

## การพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2562

**DEVELOPMENT OF MAGNETIC FIELD  
MEASUREMENT DEVICE USING  
ROTATING COIL METHOD**



**Chaiyut Preecha**

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

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2019**

## การพัฒนาอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.บัณฑิต กฤตาคม)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.จิระพล ศรีเสรีกุล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.โสธรญา แจ็งการ)

กรรมการ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและ

พัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ชัชยุทธ์ ปรีชา : การพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุน

(DEVELOPMENT OF MAGNETIC FIELD MEASUREMENT DEVICE USING

ROTATING COIL METHOD) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล,

127 หน้า.

เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนมีแม่เหล็กไฟฟ้าใช้งานเป็นจำนวนมาก เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนให้อยู่ในวงโคจรภายในท่อสุญญากาศ ซึ่งแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีจะมีสนามแม่เหล็กตามที่ได้ออกแบบไว้เท่านั้น แต่เนื่องจากความไม่สมบูรณ์แบบในกระบวนการผลิต อาจทำให้มีสนามแม่เหล็กชนิดอื่นแฝงอยู่ได้ นอกจากนี้การที่แม่เหล็กถูกใช้งานมายาวนาน เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้คุณภาพของแม่เหล็กค่อยลงไป การสอบวัดคุณภาพจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากถ้าแม่เหล็กเกิดความเสียหายจะเป็นเหตุให้ต้องหยุดการทำงาน of เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุน สำหรับใช้วัดคุณภาพของแม่เหล็ก ประกอบด้วย ระบบควบคุมความเร็วรอบของขดลวดตัววัดแบบวงปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ ในช่วงการทำงานที่ความเร็วรอบ 40 - 120 rpm และการเก็บข้อมูลค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากขดลวดตัววัด ค่าตำแหน่งเชิงมุม ค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ และค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ โดยได้ทำการทดสอบระบบด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับแม่เหล็กไฟฟ้าขนาด 5 10 และ 15 A แล้วปรับความเร็วรอบการหมุนของขดลวดตัววัดเป็น 60 90 และ 120 rpm ใช้อุปกรณ์ควบคุมแบบ NI CompactRio-9030 เชื่อมต่อกับโมดูลสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง NI cRIO-9505 และ โมดูลสำหรับอ่านค่าแรงค่าแรงดันไฟฟ้าในย่านแรงดันต่ำ NI cRIO-9411 โดยประยุกต์ใช้โปรแกรม LabVIEW และ LabVIEW FPGA สำหรับควบคุมการทำงาน แสดงผล เก็บข้อมูล และใช้โปรแกรม MATLAB-Simulink กำหนดและประมวลผลข้อมูล ผลการทดสอบสามารถควบคุมความเร็วรอบในการหมุนขดลวดตัววัดและเก็บข้อมูลแรงเคลื่อนไฟฟ้าและตำแหน่งเชิงมุมได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อลดการนำเข้าชุดวัดจากต่างประเทศ และพัฒนาเทคนิคด้านการวัดคุณภาพของแม่เหล็กขึ้นเองภายในประเทศ

สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา



CHAIYUT PREECHA : DEVELOPMENT OF MAGNETIC FIELD

MEASUREMENT DEVICE USING ROTATING COIL METHOD. THESIS

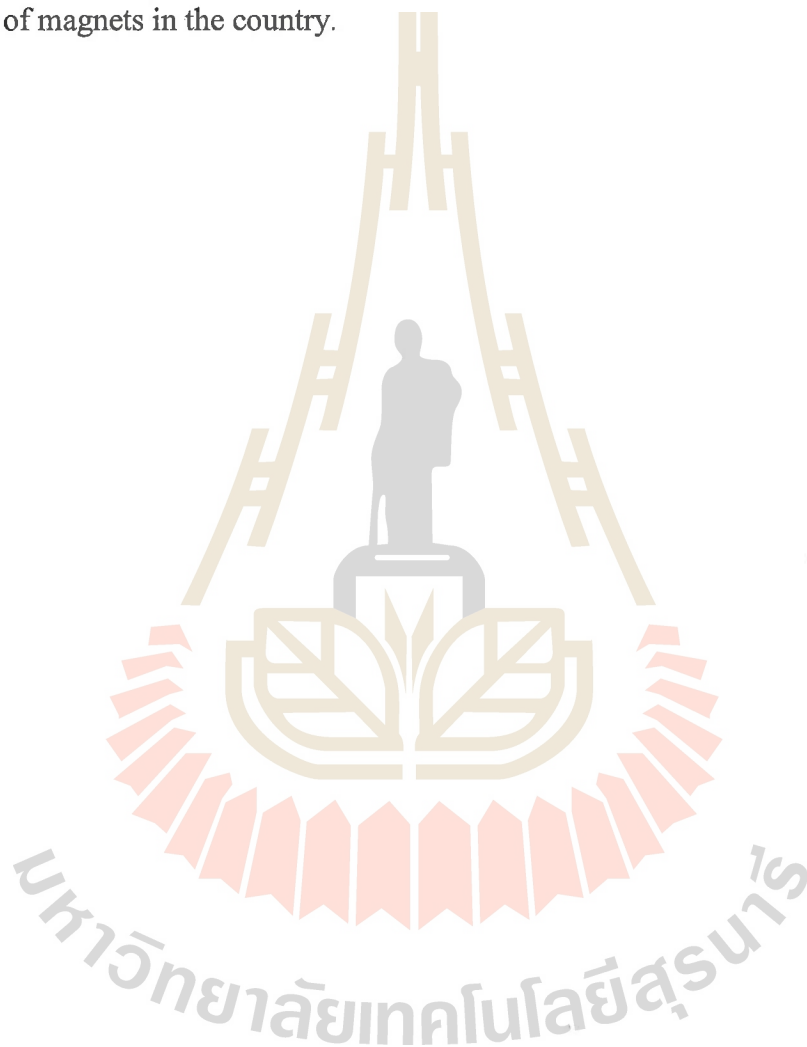
ADVISOR : ASSOC. PROF. JIRAPHON SRISERTPOL, Ph.D., 127 PP.

MAGNETIC FIELD MEASUREMENT USING ROTATING COIL METHOD/

CLOSED - LOOP SPEED CONTROL SYSTEM/ LABVIEW AND LABVIEW FPGA  
PROGRAM

In synchrotron light sources, there are many electromagnets used to control the dynamics of the electron beam in the orbit within the vacuum chamber. The ideal magnets should have only the designed magnetic field. However, in reality, the production and assembly processes are not perfect and lead to other types of undesirable magnetic fields. In addition, the magnet has been used for a long time. This is another reason for the deterioration of the quality of the magnet. Therefore, magnetic quality measurement is very necessary. It is undesirable if the magnets are not in a working condition and cause the machine shutdown. The objectives of this research are developing of magnetic field measurement system using rotating coil method, Consists of closed-loop speed control system of the measurement coil with the PI-controller at 40 - 120 rpm speed range. And data collection process, the electromotive force of the measurement coil, angular position, motor speed and the voltage applied to the motor were recorded. The system was tested by supplying DC current of 5 10 and 15 A to the electromagnets and adjusting the rotational speed of the measurement coils to 60 90 and 120 rpm using the NI CompactRio-9030 controller. It is connected to the NI cRIO-9505 DC motor driver module and the NI cRIO-9411 low voltage collecting module. LabVIEW and LabVIEW FPGA programs were applied for the devices controlling,

data collecting and displaying. MATLAB-Simulink was used to calculate and process the data. The results of the study can efficiently control the speed of the measuring coil and data collecting of the electromotive force and angular position. For reduce the import of measuring device from abroad and developed a technique for measuring the quality of magnets in the country.



School of Mechatronics Engineering

Academic Year 2019

Student's Signature

Advisor's Signature

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือ อย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และ ด้านการดำเนินงานวิจัย อาทิเช่น

รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตา เอาใจใส่ อบรมดูแล และอดทนต่อผู้วิจัยเป็นอย่างยิ่ง ผู้วิจัยจึงสามารถสำเร็จการศึกษานี้ได้ กระผมขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ด้วยความเคารพเป็นอย่างยิ่งครับ

รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โสภณา แจ่มการ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รองศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต กฤตาคม อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

เจ้าหน้าที่ประจำหลักสูตรวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ศาสตราจารย์ น.อ. ดร.สรายุทธ สุจิตจร ดร.ประพนธ์ คล้ายสุบรรณ ดร.สุพัฒน์ กลิ่นเขียว ดร.สมใจ ชื่นเจริญ ดร.ศุภชัย ประวันตา ดร.ประไพวรรณ สันวงศ์ ดร.ฐกถาวรชนัน จันทร์วัฒนะ ดร.ฐาปกรณ์ ภู่อำพงษ์ ดร.นาวัน จันทร์ทอง คุณพรทิพย์ สุดเมือง คุณสุพรรณ บุญสุยาคุณฉัฐวุฒิ สุรเดช คุณวิศิษฐ์ชัย สุขศรีเมือง คุณชัชภูมิ ธรรมทอง คุณอภิชัย ขวัญเกษม คุณบอมเบย์ ปูนวรรณ คุณศราวดี ภูเดียว และบุคลากรสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

คุณสุพิชฌาย์ มีสุขเจ้าสำราญ คุณพรพิไล กิติรัตนตระกูล คุณวันฉัตร วิมุตติสุขสุนทร คุณชนาทิพย์ พลพิจิตร คุณกนกวรรณ อินทะกนก และทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือ เป็นกำลังใจ และให้คำปรึกษาที่มิได้มีรายชื่อข้างต้น ตลอดจนครูอาจารย์ในอดีตทุกท่านที่ได้สั่งสอน อบรม และให้ความรู้

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ คุณยายอารีย์ ปรีชา ผู้เป็นเสาหลักในชีวิต และครอบครัวที่ให้การเลี้ยงดูอบรม และส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด แม้จะด้วยความยากลำบากสักเพียงใด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตได้ ขอบพระคุณครับ

ชัยยุทธ ปรีชา

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ณ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
<b>2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และปริทัศน์วรรณกรรม.....</b>	<b>5</b>
2.1 เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน.....	5
2.2 แม่เหล็กไฟฟ้าแบบสองขั้ว.....	6
2.3 แม่เหล็กไฟฟ้าแบบสี่ขั้ว.....	7
2.4 เทคนิคการวัดสนามแม่เหล็ก.....	9
2.5 การวัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุน.....	10
2.6 การควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	13
2.7 การควบคุมอัตโนมัติ.....	17
2.8 โปรแกรม LabVIEW.....	19
2.9 ปริทัศน์วรรณกรรม.....	21
<b>3 วิธีดำเนินการวิจัย.....</b>	<b>25</b>
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	25



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2	สถานที่ทำการวิจัย .....	26
3.3	อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย .....	26
3.3.1	ข้อมูลจำเพาะทางกายภาพ.....	26
3.3.2	ข้อมูลจำเพาะทางไฟฟ้า.....	26
3.4	โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย.....	27
3.4.1	โปรแกรมสำหรับควบคุมการทำงาน แสดงผล และเก็บข้อมูล .....	27
3.4.2	โปรแกรมที่ใช้สำหรับคำนวณและประมวลผลข้อมูล.....	28
3.5	การพัฒนาโปรแกรมควบคุมการทำงาน แสดงผล และเก็บข้อมูล .....	28
3.5.1	ส่วนควบคุมการทำงาน .....	29
3.5.2	ส่วนแสดงสถานะของเครื่อง.....	29
3.5.3	ส่วนเก็บข้อมูล .....	29
3.5.4	ส่วนแสดงผล .....	30
3.5.5	ส่วนแสดงสถานะของโปรแกรม .....	31
3.6	ขั้นตอนการเปิดการทำงานของเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย .....	32
3.7	ขั้นตอนการทดสอบหมุนมอเตอร์แบบขั้นบันได โดยให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบ 40 ถึง 120 rpm .....	32
3.8	ขั้นตอนการทดสอบหมุนมอเตอร์แบบขั้นบันได โดยให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบ 60 ถึง 120 rpm .....	33
3.9	ขั้นตอนการทดสอบหมุนมอเตอร์แบบขั้นบันได โดยให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบ 60, 90 และ 120 rpm.....	34
3.10	ขั้นตอนการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ .....	35
3.10.1	ขั้นตอนการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ .....	35
3.10.2	ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมแบบฟิว.....	36
3.11	ขั้นตอนเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล .....	37
3.12	การเก็บรวบรวมข้อมูลผลการทดสอบ .....	39

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

<b>4</b>	<b>อุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุน</b> .....	<b>40</b>
4.1	ส่วนประกอบทางกล .....	40
4.2	ส่วนประกอบที่ใช้ในการควบคุม แสดงผล และเก็บข้อมูล .....	42
4.3	แนวทางการพัฒนาโปรแกรมบนอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย .....	51
<b>5</b>	<b>ผลการวิจัย</b> .....	<b>54</b>
5.1	การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	54
5.1.1	การระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง .....	54
5.1.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	54
5.2	การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ .....	55
5.3	ผลการทดสอบเก็บข้อมูล.....	60
5.4	การวิเคราะห์ข้อมูลแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	66
<b>6</b>	<b>สรุปและข้อเสนอแนะ</b> .....	<b>70</b>
6.1	สรุปผลการวิจัย.....	70
6.2	สรุปปัญหาจากการวิจัย.....	71
6.3	ข้อเสนอแนะและแนวทางการทำวิจัยต่อ .....	71
	รายการอ้างอิง .....	72
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. แบบทางวิศวกรรมของ	
	อุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุน .....	75
	ภาคผนวก ข. โปรแกรมควบคุม แสดงผล และเก็บข้อมูลของ	
	อุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุน .....	98
	ภาคผนวก ค. แบบทางวิศวกรรมของแม่เหล็กแบบสองขั้ว .....	123
	ภาคผนวก ง. บทความทางวิชาการที่ได้ตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา .....	125
	ประวัติผู้เขียน .....	127

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	การเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กที่วัดได้ จากการหมุนขดลวดภายในแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ ..... 12
5.1	ค่าตัวแปรของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวิธี Parameter Estimation..... 54
5.2	ตัวควบคุมแบบพีไอจากวิธี Response Optimization โดยโปรแกรม MATLAB-Simulink..... 56
5.3	ค่าผลตอบสนองที่ได้จากการทดสอบแบบต่าง ๆ ..... 59
5.4	จำนวนข้อมูลที่เก็บได้ใน 1 รอบการหมุน ..... 65
5.5	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่อ่านได้จากขดลวดตัววัดที่ความเร็ว 60 90 120 rpm เมื่อจ่ายกระแสให้แม่เหล็กขนาด 5 10 และ 15 A ตามลำดับ ..... 67

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	ระบบวัดสนามแม่เหล็กแบบหัววัดฮอลล์สามแกน.....	2
1.2	อุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดพลิกกลับ.....	2
2.1	เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน ภายในสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน .....	5
2.2	วงกักเก็บอิเล็กตรอน .....	6
2.3	แม่เหล็กไฟฟ้าแบบสองขั้ว .....	6
2.4	การทำงานของแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสองขั้ว .....	7
2.5	แม่เหล็กไฟฟ้าแบบสี่ขั้ว .....	7
2.6	การทำงานของแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสี่ขั้ว.....	8
2.7	การวางตัวของแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสี่ขั้ว .....	8
2.8	การเปรียบเทียบความแม่นยำและช่วงการวัดของวิธีวัดค่าสนามแม่เหล็กแบบต่าง ๆ .....	10
2.9	การวางตัวของขดลวดตัววัด .....	10
2.10	ระบบพิกัดของสนามแม่เหล็ก .....	11
2.11	แผนภาพมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง .....	14
2.12	แผนภาพฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง .....	16
2.13	ตัวอย่างสัญญาณ PWM .....	17
2.14	แผนภาพระบบควบคุมแบบป้อนกลับ .....	17
2.15	แผนภาพระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่มีตัวควบคุม .....	19
2.16	ตัวอย่างโปรแกรม LabVIEW .....	20
2.17	อุปกรณ์ FPGA ของบริษัท Nation Instruments .....	21
3.1	แม่เหล็กแบบสองขั้วที่ใช้ในงานวิจัย .....	27
3.2	โปรแกรมควบคุมการทำงาน .....	28
3.3	ส่วนควบคุมการทำงานของมอเตอร์ .....	29
3.4	ส่วนแสดงสถานะ .....	29
3.5	ส่วนเก็บข้อมูล .....	30

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.6	ส่วนแสดงผล.....31
3.7	ส่วนแสดงสถานะของโปรแกรม.....31
3.8	แผนภาพการควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสไฟฟ้าตรง.....35
3.9	แผนภาพฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จากโปรแกรม MATLAB-Simulink.....36
3.10	แผนภาพฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงปิดแบบมีตัวควบคุมพีไอ จากโปรแกรม MATLAB-Simulink.....36
3.11	แผนภาพการทำงานของอุปกรณ์วัดค่าสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุน.....37
3.12	การเก็บข้อมูลของการวัดค่าสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุน.....38
4.1	อุปกรณ์วัดค่าสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุน.....40
4.2	แกนหมุน (Rotating rod) สำหรับติดตั้งขดลวดตัววัด.....41
4.3	ขดลวดตัววัด (Measuring coil).....41
4.4	อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุม แสดงผล และเก็บข้อมูล.....42
4.5	อุปกรณ์ควบคุมแบบ NI-CompactRIO รุ่น NI cRIO-9030.....43
4.6	โมดูลควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor drive module) รุ่น NI cRIO-9505 ของ National Instruments.....44
4.7	โมดูลรับค่าแรงดันไฟฟ้าย่านต่ำ (Low voltage input module) รุ่น NI cRIO-9238 ของ National Instruments.....44
4.8	อุปกรณ์อ่านค่าตำแหน่งเชิงมุม (Rotating Encoder) รุ่น ERN-420 ของ Heidenhain.....45
4.9	อุปกรณ์สลีป-ริง (Slip-Ring) รุ่น MT0120-002 ของ Moflon.....45
4.10	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC motor).....46
4.11	อุปกรณ์ Digital Multimeter รุ่น 34401a ของ Agilent Technologies.....46
4.12	อุปกรณ์ตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้า (Direct-Current Current Transformer : DCCT) รุ่น IT65-S Ultrastap ของ LEM.....47
4.13	แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (Regulated DC Power supply) รุ่น GP060-60 ของ Tagasago.....48

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14	อุปกรณ์ NI-PXIE-8840 Embedded Controller พร้อมกับ NI PXIE-1071 Power supply with 4 chassis ของ National Instruments .....49
4.15	โมดูล Digital multimeter รุ่น NI PXI-4070 ของ National Instruments..... 49
4.16	โมดูล Counter/Time รุ่น NI-PXIE-6612 ของ National Instruments .....50
4.17	อุปกรณ์กระจายสัญญาณ (Network Switch) รุ่น 3C1670800C ของ 3COM..... 50
4.18	แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวิทชิง ( Switching DC power supply) รุ่น NI PS-15 ของ National Instruments.....51
4.19	โปรแกรมทำงานบนอุปกรณ์ควบคุม NI CompactRIO .....52
4.20	โปรแกรมทำงานบนอุปกรณ์ควบคุม NI PXIE .....52
4.21	โปรแกรมบนเครื่องคอมพิวเตอร์ ..... 53
5.1	ผลการทดสอบหมุนมอเตอร์จริงแบบขึ้นบันไดที่ความเร็วรอบ 40 – 120 rpm เปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ .....55
5.2	ผลการตอบสนองกับสัญญาณอินพุตแบบขึ้นบันไดหนึ่งหน่วย ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ .....57
5.3	ผลตอบสนองของการหมุนมอเตอร์จริงแบบขึ้นบันได ต่อเนื่องที่ความเร็วรอบ 60, 90 และ 120 rpm มีตัวควบคุมแบบพีไอ .....57
5.4	ผลตอบสนองของการหมุนมอเตอร์จริงแบบขึ้นบันได ที่ความเร็วรอบ 60 rpm มีตัวควบคุมแบบพีไอ .....58
5.5	ผลตอบสนองของการหมุนมอเตอร์จริงแบบขึ้นบันได ที่ความเร็วรอบ 90 rpm มีตัวควบคุมแบบพีไอ .....58
5.6	ผลตอบสนองของการหมุนมอเตอร์จริงแบบขึ้นบันได ที่ความเร็วรอบ 120 rpm ที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ .....59
5.7	ผลการทดสอบเก็บข้อมูลที่ความเร็วการหมุน 60 rpm และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แม่เหล็กขนาด 5 A .....61
5.8	ผลการทดสอบเก็บข้อมูลที่ความเร็วการหมุน 90 rpm และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แม่เหล็กขนาด 5 A .....61

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
5.9	ผลการทดสอบเก็บข้อมูลที่ความเร็วการหมุน 120 rpm และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แม่เหล็กขนาด 5 A .....	62
5.10	ผลการทดสอบเก็บข้อมูลที่ความเร็วการหมุน 60 rpm และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แม่เหล็กขนาด 10 A .....	62
5.11	ผลการทดสอบเก็บข้อมูลที่ความเร็วการหมุน 90 rpm และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แม่เหล็กขนาด 10 A .....	63
5.12	ผลการทดสอบเก็บข้อมูลที่ความเร็วการหมุน 120 rpm และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แม่เหล็กขนาด 10 A .....	63
5.13	ผลการทดสอบเก็บข้อมูลที่ความเร็วการหมุน 60 rpm และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แม่เหล็กขนาด 5 A .....	64
5.14	ผลการทดสอบเก็บข้อมูลที่ความเร็วการหมุน 90 rpm และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แม่เหล็กขนาด 5 A .....	64
5.15	ผลการทดสอบเก็บข้อมูลที่ความเร็วการหมุน 120 rpm และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แม่เหล็กขนาด 5 A .....	65
5.16	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ความเร็วรอบ 60 rpm.....	66
5.17	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ความเร็วรอบ 90 rpm.....	66
5.18	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ความเร็วรอบ 120 rpm.....	67
5.19	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่อ่านได้จากขดลวดตัววัดที่ความเร็ว 60, 90 120 rpm เมื่อจ่ายกระแสให้แม่เหล็กขนาด 5, 10 และ 15 A ตามลำดับ .....	68
5.20	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่อ่านได้จากขดลวดตัววัดกับตำแหน่งเชิงมุม.....	69
ก.1	แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 1.....	76
ก.2	แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 2.....	77
ก.3	แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 3.....	78
ก.4	แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 4.....	79
ก.5	แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 5.....	80
ก.6	แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 6.....	81
ก.7	แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 7.....	82

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.8	แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 8.....83
ก.9	แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 9.....84
ก.10	แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 10.....85
ก.11	แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 11.....86
ก.12	แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 12.....87
ก.13	แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 13.....88
ก.14	แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 14.....89
ก.15	แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 15.....90
ก.16	แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 16.....91
ก.17	แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 17.....92
ก.18	แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 18.....93
ก.19	แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 19.....94
ก.20	แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 20.....95
ก.21	แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 19.....96
ก.22	แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 20.....97
ข.1	Main Project .....99
ข.2	NI FPGA Front panel .....100
ข.3	NI FPGA Block diagram 1 .....100
ข.4	NI FPGA Block diagram 2.....101
ข.5	NI FPGA Block diagram 3.....101
ข.6	NI FPGA Block diagram 4.....102
ข.7	NI FPGA Block diagram 5.....102
ข.8	NI FPGA Block diagram 6.....103
ข.9	Main Program Front panel .....103
ข.10	Main Program Block diagram 1 .....104
ข.11	Main Program Block diagram 2 .....104
ข.12	Main Program Block diagram 3 .....105



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
พ.13	Main Program Block diagram 4 ..... 105
พ.14	Main Program Block diagram 5 ..... 106
พ.15	Main Program Block diagram 6 ..... 106
พ.16	Main Program Block diagram 7 ..... 107
พ.17	Main Program Block diagram 8 ..... 107
พ.18	Main Program Block diagram 9 ..... 108
พ.19	Main Program Block diagram 10 ..... 108
พ.20	Main Program Block diagram 11 ..... 109
พ.21	Main Program Block diagram 12 ..... 109
พ.22	Main Program Block diagram 13 ..... 110
พ.23	Main Program Block diagram 14 ..... 110
พ.24	Main Program Block diagram 15 ..... 111
พ.25	Main Program Block diagram 16 ..... 111
พ.26	Main Program Block diagram 17 ..... 112
พ.27	Main Program Block diagram 18 ..... 112
พ.28	Main Program Block diagram 19 ..... 113
พ.29	Main Program Block diagram 20 ..... 113
พ.30	Main Program Block diagram 21 ..... 114
พ.31	Main Program Block diagram 22 ..... 114
พ.32	Main Program Block diagram 23 ..... 115
พ.33	Main Program Block diagram 24 ..... 115
พ.34	Main Program Block diagram 25 ..... 116
พ.35	Main Program Block diagram 26 ..... 116
พ.36	Main Program Block diagram 27 ..... 117
พ.37	Main Program Block diagram 28 ..... 117
พ.38	Main Program Block diagram 29 ..... 118
พ.39	Main Program Block diagram 30 ..... 118

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ข.40	Main Program Block diagram 31 .....	119
ข.41	Main Program Block diagram 32 .....	119
ข.42	Main Program Block diagram 33 .....	120
ข.43	Main Program Block diagram 34 .....	120
ข.44	Main Program Block diagram 35 .....	121
ข.45	NI PXIe Project .....	121
ข.46	NI PXIe Front panel .....	122
ข.47	NI PXIe Block diagram .....	122
ค.1	แบบทางวิศวกรรมของแม่เหล็กแบบสองขั้ว .....	124

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$\Phi$	=	ฟลักซ์แม่เหล็ก, V-s
$\theta$	=	มุมที่กวาดไป, rad
$\omega$	=	ความเร็วเชิงมุม, rad./s
$\omega(s)$	=	ความเร็วเชิงมุมใน s domain
$\dot{\omega}$	=	อนุพันธ์ของความเร็วเชิงมุม
$\delta$	=	ค่าคงที่ของมุม
$A$	=	พื้นที่ของขดลวดตัววัดที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็ก, m <sup>2</sup>
$A_n$	=	สนามแม่เหล็กในแนวแกนนอน
$B$	=	ความเข้มสนามแม่เหล็ก, T
$B_n$	=	สนามแม่เหล็กในแนวแกนตั้ง
$C(s)$	=	ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม
$FG(s)$	=	ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงปิดของระบบ
$G(s)$	=	ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ
$H(s)$	=	ฟังก์ชันถ่ายโอนของการป้อนกลับ
$I_a(s)$	=	กระแสไฟฟ้าฝั่งอาร์เมเจอร์ใน s domain
$J_a$	=	โมเมนต์ความเฉื่อย, N.m/rad/s <sup>2</sup>
$K_d$	=	อัตราขยายของการอนุพันธ์ (Derivative gain constant)
$K_i$	=	อัตราขยายของการอินทิเกรต (Integral gain constant)
$K_p$	=	อัตราขยายของการปรับสัดส่วน (Proportional gain constant)
$K_b$	=	ค่าคงที่ของ Electromotive force, V/rad/s
$K_t$	=	ค่าคงที่ของแรงบิด, N.m/A
$L_a$	=	ความเหนี่ยวนำฝั่งวงจรรอาร์เมเจอร์, H
$L$	=	ความยาวของขดลวด, m
$\sum M$	=	ผลรวมของโมเมนต์
$N$	=	จำนวนรอบของขดลวดตัววัด, rev
$R$	=	รัศมีของขดลวดตัววัด, m
$R_a$	=	ความต้านทานฝั่งวงจรรอาร์เมเจอร์, $\Omega$

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$T_r(s)$	=	แรงบิดของมอเตอร์ใน s domain
$V_a$	=	ความต่างศักย์ฝั่งวงจรรอาร์เมเจอร์, V
$V_b$	=	Back Electromotive force : Back EMF, V
$V(s)$	=	แรงเคลื่อนไฟฟ้าใน s domain
$X(s)$	=	อินพุตของระบบ
$Y(s)$	=	เอาต์พุตของระบบ
$b$	=	ความหน่วง, N.m/rad/s
$i_a$	=	กระแสไฟฟ้าฝั่งวงจรรอาร์เมเจอร์, A
$\dot{i}_a$	=	อนุพันธ์ของกระแสฝั่งอาร์เมเจอร์
$t$	=	เวลา, sec
$\frac{d\Phi}{dt}$	=	อนุพันธ์ของฟลักซ์แม่เหล็ก

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนมีแม่เหล็กไฟฟ้าใช้งานอยู่หลายชนิด เช่น แม่เหล็กแบบสองขั้ว (Dipole magnet), แม่เหล็กแบบสี่ขั้ว (Quadrupole magnet) แม่เหล็กแบบหกขั้ว (Sextupole magnet) รวมไปถึงแม่เหล็กอุปกรณ์แทรก (Insertion Device) เป็นต้น ซึ่งแม่เหล็กแต่ละชนิดจะมีหน้าที่แตกต่างกันออกไป แม่เหล็กแบบสองขั้วมีหน้าที่ควบคุมการเลี้ยวเบนของลำอิเล็กตรอนให้อยู่ในวงโคจรภายในท่อสุญญากาศ การที่แม่เหล็กมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ทำให้แม่เหล็กอาจมีการเสื่อมสภาพ ถ้าเกิดการเสียหายจะเป็นเหตุให้ต้องหยุดการทำงานของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนส่งผลกระทบต่อนักวิจัยที่ใช้งานแสงซินโครตรอนอย่างมาก นอกจากนี้ทางสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอนมีการพัฒนาแม่เหล็กขึ้นมาใหม่ด้วยตนเอง เพื่อทดแทนของเดิม และเป็นตัวต้นแบบสำหรับเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนเครื่องที่สอง อุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งที่จะบ่งบอกถึงคุณลักษณะต่าง ๆ ของแม่เหล็ก และยังเป็นการประหยัดงบประมาณในการนำเข้ามาจากต่างประเทศได้อย่างมาก

การผลิตแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน ในทางทฤษฎีสถนามแม่เหล็กที่ได้ควรจะมีเฉพาะที่ออกแบบเท่านั้น แต่ความเป็นจริงจะมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นในส่วนของกระบวนการผลิตเสมอ โดยจะเกิดสนามแม่เหล็กชนิดอื่นแฝงอยู่เป็นเหตุให้คุณภาพของแม่เหล็กที่สร้างขึ้นนั้นด้อยลงไป

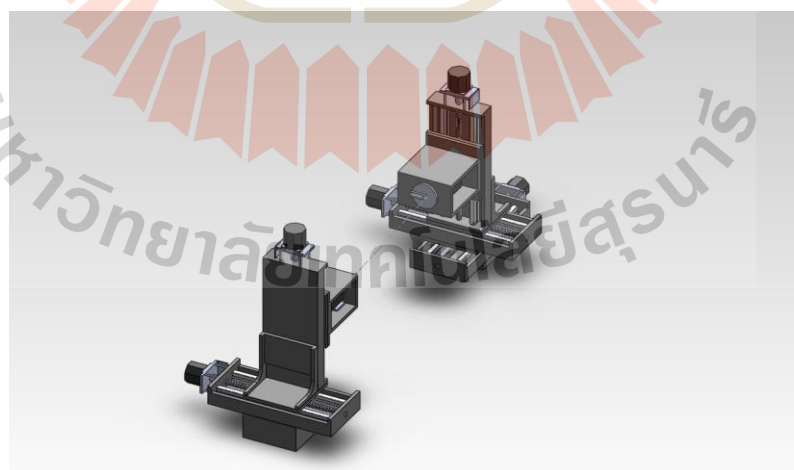
การวัดสนามแม่เหล็กมีความสำคัญมากสำหรับแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้กับเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน เพราะสนามแม่เหล็กมีผลต่อวิถีการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนทั้งในด้านการเปลี่ยนแปลงเชิงมุม และการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง เทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือ เทคนิคแบบ ฟลักซ์มิเตอร์ ซึ่งเป็นเทคนิคการวัดที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และรวดเร็ว และค่าสำคัญที่ใช้ในการวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามียู่ด้วยกัน 2 ค่า ได้แก่ 1. การวัดค่าอินทิกรัลของสนามแม่เหล็ก (Field integral) ใช้สำหรับบ่งบอกคุณลักษณะสนามแม่เหล็กของแม่เหล็ก และ 2. การวัดค่าฮาร์โมนิกส์ของสนามแม่เหล็ก (Field harmonics) ใช้สำหรับบ่งบอกถึงคุณภาพของแม่เหล็ก

ปัจจุบันสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน มีอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กใช้อยู่ 2 แบบ ได้แก่ 1. อุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีปรากฏการณ์ฮอลล์สามแกน (Three axis magnetic field measurement

device using Hall Effect method) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 และ 2. อุปกรณ์วัดค่าสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดพลิกกลับ (Magnetic field measurement device using Flip coil method) ดังแสดงในรูปที่ 1.2 โดยทั้งสองวิธีนี้เหมาะสำหรับใช้วัดคุณลักษณะสนามแม่เหล็ก แต่ไม่เหมาะที่จะใช้วัดคุณภาพของแม่เหล็ก เพราะวิธีการวัดมีความซับซ้อน ใช้เวลานาน และค่าที่วัดได้มีความแม่นยำต่ำกว่า



รูปที่ 1.1 ระบบวัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีปรากฏการณ์ฮอลล์สามแกน



รูปที่ 1.2 อุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดพลิกกลับ

อุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุน ซึ่งอาศัยเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กแบบฟลักซ์มิเตอร์ เป็นวิธีวัดคุณภาพของแม่เหล็กที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในห้องปฏิบัติการแสงซินโครตรอนทั่วโลก เพราะสามารถวัดได้อย่างแม่นยำ เชื่อถือได้ และมีกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน ในส่วนของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน ใช้งานแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนเป็นจำนวนมาก แต่ยังไม่มียุทธศาสตร์วัดสนามแม่เหล็กชนิดนี้ เนื่องจากต้องนำเข้าจากต่างประเทศ จึงมีการพัฒนาอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยขดลวดหมุนขึ้นใช้เอง เพื่อเป็นการพัฒนาองค์ความรู้ในด้านการวัดและทดสอบแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน นอกจากนี้ยังเป็นการลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศที่มีราคาแพง

ตัวอุปกรณ์วัดมีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกครึ่งวงกลมยาว 2 ชั้นประกบกัน ทำมาจากวัสดุ G10 ซึ่งเป็นไฟเบอร์กลาสอัดแรง ที่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก และอุณหภูมิภายในมีการติดตั้งขดลวดตัววัด (Measuring coil) ทำมาจากแผ่นวงจรสำเร็จรูปที่ได้ออกแบบไว้โดยเฉพาะ ซึ่งมีความยาวครอบคลุมสนามแม่เหล็กส่วนปลายทั้ง 2 ข้างของแม่เหล็กที่ต้องการวัด หลังจากนั้นติดตั้งเข้าไปตรงกลางช่องเปิดของแม่เหล็ก และหมุนด้วยมอเตอร์ด้วยความเร็วรอบคงที่ ทำการเก็บข้อมูลแล้วนำไปวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์เพื่อวัดคุณภาพของแม่เหล็ก ซึ่งเป็นงานวิจัยในลำดับถัดไป

งานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ 1. การควบคุมความเร็วรอบการหมุนของขดลวดตัววัดให้คงที่ และ 2. การวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่อ่านได้จากขดลวดตัววัดที่หมุนตัดผ่านสนามแม่เหล็กในช่องเปิดของแม่เหล็ก และตำแหน่งเชิงมุมเทียบกับเวลา โดยใช้ NI CompactRio-9030 FPGA Controller กับ โมดูลควบคุมการหมุนของมอเตอร์พร้อมทั้งอ่านค่าตำแหน่งเชิงมุม และโมดูลอ่านค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากขดลวดตัววัด เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่าน Ethernet TCP/IP และพัฒนาโปรแกรมสำหรับควบคุมการทำงาน อ่านค่า แสดงผล และเก็บข้อมูลลงคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม LabVIEW และ LabVIEW FPGA

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อสร้างอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุน
- 2) เพื่อศึกษาการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ
- 3) เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ, ความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์ และค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแม่เหล็กไฟฟ้า

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) สร้างอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุน ที่ขนาดของแกนวัดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 63.5 mm ยาว 470 mm มีการขับหมุนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง
- 2) ใช้แม่เหล็กไฟฟ้าแบบสองขั้วเป็นเครื่องมือในงานวิจัย
- 3) พัฒนาโปรแกรมสำหรับควบคุมการทำงาน เก็บข้อมูล และแสดงผล แบบกึ่งอัตโนมัติด้วยโปรแกรม LabVIEW
- 4) หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้หมุนขดลวดตัววัดในช่วงความเร็วรอบ 40 – 120 rpm โดยที่มีความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบหมุนมอเตอร์จริงไม่เกิน 3 %
- 5) ควบคุมความเร็วรอบการหมุนของแกนวัดสนามแม่เหล็กด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ที่ความเร็ว 60, 90 และ 120 rpm ให้อยู่ในข้อกำหนดของการออกแบบระบบควบคุมดังต่อไปนี้
  - ค่าการพุ่งเกิน ไม่เกิน 5 %
  - ช่วงเวลาขาขึ้น ไม่เกิน 2 sec
  - เวลาเข้าสู่สถานะคงตัว ไม่เกิน 5 sec
  - ค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัว ไม่เกิน 2 %
- 6) ทดสอบจ่ายค่ากระแสไฟฟ้าด้วยแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสองขั้วในแต่ละความเร็วรอบขนาด 5 10 และ 15 A
- 7) สามารถเก็บข้อมูล แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากขดลวดตัววัด, ค่าตำแหน่งเชิงมุม, ค่าความเร็วรอบการหมุนของขดลวดตัววัด, ค่าแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ได้

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

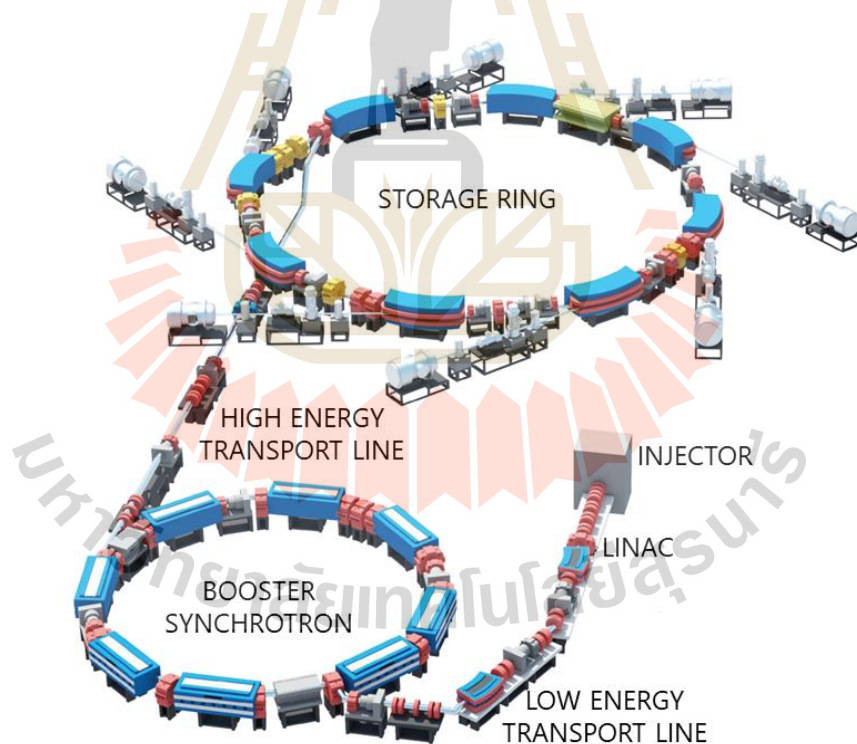
- 1) ได้อุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุน
- 2) ได้พัฒนาองค์ความรู้ทางด้านการวัดและทดสอบแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับใช้กับเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน
- 3) ได้ลดการนำเข้าจากต่างประเทศ



## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และปรัทัศน์วรรณกรรม

### 2.1 เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน

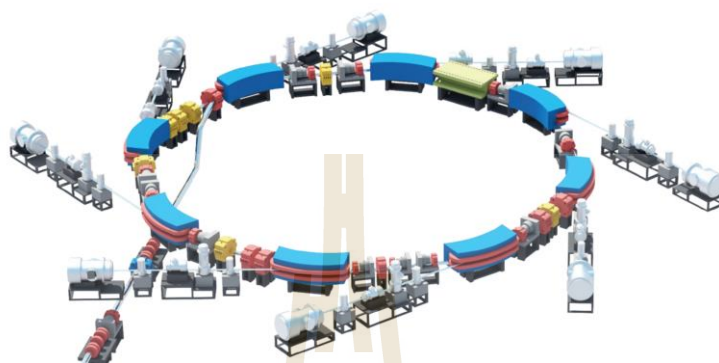
เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน ภายในห้องปฏิบัติการแสงสยาม (Siam Photon Light source laboratory : SPL) สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ประกอบด้วยแม่เหล็กไฟฟ้าและแม่เหล็กอุปกรณ์แทรก (Insertion device) หลายชนิด ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมากสำหรับเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน มีหน้าที่ควบคุมการเคลื่อนที่ และเสถียรภาพของลำอิเล็กตรอน และเพิ่มพลังงานของแสงซินโครตรอน เพื่อให้ได้แสงซินโครตรอนที่มีประสิทธิภาพสูงในการนำไปใช้สำหรับงานวิจัยต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน ภายในสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน

วงกักเก็บอิเล็กตรอนของห้องปฏิบัติการแสงสยามมีเส้นรอบวงเท่ากับ 81.3 m ผลิตแสงซินโครตรอนในระดับพลังงาน 1.2 GeV รูปแบบการจัดเรียงแม่เหล็กเป็นแบบ Double Bend

Achromat (DBA) จำนวน 4 ชุด มีจำนวนแม่เหล็กเลี้ยวเบนจำนวน 8 ตัว (สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน), 2560) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.2 วงกักเก็บอิเล็กตรอน

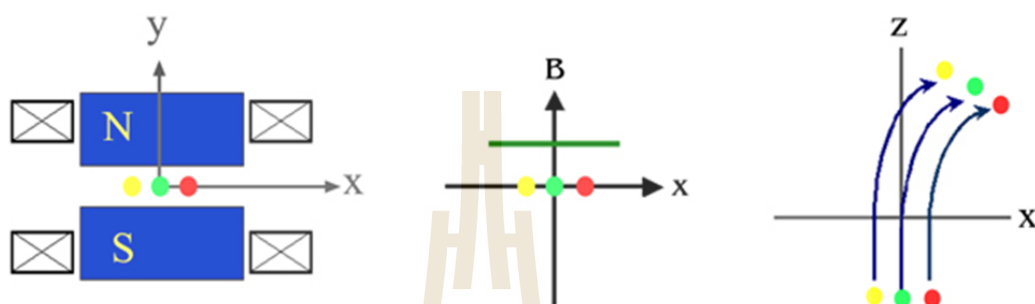
## 2.2 แม่เหล็กไฟฟ้าแบบสองขั้ว

เป็นส่วนประกอบพื้นฐานที่ใช้ในวงกักเก็บอิเล็กตรอน และเครื่องเร่งอนุภาค ซึ่งแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสองขั้วจะให้สนามแม่เหล็กแบบคงที่ โครงสร้างของแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสองขั้วประกอบด้วยขดลวดทองแดงจำนวน 2 ขด พันรอบแกนเหล็กที่ยึดติดกับโครงเหล็ก (Magnetic yoke) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แม่เหล็กไฟฟ้าแบบสองขั้ว

การทำงานของแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดสองขั้วมีดังนี้ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวดของแม่เหล็ก จะเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นแบบสม่ำเสมอ ทำให้อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านเกิดการเลี้ยวเบน หรือหักเห (ศุภกร รักใหม่, 2553) (Tanabe J., 2005). ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การทำงานของแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสองขั้ว

### 2.3 แม่เหล็กไฟฟ้าแบบสี่ขั้ว

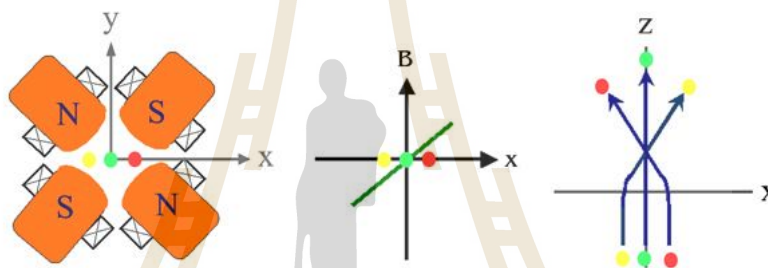
แม่เหล็กไฟฟ้าแบบสี่ขั้วเป็นส่วนประกอบพื้นฐานที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งสำหรับวงกักเก็บอิเล็กตรอน และเครื่องเร่งอนุภาค โครงสร้างประกอบด้วยขดลวดทองแดงจำนวน 4 ขด พันรอบแกนเหล็กที่ยึดติดกับโครงเหล็ก (Magnetic yoke) เรียงกันเป็นวง โดยขดลวดแต่ละขดจะมีขั้วต่อไฟฟ้าเข้าและออก ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แม่เหล็กไฟฟ้าแบบสี่ขั้ว

หลักการทํางานของแม่เหล็กแบบสี่ขั้วมีดังนี้ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวดของแม่เหล็ก จะเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ขนาดของสนามแม่เหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของแม่เหล็ก เมื่อมีอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านช่องเปิดของแม่เหล็ก จะมีแรงลอเรนทซ์กระทำกับอิเล็กตรอน ยิ่งอิเล็กตรอนอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางแม่เหล็กมากเท่าใด ขนาดของแรงลอเรนซ์จะมีค่ามากขึ้นเท่านั้น แม่เหล็กแบบสี่ขั้วจึงมีคุณสมบัติเป็นเหมือนเลนส์ที่กําลังรวมลำอิเล็กตรอนหรือโฟกัสลำอิเล็กตรอนนั่นเอง

แม่เหล็กแบบสี่ขั้วที่ทำหน้าที่รวมลำอิเล็กตรอนในแนวแกนนอน จะเรียกว่า Focusing quadrupole magnet โดยจะผลักลำอิเล็กตรอนที่อยู่ห่างจากแกนนอนทางด้านลบให้ไปทางด้านบวก และผลักลำอิเล็กตรอนที่อยู่ห่างจากแกนนอนทางด้านบวกให้ไปทางด้านลบ ดังแสดงในรูปที่ 2.6

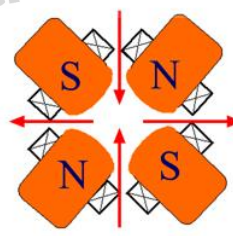


รูปที่ 2.6 การทํางานของแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสี่ขั้ว

แต่ถ้าหากหมุนแกนแม่เหล็กไป 90 องศา หรือสลับขั้วเหนือเป็นขั้วใต้ จะได้แม่เหล็กแบบสี่ขั้วที่รวมอิเล็กตรอนทางแนวแกนตั้ง จะเรียกว่า Defocusing quadrupole magnet โดยแม่เหล็กแบบสี่ขั้วจะรวมลำอิเล็กตรอนในแนวแกนหนึ่ง และกระจายลำอิเล็กตรอนในอีกแกนหนึ่งเสมอ จะไม่สามารถรวมลำอิเล็กตรอนทั้งสองแนวได้ในตัวเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ก. Focusing quadrupole magnet



รูปที่ 2.7 ข. Defocusing quadrupole magnet

รูปที่ 2.7 การวางตัวของแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสี่ขั้ว

## 2.4 เทคนิคการวัดสนามแม่เหล็ก

เทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กที่นิยมใช้ มีดังต่อไปนี้

### 2.4.1 เทคนิควัดการกำทอนของสนามแม่เหล็ก (Magnetic resonance technique)

เป็นเทคนิคที่มีความละเอียดสูงที่สามารถวัดสนามแม่เหล็กโลกได้ แต่กระบวนการวัดมีความซับซ้อนมาก ตัวอย่างของการวัดสนามแม่เหล็กที่ใช้เทคนิคนี้ได้แก่ 1. Electron Spin Resonance : ESR, 2. Nuclear Magnetic Resonance : NMR

### 2.4.2 เทคนิควัดด้วยวิธีปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect method)

เป็นเทคนิคที่ง่ายและวัดค่าได้อย่างรวดเร็ว โดยใช้หลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ ค่าที่วัดได้ค่อนข้างแม่นยำ ใช้เป็นวิธีมาตรฐานในการวัดสนามแม่เหล็ก ณ จุดต่าง ๆ ในระบบพิกัด

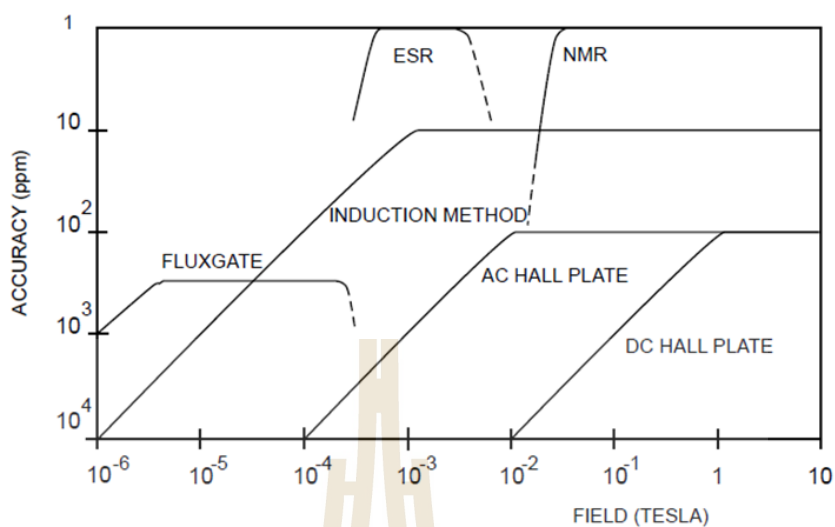
### 2.4.3 เทคนิคฟลักซ์มิเตอร์ (Flux meter method)

