

การออกแบบและสร้างขดลวดของแม่เหล็กหกขั้วที่มีพิักกระแส 20 แอมแปร์  
สำหรับเครื่องกำเนิดแสงสยาม

นายสุภชัย ประวันตา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2550

**WINDING DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A  
SEXTUPOLE MAGNET WITH CURRENT  
RATING OF 20 AMPERES FOR THE  
SIAM PHOTON SOURCE**

**Supachai Prawanta**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for  
the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2007**

การออกแบบและสร้างขดลวดของแม่เหล็กหุ้มที่มีพิกัดกระแส 20 แอมแปร์  
สำหรับเครื่องกำเนิดแสงสยาม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาโท สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล)

ประธานกรรมการ

(ศ. น.ท. ดร.สรวิชัย สุจิตจร)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.ศุภกร รักใหม่)

กรรมการ

(อ. ดร.บุญเรือง มะรังศรี)

กรรมการ

(ศ. ดร.ไพโรจน์ สัตยธรรม)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วราภรณ์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ศุภชัย ประวันตา : การออกแบบและสร้างขดลวดของแม่เหล็กหกขั้วที่มีพิกัด  
กระแส 20 แอมแปร์ สำหรับเครื่องกำเนิดแสงสยาม (WINDING DESIGN AND  
IMPLEMENTATION OF A SEXTUPOLE MAGNET WITH CURRENT RATING  
OF 20 AMPERES FOR THE SIAM PHOTON SOURCE) อาจารย์ที่ปรึกษา :  
ศาสตราจารย์ น.ท. ดร.สราวุฒิ สุจิตจร, 122 หน้า.

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของแม่เหล็กหกขั้ว  
ที่จะมีประโยชน์ต่อการแก้ไขโครมาติซิตีของเครื่องกำเนิดแสงสยาม ดำเนินงานโดยการออกแบบ  
และสร้างขดลวดของแม่เหล็กหกขั้วให้สามารถรับพิกัดกระแสป้อนแม่เหล็ก 20 แอมแปร์  
ขดลวดแม่เหล็กจะได้รับการพันลงบน โครงสร้างแม่เหล็กหกขั้วเดิม การดำเนินงานออกแบบ  
อาศัยโปรแกรมสำเร็จรูปต่าง ๆ ในการคำนวณ ได้แก่ โปรแกรม Accelerator Toolbox ใช้คำนวณ  
พิกัดกระแสป้อนแม่เหล็กของแม่เหล็กหกขั้ว โปรแกรม POISSON ใช้คำนวณสนามแม่เหล็ก  
แบบสองมิติ โปรแกรม RADIA ใช้คำนวณสนามแม่เหล็กแบบสามมิติ และโปรแกรม  
COSMOSWorks<sup>TM</sup> ใช้คำนวณอุณหภูมิของขดลวดแม่เหล็ก ทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณ  
กับผลการทดสอบคุณสมบัติของแม่เหล็กหกขั้วชุดเดิม และผลการทดสอบคุณสมบัติของแม่เหล็ก  
หกขั้วที่ใช้ขดลวดแม่เหล็กชุดใหม่ การวัดสนามแม่เหล็กได้ใช้ชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก  
เคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกนที่พัฒนาขึ้น แม่เหล็กหกขั้วที่ใช้ขดลวดแม่เหล็กชุดใหม่สามารถ  
ใช้งานได้ตามพิกัดที่ต้องการ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2550

ลายมือชื่อนักศึกษา\_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา\_\_\_\_\_

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม\_\_\_\_\_

SUPACHAI PRAWANTA : WINDING DESIGN AND  
IMPLEMENTATION OF A SEXTUPOLE MAGNET WITH CURRENT  
RATING OF 20 AMPERES FOR THE SIAM PHOTON SOURCE.  
THESIS ADVISOR : PROF. SARAWUT SUJITJORN, Ph.D., 122 PP.

SEXTUPOLE MAGNET, CHROMATICITY, SIAM PHOTON SOURCE

The objective of this thesis is to improve the properties of a sextupole magnet for the chromaticity correction of the Siam Photon Source. The approach is to design and implement new windings for the magnet to absorb 20 A – current ratings. The obtained windings are wound on the existing magnet structure. The design utilizes various software packages: Accelerator Toolbox is used for calculating the magnet excitation currents, POISSON and RADIA for 2D and 3D magnetic field calculations, and COSMOSWorks<sup>TM</sup> for coil temperature calculation. The calculated results are compared with the measured results for both the existing magnet and that with the new windings. The magnetic field measurement is carried out by the automatic three-axis magnetic field measurement system developed in-house. The new windings work very well to meet the required ratings.

School of Electrical Engineering

Academic Year 2007

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

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

Co-advisor's Signature\_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้

ศาสตราจารย์ นาวาอากาศโท ดร.สรารุณี สุจิตจร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำ ช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจ ด้วยความเมตตาปราณีต่อผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทาน แก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์ และเป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิตให้กับผู้วิจัยเสมอมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภกร รักใหม่ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ วิชาการทางด้านเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติ อรรถกิจมงคล หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ ความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

อาจารย์ ดร.บุญเรือง มะรังศรี อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ ความรู้ทางด้านวิชาการอย่างดียิ่งมาโดยตลอด

อาจารย์ ดร.นิमित ชมนาวัง อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่กรุณาให้คำแนะนำเกี่ยวกับเทคนิคการปรับเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์มอคัปเปิล

คุณพิชิต แก้วบุคตา และคุณฉัฐวุฒิ สุรเดช ผู้เขียนโปรแกรมควบคุมอัตโนมัติ คุณอภิชัย ขวัญเกษม และคุณศรายุทธ ศิริวัฒน์ไพฑูรย์ ที่ร่วมประกอบติดตั้งชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกน บุคลากรฝ่ายเทคโนโลยีเครื่องเร่งอนุภาค และบุคลากรศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ ที่ให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดียิ่งตลอดมา

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอบรมเลี้ยงดู สนับสนุน และส่งเสริมการศึกษาอย่างดียิ่งเสมอมา ขอกราบขอบพระคุณครูบาอาจารย์ทุกท่าน ที่ให้การอบรมสั่งสอน และประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ด้วยความเมตตาต่อศิษย์ และขอขอบคุณ คุณสุขุมาล และ ค.ญ.กานต์พิชชา ภรรยาและบุตรสาว ที่คอยเป็นกำลังใจให้ตลอดมา และตลอดไป

ศุภชัย ประวันตา

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 ทัศนวิสัยวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	6
<b>2 ทฤษฎีและความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>8</b>
2.1 บทนำ.....	8
2.2 เครื่องกำเนิดแสงสขาม.....	8
2.2.1 ระบบผลิตและเร่งอิเล็กตรอน.....	8
2.2.2 วงกักเก็บอิเล็กตรอน.....	12
2.3 การเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนในวงกักเก็บอิเล็กตรอน.....	14
2.3.1 การเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนในอุปกรณ์ต่าง ๆ.....	14
2.3.2 วงโคจรอุโมงค์ของลำอิเล็กตรอน.....	16
2.3.3 การแสดงพิกัดตำแหน่งของอิเล็กตรอน.....	17

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.4	โครมาติซิตีของวงกักเก็บอิเล็กตรอน.....	18
2.4	แม่เหล็กหกขั้ว.....	20
2.5	การทดสอบคุณสมบัติแม่เหล็กหกขั้วที่ใช้งานในปัจจุบัน.....	23
<b>3</b>	<b>การออกแบบขดลวดแม่เหล็กหกขั้วใหม่.....</b>	<b>27</b>
3.1	บทนำ.....	27
3.2	การคำนวณพิกัดกระแสขดลวดแม่เหล็กหกขั้ว.....	27
3.2.1	โปรแกรม Accelerator Toolbox.....	28
3.2.2	การคำนวณค่าโครมาติซิตีของวงกักเก็บอิเล็กตรอน.....	30
3.3	การคำนวณสนามแม่เหล็ก.....	31
3.3.1	การคำนวณสนามแม่เหล็กโดยโปรแกรม POISSON.....	32
3.3.2	การคำนวณสนามแม่เหล็กโดยโปรแกรม RADIA.....	35
3.4	การคำนวณอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กโดยโปรแกรม COSMOSWorks.....	39
3.5	สรุป.....	42
<b>4</b>	<b>การสร้างขดลวดแม่เหล็กหกขั้วและการเปรียบเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ.....</b>	<b>45</b>
4.1	บทนำ.....	45
4.2	การพัฒนาชุดพันขดลวดแม่เหล็กหกขั้ว.....	45
4.3	การพันขดลวดแม่เหล็กและการติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ.....	47
4.4	การทำฉนวนไฟฟ้าและการวัดค่าความต้านทาน.....	49
4.5	การเปรียบเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์มอคัปเปิล.....	51
<b>5</b>	<b>การออกแบบและสร้างชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกน.....</b>	<b>55</b>
5.1	บทนำ.....	55
5.2	การออกแบบและสร้างส่วนประกอบ.....	55
5.3	การออกแบบและสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติ.....	58
5.4	การประกอบติดตั้ง.....	60
5.5	การทดสอบชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกน.....	60
5.6	สรุป.....	63



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

<b>6</b>	<b>การทดสอบคุณสมบัติของแม่เหล็กหกขั้วที่ใช้ขดลวดแม่เหล็กใหม่</b> .....	<b>64</b>
6.1	บทนำ.....	64
6.2	การติดตั้งขดลวดแม่เหล็กและการปรับแนวสำหรับวัดสนามแม่เหล็ก.....	64
6.3	การวัดสนามแม่เหล็ก.....	67
6.4	การวัดอนุหภูมิขดลวดแม่เหล็ก.....	73
6.5	สรุป.....	79
<b>7</b>	<b>บทสรุปและข้อเสนอแนะ</b> .....	<b>81</b>
7.1	สรุป.....	81
7.2	ข้อเสนอแนะ.....	82
	รายการอ้างอิง.....	84
	ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.	โปรแกรม Accelerator Toolbox สำหรับสร้างแบบจำลองวงกักเก็บ อิเล็กตรอนระดับพลังงาน 1.2 GeV ของเครื่องกำเนิดแสงสยาม.....	86
ภาคผนวก ข.	โปรแกรม POISSON สำหรับคำนวณสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ ของแม่เหล็กหกขั้ว.....	90
ภาคผนวก ค.	โปรแกรม RADIA สำหรับคำนวณค่าสนามแม่เหล็กแบบสามมิติ ของแม่เหล็กหกขั้ว.....	104
ภาคผนวก ง.	อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการติดตั้งชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก เคลื่อนที่อัตโนมัติสามแกน.....	113
ภาคผนวก จ.	บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา.....	120
	ประวัติผู้เขียน.....	122

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	คุณสมบัติของแม่เหล็กหกซ์ที่ใช้งานในปัจจุบัน.....22
2.2	ความแรงสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กหกซ์ที่ใช้งานในปัจจุบันที่ได้จากการวัด.....24
3.1	โครมาติซิตีของวงกักเก็บอิเล็กตรอนที่กระแสนแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการ คำนวณด้วยโปรแกรม Accelerator Toolbox.....30
3.2	โครมาติซิตีของวงกักเก็บอิเล็กตรอนที่กระแสนแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการวัด.....31
3.3	ความแรงสนามแม่เหล็กที่กระแสนแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณ ด้วยโปรแกรม POISSON.....35
3.4	ความแรงสนามแม่เหล็กที่กระแสนแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณ ด้วยโปรแกรม RADIA.....37
3.5	ความยาวสนามแม่เหล็กที่กระแสนแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณ ด้วยโปรแกรม RADIA.....38
3.6	คุณสมบัติของแม่เหล็กหกซ์ที่ออกแบบขดลวดแม่เหล็กใหม่ที่ได้จากการคำนวณ.....43
4.1	ค่าความต้านทานของขดลวดแม่เหล็กหกซ์ที่ออกแบบใหม่ที่ได้จากการวัด.....51
4.2	ผลการเปรียบเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์มอคัปเปิล.....53
6.1	ความแรงสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กหกซ์ที่ใช้ขดลวดแม่เหล็กชุดใหม่.....69
6.2	ความยาวสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กหกซ์ที่ใช้ขดลวดแม่เหล็กชุดใหม่.....72
7.1	คุณสมบัติของแม่เหล็กหกซ์ที่ใช้ขดลวดแม่เหล็กชุดใหม่ที่ได้จากการวัด.....83

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	แผนภาพเครื่องกำเนิดแสงสยาม..... 2
2.1	เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง..... 9
2.2	ระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานต่ำ..... 10
2.3	เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม..... 11
2.4	ระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานสูง..... 11
2.5	แผนภาพโครงสร้างชุดแม่เหล็กแบบ DBA..... 12
2.6	วงกักเก็บอิเล็กตรอน..... 13
2.7	แผนภาพแรงลอเรนทซ์กระทำต่ออิเล็กตรอนในแม่เหล็กเลี้ยวโค้ง..... 15
2.8	แผนภาพแรงลอเรนทซ์กระทำต่ออิเล็กตรอนในแม่เหล็กสี่ขั้ว..... 16
2.9	แผนภาพแรงลอเรนทซ์กระทำต่ออิเล็กตรอนในแม่เหล็กหกขั้ว..... 16
2.10	รูปวงรี phase ellipse..... 18
2.11	แผนภาพเชิงเปรียบเทียบการแก้ไขการเลื่อนของเลนส์..... 20
2.12	แผนภาพแม่เหล็กหกขั้วฟังก์ชัน SF..... 21
2.13	แผนภาพแม่เหล็กหกขั้วฟังก์ชัน SD..... 22
2.14	การวัดสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กหกขั้วที่ใช้งานในปัจจุบัน..... 23
2.15	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับระยะทางแกน Z ที่ $Y=0$ และค่ากระแสป้อนแม่เหล็ก 12 แอมแปร์ (แม่เหล็กหกขั้ว SF)..... 24
2.16	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับระยะทางแกน Z ที่ $Y=0$ และค่ากระแสป้อนแม่เหล็ก 12 แอมแปร์ (แม่เหล็กหกขั้ว SD)..... 25
2.17	ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวขดลวดแม่เหล็กกับระยะเวลาจ่าย กระแสป้อนแม่เหล็ก ที่กระแสป้อนแม่เหล็ก 16 แอมแปร์..... 25
3.1	การเรียกใช้งานโปรแกรม Accelerator Toolbox..... 29
3.2	แบบจำลองวงกักเก็บอิเล็กตรอนโดยโปรแกรม Accelerator Toolbox..... 29
3.3	ความสัมพันธ์ระหว่างโครมาติซิตีกับกระแสป้อนแม่เหล็ก..... 31
3.4	แผนภาพขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม POISSON..... 33

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 การไหลของเส้นฟลักซ์แม่เหล็กภายในโครงสร้างแม่เหล็กหกขั้ว โดยโปรแกรม POISSON .....	34
3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับระยะทางแกน X ที่ $Y=0$ และกระแสป้อนแม่เหล็ก 4-24 แอมแปร์ .....	34
3.7 แบบจำลองแม่เหล็กหกขั้วโดยโปรแกรม RADIA .....	36
3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับระยะทางแกน Z ที่ $Y=0$ และค่ากระแสป้อนแม่เหล็ก 20 แอมแปร์ .....	37
3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความแรงสนามแม่เหล็กกับกระแสป้อนแม่เหล็ก ที่ได้จากการคำนวณและการวัด .....	39
3.10 แบบจำลองขดลวดแม่เหล็กหกขั้วโดยโปรแกรม SolidWorks .....	40
3.11 การกระจายอุณหภูมิภายในขดลวดแม่เหล็กหกขั้ว ที่ค่าพิกัดกระแส ป้อนแม่เหล็ก 20 แอมแปร์ โดยโปรแกรม COSMOSWorks .....	41
3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิชั้นในสุดของขดลวดแม่เหล็กกับระยะเวลาจ่าย กระแสป้อนแม่เหล็ก ที่ค่ากระแสป้อนแม่เหล็ก 16-24 แอมแปร์ .....	42
3.13 แผนภาพแม่เหล็กหกขั้วที่ออกแบบขดลวดแม่เหล็กใหม่ .....	43
4.1 แกนสำหรับพันขดลวดแม่เหล็กหกขั้ว .....	46
4.2 ชุดพันขดลวดแม่เหล็กหกขั้ว .....	46
4.3 ลักษณะการพันขดลวดแม่เหล็กและจุดติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ .....	47
4.4 การพันขดลวดแม่เหล็กและมีการติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ .....	48
4.5 การจัดรูปทรงขดลวดแม่เหล็กก่อนนำไปทำฉนวนไฟฟ้า .....	48
4.6 ขดลวดแม่เหล็กหกขั้วหลังการชุบวานิชครั้งแรก .....	49
4.7 ขดลวดแม่เหล็กหกขั้วหลังทำฉนวนไฟฟ้า .....	50
4.8 การวัดความต้านทานของขดลวดแม่เหล็กหกขั้ว .....	50
4.9 ชุดเปรียบเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์มอคัปเปิล .....	52
4.10 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการปรับการเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ .....	52
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเซนเซอร์วัดอุณหภูมิกับเครื่องมือวัดอุณหภูมิอ้างอิง การเปรียบเทียบครั้งที่ 1 .....	54

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเซนเซอร์วัดอุณหภูมิกับเครื่องมือวัดอุณหภูมิอ้างอิง การเปรียบเทียบครั้งที่ 1, 2 และ 3.....	54
5.1 แผนภาพชุดการเคลื่อนที่แกน X.....	56
5.2 แผนภาพชุดการเคลื่อนที่แกน Y.....	57
5.3 แผนภาพชุดการเคลื่อนที่แกน Z.....	57
5.4 แผนภาพชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกน.....	58
5.5 หน้าจอระบบควบคุมอัตโนมัติโดยโปรแกรม LabVIEW.....	59
5.6 ชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกน.....	61
5.7 ความคลาดเคลื่อนของการเคลื่อนที่ทั้งสามแกน.....	62
6.1 การถอดและประกอบขดลวดแม่เหล็กหกขั้ว.....	65
6.2 แม่เหล็กหกขั้วที่ได้รับการออกแบบขดลวดแม่เหล็กใหม่.....	66
6.3 การติดตั้งแม่เหล็กหกขั้วสำหรับวัดสนามแม่เหล็ก.....	67
6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับระยะทางแกน X ที่ $Y=0$ และ $Z=0$ ที่ค่ากระแสป้อนแม่เหล็ก 4-24 แอมแปร์.....	68
6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความแรงสนามแม่เหล็กกับกระแสป้อนแม่เหล็กที่ได้จากการวัด.....	69
6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความแรงสนามแม่เหล็กกับกระแสป้อนแม่เหล็ก ที่ได้จากการวัด และการคำนวณ โดยโปรแกรม POISSON.....	70
6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความแรงสนามแม่เหล็กกับกระแสป้อนแม่เหล็ก ที่ได้จากการวัด และการคำนวณ โดยโปรแกรม RADIA.....	71
6.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับระยะทางแกน Z ที่ $Y=0$ และค่ากระแสป้อนแม่เหล็ก 20 แอมแปร์.....	72
6.9 การวัดสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กหกขั้วที่ใช้ขดลวดแม่เหล็กชุดใหม่.....	73
6.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กกับระยะเวลาจ่ายกระแสป้อนแม่เหล็ก ที่ค่ากระแสป้อนแม่เหล็ก 16 แอมแปร์.....	75
6.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กกับระยะเวลาจ่ายกระแสป้อนแม่เหล็ก ที่ค่ากระแสป้อนแม่เหล็ก 18 แอมแปร์.....	75

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กกับระยะเวลาจ่ายกระแสป้อนแม่เหล็ก ที่ค่ากระแสป้อนแม่เหล็ก 20 แอมแปร์.....	76
6.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กกับระยะเวลาจ่ายกระแสป้อนแม่เหล็ก ที่ค่ากระแสป้อนแม่เหล็ก 22 แอมแปร์.....	76
6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กกับระยะเวลาจ่ายกระแสป้อนแม่เหล็ก ที่ค่ากระแสป้อนแม่เหล็ก 24 แอมแปร์.....	77
6.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิชั้นในสุดของขดลวดแม่เหล็กกับระยะเวลาจ่าย กระแสป้อนแม่เหล็ก ที่ค่ากระแส 16-24 แอมแปร์.....	78
6.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิชั้นในสุดของขดลวดแม่เหล็กกับกระแสป้อนแม่เหล็ก ที่ค่า 16-24 แอมแปร์.....	78
6.17 การติดตั้งแม่เหล็กหกขั้วที่ใช้ขดลวดแม่เหล็กชุดใหม่.....	79
ข.1 ส่วนประกอบย่อยต่าง ๆ ของโครงสร้างแม่เหล็กหกขั้วสำหรับการคำนวณ โดยโปรแกรม POISSON.....	103
ค.1 ส่วนประกอบย่อยต่าง ๆ ของโครงสร้างแม่เหล็กหกขั้วสำหรับการคำนวณ โดยโปรแกรม RADIA.....	112
ง.1 แสดงรายละเอียดของเซนเซอร์วัดระยะทางแบบเชิงเส้น.....	114
ง.2 แสดงรายละเอียดของมอเตอร์แบบขั้น.....	115
ง.3 แสดงรายละเอียดของชุดควบคุมมอเตอร์แบบขั้น.....	116
ง.4 แสดงรายละเอียดของแกนหมุนแบบบอลล์สกรู.....	117
ง.5 แสดงรายละเอียดของชุดต่อประกอบ.....	118
ง.6 แสดงรายละเอียดของรางนำแนวตรง.....	119

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$\alpha, \beta, \gamma$	=	ฟังก์ชันของเบทาตรอน
A	=	แอมแปร์
A	=	พื้นที่หน้าตัดของเส้นลวด
B	=	สนามแม่เหล็ก
$B_{center}$	=	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ที่ตำแหน่ง $z=0$
BM	=	แม่เหล็กเลี้ยวโค้ง
$B_x$	=	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กแนวแกน x
$B_y$	=	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กแนวแกน y
°C	=	องศาเซลเซียส
DBA	=	โครงสร้างชุดแม่เหล็กแบบดับเบิลเบนดอะโครเมต
e	=	ประจุของอิเล็กตรอน
$\epsilon$	=	อิมิตแดนซ์
$\xi_{x0,y0}$	=	โครมาติซิตีธรรมชาติ
$\xi_{x,y}$	=	โครมาติซิตีของวงกักเก็บอิเล็กตรอน
EIW	=	polyester-imide enameled copper wire
F	=	แรงลอเรนทซ์
$g'$	=	ความแรงสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กหักขั้ว
GeV	=	จิกะอิเล็กตรอน โวลต์
Hr	=	ชั่วโมง
I	=	กระแสป้อนแม่เหล็ก
k	=	ความแรงของแม่เหล็กหักขั้ว
kV	=	กิโลโวลต์
L	=	ความยาวของเส้นลวด
$L_{eff}$	=	ความยาวสนามแม่เหล็ก
m	=	ความแรงของแม่เหล็กหักขั้ว
M	=	เครื่องมือวัดอุณหภูมิอ้างอิง
MeV	=	เมกกะอิเล็กตรอน โวลต์

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

MHz	=	เมกกะเฮิรตซ์
N	=	ขั้วแม่เหล็กขั้วเหนือ
$\eta$	=	ฟังก์ชันดิสเพอร์ชัน
$P$	=	กำลังความร้อน
$\Delta p$	=	การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอิเล็กตรอน
$p_0$	=	โมเมนตัมหลักของอิเล็กตรอน
PEW	=	polyester enameled copper wire
$\pi\varepsilon$	=	พื้นที่ของรูปวงรี phase ellipse
QF	=	แม่เหล็กสี่ขั้วฟังก์ชัน โฟกัส
QF1	=	แม่เหล็กสี่ขั้วฟังก์ชัน โฟกัสชุดที่หนึ่ง
QF3	=	แม่เหล็กสี่ขั้วฟังก์ชัน โฟกัสชุดที่สาม
QD	=	แม่เหล็กสี่ขั้วฟังก์ชันคลายโฟกัส
QD2	=	แม่เหล็กสี่ขั้วฟังก์ชันคลายโฟกัสชุดที่สอง
QD4	=	แม่เหล็กสี่ขั้วฟังก์ชันคลายโฟกัสชุดที่สี่
$R$	=	ความต้านทานของเส้นลวด
$\Omega$	=	โอห์ม
$\rho$	=	ความต้านทานจำเพาะ
R20	=	ความต้านทานที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส
R75	=	ความต้านทานที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส
RF	=	คลื่นความถี่วิทยุ
S	=	ขั้วแม่เหล็กขั้วใต้
s	=	ตำแหน่งตามแนวโคจรอุดมคติ
SD	=	แม่เหล็กหกขั้วฟังก์ชันคลายโฟกัส
SF	=	แม่เหล็กหกขั้วฟังก์ชัน โฟกัส
S10C	=	เหล็กคาร์บอน S10C
T	=	เทสลา
T1	=	เซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์มอคัปเปิล ชุดที่ 1
T2	=	เซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์มอคัปเปิล ชุดที่ 2



### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

T3	=	เซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์มอคับเบิล ชุดที่ 3
T4	=	เซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์มอคับเบิล ชุดที่ 4
$V_{x,y}$	=	เบทาตรอนจูน แกน x และแกน y
$\Delta V_{x,y}$	=	การเปลี่ยนแปลงของเบทาตรอนจูน แกน x และแกน y
V	=	โวลท์
v	=	ความเร็วของอิเล็กตรอน
x	=	พิกัดแกน x
x	=	ระยะทางแกน x
$(x, x')$	=	ระบบพิกัด phase space
$(x,y,s)$	=	ระบบแกนอ้างอิงของอิเล็กตรอน
$x'$	=	มุมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ทำกับวงโคจรอุดมคติ
y	=	พิกัดแกน y

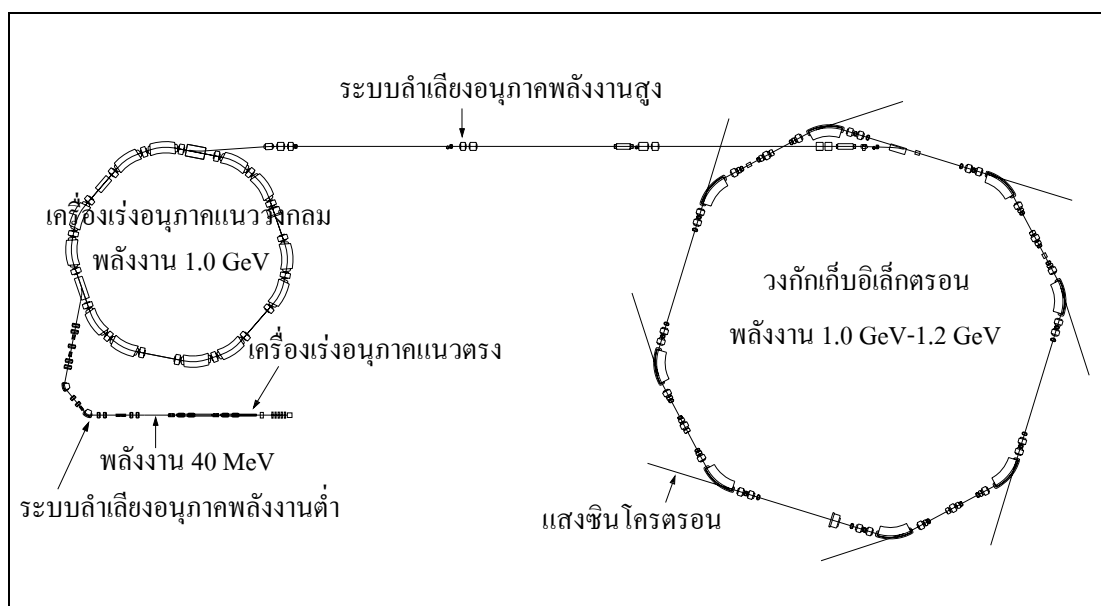
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เครื่องกำเนิดแสงสยาม (Siam Photon Source) เป็นเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนระดับพลังงาน 1 GeV เครื่องเดียวในประเทศไทย โดยอยู่ภายใต้การกำกับดูแลของศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ (ศซ.) สังกัดกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มีสถานที่ตั้งอยู่ในบริเวณเทคโนโลยีของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เครื่องกำเนิดแสงสยามซึ่งได้ดัดแปลงมาจากเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนที่ได้รับบริจาคจากกลุ่มบริษัทซอร์เทค (SORTEC Corporation) ประเทศญี่ปุ่น ให้สามารถบริการแสงซินโครตรอนความจำสูงสำหรับงานวิจัยด้านต่าง ๆ ทั้งทางวิทยาศาสตร์พื้นฐานและวิทยาศาสตร์ประยุกต์ โดยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนเดิมที่ได้รับบริจาคมานั้นเป็นเครื่องรุ่นเก่า ถูกออกแบบมาเฉพาะสำหรับการประยุกต์ใช้งานทางด้านลิโธกราฟี (lithography) โดยให้แสงซินโครตรอนที่มีความจำต่ำ และมีช่วงพลังงานแสงเพียงระดับรังสีเอ็กซ์พลังงานต่ำ (soft x-rays) ทำให้มีขีดจำกัดในการประยุกต์ใช้สำหรับงานวิจัยด้านอื่น ๆ การก่อสร้างเครื่องกำเนิดแสงสยามได้ทำการดัดแปลงและออกแบบส่วนประกอบบางส่วนใหม่ ดังต่อไปนี้ ขยายขนาดของวงกักเก็บอิเล็กตรอนเพื่อเพิ่มส่วนทางตรงสำหรับติดตั้งอุปกรณ์แทรก (insertion device) ทั้งประเภทอันดูลเลเตอร์ (undulator) สำหรับเพิ่มความจำของแสงซินโครตรอน และประเภทวิกเกอร์ (wiggler) สำหรับขยายช่วงพลังงานของแสงซินโครตรอนขึ้นไปถึงระดับรังสีเอ็กซ์พลังงานสูง (hard x-rays) โดยวงกักเก็บอิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดแสงสยามมีส่วนทางตรงสำหรับติดตั้งอุปกรณ์แทรกได้ 4 ชุด เปลี่ยนโครงสร้างชุดแม่เหล็กของวงกักเก็บอิเล็กตรอนมาเป็นแบบดับเบิลเบนดอะโครแมต (double bend achromat, DBA) เพื่อลดขนาดอิมิตแตนซ์ (emittance) สำหรับการผลิตแสงซินโครตรอนความจำสูง สร้างท่อสุญญากาศของวงกักเก็บอิเล็กตรอนใหม่ สร้างระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานสูงสำหรับลำเลียงอิเล็กตรอนจากเครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลมเข้าสู่วงกักเก็บอิเล็กตรอนใหม่ ออกแบบและจัดสร้างอุปกรณ์แทรกเพื่อผลิตแสงซินโครตรอนสำหรับงานวิจัยด้านต่าง ๆ เปลี่ยนระบบควบคุมให้เป็นระบบคอมพิวเตอร์ที่ทันสมัย ซึ่งแผนภาพเครื่องกำเนิดแสงสยาม แสดงได้ดังรูปที่ 1.1 ประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือระบบผลิตและเร่งอิเล็กตรอน (injection system) และวงกักเก็บอิเล็กตรอน (storage ring) โดยระบบผลิตและเร่งอิเล็กตรอนประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ต่อไปนี้ เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง (linear accelerator) เป็นส่วนที่ผลิตและเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานเพิ่มขึ้นเป็น 40 MeV แล้วส่งผ่านระบบ

ลำเลียงอนุภาคพลังงานต่ำ (low energy beam transport system) เข้าสู่เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม (booster synchrotron) กลุ่มอิเล็กตรอนพลังงาน 40 MeV จะถูกเร่งอีกครั้งให้มีพลังงานเพิ่มขึ้นเป็น 1 GeV แล้วส่งผ่านระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานสูง (high energy beam transport system) เข้าสู่วงกักเก็บอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนที่วิ่งวนในวงจะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเราเรียกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้างี้ว่าแสงซินโครตรอน (synchrotron radiation)



รูปที่ 1.1 แผนภาพเครื่องกำเนิดแสงสยาม

ในปัจจุบันเครื่องกำเนิดแสงสยามได้ดำเนินการปรับปรุงวงกักเก็บอิเล็กตรอนให้สามารถเพิ่มพลังงานของอิเล็กตรอนจากระดับพลังงาน 1 GeV เป็นระดับพลังงาน 1.2 GeV เพื่อเพิ่มศักยภาพในการผลิตแสงซินโครตรอนในย่านรังสีเอ็กซ์ (Rugmai et al., 2007) การบังคับลำอิเล็กตรอนอาศัยสนามแม่เหล็กที่ได้จากแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ ที่ติดตั้งไว้ภายในวง ซึ่งการกักเก็บอิเล็กตรอนระดับพลังงานสูงขึ้น ค่าสนามแม่เหล็กที่บังคับลำอิเล็กตรอนต้องเพิ่มค่าสูงขึ้นด้วย แม่เหล็กหกขั้ว (sextupole magnet) ทำหน้าที่แก้ไขค่าโครมาติซิตี (chromaticity) ของวงกักเก็บอิเล็กตรอนเพื่อป้องกันการกักเก็บอิเล็กตรอนเกิดความเสถียร ได้รับการจ่ายกระแสป้อนแม่เหล็กสูงถึง 150 เปอร์เซ็นต์ของค่าพิกัดกระแสป้อนแม่เหล็ก ทำให้อุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กมีค่าสูงเกินไป ซึ่งก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อความเสียหายที่จะเกิดกับขดลวดแม่เหล็กขณะใช้งาน งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ดำเนินการปรับปรุงคุณสมบัติของแม่เหล็กหกขั้วใหม่ให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งาน โดยออกแบบและ

สร้างขดลวดแม่เหล็กใหม่ให้สามารถรับพิกัดกระแสป้อนแม่เหล็กได้ถึง 20 แอมแปร์ ขณะที่อุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กต้องไม่สูงเกินค่าพิกัด 60 องศาเซลเซียส การออกแบบได้อาศัยโปรแกรมสำเร็จรูปในการคำนวณ ได้แก่ โปรแกรม Accelerator Toolbox ใช้คำนวณพิกัดกระแสป้อนแม่เหล็กของแม่เหล็กหกขั้วที่มีความเหมาะสมต่อการแก้ไขโครมาติซิตีของวงกักเก็บอิเล็กตรอน (Terebilo, 2001) โปรแกรม POISSON ใช้คำนวณสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ (James, Billen and Young, 2004) โปรแกรม RADIA ใช้คำนวณสนามแม่เหล็กแบบสามมิติ (Chubar, Elleaume and Chavanne, 2006) ซึ่งการคำนวณสนามแม่เหล็กโดยโปรแกรมทั้งสองจะให้พารามิเตอร์ของการออกแบบขดลวดแม่เหล็กใหม่ โปรแกรม COSMOSWorks™ (COSMOSWorks, 2006) ใช้คำนวณอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กที่ออกแบบใหม่ ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณจะนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบคุณสมบัติของแม่เหล็กหกขั้วที่ใช้ขดลวดแม่เหล็กชุดใหม่ งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ยังนำเสนอการพัฒนาชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกน เพื่อใช้วัดสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กหกขั้วและใช้งานกับเครื่องกำเนิดแสงสยาม แม่เหล็กหกขั้วที่ได้รับการออกแบบขดลวดใหม่จะนำไปติดตั้งใช้งานในวงกักเก็บอิเล็กตรอนร่วมกับแม่เหล็กหกขั้วตัวอื่นที่ทำงานในฟังก์ชันเดียวกัน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของแม่เหล็กหกขั้วให้สามารถรับพิกัดกระแสป้อนแม่เหล็กได้ 20 แอมแปร์ เพื่อใช้ประโยชน์สำหรับการแก้ไขโครมาติซิตีของวงกักเก็บอิเล็กตรอนระดับพลังงาน 1.2 GeV ของเครื่องกำเนิดแสงสยาม
2. เพื่อพัฒนาแม่เหล็กหกขั้วจากการออกแบบและสร้างขดลวดแม่เหล็กใหม่ เพื่อใช้ประโยชน์สำหรับเครื่องกำเนิดแสงสยาม
3. เพื่อพัฒนาชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกน เพื่อใช้ประโยชน์สำหรับเครื่องกำเนิดแสงสยาม

## 1.3 ข้อสมมติทางวิศวกรรม

1. การออกแบบและสร้างขดลวดแม่เหล็กใหม่ จะก่อให้เกิดความแรงสนามแม่เหล็กที่มีความเหมาะสมต่อการใช้งานสำหรับเครื่องกำเนิดแสงสยามได้
2. การออกแบบและสร้างขดลวดแม่เหล็กใหม่ จะส่งผลทำให้อุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กขณะใช้งานมีค่าไม่สูงเกินค่าพิกัด

#### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. การวิเคราะห์และการแก้ไขโครมาติซิตีของเครื่องกำเนิดแสงสยาม จะมุ่งเน้นที่การออกแบบและสร้างขดลวดแม่เหล็กใหม่ โดยใช้โครงสร้างแม่เหล็กหกขั้วชุดเดิม เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของแม่เหล็กหกขั้วให้เหมาะสมต่อการใช้งาน แนวคิดของการใช้แม่เหล็กหกขั้วที่ออกแบบขดลวดแม่เหล็กใหม่ จะได้รับการทดสอบด้วยการติดตั้งใช้งานจริงในวงกักเก็บอิเล็กตรอน
2. การสร้างชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกน เพื่อใช้ประโยชน์ในการวัดสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กหกขั้ว และสำหรับใช้งานกับเครื่องกำเนิดแสงสยาม

#### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้แม่เหล็กหกขั้วที่สามารถรับพิกัดกระแสนแม่เหล็กได้ 20 แอมแปร์ เพื่อใช้ประโยชน์สำหรับการแก้ไขโครมาติซิตีของวงกักเก็บอิเล็กตรอนระดับพลังงาน 1.2 GeV ของเครื่องกำเนิดแสงสยาม
2. ได้ชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกน เพื่อใช้ประโยชน์ในการวัดสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดแสงสยาม
3. เกิดพัฒนาการทางเทคโนโลยีการสร้างแม่เหล็กหกขั้ว เพื่อใช้ประโยชน์สำหรับการพัฒนาแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดแสงสยาม

#### 1.6 ทัศนวิสัยวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี ค.ศ. 1952 E.D. Courant, H.S. Snyder และ M.S. Livingston ได้นำแม่เหล็กที่ให้การโฟกัสอย่างเข้ม (strong-focusing หรือ alternating-gradient) มาใช้เป็นครั้งแรกในการบังคับลำอนุภาคโปรตอนของเครื่องเร่งอนุภาคซินโครตรอน ที่มีชื่อเรียกว่า Cosmotron ระดับพลังงาน 3 GeV ที่ Brookhaven National Laboratory (BNL) ประเทศสหรัฐอเมริกา (Lee, 2004) ในปี ค.ศ. 1954 R. Wilson ได้นำแม่เหล็กที่ให้การโฟกัสอย่างเข้มมาใช้เป็นครั้งแรกในการบังคับลำอนุภาคอิเล็กตรอนของเครื่องเร่งอนุภาคซินโครตรอนระดับพลังงาน 1.2 GeV ที่ Cornell University ประเทศสหรัฐอเมริกา (Lee, 2004) ในปี ค.ศ. 1960 B. Touschek et al. ได้สร้างวงกักเก็บอิเล็กตรอนเครื่องแรกมีระดับพลังงาน 200 MeV ที่ Rome ประเทศอิตาลี (Lee, 2004) เมื่อการใช้งานแม่เหล็กที่ให้การโฟกัสอย่างเข้มมีขีดจำกัดเกี่ยวกับสนามแม่เหล็ก ในปี ค.ศ. 1967 Fermi National Accelerator Laboratory ได้แยกแม่เหล็กสองขั้วและแม่เหล็กสี่ขั้วออกจากกัน เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กที่สูงขึ้นสำหรับการใช้งานในวง Fermilab Main Ring ประเทศสหรัฐอเมริกา (Lee, 2004) ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1961 เป็นต้นมา เริ่มมีการศึกษาเกี่ยวกับความไม่เสถียรของการกักเก็บลำอนุภาค (beam instability) เริ่มที่

Laboratoire de l' Accelérateur Lineaire (LAL) ประเทศฝรั่งเศส (Lee, 2004)

เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องโดยสามารถแบ่งการพัฒนาเป็นรุ่นได้ดังต่อไปนี้ *รุ่นแรก* เป็นการพัฒนาแหล่งกำเนิดแสงและศึกษาจากการชนกันของอนุภาคโพสิตรอนและอนุภาคอิเล็กตรอน *รุ่นที่สอง* เป็นการพัฒนาแหล่งกำเนิดแสงเพื่อลดระดับอิมิตแตนซ์ (low-emittance) *รุ่นที่สาม* เป็นการพัฒนาแหล่งกำเนิดแสงเพื่อให้ได้ลำแสงที่มีความจ้าสูง (high brilliance) โดยใช้อุปกรณ์แทรก (insertion devices) *รุ่นที่สี่* เป็นการพัฒนาแหล่งกำเนิดลำแสงเลเซอร์แบบอิเล็กตรอนอิสระ (free electron laser) ที่ได้จากแม่เหล็กอันดูลเตอร์

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณสมบัติของแม่เหล็กหกขั้ว ที่ National Synchrotron Light Source (NSLS) ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ทำการปรับปรุงเพิ่มพลังงานของ X-Ray Ring จากระดับพลังงาน 2.584 GeV เป็น 2.8 GeV ทำให้แม่เหล็กหกขั้วที่ทำหน้าที่คลายโฟกัส (defocusing sextupole magnet) ต้องทำงานที่ค่าพิกัดคูนทงูมิเมื่อกระแสป้อนแม่เหล็กเป็น 800 แอมแปร์ และที่กระแสป้อนแม่เหล็กค่าดังกล่าวเกิดการอิมิตัวของแกนแม่เหล็ก ซึ่งได้มีการแก้ปัญหาโดยใช้แม่เหล็กถาวรแทรกระหว่างขั้วของแม่เหล็ก ส่งผลให้ความแรงสนามแม่เหล็กเพิ่มขึ้นประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ (Rakowsky, 2001) ที่ National Institute of Standards and Technology (NIST) ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้ทำการปรับปรุงวงกักเก็บอิเล็กตรอน SURFII ซึ่งใช้งานมานานถึง 30 ปี จากระดับพลังงาน 300 MeV เป็น 400 MeV ซึ่งได้มีการแก้ปัญหาโดยสร้างแกนแม่เหล็กใหม่ และขดลวดแม่เหล็กใหม่ (National Institute of Standards and Tecnology, 1998) การเพิ่มค่าความแรงสนามแม่เหล็กด้วยการออกแบบขดลวดแม่เหล็กใหม่ มีแนวทางดำเนินการดังนี้ *วิธีการที่หนึ่ง* เพิ่มค่ากระแสป้อนแม่เหล็กให้มากขึ้น โดยใช้จำนวนรอบการพันขดลวดแม่เหล็กเท่าเดิม ซึ่งวิธีการดังกล่าวจะทำให้ขดลวดแม่เหล็กมีค่าคูนทงูมิสูง *วิธีการที่สอง* เพิ่มจำนวนรอบการพันขดลวดแม่เหล็กให้มากขึ้น โดยใช้กระแสป้อนแม่เหล็กเท่าเดิม ซึ่งวิธีการนี้อาจมีความไม่เหมาะสมกับโครงสร้างเดิมของแม่เหล็ก *วิธีการที่สาม* เพิ่มค่ากระแสป้อนแม่เหล็กและจำนวนรอบการพันขดลวดแม่เหล็กให้มากขึ้น ซึ่งวิธีการนี้อาจมีความเหมาะสมเนื่องจากจำนวนรอบการพันขดลวดแม่เหล็กไม่มากเกินไป (Tanabe, 2005) การเลือกวิธีการปรับปรุงคุณสมบัติของแม่เหล็กยังมีตัวแปรอื่นที่เกี่ยวข้องอีก คือ แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า และต้นทุนค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ การปรับปรุงคุณสมบัติของแม่เหล็กหกขั้วของวงกักเก็บอิเล็กตรอนระดับพลังงาน 1.2 GeV ของเครื่องกำเนิดแสงสยาม ผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธีการออกแบบและสร้างขดลวดแม่เหล็กใหม่ เพื่อให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งาน

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบโดยโปรแกรมสำเร็จรูป ซึ่งมีผลงานวิจัยที่น่าเสนอไว้มากมาย โดยได้ยกตัวอย่างผลงานวิจัยมานำเสนอดังต่อไปนี้ โปรแกรม Accelerator Toolbox ใช้คำนวณพารามิเตอร์ของลำอิเล็กตรอน เพื่อแก้ไขการบิดเบี้ยวในวงโคจรปิด (closed orbit distortion)

ของวงกักเก็บอิเล็กตรอนที่ SIAM PHOTON SOURCE ประเทศไทย (Rugmai, Kwankasem, Sudmuang and Klysubun, 2007) โปรแกรม POISSON ใช้ออกแบบแม่เหล็กหกขั้วของวงกักเก็บอิเล็กตรอน SUPER SOR ประเทศญี่ปุ่น (Koseki, et al., 2002) ใช้ออกแบบแม่เหล็กหกขั้วของวงกักเก็บอิเล็กตรอนที่ AUSTRALIAN SYNCHROTRON ประเทศออสเตรเลีย (Huttel, Tanabe, Jackson, Barg and LeBlanc, 2004) และใช้ออกแบบแม่เหล็กหกขั้วของวงกักเก็บอิเล็กตรอนที่ CANDLE ประเทศอาร์มีเนีย (Khachatryan and Petrosyan, 2005) โปรแกรม RADIA ใช้คำนวณหาจุดสิ้นสุดของสนามแม่เหล็กอันดูลเตอร์ LINEAR/HELICAL ที่ ESRF ประเทศฝรั่งเศส (Chavanne, Elleaume, and Van Vaerenbergh, 1999) ใช้คำนวณหาจุดสิ้นสุดของสนามแม่เหล็กหกขั้วของวงกักเก็บอิเล็กตรอน MAX II ประเทศสวีเดน (Andersson, Lindgren and Chubar, 1998) และใช้คำนวณหาจุดสิ้นสุดของสนามแม่เหล็กหกขั้วของวงกักเก็บอิเล็กตรอนที่ CANDLE ประเทศอาร์มีเนีย (Khachatryan and Petrosyan, 2005) โปรแกรม COSMOSWorks ใช้สำหรับวิเคราะห์ความร้อน (COSMOSWorks, 2006)

## 1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 7 บท และ 4 ภาคผนวก บทที่ 1 เป็นบทนำกล่าวถึงความสำคัญและที่มาของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อสมมติทางวิศวกรรม ขอบเขตของการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ รวมทั้งปฏิทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ส่วนบทอื่น ๆ มีเนื้อหาโดยสรุป ดังต่อไปนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีและความรู้พื้นฐานของเครื่องกำเนิดแสงสยาม หลักการทำงานของแม่เหล็กหกขั้ว และการทดสอบคุณสมบัติของแม่เหล็กหกขั้วที่ใช้งานในปัจจุบัน