เป็นการวัดสนามแม่เหล็กที่มีหลักการมาจากกฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ คือ การเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กภายในขดลวดตัววัดจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่ไหลในทิศทางตรงกันข้ามกับการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กนั้น เทคนิคนี้นิยมนำมาใช้หาทิศทางของฟลักซ์แม่เหล็กและค่าอินทิกรัลของสนามแม่เหล็ก (Field Integral) การวัดค่าทำได้โดย 1. ให้สนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงรอบขดลวดที่อยู่คงที่ หรือ 2. ให้ขดลวดเคลื่อนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็กที่คงที่ เทคนิคการวัดแบบฟลักซ์มิเตอร์ จำแนกได้ดังต่อไปนี้

(1) วิธีการขดลวดเดี่ยว (Single Stretched Wire method : SSW) โดยใช้ลวดตัวนำ เช่น ทังสเทน เคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก โดยให้ส่วนที่เหลือของเส้นลวดที่ประกอบกับวงจรไฟฟ้าในบริเวณที่ปราศจากสนามแม่เหล็ก

(2) วิธีการขดลวดพลิกกลับ (Flip Coil method : FC) ส่วนใหญ่ใช้วัดค่าอินทิกรัลของสนามแม่เหล็กในแม่เหล็กสองขั้ว ซึ่งสามารถวัดค่าได้เร็วกว่าเทคนิคปรากฏการณ์ฮอลล์ ขดลวดที่ใช้วัดจะยาวกว่าแม่เหล็กที่วัดเพื่อให้ครอบคลุมบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กทั้งหมด

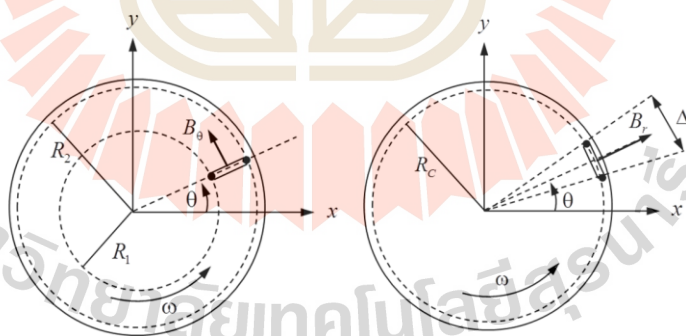
(3) วิธีการขดลวดหมุน (Rotating Coil method : RC) หลักการเดียวกันกับวิธีขดลวดพลิกกลับ เมื่อขดลวดหมุนในสนามแม่เหล็กจะทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กในหน้าตัดของขดลวดเปลี่ยนแปลงไปจึงสามารถวัดค่าอินทิกรัลของสนามแม่เหล็กได้ ข้อแตกต่างระหว่างวิธีขดลวดพลิกกลับคือ วิธีขดลวดหมุนจะมีการใช้ตัวอ่านค่าตำแหน่งเชิงมุม และมักมีขดลวดชดเชย (Bucking coil) สำหรับใช้หักล้างค่าฮาร์โมนิกส์หลักของสนามแม่เหล็ก และเพิ่มความไวในการตอบสนองของการวัดฮาร์โมนิกส์อันดับที่สูงขึ้นหรือค่าความผิดพลาดของแม่เหล็กแบบหลายขั้ว (Multipole error) (ซึ่งวิธีที่ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้) การเปรียบเทียบความแม่นยำและช่วงการวัดของวิธีวัดสนามแม่เหล็กแบบต่าง ๆ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.8 (Henrichsen K. N., 1992)



รูปที่ 2.8 การเปรียบเทียบความแม่นยำและช่วงการวัดของวิธีวัดสนามแม่เหล็กแบบต่าง ๆ

## 2.5 การวัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุน

การวัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนจะมีด้วยกัน 2 แบบ ได้แก่ 1. แบบ Radial coil และ 2. แบบ Tangential coil ซึ่งแตกต่างกันที่แนวการวางตัวของขดลวดตัววัด และค่าเฟสที่ต่างกันเท่ากับ  $90^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ก. การวางตัวของขดลวดแบบ Radial coil

รูปที่ 2.9 ข. การวางตัวของขดลวดแบบ Tangential coil

## รูปที่ 2.9 การวางตัวของขดลวดตัววัด

งานวิจัยนี้จะใช้วิธีวางตัวของขดลวดตัววัดแบบ Radial coil โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ นั่นคือ เมื่อขดลวดตัวนำหมุนตัดผ่านสนามแม่เหล็กจะเกิดการเหนี่ยวนำทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าขึ้นภายในขดลวดตัวนำนั้น ได้ดังสมการที่ 2.1

$$V = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (2.1)$$

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็ก สมการฟลักซ์แม่เหล็ก แสดงดังสมการที่ 2.2

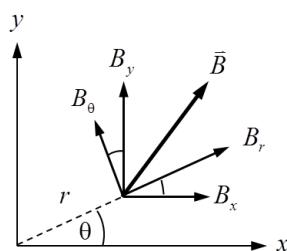
$$\Phi = AB \cos \theta \quad (2.2)$$

จากสมการที่ 2.1 และ 2.2 จะได้ความสัมพันธ์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้า ดังสมการที่ 2.3

$$V = \omega AB \sin \theta \quad (2.3)$$

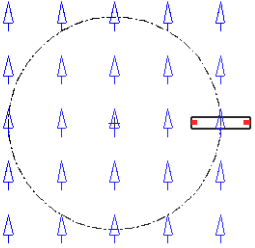
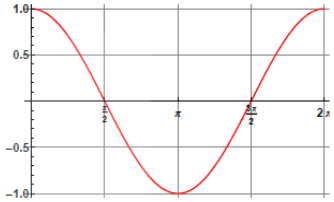
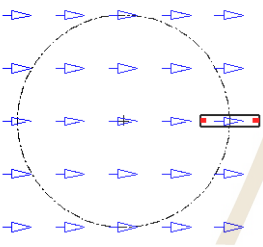
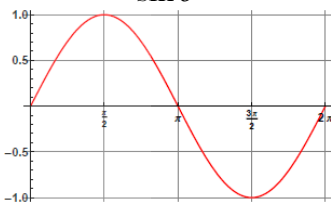
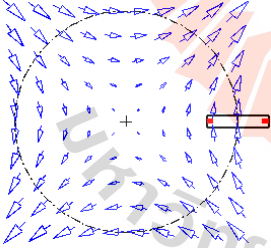
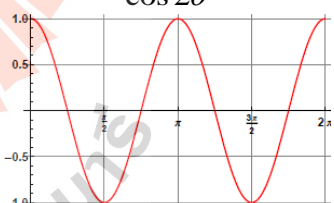
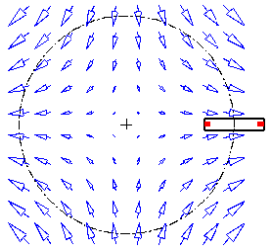
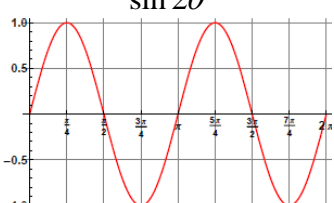
เมื่อ	$V$	=	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ, V
	$\Phi$	=	ฟลักซ์แม่เหล็ก, V-s
	$N$	=	จำนวนรอบของขดลวดตัววัด, rev
	$B$	=	ความเข้มสนามแม่เหล็ก, T
	$A$	=	พื้นที่ของขดลวดตัววัดที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็ก, m <sup>2</sup>
	$\omega$	=	ความเร็วการหมุนของขดลวดตัววัดในสนามแม่เหล็ก, red/s

ระบบพิกัดของสนามแม่เหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 2.10 สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้จากการหมุนขดลวดผ่านสนามแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งมีลักษณะเป็นฟังก์ชันไซน์ (Sunwong P., 2015)



รูปที่ 2.10 ระบบพิกัดของสนามแม่เหล็ก

ตารางที่ 2.1 การเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กที่วัดได้จากการหมุนขดลวดภายในแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ

Magnet type	Maxima and minima	Waveform
<p data-bbox="395 501 560 533">Normal dipole</p> 	<p data-bbox="794 479 892 510">0 and <math>\pi</math></p>	<p data-bbox="1177 539 1246 571"><math>\cos \theta</math></p> 
<p data-bbox="405 904 550 936">Skew dipole</p> 	<p data-bbox="762 869 924 900"><math>\pi/2</math> and <math>3\pi/2</math></p>	<p data-bbox="1177 929 1246 960"><math>\sin \theta</math></p> 
<p data-bbox="363 1285 588 1317">Normal quadrupole</p> 	<p data-bbox="730 1249 959 1281">0, <math>\pi/2</math>, <math>\pi</math> and <math>3\pi/2</math></p>	<p data-bbox="1166 1310 1257 1341"><math>\cos 2\theta</math></p> 
<p data-bbox="379 1673 576 1704">Skew quadrupole</p> 	<p data-bbox="691 1637 999 1668"><math>\pi/4</math>, <math>3\pi/4</math>, <math>5\pi/4</math> and <math>7\pi/4</math></p>	<p data-bbox="1171 1697 1252 1729"><math>\sin 2\theta</math></p> 



จากสมการที่ 2.3 เมื่อพิจารณาการกระจายแบบหลายขั้วของสนามแม่เหล็ก (Multipole expansion) แรงดันของขดลวดที่วัดได้มีค่า

$$V(t) = \sum_{n=1}^{\infty} N \cdot L \cdot \omega \cdot \frac{R_2^n - R_1^n}{R_0^{n-1}} \cdot [B_n(R_0) \sin n\theta + A_n(R_0) \cos n\theta] \quad (2.4)$$

เมื่อ	$A_n$	=	สนามแม่เหล็กในแนวแกนนอน
	$B_n$	=	สนามแม่เหล็กในแนวแกนตั้ง
	$L$	=	ความยาวของขดลวดตัววัด
	$R_0, R_1, R_2$	=	รัศมีของขดลวดตัววัด

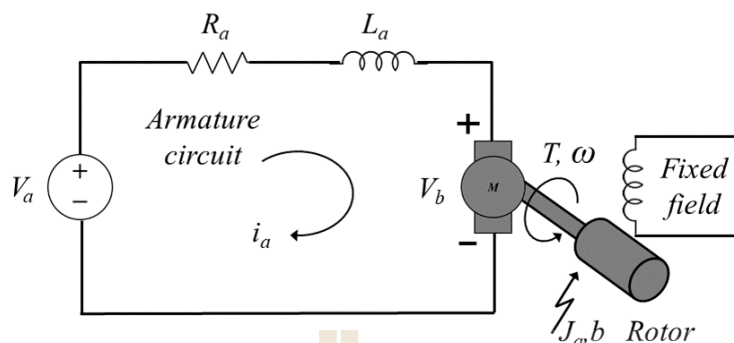
## 2.6 การควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นอุปกรณ์ขับเคลื่อนที่สำคัญในอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถควบคุมความเร็วได้ง่ายตั้งแต่ความเร็วต่ำถึงความเร็วพิกัดของมอเตอร์ ยกตัวอย่างเช่น การใช้งานในรถที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า เป็นต้น

งานวิจัยนี้ใช้มอเตอร์กระแสตรงในการขับเคลื่อนแกนวัดซึ่งมีขดลวดตัววัดสนามแม่เหล็กอยู่ด้านใน ด้วยหลักการทำงานของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนนี้จะต้องอาศัยการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้คงที่ขณะทำการวัด (Sunwong P., 2015) จึงได้เลือกใช้วิธีการควบคุมความเร็วมอเตอร์ด้วยวิธีควบคุมแรงดันไฟฟ้าฝั่งวงจรรออาร์เมเจอร์ เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและมีประสิทธิภาพ

### 2.6.1 การควบคุมความเร็วมอเตอร์ด้วยวิธีควบคุมแรงดันไฟฟ้าฝั่งวงจรรออาร์เมเจอร์ (Armature Voltage Control)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงคือเครื่องกลไฟฟ้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานทางกลงานวิจัยนี้จะใช้วิธีควบคุมค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับวงจรรออาร์เมเจอร์ แผนภาพของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแสดงในรูปที่ 3 และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แสดงดังสมการที่ 2 (Dorf R.C. and Bishop R.H., 2001) (กองพัน อารีร์กันย์, 2558)



รูปที่ 2.11 แผนภาพมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากรูปที่ 2.11 และจากกฎแรงดันไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ (Khan S, Alamgir Z and Alam S., 2016) จะได้สมการทางไฟฟ้าของมอเตอร์กระแสตรง ดังสมการที่ 2.5 – 2.7

$$V_a = V_R + V_L + V_b \quad (2.5)$$

และ

$$V_R = R_a i_a \quad (2.6)$$

$$V_L = L_a \frac{di}{dt} = L_a \dot{i}_a \quad (2.7)$$

$V_b$  คือแรงเคลื่อนไฟฟ้าซึ่งมีทิศตรงข้ามกับกระแสในวงจร ซึ่งขณะที่ขดลวดของมอเตอร์หมุนอยู่ในสนามแม่เหล็ก ขดลวดจะตัดเส้นแรงแม่เหล็ก ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำซึ่งมีทิศตรงข้ามกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่มอเตอร์ (Back Electromotive force : Back EMF) และมีสัดส่วน โดยตรงกับความเร็วเชิงมุม จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.7 (Ahmad M.A., Kishor K., Rai P., 2014) ดังสมการที่ 2.8

$$V_b = K_b \omega \quad (2.8)$$

เมื่อ  $K_b$  = ค่าคงที่ของ Electromotive force, V/rad/s

จากสมการที่ 2.4 - 2.8 จัดรูปสมการใหม่ ได้ดังสมการที่ 2.9

$$\dot{i}_a = -\frac{K_b}{L_a} \omega - \frac{R_a}{L_a} i_a + \frac{1}{L_a} V_a \quad (2.9)$$

เมื่อ	$R_a$	=	ความต้านทานฝั่งวงจรรออาร์เมเจอร์, $\Omega$
	$L_a$	=	ความเหนี่ยวนำฝั่งวงจรรออาร์เมเจอร์, H
	$i_a$	=	กระแสไฟฟ้าฝั่งวงจรรออาร์เมเจอร์, A
	$V_a$	=	ความต่างศักย์ฝั่งวงจรรออาร์เมเจอร์, V

จากรูปที่ 2.11 และจากกฎของนิวตัน จะได้สมการทางกลของมอเตอร์ ดังสมการที่ 2.10

$$\sum M = T - b\omega = J_a \dot{\omega} \quad (2.10)$$

$T$  คือแรงบิดของมอเตอร์, N.m ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงดันฝั่งวงจรรออาร์เมเจอร์ ได้ดังสมการที่ 2.11

$$T = K_t i_a \quad (2.11)$$

จากสมการที่ 2.9 และ 2.10 จัดรูปสมการใหม่ ได้ดังสมการที่ 2.12

$$\dot{\omega} = \frac{K_t}{J_a} i_a - \frac{b}{J_a} \omega \quad (2.12)$$

เมื่อ	$\omega$	=	ความเร็วเชิงมุม, rad/s
	$J_a$	=	โมเมนต์ความเฉื่อย, $\text{kg-m}^2$
	$K_t$	=	ค่าคงที่ของแรงบิด, N.m/A
	$b$	=	ความหน่วง, N.m/rad/s

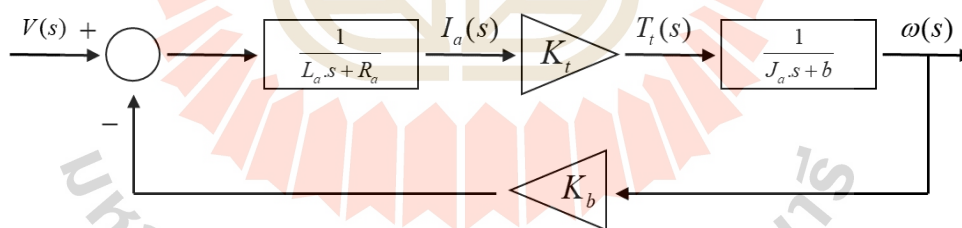
เมื่อได้สมการทางไฟฟ้า และสมการทางกลของมอเตอร์ จากสมการที่ 2.9 และ 2.12 จะได้สมการทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังแสดงในสมการที่ 2.13

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ \dot{i}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{b}{J_a} & \frac{K_t}{J_a} \\ -\frac{K_b}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ i_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} V_a \quad (2.13)$$

เมื่อทำการแปลงลาปลาซ (Laplace Transform) ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของแรงดันไฟฟ้าขาเข้าฝั่งอาร์มเจอร์กับความเร็วเชิงมุม ดังสมการที่ 2.14

$$\frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{\frac{K_t}{L_a J_a}}{s^2 + \left( \frac{J_a R_a + L_a b}{L_a J_a} \right) s + \left( \frac{R_a b + K_t K_b}{L_a J_a} \right)} \quad (2.14)$$

จากสมการที่ 13 สามารถเขียนเป็นแผนภาพฟังก์ชันถ่ายโอน ได้ดังรูปที่ 2.12

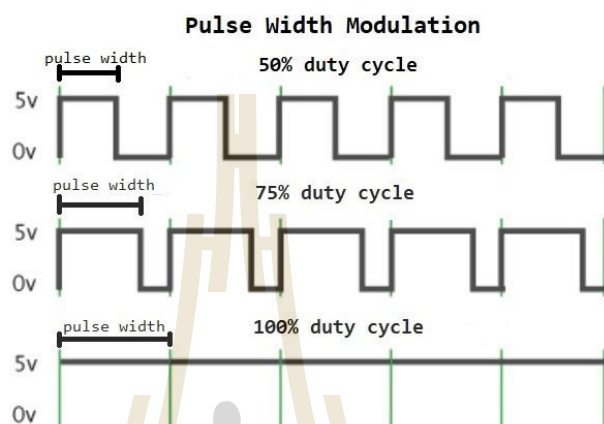


รูปที่ 2.12 แผนภาพฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

## 2.6.2 Pulse Width Modulation (PWM)

จากหัวข้อที่ 2.6.1 เนื่องด้วยการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในงานวิจัยนี้ใช้วิธีควบคุมแรงดันไฟฟ้าฝั่งวงจรรีโมเจอร์ ซึ่งจะใช้เทคนิค Pulse Width Modulation (PWM) โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้มอเตอร์ในรูปแบบของสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีช่วงเปิด-ปิดสัญญาณสลับกัน ซึ่งช่วงที่เปิดคือช่วงที่มีแรงดันไฟฟ้าทำให้อมอเตอร์ไฟฟ้าทำงาน ส่วนช่วงปิดคือช่วงที่ไม่มีแรงดันไฟฟ้ามอเตอร์ไฟฟ้าจะไม่ทำงาน ช่วงเวลาที่สัญญาณเปิด เมื่อเทียบกับช่วงเวลาที่จ่าย

สัญญาณออกมาทั้งหมดจะเรียกว่า ความกว้างของสัญญาณ (Pulse Width) ดังแสดงในรูปที่ 2.13 นอกจากนี้ความถี่ในการเปิด-ปิดสัญญาณจะต้องสูงเพียงพอที่จะทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าทำงานได้อย่างราบรื่น (Tanabodin K., 2018)

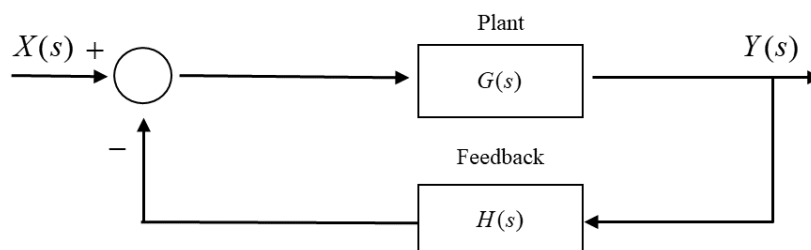


รูปที่ 2.13 ตัวอย่างสัญญาณ PWM

## 2.7 การควบคุมอัตโนมัติ

### 2.7.1 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control system) หรือระบบควบคุมแบบวงปิด (Closed-Loop control system) คือระบบควบคุมที่มีการนำสัญญาณขาออก (Output) ย้อนกลับมาเปรียบเทียบกับสัญญาณขาเข้า (Input) เพื่อหาค่าความผิดพลาด (Error) แล้วนำไปควบคุมสัญญาณขาออกให้มีค่าตามสัญญาณขาเข้าที่ต้องการ นั่นคือสัญญาณขาออกของระบบจะสามารถเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณขาเข้าได้ตลอดเวลาด้วยสัญญาณป้อนกลับ (สราวุฒิ สุจิตจร, 2546) (ก้องพันธ์ อารีรักษ์, 2558) ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แผนภาพระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

ระบบควบคุมแบบป้อนกลับจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใช้แทนลักษณะทางกายภาพของระบบ จากรูปที่ 2.11 สามารถเขียนเป็นของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังแสดงในสมการที่ 2.15

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)H(s)} \quad (2.15)$$

### 2.7.2 ค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว

ค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (Steady-state error) คือผลต่างของสัญญาณขาเข้ากับสัญญาณขาออกเมื่อระบบได้เข้าสู่สถานะอยู่ตัวแล้ว ระบบควบคุมที่ดีจะมีค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวน้อย

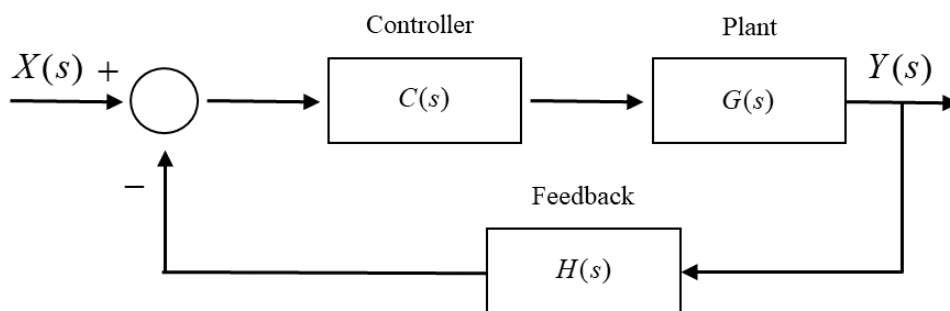
### 2.7.3 ตัวควบคุมแบบพีไอดี

ตัวควบคุมแบบพีไอดี เป็นตัวควบคุมที่นิยมใช้กันมากในวงการอุตสาหกรรม ส่วนประกอบของตัวควบคุมแบบพีไอดี ได้แก่ ส่วนการปรับสัดส่วน (Proportional) ส่วนการอินทิเกรต (Integral) และส่วนการอนุพันธ์ (Derivative) ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลายรูปแบบ เช่น ตัวควบคุมแบบพี ตัวควบคุมแบบพีดี ตัวควบคุมแบบพีไอ หรือตัวควบคุมแบบพีไอดี

ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ของตัวควบคุมแบบพีไอดีแสดงในสมการที่ 2.16 และแผนภาพระบบควบคุม (กองพัน อารีรักษ์, 2558) แสดงดังรูปที่ 2.12

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.16)$$

เมื่อ	$C(s)$	=	ฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุม (Controller transfer function)
	$K_p$	=	อัตราขยายของการปรับสัดส่วน (Proportional gain constant)
	$K_i$	=	อัตราขยายของการอินทิเกรต (Integral gain constant)
	$K_d$	=	อัตราขยายของการอนุพันธ์ (Derivative gain constant)



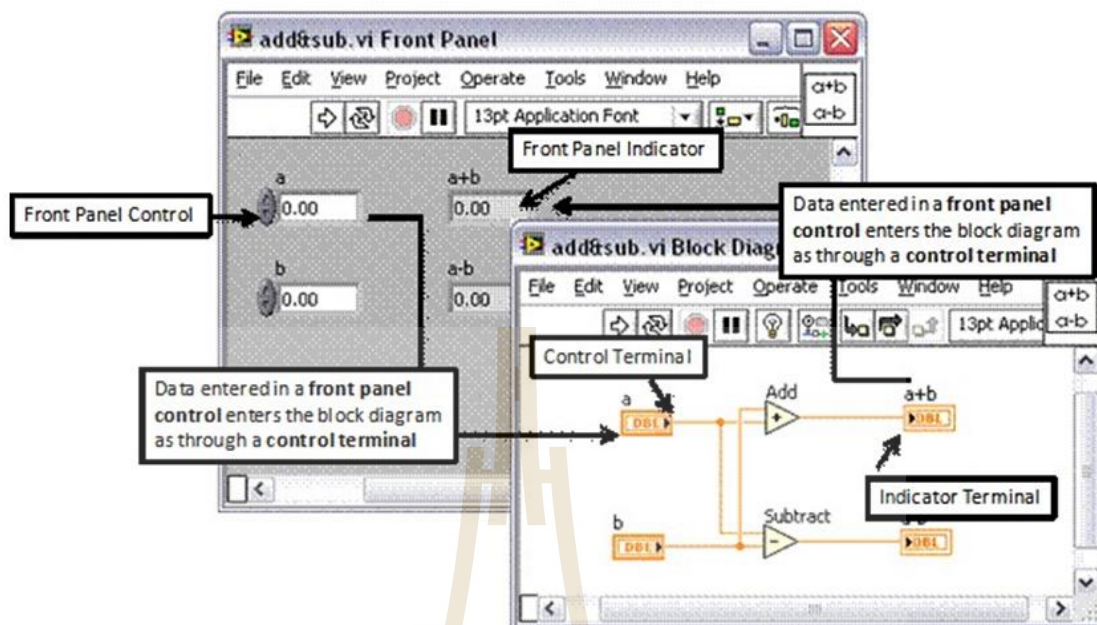
รูปที่ 2.15 แผนภาพระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่มีตัวควบคุม

## 2.8 โปรแกรม LabVIEW

โปรแกรม LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) คือโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ถูกพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในด้านกรวัด ควบคุม และแสดงผลสำหรับงานทางวิศวกรรม โดยบริษัท National Instruments ซึ่งเป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวางในวงการวิจัยและอุตสาหกรรม โปรแกรมสามารถสร้างเครื่องมือวัดเสมือนจริง (Virtual Instrument) ให้องปฏิบัติการทางวิศวกรรม และในตัวของโปรแกรมจะประกอบไปด้วยฟังก์ชันที่ช่วยในการทำงานจำนวนมาก

โปรแกรม LabVIEW เป็นโปรแกรมประเภท GUI (Graphic User Interface) ไม่จำเป็นต้องเขียนคำสั่งใด ๆ และภาษาที่ใช้ในโปรแกรมนี้อาจเรียกว่า ภาษารูปภาพ (Graphical language) ซึ่งจะแทนการเขียนโปรแกรมแบบภาษาพื้นฐาน เช่น ภาษาซี หรือภาษาเบสิก ด้วยรูปภาพและสัญลักษณ์ทั้งหมด มีความสะดวกและสามารถลดเวลาในการเขียนโปรแกรมลงไปได้มาก โดยเฉพาะในงานเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับใช้ในการวัดและการควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 2.16

สำหรับโปรแกรมประเภทที่ใช้ตัวหนังสือ มีความยุ่งยากในการส่งผ่านข้อมูลด้วยอุปกรณ์เชื่อมต่อต่าง ๆ รวมถึงการจัดวางตำแหน่งในหน่วยความจำเพื่อที่จะสามารถรวบรวมข้อมูลมาใช้ในการคำนวณและเก็บข้อมูลให้ได้ประโยชน์สูงสุด ปัญหาเหล่านี้ได้รับการแก้ไขในโปรแกรม LabVIEW โดยได้มีการบรรจุโปรแกรมจำนวนมากไว้ในคลังโปรแกรม (Libraries) สำหรับจัดการกับปัญหาเหล่านั้น นอกจากนี้ในคลังโปรแกรมยังได้บรรจุฟังก์ชันการทำงานที่สำคัญอีกหลายประการเช่น Signal generation, Signal processing, Filters, สถิติ, พีชคณิต และคณิตศาสตร์อื่นๆ ดังนั้นโปรแกรม LabVIEW จึงทำให้การวัดและการใช้เครื่องมือวัดกลายเป็นเรื่องง่ายลงไปมาก และทำให้คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลกลายเป็นเครื่องมือทางด้านกรวัดหลายชนิดอยู่ในเครื่องเดียว



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างโปรแกรม LabVIEW

ข้อได้เปรียบสูงสุดของโปรแกรม LabVIEW คือเมื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์เพื่อการเก็บข้อมูล (Data acquisition device) แล้วสามารถเปลี่ยนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลให้กลายเป็นเครื่องมือวัดในหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็น Oscilloscope, Multi-meter, Function Generator, Strain Meter, Thermometer หรือเครื่องมือวัดอื่นๆ ตามที่ต้องการ ทำให้สามารถใช้คอมพิวเตอร์ทำการวัดและควบคุมได้อย่างกว้างขวาง (กิจไพบูลย์ ชีวพันธุ์ศรี, 2011)

### 2.8.1 LabVIEW FPGA

FPGA (Field-programmable gate array) เป็น วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ประกอบด้วยวงจรถ่ายทอดที่สามารถโปรแกรมได้ (Programmable logic block) ซึ่งสามารถทำงานได้อย่างรวดเร็ว มีเสถียรภาพสูง มีความคล่องตัว และสามารถทำงานพร้อม ๆ กันแบบคู่ขนานได้ อันเป็นข้อได้เปรียบกว่าระบบที่ทำงานผ่านหน่วยปฏิบัติการ

บริษัท National Instruments ได้ทำการพัฒนาอุปกรณ์ที่รวมเอาไมโครโปรเซสเซอร์เข้ากับ FPGA ทำให้ได้อุปกรณ์ควบคุมที่มีความสามารถหลากหลาย และมีประสิทธิภาพสูง แต่สามารถใช้งานได้ง่าย เนื่องจากการพัฒนาโปรแกรมสำหรับใช้งานกับ FPGA ยังคงเป็นโปรแกรมแบบรูปภาพ เหมือนกับการใช้งานโปรแกรม LabVIEW ทั่วไป โดยใช้ชื่อเรียกว่า LabVIEW FPGA ซึ่งทางบริษัทได้พัฒนาอุปกรณ์สำหรับ FPGA ขึ้นหลายรูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.17





รูปที่ 2.17 อุปกรณ์ FPGA ของบริษัท Nation Instruments

## 2.9 ปรีทัศน์วรรณกรรม

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ในช่วงเวลาที่ผ่านมานี้ งานวิจัยต่างๆนี้ สามารถได้ให้ความรู้ในการพัฒนางานวิจัยในเรื่องต่างๆได้ดังนี้

### 2.9.1 งานวิจัยการวัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุน

Hedqvist A., Hellberg F., (2007) นำเสนอการวัดสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กแบบสี่ขั้วด้วยวิธีขดลวดหมุน โดยเน้นไปที่การวัดตำแหน่งแกนแม่เหล็กและเสถียรภาพของแม่เหล็กเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสที่ป้อนให้กับแม่เหล็ก ขดลวดหมุนประกอบด้วยขดลวด 2 ชุด ใช้ในการหักล้างผลกระทบจากการหมุน และใช้หักล้างค่าสนามแม่เหล็กหลักเหลือแต่ค่าฮาร์โมนิกส์ที่สูงขึ้น ตำแหน่งแกนแม่เหล็กสามารถคำนวณจากค่าที่ได้จากการวัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุน รวมถึงค่าความผิดพลาดของสนามแม่เหล็ก ซึ่งเป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับการนำแม่เหล็กไปใช้งาน

J.X. Zhou., et al, (2010) นำเสนอการพัฒนาาระบบวัดขดลวดฮาร์โมนิกส์แบบใหม่ที่อาศัยอุปกรณ์เก็บข้อมูลแบบพลวัตเพื่อใช้วัดคุณภาพสนามแม่เหล็กสำหรับแม่เหล็กแบบสี่ขั้ว ได้ถูกออกแบบให้เก็บข้อมูลได้หลายช่องสัญญาณด้วยช่วงสัญญาณฝั่งขาเข้าที่กว้าง ชุดของคำสั่งได้พัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม LabVIEW ใช้อุปกรณ์ควบคุมและเก็บข้อมูลด้วย NI PXI ของบริษัท National Instruments ซึ่งมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือสูง นอกจากนี้ยังทำการลดการคลาดเคลื่อนที่เกิดจาก eddy current และจากการสั่นสะเทือนด้วย ขดลวดฮาร์โมนิกส์ที่ใช้วัดจะมีด้วยกัน 2 ชุด เรียกว่า ขดลวดหลัก และขดลวดชดเชย ขดลวดทั้งสองชุดจะถูกพันเข้ากับแกนเดียวกัน ขดลวดหลักพันอยู่ชั้นนอก ขดลวดชดเชยถูกพันอยู่ชั้นใน ทำหน้าที่หักล้างค่าฮาร์โมนิกส์หลักของแม่เหล็กออกเหลือแต่ฮาร์โมนิกส์อันดับที่สูงขึ้นเท่านั้น นอกจากนี้ยังได้เขียนโปรแกรมเพื่อหักล้างค่าฮาร์โมนิกส์หลักเพิ่มเข้ามาอีกด้วย กระบวนการวัดจะเก็บค่าแรงดันที่อ่านได้จากขดลวดหลัก และขดลวดชดเชย

ชดเชย กับค่าตำแหน่งมุมที่อ่านได้จากเอ็นโค้ดเดอร์ไปพร้อม ๆ กัน ผลที่ได้คือระบบใหม่นี้สามารถทำงานได้อย่างแม่นยำในขณะที่ขดลวดหมุนในสนามแม่เหล็กแบบต่อเนื่อง

Quanling Peng., et al, (2010) นำเสนอระบบ Rotating coil field measurement ที่ใช้วัดสนามแม่เหล็ก Superconducting magnet ที่ Beijing Electron Positron Collider upgrade project (BEPCII) ที่ BEPCII มีระบบวัดสนามแม่เหล็กใช้งานอยู่ 3 ระบบ คือ 1. Rotating coil measurement 2. Stretched wire 3. Hall probe โดยระบบ Rotating coil measurement มีใช้งานอยู่ 2 แบบ คือแบบสั้น 50 มม. สำหรับแม่เหล็กขนาดเล็ก และแบบยาว 950 มม. สำหรับแม่เหล็กขนาดใหญ่ ซึ่งทั้ง 2 แบบ มีลักษณะเหมือนกันทุกประการ ส่วนประกอบของเครื่องมือวัดประกอบด้วย Stepping motor สำหรับขับ Rotating coil, ระบบเก็บข้อมูลใช้เครื่อง PDI5025, และใช้ Angular encoder ที่มีความละเอียดถึง 4096 พัลส์ต่อรอบ หลักการดังนี้ เมื่อให้ขดลวดที่ใช้วัดหมุนในสนามแม่เหล็กจะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าที่มุมต่าง ๆ กัน เมื่อทำการอินทิเกรตค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลาจะทำให้ได้ค่าฟลักซ์แม่เหล็ก ซึ่งค่าฟลักซ์แม่เหล็กที่ได้จะประกอบด้วย ฟลักซ์แม่เหล็กจากขดลวดหลัก และจากขดลวดชดเชยเพื่อหักล้างสนามแม่เหล็กที่วัด ให้เหลือแต่ค่าฮาร์โมนิกอันดับที่สูงกว่าเท่านั้น เมื่อใช้ระบบ Rotating coil field measurement วัดค่า field integral เทียบกับระบบ Stretched wire ค่าที่ได้มีความแตกต่างกันไม่เกิน 0.2 % ซึ่งถือว่าระบบมีความแม่นยำ

J.X. Zhou., et al, (2015) นำเสนอระบบ วัดสนามแม่เหล็กที่ใช้กับ Drift tube Linac Quadrupole magnet ในส่วนการติดตั้งระบบวัดสนามแม่เหล็กแบบขดลวดหมุน ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากชิ้นส่วนเชิงกลมีส่วนทำให้ผลการวัดคลาดเคลื่อนมีอยู่ด้วยกัน 2 ข้อ คือ การเยื้องศูนย์ของแกนขดลวดที่ใช้ในการวัด และการสั่นสะเทือน การทำแท่นรองรับระบบวัดที่ดีสามารถลดผลกระทบจากการคลาดเคลื่อนได้ นอกจากนี้ในการติดตั้งแกนขดลวดจะใช้แกนเหล็กติดตั้งแทนที่ก่อนเพื่อวัดการเยื้องศูนย์ด้วย Dial gauge ระหว่างตำแหน่งหัวและปลายของแกนเหล็ก และวัดตำแหน่งการติดตั้งของแม่เหล็กเข้ากับแท่น ซึ่งระบบวัดสนามแม่เหล็กแบบขดลวดหมุนที่มีความแม่นยำจะต้องอยู่บนฐานรองรับที่มีการปรับตั้งที่แม่นยำด้วย

Köster O., Fiscarelli L., Russenschuck S., (2016) นำเสนอกระบวนการวัดสนามแม่เหล็กด้วย Rotating coil กับแม่เหล็กที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ การวัดสนามแม่เหล็กมีความสำคัญมากในแต่กระบวนการสร้างแม่เหล็ก เช่น การวัดสนามแม่เหล็กกับแม่เหล็กต้นแบบเพื่อตรวจสอบกับการออกแบบ และ ระหว่างกระบวนการผลิตเพื่อตรวจสอบแม่เหล็กแต่ละตัวว่าได้ตามมาตรฐานหรือไม่ ระบบ Rotating coil จะต้องมีแกนวัดที่ยาวครอบคลุมแม่เหล็กทั้งหมด และมีขนาดเล็กกว่าช่องเปิดของแม่เหล็ก สำหรับแม่เหล็กที่มีขนาดช่องเปิดใหญ่มาก ๆ จะทำการวัดสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่าง ๆ โดยจำนวนครั้งและตำแหน่งในการวัดจะขึ้นกับรัศมีของแม่เหล็ก และรัศมีของขดลวดที่ใช้วัด

Campmany J., Marcos J., Massana V., Ribó Ll. and Petrocelli R., (2019) นำเสนอการพัฒนาแกนวัดสนามแม่เหล็กขนาดเล็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ที่ ALBA Magnetic Measurement Laboratory เนื่องจากความต้องการแสงซินโครตรอนคุณภาพสูง แม่เหล็กจึงมีช่องเปิดแคบลงกว่าในอดีตมาก ซึ่งเป็นเรื่องยากมากที่จะทำแกนและขดลวดตัววัดให้เล็กลงแต่ยังคงความแม่นยำสูง ปัญหาที่เจอคือ มีสัญญาณที่น้อยลง แกนวัดอาจเกิดการสั้นไหวได้ง่ายเนื่องจากแกนวัดมีขนาดเล็กลง จากการทดสอบพบว่าวัสดุที่ใช้ทำแกนวัดเป็นผสมระหว่าง เซรามิกกับอลูมิเนียม และใช้ขดลวดตัววัดทำด้วย PCB multilayer ทำให้การวัดเป็นไปตามเงื่อนไขที่ต้องการ เนื่องจากวัสดุดังกล่าวมีความแข็งแรง การสั้นสะเทือนน้อย

### 2.9.2 งานวิจัยการควบคุมความเร็วรอบไฟฟ้ากระแสตรง

Ahmad M.A., Kishor K., Rai P., (2014) นำเสนอการควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงด้วยตัวควบคุมแบบ PID เปรียบเทียบกับ Fuzzy Logic โดยใช้โปรแกรม MATLAB สำหรับการจำลองการทำงาน ค่าตัวแปรของมอเตอร์ได้มาจากค่าจริง และใช้ Ziegler-Nichols frequency response method ในการปรับค่า PID จากผลการทดสอบพบว่าเนื่องจากเป็นระบบที่ใช้การจำลองตัวควบคุมแบบ Fuzzy Logic จึงทำงานได้ดีกว่า ตัวควบคุมแบบ PID มาก

Hassan A.A., Al-Shamaa N.K. and Abdalla K.K., (2018) นำเสนอการเปรียบเทียบวิธีการปรับค่าตัวควบคุมพีไอดีของการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงโดยใช้ Atmega 328 microcontroller ร่วมกับ IBT-2 เป็นตัวขับเคลื่อนด้วยสัญญาณ PWM วิธีการที่ใช้ในการเปรียบเทียบมีดังนี้ Modified Ziegler-Nichols, Chien-Hrones-Reswick (CHR), Tyreus-Luyben, Damped Oscillation, และใช้ MATLAB-Simulink หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากผลการทดสอบพบว่าวิธี Modified Ziegler-Nichols ได้ผลดีที่สุดกับมอเตอร์กระแสตรงที่นำมาทดสอบ ผลการปรับค่าพบว่าระบบตอบสนองต่อการรบกวนจากภายนอกได้ดี

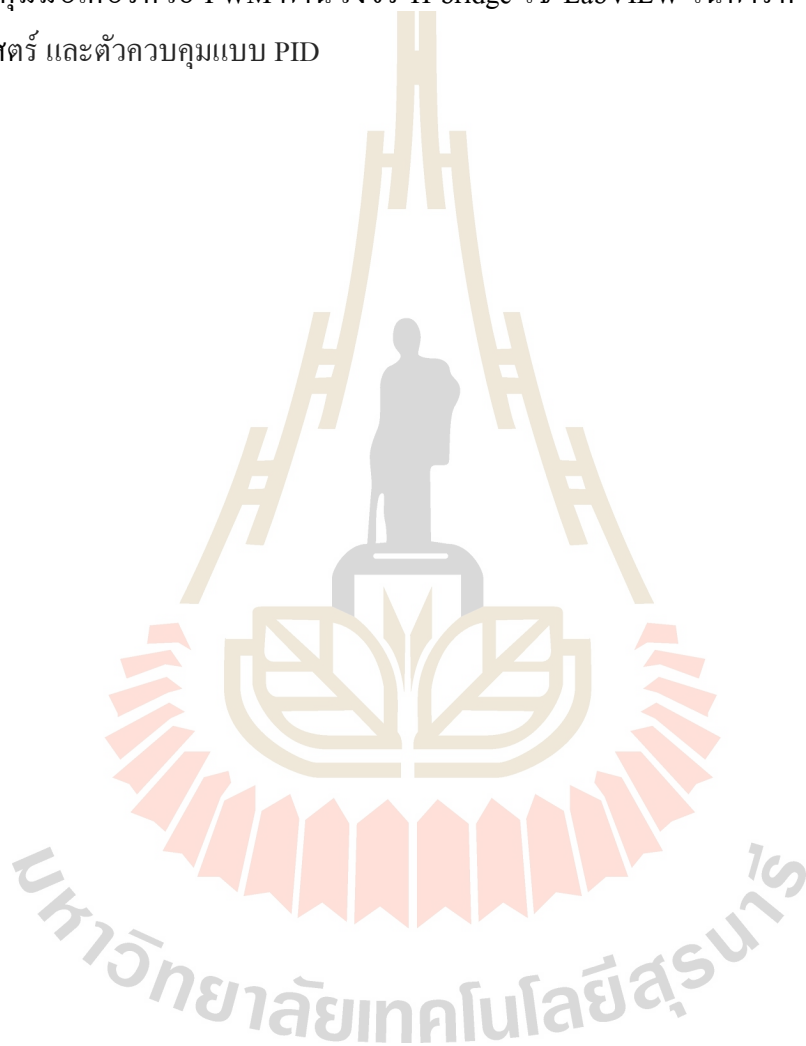
Da S. Dantas A.D.O., Da S. Dantas A.F.O., et al., (2018) นำเสนอการควบคุมแบบ PID กับมอเตอร์ไฟฟ้าของรถยนต์ไฟฟ้าด้วย Armature voltage control โดยพิจารณาความเร็วเชิงมุมกับค่าแรงดันไฟฟ้าขาเข้าฝั่งวงจรรีเมเจอร์ ความเร็วมอเตอร์จะถูกจำกัดไว้ที่ค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุดของมอเตอร์ จากการทดสอบพบว่าค่าพลวัตของมอเตอร์จะสัมพันธ์กับค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าอินพุตกับเอาต์พุต และขึ้นอยู่กับค่าปรับค่า PID ให้เหมาะสม

### 2.9.3 งานวิจัยการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยโปรแกรม LabVIEW

Vikhel P., Punjabi N., Kadu C.,(2014) นำเสนอการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยตัวควบคุมแบบ PID โดยใช้โปรแกรม LabVIEW ด้วย Arduino UNO microcontroller board

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม LabVIEW พัฒนาโปรแกรมควบคุมการหมุนของมอเตอร์ด้วย PWM และใช้อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ (Tachometer) เป็นสัญญาณป้อนกลับให้ระบบควบคุม

Dinesh O., Mevekari D.R., Khartad D.D., (2015) นำเสนอการใช้ LabVIEW FPGA ในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ใช้ NI CompactRIO-9076 เป็นตัวควบคุม และใช้ NI-9401 digital I/O module อ่านค่าจาก Quadrature encoder และใช้ NI-9221 analog I/O module เป็นตัวควบคุมมอเตอร์ด้วย PWM ผ่าน วงจร H-bridge ใช้ LabVIEW ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และตัวควบคุมแบบ PID



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

ในบทนี้อธิบายวิธีการดำเนินการวิจัย โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การศึกษาวิธีการควบคุมความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอที่ใช้ขับหมุนขดลวดตัววัด และกระบวนการเก็บข้อมูลการวัดค่าจากอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุน เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผล

#### 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยนี้ ประกอบด้วย

- 1) อุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุน
- 2) อุปกรณ์ควบคุมแบบ NI CompactRio รุ่น NI cRIO-9030
- 3) โมดูลควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor drive module) รุ่น NI cRIO-9505

ของ National Instruments

- 4) โมดูลรับค่าแรงดันไฟฟ้าย่านแรงดันต่ำ (Low Voltage input module) รุ่น NI cRIO-9238 ของ National Instruments

- 5) อุปกรณ์อ่านค่าตำแหน่งเชิงมุม (Rotating Encoder) รุ่น ERN420 ของ Heidenhain

- 6) อุปกรณ์สลีป-ริง (Slip-Ring) รุ่น MT0120-002 ของ Moflon

- 7) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC motor) รุ่น 65JW15G/63ZY125-2430 ผลิตในประเทศจีน

- 8) Digital Multimeter รุ่น 34401a ของ Agilent Technologies

- 9) อุปกรณ์ตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้า (Direct-Current Current Transformer : DCCT) รุ่น IT65-S Ultrastap ของ LEM

- 10) แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (Regulated DC Power supply) รุ่น GP060-60 ของ Tagasago

- 11) อุปกรณ์ควบคุมแบบ NI-PXIe รุ่น PXIe-8840 พร้อมกับ NI PXIe-1071 Power supply with 4 chassis ของ National Instruments

- 12) โมดูล Digital multimeter รุ่น NI PXI-4070 ของ National Instruments
- 13) โมดูล Counter/Time รุ่น NI-PXIE-6612 ของ National Instruments
- 14) อุปกรณ์กระจายสัญญาณเครือข่าย (Network Switch) รุ่น 3C1670800C ของ 3COM
- 15) แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวิตชิง ( Switching DC power supply) รุ่น NI PS-15 ของ National Instruments
- 16) เครื่องคอมพิวเตอร์

### 3.2 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องปฏิบัติการแม่เหล็กไฟฟ้า สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) เลขที่ 111 ถนนพหลโยธิน ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา

### 3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

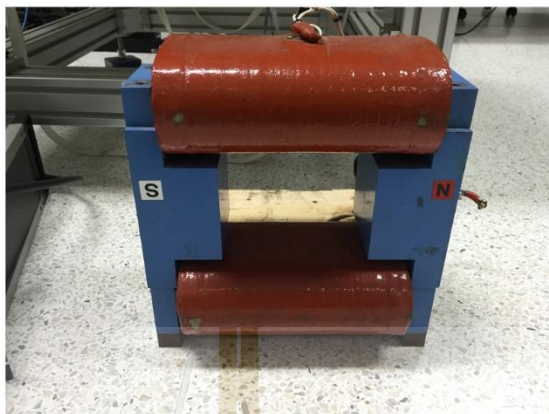
งานวิจัยนี้ใช้แม่เหล็กไฟฟ้าแบบสองขั้วสำหรับดำเนินงานวิจัยดังแสดงในรูปที่ 3.1 มีข้อมูลจำเพาะดังต่อไปนี้

#### 3.3.1 ข้อมูลจำเพาะทางกายภาพ

- ผลิตโดยบริษัท Mitsubishi Electric Corporation เมือง โโกเบ ประเทศญี่ปุ่น
- ผลิตเมื่อ พ.ศ.2531 (ค.ศ.1988)
- แม่เหล็กรวมขดลวดมีขนาด (กว้าง x ยาว x สูง) 157 x 300 x 310 mm
- ช่องเปิดของแม่เหล็กมีขนาด (กว้าง x ยาว x สูง) 100 x 145 x 100 mm
- แม่เหล็กมีจำนวน 2 ขั้ว
- แม่เหล็กพันขดลวดจำนวน 216 รอบ มีขนาด (กว้าง x ยาว x สูง) 157 x 240 x 100 mm

#### 3.3.2 ข้อมูลจำเพาะทางไฟฟ้า

- ใช้กับไฟฟ้ากระแสตรง
- รองรับกระแสไฟฟ้าได้สูงสุด 24.6 A
- รองรับแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด 3.4 V
- มีความต้านทานภายในขดลวดขนาด 0.114  $\Omega$
- มีความเหนี่ยวนำของขดลวดขนาด 0.016 H
- มีขนาดสนามแม่เหล็กสูงสุด 90.043 T



รูปที่ 3.1 แม่เหล็กแบบสองขั้วที่ใช้ในงานวิจัย

### 3.4 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมทางด้านวิศวกรรมในการพัฒนาโปรแกรมสำหรับควบคุมการทำงาน แสดงผล และเก็บข้อมูลของอุปกรณ์ที่ใช้วิจัย รวมถึงใช้ในการคำนวณประมวลผลข้อมูลดังต่อไปนี้

#### 3.4.1 โปรแกรมสำหรับควบคุมการทำงาน แสดงผล และเก็บข้อมูล

โปรแกรมทางด้านวิศวกรรมที่ใช้เป็นศูนย์กลางในการพัฒนาโปรแกรมสำหรับควบคุมการทำงาน แสดงผล และเก็บข้อมูลในงานวิจัยนี้ได้แก่ โปรแกรม LabVIEW™ Full Development System Edition เวอร์ชัน 2017 และโปรแกรมย่อยที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้

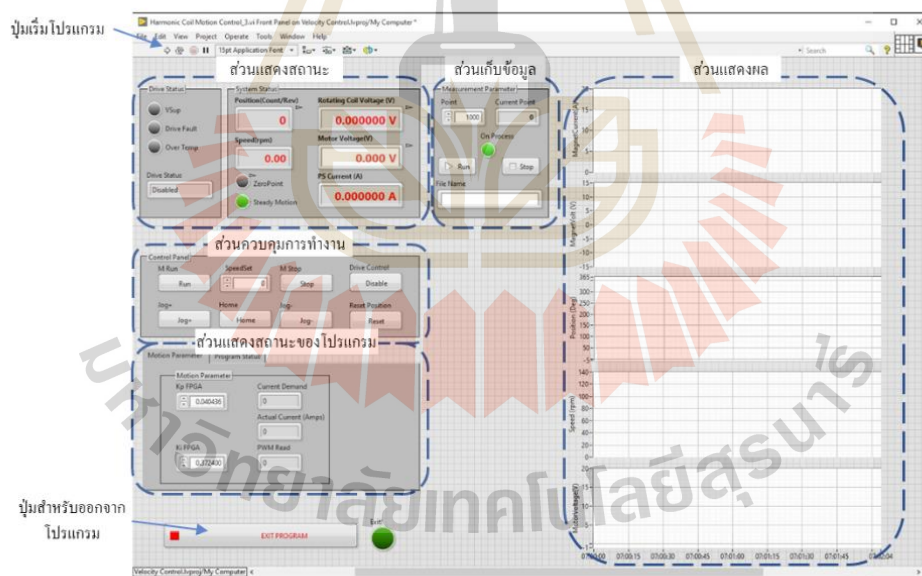
- NI SoftMotion 2017
- LabVIEW™ FPGA 2017
- LabVIEW™ Real-Time 2017
- NI RIO 17.0
- LabVIEW™ FPGA Module Xilinx Compilation Tool for Windows 2017
- NI PXI Platform service configuration
- NI DAQmx 17.0
- LabVIEW™ DMM 2017
- NI Shared Variable Engine

### 3.4.2 โปรแกรมที่ใช้สำหรับคำนวณและประมวลผลข้อมูล

โปรแกรมที่ใช้สำหรับคำนวณและประมวลผลข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้แก่ โปรแกรม MATLAB® และ MATLAB-Simulink® 2020a ในส่วนของ Toolbox ที่ใช้คือ Control System และ Math and Optimization

### 3.5 การพัฒนาโปรแกรมควบคุมการทำงาน แสดงผล และเก็บข้อมูล

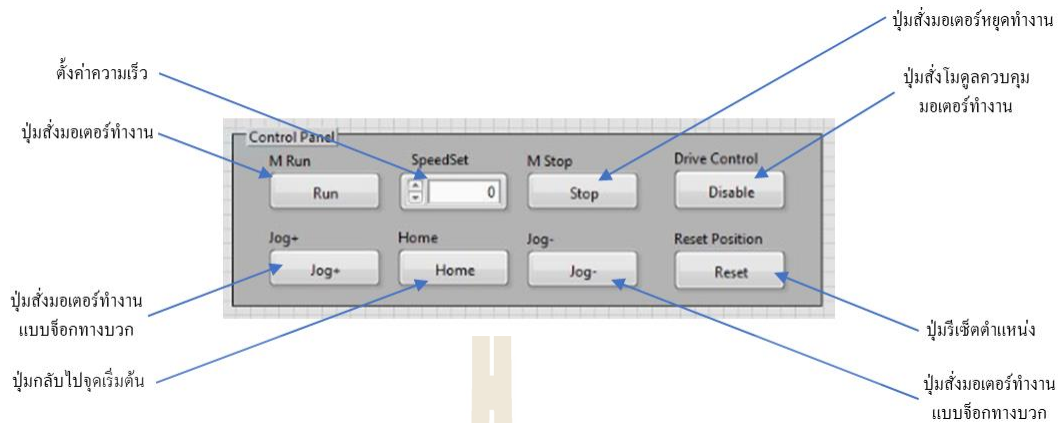
โปรแกรมควบคุมการทำงาน แสดงผล และเก็บข้อมูล ถูกพัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม LabVIEW มีหน้าที่ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อขับหมุนขดลวดตัววัด แสดงผล และเก็บข้อมูลที่อ่านได้จากอุปกรณ์ควบคุมและอ่านค่า มีหน้าโปรแกรมสำหรับติดต่อกับผู้ใช้งาน (User Interface) ลักษณะการทำงานเป็นแบบกึ่งอัตโนมัติ (รายละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ข.) สามารถตั้งค่าและแสดงผลข้อมูลได้ ความเร็วในการเก็บข้อมูลอยู่ที่ 100 ข้อมูลต่อวินาที ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ส่วนประกอบของโปรแกรมอธิบายได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.2 โปรแกรมควบคุมการทำงาน

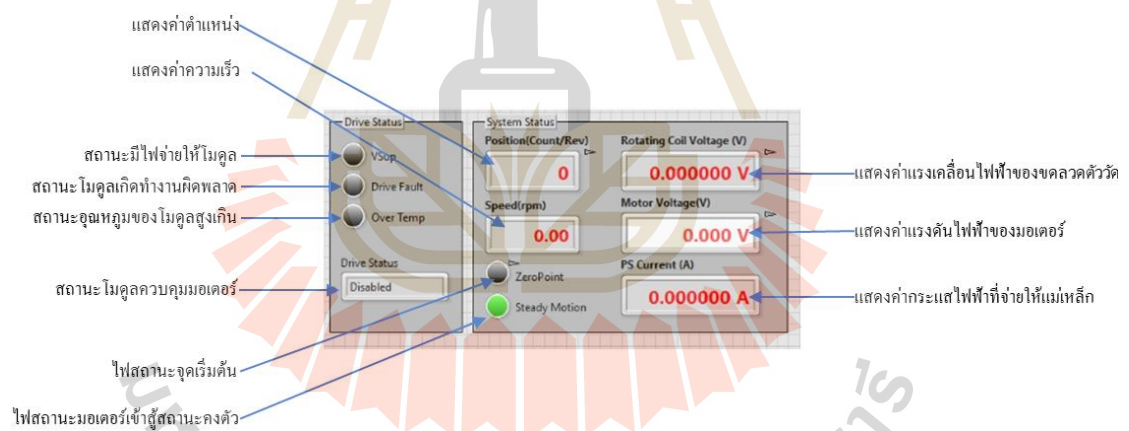
3.5.1 ส่วนควบคุมการทำงาน เป็นส่วนที่ใช้สำหรับสั่งการทำงานของมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.3





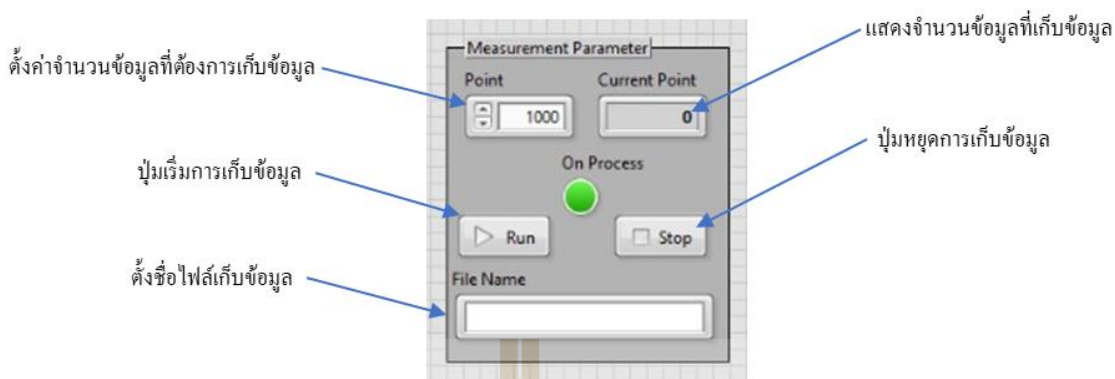
รูปที่ 3.3 ส่วนควบคุมการทำงานของมอเตอร์

3.5.2 ส่วนแสดงสถานะของเครื่อง เป็นส่วนที่ใช้สำหรับแสดงสถานะการทำงานของมอเตอร์ และแสดงค่าที่อ่านได้จากอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ส่วนแสดงสถานะ

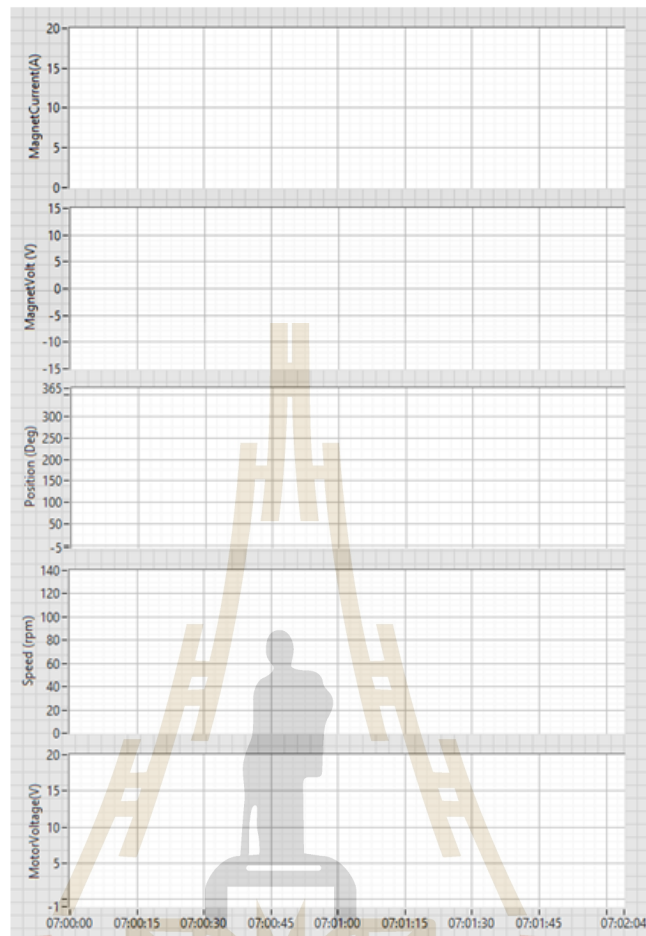
3.5.3 ส่วนเก็บข้อมูล เป็นส่วนที่ใช้สำหรับเก็บข้อมูล ประกอบไปด้วยการตั้งค่าจำนวนข้อมูลที่ต้องการเก็บค่าในการทดสอบแต่ละครั้ง โปรแกรมถูกตั้งค่าให้จัดเก็บข้อมูลด้วยไฟล์นามสกุล .csv และสามารถตั้งชื่อไฟล์ได้ ประกอบไปด้วยปุ่มสั่งให้เริ่มหรือหยุดเก็บข้อมูล และแสดงสถานะการเก็บข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ส่วนเก็บข้อมูล

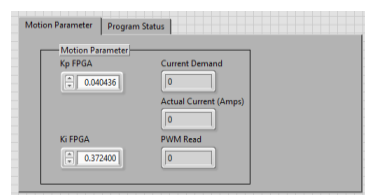
3.5.4 ส่วนแสดงผล เป็นส่วนที่ใช้สำหรับแสดงผลข้อมูลในรูปแบบกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 มีอยู่ด้วยกัน 5 ค่า ได้แก่

- กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแม่เหล็ก
- แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้จากขดลวดตัววัด
- ตำแหน่งการหมุนของขดลวดตัววัด
- ความเร็วการหมุนของมอเตอร์
- แรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์

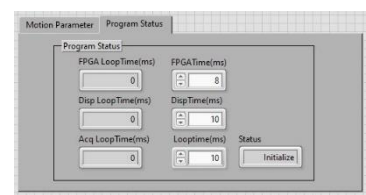


รูปที่ 3.6 ส่วนแสดงผล

3.5.5 ส่วนแสดงสถานะของโปรแกรม เป็นส่วนที่ใช้สำหรับแสดงสถานะของโปรแกรม ประกอบด้วย 1. แสดงสถานะและการตั้งค่าของระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.7ก และ 2. แสดงสถานะการทำงานของโปรแกรม ดังแสดงในรูปที่ 3.7ข.



รูปที่ 3.7ก สถานะและตั้งค่าการควบคุมมอเตอร์



รูปที่ 3.7ข สถานะการทำงานของโปรแกรม

รูปที่ 3.7 ส่วนแสดงสถานะของโปรแกรม

### 3.6 ขั้นตอนการเปิดการทำงานของเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

ขั้นตอนการเปิดการทำงานของเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย ประกอบด้วย

3.6.1 ขั้นตอนการเปิดการทำงานของอุปกรณ์ควบคุมแบบ PXI มีขั้นตอนดังนี้

- เปิดเครื่อง NI-PXIE-8840
- เปิดโปรแกรม LabVIEW จากเครื่อง NI-PXIE-8840 สำหรับอ่านค่าแรง

ไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและอ่านค่าเซ็นเซอร์ตำแหน่งเริ่มต้น

- กดปุ่ม Run ให้โปรแกรมทำงาน

3.6.2 ขั้นตอนการเปิดการทำงานของ Digital multimeter ของ Agilent รุ่น 34401a มีขั้นตอนดังนี้

- เปิดเครื่อง Digital multimeter
- ตั้งค่าให้เครื่องอ่านค่ากระแสไฟฟ้า

3.6.3 ขั้นตอนการเปิดการทำงานของโปรแกรมบนเครื่องคอมพิวเตอร์ มีขั้นตอนดังนี้

- เปิดเครื่องคอมพิวเตอร์
- เปิดโปรแกรม LabVIEW จากเครื่องคอมพิวเตอร์ สำหรับควบคุมการทำงานของ

ของอุปกรณ์ทั้งหมด

- กดปุ่ม Run ให้โปรแกรมทำงาน

### 3.7 ขั้นตอนการทดสอบหมุนมอเตอร์แบบขั้นบันได โดยให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบ 40 ถึง 120 rpm

การทดสอบหมุนมอเตอร์แบบขั้นบันไดให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบ 40 ถึง 120 rpm โดยทำการปรับค่าความเร็วขึ้น-ลงเป็นแบบขั้นบันได ดังนี้ 40 60 80 100 120 100 80 60 40 rpm ตามลำดับ รวมทั้งสิ้น 9 ครั้ง แต่ละครั้งจะให้มอเตอร์หมุนคงที่เป็นเวลา 50 วินาที พร้อมทำการเก็บข้อมูล ขั้นตอนการทดสอบมีดังต่อไปนี้

(1) กดปุ่ม Drive Control เพื่อให้ไมโครควบคุมมอเตอร์ทำงาน ปุ่มจะเปลี่ยนสถานะเป็น Enable และสถานะ Drive Status ในส่วนแสดงสถานะการทำงานของเครื่องจะแสดง Enabled

(2) กดปุ่ม Home เพื่อให้มอเตอร์หมุนไปยังตำแหน่งเริ่มต้น รอจนกระทั่งไฟแสดงสถานะ Zero Point จะเป็นสีเขียว มอเตอร์จะหยุดหมุน

(3) ตั้งค่าจำนวนการเก็บข้อมูลที่ต้องการเก็บในช่อง Point และตั้งชื่อไฟล์ในช่อง File Name ในส่วนเก็บข้อมูลของโปรแกรม

- (4) ตั้งค่าความเร็วเริ่มต้นเท่ากับ 0 rpm ในช่อง Speed Set ในส่วนของการทำงานของโปรแกรม
- (5) กดปุ่ม M Run ในส่วนของควบคุมการทำงานของโปรแกรมให้มอเตอร์เริ่มทำงาน
- (6) กดปุ่ม Run ในส่วนเก็บข้อมูลของโปรแกรม เพื่อเริ่มการเก็บข้อมูล โปรแกรมจะเริ่มทำงาน ไฟสถานะ On Process จะเป็นสีเขียว และค่าการเก็บข้อมูลในช่อง Current Point จะเริ่มนับ
- (7) โปรแกรมจะทำการปรับค่าความเร็วรอบทุก ๆ 50 วินาที
- (8) เมื่อครบทุกค่าแล้ว โปรแกรมจะหยุดการเก็บข้อมูล ไฟแสดงสถานะ On Process จะเป็นสีเทา
- (9) กดปุ่ม M Stop ส่วนของควบคุมการทำงานของโปรแกรมให้มอเตอร์หยุดทำงาน
- (10) กดปุ่ม Drive Control เพื่อให้ไมโครควบคุมมอเตอร์หยุดทำงาน ปุ่มจะเปลี่ยนสถานะเป็น Disable และสถานะ Drive Status ในส่วนแสดงสถานะการทำงานของเครื่องจะแสดง Disable

### 3.8 ขั้นตอนการทดสอบหมุนมอเตอร์แบบขึ้นบันได โดยให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบ 60 ถึง 120 rpm

การทดสอบหมุนมอเตอร์แบบขึ้นบันได โดยให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบ 60 ถึง 120 rpm โดยทำการปรับค่าความเร็วขึ้น-ลงเป็นแบบขึ้นบันได ดังนี้ 60 90 120 90 60 rpm ตามลำดับ รวมทั้งสิ้น 5 ครั้ง แต่ทุกครั้งจะให้มอเตอร์หมุนคงที่เป็นเวลา 50 วินาที พร้อมทำการเก็บข้อมูล ขั้นตอนการทดสอบมีดังต่อไปนี้

- (1) กดปุ่ม Drive Control เพื่อให้ไมโครควบคุมมอเตอร์ทำงาน ปุ่มจะเปลี่ยนสถานะเป็น Enable และสถานะ Drive Status ในส่วนแสดงสถานะการทำงานของเครื่องจะแสดง Enabled
- (2) กดปุ่ม Home เพื่อให้มอเตอร์หมุนไปยังตำแหน่งเริ่มต้น รอจนกระทั่งไฟแสดงสถานะ Zero Point จะเป็นสีเขียว มอเตอร์จะหยุดหมุน
- (3) ตั้งค่าจำนวนการเก็บข้อมูลที่ต้องการเก็บในช่อง Point และตั้งชื่อไฟล์ในช่อง File Name ในส่วนเก็บข้อมูลของโปรแกรม
- (4) ตั้งค่าความเร็วเริ่มต้นเท่ากับ 0 rpm ในช่อง Speed Set ในส่วนของการทำงานของโปรแกรม
- (5) กดปุ่ม M Run ในส่วนของควบคุมการทำงานของโปรแกรมให้มอเตอร์เริ่มทำงาน

- (6) กดปุ่ม Run ในส่วนเก็บข้อมูลของโปรแกรม เพื่อเริ่มการเก็บข้อมูล โปรแกรมจะเริ่มทำงานไฟสถานะ On Process จะเป็นสีเขียว และค่าการเก็บข้อมูลในช่อง Current Point จะเริ่มนับ
- (7) โปรแกรมจะทำการปรับค่าความเร็วรอบทุก ๆ 50 วินาที
- (8) เมื่อครบทุกค่าแล้ว โปรแกรมจะหยุดการเก็บข้อมูล ไฟแสดงสถานะ On Process จะเป็นสีเทา
- (9) กดปุ่ม M Stop ส่วนของควบคุมการทำงานของโปรแกรมให้มอเตอร์หยุดทำงาน
- (10) กดปุ่ม Drive Control เพื่อให้โมดูลควบคุมมอเตอร์หยุดทำงาน ปุ่มจะเปลี่ยนสถานะเป็น Disable และสถานะ Drive Status ในส่วนแสดงสถานะการทำงานของเครื่องจะแสดง Disabled

### 3.9 ขั้นตอนการทดสอบหมุนมอเตอร์แบบขั้นบันได โดยให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบ 60, 90 และ 120 rpm

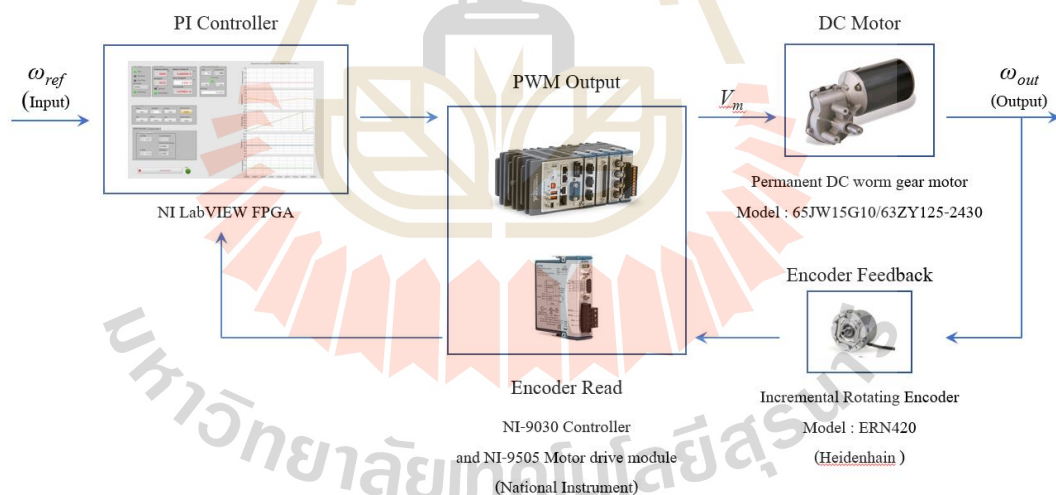
การทดสอบหมุนมอเตอร์แบบขั้นบันไดให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วรอบ 60 90 และ 120 rpm โดยทำการปรับค่าความเร็วขึ้นเป็นแบบขั้นบันได 1 ครั้ง เมื่อถึงเวลา 5 วินาที และให้มอเตอร์หมุนคงที่จนครบ 10 วินาที พร้อมทำการเก็บข้อมูล ขั้นตอนการทดสอบมีดังต่อไปนี้

- (1) กดปุ่ม Drive Control เพื่อให้โมดูลควบคุมมอเตอร์ทำงาน ปุ่มจะเปลี่ยนสถานะเป็น Enable และสถานะ Drive Status ในส่วนแสดงสถานะการทำงานของเครื่องจะแสดง Enabled
- (2) กดปุ่ม Home เพื่อให้มอเตอร์หมุนไปยังตำแหน่งเริ่มต้น รอจนกระทั่งไฟแสดงสถานะ Zero Point จะเป็นสีเขียว มอเตอร์จะหยุดหมุน
- (3) ตั้งค่าจำนวนการเก็บข้อมูลที่ช่อง Point และตั้งชื่อไฟล์ในช่อง File Name ในส่วนเก็บข้อมูลของโปรแกรม
- (4) ตั้งค่าความเร็วเริ่มต้นเท่ากับ 0 rpm ในช่อง Speed Set ในส่วนของการทำงานของโปรแกรม
- (5) กดปุ่ม M Run ในส่วนของการทำงานของโปรแกรมให้มอเตอร์เริ่มทำงาน
- (6) กดปุ่ม Run ในส่วนเก็บข้อมูลของโปรแกรม เพื่อเริ่มการเก็บข้อมูล โปรแกรมจะเริ่มทำงานไฟสถานะ On Process จะเป็นสีเขียว โปรแกรมเก็บข้อมูลและค่าการเก็บข้อมูลในช่อง Current Point จะเริ่มนับ
- (7) โปรแกรมจะทำการปรับความเร็วรอบที่วินาทีที่ 5

- (8) เมื่อครบ 10 วินาทีแล้ว โปรแกรมจะหยุดการเก็บข้อมูล ไฟแสดงสถานะ On Process จะเป็นสีเขียว มอเตอร์จะยังคงหมุนที่ความเร็วค่าสุดท้าย
- (9) กดปุ่ม M Stop ส่วนของการทำงานของโปรแกรมให้มอเตอร์หยุดทำงาน
- (10) กดปุ่ม Drive Control เพื่อให้โมดูลควบคุมมอเตอร์หยุดทำงาน ปุ่มจะเปลี่ยนสถานะเป็น Disable และสถานะ Drive Status ในส่วนแสดงสถานะการทำงานของเครื่องจะแสดง Disabled

### 3.10 ขั้นตอนการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์

การวัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุน ต้องการควบคุมความเร็วรอบการหมุนของขดลวดตัววัดให้คงที่ เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากขดลวดตัววัดจะแปรผันโดยตรงกับความเร็วรอบ งานวิจัยนี้จึงให้ความสำคัญกับค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวเป็นหลัก และใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) เป็นตัวขับหมุนขดลวดตัววัด มีการอ่านค่าตำแหน่งเชิงมุมด้วยอุปกรณ์อ่านตำแหน่งเชิงมุม (Rotating encoder) ผ่านทาง NI cRIO-9505 Motor drive module เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ควบคุม NI CompactRio ดังแสดงในรูปที่ 3.8

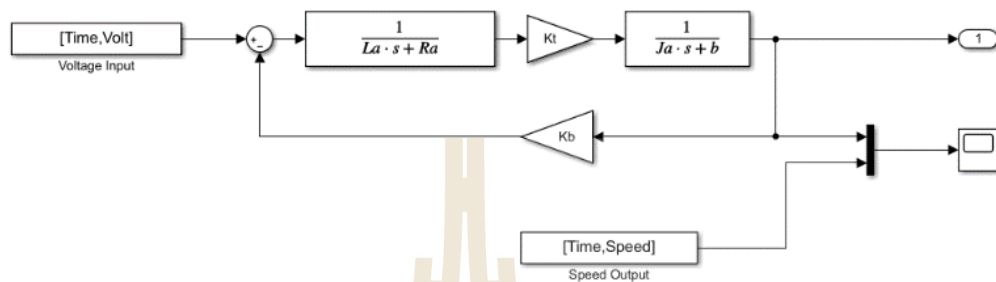


รูปที่ 3.8 แผนภาพการควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสไฟฟ้าตรง

#### 3.10.1 ขั้นตอนการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ทดสอบการหมุนมอเตอร์แบบขั้นบันไดด้วยความเร็วการหมุน 40 ถึง 120 rpm ตามวิธีในหัวข้อที่ 3.7 เก็บข้อมูลแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ และความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ งานวิจัยนี้ใช้การควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงด้วยวิธี Armature control โดยฟังก์ชันถ่ายโอน

แสดงในสมการที่ 2.13 นำไปสร้างบล็อกในโปรแกรม MATLAB-Simulink ได้ดังรูปที่ 3.9 เพื่อที่จะนำข้อมูลไปประมวลผลด้วยวิธี Parameter estimation



รูปที่ 3.9 แผนภาพฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจาก โปรแกรม MATLAB-Simulink

นำค่าตัวแปรของมอเตอร์ที่ได้แทนในโปรแกรม MATLAB-Simulink เปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบการหมุนมอเตอร์จริงกับผลการจำลอง พร้อมเก็บข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ผล โดยกำหนดให้ค่าความผิดพลาดระหว่างแบบจำลองกับการทดสอบจริงมีค่าไม่เกินร้อยละ 3 จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้แทนระบบจริง

### 3.10.2 ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ

หลังจากได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากหัวข้อ 3.10.1 แล้ว หลังจากนั้นนำไปออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ โดยใช้วิธี Response Optimization ด้วยโปรแกรม MATLAB-Simulink แผนภาพฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงปิดแสดงดังรูปที่ 3.10 ทดสอบด้วยสัญญาณอินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วยพร้อมเก็บข้อมูล



รูปที่ 3.10 แผนภาพฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงปิดแบบมีตัวควบคุมพีไอจาก โปรแกรม MATLAB-Simulink



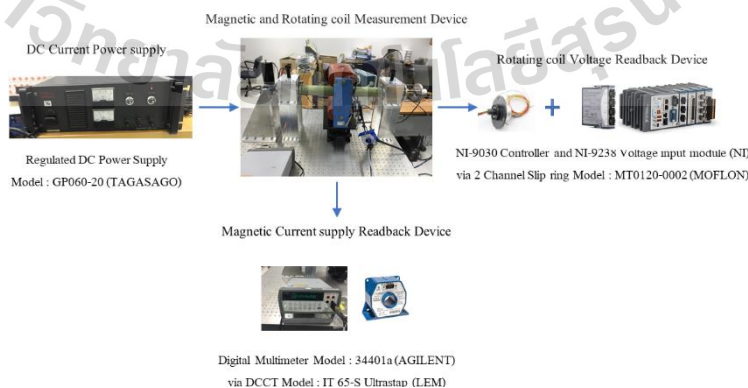
โดยข้อกำหนดการออกแบบระบบควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบพีไอที่ต้องการ ดังต่อไปนี้

- ค่าการพุ่งเกิน ไม่เกิน 5 %
- ช่วงเวลาขาขึ้น ไม่เกิน 2 sec.
- เวลาเข้าสู่สถานะคงตัว ไม่เกิน 5 sec.
- ค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัว ไม่เกิน 2 %

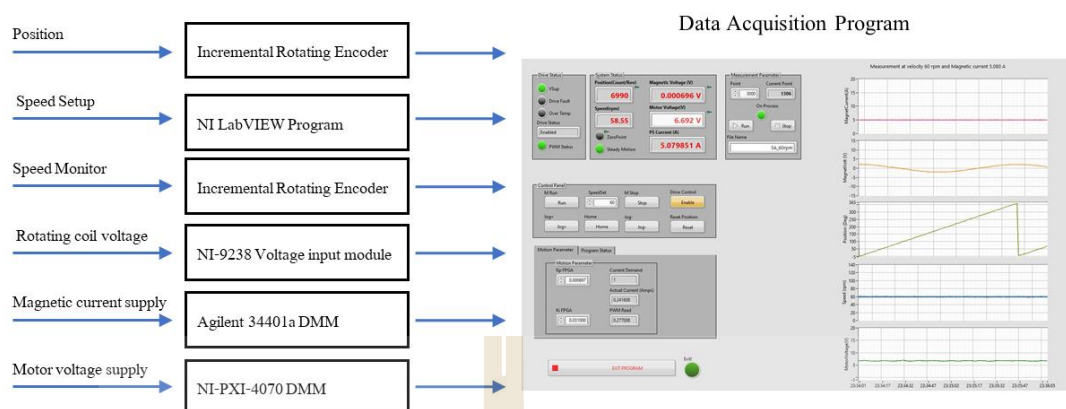
เมื่อได้ค่าตัวควบคุมตามความต้องการแล้ว นำไปทดสอบด้วยการหมุนมอเตอร์จริงตามวิธีการในหัวข้อที่ 3.8 และ 3.9 พร้อมเก็บข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ผล เปรียบเทียบกับเงื่อนไขที่ได้ระบุไว้ข้างต้น และการทดสอบด้วยสัญญาณอินพุตขั้นบันไดหนึ่งหน่วย

### 3.11 ขั้นตอนเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล

อุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุน มีอุปกรณ์ Slip ring ตรวจจับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากขดลวดตัววัดหมุนตัดสนามแม่เหล็ก ได้จากการอ่านค่าด้วย NI CompactRIO-9238 และใช้ NI CompactRIO-9505 อ่านค่าตำแหน่งเชิงมุมที่ขดลวดตัววัดหมุนไปใน 1 รอบ มีแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (Regulated DC power supply) จ่ายกระแสให้แม่เหล็กแบบสองขั้วที่ใช้ทดสอบ ขนาด 5, 10 และ 15 A โดยมีอุปกรณ์ตรวจจับค่ากระแส (DCCT) อ่านค่าด้วย Digital Multimeter Agilent Model 34401a เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทาง GPIB Interface ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ใช้โปรแกรม LabVIEW พัฒนาโปรแกรมสำหรับเก็บข้อมูลแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่อ่านได้จากขดลวดตัววัด, ตำแหน่งเชิงมุม, ความเร็วรอบการหมุนขดลวดตัววัด, และแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.11 แผนภาพการทำงานของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุน



รูปที่ 3.12 การเก็บข้อมูลของการวัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีชดวคหมุม

การทดสอบหมวมอเตอร์ด้วยความเร็ว 60 90 และ 120 rpm ตามลำดับ โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับแม่เหล็กขนาด 2 V และในแต่ละความเร็วรอบที่ทดสอบให้ปรับค่ากระแสที่จ่ายให้กับแม่เหล็กขนาด 5 10 และ 15 A ตามลำดับ ขั้นตอนการทดสอบมีดังต่อไปนี้

- (1) กดปุ่ม Drive Control เพื่อให้ไมคูลควบคุมมอเตอร์ทำงาน ปุ่มจะเปลี่ยนสถานะเป็น Enable และสถานะ Drive Status ในส่วนแสดงสถานะการทำงานของเครื่องจะแสดง Enabled
- (2) ปรับค่ากระแสไฟฟ้าที่แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้แม่เหล็ก 5 A
- (3) กดปุ่ม Home เพื่อให้หมวมอเตอร์หมุนไปยังตำแหน่งเริ่มต้น รอจนกระทั่งไฟแสดงสถานะ Zero Point จะเป็นสีเขียว มอเตอร์จะหยุดหมุน
- (4) ตั้งค่าจำนวนการเก็บข้อมูลที่ช่อง Point และ ตั้งชื่อไฟล์ในช่อง File Name ในส่วนเก็บข้อมูลของโปรแกรม
- (5) ตั้งค่าความเร็วเริ่มต้นเท่ากับ 60 rpm ในช่อง Speed Set ในส่วนการทำงานของโปรแกรม
- (6) กดปุ่ม M Run ในส่วนการทำงานของโปรแกรมให้หมวมอเตอร์เริ่มทำงาน รอจนกว่าไฟแสดงสถานะ Steady-state จะเป็นสีเขียว
- (7) กดปุ่ม Run ในส่วนเก็บข้อมูลของโปรแกรม เพื่อเริ่มการเก็บข้อมูล โปรแกรมจะเริ่มทำงานไฟสถานะ On Process จะเป็นสีเขียว และค่าการเก็บข้อมูลในช่อง Current Point จะเริ่มนับ โปรแกรมจะเก็บข้อมูลจนครบจำนวนที่ได้ตั้งค่าไว้ ไฟแสดงสถานะ On Process จะเป็นสีเทา มอเตอร์จะหยุดหมุน
- (8) กดปุ่ม M Stop ส่วนการทำงานของโปรแกรมให้หมวมอเตอร์หยุดทำงาน

- (9) ย้อนกลับไปทำตามขั้นตอนที่ (2) ถึง (8) ที่ค่ากระแส 10 และ 15 A ตามลำดับ
- (10) ให้ย้อนกลับไปทำตามขั้นตอนที่ (2) ถึง (9) โดยปรับค่าความเร็วการหมุนของมอเตอร์ในขั้นตอนที่ (5) ด้วยค่าความเร็วการหมุน 90 และ 120 rpm ตามลำดับ จนครบ
- (11) กดปุ่ม Drive Control เพื่อให้ไมโครควบคุมมอเตอร์หยุดทำงาน ปุ่มจะเปลี่ยนสถานะเป็น Disable และสถานะ Drive Status ในส่วนแสดงสถานะการทำงานของเครื่องจะแสดง Disabled

### 3.12 การเก็บรวบรวมข้อมูลผลการทดสอบ

ข้อมูลที่น่าสนใจพร้อมวิเคราะห์ผล มีดังต่อไปนี้

- ผลการทดสอบหมุนมอเตอร์จริงแบบขั้นบันไดที่ความเร็วรอบ 40 – 120 rpm เปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
- ผลการตอบสนองกับสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ
- ผลทดสอบหมุนมอเตอร์จริงแบบขั้นบันไดต่อเนื่องที่ความเร็วรอบ 60 90 และ 120 rpm ที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ
- ผลการทดสอบความเร็วแบบขั้นบันไดของการหมุนมอเตอร์จริงแบบตัวควบคุมที่ความเร็ว 60 90 และ 120 rpm ที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ
- ผลการทดสอบเก็บข้อมูลที่ความเร็วการหมุนของมอเตอร์ที่ค่ากระแส 5, 10 15 A ของแต่ละความเร็วรอบที่ 60 90 และ 120 rpm
- แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ความเร็วรอบ 60 90 และ 120 rpm
- แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่อ่านได้จากขดลวดตัววัดที่ความเร็ว 60 90 120 rpm เมื่อจ่ายกระแสให้แม่เหล็กขนาด 5 10 และ 15 A ตามลำดับ
- ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่อ่านได้จากขดลวดตัววัดกับตำแหน่งเชิงมุมเทียบกับเวลา

## บทที่ 4

### อุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุน

ในบทนี้อธิบายถึงส่วนประกอบทางกล ส่วนประกอบที่ใช้ในการควบคุม แสดงผล และเก็บข้อมูล และ โครงสร้างของการพัฒนาโปรแกรมบนอุปกรณ์ที่ใช้ของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุน

#### 4.1 ส่วนประกอบทางกล

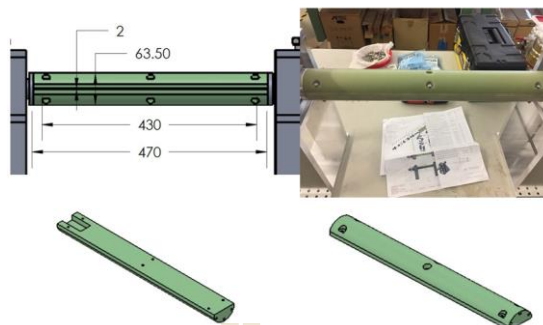
ประกอบด้วย โครงสร้างของตัวเครื่อง แท่นรองรับแกนหมุน และแท่นสำหรับติดตั้งมอเตอร์ ตัวเครื่องถูกติดตั้งโดยการยึดยึดที่ฐานเข้ากับตัวโต๊ะกันการสั่นสะเทือน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (รายละเอียดแสดงไว้ในภาคผนวก ก.)



รูปที่ 4.1 อุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุน

##### 4.1.1 แกนหมุน (Rotating rod)

ผลิตขึ้นจากวัสดุ G10 ซึ่งเป็นวัสดุไฟเบอร์กลาสอัดแรงชนิดหนึ่ง ที่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิ มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกนำมาถึงขึ้นรูปเป็นครึ่งวงกลมยาวจำนวน 2 ชิ้น แล้วนำมาประกบเข้าด้วยกันกับขดลวดตัววัด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 63.5 mm ยาว 470 mm มีน้ำหนัก 2 kg ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แกนหมุน (Rotating rod) สำหรับติดตั้งขดลวดตัววัด

#### 4.1.2 ขดลวดตัววัด (Measuring coil)

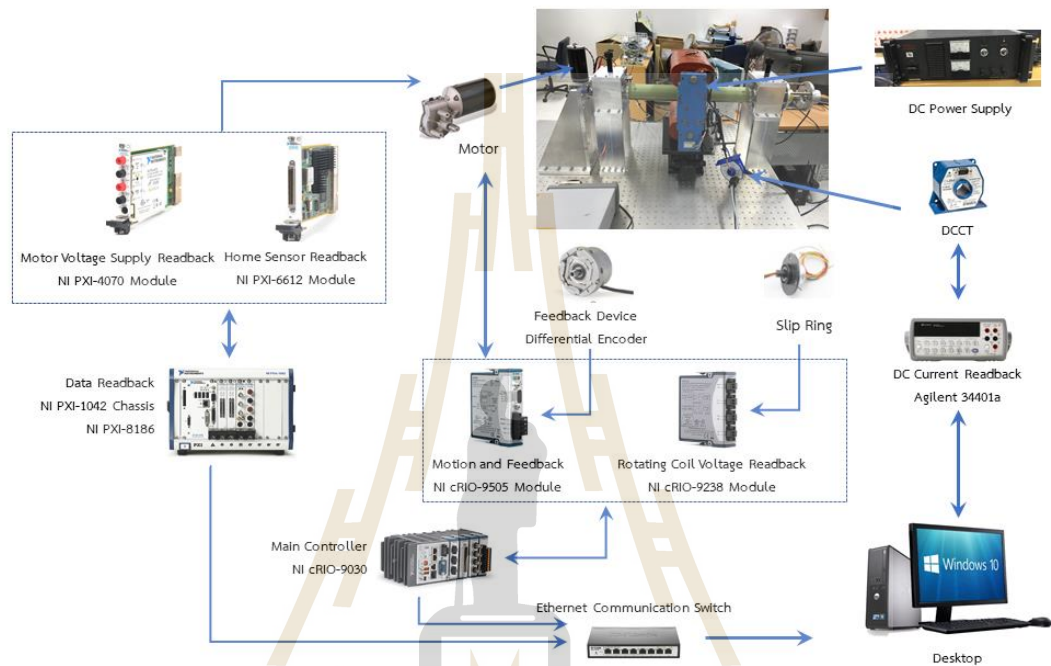
ทำหน้าที่จับสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากการหมุนขดลวดตัววัดตัดกับสนามแม่เหล็ก ทำมาจากแผ่นวงจรสำเร็จรูปที่มีการออกแบบไว้เฉพาะสำหรับแม่เหล็กไม่เก็นสี่ขั้ว (ขดลวดตัววัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้ถูกออกแบบโดยนักฟิสิกส์เครื่องเร่งอนุภาค) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 มีความยาว 430 mm กว้าง 53 mm ถูกติดตั้งประกบเข้ากับแกนหมุน ภายในประกอบด้วยขดลวด 2 ชุด ชุดแรกอยู่ด้านนอก เป็นขดลวดสำหรับจับสัญญาณการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าทั้งหมดที่สามารถอ่านค่าได้ เพื่อแปลงค่าเป็นสนามแม่เหล็กในรูปแบบของสัญญาณฮาร์โมนิกส์ เรียกว่า ขดลวดหลัก (Search coil) มีความกว้างระหว่างกึ่งกลางของชุดขดลวดแต่ละข้างเท่ากับ 38.5 mm ประกอบด้วยเส้นลวดจำนวน 10 เส้น พันเป็นวงรอบจำนวน 10 รอบมีความยาว 400 mm ชุดที่สองอยู่ด้านใน เป็นขดลวดสำหรับจับสัญญาณการเหนี่ยวนำแรงเคลื่อนไฟฟ้าเช่นเดียวกับขดลวดหลัก โดยจะเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อ่านค่าในทิศทางตรงกันข้ามกัน เพื่อเอาสัญญาณที่ได้มาหักล้างกับสัญญาณจากขดลวดหลักที่ต้องการวัดออก เรียกว่า ขดลวดชดเชย (Bucking coil) มีความกว้างระหว่างกึ่งกลางชุดขดลวดแต่ละข้างเท่ากับ 26.74 mm ประกอบด้วยเส้นลวดจำนวน 12 เส้น พันเป็นวงรอบจำนวน 12 รอบมีความยาว 385 mm เมื่อหักล้างสัญญาณที่อ่านจากขดลวดชดเชยออกจะเหลือเฉพาะสัญญาณของสนามแม่เหล็กที่ปะปนอยู่อย่างเดียวนั่น ในงานวิจัยนี้ใช้เพียงขดลวดหลักเท่านั้น เนื่องจากแม่เหล็กแบบสองขั้วไม่มีสัญญาณที่ต้องหักล้างออก



รูปที่ 4.3 ขดลวดตัววัด (Measuring coil)

## 4.2 ส่วนประกอบที่ใช้ในการควบคุม แสดงผล และเก็บข้อมูล

อุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุน มีส่วนประกอบที่ใช้ในการควบคุม แสดงผล และเก็บข้อมูล อยู่ด้วยกันหลายอุปกรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 มีข้อมูลจำเพาะ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุม แสดงผล และเก็บข้อมูล

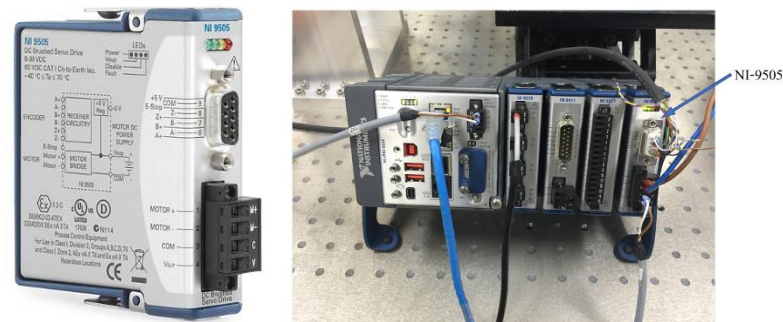
4.2.1 อุปกรณ์ควบคุมแบบ NI-CompactRIO รุ่น NI cRIO-9030 เป็นอุปกรณ์ควบคุมชนิดฝังตัว (Embedded controller) ของ National Instruments ดังแสดงในรูปที่ 4.5 เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเขียน โปรแกรมใส่เข้าไปในหน่วยความจำภายในให้เครื่องทำงานเองได้ ใช้ควบคุมการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และอ่านค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้จากการหมุนของขดลวดตัววัด มีข้อมูลจำเพาะดังนี้



รูปที่ 4.5 อุปกรณ์ควบคุมแบบ NI-CompactRIO รุ่น NI cRIO-9030

- อุปกรณ์ควบคุมแบบ Embedded CompactRIO controller with Real-Time processor and reconfigurable FPGA
- FPGA ชนิด Reconfigurable FPGA แบบ Xilinx Kintex-7 7K70T
- หน่วยประมวลผลกลาง Intel Atom E3825 (1.33 GHz)
- หน่วยความจำหลัก (RAM) แบบ DDR3L ขนาด 1 GB
- หน่วยเก็บข้อมูลแบบ Solid-state drive ขนาด 4 GB และสามารถใส่อุปกรณ์เก็บข้อมูลภายนอกชนิด SD-card ได้สูงสุด 32 GB
- ระบบปฏิบัติการ NI Linux Real-Time แบบ 64 bit
- ซอฟต์แวร์ LabVIEW Real-Time module และ LabVIEW FPGA module
- พอร์ตเชื่อมต่อเครือข่าย (Ethernet Port) ความเร็ว 1 Gb/s จำนวน 2 พอร์ต
- พอร์ตเชื่อมต่อ Serial connection แบบ RS-232/422/485 จำนวน 1 พอร์ต
- ช่องสำหรับใส่โมดูลอินพุต เอาท์พุต จำนวน 4 ช่อง
- แรงดันไฟฟ้าขาเข้าแบบกระแสตรงขนาด 9 - 30 V

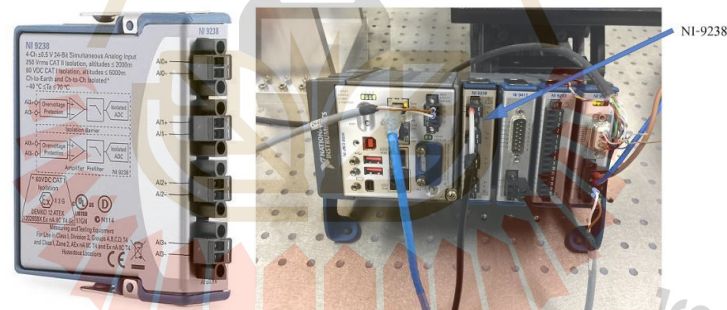
4.2.2 โมดูลควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor drive module) รุ่น NI cRIO-9505 ของ National Instruments ดังแสดงในรูปที่ 4.6 เป็น โมดูลสำหรับควบคุมมอเตอร์กระแสตรงขนาด 8-24 V 12 A ด้วยสัญญาณ PWM ความถี่ 20 kHz สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์อ่านค่าตำแหน่ง (Encoder) แบบ Single-End โดยสัญญาณเป็นชนิด TTL ขนาด 5 V ผ่าน DB9 Pin Connector



รูปที่ 4.6 โมดูลควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor drive module)

รุ่น NI cRIO-9505 ของ National Instruments

4.2.3 โมดูลรับค่าแรงดันไฟฟ้าย่านต่ำ (Low Voltage input module) รุ่น NI cRIO-9238 ของ National Instruments ดังแสดงในรูปที่ 4.7 เป็นโมดูลสำหรับอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าในย่านต่ำ ขนาด  $\pm 500$  mV ความถี่ในการอ่านข้อมูล (Data rate) 50 kHz เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ตรวจรับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าผ่านหัวต่อสายไฟแบบสกรู (Screw terminal) ด้วยสาย BNC Low-Loss



รูปที่ 4.7 โมดูลรับค่าแรงดันไฟฟ้าย่านต่ำ (Low voltage input module)

รุ่น NI cRIO-9238 ของ National Instruments

4.2.4 อุปกรณ์อ่านค่าตำแหน่งเชิงมุม (Rotating Encoder) รุ่น ERN420 ของ Heidenhain ดังแสดงในรูปที่ 4.8 เป็นอุปกรณ์อ่านค่าตำแหน่งเชิงมุมชนิด Incremental Rotating Encoder มีรูปแบบสัญญาณแบบ TTL ความละเอียดในการอ่านค่าที่ 9000 count/revolution ใช้กับแรงดันไฟฟ้าขาเข้าแบบกระแสตรงขนาด 5 V อ่านค่าด้วยความถี่สูงสุดที่ 300 kHz ติดตั้งแบบกลวงเพลลาผ่านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm โดยติดตั้งเข้ากับปลายเพลลาขับของขดลวดตัววัด และเชื่อมต่อกับโมดูล NI cRIO-9505 ด้วยสายสัญญาณแบบ Shielding multicore





รูปที่ 4.8 อุปกรณ์อ่านค่าตำแหน่งเชิงมุม (Rotating Encoder) รุ่น ERN-420 ของ Heidenhain