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบขดลวดแม่เหล็กหกขั้วใหม่ โดยอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูปในการคำนวณ ได้แก่ โปรแกรม Accelerator Toolbox ใช้คำนวณพิกัดกระแสป้อนแม่เหล็กหกขั้ว โปรแกรม POISSON ใช้คำนวณสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ โปรแกรม RADIA ใช้คำนวณสนามแม่เหล็กแบบสามมิติ และโปรแกรม COSMOSWorks ใช้คำนวณอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กที่ออกแบบใหม่

บทที่ 4 กล่าวถึงการสร้างขดลวดแม่เหล็กหกขั้วใหม่ และการเปรียบเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์มอคัปเปิล ก่อนนำไปติดตั้งใช้งานกับขดลวดแม่เหล็กที่ออกแบบใหม่

บทที่ 5 กล่าวถึงการออกแบบและสร้างชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกน สำหรับใช้วัดสนามแม่เหล็กหกขั้ว และใช้งานกับเครื่องกำเนิดแสงสยาม

บทที่ 6 กล่าวถึงการทดสอบคุณสมบัติของแม่เหล็กหกขั้วที่ใช้ขดลวดแม่เหล็กออกแบบใหม่ โดยดำเนินการวัดสนามแม่เหล็กที่กระแสป้อนแม่เหล็กค่าต่าง ๆ และวัดอุณหภูมิขดลวด

แม่เหล็กเมื่อได้รับการจ่ายกระแสเปลี่ยนแม่เหล็กเป็นระยะเวลาประมาณ 12 ชั่วโมง พร้อมกับการอภิปรายผล การออกแบบขดลวดแม่เหล็กหกขั้วใหม่ การทดสอบคุณสมบัติของแม่เหล็กหกขั้วที่ใช้ขดลวดแม่เหล็กออกแบบใหม่

บทที่ 7 เป็นบทสรุปและข้อเสนอแนะ

ภาคผนวก ก. โปรแกรม Accelerator Toolbox สำหรับสร้างแบบจำลองวงกักเก็บอิเล็กตรอนระดับพลังงาน 1.2 GeV ของเครื่องกำเนิดแสงสยาม

ภาคผนวก ข. โปรแกรม POISSON สำหรับคำนวณสนามแม่เหล็กแบบสองมิติของแม่เหล็กหกขั้ว

ภาคผนวก ค. โปรแกรม RADIA สำหรับคำนวณสนามแม่เหล็กแบบสามมิติของแม่เหล็กหกขั้ว

ภาคผนวก ง. อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการติดตั้งชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกน



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและความรู้พื้นฐานของกับเครื่องกำเนิดแสงสยาม ซึ่งประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือ ระบบผลิตและเร่งอิเล็กตรอน และวงกักเก็บอิเล็กตรอน โดยระบบผลิตและเร่งอิเล็กตรอนยังประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ได้แก่ เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง ระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานต่ำ เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม และระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานสูง และบทนี้ยังกล่าวถึงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในวงกักเก็บอิเล็กตรอน การทำหน้าที่ของแม่เหล็กหกซ์ และการทดสอบคุณสมบัติของแม่เหล็กหกซ์ที่ใช้งานในปัจจุบัน

#### 2.2 เครื่องกำเนิดแสงสยาม

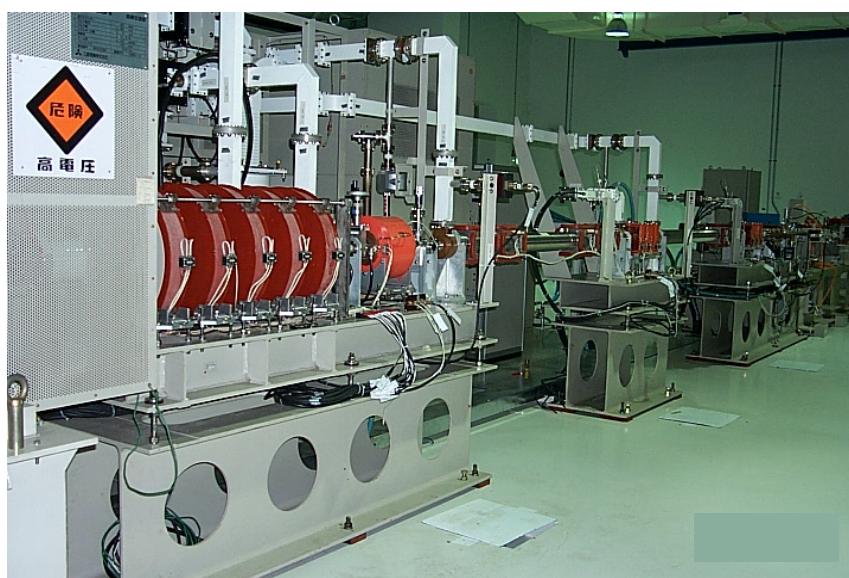
กำเนิดแสงสยามประกอบด้วยสองส่วนหลักที่สำคัญ คือ ระบบผลิตและเร่งอิเล็กตรอน และวงกักเก็บอิเล็กตรอน

##### 2.2.1 ระบบผลิตและเร่งอิเล็กตรอน

ระบบผลิตและเร่งอิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดแสงสยามซึ่งเป็นส่วนที่ทำหน้าที่ผลิตและเร่งอนุภาคอิเล็กตรอน ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ต่อไปนี้

เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนและเร่งอิเล็กตรอน มีส่วนประกอบสำคัญ ได้แก่ ปืนอิเล็กตรอน (electron gun) ทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนเข้าสู่ระบบการเร่งอนุภาค ระบบจัดกลุ่ม (buncher) ทำหน้าที่แบ่งกลุ่มอิเล็กตรอนที่กระจัดกระจายให้มีลักษณะเป็นกลุ่ม เพื่อให้เหมาะกับการเร่งโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ ท่อเร่งอิเล็กตรอน (accelerator tube) ทำหน้าที่เร่งอิเล็กตรอนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟให้ได้ค่าพลังงานที่ต้องการ โดยเครื่องเร่งอนุภาคแนวตรงของเครื่องกำเนิดแสงสยาม ได้ติดตั้งท่อเร่งอิเล็กตรอนขนาดความยาว 2.3 เมตร จำนวน 2 ท่อ สามารถเร่งอิเล็กตรอนได้พลังงานถึง 40 MeV ระบบแม่เหล็กทำหน้าที่ปรับขนาดและตำแหน่งของกลุ่มอิเล็กตรอน รวมทั้งควบคุมแนวการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในท่อสุญญากาศ ไคลสตรอน (klystron) ทำหน้าที่สร้างคลื่นไมโครเวฟความถี่ 2,856 MHz เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานในการเร่งอิเล็กตรอน ระบบสุญญากาศทำหน้าที่รักษาสภาพสุญญากาศให้อยู่ในระดับ  $10^{-8}$  ทอร์รี่ เพื่อให้อิเล็กตรอนส่วนใหญ่เคลื่อนที่ได้โดยไม่สูญเสียพลังงานจากการชนกับโมเลกุลของอากาศ เครื่องเร่ง

อนุภาคแนวตรงมีความยาวเท่ากับ 9.4 เมตร ให้พลังงานอิเล็กตรอนได้ถึง 40 MeV และมีค่ากระแสลำอิเล็กตรอน (electron beam current) อยู่ในช่วง 60-80 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งเครื่องเร่งอนุภาคแนวตรงแสดงได้ดังรูปที่ 2.1

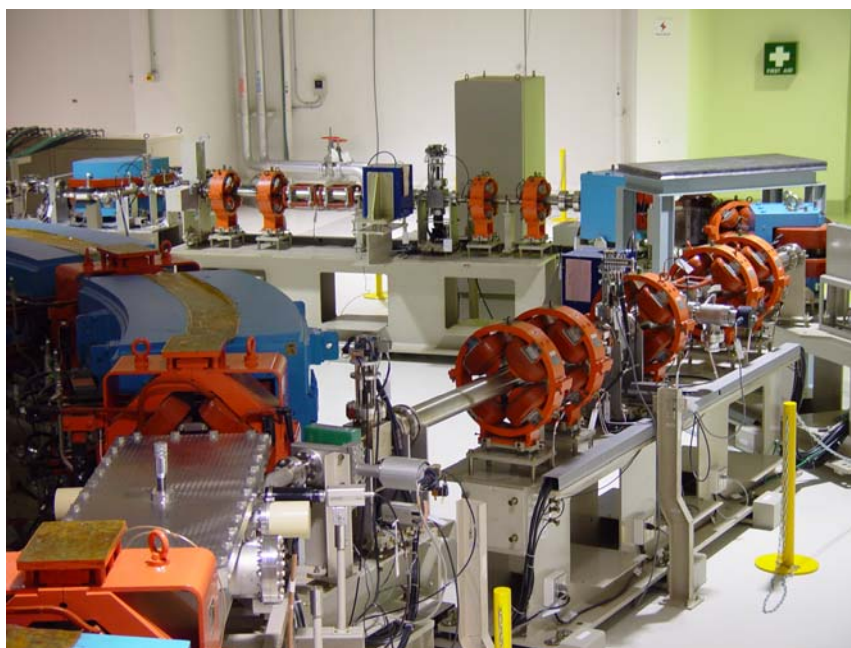


รูปที่ 2.1 เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง

ระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานต่ำ ติดตั้งเชื่อมต่อระหว่างเครื่องเร่งอนุภาคแนวตรงกับเครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม มีส่วนประกอบสำคัญ ได้แก่ ระบบแม่เหล็ก และระบบสุญญากาศในระดับ  $10^{-8}$  ทอรร ซึ่งหน้าที่หลักของระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานต่ำ คือ คัดเลือกกลุ่มอิเล็กตรอนระดับพลังงาน 40 MeV จากเครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง และควบคุมแนวการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนให้เหมาะสมกับการส่งเข้าไปเพิ่มพลังงานในเครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม ระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานต่ำมีความยาวเท่ากับ 10.85 เมตร และมีค่ากระแสลำอิเล็กตรอนหลังจากคัดเลือกกลุ่มอิเล็กตรอนแล้วประมาณ 30 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานต่ำแสดงได้ดังรูปที่ 2.2

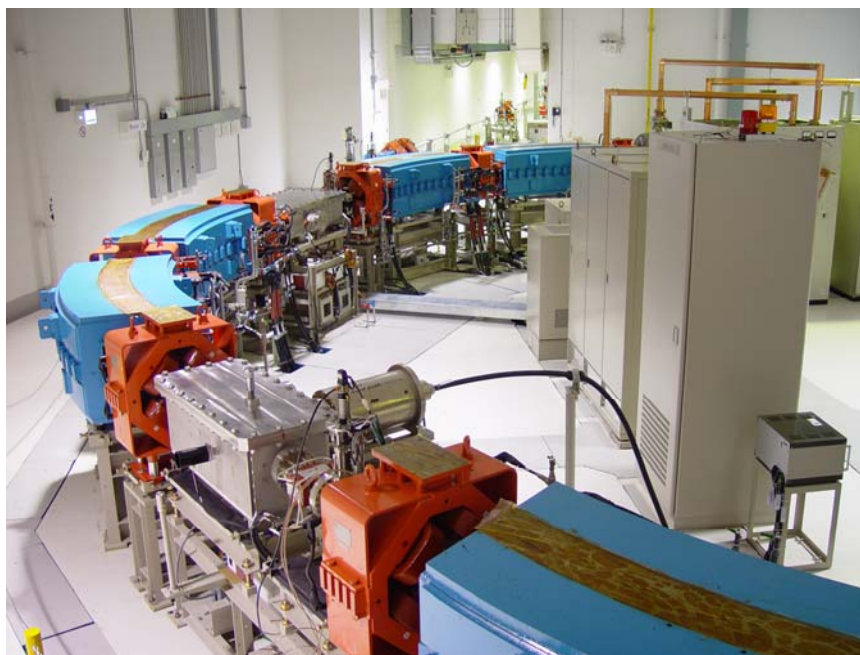
เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม มีส่วนประกอบสำคัญ ได้แก่ แม่เหล็กเลี้ยวโค้ง (bending magnet) ทำหน้าที่บังคับทิศทางให้กลุ่มอิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นวงในระหว่างการเพิ่มพลังงานแม่เหล็กสี่ขั้ว (quadrupole magnet) ทำหน้าที่บังคับขนาดของลำอิเล็กตรอนไม่ให้กระจายออกจากแนวการเคลื่อนที่ แม่เหล็กแบบพัลส์ (pulse magnet) ใช้ในการบิดแนวการเคลื่อนที่ให้สอดคล้องกับการสายของลำอิเล็กตรอนในขณะที่มีการบรรจุอิเล็กตรอน (injection) หรือการถ่ายเทอิเล็กตรอนออก (extraction) โพรงอาร์เอฟ (RF cavity) เป็นอุปกรณ์ถ่ายเทพลังงานจากคลื่นวิทยุ

ให้แก่กลุ่มอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในวง และระบบสุญญากาศในระดับ  $10^{-8}$  ทอร์รี่ เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลมทำหน้าที่เพิ่มพลังงานให้อิเล็กตรอนที่ส่งมาจากระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานต่ำ โดยบังคับให้กลุ่มอิเล็กตรอนเคลื่อนที่เป็นวงซ้ำแนวเดิมผ่านสนามไฟฟ้าจากคลื่นวิทยุความถี่ 118 MHz ในโพรงอาร์เอฟ ทำให้พลังงานของกลุ่มอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นทีละรอบ ซึ่งต้องเพิ่มความแรงสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กเดี่ยว โคงังและแม่เหล็กสี่ขั้วขึ้นตามจังหวะการเพิ่มพลังงานของกลุ่มอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนถูกเพิ่มพลังงานขึ้นจาก 40 MeV เป็น 1 GeV โดยใช้เวลาประมาณ 0.6 วินาที และมีความเร็วประมาณ 0.99999986 เท่าของความเร็วแสง (ศุภกร รักใหม่, 2548) เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลมมีความยาวเท่ากับ 43.19 เมตร และให้ค่ากระแสลำอิเล็กตรอนสูงสุดประมาณ 30 มิลลิแอมแปร์ ซึ่งเครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม แสดงได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 ระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานต่ำ

ระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานสูง ติดตั้งเชื่อมต่อระหว่างเครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลมกับวงกักเก็บอิเล็กตรอน มีส่วนประกอบสำคัญ ได้แก่ ระบบแม่เหล็ก และระบบสุญญากาศในระดับ  $10^{-8}$  ทอร์รี่ ซึ่งหน้าที่หลักของระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานสูง คือ นำกลุ่มอิเล็กตรอนพลังงาน 1 GeV จากเครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม เพื่อบรรจุเข้าวงกักเก็บอิเล็กตรอนให้เกิดการสูญเสียอิเล็กตรอนจำนวนน้อยที่สุด ระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานสูงมีความยาวเท่ากับ 45.94 เมตร ซึ่งระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานสูง แสดงได้ดังรูปที่ 2.4



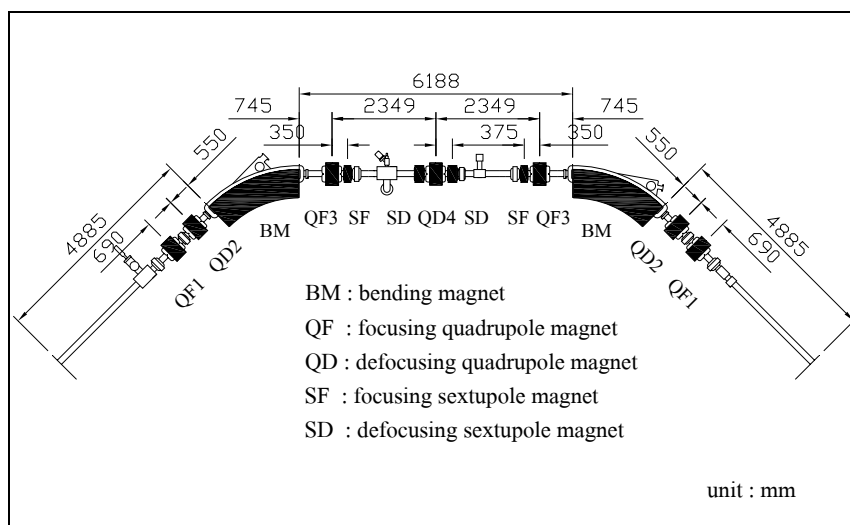
รูปที่ 2.3 เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม



รูปที่ 2.4 ระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานสูง

### 2.2.2 วงกักเก็บอิเล็กตรอน

วงกักเก็บอิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดแสงสยามมีส่วนประกอบสำคัญ ดังต่อไปนี้ โครงสร้างชุดแม่เหล็กแบบ DBA ซึ่งแผนภาพโครงสร้างชุดแม่เหล็กแบบ DBA แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 (Mitsubishi Electric Corporation, 2001) ประกอบด้วยแม่เหล็กเลี้ยวโค้งหรือ BM จำนวน 2 ตัว แม่เหล็กสี่ขั้วฟังก์ชัน QF และ QD จำนวน 7 ตัว และแม่เหล็กหกขั้วฟังก์ชัน SF และ SD จำนวน 4 ตัว โดยติดตั้งโครงสร้างชุดแม่เหล็กแบบ DBA สมมาตรกันจำนวน 4 ชุด มีความยาวของเส้นรอบวงโคจรเท่ากับ 81.3 เมตร แม่เหล็กเลี้ยวโค้งทำหน้าที่บังคับทิศทางให้ลำอิเล็กตรอนเคลื่อนที่โค้งตามวงโคจร แสงซินโครตรอนจะถูกผลิตขึ้นเมื่อลำอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กเลี้ยวโค้ง และแสงที่ได้จะถ่ายเทไปตามท่อนำแสงเพื่อนำไปใช้งานต่อไป แม่เหล็กสี่ขั้วทำหน้าที่บังคับขนาดของลำอิเล็กตรอนไม่ให้กระจายออกจากแนวการเคลื่อนที่ และแม่เหล็กหกขั้วทำหน้าที่ช่วยแม่เหล็กสี่ขั้วในการ โฟกัสลำอิเล็กตรอนที่ประกอบด้วยอิเล็กตรอนพลังงานแตกต่างกัน เพื่อให้เกิดจุดโฟกัสที่ตำแหน่งเดียวกัน



รูปที่ 2.5 แผนภาพโครงสร้างชุดแม่เหล็กแบบ DBA

แม่เหล็กแบบพัลส์ใช้ในการบิดแนวการเคลื่อนที่ให้สอดคล้องกับการส่ายของลำอิเล็กตรอนในขณะที่มีการบรรจุอิเล็กตรอน

โพรงอาร์เอฟเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ชดเชยพลังงานจากคลื่นวิทยุความถี่ 118 MHz ให้แก่กลุ่มอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ไปรอบ ๆ วงกักเก็บอิเล็กตรอน ซึ่งพลังงานที่ได้รับจากคลื่นวิทยุจะเท่ากับพลังงานที่อิเล็กตรอนสูญเสียไปในการปลดปล่อยแสงซินโครตรอน ทำให้เกิดสมดุลพลังงาน

และกลุ่มอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ในวงได้เป็นเวลานาน

ระบบสุญญากาศระดับสูง (ultra high vacuum) เพื่อรักษาระดับสุญญากาศให้อยู่ในระดับ  $10^{-10}$  ทอรร์ ซึ่งมีความจำเป็นมากที่จะช่วยยืดช่วงชีวิตของกลุ่มอิเล็กตรอนในวงกักเก็บอิเล็กตรอน

ตัวเฝ้าสังเกตตำแหน่งลำอิเล็กตรอน (beam position monitor) เพื่อศึกษาและติดตามการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอน เพื่อให้ทราบถึงพฤติกรรมเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอน

เมื่ออิเล็กตรอนถูกผลิตและเร่งจากเครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง ส่งผ่านระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานต่ำเข้าสู่เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลมเพื่อเร่งพลังงานอิเล็กตรอนอีกครั้ง แล้วส่งผ่านระบบลำเลียงอนุภาคพลังงานสูงและบรรจุเข้าสู่วงกักเก็บอิเล็กตรอน กระบวนการดังกล่าวจะดำเนินไปในทุก 2 วินาที จำนวนอิเล็กตรอนในวงกักเก็บอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งกระแสลำอิเล็กตรอนถึงระดับประมาณ 100 มิลลิแอมแปร์ ก็พร้อมให้บริการแสงซินโครตรอนได้ กระบวนการบรรจุอิเล็กตรอนใช้เวลาประมาณ 10-15 นาที ลำอิเล็กตรอนจะมีช่วงชีวิตอยู่ในวงกักเก็บอิเล็กตรอนประมาณ 4-6 ชั่วโมง เมื่ออิเล็กตรอนลดจำนวนลงจะสามารถทำการบรรจุอิเล็กตรอนเพิ่มใหม่ได้อีก ทำให้สามารถให้บริการแสงซินโครตรอนได้ต่อเนื่องเป็นเวลานาน ซึ่งวงกักเก็บอิเล็กตรอน แสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 วงกักเก็บอิเล็กตรอน

## 2.3 การเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนในวงกักเก็บอิเล็กตรอน

การเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนในวงกักเก็บอิเล็กตรอน จะอยู่ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กจากแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ ที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของวง ซึ่งสามารถอธิบายการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนได้ โดยพิจารณาจากแรงลอเรนทซ์ (Lorentz force) ที่กระทำต่ออิเล็กตรอน ดังสมการที่ (2-1)

$$\vec{F} = e(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (2-1)$$

โดยที่  $\vec{F}$  คือ แรงลอเรนทซ์ (Newtons)

$e$  คือ ประจุของอิเล็กตรอน (Coulombs)

$\vec{v}$  คือ ความเร็วของอิเล็กตรอน (m/s)

$\vec{B}$  คือ สนามแม่เหล็ก (Tesla)

เมื่ออิเล็กตรอนมีประจุเท่ากับ  $-e$  เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับ  $\vec{v}$  ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กเท่ากับ  $\vec{B}$  จะเกิดแรงลอเรนทซ์กระทำต่ออิเล็กตรอนมีขนาดเท่ากับ  $e v B$  มีทิศตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และตั้งฉากกับทิศของสนามแม่เหล็ก

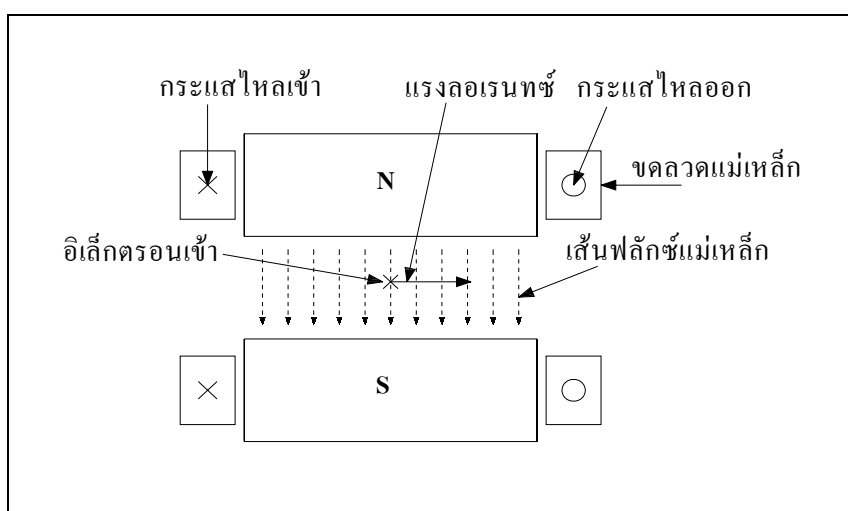
### 2.3.1 การเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนในอุปกรณ์ต่าง ๆ

การเคลื่อนที่ในทอสุญญากาศที่ไม่มีแม่เหล็กติดตั้งอยู่ เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านส่วนนี้จะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง เนื่องจากไม่มีแรงลอเรนทซ์มากระทำ

การเคลื่อนที่ในแม่เหล็กเลี้ยวโค้ง ซึ่งแผนภาพแรงลอเรนทซ์กระทำต่ออิเล็กตรอน แสดงได้ดังรูปที่ 2.7 (Tanabe, 2005) แม่เหล็กเลี้ยวโค้งสร้างสนามแม่เหล็กมีค่าคงที่ เมื่อสังเกตทิศทางการไหลของกระแสป้อนแม่เหล็ก จะเห็นได้ว่าเส้นฟลักซ์แม่เหล็กมีทิศชี้จากบนลงล่าง เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าในแม่เหล็กเลี้ยวโค้งจะถูกผลักโดยแรงลอเรนทซ์ ในทิศตั้งฉากกับการเคลื่อนที่และตั้งฉากกับทิศของสนามแม่เหล็ก เมื่อพิจารณาจากกฎมือขวาจะได้ทิศของแรงลอเรนทซ์ชี้ไปทางขวา

การเคลื่อนที่ในแม่เหล็กสี่ขั้ว ซึ่งแผนภาพแรงลอเรนทซ์กระทำต่ออิเล็กตรอน แสดงได้ดังรูปที่ 2.8 (Tanabe, 2005) แม่เหล็กสี่ขั้วสร้างสนามแม่เหล็กที่จุดศูนย์กลางแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์ มีเส้นผ่านศูนย์กลางของสนามแม่เหล็กอยู่ที่ระนาบแนวนอนและระนาบแนวตั้ง สนามแม่เหล็กมีค่าเปลี่ยนแปลงแบบเชิงเส้นกับระยะห่างจากจุดศูนย์กลางแม่เหล็ก เมื่อสังเกตทิศทางการ

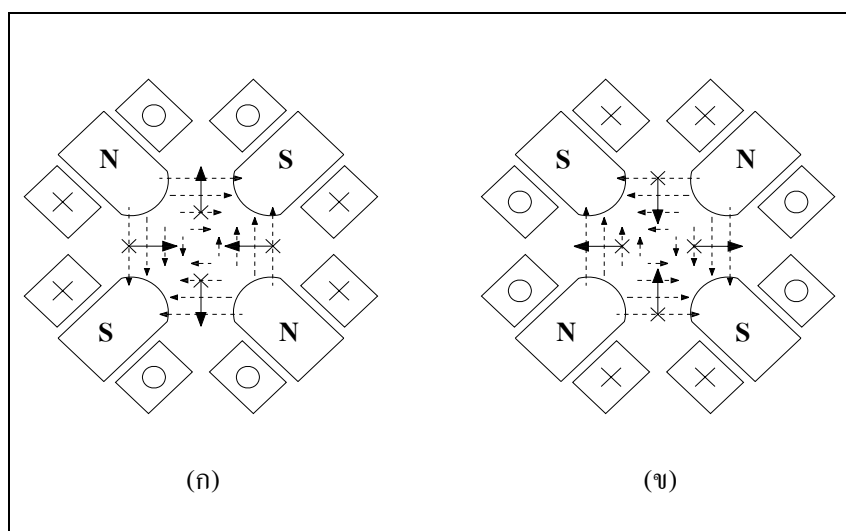
ไหลของกระแสป้อนแม่เหล็ก จะเห็นได้ว่าเส้นฟลักซ์แม่เหล็กไหลออกจากขั้วเหนือที่มุม 135 และ 315 องศา และไหลเข้าขั้วใต้ที่มุม 45 และ 225 องศา เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าไปในแม่เหล็กขั้ว ระบายสนามจะถูกลักโดยแรงลอเรนทซ์ในทิศเข้าหาจุดศูนย์กลางแม่เหล็ก และเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าไปในระบายแนวตั้งจะถูกลักโดยแรงลอเรนทซ์ในทิศออกจากจุดศูนย์กลางแม่เหล็ก เรานิยามแม่เหล็กขั้วดังกล่าวนี้เป็นแม่เหล็กขั้วฟังก์ชัน QF คือ โฟกัสลำอิเล็กตรอนในระบายแนวอนและคลายโฟกัสลำอิเล็กตรอนในระบายแนวตั้ง ส่วนแม่เหล็กขั้วฟังก์ชัน QD คือ คลายโฟกัสลำอิเล็กตรอนในระบายแนวอนอน และโฟกัสลำอิเล็กตรอนในระบายแนวตั้ง



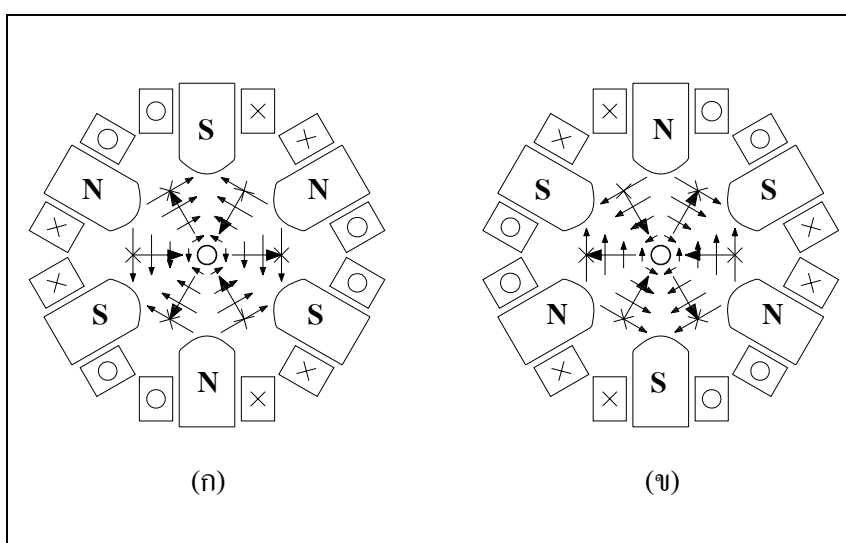
รูปที่ 2.7 แผนภาพแรงลอเรนทซ์กระทำต่ออิเล็กตรอนในแม่เหล็กเดี่ยวโค้ง

การเคลื่อนที่ในแม่เหล็กหกขั้ว ซึ่งแผนภาพแรงลอเรนทซ์กระทำต่ออิเล็กตรอนแสดงได้ดังรูปที่ 2.9 (Tanabe, 2005) แม่เหล็กหกขั้วสร้างสนามแม่เหล็กที่จุดศูนย์กลางแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์ มีเส้นผ่านศูนย์กลางของสนามแม่เหล็กอยู่ที่ระบายมุม 0, 60 และ 120 องศา สนามแม่เหล็กมีค่าเปลี่ยนแปลงแบบกำลังสองกับระยะห่างจากจุดศูนย์กลางแม่เหล็ก เมื่อตั้งเกดทิศทางการไหลของกระแสป้อนแม่เหล็ก จะเห็นได้ว่าเส้นฟลักซ์แม่เหล็กไหลออกจากขั้วเหนือที่มุม 30, 150 และ 270 องศา และไหลเข้าขั้วใต้ที่มุม 90, 210 และ 330 องศา เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าไปในแม่เหล็กหกขั้วระบายแนวอนจะถูกผลักโดยแรงลอเรนทซ์ในทิศไปทางขวา เรานิยามแม่เหล็กหกขั้วดังกล่าวนี้เป็นแม่เหล็กหกขั้วฟังก์ชัน SF ส่วนแม่เหล็กหกขั้วฟังก์ชัน SD เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าไปในระบายแนวอนจะถูกผลักโดยแรงลอเรนทซ์ในทิศไปทางซ้าย





รูปที่ 2.8 แผนภาพแรงลอเรนซ์กระทำต่ออิเล็กตรอนในแม่เหล็กสี่ขั้ว  
(ก) แม่เหล็กสี่ขั้วฟังก์ชัน QF (ข) แม่เหล็กสี่ขั้วฟังก์ชัน QD



รูปที่ 2.9 แผนภาพแรงลอเรนซ์กระทำต่ออิเล็กตรอนในแม่เหล็กหกขั้ว  
(ก) แม่เหล็กหกขั้วฟังก์ชัน SF (ข) แม่เหล็กหกขั้วฟังก์ชัน SD

### 2.3.2 วงโคจรอุดมคติของลำอิเล็กตรอน

วงโคจรอุดมคติ (ideal orbit) ของการเคลื่อนที่ในวงกักเก็บอิเล็กตรอน คือ วงโคจรที่ผ่านจุดศูนย์กลางของแม่เหล็กสี่ขั้วทุกตัว เมื่อมีการบรรจุอิเล็กตรอนเพียง 1 ตัว ให้เคลื่อนที่อยู่บนวง

โคจรอุดมคติ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่โดยไม่มีการส่าย เนื่องจากสนามแม่เหล็กที่จุดศูนย์กลางของแม่เหล็กสี่ขั้วมีค่าเป็นศูนย์จึงไม่มีแรงกระทำต่ออิเล็กตรอน ในการกักเก็บอิเล็กตรอนจำนวนมากไม่สามารถบรรจุอิเล็กตรอนทุกตัวลงบนวงโคจรอุดมคติได้ เพราะโดยธรรมชาติของอิเล็กตรอนจะผลักกันเนื่องจากแรงผลักทางไฟฟ้า อิเล็กตรอนส่วนใหญ่จึงไม่อยู่บนวงโคจรอุดมคติแต่จะเคลื่อนที่ส่ายไปมารอบวงโคจรอุดมคติ เนื่องมาจากผลของการ โฟกัสและคลายโฟกัสของแม่เหล็กสี่ขั้ว (ศุภกร รักใหม่, 2548) โดยเรานิยามระบบแกนอ้างอิงของลำอิเล็กตรอนในวงกักเก็บอิเล็กตรอน คือ  $(x, y, s)$  ซึ่ง  $x$  และ  $y$  จะตั้งฉากกับวงโคจรอุดมคติเสมอ ส่วน  $s$  จะหมุนไปตามวงโคจรอุดมคติ การเคลื่อนที่ที่ส่ายไปมารอบวงโคจรอุดมคติของลำอิเล็กตรอน เรียกว่า เกิดการสั่นของเบทาตรอน (betatron oscillation) และจำนวนลูกคลื่นของการส่ายต่อรอบวงโคจรอุดมคติ คือ เบทาตรอนจูน (betatron tune,  $\nu$ ) ซึ่งค่าเบทาตรอนจูนมีความสำคัญต่อความเสถียรของลำอิเล็กตรอนในวงกักเก็บอิเล็กตรอน

### 2.3.3 การแสดงพิกัดตำแหน่งของอิเล็กตรอน

การแสดงพิกัดตำแหน่งของอิเล็กตรอนที่จุดต่าง ๆ ในวงกักเก็บอิเล็กตรอนในระนาบแนวนอน จะแสดงด้วยระบบพิกัด  $(x, x')$  โดยที่  $x$  คือระยะทางแกน  $x$  และ  $x' = \frac{dx}{ds}$  คือมุมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ทำกับวงโคจรอุดมคติ ซึ่งเราเรียกระบบพิกัดดังกล่าวนี้ว่า phase space เมื่อทำการพล็อตพิกัดตำแหน่งของอิเล็กตรอนแต่ละตัวในลำอิเล็กตรอนที่จุดใดจุดหนึ่งของวงกักเก็บอิเล็กตรอนลงในระบบพิกัด  $(x, x')$  จะได้รูปวงรีที่บรรจุอิเล็กตรอนทั้งหมดไว้ ซึ่งเราเรียกรูปวงรีดังกล่าวนี้ว่า phase ellipse โดยพื้นที่ของวงรีมีค่าคงที่ในทุก ๆ จุดในแนวการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอน แต่จะเปลี่ยนรูปร่างไปเมื่อเคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์ต่าง ๆ ซึ่งสามารถเขียนสมการของรูปวงรีในระบบพิกัด  $(x, x')$  ได้ดังสมการที่ (2-2) (Wiedemann, 1993) และรูปวงรีที่มีพื้นที่เท่ากับ  $\pi\varepsilon$  และมีจุดตัดแกน  $x$  และแกน  $x'$  แสดงได้ดังรูปที่ 2.10 (Wiedemann, 1993)

$$\gamma x^2 + 2\alpha x x' + \beta x'^2 = \varepsilon \quad (2-2)$$

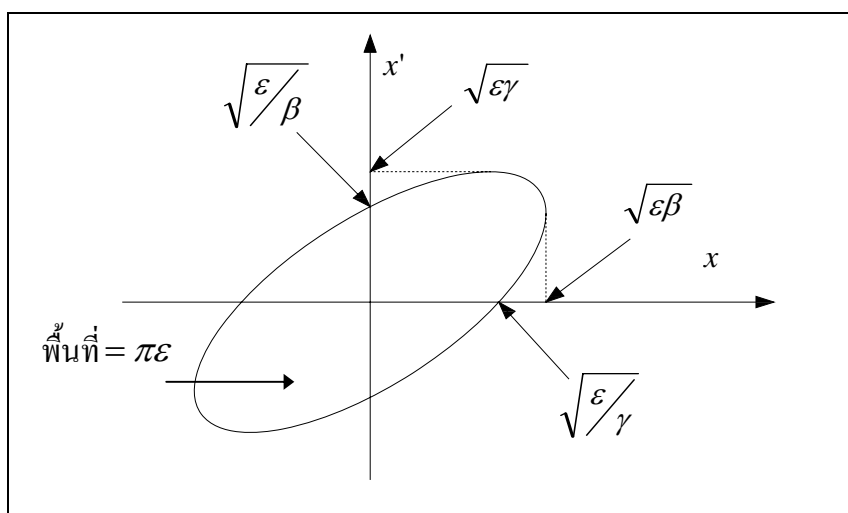
โดยที่  $\alpha, \beta, \gamma$  คือ ฟังก์ชันของเบทาตรอน (betatron functions) (m)

$x$  คือ ระยะทางแกน  $x$  (m)

$x'$  คือ มุมการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ทำกับวงโคจรอุดมคติ (rad)

$\varepsilon$  คือ อิมิตแดนซ์ (m.rad)

ซึ่งฟังก์ชันของเบทาตรอนเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้บอกลักษณะรูปร่างของวงรี ในแต่ละจุดของเส้นทางการเคลื่อนที่ในวงกักเก็บอิเล็กตรอน และในสมการที่ (2-2) ค่าอิมิตแดนซ์จะมีค่าคงที่เฉพาะสำหรับวงกักเก็บอิเล็กตรอนแต่ละวง



รูปที่ 2.10 รูปร่าง phase ellipse

### 2.3.4 โครมาติซิตีของวงกักเก็บอิเล็กตรอน

ถ้าอิเล็กตรอนที่ประกอบด้วยอิเล็กตรอนโมเมนตัมแตกต่างกัน เคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กเลี้ยวโค้ง อิเล็กตรอนที่มีค่าโมเมนตัมสูงจะเลี้ยวโค้งได้น้อยกว่าอิเล็กตรอนที่มีค่าโมเมนตัมต่ำ และเมื่อเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กสี่ขั้วซึ่งทำหน้าที่โฟกัสสำหรับอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนที่มีโมเมนตัมแตกต่างกันจะถูกโฟกัสไปที่จุดต่างกันเราเรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ว่า การเลือนของเลนส์ (chromatic aberration) ซึ่งการเลือนของเลนส์ทำให้การสั้นของเบทาตรอนของอิเล็กตรอนที่มีโมเมนตัมไม่เท่ากันมีความแตกต่างกัน และทำให้เบทาตรอนเกิดการเปลี่ยนแปลง ดังสมการที่ (2-3) (Wiedemann, 1993) ในสมการที่ (2-3) เครื่องหมาย  $\mp$  หมายถึง ค่า  $\Delta v_x$  ใช้เครื่องหมาย - และค่า  $\Delta v_y$  ใช้เครื่องหมาย +

$$\Delta v_{x,y} = \mp \frac{\Delta p / p_0}{4\pi} \int_c \beta_{x,y}(s) k(s) ds \quad (2-3)$$

โดยที่  $\Delta v_{x,y}$  คือ การเปลี่ยนแปลงของเบทาตรอนจน

$\beta_{x,y}$	คือ ฟังก์ชันของเบทาตรอน (m)
$k$	คือ ความแรงของแม่เหล็กสี่ขั้ว (quadrupole strength) ( $m^{-2}$ )
$ds$	คือ ตำแหน่งการเคลื่อนที่ตามวงโคจร (m)
$\Delta p$	คือ การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอิเล็กตรอน (kg.m/s)
$p_0$	คือ โมเมนตัมหลักของอิเล็กตรอน (kg.m/s)

ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงของเบทาตรอนจูงต่อการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมของอิเล็กตรอนเทียบกับ โมเมนตัมหลักของอิเล็กตรอน เรียกว่า โครมาติซิตี (chromaticity,  $\xi$ ) ดังสมการที่ (2-4) (Wiedemann, 1993)

$$\xi_{x0,y0} = \frac{\Delta v_{x,y}}{\Delta p / p_0} \quad (2-4)$$

โดยที่  $\xi_{x0,y0}$  คือ โครมาติซิตีธรรมชาติ (natural chromaticity) และเมื่อแทนค่า  $\Delta v_{x,y}$  ลงในสมการที่ (2-4) จะได้โครมาติซิตีธรรมชาติ ดังสมการที่ (2-5)

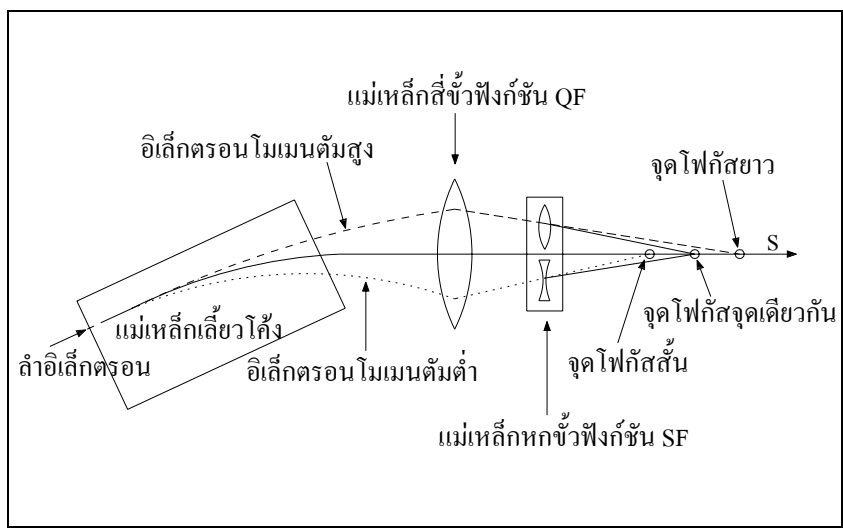
$$\xi_{x0,y0} = \mp \frac{1}{4\pi} \int_C \beta_{x,y}(s)k(s)ds \quad (2-5)$$

โครมาติซิตีธรรมชาติในสมการที่ (2-5) โดยปกติจะมีค่าเป็นลบทั้งสองระนาบ การกักเก็บอิเล็กตรอนจะเกิดความเสถียรได้เมื่อค่าโครมาติซิตีมีค่าเป็นบวกเล็กน้อย ซึ่งสามารถชดเชยค่าโครมาติซิตีธรรมชาติได้ โดยใช้แม่เหล็กหกขั้วช่วยในการทำหน้าที่โพกัสอิเล็กตรอนที่มีค่าโมเมนตัมสูงและคลายโพกัสอิเล็กตรอนที่มีค่าโมเมนตัมต่ำ เพื่อให้เกิดจุดโฟกัสที่จุดเดียวกัน การอธิบายข้างต้นอาจแทนได้ด้วยแผนภาพดังรูปที่ 2.11 (Tanabe, 2005)

เมื่อชดเชยค่าโครมาติซิตีธรรมชาติแล้ว จะได้สมการโครมาติซิตีของวงกักเก็บอิเล็กตรอนใหม่ ดังสมการที่ (2-6) (Wiedemann, 1993) โดยค่าโครมาติซิตีดังกล่าวสามารถให้ค่าที่เป็นบวกได้ทั้งสองระนาบ ซึ่งจะสามารถทำให้การกักเก็บอิเล็กตรอนเกิดความเสถียรได้

$$\xi_{x,y} = \pm \frac{1}{4\pi} \int_C \beta_{x,y}(s)(m(s)\eta(s) - k(s))ds \quad (2-6)$$

- โดยที่  $\xi_{x,y}$  คือ โคจรมาติชิตีของวงกักเก็บอิเล็กตรอน  
 $m$  คือ ความแรงของแม่เหล็กหกขั้ว (sextupole strength) ( $m^{-1}$ )  
 $\eta$  คือ ฟังก์ชันดิสเพอร์ชัน (dispersion function) (m)



รูปที่ 2.11 แผนภาพเชิงเปรียบเทียบการแก้ไขการเลือนของเลนส์

### 2.4 แม่เหล็กหกขั้ว

แม่เหล็กหกขั้วประกอบไปด้วยขั้วเหนือสามขั้วและขั้วใต้สามขั้ว สร้างสนามแม่เหล็ก ดังสมการที่ (2-7) (Guiducci, 1991) จากสมการที่ (2-7) แม่เหล็กหกขั้วจะสร้างสนามแม่เหล็กที่จุดศูนย์กลางแม่เหล็กมีค่าเป็นศูนย์ และสนามแม่เหล็กมีค่าเปลี่ยนแปลงแบบกำลังสองกับระยะห่างจากจุดศูนย์กลางแม่เหล็ก

$$\begin{aligned}
 B_x &= g'xy \\
 B_y &= \frac{1}{2}g'(x^2 - y^2) \\
 g' &= \frac{\partial B_y}{\partial x^2}
 \end{aligned}
 \tag{2-7}$$

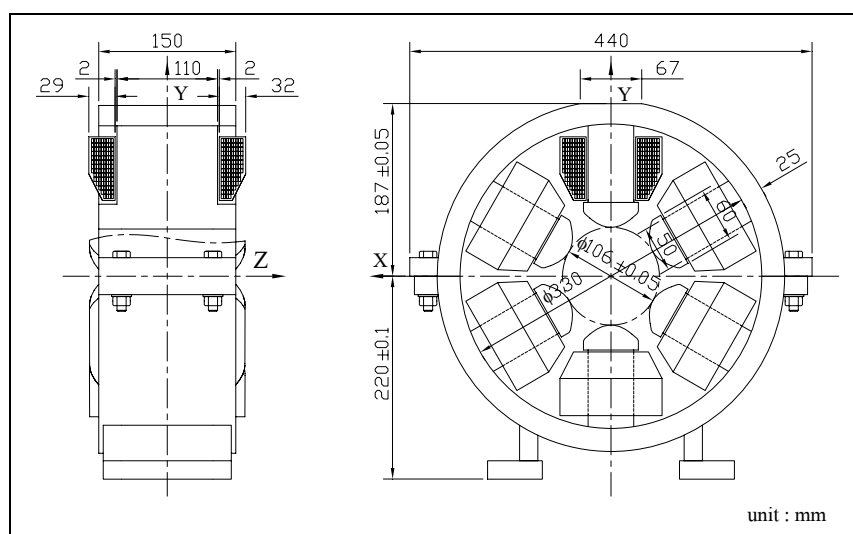
- โดยที่  $B_x$  คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก แกน x (magnetic flux density) (T)  
 $B_y$  คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก แกน y (T)  
 $g'$  คือ ความแรงสนามแม่เหล็ก (field strength) ( $T/m^2$ )