4.2.5 อุปกรณ์สลีป-ริง (Slip-Ring) รุ่น MT0120-002 ของ Moflon ดังแสดงในรูปที่ 4.9 เป็นอุปกรณ์ส่งผ่านสัญญาณทางไฟฟ้าระหว่างอุปกรณ์ที่มีการหมุนไม่เท่ากัน รองรับแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 440 V มีจำนวนวงแหวนสำหรับส่งผ่านสัญญาณ 2 วง ติดตั้งแบบกลวงเพลลาผ่านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12 mm โดยติดตั้งเข้ากับปลายเพลลาขับของขดลวดตัววัด และเชื่อมต่อกับโมดูล NI-9238 ด้วยสายสัญญาณแบบ BNC Low-loss



รูปที่ 4.9 อุปกรณ์สลีป-ริง (Slip-Ring) รุ่น MT0120-002 ของ Moflon

4.2.6 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC motor) รุ่น 65JW15G/63ZY125-2430 ผลิตในประเทศจีน ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ใช้สำหรับขับเพลลาหมุนขดลวดตัววัด เป็นมอเตอร์แบบ Permanent DC worm gear motor มอเตอร์มีพิกัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 24 V ความเร็วรอบ

สูงสุดที่ 3000 rpm ผ่านชุดเกียร์ทดขนาด 1:15 ทำให้หลังผ่านชุดเกียร์ มีความเร็วรอบขณะไม่ขับ โหลดสูงสุดที่ 200 rpm และมีความเร็วพิกัดอยู่ที่ 175 rpm มีพิกัดแรงบิด (Rated torque) ขนาด 3 N.m ตัวมอเตอร์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 63 mm หน้าแปลนหลังชุดเกียร์มีขนาด 66 mm มีแกนหมุน มอเตอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 mm ยาว 15 mm มีน้ำหนักรวม 1 kg ติดตั้งเข้ากับแท่นรองรับ มอเตอร์และเชื่อมต่อกับเฟลาขับขดลวดตัววัดผ่านขอย (Coupling) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10/10 mm



รูปที่ 4.10 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC motor)

4.2.7 Digital Multimeter รุ่น 34401a ของ Agilent Technologies ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ใช้สำหรับอ่านค่ากระแสที่จ่ายให้กับแม่เหล็ก โดยเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้าผ่านสายสัญญาณแบบ BNC



รูปที่ 4.11 อุปกรณ์ Digital Multimeter รุ่น 34401a ของ Agilent Technologies

4.2.8 อุปกรณ์ตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้า (Direct-Current Current Transformer : DCCT) รุ่น IT65-S Ultrastab ของ LEM ดังแสดงในรูปที่ 4.12 เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ประกอบการวัดกระแสไฟฟ้าโดยต่อร่วมกับเครื่อง Digital Multimeter เพื่อวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับแม่เหล็ก มีช่วงการวัดกระแสไฟฟ้าแบบกระแสตรงที่  $\pm 60$  A ค่าความต้านทานภายในเท่ากับ  $50 \Omega$  พิกัดแรงดันเท่ากับ  $\pm 15$  V อัตราขยายของการอ่านค่ากระแสเท่ากับ 1:600 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องเปิดสำหรับสายไฟผ่านเท่ากับ 25 mm เชื่อมต่อกับเครื่อง Digital Multimeter ผ่านพอร์ต DB-9pin ด้วยสายสัญญาณแบบ BNC



รูปที่ 4.12 อุปกรณ์ตรวจวัดค่ากระแสไฟฟ้า (Direct-Current Current Transformer : DCCT) รุ่น IT65-S Ultrastab ของ LEM

4.2.9 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (Regulated DC Power supply) รุ่น GP060-60 ของ Tagasago ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ใช้สำหรับจ่ายกระแสให้กับแม่เหล็ก มีช่วงแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0 - 60 V ช่วงกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 0 - 20 A แรงดันไฟฟ้าขาเข้าแบบ 1 เฟส 200 VAC  $\pm 10$  % ที่ความถี่ 50/60 Hz มีเสถียรการจ่ายกระแสที่เท่ากับ  $\pm 0.05$  % อุณหภูมิแวดล้อมในการใช้งาน 0 - 40 °C ระบายความร้อนด้วยพัดลม ตัวเครื่องมีขนาด 425x449x480 mm มีน้ำหนัก 31 kg เชื่อมต่อกับแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสองขั้วผ่านขั้วต่อสายไฟแบบสกรู (Screw terminal) ด้วยสายไฟแบบ multicore ขนาด 3x2.0 mm



รูปที่ 4.13 แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรง (Regulated DC Power supply)  
รุ่น GP060-60 ของ Tagasago

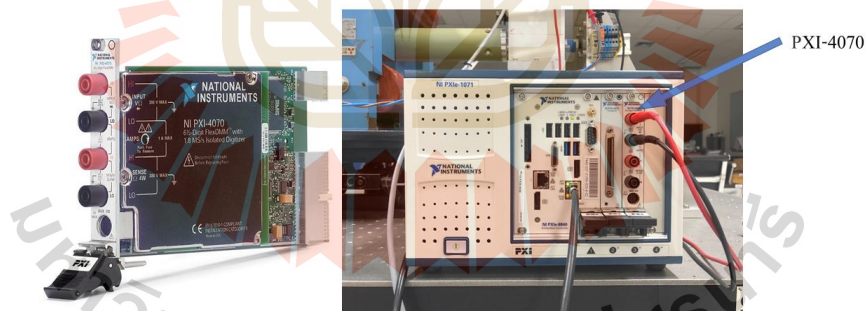
4.2.10 อุปกรณ์ควบคุมแบบ NI-PXIe รุ่น PXIe-8840 พร้อมกับ NI PXIe-1071 Power supply with 4 chassis ของ National Instruments ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ใช้สำหรับอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ และอ่านค่าเซ็นเซอร์ตรวจจับตำแหน่งเริ่มต้นของขดลวดตัววัด โดยพัฒนาโปรแกรมสำหรับอ่านค่า และส่งค่าไปยังอุปกรณ์ภายนอกด้วย โปรแกรม LabVIEW มีคุณลักษณะจำเพาะดังนี้

- หน่วยประมวลผลกลาง Intel® Core™ i5 4400E (2.7 GHz dual-core processor)
- หน่วยความจำหลัก (RAM) 8GB DDR3L FSB 1600 MHz Single-Channel
- หน่วยเก็บข้อมูล Solid-state drive 480 GB
- พอร์ตเชื่อมต่อเครือข่าย (Ethernet port) 1 Gb/s จำนวน 2 พอร์ต
- ระบบปฏิบัติการ Windows 7 Professional 64 bit
- โปรแกรม LabVIEW Professional เวอร์ชัน 2017
- NI PXIe-7071 Power supply with 4 chassis
- แรงดันไฟฟ้าขาเข้าแบบ 1 เฟส 220 V 50 Hz



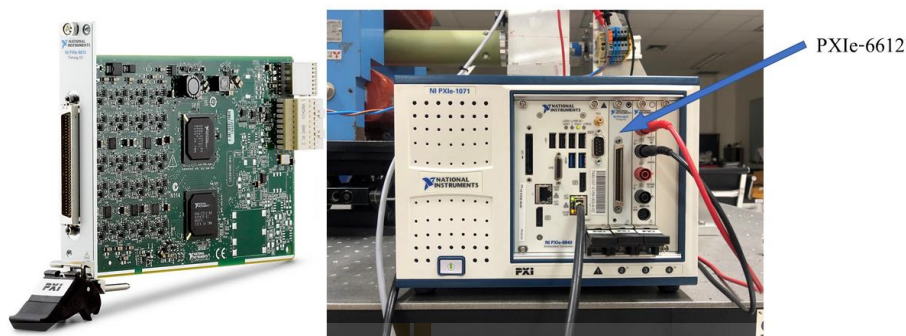
รูปที่ 4.14 อุปกรณ์ NI-PXIe-8840 Embedded Controller พร้อมกับ NI PXIe-1071  
Power supply with 4 chassis ของ National Instruments

4.2.11 โมดูล Digital multimeter รุ่น NI PXI-4070 ของ National Instruments ดังแสดงในรูปที่ 15 ใช้สำหรับอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์กระแสตรง โดยใช้ร่วมกับ PXIe-8840 และตรวจจับแรงดันไฟฟ้าด้วยหัววัดซึ่งเชื่อมต่อกับขั้วต่อสายไฟแบบสกรู (Screw Terminal) ของมอเตอร์



รูปที่ 4.15 โมดูล Digital multimeter รุ่น NI PXI-4070 ของ National Instruments

4.2.12 โมดูล Counter/Time รุ่น NI-PXIe-6612 ของ National Instruments ดังแสดงในรูปที่ 16 ใช้สำหรับรับสัญญาณจากเซ็นเซอร์ตรวจหาตำแหน่งเริ่มต้นของขดลวดตัววัด โดยใช้ร่วมกับ PXIe-8840 เชื่อมต่อกับเซ็นเซอร์ด้วยสายไฟแบบ multicore 2x0.34 mm ผ่าน NI TB-2716 Terminal Block



รูปที่ 4.16 โมดูล Counter/Time รุ่น NI-PXIe-6612 ของ National Instruments

4.2.13 อุปกรณ์กระจายสัญญาณเครือข่าย (Network Switch) รุ่น 3C1670800C ของ 3COM ดังแสดงในรูปที่ 17 ใช้สำหรับเชื่อมต่ออุปกรณ์ควบคุมกับเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านระบบเครือข่าย (Network system) ด้วยสาย LAN ซึ่งการเชื่อมต่อด้วยวิธีนี้จะทำให้การส่งผ่านข้อมูลระหว่างอุปกรณ์กับเครื่องคอมพิวเตอร์มีความรวดเร็วมาก เมื่อเทียบกับการเชื่อมต่ออุปกรณ์กับเครื่องคอมพิวเตอร์แบบอนุกรม (Serial Communication) อุปกรณ์มีพอร์ต RJ45 จำนวน 8 พอร์ต แบบ Gigabit switch อุณหภูมิแวดล้อมในการใช้งาน 0-40 °C ใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงจากภายนอกขนาด 12 V 1 A ผ่านตัวแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC Adapter) จาก 100-240 V 50/60Hz มีขนาดความกว้าง 22.5 mm ยาว 142 mm สูง 22.5 mm



รูปที่ 4.17 อุปกรณ์กระจายสัญญาณ (Network Switch) รุ่น 3C1670800C ของ 3COM

4.2.14 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวิทชิง ( Switching DC power supply) รุ่น NI PS-15 ของ National Instruments ดังแสดงในรูปที่ 18 ใช้สำหรับจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับอุปกรณ์ควบคุม NI cRIO-9030 และ โมดูล NI-9505 สำหรับควบคุมการหมุนของมอเตอร์

แรงดันไฟฟ้าขาเข้ากระแสสลับ 1 เฟส 100-200 V 50/60 Hz แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขาออก 24 V 5 A ติดตั้งบนรางติดอุปกรณ์



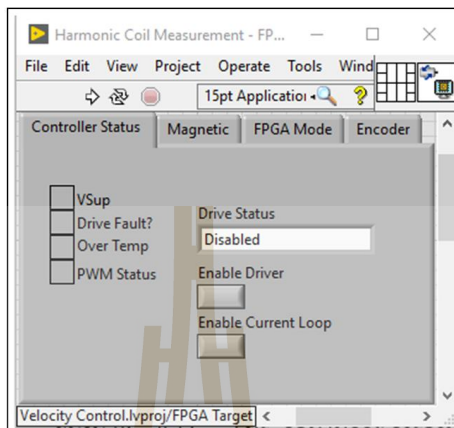
รูปที่ 4.18 แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแบบสวิทชิง ( Switching DC power supply)  
รุ่น NI PS-15 ของ National Instruments

### 4.3 แนวทางการโปรแกรมบนอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาโปรแกรมสำหรับควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แสดงผลข้อมูลที่อ่านได้ในรูปของตัวเลขและกราฟ รวมถึงการเก็บข้อมูลลงคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม LabVIEW โดยแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน

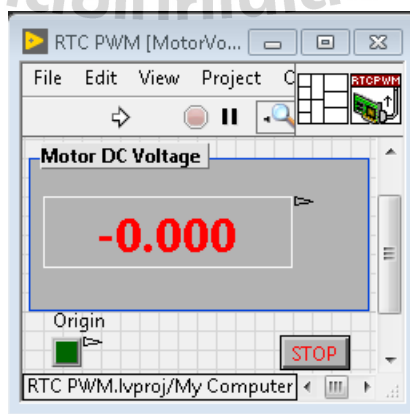
4.3.1 โปรแกรมทำงานบน อุปกรณ์ควบคุม NI CompactRIO เป็น โปรแกรมควบคุมความเร็วการหมุนของมอเตอร์ และอ่านค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่มาจากขดลวดตัววัด ถูกพัฒนาเพื่อให้ทำงานบน FPGA Embedded Controller ในอุปกรณ์ควบคุม NI CompactRIO-9030 ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ซึ่งสามารถทำงานได้ด้วยตัวเองผ่านโปรแกรม LabVIEW FPGA มีความถี่ในการอ่านข้อมูล (Data rate) ที่ 40 MHz ทำให้ทำงานได้เร็วกว่าบนเครื่องคอมพิวเตอร์ โปรแกรมทำงานด้วยรูปแบบลูปขนาน (Parallel Loop) ประกอบไปด้วย การอ่านค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า, การอ่านค่าสถานะของโมดูลควบคุมการหมุนของมอเตอร์, การอ่านค่าตำแหน่งเชิงมุมจากอุปกรณ์อ่านค่าตำแหน่ง (Rotating encoder) , การควบคุมแบบพีไอ และการส่งค่า PWM ไปยังมอเตอร์ โดยแต่ละลูปทำงานอย่างอิสระอิสระ ส่งผ่านข้อมูลระหว่างลูปด้วยการใช้ Local variable ซึ่งเป็นการสร้างตัวแปรเสมือนขึ้นมา จะเปลี่ยนแปลงเหมือนกับตัวแปรจริงทุกประการ รับ-ส่งข้อมูลกับอุปกรณ์ภายนอก

ด้วย VI-Reference ซึ่งเป็นเครื่องมือในการรับ-ส่งข้อมูลของอุปกรณ์ National Instrument (รายละเอียดของโปรแกรมแสดงในภาคผนวก ข)



รูปที่ 4.19 โปรแกรมทำงานบนอุปกรณ์ควบคุม NI CompactRIO

4.3.2 โปรแกรมทำงานบน NI PXIe เป็นโปรแกรมอ่านค่าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่จ่ายให้มอเตอร์ และอ่านค่าจากเซ็นเซอร์ตรวจหาตำแหน่งเริ่มต้น ถูกพัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม LabVIEW บนอุปกรณ์ควบคุมแบบ PXIe โดยมีความถี่ในการอ่านข้อมูลอยู่ที่ 200 Hz ดังแสดงในรูปที่ 4.20 การติดต่อกับอุปกรณ์อินพุตเอาต์พุตภายนอกของ National Instruments ต้องผ่าน NI Device driver เพื่อให้อุปกรณ์สามารถทำงานร่วมกับโปรแกรม LabVIEW ได้ ซึ่งโปรแกรมนี้อาจใช้ NI Device driver ดังนี้ 1. การอ่านค่าแรงดันกระแสตรงที่จ่ายให้กับมอเตอร์จะผ่าน LabVIEW DMM 2017 และ 2. การอ่านค่าจากเซ็นเซอร์ตรวจหาตำแหน่งเริ่มต้นจะใช้ NI-DAQmx 2017 และรับ-ส่งข้อมูลกับอุปกรณ์ภายนอกด้วย NI Shared variable engine ซึ่งเป็นเครื่องมือในการรับ-ส่งข้อมูลของอุปกรณ์ National Instrument (รายละเอียดของโปรแกรมแสดงในภาคผนวก ข)

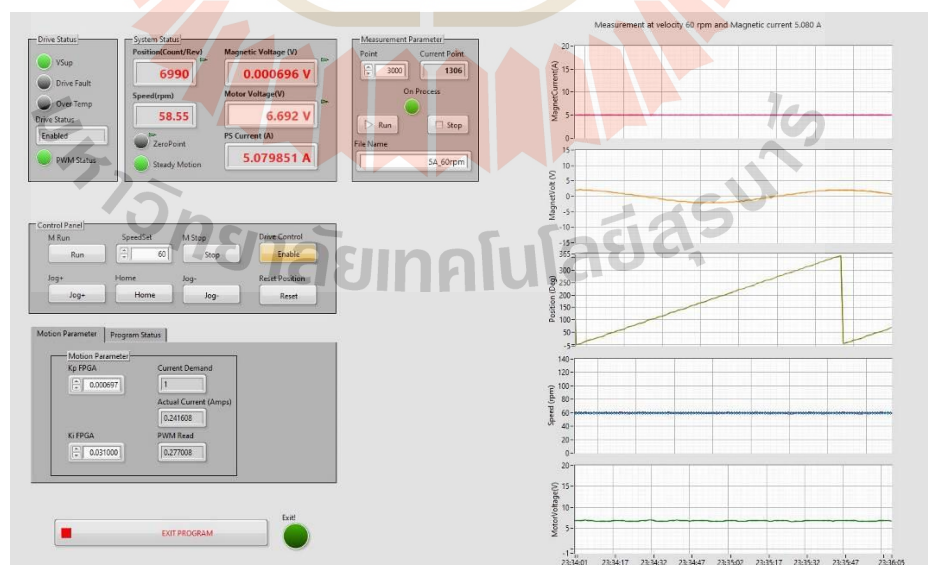




### รูปที่ 4.20 โปรแกรมทำงานบนอุปกรณ์ควบคุม NI PXIe

4.3.3 โปรแกรมทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็น โปรแกรมควบคุมการทำงาน แสดงผล และเก็บข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งเป็น โปรแกรมหลักสำหรับอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กแบบขดลวดหมุน ทำหน้าที่ติดต่อกับผู้ใช้งาน (User Interface) ซึ่งสามารถตั้งการทำงาน อ่านค่าอุปกรณ์ควบคุม NI CompactRIO และ NI PXIe ได้ โปรแกรมทำงานด้วยรูปแบบลูปขนาน ประกอบด้วย 5 ลูป มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- อ่านค่าสถานะจากอุปกรณ์ NI CompactRIO โดยทำงานที่ความเร็ว 125 Hz
- ตั้งงานอุปกรณ์ NI CompactRIO เพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์ โดยทำงานที่ความเร็ว 100 Hz
- แสดงผลตัวเลขและกราฟ, อ่านค่าจาก NI Shared variable engine จากอุปกรณ์ NI PXIe โดยทำงานที่ความเร็ว 100 Hz
- อ่านข้อมูลจาก Digital Multimeter 34401a ของ Agilent Technologies โดยทำงานที่ความเร็ว 10 Hz
- เก็บข้อมูลและบันทึกลงไฟล์ โดยทำงานที่ความเร็ว 100 Hz โดยโปรแกรมจะรับส่งข้อมูลระหว่างลูปด้วย Local variable (รายละเอียดของโปรแกรมแสดงในภาคผนวก ข)



รูปที่ 4.21 โปรแกรมบนเครื่องคอมพิวเตอร์



## บทที่ 5

### ผลการวิจัย

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดสอบควบคุมความเร็วการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สำหรับอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีชดเชยความถี่ ประกอบด้วยผลการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผลการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ โดยทดสอบที่ความเร็วรอบการหมุน 60 90 และ 120 rpm รวมถึงผลการเก็บข้อมูล และการวิเคราะห์ข้อมูลแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่อ่านได้จากชดเชยตัววัด

#### 5.1 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

##### 5.1.1 การระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ในสมการที่ 2.13 และการวัดค่าจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้ค่า  $R_a = 4.700 \Omega$  ใช้วิธี Parameter Estimation ด้วยโปรแกรม MATLAB-Simulink เพื่อหาค่าตัวแปรที่เหลือ ดังแผนภาพที่ 3.9 ได้ค่าดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าตัวแปรของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากวิธี Parameter Estimation

ค่าตัวแปร	ค่าที่ได้
$L_a$	0.0245 H
$J_a$	0.3981 kg-m <sup>2</sup>
$K_t$	41.0441 N-m/A
$K_b$	0.0647 V/rad/s
$b$	0.4056 N-m/rad/s

##### 5.1.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

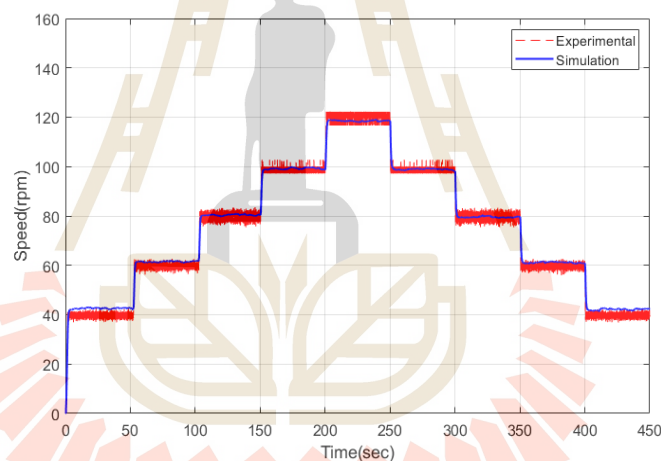
จากตารางที่ 5.1 นำไปแทนค่าลงในฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แสดงดังสมการที่ 2.13 ในบทที่ 2 ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังสมการที่ 5.1

$$G(s) = \frac{41.04}{0.009753s^2 + 1.881s + 4.562} \quad (5.1)$$

เมื่อ

$G(s)$  = ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

นำผลจากการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบหมุนมอเตอร์จริงแบบขั้นบันไดในช่วงความเร็วรอบที่ 40 – 120 rpm จะพบว่าค่าความผิดพลาดระหว่างผลการทดสอบจริงกับค่าที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อยู่ที่ 2.27 % ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้กำหนดไว้ที่ 3 % แสดงว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากวิธี Parameter Estimation นี้สามารถนำไปใช้แทนระบบในงานวิจัยครั้งนี้ได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ผลการทดสอบหมุนมอเตอร์จริงแบบขั้นบันไดที่ความเร็วรอบ 40 – 120 rpm  
เปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

## 5.2 การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ

นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้มาหาตัวควบคุมแบบพีไอ โดยมีข้อกำหนดการออกแบบระบบควบคุม ดังต่อไปนี้

- ค่าการพุ่งเกิน ไม่เกิน 5 %
- ช่วงเวลาขาขึ้น ไม่เกิน 2 sec
- เวลาเข้าสู่สถานะคงตัว ไม่เกิน 5 sec
- ค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัว ไม่เกิน 2 %

ในงายวิจัยนี้หาค่าตัวควบคุมแบบพีไอด้วยวิธี Response Optimization โดยโปรแกรม MATLAB-Simulink ได้ค่าอัตราขยาย  $K_p$  และ  $K_i$  ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ตัวควบคุมแบบพีไอจากวิธี Response Optimization โดยโปรแกรม MATLAB-Simulink

ค่าตัวแปร	$K_p$	$K_i$
อัตราขยายของตัวควบคุม	0.1001	0.3724

นำค่าตัวแปรที่ได้จากตารางที่ 5.2 แทนค่าลงในสมการที่ 2.16 จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงเปิดของตัวควบคุมแบบพีไอ ดังแสดงในสมการที่ 5.2

$$C(s) = 0.1001 + \frac{0.3724}{s} \quad (5.2)$$

จากสมการที่ 5.1 และ 5.2 จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงเปิดที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ ดังสมการที่ 5.3

$$C(s)G(s) = \left( \frac{0.1001s + 0.3724}{s} \right) \left( \frac{41.04}{0.009753s^2 + 1.881s + 4.562} \right) \quad (5.3)$$

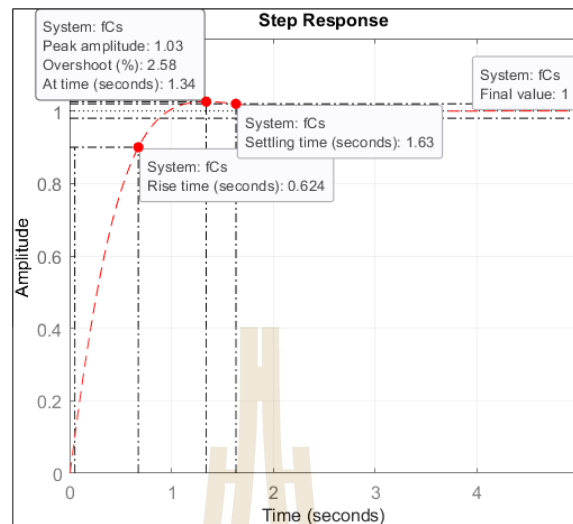
จากสมการที่ 5.3 จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงปิดของระบบควบคุมความเร็วการหมุนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับอุปกรณ์วัดค่าสนามแม่เหล็กด้วยวิธีลดความถี่ที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ ดังสมการที่ 5.4

$$FG(s) = \frac{4.107s + 15.28}{0.009753s^3 + 1.881s^2 + 8.669s + 15.28} \quad (5.4)$$

เมื่อ

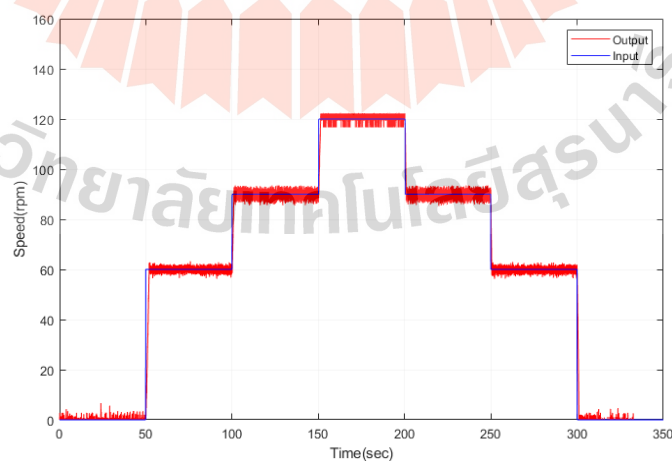
$$FG(s) = \text{ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดแบบมีตัวควบคุมแบบพีไอของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง}$$

แล้วนำเอาระบบที่ได้ไปทดสอบด้วยสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วย แสดงดังรูปที่ 5.2

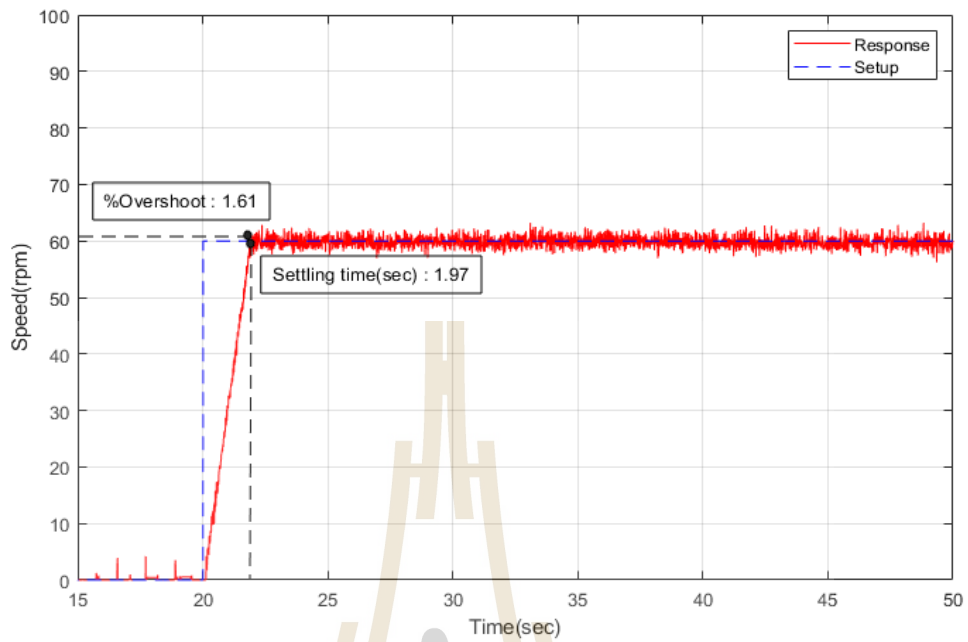


รูปที่ 5.2 ผลการตอบสนองกับสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วยของ  
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ

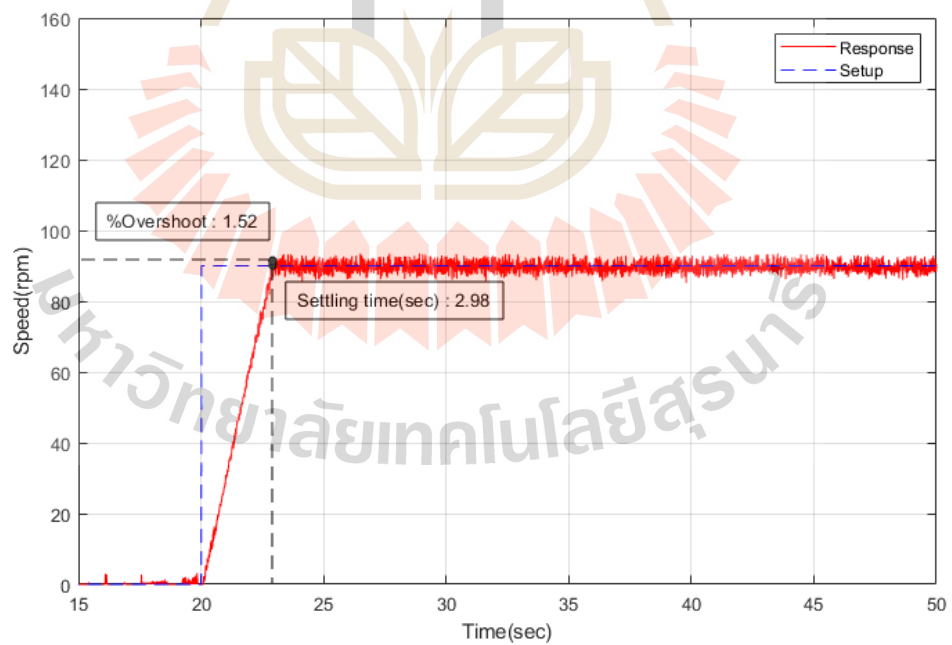
ผลการทดสอบตัวควบคุมแบบพีไอด้วยสัญญาณอินพุตแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วย จะได้ค่าการพุ่งเกินเท่ากับ 2.58 % ค่าช่วงเวลาที่ขึ้นเท่ากับ 0.64 sec ค่าเวลาเข้าสู่สถานะคงตัวเท่ากับ 1.63 sec และมีค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวเท่ากับ 1.4 % ดังแสดงในรูปที่ 5.2 ซึ่งเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ และนำไปทดสอบกับความเร็วรอบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ 60 90 และ 120 rpm ด้วยการทดสอบหมุนมอเตอร์จริง ได้ผลตอบสนองแสดงดังรูปที่ 5.3 – 5.6



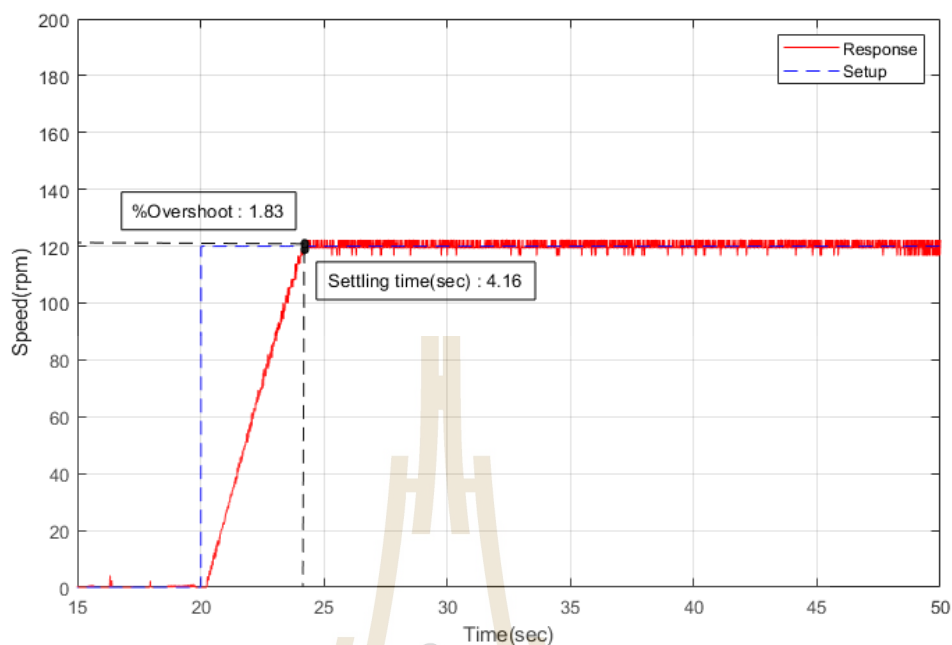
รูปที่ 5.3 ผลทดสอบหมุนมอเตอร์จริงแบบขั้นบันไดต่อเนื่อง  
ที่ความเร็วรอบ 60 90 และ 120 rpm ที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ



รูปที่ 5.4 ผลการทดสอบหมุนมอเตอร์จริงแบบขั้นบันไดที่ความเร็วรอบ 60 rpm  
ที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ



รูปที่ 5.5 ผลการทดสอบหมุนมอเตอร์จริงแบบขั้นบันไดที่ความเร็วรอบ 90 rpm  
ที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ



รูปที่ 5.6 ผลการทดสอบหมุนมอเตอร์จริงแบบขั้นบันไดที่ความเร็วรอบ 120 rpm ที่มีตัวควบคุมแบบพีไอ

ผลทดสอบการตอบสนองของการหมุนมอเตอร์จริงด้วยระบบที่มีตัวควบคุมแบบพีไอที่ได้จากการออกแบบ ค่าการพุ่งเกิน, ค่าช่วงเวลาขาขึ้น, ค่าช่วงเวลาเข้าสู่สถานะอยู่ตัว และค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว แสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ค่าผลตอบสนองที่ได้จากการทดสอบแบบต่าง ๆ

ผลตอบสนอง	ทดสอบ	เงื่อนไขที่	ขั้นบันได	ความเร็ว	ความเร็ว	ความเร็ว
		กำหนด	หนึ่งหน่วย	60 rpm	90 rpm	120 rpm
การพุ่งเกิน	(%)	5	2.58	1.61	1.52	1.83
ช่วงเวลาขาขึ้น	sec	2	0.64	1.84	2.48	3.58
ช่วงเวลาเข้าสู่สถานะอยู่ตัว	sec	5	1.63	1.97	2.98	4.16
ความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว	%	2	1.4	0.99	1.48	1.31

จากตารางที่ 5.3 พบว่าผลตอบสนองของระบบมีดังต่อไปนี้ ค่าการพุ่งเกินที่ความเร็วการหมุนทั้ง 3 ความเร็วรอบมีค่าอยู่ในช่วงที่ออกแบบ ช่วงเวลาขาขึ้นที่ความเร็วการหมุนที่ 90 และ 120 rpm เกินค่าที่กำหนดเล็กน้อย ช่วงเวลาเข้าสู่สถานะอยู่ตัวของความเร็วรอบทั้ง 3 ค่าอยู่ในช่วงที่กำหนด ค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัว ซึ่งเป็นผลตอบสนองที่สำคัญในงานวิจัยนี้ เพราะการวัดค่า



สนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนต้องการความเร็วการหมุนของขดลวดตัววัดคงที่ เนื่องจากความเร็วรอบมีผลโดยตรงกับค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขดลวดตัววัดอ่านค่าได้ ยิ่งความเร็วรอบมีค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวน้อย ความแม่นยำในการวัดยิ่งมากขึ้น จากผลการตอบสนองที่ได้จากการทดสอบจะพบว่าที่ความเร็วรอบ 60 rpm ได้ค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวน้อยที่สุด และที่ความเร็วรอบที่ 90 rpm ได้ค่ามากที่สุด แต่ไม่เกินค่าตามเงื่อนไขที่กำหนดทั้ง 3 ความเร็วรอบ

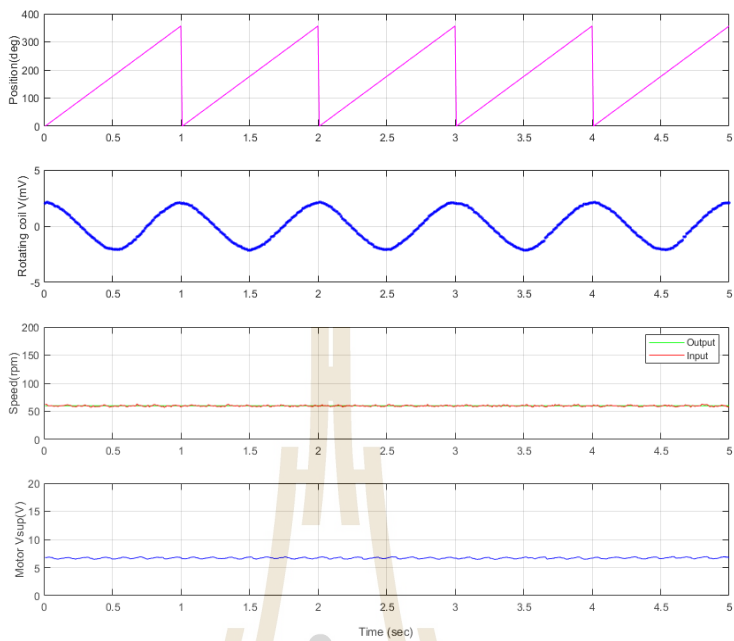
จากการทดสอบการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ขับหมุนแกนขดลวดตัววัดของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนจะได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากวิธีการประมาณค่าตัวแปรสามารถใช้แทนระบบได้เป็นอย่างดี และเมื่อนำออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอพบว่าจากผลตอบสนองของระบบที่ได้สามารถควบคุมความเร็วการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงให้อยู่ในเงื่อนไขของงานวิจัยได้อย่างมีประสิทธิภาพ และพบว่าความเร็วรอบที่เหมาะสมคือ 60 rpm

### 5.3 ผลการทดสอบเก็บข้อมูล

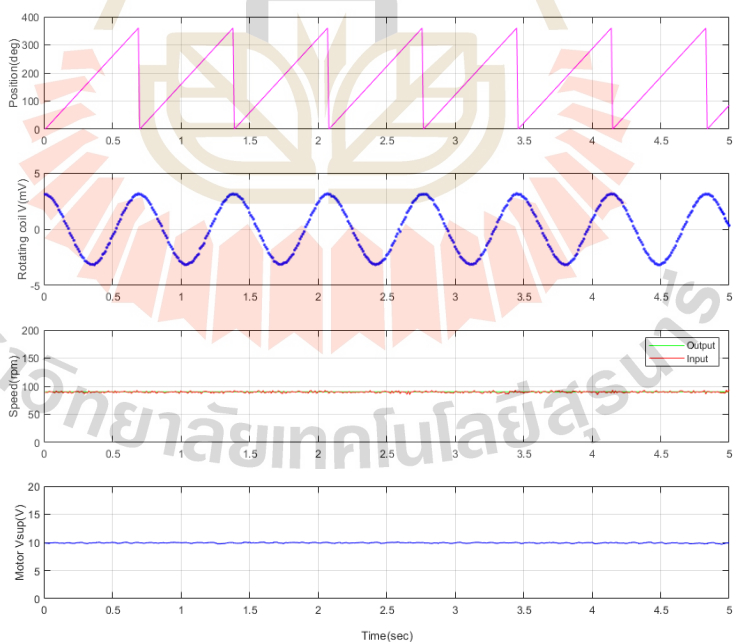
ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบเก็บข้อมูลดังต่อไปนี้

- แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากขดลวดตัววัด
- ตำแหน่งเชิงมุมที่เกิดจากการหมุนขดลวดตัววัด
- ความเร็วในการหมุนขดลวดตัววัด
- ค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์

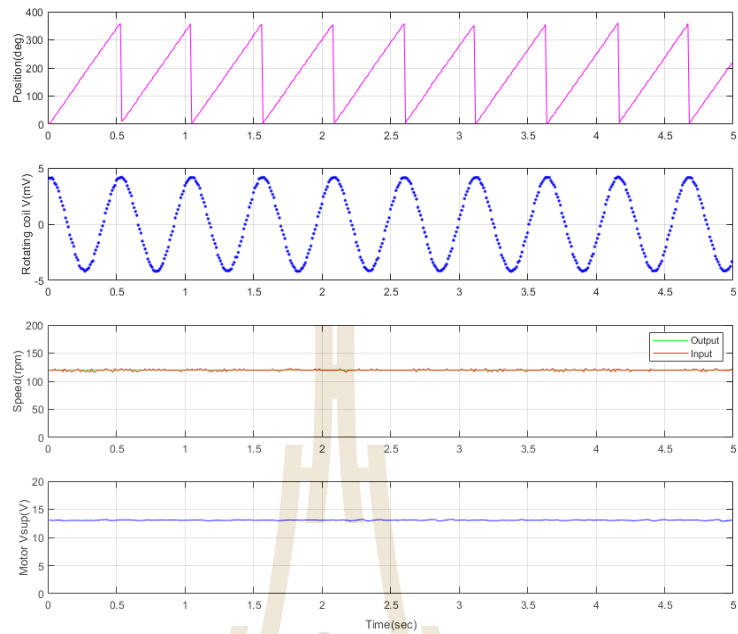
ข้อมูลที่ได้มาจากการการหมุนขดลวดตัววัดที่ความเร็วรอบการหมุน 60 90 และ 120 rpm โดยในแต่ละความเร็วรอบมีการปรับค่ากระแสที่จ่ายให้กับแม่เหล็กที่ 5 10 และ 15 A ตามลำดับ ใช้อุปกรณ์ NI CompactRIO อ่านค่าจากอุปกรณ์วัด และพัฒนาโปรแกรม LabVIEW สำหรับเก็บข้อมูลบนเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลได้ 100 ค่าต่อวินาที ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.7– 5.1



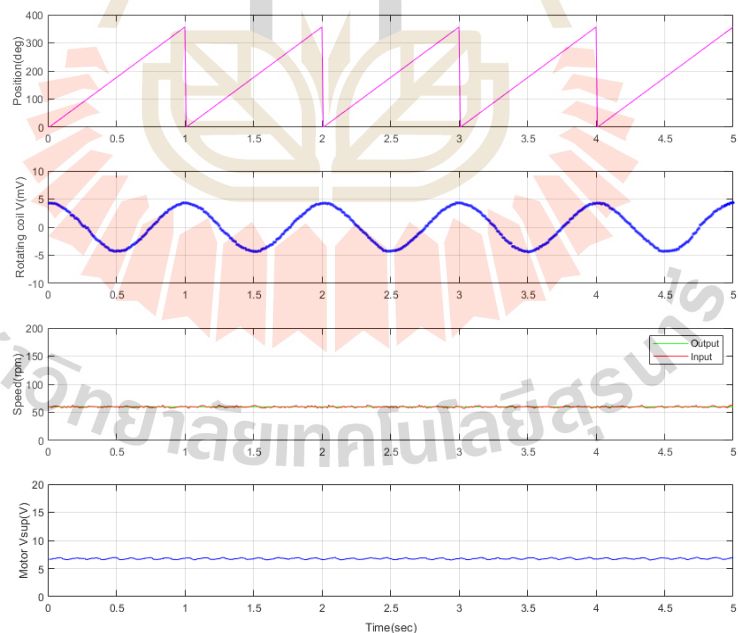
รูปที่ 5.7 ผลการทดสอบเก็บข้อมูลที่ความเร็วการหมุน 60 rpm  
และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แม่เหล็กขนาด 5 A



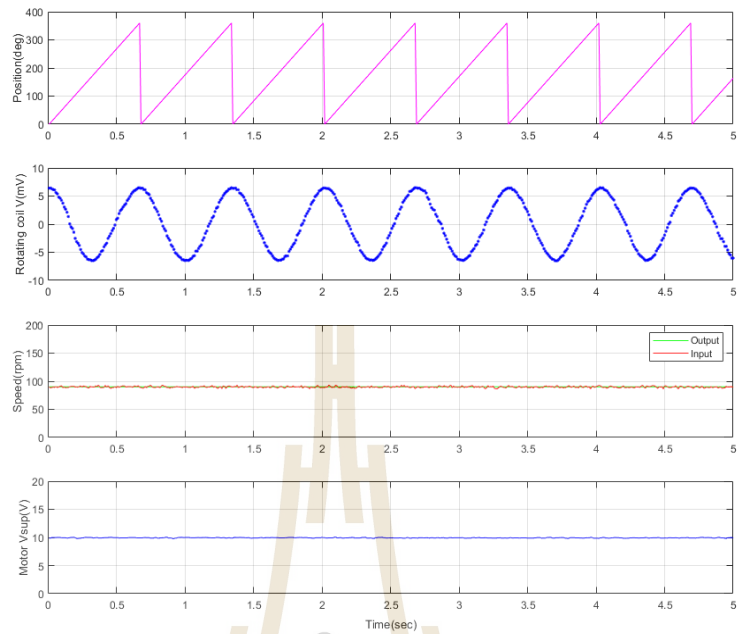
รูปที่ 5.8 ผลการทดสอบเก็บข้อมูลที่ความเร็วการหมุน 90 rpm  
และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แม่เหล็กขนาด 5 A



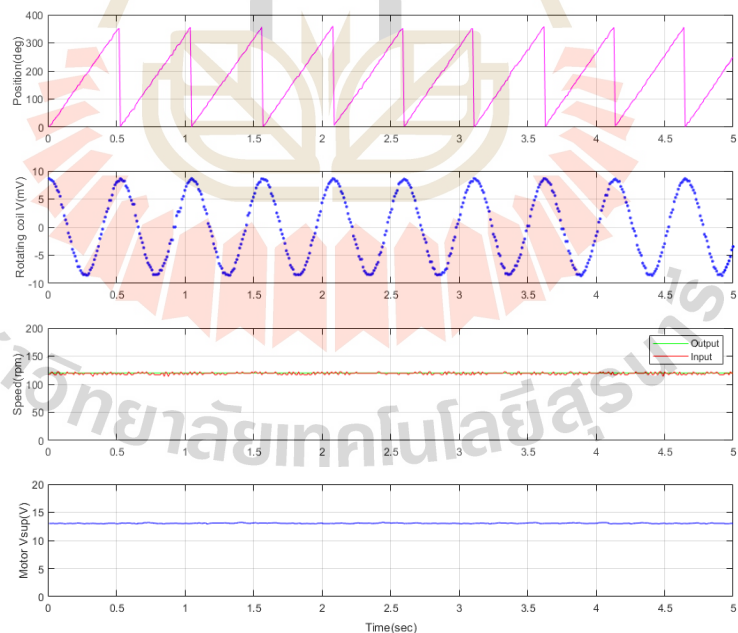
รูปที่ 5.9 ผลการทดสอบเก็บข้อมูลที่ความเร็วการหมุน 120 rpm  
และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แม่เหล็กขนาด 5 A



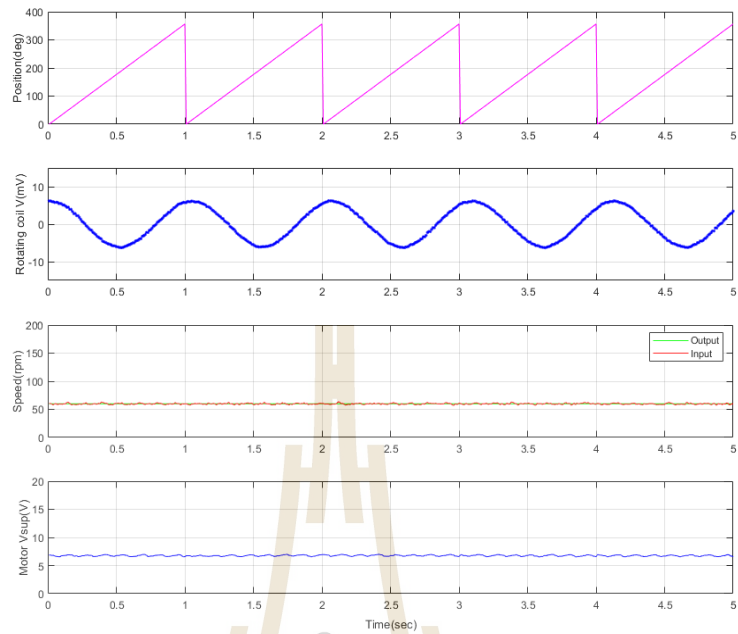
รูปที่ 5.10 ผลการทดสอบเก็บข้อมูลที่ความเร็วการหมุน 60 rpm  
และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แม่เหล็กขนาด 10 A



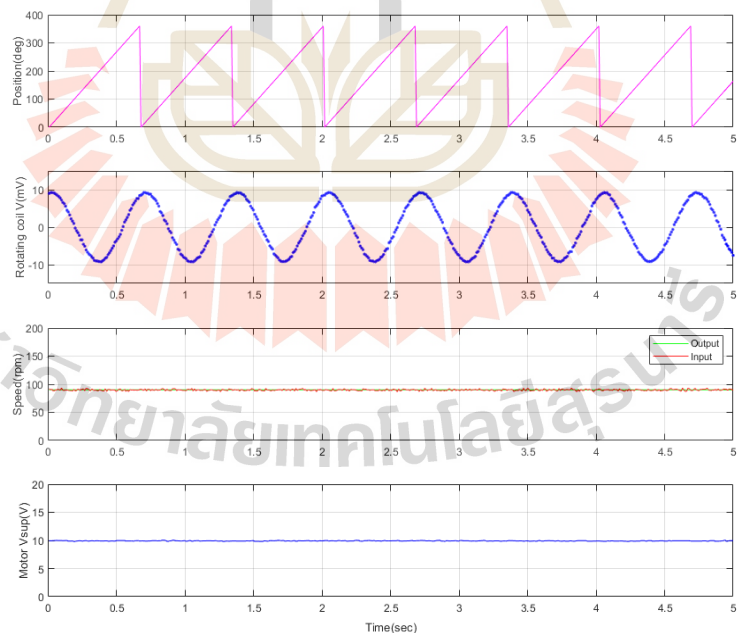
รูปที่ 5.11 ผลการทดสอบเก็บข้อมูลที่ความเร็วการหมุน 90 rpm  
และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แม่เหล็กขนาด 10 A



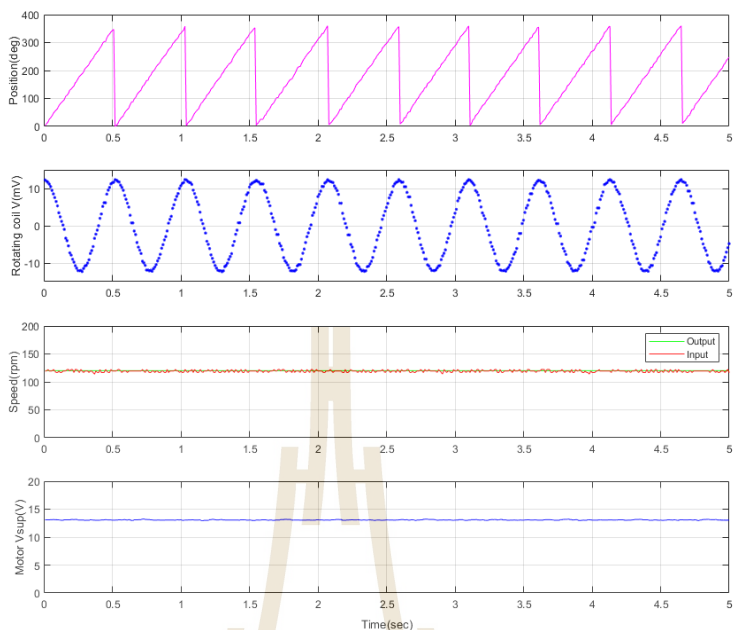
รูปที่ 5.12 ผลการทดสอบเก็บข้อมูลที่ความเร็วการหมุน 120 rpm  
และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แม่เหล็กขนาด 10 A



รูปที่ 5.13 ผลการทดสอบเก็บข้อมูลที่ความเร็วการหมุน 60 rpm  
และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แม่เหล็กขนาด 15 A



รูปที่ 5.14 ผลการทดสอบเก็บข้อมูลที่ความเร็วการหมุน 90 rpm  
และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แม่เหล็กขนาด 15 A



รูปที่ 5.15 ผลการทดสอบเก็บข้อมูลที่ความเร็วการหมุน 120 rpm และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แม่เหล็กขนาด 15 A

จากผลการทดสอบด้วยความเร็วในการเก็บข้อมูลเท่ากับ 100 ค่าต่อวินาที จะได้จำนวนข้อมูลที่ไม่เท่ากันต่อการเก็บค่าใน 1 รอบการหมุน ดังแสดงในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 จำนวนข้อมูลที่เก็บได้ใน 1 รอบการหมุน

ความเร็วรอบการหมุน (rpm)	60	90	120
จำนวนข้อมูลที่เก็บได้ใน 1 รอบ (Point)	100	67	50

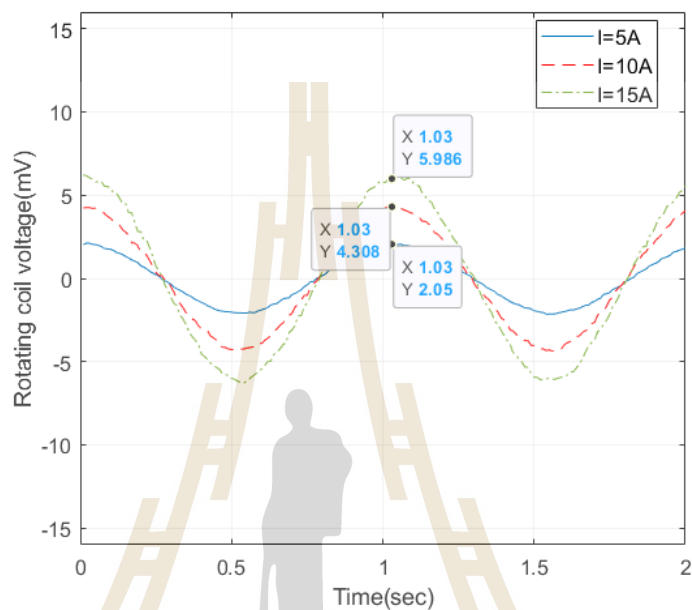
จากตารางที่ 5.4 จำนวนข้อมูลที่เก็บได้ใน 1 รอบการหมุน แสดงดังสมการที่ 5.4

$$DataPoint(1rev) = \frac{Speed}{Time(1s)} \times DataRate \quad (5.4)$$

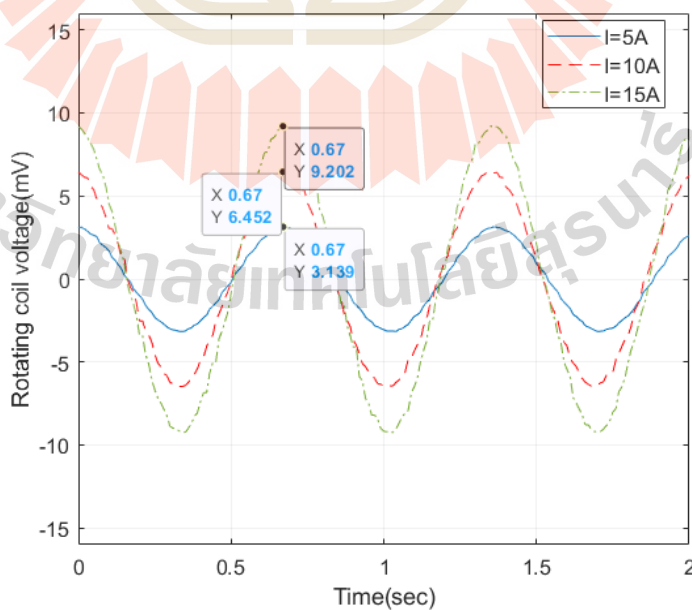
เมื่อ  $DataPoint(1rev)$  = จำนวนข้อมูลที่เก็บได้ใน 1 รอบการหมุน  
 $Speed$  = ความเร็วรอบของมอเตอร์, rpm  
 $Time(1s)$  = เวลาใน 1 นาที (60sec)  
 $DataRate$  = อัตราการเก็บข้อมูล, Hz

#### 5.4 การวิเคราะห์ข้อมูลแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

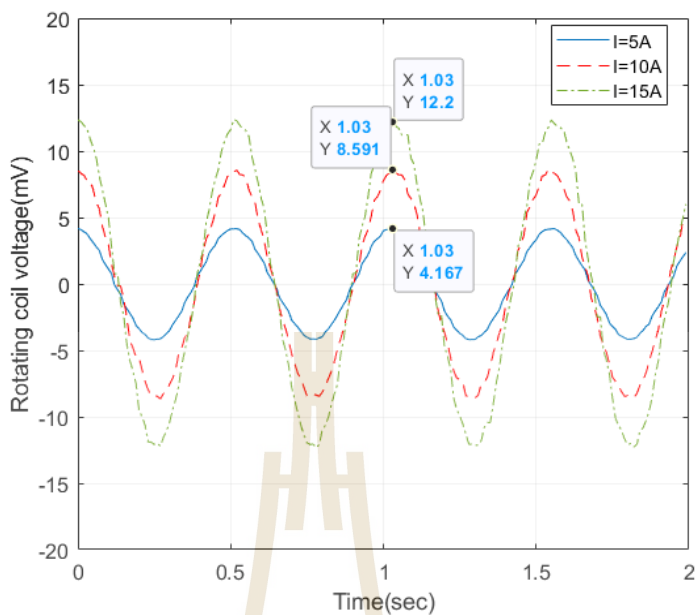
จากหัวข้อที่ 5.3 สามารถจำแนกข้อมูลแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากขดลวดตัววัดตามความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังแสดงในรูปที่ 5.16 - 5.18



รูปที่ 5.16 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ความเร็วรอบ 60 rpm



รูปที่ 5.17 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ความเร็วรอบ 90 rpm



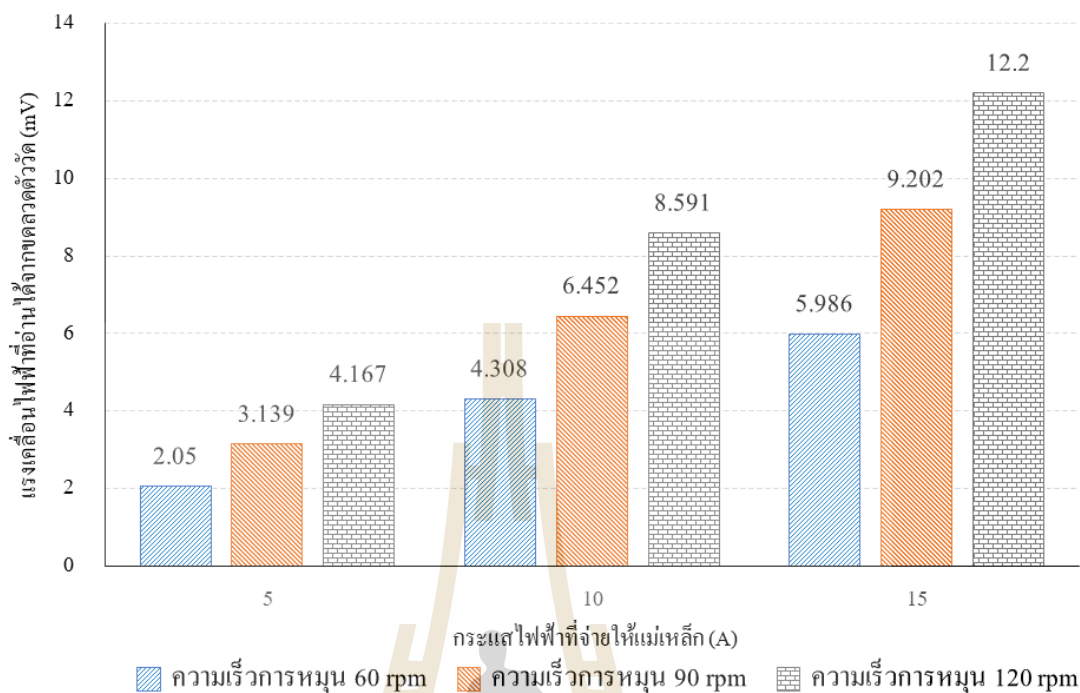
รูปที่ 5.18 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ความเร็วรอบ 120 rpm

จากรูปที่ 5.16 – 5.18 เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แม่เหล็กขนาด 5 10 และ 15 A ที่ความเร็วการหมุน 60 90 และ 120 rpm จะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ขดลวดตัววัดอ่านค่าได้ ดังแสดงในตารางที่ 5.5 และในรูปที่ 5.19

ตารางที่ 5.5 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่อ่านได้จากขดลวดตัววัดที่ความเร็ว 60 90 120 rpm เมื่อจ่ายกระแสให้แม่เหล็กขนาด 5 10 และ 15 A ตามลำดับ

กระแสที่จ่ายให้แม่เหล็ก (A)	5	10	15
ความเร็วรอบมอเตอร์ (rpm)			
60	2.050	4.308	5.986
90	3.139	6.452	9.202
120	4.167	8.591	12.200

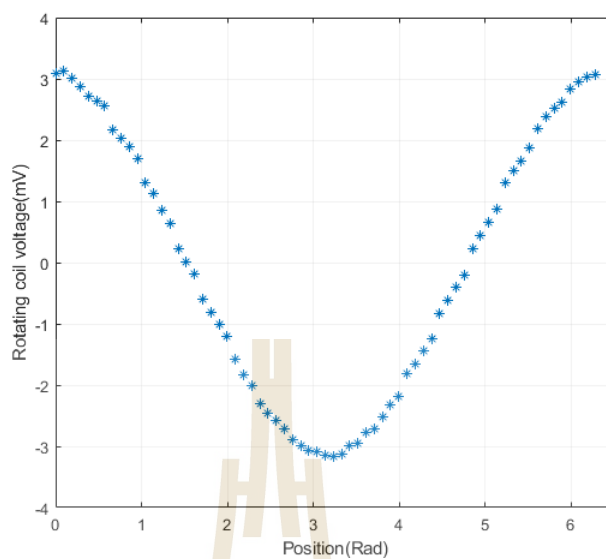




รูปที่ 5.19 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่อ่านได้จากขดลวดตัววัดที่ความเร็ว 60 90 120 rpm เมื่อจ่ายกระแสให้แม่เหล็กขนาด 5 10 และ 15 A ตามลำดับ

พบว่าเมื่อความเร็วในการหมุนสูงขึ้น จะส่งผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่อ่านได้จากขดลวดตัววัดสูงขึ้นด้วย แสดงให้เห็นว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่อ่านได้จากขดลวดตัววัดแปรผันตรงกันกับความเร็วยรอบการหมุน ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ 2.1 ในทางปฏิบัติสามารถนำไปปรับใช้งานให้เหมาะสมกับขนาดของสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กที่เล็กลงได้ เช่น ถ้าแม่เหล็กตัวเล็กที่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กน้อย แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่วัดได้จะน้อยด้วย จึงสามารถปรับความเร็วรอบการหมุนเพิ่มขึ้นได้เล็กน้อยให้เหมาะสม

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่อ่านได้จากขดลวดตัววัดกับตำแหน่งเชิงมุมจากกระบวนการวัดและเก็บข้อมูลของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนที่ได้พัฒนาขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.20 มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับนำไปวิเคราะห์เพื่อการวัดคุณภาพของแม่เหล็ก ซึ่งเป็นงานวิจัยในลำดับถัดไป



รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่อ่านได้จากขดลวดตัววัดกับตำแหน่งเชิงมุม

## บทที่ 6

### สรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวสรุปผลการวิจัย สรุปปัญหาจากการทดลอง ข้อเสนอแนะ และแนวทางการทำวิจัยต่อไป แบ่งเป็นหัวข้อดังนี้

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้กล่าวในบทที่ 5 สามารถสรุปได้ดังนี้

1). การระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวิธีการประมาณค่าตัวแปร ใช้การทดสอบหมุนมอเตอร์แบบต่อเนื่องที่ช่วงความเร็ว 40 – 120 rpm จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบหมุนมอเตอร์แบบต่อเนื่องพบว่ามีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 2.27 % หลังจากนั้นทำการออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ ด้วยวิธี Optimization โดยใช้โปรแกรม MATLAB-Simulink ภายใต้ข้อกำหนดของการออกแบบตัวควบคุมได้ค่า  $K_p$  และ  $K_i$  เท่ากับ 0.1001 และ 0.3724 ตามลำดับ แล้วนำไปทดสอบกับสัญญาณอินพุตขั้นบันไดแบบหนึ่งหน่วยได้ค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวเท่ากับ 1.4 % และสามารถควบคุมความเร็วรอบการหมุน 60 90 และ 120 rpm ให้คงที่ได้มีค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวอยู่ในช่วง 0.99 - 1.48 % ซึ่งมีค่าไม่เกิน 2.00 % ตามข้อกำหนดของการออกแบบ และความเร็วรอบที่ 60 rpm มีค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวน้อยที่สุดที่ 0.99 % ผลการวัดสนามแม่เหล็กจะแม่นยำมากขึ้น ถ้าสามารถควบคุมมอเตอร์ที่ขับหมุนขดลวดตัววัดให้คงที่ได้มากที่สุด

2). สามารถเก็บข้อมูลการวัดจากอุปกรณ์ NI CompactRIO ผ่านโปรแกรม LabVIEW บนเครื่องคอมพิวเตอร์ ด้วยความเร็วในการเก็บข้อมูล 100 ค่าต่อวินาที ที่ความเร็วรอบ 60 90 และ 120 rpm ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่อ่านได้จากขดลวดตัววัดตามค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แม่เหล็ก 5 10 และ 15 A ในความเร็ว 60 90 และ 120 rpm พบว่าถ้าความเร็วรอบการหมุนสูงขึ้น จะทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขดลวดตัววัดสูงขึ้นด้วย นั่นคือความเร็วรอบการหมุนมีผลกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่อ่านได้จากขดลวดตัววัด ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี

## 6.2 สรุปปัญหาจากการวิจัย

เนื่องจากอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนเป็นอุปกรณ์วัดคุณภาพแม่เหล็กที่ได้พัฒนาขึ้นเป็นครั้งแรก ผลการทดสอบที่ได้อาจมีความแปรปรวนอยู่บ้าง เนื่องจากปัญหาทางกล เช่น การติดตั้ง, การประกอบอุปกรณ์ขับเคลื่อนที่อาจเกิดการเยื้องศูนย์ แต่ยังสามารถพัฒนาเพื่อวัดคุณภาพของแม่เหล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพอยู่

## 6.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการทำวิจัยต่อ

งานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาเครื่องมือสำหรับวัดสนามแม่เหล็กซึ่งมีความสำคัญสำหรับห้องปฏิบัติการที่เกี่ยวข้องกับเครื่องเร่งอนุภาคเป็นอย่างมาก ด้วยเหตุนี้จึงมีความน่าสนใจต่อการพัฒนาต่อให้สามารถวัดคุณภาพสนามแม่เหล็กได้อย่างสมบูรณ์ ด้วยการนำข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้ไปวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์เพื่อที่จะสามารถระบุได้ว่าแม่เหล็กที่ทำการวัดนั้นมีคุณภาพอย่างไร ซึ่งเป็นงานวิจัยในลำดับถัดไป

ในส่วนของข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยนี้ เพื่อที่จะได้พัฒนาอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงควรพัฒนาชิ้นส่วนเชิงกลให้สามารถทำงานได้อย่างราบรื่นมากขึ้น เช่น การปรับปรุงส่วนรองรับแกนวัดให้มีความมั่นคงด้วยวัสดุแกรนิต พร้อมกับประกอบและติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้เข้ากัน โดยมีการปรับตั้งให้ไม่มีการเยื้องศูนย์เกิดขึ้น

## รายการอ้างอิง

- กองพัน อารีรักษ์. (2558). **ระบบควบคุม (Control System)**. กรุงเทพฯ. บริษัท จรัสสนิทวงศ์ จำกัด
- กิจไพบุลย์ ชิวพันธ์ุศรี (2011). **LabVIEW ซอฟต์แวร์เพื่อการพัฒนากระบวนการวัดและควบคุม**. กรุงเทพฯ. บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน)
- ชนบดีน กมล. (2561). **มารู้จักสัญญาณ PWM กันเถอะ : PWM คืออะไร**[ออนไลน์]. ได้จาก : <https://medium.com/icreativesystems/to-know-pwm-373efal322ce>
- ศุภกร รักใหม่. (2553). **ฟิสิกส์ของวงกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์** [ออนไลน์], สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน), ได้จาก: <https://www.slri.or.th/th/index.php/machine/machine-layout.html>
- สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน(องค์การมหาชน) (2560). **เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน STR** [ออนไลน์]. ได้จาก : <https://www.slri.or.th/th/machine/str.html>
- สรวุฒิ สุจิตจร. (2546). **การควบคุมอัตโนมัติ**. กรุงเทพฯ. บริษัทเพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น อินโดไชน่า จำกัด (มหาชน)
- Ahmad M.A., Kishor K., Rai P.. 2014. Speed control of a DC motor using controller. **Automation, Control and Intelligent System**. 2:6-1:1-9
- Campmany J., Marcos J., Massana V., Ribó Ll. and Petrocelli R.. (2019). New small diameter rotating coil shaft for characterizing new generation of multipolar magnet. **International Particle Accelerator Conference**.
- Da S. Dantas A.D.O., Da S. Dantas A.F.O., et al.. 2018. PID control for electric vehicles subject to control and speed signal constraints. **Journal of Control Science and Engineering**.
- Dinesh O., Mevekari D.R., Khartad D.D.. 2015. DC Motor Speed Control using LabVIEW FPGA Modeling, Control Algorithm Simulation & Implementation. **International Journal for Scientific Research & Development**. 3:95-99
- Dorf R.C. and Bishop R.H. (2001). **Modern Control Systems 9th Ed**. NJ: Prentice-Hall, Inc.
- Hassan A.A., Al-Shamaa N.K. and Abdalla K.K.. (2018) Comparative Study for DC Motor Speed Control Using PID Controller. **International Journal of Engineering and Technology**. Vol 9(6) : 4181-4192

- Hedqvist A., Hellberg F. 2007. Quadrupole magnetic field measurement with a rotating coil setup. **Manne Siegbahn Laboratory. Stockholm University. MSL-07-2**
- Henrichsen K. N.. 1992. Classification of magnetic measurement method. **CERN. 70-83**
- Tanabe J. (2005). Iron Dominated Electromagnets Design, Fabrication, Assembly and Measurements. CA: **Stanford Linear Accelerator Center. Stanford Synchrotron Radiation Laboratory. Stanford.**
- J. Billan, S. D. Panfilis, D. Giloteaux, and O. Pagano. 1995. Ambient Temperature Field Measuring System for LHC Superconducting Dipoles. **Magnet Technology Conference (MT14).**
- J. D. Zhang, Z. Cao, F. L. Ren, Q. G. Zhou, L. H. Zhang, Y. Li, *et al.* (2001). Design and fabrication of a rotating coil magnetic measurement system. **The Second Asian Particle Accelerator Conference. 595-597.**
- J.X. Zhou , L.Li, B.G.Yin, C.D.Deng, W.Kang, Y.Chen, Z.Zhang and S.N.Fu. (2010). A harmonic coil measurement system based on a dynamic signal acquisition device. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A624: 549–553**
- J.X. Zhou., *et al* (2015). The development of magnetic field measurement system for drift-tube linac quadrupole. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A786: 142-146**
- K. H. Park, Y. G. Jung, D. E. Kim, H. S. Suh, H. G. Lee, H. S. Han, *et al.* (2010). Magnetic field measurement system for PLS-II magnets. **International Particle Accelerator Conference. 2603-2605.**
- Khan S, Alamgir Z and Alam S. (2016). Generalized Versions of Kirchhoff's Laws for Students. **Research Gate.**
- Köster O., Fiscarelli L., Russenschuck S. (2016). A procedure for combining rotating-coil measurements of large-aperture accelerator magnets. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A818: 20–25**
- L. Li, Y. J. Li, G. L. Ni, W. Chen, and X. J. Sun (2005). Rotating coil magnetic measurement system and measurement results of quadrupole prototype for BEPCII storage ring. **Partical Accelerator Conference. 1844-1846.**
- Q. Peng, B. Yin, J. Zhou, Y. Wu, H. Brueck, M. Stolper, *et al.* (2010). Harmonic coil design, fabrication and commissioning for European XFEL linear accelerator superconducting magnets field measurements. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 20: 2015-2018**

Sunwong P. 2015. Rotating coil system for multipole measurement of quadrupole and sextupole magnets at SPS laboratory. **Technical note**

Vikhe1 P., Punjabi1 N., Kadu C.. 2014. Real time DC motor speed control using PID controller in LabVIEW. **International Journal of advance research in electrical, Electronics and instrumentation engineering**. 3: 12162-12167

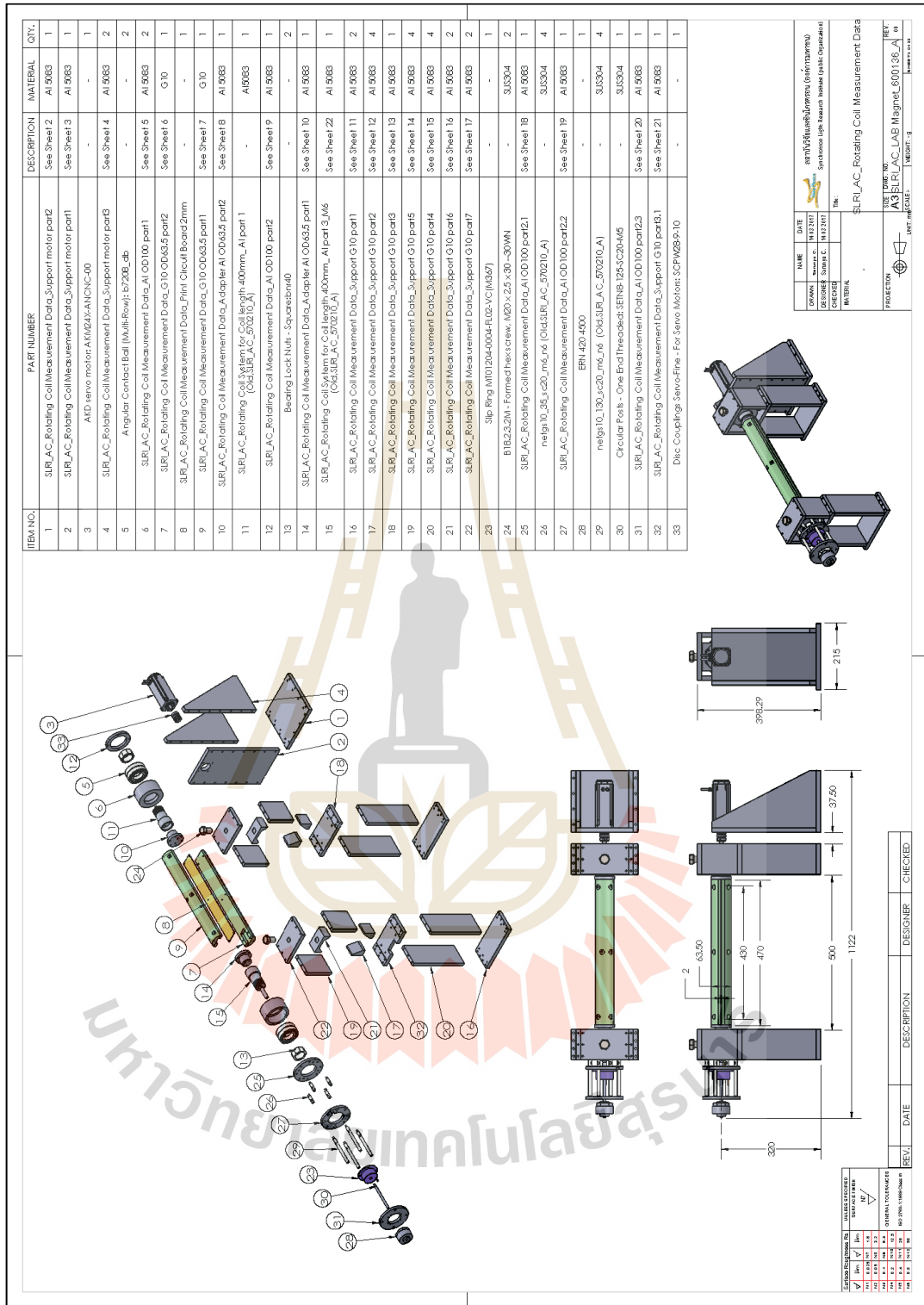




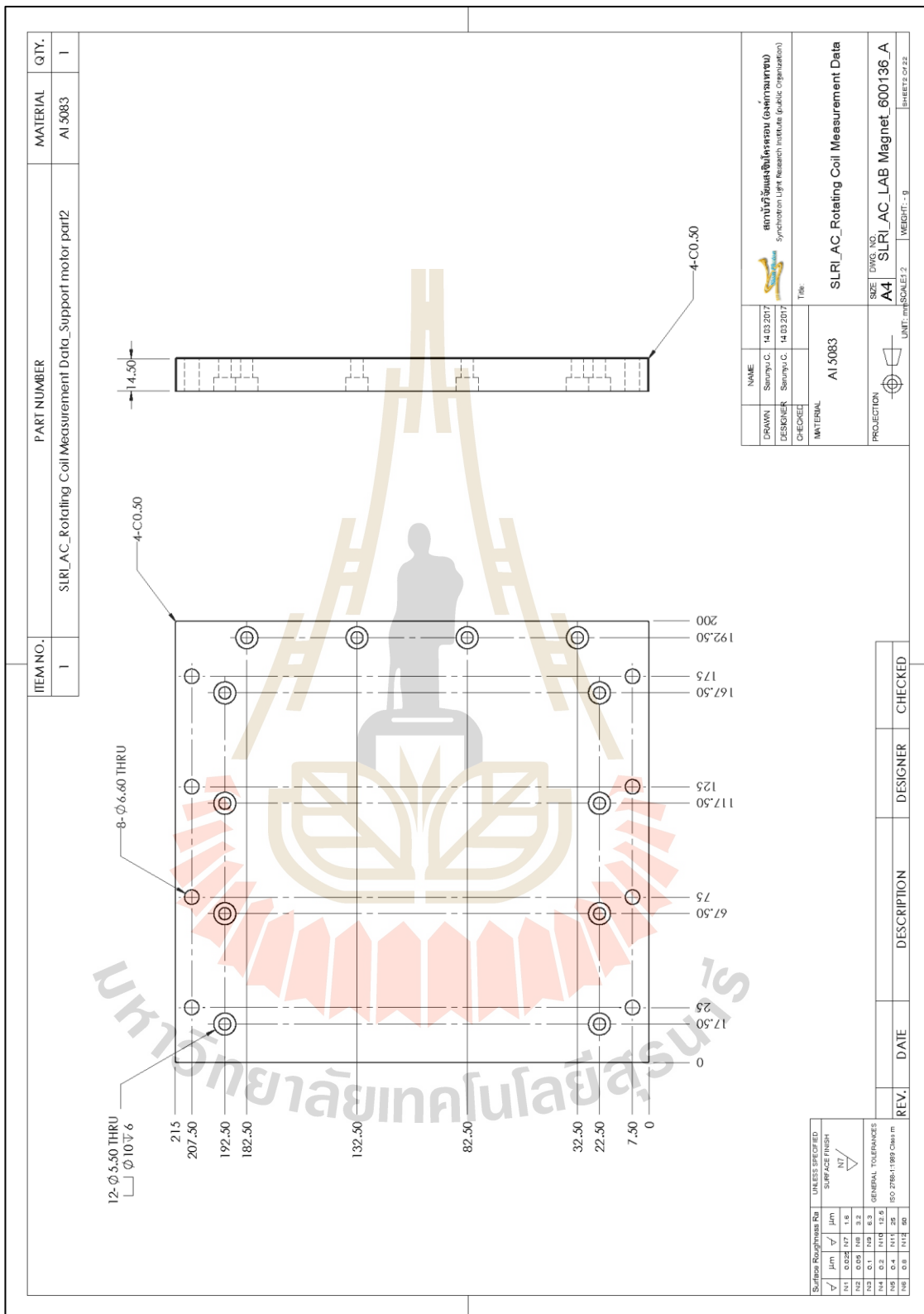
ภาคผนวก ก

แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุน

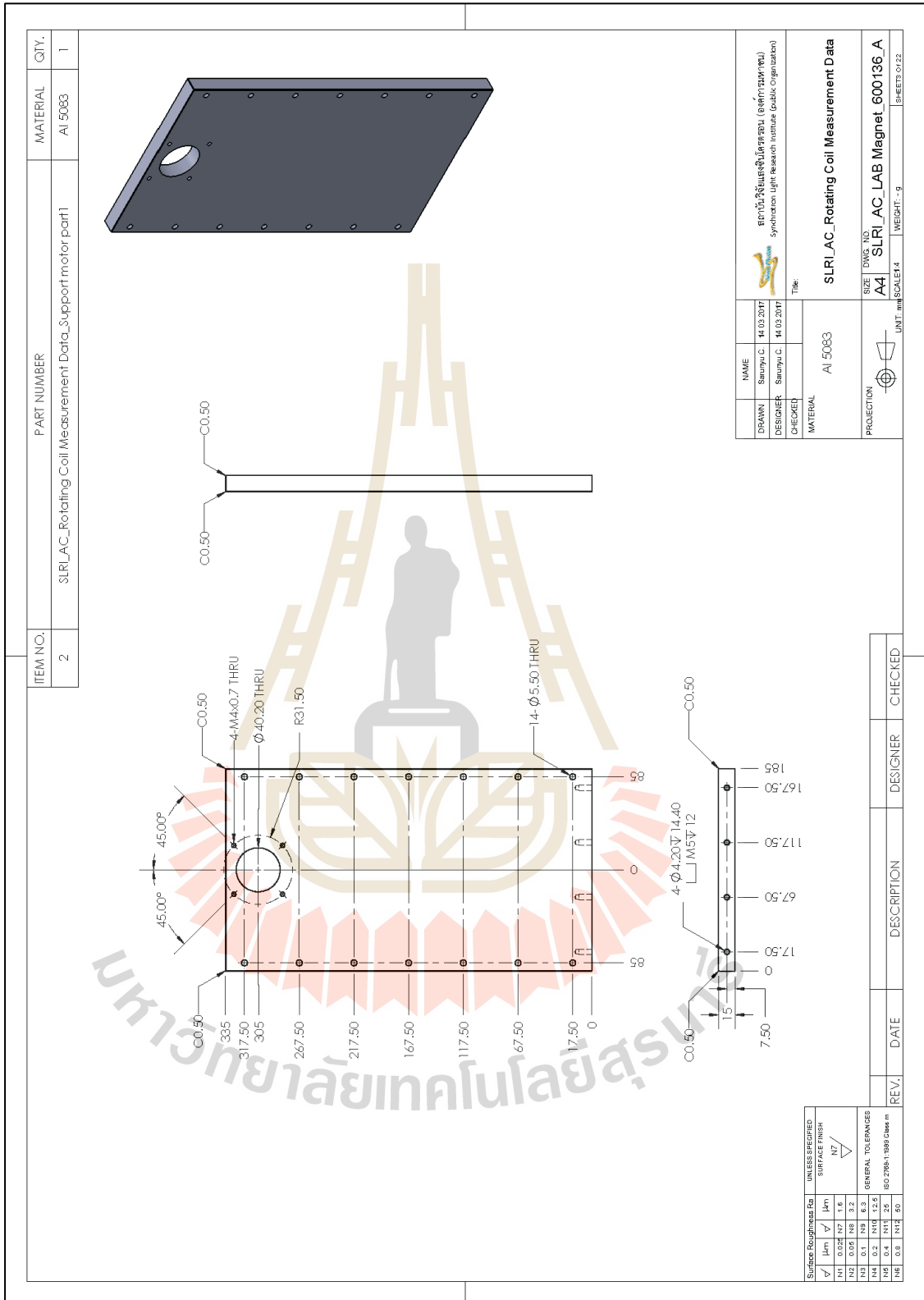




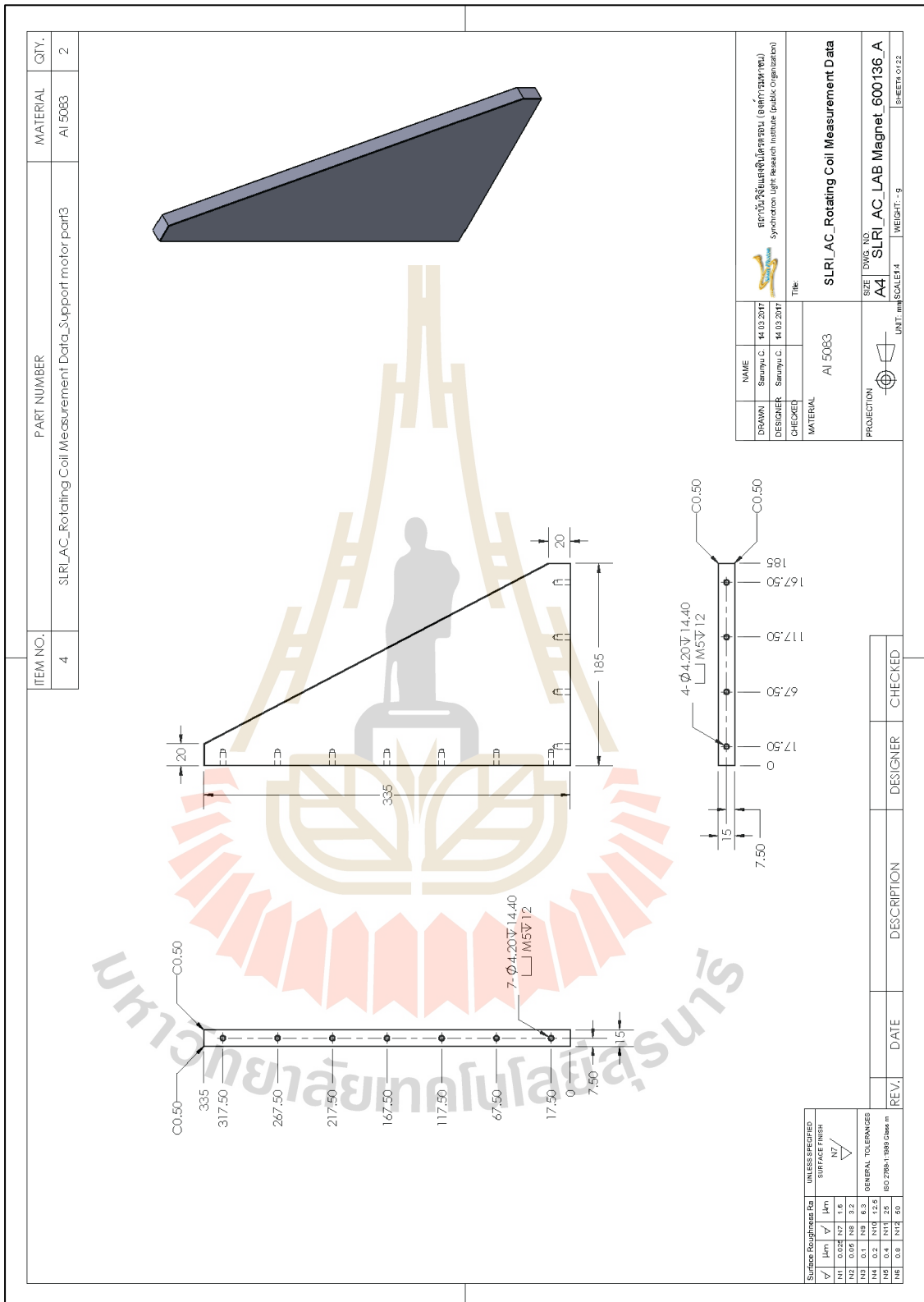
รูปที่ ก.1 แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 1



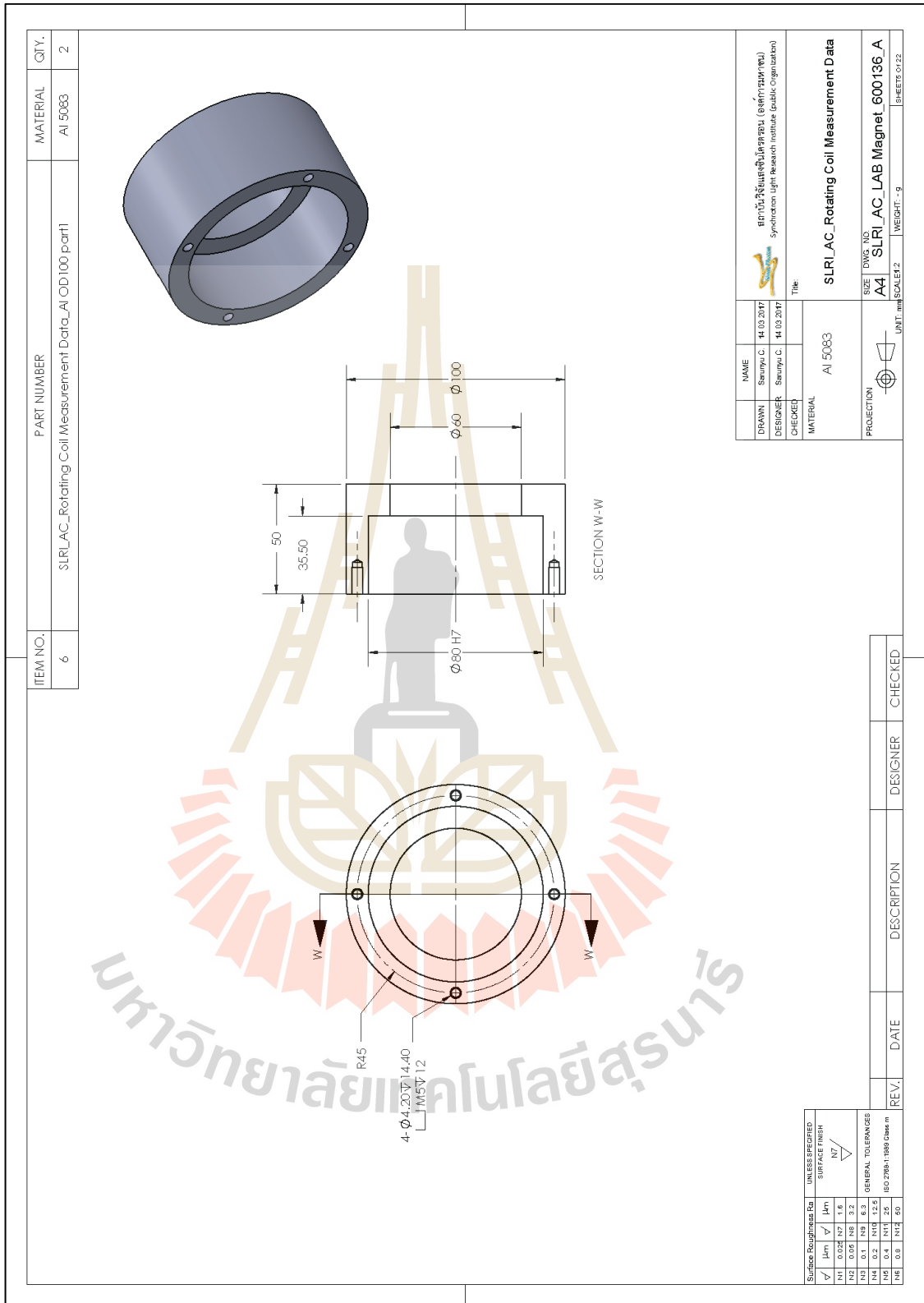
รูปที่ ก.2 แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีชดววดหมุนแผ่นที่ 2



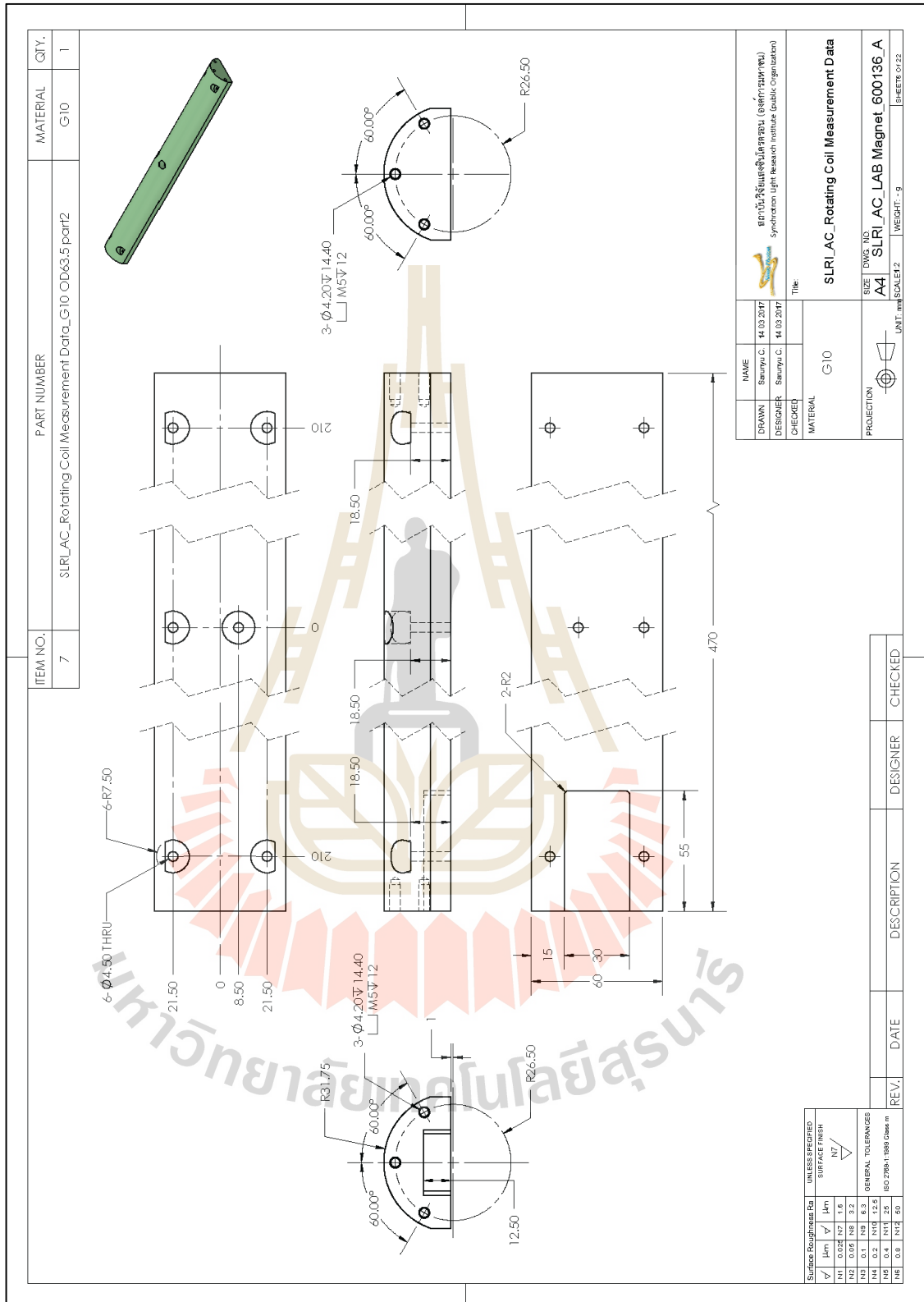
รูปที่ ก.3 แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีชดวทหมุนแผ่นที่ 3



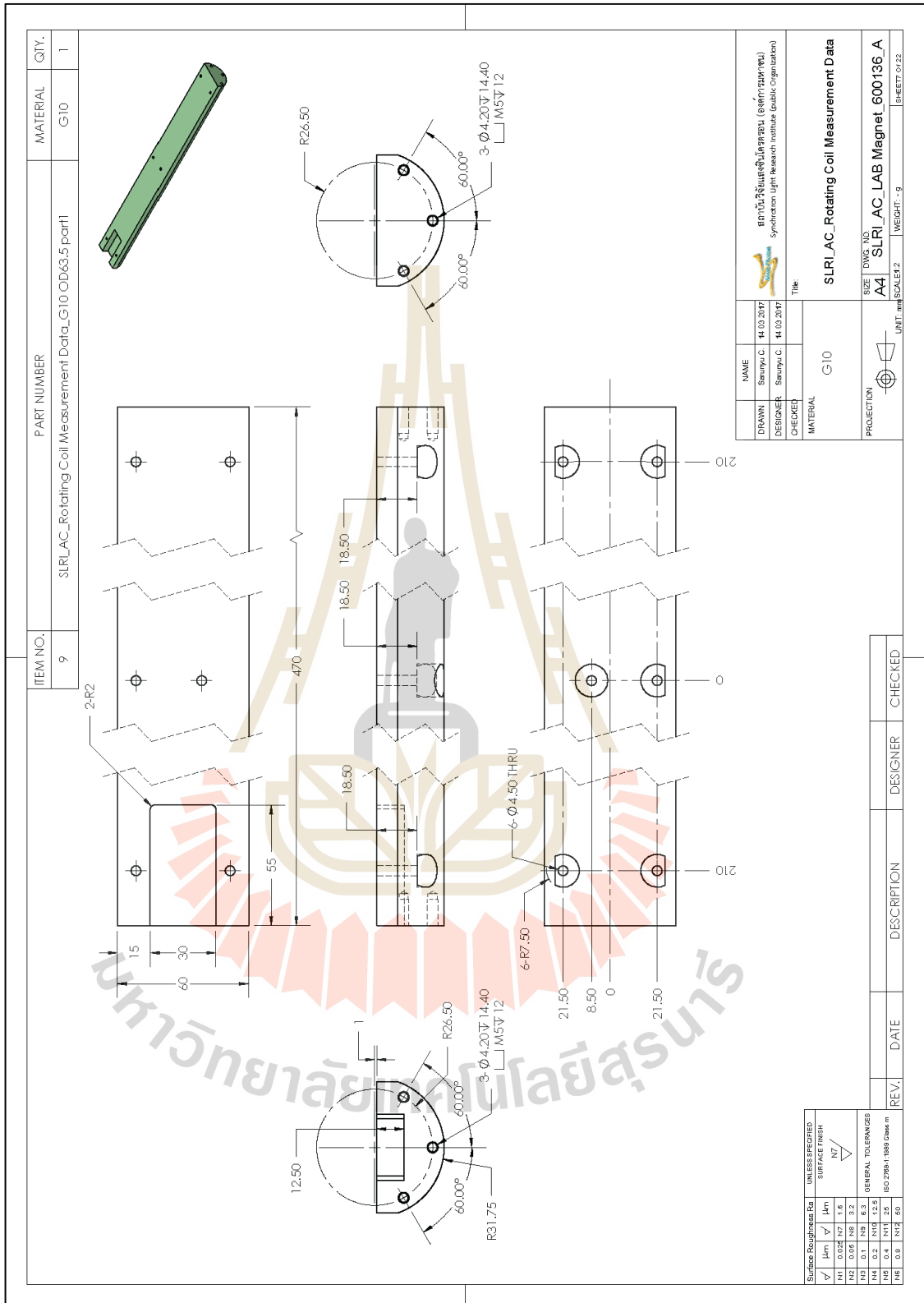
รูปที่ ก.4 แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 4