ความยาวสนามแม่เหล็ก (magnetic length,  $L_{eff}$ ) ซึ่งเป็นระยะที่สนามแม่เหล็กมีผลต่อการบังคับทิศทางของลำอิเล็กตรอน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-8) (Tanabe, 2005)

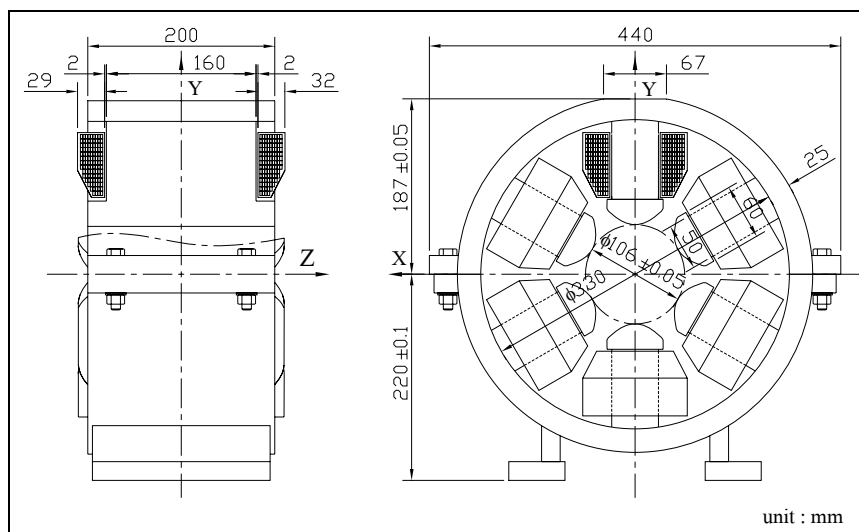
$$L_{eff} = \frac{\int Bdz}{B_{center}} \quad (2-8)$$

โดยที่  $L_{eff}$  คือ ความยาวสนามแม่เหล็ก (m)  
 $B$  คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (T)  
 $B_{center}$  คือ ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ที่ตำแหน่ง  $z=0$  (T)  
 $dz$  คือ ระยะทางแกน  $z$

วงกักเก็บอิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดแสงสยาม มีแม่เหล็กหกขั้วอยู่สองชนิด คือ แม่เหล็กหกขั้วฟังก์ชัน SF และ SD ฟังก์ชันละ 8 ตัว ซึ่งแผนภาพแม่เหล็กหกขั้วทั้งสอง แสดงได้ดังรูปที่ 2.12 และ 2.13 (Mitsubishi Electric Corporation, 2000) จะสังเกตเห็นได้ว่าแม่เหล็กหกขั้วทั้งสองมีความยาวของแม่เหล็กไม่เท่ากัน โดยที่แม่เหล็กหกขั้วฟังก์ชัน SF มีความยาวของแกนแม่เหล็กเท่ากับ 150 มิลลิเมตร และแม่เหล็กหกขั้วฟังก์ชัน SD มีความยาวของแกนแม่เหล็กเท่ากับ 200 มิลลิเมตร โดยคุณสมบัติของแม่เหล็กหกขั้วทั้งสองชนิดมีรายละเอียด ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.12 แผนภาพแม่เหล็กหกขั้วฟังก์ชัน SF



รูปที่ 2.13 แผนภาพแม่เหล็กหุ้มขั้วฟังก์ชัน SD

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของแม่เหล็กหุ้มขั้วที่ใช้งานในปัจจุบัน

รายละเอียด	แม่เหล็กหุ้มขั้ว SF	แม่เหล็กหุ้มขั้ว SD
พิกัดกระแสป้อนแม่เหล็ก (A)	12	12
พิกัดแรงดันไฟฟ้า (V)	7.1	8.6
ความต้านทาน R20 ( $\Omega$ )	0.49	0.57
พิกัดแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (A.turns)	1,320	1,320
พิกัดความแรงสนามแม่เหล็ก ( $T/m^2$ )	60	60
จำนวนรอบการพันขดลวดต่อขั้ว (รอบ)	110	110
เส้นลวด (mm)	PEW-2.4x4.5	PEW-2.4x4.5
การระบายความร้อน	อากาศ	อากาศ
พิกัดอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็ก ( $^{\circ}C$ )	60	60
วัสดุที่ใช้ทำแกนแม่เหล็ก	S10C	S10C

หมายเหตุ PEW หมายถึง polyester enameled copper wire

S10C หมายถึง JIS carbon steel S10C

## 2.5 การทดสอบคุณสมบัติแม่เหล็กขั้วที่ใช้งานในปัจจุบัน

การทดสอบคุณสมบัติของแม่เหล็กขั้วที่ใช้งานในปัจจุบันของเครื่องกำเนิดแสงสยาม เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติของแม่เหล็กขั้วใหม่ การทดสอบได้ดำเนินการในช่วงที่มีการหยุดทำงานของเครื่องกำเนิดแสงสยามเพื่อทำการซ่อมบำรุงประจำปี โดยได้ถอดแม่เหล็กขั้วฟังก์ชัน SF และ SD ออกจากวงกักเก็บอิเล็กตรอนอย่างละตัว และทำการวัดสนามแม่เหล็กด้วยชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกนที่ได้จัดสร้างขึ้นร่วมกับชุดวัดสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์โพรบ การวัดสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กขั้วที่ใช้งานในปัจจุบัน แสดงได้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การวัดสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กขั้วที่ใช้งานในปัจจุบัน

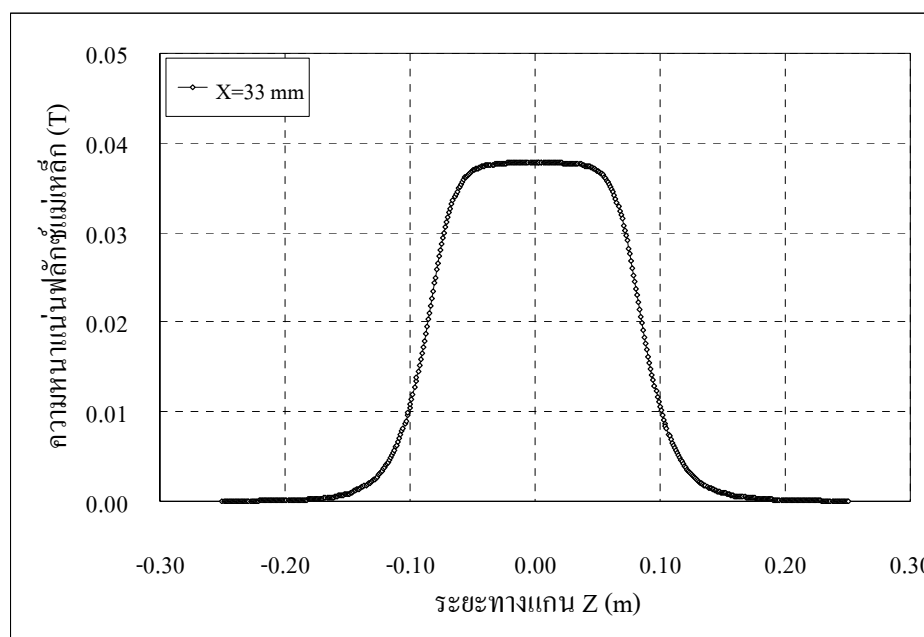
ผลที่ได้จากการวัดให้ค่าความแรงสนามแม่เหล็กที่กระแสนแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 จะสังเกตเห็นได้ว่าความแรงสนามแม่เหล็กกับกระแสนแม่เหล็กมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น และผลที่ได้จากการวัดให้ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับระยะทางแกน Z แสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 2.15 และ 2.16 และสามารถคำนวณค่าความยาวสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กขั้วฟังก์ชัน SF โดยใช้วิธีการอินทิเกรตเชิงเลข ให้ค่าเท่ากับ 180.8 มิลลิเมตร โดยที่ความยาวสนามแม่เหล็กขนาดดังกล่าวมีระยะทางจากแกน Z ที่  $-90.4$  มิลลิเมตร ถึง  $+90.4$  มิลลิเมตร และแม่เหล็กขั้วฟังก์ชัน SD ให้ค่าเท่ากับ 230.6 มิลลิเมตร โดยที่ความยาว



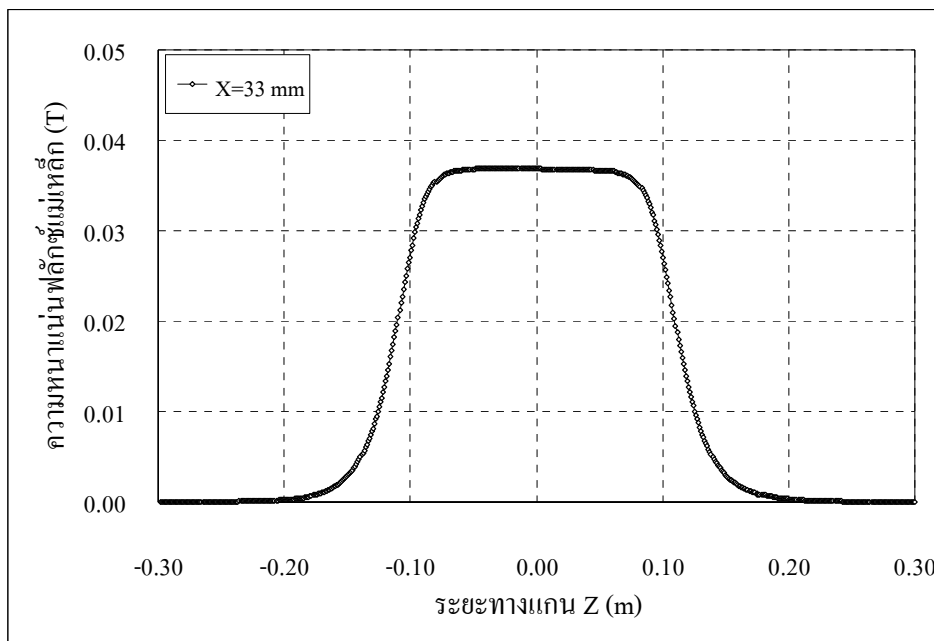
สนามแม่เหล็กขนาดดังกล่าวมีระยะทางจากแกน Z ที่  $-115.3$  มิลลิเมตร ถึง  $+115.3$  มิลลิเมตร ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวัดแม่เหล็กหกขั้วชุดเดิมจะนำไปใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการปรับปรุงคุณสมบัติของแม่เหล็กหกขั้วใหม่

ตารางที่ 2.2 ความแรงสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กหกขั้วที่ใช้งานในปัจจุบัน ที่ได้จากการวัด

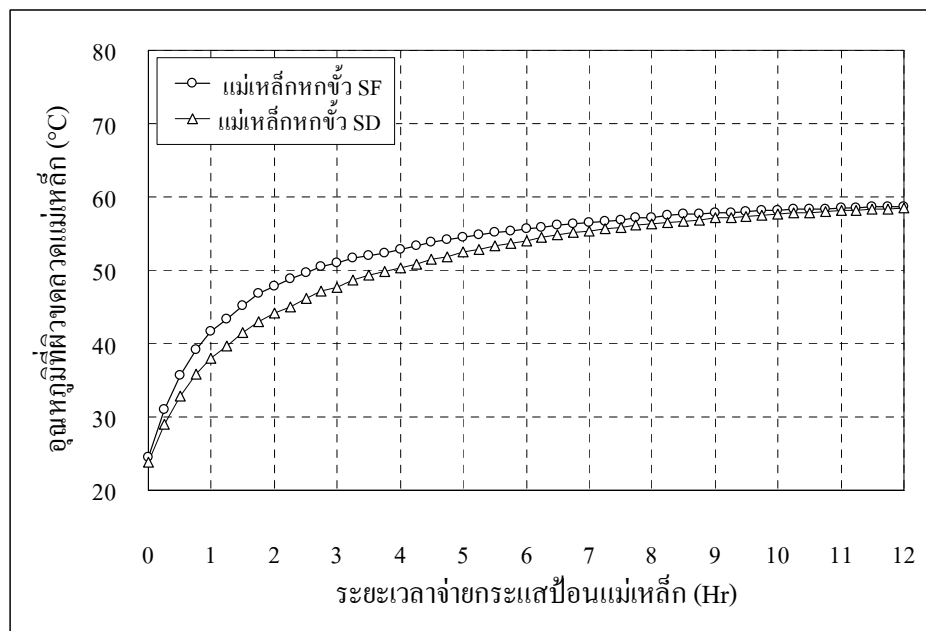
กระแสน้ำแม่เหล็ก (A)	ความแรงสนามแม่เหล็ก ( $T/m^2$ ) แม่เหล็กหกขั้ว SF	ความแรงสนามแม่เหล็ก ( $T/m^2$ ) แม่เหล็กหกขั้ว SD
2	11.68320	11.88923
4	22.52888	22.64756
6	33.53544	33.37477
8	44.46402	44.12348
10	55.46124	54.90450
12	66.22528	65.81974



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับระยะทางแกน Z ที่  $Y=0$  และค่ากระแสน้ำแม่เหล็ก 12 แอมแปร์ (แม่เหล็กหกขั้ว SF)



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับระยะทางแกน Z ที่  $Y=0$  และค่ากระแสป้อนแม่เหล็ก 12 แอมแปร์ (แม่เหล็กหกขั้ว SD)



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวขดลวดแม่เหล็กกับระยะเวลาจ่ายกระแสป้อนแม่เหล็ก ที่กระแสป้อนแม่เหล็ก 16 แอมแปร์

การทดสอบอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กหุ้มขั้วทั้งสองฟังก์ชัน ที่ค่ากระแสป้อนแม่เหล็ก 16 แอมแปร์ ซึ่งกระแสป้อนแม่เหล็กค่าดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกับการใช้งานจริง โดยจ่ายกระแสป้อนแม่เหล็กเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง แล้ววัดค่าอุณหภูมิที่ผิวขดลวดแม่เหล็กด้วยเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์มอคัปเปิล ผลที่ได้ให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่ผิวขดลวดแม่เหล็กกับระยะเวลาจ่ายกระแสป้อนแม่เหล็ก แสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 2.17 จะสังเกตเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่ผิวขดลวดแม่เหล็กทั้งสองชนิดเมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง มีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มจะคงที่ ที่ค่าใกล้เคียง 60 องศาเซลเซียส โดยประมาณ ซึ่งการวัดอุณหภูมิที่ผิวขดลวดแม่เหล็กอาจทำให้เราสามารถประมาณค่าอุณหภูมิชั้นในของขดลวดแม่เหล็กได้อย่างหายاب โดยที่ค่าอุณหภูมิชั้นในของขดลวดแม่เหล็กอาจมีค่าสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส

## บทที่ 3

### การออกแบบขดลวดแม่เหล็กหกขั้วใหม่

#### 3.1 บทนำ

การปรับปรุงวงกักเก็บอิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดแสงสยาม เพื่อเพิ่มระดับพลังงานจาก 1.0 GeV เป็น 1.2 GeV มีความจำเป็นต้องออกแบบขดลวดแม่เหล็กหกขั้วใหม่ เพราะถ้าใช้วิธีป้อนกระแสแม่เหล็กให้เพิ่มสูงขึ้นเพื่อให้สามารถกักเก็บอิเล็กตรอนระดับพลังงาน 1.2 GeV ได้ อุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กจะสูงเกิน 60 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นระดับพิกัดและเป็นอันตรายต่อการใช้งาน ขดลวดแม่เหล็กที่ได้รับการออกแบบใหม่จะพันลงบน โครงสร้างแม่เหล็กหกขั้วชุดเดิม ซึ่งการออกแบบต้องสามารถทำงานที่ระดับพลังงาน 1.2 GeV ได้ ขณะที่อุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กต้องไม่สูงเกินค่าพิกัด 60 องศาเซลเซียส

บทนี้จะอธิบายการออกแบบขดลวดแม่เหล็กหกขั้วใหม่ โดยแม่เหล็กหกขั้วที่ได้รับการออกแบบขดลวดแม่เหล็กใหม่จะนำไปติดตั้งใช้งานในวงกักเก็บอิเล็กตรอน ร่วมกับแม่เหล็กหกขั้วตัวอื่นที่ใช้งานในฟังก์ชันเดียวกัน การออกแบบได้อาศัยโปรแกรมสำเร็จรูปในการคำนวณ ได้แก่ โปรแกรม Accelerator Toolbox ใช้คำนวณค่าพิกัดกระแสป้อนแม่เหล็กของแม่เหล็กหกขั้วสำหรับวงกักเก็บอิเล็กตรอนระดับพลังงาน 1.2 GeV โปรแกรม POISSON ใช้คำนวณค่าสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ โปรแกรม RADIA ใช้คำนวณค่าสนามแม่เหล็กแบบสามมิติ ซึ่งการคำนวณค่าสนามแม่เหล็กโดยโปรแกรมทั้งสองจะให้ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบขดลวดแม่เหล็กใหม่ และโปรแกรม COSMOSWorks ใช้คำนวณค่าอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กที่ออกแบบใหม่ ซึ่งผลการคำนวณค่าอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กจะบ่งบอกได้ถึงความถูกต้องเหมาะสมของค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้โดยโปรแกรม POISSON และ RADIA

#### 3.2 การคำนวณพิกัดกระแสป้อนแม่เหล็กหกขั้ว

การคำนวณค่าพิกัดกระแสป้อนแม่เหล็กของแม่เหล็กหกขั้วสำหรับวงกักเก็บอิเล็กตรอนระดับพลังงาน 1.2 GeV ของเครื่องกำเนิดแสงสยาม โดยใช้โปรแกรม Accelerator Toolbox (version 1.2) ใช้งานร่วมกับ MATLAB (version 7.1) โดยโปรแกรมจะสร้างแบบจำลองวงกักเก็บอิเล็กตรอนขึ้น แล้วคำนวณค่าโครมาติซิตีของวงกักเก็บอิเล็กตรอนที่สัมพันธ์กับค่ากระแสป้อนแม่เหล็กหกขั้ว

### 3.2.1 โปรแกรม Accelerator Toolbox

โปรแกรม Accelerator Toolbox ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อช่วยสนับสนุนในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางฟิสิกส์ของเครื่องเร่งอนุภาค ซึ่งผู้วิจัยได้นำโปรแกรมมาใช้คำนวณหาพิกัดกระแสป้อนแม่เหล็กของแม่เหล็กหักขั้ว ที่มีความเหมาะสมสำหรับวงกักเก็บอิเล็กตรอนระดับพลังงาน 1.2 GeV ของเครื่องกำเนิดแสงสยาม โดยโปรแกรมจะสร้างแบบจำลองวงกักเก็บอิเล็กตรอน (ดังแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก) ซึ่งแบบจำลองจะประกอบไปด้วย โครงสร้างชุดแม่เหล็กแบบ DBA จำนวน 4 ชุด (ดูรายละเอียดในบทที่ 2 เรื่องวงกักเก็บอิเล็กตรอน) โดยที่ชื่อของแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ และมิติของโครงสร้างชุดแม่เหล็กแบบ DBA มีความสำคัญที่ต้องใช้เป็นพารามิเตอร์อินพุตให้กับโปรแกรม ซึ่งการทำงานของโปรแกรม Accelerator Toolbox มีการเรียกใช้โปรแกรมย่อยต่าง ๆ ได้แก่

โปรแกรมย่อย “rbend” ใช้สำหรับสร้างแม่เหล็กเลี้ยวโค้ง โดยมีพารามิเตอร์อินพุต ได้แก่ มุมเลี้ยวโค้งเท่ากับ  $\pi/4$  เรเดียน ความยาวส่วนโค้งของแม่เหล็กเท่ากับ 2.1834 เมตร มุมทางเข้าของแม่เหล็กเท่ากับ 0 เรเดียน มุมทางออกของแม่เหล็กเท่ากับ 0 เรเดียน และความแรงของแม่เหล็กสี่ขั้วในแม่เหล็กเลี้ยวโค้งเท่ากับ  $0 \text{ m}^{-2}$

โปรแกรมย่อย “quadrupole” ใช้สำหรับสร้างแม่เหล็กสี่ขั้วฟังก์ชัน QF1, QD2, QF3 และ QD4 โดยมีพารามิเตอร์อินพุต ได้แก่ ความแรงของแม่เหล็กสี่ขั้วฟังก์ชัน QF1, QD2, QF3 และ QD4 มีค่าเท่ากับ 2.463036, -2.617328, 2.315304 และ -1.758017  $\text{m}^{-2}$  ตามลำดับ (Kwankasem, 2006) ความยาวสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กสี่ขั้วฟังก์ชัน QF1, QD2, QF3 และ QD4 เท่ากับ 323 มิลลิเมตร

โปรแกรมย่อย “sextupole” ใช้สำหรับสร้างแม่เหล็กหกขั้วฟังก์ชัน SF และ SD โดยมีพารามิเตอร์อินพุต ได้แก่ ความยาวสนามแม่เหล็กหกขั้วฟังก์ชัน SF และ SD มีค่าเท่ากับ 180.8 และ 230.6 มิลลิเมตร ตามลำดับ (ผลจากการวัดดังที่แสดงไว้ในบทที่ 2) ความแรงของแม่เหล็กหกขั้วฟังก์ชัน SF และ SD ที่ค่ากระแสป้อนแม่เหล็ก 20 แอมแปร์ เท่ากับ 13.6713 และ -13.3834  $\text{m}^{-3}$  ตามลำดับ

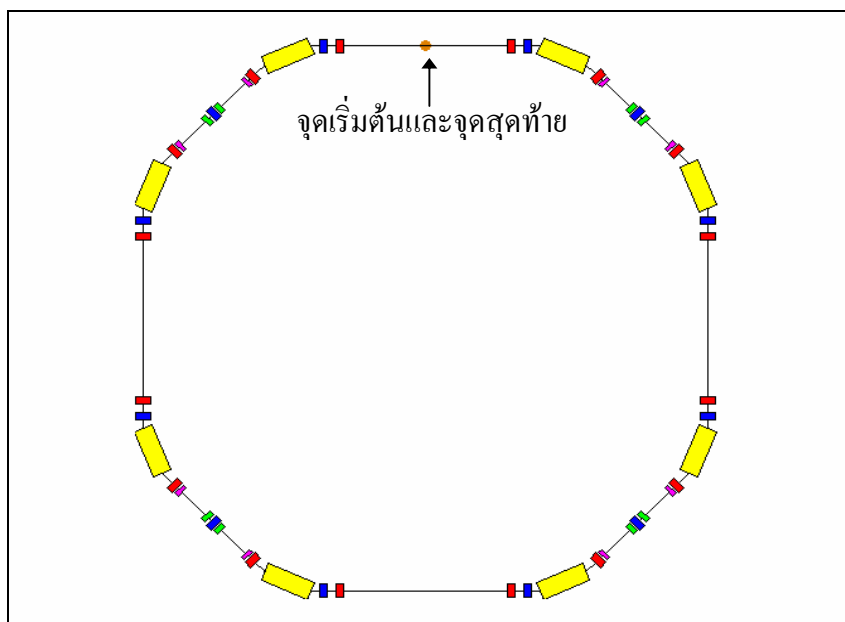
โปรแกรมย่อย “rfcavity” ใช้สำหรับสร้างโพรงอาร์เอฟ โดยมีพารามิเตอร์อินพุต ได้แก่ ความยาวของโพรงอาร์เอฟเท่ากับ 0 เมตร แรงดันไฟฟ้าของคลื่นวิทยุเท่ากับ 120 kV ความถี่ของคลื่นวิทยุเท่ากับ 118.00076 MHz จำนวนกลุ่มอิเล็กตรอนในวงกักเก็บอิเล็กตรอนเท่ากับ 32

การทำงานเบื้องต้นของโปรแกรม Accelerator Toolbox ต้องทำการโหลดข้อมูลของแบบจำลองวงกักเก็บอิเล็กตรอนก่อน โดยใช้คำสั่ง “LATTICESPL” ซึ่งเขียนในรูปแบบ m-file การเรียกโปรแกรมนี้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1 จะสังเกตเห็นว่าเมื่อโปรแกรมโหลดข้อมูลแล้วเสร็จจะคำนวณค่าเบตาตรอนจูนและค่าโครมาติซิตีให้ด้วย เมื่อโปรแกรมโหลดข้อมูลเสร็จสามารถแสดง

แบบจำลองวงกักเก็บอิเล็กตรอนได้ โดยใช้คำสั่ง “intlatt” ซึ่งแบบจำลองวงกักเก็บอิเล็กตรอน แสดงได้ดังรูปที่ 3.2 จะสังเกตเห็นได้ว่าวงกักเก็บอิเล็กตรอนประกอบไปด้วยโครงสร้างชุดแม่เหล็กแบบ DBA จำนวน 4 ชุด และสังเกตเห็นต่อไปว่าจุดที่มีลูกศรชี้ซึ่งเป็นจุดเชื่อมต่อระหว่างโครงสร้างชุดแม่เหล็กชุดแรกกับชุดสุดท้าย สามารถเชื่อมกันได้อย่างพอดี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของวงกักเก็บอิเล็กตรอนมีความถูกต้อง

```
>> LATTICESPL
** Loading SPL lattice in LATTICESPL.m **
** Done **
tune =
      4.7301      2.8400
chrom =
      6.5723      4.0682
```

รูปที่ 3.1 การเรียกใช้งานโปรแกรม Accelerator Toolbox



รูปที่ 3.2 แบบจำลองวงกักเก็บอิเล็กตรอนโดยโปรแกรม Accelerator Toolbox

### 3.2.2 การคำนวณค่าโครมาติซิตีของวงกักเก็บอิเล็กตรอน

การคำนวณค่าโครมาติซิตีของวงกักเก็บอิเล็กตรอนที่สัมพันธ์กับค่ากระแสป้อนแม่เหล็กของแม่เหล็กหกขั้วฟังก์ชัน SF และ SD ด้วยโปรแกรม Accelerator Toolbox (ดังแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก) ทำการคำนวณค่าโครมาติซิตีที่ค่ากระแสป้อนแม่เหล็ก 0-25 แอมแปร์ โดยเพิ่มค่ากระแสขึ้นทีละ 2.5 แอมแปร์ ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณให้ค่าโครมาติซิตีที่กระแสป้อนแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 และได้แสดงผลที่ได้จากการวัดเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.2 (Kwankasem, 2006)

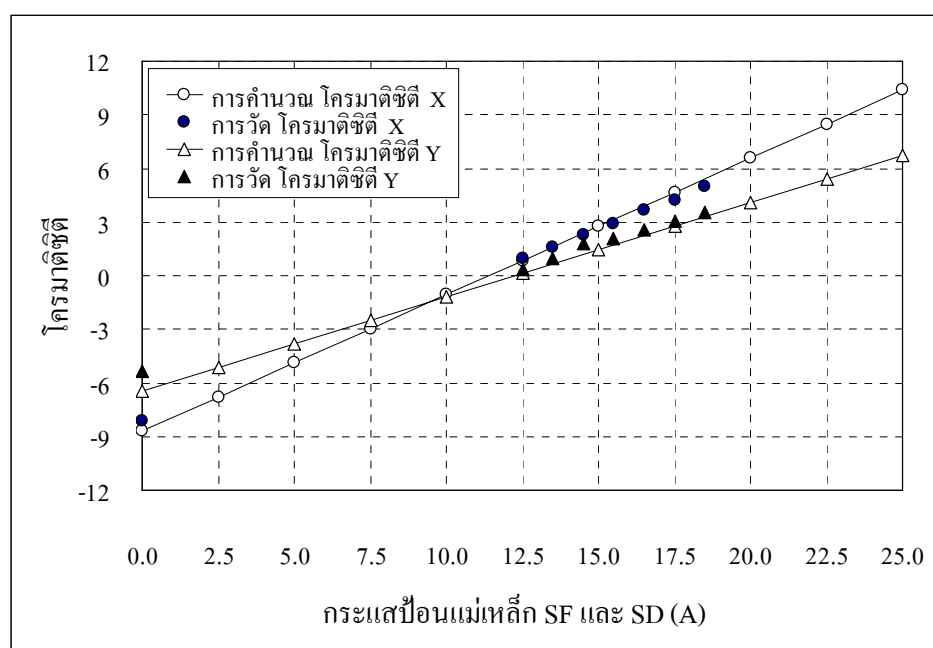
จากผลการคำนวณและการวัดที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.1 และ 3.2 ให้ความสัมพันธ์ระหว่างโครมาติซิตีกับกระแสป้อนแม่เหล็ก แสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 3.3 จะสังเกตเห็นได้ว่าผลการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับการวัด ซึ่งปัจจุบันวงกักเก็บอิเล็กตรอนระดับพลังงาน 1.2 GeV ของเครื่องกำเนิดแสงสยาม ใช้งานแม่เหล็กหกขั้วฟังก์ชัน SF ที่ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก 1,760 แอมแปร์-รอบ และแม่เหล็กหกขั้วฟังก์ชัน SD ที่ค่าแรงเคลื่อนแม่เหล็ก 1,980 แอมแปร์-รอบ ดังนั้นการกำหนดค่าฟลักตแรงเคลื่อนแม่เหล็กของแม่เหล็กหกขั้วเพื่อให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งานในวงกักเก็บอิเล็กตรอนระดับพลังงาน 1.2 GeV จะใช้ค่าฟลักตแรงเคลื่อนแม่เหล็กใหม่ที่ค่า 2,200 แอมแปร์-รอบ

ตารางที่ 3.1 โครมาติซิตีของวงกักเก็บอิเล็กตรอนที่กระแสป้อนแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Accelerator Toolbox

กระแสป้อนแม่เหล็ก SF และ SD (A)	โครมาติซิตี X ( $\xi_x$ )	โครมาติซิตี Y ( $\xi_y$ )
0	-8.6912	-6.4708
2.5	-6.7830	-5.1532
5.0	-4.8750	-3.8357
7.5	-2.9670	-2.5182
10.0	-1.0590	-1.2008
12.5	0.8489	0.1166
15.0	2.7567	1.4338
17.5	4.6645	2.7511
20.0	6.5723	4.0682
22.5	8.4800	5.3853
25.0	10.3905	6.7014

ตารางที่ 3.2 โครมาติซิตีของวงกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ที่กระแสป้อนแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการวัด

กระแสป้อนแม่เหล็ก SF และ SD (A)	โครมาติซิตีแกน X ( $\zeta_x$ )	โครมาติซิตีแกน Y ( $\zeta_y$ )
0	-8.0912	-5.3748
12.5	0.9450	0.3564
13.5	1.5978	0.9592
14.5	2.2818	1.7870
15.5	2.8815	2.1149
16.5	3.6499	2.5834
17.5	4.2652	3.0613
18.5	4.9898	3.5673



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างโครมาติซิตีกับกระแสป้อนแม่เหล็ก

### 3.3 การคำนวณสนามแม่เหล็ก

แม่เหล็กหกขั้วที่ได้รับการออกแบบขดลวดแม่เหล็กใหม่ จะถูกนำไปติดตั้งใช้งานในวงกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์พร้อมกับแม่เหล็กหกขั้วตัวอื่นที่ใช้งานในฟังก์ชันเดียวกัน ซึ่งในฟังก์ชันการทำงาน

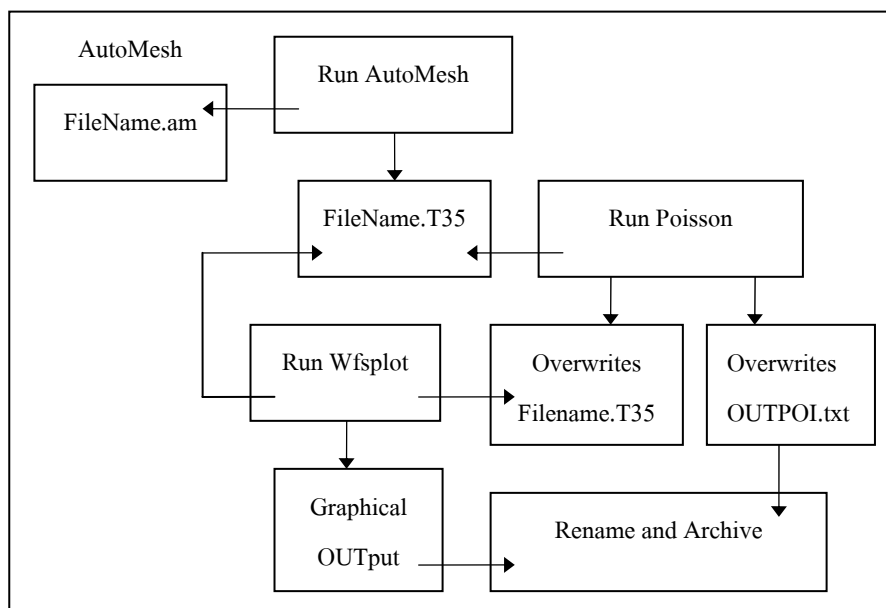


หนึ่งจะประกอบด้วยแม่เหล็กทั้งหมด 8 ตัว ใช้แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าร่วมกัน คือ ต่อวงจรแม่เหล็กแบบอนุกรมกันเพื่อให้ค่าสนามแม่เหล็กเท่ากันทุกตัว การออกแบบขดลวดแม่เหล็กหุ้มขั้วใหม่ค่าสนามแม่เหล็กจึงเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญมาก ซึ่งการคำนวณได้ใช้โปรแกรม POISSON คำนวณสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ คือมิติ XY และใช้โปรแกรม RADIA คำนวณสนามแม่เหล็กแบบสามมิติ คือมิติ XYZ ผลที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรมทั้งสองจะให้พารามิเตอร์ของการออกแบบขดลวดแม่เหล็กใหม่ และพารามิเตอร์ดังกล่าวจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กด้วยโปรแกรม COSMOSWorks ต่อไป

### 3.3.1 การคำนวณสนามแม่เหล็กโดยโปรแกรม POISSON

การคำนวณสนามแม่เหล็กในมิติ XY โดยใช้โปรแกรม POISSON (version 7.16) ซึ่งโปรแกรมถูกพัฒนาขึ้นเพื่อสนับสนุนการออกแบบแม่เหล็ก เส้นรอบรูปขั้วแม่เหล็ก (pole contour) โครงสร้างแม่เหล็ก (yoke) เพื่อให้ได้ขนาดและความเป็นรูปแบบเดียวกันของสนามแม่เหล็ก ซึ่งมีความจำเป็นต่อการบังคับลำอิเล็กตรอน และการออกแบบยังมีปัจจัยอื่นเข้ามาเกี่ยวข้องอีก ได้แก่ กระแสป้อนแม่เหล็ก ขนาดขดลวดแม่เหล็ก และตำแหน่งการติดตั้งขดลวด การคำนวณด้วยโปรแกรม POISSON เรียกใช้โปรแกรมย่อยต่าง ๆ ได้แก่ โปรแกรมย่อย “Automesh” สำหรับสร้างพารามิเตอร์อินพุตให้กับโปรแกรม (ดังแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข) โปรแกรมย่อย “Poisson” สำหรับคำนวณสนามแม่เหล็ก โปรแกรมย่อย “Wfsplot” สำหรับแสดงเอาต์พุตในรูปของกราฟฟิก ซึ่งขั้นตอนการทำงาน แสดงได้ดังแผนภาพรูปที่ 3.4 (Tanabe, 2005) จะสังเกตเห็นว่าโปรแกรมย่อย “Automesh” ทำงานโดยมีอินพุตเป็นไฟล์ข้อความ “FileName.am” แล้วสร้างไฟล์เอาต์พุตที่มีชื่อเดียวกันกับไฟล์อินพุต “FileName.T35” ซึ่งจะใช้เป็นอินพุตให้กับโปรแกรมย่อย “Poisson” และ “Wfsplot” เมื่อโปรแกรมย่อย “Poisson” ทำงานจะให้เอาต์พุตเป็นไฟล์ข้อความ “OUTPOL.txt” และจะบันทึกข้อมูลทับไฟล์ “FileName.T35” ซึ่งจะใช้เป็นอินพุตให้กับโปรแกรมย่อย “Wfsplot” ต่อไป และเมื่อโปรแกรมย่อย “Wfsplot” ทำงาน เอาต์พุตที่ได้คือกราฟฟิกรูปทรงเรขาคณิตของแม่เหล็ก และแสดงเส้นฟลักซ์แม่เหล็ก

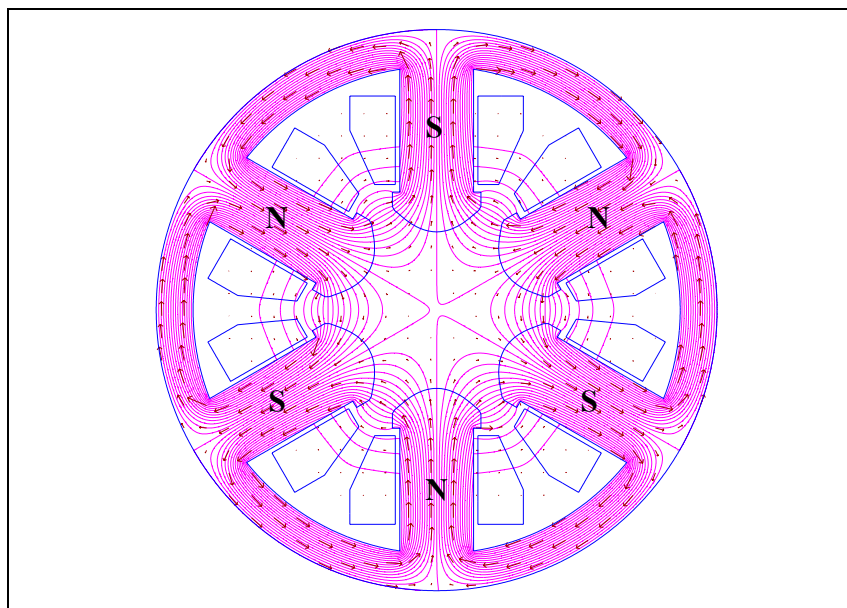
การออกแบบขดลวดแม่เหล็กหุ้มขั้วใหม่จะใช้โครงสร้างแม่เหล็กหุ้มขั้วชุดเดิม คือแม่เหล็กหุ้มขั้วฟังก์ชัน SD ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.12 ซึ่งมีติของโครงสร้างแม่เหล็กมีความสำคัญที่ต้องใช้เป็นพารามิเตอร์อินพุตของโปรแกรมย่อย “Automesh” และได้กำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับการออกแบบขดลวดแม่เหล็กหุ้มขั้วใหม่ ดังนี้ พิกัดกระแสป้อนแม่เหล็ก 20 แอมแปร์ จำนวนรอบการพันขดลวดแม่เหล็ก 110 รอบต่อขั้ว และขนาดเส้นลวดที่ใช้พันขดลวดแม่เหล็ก 2.8 x 5.0 ตารางมิลลิเมตร ซึ่งขนาดของเส้นลวดที่เลือกใช้มีความเหมาะสม เมื่อพันเป็นขดลวดแม่เหล็กแล้วจะติดตั้งเข้ากับโครงสร้างแม่เหล็กชุดเดิมได้ และพารามิเตอร์เหล่านี้จะก่อให้เกิดความแรงสนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากับแม่เหล็กหุ้มขั้วตัวอื่นที่ทำงานในฟังก์ชันเดียวกัน



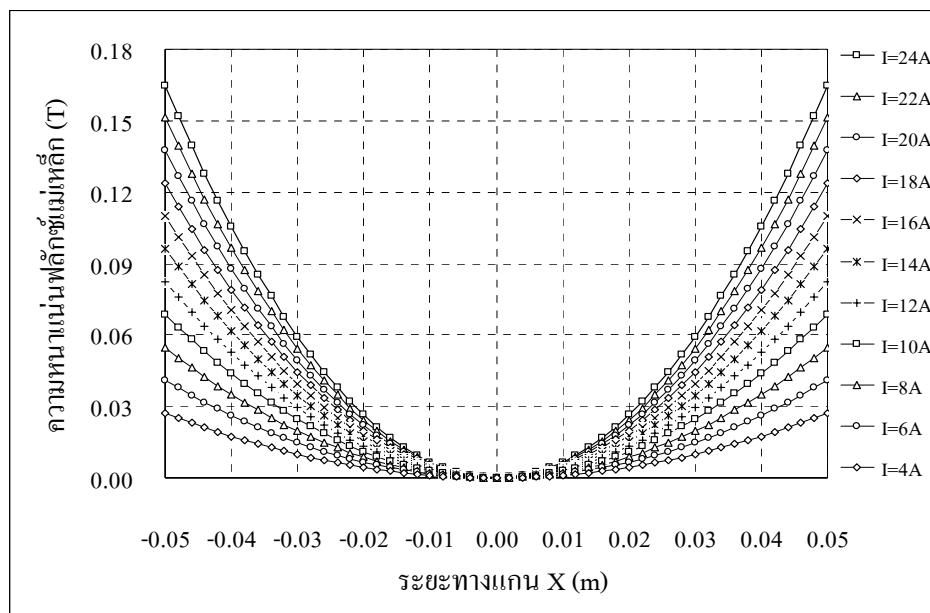
รูปที่ 3.4 แผนภาพขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม POISSON

ผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม POISSON สามารถแสดงทิศทางการไหลของเส้นฟลักซ์แม่เหล็กภายใน โครงสร้างแม่เหล็กหกขั้ว แสดงได้ดังรูปที่ 3.5 จะสังเกตเห็นว่าลักษณะของฟลักซ์แม่เหล็กมีความแตกต่างกันในเชิงของความหนาแน่น บริเวณที่มีความหนาแน่นของเส้นฟลักซ์แม่เหล็กสูงจะให้ค่าสนามแม่เหล็กสูงด้วย ซึ่งสังเกตเห็นต่อไปว่าเส้นฟลักซ์แม่เหล็กไหลออกจากขั้วแม่เหล็กที่ตำแหน่งมุม 30, 150 และ 270 องศา และไหลเข้าขั้วแม่เหล็กที่ตำแหน่งมุม 90, 210 และ 330 องศา อาจกล่าวได้ว่าฟลักซ์แม่เหล็กมีทิศทางการไหลจากขั้วเหนือเข้าหาขั้วใต้เสมอ และขอบเขตของสนามแม่เหล็กที่นำไปใช้งานในการบังคับลำอิเล็กตรอน คือบริเวณที่เป็นช่องว่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก

ผลที่ได้จากการคำนวณให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับระยะทางแกน X ที่  $Y=0$  และค่ากระแสป้อนแม่เหล็ก 4-24 แอมแปร์ แสดงได้ดังรูปที่ 3.6 จะสังเกตเห็นว่ากราฟความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีรูปทรงแบบพาราโบลาเมื่อพิจารณาตามระยะทางแกน X และที่จุดศูนย์กลางแม่เหล็กที่  $X=0$  ให้ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเป็นศูนย์ และสังเกตเห็นต่อไปว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กแปรผันกับค่ากระแสป้อนแม่เหล็ก ในลักษณะการแปรผันตรง ซึ่งผลจากกราฟในรูปที่ 3.6 คำนวณค่าความแรงสนามแม่เหล็กดังสมการที่ (2-7) โดยอาศัยฟังก์ชันพหุนามที่ได้จากการถดถอยเชิงเลข ผลที่ได้จากการคำนวณให้ค่าความแรงสนามแม่เหล็กที่กระแสป้อนแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.3 จะสังเกตเห็นได้ว่าความแรงสนามแม่เหล็กกับกระแสป้อนแม่เหล็กมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น



รูปที่ 3.5 การไหลของเส้นฟลักซ์แม่เหล็กภายในโครงสร้างแม่เหล็กหกขั้ว  
โดยโปรแกรม POISSON



รูปที่ 3.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับระยะทางแกน X  
ที่  $Y=0$  และกระแสป้อนแม่เหล็ก 4-24 แอมแปร์

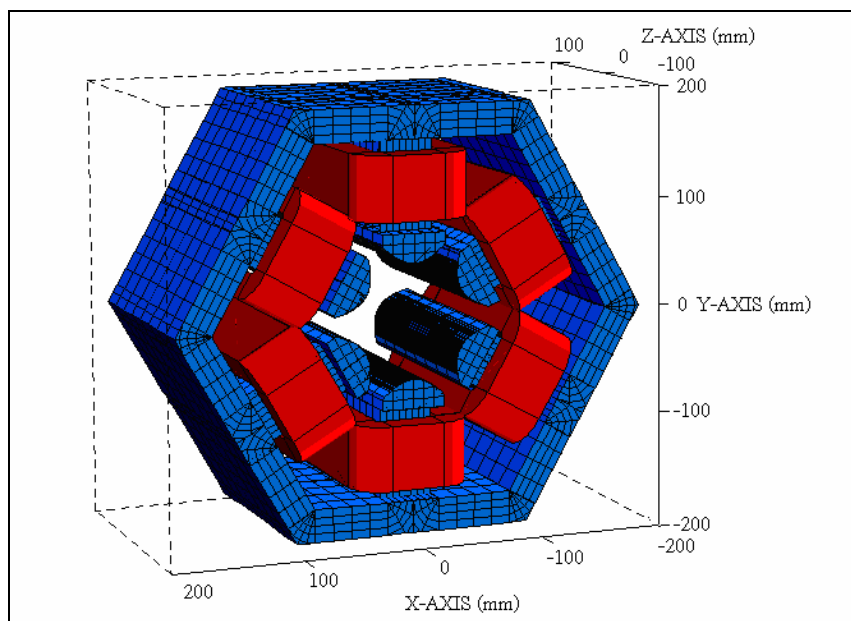
ตารางที่ 3.3 ความแรงสนามแม่เหล็กที่กระแสนแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณ  
ด้วยโปรแกรม POISSON

กระแสนแม่เหล็ก (A)	ความแรงสนามแม่เหล็ก (T/m <sup>2</sup> )
4	21.8420
6	32.7948
8	43.7926
10	54.8240
12	65.8548
14	76.8848
16	87.9088
18	98.9258
20	109.9340
22	120.9304
24	131.9142

### 3.3.2 การคำนวณสนามแม่เหล็กโดยโปรแกรม RADIA

การคำนวณสนามแม่เหล็กในมิติ XYZ โดยใช้โปรแกรม RADIA (version 4.1) ใช้งานร่วมกับ MATHEMATICA (version 5.1) ซึ่งโปรแกรมถูกพัฒนาขึ้นเพื่อสนับสนุนการคำนวณสนามแม่เหล็กทั้งสามมิติ โดยเฉพาะในมิติ Z ที่โปรแกรม POISSON ไม่อาจคำนวณให้ได้ ซึ่งสนามแม่เหล็กในมิติ Z จะบอกถึงช่วงความยาวสนามแม่เหล็กที่มีผลต่อการบังคับลำอิเล็กตรอน โปรแกรม RADIA สำหรับใช้คำนวณสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กหกขั้ว (ดังแสดงรายละเอียดในภาคผนวก ก) และได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณเหมือนกันกับที่ใช้คำนวณด้วยโปรแกรม POISSON

ผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรม RADIA สามารถแสดงแบบจำลองของแม่เหล็กหกขั้วแบบสามมิติ แสดงได้ดังรูปที่ 3.7 จะสังเกตเห็นว่าโปรแกรมสามารถแสดงโครงสร้างแม่เหล็กหกขั้วได้ทั้งสามมิติ โดยการคำนวณด้วยโปรแกรม POISSON จะคำนวณสนามแม่เหล็กในมิติ XY ที่ Z=0 ส่วนการคำนวณด้วยโปรแกรม RADIA จะคำนวณสนามแม่เหล็กในมิติ XYZ ที่ค่า Z จาก  $-\infty$  ถึง  $+\infty$



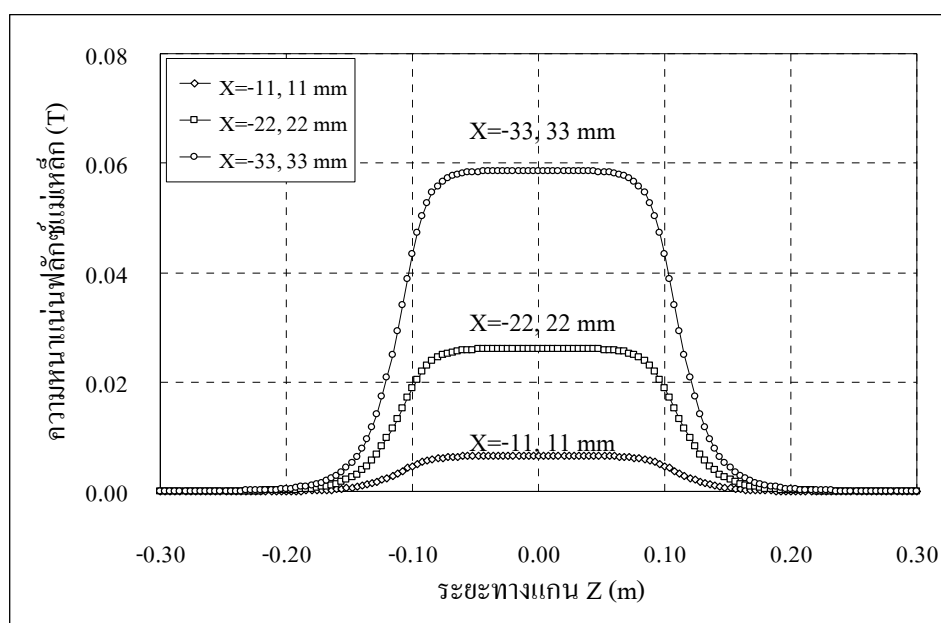
รูปที่ 3.7 แบบจำลองแม่เหล็กหกขั้วโดยโปรแกรม RADIA

ผลที่ได้จากการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับระยะทางแกน X ที่  $Y=0$  และค่ากระแสขดลวดแม่เหล็ก 4-24 แอมแปร์ ให้ค่าความแรงสนามแม่เหล็กที่กระแสขดลวดแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.4 จะสังเกตเห็นได้ว่าความแรงสนามแม่เหล็กมีความสัมพันธ์กับกระแสขดลวดแม่เหล็กแบบเชิงเส้น

ผลที่ได้จากการคำนวณในมิติ Z ที่  $Y=0$  และที่ค่า X ห่างจากศูนย์กลางแม่เหล็กเท่ากับ -33, -22, -11, 11, 22 และ 33 มิลลิเมตร ที่ค่ากระแสขดลวดแม่เหล็ก 20 แอมแปร์ ให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับระยะทางแกน Z แสดงได้ดังรูปที่ 3.8 จะสังเกตเห็นว่าที่ X เท่ากับ -11 มิลลิเมตร และที่ X เท่ากับ 11 มิลลิเมตร จะให้ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเท่ากัน และเมื่อ X ห่างออกจากจุดศูนย์กลางแม่เหล็กมากขึ้นค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กจะมากขึ้นด้วย และสังเกตเห็นต่อไปว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าคงที่ช่วงหนึ่งที่บริเวณตอนกลางของแม่เหล็ก และมีค่าลดลงตามระยะห่างจากจุดกลางแม่เหล็ก ซึ่งกราฟในรูปที่ 3.8 แสดงให้เห็นถึงความสมมาตรของสนามแม่เหล็กทั้งแกน X และแกน Z และเมื่อคำนวณความยาวสนามแม่เหล็กดังสมการที่ (2-8) จากกราฟทั้งสาม โดยวิธีการอินทิเกรตเชิงเลข ให้ค่าความยาวสนามแม่เหล็กเท่ากัน คือ 230 มิลลิเมตร โดยที่ความยาวสนามแม่เหล็กขนาดดังกล่าวมีระยะทางจากแกน Z ที่ -115 มิลลิเมตร ถึง +115 มิลลิเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าความยาวสนามแม่เหล็กอาจมีค่าคงที่ตลอดแนวแกน X

ตารางที่ 3.4 ความแรงสนามแม่เหล็กที่กระแสแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณ  
ด้วยโปรแกรม RADIA

กระแสแม่เหล็ก (A)	ความแรงสนามแม่เหล็ก (T/m <sup>2</sup> )
4	21.6306
6	32.4286
8	43.2208
10	54.0046
12	64.7528
14	75.5362
16	86.2768
18	96.9894
20	107.6782
22	118.3322
24	128.9384



รูปที่ 3.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับระยะทางแกน Z  
ที่  $Y=0$  และค่ากระแสแม่เหล็ก 20 แอมแปร์

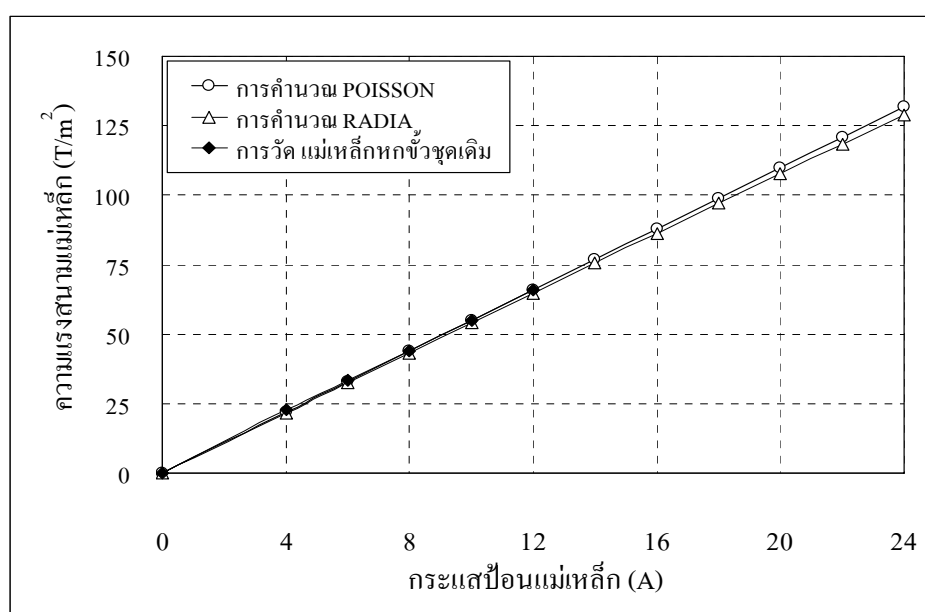
ผลที่ได้จากการคำนวณในมิติ Z ที่  $Y=0$  และที่ค่า X ห่างจากจุดศูนย์กลางแม่เหล็กเท่ากับ 33 มิลลิเมตร ที่ค่ากระแสป้อนแม่เหล็ก 4-24 แอมแปร์ ให้ค่าความยาวสนามแม่เหล็กที่กระแสป้อนแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.5 จะสังเกตเห็นว่าความยาวสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากอาจไม่ขึ้นกับค่ากระแสป้อนแม่เหล็ก

ตารางที่ 3.5 ความยาวสนามแม่เหล็กที่กระแสป้อนแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม RADIA

กระแสป้อนแม่เหล็ก (A)	ความยาวสนามแม่เหล็ก (mm)
4	230.18
6	230.17
8	230.16
10	230.15
12	230.14
14	230.13
16	230.12
18	230.10
20	230.08
22	230.06
24	230.05

ผลการคำนวณค่าความแรงสนามแม่เหล็กที่ได้จากโปรแกรม POISSON และโปรแกรม RADIA ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.3 และ 3.4 นำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวัดแม่เหล็กหกขั้วชุดเดิม ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 ให้ผลดังแสดงไว้ในกราฟรูปที่ 3.9 จะสังเกตเห็นว่าการคำนวณโดยโปรแกรมทั้งสองให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน และสังเกตเห็นต่อไปว่าผลที่คำนวณได้จากโปรแกรม POISSON ให้ค่าใกล้เคียงกับการวัดมากกว่าผลที่คำนวณได้จากโปรแกรม RADIA ซึ่งผลการคำนวณโดยโปรแกรม POISSON และ RADIA ให้ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบขดลวดแม่เหล็กหกขั้วใหม่ ดังต่อไปนี้ จำนวนรอบการพันขดลวดแม่เหล็ก 110 รอบต่อขั้ว ขนาดเส้นลวดที่ใช้พันขดลวดแม่เหล็ก 2.8 x 5.0 ตารางมิลลิเมตร และที่ค่าพิกัดกระแสป้อนแม่เหล็ก 20 แอมแปร์ ให้ค่าความแรงสนามแม่เหล็กโดยโปรแกรม POISSON มีค่าเท่ากับ  $109.9340 \text{ T/m}^2$

และโปรแกรม RADIA มีค่าเท่ากับ  $107.6782 \text{ T/m}^2$  และค่าความยาวสนามแม่เหล็กโดยโปรแกรม RADIA มีค่าเท่ากับ 230 มิลลิเมตร ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะนำไปใช้ในการคำนวณค่าอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กด้วยโปรแกรม COSMOSWorks ต่อไป

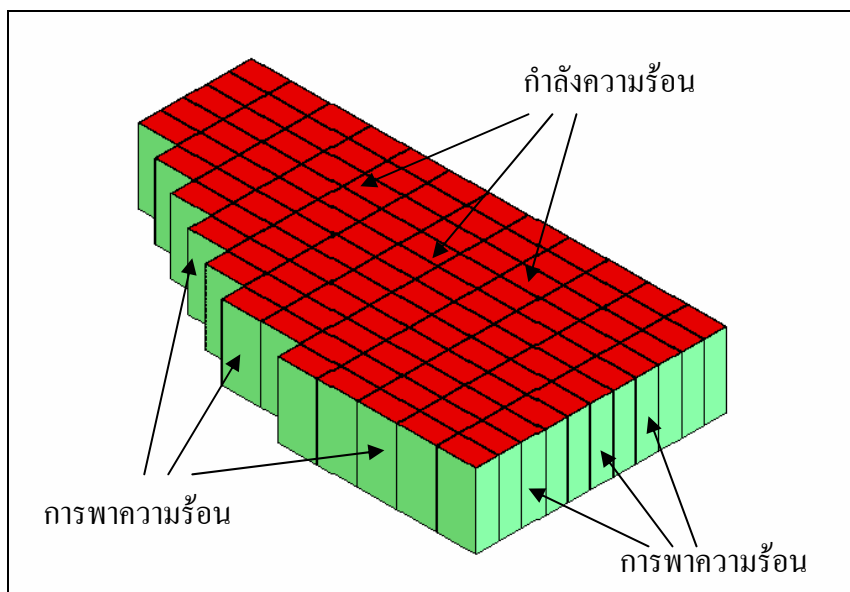


รูปที่ 3.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความแรงสนามแม่เหล็กกับกระแสป้อนแม่เหล็ก  
ที่ได้จากการคำนวณและการวัด

### 3.4 การคำนวณอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กโดยโปรแกรม COSMOSWorks

การคำนวณค่าอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กที่ออกแบบใหม่ ใช้โปรแกรม COSMOSWorks (version 2006) (COSMOSWorks, 2006) ใช้งานร่วมกับ SolidWorks (version 2006) โดยค่าพารามิเตอร์ของขดลวดแม่เหล็กหกขั้วใหม่ที่ใช้ในการคำนวณ ดังต่อไปนี้ พิกัดกระแสป้อนแม่เหล็ก 20 แอมแปร์ จำนวนรอบการพันขดลวดแม่เหล็ก 110 รอบต่อขั้ว และเส้นลวดที่ใช้พันขดลวดแม่เหล็กขนาด  $2.8 \times 5.0$  ตารางมิลลิเมตร และกำหนดความหนาของฉนวนเส้นลวดเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร โปรแกรม SolidWorks จะสร้างขดลวดแม่เหล็กที่ประกอบไปด้วยเส้นลวดจำนวน 110 เส้น โดยความยาวของเส้นลวดแต่ละเส้นมีค่าเท่ากับ 10 มิลลิเมตร ซึ่งการจัดเรียงเส้นลวดแสดงได้ดังรูปที่ 3.10 จะสังเกตเห็นลักษณะการจัดเรียงเส้นลวดดังกล่าว เพื่อให้สามารถติดตั้งขดลวดแม่เหล็กเข้ากับโครงสร้างแม่เหล็กหกขั้วได้ และสังเกตเห็นต่อไปว่าการคำนวณค่าอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็ก โดยตัดขดลวดแม่เหล็กมาทำการคำนวณเพียง 10 มิลลิเมตร เท่านั้น





รูปที่ 3.10 แบบจำลองขดลวดแม่เหล็กหกขั้วโดยโปรแกรม SolidWorks

การคำนวณโดยโปรแกรม COSMOSWorks ใช้การคำนวณแบบ “Transient Thermal Analysis” ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์อินพุตของโปรแกรม ดังนี้ ตัวนำไฟฟ้าของเส้นลวดเลือกใช้วัสดุเป็นทองแดง (copper) ฉนวนไฟฟ้าของเส้นลวดใช้วัสดุเป็นโพลีเอสเตอร์ (polyester) และกำลังความร้อน (heat power) ที่เกิดขึ้นกับเส้นลวดแต่ละเส้น เมื่อได้รับการจ่ายกระแสป้อนแม่เหล็กสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3-1)

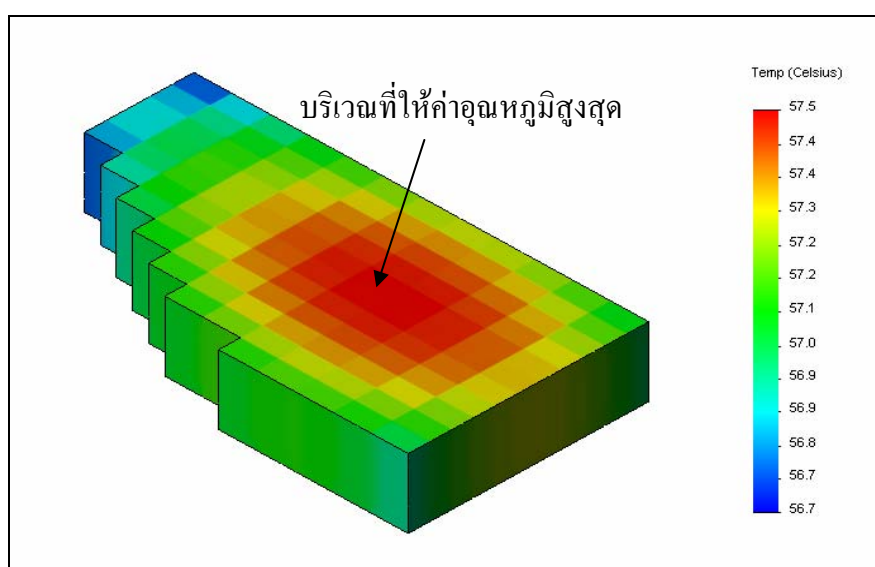
$$P = I^2 R \quad (3-1)$$

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

- โดยที่  $P$  คือ กำลังความร้อน (W)  
 $I$  คือ กระแสป้อนแม่เหล็ก (A)  
 $R$  คือ ความต้านทานของเส้นลวด ( $\Omega$ )  
 $\rho$  คือ ความต้านทานจำเพาะของเส้นลวด ( $\Omega \cdot m$ )  
 $L$  คือ ความยาวของเส้นลวด (m)  
 $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของเส้นลวด ( $m^2$ )

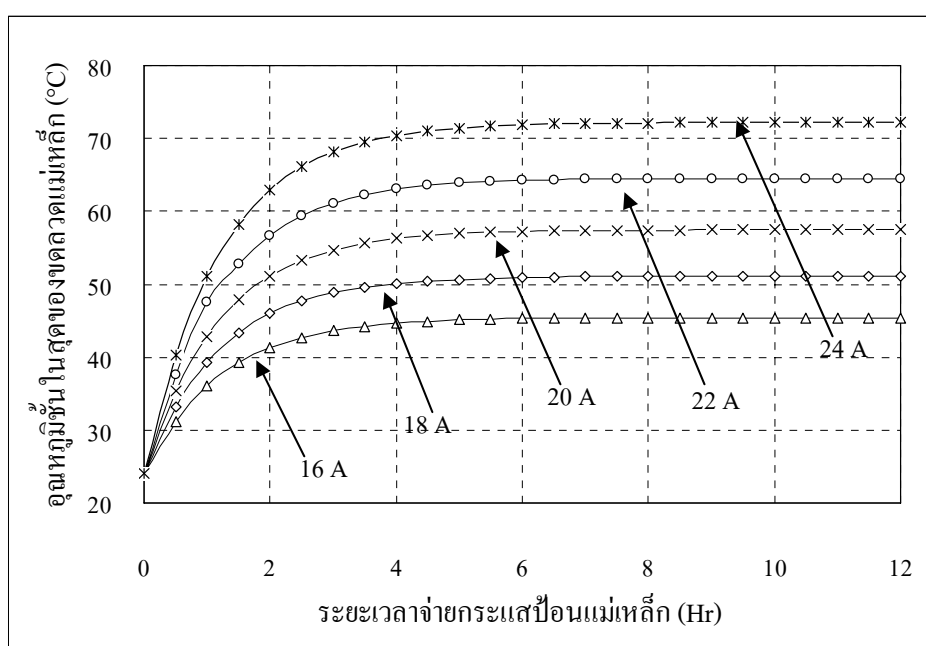
จากสมการที่ (3-1) เมื่อเราทราบค่าความต้านทานจำเพาะของทองแดงที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส มีค่าประมาณ  $17.12 \times 10^{-9}$  โอห์ม-เมตร เพราะฉะนั้นให้ค่าความต้านทานของเส้นลวดต่อเส้นที่อุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส เท่ากับ  $12.23 \times 10^{-6}$  โอห์ม ซึ่งค่าอุณหภูมิ 24 องศาเซลเซียส เป็นมีค่าอุณหภูมิห้องที่จะใช้ทำการทดสอบแม่เหล็กหกขั้ว ตามสภาพการใช้งานจริงที่ศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ เพราะฉะนั้นค่ากำลังความร้อนของเส้นลวดแต่ละเส้นที่อุณหภูมิห้อง ที่ค่ากระแสป้อนแม่เหล็ก 16, 18, 20, 22 และ 24 แอมแปร์ มีค่าเท่ากับ 3.130, 3.962, 4.891, 5.919 และ 7.044 มิลลิวัตต์ ตามลำดับ ในการคำนวณจะให้กำลังความร้อนกับเส้นลวดทุกเส้นเท่ากัน และมีการระบายความร้อนออกจากขดลวดแม่เหล็กที่ผิวด้านข้างโดยรอบทุกด้านด้วยการพาความร้อน (convection) อาจดูได้ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.10 และสัมประสิทธิ์ของการพาความร้อน (convection heat transfer coefficient) ใช้ค่าเท่ากับ  $8.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

ผลที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม COSMOSWorks ที่พิกัดกระแสป้อนแม่เหล็ก 20 แอมแปร์ สามารถแสดงการกระจายอุณหภูมิภายในขดลวดแม่เหล็กหกขั้วเมื่อเข้าสู่ภาวะสมดุล แสดงได้ดังรูปที่ 3.11 จะสังเกตเห็นว่าที่ชั้นในสุดของขดลวดแม่เหล็กมีสีแดงหมายถึงการมีอุณหภูมิสูงสุดประมาณ 57.5 องศาเซลเซียส และที่ผิววนนอกสุดมีสีน้ำเงินหมายถึงการมีอุณหภูมิต่ำสุดประมาณ 56.7 องศาเซลเซียส และจะสังเกตเห็นต่อไปว่าอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กมีค่าลดลงจากชั้นในสุดออกมาหาชั้นนอกสุด



รูปที่ 3.11 การกระจายอุณหภูมิภายในขดลวดแม่เหล็กหกขั้ว ที่ค่าพิกัดกระแสป้อนแม่เหล็ก 20 แอมแปร์ โดยโปรแกรม COSMOSWorks

ผลที่ได้จากการคำนวณที่ค่ากระแสป้อนแม่เหล็ก 16, 18, 20, 22 และ 24 แอมแปร์ ให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิชั้นในสุดของขดลวดแม่เหล็กกับกระแสป้อนแม่เหล็ก แสดงได้ดังรูปที่ 3.12 จะสังเกตเห็นว่าเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 8 ชั่วโมง อุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กเริ่มมีค่าคงที่ และสังเกตเห็นต่อไปว่าเมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง ให้ค่าอุณหภูมิสูงสุดของขดลวดแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ 45.5, 51.1, 57.5, 64.5 และ 72.2 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งค่าพิกัดกระแสป้อนแม่เหล็ก 20 แอมแปร์ ให้อุณหภูมิสูงสุดของขดลวดแม่เหล็กยังมีค่าน้อยกว่าค่าพิกัดการออกแบบอยู่ถึง 2.5 องศาเซลเซียส โดยประมาณ



รูปที่ 3.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิชั้นในสุดของขดลวดแม่เหล็กกับระยะเวลาจ่ายกระแสป้อนแม่เหล็ก ที่ค่ากระแสป้อนแม่เหล็ก 16-24 แอมแปร์

### 3.5 สรุป

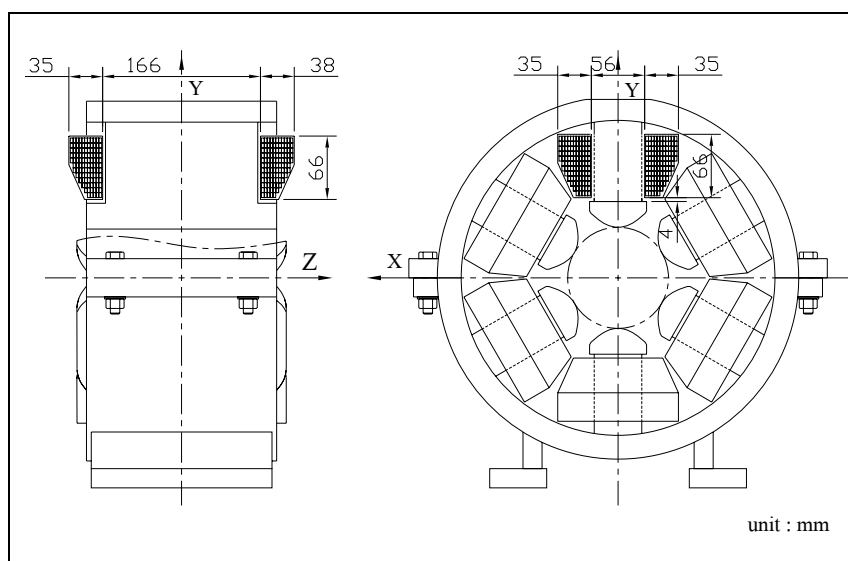
การออกแบบขดลวดแม่เหล็กหกขั้วใหม่โดยใช้โครงสร้างแม่เหล็กหกขั้วชุดเดิม สำหรับวงกักเก็บอิเล็กตรอนระดับพลังงาน 1.2 GeV ของเครื่องกำเนิดแสงสยาม โดยอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูปในการคำนวณ ค่าพิกัดกระแสป้อนแม่เหล็กของแม่เหล็กหกขั้วคำนวณด้วยโปรแกรม Accelerator Toolbox ให้ค่าพิกัดกระแสป้อนแม่เหล็กเท่ากับ 20 แอมแปร์ การคำนวณสนามแม่เหล็กได้ใช้โปรแกรม POISSON และ โปรแกรม RADIA ให้ค่าความแรงสนามแม่เหล็กมีค่าใกล้เคียงกันมากกับผลที่ได้จากการวัดแม่เหล็กหกขั้วชุดเดิม และการคำนวณโดยโปรแกรมทั้งสองให้พารามิเตอร์

ของการออกแบบขดลวดแม่เหล็กหกขั้วใหม่ ดังนี้ พิกัดกระแสป้อนแม่เหล็ก 20 แอมแปร์ จำนวนรอบการพันขดลวดแม่เหล็ก 110 รอบต่อขั้ว ขนาดเส้นลวดที่ใช้พันขดลวดแม่เหล็ก 2.8 x 5.0 ตารางมิลลิเมตร และที่ค่าพิกัดกระแสป้อนแม่เหล็กให้ค่าความแรงสนามแม่เหล็กสูงสุด 109.9340 T/m<sup>2</sup> และความยาวสนามแม่เหล็ก 230 มิลลิเมตร ในการคำนวณอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กที่ออกแบบใหม่โดยโปรแกรม COSMOSWorks ให้ค่าอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กสูงสุดที่ค่าพิกัดกระแสป้อนแม่เหล็ก

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติของแม่เหล็กหกขั้วที่ออกแบบขดลวดแม่เหล็กใหม่ ที่ได้จากการคำนวณ

พิกัดกระแสป้อนแม่เหล็ก (A)	20
พิกัดแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (A.turns)	2,200
พิกัดความแรงสนามแม่เหล็ก (T/m <sup>2</sup> )	109.934
ความยาวสนามแม่เหล็ก (m)	0.230
จำนวนรอบการพันขดลวดต่อขั้ว (รอบ)	110
เส้นลวด (mm)	EIW-2.8x5.0
การระบายความร้อน	อากาศ
พิกัดอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็ก (°C)	60
วัสดุที่ใช้ทำแกนแม่เหล็ก	S10C

หมายเหตุ EIW หมายถึง polyester-imide enameled copper wire



รูปที่ 3.13 แผนภาพแม่เหล็กหกขั้วที่ออกแบบขดลวดแม่เหล็กใหม่

ประมาณ 57.5 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่ามีค่าน้อยกว่าค่าพิกัดออกแบบอยู่ถึง 2.5 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณมีความถูกต้องเหมาะสม และผลการคำนวณเหล่านี้จะได้รับการนำไปเปรียบเทียบกับผลจากการวัด เมื่อจัดสร้างขดลวดแม่เหล็กหุ้มขั้วชุดใหม่แล้วเสร็จและทำการทดสอบคุณสมบัติ ซึ่งได้รวบรวมคุณสมบัติของแม่เหล็กหุ้มขั้วที่ออกแบบขดลวดแม่เหล็กใหม่ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.6 และแผนภาพแม่เหล็กหุ้มขั้วที่ออกแบบขดลวดแม่เหล็กใหม่ แสดงได้ดังรูปที่ 3.13

## บทที่ 4

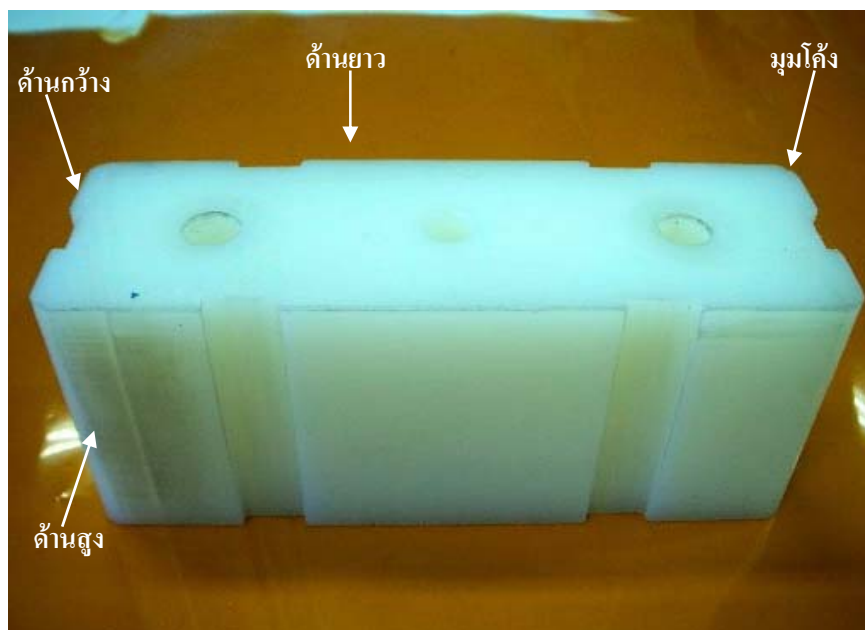
### การสร้างขดลวดแม่เหล็กหุ้มและการปรับเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

#### 4.1 บทนำ

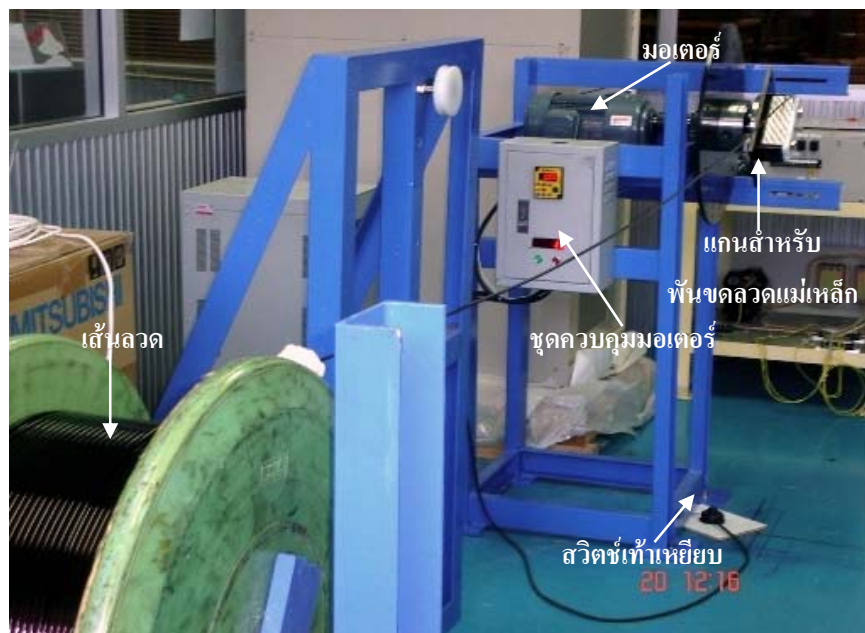
การออกแบบขดลวดแม่เหล็กหุ้มใหม่เพื่อให้สามารถรับพิกัดกระแสป้อนแม่เหล็กได้ 20 แอมแปร์ และอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กไม่สูงเกินค่าพิกัด 60 องศาเซลเซียส ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณที่แสดงไว้ในบทที่ 3 ให้ค่าพารามิเตอร์ขดลวดแม่เหล็กหุ้มใหม่ ดังนี้ พิกัดกระแสป้อนแม่เหล็ก 20 แอมแปร์ จำนวนรอบการพันขดลวดแม่เหล็ก 110 รอบต่อขั้ว และเส้นลวดที่ใช้พันขดลวดแม่เหล็กมีขนาด 2.8 x 5.0 ตารางมิลลิเมตร งานวิจัยนี้เลือกใช้เส้นลวดสำหรับพันขดลวดแม่เหล็กชนิด EIW ใช้งานที่อุณหภูมิสูงสุด 180 องศาเซลเซียส มีคุณสมบัติของการนำไฟฟ้าที่ดี และทนต่อการกัดกร่อนของสารละลายได้ดี ดังนั้นบทที่ 4 นี้ จึงนำเสนอเนื้อหาในเชิงปฏิบัติที่ให้การอธิบายการจัดสร้างขดลวดแม่เหล็กจำนวน 6 ชุด สำหรับแม่เหล็กหุ้มหนึ่งตัว โดยมีขั้นตอนการดำเนินงาน ต่อไปนี้ เริ่มด้วยการพัฒนาชุดพันขดลวดแม่เหล็ก การพันขดลวดแม่เหล็กและการติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิไว้ภายในขดลวดแม่เหล็ก การทำฉนวนไฟฟ้าให้กับขดลวดแม่เหล็ก และการวัดค่าความต้านทานของขดลวดแม่เหล็ก และในบทนี้ยังอธิบายการปรับเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิล ที่ติดตั้งไว้ภายในขดลวดแม่เหล็กตามตำแหน่งต่าง ๆ เพื่อใช้วัดค่าอุณหภูมิ

#### 4.2 การพัฒนาชุดพันขดลวดแม่เหล็กหุ้ม

การพัฒนาชุดพันขดลวดแม่เหล็กจากของเดิมในส่วนงานระบบแม่เหล็กที่ ศช. ที่ประกอบด้วย ชุดควบคุมการหมุนของมอเตอร์และมอเตอร์ โดยดำเนินการดัดแปลงโครงสร้างใหม่ให้เหมาะสมสำหรับการพันขดลวดแม่เหล็กหุ้ม เพิ่มสวิทช์ตรวจวัดจำนวนรอบของการหมุนเพื่อใช้นับจำนวนรอบการพันขดลวดแม่เหล็ก เพิ่มสวิทช์เท้าเหยียบเพื่อใช้ควบคุมการหยุดในขณะพันสร้างชุดจับยึด โครงม้วนเส้นลวดเพื่อทำให้เกิดความตึงของเส้นลวดอย่างสม่ำเสมอขณะพัน สร้างแกนสำหรับพันขดลวดแม่เหล็กหุ้ม โดยมีลักษณะรูปร่างที่จำลองจากขั้วแม่เหล็กของจริงแต่ให้มีขนาดใหญ่กว่า แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งวัสดุที่ใช้เป็นพลาสติกที่มีความแข็งแรงและป้องกันการเกิดรอยขีดข่วนต่อฉนวนของเส้นลวดในขณะพัน แกนสำหรับพันขดลวดแม่เหล็กหุ้มดังกล่าวมีมิติ ดังนี้ ความกว้าง ความยาว และความสูง เท่ากับ 55, 165 และ 70 มิลลิเมตร และรัศมีของมุมโค้ง เท่ากับ 6 มิลลิเมตร ชุดพันขดลวดแม่เหล็กหุ้มที่ประกอบติดตั้งเสร็จ แสดงได้ดังรูปที่ 4.2



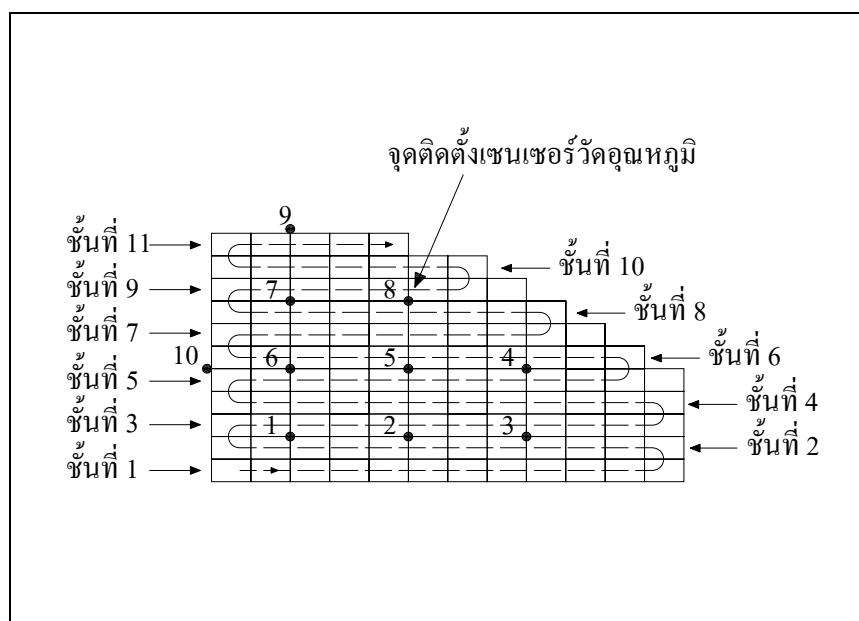
รูปที่ 4.1 แกนสำหรับพิมพ์ขดลวดแม่เหล็กหกขั้ว



รูปที่ 4.2 ชุดพิมพ์ขดลวดแม่เหล็กหกขั้ว

### 4.3 การพันขดลวดแม่เหล็กและการติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

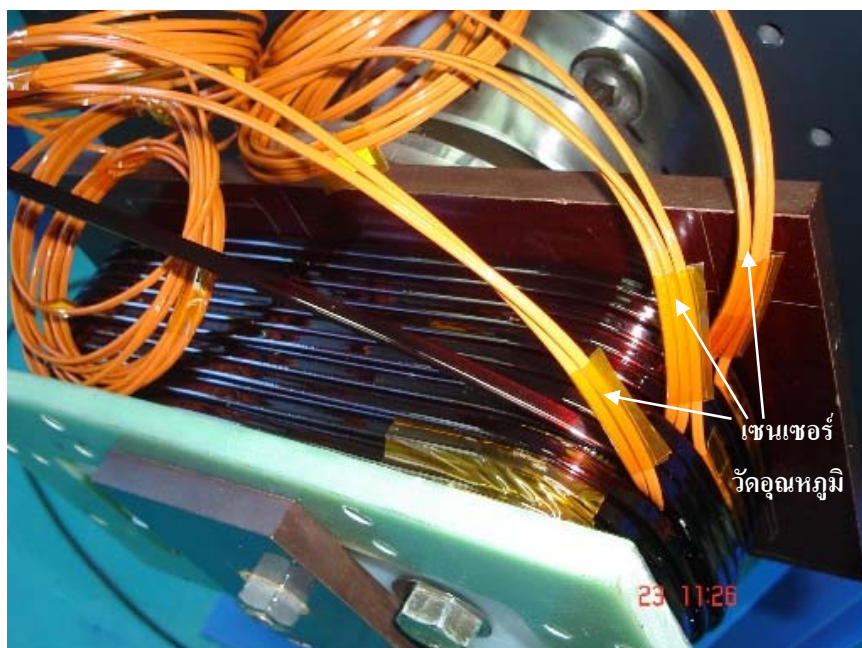
การพันขดลวดแม่เหล็กหุ้มขั้วที่ได้รับการออกแบบใหม่ อาจดูลักษณะของการจัดเรียงเส้นลวดภายในขดลวดแม่เหล็กได้ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.10 และลักษณะการพันขดลวดแม่เหล็กกับตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ แสดงได้ดังรูปที่ 4.3 จะสังเกตเห็นว่าการพันขดลวดจะเริ่มพันจากเส้นลวดเส้นที่ 1 ชั้นที่ 1 พันตามทิศทางทศกึ่งวงรอบ 12 เส้น แล้วจึงพันขดลวดในชั้นถัดไปจนครบทั้งหมด 11 ชั้น และสังเกตเห็นต่อไปว่าเมื่อพันขดลวดถึงชั้นที่ 3 เส้นที่ 2 มีการติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิตำแหน่งที่ 1 ไว้ แล้วจึงพันเส้นลวดเส้นที่ 3 ต่อไป การติดตั้งเซนเซอร์ตำแหน่งต่อไปจะทำลักษณะเดียวกันจนครบทั้ง 8 ตำแหน่ง ส่วนตำแหน่งติดตั้งที่ 9 และ 10 จะติดตั้งหลังจากที่ประกอบขดลวดแม่เหล็กใหม่เข้ากับโครงสร้างแม่เหล็กหุ้มขั้วแล้วเสร็จ



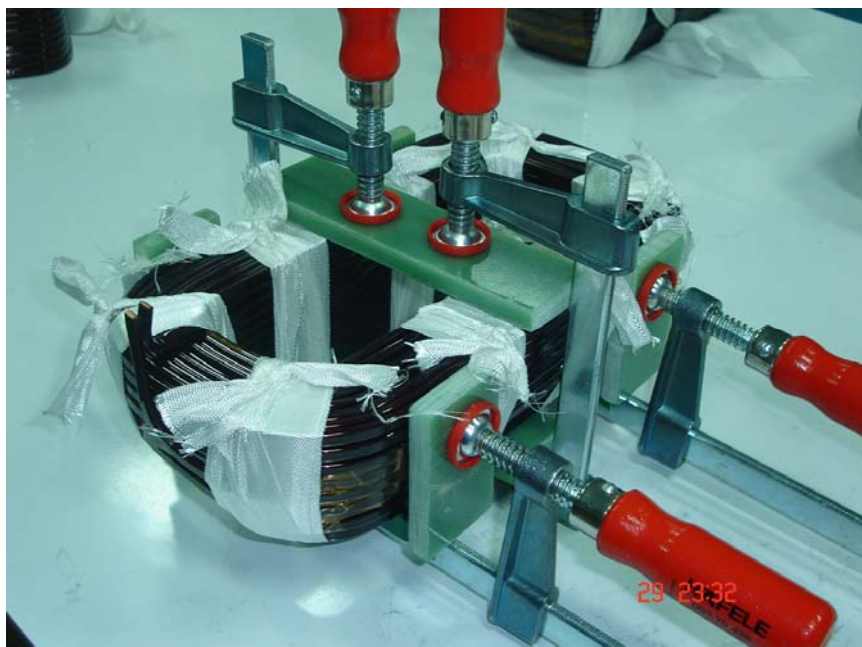
รูปที่ 4.3 ลักษณะการพันขดลวดแม่เหล็กและจุดติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

การดำเนินงานสำหรับการพันขดลวดแม่เหล็กหุ้มขั้วใหม่ สามารถแสดงการพันขดลวดแม่เหล็กขณะพันและมีการติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 จะสังเกตเห็นว่าได้มีการติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิไว้ภายในขดลวดแม่เหล็ก และขดลวดแม่เหล็กที่พันเสร็จจะถูกจะนำมาจัดรูปทรงเพื่อให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ และยึดขดลวดแม่เหล็กให้แน่นด้วยเทปใยแก้วก่อนนำไปทำฉนวนไฟฟ้า แสดงได้ดังรูปที่ 4.5





รูปที่ 4.4 การพันขดลวดแม่เหล็กและมีการติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ



รูปที่ 4.5 การจัดรูปทรงขดลวดแม่เหล็กก่อนนำไปทำฉนวนไฟฟ้า

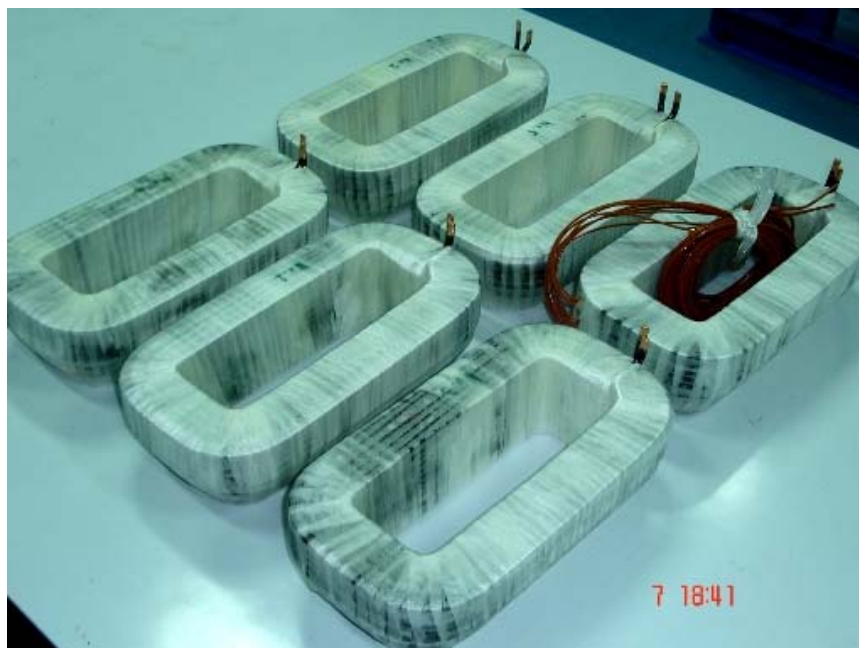
#### 4.4 การทำฉนวนไฟฟ้าและการวัดค่าความต้านทาน

การทำฉนวนไฟฟ้าให้กับขดลวดแม่เหล็กเพื่อป้องกันการเกิดการลัดวงจรไฟฟ้า สร้างความแข็งแรงให้กับขดลวดแม่เหล็ก และป้องกันการเกิดรอยขีดข่วนที่จะก่อให้เกิดความเสียหายต่อขดลวดแม่เหล็กในขณะใช้งาน การทำฉนวนไฟฟ้ามีขั้นตอนดังนี้ นำขดลวดแม่เหล็กที่ได้จัดรูปทรงและยึดให้แน่นด้วยผ้าใยแก้วลงชุบในน้ำยาวานิช แล้วทิ้งไว้ให้แห้งกินเวลาประมาณ 6 ชั่วโมง ขดลวดแม่เหล็กหกขั้วที่ชุบน้ำยวานิชครั้งแรก แสดงได้ดังรูปที่ 4.6 จะสังเกตเห็นว่าขดลวดแม่เหล็กที่ผ่านการชุบด้วยน้ำยาวานิชแล้วจะมีความแข็งแรง จากนั้นนำมาพันด้วยผ้าใยแก้วให้รอบเพื่อเป็นฉนวนไฟฟ้าให้กับขดลวดแม่เหล็ก แล้วนำไปชุบน้ำยวานิชอีกครั้ง ซึ่งจะได้ขดลวดแม่เหล็กหกขั้วหลังทำฉนวนไฟฟ้าเสร็จ แสดงได้ดังรูปที่ 4.7 จะสังเกตเห็นว่าขดลวดแม่เหล็กหกขั้วทั้ง 6 ชุด มีลักษณะรูปร่างที่เหมือนกัน และมีอยู่หนึ่งชุดที่มีการติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิไว้ภายในขดลวดแม่เหล็ก



รูปที่ 4.6 ขดลวดแม่เหล็กหกขั้วหลังการชุบวานิชครั้งแรก

การวัดค่าความต้านทานขดลวดแม่เหล็กหกขั้วหลังทำฉนวนไฟฟ้าแล้วเสร็จ โดยใช้เทคนิคการวัดค่าความต้านทานแบบ 4 สาย เนื่องจากความต้านทานขดลวดแม่เหล็กมีค่าน้อยอยู่ในย่านของมิลลิโอห์ม การวัดค่าความต้านทานขดลวดแม่เหล็กหกขั้ว แสดงได้ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งเครื่องมือวัดค่าความต้านทานที่ใช้ คือ ADVANTEST R6552 digital multimeter และผลการวัดได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าความต้านทานของขดลวดแม่เหล็กทั้ง 6 ชุด มีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.7 ขดลวดแม่เหล็กหกขั้วหลังทำจนวนไฟฟ้า



รูปที่ 4.8 การวัดความต้านทานของขดลวดแม่เหล็กหกขั้ว

ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานของขดลวดแม่เหล็กหกขั้วที่ออกแบบใหม่ ที่ได้จากการวัด

ขดลวดแม่เหล็ก (ชุด)	ค่าความต้านทาน (มิลลิโอห์ม)		
	อ่านค่าครั้งที่ 1	อ่านค่าครั้งที่ 2	ค่าเฉลี่ย
1	77.2	77.0	77.10
2	77.0	77.2	77.10
3	77.2	77.4	77.30
4	77.0	76.9	76.95
5	77.2	77.3	77.25
6	77.1	77.3	77.20

#### 4.5 การเปรียบเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์มอคัปเปิล

งานวิจัยนี้ได้นำเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์มอคัปเปิลมาใช้วัดอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กหกขั้ว โดยการนำเซนเซอร์วัดอุณหภูมิมาใช้งาน ผู้วิจัยได้คำนึงถึงความน่าเชื่อถือในการอ่านค่าอุณหภูมิที่แท้จริงของเซนเซอร์ จึงได้ดำเนินการเปรียบเทียบการวัดค่าอุณหภูมิของเซนเซอร์กับเครื่องมือวัดอุณหภูมิอ้างอิง คือ ANRITSU HA350K digital thermometer โดยได้นำเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์มอคัปเปิลมาทำการเปรียบเทียบจำนวน 4 ชุด ในจำนวนที่นำไปใช้งานทั้งหมด 10 ชุด และได้สร้างชุดเปรียบเทียบอุณหภูมิด้วยการติดเทอร์มอคัปเปิลไว้ที่แผ่นโลหะทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และมีความหนา 4 มิลลิเมตร ตำแหน่งตรงกลางของแผ่นทองแดง ติดตั้งหัววัดอุณหภูมิอ้างอิงไว้ ซึ่งชุดเปรียบเทียบอุณหภูมิที่สร้างขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 4.9 จะสังเกตเห็นว่าเทอร์มอคัปเปิลทั้ง 4 ชุด ถูกยึดติดแน่นกับแผ่นทองแดงด้วยแผ่นพลาสติก และตำแหน่งของเทอร์มอคัปเปิลแต่ละชุดติดตั้งห่างจากหัววัดอุณหภูมิอ้างอิงเท่ากัน การเปรียบเทียบอุณหภูมิมียุ่ขั้นตอน ดังต่อไปนี้ นำชุดเปรียบเทียบอุณหภูมิเข้าสู่ตู้อบความร้อน โดยใช้ LENTON WHT high temperature ovens เพื่อใช้ปรับค่าอุณหภูมิการเปรียบเทียบจาก 30-80 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิของการใช้งานจริง ในการเพิ่มค่าอุณหภูมิของตู้อบความร้อนจะเพิ่มทีละ 5 องศาเซลเซียส และให้ระยะเวลาที่ตู้อบความร้อนทำให้แผ่นทองแดงมีอุณหภูมิเท่ากันทั่วทั้งแผ่นประมาณ 40 นาที แล้วจึงบันทึกค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดอุณหภูมิอ้างอิง และค่าอุณหภูมิที่อ่านได้จากเทอร์มอคัปเปิล โดยใช้เครื่องมืออ่านค่าอุณหภูมิให้กับเซนเซอร์ คือ Agilent 34970A data acquisition/switch unit การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการเปรียบเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์มอคัปเปิล แสดงได้ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.9 ชุดปรับเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์มอคัปเปิล



รูปที่ 4.10 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการปรับเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

การเปรียบเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์มอคัปเปิลทั้ง 4 ชุด ได้ดำเนินการเปรียบเทียบจำนวน 3 ครั้ง และให้ผลการเปรียบเทียบอุณหภูมิ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 ผลที่ได้จากการเปรียบเทียบให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเซนเซอร์วัดอุณหภูมิกับเครื่องมือวัดอุณหภูมิอ้างอิง แสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 4.11 และ 4.12 จะสังเกตเห็นว่ากราฟในรูปที่ 4.11 เป็นการเปรียบเทียบครั้งที่ 1 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิทั้ง 4 ชุด ให้ค่าใกล้เคียงกันมาก และมีลักษณะของกราฟเป็นเชิงเส้นไม่ปรากฏฮิสเตอร์ซิส ซึ่งการเปรียบเทียบครั้งที่ 2 และ 3 ก็ให้ผลเช่นเดียวกัน และสังเกตเห็นต่อไปว่ากราฟในรูปที่ 4.12 เป็นการเปรียบเทียบครั้งที่ 1, 2 และ 3 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิชุดที่ 1 ให้ค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด 3 ครั้ง และมีลักษณะของกราฟเป็นเชิงเส้นไม่ปรากฏฮิสเตอร์ซิส ซึ่งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิชุดที่ 2, 3 และ 4 ก็ให้ผลเช่นเดียวกัน

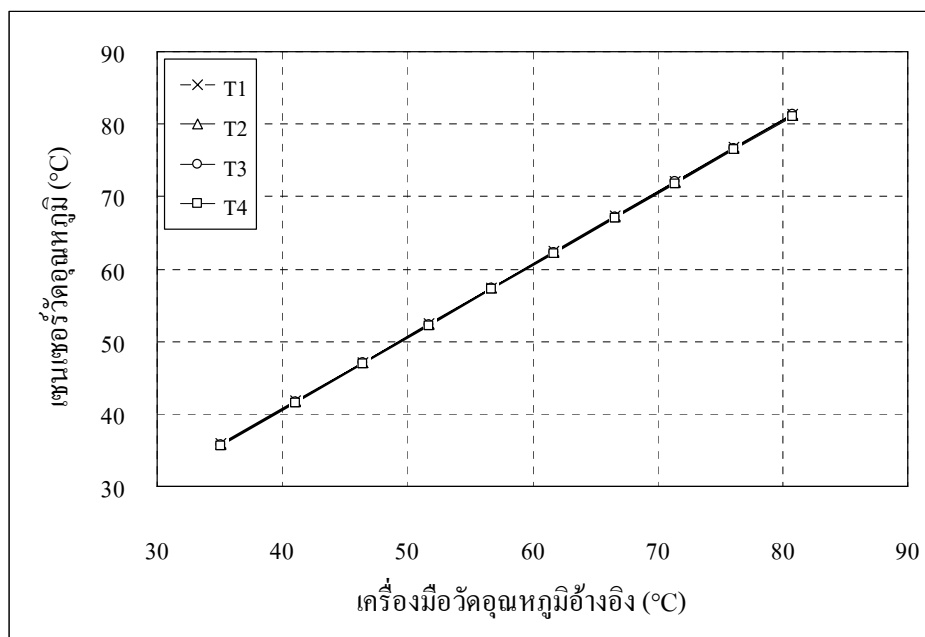
ตารางที่ 4.2 ผลการเปรียบเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์มอคัปเปิล

การเปรียบเทียบครั้งที่ 1					การเปรียบเทียบครั้งที่ 2					การเปรียบเทียบครั้งที่ 3				
M	T1	T2	T3	T4	M	T1	T2	T3	T4	M	T1	T2	T3	T4
35.1	35.9	35.8	35.8	35.7	36.4	37.2	37.1	37.1	36.9	35.9	36.6	36.5	36.5	36.3
41.1	41.8	41.7	41.7	41.5	41.2	41.9	41.8	41.8	41.6	41.0	41.7	41.7	41.7	41.5
46.4	47.1	47.0	47.0	46.8	46.5	47.2	47.1	47.1	46.9	46.5	47.2	47.1	47.1	46.9
51.7	52.5	52.3	52.3	52.2	51.7	52.4	52.3	52.3	52.1	51.7	52.4	52.3	52.3	52.2
56.7	57.4	57.3	57.3	57.1	56.8	57.5	57.4	57.4	57.2	56.8	57.4	57.3	57.3	57.2
61.7	62.4	62.3	62.3	62.2	61.6	62.4	62.2	62.3	62.1	61.7	62.4	62.3	62.3	62.1
66.6	67.3	67.2	67.2	67.0	66.6	67.3	67.2	67.2	67.0	66.6	67.3	67.2	67.2	67.0
71.4	72.1	71.9	72.0	71.8	71.2	72.0	71.8	71.9	71.7	71.4	72.1	72.0	72.0	71.8
76.1	76.8	76.6	76.6	76.4	76.1	76.8	76.6	76.7	76.5	76.1	76.8	76.6	76.7	76.5
80.8	81.4	81.3	81.3	81.1	80.7	81.3	81.2	81.2	81.0	80.8	81.3	81.2	81.2	81.0
71.4	72.0	71.9	72.0	71.7	71.2	71.9	71.8	71.9	71.6	71.4	71.8	71.9	71.9	71.7
61.7	62.4	62.4	62.4	62.1	61.6	62.3	62.3	62.3	62.1	61.7	62.3	62.3	62.3	62.1
51.7	52.4	52.4	52.4	52.1	51.7	52.4	52.4	52.3	52.1	51.7	52.3	52.3	52.3	52.1
41.1	41.8	41.7	41.7	41.5	41.2	41.8	41.6	41.6	41.5	41.0	41.7	41.7	41.6	41.5

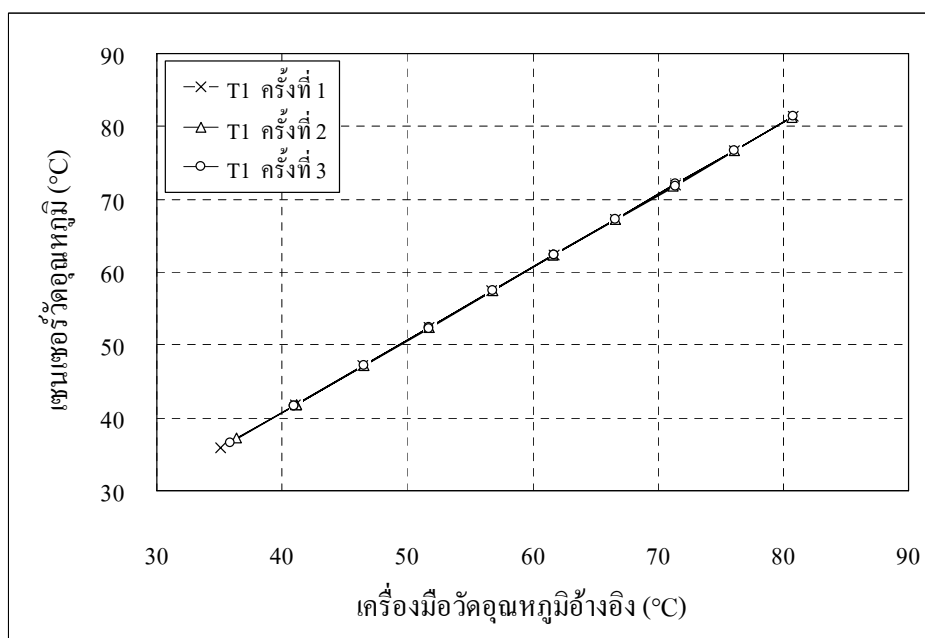
หมายเหตุ M หมายถึง เครื่องมือวัดอุณหภูมิอ้างอิง

T1, T2, T3 และ T4 หมายถึง เซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์มอคัปเปิล ชุดที่ 1, 2, 3 และ 4 ตามลำดับ

ค่าตัวเลขในตารางมีหน่วย องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเซนเซอร์วัดอุณหภูมิกับเครื่องมือวัดอุณหภูมิอ้างอิง การเปรียบเทียบครั้งที่ 1



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเซนเซอร์วัดอุณหภูมิกับเครื่องมือวัดอุณหภูมิอ้างอิง การเปรียบเทียบครั้งที่ 1, 2 และ 3

## บทที่ 5

# การออกแบบและสร้างชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ แบบอัตโนมัติสามแกน

### 5.1 บทนำ

การวัดสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กหกขั้วที่ออกแบบขดลวดใหม่ มีความจำเป็นที่ต้องมีชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กที่มีความละเอียดสูง และสามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งสามทิศทาง ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ที่จะจัดสร้างชุดเครื่องมือวัดดังกล่าว โดยพึ่งพาเทคโนโลยีที่มีอยู่ของศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ (ศช.) ซึ่งได้ข้อสรุปว่ามีความสามารถที่จะจัดสร้างชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กที่สามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งสามทิศทาง และชุดเครื่องมือวัดดังกล่าวสามารถใช้งานได้กับแม่เหล็กชนิดอื่นของเครื่องกำเนิดแสงสยาม โดยการจัดสร้างได้รับการสนับสนุนจาก ศช.

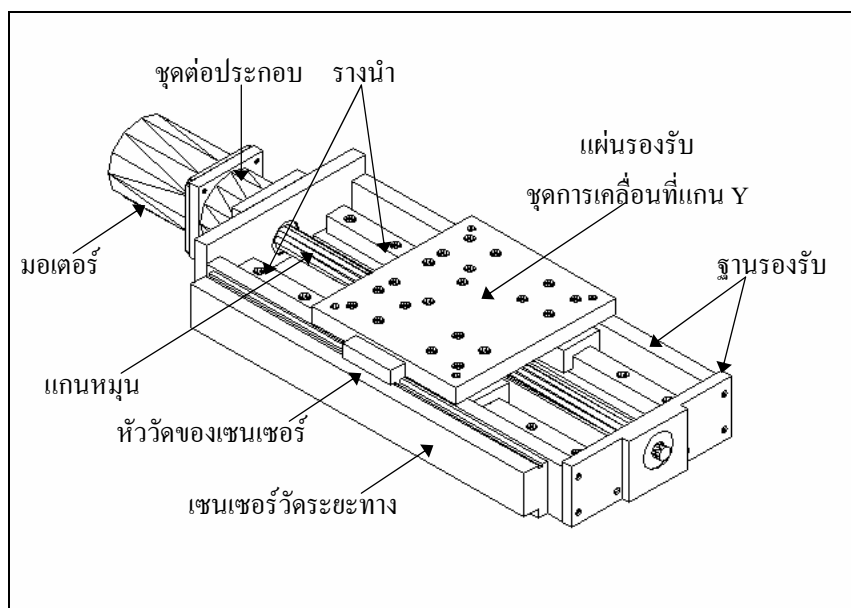
บทนี้จะอธิบายการออกแบบและจัดสร้างชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กที่สามารถเคลื่อนที่ได้แบบอัตโนมัติทั้งสามแกน โดยชุดเครื่องมือวัดดังกล่าวใช้งานกับแม่เหล็กหกขั้ว และแม่เหล็กชนิดอื่นของเครื่องกำเนิดแสงสยาม การออกแบบได้กำหนดคุณสมบัติเบื้องต้น ดังนี้ พิสัยของการเคลื่อนที่แกน X เท่ากับ 0.25 เมตร พิสัยของการเคลื่อนที่แกน Y เท่ากับ 0.25 เมตร พิสัยของการเคลื่อนที่แกน Z เท่ากับ 2.80 เมตร และความคลาดเคลื่อนของการเคลื่อนที่ทั้งสามแกนน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร การออกแบบชุดการเคลื่อนที่ทั้งสามแกนใช้มอเตอร์แบบขั้น (stepping motor) เป็นตัวขับเคลื่อนแบบบอลสกรู (ballscrews) เพื่อทำหน้าที่บังคับให้เกิดการเคลื่อนที่ไปบนรางนำแนวตรง (linear guideways) ที่ติดตั้งไว้แบบคู่ขนาน การวัดระยะทางการเคลื่อนที่ใช้เซนเซอร์วัดระยะทางแบบเชิงเส้น และการวัดสนามแม่เหล็กใช้ชุดวัดสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์โพรบ (hall probe) ติดตั้งไว้ที่ชุดการเคลื่อนที่แกน Y ซึ่งการเขียนโปรแกรมควบคุมแบบอัตโนมัติให้กับชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กดังกล่าวดำเนินการร่วมกับวิศวกรของ ศช.

### 5.2 การออกแบบและสร้างส่วนประกอบ

ชุดการเคลื่อนที่แกน X ซึ่งมีแผนภาพดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.1 มีส่วนประกอบต่าง ๆ ได้แก่ ฐานรองรับใช้ติดตั้งรางนำแนวตรงแบบคู่ขนาน ตรงกลางระหว่างรางนำแนวตรงติดตั้งแกนหมุนแบบบอลสกรูไว้ พร้อมกับติดตั้งมอเตอร์แบบขั้นที่ปลายด้านหนึ่งของแกนหมุนผ่านชุดต่อ



ประกอบ (coupling) เพื่อใช้เป็นตัวจับแกนหมุนบังคับให้เกิดการเคลื่อนที่ ด้านข้างของฐานรองติดตั้งเซนเซอร์วัดระยะทางแบบเชิงเส้น โดยยึดหัววัดของเซนเซอร์เข้ากับแผ่นรองรับชุดการเคลื่อนที่แกน Y โดยที่แผ่นรองรับดังกล่าวติดตั้งอยู่บนรางนำแนวตรงและแกนหมุน การจัดสร้างส่วนประกอบชุดการเคลื่อนที่แกน Y ใช้วัสดุอะลูมิเนียม และจัดสร้างที่โรงเครื่องมือกลของ ศช.

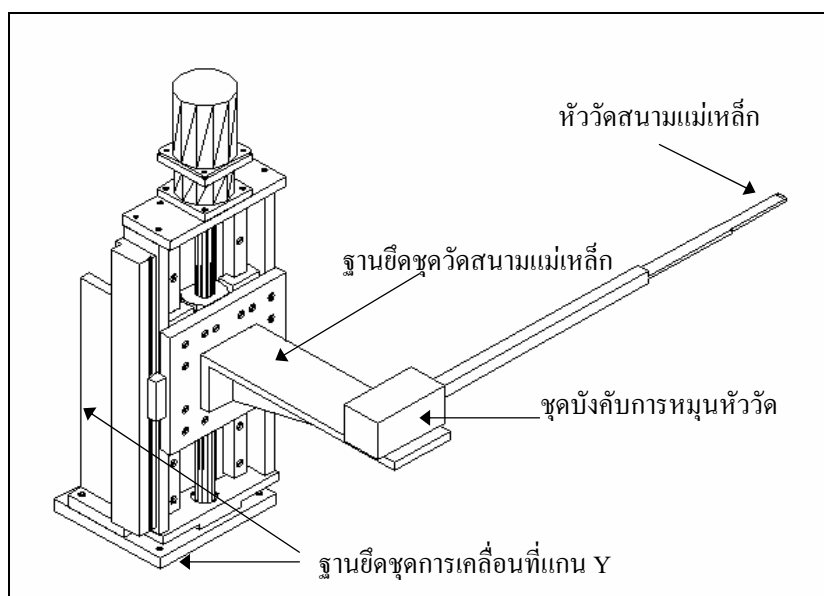


รูปที่ 5.1 แผนภาพชุดการเคลื่อนที่แกน X

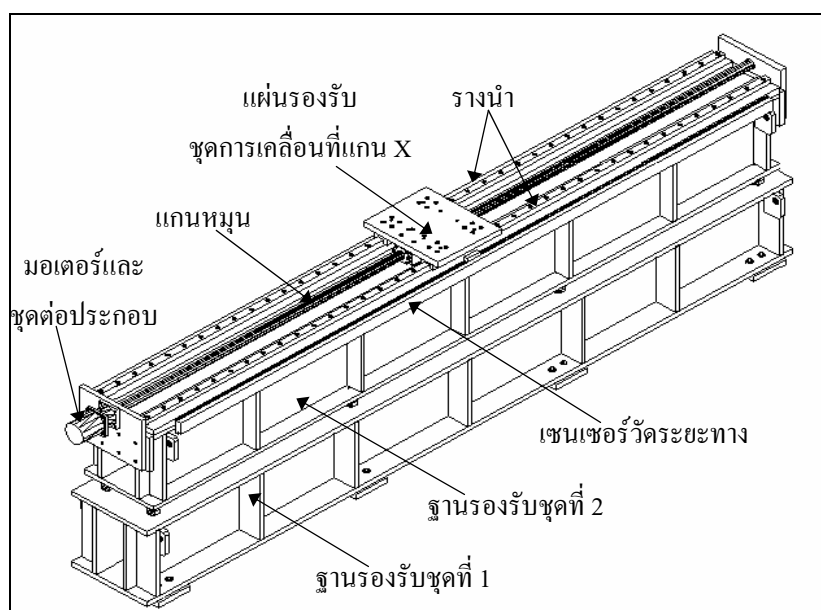
ชุดการเคลื่อนที่แกน Y ซึ่งมีแผนภาพดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.2 มีรูปลักษณะที่คล้ายกับชุดการเคลื่อนที่แกน X โดยติดตั้งชุดการเคลื่อนที่แกน Y เข้ากับฐานยึด และที่บริเวณกลางของชุดการเคลื่อนที่แกน Y ติดตั้งชุดวัดสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์โพรบที่ประกอบด้วย ฐานยึดชุดวัดสนามแม่เหล็ก ชุดบังคับการหมุน และหัววัดสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์โพรบ การจัดสร้างส่วนประกอบชุดการเคลื่อนที่แกน Y ใช้วัสดุอะลูมิเนียม และจัดสร้างที่โรงเครื่องมือกลของ ศช.

ชุดการเคลื่อนที่แกน Z ซึ่งมีแผนภาพดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.3 มีส่วนประกอบต่าง ๆ ได้แก่ ฐานรองรับชุดที่ 1 ติดตั้งกับพื้น และใช้ติดตั้งฐานรองรับชุดที่ 2 โดยใช้เนื้อปรับระดับยึดฐานทั้งสองเข้าด้วยกัน ที่ด้านบนของฐานรองรับชุดที่ 2 ติดตั้งรางนำแนวตรงแบบคู่ขนาน ตรงกลางระหว่างรางนำแนวตรงติดตั้งแกนหมุนแบบบอลส์สกรูไว้ พร้อมกับติดตั้งมอเตอร์แบบขั้นที่ปลายด้านหนึ่งของแกนหมุนผ่านชุดต่อประกอบ เพื่อใช้เป็นตัวจับแกนหมุนบังคับให้เกิดการเคลื่อนที่ ด้านข้างของฐานรองรับชุดที่ 2 ติดตั้งเซนเซอร์วัดระยะทางแบบเชิงเส้น โดยยึดหัววัดของเซนเซอร์เข้ากับแผ่นรองรับชุดการเคลื่อนที่แกน X โดยที่แผ่นรองรับดังกล่าวติดตั้งอยู่บนรางนำแนวตรงและ

แกนหมุน การจัดสร้างฐานรองรับชุดที่ 1 และ 2 ใช้วัสดุเป็นเหล็กโครงสร้างมีความยาวประมาณ 3 เมตร สร้างโดยบริษัทเอกชน ส่วนการจัดสร้างส่วนประกอบชุดการเคลื่อนที่แกน Z ใช้วัสดุอะลูมิเนียม และจัดสร้างที่โรงเครื่องมือกลของ ศช.

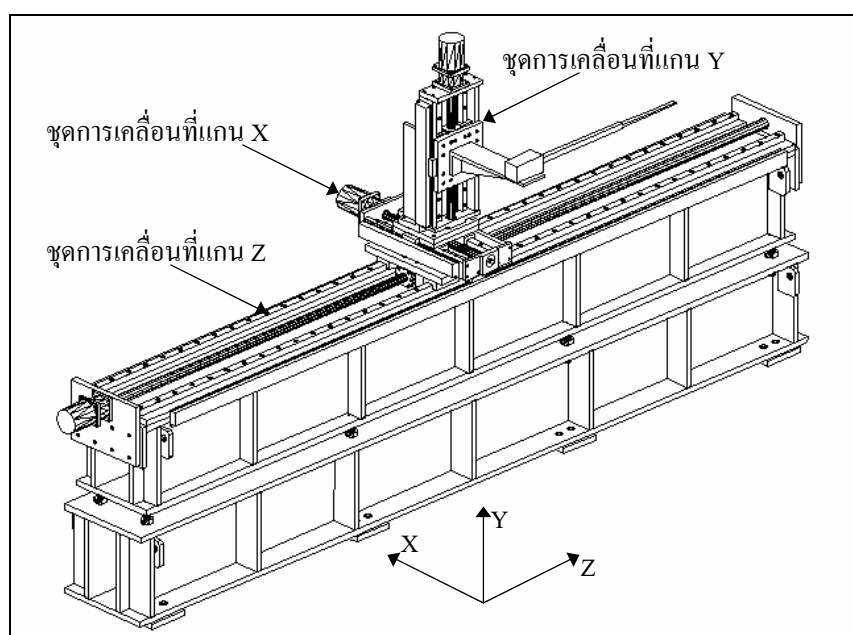


รูปที่ 5.2 แผนภาพชุดการเคลื่อนที่แกน Y



รูปที่ 5.3 แผนภาพชุดการเคลื่อนที่แกน Z

เมื่อดำเนินการประกอบติดตั้งชุดการเคลื่อนที่แกน X ชุดการเคลื่อนที่แกน Y และชุดการเคลื่อนที่แกน Z เข้าด้วยกัน จะได้ชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกน ดังแผนภาพที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 แผนภาพชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกน

### 5.3 การออกแบบและสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติ

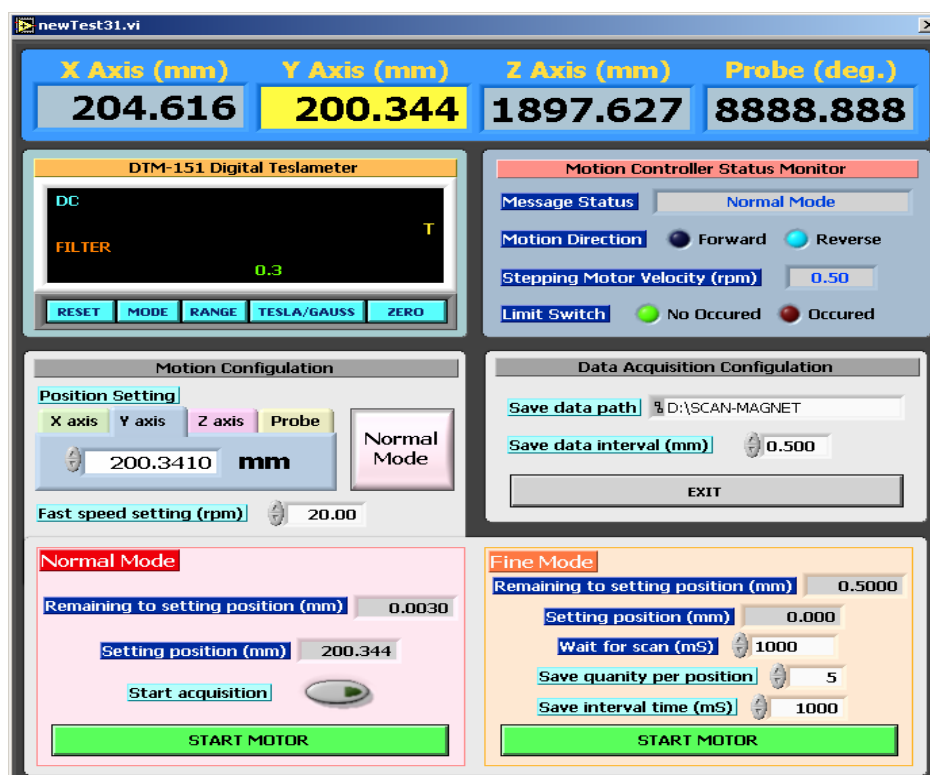
การออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติได้ดำเนินการร่วมกับทีมนักวิชาการของ ศษ. โดยวิศวกรจะเป็นผู้เขียนโปรแกรมและทดสอบระบบควบคุม การเขียนโปรแกรมควบคุมใช้โปรแกรม LabVIEW ซึ่งสามารถแสดงหน้าจอของระบบควบคุมอัตโนมัติได้ดังรูปที่ 5.5 หลักการทำงานของระบบควบคุมอัตโนมัติ มีดังต่อไปนี้

โปรแกรมจะควบคุมมอเตอร์แบบขั้นทั้งสามแกน บังคับให้เกิดการเคลื่อนที่และหยุดตรงตามตำแหน่งที่กำหนด โดยมีเซนเซอร์วัดระยะทางแบบเชิงเส้นเป็นตัวบอกให้มอเตอร์แบบขั้นรู้ว่าอยู่ที่ตำแหน่งไหน และการบันทึกค่าสนามแม่เหล็กของชุดวัดสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์โพรบ จะทำการบันทึกค่าสนามแม่เหล็กพร้อมกับพิกัดตำแหน่ง XYZ พร้อมกัน

การเคลื่อนที่ทั้งสามแกน ต้องกำหนดตำแหน่งเป้าหมายการเคลื่อนที่ และความเร็วของการเคลื่อนที่โดยกำหนดเป็นจำนวนรอบของการหมุนต่อนาที เมื่อการเคลื่อนที่เข้าใกล้ตำแหน่งเป้าหมาย โปรแกรมจะควบคุมให้มอเตอร์แบบขั้นลดความเร็วลงและหยุดตรงตำแหน่งที่กำหนด

การวัดค่าสนามแม่เหล็กแบบโหมดปกติ (normal mode) คือ ต้องกำหนดตำแหน่งเป้าหมายของการเคลื่อนที่ ความเร็วของการเคลื่อนที่ และระยะห่างที่ต้องการให้บันทึกค่าสนามแม่เหล็ก โดยการทำงานชุดการเคลื่อนที่จะเริ่มจากจุดเริ่มต้นและเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมาย และขณะที่เคลื่อนที่ชุดวัดสนามแม่เหล็กจะบันทึกค่าสนามแม่เหล็กทุกระยะห่างที่กำหนดไว้

การวัดค่าสนามแม่เหล็กแบบโหมดค้นหา (find mode) คือ ต้องกำหนดตำแหน่งเป้าหมายของการเคลื่อนที่ ความเร็วของการเคลื่อนที่ ระยะห่างที่ต้องการให้มีการบันทึกค่าสนามแม่เหล็ก และจำนวนครั้งการบันทึกค่าสนามแม่เหล็กต่อจุด โดยการทำงานชุดการเคลื่อนที่จะเริ่มจากจุดเริ่มต้นและเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายที่กำหนด ผ่านเป้าหมายแรกห่างจากจุดเริ่มต้นเท่ากับระยะห่างที่กำหนดไว้ ซึ่งชุดการเคลื่อนที่จะหยุดและทำการบันทึกค่าสนามแม่เหล็กตามจำนวนครั้งที่กำหนดไว้ จากนั้นจะเคลื่อนที่ต่อไปยังเป้าหมายที่สองคือมีระยะห่างออกไปอีกเท่ากับระยะห่างที่กำหนดไว้ จนกว่าจะถึงเป้าหมายสุดท้ายที่กำหนด ชุดการเคลื่อนที่ถึงจะหยุดการทำงาน



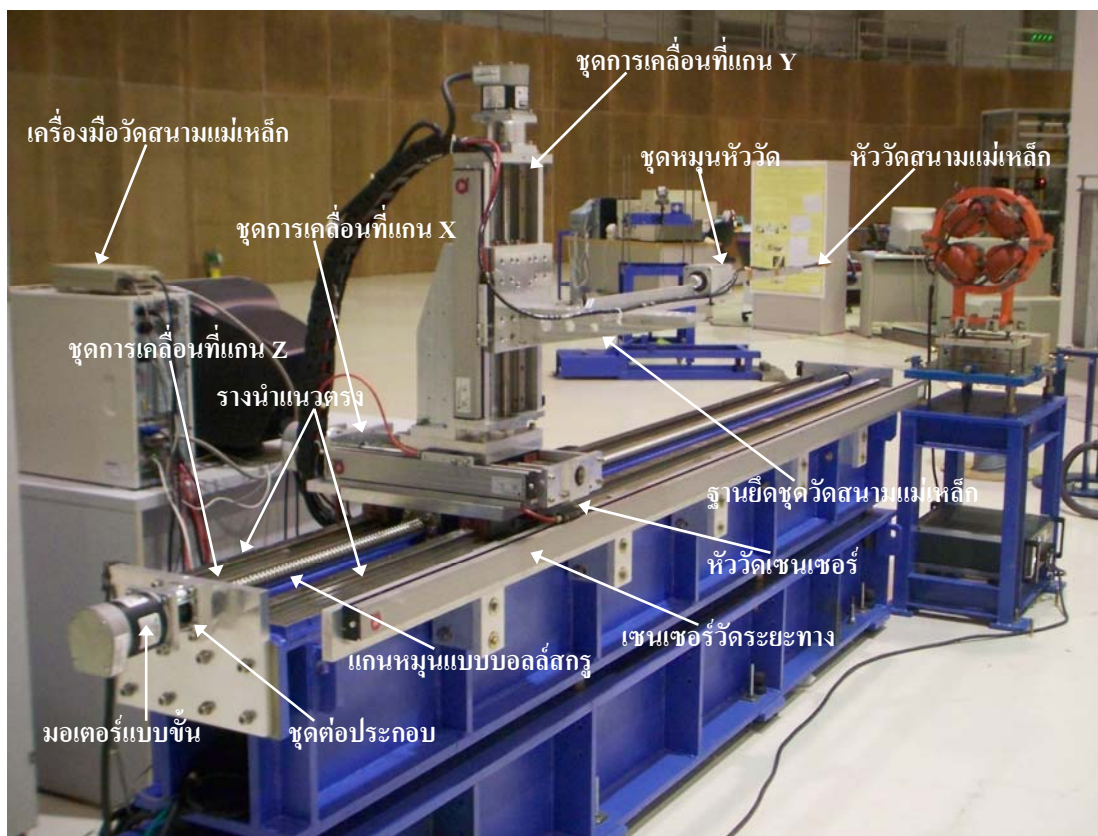
รูปที่ 5.5 หน้าจอระบบควบคุมอัตโนมัติโดยโปรแกรม LabVIEW

## 5.4 การประกอบติดตั้ง

การประกอบติดตั้งชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกน ใช้ อุปกรณ์เครื่องมือร่วมกับส่วนประกอบที่จัดสร้างขึ้น ได้แก่ มอเตอร์แบบขั้น ชุดต่อประกอบ แกน หมุนแบบบอลล์สกรู รางนำแนวตรง และเซนเซอร์วัดระยะทางแบบเชิงเส้น (ดูรายละเอียดเพิ่มเติม ในภาคผนวก ง) การประกอบติดตั้งใช้เครื่องมือวัดต่าง ๆ ดังนี้ เครื่องมือวัดระยะทางแบบสามมิติใช้ FARO laser tracker Xi (FARO Technologies, 2002) กล้องวัดระดับใช้ Leica NAK2 automatic level (Leica Geosystem, 2002) เครื่องมือวัดระนาบเอียงใช้ Wyler leveltronic NT (WYLER AG, 2002) การประกอบติดตั้งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ เริ่มจากชุดการเคลื่อนที่แกน Z โดยติดตั้งฐานรองรับ ชุดที่ 1 กับพื้น และประกอบฐานรองรับชุดที่ 2 พร้อมกับปรับระดับความสูงและระนาบ จากนั้น ติดตั้งรางนำแนวตรงแบบคู่ขนานไว้ และติดตั้งแกนหมุนแบบบอลล์สกรูอยู่ตรงกลางและขนานกับ รางนำแนวตรง แล้วประกอบแผ่นรองรับชุดการเคลื่อนที่แกน X เข้ากับรางนำแนวตรงและแกน หมุน จากนั้นติดมอเตอร์ที่ปลายด้านหนึ่งของแกนหมุนผ่านชุดต่อประกอบ การประกอบชุดการ เคลื่อนที่แกน X และชุดการเคลื่อนที่แกน Y ก็ใช้หลักการเดียวกันดังที่ได้อธิบายไว้ในข้างต้น ประกอบชุดการเคลื่อนที่แกน X เข้ากับชุดการเคลื่อนที่แกน Z แล้วปรับระนาบและแนวตั้งฉากกับ แกน Z จากนั้นประกอบชุดการเคลื่อนที่แกน Y เข้ากับชุดการเคลื่อนที่แกน X พร้อมกับปรับแนวให้ ตั้งฉากกับแกน X และแกน Z เมื่อประกอบติดตั้งชุดการเคลื่อนที่แล้วเสร็จจะดำเนินการติดตั้ง เซนเซอร์วัดระยะทางแบบเชิงเส้น การติดตั้งเซนเซอร์วัดระยะทางได้ทำเป็นขั้นตอนสุดท้าย เพื่อ ป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นต่อตัวเซนเซอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีความละเอียดสูง ชุดเครื่องมือ วัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกนเมื่อประกอบติดตั้งเสร็จ แสดงได้ดังรูปที่ 5.6

## 5.5 การทดสอบชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกน

การทดสอบคุณสมบัติของชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกน มีดังนี้ วัดระยะทางของการเคลื่อนที่ วัดค่าความคลาดเคลื่อนของการเคลื่อนที่ และทดสอบ โปรแกรมควบคุมอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้น การวัดระยะทางของการเคลื่อนที่และความคลาดเคลื่อนของ การเคลื่อนที่ด้วยเครื่องมือวัดระยะทางแบบสามมิติ โดยดำเนินการดังนี้ สร้างระบบพิกัดอ้างอิง XYZ จากนั้นติดตั้งเซนเซอร์ของเครื่องมือวัดระยะทางแบบสามมิติไว้บนฐานยึดชุดวัด สนามแม่เหล็ก และทดสอบการเคลื่อนที่แกน X ในขณะที่แกน Y และแกน Z ไม่มีการเคลื่อนที่ เมื่อ โปรแกรมสั่งให้มีการเคลื่อนที่ในแกน X และทำการบันทึกค่าระยะทางการเคลื่อนที่ทั้งสามแกน ด้วยเซนเซอร์วัดระยะทางแบบเชิงเส้น และเครื่องมือวัดระยะทางแบบสามมิติ การทดสอบลักษณะ ดังกล่าวจะให้ผลของความคลาดเคลื่อนจากระบบพิกัดอ้างอิงอย่างไร และระยะทางที่วัดได้จาก เครื่องมือวัดทั้งสองชนิดแตกต่างกันอย่างไร ผลการทดสอบทั้งสามแกนสรุปได้ดังนี้



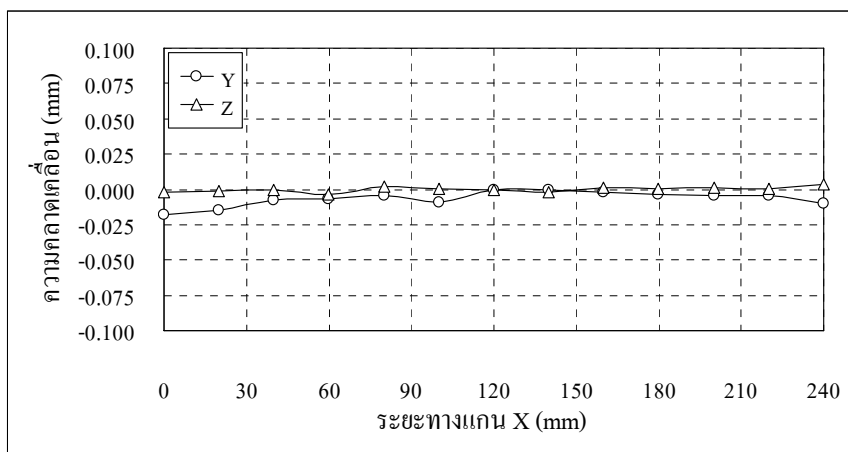
รูปที่ 5.6 ชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกน

โปรแกรมควบคุมอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้น สามารถควบคุมการเคลื่อนที่แกน X และแกน Y ได้ละเอียดถึง 0.02 มิลลิเมตร และควบคุมการเคลื่อนที่แกน Z ได้ละเอียดถึง 0.05 มิลลิเมตร ซึ่งค่าความละเอียดของการเคลื่อนที่วัด โดยเซนเซอร์วัดระยะทางแบบเชิงเส้น

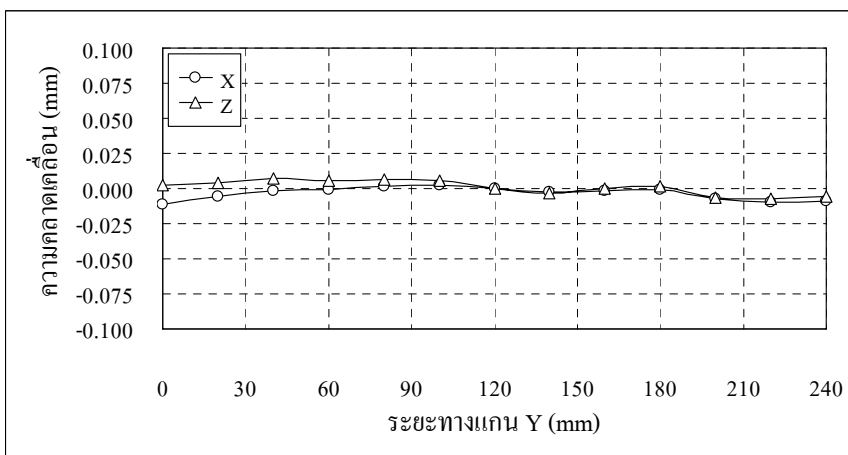
การวัดระยะทางของการเคลื่อนที่ โดยเครื่องมือวัดระยะทางแบบสามมิติและเซนเซอร์วัดระยะทางแบบเชิงเส้นให้ผลลัพธ์เท่ากัน ซึ่งขณะใช้งานจริงจะใช้เซนเซอร์วัดระยะทางแบบเชิงเส้นเป็นตัววัดระยะทาง

พิสัยของการเคลื่อนที่แนวแกน X เท่ากับ 240 มิลลิเมตร แนวแกน Y เท่ากับ 240 มิลลิเมตร และแนวแกน Z เท่ากับ 2,650 มิลลิเมตร

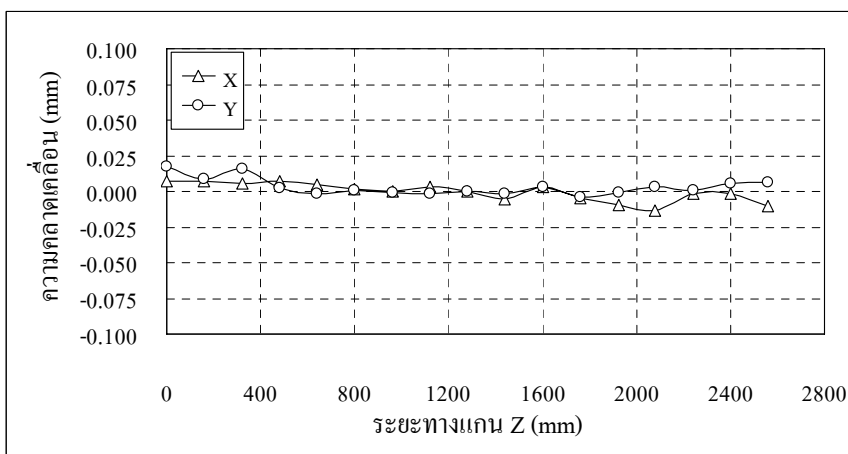
ความคลาดเคลื่อนของการเคลื่อนที่ในแต่ละแกน แสดงได้ดังกราฟในรูปที่ 5.7 จะเห็นได้ว่า ในรูปที่ 5.7 (ก) เป็นการเคลื่อนที่ตามแนวแกน X โดยมีค่าความคลาดเคลื่อน Y ซึ่งหมายถึง ความไม่สม่ำเสมอของระนาบแกน X และค่าความคลาดเคลื่อน Z หมายถึง ความไม่สม่ำเสมอของแกน X โดยเทียบกับระบบพิกัดอ้างอิง ในรูปที่ 5.7 (ข) เป็นการเคลื่อนที่ตามแนวแกน Y และค่าความคลาดเคลื่อน X หมายถึง ความไม่สม่ำเสมอของระนาบแกน Y และค่าความคลาดเคลื่อน Z หมายถึง



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 5.7 ความคลาดเคลื่อนของการเคลื่อนที่ทั้งสามแกน

(ก) ความคลาดเคลื่อนแกน X (ข) ความคลาดเคลื่อนแกน Y

(ค) ความคลาดเคลื่อนแกน Z

ความไม่สม่ำเสมอของแกน Y โดยเทียบกับระบบพิกัดอ้างอิง ในรูปที่ 5.7 (ค) เป็นการเคลื่อนที่ตามแนวแกน Z และค่าความคลาดเคลื่อน X หมายถึง ความไม่สม่ำเสมอของแกน Z และค่าความคลาดเคลื่อน Y หมายถึง ความไม่สม่ำเสมอของระนาบแกน Z โดยเทียบกับระบบพิกัดอ้างอิง ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนของการเคลื่อนที่ทั้งสามแกนอยู่ในช่วง  $\pm 0.025$  มิลลิเมตร

## 5.6 สรุป

การออกแบบและจัดสร้างชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติทั้งสามแกน เพื่อใช้วัดสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กหกขั้วที่ออกแบบขดลวดแม่เหล็กใหม่ และใช้งานกับเครื่องกำเนิดแสงสยาม กาจจัดสร้างสามารถควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติได้ทั้งสามแกน การควบคุมสามารถดำเนินการได้ที่ละแกน โดยมีพิสัยของการเคลื่อนที่แกน X เท่ากับ 240 มิลลิเมตร พิสัยของการเคลื่อนที่แกน Y เท่ากับ 240 มิลลิเมตร และพิสัยของการเคลื่อนที่แกน Z เท่ากับ 2,650 มิลลิเมตร ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าพิสัยของการเคลื่อนที่น้อยกว่าที่กำหนดไว้เบื้องต้น เนื่องจากได้ติดตั้งลิimitswitch ไว้ที่หัวและท้ายของชุดการเคลื่อนที่ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการชนของชุดการเคลื่อนที่กับฐานยึดแกนหมุน การเคลื่อนที่ทั้งสามแกนมีความละเอียดของการเคลื่อนที่แกน X และแกน Y เท่ากับ 0.02 มิลลิเมตร และแกน Z เท่ากับ 0.05 มิลลิเมตร โดยการเคลื่อนที่ทั้งสามแกนมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง  $\pm 0.025$  มิลลิเมตร ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวมีค่าน้อยกว่าที่ออกแบบไว้เบื้องต้น และความคลาดเคลื่อนค่าดังกล่าวมีความเหมาะสมสำหรับการวัดสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กหกขั้ว และแม่เหล็กชนิดอื่นของเครื่องกำเนิดแสงสยาม