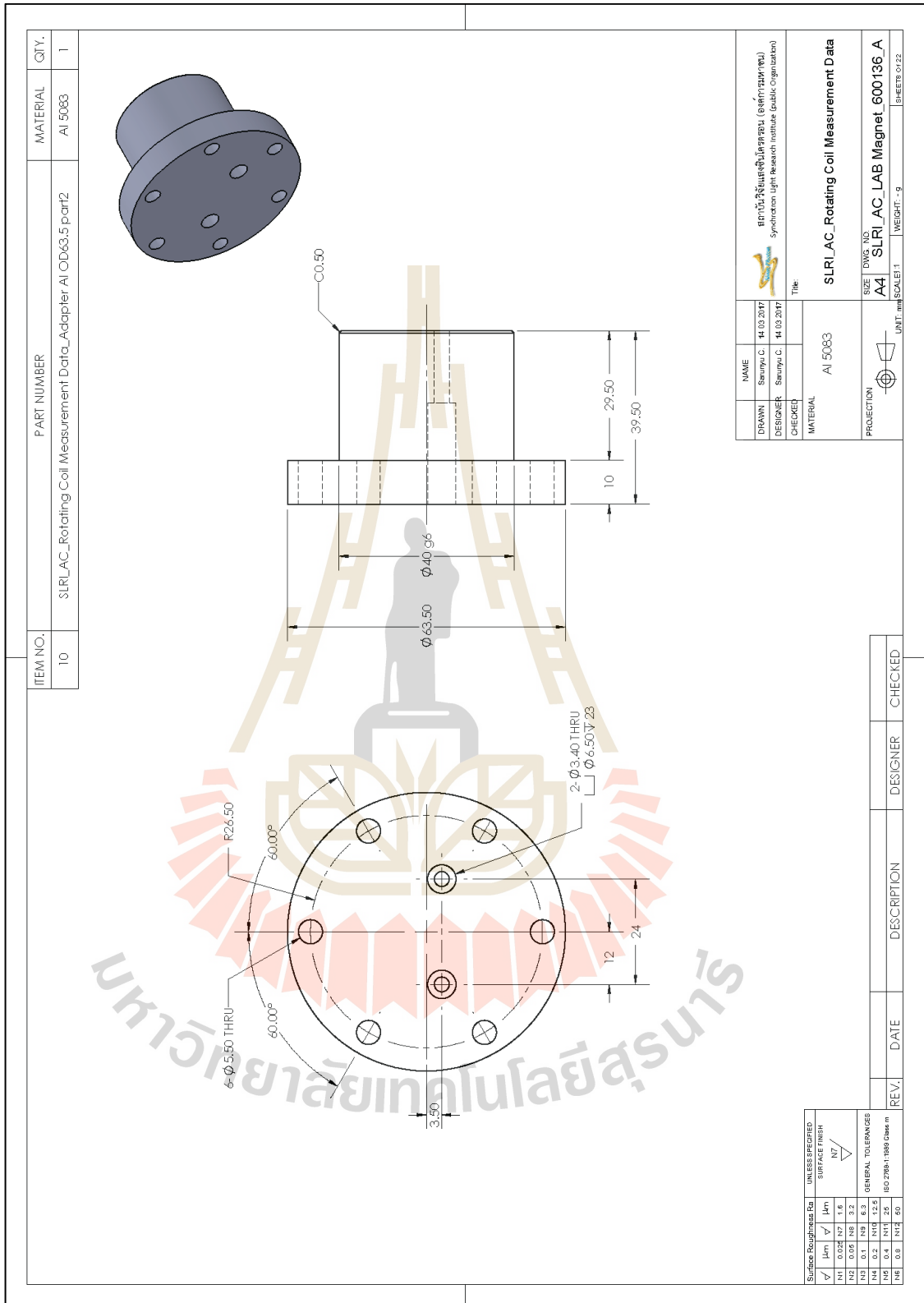
รูปที่ ก.5 แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 5



รูปที่ ก.6 แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 6

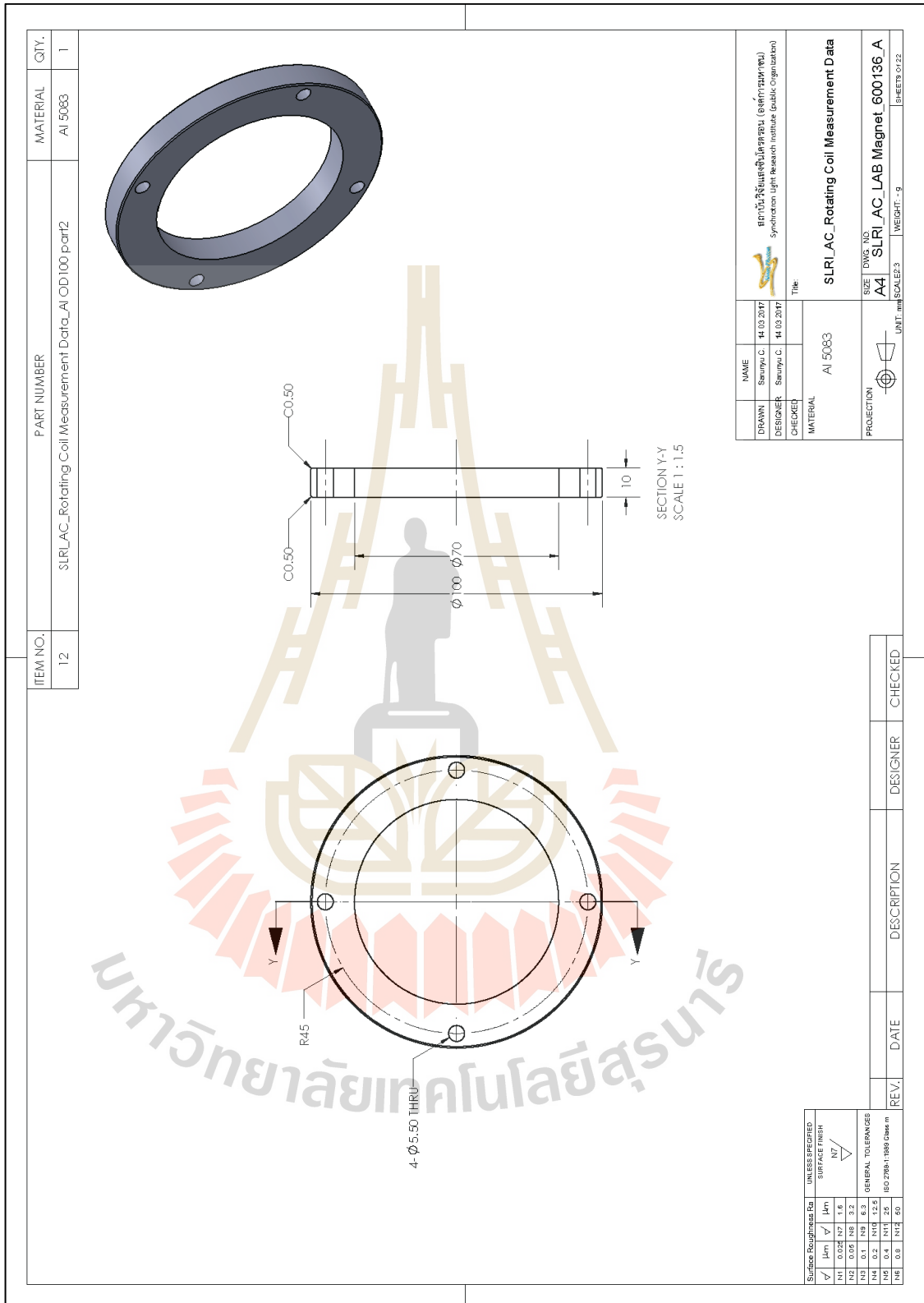


รูปที่ ก.7 แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีชดวอดหมุนแผ่นที่ 7

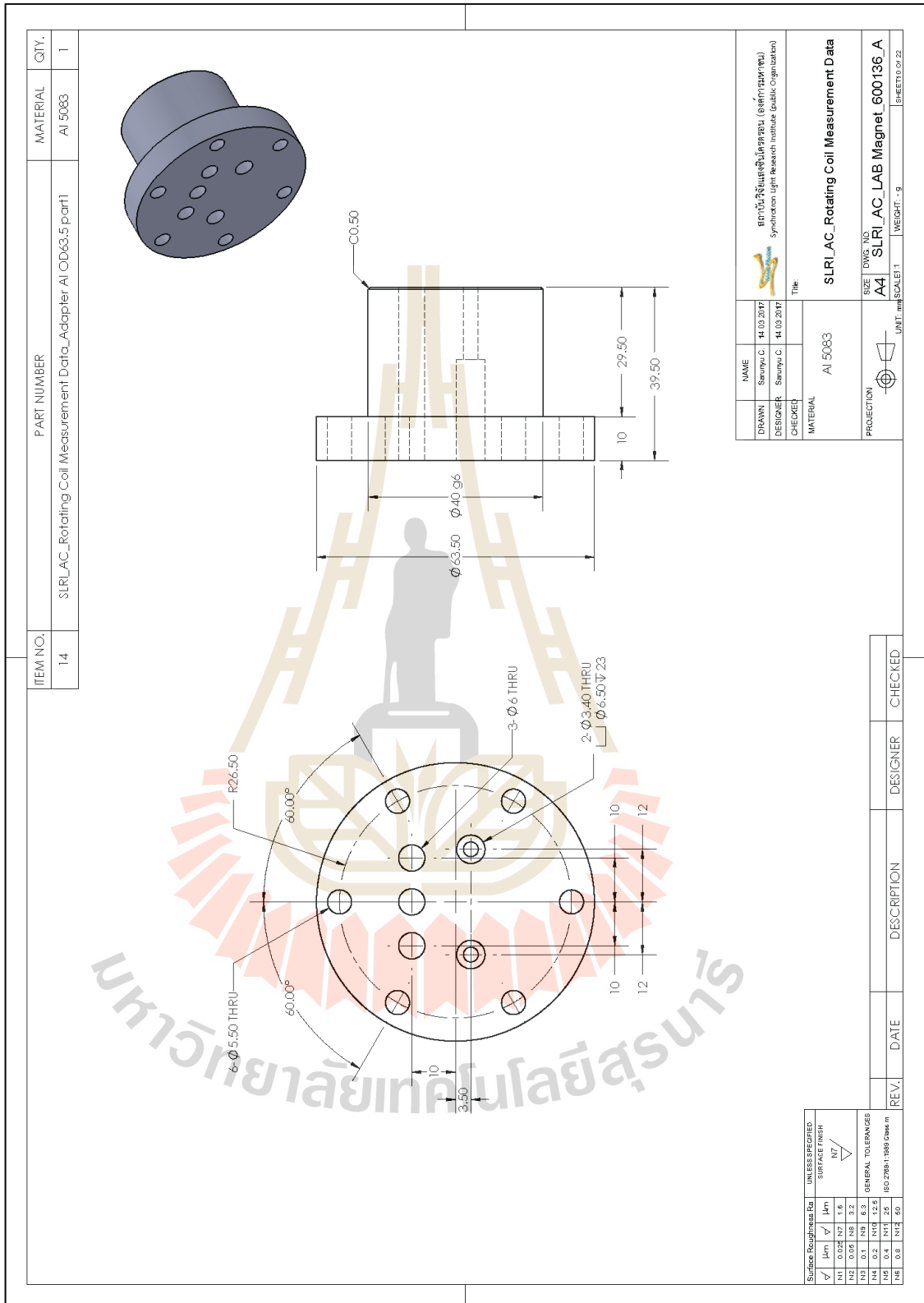


รูปที่ ก.8 แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 8

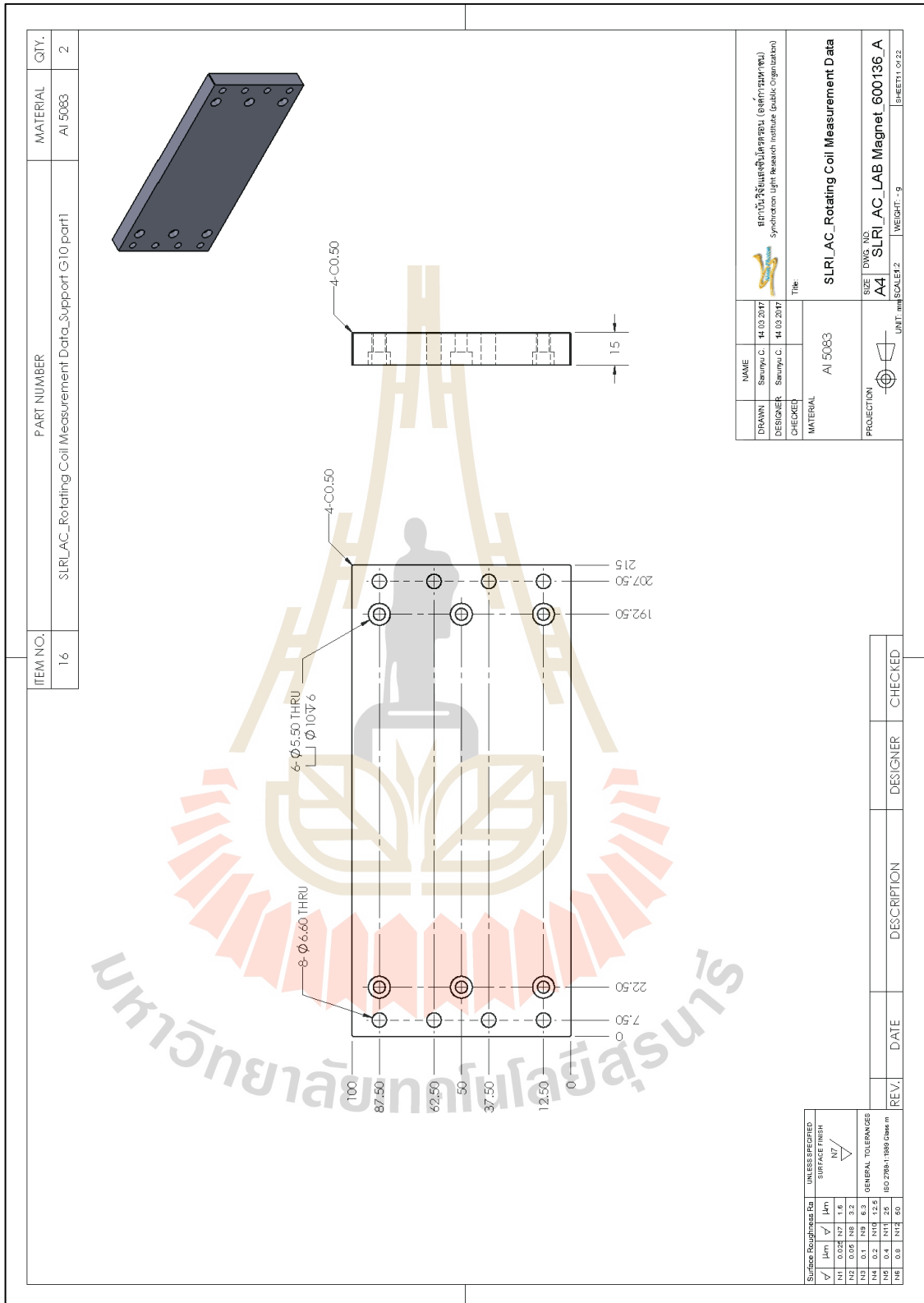




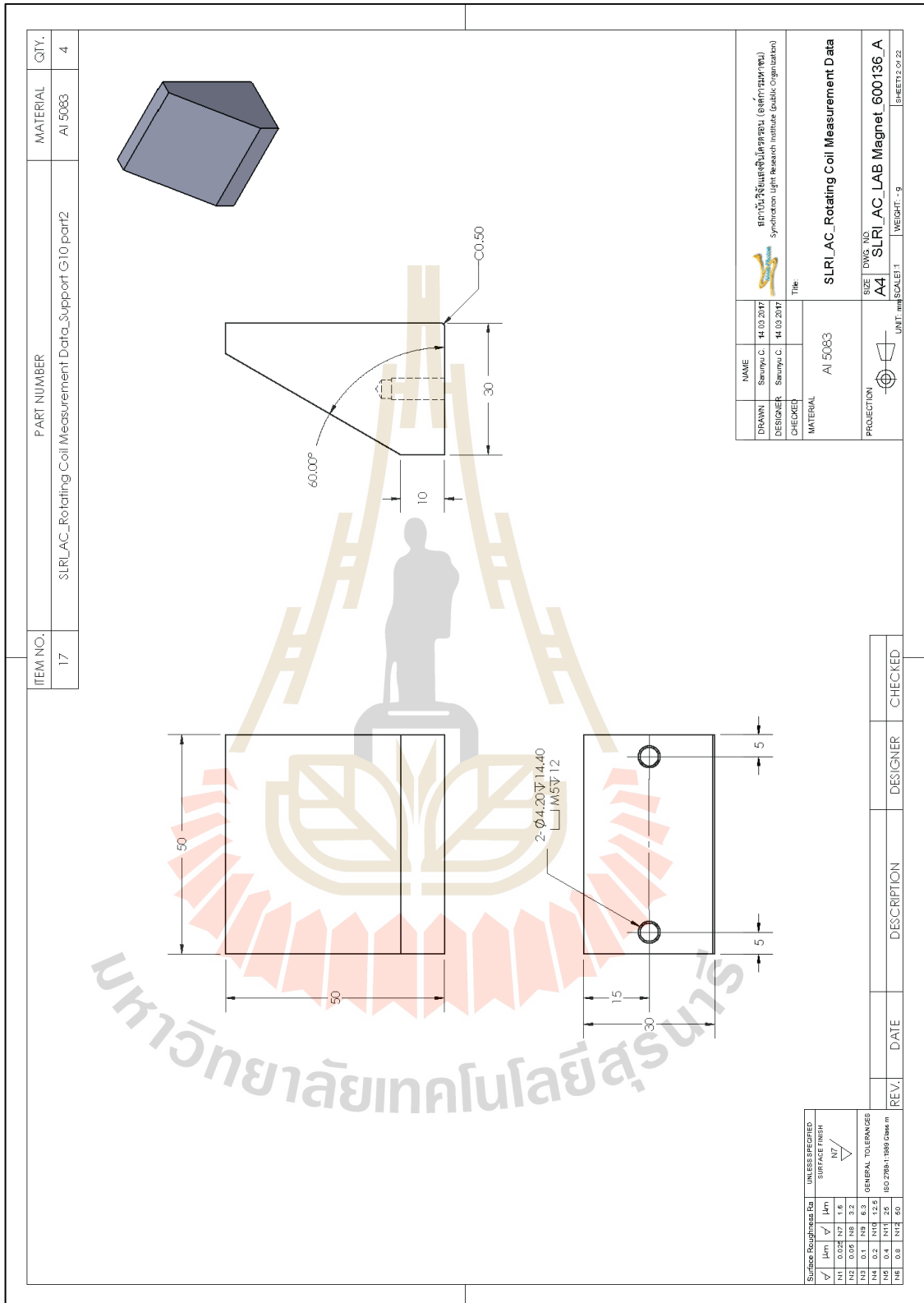
รูปที่ ก.9 แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 9



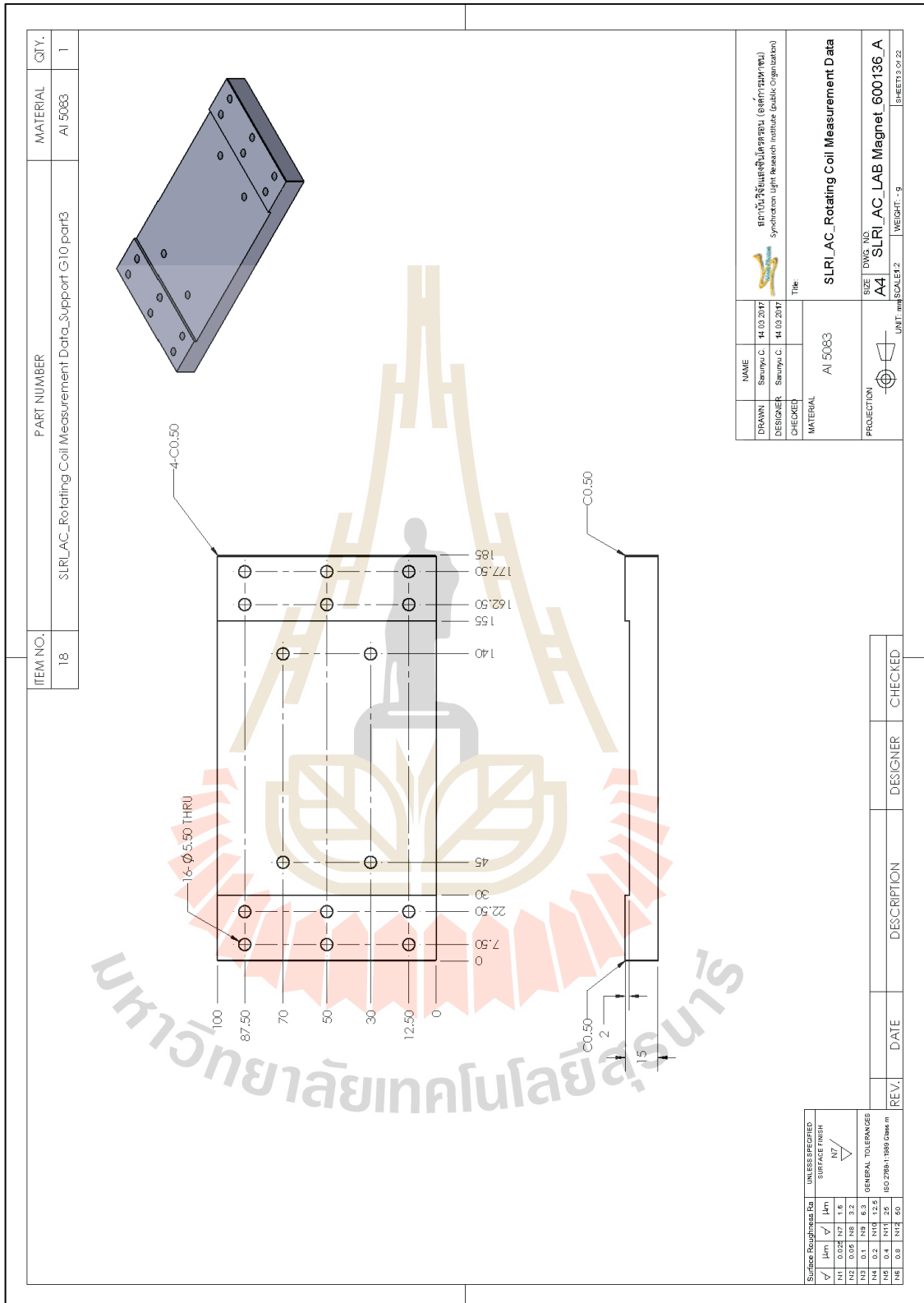
รูปที่ ก.10 แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 10



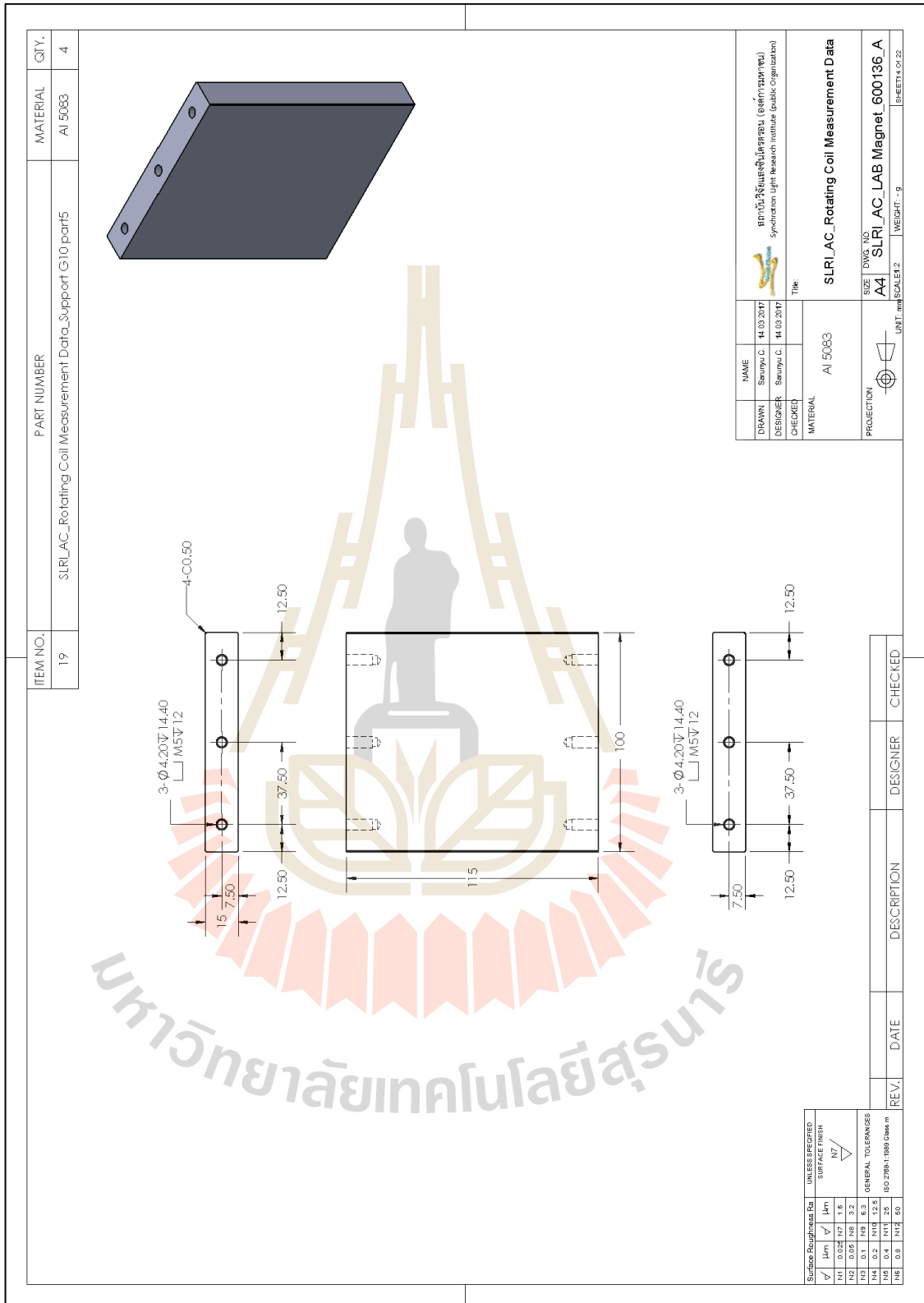
รูปที่ ก.11 แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 11



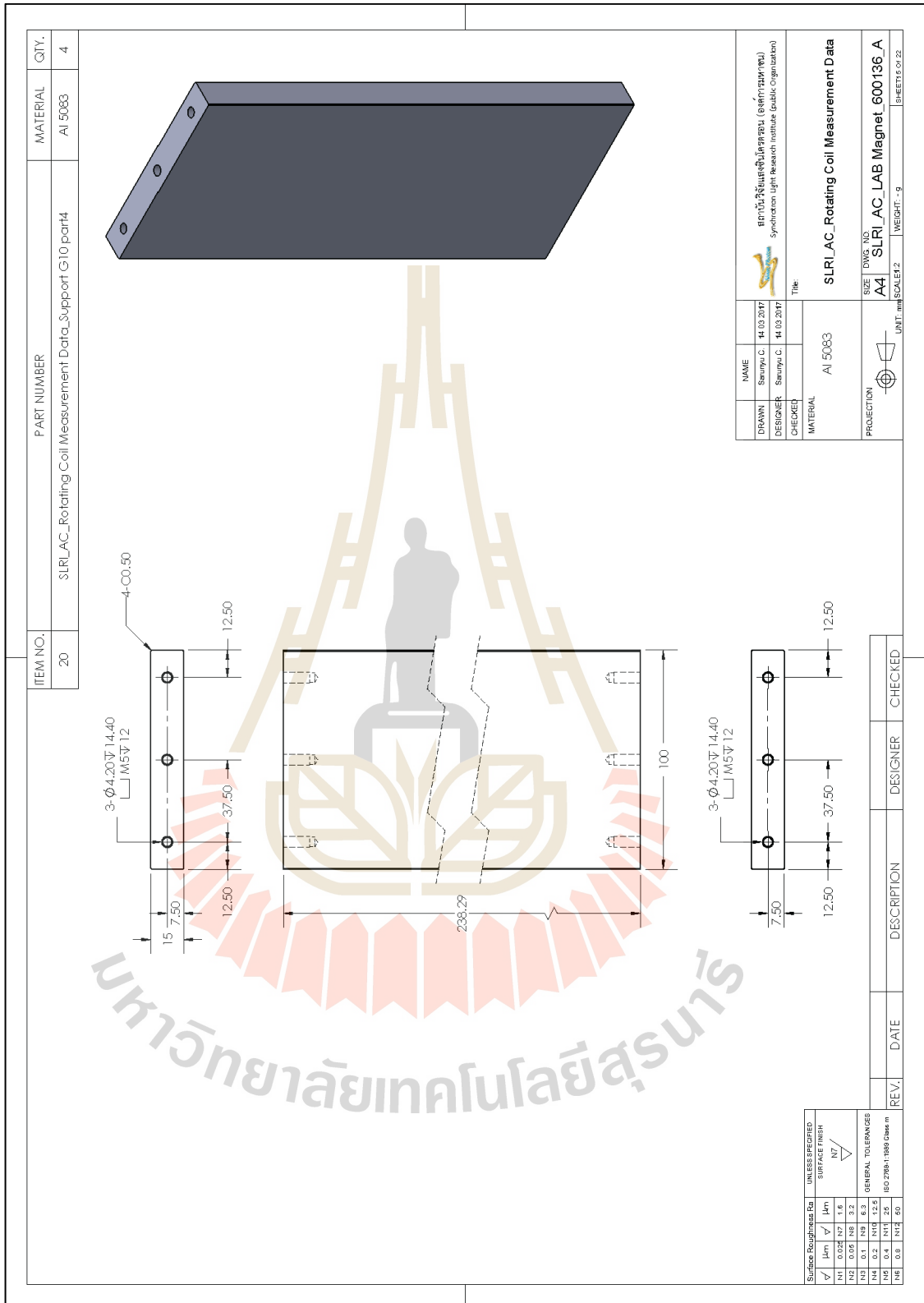
รูปที่ ก.12 แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 12



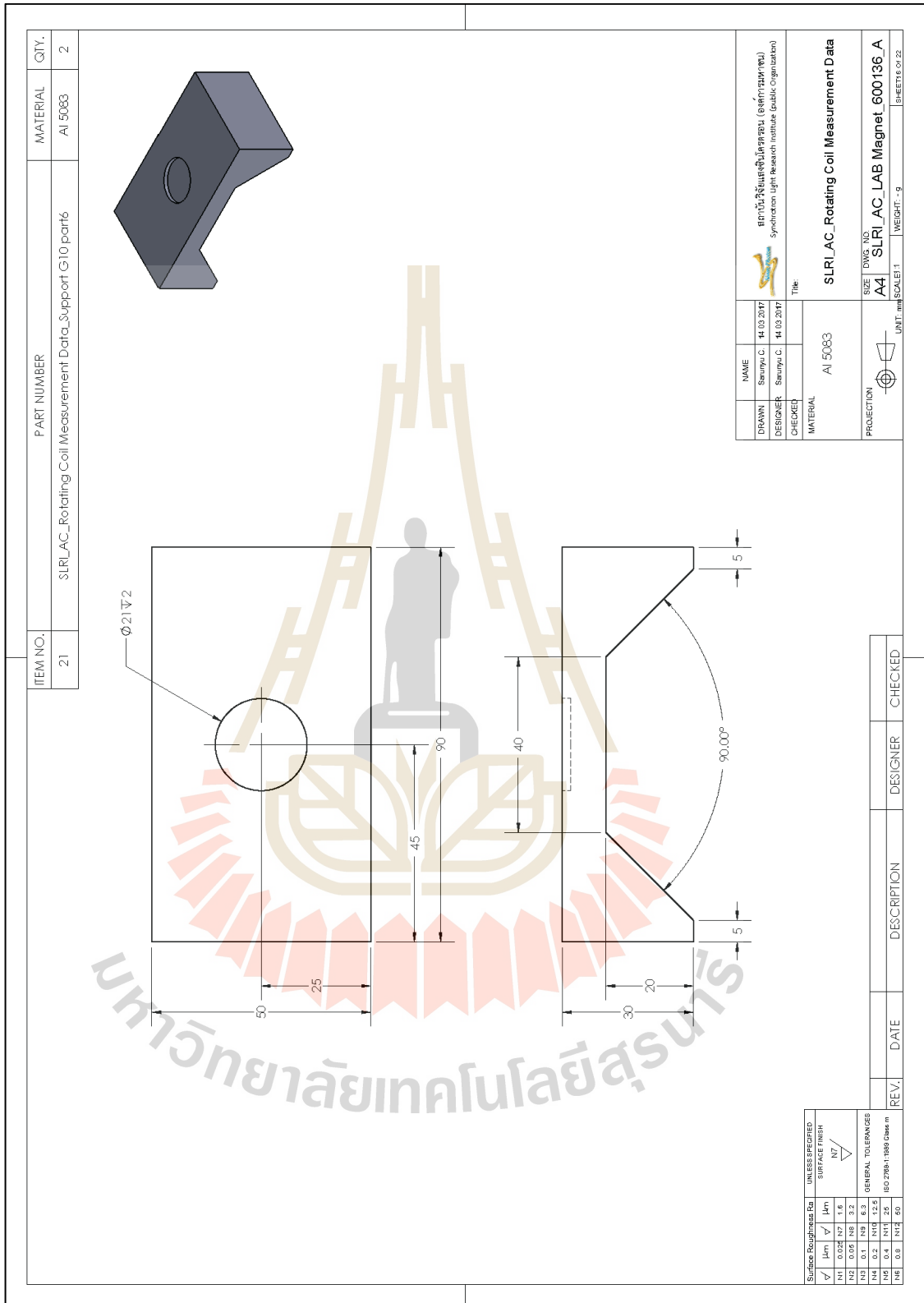
รูปที่ ก.13 แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีคลาดหมุนแผ่นที่ 13



รูปที่ ก.14 แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 14

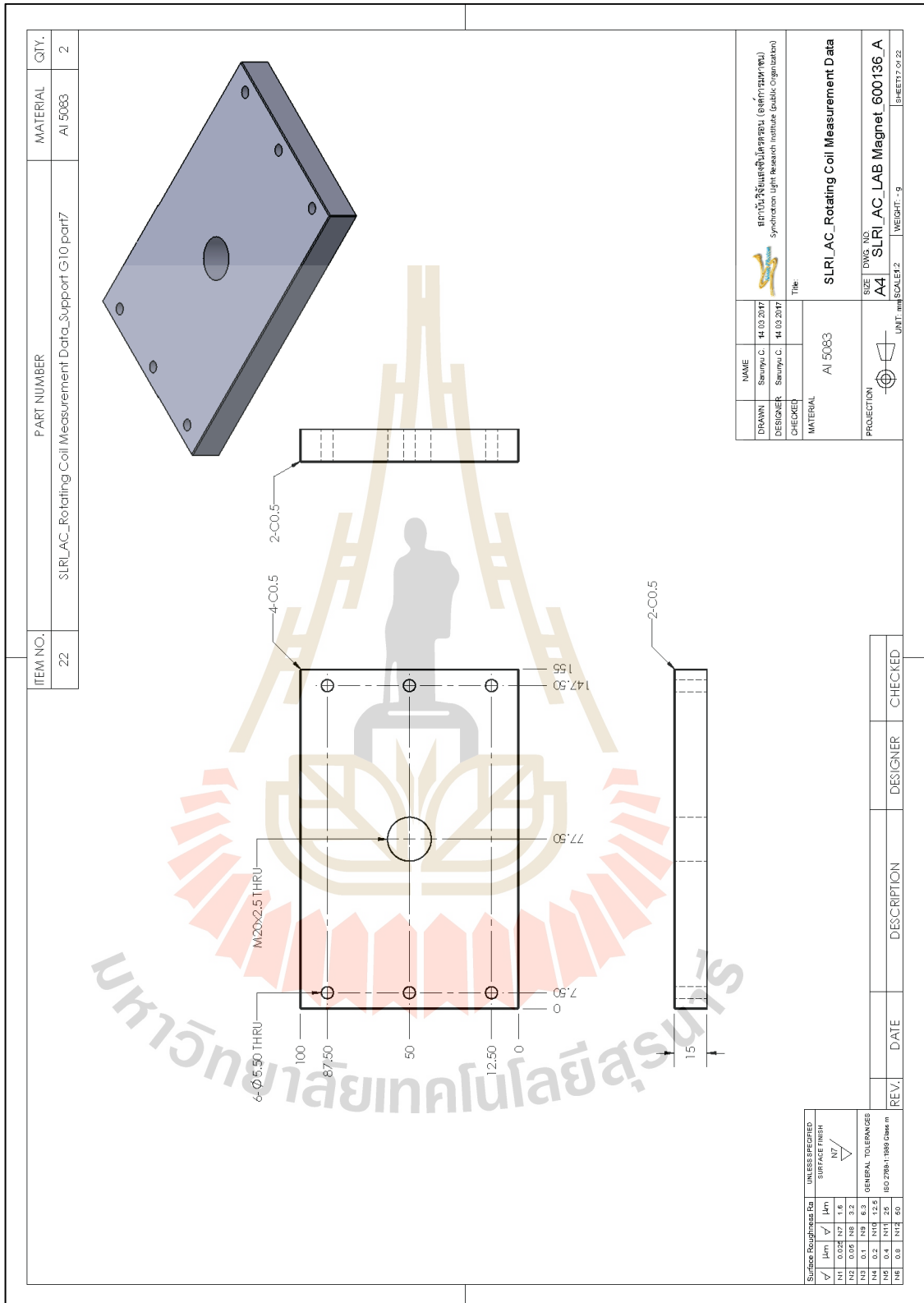


รูปที่ ก.15 แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 15

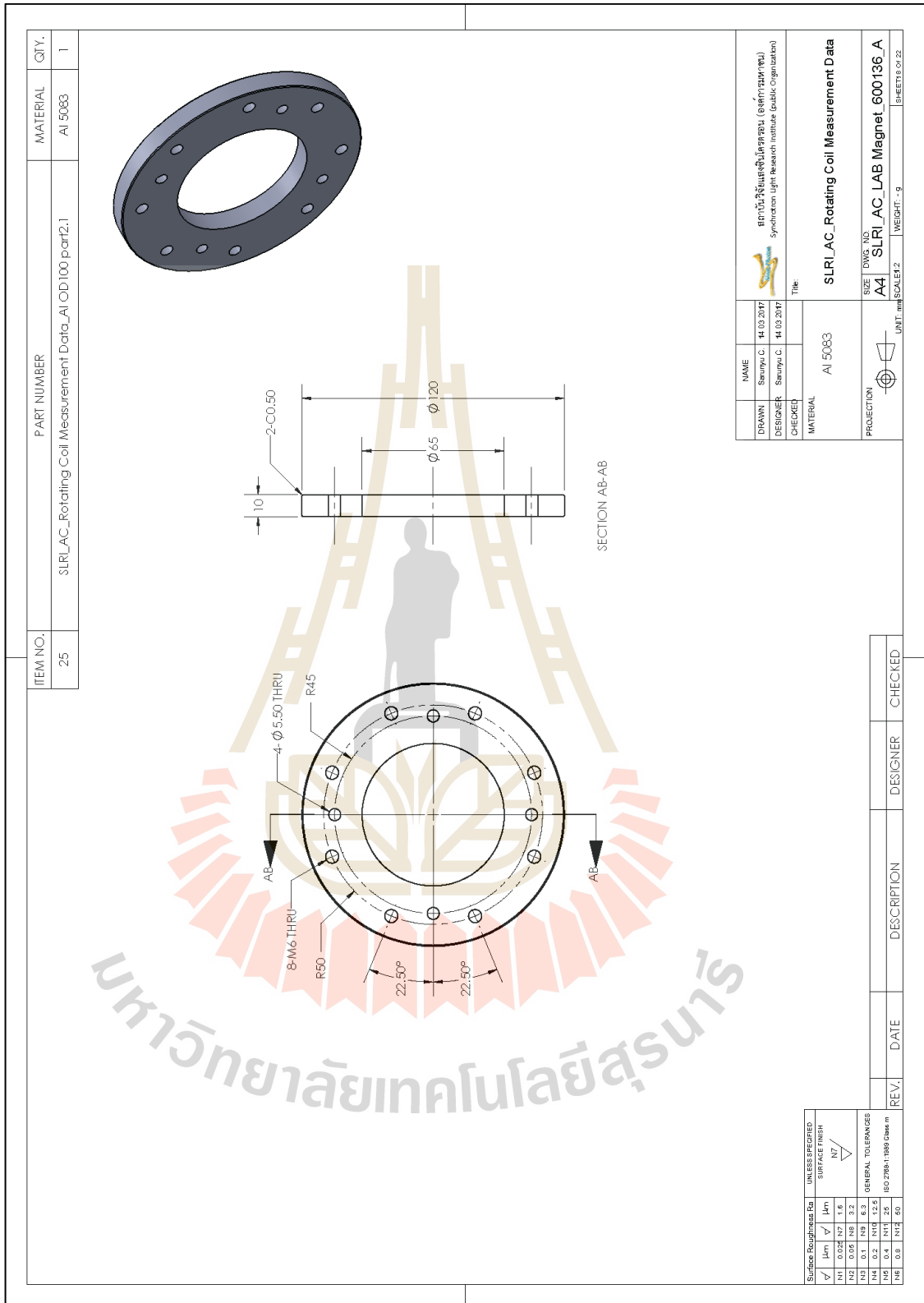


รูปที่ ก.16 แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 16

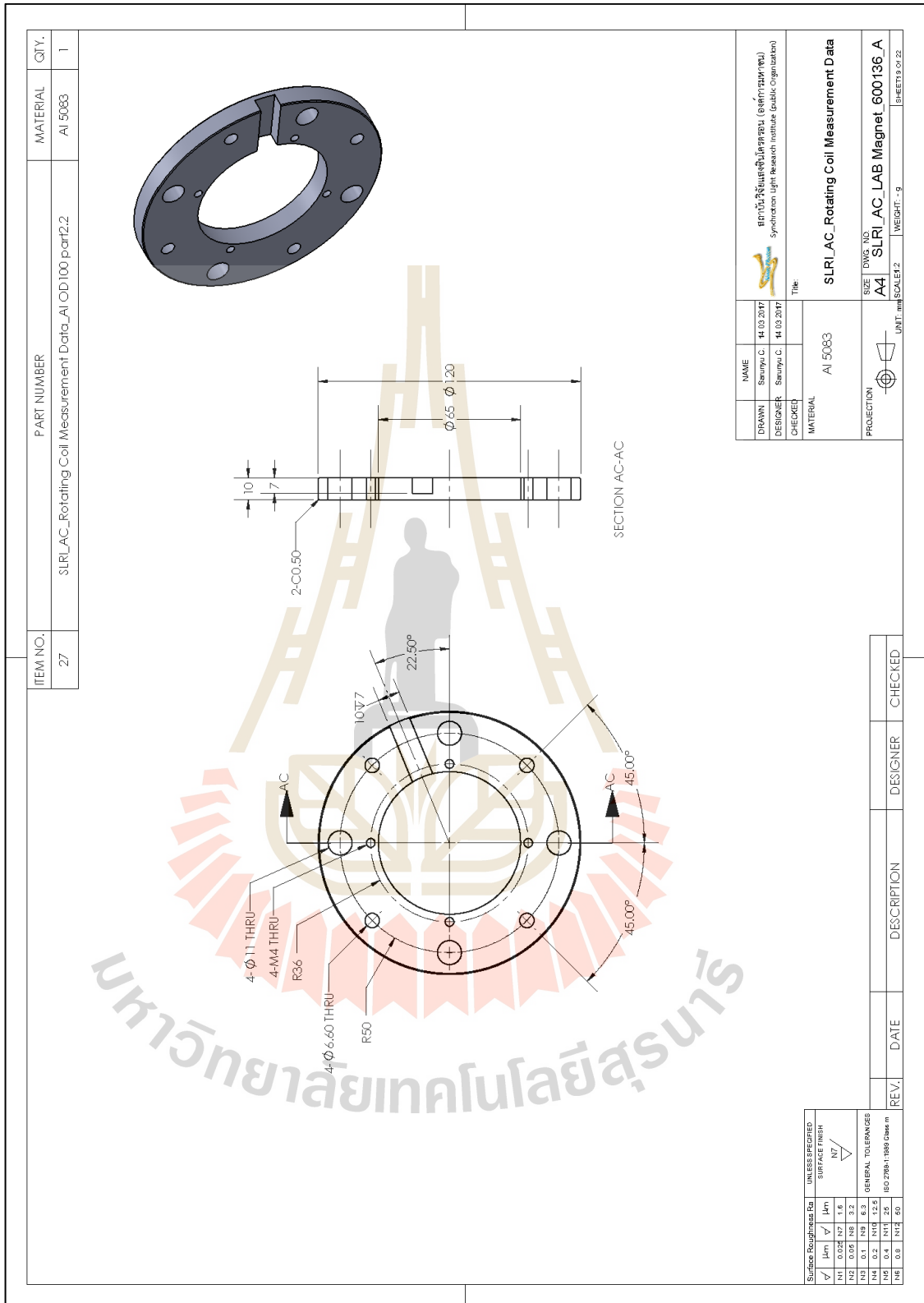




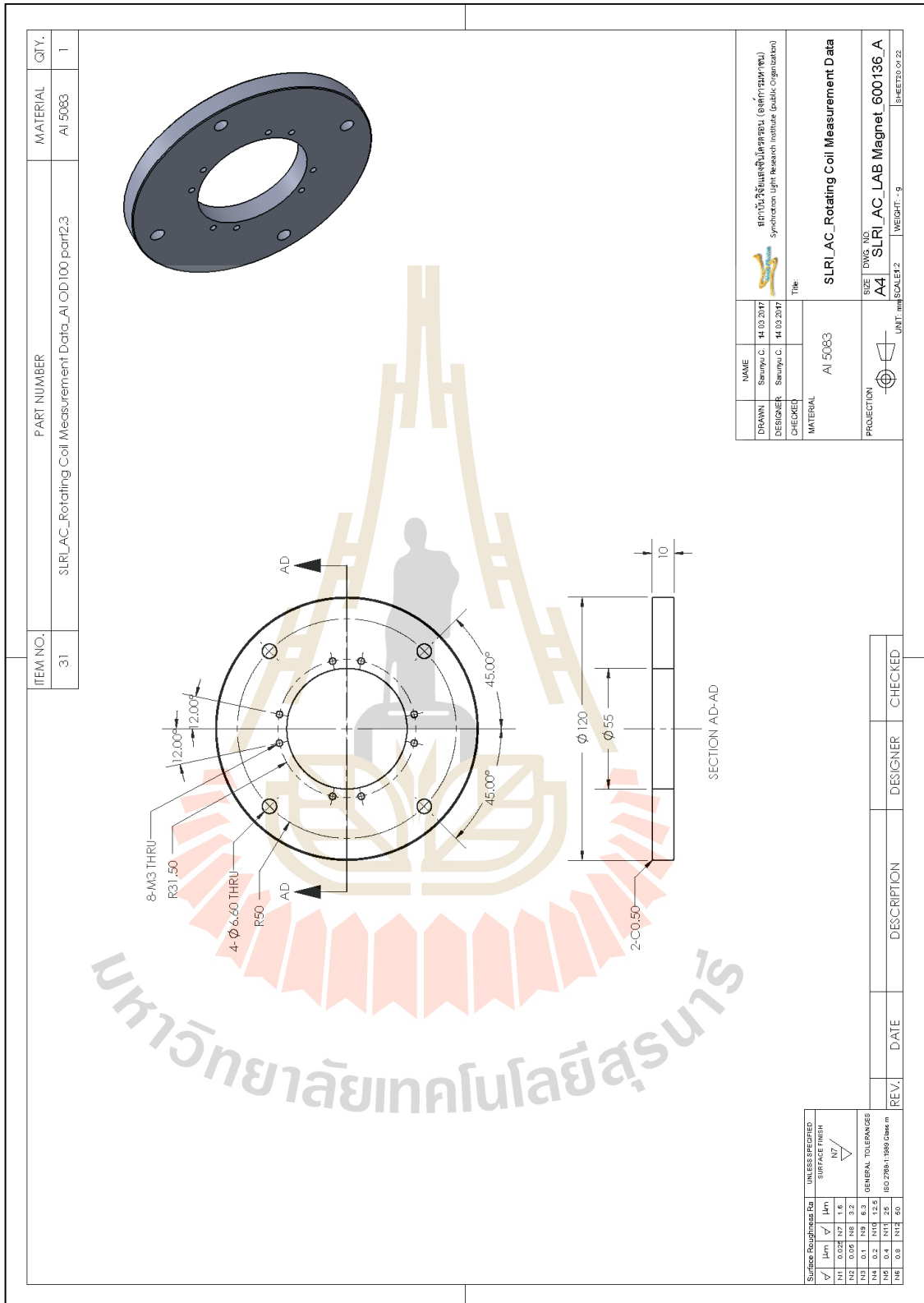
รูปที่ ก.17 แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 17