## บทที่ 6

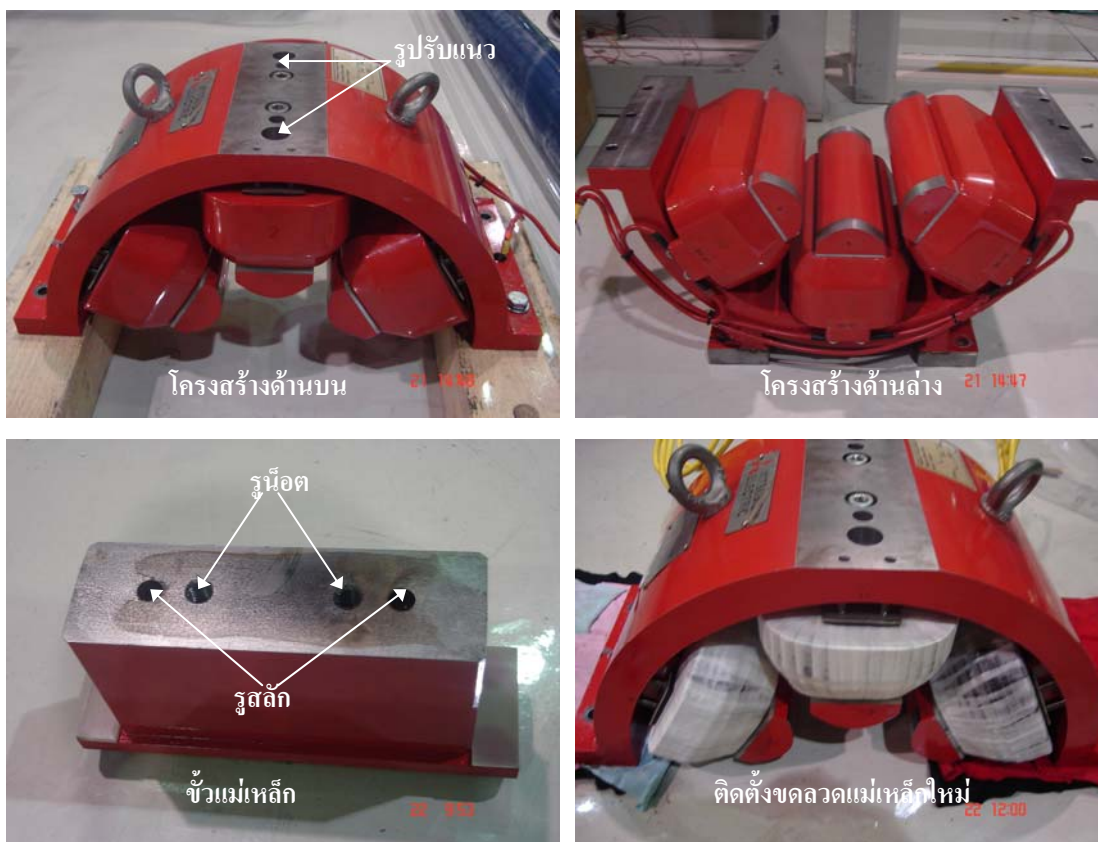
### การทดสอบคุณสมบัติของแม่เหล็กหิ้วที่ใช้ขดลวดแม่เหล็กใหม่

#### 6.1 บทนำ

ขดลวดแม่เหล็กหิ้วที่ได้รับการออกแบบและจัดสร้างขึ้นใหม่จำนวน 6 ชุด จะได้รับการติดตั้งเข้ากับโครงสร้างแม่เหล็กหิ้วชุดเดิมที่ถอดออกมาจากวงกักเก็บอิเล็กตรอน เพื่อทำการทดสอบคุณสมบัติของแม่เหล็ก ดังนี้ การวัดสนามแม่เหล็กด้วยชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกน และการวัดอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กด้วยเซนเซอร์อุณหภูมิแบบเทอร์มอคัปเปิลที่ติดตั้งไว้ตามตำแหน่งต่าง ๆ ของขดลวดแม่เหล็ก ผลที่ได้จากการวัดจะนำไปวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณโดยอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูป ดังนั้น บทนี้จะนำเสนอการทดสอบคุณสมบัติของแม่เหล็กหิ้วที่ใช้ขดลวดแม่เหล็กใหม่ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ ติดตั้งขดลวดแม่เหล็กใหม่เข้ากับโครงสร้างแม่เหล็กหิ้วชุดเดิม จากนั้นติดตั้งแม่เหล็กหิ้วชุดดังกล่าวเข้ากับชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกนพร้อมกับการปรับแนว (alignment) จากนั้นดำเนินการวัดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่สัมพันธ์กับระยะทางแกน X เพื่อใช้คำนวณค่าความแรงสนามแม่เหล็ก และวัดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่สัมพันธ์กับระยะทางแกน Z เพื่อใช้คำนวณค่าความยาวสนามแม่เหล็ก และทำการวัดค่าอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กเมื่อรับการจ่ายกระแสป้อนแม่เหล็กเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง เมื่อดำเนินการทดสอบคุณสมบัติของแม่เหล็กหิ้วเสร็จ แม่เหล็กชุดดังกล่าวจะถูกนำไปติดตั้งใช้งานในวงกักเก็บอิเล็กตรอนร่วมกับแม่เหล็กหิ้วตัวอื่นที่ทำงานในฟังก์ชันเดียวกัน

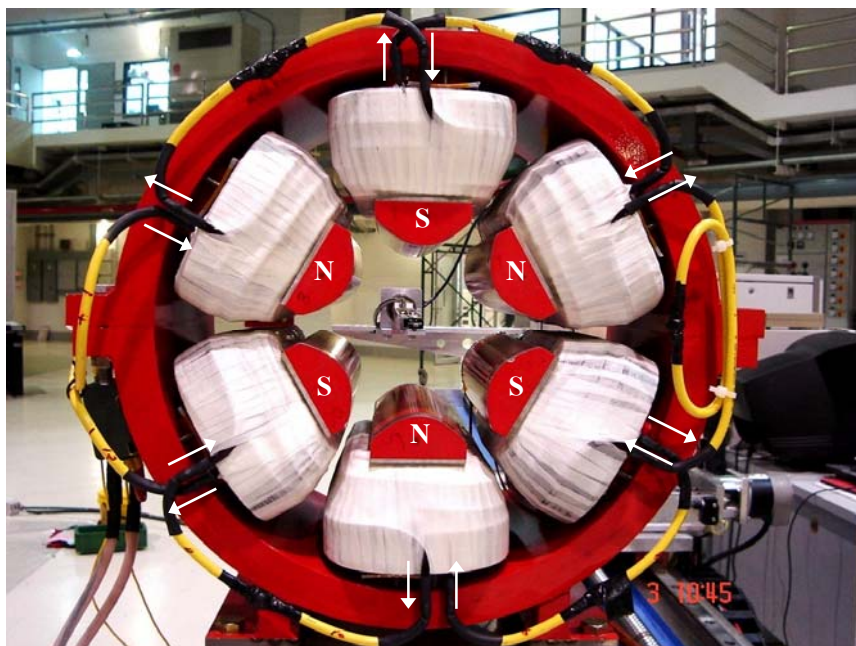
#### 6.2 การติดตั้งขดลวดแม่เหล็กและการปรับแนวสำหรับวัดสนามแม่เหล็ก

ขดลวดแม่เหล็กหิ้วที่จัดสร้างขึ้นใหม่จำนวน 6 ชุด ดังที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 4 ทำการเชื่อมต่อสายไฟขนาดเท่ากับเส้นลวดที่ใช้พันขดลวดแม่เหล็ก เพื่อใช้สำหรับต่ออนุกรมขดลวดแม่เหล็ก การติดตั้งขดลวดแม่เหล็กใหม่เริ่มด้วยการถอดโครงสร้างแม่เหล็กหิ้วออกเป็น 2 ส่วน คือ โครงสร้างด้านบนที่ประกอบด้วยขั้วแม่เหล็ก 3 ขั้ว และโครงสร้างด้านล่างที่ประกอบด้วยขั้วแม่เหล็ก 3 ขั้ว จากนั้นถอดขั้วแม่เหล็กพร้อมกับขดลวดแม่เหล็กชุดเดิมออก และติดตั้งขดลวดแม่เหล็กชุดใหม่แทนที่แล้วทำการประกอบคืน โครงสร้างของแม่เหล็กหิ้วถูกออกแบบมาให้มีการถอดออกและประกอบคืน โดยที่ไม่ทำให้พิสัยทางกายภาพของโครงสร้างแม่เหล็กเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 6.1 การถอดและประกอบขดลวดแม่เหล็กหกขั้ว

การถอดและประกอบขดลวดแม่เหล็กหกขั้ว แสดงได้ดังรูปที่ 6.1 จะสังเกตเห็นว่าที่ขั้วแม่เหล็กมีรูสำหรับขันน็อต 2 รู และรูสำหรับยึดด้วยสลัก 2 รู ซึ่งรูสำหรับยึดสลักดังกล่าวจะเป็นตัวบังคับให้ทิศทางกายภาพของ โครงสร้างแม่เหล็กไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อดำเนินการติดตั้งขดลวดแม่เหล็กใหม่เสร็จ และทำการต่ออนุกรมขดลวดแม่เหล็กทั้ง 6 ชุด จากนั้นทำการวัดค่าฉนวนไฟฟ้าระหว่างขดลวดแม่เหล็กกับ โครงแม่เหล็ก โดยใช้เครื่องมือวัด ADVANTEST R6552 digital multimeter และให้ค่าความเป็นฉนวนไฟฟ้ามากกว่า 100 เมกกะโอห์ม ซึ่งมีความเหมาะสมต่อการใช้งาน แม่เหล็กหกขั้วที่ได้รับการออกแบบขดลวดแม่เหล็กใหม่ แสดงได้ดังรูปที่ 6.2 จะสังเกตเห็นได้ว่ารูปที่ 6.2 (ก) ขดลวดแม่เหล็กมีการต่ออนุกรมกัน และสลับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเพื่อให้เกิดขั้วเหนือและขั้วใต้ตามต้องการ ลูกศรที่แสดงไว้แสดงทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าและอาจสังเกตเห็นต่อไปว่าขดลวดแม่เหล็กใหม่ถูกออกแบบและสร้างขึ้นมีขนาดรูปร่างที่เหมาะสมกับ โครงสร้างแม่เหล็ก เมื่อติดตั้งแล้วขดลวดแม่เหล็กไม่แน่นเกินไป ยังมีช่องว่างสำหรับการระบายความร้อนได้ดี



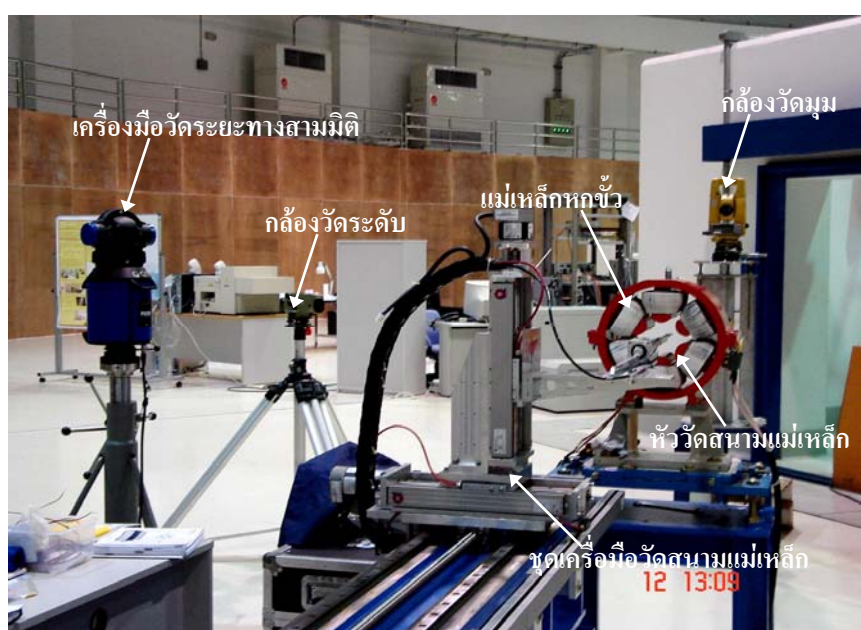
(ก)



(ข)

รูปที่ 6.2 แม่เหล็กหกขั้วที่ได้รับการออกแบบขดลวดแม่เหล็กใหม่  
 (ก) ด้านหน้าแม่เหล็กหกขั้ว (ข) ด้านหลังแม่เหล็กหกขั้ว

การติดตั้งแม่เหล็กหกขั้วเข้ากับชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกน เริ่มด้วยการติดตั้งแม่เหล็กหกขั้วให้ได้ระดับและระนาบ โดยใช้กล้องวัดระดับและเครื่องมือวัดระนาบเอียง จากนั้นปรับระบบพิกัดของแม่เหล็กหกขั้วและระบบพิกัดของชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กดังกล่าวให้อยู่ในระบบพิกัดเดียวกัน โดยใช้เครื่องมือวัดระยะทางแบบสามมิติ จากนั้นหาตำแหน่งของหัววัดสนามแม่เหล็กเทียบกับพิกัดของแม่เหล็กหกขั้ว โดยใช้กล้องวัดมุม TOPCON GTS-710 electronic total station (TOPCON, 2000) และกล้องวัดระดับ การติดตั้งแม่เหล็กหกขั้วสำหรับวัดสนามแม่เหล็ก แสดงได้ดังรูปที่ 6.3



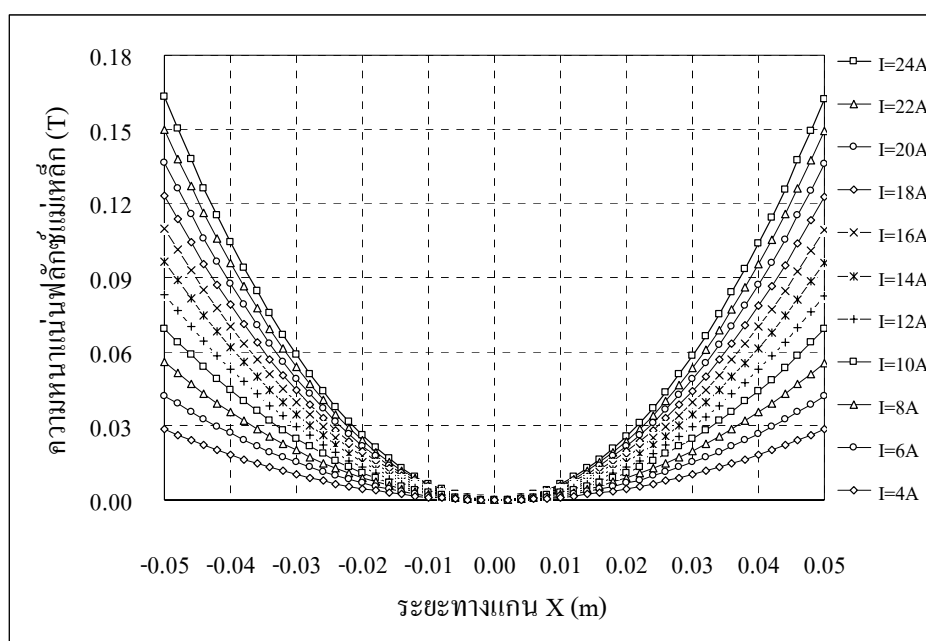
รูปที่ 6.3 การติดตั้งแม่เหล็กหกขั้วสำหรับวัดสนามแม่เหล็ก

### 6.3 การวัดสนามแม่เหล็ก

การวัดสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กหกขั้วที่ใช้ขดลวดแม่เหล็กใหม่ ด้วยชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกน และชุดวัดสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์โพรบ Group3 DTM-151 digital teslameter (Group3 Technology, 2000) โดยมีแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าตรงแบบกระแสคงที่ Sorensen SGI DC power supply (Sorensen, 2004) เป็นตัวจ่ายกระแสป้อนแม่เหล็ก การวัดสนามแม่เหล็กจะจ่ายกระแสป้อนแม่เหล็กสูงสุดประมาณ 120 เอมแปร์เซ็นต์ ของค่าพิกัดออกแบบ

การวัดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่สัมพันธ์กับระยะทางแกน X จาก -50 มิลลิเมตร ถึง +50 มิลลิเมตร ที่ Y=0 และ Z=0 และกระแสป้อนแม่เหล็ก 4-24 แอมแปร์ ผลที่ได้จากการวัดให้

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับระยะทางแกน X แสดงได้ดังรูปที่ 6.4 จะสังเกตเห็นว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีรูปทรงแบบพาราโบลาเมื่อพิจารณาตามระยะทางแกน X และที่จุดศูนย์กลางแม่เหล็กที่  $X=0$  ให้ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กเป็นศูนย์ และสังเกตเห็นต่อไปว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กแปรผันกับกระแสป้อนแม่เหล็กในลักษณะการแปรผันตรง ซึ่งผลที่แสดงไว้ในกราฟรูปที่ 6.4 จำนวนความแรงสนามแม่เหล็กได้ดังสมการที่ (2-7) โดยอาศัยฟังก์ชันพหุนามที่ได้จากการถดถอยเชิงเลข ให้ค่าความแรงสนามแม่เหล็กที่กระแสป้อนแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 6.1 จะสังเกตเห็นได้ว่าความแรงสนามแม่เหล็กกับกระแสป้อนแม่เหล็กมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้น

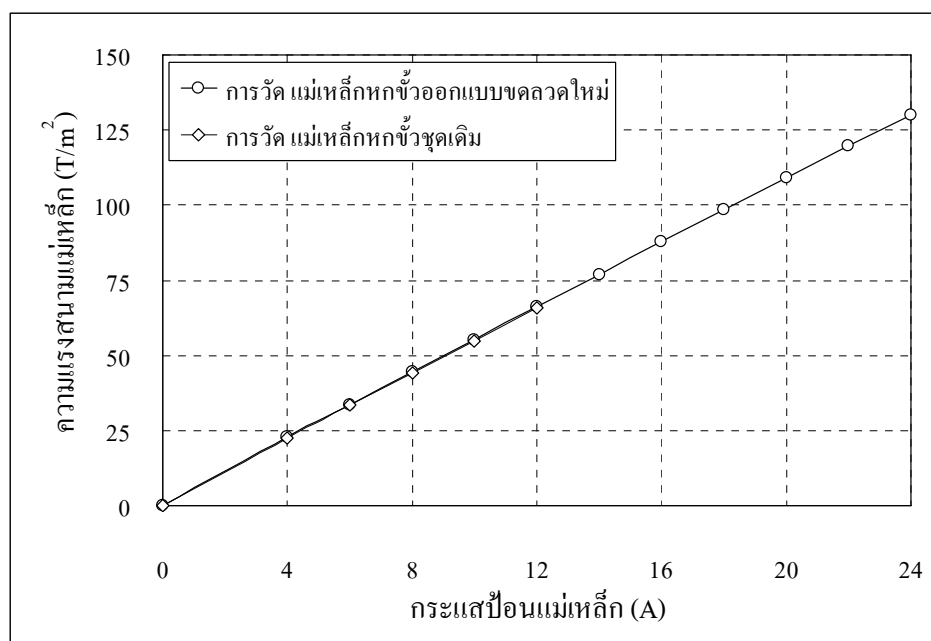


รูปที่ 6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับระยะทางแกน X ที่  $Y=0$  และ  $Z=0$  ที่ค่ากระแสป้อนแม่เหล็ก 4-24 แอมแปร์

เมื่อนำผลที่ได้จากการวัดแม่เหล็กหกขั้วที่ใช้ขดลวดแม่เหล็กชุดใหม่ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 6.1 และผลที่ได้จากการวัดแม่เหล็กหกขั้วชุดเดิม ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 มาเปรียบเทียบกับให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแรงสนามแม่เหล็กกับกระแสป้อนแม่เหล็ก แสดงได้ดังรูปที่ 6.5 จะสังเกตเห็นว่าผลที่ได้จากการวัดให้ค่าใกล้เคียงกัน เมื่อลากเส้นเชื่อมต่อระหว่างจุดข้อมูลแสดงให้เห็นว่าเส้นทั้งสองทับกันสนิท ซึ่งเป็นไปตามจุดประสงค์ของการออกแบบที่ต้องการให้แม่เหล็กหกขั้วชุดใหม่ ทำงานร่วมกับแม่เหล็กหกขั้วตัวอื่น ๆ ที่อยู่ในฟังก์ชันเดียวกันได้

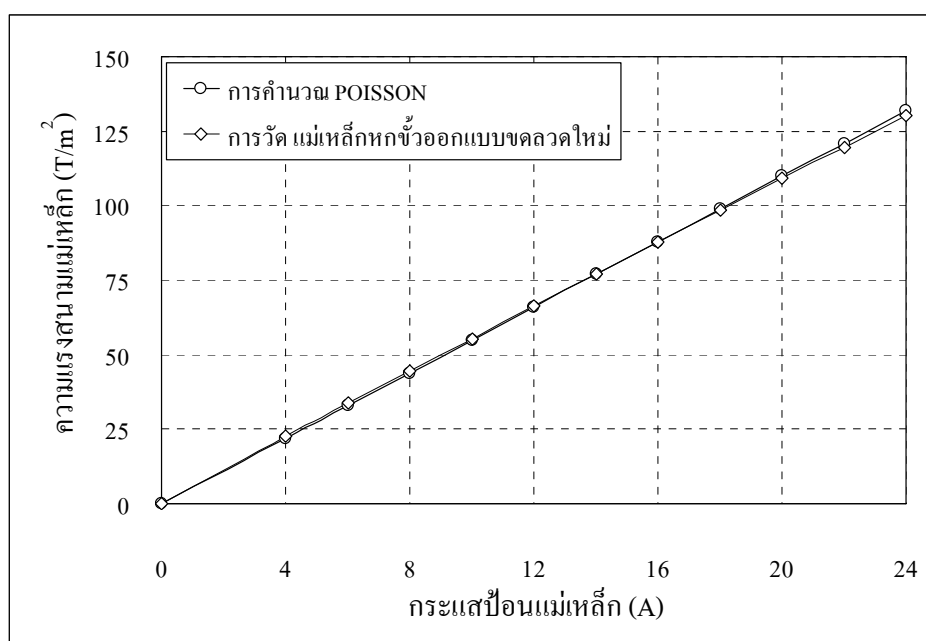
ตารางที่ 6.1 ความแรงสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กหกขั้วที่ใช้ขดลวดแม่เหล็กชุดใหม่

กระแสป้อนแม่เหล็ก (A)	ความแรงสนามแม่เหล็ก (T/m <sup>2</sup> )
4	22.7836
6	33.6344
8	44.4756
10	55.3238
12	66.1878
14	77.0080
16	87.7408
18	98.4192
20	109.0378
22	119.6324
24	130.1652



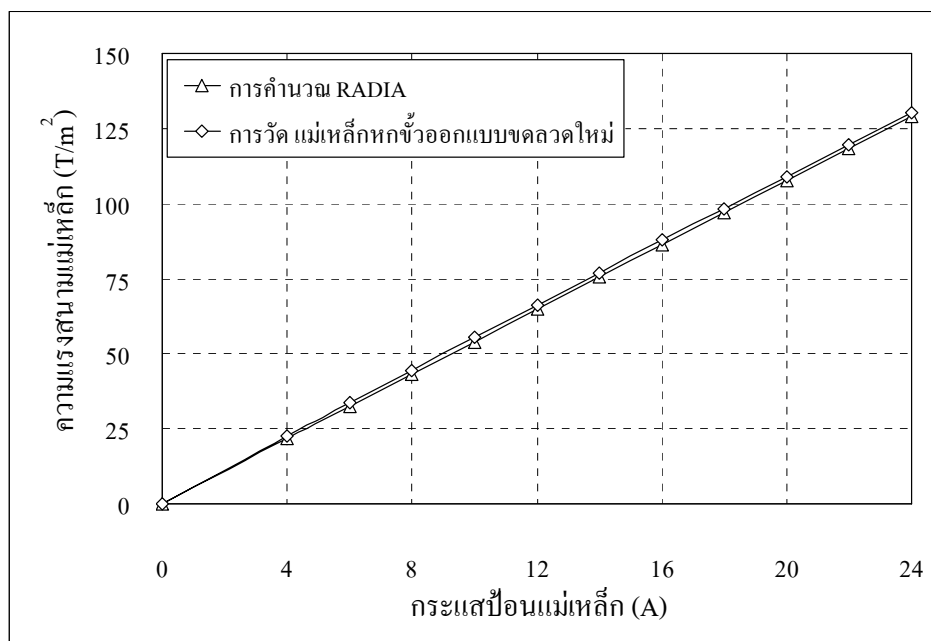
รูปที่ 6.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความแรงสนามแม่เหล็กกับกระแสป้อนแม่เหล็กที่ได้จากการวัด

เมื่อนำผลที่ได้จากการวัดแม่เหล็กหกซ์ที่ใช้ขดลวดแม่เหล็กชุดใหม่ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 6.1 และผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม POISSON ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.3 มาเปรียบเทียบกัน ให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแรงสนามแม่เหล็กกับกระแสแม่เหล็ก แสดงได้ดังรูปที่ 6.6 จะสังเกตเห็นว่าผลที่ได้จากการวัดกับผลที่ได้จากการคำนวณให้ค่าใกล้เคียงกัน เมื่อลากเส้นเชื่อมต่อระหว่างจุดข้อมูลช่วงค่ากระแสแม่เหล็ก 4-20 แอมแปร์ แสดงให้เห็นว่าเส้นทั้งสองทับกัน และสังเกตเห็นต่อไปว่าเส้นกราฟเริ่มมีลักษณะของส่วนโค้งปรากฏให้เห็นตั้งแต่ค่ากระแสแม่เหล็ก 22 แอมแปร์ขึ้นไป ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระแสแม่เหล็กที่ค่าดังกล่าวเริ่มทำให้เกิดการอิ่มตัวของแกนแม่เหล็ก



รูปที่ 6.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความแรงสนามแม่เหล็กกับกระแสแม่เหล็กที่ได้จากการวัด และการคำนวณ โดยโปรแกรม POISSON

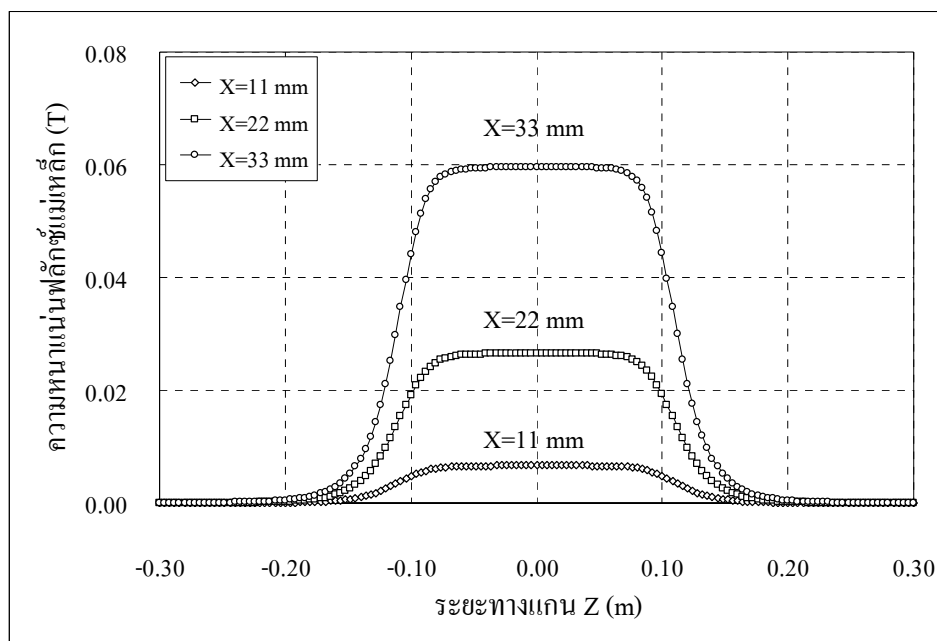
เมื่อนำผลที่ได้จากการวัดแม่เหล็กหกซ์ที่ใช้ขดลวดแม่เหล็กชุดใหม่ ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 6.1 และผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม RADIA ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.4 มาเปรียบเทียบกัน ให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแรงสนามแม่เหล็กกับกระแสแม่เหล็ก แสดงได้ดังรูปที่ 6.7 จะสังเกตเห็นว่าผลที่ได้จากการวัดกับผลที่ได้จากการคำนวณมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน และสังเกตเห็นต่อไปว่าผลที่ได้จากการวัดให้ค่าความแรงสนามแม่เหล็กมากกว่าผลที่ได้จากการคำนวณ



รูปที่ 6.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความแรงสนามแม่เหล็กกับกระแสป้อนแม่เหล็ก  
ที่ได้จากการวัด และการคำนวณ โดยโปรแกรม RADIA

การวัดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่สัมพันธ์กับระยะทางแกน Z ที่ค่า X จาก  $-\infty$  ถึง  $+\infty$  ที่  $Y=0$  และที่ค่า X ห่างจากศูนย์กลางแม่เหล็กเท่ากับ 11, 22 และ 33 มิลลิเมตร ที่ค่าพิกัดกระแสป้อนแม่เหล็ก 20 แอมแปร์ ผลที่ได้จากการวัดให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับระยะทางแกน Z แสดงได้ดังรูปที่ 6.8 จะสังเกตเห็นว่าที่ค่า X ห่างออกจากศูนย์กลางแม่เหล็กมากขึ้นจะเกิดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมากขึ้นด้วย และสังเกตเห็นต่อไปว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กมีค่าคงที่ช่วงหนึ่งที่บริเวณตอนกลางของแม่เหล็ก และมีค่าลดลงตามระยะห่างจากศูนย์กลางแม่เหล็ก ซึ่งผลที่แสดงไว้ในกราฟรูปที่ 6.8 จำนวนค่าความยาวสนามแม่เหล็กได้ตั้งสมการที่ (2-8) โดยวิธีการอินทิเกรตเชิงเลข ให้ค่าความยาวสนามแม่เหล็กที่ค่า X เท่ากับ 11, 22 และ 33 มิลลิเมตร มีค่าเท่ากับ 230.72, 230.54 และ 230.49 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งค่าเฉลี่ยของความยาวสนามแม่เหล็กประมาณ 230.6 มิลลิเมตร โดยที่ความยาวสนามแม่เหล็กขนาดดังกล่าวมีระยะทางจากแกน Z ที่  $-115.3$  มิลลิเมตร ถึง  $+115.3$  มิลลิเมตร และจะเห็นได้ว่าความยาวสนามแม่เหล็กมีค่าแตกต่างจากค่าเฉลี่ยน้อยมาก แสดงให้เห็นว่าความยาวสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากตามระยะทางแกน X และเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม RADIA ที่ให้ค่าความยาวสนามแม่เหล็ก 230 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่ามีค่าใกล้เคียงกันมากกับการวัด



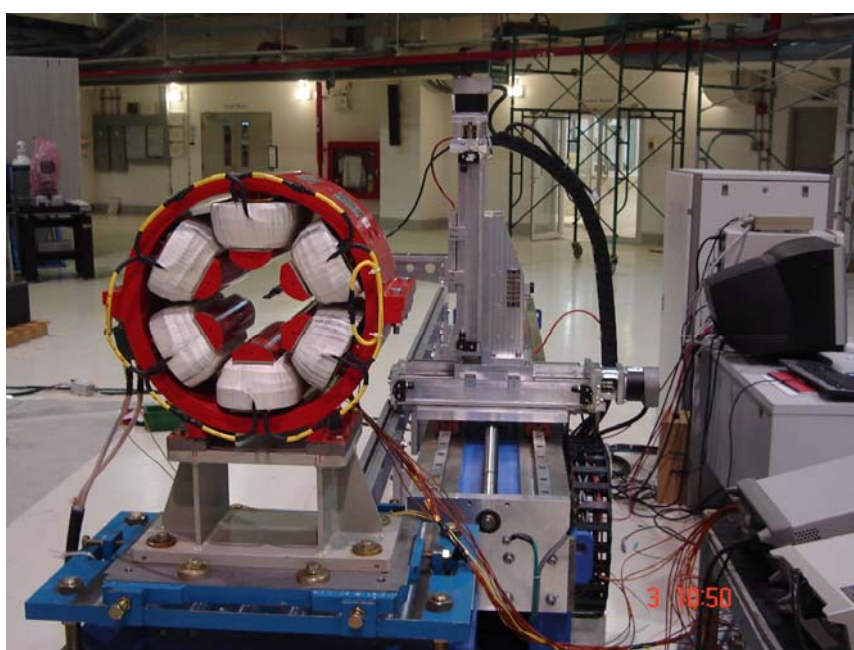


รูปที่ 6.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับระยะทางแกน Z ที่  $Y=0$  และค่ากระแสป้อนแม่เหล็ก 20 แอมแปร์

ตารางที่ 6.2 ความยาวสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กหกขั้วที่ใช้ขดลวดแม่เหล็กชุดใหม่

กระแสป้อนแม่เหล็ก (A)	ความยาวสนามแม่เหล็ก (mm)
4	231.17
6	231.08
8	231.00
10	230.87
12	230.75
14	230.66
16	230.61
18	230.55
20	230.49
22	230.46
24	230.43

การวัดค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่สัมพันธ์กับระยะทางแกน  $Z$  ที่ค่า  $Z$  จาก  $-\infty$  ถึง  $+\infty$  ที่  $Y=0$  และที่ค่า  $X$  ห่างจากศูนย์กลางแม่เหล็กเท่ากับ 33 มิลลิเมตร และที่ค่ากระแสป้อนแม่เหล็ก 4-24 แอมแปร์ ผลที่ได้จากการวัดให้ค่าความยาวสนามแม่เหล็กที่กระแสป้อนแม่เหล็กค่าต่าง ๆ ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 6.2 จะสังเกตเห็นว่าความยาวสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยให้ค่าเฉลี่ยของความยาวสนามแม่เหล็กประมาณ 230.7 มิลลิเมตร อาจกล่าวได้ว่าความยาวสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับกระแสป้อนแม่เหล็ก ซึ่งการวัดสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กหกขั้วที่ใช้ขดลวดแม่เหล็กใหม่ แสดงได้ดังรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 การวัดสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กหกขั้วที่ใช้ขดลวดแม่เหล็กชุดใหม่

#### 6.4 การวัดอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็ก

การออกแบบขดลวดแม่เหล็กใหม่ได้กำหนดค่าอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กสูงสุดไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส ที่ค่าพิกัดกระแสป้อนแม่เหล็ก 20 แอมแปร์ ซึ่งผลที่ได้จากการวัดอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กจะเป็นตัวชี้วัดได้ว่าการออกแบบมีความถูกต้องเหมาะสมอย่างไร โดยใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์โมคัปเปิลที่ติดตั้งตามตำแหน่งต่าง ๆ ทั้งภายในและที่ผิวของขดลวดแม่เหล็ก อาจดูตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์ได้ ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.3 และเครื่องมือวัดที่ใช้บันทึกค่าอุณหภูมิให้กับเซนเซอร์ใช้ AGILENT 34970A data acquisition/switch unit การวัดอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กจะจ่ายกระแสป้อนแม่เหล็กสูงสุดประมาณ 120 เปอร์เซ็นต์ ของค่าพิกัดออกแบบ

การวัดอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กที่ค่ากระแสป้อนแม่เหล็ก 16, 18, 20, 22 และ 24 แอมแปร์ เป็นระยะเวลาานาน 12 ชั่วโมง ผลที่ได้จากการวัดให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กกับระยะเวลาจ่ายกระแสป้อนแม่เหล็ก แสดงได้ดังรูปที่ 6.10, 6.11, 6.12, 6.13 และ 6.14 ตามลำดับ จะสังเกตเห็นว่าในรูปเหล่านี้ทางด้านขวาของรูปปรากฏเลข 1-10 ตามแนวดิ่ง หมายถึง ตำแหน่งที่ติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

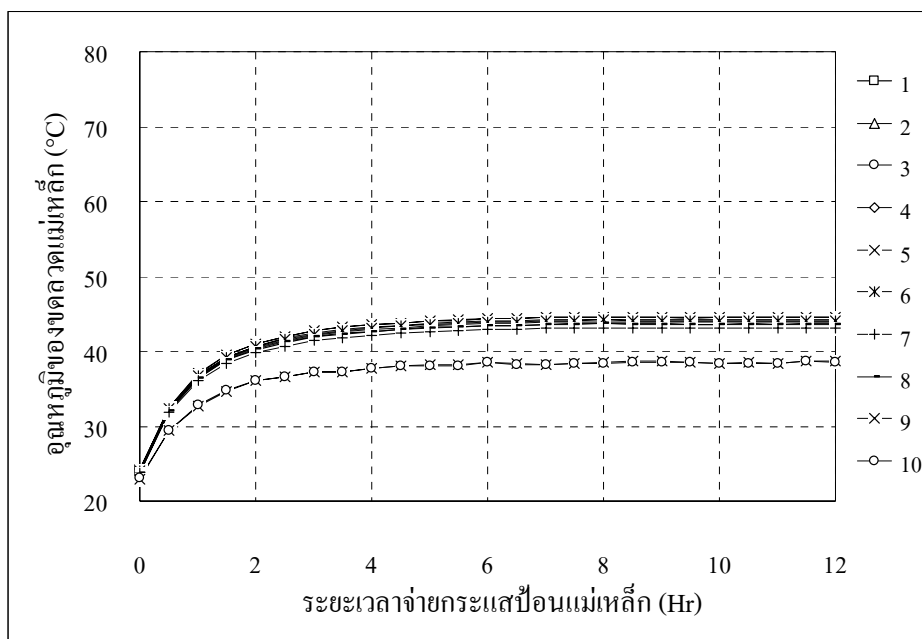
จากกราฟรูปที่ 6.10 จะสังเกตเห็นว่าอุณหภูมิภายในขดลวดแม่เหล็กมีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 1.5 องศาเซลเซียส และสังเกตเห็นต่อไปว่าอุณหภูมิสูงสุดของขดลวดแม่เหล็กมีค่า 45 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่ผิวขดลวดแม่เหล็กมีค่าประมาณ 39 องศาเซลเซียส โดยให้ค่าอุณหภูมิแตกต่างกันอยู่ถึง 6 องศาเซลเซียส โดยประมาณ

จากกราฟรูปที่ 6.11 จะสังเกตเห็นว่าอุณหภูมิภายในขดลวดแม่เหล็กมีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 2 องศาเซลเซียส และสังเกตเห็นต่อไปว่าอุณหภูมิสูงสุดของขดลวดแม่เหล็กมีค่า 51 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่ผิวขดลวดแม่เหล็กมีค่าประมาณ 44 องศาเซลเซียส โดยให้ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันอยู่ถึง 7 องศาเซลเซียส โดยประมาณ

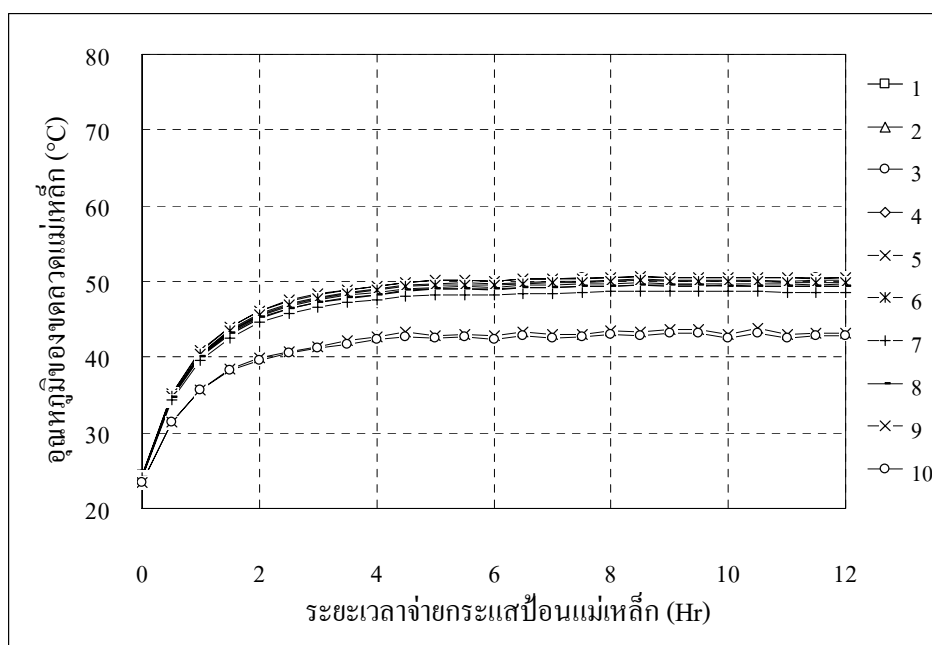
จากกราฟรูปที่ 6.12 จะสังเกตเห็นว่าอุณหภูมิภายในขดลวดแม่เหล็ก ที่ตำแหน่งเซนเซอร์ 1-8 ให้ค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 2.5 องศาเซลเซียส ส่วนอุณหภูมิที่ผิวขดลวดแม่เหล็ก ที่ตำแหน่งเซนเซอร์ 9-10 ให้ค่าใกล้เคียงกันประมาณ 49 องศาเซลเซียส และสังเกตเห็นต่อไปว่าอุณหภูมิสูงสุดของขดลวดแม่เหล็กมีค่า 58 องศาเซลเซียส โดยให้ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันอยู่ถึง 9 องศาเซลเซียส โดยประมาณ ซึ่งค่าอุณหภูมิตดลวดแม่เหล็กที่ตำแหน่งเซนเซอร์ 1-10 เรียงลำดับจากค่าสูงสุดไปต่ำสุด ได้ดังต่อไปนี้ ตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์ 5, 3, 2, 6, 4, 8, 1, 7, 9 และ 10 ให้ค่าอุณหภูมิเท่ากับ 58, 57.8, 57.4, 57.2, 56.8, 56.5, 56.4, 55.5, 49 และ 48.7 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

จากกราฟรูปที่ 6.13 จะสังเกตเห็นว่าอุณหภูมิภายในขดลวดแม่เหล็กมีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 3 องศาเซลเซียส และสังเกตเห็นต่อไปว่าอุณหภูมิสูงสุดของขดลวดแม่เหล็กมีค่า 66 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่ผิวขดลวดแม่เหล็กมีค่าประมาณ 55 องศาเซลเซียส โดยให้ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันอยู่ถึง 10 องศาเซลเซียส โดยประมาณ

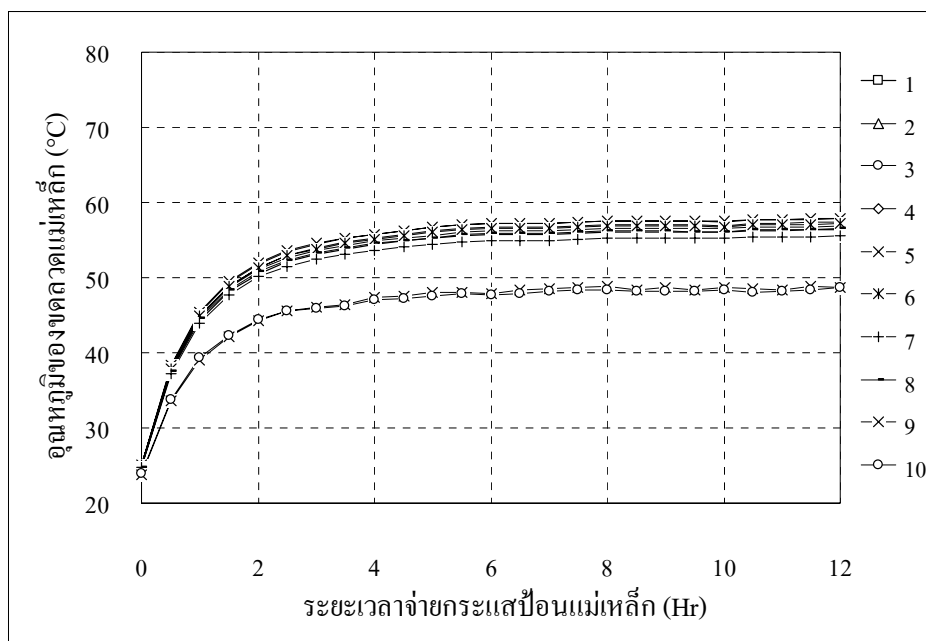
จากกราฟรูปที่ 6.14 จะสังเกตเห็นว่าอุณหภูมิภายในขดลวดแม่เหล็กมีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 3.5 องศาเซลเซียส และสังเกตเห็นต่อไปว่าอุณหภูมิสูงสุดของขดลวดแม่เหล็กมีค่า 78 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิที่ผิวขดลวดแม่เหล็กมีค่าประมาณ 67 องศาเซลเซียส โดยให้ค่าอุณหภูมิที่แตกต่างกันอยู่ถึง 11 องศาเซลเซียส



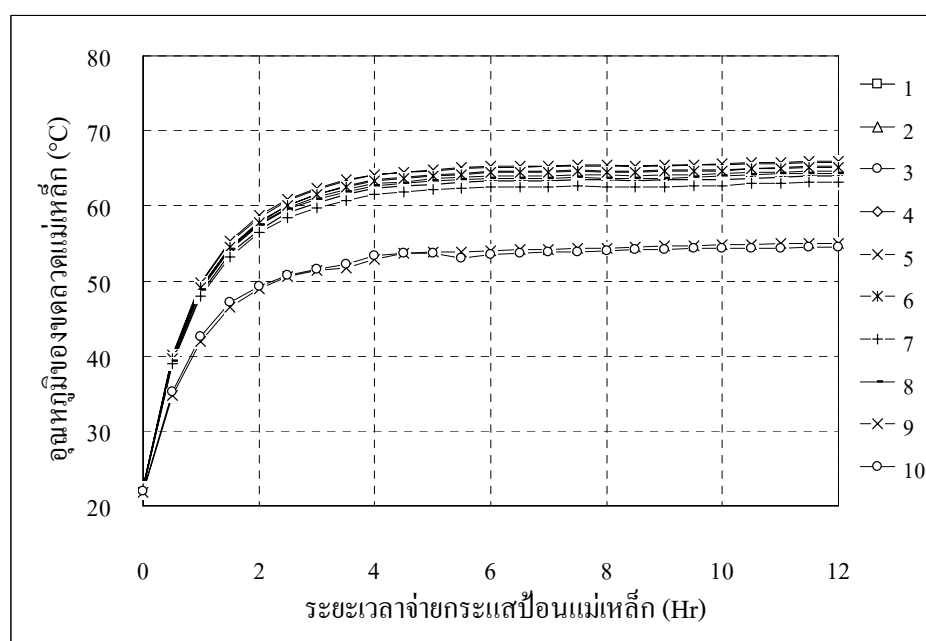
รูปที่ 6.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขวดนมแม่เหล็กกับระยะเวลาจ่ายกระแสปั๊นมแม่เหล็ก ที่ค่ากระแสปั๊นมแม่เหล็ก 16 แอมแปร์



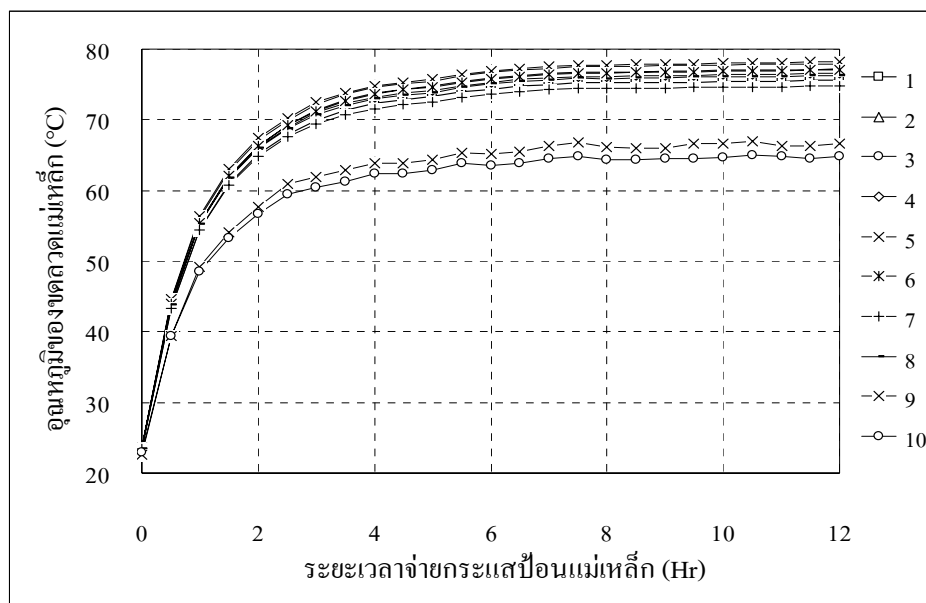
รูปที่ 6.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขวดนมแม่เหล็กกับระยะเวลาจ่ายกระแสปั๊นมแม่เหล็ก ที่ค่ากระแสปั๊นมแม่เหล็ก 18 แอมแปร์



รูปที่ 6.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กกับระยะเวลาจ่ายกระแส  
ป้อนแม่เหล็ก ที่ค่ากระแสป้อนแม่เหล็ก 20 แอมแปร์



รูปที่ 6.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กกับระยะเวลาจ่ายกระแส  
ป้อนแม่เหล็ก ที่ค่ากระแสป้อนแม่เหล็ก 22 แอมแปร์

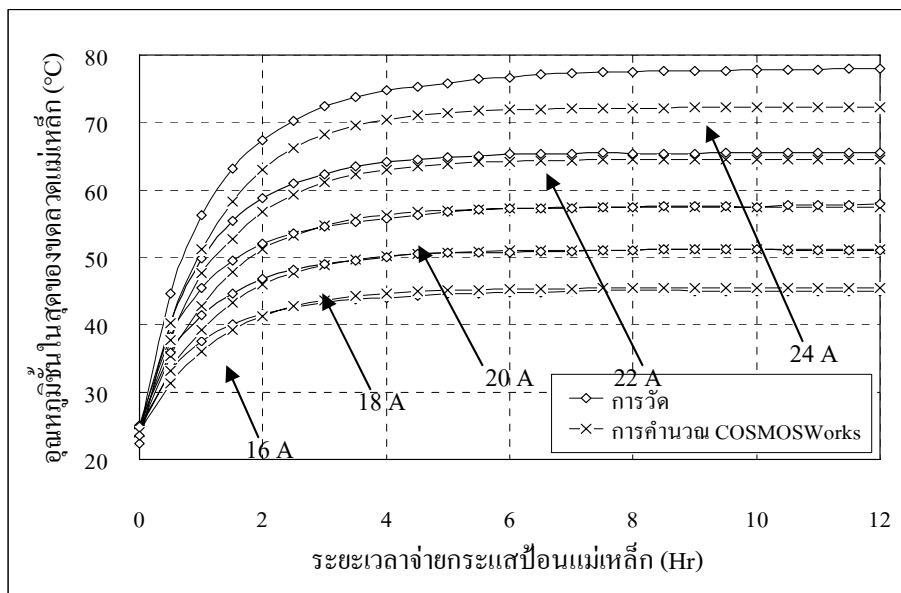


รูปที่ 6.14 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กกับระยะเวลาจ่ายกระแส  
ป้อนแม่เหล็ก ที่ค่ากระแสป้อนแม่เหล็ก 24 แอมแปร์

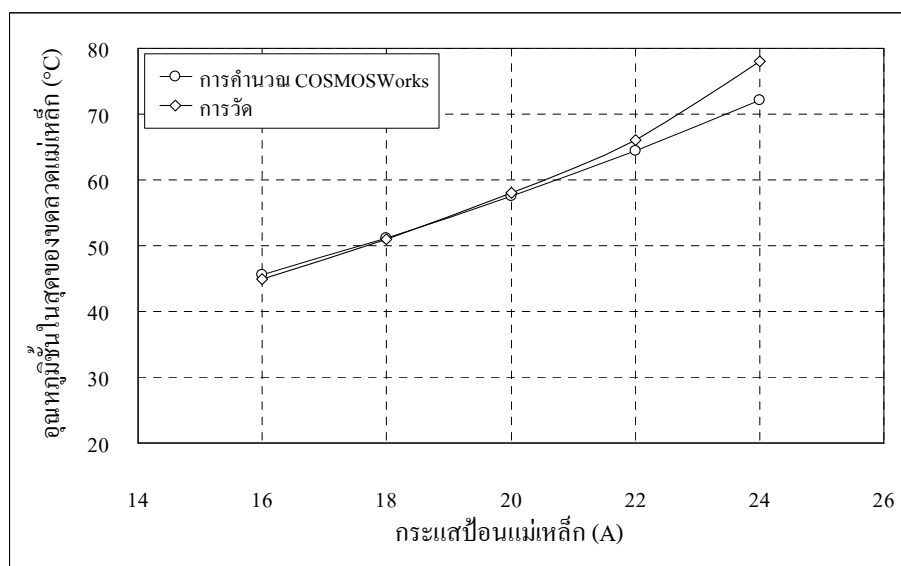
เมื่อนำผลการคำนวณโดยโปรแกรม COSMOSWorks ที่แสดงไว้ในกราฟรูปที่ 3.12 และผลการวัดมาเปรียบเทียบกัน ให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขึ้นในสุดของขดลวดแม่เหล็กกับระยะเวลาจ่ายกระแสป้อนแม่เหล็ก แสดงได้ดังรูปที่ 6.15 จะสังเกตเห็นว่าผลการคำนวณและการวัดมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขึ้นในสุดของขดลวดแม่เหล็กกับกระแสป้อนแม่เหล็ก แสดงได้ดังรูปที่ 6.16 จะสังเกตเห็นว่าผลการคำนวณและการวัดมีค่าใกล้เคียงกันในช่วงกระแสป้อนแม่เหล็กถึง 20 แอมแปร์ และที่กระแสป้อนแม่เหล็ก 22 แอมแปร์ขึ้นไป จะเห็นว่าอุณหภูมิเริ่มมีค่าแตกต่างกันมากขึ้น และที่กระแสป้อนแม่เหล็ก 24 แอมแปร์ เส้นกราฟที่ได้จากการวัดมีลักษณะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งการออกแบบขดลวดแม่เหล็กที่ใช้การระบายความร้อนด้วยอากาศ ค่าความหนาแน่นกระแสป้อนแม่เหล็กควรมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1.5 แอมแปร์ต่อตารางมิลลิเมตร (Tanabe, 2005) ซึ่งการวิจัยนี้ได้ใช้ข้อกำหนดดังกล่าวสำหรับประมาณการถึงเส้นลวดที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ประโยชน์ พบว่าเส้นลวดคือ EIW 2.8 x 5.0 ตารางมิลลิเมตรสามารถรองรับกระแสได้ไม่เกิน 21 แอมแปร์ ไม่เช่นนั้นอุณหภูมิของขดลวดจะเพิ่มสูงขึ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้น ดังปรากฏการณ์ที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.16

เมื่อทดสอบคุณสมบัติของแม่เหล็กหกขั้วเสร็จ แม่เหล็กหกขั้วชุดดังกล่าวถูกนำไปติดตั้งใช้งานร่วมกับแม่เหล็กหกขั้วตัวอื่น ๆ ที่ทำงานฟังก์ชันเดียวกัน ในวงกักเก็บอิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดแสงสยาม ซึ่งการใช้งานแม่เหล็กหกขั้วชุดดังกล่าวไม่ก่อให้เกิดผลในทางลบต่อการกักเก็บ

อิเล็กทรอนิกส์ แสดงให้เห็นว่าการออกแบบขดลวดแม่เหล็กหกขั้วและเทคนิคการสร้างขดลวดแม่เหล็กใหม่มีความถูกต้องเหมาะสม การติดตั้งแม่เหล็กหกขั้วชุดดังกล่าวใช้งาน แสดงได้ดังรูปที่ 6.17



รูปที่ 6.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขั้นในสุดของขดลวดแม่เหล็กกับระยะเวลาจ่ายกระแสแม่เหล็ก ที่ค่ากระแส 16-24 แอมแปร์



รูปที่ 6.16 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขั้นในสุดของขดลวดแม่เหล็กกับกระแสแม่เหล็ก ที่ค่า 16-24 แอมแปร์



รูปที่ 6.17 การติดตั้งแม่เหล็กหกขั้วที่ใช้ขดลวดแม่เหล็กชุดใหม่

## 6.5 สรุป

การทดสอบคุณสมบัติของแม่เหล็กหกขั้วที่ออกแบบขดลวดแม่เหล็กใหม่ โดยการวัดสนามแม่เหล็กใช้ชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกนที่พัฒนาขึ้น ร่วมกับชุดวัดสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์โพรบ การวัดอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์มอคัปเปิลที่ติดตั้งไว้ตามตำแหน่งต่าง ๆ ทั้งภายในขดลวดแม่เหล็กและที่ผิวของขดลวดแม่เหล็ก ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบคุณสมบัติของแม่เหล็กหกขั้ว สามารถสรุปผลได้ ดังต่อไปนี้

แม่เหล็กหกขั้วที่ออกแบบขดลวดใหม่และแม่เหล็กหกขั้วชุดเดิม ให้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความแรงสนามแม่เหล็กกับกระแสป้อนแม่เหล็ก ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.5 แสดงให้เห็นว่าแม่เหล็กทั้งสองมีคุณสมบัติทางแม่เหล็กเหมือนกัน

ความแรงสนามแม่เหล็กที่ได้จากการวัดมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการคำนวณ การคำนวณโดยโปรแกรม POISSON ให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับการวัดมากกว่าผลที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม RADIA ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.6 และ 6.7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการคำนวณค่าความแรงสนามแม่เหล็กโดยโปรแกรม POISSON มีความเหมาะสมกว่าโปรแกรม RADIA

ความยาวสนามแม่เหล็กที่ได้จากการวัดมีค่าประมาณ 230.6 มิลลิเมตร และผลที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม RADIA มีค่าเท่ากับ 230 มิลลิเมตร ซึ่งให้ค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นว่าการคำนวณความยาวสนามแม่เหล็กโดยโปรแกรม RADIA มีความถูกต้องเหมาะสม



อุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กที่ได้จากการวัดมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการคำนวณโดยโปรแกรม COSMOSWorks ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.16 ซึ่งพิกัดกระแสป้อนแม่เหล็ก 20 แอมแปร์ ให้ค่าอุณหภูมิที่ขึ้นในสุดของขดลวดแม่เหล็กประมาณ 58 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าค่าอุณหภูมิสูงสุดของขดลวดแม่เหล็กที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าพิกัดออกแบบอยู่ถึง 2 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าการเลือกขนาดเส้นลวดและการจัดเรียงเส้นลวดมีความถูกต้องเหมาะสม และโปรแกรม COSMOSWorks แสดงให้เห็นว่าสามารถนำมาประมาณค่าอุณหภูมิสูงสุดของขดลวดแม่เหล็กได้

เมื่อพิจารณาถึงการใช้งานแม่เหล็กหกขั้วชุดดังกล่าวในวงกักเก็บอิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดแสงสยาม ข้อมแสดงให้เห็นว่าการออกแบบขดลวดแม่เหล็กหกขั้วใหม่โดยอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูปในการคำนวณให้ความน่าเชื่อถือสูง และการจัดสร้างขดลวดแม่เหล็กหกขั้วชุดดังกล่าวมีความถูกต้องเป็นไปตามผลที่ได้ออกแบบไว้

## บทที่ 7

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 7.1 สรุป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณสมบัติของแม่เหล็กหกขั้ว เพื่อใช้ประโยชน์ในการแก้ไขโครมาติซิตีของวงกักเก็บอิเล็กตรอนระดับพลังงาน 1.2 GeV ของเครื่องกำเนิดแสงสยาม โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของแม่เหล็กหกขั้วให้สามารถรับพิกัดกระแสป้อนแม่เหล็ก 20 แอมแปร์ เพื่อพัฒนาแม่เหล็กหกขั้วจากการออกแบบและสร้างขดลวดแม่เหล็กใหม่ และเพื่อพัฒนาชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกน สำหรับใช้ประโยชน์ในการวัดสนามแม่เหล็ก การดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์ดังกล่าวสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ โดยสามารถสรุปผลการดำเนินงานวิจัยและพัฒนาทางวิศวกรรมเป็นข้อสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ความสำคัญและที่มาของปัญหา ได้รับการรายงานไว้ในบทที่ 1 เมื่อวงกักเก็บอิเล็กตรอนของเครื่องกำเนิดแสงสยามได้ปรับปรุงเพิ่มพลังงานจากระดับพลังงาน 1 GeV เป็นระดับพลังงาน 1.2 GeV เพื่อเพิ่มศักยภาพในการผลิตแสงซินโครตรอนในย่านรังสีเอ็กซ์ เพื่อให้การกักเก็บอิเล็กตรอนเกิดความเสถียร แม่เหล็กหกขั้วต้องรับการจ่ายกระแสป้อนแม่เหล็กสูงถึง 150 แอมแปร์ของค่าพิกัด ซึ่งก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อความเสียหายของขดลวดแม่เหล็กขณะใช้งาน โดยงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการปรับปรุงคุณสมบัติของแม่เหล็กหกขั้วใหม่ให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งาน

2. การทำงานของเครื่องกำเนิดแสงสยาม ได้ทำการศึกษาและเรียบเรียงไว้ในบทที่ 2 โดยให้ความสนใจหลักการทำงานของระบบผลิตและเร่งอิเล็กตรอน วงกักเก็บอิเล็กตรอน และการแก้ไขค่าโครมาติซิตีด้วยแม่เหล็กหกขั้ว เพื่อทำให้เกิดความเสถียรสำหรับการกักเก็บอิเล็กตรอน นอกจากนี้ในบทที่ 2 ยังนำเสนอผลการทดสอบแม่เหล็กหกขั้วชุดเดิมที่ใช้งานในปัจจุบัน เพื่อเป็นข้อมูลอ้างอิงสำหรับการดำเนินการปรับปรุงคุณสมบัติของแม่เหล็กหกขั้วใหม่

3. การออกแบบขดลวดแม่เหล็กหกขั้ว ได้รับการนำเสนอในบทที่ 3 โดยอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูปในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ โปรแกรม Accelerator Toolbox คำนวณพิกัดกระแสป้อนแม่เหล็กของแม่เหล็กหกขั้วที่มีความเหมาะสมต่อการใช้งาน โปรแกรม POISSON และโปรแกรม RADIA คำนวณสนามแม่เหล็กในสองมิติและสามมิติ ซึ่งการคำนวณโดยโปรแกรมทั้งสองจะให้ค่าพารามิเตอร์ของการออกแบบขดลวดแม่เหล็กใหม่ และโปรแกรม COSMOSWorks คำนวณอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กที่ออกแบบใหม่

4. การสร้างขดลวดแม่เหล็กหกซ์ ได้รับการนำเสนอในบทที่ 4 โดยได้ดำเนินการจัดสร้างขดลวดแม่เหล็กใหม่จำนวน 6 ชุด และมีการติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์มอคัปเปิลไว้ในขดลวดแม่เหล็กตามตำแหน่งต่าง ๆ ด้วย นอกจากนี้ยังนำเสนอผลการเปรียบเทียบเซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์มอคัปเปิลก่อนนำไปใช้งาน พบว่าเซนเซอร์มีการตอบสนองเป็นเชิงเส้นไม่ปรากฏฮิสเทอรีซิส

5. การออกแบบและสร้างชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกน ได้รับการนำเสนอในบทที่ 5 โดยได้จัดสร้างชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กดังกล่าวขึ้น เพื่อวัตถุประสงค์ในการวัดสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กหกซ์และใช้งานกับเครื่องกำเนิดแสงสยาม การจัดสร้างให้พิสัยของการเคลื่อนที่แกน X เท่ากับ 240 มิลลิเมตร แกน Y เท่ากับ 240 มิลลิเมตร และแกน Z เท่ากับ 2,560 มิลลิเมตร และผลของความคลาดเคลื่อนของการเคลื่อนที่ทั้งสามแกนอยู่ในช่วง  $\pm 0.025$  มิลลิเมตร

ซึ่งความคลาดเคลื่อนของการเคลื่อนที่มีค่าน้อยมาก เมื่อนำชุดเครื่องมือวัดดังกล่าวไปใช้งานจริงจะทำให้ข้อมูลที่ได้จากการวัดมีความน่าเชื่อถือสูง

6. การทดสอบคุณสมบัติของแม่เหล็กหกซ์ที่ใช้ขดลวดแม่เหล็กชุดใหม่ ได้รับการนำเสนอ ดังรายละเอียดในบทที่ 6 โดยการวัดสนามแม่เหล็กใช้ชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกน ร่วมกับชุดวัดสนามแม่เหล็กแบบฮอลล์โพรบ การวัดอุณหภูมิขดลวดแม่เหล็กใช้เซนเซอร์วัดอุณหภูมิแบบเทอร์มอคัปเปิล ที่ติดตั้งไว้ตามตำแหน่งต่าง ๆ ภายในขดลวดแม่เหล็ก เมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบผลที่ได้จากการวัดและผลที่ได้จากการคำนวณ แสดงให้เห็นว่าการออกแบบขดลวดแม่เหล็กหกซ์ใหม่ โดยอาศัยโปรแกรมสำเร็จรูปในการคำนวณมีความน่าเชื่อถือสูง และการสร้างขดลวดแม่เหล็กหกซ์ใหม่มีความถูกต้องเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ เมื่อนำแม่เหล็กหกซ์ชุดดังกล่าวติดตั้งใช้งานจริงในวงกักเก็บอิเล็กตรอน สามารถใช้งานได้เป็นอย่างดีโดยไม่ส่งผลกระทบต่อวงกักเก็บอิเล็กตรอน โดยคุณสมบัติของแม่เหล็กหกซ์ที่ใช้ขดลวดแม่เหล็กชุดใหม่ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 7.1 และการติดตั้งแม่เหล็กหกซ์ที่ได้รับการออกแบบขดลวดใหม่ใช้งานในวงกักเก็บอิเล็กตรอนระดับพลังงาน 1.2 GeV โดยมีพิกัดการใช้งาน ดังนี้ ค่ากระแสป้อนแม่เหล็ก 17.5 แอมแปร์ ความแรงสนามแม่เหล็ก  $95.749 \text{ T/m}^2$  และค่าอุณหภูมิสูงสุดของขดลวดแม่เหล็กประมาณ 49 องศาเซลเซียส

## 7.2 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์และผลที่ได้ ทำให้เกิดแนวคิดและข้อเสนอแนะในการดำเนินงานวิจัยต่อไปในอนาคต ดังต่อไปนี้

1. การปรับปรุงคุณสมบัติของแม่เหล็ก ควรมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบโครงสร้างแม่เหล็ก การเลือกใช้วัสดุสร้างแกนแม่เหล็ก และเทคนิคการสร้างที่มีความละเอียดสูง โดยงานวิจัยเหล่านี้ จะนำพาให้เราสามารถสร้างแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับบังคับลำอนุภาคพลังงานสูงได้

2. การออกแบบขดลวดแม่เหล็ก ควรมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการใช้เส้นลวดที่มีการระบายความร้อนภายในตัวเส้นลวด ซึ่งการใช้เส้นลวดดังกล่าวจะสามารถรับกระแสป้อนแม่เหล็กได้สูง

3. การคำนวณอนุกรมขดลวดแม่เหล็ก ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับ โปรแกรม SolidWorks และ COSMOSWorks เพื่อให้สามารถวิเคราะห์อนุกรมขดลวดแม่เหล็กได้เสมือนการใช้งานจริง ดังเช่น การคำนวณอนุกรมขดลวดแม่เหล็กเข้ากับตัวโครงสร้างแม่เหล็ก

4. การพัฒนาชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก เพื่อให้ได้พิสัยและความคลาดเคลื่อนของการเคลื่อนที่ตามที่ต้องการ ควรมีการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเลือกใช้วัสดุและการออกแบบโครงสร้างฐานรอง เพื่อให้เกิดการยึดหดของโครงสร้างน้อยที่สุด ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับชุดบังคับการเคลื่อนที่ เมื่อต้องการออกแบบให้มีพิสัยของการเคลื่อนที่มากขึ้น การใช้แกนหมุนแบบบอลล์สกรู อาจมีความไม่เหมาะสม

ตารางที่ 7.1 คุณสมบัติของแม่เหล็กหกขั้วที่ใช้ขดลวดแม่เหล็กชุดใหม่ ที่ได้จากการวัด

พิกัดกระแสป้อนแม่เหล็ก (A)	20
พิกัดแรงเคลื่อนแม่เหล็ก (A.turns)	2,200
พิกัดความแรงสนามแม่เหล็ก ( $T/m^2$ )	109.0378
ความต้านทาน R24 ( $\Omega$ )	0.47
ความยาวสนามแม่เหล็ก (mm)	230.6
จำนวนรอบการพันขดลวดต่อขั้ว (รอบ)	110
เส้นลวด (mm)	EIW-2.8x5.0
การระบายความร้อน	อากาศ
ที่ค่าพิกัดกระแสป้อนแม่เหล็กให้ค่าอนุกรมชั้นในสุดของขดลวดแม่เหล็ก ( $^{\circ}C$ )	58
วัสดุที่ใช้ทำแกนแม่เหล็ก	S10C

## รายการอ้างอิง

- ศุภกร รักใหม่. (2548). ระบบผลิตและเร่งอิเล็กตรอน. **ฟิสิกส์และวิศวกรรม. ศูนย์ปฏิบัติการวิจัย เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ.**
- ศุภกร รักใหม่. (2548). ฟิสิกส์ของวงกักเก็บอิเล็กตรอน. **ฟิสิกส์และวิศวกรรม. ศูนย์ปฏิบัติการวิจัย เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ.**
- Andersson, A., Lindgren, L-J. and Chubar, O. (1998). 3D calculation for the MAX II lattice magnet. **EPAC 1998, Sweden.** pp. 1207-1210.
- Billen, J. H. and Young, L. M. (2004). Poisson superfish. **LA-UR-96-1834.** Los Alamos National Laboratory, California, USA.
- Chavanne, J., Elleaume, P. and Van Vaerenbergh, P. (1999). End field structure for LINEAR/HELICAL insertion devices. **PAC1999, New York.** pp. 2665-2667.
- Chubar, O., Elleaume, P. and Chavanne, J. (2006). RADIA (version 4.1) [Computer software]. European Synchrotron Radiation Facility.
- COSMOSWorks [Computer software].(2006). SolidWorks Corporation.
- FARO Technologies. (2002). **FARO laser tracker Xi.** FARO Technologies.
- Group3 Technology. (2000). **Group3 DTM-151 digital teslameter.** Group3 Technology.
- Guiducci, S. (1991). Chromaticity. **LNF-91/031(R).** Frascati National Laboratories, Italy.
- Huttel, E., Tanabe, J., Jackson, A., Barg, B. and LeBlanc, G. (2004). The storage ring magnet of the Australian Synchrotron. **EPAC 2004, Switzerland.** pp. 1666-1668.
- James, H. ,Billen and Young, Lloyd M. (2004). POISSON SUPERFISH (version 7.16) [Computer software]. Los Alamos National Laboratory.
- Khachatryan, V. and Petrosyan, A. (2005). Conventional magnet design for the CANDLE storage ring. **PAC2005, Tennessee.** pp. 4182-4184.
- Koseki, T., et al. (2002). Quadrupole and sextupole magnet for the SUPER SOR storage ring.**EPAC 2002, France.** pp. 2355-2357.
- Kwankasem, C. (2006). Measurement of the chromaticity for the beam service configuration 1.2 GeV. **NSRC-TN-2006-10.** National Synchrotron Research Center, Thailand.
- Leica Geosystem. (2002). **Leica NAK2 automatic level.** Leica Geosystem.

- Mitsubishi Electric Corporation. (2000). **Final documents of magnet construction for Siam Photon Project**. Mitsubishi Electric Corporation.
- Mitsubishi Electric Corporation. (2001). **Final documents of reassembling for Siam Photon Project**. Mitsubishi Electric Corporation.
- Portmann,G.,Corbett, J. and Terebilo, A. (2005). An accelerator control middle layer using matlab. **PAC2005, Tennessee**. pp. 4009-4011.
- Rakowsky, G. (2001). Enhancement of NSLS sextupole using permanent magnet. **PAC2001, Chicago**. pp.3242-3244.
- Rugmai, S., et al. (2007). Energy upgrade of the Siam Photon Source. **AIP Proceeding** . 879 : 58-61.
- Rugmai, S., Kwankasem, C., Sudmuang, P. and Klysubun, P. (2007) Beam based alignment and cod correction for Siam Photon Source. **APAC 2007, India**. pp. 130-132.
- Sorensen . (2004). **Sorensen SGI DC power supply**.Sorensen.
- S Y Lee, S Y. (2004). **Accelerator Physics**. Indiana University, USA.
- Tanabe, J. (2005). **Iron Dominated Electromagnets Design, Fabrication, Assembly and Measurements**. Stanford Linear Accelerator Center, Stanford, USA.
- Terebilo, A. (2001). Accelerator Toolbox for MATLAB (version 1.2) [Computer software]. Stanford Linear Accelerator Center, Stanford, USA.
- TOPCON. (2000). **TOPCON GTS-710 electronic total station**. TOPCON.
- Wiedemann, H. (1993). **Particle Accelerator Physics I**. New York : Springer-Verlag.
- WYLER AG. (2002). **Wyler leveltronic NT**. WYLER AG.

ภาคผนวก ก

โปรแกรม Accelerator Toolbox สำหรับสร้างแบบจำลองวงกักเก็บอิเล็กตรอน  
ระดับพลังงาน 1.2 GeV ของเครื่องกำเนิดแสงสยาม





```

QF3_K = 2.315304; % ความแรงของแม่เหล็กสี่ขั้ว QF3
QD4_K = -1.758017; % ความแรงของแม่เหล็กสี่ขั้ว QD4
QF1_LENGTH = 0.323; % ความยาวสนามแม่เหล็ก QF1
QD2_LENGTH = 0.323; % ความยาวสนามแม่เหล็ก QD2
QF3_LENGTH = 0.323; % ความยาวสนามแม่เหล็ก QF3
QD4_LENGTH = 0.323; % ความยาวสนามแม่เหล็ก QD4
QF1 = quadrupole('QF1',QF1_LENGTH,QF1_K,'QuadLinearPass'); % สร้างแม่เหล็กสี่ขั้ว QF1
QD2 = quadrupole('QD2',QD2_LENGTH,QD2_K,'QuadLinearPass'); % สร้างแม่เหล็กสี่ขั้ว QD2
QF3 = quadrupole('QF3',QF3_LENGTH,QF3_K,'QuadLinearPass'); % สร้างแม่เหล็กสี่ขั้ว QF3
QD4 = quadrupole('QD4',QD4_LENGTH,QD4_K,'QuadLinearPass'); % สร้างแม่เหล็กสี่ขั้ว QD4
% สร้างแม่เหล็กหกขั้วฟังก์ชัน SF และ SD
GLOBVAL.E0 = 1.20e9; % ระดับพลังงานของอิเล็กตรอน
GLOBVAL.BRHO = GLOBVAL.E0/2.99e8; % magnetic rigid
% ความชันของกราฟความแรงสนามแม่เหล็กกับกระแสป้อนแม่เหล็ก ฟังก์ชัน SF
GLOBVAL.SLOPESF = 5.47217;
% ความชันของกราฟความแรงสนามแม่เหล็กกับกระแสป้อนแม่เหล็ก ฟังก์ชัน SD
GLOBVAL.SLOPESD = -5.35693;
ISF=20; % ค่ากระแสป้อนแม่เหล็กฟังก์ชัน SF
ISD=20; % ค่ากระแสป้อนแม่เหล็กฟังก์ชัน SD
SF_LENGTH = 0.18087; % ความยาวสนามแม่เหล็กฟังก์ชัน SF
SD_LENGTH = 0.23065; % ความยาวสนามแม่เหล็กฟังก์ชัน SD
SF_S = ISF*GLOBVAL.SLOPESF/GLOBVAL.BRHO/2; % ความแรงของแม่เหล็กหกขั้ว SF
SD_S = ISD*GLOBVAL.SLOPESD/GLOBVAL.BRHO/2; % ความแรงของแม่เหล็กหกขั้ว SD
SF=sextupole('SF',SF_LENGTH,SF_S, 'StrMPoleSymplectic4Pass'); % สร้างแม่เหล็กหกขั้ว SF
SD=sextupole('SD',SD_LENGTH,SD_S, 'StrMPoleSymplectic4Pass'); % สร้างแม่เหล็กหกขั้ว SD
% สร้างช่องว่างส่วนที่ไม่มีแม่เหล็กติดตั้งอยู่
DQF1 = QF1_LENGTH/2;
DQD2 = QD2_LENGTH/2;
DQF3 = QF3_LENGTH/2;
DQD4 = QD4_LENGTH/2;
DSF= SF_LENGTH/2;

```

```

DSD = SD_LENGTH/2;
D0 = drift('D0' ,0.0000,'DriftPass');           % สร้างจุดเริ่มต้นของโครงสร้างแบบ DBA
D1 = drift('D1' ,3.6450-DQF1,'DriftPass');      % สร้างช่องว่างระหว่างจุดเริ่มต้นกับ QF1
D2 = drift('D2' ,0.6900-DQF1-DQD2,'DriftPass'); % สร้างช่องว่างระหว่าง QF1 กับ QD2
D3 = drift('D3' ,0.5500-DQD2,'DriftPass');      % สร้างช่องว่างระหว่าง QD2 กับ BM
D4 = drift('D4' ,0.7450-DQF3,'DriftPass');      % สร้างช่องว่างระหว่าง BM กับ QF3
D5 = drift('D5' ,0.3500-DQF3-DSF,'DriftPass');  % สร้างช่องว่างระหว่าง QF3 กับ SF
D6 = drift('D6' ,1.6240-DSF-DSD,'DriftPass');   % สร้างช่องว่างระหว่าง SF กับ SD
D7 = drift('D7' ,0.3750-DSD-DQD4,'DriftPass');  % สร้างช่องว่างระหว่าง SD กับ QD4
DARF = drift('DARF' ,1.6340-DQF1,'DriftPass'); % สร้างช่องว่างระหว่าง QF1 กับ RF
DBRF = drift('DBRF' ,2.0110,'DriftPass');      % สร้างช่องว่างระหว่าง RF กับจุดกึ่งกลางของวง
% สร้างส่วนประกอบแลตทิซส่วนที่ 1
SPL1 = [D0 D1 QF1 D2 QD2 D3 BM D4 QF3 D5 SF D6 SD...
        D7 QD4 D7 SD D6 SF D5 QF3 D4 BM D3 QD2 D2 QF1 D1];
% สร้างส่วนประกอบแลตทิซส่วนที่ 2
SPL 2 = [D1 QF1 D2 QD2 D3 BM D4 QF3 D5 SF D6 SD...
        D7 QD4 D7 SD D6 SF D5 QF3 D4 BM D3 QD2 D2 QF1 DARF DBRF];
% สร้างส่วนประกอบแลตทิซส่วนที่ 3
SPL 3 = [D1 QF1 D2 QD2 D3 BM D4 QF3 D5 SF D6 SD...
        D7 QD4 D7 SD D6 SF D5 QF3 D4 BM D3 QD2 D2 QF1 D1];
% สร้างส่วนประกอบแลตทิซส่วนที่ 4
SPL 4 = [D1 QF1 D2 QD2 D3 BM D4 QF3 D5 SF D6 SD...
        D7 QD4 D7 SD D6 SF D5 QF3 D4 BM D3 QD2 D2 QF1 D1 D0];
SPLLIST = [CAV SPL1 SPL2 SPL3 SPL4 AP]; % สร้างส่วนประกอบทั้งวง
buildlat(SPLLIST);                       % สร้างแบบจำลองวงกักเก็บอิเล็กตรอน
evalin('caller' , 'global FAMLIST THERING GLOBVAL');
disp('** Done **');
% คำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าโครมาติซิตี
[tune,chrom]=tunchrom(THERING,0.00001,[4.7 2.8],'chrom');

```

ภาคผนวก ข

โปรแกรม POISSON สำหรับคำนวณสนามแม่เหล็กแบบสองมิติ  
ของแม่เหล็กทรงแฉั่ว

\*\*\*\*\*

โปรแกรมสำหรับคำนวณสนามแม่เหล็กแบบสองมิติของแม่เหล็กหกขั้ว

โดย นายศุภชัย ประวันตา สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

\*\*\*\*\*

### โปรแกรม SEXTUPOLE.am

Sextupole Magnet for Storage Ring 1.2 GeV

Magnetic Fields Simulation by POISSON

```
&reg kprob=0,           % การคำนวณโดยโปรแกรม POISSON
mode=0                 % กำหนดวัสดุของแกนแม่เหล็กเป็นเหล็กคาร์บอน 1010 หรือ S10C
mat=2,                 % กำหนดขอบเขตแรกที่สร้างขึ้น วัสดุจะเป็นเหล็กคาร์บอน 1010
dx=0.03,
dy=0.03,
yminf=0.0,ymaxf=0.0   % ช่วงการคำนวณค่าสนามแม่เหล็กแกน Y
xminf=-15.0,xmaxf=15.0 % ช่วงการคำนวณค่าสนามแม่เหล็กแกน X
% กำหนดพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก
ktype=7,               % การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกของแม่เหล็กหกขั้ว
nterm=5,
nptc=11,
rint=1.0,
angle=360,
rnorm=1.0 &
% สร้างขอบเขตแรก
&po x=19.00,y=0.00 &
&po nt=2,r=19.00,theta=180 &
&po nt=2,r=19.00,theta=360 &
% สร้างขอบเขตของอากาศหรือช่องว่างภายในโครงสร้างแม่เหล็ก
&reg mat=1 &
&po x=16.50,y=0.00 &
&po nt=2,x=15.3744,y=5.9897 &
&po x=8.1782,y=1.8349 &
&po x=8.4283,y=1.4018 &
```

&po x=7.5742,y=0.9087 &  
&po x=7.2742,y=0.9087 &  
&po x=6.6025,y=1.1500 &  
&po x=6.3420,y=1.2500 &  
&po x=6.1128,y=1.3500 &  
&po x=5.9097,y=1.4500 &  
&po x=5.7286,y=1.5500 &  
&po x=5.5663,y=1.6500 &  
&po x=5.4201,y=1.7500 &  
&po x=5.2882,y=1.8500 &  
&po x=5.1688,y=1.9500 &  
&po x=5.0604,y=2.0500 &  
&po x=4.9621,y=2.1500 &  
&po x=4.8727,y=2.2500 &  
&po x=4.7914,y=2.3500 &  
&po x=4.7176,y=2.4500 &  
&po x=4.6506,y=2.5500 &  
&po x=4.5899,y=2.6500 &  
&po x=4.5336,y=2.7525 &  
&po x=4.4806,y=2.8606 &  
&po x=4.4309,y=2.9745 &  
&po x=4.3849,y=3.0949 &  
&po x=4.3430,y=3.2223 &  
&po x=4.3055,y=3.3574 &  
&po x=4.2731,y=3.5013 &  
&po x=4.2462,y=3.6547 &  
&po x=4.2256,y=3.8189 &  
&po x=4.2121,y=3.9956 &  
&po x=4.2066,y=4.1861 &  
&po x=4.2106,y=4.3929 &  
&po x=4.2255,y=4.6188 &

&po x=4.2535,y=4.8673 &  
&po x=4.2972,y=5.1429 &  
&po x=4.4241,y=5.8453 &  
&po x=4.5741,y=6.1051 &  
&po x=5.4282,y=6.5981 &  
&po x=5.6782,y=6.1651 &  
&po x=12.8744,y=10.3198 &  
&po nt=2,x=2.5000,y=16.3095 &  
&po x=2.5000,y=8.0000 &  
&po x=3.0000,y=8.0000 &  
&po x=3.0000,y=7.0138 &  
&po x=2.8500,y=6.7540 &  
&po x=2.3053,y=6.2929 &  
&po x=2.0885,y=6.1173 &  
&po x=1.8873,y=5.9689 &  
&po x=1.6991,y=5.8429 &  
&po x=1.5220,y=5.7361 &  
&po x=1.3542,y=5.6456 &  
&po x=1.1945,y=5.5689 &  
&po x=1.0419,y=5.5047 &  
&po x=0.8956,y=5.4513 &  
&po x=0.7548,y=5.4074 &  
&po x=0.6191,y=5.3723 &  
&po x=0.4878,y=5.3449 &  
&po x=0.3605,y=5.3245 &  
&po x=0.2370,y=5.3106 &  
&po x=0.1169,y=5.3025 &  
&po x=0.0000,y=5.3000 &  
&po x=-0.1169,y=5.3025 &  
&po x=-0.2370,y=5.3106 &  
&po x=-0.3605,y=5.3245 &

&po x=-0.4878,y=5.3449 &  
&po x=-0.6191,y=5.3723 &  
&po x=-0.7548,y=5.4074 &  
&po x=-0.8956,y=5.4513 &  
&po x=-1.0419,y=5.5047 &  
&po x=-1.1945,y=5.5689 &  
&po x=-1.3542,y=5.6456 &  
&po x=-1.5220,y=5.7361 &  
&po x=-1.6991,y=5.8429 &  
&po x=-1.8873,y=5.9689 &  
&po x=-2.0885,y=6.1173 &  
&po x=-2.3053,y=6.2929 &  
&po x=-2.8500,y=6.7540 &  
&po x=-3.0000,y=7.0138 &  
&po x=-3.0000,y=8.0000 &  
&po x=-2.5000,y=8.0000 &  
&po x=-2.5000,y=16.3095 &  
&po nt=2,x=-12.8744,y=10.3198 &  
&po x=-5.6782,y=6.1651 &  
&po x=-5.4282,y=6.5981 &  
&po x=-4.5741,y=6.1051 &  
&po x=-4.4241,y=5.8453 &  
&po x=-4.2972,y=5.1429 &  
&po x=-4.2535,y=4.8673 &  
&po x=-4.2255,y=4.6188 &  
&po x=-4.2106,y=4.3929 &  
&po x=-4.2066,y=4.1861 &  
&po x=-4.2121,y=3.9956 &  
&po x=-4.2256,y=3.8189 &  
&po x=-4.2462,y=3.6547 &  
&po x=-4.2731,y=3.5013 &

&po x=-4.3055,y=3.3574 &  
&po x=-4.3430,y=3.2223 &  
&po x=-4.3849,y=3.0949 &  
&po x=-4.4309,y=2.9745 &  
&po x=-4.4806,y=2.8606 &  
&po x=-4.5336,y=2.7525 &  
&po x=-4.5899,y=2.6500 &  
&po x=-4.6506,y=2.5500 &  
&po x=-4.7176,y=2.4500 &  
&po x=-4.7914,y=2.3500 &  
&po x=-4.8727,y=2.2500 &  
&po x=-4.9621,y=2.1500 &  
&po x=-5.0604,y=2.0500 &  
&po x=-5.1688,y=1.9500 &  
&po x=-5.2882,y=1.8500 &  
&po x=-5.4201,y=1.7500 &  
&po x=-5.5663,y=1.6500 &  
&po x=-5.7286,y=1.5500 &  
&po x=-5.9097,y=1.4500 &  
&po x=-6.1128,y=1.3500 &  
&po x=-6.3420,y=1.2500 &  
&po x=-6.6025,y=1.1500 &  
&po x=-7.2742,y=0.9087 &  
&po x=-7.5742,y=0.9087 &  
&po x=-8.4283,y=1.4018 &  
&po x=-8.1782,y=1.8349 &  
&po x=-15.3744,y=5.9897 &  
&po nt=2,x=-15.3744,y=-5.9897 &  
&po x=-8.1782,y=-1.8349 &  
&po x=-8.4283,y=-1.4018 &  
&po x=-7.5742,y=-0.9087 &



&po x=-7.2742,y=-0.9087 &  
&po x=-6.6025,y=-1.1500 &  
&po x=-6.3420,y=-1.2500 &  
&po x=-6.1128,y=-1.3500 &  
&po x=-5.9097,y=-1.4500 &  
&po x=-5.7286,y=-1.5500 &  
&po x=-5.5663,y=-1.6500 &  
&po x=-5.4201,y=-1.7500 &  
&po x=-5.2882,y=-1.8500 &  
&po x=-5.1688,y=-1.9500 &  
&po x=-5.0604,y=-2.0500 &  
&po x=-4.9621,y=-2.1500 &  
&po x=-4.8727,y=-2.2500 &  
&po x=-4.7914,y=-2.3500 &  
&po x=-4.7176,y=-2.4500 &  
&po x=-4.6506,y=-2.5500 &  
&po x=-4.5899,y=-2.6500 &  
&po x=-4.5336,y=-2.7525 &  
&po x=-4.4806,y=-2.8606 &  
&po x=-4.4309,y=-2.9745 &  
&po x=-4.3849,y=-3.0949 &  
&po x=-4.3430,y=-3.2223 &  
&po x=-4.3055,y=-3.3574 &  
&po x=-4.2731,y=-3.5013 &  
&po x=-4.2462,y=-3.6547 &  
&po x=-4.2256,y=-3.8189 &  
&po x=-4.2121,y=-3.9956 &  
&po x=-4.2066,y=-4.1861 &  
&po x=-4.2106,y=-4.3929 &  
&po x=-4.2255,y=-4.6188 &  
&po x=-4.2535,y=-4.8673 &

&po x=-4.2972,y=-5.1429 &  
&po x=-4.4241,y=-5.8453 &  
&po x=-4.5741,y=-6.1051 &  
&po x=-5.4282,y=-6.5981 &  
&po x=-5.6782,y=-6.1651 &  
&po x=-12.8744,y=-10.3198 &  
&po nt=2,x=-2.5000,y=-16.3095 &  
&po x=-2.5000,y=-8.0000 &  
&po x=-3.0000,y=-8.0000 &  
&po x=-3.0000,y=-7.0138 &  
&po x=-2.8500,y=-6.7540 &  
&po x=-2.3053,y=-6.2929 &  
&po x=-2.0885,y=-6.1173 &  
&po x=-1.8873,y=-5.9689 &  
&po x=-1.6991,y=-5.8429 &  
&po x=-1.5220,y=-5.7361 &  
&po x=-1.3542,y=-5.6456 &  
&po x=-1.1945,y=-5.5689 &  
&po x=-1.0419,y=-5.5047 &  
&po x=-0.8956,y=-5.4513 &  
&po x=-0.7548,y=-5.4074 &  
&po x=-0.6191,y=-5.3723 &  
&po x=-0.4878,y=-5.3449 &  
&po x=-0.3605,y=-5.3245 &  
&po x=-0.2370,y=-5.3106 &  
&po x=-0.1169,y=-5.3025 &  
&po x=0.0000,y=-5.3000 &  
&po x=0.1169,y=-5.3025 &  
&po x=0.2370,y=-5.3106 &  
&po x=0.3605,y=-5.3245 &  
&po x=0.4878,y=-5.3449 &

&po x=0.6191,y=-5.3723 &  
&po x=0.7548,y=-5.4074 &  
&po x=0.8956,y=-5.4513 &  
&po x=1.0419,y=-5.5047 &  
&po x=1.1945,y=-5.5689 &  
&po x=1.3542,y=-5.6456 &  
&po x=1.5220,y=-5.7361 &  
&po x=1.6991,y=-5.8429 &  
&po x=1.8873,y=-5.9689 &  
&po x=2.0885,y=-6.1173 &  
&po x=2.3053,y=-6.2929 &  
&po x=2.8500,y=-6.7540 &  
&po x=3.0000,y=-7.0138 &  
&po x=3.0000,y=-8.0000 &  
&po x=2.5000,y=-8.0000 &  
&po x=2.5000,y=-16.3095 &  
&po nt=2,x=12.8744,y=-10.3198 &  
&po x=5.6782,y=-6.1651 &  
&po x=5.4282,y=-6.5981 &  
&po x=4.5741,y=-6.1051 &  
&po x=4.4241,y=-5.8453 &  
&po x=4.2972,y=-5.1429 &  
&po x=4.2535,y=-4.8673 &  
&po x=4.2255,y=-4.6188 &  
&po x=4.2106,y=-4.3929 &  
&po x=4.2066,y=-4.1861 &  
&po x=4.2121,y=-3.9956 &  
&po x=4.2256,y=-3.8189 &  
&po x=4.2462,y=-3.6547 &  
&po x=4.2731,y=-3.5013 &  
&po x=4.3055,y=-3.3574 &

```

&po x=4.3430,y=-3.2223 &
&po x=4.3849,y=-3.0949 &
&po x=4.4309,y=-2.9745 &
&po x=4.4806,y=-2.8606 &
&po x=4.5336,y=-2.7525 &
&po x=4.5899,y=-2.6500 &
&po x=4.6506,y=-2.5500 &
&po x=4.7176,y=-2.4500 &
&po x=4.7914,y=-2.3500 &
&po x=4.8727,y=-2.2500 &
&po x=4.9621,y=-2.1500 &
&po x=5.0604,y=-2.0500 &
&po x=5.1688,y=-1.9500 &
&po x=5.2882,y=-1.8500 &
&po x=5.4201,y=-1.7500 &
&po x=5.5663,y=-1.6500 &
&po x=5.7286,y=-1.5500 &
&po x=5.9097,y=-1.4500 &
&po x=6.1128,y=-1.3500 &
&po x=6.3420,y=-1.2500 &
&po x=6.6025,y=-1.1500 &
&po x=7.2742,y=-0.9087 &
&po x=7.5742,y=-0.9087 &
&po x=8.4283,y=-1.4018 &
&po x=8.1782,y=-1.8349 &
&po x=15.3744,y=-5.9897 &
&po nt=2,x=16.50,y=0.00 &
% สร้างขดลวดแม่เหล็ก ขดลวดที่ 1 ด้านซ้าย
&reg mat=1,cur=2200 & % กระแสป้อนแม่เหล็กไหลออกจากหน้ากระดาษ
&po x=8.7612,y=1.8251 &
&po x=9.4612,y=0.6127 &

```

```

&po x=13.4769,y=0.9913 &
&po x=15.4974,y=2.1578 &
&po x=13.9574,y=4.8251 &
&po x=8.7612,y=1.8251 &
% สร้างขดลวดแม่เหล็ก ขดลวดที่ 1 ด้านขวา
&reg mat=1,cur=-2200 &          % กระแสป้อนแม่เหล็กไหลเข้าหน้ากระดาษ
&po x=5.9612,y=6.6749 &
&po x=5.2612,y=7.8873 &
&po x=7.5969,y=11.1757 &
&po x=9.6174,y=12.3422 &
&po x=11.1574,y=9.6749 &
&po x=5.9612,y=6.6749 &
% สร้างขดลวดแม่เหล็ก ขดลวดที่ 2 ด้านซ้าย
&reg mat=1,cur=-2200 &
&po x=2.8000,y=8.5000 &
&po x=4.2000,y=8.5000 &
&po x=5.8800,y=12.1670 &
&po x=5.8800,y=14.5000 &
&po x=2.8000,y=14.5000 &
&po x=2.8000,y=8.5000 &
% สร้างขดลวดแม่เหล็ก ขดลวดที่ 2 ด้านขวา
&reg mat=1,cur=2200 &
&po x=-2.8000,y=8.5000 &
&po x=-4.2000,y=8.5000 &
&po x=-5.8800,y=12.1670 &
&po x=-5.8800,y=14.5000 &
&po x=-2.8000,y=14.5000 &
&po x=-2.8000,y=8.5000 &
% สร้างขดลวดแม่เหล็ก ขดลวดที่ 3 ด้านซ้าย
&reg mat=1,cur=2200 &
&po x=-5.9612,y=6.6749 &

```

```

&po x=-5.2612,y=7.8873 &
&po x=-7.5969,y=11.1757 &
&po x=-9.6174,y=12.3422 &
&po x=-11.1574,y=9.6749 &
&po x=-5.9612,y=6.6749 &
% สร้างขดลวดแม่เหล็ก ขดลวดที่ 3 ด้านขวา
&reg mat=1,cur=-2200 &
&po x=-8.7612,y=1.8251 &
&po x=-9.4612,y=0.6127 &
&po x=-13.4769,y=0.9913 &
&po x=-15.4974,y=2.1578 &
&po x=-13.9574,y=4.8251 &
&po x=-8.7612,y=1.8251 &
% สร้างขดลวดแม่เหล็ก ขดลวดที่ 4 ด้านซ้าย
&reg mat=1,cur=-2200 &
&po x=-8.7612,y=-1.8251 &
&po x=-9.4612,y=-0.6127 &
&po x=-13.4769,y=-0.9913 &
&po x=-15.4974,y=-2.1578 &
&po x=-13.9574,y=-4.8251 &
&po x=-8.7612,y=-1.8251 &
% สร้างขดลวดแม่เหล็ก ขดลวดที่ 4 ด้านขวา
&reg mat=1,cur=2200 &
&po x=-5.9612,y=-6.6749 &
&po x=-5.2612,y=-7.8873 &
&po x=-7.5969,y=-11.1757 &
&po x=-9.6174,y=-12.3422 &
&po x=-11.1574,y=-9.6749 &
&po x=-5.9612,y=-6.6749 &
% สร้างขดลวดแม่เหล็ก ขดลวดที่ 5 ด้านซ้าย
&reg mat=1,cur=2200 &

```

```

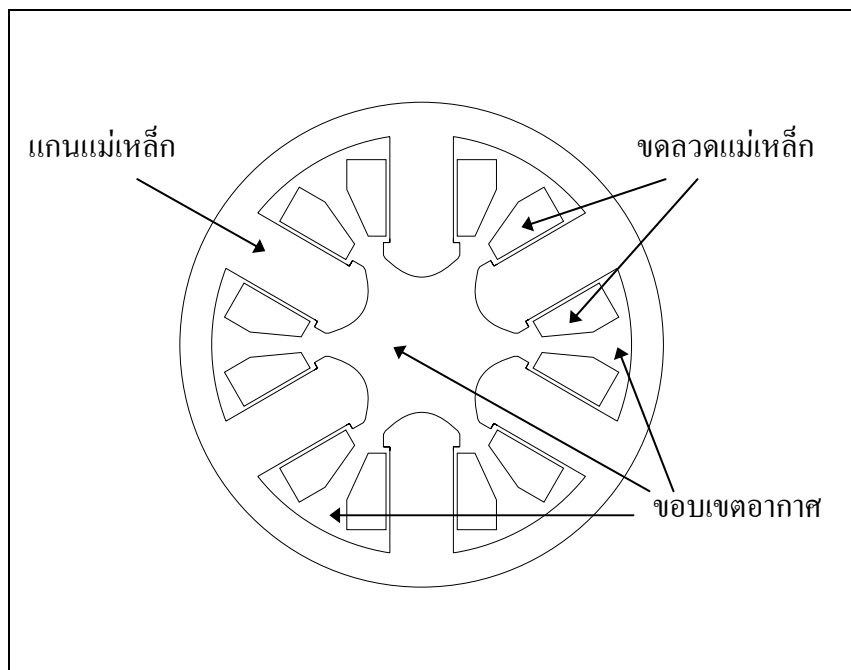
&po x=-2.8000,y=-8.5000 &
&po x=-4.2000,y=-8.5000 &
&po x=-5.8800,y=-12.1670 &
&po x=-5.8800,y=-14.5000 &
&po x=-2.8000,y=-14.5000 &
&po x=-2.8000,y=-8.5000 &
% สร้างขดลวดแม่เหล็ก ขดลวดที่ 5 ด้านขวา
&reg mat=1,cur=-2200 &
&po x=2.8000,y=-8.5000 &
&po x=4.2000,y=-8.5000 &
&po x=5.8800,y=-12.1670 &
&po x=5.8800,y=-14.5000 &
&po x=2.8000,y=-14.5000 &
&po x=2.8000,y=-8.5000 &
% สร้างขดลวดแม่เหล็ก ขดลวดที่ 6 ด้านซ้าย
&reg mat=1,cur=-2200 &
&po x=5.9612,y=-6.6749 &
&po x=5.2612,y=-7.8873 &
&po x=7.5969,y=-11.1757 &
&po x=9.6174,y=-12.3422 &
&po x=11.1574,y=-9.6749 &
&po x=5.9612,y=-6.6749 &
% สร้างขดลวดแม่เหล็ก ขดลวดที่ 6 ด้านขวา
&reg mat=1,cur=2200 &
&po x=8.7612,y=-1.8251 &
&po x=9.4612,y=-0.6127 &
&po x=13.4769,y=-0.9913 &
&po x=15.4974,y=-2.1578 &
&po x=13.9574,y=-4.8251 &
&po x=8.7612,y=-1.8251 &
% สร้างของขอบเขตรอบแม่เหล็ก

```

```

;&reg cur=0.0,ibound=0 &
;&po x=19.00,y=0.00 &
;&po nt=2,r=19.00,theta=180 &
;&po nt=2,r=19.00,theta=360 &

```



รูปที่ ข.1 ส่วนประกอบย่อยต่าง ๆ ของโครงสร้างแม่เหล็กหกขั้ว  
สำหรับการคำนวณ โดยโปรแกรม POISSON



ภาคผนวก ค

โปรแกรม RADIA สำหรับคำนวณค่าสนามแม่เหล็กแบบสามมิติ  
ของแม่เหล็กหกขั้ว

\*\*\*\*\*

โปรแกรมสำหรับคำนวณสนามแม่เหล็กแบบสามมิติของแม่เหล็กหกขั้ว

โดย นายศุภชัย ประวันตา สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

\*\*\*\*\*

### โปรแกรม SEXTUPOLE.nb

```
<<Radia`;                                % โหลดโปรแกรม
Off[General::"spell1"];
<<Graphics`MultipleListPlot`;
<<Graphics`PlotField3D`;
% สร้างส่วนประกอบต่าง ๆ ของแม่เหล็กหกขั้ว
sex[radius_,thick_,width_,height_,ns_seg,CurDens_,ironmat_]:=Module[{n1,n2,np3,n4,np5,t0,t1,
t2,dy,Bz,Iz,gap,nx,ny,nz,na,nr3,nr5,Nn,depth,ct,z0,y0,dz,qq,g1,g2,gg,g3,cy,tan,len,g4,g5,cyl,
rmax,coil1,coilvol,g,gd,t,tc,w,mm,y,bp,Resistivity,power,volRaceTrk},
  t0=AbsoluteTime[];
  volRaceTrk[{rmin_,rmax_},{lx_,ly_},h_]:=h*(rmax-rmin)*(2*(lx+ly)+Pi*(rmax+rmin));
  gap=2*radius;                                % ช่องว่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก
  {nx,ny,nb,na}=List@@ns;
  n1={nx,6,8};
  n2={20,ny,nz};
  np3=na;
  nr3=ny;
  n4={nx,nz,ny};
  np5=Ceiling[np3/2];
  Nn=6;
  depth=1.2*width/2;                            % ความหนาของโครงแม่เหล็ก
  ct={0,0,0};
  z0=gap/2;                                    % พิกัดตำแหน่ง Z =0
  y0=width/2;                                  % พิกัดตำแหน่ง Y =0
  % สร้างเส้นรอบรูปของโครงสร้าง g1
  qq = N [ { {0.0000,53.0000} , {0.2893,53.0011}, {0.5808,53.0060} , {0.8743,53.0144} ,
{1.1694,53.0254} , {1.4664,53.0398} , {1.7659,53.0586} , {2.0669,53.0799} , {2.3704,53.1056}
```

, {2.6759,53.1348} , {2.9834,53.1674} , {3.2934,53.2043} , {3.6054,53.2447} ,  
 {3.9199,53.2895} , {4.2369,53.3386} , {4.5559,53.3911} , {4.8779,53.4488} , {5.2019,53.5100}  
 , {5.5289,53.5764} , {5.8584,53.6471} , {6.1910,53.7230} , {6.5260,53.8033} ,  
 {6.8640,53.8887} , {7.2050,53.9794} , {7.5485,54.0743} , {7.8955,54.1754} , {8.2460,54.2825}  
 , {8.5995,54.3948} , {8.9565,54.5131} , {9.3166,54.6367} , {9.6805,54.7671} ,  
 {10.0480,54.9037} , {10.4195,55.0472} , {10.7950,55.1976} , {11.1740,55.3540} ,  
 {11.5575,55.5183} , {11.9451,55.6894} , {12.3376,55.8693} , {12.7341,56.0561} ,  
 {13.1356,56.2515} , {13.5421,56.4556} , {13.9531,56.6675} , {14.3701,56.8897} ,  
 {14.7921,57.1207} , {15.2196,57.3611} , {15.6531,57.6120} , {16.0926,57.8732} ,  
 {16.5386,58.1457} , {16.9911,58.4295} , {17.4506,58.7254} , {17.9171,59.0334} ,  
 {18.3912,59.3544} , {18.8727,59.6884} , {19.3627,60.0371} , {19.8612,60.4006} ,  
 {20.3682,60.7787} , {20.8847,61.1733} , {21.4107,61.5844} , {21.9472,62.0137} ,  
 {22.4947,62.4620} , {23.0532,62.9293} , {28.5014,67.5399} , {30.0000,70.1380} ,  
 {30.0000,80.0000} , {0.0000,80.0000} } ] ;

% สร้างโครงสร้าง g1

g1=radObjThckPgn[thick/4,thick/2,qq];

radObjDivMag[g1,n1];

% แบ่งย่อยส่วนโครงสร้าง g1

% สร้างโครงสร้าง g2

g2=radObjRecMag[{thick/4-10,width/4,gap/2+h1+(height-h1)/2},{thick/2-20,width/2,  
 (height-h1)}];

radObjDivMag[g2,n2];

% แบ่งย่อยส่วนโครงสร้าง g2

gg=radObjCnt[{g1,g2}];

% รวมโครงสร้าง g1 และ g2 เข้าด้วยกัน

% สร้างโครงสร้าง g3

g3=radObjRecMag[{thick/4,width/4,gap/2+height+depth/2},{thick/2,width/2,depth}];

cy={"cyl",{0,width/2,gap/2+height},{1,0,0}},{0,0,gap/2+height},2\*depth/width};

radObjDivMag[g3,{nr3,np3,nx},cy];

% แบ่งย่อยส่วนโครงสร้าง g3

% สร้างโครงสร้าง g4

tan=N[Tan[2\*Pi/2/Nn]];

len=tan\*(height+gap/2)-width/2;

g4=radObjRecMag[{thick/4,width/2+len/2,gap/2+height+depth/2},{thick/2,len,depth}];

radObjDivMag[g4,n4];

% แบ่งย่อยส่วนโครงสร้าง g4

```

% สร้างโครงสร้าง g5
    posy=width/2+len;
    posz=posy/tan;
    g5=radObjThckPgn[thick/4,thick/2,{{posy,posz},{posy,posz+depth},{posy+depth*tan,
posz+depth}}];
    cyl={"cyl",{{0,posy,posz},{1,0,0}},{0,posy,posz+depth},1};
    radObjDivMag[g5,{nr5,np5,nx},cyl];          % แบ่งย่อยส่วนโครงสร้าง g5
% สร้างขดลวดแม่เหล็ก
    rmax=rmin+offset;
    coil1=radObjRaceTrk[{0,0,gap/2+h1+(height-h1)/2},{rmin,rmax},{thick-40,width},
h,10,CurDens];
    coilvol=volRaceTrk[{rmin,rmax},{thick,width},h];
    radObjDrwAtr[coil1,coilcolor];             % กำหนดสีขดลวดแม่เหล็ก
    g=radObjCnt[gg,g3,g4,g5];                 % รวมโครงสร้าง gg, g2, g3, g4, g5 เข้าด้วยกัน
    radObjDrwAtr[g,ironcolor];               % กำหนดสีโครงสร้าง g
    gd=radObjCnt[g];                          % ทำสำเนาโครงสร้าง g
    RadTrfZerPerp[gd,ct,{1,0,0}];            % สร้าง gd ในลักษณะ mirror กับแกน X
    RadTrfZerPerp[gd,ct,{0,1,0}];           % สร้าง gd ในลักษณะ mirror กับแกน Y
    t=radObjCnt[gd,coil1];                   % รวมโครงสร้าง gd และขดลวดแม่เหล็ก
    tc=radObjDpl[t];
    % สร้างโครงแม่เหล็กหกขั้วทั้งหมดโดยใช้หลักการ mirror และ rotation
    RadTrfZerPara[t,ct,{0,N[Cos[Pi/Nn]],N[Sin[Pi/Nn]]}];
    radTrfMlt[t,radTrfRot[ct,{1,0,0},4*Pi/Nn],Nn/2];
    radMatApl[g,ironmat];                   % กำหนดวัสดุของแกนเหล็ก
    radTrfOrnt[t,radTrfRot[{0,0,0},{1,0,0},N[2*Pi/Nn]]];
    size=radObjDegFre[t];
% คำนวณสนามแม่เหล็ก
    t1=AbsoluteTime[];
    {r1,r2,r3,r4}=RadSolve[t,0.0001,1000];
    t2=AbsoluteTime[];
% คำนวณอินทิกรัลสนามแม่เหล็ก

```

```

dy=1;
Bz=radFld[t,"Bz",{0,dy,0}];
Iz=radFldInt[t,"inf","ibz",{-1,dy,0},{1,dy,0}];
ra=2;
nharm=10;
w=harm[t,{0,0,ra},nharm];
mm=Table[multipol[w,i},{i,0,nharm-1}];
t3=AbsoluteTime[];
y=radius*0.97;
bp=Sqrt[2]*radFld[t,"Bz",{0,y*Cos[Pi/4],y*Sin[Pi/4]}];
power=coilvol*6*CurDens^2*1000*Resistivity;
% กำหนดสัญลักษณ์เอาต์พุต
{AllObject→t, % โครงสร้างทั้งหมดของแม่เหล็ก
 PoleObject→g, % โครงสร้างแกนแม่เหล็กบางส่วน
 PoleCoilObject→tc, % โครงสร้างแกนแม่เหล็กและขดลวดแม่เหล็กหนึ่งขั้ว
 PoleProfile→qq, % เส้นแสดงรูปร่างของแกนแม่เหล็ก
 DegOfFreedom→size,
 CreationCpuTime→t1-t0,
 SolvingCpuTime→t2-t1,
 ProcessCpuTime→t3-t2,
 AvPrec→r1,
 MaxMag→r2, % ค่าสูงสุดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในแกนเหล็ก (T)
 MaxH→r3, % ค่าสูงสุดของสนามแม่เหล็กในแกนเหล็ก (T)
 Niter→r4, % การคำนวณแบบวนซ้ำ
 PoleField→bp, % ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ศูนย์กลาง (T)
 IntSex→Iz/dy, % ค่าอินทิกรัลของสนามแม่เหล็ก (T)
 PeakGrad→Bz/dy, % ค่าเกรเดียนต์ (T/m)
 EffLength→Iz/Bz, % ค่าความยาวสนามแม่เหล็ก (mm)
 CoilVolume→coilvol*6, % ปริมาตรของขดลวดแม่เหล็ก (mm3)
 CoilPower→power, % ค่ากำลังความร้อนของขดลวดแม่เหล็ก (W)
 Debug→1,

```

```

    PeakField→Bz          % ค่าสูงสุดความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กในอากาศ (T)
}
];
SetAttributes[sex,Listable];
SetAttributes[seg,Listable];
% กำหนดค่าพารามิเตอร์อินพุตสำหรับแม่เหล็กหกขั้ว
radius=53;                % รัศมีของช่องว่างระหว่างขั้วแม่เหล็ก
width=50;                 % ความกว้างของแกนแม่เหล็ก
height=112;               % ความสูงของแกนแม่เหล็ก
thick=200;                % ความยาวของแกนแม่เหล็ก
CurDens=1.4285;          % ความหนาแน่นกระแสป้อนแม่เหล็กที่ค่า 20 แอมแปร์ (A/mm2)
h1=27;                    % ความสูงของเส้นแสดงรูปร่างแกนแม่เหล็ก
nx=25;                    % การแบ่งย่อยแกน X
ny=5;                     % การแบ่งย่อยแกน Y
nz=7;                     % การแบ่งย่อยแกน Z
na=6;                     % การแบ่งย่อยมุมโค้ง
rmin=5;
offset=25.66;             % ความกว้างของขดลวดแม่เหล็ก
h=60;                     % ความสูงของขดลวดแม่เหล็ก
ironcolor={0,0.5,1};      % สีของแกนแม่เหล็ก
coilcolor={1,0,0};        % สีของขดลวดแม่เหล็ก
Resistivity=1.7 10^-8;    % ค่าความต้านทานจำเพาะของทองแดง
radUtiDelAll[];
ironmat =RadMatSteel37[]; % กำหนดวัสดุแกนแม่เหล็ก
nseg=seg[nx,ny,nb,na];
res=sex[radius,thick,width,height,nseg,CurDens,ironmat]
% การแสดงผลการคำนวณ
g=PoleObject/.res;
t=AllObject/.res;
p= PoleCoilObject/.res;
RadPlot3DOptions[];

```

```

Show[Graphics3D[radObjDrw[g]],      % แสดงกราฟิกส่วนของโครงสร้าง g
  ViewPoint->{3,2,0}];
Show[Graphics3D[radObjDrw[p]],      % แสดงกราฟิกส่วนของโครงสร้าง p
  ViewPoint->{3,2,0}];
radObjDrwQD3D[g];                   % แสดงโครงสร้างแบบสามมิติของ g
radObjDrwQD3D[p];                   % แสดงโครงสร้างแบบสามมิติของ p
radObjDrwQD3D[t];                   % แสดงโครงสร้างแบบสามมิติของ t
% แสดงกราฟความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับระยะทางแกน X ซึ่งในโปรแกรม RADIA
% จะกำหนดระบบพิกัดอ้างอิง XYZ เป็น YZX
ob=t;z=0;x1=0;ymax=50;Npt=100;
bz1=radFldLst[ob,"Bz",{x1,-ymax,z},{x1,ymax,z},Npt,"arg",-ymax];
MultipleListPlot[bz1,
  PlotJoined->True,
  Frame->True,
  RotateLabel -> False,
  GridLines -> Automatic,
  SymbolShape->None,
  PlotStyle->{GrayLevel[0],Dashing[{Dash}]},
  PlotLabel->"Magnetic Field",
  FrameLabel-> {"Y [mm]","Bz [T]"} ];
% แสดงกราฟความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับระยะทางแกน Z ที่ค่า X =11, 22 และ 33 มิลลิเมตร
ob=t;y1=11;y2=22;y3=33;z=0;xmax=300;Npt=300;
bz2=radFldLst[ob,"Bz",{-xmax,y1,z},{xmax,y1,z},Npt,"arg",-xmax];
bz3=radFldLst[ob,"Bz",{-xmax,y2,z},{xmax,y2,z},Npt,"arg",-xmax];
bz4=radFldLst[ob,"Bz",{-xmax,y3,z},{xmax,y3,z},Npt,"arg",-xmax];
MultipleListPlot[bz2,bz3,bz4,
  PlotJoined->True,
  Frame->True,
  RotateLabel -> False,
  GridLines -> Automatic,
  SymbolShape->None,

```

```

PlotStyle->{GrayLevel[0],Dashing[{Dash]}},
PlotLabel->"Magnetic Field",
FrameLabel-> {"X [mm]","Bz [T]"};
% แสดงกราฟิกของเส้นฟลักซ์แม่เหล็ก
RadPlot3DOptions[];
ListPlotVectorField3D[radObjM[t]
,VectorHeads->True
,ColorFunction-> Hue
,PlotLabel->"Magnetization in Element # "<>ToString[t]
,ViewPoint->{3,2 , 0}
,PlotRange->{All,All,All}
,ScaleFactor->10];
% แสดงกราฟิกของโครงสร้างแม่เหล็กหกขั้ว
draw=radObjDrw[t];
RadPlot3DOptions[];
Show[Graphics3D[draw]
,ViewPoint->{5,-2,1}
,PlotRange->All
,AmbientLight -> GrayLevel[0.1]];
% การบันทึกค่าเอาต์พุต
% ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ระยะทางแกน X
tab=bz1;
tmp=OpenWrite["bz1.dta",FormatType->OutputForm];
Do[Write[tmp,CForm[tab[i,1]],"\t",CForm[tab[i,2]],{i,Length[tab]}];Close[tmp]
% ค่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ระยะทางแกน Z ที่ X=11 มิลลิเมตร
tab=bz2;
tmp=OpenWrite["bz2.dta",FormatType->OutputForm];
Do[Write[tmp,CForm[tab[i,1]],"\t",CForm[tab[i,2]],{i,Length[tab]}];Close[tmp]
% ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กที่ระยะทางแกน Z ที่ X=22 มิลลิเมตร
tab=bz3;
tmp=OpenWrite["bz3.dta",FormatType->OutputForm];

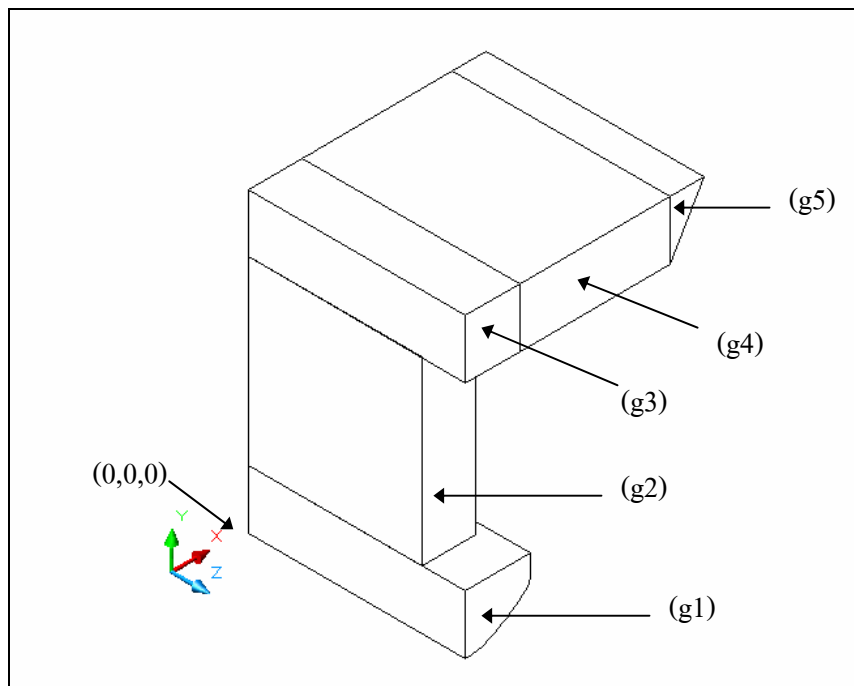
```



```

Do[Write[tmp,CForm[tab[i,1]],"\t",CForm[tab[i,2]],{i,Length[tab]}];Close[tmp]
% ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็กกับระยะทางแกน Z ที่ X=33 มิลลิเมตร
tab=bz4;
tmp=OpenWrite["bz4.dta",FormatType->OutputForm];
Do[Write[tmp,CForm[tab[i,1]],"\t",CForm[tab[i,2]],{i,Length[tab]}];Close[tmp]

```



รูปที่ ค.1 ส่วนประกอบย่อยต่าง ๆ ของโครงสร้างแม่เหล็กหกขั้ว  
สำหรับการคำนวณโดยโปรแกรม RADIA

ภาคผนวก ง

อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการติดตั้งชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก  
เคลื่อนที่อัตโนมัติสามแกน

## เซนเซอร์วัดระยะทางแบบเชิงเส้น



### Electrical Data

Measurement Principle .....	absolute coded (transformation measuring method)
Measurement Embodiment.....	Glass scale with code structure
Accuracy Class .....	$\pm 5 \mu\text{m}$ (local deviation documented in the measurement record)
* Recommended measuring step.....	0.1 $\mu\text{m}$ , 1 $\mu\text{m}$ , 10 $\mu\text{m}$
Measuring Length ( mm ).....	140, 240, <u>340</u> , 440, 540, 640, 740, 840, 940, 1040, 1140, 1240, 1340, 1540, 1640, 1740, 1840, 2040, 2240, 2440, 2640, <u>2840</u> , 3040 (other measuring lengths on request)
Max. Operating Speed .....	10 ms <sup>-1</sup>
Cycle Time .....	1 ms
Operating Voltage .....	11-27 V DC
Power Dissipation (No Load) .....	< 4 Watt
Programmable via RS485 / RS232.....	IBM PC Compatible LTPROG-Software
Clock Input SSI .....	Opto Coupler
Clock Frequency SSI .....	95 kHz – 1 MHz
Transmission Cable Length .....	Dependent on Cable Cross Section, Shielding, Clock Frequency etc.
* Output Code (programmable).....	Binary, BCD, Gray
Data Output.....	RS422 (4-wire)
Load capacity .....	100 mA / short-circuit proof
Input Options	
* Forward / Reverse .....	Change direction of count
* Preset .....	Adjust zero position of the measurement system (saved permanently)
Logic Levels .....	“0“ < + 2 V DC, “1“ > + 8 V DC, max. 30 V DC
Pin Configuration.....	Upon Request
* Programmable Parameters	

### Environmental Data

Electromagnetic compatibility (EMC) .....	EN 61000-4-2 (IEC-801-2) / EN 61000-4-4 (IEC-801-4)
Operating Temperature.....	0-40°C (Optional -10 to +60°C)
Storage Temperature .....	-20 to +70°C
Relative Humidity .....	98 % (non condensing)
* Protection Class .....	IP 50 (DIN 40 050) / IP 52 with cover for measuring axis
* The protection class is valid if the mounting instructions are followed correctly	

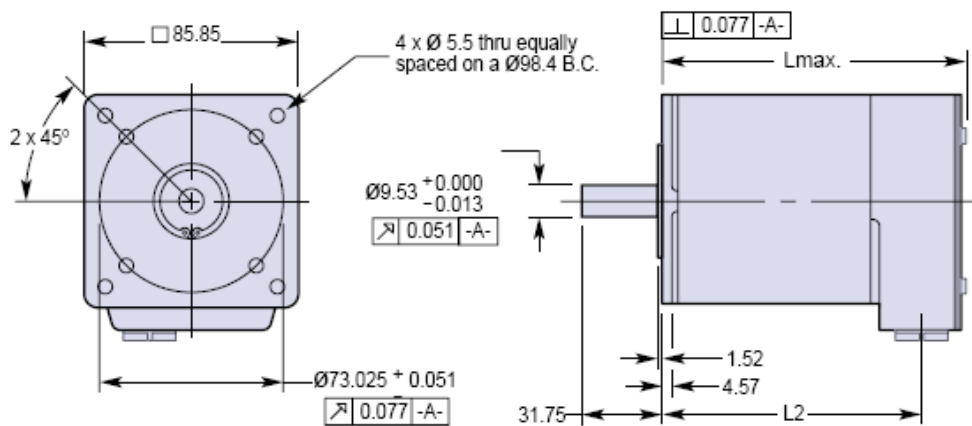
รูปที่ ง.1 แสดงรายละเอียดของเซนเซอร์วัดระยะทางแบบเชิงเส้น

## มอเตอร์แบบขั้นและชุดควบคุมมอเตอร์

### OEM750/OEM750X motor dimensions (mm)

#### Size 34 Frame, R Series, end bell construction (NPS)

Model	L	max. L2
RS31B NPS	65.54	72.9
RS32B NPS	95.51	102.11
RS33B NPS	128.53	134.62



#### OEM750/OEM750X motor data

	Size 23 Frame			Size 34 Frame		
	OS2HA	OS21A	OS22A	RS31B	RS32B	RS33B
Static torque, Nm	0.26	0.47	0.94	1.03	2.02	2.55
Rotor inertia, kg-cm	0.070	0.119	0.253	0.583	1.195	1.757
Current, Apk/Arms: Series	2.65/1.9	3.3/2.3	3.8/2.7			
Parallel	5.3/3.7	6.6/4.7	7.5/5.3	4.4/3.1	5.6/4.0	6.9/4.9
Inductance, mH: Series	1.7	1.8	2.8			
Parallel	0.4	0.4	0.7	2.9	2.9	2.4
Detent Torque, Nm	0.02	0.03	0.05	0.06	0.13	0.19
Bearing Information						
Thrust Load, N	6.0	6.0	6.0	800	800	800
Radial Load, N	90	90	90	160	160	160
End Play, mm	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
(Reversing load equal to 5N)						
Radial Play, mm	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
(Per 2.5N load)						
Motor Weight, kg	0.45	0.68	1.14	1.45	2.41	3.45
Certifications: UL recognized	Pending	Pending	Pending	Yes	Yes	Yes
CE (LVD)	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
CE (EMC & LVD)	w/C10 kit*	w/C10 kit*	w/C10 kit*	w/C10kit		w/C10 kit

\*Provided EMD Installation Guidelines for 'motors with non removable cabling' are followed.

รูปที่ ง.2 แสดงรายละเอียดของมอเตอร์แบบขั้น



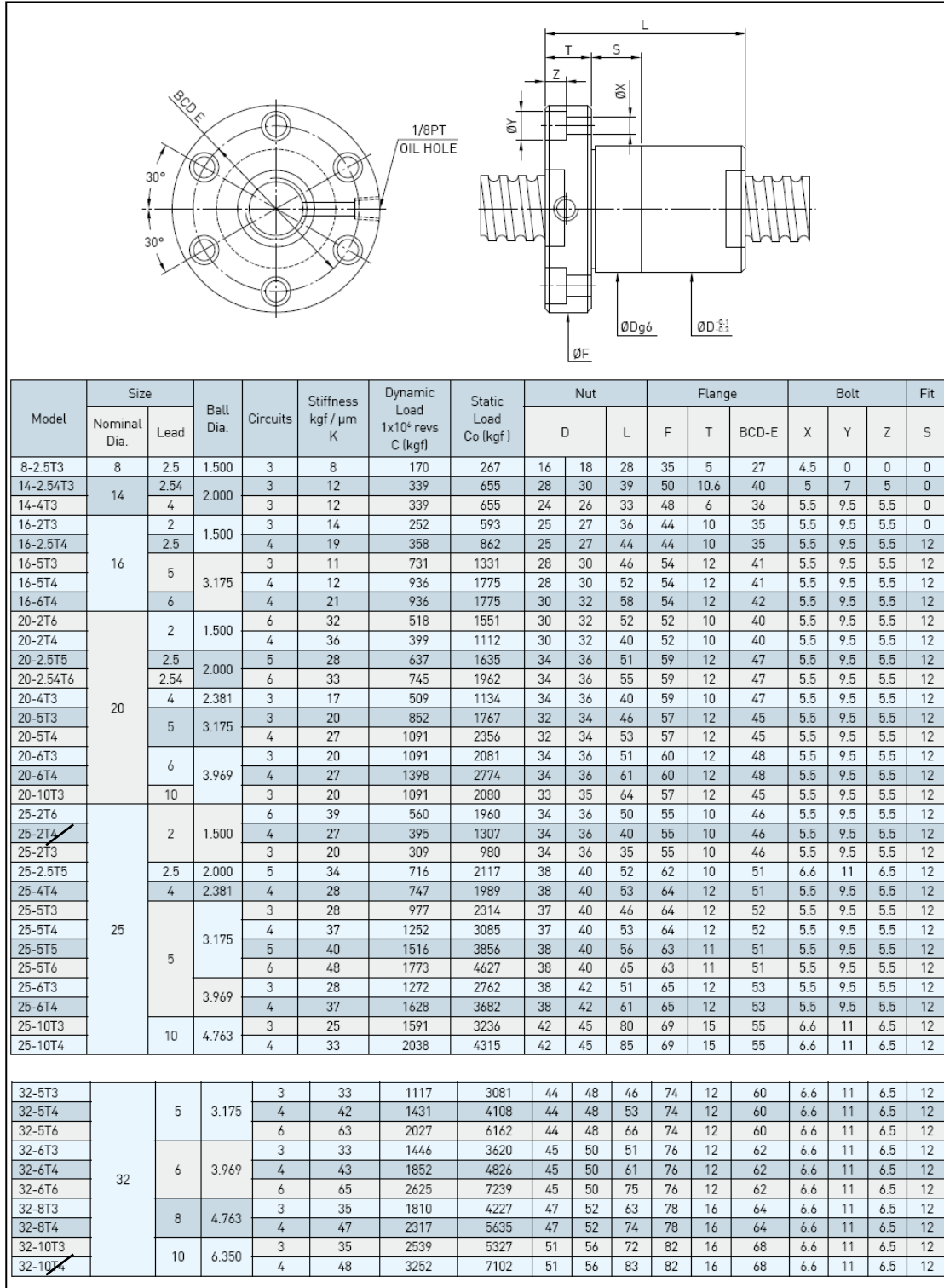
### OEM750X microstep drives

#### Parameter Value

Power Input - DC	24–75 VDC @ 2A max
Performance	
Accuracy	5 arc min (0.0833°) typical, unloaded, bidirectional with Parker-supplied motors. Other motors may exhibit different absolute accuracy Loaded condition - in addition to unloaded accuracy, add 1 arc min (0.0167°) for each increment of load equal to 1% of the rated motor torque
Repeatability	5 arc sec (0.0014°) typical, unloaded - one revolution returning to start point from same direction
Hysteresis	Less than 2 arc min (0.0334°) unloaded, bidirectional
Resolution	16 selectable options: 200, 400, 1000, 2000, 5000, 10000, 12800, 18000, 20000, 21600, 25000, 25400, 25600, 36000, 50000, 50800
Waveform	Selectable - allows waveform shaping for optimum smoothness or relative accuracy. Pure sine; -4%, -6%, -8%, -10% 3rd harmonic
Amplifier	
Type	20 kHz fixed frequency, variable duty cycle pulse width modulated (PWM) current controlled, bipolar chopper
Number of Phases	2
Output Current Programmable,	0.15 - 7.5A/phase peak
Drive Supply Voltage	24–75 VDC (dependent on external power supply)
Standby Current Reduction	25%, 50% or 75% of selected motor current
Nominal Chopping Frequency	20 kHz
Max Stepping Rate	2 MHz max pulse rate; 50 rps max speed
Protection Circuits*	
Short Circuit	Phase-to-phase, phase-to-ground
Undervoltage	If DC supply drops below 24 VDC
Overtemperature	If internal air temperature exceeds 70°C
Environmental	
Operating temp.	0°C to 50°C. Max allowable ambient temperature is 50°C. External heat sinking is required via the mounting surface or a suitable heatsink. Max. heatplate temperature 55°C
Storage temp.	-40°C to 85°C
Humidity	0 to 95% Non-condensing
Physical	
Drive Dimensions	127 x 91 x 41 mm
Weight	0.32 kg
Motor	
Type	2 phase hybrid; 4, 6 or 8 leads
Inductance Range	0.2mH - 80mH

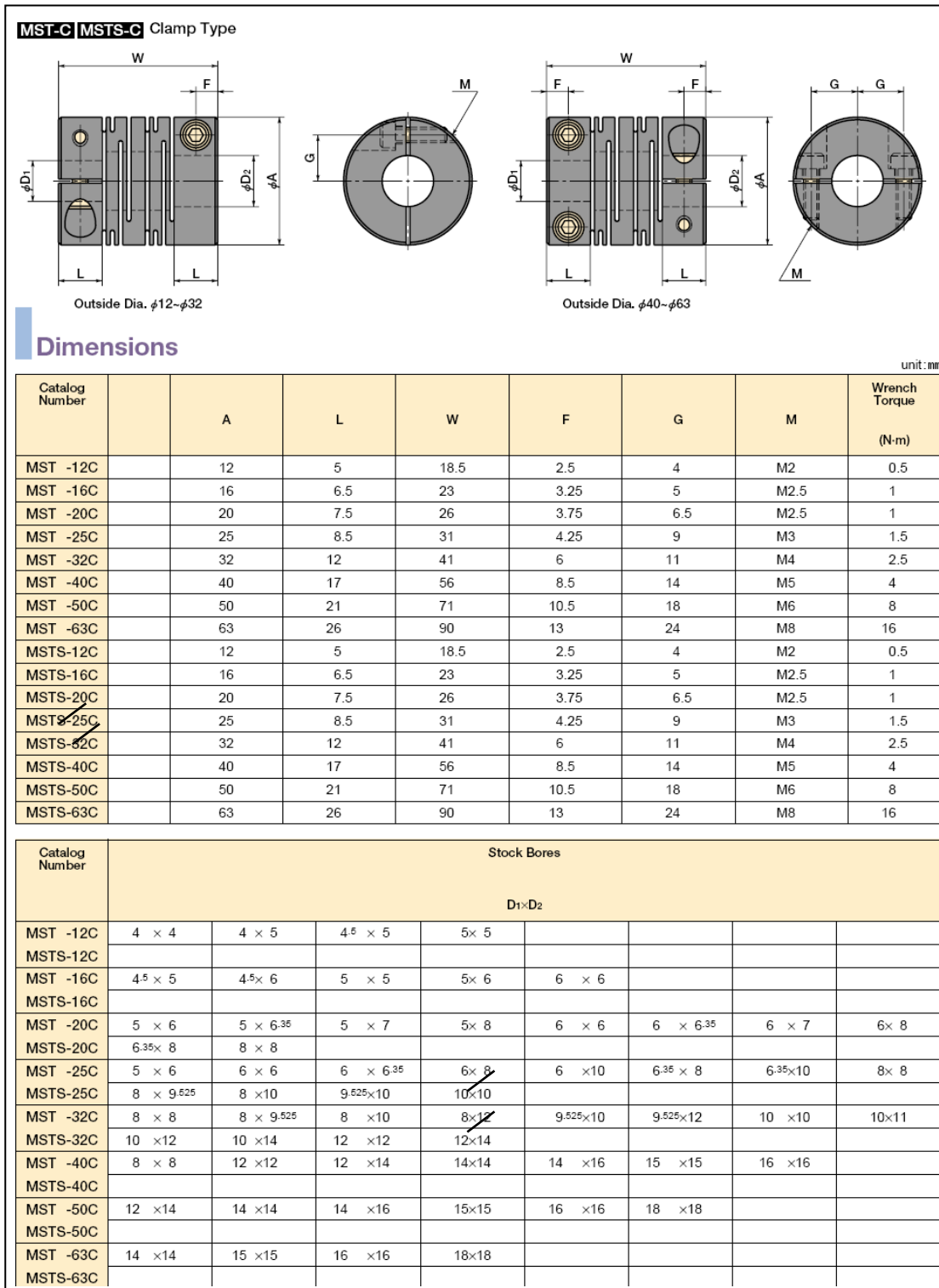
รูปที่ ๓.3 แสดงรายละเอียดของชุดควบคุมมอเตอร์แบบขั้น

แกนหมุนแบบบอลล์สกรู



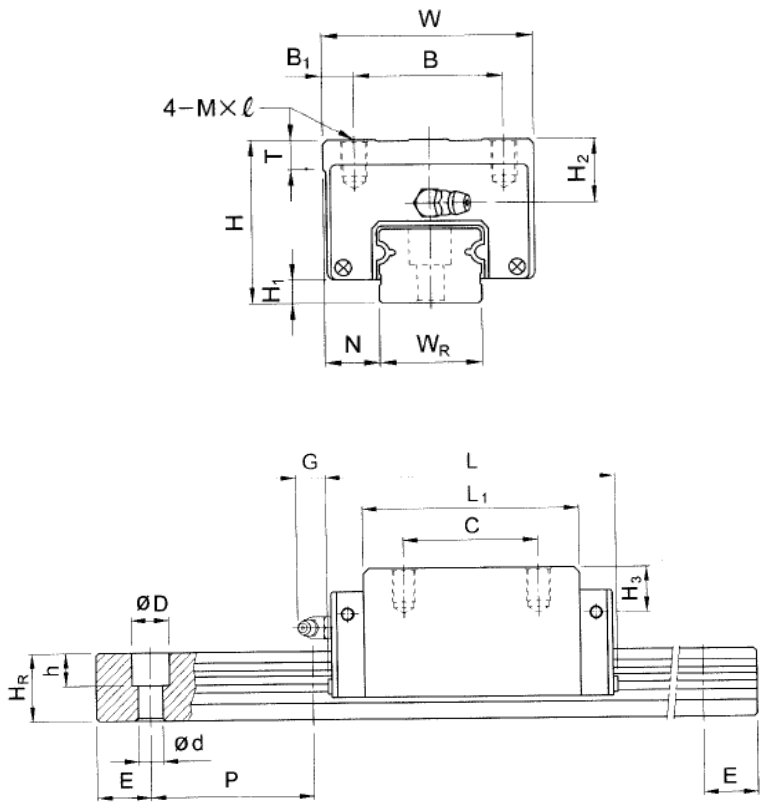
รูปที่ 4 แสดงรายละเอียดของแกนหมุนแบบบอลล์สกรู

ชุดต่อประกอบ



รูปที่ ง.5 แสดงรายละเอียดของชุดต่อประกอบ

รายนำนวตกร



The technical drawing shows two views of a rail assembly. The top view is a plan view showing a rectangular block with a central rail. Dimensions include overall width (W), block width (B), block width excluding bolt holes (B<sub>1</sub>), total height (H), height to the top of the block (H<sub>1</sub>), height to the top of the rail (H<sub>2</sub>), distance from the center to the side edge (N), and distance from the center to the rail edge (W<sub>R</sub>). Four bolts are shown, labeled 4-M×ℓ. The side view shows the rail profile with dimensions for height (H<sub>R</sub>), diameter (∅D), diameter of the rail (∅d), length (L), length of the rail (L<sub>1</sub>), distance from the center to the rail edge (C), distance from the center to the side edge (G), distance from the center to the rail edge (E), and distance from the center to the rail edge (P).

Model No.	Dimensions of Assembly (mm)			Dimensions of Block (mm)										Dimensions of Rail (mm)						Mounting Bolt for Rail (mm)	Basic Dynamic Load Rating (kgf)	Basic Static Load Rating (kgf)	
	H	H <sub>1</sub>	N	W	B	B <sub>1</sub>	C	L <sub>1</sub>	L	G	M×ℓ	T	H <sub>2</sub>	W <sub>R</sub>	H <sub>r</sub>	D	h	d	P				E
LGH15-CA	28	4.5	9.5	34	26	4	26	39.6	60.6	3.8	M4×5	6	8.5	15	14	7.5	5.3	4.5	60	20	M4×16	1040	1,680
LGH20-CA	30	5	12	44	32	6	36	52.7	77.3	12	M5×6	8	7.1	20	15	9.5	8.5	6	60	20	M5×16	1650	2670
LGH20-HA							50	67	91.6													2100	3400
LGH25-CA	40	6.5	12.5	48	35	6.5	35	57.6	85.6	12	M6×8	8	11.2	23	20	11	9	7	60	20	M6×20	2410	3880
LGH25-HA							50	76.6	104.6													3210	5180
LGH30-CA	45	7	16	60	40	10	40	72	104.4	12	M8×10	8	10.5	28	23	14	12	9	80	20	M8×25	3380	5460
LGH30-HA							60	93	125.4													4400	7100
LGH35-CA	55	8	18	70	50	10	50	82	118.4	12	M8×12	10	15	34	25	14	12	9	80	20	M8×25	4180	6740
LGH35-HA							72	105.8	142.2													5430	8770
LGH45-CA	70	10	20.5	86	60	13	60	99.6	139.2	12.9	M10×17	15	21	45	32	20	17	14	105	22.5	M12×35	6020	9710
LGH45-HA							80	133	172.6													8430	13600
LGH55-CA	80	13	23.5	100	75	12.5	75	115.8	164.8	12.9	M12×18	17	22	53	40	23	20	16	120	30	M14×45	9740	13220
LGH55-HA							95	154.7	203.7													11810	18510
LGH65-CA	90	19	31.5	126	76	25	70	138.6	197.6	12.9	M16×20	25	20	63	48	26	22	18	150	35	M16×50	14940	20990
LGH65-HA							120	187.6	246.6													18290	27290

รูปที่ ง.6 แสดงรายละเอียดของรายนำนวตกร



ภาคผนวก จ

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

**บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา**

ศุภชัย ประวันตา สราวุฒิ สุจิตจร และศุภกร รักใหม่ (2551). การออกแบบและสร้างขดลวดแม่เหล็กหกขั้วสำหรับวงกักเก็บอิเล็กตรอนพลังงาน 1.2 GeV ของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน – ประเทศไทย. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.).

## ประวัติผู้เขียน

นายศุภชัย ประวันตา เกิดเมื่อวันที่ 7 มิถุนายน พ.ศ. 2517 สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนเวียงน้อยศึกษา จังหวัดขอนแก่น และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2540 โดยหลังจากสำเร็จการศึกษาได้รับใบอนุญาตเป็นผู้ประกอบวิชาชีพวิศวกรรมควบคุม ระดับภาคีวิศวกร สาขาไฟฟ้าแรงสูงไฟฟ้ากำลัง และได้บรรจุเข้าเป็นพนักงานของศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ในตำแหน่งวิศวกรฝ่ายเทคโนโลยีเครื่องเร่งอนุภาค

ปี พ.ศ. 2548 ได้รับทุนในโครงการพัฒนาบุคลากรของศูนย์ปฏิบัติการวิจัยเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนแห่งชาติ และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยขณะศึกษาได้สอนวิชาปฏิบัติการของสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ได้แก่ ปฏิบัติการวงจรและอุปกรณ์ ปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้า 1 ขณะศึกษาได้ทำงานวิจัยทางด้านการปรับปรุงคุณสมบัติของแม่เหล็กหกซ์ไว้ให้มีความเหมาะสมต่อการใช้งาน สำหรับวงกักเก็บอิเล็กตรอนระดับพลังงาน 1.2 GeV ของเครื่องกำเนิดแสงสยาม และการพัฒนาชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติสามแกน สำหรับใช้วัดสนามแม่เหล็ก การดำเนินงานวิจัยดังกล่าวให้ผลสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์

ผลงานวิจัย : ได้นำเสนอบทความวิจัย ลงตีพิมพ์ในวิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนาวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ (วสท.) เรื่อง การออกแบบและสร้างขดลวดแม่เหล็กหกซ์สำหรับวงกักเก็บอิเล็กตรอนพลังงาน 1.2 GeV ของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน – ประเทศไทย