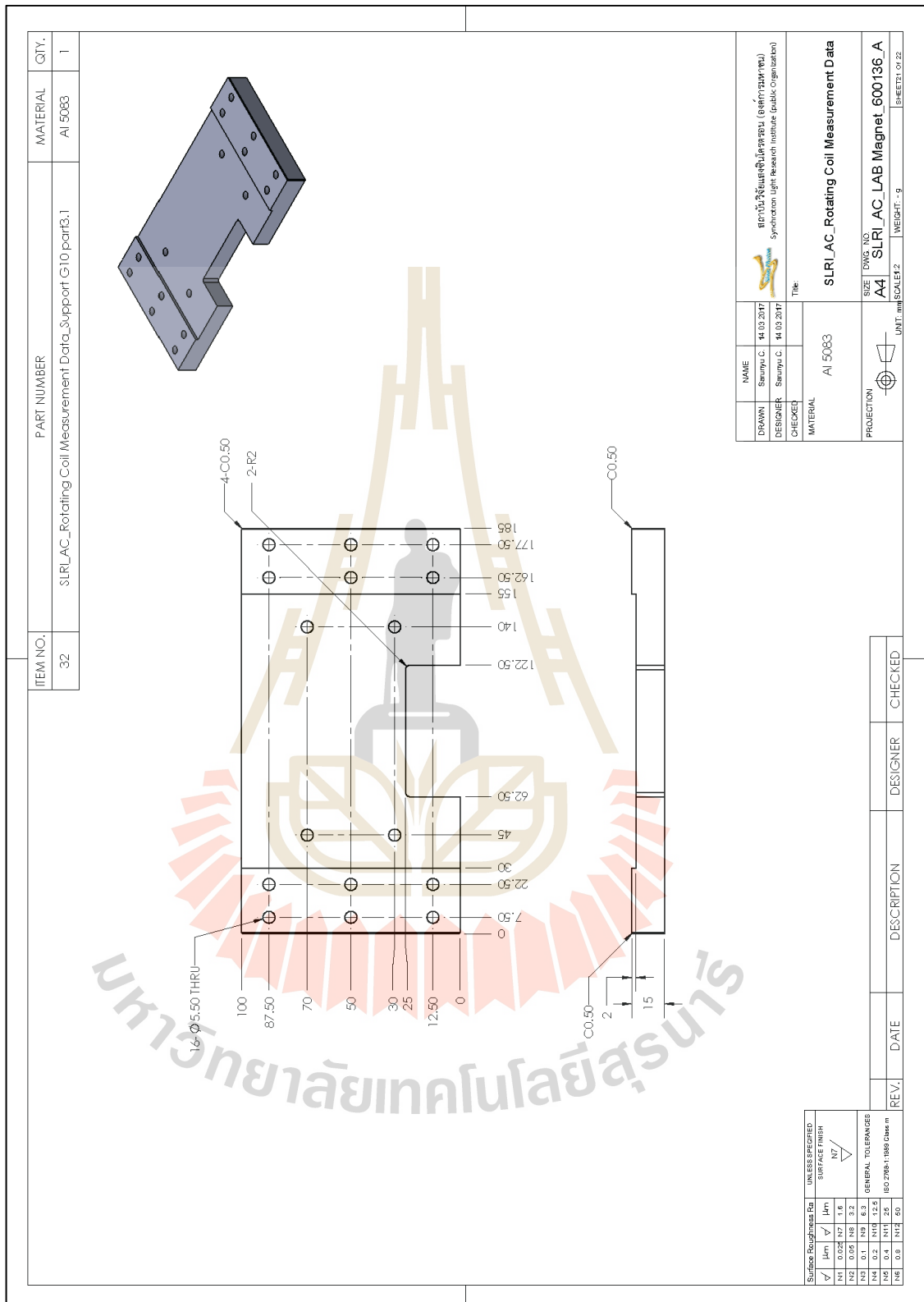
รูปที่ ก.18 แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 18



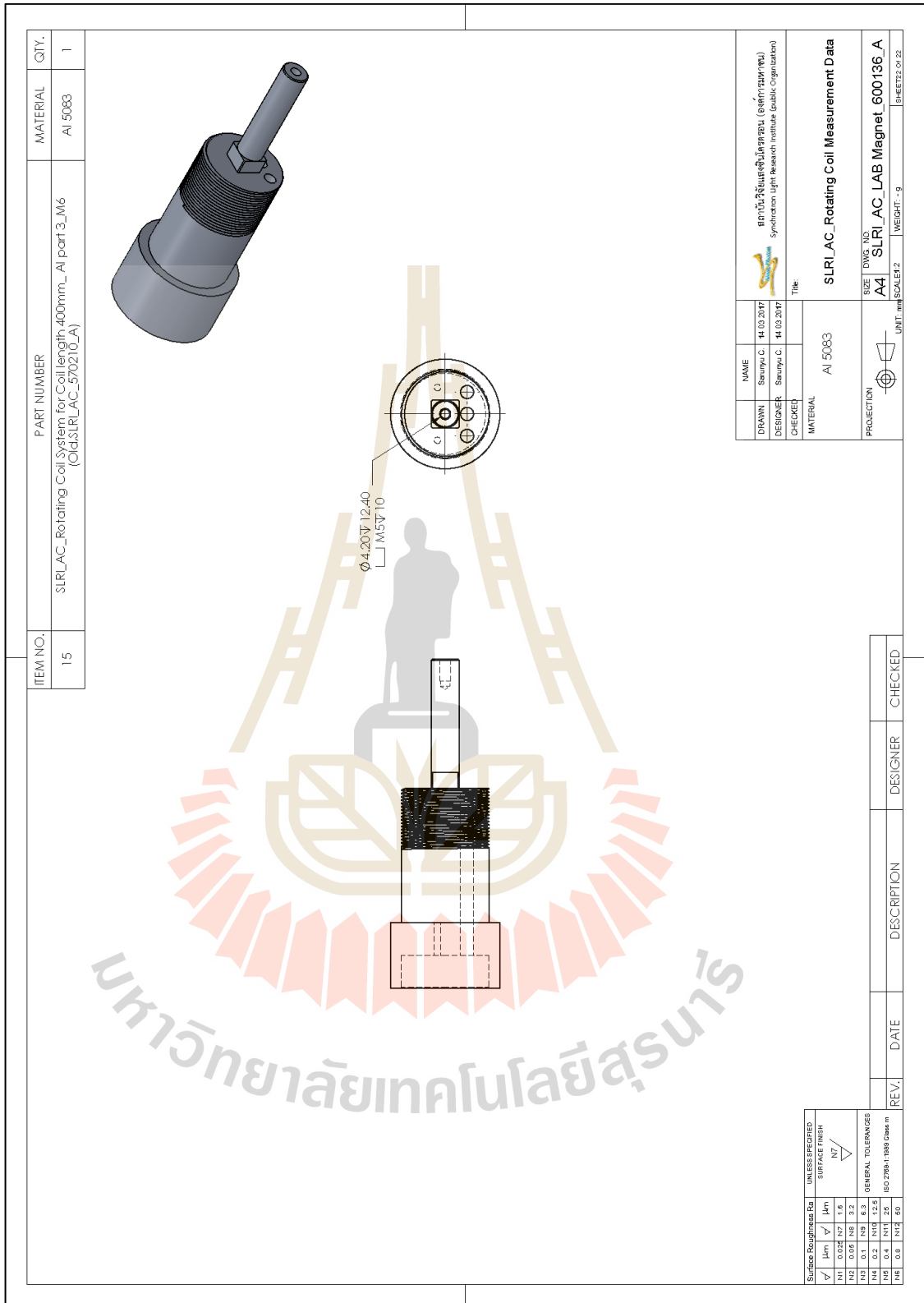
รูปที่ ก.19 แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีชดวาทมนุแผนที่ 19



รูปที่ ก.20 แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 20



รูปที่ ก.21 แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 21



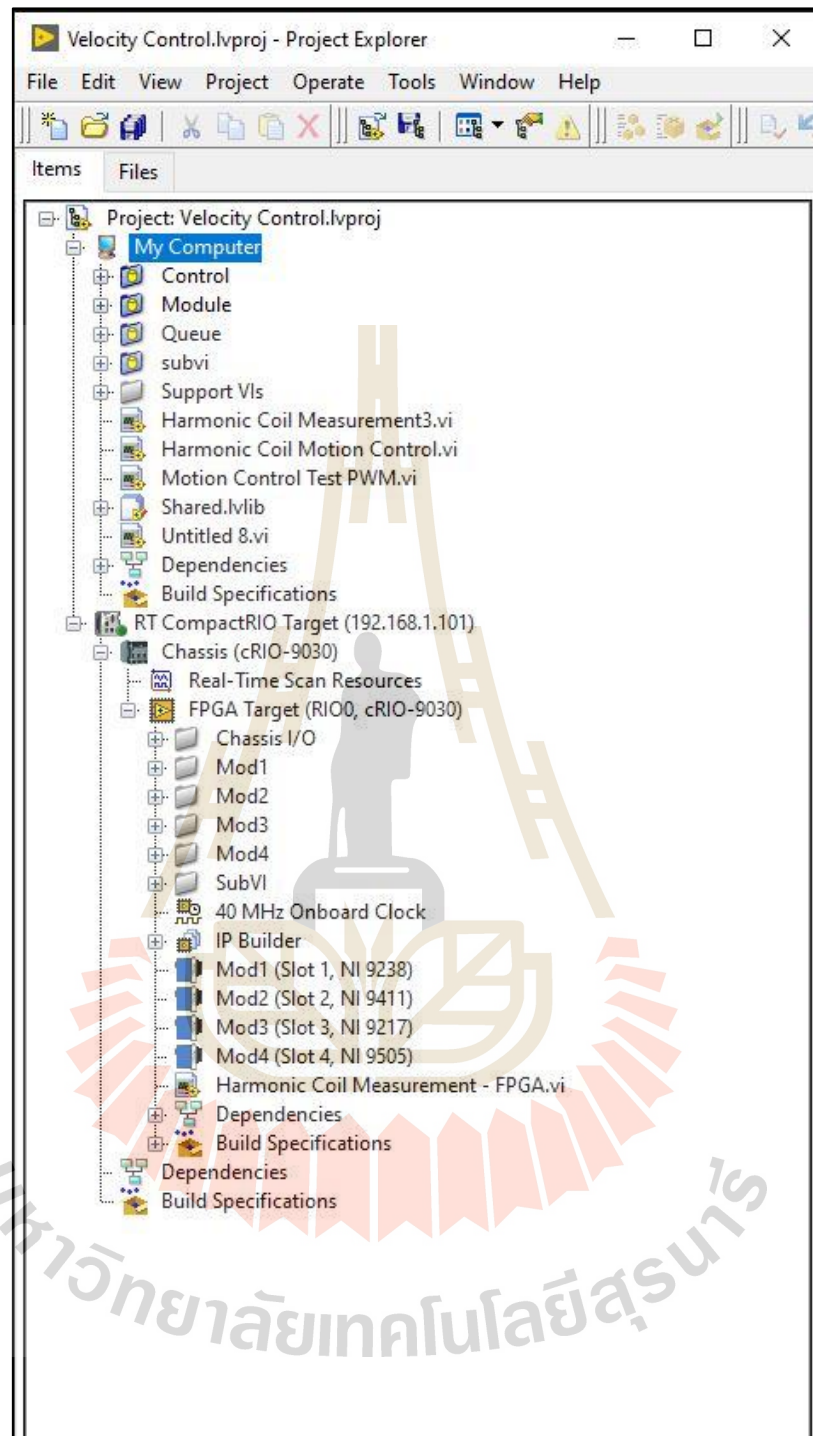
รูปที่ ก.22 แบบทางวิศวกรรมของอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนแผ่นที่ 22



ภาคผนวก ข

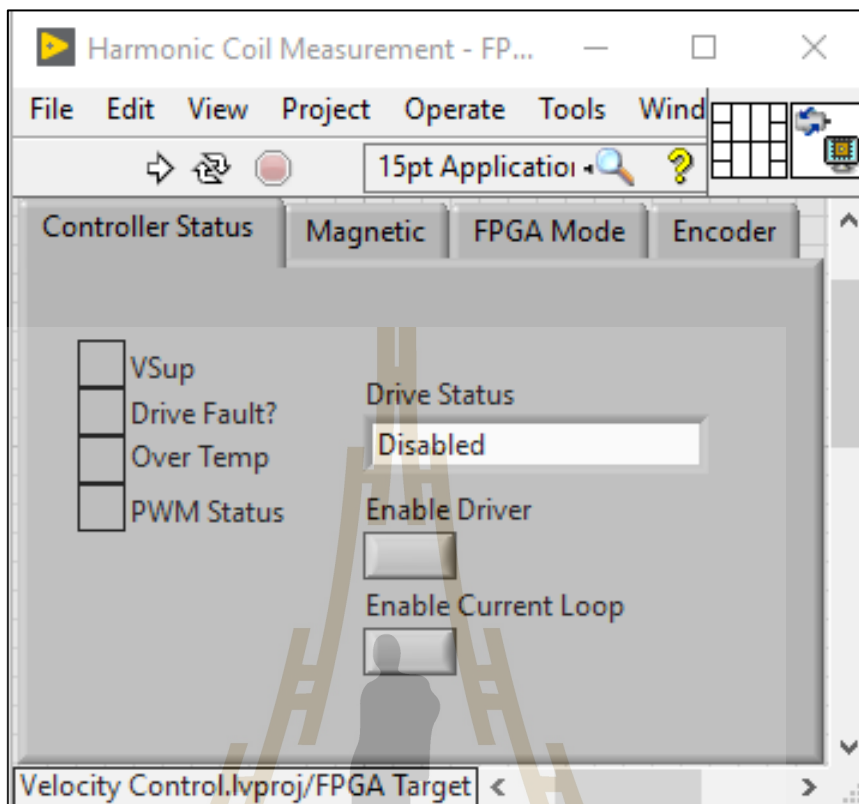
โปรแกรมควบคุม แสดงผล และเก็บข้อมูลของ  
อุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

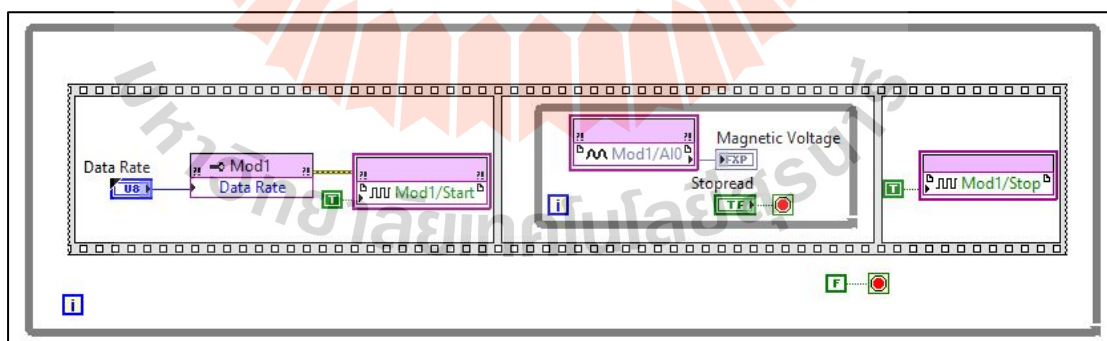


รูปที่ ๖.1 Main Project

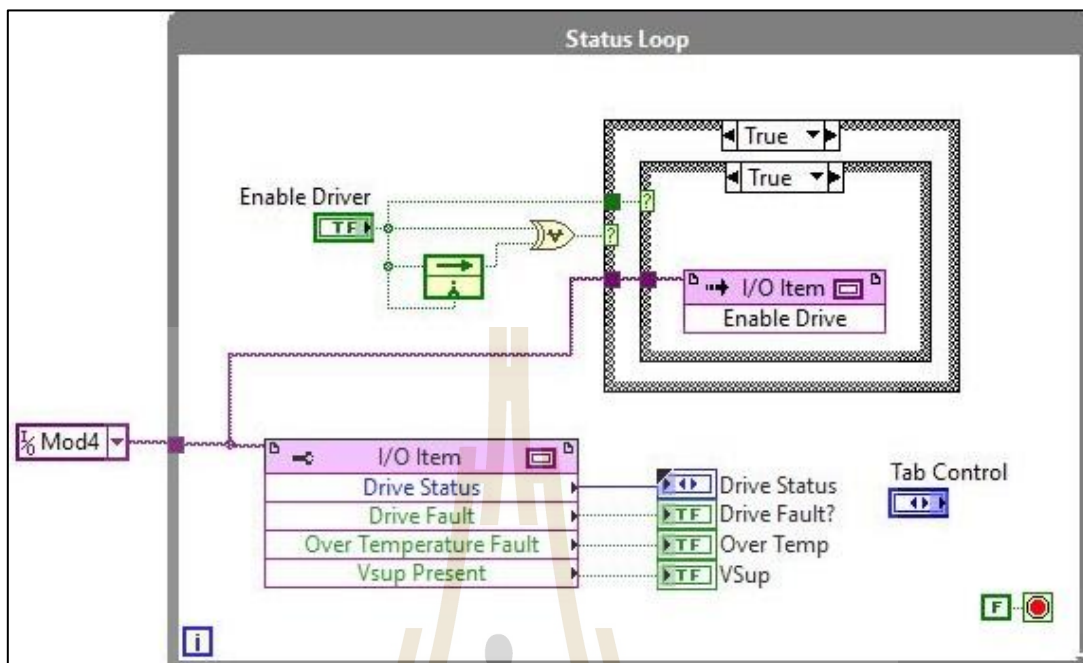




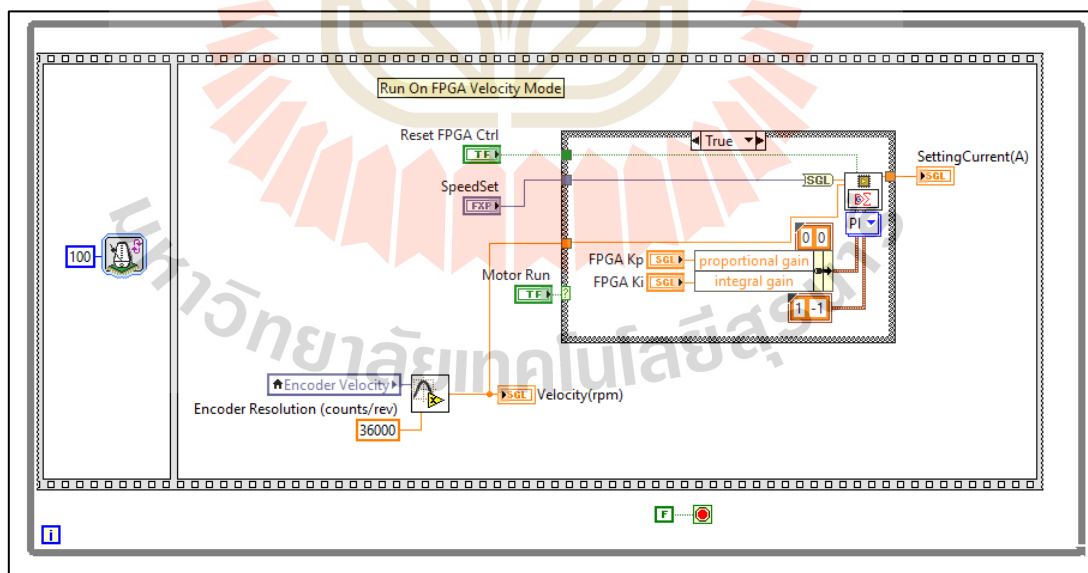
រូបទី ២.2 NI FPGA Front panel



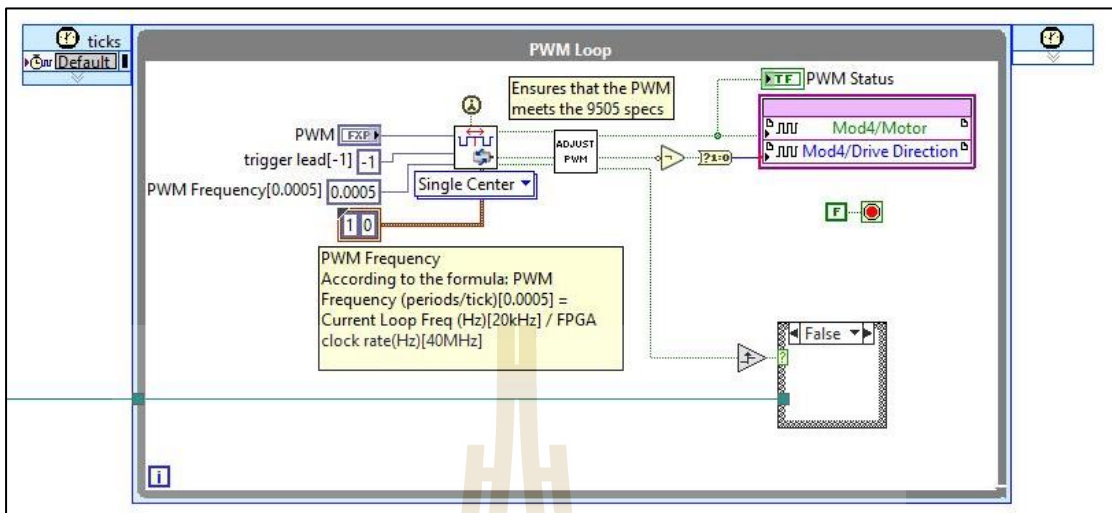
រូបទី ២.3 NI FPGA Block diagram 1



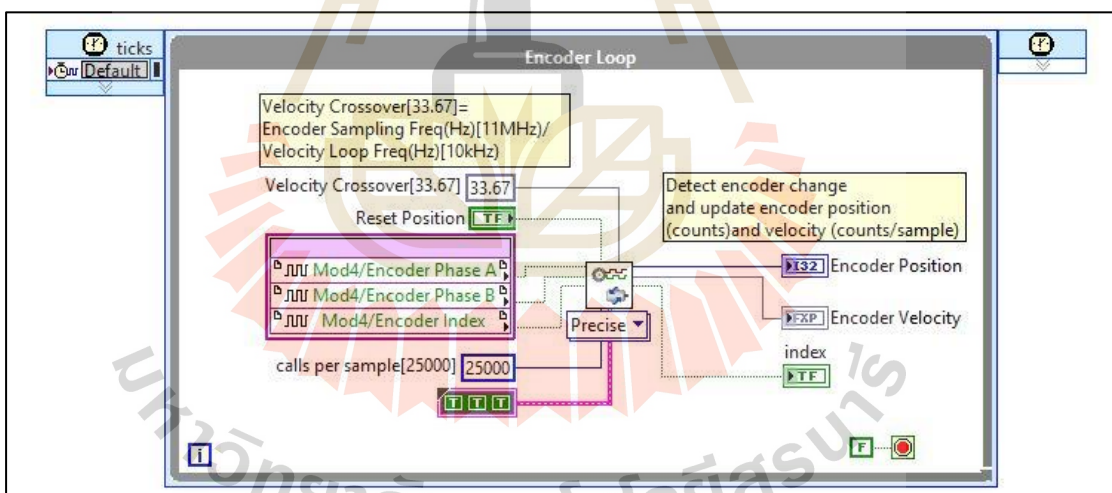
รูปที่ ข.4 NI FPGA Block diagram 2



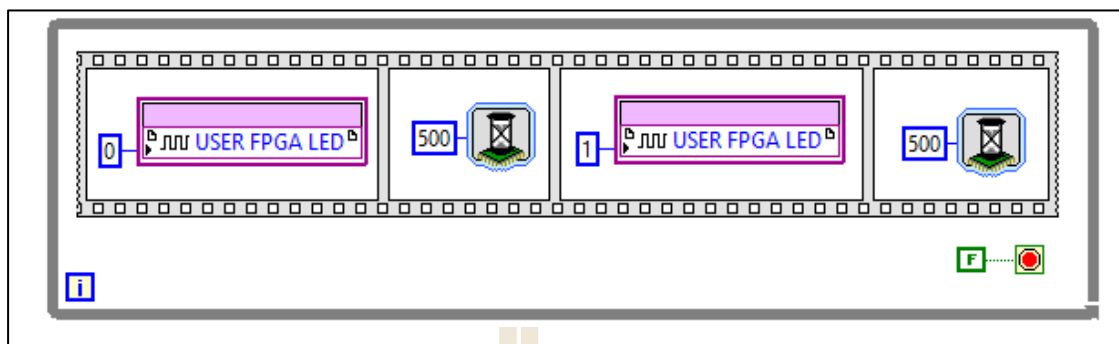
รูปที่ ข.5 NI FPGA Block diagram 3



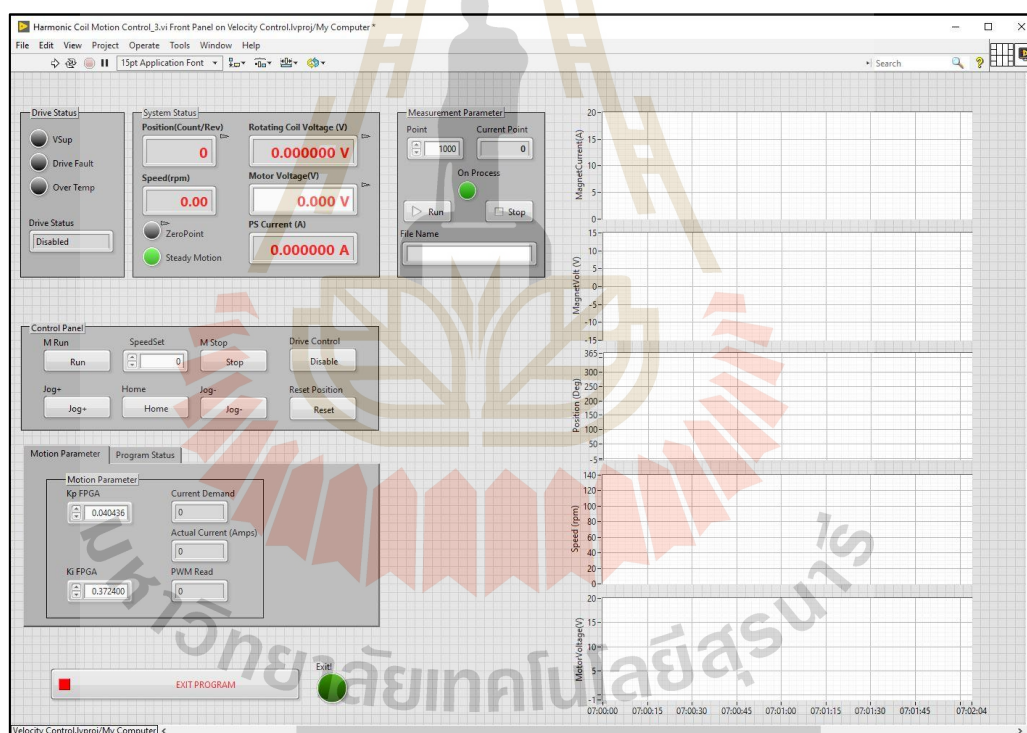
รูปที่ ๖.6 NI FPGA Block diagram 4



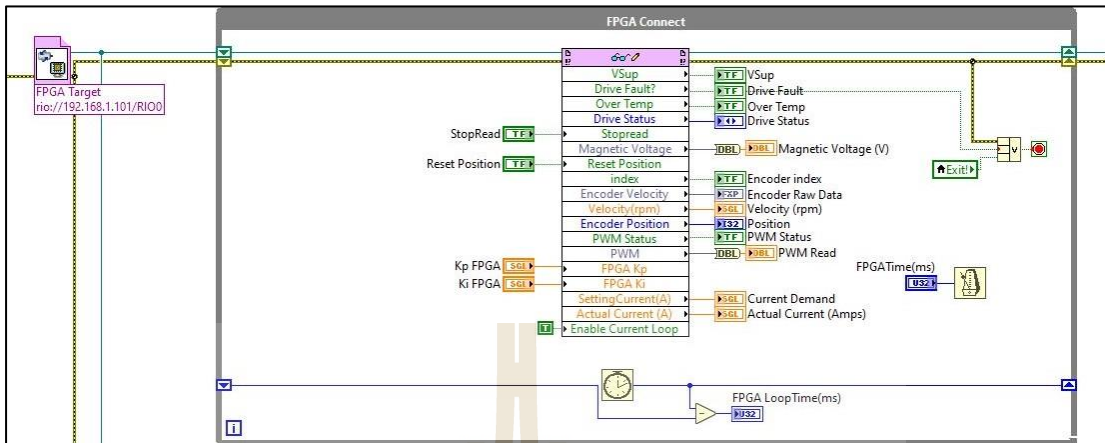
รูปที่ ๖.7 NI FPGA Block diagram 5



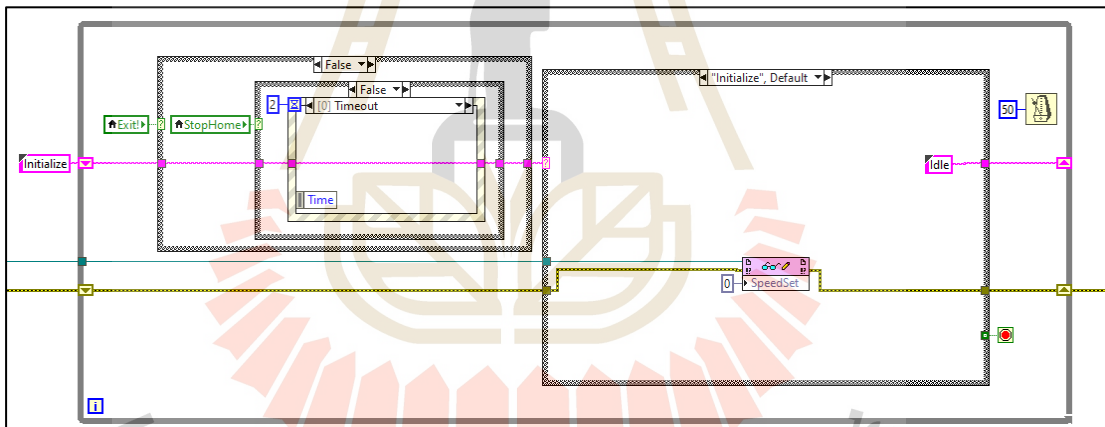
រូបភាព ៦.8 NI FPGA Block diagram 6



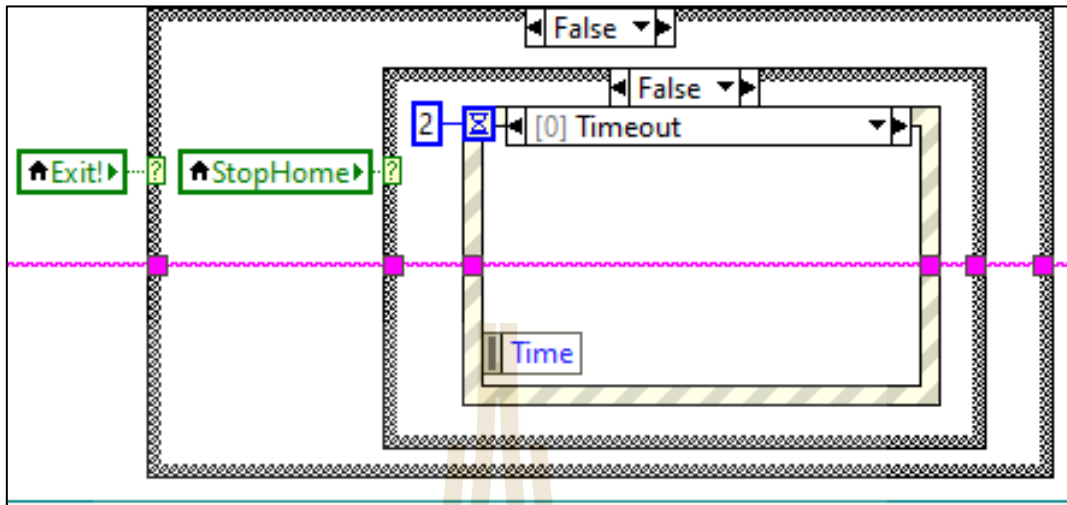
រូបភាព ៦.9 Main Program Front panel



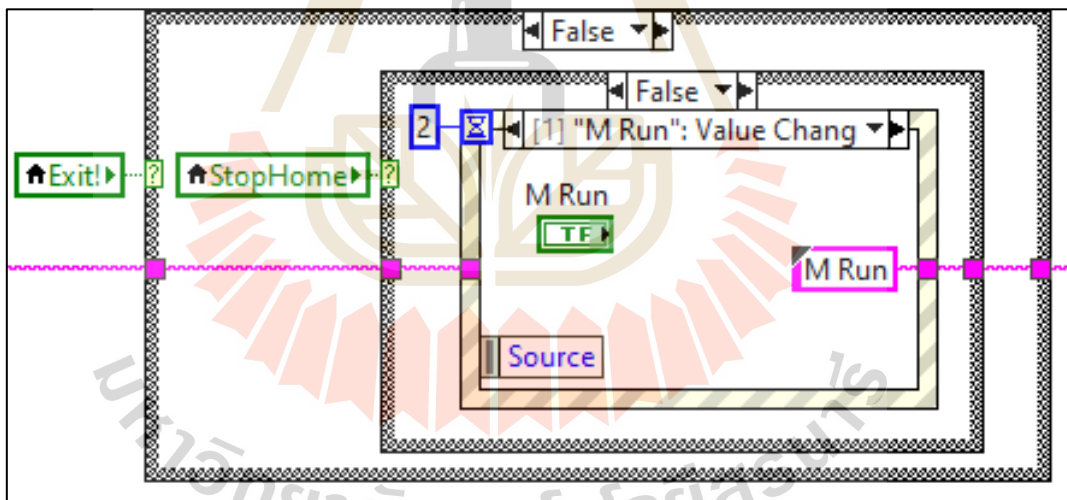
รูปที่ ข.10 Main Program Block diagram 1



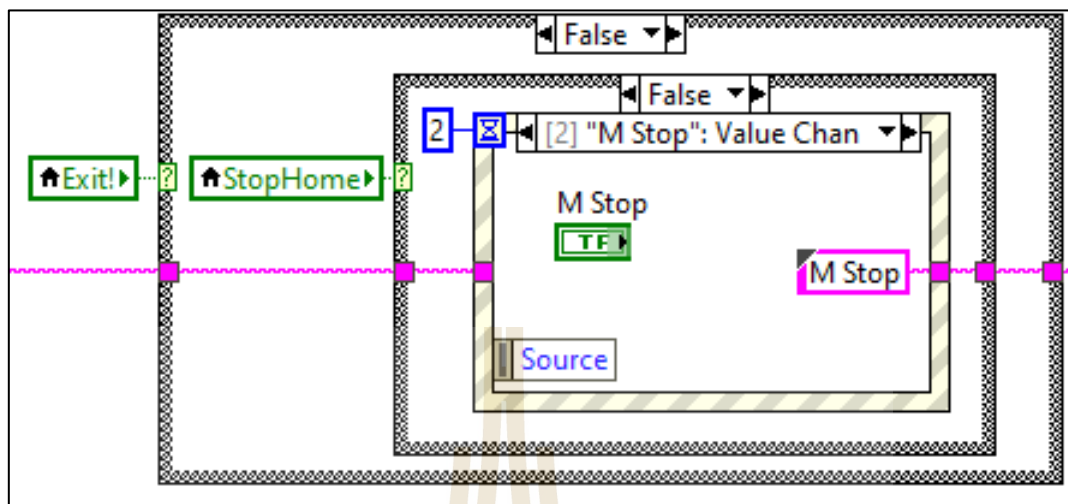
รูปที่ ข.11 Main Program Block diagram 2



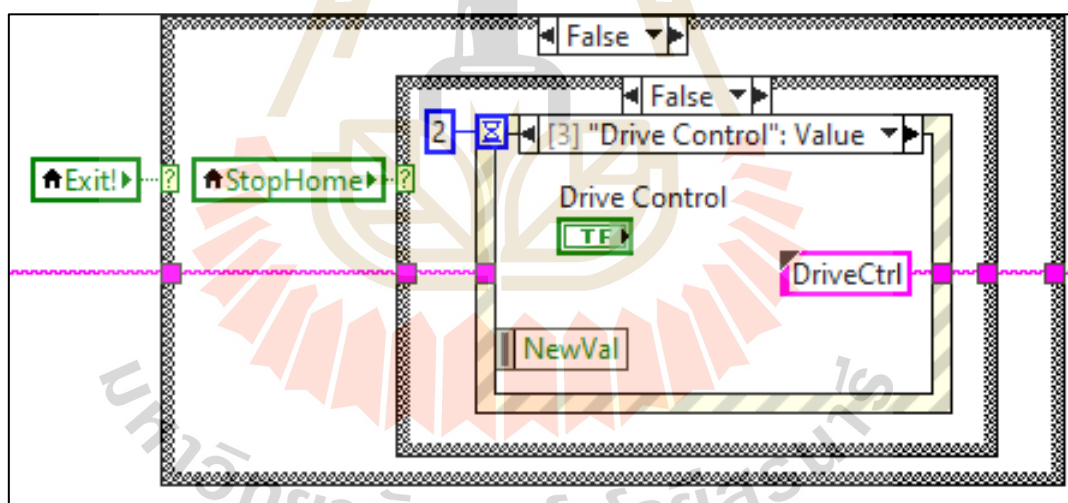
รูปที่ ข.12 Main Program Block diagram 3



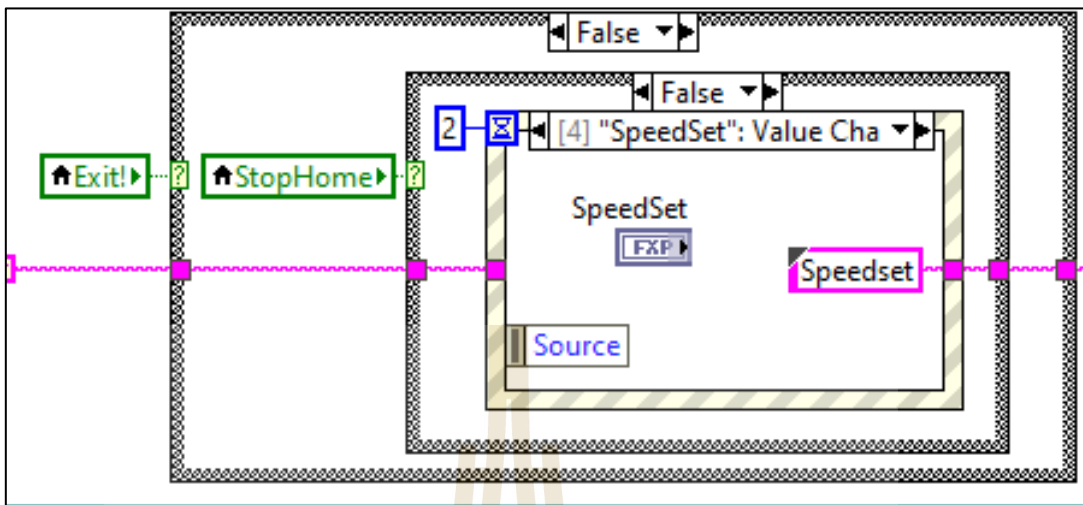
รูปที่ ข.13 Main Program Block diagram 4



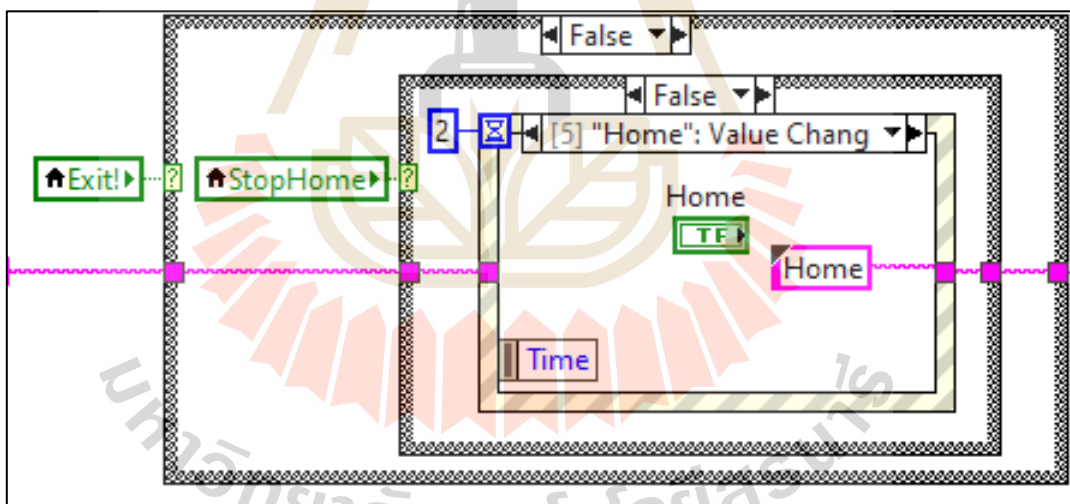
รูปที่ ข.14 Main Program Block diagram 5



รูปที่ ข.15 Main Program Block diagram 6

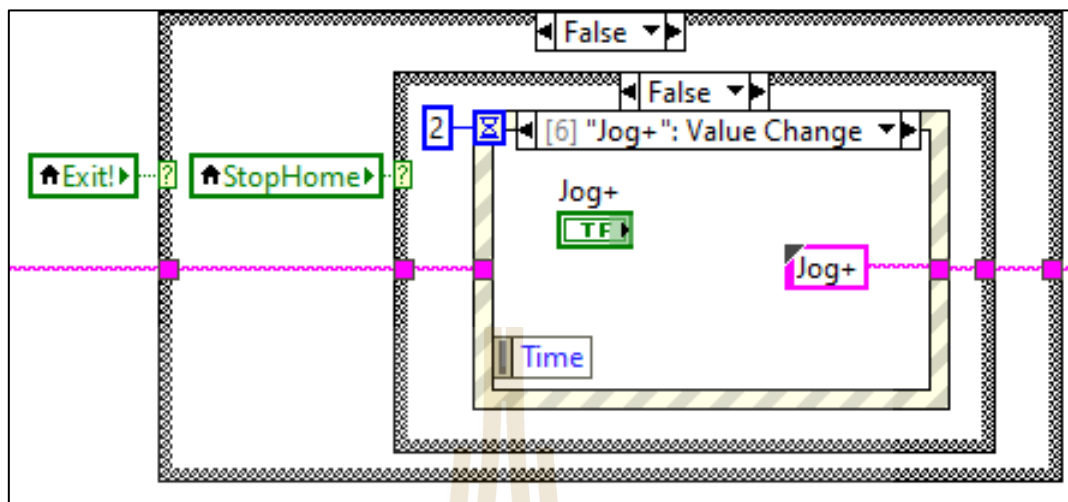


รูปที่ ข.16 Main Program Block diagram 7

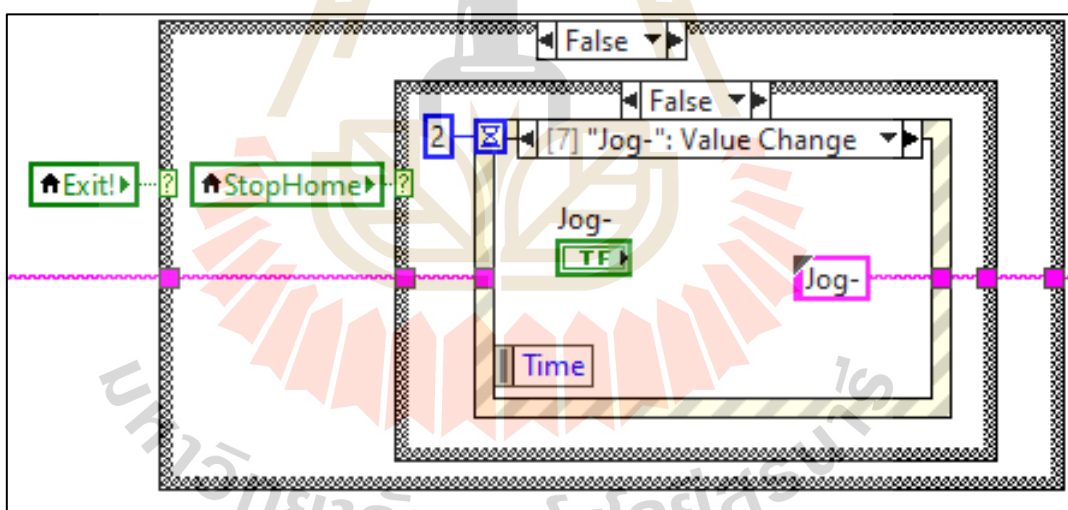


รูปที่ ข.17 Main Program Block diagram 8

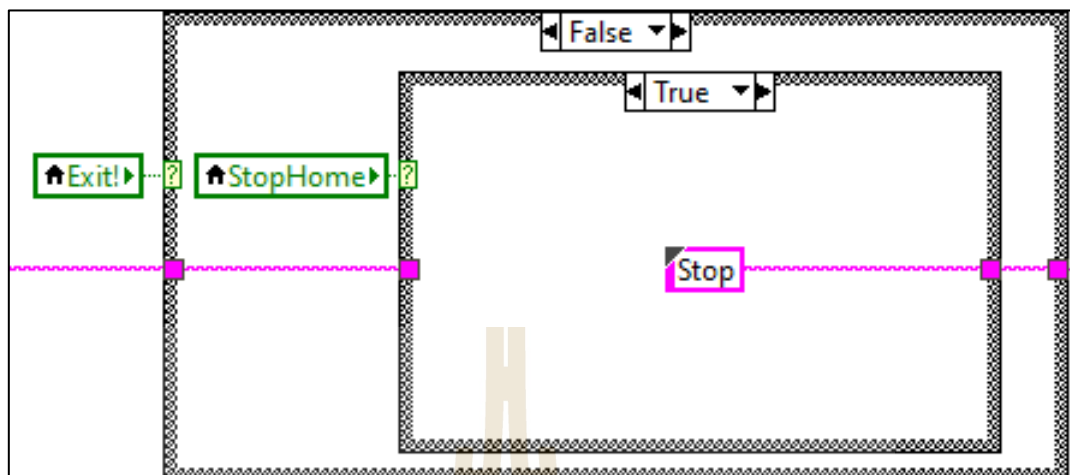




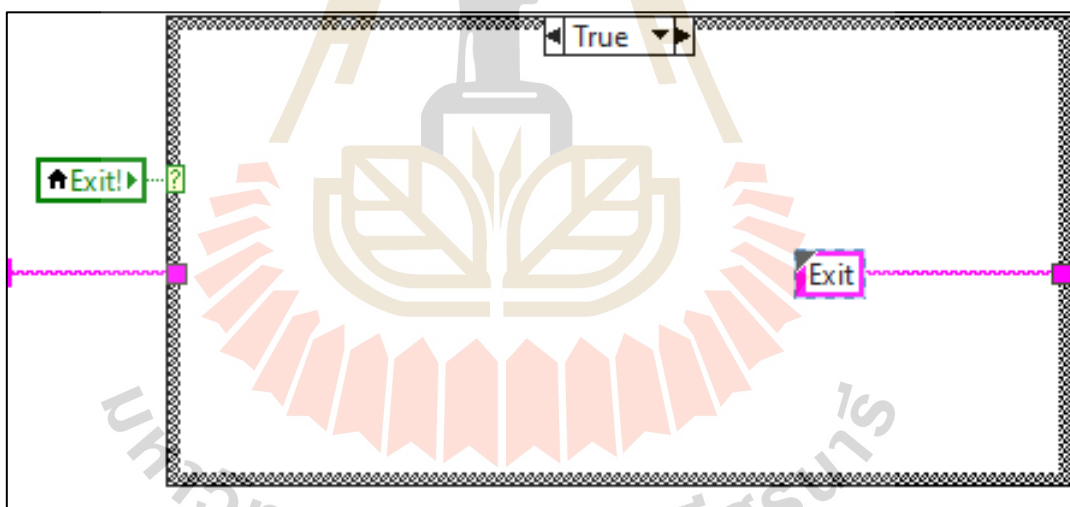
รูปที่ ข.18 Main Program Block diagram 9



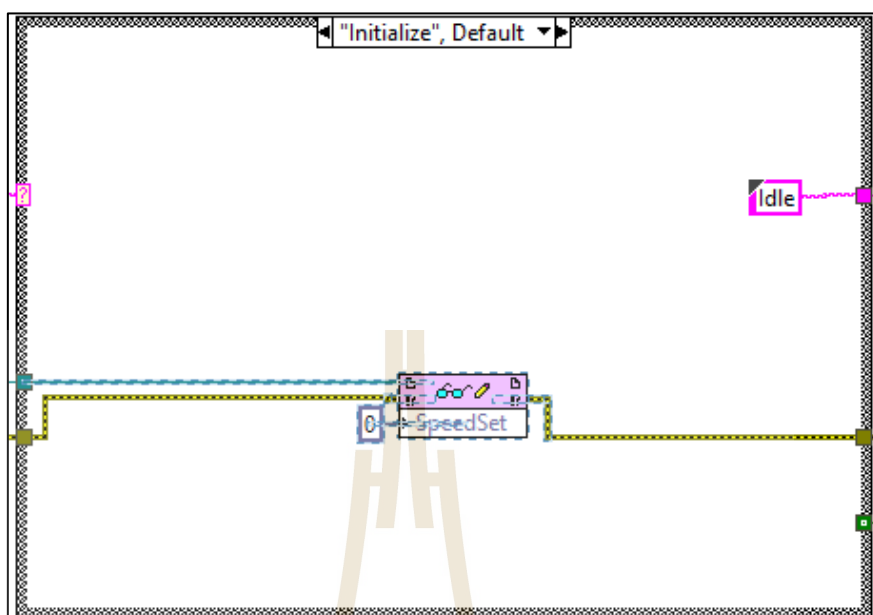
รูปที่ ข.19 Main Program Block diagram 10



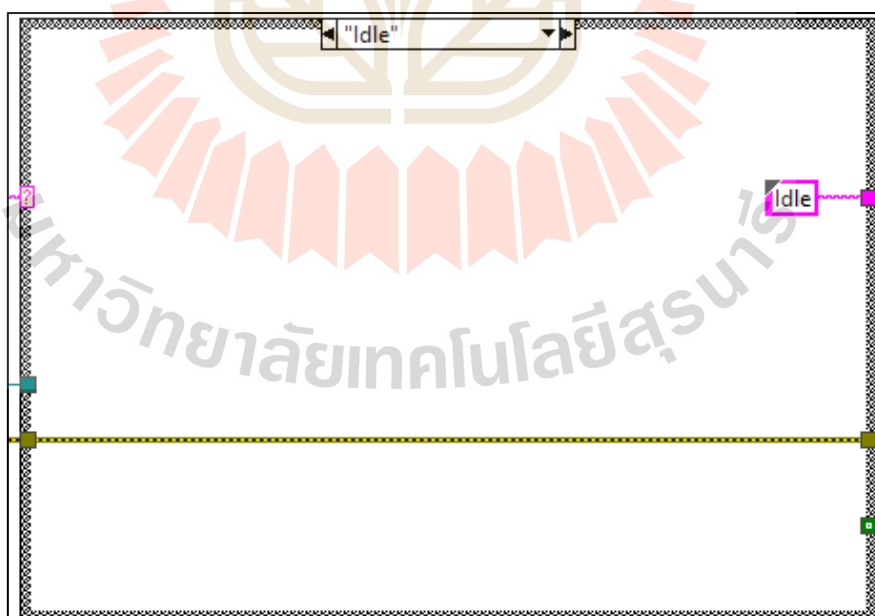
รูปที่ ข.20 Main Program Block diagram 11



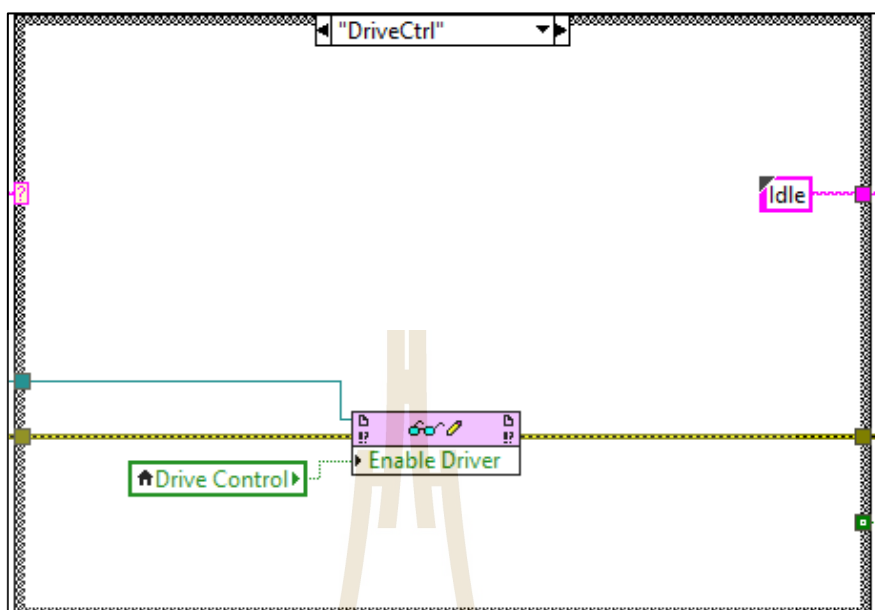
รูปที่ ข.21 Main Program Block diagram 12



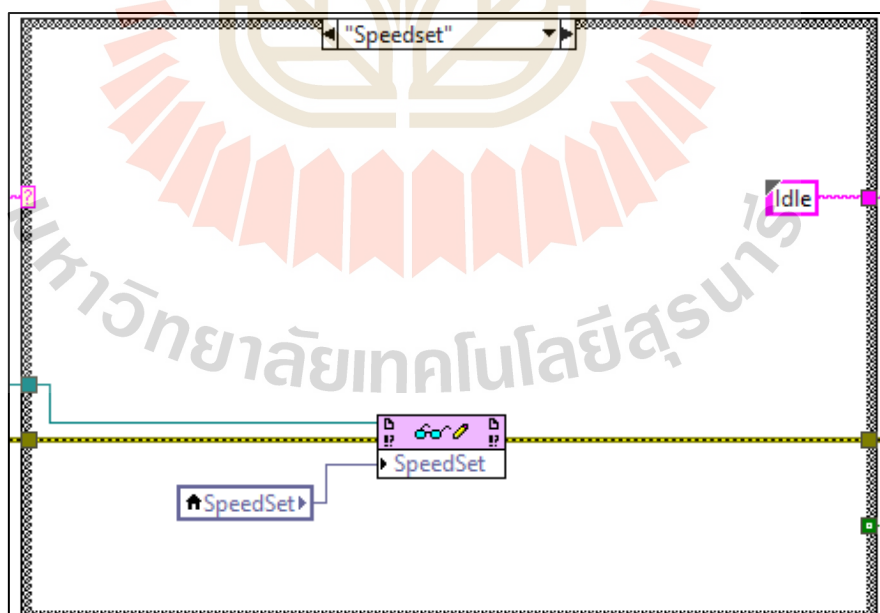
รูปที่ ข.22 Main Program Block diagram 13



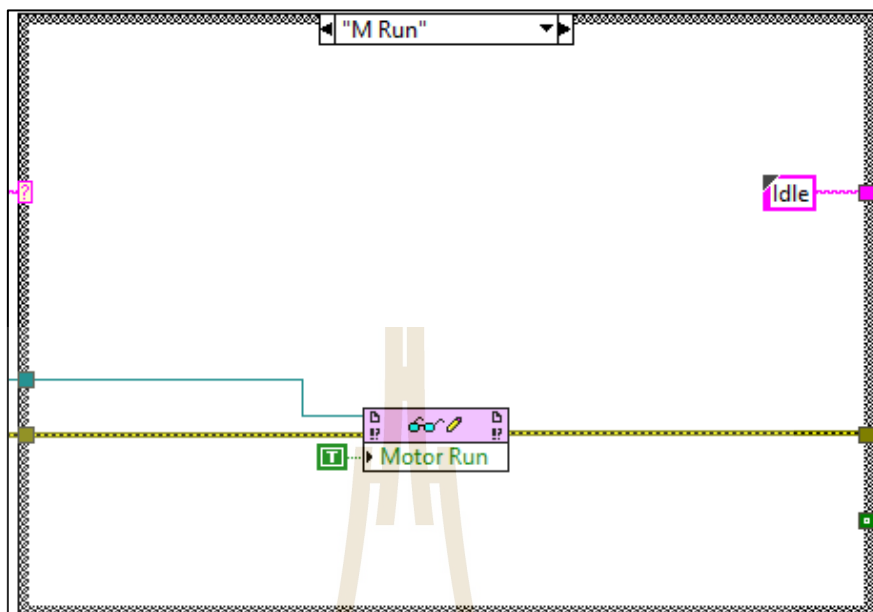
รูปที่ ข.23 Main Program Block diagram 14



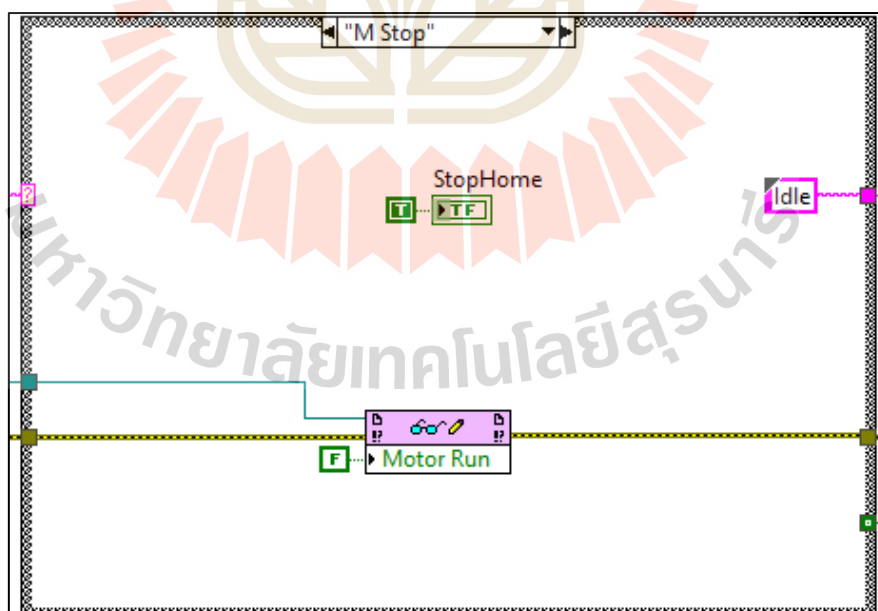
รูปที่ ข.24 Main Program Block diagram 15



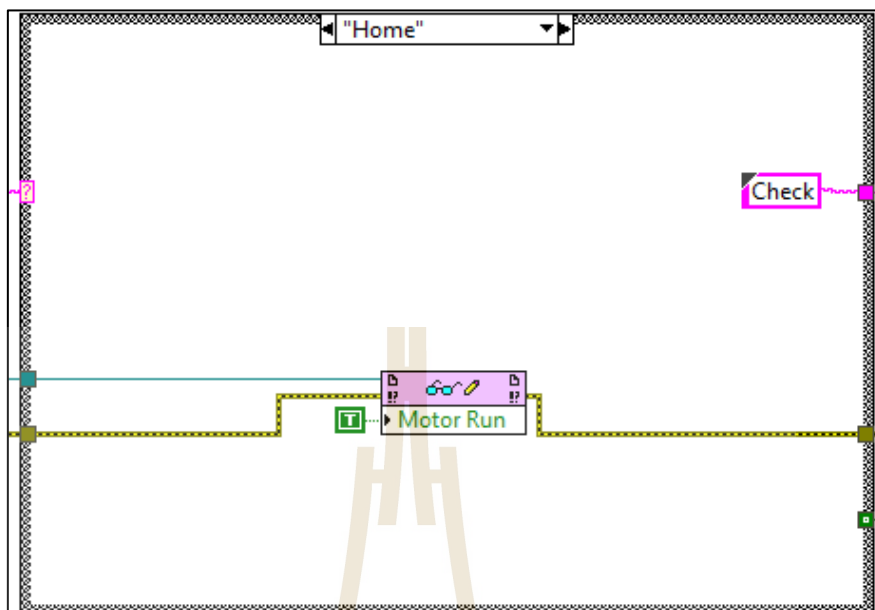
รูปที่ ข.25 Main Program Block diagram 16



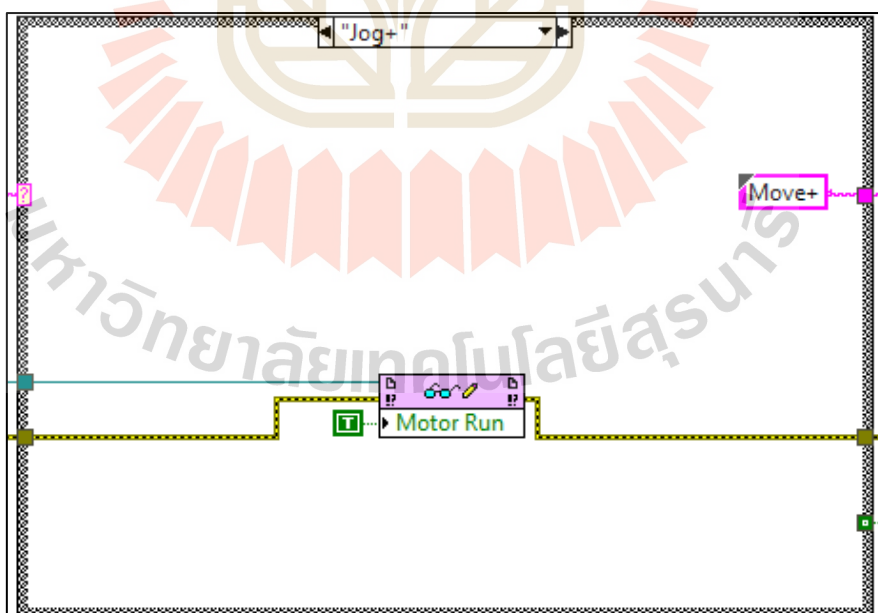
รูปที่ ข.26 Main Program Block diagram 17



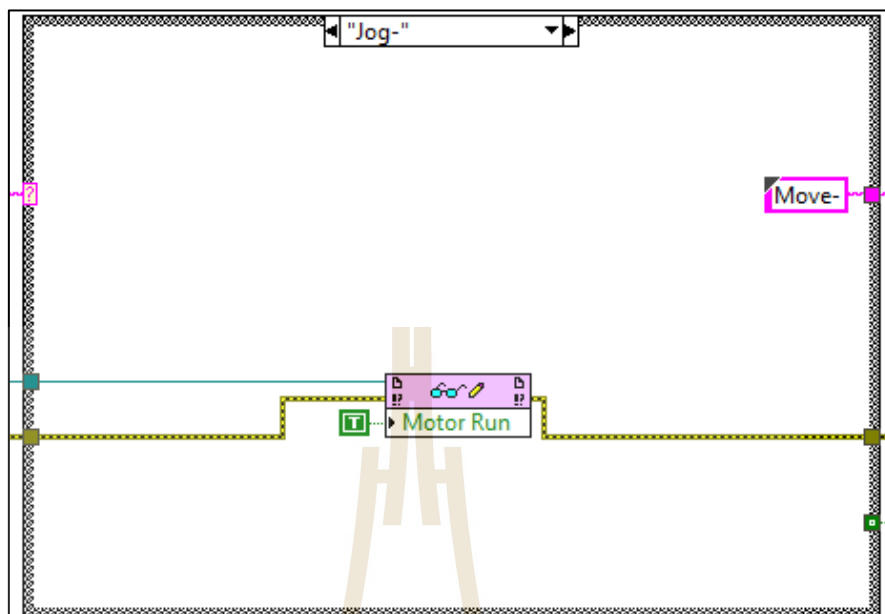
รูปที่ ข.27 Main Program Block diagram 18



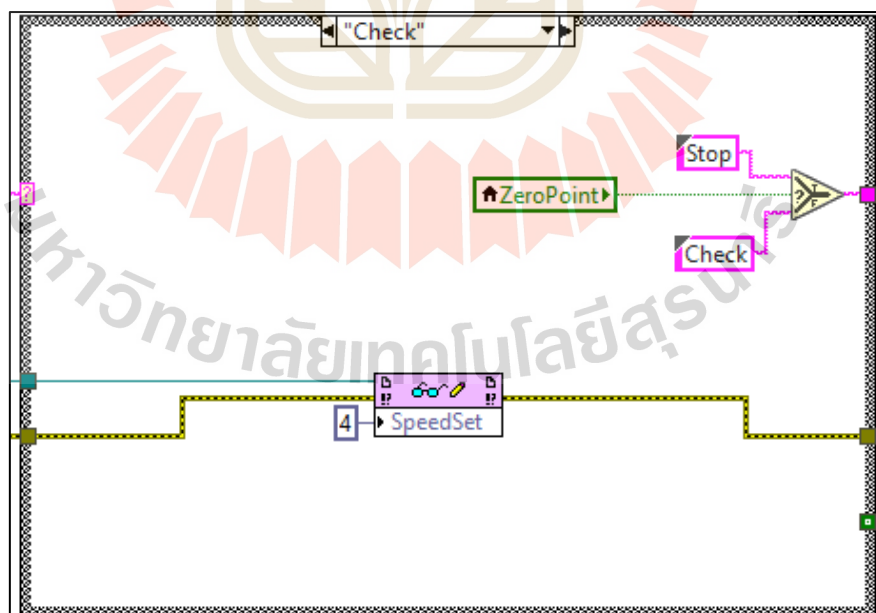
รูปที่ ข.28 Main Program Block diagram 19



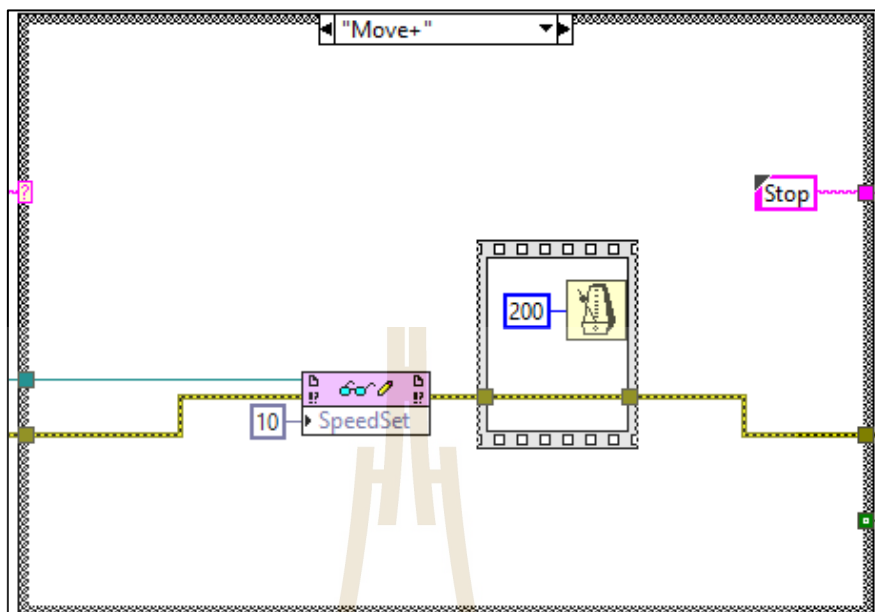
รูปที่ ข.29 Main Program Block diagram 20



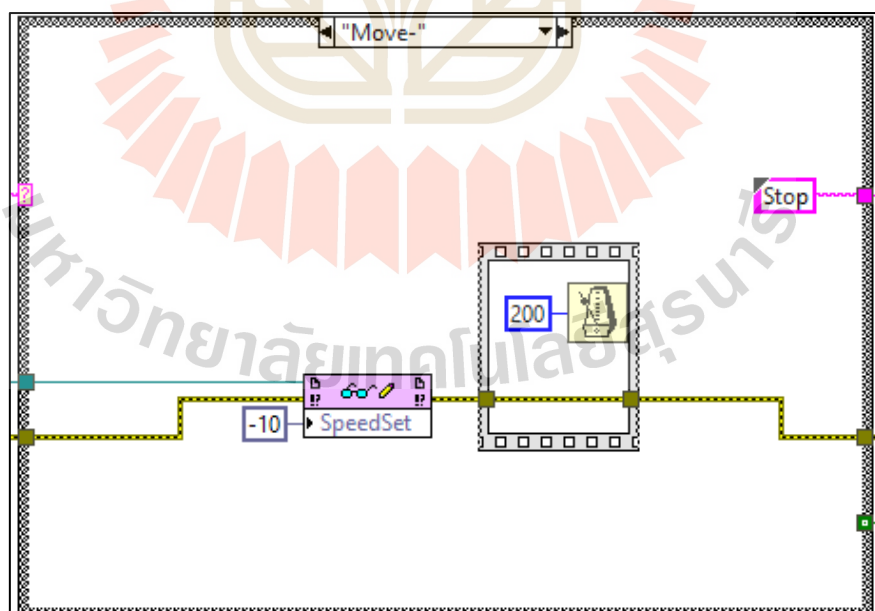
รูปที่ ข.30 Main Program Block diagram 21



รูปที่ ข.31 Main Program Block diagram 22

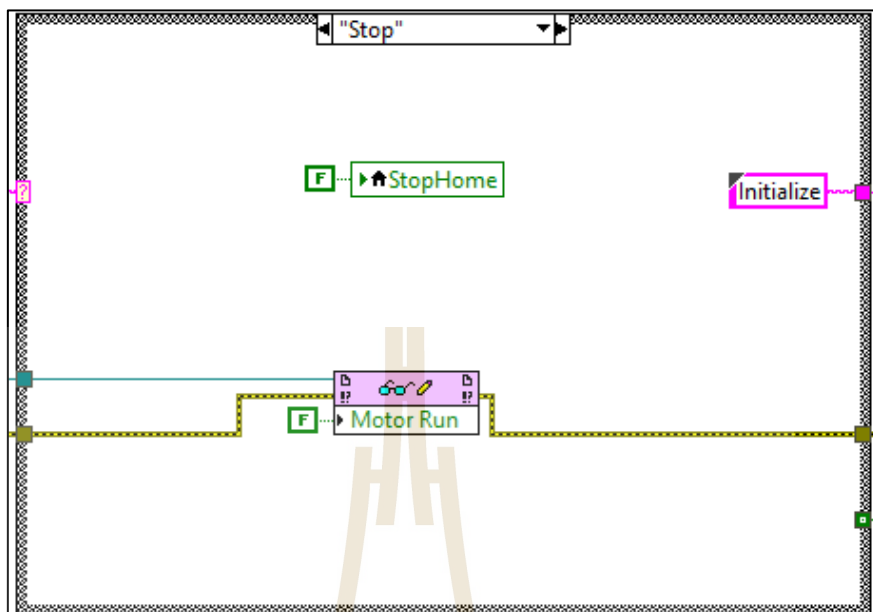


รูปที่ ข.32 Main Program Block diagram 23

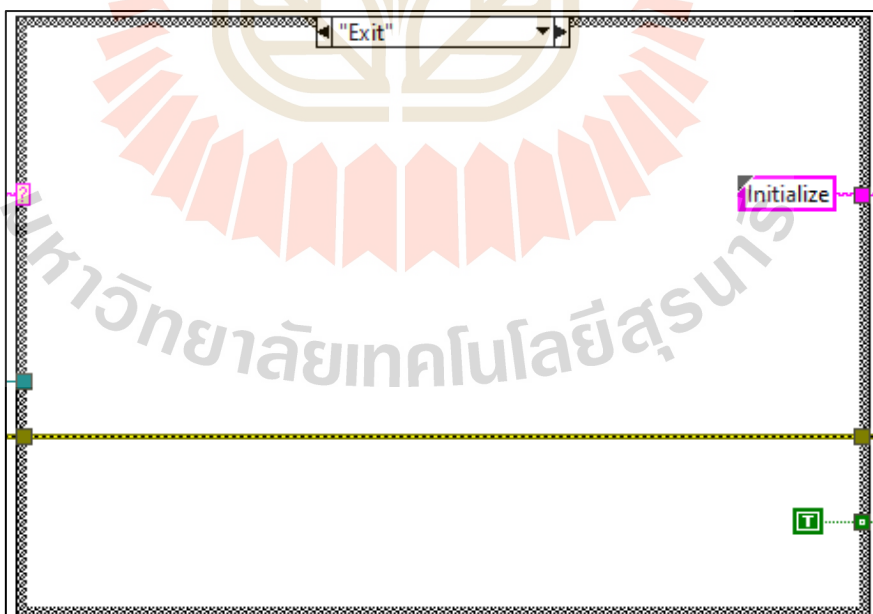


รูปที่ ข.33 Main Program Block diagram 24

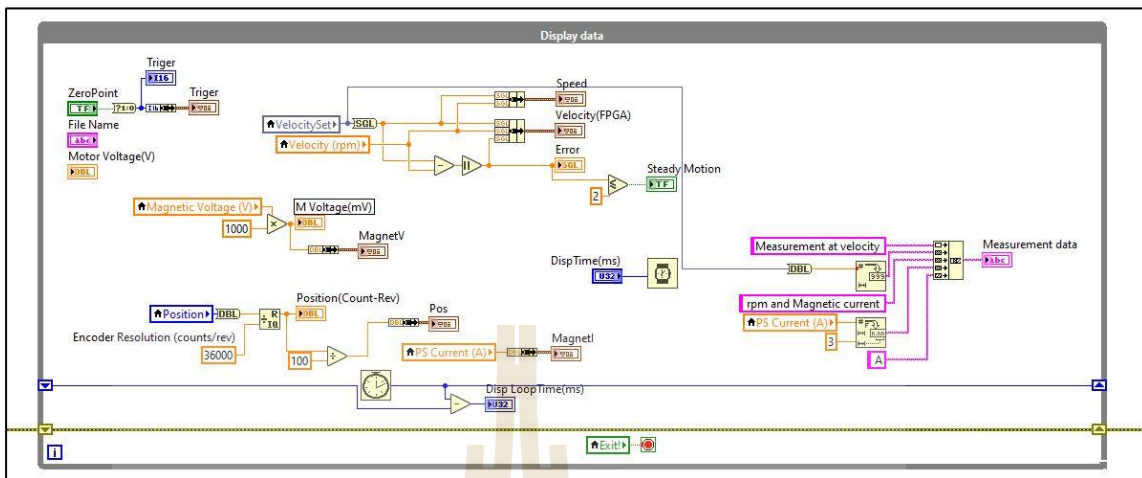




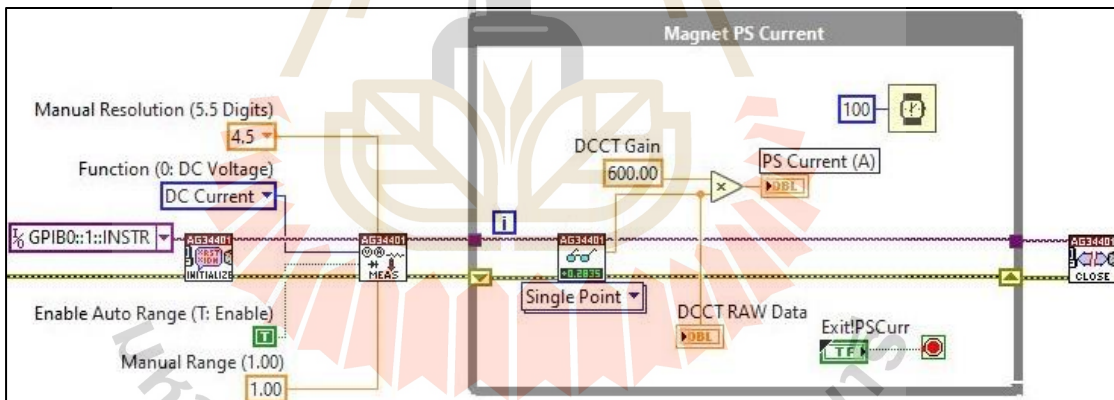
รูปที่ ข.34 Main Program Block diagram 25



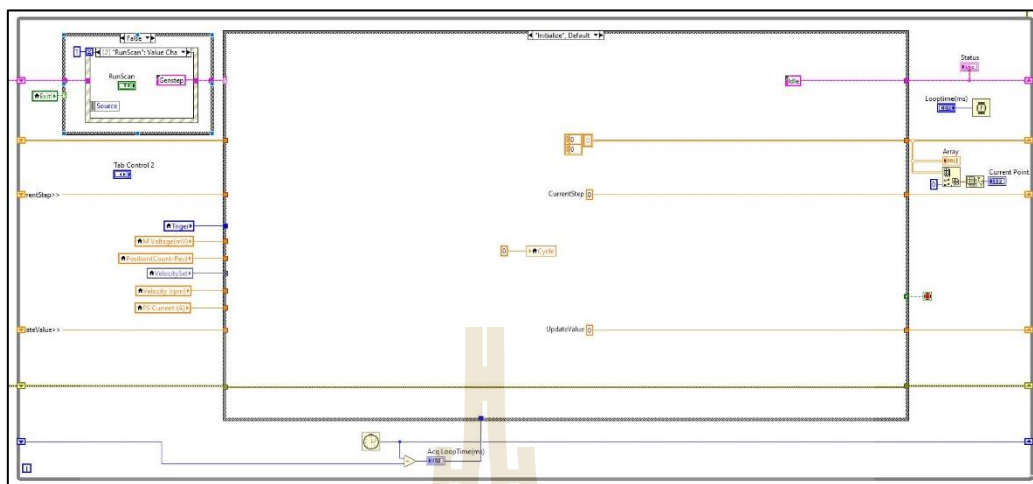
รูปที่ ข.35 Main Program Block diagram 26



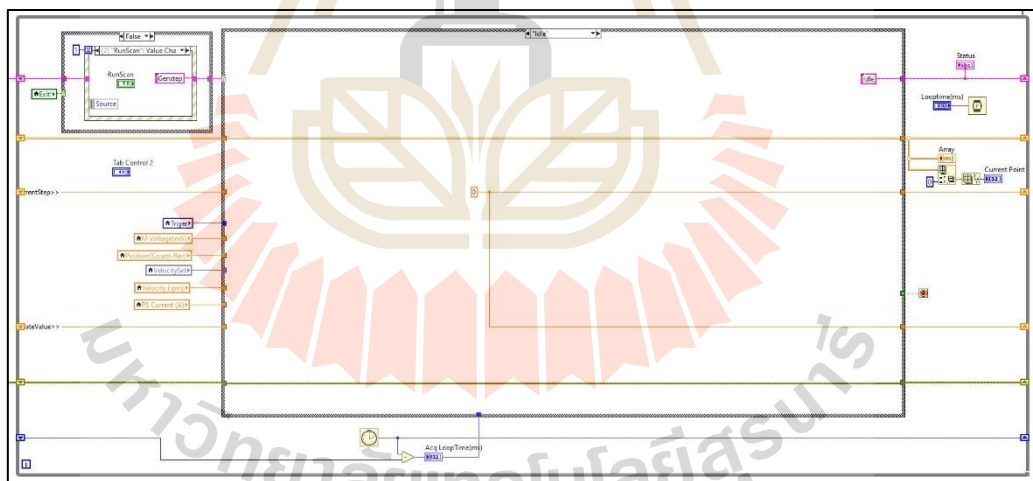
รูปที่ ๓.36 Main Program Block diagram 27



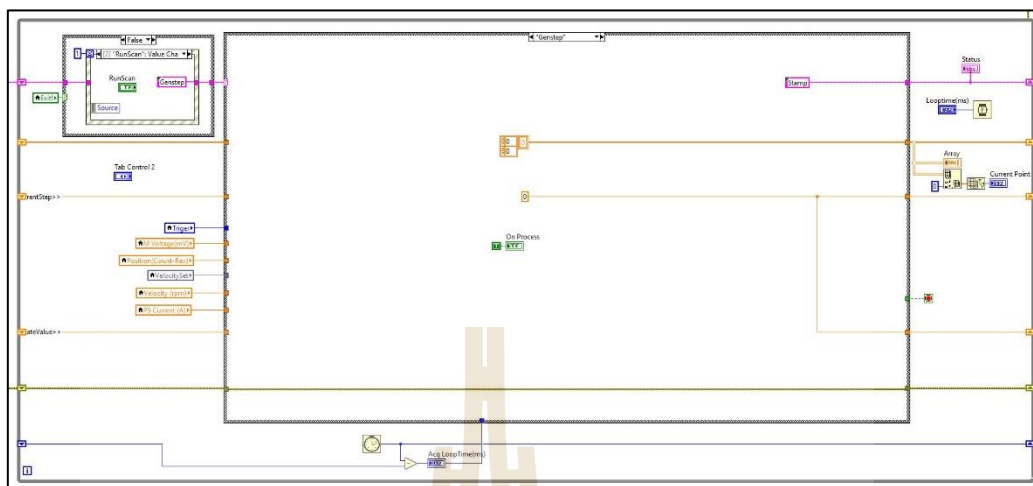
รูปที่ ๓.37 Main Program Block diagram 28



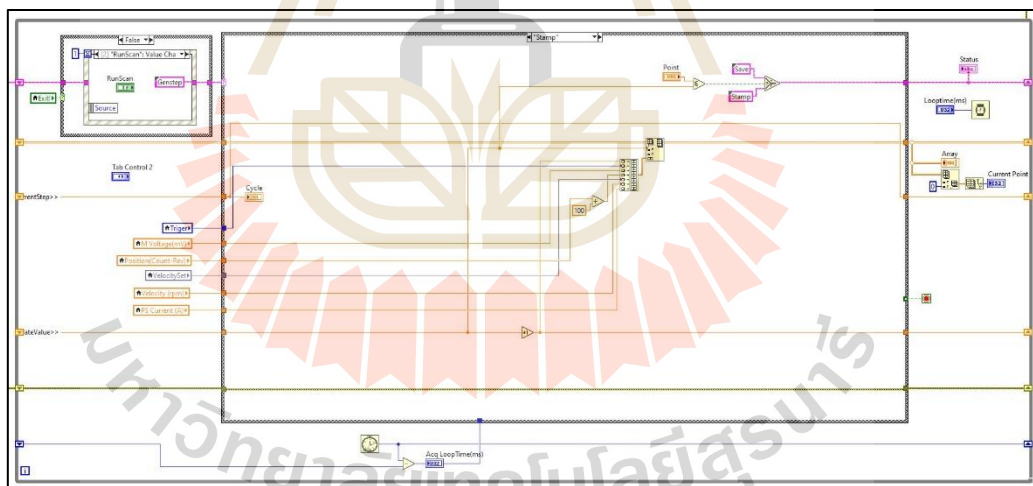
รูปที่ ข.38 Main Program Block diagram 29



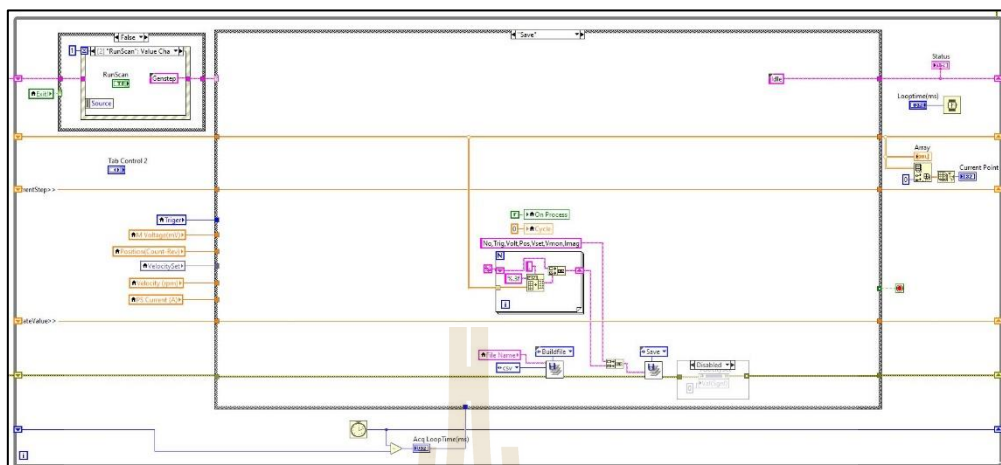
รูปที่ ข.39 Main Program Block diagram 30



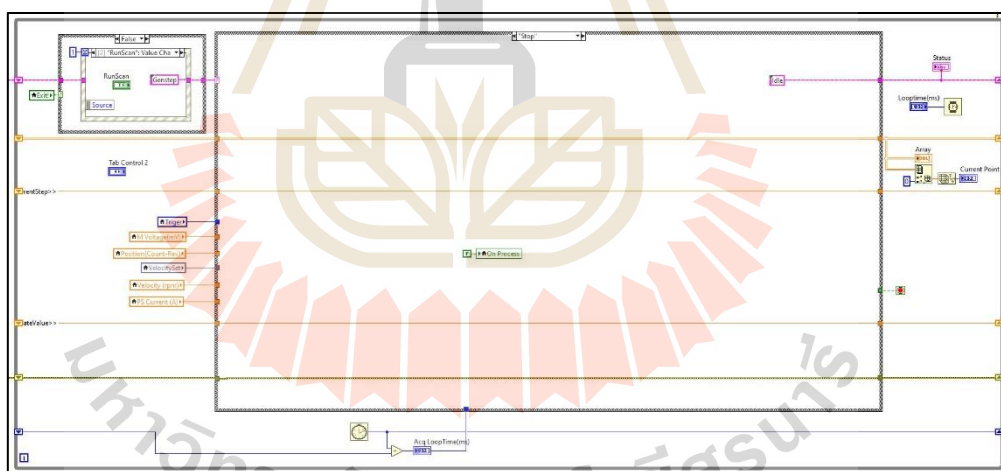
รูปที่ ข.40 Main Program Block diagram 31



รูปที่ ข.41 Main Program Block diagram 32



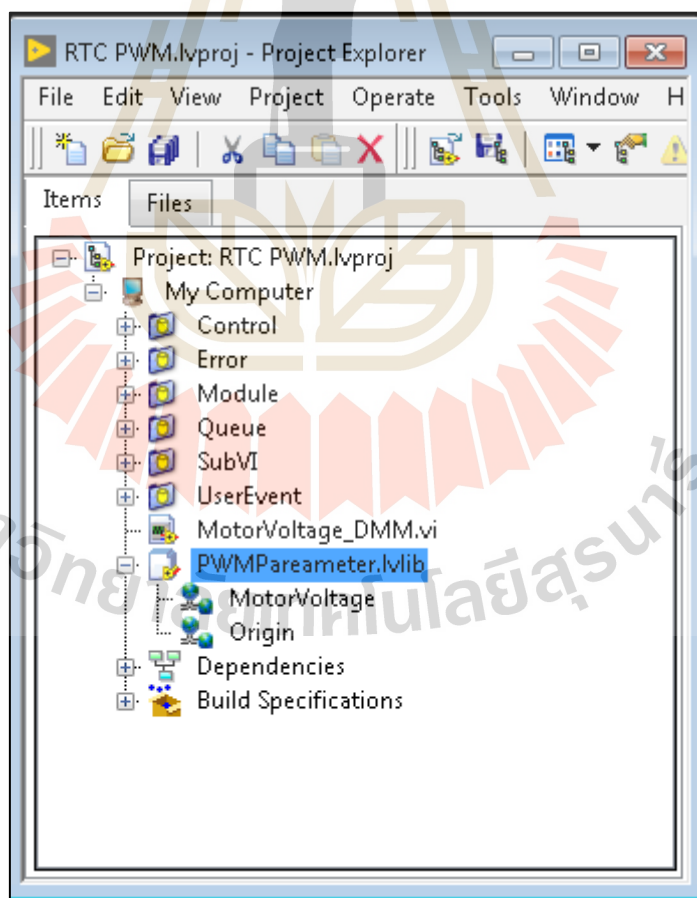
รูปที่ ข.42 Main Program Block diagram 33



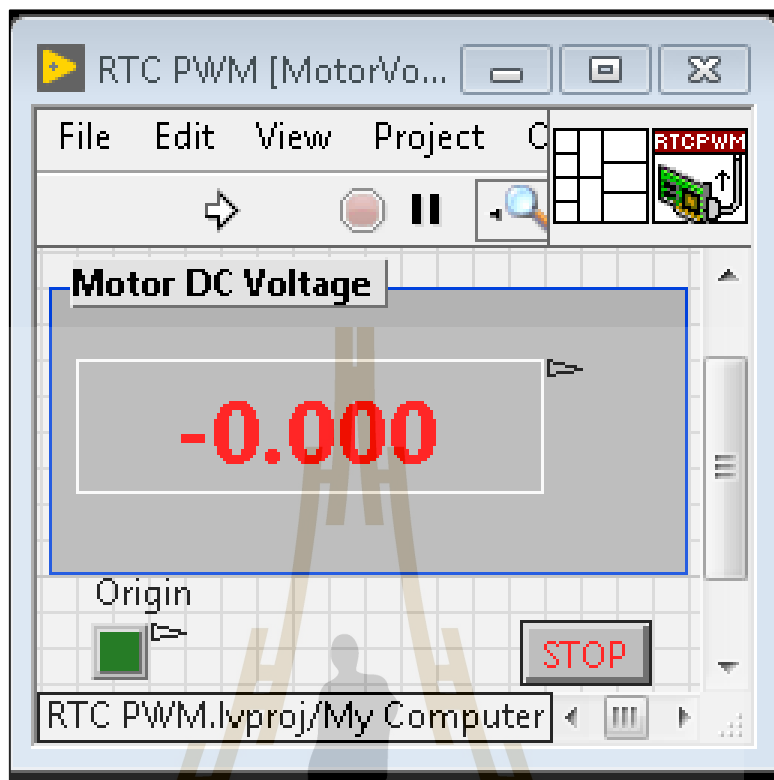
รูปที่ ข.43 Main Program Block diagram 34



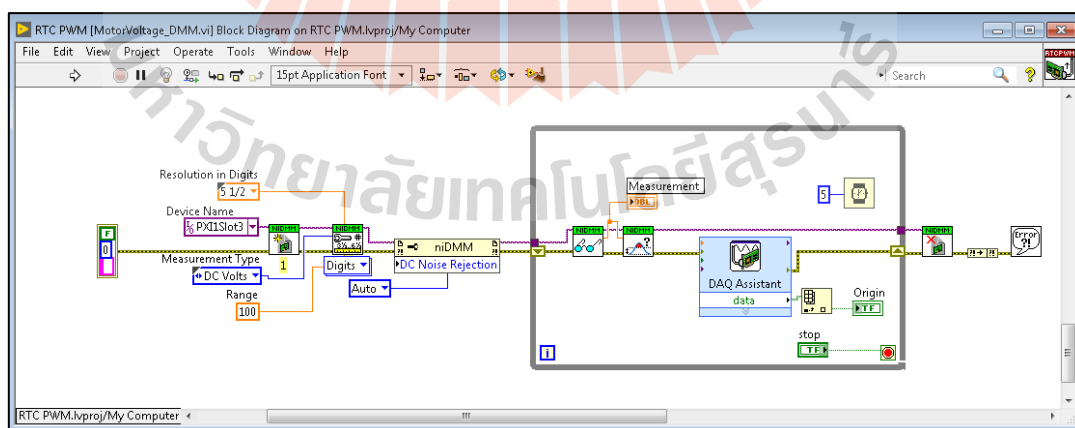
รูปที่ ๖.44 Main Program Block diagram 35



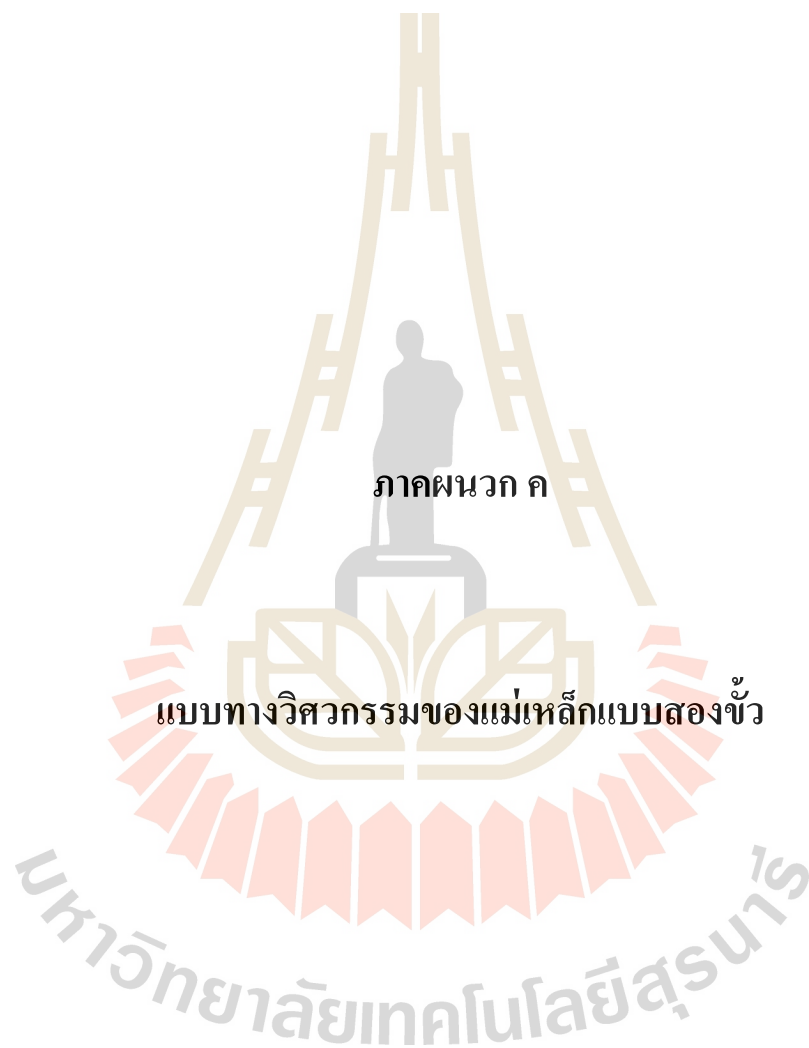
รูปที่ ๖.45 NI PXIe Project



รูปที่ ข.46 NI PXIe Front panel

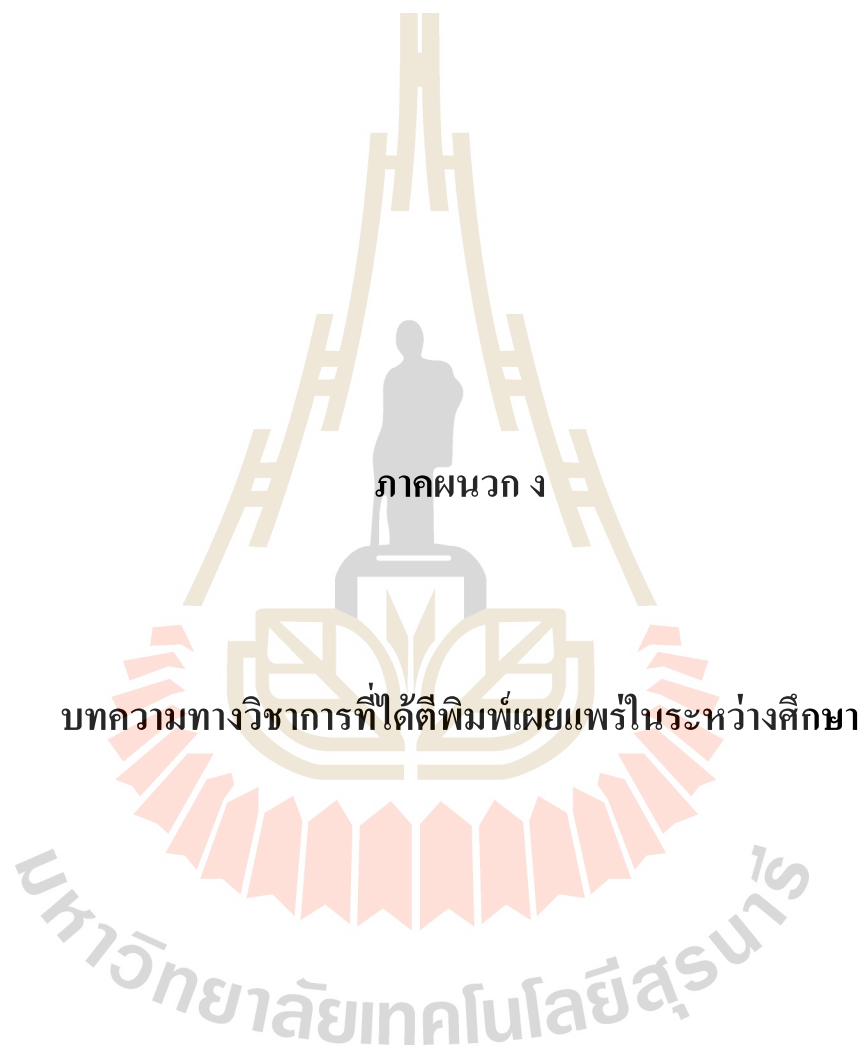


รูปที่ ข.47 NI PXIe Block diagram









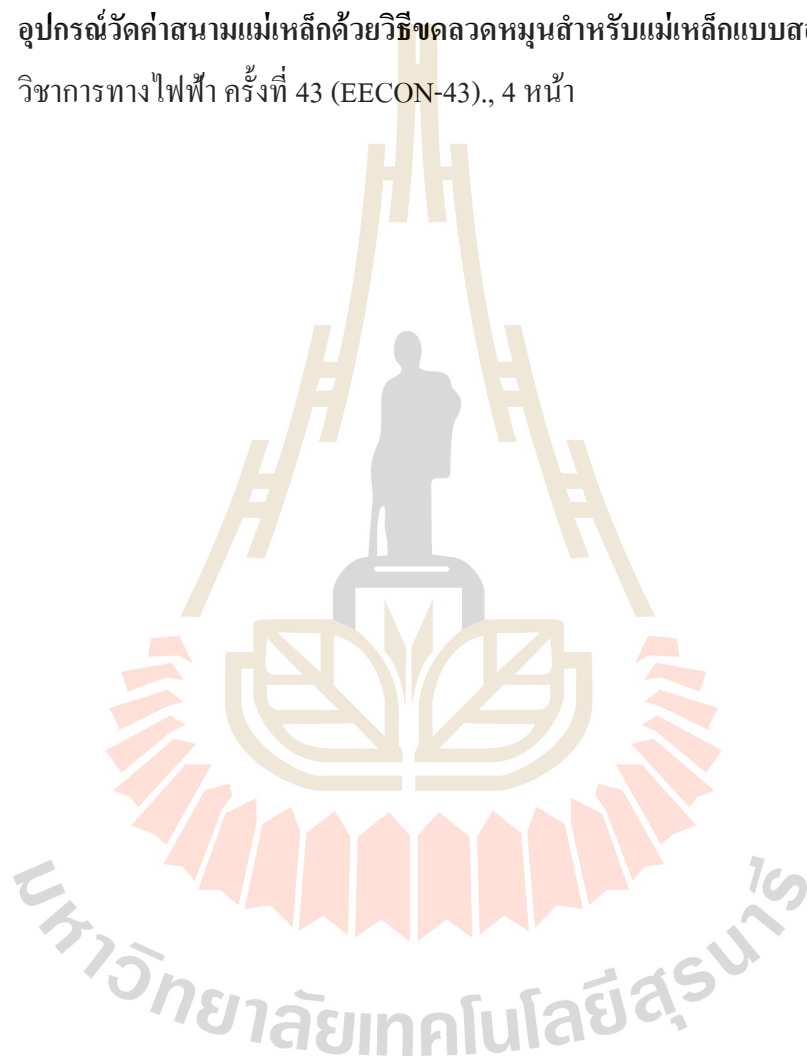
ภาคผนวก ง

บทความทางวิชาการที่ได้ตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

ชัยยุทธ์ ปรีชา, สุนทร โอบฐงาม, ประไพวรรณ สันวงศ์, จิระพล ศรีเสริฐผล (2563). การพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนสำหรับแม่เหล็กแบบสองขั้ว. การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 43 (EECON-43)., 4 หน้า



## ประวัติผู้เขียน

นายชัยยุทธ์ ปรีชา เกิดเมื่อวันที่ 21 มีนาคม พ.ศ. 2524 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร ได้เข้าศึกษาในระดับชั้นประถมศึกษา ที่โรงเรียนบางจาก(นาคเพื่อนอุปถัมภ์) และระดับมัธยมศึกษา ที่โรงเรียนปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี หลังจากนั้น ในปี พ.ศ. 2542 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2552

ปี พ.ศ. 2558 เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยในระดับปริญญาโท ได้นำเสนอในการประชุมวิชาการดังนี้

- ชัยยุทธ์ ปรีชา, สุนทร โอบฐงาม, ประไพวรรณ สันวงศ์, และ จิระพล ศรีเสริฐผล. (2563). การพัฒนาอุปกรณ์วัดค่าสนามแม่เหล็กด้วยวิธีขดลวดหมุนสำหรับแม่เหล็กแบบสองขั้ว. ใน การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 43. 28-30 ตุลาคม 2563. มหาวิทยาลัยนเรศวร.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี