

# การวัดและวิเคราะห์สนามแม่เหล็กที่ขั้วความละเอียดสูง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2563

**HIGH – PRECISION MAGNETIC FIELD  
MEASUREMENT AND ANALYSIS  
OF QUADRUPOLE MAGNET**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the  
Degree of Doctor of Philosophy in Mechatronics Engineering**

**Suranaree University of Technology**

**Academic Year 2020**

## การวัดและวิเคราะห์สนามแม่เหล็กที่ขั้วความละเอียดสูง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาคุณวุฒิปบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ดร.สุพัฒน์ กลั่นเขียว)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.จิระพล ศรีเสรีภูผล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



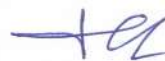
(รศ. ร.อ. ดร.กนัตถ์ร ชานีประศาสน์)

กรรมการ



(ผศ. ดร.อุเทน ลีตน)

กรรมการ



(อ. ดร.รัทต ชลวิชัย)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนัตถ์ร ชานีประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สุนทร โยษฐางาม : การวัดและวิเคราะห์สนามแม่เหล็กสี่ขั้วความละเอียดสูง

(HIGH - PRECISION MAGNETIC FIELD MEASUREMENT AND ANALYSIS OF QUADRUPOLE MAGNET) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล, 200 หน้า.

แม่เหล็กไฟฟ้าแบบสี่ขั้วใน วงกักเก็บอิเล็กตรอนทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอนใน แนวแกนนอน (Focusing) และแกนตั้ง (Defocusing) ซึ่งมีจำนวนมากที่สุดในเครื่องกำเนิด แสงซินโครตรอน การตรวจสอบคุณภาพสนามแม่เหล็กจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งต่อการควบคุม การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน เนื่องจากแม่เหล็กสี่ขั้วมีการใช้งานมาเป็นระยะเวลานานและ หากเกิดความเสียหายจำเป็นต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ซึ่งมีราคาแพงและใช้เวลาในการขนส่งนาน เพื่อลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศและพัฒนาการสร้างแม่เหล็กไฟฟ้าในประเทศ งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กแบบสี่ขั้วโดยใช้เทคนิค ขดลวดหมุน (Rotating coil) ที่มีระบบควบคุมความเร็วรอบแบบวงปิดด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID controller) และการประมาณค่าสนามแม่เหล็กภายในโพรงช่องว่าง สำหรับการวิเคราะห์ ผลกระทบจากการควบคุมความเร็วในช่วง 60, 90 และ 120 รอบต่อนาที และการเหวี่ยงตัวของ แท่งทรงกระบอกที่ส่งผลต่อความแม่นยำในการวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสี่ขั้วด้วยเทคนิค ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว เพื่อจำแนกลักษณะของความผิดพลาดที่เกิดจากเกิดการควบคุม ความเร็วในสถานะคงตัวและการเหวี่ยงตัวจากการหมุน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สาขาวิชา วิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์  
ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนักศึกษา สุนทร  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา จิระพล

SOONTORN ODNGAM : HIGH – PRECISION MAGNETIC FIELD  
MEASUREMENT AND ANALYSIS OF QUADRUPOLE MAGNET.  
THESIS ADVISOR : ASST. PROF. JIRAPHON SRISERTPHOL, Ph.D.,  
200 PP.

#### ANALYSIS/MAGNETIC FIELD/QUADRUPOLE MAGNET

Quadrupole magnet in electron storage rings acted to focus the electron beam on the horizontal axis (Focusing) and the vertical axis (Defocusing), which has the largest in the synchrotron light generator. Magnetic field quality inspection is essential to control the movement of electrons as a quadrupole magnet has been in use for a long time and if damaged, it is necessary to import from abroad which are expensive and take a long time to transport. To reduce dependence on foreign technology and develop building an electromagnet in the country, this research presents the design and construction of measuring instruments for a quadrupole magnetic field using a rotating coil technique, which there is a closed loop speed control system with a PID controller and estimation of the magnetic field within free space. For analysis of the effects of speed control in the range of 60, 90 and 120 rpm. and the whirling of the cylinder rod affects the measurement accuracy of a quadrupole magnetic field with a fast Fourier transform technique for classify the types of the error that caused by steady state speed control and the whirling of rotation.

School of Mechatronics Engineering

Academic year 2020

Student's Signature

Soontorn

Advisor's Signature

Siripal

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ และขอขอบคุณบุคคลต่าง ๆ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่ให้ทุนการศึกษาสำหรับผู้มีศักยภาพ เข้าศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา และทุนการศึกษาที่คณาจารย์ได้รับการสนับสนุนจากแหล่งทุนภายนอก

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ และคำปรึกษาแนะนำในการทำงานวิจัย รวมทั้งให้คำแนะนำในการดำเนินชีวิตด้วยความเมตตาโดยตลอด และสละเวลาตรวจสอบแก้ไขให้วิทยานิพนธ์มีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ และอาจารย์ ดร.ธีทัต คลวิชัย ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการดำเนินงานวิจัย และให้โอกาสการทำงานในหลายด้านด้วยความกรุณาเสมอมา และขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้ทำวิจัยทั้งในอดีตจนถึงปัจจุบัน

ขอบคุณ เจ้าหน้าที่ประจำสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ที่อำนวยความสะดวกในด้านธุรการต่าง ๆ ขอขอบคุณ คุณศิขริน เลขาวิจิตร ที่ให้การช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาที่ใกล้ชิดทุกคนที่มีส่วนทำให้การเรียนในระดับปริญญาเอกเป็นช่วงเวลาที่มีความสุข

ขอบคุณ วิศวกรและเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือต่าง ๆ

และที่ขาดไม่ได้ขอกราบขอบพระคุณพ่อประยูร โอบสูงาม และคุณแม่สมยศ โอบสูงาม รวมถึงสมาชิกในครอบครัวทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดู และส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอดจนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

สุนทร โอบสูงาม

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ท
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.5 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	5
<b>2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>7</b>
2.1 บทนำ.....	7
2.2 พื้นฐานสนามแม่เหล็ก.....	7
2.2.1 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก.....	7
2.2.2 ความเข้มสนามแม่เหล็ก.....	10
2.3 พื้นฐานแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ.....	10
2.3.1 ตัวนำอยู่นิ่งสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงตามเวลา.....	11
2.3.2 ตัวนำเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กที่อยู่นิ่ง.....	12
2.3.3 ตัวนำเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา.....	13
2.4 พื้นฐานการควบคุมความเร็วรอบ.....	14
2.4.1 ระบบควบคุมแบบวงเปิด (Open loop control system).....	14

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.2	ระบบควบคุมแบบวงปิด (Close loop control system) .....	15
2.4.3	ตัวควบคุม (Controller) .....	15
2.5	พื้นฐานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC motor) .....	17
2.6	การเคลื่อนตัวของแท่งทรงกระบอก .....	21
2.7	การประมาณค่าของระบบ โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบไม่เป็นเชิงเส้น .....	25
2.8	การวัดและการจัดการสัญญาณ (Measurement and signal processing) .....	26
2.8.1	อุปกรณ์สำหรับวัดการสั่นสะเทือน .....	26
2.8.2	พื้นฐานการวัดการสั่นสะเทือน.....	28
2.8.3	พื้นฐานการวิเคราะห์ฟูเรียร์ (Fourier transform) .....	31
2.8.4	พื้นฐานตัวกรองสัญญาณ .....	32
2.9	การหาค่าเหมาะที่สุดฮาร์มอนิกส์ปรับตัวได้ชนิดอ้างอิงแบบจำลอง โดยใช้วิธีการ Gradient Method.....	32
2.10	พื้นฐานการสอบเทียบเครื่องมือวัด.....	34
2.10.1	การสอบเทียบแบบสถิต (Static calibration) .....	34
2.10.2	การสอบเทียบแบบพลวัต .....	35
2.10.3	ความไวของการวัด.....	35
2.10.4	ความเป็นเชิงเส้นและความไม่เป็นเชิงเส้น .....	36
2.10.5	ความเที่ยงตรงและความสามารถในการทำซ้ำ.....	36
2.10.6	ย่านวัดหรือช่วงการวัด (Rang or Span).....	37
2.10.7	ความละเอียดของการวัด (Resolution) .....	37
2.10.8	ความผิดพลาดและความไม่แน่นอน .....	37
2.11	ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
2.11.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบ ของขดลวดหมุน .....	41
2.11.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับขดลวดหมุน .....	42
2.11.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนตัวของขดลวดหมุน.....	43
2.11.4	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดการโก่งตัวของขดลวดหมุน.....	44



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.11.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการชดเชยแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ จากการ โกงตัวของขดลวดหมุน .....	45
2.12 สรุป .....	46
<b>3 การออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก .....</b>	<b>47</b>
3.1 บทนำ.....	47
3.2 การออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก .....	47
3.2.1 แท่นรองรับแท่งทรงกระบอก .....	47
3.2.2 การออกแบบแท่งทรงกระบอก .....	50
3.3 การติดตั้งอุปกรณ์การวัดสนามแม่เหล็ก.....	51
3.3.1 การวัดการเหี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก .....	51
3.3.2 การติดตั้งอุปกรณ์การวัดสนามแม่เหล็ก .....	53
3.4 การหาความถี่ธรรมชาติของเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก .....	57
3.4.1 อุปกรณ์สำหรับการหาความถี่ธรรมชาติ.....	58
3.4.2 ขั้นตอนการหาความถี่ธรรมชาติ.....	59
3.4.3 ผลการทดสอบ โครงสร้างเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก .....	60
3.5 การออกแบบระบบควบคุมการหมุนแท่งทรงกระบอก.....	61
3.5.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง .....	61
3.5.2 การระบุเอกลักษณ์พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	65
3.5.3 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง .....	68
3.6 สรุป .....	81
<b>4 การจำลองผลการเกิดสนามแม่เหล็ก .....</b>	<b>83</b>
4.1 บทนำ.....	83
4.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็ก .....	83
4.2.1 โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็ก .....	87
4.2.2 ผลการจำลองการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก .....	90
4.3 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของขดลวดหมุน .....	93

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.1	โปรแกรมจำลองผลการวัดสนามแม่เหล็ก..... 99
4.3.2	ผลการจำลองแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ..... 100
4.4	สรุป ..... 110
<b>5</b>	<b>การวัดและวิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยเทคนิคขดลวดหมุน ..... 112</b>
5.1	บทนำ..... 112
5.2	การวัดและวิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับสนามแม่เหล็ก สองขั้ว ..... 112
5.2.1	ขั้นตอนการทำงานของเครื่องวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แม่เหล็กสองขั้ว ..... 113
5.2.2	การทดสอบแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำแม่เหล็กสองขั้ว..... 114
5.3	การประมาณค่าและวิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สถานะคงตัว ของการหมุนขดลวดตัวนำสำหรับการวัดสนามแม่เหล็กสองขั้วและสี่ขั้ว ..... 116
5.3.1	ขั้นตอนการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ สำหรับการวัดสนามแม่เหล็ก ..... 116
5.3.2	การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำการวัดสนาม แม่เหล็กสองขั้วและสี่ขั้ว ..... 117
5.4	การประมาณค่าและวิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิด การเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอกบรรจุขดลวดตัวนำสำหรับ การวัดสนามแม่เหล็กสี่ขั้ว..... 129
5.4.1	การทำงานของอุปกรณ์วัดการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก ที่บรรจุขดลวดตัวนำ ..... 129
5.4.2	การวัดระยะการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอกที่บรรจุ ขดลวดตัวนำ ..... 130
5.4.3	ขั้นตอนการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับ สนามแม่เหล็กสี่ขั้วที่มีการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก ..... 131
5.4.4	การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับ สนามแม่เหล็กสี่ขั้วที่มีการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก ..... 134

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

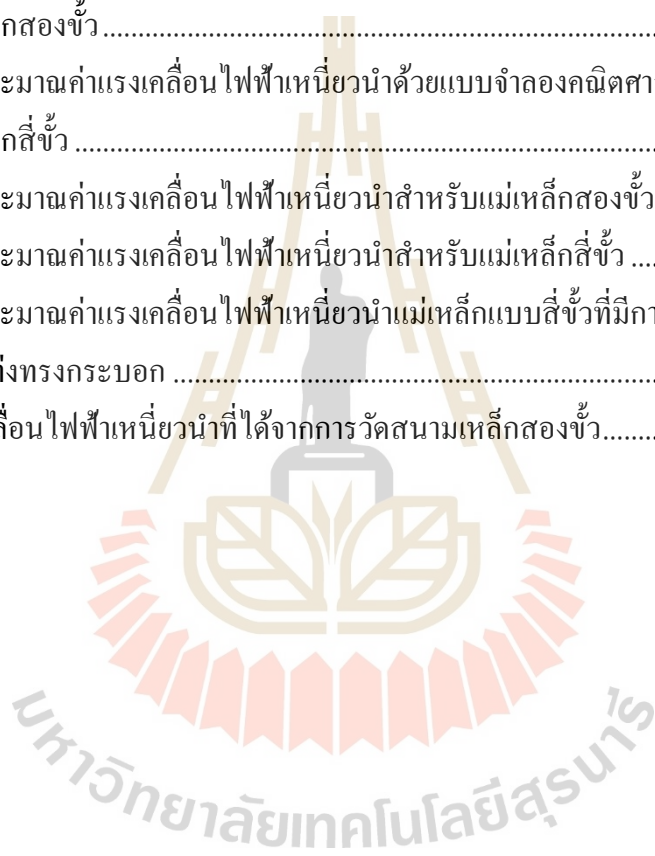
5.5	การประมาณค่าและวิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สถานะ คงตัวของการหมุนและการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอกบรรจุ ขดลวดตัวนำสำหรับการวัดสนามแม่เหล็กสี่ขั้ว.....	145
5.5.1	ขั้นตอนการประมาณค่าและวิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่สถานะคงตัวของการหมุนและการเหวี่ยงตัวของแท่ง ทรงกระบอกที่บรรจุขดลวดตัวนำสำหรับแม่เหล็กสี่ขั้ว.....	146
5.5.2	การประมาณค่าและวิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ที่สถานะคงตัวของการหมุนและการเหวี่ยงตัวของแท่ง ทรงกระบอกที่บรรจุขดลวดตัวนำสำหรับแม่เหล็กสี่ขั้ว.....	147
5.6	สรุป .....	157
6	สรุปและข้อเสนอแนะ .....	160
6.1	สรุป .....	160
6.2	ข้อเสนอแนะ.....	164
	รายการอ้างอิง .....	166
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. การใช้งาน LabVIEW .....	169
	ภาคผนวก ข. การใช้งาน Rapcon.....	172
	ภาคผนวก ค. การใช้โปรแกรม Simulink Parameter Estimation .....	177
	ภาคผนวก ง. การใช้โปรแกรม Simulink Response Optimization .....	184
	ภาคผนวก จ. โปรแกรมประมาณค่าสนามแม่เหล็กและแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ .....	189
	ภาคผนวก ฉ. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	198
	ประวัติผู้เขียน .....	200

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและทางกลของ DC Motor ..... 68
3.2	เงื่อนไขสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตัวควบคุม..... 72
3.3	ขอบเขตสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตัวควบคุม..... 72
3.4	ผลการตอบสนองความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ชุด NI ..... 74
3.5	ผลการตอบสนองความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ..... 78
3.6	ผลการตอบสนองความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ..... 81
4.1	พารามิเตอร์ของแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วและแม่เหล็กไฟฟ้าสี่ขั้ว ..... 84
4.2	ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสองขั้วที่ค่ากระแสไฟฟ้าต่าง ๆ..... 91
4.3	ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสี่ขั้วที่ค่ากระแสไฟฟ้าต่าง ๆ ..... 93
4.4	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบและ กระแสไฟฟ้าแม่เหล็กสองขั้วแบบ Skew dipole magnet..... 102
4.5	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบและ กระแสไฟฟ้าแม่เหล็ก สองขั้วแบบ Normal dipole magnet ..... 105
4.6	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบและ กระแสไฟฟ้าแม่เหล็ก สี่ขั้วแบบ Skew quadrupole magnet..... 107
4.7	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบและ กระแสไฟฟ้าแม่เหล็ก สี่ขั้วแบบ Normal quadrupole magnet..... 110
5.1	แอมพลิจูดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดลองที่ 5.1.1 - 5.1.3 ..... 116
5.2	แอมพลิจูดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดลองที่ 5.2.1 - 5.2.3 ..... 120
5.3	แอมพลิจูดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดลองที่ 5.3.1 - 5.3.3 ..... 123
5.4	แอมพลิจูดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดลองที่ 5.4.1 - 5.4.3 ..... 126
5.5	แอมพลิจูดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดลองที่ 5.5.1 - 5.5.3 ..... 129
5.6	ระยะการเหวี่ยงตัวตำแหน่งต่าง ๆ ในแนวแกนตั้งและแนวแกนนอน ..... 133
5.7	จุดศูนย์กลางและรัศมีการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก..... 135
5.8	แอมพลิจูดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดลองที่ 5.7.1 - 5.7.3 ..... 145

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.9	แอมพลิจูดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดลองที่ 5.8.1 - 5.8.3 ..... 157
6.1	เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่สถานะคงตัวของอุปกรณ์ควบคุม ..... 160
6.2	การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ของ แม่เหล็กสองขั้ว ..... 161
6.3	การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ของ แม่เหล็กสี่ขั้ว ..... 161
6.4	การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับแม่เหล็กสองขั้ว ..... 162
6.5	การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับแม่เหล็กสี่ขั้ว ..... 162
6.6	การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำแม่เหล็กแบบสี่ขั้วที่มีการเหวี่ยงตัว ของแท่งทรงกระบอก ..... 163
6.7	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการวัดสนามแม่เหล็กสองขั้ว ..... 164



## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	แผนผังสถานีทดลองต่าง ๆ ของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน .....	2
1.2	การเรียงแม่เหล็กในวงกักเก็บอิเล็กตรอน .....	3
1.3	Focusing Quadrupole และ Defocusing Quadrupole .....	3
1.4	เทคนิค Hall Effect และเทคนิค Rotating Coil .....	4
2.1	เส้นแรงแม่เหล็กพุ่งออกจากขั้วเหนือเข้าสู่ขั้วใต้ .....	7
2.2	ฟลักซ์แม่เหล็กตัดผ่านพื้นที่ใด ๆ .....	8
2.3	ฟลักซ์แม่เหล็กวงปิด .....	9
2.4	พื้นที่วงปิดตัวนำที่สนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาและวงจรมุมล .....	11
2.5	ตัวนำยาว $l$ เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว $v$ ตามแกนนอน (x) ในสนามแม่เหล็ก $B\hat{z}$ .....	12
2.6	แผนภาพระบบควบคุมแบบวงเปิด .....	15
2.7	แผนภาพระบบควบคุมแบบวงปิด .....	15
2.8	แผนภาพระบบควบคุมแบบพีไอดี .....	16
2.9	แผนภาพมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง .....	18
2.10	แผนภาพวงจรอาร์มเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง .....	19
2.11	การวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า 4 ขั้ว .....	21
2.12	แท่งทรงกระบอกเป็นวัสดุแข็งแกร่ง และแบริงเป็นวัสดุยืดหยุ่น .....	21
2.13	แท่งทรงกระบอกเป็นวัสดุยืดหยุ่น และแบริงเป็นวัสดุแข็งแกร่ง .....	22
2.14	แบบจำลองความไม่สมดุลทางกล .....	22
2.15	แบบจำลองการโก่งตัวของเพลลา .....	23
2.16	ลักษณะการเคลื่อนตัวของแท่งทรงกระบอก .....	23
2.17	แบบจำลองทางกลของแท่งทรงกระบอก .....	24
2.18	การหาค่าเบี่ยงเบนของวิธีกำลังสองน้อยที่สุด .....	26
2.19	ตัวอย่างตัวตรวจรู้ .....	27
2.20	ตัวกระตุ้นการสั่นสะเทือน .....	28
2.21	แสดงเครื่องมือวิเคราะห์สัญญาณ .....	28

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.22	ตัวอย่างการสุมวัดการสั้นสะเทือน .....	29
2.23	สัญญาณการสั้นสะเทือนที่ความถี่สุมวัดต่าง ๆ .....	30
2.24	สัญญาณในโดเมนเวลา และ โดเมนความถี่ .....	31
2.25	แผนภาพหลักการทำงานของ MRAS .....	33
2.26	กระบวนการวัดพื้นฐาน .....	34
2.27	กราฟที่ได้จากการสอบเทียบแบบสถิต .....	35
2.28	การเปรียบเทียบความเที่ยงตรงและความถูกต้องของผลลัพธ์ .....	37
2.29	ความผิดพลาดระบบ ความผิดพลาดแบบสุมและความผิดพลาดทั้งหมด .....	38
2.30	แผนภาพแบบจำลองของฮอลล์เอฟเฟค .....	40
2.31	การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กด้วยเทคนิคขดลวดหมุน .....	41
2.32	ตัวอย่าง Search coils ขนาดต่าง ๆ .....	43
3.1	แบบเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก .....	48
3.2	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง .....	48
3.3	Flexible coupling .....	48
3.4	Single-row angular contact ball bearings .....	49
3.5	Slip ring coil voltage .....	49
3.6	Incremental rotating encoder .....	50
3.7	ขนาดของแท่งทรงกระบอกและขดลวดเหนี่ยวนำ .....	50
3.8	ขดลวดเหนี่ยวนำ .....	50
3.9	อุปกรณ์วัดการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก .....	51
3.10	หน้าต่างการแสดงผลของการวัดการเหวี่ยงตัว .....	52
3.11	รูปการทำงานของโปรแกรมวัดการเหวี่ยงตัว .....	52
3.12	เซ็นเซอร์วัดระยะ .....	53
3.13	Photo microsensor .....	53
3.14	การติดตั้งอุปกรณ์การวัดสนามแม่เหล็ก .....	54
3.15	หน้าต่างการแสดงผลของการวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า .....	54

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.16	Motor drive module.....55
3.17	Motor drive power amplifier .....55
3.18	เซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า.....56
3.19	ดิจิทัลมัลติมิเตอร์ .....56
3.20	เซ็นเซอร์วัดแรงเคลื่อน ไฟฟ้า .....56
3.21	NI cRIO-9030 Controller .....57
3.22	อุปกรณ์สำหรับการทำ Impact test.....59
3.23	จุดวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน .....60
3.24	การตอบสนองเชิงความถี่ที่ได้จากการทดสอบ โมคอด .....61
3.25	แผนภาพวงจรรีเลย์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....62
3.26	บล็อกไดอะแกรมควบคุมความเร็วเชิงมุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงเปิด.....64
3.27	บล็อกไดอะแกรมการทำงานของ Parameter estimation .....65
3.28	แรงดันไฟฟ้าขาเข้า (Input).....66
3.29	ความเร็วรอบของมอเตอร์ (Output) .....66
3.30	บล็อกไดอะแกรมการระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....67
3.31	ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองคณิตศาสตร์กับผลการทดลอง ของมอเตอร์ไฟฟ้า.....67
3.32	แผนภาพบล็อกไดอะแกรมการควบคุมความเร็วรอบด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ .....68
3.33	แผนภาพบล็อกไดอะแกรมการควบคุมความเร็วรอบด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี.....69
3.34	แผนภาพบล็อกไดอะแกรมการหาค่าเหมาะสมที่สุดด้วย Response Optimization .....72
3.35	ผลการตอบสนองด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ชุด NI ที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที .....73
3.36	ผลการตอบสนองด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ชุด NI ที่ความเร็ว 90 รอบต่อนาที .....73
3.37	ผลการตอบสนองด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ชุด NI ที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที .....74
3.38	ผลการตอบสนองด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ (ชุดที่ 1) ที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที.....75
3.39	ผลการตอบสนองด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ (ชุดที่ 1) ที่ความเร็ว 90 รอบต่อนาที .....75
3.40	ผลการตอบสนองด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ (ชุดที่ 1) ที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที.....76
3.41	ผลการตอบสนองด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ (ชุดที่ 2) ที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที .....76



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.42	ผลการตอบสนองด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ (ชุดที่ 2) ที่ความเร็ว 90 รอบต่อนาที ..... 77
3.43	ผลการตอบสนองด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ (ชุดที่ 2) ที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที ..... 77
3.44	ผลการตอบสนองด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี (ชุดที่ 1) ที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที ..... 78
3.45	ผลการตอบสนองด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี (ชุดที่ 1) ที่ความเร็ว 90 รอบต่อนาที ..... 79
3.46	ผลการตอบสนองด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี (ชุดที่ 1) ที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที ..... 79
3.47	ผลการตอบสนองด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี (ชุดที่ 2) ที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที ..... 80
3.48	ผลการตอบสนองด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี (ชุดที่ 2) ที่ความเร็ว 90 รอบต่อนาที ..... 80
3.49	ผลการตอบสนองด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี (ชุดที่ 2) ที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที ..... 81
4.1	คอยล์แม่เหล็กไฟฟ้า..... 83
4.2	ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กและจำลองผล แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำร่วมกับการวิเคราะห์สัญญาณแบบ ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ..... 87
4.3	ภาพมุมมอง 2 มิติ ของแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้ว (Dipole magnet)..... 88
4.4	ภาพมุมมอง 2 มิติ ของแม่เหล็กไฟฟ้าสี่ขั้ว (Quadrupole magnet) ..... 88
4.5	การสร้างเอลิเมนต์ด้วยฟังก์ชัน generate Mesh ..... 89
4.6	(ก) สนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วแบบ Skew dipole ( $B_x$ ) (ข) สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ค่ากระแสไฟฟ้า 5, 10 และ 15 แอมป์..... 90
4.7	(ก) สนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วแบบ Normal dipole ( $B_y$ ) (ข) สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ค่ากระแสไฟฟ้า 5, 10 และ 15 แอมป์..... 91
4.8	(ก) สนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วแบบ Skew quadrupole magnet (ข) สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ค่ากระแสไฟฟ้า 2, 4 และ 6 แอมป์..... 92
4.9	(ก) สนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วแบบ Normal quadrupole magnet (ข) สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ค่ากระแสไฟฟ้า 2, 4 และ 6 แอมป์..... 92
4.10	ขดลวดเหนี่ยวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสองขั้ว ..... 94
4.11	ขดลวดเหนี่ยวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสี่ขั้ว ..... 96
4.12	ขดลวดเหนี่ยวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วแบบ Skew dipole magnet ..... 100



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26	(ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ 90 รอบต่อนาที (ข) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ 90 รอบต่อนาที ..... 109
4.27	(ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ 120 รอบต่อนาที (ข) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ 120 รอบต่อนาที ..... 109
5.1	การวัดสนามแม่เหล็กสองขั้วแบบ Skew dipole magnets..... 113
5.2	การทำงานของเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กสองขั้ว ..... 113
5.3	(ก) สัญญาณฮาร์โมนิกส์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 1 Hz (ข) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 1 Hz (ค) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 3 Hz ..... 114
5.4	(ก) สัญญาณฮาร์โมนิกส์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 1.5 Hz (ข) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 1.5 Hz (ค) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 4.5 Hz ..... 115
5.5	(ก) สัญญาณฮาร์โมนิกส์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 2 Hz (ข) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 2 Hz (ค) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 6 Hz ..... 115
5.6	ขั้นตอนการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ..... 117
5.7	(ก) สัญญาณฮาร์โมนิกส์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 1 Hz (ข) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 1 Hz (ค) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 3 Hz ..... 118
5.8	(ก) สัญญาณฮาร์โมนิกส์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 1.5 Hz (ข) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 1.5 Hz (ค) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 4.5 Hz ..... 119
5.9	(ก) สัญญาณฮาร์โมนิกส์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 2 Hz (ข) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 2 Hz (ค) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 6 Hz ..... 119



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.19 การวัดระยะการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก .....	130
5.20 รูปภาพจำลองการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก .....	131
5.21 ลักษณะการเคลื่อนที่ของขดลวดที่ความเร็วรอบการหมุน 60 RPM.....	131
5.22 ลักษณะการเคลื่อนที่ของขดลวดที่ความเร็วรอบการหมุน 90 RPM.....	132
5.23 ลักษณะการเคลื่อนที่ของขดลวดที่ความเร็วรอบการหมุน 120 RPM.....	132
5.24 ขั้นตอนการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการเหวี่ยงตัวของ แท่งทรงกระบอก .....	134
5.25 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 2 แอมป์ .....	136
5.26 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 4 แอมป์ .....	137
5.27 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 6 แอมป์ .....	138
5.28 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 90 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 2 แอมป์ .....	139
5.29 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 90 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 4 แอมป์ .....	140
5.30 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 90 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 6 แอมป์ .....	141
5.31 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 2 แอมป์ .....	142
5.32 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 4 แอมป์ .....	143
5.33 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 6 แอมป์ .....	144
5.34 ขั้นตอนการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ .....	146
5.35 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 2 แอมป์ .....	148
5.36 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 4 แอมป์ .....	149
5.37 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 6 แอมป์ .....	150
5.38 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 90 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 2 แอมป์ .....	151
5.39 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 90 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 4 แอมป์ .....	152
5.40 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 90 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 6 แอมป์ .....	153
5.41 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 2 แอมป์ .....	154
5.42 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 4 แอมป์ .....	155
5.43 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 6 แอมป์ .....	156

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.1	หน้าต่างโปรแกรม Lab VIEW สำหรับเก็บข้อมูลการเหวี่ยงตัวของเพลลา ..... 170
ก.2	การเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ต่าง ๆ กับคอมพิวเตอร์ ..... 171
ค.1	แผนภาพการจำลองระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ..... 178
ค.2	แผนภาพแบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ..... 178
ค.3	แผนภาพแสดงหน้าต่างของ Control and Estimation Tool Manager ..... 179
ค.4	แผนภาพแสดงหน้าต่างของการเลือก New Data..... 179
ค.5	แผนภาพแสดงหน้าต่างการเลือกข้อมูลเข้า ..... 179
ค.6	แผนภาพแสดงหน้าต่างการเลือกตัวแปรที่ต้องการประมาณค่า ..... 180
ค.7	แผนภาพแสดงการกำหนดขอบเขตตัวแปร ..... 180
ค.8	แผนภาพแสดงหน้าต่างการสร้าง New Estimation ..... 180
ค.9	แผนภาพแสดงหน้าต่างการเลือกข้อมูลในการ Estimate ..... 181
ค.10	แผนภาพแสดงหน้าต่างการกำหนดตัวแปรที่ต้องการประมาณค่า..... 181
ค.11	แผนภาพแสดงการกำหนดอัลกอริทึมในการประมาณค่าตัวแปร ..... 182
ค.12	แผนภาพแสดงการเริ่มการประมาณค่าตัวแปร ..... 182
ค.13	แผนภาพแสดงค่าตัวแปรที่โปรแกรมประมาณได้..... 183
ง.1	แผนภาพแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB/Simulink..... 185
ง.2	แผนภาพแสดง Signal Constraint Window..... 185
ง.3	แผนภาพแสดงการกำหนดขอบเขตการตอบสนอง ..... 186
ง.4	แผนภาพแสดงการ Add Parameter ..... 186
ง.5	แผนภาพแสดงการกำหนดขอบเขตพารามิเตอร์..... 187
ง.6	แผนภาพแสดง Options ของการ Optimize..... 187
ง.7	แผนภาพแสดงการตอบสนองของสัญญาณในขอบเขต ..... 188
ง.8	แผนภาพแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้ปรับแต่ง ..... 188

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$\bar{B}$	=	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก
$\bar{H}$	=	ความเข้มสนามแม่เหล็ก
$\mu_0$	=	สภาพให้ซึมผ่านได้ของอากาศ
$V_{emf}$	=	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ
$N$	=	จำนวนรอบขดลวด
$V_{emf}^{tr}$	=	แรงเคลื่อนไฟฟ้าหม้อแปลง
$V_{emf}^m$	=	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเคลื่อนที่
$\bar{v}$	=	ความเร็ว
$l$	=	ความยาวขดลวด
$q$	=	ประจุไฟฟ้า
$\bar{F}_m$	=	แรงแม่เหล็ก
$\bar{E}$	=	สนามไฟฟ้า
$\bar{E}_m$	=	สนามไฟฟ้าเคลื่อนที่
$P$	=	ตัวควบคุมพี
$I$	=	ตัวควบคุมไอ
$D$	=	ตัวควบคุมดี
$u(t)$	=	สัญญาณควบคุม
$e(t)$	=	ค่าความผิดพลาด
$i_a$	=	กระแสไฟฟ้า
$T$	=	แรงบิด
$b$	=	ความกว้างขดลวด
$k_b$	=	ค่าคงที่ในวงจรรอาร์เมเจอร์
$\omega$	=	ความเร็วรอบของมอเตอร์

### คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

$R_a$	=	ความต้านทาน
$L_a$	=	ความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์
$V_a$	=	แรงดันไฟฟ้าอาร์เมเจอร์
$V_b$	=	แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ
C	=	ค่าคงที่ความเสียดทาน
$K_t$	=	ค่าคงที่แรงบิดของมอเตอร์
$K_b$	=	ค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ
$T_L$	=	แรงบิดภายนอก
$J_m$	=	โมเมนต์ความเฉื่อยในการหมุน
m	=	มวลของแท่งทรงกระบอก
e	=	ระยะการโก่งตัว
x	=	ระยะการเหียงตัวในแนวนแกนนอน
y	=	ระยะการเหียงตัวในแนวแกนตั้ง
DE	=	ด้านขับเคลื่อน
NDE	=	ด้านไม่ได้ขับเคลื่อน
H	=	ความสูง
L	=	ความยาว



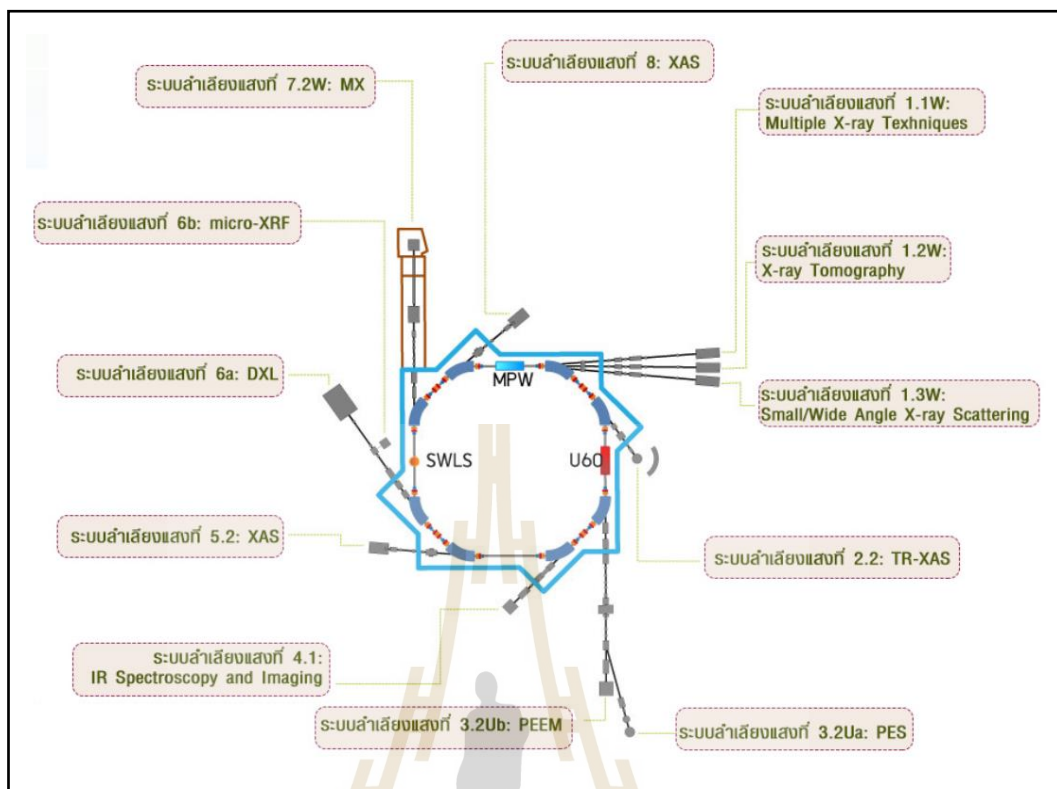
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

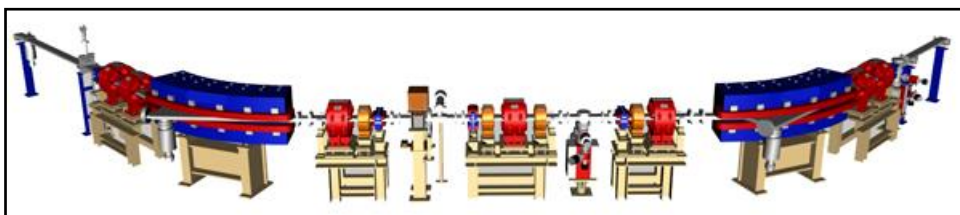
แสงซินโครตรอน คือ แสงที่ปลดปล่อยออกมาจากอนุภาคที่มีประจุและถูกบังคับให้เลี้ยวโค้งด้วยความเร็วใกล้ความเร็วแสง (ประมาณหนึ่งพันล้านล้านกิโลเมตรต่อชั่วโมง) โดยส่วนใหญ่ นิยมใช้อิเล็กตรอน เนื่องจากเป็นอนุภาคที่มีน้ำหนักเบาและสามารถผลิตได้ง่ายเมื่อเทียบกับอนุภาคอื่น ๆ อนุภาคอิเล็กตรอนสามารถผลิตได้โดยอุปกรณ์ที่เรียกว่า “หลอดแคโทด” โดยการนำมาเผาให้ร้อนจะทำให้อิเล็กตรอนบริเวณผิวโลหะนั้นหลุดออกมา จากนั้นเร่งอนุภาคให้มีความเร็วใกล้ความเร็วแสงและบังคับให้เลี้ยวโค้งด้วยสนามแม่เหล็กส่งผลให้อนุภาคนั้นปลดปล่อยแสงที่มีความเข้มสูงและมีย่านพลังงานที่ต่อเนื่องครอบคลุมตั้งแต่ช่วงรังสีอินฟราเรดจนถึงรังสีเอกซ์ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย โดยการบังคับแสงซินโครตรอนให้เดินทางผ่านวัตถุที่ต้องการจะตรวจสอบ ผลที่ได้จะทำให้นักวิจัยทราบว่าวัตถุนั้นประกอบไปด้วยธาตุอะไรบ้าง ที่นำไปสู่การศึกษาโครงสร้างในระดับอะตอมที่เป็นประโยชน์หลักของแสงซินโครตรอน

เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนในประเทศไทยนั้น ตั้งอยู่ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในนาม “สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)” สังกัดกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เริ่มเปิดบริการแสงซินโครตรอนครั้งแรกเมื่อปี 2546 ด้วยวงกักเก็บอิเล็กตรอนขนาด 1.2 GeV. เส้นรอบวง 81.3 เมตร ประกอบด้วยสถานีทดลองทั้งหมด 12 สถานี แสดงดังรูปที่ 1.1 ด้วยส่วนใหญ่จะศึกษาวิจัยเกี่ยวกับองค์ประกอบและโครงสร้างของวัสดุด้วยหลักการใช้แสงซินโครตรอนเข้าไปกระตุ้นอะตอมที่อยู่ภายในวัสดุส่งผลให้เกิดการกระเจิงของแสงหรือวัสดุมีการดูดกลืนแสง ผลที่ได้จากการกระตุ้นด้วยแสงซินโครตรอนจะให้ข้อมูลที่แตกต่างกันออกไป เช่น การวัดการกระเจิงของแสงด้วยรังสีเอกซ์จะได้ขนาดและรูปร่างของโมเลกุลหรือวัดการดูดกลืนรังสีเอกซ์จะได้ระยะห่างระหว่างอะตอมภายในวัสดุ เป็นต้น



รูปที่ 1.1 แผนผังสถานีทดลองต่าง ๆ ของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (ที่มา SLRI)

จากรูปที่ 1.1 การใช้งานแสงซินโครตรอนจะมีระบบลำแสงที่ทำหน้าที่เลือกย่านความถี่ของแสงเพื่อจัดส่งให้แก่สถานีตามต้องการ ซึ่งประกอบไปด้วย ท่อสุญญากาศ (Vacuum chamber) กระจกรวมแสง (Collimating mirror) ระบบโฟกัสแสง (Focusing mirror) ระบบคัดเลือกพลังงานแสง (Monochromator) ระบบช่องสำหรับแสงผ่าน (Slit) เป็นต้น ก่อนที่อิเล็กตรอนจะปลดปล่อยพลังงานออกมาจะต้องเคลื่อนที่ผ่านแม่เหล็กชนิดต่าง ๆ ที่เป็นส่วนประกอบในวงกักเก็บอิเล็กตรอน โดยวงกักเก็บอิเล็กตรอนจะประกอบไปด้วยแม่เหล็กชนิดต่างๆ ดังนี้ แม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้ว (Dipole magnet) แม่เหล็กไฟฟ้าสี่ขั้ว (Quadrupole magnet) และแม่เหล็กไฟฟ้าหกขั้ว (Sextupole magnet) แสดงดังรูปที่ 1.2



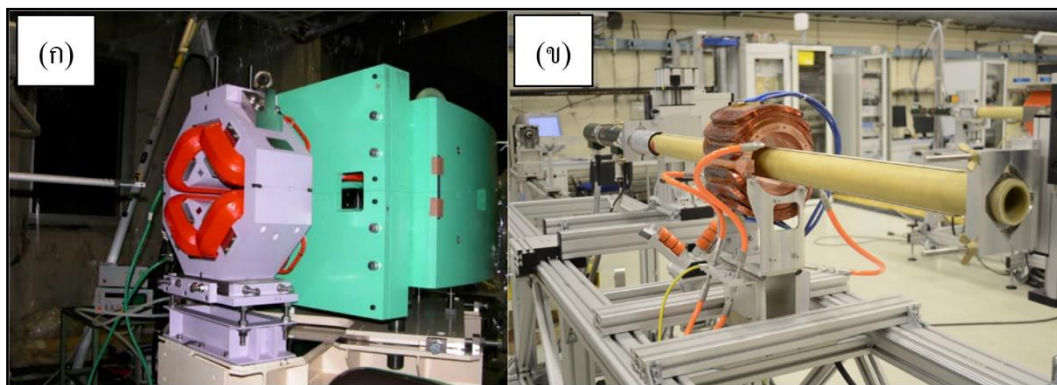
รูปที่ 1.2 การเรียงแม่เหล็กในวงกักเก็บอิเล็กตรอน (สีน้ำเงินเป็น Dipole magnet สีส้มเป็น Quadrupole magnet สีเหลืองเป็น Sextupole magnet) (ที่มา: SLRI)

ในการลำเลียงและการกักเก็บอิเล็กตรอนจะมีการใช้งานแม่เหล็กเป็นจำนวนมากในการบังคับทิศทางของอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่ในทิศทางที่ต้องการ ซึ่งประกอบไปด้วยแม่เหล็กถาวรและแม่เหล็กไฟฟ้า ในส่วนของแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีการออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งาน อาทิเช่นแม่เหล็กไฟฟ้าสี่ขั้ว (Quadrupole magnet) ที่ประกอบไปด้วยขดลวดจำนวน 4 ขั้ว เพื่อใช้ในการโฟกัส (Focusing) เพื่อบีบลำอิเล็กตรอน และดีโฟกัส (Defocusing) เพื่อขยายลำอิเล็กตรอน แสดงดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 Focusing Quadrupole และ Defocusing Quadrupole (ที่มา: SLRI)

แม่เหล็กไฟฟ้าในสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอนที่ใช้งานในส่วนต่าง ๆ ล้วนมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ความร้อนที่สูงเกินไปของขดลวดทองแดงอาจส่งผลให้แกนแม่เหล็กไฟฟ้าเสียรูปร่างได้ ดังนั้นการตรวจสอบสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อลดความเสียหายที่จะส่งผลกระทบต่อเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนในการบังคับลำอิเล็กตรอนที่กำลังเคลื่อนที่ เทคนิคที่ใช้ในการตรวจสอบสนามแม่เหล็กมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น การวัดสนามแม่เหล็กด้วยเทคนิคเส้นลวดขึง (Single stretched wire, SSW) การวัดสนามแม่เหล็กด้วยเทคนิคฮอลล์เอฟเฟกต์ (Hall effect) และการวัดสนามแม่เหล็กด้วยเทคนิคขดลวดหมุน (Rotating coil) เทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กที่นิยมใช้ในปัจจุบัน แสดงดังรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 เทคนิค Hall Effect (ก) และเทคนิค Rotating Coil (ข) (ที่มา CERN)

การวัดสนามแม่เหล็กด้วยเทคนิคขดลวดหมุนเป็นวิธีในการวัดสนามแม่เหล็กที่มีความรวดเร็วมากกว่าเทคนิคฮอลล์เอฟเฟกต์ โดยจะมีการติดตั้งตัวตรวจรู้ (Sensor) อยู่ภายในแท่งทรงกระบอกที่ทำจากวัสดุ G10 (Fiber glass epoxy) ที่มีความยาวมากกว่าแม่เหล็กที่จะวัด 20 เปอร์เซ็นต์ และความเร็วรอบในการหมุนขดลวดประมาณ 60 - 120 รอบต่อนาที งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวัดสนามแม่เหล็กที่ซับซ้อนด้วยเทคนิคขดลวดหมุนร่วมกับการชดเชยความผิดพลาดที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของแท่งทรงกระบอกที่ส่งผลต่อสัญญาณฮาร์โมนิกส์ที่ได้จากการวัด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อลดการนำเข้าเทคโนโลยีด้านการออกแบบ และสร้างเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กด้วยเทคนิคขดลวดหมุน
2. เพื่อออกแบบและสร้างระบบควบคุมความเร็วรอบของขดลวดหมุนร่วมกับการวัดการเคลื่อนตัวของแท่งทรงกระบอกที่บรรจุ Search coil
3. เพื่อวิเคราะห์ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนตัวของแท่งทรงกระบอกให้มีความแม่นยำในการวัดสนามแม่เหล็กที่สูงขึ้น

## 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1. เครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กด้วยเทคนิคขดลวดหมุนจะใช้วัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเท่านั้น ด้วยการวัดสนามแม่เหล็กจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามาตรฐาน แทนการใช้แม่เหล็กไฟฟ้าในเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน

2. ออกแบบและสร้างชุดขับเคลื่อนขดลวดหมุนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาดไม่เกิน 900 วัตต์ ที่ความเร็วรอบในการหมุนไม่เกิน 200 รอบต่อนาที พร้อมติดตั้งอุปกรณ์วัดความเร็วรอบและองศาการเคลื่อนที่รอบช่องว่างภายในโพรงแม่เหล็ก

3. วัดสนามแม่เหล็กด้วยขดลวดหมุนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 63.50 มิลลิเมตร ความยาว 470 มิลลิเมตร การติดตั้งขดลวดเป็นแบบเรเดียนคอยล์ภายในแท่งทรงกระบอก

4. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์การวัดการเคลื่อนตัวของแท่งทรงกระบอกในการศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมเคลื่อนที่ของโครงสร้างและสัญญาณที่ได้จากการวัดสนามแม่เหล็กด้วยโปรแกรม MATLAB สำหรับจำแนกสัญญาณที่เกิดขึ้น

5. ออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบของขดลวดหมุนด้วยตัวควบคุมแบบ PID ให้มีความผิดพลาดไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ พร้อมทั้งเก็บข้อมูลของสัญญาณฮาร์มอนิกส์และความเร็วรอบ

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. พัฒนาเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยขดลวดหมุน เพื่อลดการนำเข้าและพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ

2. ได้เครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยเทคนิคขดลวดหมุนที่มีความละเอียดสูงสำหรับตรวจสอบสัญญาณฮาร์มอนิกส์ของแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่างๆ

3. ได้โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์และลดความผิดพลาดในการวัดสนามแม่เหล็กด้วยเทคนิคขดลวดหมุน

4. เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ลักษณะของสัญญาณฮาร์มอนิกส์ที่ได้จากเครื่องมือวัดที่สามารถนำมาแก้ไขแม่เหล็กไฟฟ้าให้มีคุณภาพสูง

#### 1.5 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 6 บท 4 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำซึ่งจะกล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และเป้าหมายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ตลอดจนขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า พื้นฐานการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำบนขดลวดตัดผ่านสนามแม่เหล็ก พื้นฐานของระบบควบคุม พื้นฐานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง พื้นฐานการวัดและวิเคราะห์สัญญาณ การประมาณค่าของแบบจำลอง พื้นฐานการสอบเทียบเครื่องมือวัด และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

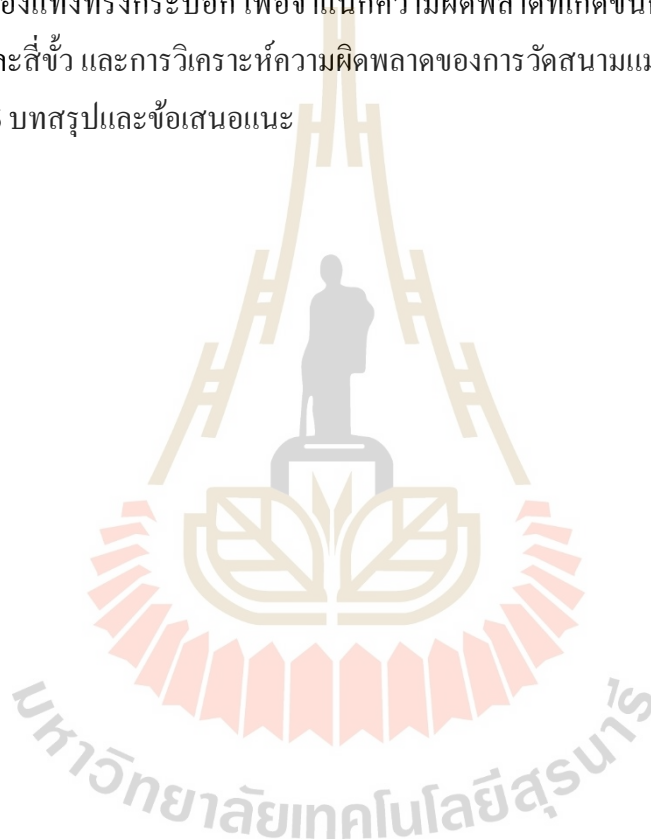
บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบ การสร้างเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก การออกแบบระบบควบคุม แบบจำลองคณิตศาสตร์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุม

การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวด้วยตัวควบคุมด้วยพารามิเตอร์ชุดเก่าและชุดใหม่ และการหาความถี่ธรรมชาติของเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก

บทที่ 4 การจำลองผลการเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วและสี่ขั้วด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข การจำลองผลการวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วและสี่ขั้วด้วยเทคนิคลดทอน และการจำลองผลกระทบที่เกิดจากการควบคุมความเร็วรอบในการวัดแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสองขั้วและสี่ขั้ว ด้วยตัวควบคุมด้วยพารามิเตอร์ชุดเก่าและชุดใหม่

บทที่ 5 การจำลองผลการวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากการควบคุมความเร็วรอบร่วมกับการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก เพื่อจำแนกความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับการวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วและสี่ขั้ว และการวิเคราะห์ความผิดพลาดของการวัดสนามแม่เหล็ก

บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ



## บทที่ 2

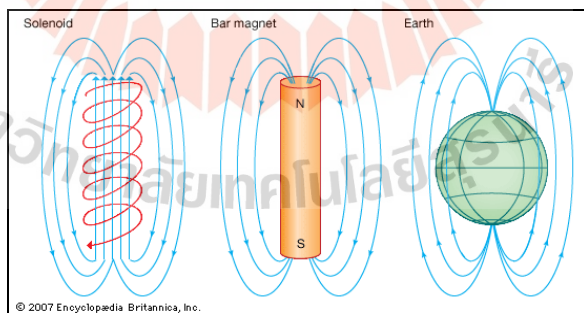
### ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 บทนำ

เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนทั่วโลกจะมีการใช้งานแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก ทั้งในส่วนของเครื่องอนุภาคและในวงกักเก็บอิเล็กตรอน ได้แก่ แม่เหล็กไฟฟ้า 2 ขั้ว (Dipole magnet) แม่เหล็กไฟฟ้า 4 ขั้ว (Quadrupole magnet) และแม่เหล็กไฟฟ้า 6 ขั้ว (Sextupole magnet) เป็นต้น ในบทนี้จะกล่าวถึงปรีทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การควบคุมความเร็วรอบการวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยเทคนิคขดลวดหมุน เป็นต้น

#### 2.2 พื้นฐานสนามแม่เหล็ก

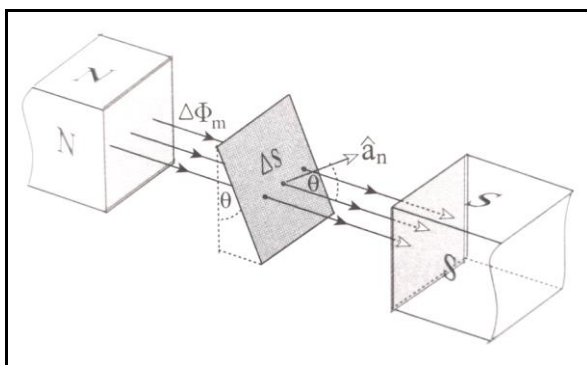
สนามแม่เหล็ก คือ บริเวณที่แม่เหล็กส่งอำนาจดึงดูดไปถึงหรือปริมาณที่บ่งบอกแรงกระทำบนประจุไฟฟ้าที่กำลังเคลื่อนที่ ซึ่งประจุไฟฟ้าที่กำลังเคลื่อนที่จะก่อให้เกิดสนามแม่เหล็ก กล่าวคือ รอบ ๆ ตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลจะมีสนามแม่เหล็กและสนามแม่เหล็กจะมีทิศทางออกจากขั้วเหนือไปเข้าสู่ขั้วใต้ โดยเส้นแรงแม่เหล็กจะมีลักษณะเป็นเส้นไม่ตัดกัน แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เส้นแรงแม่เหล็กพุ่งออกจากขั้วเหนือเข้าสู่ขั้วใต้

##### 2.2.1 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก

เพื่อให้รู้ว่าพื้นที่ใดมีฟลักซ์แม่เหล็กมากหรือน้อย จึงมีการกำหนดปริมาณทางแม่เหล็กที่เรียกว่า ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ( $B$ ) เป็นปริมาณเวกเตอร์มีทิศทางในแนวเส้นสัมผัสกับเส้นแรงแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ฟลักซ์แม่เหล็กตัดผ่านพื้นที่ใด ๆ

จากรูปที่ 2.2 เส้นแรงแม่เหล็ก  $\Delta\Phi_m$  พุ่งผ่านทำมุม  $\theta$  กับเส้นตั้งฉากพื้นที่  $\Delta S$  ซึ่งเป็นพื้นที่พิจารณา สามารถหาพื้นที่ตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็กได้เท่ากับ  $\Delta S \cos \theta$  และเมื่อกำหนดว่าความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก คือ จำนวนเส้นแรงต่อหน่วยพื้นที่ที่ตั้งฉาก ดังสมการที่ 2.1

$$B = \frac{\Delta\Phi_m}{\Delta S \cos \theta} \quad (2.1)$$

หรือ

$$\Delta\Phi_m = B \Delta S \cos \theta \quad (2.2)$$

โดยที่  $B$  เป็นขนาดของเวกเตอร์  $\vec{B}$  และกำหนดให้  $\theta$  เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย มีทิศตั้งฉากกับพื้นที่  $\Delta S$  เมื่อใช้  $\hat{a}_n$  บอกทิศพื้นที่  $\Delta S$  เขียนเป็น  $\hat{a}_n \Delta S$  หรือจากสมการ  $\Delta\vec{B}$  เขียนให้อยู่ในรูปผลคูณสเกลาร์ ดังสมการที่ 2.3

$$\Delta\Phi_m = \vec{B} \cdot \Delta\vec{S} \quad (2.3)$$

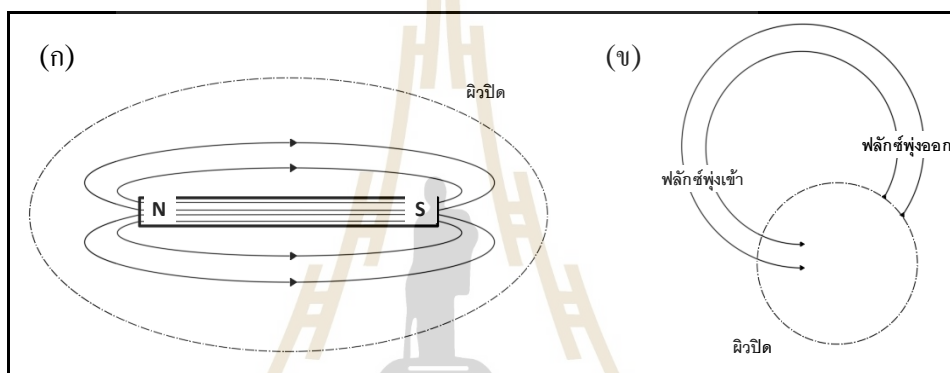
เมื่อ  $\Delta S \rightarrow 0$  จะได้

$$\Delta\Phi_m = \vec{B} \cdot \Delta\vec{S}$$



$$\Phi_m = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (2.4)$$

โดยที่ฟลักซ์แม่เหล็กเป็นเส้นที่ครบวงหรือเป็นวงปิด และในกรณีที่ฟลักซ์แม่เหล็กพุ่งผ่านพื้นผิวที่เป็นผิปิดใด ๆ แสดงดังรูปที่ 2.3 โดยรูปที่ 2.3 (ก) จะไม่มีเส้นแรงพุ่งผ่านผิวปิดออกมา ส่วนรูปที่ 2.3 (ข) มีฟลักซ์แม่เหล็กพุ่งผ่านผิวปิดแต่จำนวนเส้นแรงที่พุ่งเข้าจะเท่ากับพุ่งออก ส่งผลให้ฟลักซ์แม่เหล็กรวมภายในผิวปิดมีค่าเท่ากับศูนย์ จากสมการที่ 2.3 จะได้ความสัมพันธ์ตามกฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็ก ดังสมการที่ 2.4



รูปที่ 2.3 ฟลักซ์แม่เหล็กวงปิด

จากสมการที่ 2.4 จะได้ความสัมพันธ์ตามกฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็ก ดังสมการที่ 2.5

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (2.5)$$

จากสมการที่ 2.5 ใช้ทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์ จะได้

$$\int_V (\nabla \cdot \vec{B}) dv = 0 \quad (2.6)$$

หรือ

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.7)$$

สมการที่ 2.7 เป็นหนึ่งในสมการของแมกซ์เวลล์ ซึ่งสนามที่ไม่มีค่าไดเวอร์เจนซ์ จะเรียกว่า “สนามโซลีนอยดัล” หรือ “สนามไร้แหล่งกำเนิด” เส้นฟลักซ์ที่เกิดขึ้นทุกเส้นในสนามนี้ จะมีลักษณะเป็นวงปิด

### 2.2.2 ความเข้มสนามแม่เหล็ก

ตัวกลางในปริภูมิโดยรอบแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กมีผลต่อสนามแม่เหล็กที่แตกต่างกัน และได้กำหนดให้ค่าสภาพซึมผ่านได้ (Permeability) แทนด้วย  $\mu_0$  สำหรับสุญญากาศ เป็นลักษณะสมบัติของตัวกลางที่มีผลต่อความแรงของสนามแม่เหล็ก จึงกำหนดให้  $\vec{H}$  เป็นปริมาณเวกเตอร์ที่บ่งบอกความแรงของสนามแม่เหล็กในตัวกลาง และเรียก  $\vec{H}$  ว่า “ความเข้มสนามแม่เหล็ก” ซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ดังสมการที่ 2.8

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} \quad (2.8)$$

โดยที่  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A-m}$

### 2.3 พื้นฐานแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

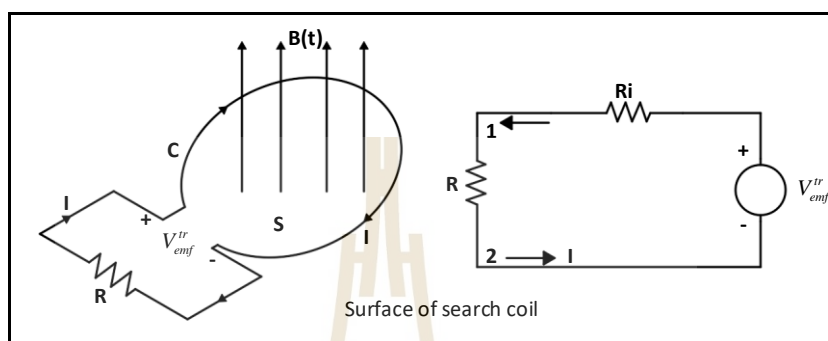
การวัดสนามแม่เหล็กจะใช้กฎของฟาราเดย์ โดยการนำเข้าขดลวดไปตัดกับสนามแม่เหล็กที่ต้องการจะวัดผลที่ได้จากการวัด คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Electromotive force,  $V_{emf}$ ) ซึ่งกฎของฟาราเดย์กล่าวไว้ว่า เมื่อมีฟลักซ์แม่เหล็กที่ตัดผ่านลูปวงจรใด ๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้น แสดงดังสมการที่ 2.9

$$V_{emf} = -N \frac{d\Phi_m}{dt} = -N \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (2.9)$$

เครื่องหมายลบเป็นตัวบ่งชี้ว่าทิศทางการไหลกระแสไฟฟ้าไหลทิศทางสร้างสนามแม่เหล็กขึ้นมาด้านสนามแม่เหล็กที่มาเหนี่ยวนำตามกฎของเลนซ์ และพิจารณาเฉพาะแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำตามกฎของฟาราเดย์ซึ่งมีอยู่ 3 เงื่อนไข ได้แก่

### 2.3.1 ตัวนำอยู่หนึ่งสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงตามเวลา

เมื่อตัวนำ (ขดลวด) หุคหนึ่งไม่มีการเคลื่อนที่ สนามแม่เหล็ก  $\vec{B}$  มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาจะส่งผลให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเกิดขึ้น และเรียกแรงเคลื่อนไฟฟ้านี้ว่า “แรงเคลื่อนไฟฟ้าหม้อแปลง (Transformer emf,  $V_{emf}^{tr}$ )” แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 พื้นที่วงปิดตัวนำที่สนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาและวงจรสมมูล

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในกรณีนี้บริเวณพื้นที่ปิดล้อมแสดงดังสมการที่ 2.10

$$V_{emf}^{tr} = -N \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (2.10)$$

แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดตามสมการที่ 2.10 ทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างขั้ว 1 กับ 2 ของวงปิดตัวนำ เท่ากับ  $V_{12} = V_{emf}^{tr}$  ถ้าสนามแม่เหล็กไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะทำให้  $\partial \vec{B} / \partial t = 0$  ส่งผลให้  $V_{emf}^{tr} = 0$  กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  $I$  จะไหลในทิศทางสร้างสนามแม่เหล็ก  $\vec{B}_{ind}$  ในทิศทางสวนกับสนามแม่เหล็กที่มาเหนี่ยวนำ  $\vec{B}(t)$  ตามกฎของเลนซ์ โดยทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะกลับทางเมื่อสนามแม่เหล็กค่อย ๆ ลดลงและกลับทิศทางเมื่อสนามแม่เหล็กค่อย ๆ เพิ่มขึ้น แสดงว่าตัวนำเป็นแหล่งกำเนิดแรงเคลื่อนไฟฟ้า ดังวงจรสมมูลในรูปที่ 2.4

แรงเคลื่อนไฟฟ้ากำหนดได้จากงานที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายประจุต่อหนึ่งหน่วยประจุ ในกรณีที่เส้นทางเคลื่อนย้ายประจุเป็นวงปิดของตัวนำจะได้

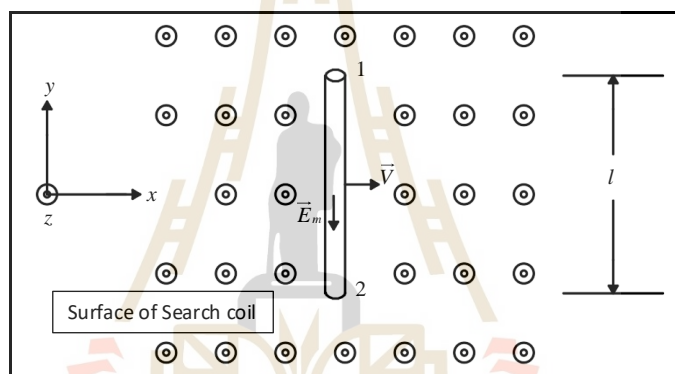
$$V_{emf}^{tr} = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (2.11)$$

จากสมการที่ 2.11 ถ้าพิจารณาตัวนำมีการพันขดลวดจำนวน 1 รอบหรือ  $N = 1$  จะได้

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{s} \quad (2.12)$$

### 2.3.2 ตัวนำเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กที่อยู่นิ่ง

เมื่อตัวนำเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กที่อยู่นิ่งจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเช่นเดียวกัน แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในลักษณะนี้เรียกว่า “แรงเคลื่อนไฟฟ้าเคลื่อนที่ (Motion emf,  $V_{emf}^m$ )” แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ตัวนำยาว  $l$  เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $\vec{v}$  ตามแกนนอน ( $x$ ) ในสนามแม่เหล็ก  $B\hat{a}_z$

จากรูปที่ 2.5 ตัวนำยาว  $l$  เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $\vec{v}$  ตามแกนนอน ( $x$ ) ผ่านสนามแม่เหล็กทำให้ประจุอิสระ  $q$  บนตัวนำถูกแรงทางแม่เหล็กทำให้เคลื่อนที่ ดังสมการที่ 2.13

$$\vec{F}_m = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.13)$$

แรงทางแม่เหล็กที่กระทำต่อประจุในกรณีนี้เท่ากับแรงที่เกิดจากสนามไฟฟ้า  $\vec{E}_m$  เรียกว่า “สนามไฟฟ้าเคลื่อนที่ (Motional Electric Field)” มีทิศทาง  $-\hat{a}_y$  และเนื่องจาก  $\vec{E} = \vec{F}/q$  แสดงดังสมการที่ 2.14

$$\vec{E}_m = \vec{v} \times \vec{B} \quad (2.14)$$

จากการเคลื่อนที่ของตัวนำดังรูปที่ 2.5 แรงแม่เหล็กทำให้ประจุบวกเคลื่อนที่ไปทางเลข 2 ประจุลบเคลื่อนที่ไปทางเลข 1 ส่งผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น ( $V_{emf}^m$ ) จึงเกิดความต่างศักย์ระหว่างปลายทั้ง 2 ข้าง แสดงดังสมการที่ 2.15

$$V_{emf}^m = V_{12} = \int_2^1 \vec{E}_m \cdot d\vec{l} \quad (2.15)$$

หรือ

$$V_{emf}^m = \int_2^1 (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \quad (2.16)$$

### 2.3.3 ตัวนำเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

การเคลื่อนที่ของตัวนำเป็นการทำให้ประจุอิสระ ( $q$ ) บนตัวนำที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $\vec{v}$  และเมื่อตัวนำเคลื่อนเข้าไปในสนามไฟฟ้า  $\vec{E}$  และสนามแม่เหล็ก  $\vec{B}$  แล้วจะทำให้เกิดแรงลอเรนตซ์ กระทำต่อประจุ แสดงดังสมการที่ 2.17

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.17)$$

จากสมการที่ 2.17 เป็นผลของแรงลอเรนตซ์เมื่อเทียบแรงทางไฟฟ้า ( $\vec{F} = q\vec{E}$ ) จะทำให้ได้สมการไฟฟ้าเคลื่อนที่  $\vec{E}_m$  แสดงดังสมการที่ 2.18 และสมการที่ 2.19

$$\vec{E}_m = \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \quad (2.18)$$

หรือ

$$\vec{E} = \vec{E}_m - \vec{v} \times \vec{B} \quad (2.19)$$

แทนค่า  $\vec{E}$  ลงในสมการที่ 2.12 จะได้

$$\oint_C (\vec{E}_m - \vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{s} \quad (2.20)$$

จัดรูปใหม่จะได้

$$\oint_C \vec{E}_m \cdot d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{s} + \oint_C (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \quad (2.21)$$

จากสมการที่ 2.21 พจน์ที่หนึ่งขวามือจะประกอบไปด้วยแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก  $V_{emf}^{tr}$  และพจน์ที่สองจะเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของ search coil,  $V_{emf}^m$  เมื่อกำหนดให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าทั้งหมดเป็น  $V_{emf}$  จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.22

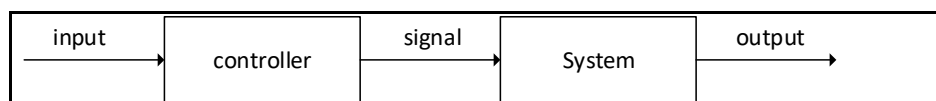
$$V_{emf} = V_{emf}^{tr} + V_{emf}^m \quad (2.22)$$

## 2.4 พื้นฐานการควบคุมความเร็วรอบ

การวัดสนามแม่เหล็กด้วยเทคนิคขดลวดหมุนจำเป็นต้องมีระบบควบคุมการหมุนขดลวดให้มีความเร็วรอบคงที่ เนื่องจากแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับความเร็วรอบในการหมุนขดลวด ในงานวิจัยนี้เลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับหมุนขดลวด โดยโครงสร้างของระบบควบคุมจะมีอยู่ 2 แบบ ดังต่อไปนี้

### 2.4.1 ระบบควบคุมแบบวงเปิด (Open loop control system)

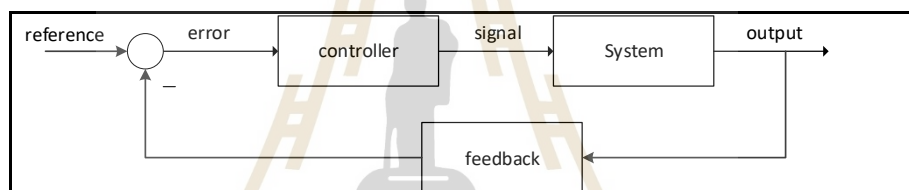
ระบบควบคุมแบบวงเปิดเป็นระบบควบคุมที่ไม่มีการนำเอาสัญญาณเอาต์พุตการป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตทำให้ง่ายต่อการควบคุมมอเตอร์และประหยัดค่าใช้จ่ายเนื่องจากไม่มีการติดตั้งตัวควบคุม (Controller) เข้าไปในระบบ ดังนั้นเอาต์พุตจะไม่มีผลการทำงานต่อระบบ เช่น การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ในการหมุนขดลวด ถ้ามีการรบกวนจากภายนอกหรือมีภาระกรรมเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์เกิดการเปลี่ยนแปลงระบบจะไม่สามารถชดเชยความผิดพลาดของความเร็วรอบที่เกิดขึ้นได้ แผนภาพระบบควบคุมแบบวงเปิด แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แผนภาพระบบควบคุมแบบวงเปิด

### 2.4.2 ระบบควบคุมแบบวงปิด (Close loop control system)

ระบบควบคุมแบบวงปิดเป็นระบบควบคุมที่มีการป้อนกลับ (Feedback) โดยนำเอาสัญญาณเอาต์พุตมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุต ความแตกต่างระหว่างสัญญาณเอาต์พุตและสัญญาณอินพุต คือ สัญญาณความผิดพลาด (Error) ที่เกิดขึ้นกับระบบ สำหรับการควบคุมมอเตอร์เพื่อหมุนขดลวดจะใช้ระบบควบคุมแบบวงปิดนี้ เพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการหมุนให้มีความน้อยที่สุด แผนภาพระบบควบคุมแบบวงปิด แสดงดังรูปที่ 2.7

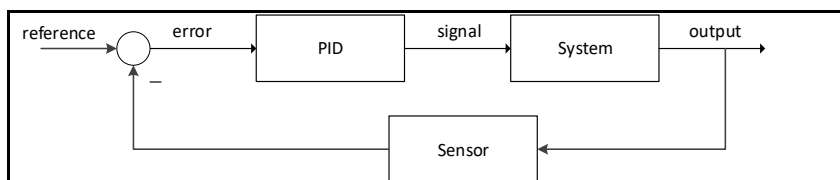


รูปที่ 2.7 แผนภาพระบบควบคุมแบบวงปิด

### 2.4.3 ตัวควบคุม (Controller)

การควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ในการหมุนขดลวดให้มีความเร็วรอบที่คงที่นั้น จำเป็นต้องมีตัวควบคุมซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID controller) เนื่องจากเป็นตัวควบคุมอันทรงประสิทธิภาพที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย กว่าร้อยละ 90 ของปัญหาการควบคุมสามารถแก้ไขได้ด้วยตัวควบคุมชนิดนี้ โดยตัวควบคุม “พี” คือ ตัวอักษร “P” มาจากตัวอักษรตัวแรกของคำว่า “Proportional” หมายถึง การปรับสัดส่วนสัญญาณ “ไอ” คือ ตัวอักษร “I” มาจากตัวอักษรของคำว่า “Integral” หมายถึง การอินทิเกรตสัญญาณ และ “ดี” คือ ตัวอักษร “D” มาจากตัวอักษรของคำว่า “Derivative” หมายถึง การอนุพันธ์สัญญาณ กลไกทั้งสามที่กระทำกับสัญญาณจะถูกรวมเข้าด้วยกัน เพื่อทำหน้าที่ปรุ่่งแต่งสัญญาณอย่างเหมาะสมให้เกิดการควบคุมแบบอัตโนมัติ ในการใช้งานตัวควบคุมไม่จำเป็นต้องใช้กลไกทั้งสามพร้อมกัน อาจจะใช้ “พี” เพียงอย่างเดียว หรือใช้ “พีไอ” หรือ “พีดี” ควบคู่กัน เป็นต้น ซึ่งตัวชดเชยแต่ละตัวต่างก็มีข้อของ

ตัวมันเอง และใช้เพื่อวัตถุประสงค์ในการชดเชยพลวัตของระบบ แผนภาพตัวควบคุมแบบ “พีไอดี” แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แผนภาพระบบควบคุมแบบพีไอดี

กลไกของตัวควบคุม “พีไอดี” ทั้งสามที่กระทำกับสัญญาณถูกรวมเข้าด้วยกัน เพื่อปรับแต่งสัญญาณอย่างเหมาะสมเพื่อทำให้เกิดการควบคุมแบบอัตโนมัติ เมื่อมีการใช้ตัวควบคุม จะพบสัญญาณที่ออกจากตัวควบคุม แสดงดังสมการที่ 2.23

$$u(t) = K_p (e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (2.23)$$

เมื่อ	$u(t)$	คือ สัญญาณควบคุม
	$e(t)$	คือ ค่าความผิดพลาด
	$K_p$	คือ ค่าอัตราขยายแบบสัดส่วน
	$T_i$	คือ ค่า Integral time
	$T_d$	คือ ค่า Derivative time

ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (P) เป็นเทคนิคที่ง่ายที่สุด คือ สัญญาณควบคุม  $u(t)$  จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าสัญญาณความผิดพลาดที่เกิดจากผลต่างระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตของระบบ ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.24

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.24)$$

ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล (I) สัญญาณควบคุมอาจจะมีค่าค่อนข้างมากก็ได้โดยไม่ลดลงทั้ง ๆ ที่สัญญาณความผิดพลาดมีค่าเป็นศูนย์ในภายหลังหรือเมื่อเวลาผ่านไปแล้วก็ตาม ทั้งนี้



เนื่องจากสัญญาณควบคุมแบบอินทิกรัลจะขึ้นอยู่กับค่าในอดีตต่างจากตัวควบคุมแบบสัดส่วนที่ขึ้นอยู่กับค่าในปัจจุบัน ข้อดีของตัวควบคุมแบบอินทิกรัลก็เพื่อลดค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว การตอบสนองของการควบคุมแบบอินทิกรัล แสดงดังสมการที่ 2.25

$$u(t) = \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (2.25)$$

ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (D) ตัวควบคุมชนิดนี้โดยส่วนมากแล้วใช้ร่วมกับตัวควบคุมชนิดอื่น เช่น ใช้ร่วมกับตัวควบคุมแบบสัดส่วน ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์จะช่วยในการเพิ่มค่าความหน่วงให้กับระบบที่ควบคุม กล่าวคือทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้นแต่ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์นี้จะไม่ทำให้ค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวมีค่าเป็นศูนย์ได้ ดังนั้นถ้าสัญญาณความผิดพลาดมีสัญญาณรบกวนมาก สัญญาณสั่งการที่ออกจากตัวควบคุมเชิงอนุพันธ์จะกระเพื่อมอาจจะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้ การตอบสนองของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ แสดงดังสมการที่ 2.26

$$u(t) = K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.26)$$

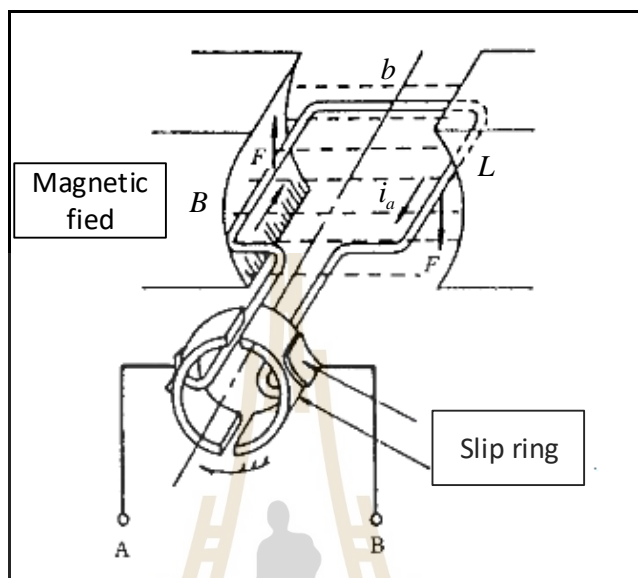
ตัวควบคุมจะถูกรอกแบบไว้เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมไปควบคุมระบบเมื่อมีสัญญาณความผิดพลาดเกิดขึ้น ซึ่งกฎของการควบคุม คือ เมื่อสัญญาณความผิดพลาดมีค่าไม่เป็นศูนย์ที่มาจาก การเปลี่ยนแปลงคำสั่งหรือเกิดการรบกวนหน้าที่ของตัวควบคุม คือ พยายามควบคุมตัวแปรของระบบให้ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ หน้าที่ของตัวควบคุมสรุปพอสังเขป ดังนี้

- ลดค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว
- ลดค่าเวลาเข้าที่
- เพื่อให้การตอบสนองในช่วงครู่มีลักษณะตามที่กำหนดไว้

## 2.5 พื้นฐานมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC motor)

ก่อนการออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบการหมุนขดลวดจะต้องทราบแบบจำลองคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ที่นำมาใช้งาน โดยมอเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล การสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะมีอยู่ 2 วิธีขึ้นอยู่กับตัวแปรที่ควบคุม ได้แก่ Armature control และ Field control ซึ่งงานวิจัยนี้จะควบคุมด้วย

วิธี Armature control โดยการปรับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับวงจรรออาร์เมเจอร์ (Armature circuit) เพื่อควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แผนภาพมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากรูปที่ 2.9 แรง \$F\$ บนขดลวดความยาว \$L\$ ที่มีกระแส \$i\_a\$ ไหลผ่านและวางอยู่ในสนามแม่เหล็ก \$B\$ และแรง \$F\$ ที่กระทำกับสนามแม่เหล็ก \$B\$ มีค่าดังสมการที่ 2.27

$$F = Bi_a L \quad (2.27)$$

ถ้าขดลวดของมอเตอร์มีจำนวนเท่ากับ \$N\$ จะได้

$$F = NBi_a L \quad (2.28)$$

แรง \$F\$ จะส่งผลให้เกิดแรงบิด \$T\$ เมื่อ \$T = Fb\$ โดย \$b\$ คือ ความกว้างของขดลวด จะได้แรงบิดของมอเตอร์ ดังสมการที่ 2.29

$$T = NBi_a Lb \quad (2.29)$$

จากสมการที่ 2.29 จะเห็นได้ว่าแรงบิด  $T$  เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ  $Bi_a$  ตัวแปรอื่น  
จะมีค่าคงที่สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จะได้สมการแรงบิดใหม่ แสดงดังสมการที่ 2.30

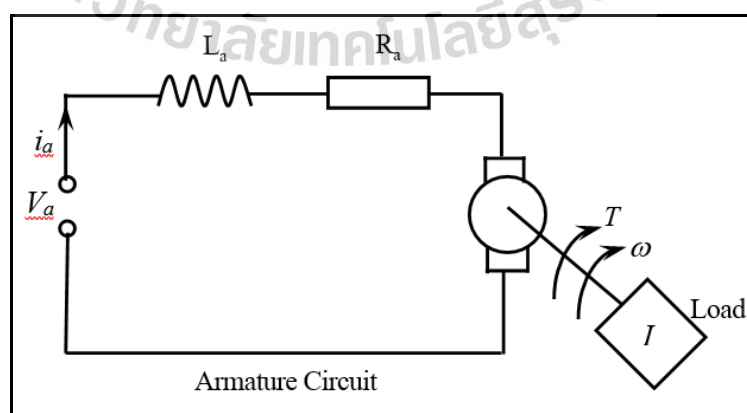
$$T = k_3 Bi_a \quad (2.30)$$

โดยที่  $k_3 = NbL$

ขดลวดอาร์เมเจอร์ที่วางอยู่ในสนามแม่เหล็กเมื่อเกิดการหมุนจะก่อให้เกิด  
การเหนี่ยวนำไฟฟ้า โดยทิศทางของแรงไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะตรงกันข้ามกับความต่างศักย์ที่ทำให้เกิด  
การหมุนของมอเตอร์ ซึ่งแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำในลักษณะนี้ว่า “back emf”  
จะเป็นอัตราส่วนกับการหมุนของขดลวดอาร์เมเจอร์และสนามแม่เหล็ก สำหรับการควบคุมมอเตอร์  
ผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์นั้นจะกำหนดให้ field coil มีค่าคงที่หรือสนามแม่เหล็ก ( $B$ ) ในมอเตอร์คงที่  
และปรับเปลี่ยนความเร็วรอบของมอเตอร์ด้วย  $V_b$  แสดงดังสมการที่ 2.31

$$V_b = k_b \omega \quad (2.31)$$

เมื่อ  $k_b$  คือ ค่าคงที่ในวงจรรอาร์เมเจอร์,  $\omega$  คือ ความเร็วรอบของมอเตอร์ และ  
ในวงจรรอาร์เมเจอร์จะประกอบไปด้วย ความต้านทาน  $R_a$  และความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์  $L_a$   
แสดงดังรูปที่ 2.10 ซึ่งในกรณีนี้จะก่อให้เกิด back emf,  $V_b$  ขึ้น



รูปที่ 2.10 แผนภาพวงจรรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากรูปที่ 2.10 จะเห็นว่าค่าแรงดันที่ให้กับระบบที่เป็น  $V_a$  จะถูกลดทอนด้วย back emf,  $V_b$  ซึ่งจะทำให้ได้สัญญาณความผิดพลาด  $V_a - V_b$  แสดงดังสมการที่ 2.32 และความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณความผิดพลาด ดังสมการที่ 2.33

$$V_a - V_b = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a \quad (2.32)$$

แทนสมการที่ 2.31 ลงในสมการที่ 2.32 จะได้

$$V_a - k_b \omega = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a \quad (2.33)$$

จากสมการที่ 2.30 กระแส  $i_a$  ในขดลวดอาร์เมเจอร์จะทำให้เกิดแรงบิด  $T$  ซึ่งจะมีค่าดังสมการที่ 2.34

$$T = k_s B i_a = k_t i_a \quad (2.34)$$

เมื่อ  $k_t$  คือค่าคงที่ของแรงบิด ซึ่งจะเป็นแรงบิดนั้นจะกลายเป็นต้นกำลังให้กับระบบเพื่อเอาชนะความเฉื่อยและส่วนของการหมุนทั้งหมด แสดงดังสมการที่ 2.35

$$Net\_torque = T - damping\_torque \quad (2.35)$$

เมื่อ  $damping\_torque = c\omega$  คือความหน่วง และ  $c$  เป็นค่าคงที่ ถ้าหากพิจารณาว่าเพลานี้ไม่มีความยืดหยุ่นเชิงมุม หรือเพลานี้เป็นวัตถุแข็งเกร็ง จะได้

$$Net\_torque = k_t i_a - c\omega \quad (2.36)$$

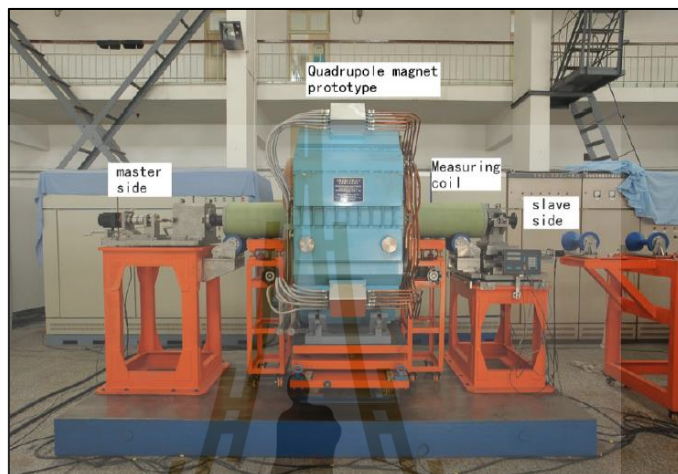
จากกฎข้อที่ 2 ของ Newton จะได้

$$I \frac{d\omega}{dt} + T_L = k_t i_a - c\omega \quad (2.37)$$

เมื่อ  $T_L$  คือ แรงบิดภายนอกระบบ (External Torque)

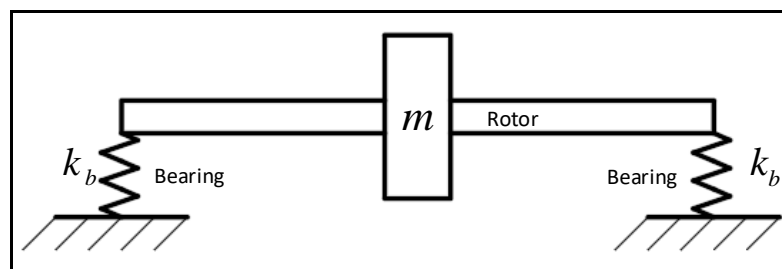
## 2.6 การเคลื่อนตัวของแท่งทรงกระบอก

โครงสร้างของขดลวดหมุน (Rotating coil) จะบรรจุขดลวด (Search coil) อยู่ภายในและรองรับด้วยแบร์ริงจำนวน 2 ตัว ในตำแหน่ง Drive end และตำแหน่ง Non-driver ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ แสดงดังรูปที่ 2.11

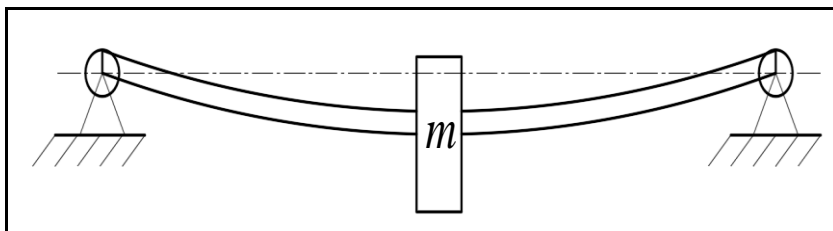


รูปที่ 2.11 การวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า 4 ขั้ว

การพิจารณาแบบจำลองของโครงสร้างขดลวดหมุนจะแบ่งออกเป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 พิจารณาให้แบร์ริงที่รองรับแท่งทรงกระบอกเป็นวัสดุยืดหยุ่น (Flexible) ส่วนเพลเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid) แสดงดังรูปที่ 2.12 และกรณีที่ 2 พิจารณาให้แบร์ริงเป็นวัตถุแข็งเกร็ง ส่วนแท่งทรงกระบอกเป็นวัตถุที่มีความยืดหยุ่นแสดงดังรูปที่ 2.13

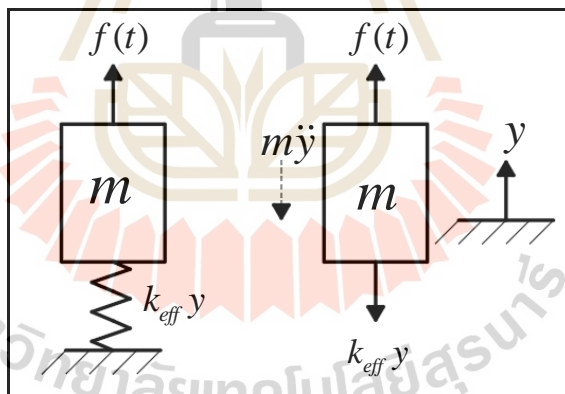


รูปที่ 2.12 แท่งทรงกระบอกเป็นวัตถุแข็งเกร็ง และแบร์ริงเป็นวัตถุยืดหยุ่น



รูปที่ 2.13 แท่งทรงกระบอกเป็นวัตถุยืดหยุ่น และแบร์ริงเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (ที่มา NPTEL)

จากทั้ง 2 กรณี ปัญหาการสั่นทางกลส่วนมากที่เกิดขึ้นนั้นจะมาจากการหมุนของแท่งทรงกระบอกเนื่องจากน้ำหนักของแท่งทรงกระบอกที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่จึงก่อให้เกิดความไม่สมดุลขณะหมุน ผลจากความไม่สมดุลขณะหมุนจะทำให้เกิดการสั่นแบบบังคับกระทำต่อการวัดสนามแม่เหล็ก นอกจากนั้นยังอาจจะเกิดการเอียงศูนย์กลางของแท่งทรงกระบอกที่เกิดจากการประกอบที่ไม่สมมาตรซึ่งนำไปสู่การเอียงศูนย์กลางทางกล ต่อไปนี้จะแสดงแบบจำลองการสั่นเนื่องจากความไม่สมดุลทางกล แสดงดังรูปที่ 2.14

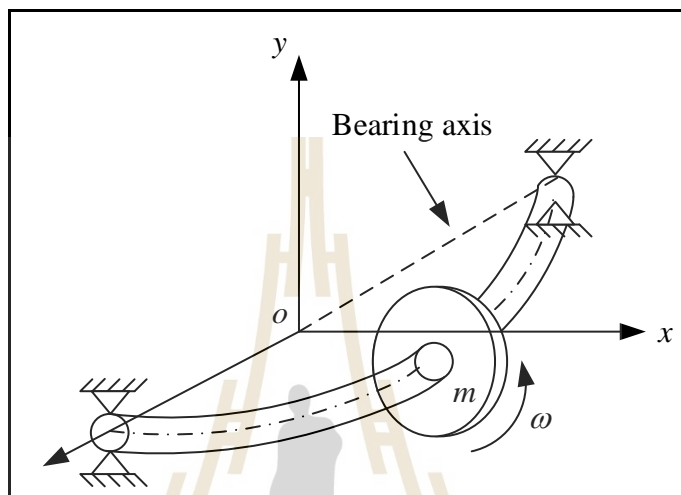


รูปที่ 2.14 แบบจำลองความไม่สมดุลทางกล

จากแบบจำลองความไม่สมดุลของการหมุน เมื่อ  $k_{eff}$  คือ ความแข็งของแท่งทรงกระบอกหรือแบร์ริง และ  $f(t)$  คือ แรงเนื่องจากความไม่สมดุล แสดงดังสมการที่ 2.38

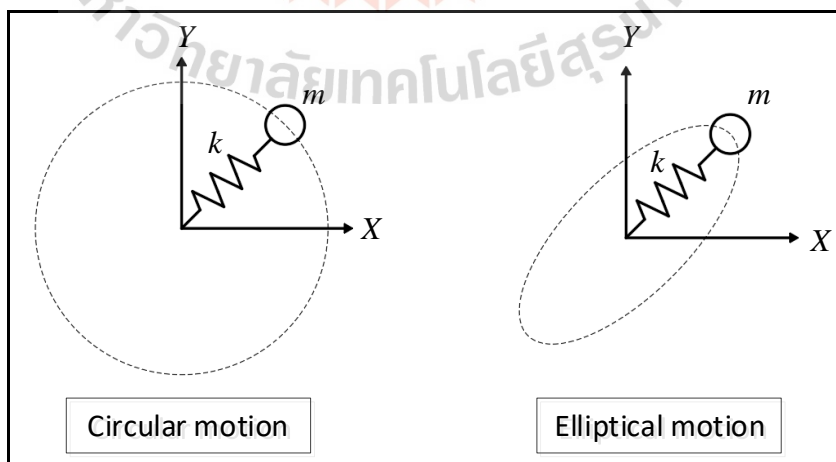
$$f(t) = m\omega^2 e \sin \omega t \quad (2.38)$$

เมื่อ  $m$  คือ มวลของแท่งทรงกระบอก (ขดลวดหมุน),  $e$  คือ ระยะการโก่งตัวของแท่งทรงกระบอกจากจุดศูนย์กลาง,  $\omega$  คือ ความถี่ของการหมุน และ  $me$  คือ แรงที่ทำให้เกิดความไม่สมดุล โดยแรงเนื่องจากความไม่สมดุลดังกล่าวเกิดจากการโก่งตัวของแท่งทรงกระบอก แสดงดังรูปที่ 2.15



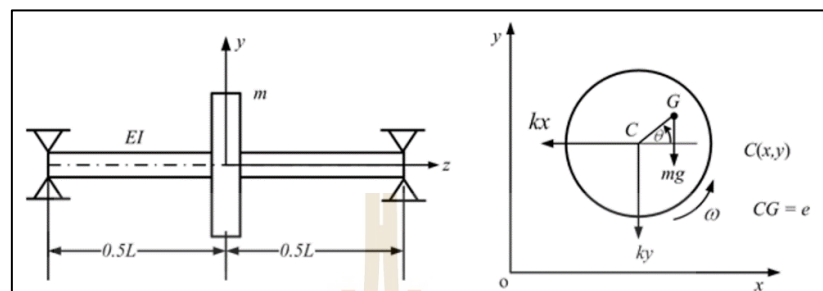
รูปที่ 2.15 แบบจำลองการโก่งตัวของเพลา

การโก่งตัวของแท่งทรงกระบอกที่เกิดจากน้ำหนักตัว จะก่อให้เกิดพฤติกรรมการเคลื่อนตัวในลักษณะต่าง ๆ เช่น วงกลมหรือวงรี แสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ลักษณะการเคลื่อนตัวของแท่งทรงกระบอก

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาการเคลื่อนที่ของแท่งทรงกระบอก ดังนั้นจะทำการวิเคราะห์ในกรณีที่แบร์ริงเป็นวัตถุแข็งเกร็ง ส่วนแท่งทรงกระบอกเป็นวัตถุยืดหยุ่น แบบจำลองที่ใช้ในการพิจารณาแสดงดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แบบจำลองทางกลของแท่งทรงกระบอก

จากรูปที่ 2.17 ในการวิเคราะห์การสั่นทางกลของแท่งทรงกระบอกจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน ได้แก่ การสั่นตามขวาง (Transverse vibration) และการสั่นแบบบิด (Torsional vibration) ในกรณีนี้จะสนใจไปที่การสั่นตามขวางของเพลลาโดยพิจารณาเป็น 2 - DOF และกำหนดให้แท่งทรงกระบอกหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ การเคลื่อนที่ของแท่งทรงกระบอกในแกนนอน (Horizontal axis) และแนวแกนตั้ง (Vertical axis) ดังสมการที่ 2.39 และสมการที่ 2.40 ดังต่อไปนี้

การเคลื่อนที่ในแนวแกนนอน

$$m\ddot{x} + c_x \dot{x} + k_x x = m\omega^2 e \cos \omega t \quad (2.39)$$

การเคลื่อนที่ในแนวแกนตั้ง

$$m\ddot{y} + c_y \dot{y} + k_y y = m\omega^2 e \cos \omega t \quad (2.40)$$

ขนาดของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่กระทำเนื่องจากความไม่สมดุลในการหมุนของแท่งทรงกระบอก คือ  $m\omega^2 e$  โดยที่ขนาดของแรงจะแปรผันตรงกับความถี่รอบการหมุน ( $\omega$ ) ของแท่งทรงกระบอก เมื่อ  $y$  และ  $x$  คือ ขนาดของแอมพลิจูดในแนวแกนตั้งและแนวแกนนอน ดังนั้นจะได้ระยะการเหวี่ยงตัวในแนวแกนตั้งและแนวแกนนอนดังสมการที่ 2.41 และสมการที่ 2.42



ระยะการเหวี่ยงตัวในแนวแกนนอน (Horizontal amplitude, x)

$$x = \frac{m\omega^2}{\sqrt{(k_x - m\omega^2)^2 + (c_x\omega)^2}} \quad (2.41)$$

ระยะการเหวี่ยงตัวในแนวแกนตั้ง (Vertical amplitude, y)

$$y = \frac{m\omega^2}{\sqrt{(k_y - m\omega^2)^2 + (c_y\omega)^2}} \quad (2.42)$$

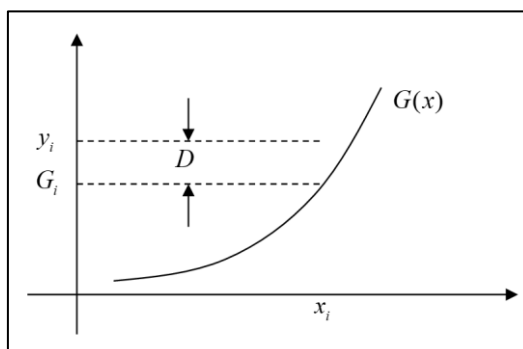
จากสมการที่ 2.41 และสมการที่ 2.42 สามารถนำระยะการเหวี่ยงตัวในแนวแกนตั้งและแนวแกนนอนมาวิเคราะห์และคำนวณหาสมการการเคลื่อนที่ของวงโคจรแท่งทรงกระบอกในขณะหมุน เพื่อบ่งชี้ว่าการเคลื่อนที่เป็นในลักษณะวงกลม (Ideal) วงรีแนวนอน (Horizontal ellipse) และวงรีแนวตั้ง (Vertical ellipse) เป็นต้น

## 2.7 การประมาณค่าของระบบโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบไม่เป็นเชิงเส้น

การประมาณค่าฟังก์ชัน โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด จะได้ฟังก์ชันที่เป็นตัวแทนที่ดีที่สุดของข้อมูลเพราะได้จากการเฉลี่ยค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลให้เหลือน้อยที่สุด ดังนั้น เมื่อเขียนเส้นกราฟของฟังก์ชัน เส้นกราฟจะผ่าน ไปบริเวณต่าง ๆ ของข้อมูล โดยจะตัดผ่านข้อมูลในบางจุด ข้อมูล หลักการของวิธีกำลังสองน้อยที่สุด คือ ถ้ามีข้อมูล  $x, y$  ทั้งสิ้นจำนวน  $n$  ชุด ให้ฟังก์ชันที่ประมาณค่าของข้อมูลชุดนี้เป็น  $G(x)$  โดยที่  $G(x)$  จะอยู่ในรูป ดังสมการที่ 2.43

$$G(x) = a_1g_1(x) + a_2g_2(x) + \dots + a_mg_m(x) \quad (2.43)$$

โดยที่  $m \leq n$  และ  $g_1(x), g_m(x)$  เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับค่า  $x$  อาจอยู่ในรูปพหุนาม รูปลอการิทึมหรือเอกซ์โพเนนเชียล สมการที่ 2.42 จะสมบูรณได้ก็ต่อเมื่อทราบค่า  $a_1, a_2, \dots, a_m$  โดยหาค่าสัมประสิทธิ์เหล่านี้ได้จากการทำให้เบี่ยงเบนข้อมูลกับค่าประมาณที่ได้จากการหาฟังก์ชัน  $G(x)$  มีค่าน้อยที่สุด รูปที่ 2.18 แสดงค่าความแตกต่างของข้อมูลชุดที่  $i$  คือ  $y_i - g_i(x)$  เมื่อหาค่าความแตกต่างของข้อมูลทุกชุดแล้วนำค่าความแตกต่างเหล่านี้มารวมกัน แล้วยกกำลังสองเพื่อจัดเครื่องหมายลบ ดังสมการที่ 2.44



รูปที่ 2.18 การหาค่าเบี่ยงเบนของวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

$$D = \sum_{i=1}^n [y_i - G(x_i)]^2 \quad (2.44)$$

โดยที่ ค่าสัมประสิทธิ์  $a_1, a_2, \dots, a_m$  จะเป็นตัวแปร เพราะเมื่อค่าเหล่านี้มีค่าต่างกันจะเป็นฟังก์ชันที่แตกต่างกันออกไป แต่ต้องหาค่า  $a_1, a_2, \dots, a_m$  เหล่านี้ที่มีเงื่อนไขทำให้เกิดค่า  $D$  มีค่าน้อยที่สุดจะได้สมการ  $m$  ชุด โดยสามารถหาค่า  $a_1, a_2, \dots, a_m$  ได้จากสมการที่ 2.45

$$\frac{\partial D}{\partial a_1} = 0, \frac{\partial D}{\partial a_2} = 0, \dots, \frac{\partial D}{\partial a_m} = 0 \quad (2.45)$$

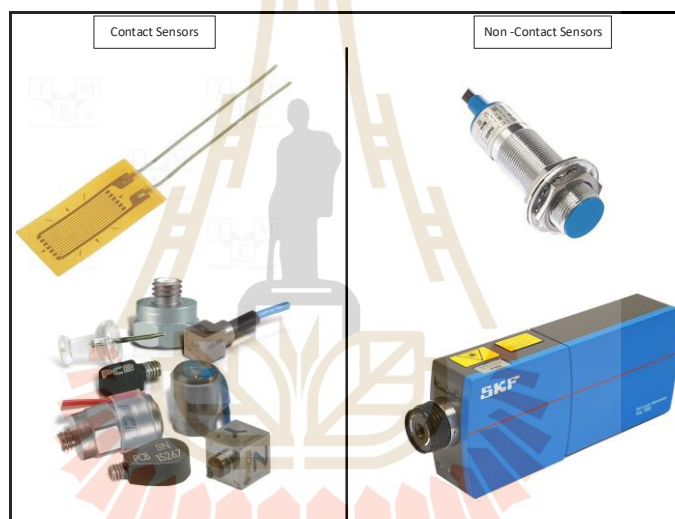
## 2.8 การวัดและการจัดการสัญญาณ (Measurement and signal processing)

ในการศึกษาการเคลื่อนตัวของแท่งทรงกระบอกเพื่ออธิบายลักษณะการเคลื่อนที่ที่ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการวัดสนามแม่เหล็ก ดังที่ได้กล่าวไปในก่อนหน้านี้ การที่จะทำนายพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ได้นั้นจำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่าง ๆ เช่น มวล (Mass) ที่สามารถประมาณค่าได้ด้วยการชั่งน้ำหนัก แต่หลาย ๆ ตัวแปร เช่น ความหน่วง (Damping) โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertia) ไม่สามารถหาได้โดยง่าย จะต้องหาค่าจากการทดสอบวิธีอื่น ๆ เพื่อให้ทราบค่าเหล่านั้นในการทำนายลักษณะการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นได้

### 2.8.1 อุปกรณ์สำหรับวัดการสั่นสะเทือน

อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการวัดการสั่นสะเทือน จะประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ได้แก่ ชิ้นงานที่ต้องการวัด ตัวตรวจรู้ (Sensor) ตัวกระตุ้น (Actuator) เครื่องขยายสัญญาณ (Signal amplifiers) และเครื่องมือวิเคราะห์สัญญาณ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- ตัวตรวจรู้ (Sensor) เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนแรงหรือการเคลื่อนที่ทางกลให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ตัวตรวจรู้ที่ใช้ในการวัดการสั่นสะเทือนจะวัดมาเป็นการจัด ความเร็ว และความเร่ง ขึ้นอยู่กับชนิดและหลักการทำงาน ตัวตรวจรู้ในการวัดการสั่นสะเทือนจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามลักษณะการติดตั้ง ได้แก่ ตัวตรวจรู้ที่สัมผัสกับชิ้นงานและตัวตรวจรู้ที่ไม่สัมผัสกับชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 2.19 โดยตัวตรวจรู้ที่สัมผัสกับชิ้นงานมวลของตรวจรู้อาจจะส่งผลต่อมวลรวมของการสั่นสะเทือน ดังนั้นการวัดการสั่นสะเทือนได้อย่างถูกต้องมวลของตัวตรวจรู้จะต้องมีขนาดเล็กกว่าระบบมาก ๆ ตัวตรวจรู้ที่ติดกับชิ้นงาน ได้แก่ Strain gauge และ Accelerometer เป็นต้น และตัวตรวจรู้ที่ไม่สัมผัสกับชิ้นงานจะมีข้อดีคือมวลของตัวตรวจรู้ไม่ส่งผลต่อการวัดการสั่นสะเทือนของระบบ ได้แก่ Proximity และ Stroboscope เป็นต้น



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างตัวตรวจรู้ (Sensor)

- ตัวกระตุ้นการสั่นสะเทือน (Actuators) เป็นอุปกรณ์ที่ให้แรงกระตุ้นกับระบบ เช่น Impulse hammer ซึ่งทำหน้าที่สร้างแรงกระตุ้นแบบ Impulse กับระบบ ทำให้ระบบสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติ โดยความถี่ที่กระตุ้นจะสัมพันธ์กับคาบเวลาที่เกิดการกระแทก และตัวกระตุ้นที่นิยมใช้อีกชนิด คือ Vibration shaker ตัวกระตุ้นชนิดนี้จะให้ความถี่ในการกระตุ้นที่หลากหลาย ซึ่งสามารถปรับขนาดความถี่ได้ตามต้องการ ตัวกระตุ้นทั้ง 2 ชนิด แสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ตัวกระตุ้นการสั่นสะเทือน

- อุปกรณ์วิเคราะห์สัญญาณ (Signal analyzers) เป็นอุปกรณ์สำหรับบันทึกสัญญาณและจัดการสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบที่ง่ายต่อการวิเคราะห์ เครื่องมือวิเคราะห์สัญญาณแสดงดังรูปที่ 2.21 ปัจจุบันเครื่องวิเคราะห์สัญญาณมีฟังก์ชันการทำงานที่หลากหลาย เช่น การบันทึกสัญญาณในโดเมนเวลา การแปลงสัญญาณเป็นโดเมนความถี่ และการกรองสัญญาณ เป็นต้น



รูปที่ 2.21 แสดงเครื่องมือวิเคราะห์สัญญาณ

### 2.8.2 พื้นฐานการวัดการสั่นสะเทือน

การวัดการสั่นสะเทือนสำหรับใช้ในการวิเคราะห์จากอุปกรณ์ที่ได้กล่าวไปข้างต้นทั้งหมด ขนาดของการสั่นสะเทือนจะแสดงออกมาในรูปของการขจัด อย่างไรก็ตามการขจัดจะมีความสัมพันธ์กับความเร็วและความเร่ง อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์การสั่นสะเทือนในบั้ง

ปัญหาอาจจะวิเคราะห์จากความเร็วหรือความเร่งขึ้นอยู่กับลักษณะของงานหรือมาตรฐานที่ใช้ในการวิเคราะห์ ความสัมพันธ์ของการขจัด ความเร็วและความเร่ง แสดงดังสมการที่ 2.46

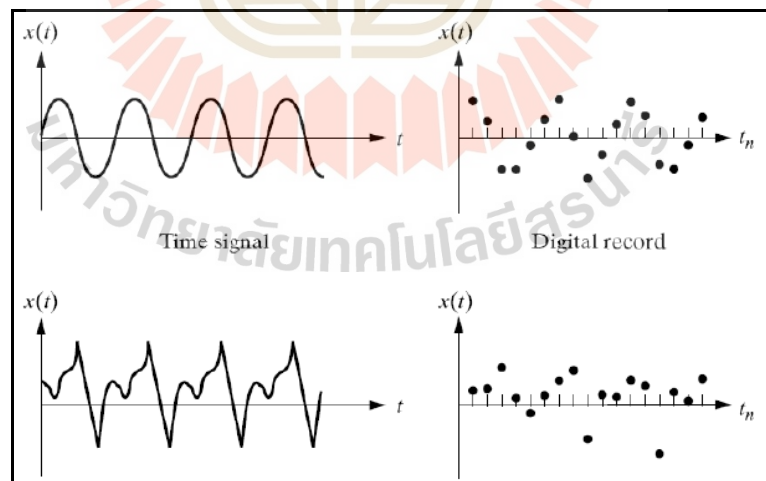
$$x = X \cos(\omega t + \phi)$$

$$v = -\omega X \sin(\omega t + \phi)$$

$$a = -\omega^2 X \cos(\omega t + \phi) \quad (2.46)$$

การวัดสัญญาณของเครื่องมือวัดในปัจจุบันจะสุ่มวัดสัญญาณ โดยเวลาที่ใช้ในการสุ่มวัดจะเว้นระยะห่างเท่า ๆ กัน ลักษณะของการสุ่มวัดแสดงดังรูปที่ 2.22 ความถี่ที่ใช้ในการสุ่มวัดมีชื่อเรียกว่า “ความถี่สุ่มวัด (Sampling frequency)” สำหรับช่วงเวลาที่แต่ละจุดข้อมูลห่างกันนั้นสามารถคำนวณได้จากความถี่สุ่มวัดสัญญาณ ดังสมการที่ 2.47

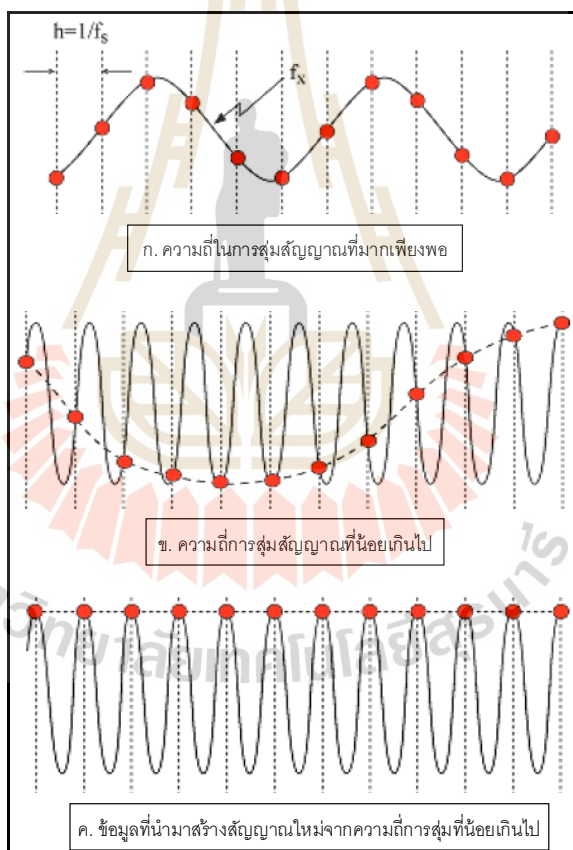
$$t = \frac{1}{\text{sampling\_frequency}} \quad (2.47)$$



รูปที่ 2.22 ตัวอย่างการสุ่มวัดการสั่นสะเทือน

จากรูปที่ 2.22 และสมการที่ 2.46 แสดงให้เห็นว่ายิ่งใช้ความถี่สุ่มวัดสัญญาณสูงขึ้นเท่าใดจะทำให้การวัดสัญญาณมีความถูกต้องกับลักษณะของสัญญาณจริงมากขึ้นเท่านั้น

แต่การใช้ความถี่สุ่มวัดที่สูงเกินไปจะส่งผลต่อจำนวนชุดข้อมูลที่ต้องจัดเก็บเนื่องจากมีข้อมูลมากเกินไปจนความจำเป็นที่จะใช้งาน ในทางตรงกันข้ามถ้าใช้ความถี่สุ่มวัดที่ต่ำเกินไปจะส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า “Aliasing” ขึ้นได้ ส่งผลให้สัญญาณที่สร้างขึ้นใหม่จากจากจุดข้อมูลที่ได้จากการสุ่มวัดมีค่าต่ำกว่าความถี่จริงที่เกิดขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.23 จุดสีแดงแสดงจุดที่ทำการสุ่มวัดสัญญาณ ส่วนเส้นทึบสีแดงแสดงถึงสัญญาณที่ต้องการวัด รูปที่ 2.23 (ก) แสดงให้เห็นถึงการสุ่มสัญญาณที่มากเพียงพอ เนื่องจากแนวของจุดสีแดงกับแนวของเส้นสัญญาณเป็นเส้นเดียวกันทำให้ทราบถึงลักษณะของสัญญาณที่ทำการวัด แต่รูปที่ 2.23 (ข) การสุ่มสัญญาณมีความถี่ในการสุ่มต่ำเกินไป เมื่อนำข้อมูลที่สุ่มได้มาสร้างสัญญาณใหม่ จึงส่งผลให้ได้สัญญาณที่ไม่ถูกต้อง แสดงดังรูปที่ 2.23 (ค) เนื่องจากมีความถี่ต่ำกว่าความถี่สัญญาณจริง



รูปที่ 2.23 สัญญาณการสันสะท้อนที่ความถี่สุ่มวัดต่าง ๆ

การแก้ปัญหาการเกิด Aliasing ทำได้โดยการเลือกความถี่สุ่มวัดให้มากกว่าความถี่ที่เราสนใจจะวัดไม่น้อยกว่า 2.5 เท่า ตามกฎของไนควิสต์ เช่น ทราบความถี่สูงสุดที่เกิดขึ้นในเครื่องจักรว่ามีค่า 50,000 Hz ก็ควรสุ่มความถี่ไม่ต่ำกว่า  $2.5 \times 5,000 = 12,500$  Hz เป็นต้น

### 2.8.3 พื้นฐานการวิเคราะห์ฟูรีเยร์ (Fourier transform)

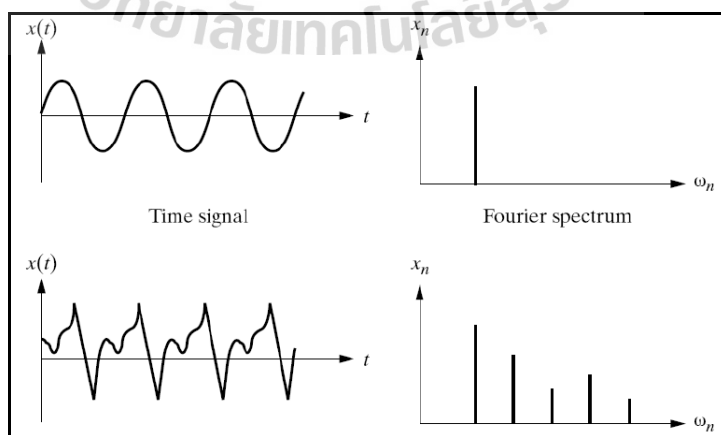
การวิเคราะห์ฟูรีเยร์เป็นการวิเคราะห์สัญญาณพื้นฐานที่ใช้กันมาก เนื่องจากเป็นการเปลี่ยนแปลงสัญญาณในโดเมนเวลาไปเป็นโดเมนความถี่โดยใช้การแปลงแบบฟูรีเยร์ หลักของการแปลงฟูรีเยร์มีความคล้ายคลึงกับการเขียนสัญญาณที่เป็นฟังก์ชันคาบ ให้เป็นผลรวมของฟังก์ชันไซน์ซอซด์ โดยสมการที่ใช้ในการแปลงฟูรีเยร์ แสดงดังสมการที่ 2.48

$$X(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.48)$$

โดย  $X(\omega)$  คือ สัญญาณในโดเมนความถี่ และ  $x(t)$  คือ สัญญาณในโดเมนเวลา ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ แสดงดังรูปที่ 2.24 โดยสัญญาณที่เป็นฟังก์ชัน ไซน์ซอซด์ แสดงดังสมการที่ 2.49

$$x(t) = X \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) = X \sin(\omega t) \quad (2.49)$$

เมื่อแปลงเป็นโดเมนความถี่  $\omega$  จะแสดงด้วยเส้นในแนวดิ่ง ซึ่งความสูงของเส้นหมายถึงขนาดของสัญญาณ  $X$  และเกิดที่แกนนอน ซึ่งจะเท่ากับความถี่ของสัญญาณ โดยที่ข้อมูลเฟสจะไม่แสดงในสเปกตรัมดังรูปที่ 2.24 แต่ในการแปลงฟูรีเยร์จะได้ข้อมูลเฟสออกมาด้วย ซึ่งอาจจะแสดงได้ด้วยกราฟเฟสในโดเมนความถี่



รูปที่ 2.24 สัญญาณในโดเมนเวลา และ โดเมนความถี่

#### 2.8.4 พื้นฐานตัวกรองสัญญาณ

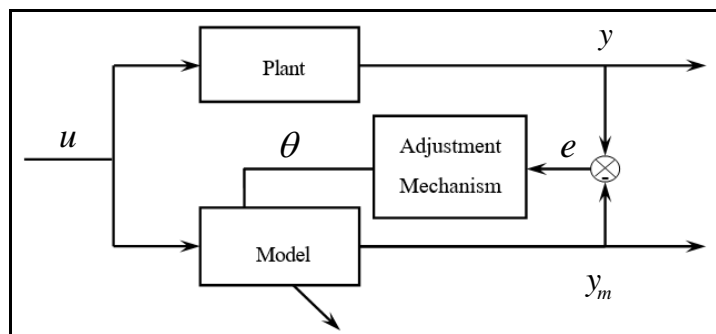
ในการวัดสัญญาณสิ่งหนึ่งที่จะหลีกเลี่ยงได้ยาก คือ สัญญาณรบกวนในการวัด ซึ่งจะพบได้ทุกสภาวะการทำงานของระบบ โดยสัญญาณรบกวนจะอยู่ในรูปแบบสัญญาณแบบสุ่ม (Random signal) ดังนั้นก่อนทำการวัดสัญญาณจะต้องศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับสัญญาณที่จะทำการวัด เพื่อลดผลกระทบที่จะเกิดขึ้น เช่น การวัดอุณหภูมิสภาพแวดล้อมจะใช้ตัวตรวจรู้ชนิดที่ให้สัญญาณแบบอนาล็อก โดยที่เอาต์พุตของเทอร์โมคัปเปิลจะเป็นสัญญาณความถี่ต่ำซึ่งเป็นที่ต้องคำนึงถึง ดังนั้นสัญญาณความถี่สูงจึงเป็นสัญญาณรบกวนและสามารถกำจัดออกไปได้โดยไม่ทำให้ข้อมูลหาย การกำจัดสัญญาณรบกวนต้องอาศัยตัวกรองสัญญาณ ซึ่งตัวกรองสัญญาณจะแบ่งออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่

- ตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (Low pass filter) คือ ตัวกรองที่ยอมให้สัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่าค่าความถี่ตัด (Cutoff frequency) ผ่านได้โดยไม่มีการลดทอนของสัญญาณหรือมีการลดทอนสัญญาณในปริมาณที่น้อย
- ตัวกรองสัญญาณความถี่สูง (High pass filter) คือ ตัวกรองที่ยอมให้สัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าตัดผ่านไปได้
- ตัวกรองสัญญาณช่วงความถี่ (Band pass filter) คือ ตัวกรองที่ยอมให้สัญญาณที่มีความถี่ในช่วงที่กำหนดผ่าน สัญญาณที่อยู่นอกช่วงความถี่จะถูกลดทอนสัญญาณลง
- ตัวกรองลดทอนสัญญาณช่วงความถี่ (Notch filter) คือ ตัวกรองที่ลดทอนสัญญาณในช่วงที่กำหนดให้หมดไป หรือที่เรียกว่า “Band reject filter”

### 2.9 การชดเชยสัญญาณฮาร์มอนิกส์ปรับตัวได้ชนิดอ้างอิงแบบจำลองโดยใช้วิธีการ Gradient Method

การชดเชยสัญญาณฮาร์มอนิกส์เนื่องจากการโก่งตัวของแท่งทรงกระบอกที่ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของสัญญาณฮาร์มอนิกส์ขึ้นใน Search Coil ด้วยเทคนิคการปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลอง มีหลักการทำงานคือจะปรับค่าตัวแปรต่าง ๆ ภายในระบบเพื่อทำให้ความแตกต่างของเอาต์พุตของแบบจำลอง (Model) และระบบที่ต้องการ (Plant) หมดไป จากรูปที่ 2.25 ให้เอาต์พุตของแบบจำลองเป็น  $y_m$  เอาต์พุตของระบบเป็น  $y$  และ  $e$  เป็นความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตทั้งสอง (Error) และมีตัวแปรที่ทำการปรับค่าคือ  $\theta$





รูปที่ 2.25 แผนภาพหลักการทำงานของ MRAS

การปรับค่าตัวแปร ( $\theta$ ) เพื่อให้ความแตกต่างระหว่างเอาต์พุตของแบบจำลองและระบบที่ต้องการหมดไป โดยกำหนดให้ Loss Function ( $J$ ) มีค่า

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^2 \quad (2.50)$$

การปรับตัวของตัวแปร ( $\theta$ ) โดยกำหนด

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{dJ}{d\theta} = -\gamma e \frac{de}{d\theta} \quad (2.51)$$

$$\text{เมื่อ } e = y - y_m \quad (2.52)$$

$$\frac{de}{d\theta} = -\frac{dy_m}{d\theta} \quad (2.53)$$

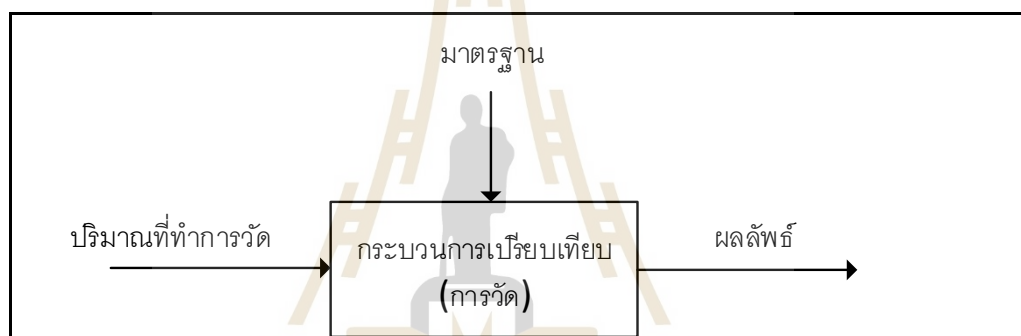
เมื่อ  $-\gamma$  คือ อัตราการปรับตัว (Adaptation Gain)

การควบคุมแบบปรับตัวชนิดอ้างอิงแบบจำลองจากทฤษฎีของ Gradient Method จะทำการปรับค่าตัวแปรภายในระบบที่สนใจในทิศทาง Negative of Loss Function ( $J$ ) เพื่อให้ค่าความแตกต่างระหว่างระบบและแบบจำลองหมดไป โดยความเร็วในการปรับตัวจะขึ้นอยู่กับ

ค่าอัตราการปรับตัว ซึ่งค่าอัตราการปรับตัวต้องเลือกใช้อย่างเหมาะสมเนื่องจากอาจจะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพได้

## 2.10 พื้นฐานการสอบเทียบเครื่องมือวัด

ระบบการวัดทุกระบบต้องให้ผลการวัดที่มีความน่าเชื่อถือ โดยกระบวนการวัดที่ใช้ในการตรวจสอบสเกลการวัดของระบบเรียกว่า “กระบวนการสอบเทียบ” คือการให้อินพุตที่ทราบค่าแก่ระบบการวัด เพื่อสังเกตเอาต์พุตของระบบและแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอินพุตและเอาต์พุต โดยอินพุตที่ทราบค่าสำหรับกระบวนการสอบเทียบเรียกว่า “ค่ามาตรฐาน” กระบวนการสอบเทียบแสดงดังรูปที่ 2.26

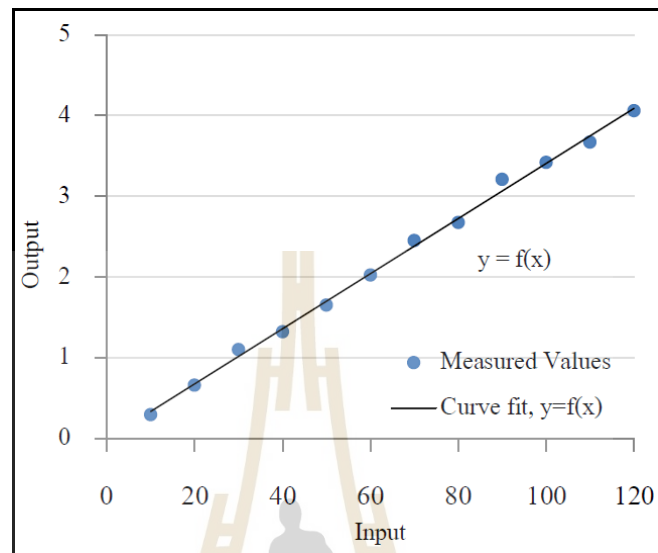


รูปที่ 2.26 กระบวนการวัดพื้นฐาน

### 2.10.1 การสอบเทียบแบบสถิต (Static calibration)

การสอบเทียบแบบสถิตเป็นการสอบเทียบพื้นฐานประเภทหนึ่ง ในกระบวนการนี้เป็นการให้อินพุตที่ทราบค่าล่วงหน้าทีละน้อยให้กับระบบที่ทำการสอบเทียบและเอาต์พุตของระบบจะถูกบันทึก คำว่า “สถิต” หมายถึงวิธีสอบเทียบค่าของตัวแปรที่เกี่ยวข้องเป็นค่าที่ไม่มีเปลี่ยนแปลง นั่นคือตัวแปรเหล่านี้ไม่ขึ้นกับเวลา ในการสอบเทียบแบบสถิตนั้นจะมีเพียงขนาดของอินพุตที่ทราบค่าและเอาต์พุตที่วัดได้เท่านั้นที่สำคัญ จากการให้อินพุตที่ทราบค่าแก่ระบบและสังเกตเอาต์พุตของระบบ กราฟที่ได้จากการสอบเทียบแบบสถิต แสดงดังรูปที่ 2.27 นั้นเป็นการพล็อตอินพุต (x) บนแกนนอนเปรียบเทียบกับเอาต์พุตจากการวัด (y) บนแกนตั้ง ค่าอินพุตในการสอบเทียบนั้น โดยปกติแล้วจะเป็นตัวแปรอิสระ ในขณะที่เอาต์พุตจากการวัดเป็นตัวแปรตาม กราฟที่ได้จากการสอบเทียบแบบสถิตสามารถใช้ในการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุต สมการจะอยู่ในรูปแบบ  $y = f(x)$  ซึ่งหาได้จากเทคนิค Curve fitting สามารถนำ

ความสัมพันธ์นี้ไปใช้ในกระบวนการวัดครั้งต่อไป เพื่อหาค่าอินพุตที่ต้องการทราบค่าจากเอาต์พุตของเครื่องมือวัด



รูปที่ 2.27 กราฟที่ได้จากการสอบเทียบแบบสถิต

### 2.10.2 การสอบเทียบแบบพลวัต

เมื่อตัวแปรที่สนใจมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา เพื่อหาข้อมูลเหล่านี้จึงต้องการข้อมูลทางพลวัต ตัวแปรทางพลวัตเป็นตัวแปรที่ขึ้นกับเวลาทั้งขนาดและความถี่ที่รับได้ กระบวนการสอบเทียบแบบพลวัตเป็นการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตที่ทราบพฤติกรรมทางพลวัตและเอาต์พุตของระบบที่ทำการวัด โดยปกติการทำการสอบเทียบแบบพลวัตส่วนใหญ่จะใช้สัญญาณแบบ Sinusoidal หรือ Step ที่มีการเปลี่ยนแปลงสัญญาณอินพุตให้กับระบบทำการวัด

### 2.10.3 ความไวของการวัด

ความไวของการวัด (Sensitivity of measurement) คือการเปลี่ยนแปลงของค่าที่วัดได้เมื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณที่ต้องการวัดซึ่งอัตราส่วนของผลลัพธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าที่วัดได้ ดังนั้นความไวของการวัดคือความชันของเส้นตรงในรูปที่ 2.27 กำหนดให้  $S_x$  คือความชันของกราฟที่ได้จากการสอบเทียบแบบสถิต ดังสมการที่ 2.54

$$S_x = \frac{dy}{dx} \quad (2.54)$$

เมื่อ  $S_k$  เป็นฟังก์ชันของ  $x$  ความไวของการวัดให้สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุต กราฟที่ได้จากการสอบเทียบแบบสถิติอาจเป็นเส้นตรงหรือไม่เป็นเส้นตรงก็ได้ขึ้นกับกระบวนการวัดและตัวแปรที่ต้องถูกวัด ดังนั้น  $S_k$  อาจเป็นค่าคงตัวหรือไม่เป็นค่าคงตัวตลอดช่วงของค่าอินพุต

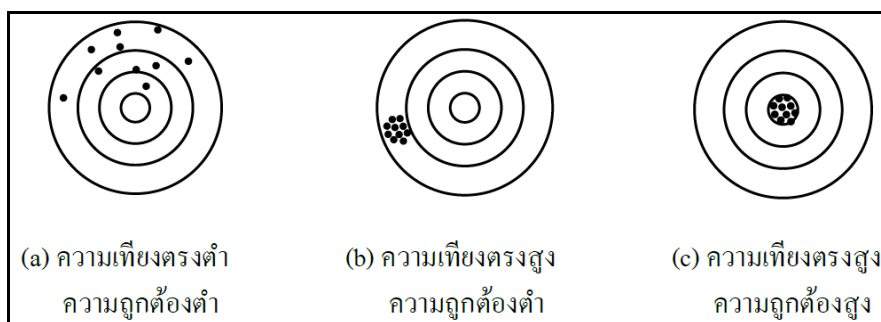
#### 2.10.4 ความเป็นเชิงเส้นและความไม่เป็นเชิงเส้น

ความเป็นเชิงเส้น (Linearity) หมายถึง การที่ค่าเอาต์พุตที่ได้จากการวัดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอินพุตของปริมาณที่ต้องการวัด เช่น เมื่อปริมาณอินพุตเพิ่มขึ้น 1 หน่วย ค่าเอาต์พุตของเครื่องวัดจะเปลี่ยนไป 1 หน่วย หรือเมื่อไปปริมาณของเครื่องมือวัดเปลี่ยนไป 2 หน่วย ค่าเอาต์พุตที่ได้จากเครื่องมือวัดจะเปลี่ยนไป 2 หน่วย เป็นต้น ซึ่งความเป็นเชิงเส้นเป็นคุณสมบัติการวัดที่ต้องการ จากรูปที่ 2.27 โดยทั่วไปใช้การลากเส้นตรงผ่านจุดข้อมูลที่แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณในแกนตั้งและแกนนอนให้มากที่สุดด้วยเทคนิคทางสถิติ ส่วนความไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear) จะหมายถึงจุดข้อมูลที่เบี่ยงเบนจากแนวเส้นตรงมากที่สุด โดยค่าความไม่เป็นเชิงเส้นนี้มักแสดงในรูปเปอร์เซ็นต์ของค่าเต็มสเกล

#### 2.10.5 ความเที่ยงตรงและความสามารถของการทำซ้ำ

ความเที่ยงตรง (Precision) เป็นค่าที่ใช้อธิบายองศาความอิสระของเครื่องมือวัดจากความผิดพลาดแบบสุ่ม โดยความเที่ยงตรงของเครื่องมือวัดจะพิจารณาจากขนาดของความแปรผันที่เกิดขึ้นจากการวัดวัดซ้ำขึ้นเดี๋ยวกันหลายครั้ง โดยการใช้ผู้วัด วิธีการวัดเครื่องมือชุดเดียวกัน ถ้าได้ค่าใกล้เคียงกันโดยไม่ต้องคำนึงว่าค่านั้นเป็นค่าที่ถูกต้องหรือไม่ แสดงว่าขนาดของความแปรผันในการวัดซ้ำเกิดขึ้นน้อยหรือระบบการวัดมีความเที่ยงตรงสูง

ความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability) เป็นอีกวิธีที่ใช้ในการแสดงความเที่ยงตรงของการวัด ซึ่งใช้อธิบายการกระจายของการวัดสิ่งเดียวกัน โดยหาทำการวัดภายใต้สภาวะเดียวกันกับข้อมูลที่ได้จะแสดงการกระจายของผลลัพธ์ในการวัดซ้ำ แต่ถ้าการวัดกระทำภายใต้สภาวะต่างกันข้อมูลที่ได้จะแสดงการกระจายของผลลัพธ์ในการทำซ้ำ แสดงดังรูปที่ 2.28 แสดงการยิงปืนของผู้ยิง 3 คน โดยเป้าการยิงอยู่ที่จุดศูนย์กลางของวงกลม จุดดำแต่ละจุดแสดงจุดที่ผู้ยิงโดนเป้า จากรูปจะเห็นว่าผู้ยิงคนที่ 1 (a) มีความถูกต้องและความเที่ยงตรงของการยิงต่ำ ในขณะที่ผู้ยิงคนที่ 2 (b) สามารถยิงเป้าในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกัน แต่เป็นตำแหน่งที่ไม่ถูกต้อง ผลการยิงคนที่ 2 ถือได้ว่ามีความเที่ยงตรงสูงแต่มีความถูกต้องต่ำ ส่วนผู้ยิงคนที่ 3 (c) จะมีความถูกต้องและเที่ยงตรงสูงเพราะสามารถยิงตรงจุดที่ถูกต้องอย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 2.28 การเปรียบเทียบความเที่ยงตรงและความถูกต้องของผลลัพธ์

### 2.10.6 ย่านวัดหรือช่วงการวัด (Rang or Span)

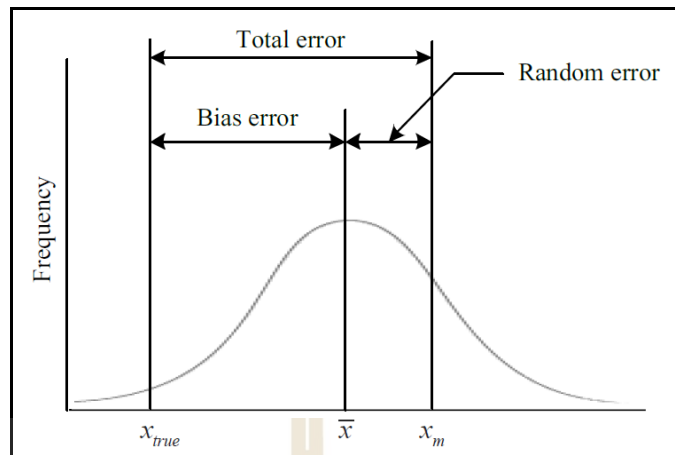
ย่านวัดหรือช่วงการวัดของเครื่องวัดใช้สำหรับระบุค่าต่ำสุดและสูงสุดที่เครื่องมือวัดได้รับการออกแบบเพื่อใช้งานให้เหมาะสม เป็นบริเวณที่เครื่องมือวัดสามารถวัดได้ถูกต้อง แต่อาจจะไม่มีความละเอียดในการวัด

### 2.10.7 ความละเอียดของการวัด (Resolution)

ความละเอียดของการวัด คือ จิตจำกัดล่างของขนาดอินพุตที่เปลี่ยนแปลงหรือขนาดของอินพุตที่น้อยที่สุดที่เปลี่ยนแปลงแล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุต ซึ่งการระบุความละเอียดของการวัดอาจแสดงด้วยค่าสัมบูรณ์หรือเปอร์เซ็นต์การเบี่ยงเบนของค่าเต็มสเกลได้

### 2.10.8 ความผิดพลาดและความไม่แน่นอน

ความผิดพลาดในการวัด คือ ความแตกต่างระหว่างค่าที่วัดได้ (Measured value) และค่าที่แท้จริงที่ควรจะเป็น (True value) โดยความผิดพลาดพื้นฐานที่เกิดขึ้นในการวัดมี 2 ชนิด ได้แก่ ความผิดพลาดของระบบ (Systematic or Bias error) และความผิดพลาดแบบสุ่ม (Precision or Random error) ในกระบวนการวัดจริงจะไม่สามารถทราบค่าที่ถูกต้องและจะทำให้ไม่ทราบค่าความผิดพลาด จึงมีการประมาณค่าของขอบเขตความผิดพลาด โดยที่ขอบเขตนั้นเรียกว่า “ความไม่แน่นอน (Uncertainty)” แสดงดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 ความผิดพลาดระบบ ความผิดพลาดแบบสุ่มและความผิดพลาดทั้งหมด

ความไม่แน่นอนของการวัดเป็นพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการวัด ซึ่งบอกลักษณะการกระจายของค่าที่วัดได้และสามารถบอกค่าของสิ่งที่ถูกวัดอย่างสมเหตุสมผล ความไม่แน่นอนของการวัดประกอบด้วยหลายองค์ประกอบ ซึ่งองค์ประกอบบางอย่างอาจประเมินได้จากการแจกแจงทางสถิติของผลลัพธ์ของอนุกรมการวัดและสามารถบอกลักษณะได้ด้วยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จากการทดลอง องค์ประกอบอื่น ๆ ซึ่งสามารถบอกลักษณะได้โดยการประเมินจากการแจกแจงความน่าจะเป็นที่ถูกสมมุติขึ้น โดยมีพื้นฐานมาจากความชำนาญหรือข้อมูลอื่น ๆ จากการวิเคราะห์ทางสถิติของชุดข้อมูลที่ได้จากการวัดและการวิเคราะห์แหล่งของความผิดพลาดที่มีอิทธิพลต่อค่าการวัด เราสามารถประมาณค่า  $x'$  ซึ่งมีพื้นฐานอยู่บนข้อมูลที่ได้มาจากการวัดค่า  $x$  ซ้ำ ๆ กัน ดังสมการที่ 2.55

$$x' = \bar{x} \pm u_x(P\%) \quad (2.55)$$

เมื่อ  $\bar{x}$  คือ เฉลี่ยที่แทนการประมาณค่า  $x'$  ที่เป็นไปได้มากที่สุดบนพื้นฐานของข้อมูลที่ได้และ  $u_x$  คือ ความไม่แน่นอนในการประมาณค่าที่ระดับความเป็นไปได้  $P\%$  คือ ช่วงของความเชื่อมั่นหรือความไม่แน่นอนอยู่บนพื้นฐานของความผิดพลาดแบบสุ่มและความผิดพลาดระบบในการวัดค่า  $x$  ในการคำนวณค่าความไม่แน่นอนของการวัดจะต้องระบุสาเหตุหรือแหล่งของความไม่แน่นอนในการวัด จากนั้นจึงประเมินความไม่แน่นอนนี้ ซึ่งมีอยู่ 2 รูปแบบ ดังต่อไปนี้

- การประเมินแบบ Type A เป็นการประเมินความไม่แน่นอนโดยเทคนิคสถิติ  
สมการที่ใช้ในการคำนวณของ Type A คือ

$$\mu = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2.56)$$

เมื่อ  $\mu$  คือ ค่าความไม่แน่นอน  
 $s$  คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน  
 $n$  คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

- การประเมินแบบ Type B เป็นการประเมินความไม่แน่นอนจากข้อมูลข่าวสาร  
อย่างอื่นที่ประกอบด้วยประสบการณ์ในอดีตของการวัด จากใบรับรองการสอบเทียบ จากข้อกำหนด  
ของผู้ผลิต จากการคำนวณ สมการที่ใช้ในการคำนวณ Type B คือ

$$p = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (2.57)$$

เมื่อ  $p$  คือ ค่าความไม่แน่นอน  
 $a$  คือ ครึ่งหนึ่งของความไม่แน่นอนที่ระบุมากับเครื่อง

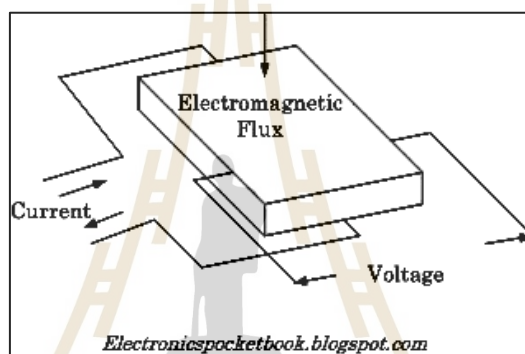
## 2.11 ปรัชญาบรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนทั่วโลกจะมีแม่เหล็กไฟฟ้าจำนวนมากในวงกักเก็บ  
อิเล็กตรอน ดังนั้นการทดสอบคุณสมบัติของแม่เหล็กไฟฟ้าที่สร้างขึ้นใหม่หรือตรวจสอบ  
แม่เหล็กไฟฟ้าที่มีใช้งานเป็นระยะเวลานานจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการตรวจสอบและแก้ไข  
วิธีในการตรวจสอบคือการวัดสนามแม่เหล็กโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำไฟฟ้า ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน  
หลายเทคนิค ได้แก่

การวัดสนามแม่เหล็กแบบขดลวดขึง (Single Stretched Wire, SSW) เป็นเทคนิคการวัด  
สนามแม่เหล็กหลายขั้วสำหรับแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีช่องว่างระหว่างขั้วขนาดเล็กระมาณ  
10 มิลลิเมตร และอาศัยการเหนี่ยวนำไฟฟ้าผ่านเส้นลวดโดยการเคลื่อนย้ายเส้นลวดไปรอบ ๆ  
แม่เหล็กหลายขั้วแบบจุดต่อจุด ดังนั้นการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความจำเป็น

อย่างยิ่งสำหรับเทคนิคนี้ เพื่อการประมวลผลสัญญาณที่วัดได้และลดข้อผิดพลาดที่เกิดจากการสั่น การยึดของเส้นลวด เป็นต้น (P. Arpaia และคณะ, 2012; G. Le Bec และคณะ, 2012)

การวัดสนามแม่เหล็กด้วยฮอลล์เอฟเฟกต์ (Hall Effect) เป็นเทคนิคที่สามารถวัด สนามแม่เหล็กได้หลากหลายชนิด ตั้งแต่แม่เหล็ก 2 ขั้ว ไปจนถึงแม่เหล็กหลายขั้ว เนื่องจากมี ความง่ายในการวัด หลักการทำงานของฮอลล์เอฟเฟกต์ แผ่นตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านเมื่อมีฟลักซ์ แม่เหล็กไหลผ่านจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้า ซึ่งจะก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าที่เรียกว่า “แรงดันฮอลล์” เกิดขึ้นในทิศตั้งฉากกับกระแสและฟลักซ์แม่เหล็ก ดังรูปที่ 2.30 เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนที่ Hefei Light Source (HLS) ใช้เทคนิคนี้ในการวัดสนามแม่เหล็ก (Li Li และคณะ 2014)



รูปที่ 2.30 แผนภาพแบบจำลองของฮอลล์เอฟเฟกต์

การวัดสนามแม่เหล็กด้วยขดลวดหมุน (Rotating Coil or Harmonic Coil) เป็นเทคนิค การวัดความสนามแม่เหล็กที่มีความรวดเร็วกว่าการใช้ฮอลล์เอฟเฟกต์สำหรับแม่เหล็กหลายขั้วที่มี ขนาดใหญ่ โดยเทคนิคนี้จะมีขดลวดบรรจุอยู่ในแท่งทรงกระบอกที่ทำจากวัสดุ G10 และมีความยาว มากกว่าขนาดของแม่เหล็กไฟฟ้าที่จะนำไปวัด หลักการทำงานของกรวัดด้วยเทคนิคนี้จะ ประกอบด้วย 2 ส่วนที่สำคัญ ได้แก่ การควบคุมความเร็วรอบของขดลวดหมุนและสัญญาณไฟฟ้า แบบฮาร์โมนิกส์ (Harmonic Signal) ที่ได้จากการหมุนขดลวด ดังรูปที่ 2.31 แสดงเทคนิคการวัด สนามความเข้มของแม่เหล็กด้วยขดลวดหมุน (Li Li และคณะ 2005)





รูปที่ 2.31 การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็กด้วยเทคนิคขดลวดหมุน

### 2.11.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบควบคุมความเร็วรอบของขดลวดหมุน

การวัดสนามแม่เหล็กด้วยขดลวดหมุนจำเป็นที่จะต้องมีการควบคุมความเร็วรอบของการหมุนขดลวดให้มีความเร็วคงที่และให้มีความคลาดเคลื่อนของความเร็วในการหมุนน้อยที่สุด เนื่องจากมีผลต่อการเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขดลวด ที่ CERN, Geneva, Switzerland เลือกใช้สแต็ปมอเตอร์ในการควบคุมความเร็วรอบของขดลวดหมุนเพราะมีความง่ายในการควบคุม (L. Walckiers, 1992)

การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อไปขับเคลื่อนขดลวดหมุนให้มีความเร็วคงที่ที่จะต้องมีการออกแบบตัวควบคุม (Controller) ซึ่งตัวควบคุมที่สามารถแก้ไขปัญหาความผิดพลาดในการขับเคลื่อนขดลวดหมุนที่นิยมใช้คือ ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller) โดยตัวควบคุมพี (P) คือ การปรับแบบสัดส่วน (Proportional), ตัวควบคุมไอ (I) คือ การอินทิเกรต (Integral) และตัวควบคุมดี (D) คือ การอนุพันธ์สัญญาณ (Derivative) ตัวควบคุมทั้งสาม

เมื่อนำไปใช้งานจะส่งผลให้เกิดการทำงานอย่างอัตโนมัติในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนขดลวดหมุน (P. Kumar และคณะ, 2014) [10]

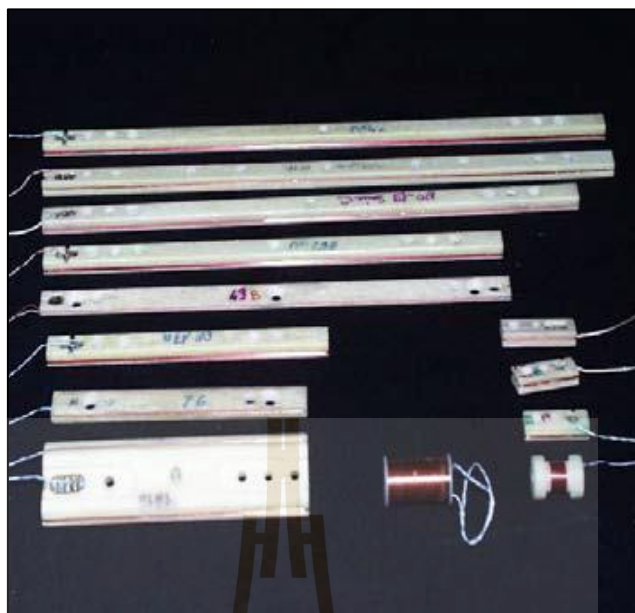
การออกแบบตัวควบคุม (Controller design) เพื่อให้การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าของขดลวดหมุนเป็นไปตามต้องการโดยการออกแบบนั้นจะมีอยู่ด้วยกันหลายวิธีเพื่อให้ได้ค่าของตัวแปรตัวควบคุมนั้นไปสั่งการทำงานเมื่อระบบที่ทำการควบคุมนั้นถูกรบกวนวิธีที่นิยมใช้ในการสืบค้นค่าของตัวแปรที่มีความรวดเร็วในการออกแบบ ได้แก่ Artificial Intelligence (AI), Parameter Estimation โดยการกำหนดขอบเขตที่ใช้ในการค้นหา เช่น การพุ่งเกิน (Overshoot), ช่วงเวลาขึ้น (Rise time) และช่วงเวลาเข้าที่ (Setting time) เป็นต้น (N. Dafina AI, 2013)

การระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) ที่ใช้ในการขับเคลื่อนขดลวดหมุน เพื่อใช้สำหรับออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical models) และเนื่องจากระบบพลวัตของการขับเคลื่อนขดลวดหมุนค่อนข้างมีความซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อให้เกิดความผิดพลาดน้อยและอยู่ในขอบเขตที่พึงยอมรับได้ การวิเคราะห์หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าสามารถแทนได้ด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนอันดับหนึ่งหรืออันดับสองในโดเมนเวลา เพื่อความง่ายต่อการศึกษาการตอบสนองของมอเตอร์ไฟฟ้า (Chang Kyoo Yoo และคณะ, 2001)

### 2.11.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับขดลวดหมุน

ขดลวดหมุน (Rotating Coil) ที่ใช้สำหรับวัดสนามแม่เหล็กหลายขั้วนั้นเป็นวิธีการที่มีมานานและมีพัฒนารูปแบบของขดลวด (Coil) ที่บรรจุภายในแท่งทรงกระบอกมาจนถึงปัจจุบัน เพราะว่าวิธีการนี้มีความรวดเร็วในการวัดทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย รูปแบบของการวางขดลวดภายในแท่งทรงกระบอกจะมีอยู่ด้วยกัน 2 รูปแบบ ได้แก่ การวางขดลวดแบบ Radial coil และการวางขดลวดแบบ Tangential coil ทั้ง 2 รูปแบบจะให้สัญญาณฮาร์มอนิกส์ที่แตกต่างกัน (Animesh K Jain, 2001)

ขดลวด (Coil) ที่บรรจุอยู่ภายในแท่งทรงกระบอกจะมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า “Search Coil” แสดงดังรูปที่ 2.32 ในการออกแบบ Search Coil นั้นส่วนใหญ่จะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า และขนาดจะพิจารณาตามแม่เหล็กหลายขั้วที่จะทำการวัดสนามแม่เหล็กทั้งความกว้างและความยาว เพื่อให้มีความเหมาะสมกับลักษณะการนำไปใช้งาน และวัสดุที่นำมาใช้ในการสร้าง Search Coil จะไม่ส่งผลต่อการเหนี่ยวนำไฟฟ้า (M. Buzio, 2009)



รูปที่ 2.32 ตัวอย่าง Search coils ขนาดต่าง ๆ

การสอบเทียบขดลวดหมุนเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อให้ได้ผลการวัดที่ถูกต้องและเที่ยงตรง โดยการใช้การเปรียบเทียบสนามแม่เหล็กที่ได้จากขดลวดหมุนกับค่ามาตรฐาน (P. Arpaia และคณะ, 2016) นำเสนอหลักการสอบเทียบขดลวดหมุน 2 กรณี ได้แก่ Roll-Angle Misalignment และ Higher-Order Harmonic สำหรับแม่เหล็กไฟฟ้า 4 ขั้ว

### 2.11.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนตัวของขดลวดหมุน

การวัดสนามแม่เหล็กด้วยขดลวดหมุนนอกเหนือจากการควบคุมความเร็วรอบของการหมุนให้คงที่ สิ่งที่ต้องพิจารณาเพิ่มเติมคือการโก่งตัวของแท่งทรงกระบอกที่นำมาบรรจุ Search Coil ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการผลิตหรือเกิดจากน้ำหนักของตัวแท่งทรงกระบอกที่ทำให้เกิดการโก่งตัวขณะหมุนจะส่งผลทำให้พื้นที่หน้าสัมผัสของ Search coil กับสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม (L. Bottura)

โก่งตัวของแท่งทรงกระบอกนำไปสู่ความคลาดเคลื่อนของสัญญาณฮาร์มอนิกส์ที่ได้จาก Search Coil ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากการเอียงศูนย์กลางของแท่งทรงกระบอกด้วยการวัดเทียบกับจุดอ้างอิงในการหาระยะการเคลื่อนตัวในแนวแกนอนและแกนตั้ง เพื่อศึกษารูปแบบของวงโคจรของแท่งทรงกระบอกที่ส่งผลกระทบต่อขดลวดที่บรรจุอยู่ภายใน Search Coil (Zhang Hongxis และคณะ, 2013)

รูปแบบวงโคจรของแท่งทรงกระบอกที่ความเร็วรอบต่าง ๆ จะมีลักษณะที่ต่างกััน ผลกระทบเนื่องจากความเร็วรอบจะส่งผลต่อรูปแบบการเคลื่อนตัวได้หลากหลายลักษณะ เช่น Straight Line Orbit, Circle Orbit และ Elliptical Orbit เป็นต้น (Zhigang Li, 2016)

การออกแบบแท่งทรงกระบอกให้มีระยะการ โกงตัวหรือการสั่นสะเทือนขณะหมุนให้มีค่าน้อยที่สุด เพื่อลดความผิดพลาดของเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก จำเป็นต้องคำนึงถึงมวล (Mass) ความยาวของแท่งทรงกระบอก (Length of Shaft) รัศมีของแท่งทรงกระบอก (Radial) และค่าโมดูลัสของวัสดุที่นำมาใช้แท่งทรงกระบอก (Modulus of Elasticity) เป็นต้น เนื่องจากตัวแปรเหล่านี้จะส่งผลต่อค่าความแข็งแรงของแท่งทรงกระบอกที่นำมาใช้งาน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาความเร็วที่เหมาะสมกับการวัดความเข้มสนามแม่เหล็ก (Balasaheb Keshav Takel, 2014)

การศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะทำให้สามารถวิเคราะห์ความเร็วรอบที่เหมาะสมสำหรับการหมุนแท่งทรงกระบอก เพื่อไม่ให้เกิดการสั่นพ้องของระบบเนื่องจากความถี่ในการหมุนตรงกับความถี่ธรรมชาติของแท่งทรงกระบอกหรือที่เรียกว่า “ความเร็ววิกฤต” และแสดงถึงวิธีการแก้ปัญหาของการเคลื่อนผ่านจุดความเร็ววิกฤต (Kaoru Inoue และคณะ, 2003)

#### 2.11.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดการโก่งตัวของขดลวดหมุน

เพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์การโก่งตัวของขดลวดหมุน การวัดพฤติกรรมของขดลวดหมุนจึงมีความสำคัญมากในการสร้างความถูกต้องให้กับแบบจำลอง (U. Werner, 2009) นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายพฤติกรรมการโก่งตัวของแกนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับด้วยการวัดการเคลื่อนตัวของโรเตอร์ที่ Sleeve Bearing ตามมาตรฐานของ ISO 7919-1 เนื่องจากการวัดระยะการ โกงตัวที่ตำแหน่งกึ่งกลางโรเตอร์ทำได้ยาก และได้ใช้ตัวตรวจรู้แบบ Inductive sensor ในงานวิจัย และได้ทำการแบ่งกรณีศึกษาที่มีความสำคัญออกเป็น 3 กรณีที่เกิดขึ้น ได้แก่ การโก่งตัวที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักตัวของโรเตอร์, การโก่งตัวเนื่องจากสนามแม่เหล็ก และการโก่งตัวเนื่องจากความร้อนสะสมภายในโรเตอร์

การวัดรูปแบบการเคลื่อนตัวหรือการโก่งตัวของขดลวดหมุน (Rotating Coil) จะมีลักษณะคล้ายกับการเคลื่อนตัวของโรเตอร์เพื่อตรวจสอบความผิดปกติและทำการแก้ไข (Zhang H. และคณะ, 2013) ได้ทำการวัดการเคลื่อนตัวของโรเตอร์ด้วยโปรแกรม LabVIEW ผ่านทาง DAQ-PCI-6251 สำหรับเก็บข้อมูล เพื่อจำแนกพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของโรเตอร์ ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์แยกแยะไว้ 6 กรณี ได้แก่ Oil Whirl, Rotor Misalignment, Rotor Imbalance, Rotor Rubbing, Oil Whip และ The Ideal State เป็นต้น ข้อมูลที่ได้ทั้ง 6 กรณี จะใช้เป็นข้อมูลในการทำโปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ข้อผิดพลาดแบบ Online ผ่านโปรแกรม LabVIEW ว่าเกิดขึ้นในกรณีใด เพื่อให้มีความสะดวกต่อการแก้ไขได้ถูกต้องตามกรณีนั้น ๆ

โดยทั่วไปการวัดการเคลื่อนตัวของเพลลาหรือโรเตอร์มักจะใช้ตัวตรวจรู้ (Sensor) แบบสัมผัสชิ้นงาน (Contact Sensor) หรือแบบไม่สัมผัสชิ้นงาน (Non-Contact Sensor) เช่น Eddy Current Sensor, Proximity Sensor ตามลำดับ แต่ในบางกรณีอาจจะไม่สามารถใช้ตัวตรวจรู้ประเภทนี้ได้ เนื่องจากข้อจำกัดทางสภาพแวดล้อมของเครื่องจักร อาทิเช่น ไม่มีพื้นที่ให้ติดตั้งตัวตรวจรู้ หรือบริเวณติดตั้งตัวตรวจรู้มีสนามแม่เหล็กมารบกวน (Endo M.T. และคณะ, 2015) นำเสนอการวัดพฤติกรรมเคลื่อนตัวของเพลลาด้วยภาพจากกล้องราคาถูกด้วยเทคนิค Sub-Sampling เปรียบเทียบกับการใช้ Proximity Sensor โดยความเร็วรอบของเพลลาที่ใช้ในการวัดอยู่ในช่วง 300 รอบต่อนาที (5 Hz) ถึง 990 รอบต่อนาที (16.5 Hz) แอมพลิจูดการสั่นอยู่ที่  $130 \mu\text{m}$  ใช้กล้องถ่ายภาพ รุ่น Nikon D3100 ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในกรณีที่ไม่สามารถวัดการเคลื่อนตัวของเพลลาเนื่องจากปัจจัยต่างๆ ได้

### 2.11.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการชดเชยแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากการโก่งตัวของขดลวดหมุน

เครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กแบบขดลวดหมุน (Rotating Coil) สามารถวัดได้ด้วยหลักการเหนี่ยวนำไฟฟ้า เมื่อมีความเร็วเชิงมุมมาเกี่ยวข้องจะทำให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเนื่องจากการโก่งตัวของแท่งทรงกระบอก ส่งผลให้รูปแบบของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำคลาดเคลื่อนไป (Saraporn C. และคณะ, 2013) นำเสนอการปรับปรุงสัญญาณของใจโรสโคปราคาถูกที่มีสัญญาณรบกวนมาก โดยใช้กาลมานฟิลเตอร์นั้นเป็นตัวสังเกตแบบเหมาะสมที่สุด (Optimal Observer) ที่สามารถลดสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการได้ และใช้วิธี Linear Least Square ซึ่งเป็นอัลกอริทึมแบบปรับตัวได้สำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ยังไม่ทราบค่า ได้แก่ ค่า Bias และค่า Scaling Factor จากนั้นชดเชยความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นให้กับแบบจำลองเพื่อให้สัญญาณใจโรสโคปมีความถูกต้องมากขึ้น โดยค่าความคลาดเคลื่อนหาได้จากการเปรียบเทียบสัญญาณของแบบจำลองใจโรสโคปกับเอ็นโค้ดเดอร์ กระบวนการนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากขดลวดหมุนที่โก่งตัวเปรียบเทียบกับสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมาตรฐาน

การชดเชยความผิดพลาดของสัญญาณมีการประยุกต์ใช้งานค่อนข้างหลากหลาย (เกรียงไกร เจริญสุข และคณะ, 2560) นำเสนอการทำงานของระบบการชดเชยเพื่อประมาณค่าแรงบิดแบบปรับตัวได้ โดยมีตัวควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) ทำหน้าที่ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) ในการขับเคลื่อนสายพานลำเลียงให้มีความเร็วรอบคงที่ และในทางปฏิบัติไม่สามารถติดตั้งเซ็นเซอร์วัดแรงบิดได้ จึงใช้ตัวสังเกต (Observer) เข้ามาช่วยในการประมาณค่าต่าง ๆ เมื่อน้ำหนักบนสายพานลำเลียงเกิดการเปลี่ยนแปลง จะทำให้ระบบกับตัวสังเกตมีค่าผิดพลาดเกิดขึ้นและจะใช้ค่าผิดพลาดนี้ในการออกแบบตัวชดเชยแบบปรับตัวได้

(Adaptive Compensator) ในการชดเชยแรงบิดที่เกิดจากน้ำหนักให้กับตัวสังเกต เพื่อรักษาความเร็วรอบให้คงที่ หลักการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กได้เช่นเดียวกัน เพื่อลดความผิดพลาด

โดยปกติในการวิเคราะห์สัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นอย่างไร และสถานะเปลี่ยนแปลงอย่างไร ในทางปฏิบัติการหาสถานะของสัญญาณไม่ใช่เรื่องง่าย เนื่องจากข้อจำกัดหลาย ๆ ปัจจัย เช่น ความไม่สมบูรณ์ของเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการวัดและความคลาดเคลื่อนในการวัด (กฤษฎา แสงเพชรส่อง, 2547) นำเสนอคาลมานฟิลเตอร์ (Kalman Filter) ในการประมาณสถานะของระบบการวัดระยะห่างเรือกับประภาคาร เนื่องจากค่าที่วัดได้จากเซ็นเซอร์มีสัญญาณรบกวนค่อนข้างมาก โดยคาลมานฟิลเตอร์สามารถประมาณค่าได้ใกล้เคียงกับสถานะจริงของระบบเพราะจุดแข็งของคาลมานฟิลเตอร์เหมาะกับการประมาณสถานะของระบบพลวัต ในการวัดสนามแม่เหล็กด้วยขดลวดหมุนอาจจะเจอสัญญาณรบกวนจากหลาย ๆ ปัจจัย เนื่องจากความซับซ้อนของระบบ คาลมานฟิลเตอร์จะช่วยในการกำจัดสัญญาณรบกวนนี้ได้

## 2.12 สรุป

จากปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องได้นำเสนอหลักการที่ใช้สำหรับการสร้างเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสี่ขั้วด้วยเทคนิคขดลวดหมุน โดยขั้นต้นจะเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการเกิดสนามแม่เหล็ก ความเข้มสนามแม่เหล็ก และความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก จากนั้นเข้าสู่กระบวนการวัดสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ **ส่วนที่ 1** การควบคุมความเร็วรอบของการหมุนขดลวด ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบของการหมุนให้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด **ส่วนที่ 2** การวัดการเคลื่อนตัวและสันสะท้อนของแท่งทรงกระบอก ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาความถี่ธรรมชาติของเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กว่า ความเร็วรอบที่เลือกใช้ในการหมุนไปตรงกับความถี่ธรรมชาติของระบบหรือไม่ รวมถึงไปถึงอุปกรณ์การวัดการสันสะท้อนและการเคลื่อนตัว **ส่วนที่ 3** การวัดและชดเชยความผิดพลาดของการวัดสนามแม่เหล็ก ในส่วนนี้จะเป็นการศึกษาการวัดสัญญาณฮาร์โมนิกส์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและทำการชดเชยสัญญาณฮาร์โมนิกส์ที่ได้จากการวัดเนื่องจากการเคลื่อนตัวของแท่งทรงกระบอกที่บรรจุขดลวดตัวนำให้มีความแม่นยำที่สูงขึ้น

## บทที่ 3

### การออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก

#### 3.1 บทนำ

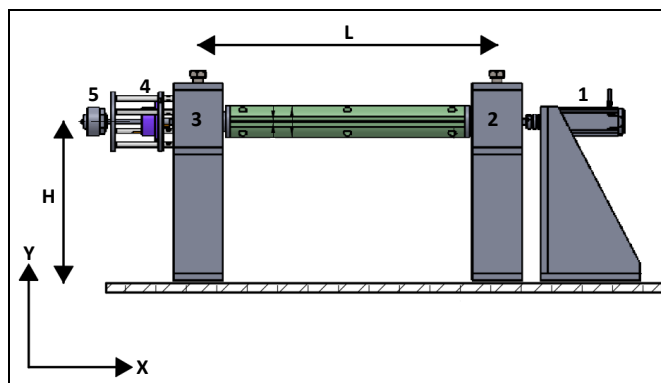
ในบทนี้จะทำการออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กด้วยเทคนิคขดลวดหมุน (Rotating coil) ที่ประกอบไปด้วยระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงปิด (Close-loop control) ร่วมกับการวัดสนามแม่เหล็กผ่านขดลวดเหนี่ยวนำ (Search coil) พร้อมระบุตำแหน่งของการวัดในช่วงความเร็วรอบการหมุนที่ 60, 90 และ 120 รอบต่อนาที โดยขั้นต้นก่อนการออกแบบจะเริ่มจากการศึกษาจำนวนแม่เหล็กแต่ละชนิดรวมไปถึงขนาดของแม่เหล็ก (ความยาว ความสูง ความลึก) ในงานวิจัยนี้จะใช้เป็นแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด ได้แก่ แม่เหล็กไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Dipole magnet) และแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสี่ขั้ว (Quadrupole magnet) โดยเฉพาะแม่เหล็กไฟฟ้าสี่ขั้วที่มีจำนวนมากที่สุดในเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนจำนวน 28 ตัว แบ่งออกเป็นแม่เหล็กไฟฟ้าสี่ขั้วแบบ Focusing quadrupole จำนวน 16 ตัว และแม่เหล็กไฟฟ้าสี่ขั้วแบบ Defocusing quadrupole จำนวน 12 ตัว ข้อมูลเบื้องต้นจะใช้เป็นข้อกำหนดในการออกแบบโครงสร้าง การออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบและอุปกรณ์ในการวัดสนามแม่เหล็กดังต่อไปนี้

#### 3.2 การออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก

โครงสร้างของเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนที่สำคัญ ได้แก่ ส่วนที่ 1 แท่นรองรับแท่งทรงกระบอก และส่วนที่ 2 แท่งทรงกระบอกที่บรรจุขดลวดเหนี่ยวนำ (Rotating coil rod)

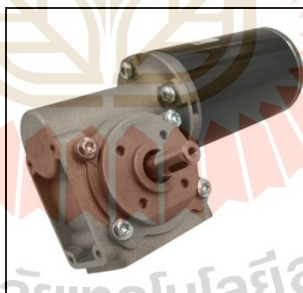
##### 3.2.1 แท่นรองรับแท่งทรงกระบอก

ตัวโครงสร้างหลักของแท่นรองรับจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 แท่นรองรับมอเตอร์ไฟฟ้า ส่วนที่ 2 แท่นรองรับเพลาด้านขับเคลื่อน (Drive end, DE) และส่วนที่ 3 แท่นรองรับเพลาด้านไม่ขับเคลื่อน (Non-drive end, NDE) ทั้ง 3 ส่วนจะถูกติดตั้งบนโต๊ะระดับที่มีความเรียบสูงโดยวัสดุโครงสร้างของแท่นรองรับทำมาจากอลูมิเนียม 5083 ที่มีน้ำหนักเบาและแข็งแรง โดยมีความสูง (H) 320 มิลลิเมตร ความยาว (L) 500 มิลลิเมตร และความลึก 215 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แบบเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก

จากรูปที่ 3.1 หมายเลข 1 จะเป็นในส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีเกียร์ทด (DC motor worm gear) ขนาด 100 วัตต์ แรงดันไฟฟ้า 24 โวลต์ กระแสไฟฟ้าสูงสุด 4.6 แอมป์ ความเร็วรอบสูงสุด 200 รอบต่อนาที แรงบิดสูงสุด 7.1 นิวตันเมตร ทำหน้าที่ขับเคลื่อนแท่งทรงกระบอก ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และส่งกำลังของมอเตอร์ไปยังแท่งทรงกระบอกด้วยคัปปลิงชนิด Flexible coupling แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 3.3 Flexible coupling



หมายเลข 2 และ 3 ในส่วนนี้จะป็นจุดรองรับแ่งทรงกระบอกด้านขับเคลื่อน (DE) และด้านไม่ขับเคลื่อน (NDE) ตำแหน่งนี้จะมึแบร้งชนิด Single-row angular contact ball bearings วางอยู่บนฐานเพื่อป็นจุดช้ปพอดให้กับแ่งทรงกระบอก แสดงด้งรูปที่ 3.4



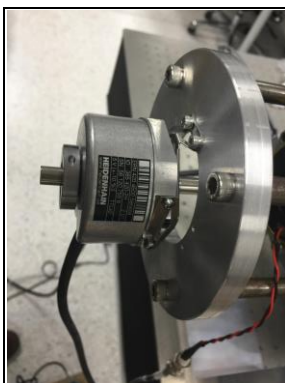
รูปที่ 3.4 Single-row angular contact ball bearings

หมายเลข 4 Slip ring coil voltage ทำหน้าที่ส่งผ่านแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการเคลื่อนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็กของขดลวดเหนี่ยวนำที่บรรจุในแ่งทรงกระบอกไปยังเครื่องมือวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเพื่อบันทึกข้อมูล แสดงด้งรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 Slip ring coil voltage

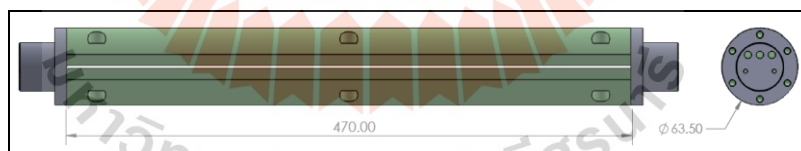
หมายเลข 5 เซ็นเซอร์วัดความเร็วรอบของมอเตอร์ชนิด Incremental rotating encoder ทำหน้าที่วัดความเร็วรอบและส่งสัญญาณป้อนกลับ (Feedback) ไปยังตัวควบคุม เพื่อรักษาความเร็วรอบในการหมุนให้ได้ตามที่ต้องการ แสดงด้งรูปที่ 3.6



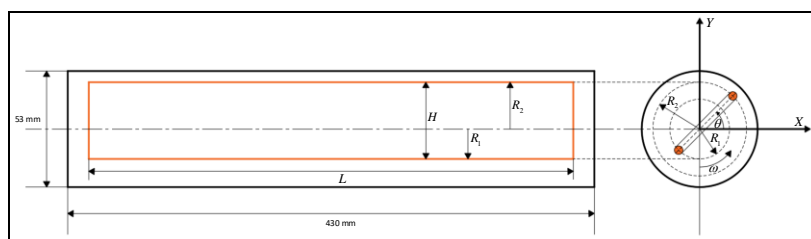
รูปที่ 3.6 Incremental rotating encoder

### 3.2.2 การออกแบบแท่งทรงกระบอก

ในส่วนของแท่งทรงกระบอกสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้จะออกแบบตามมิติความยาวและรัศมีของโพรงช่องว่างของแม่เหล็กไฟฟ้า จากข้อกำหนดดังกล่าวทำให้ได้แท่งทรงกระบอกที่มีความยาว 470 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 63.5 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3.7 ทำมาจากวัสดุคอมโพสิต G10 มีคุณสมบัติเด่น คือ ไม่ทำสัผลกับการวัดสนามแม่เหล็กเนื่องจากเป็นฉนวนทางไฟฟ้า ซึ่งภายในแท่งทรงกระบอกจะบรรจุขดลวดเหนี่ยวนำที่เรียกว่า “Search coil” หรือ “Harmonic coil” แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.7 ขนาดของแท่งทรงกระบอกและขดลวดเหนี่ยวนำ



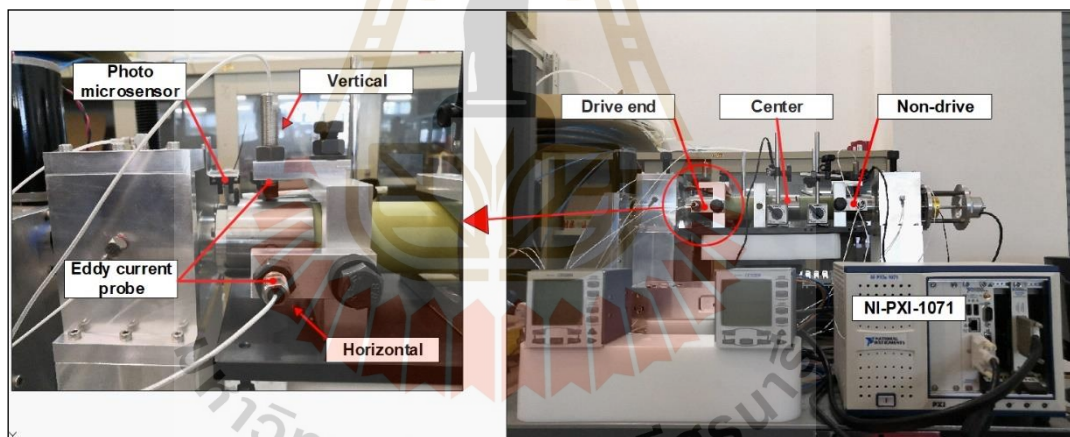
รูปที่ 3.8 ขดลวดเหนี่ยวนำ

### 3.3 การติดตั้งอุปกรณ์การวัดสนามแม่เหล็ก

จากหัวข้อที่ 3.2 เมื่อทำการออกแบบและสร้างเครื่องวัดสนามแม่เหล็กเรียบร้อยแล้ว ในหัวข้อนี้จะพูดถึงการติดตั้งเครื่องมือวัดที่สำคัญและการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์สำหรับการบันทึกข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป สำหรับในหัวข้อนี้จะแยกออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การวัดการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอกและการวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังต่อไปนี้

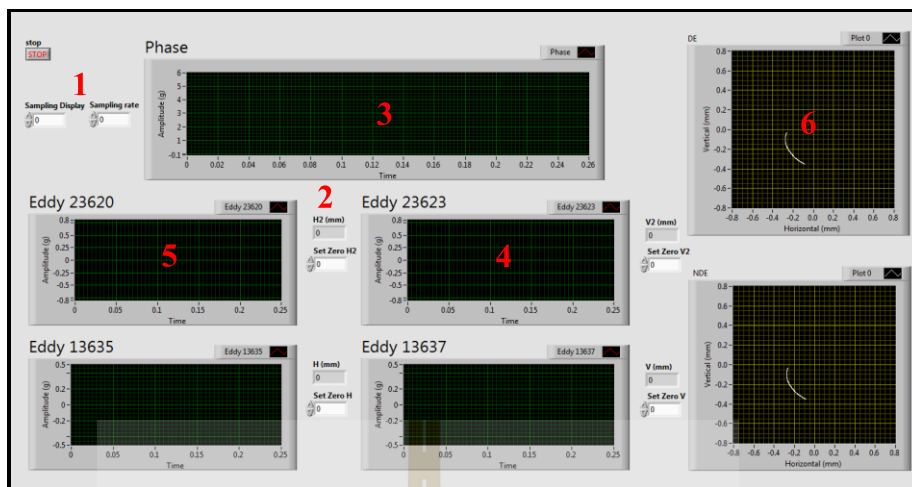
#### 3.3.1 การวัดการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก

รูปที่ 3.9 จะเป็นการติดตั้งอุปกรณ์วัดการเหวี่ยงตัวของขดลวด ซึ่งจะมีอุปกรณ์ที่สำคัญ ได้แก่ เซ็นเซอร์วัดระยะชนิด Eddy current probe ซึ่งมี measurement range 4 mm. resolution 4 micrometer. พร้อมชุด Amplifier output 0 – 10 volt. วัดการเหวี่ยงทั้งหมด 3 ตำแหน่ง Drive end, Center, Non-driver end ตำแหน่งละ 2 จุด ในแนวแกนตั้ง (Vertical) และแกนนอน (Horizontal) และเซ็นเซอร์สำหรับวัด Phase การหมุน (Photo microsensor) Response frequency 1 kHz. เชื่อมต่อผ่านทาง NI-PXI-5259 module กับ NI-PXI-1071 ด้วยโปรแกรม LabVIEW 2017

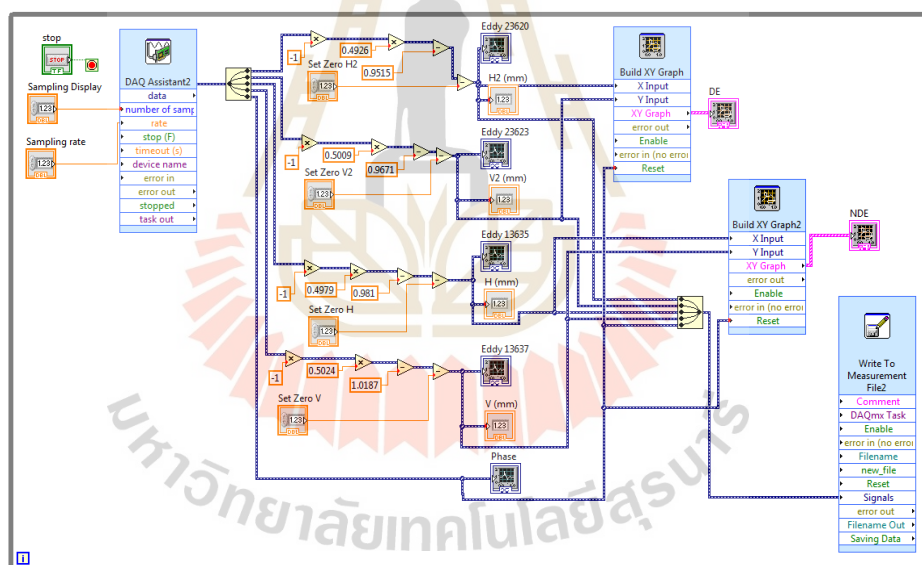


รูปที่ 3.9 อุปกรณ์วัดการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก

เมื่อติดตั้งเซ็นเซอร์สำหรับวัดการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอกครบถ้วนทำการเขียนโปรแกรมเพื่อเชื่อมต่อและเก็บข้อมูลแบบเวลาจริง (Real time) หน้าต่างของโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 3.10 ซึ่งจะประกอบไปด้วยในส่วนของกำหนดค่าเริ่มต้น ได้แก่ Sampling rate (1) และการกำหนดค่า Zero ในแต่ละตำแหน่งการวัด (2) และในส่วนของการแสดงผล ได้แก่ เฟสการหมุน (3) การเหวี่ยงตัวในแนวแกนตั้ง (Vertical axis, 4) การเหวี่ยงตัวในแนวแกนนอน (Horizontal axis, 5) และการแสดงผลวงโคจรการเหวี่ยงตัว (6) และส่วนลูปการทำงานของโปรแกรม แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 หน้าต่างการแสดงผลของการวัดการเหียงตัว



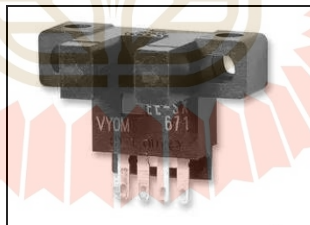
รูปที่ 3.11 ลูปรการทำงานของโปรแกรมวัดการเหียงตัว

เซ็นเซอร์วัดระยะ (Distance sensor) ทำหน้าที่วัดระยะการเหียงตัวของแท่งทรงกระบอกในแนวแกนตั้ง (Vertical axis) และในแนวนอน (Horizontal axis) เป็นเซ็นเซอร์แบบไม่สัมผัส (Non-contact) ส่งสัญญาณไฟฟ้าแบบอนาล็อกในช่วง 0 - 10 โวลต์ ที่ระยะ 0 - 4 มิลลิเมตร เพื่อนำระยะที่วัดได้ไปพล็อตวงโคจรการเหียงตัวว่าเป็นไปในลักษณะใด แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เซ็นเซอร์วัดระยะ

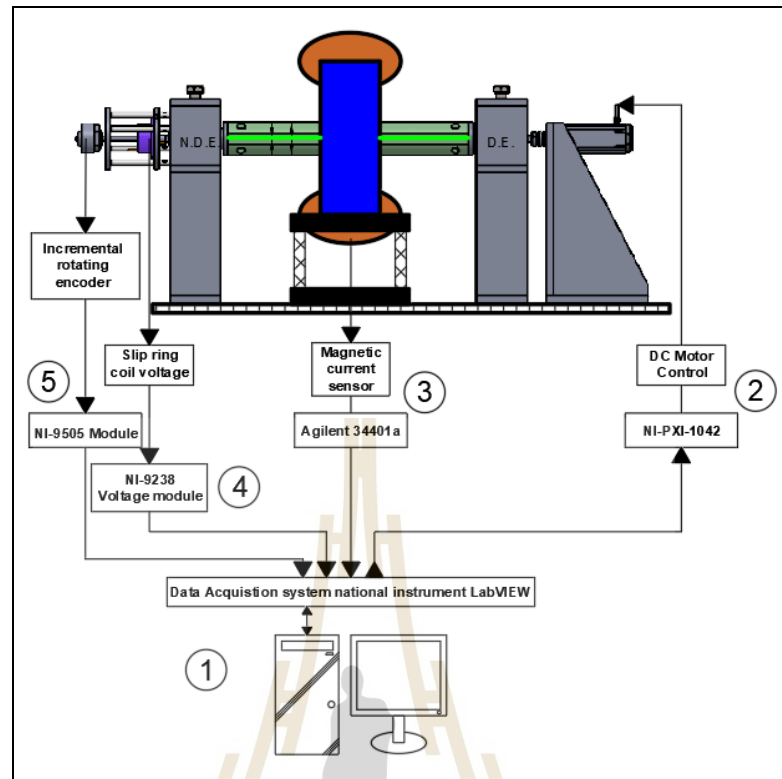
เซ็นเซอร์วัดเฟสการหมุน (Key phasor) ทำหน้าที่วัดตำแหน่งการหมุนของแท่งทรงกระบอก เพื่อหาจุดอ้างอิงของการหมุนสำหรับวิเคราะห์ปัญหาในการเคลื่อนที่ของแท่งทรงกระบอก ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ชนิด Photo microsensor แสดงดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 Photo microsensor

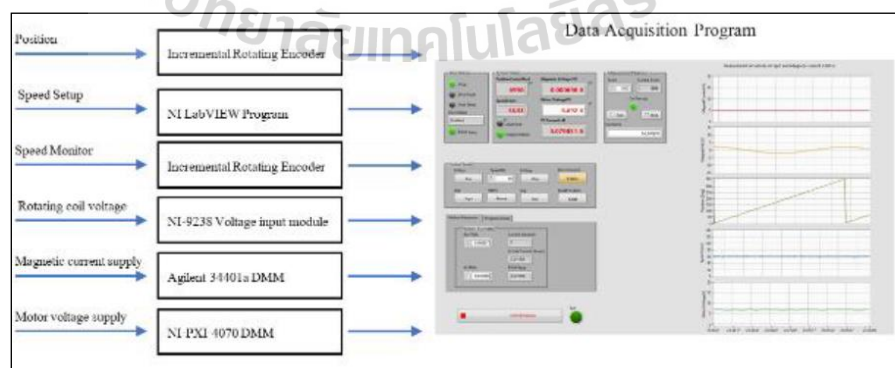
### 3.3.2 การติดตั้งอุปกรณ์การวัดสนามแม่เหล็ก

รูปที่ 3.14 จะเป็นการติดตั้งอุปกรณ์การวัดสนามแม่เหล็กและมีอุปกรณ์ที่สำคัญทั้งหมด 5 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 คอมพิวเตอร์สำหรับเขียนโปรแกรมควบคุมการหมุนของมอเตอร์ และการเก็บข้อมูล ส่วนที่ 2 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนที่ 3 ชุดอุปกรณ์การวัดกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า ส่วนที่ 4 ชุดอุปกรณ์การวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และส่วนที่ 5 ชุดอุปกรณ์การวัดความเร็วรอบ รายละเอียดอุปกรณ์แต่ละส่วนแสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.14 การติดตั้งอุปกรณ์การวัดสนามแม่เหล็ก

ส่วนที่ 1 การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ LabVIEW 2017 ควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและเก็บข้อมูล แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ กระแสไฟฟ้า และความเร็วรอบการหมุน หน้าต่างโปรแกรมแสดงดังรูปที่ 3.15

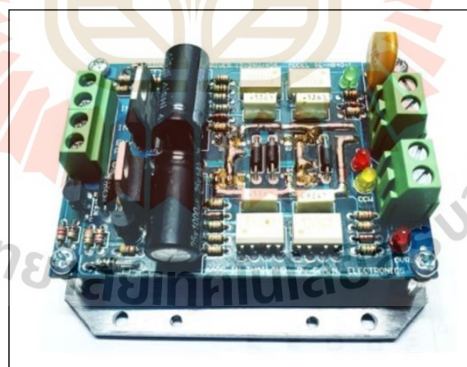


รูปที่ 3.15 หน้าต่างการแสดงผลของการวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

ส่วนที่ 2 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ทำหน้าที่ควบคุมกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ด้วยสัญญาณแบบ PWM (Pulse-width modulation) ด้วยอุปกรณ์ NI-9505 Motor drive module ไปยังบอร์ด Motor drive power amplifier แสดงดังรูปที่ 3.16 และรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.16 Motor drive module



รูปที่ 3.17 Motor drive power amplifier

ส่วนที่ 3 ชุดอุปกรณ์วัดกระแสไฟฟ้า ทำหน้าที่วัดกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดของแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบไปด้วย เซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า DCCT Model : IT 65-S Ultrastab ช่วงของการวัด 0 - 60 แอมป์ เชื่อมต่อกับ Digital multimeter Model : 34410a Agilent แสดงดังรูปที่ 3.18 และดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.18 เซ็นเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า



รูปที่ 3.19 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์

ส่วนที่ 4 ชุดอุปกรณ์วัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ทำหน้าที่วัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้จากการหมุนขดลวดเหนี่ยวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็ก ประกอบไปด้วย เซ็นเซอร์วัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าแบบอนาล็อก NI-9238 Voltage input module ช่วงของการวัดอยู่ที่ 0 - 500 มิลลิโวลต์ โดยรับสัญญาณมาจาก Slip ring ที่เชื่อมต่อกับขดลวดเหนี่ยวนำภายในแท่งทรงกระบอก ส่งสัญญาณไปยังคอมพิวเตอร์ด้วย NI cRIO-9030 Controller แสดงดังรูปที่ 3.20 และดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.20 เซ็นเซอร์วัดแรงเคลื่อนไฟฟ้า





รูปที่ 3.21 NI cRIO-9030 Controller

ส่วนที่ 5 ชุดอุปกรณ์วัดความเร็วรอบ ทำหน้าที่วัดความเร็วรอบในการหมุนแห่งทรงกระบอกเพื่อเป็นสัญญาณป้อนกลับ (Feedback) ให้กับตัวควบคุม โดยในส่วนนี้จะอุปกรณ์ที่รับสัญญาณความเร็วมาจาก Incremental rotating encoder เพื่อแปลงสัญญาณไปยังคอมพิวเตอร์ด้วย NI-9505 Module ดังรูปที่ 3.16 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกับ Motor drive module

ในหัวข้อที่ 3.3 นี้ได้กล่าวถึงอุปกรณ์ที่สำคัญสำหรับการทดลอง เมื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์และเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนที่สำคัญก่อนที่จะนำเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบและนำไปวัดสนามแม่เหล็ก เนื่องจากเครื่องมือสนามแม่เหล็กด้วยเทคนิคขดลวดหมุนจัดเป็นเครื่องจักรที่มีการเคลื่อนที่แบบหมุน (Rotating machine) จำเป็นต้องทดสอบ โครงสร้างเพื่อหาความถี่ธรรมชาติของระบบ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้เป็นข้อจำกัดความเร็วรอบในการหมุนแห่งทรงกระบอกที่ไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

### 3.4 การหาความถี่ธรรมชาติของเครื่องวัดสนามแม่เหล็ก

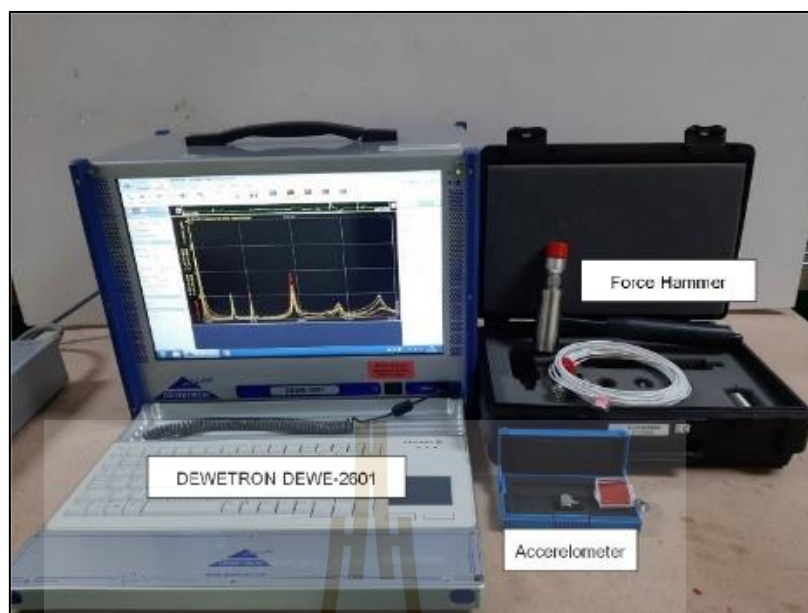
เมื่อทำการจัดสร้าง โครงสร้างและติดตั้งอุปกรณ์การวัดต่าง ๆ เป็นที่เรียบร้อยแล้ว การทดสอบการสั่นสะเทือนระดับเบื้องต้นจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นก่อนจะนำไปใช้งาน คือ การหาความถี่ธรรมชาติของระบบ ซึ่งในการหาความถี่ธรรมชาตินั้นสามารถทำนายได้ด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ แต่จำเป็นที่จะต้องทราบค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญก่อน เช่น มวล (Mass) ความหน่วง (Damping) โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of inertial) และค่าความแข็งเกร็ง (Stiffness) เป็นต้น ในทางปฏิบัติค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ไม่สามารถหามาได้โดยง่าย เพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการหาค่าความถี่ธรรมชาติของเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก งานวิจัยนี้เลือกใช้การทดสอบการสั่นสะเทือนเพื่อทำนายความถี่ธรรมชาติด้วยวิธี Modal testing ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งของการทำ Impact test และใช้เทคนิค

Roving hammer แทนการ Roving sensor เพื่อควบคุมแรงที่ใช้ในการกระตุ้น โครงสร้างด้วย Human ที่ตำแหน่งเดิม อุปกรณ์และขั้นตอนในการทดสอบแสดงดังต่อไปนี้

### 3.4.1 อุปกรณ์สำหรับการหาความถี่ธรรมชาติ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบความถี่ธรรมชาติของเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้แก่

1. ชิ้นงานที่จะทดสอบ (เครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก) ตัวโครงสร้างเป็นอลูมิเนียม เกรด 5083
2. ตัวตรวจวัด (Sensor) Accelerometer sensor Kistler (8763B100AT) ช่วงของการวัด  $\pm 100$  g ค่า Sensitivity  $50 \pm 15\%$  mV/g และช่วงความถี่ทำงาน 0.5 - 7 kHz ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงหรือการเคลื่อนทางกลเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ซึ่งจะนำไปติดตั้งในบริเวณที่สนใจหรือบริเวณที่มีการส่งผ่านแรง เช่น บริเวณฐานของ โครงสร้างหรือบริเวณแบร์ริง
3. ตัวกระตุ้น (Actuators) Impulse force hammer Kistler (9722A500) ช่วงในการวัด 0 - 100 lbf (500N) และค่า Sensitivity 50 mV/lbf ทำหน้าที่สร้างแรงกระตุ้นแบบ Impulse ให้กับโครงสร้างของเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก ทำให้โครงสร้างสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติของตัวโครงสร้างเอง
4. เครื่องขยายสัญญาณ (Signal amplifiers) Dewetron DEWE - 2601 ทำหน้าที่ขยายสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จาก Accelerometer sensor เนื่องจากสัญญาณที่ได้จะขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ค่อนข้างต่ำไม่เหมาะกับการนำมาใช้งานโดยตรง เพื่อความสะดวกในการจำแนกและวิเคราะห์สัญญาณที่ได้จำเป็นต้องขยายสัญญาณให้มีขนาดที่เหมาะสมและกำจัดสัญญาณรบกวน
5. เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (Signal analyzers) Dewesoft X3 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการบันทึกและจัดการสัญญาณที่ได้จากส่วนขยายสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบที่ง่ายต่อการนำไปวิเคราะห์ สัญญาณที่ได้อาจจะอยู่ในรูปแบบของสัญญาณในโดเมนเวลา หรือแปลงสัญญาณให้อยู่ในโดเมนความถี่โดยใช้การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier transform, FFT) เป็นต้น



รูปที่ 3.22 อุปกรณ์สำหรับการทำ Impact test

### 3.4.2 ขั้นตอนการหาความถี่ธรรมชาติ

ขั้นตอนในการทดสอบเพื่อหาความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กนั้นจะอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ คือ โปรแกรม DEWESoft™ สำหรับคำนวณหาความถี่ธรรมชาติในโหมดต่าง ๆ ซึ่งลำดับการทำงานของโปรแกรมในการวิเคราะห์ที่สามารถเขียนแทนด้วยแผนภูมิดังรูปที่ 3.23

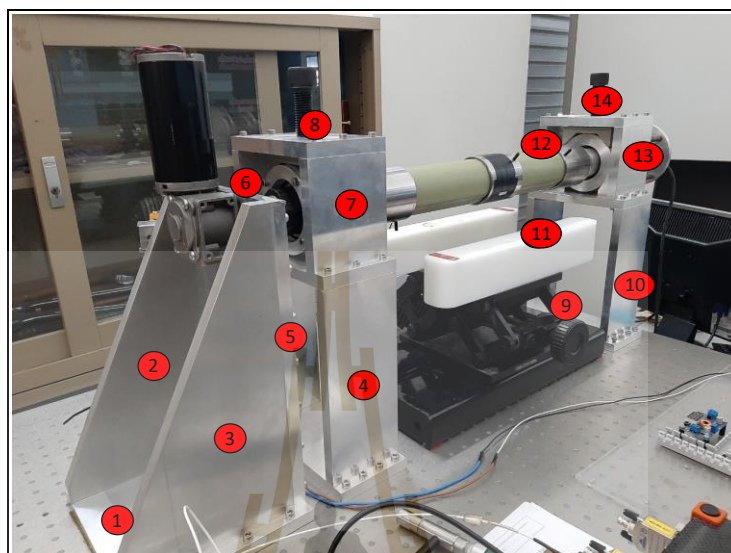
**ขั้นตอนที่ 1** กำหนดการทำงานตัวกระตุ้น (Hammer force) และตัวตรวจรู้ (Accelerometer sensor) ที่นำมาใช้งานในโปรแกรม Dewesoft ได้แก่

- กำหนดค่าการตอบสนอง (Sensitivity) ของอุปกรณ์
- กำหนดค่าอัตราของสัญญาณ (Dynamic acquisition rate)
- กำหนดช่วงความถี่ในการใช้งาน (Frequency length)
- กำหนดชนิดตัวกรอง (Filter type)

**ขั้นตอนที่ 2** กำหนดค่าและรูปแบบการเก็บข้อมูลในโปรแกรม Dewesoft ในส่วนของ Modal test features ได้แก่

- กำหนดรูปแบบการตอบสนองของโมดอล (Roaming sensor or Roaming hammer)
- กำหนดค่าความละเอียด (Line of resolution, LOR)
- กำหนดค่าอัตราการสุ่มตัวอย่างของการสั่นสะเทือน (Sampling rate)
- กำหนดความถี่ในการกรองสัญญาณ

**ขั้นตอนที่ 3** กำหนดจุดวัดสัญญาณและติดตั้งตัวตรวจรู้เข้ากับโครงสร้างของเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กที่ได้ออกแบบไว้สำหรับกรวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติ แสดงดังรูปที่ 3.23



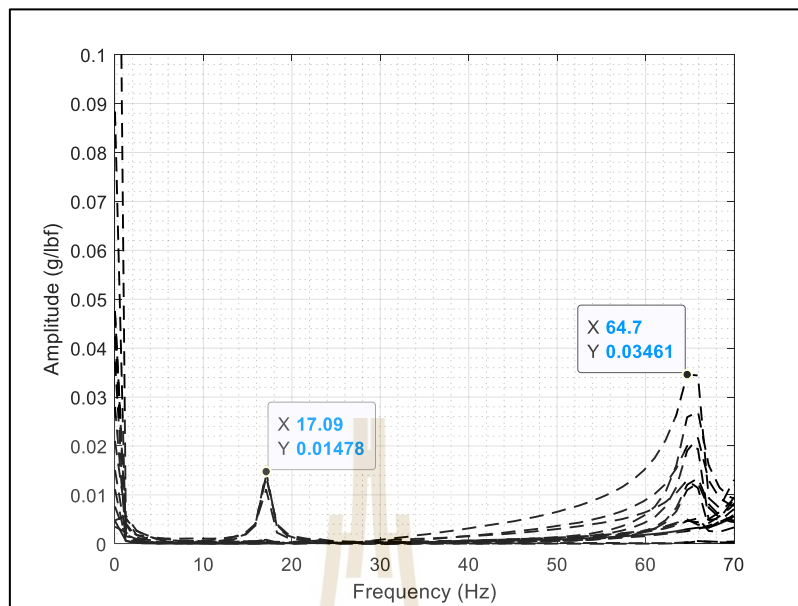
รูปที่ 3.23 จุดวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน

**ขั้นตอนที่ 4** เริ่มการทดสอบด้วยการใช้ตัวกระตุ้นเคาะไปที่ตำแหน่งที่กำหนดตามลำดับจนครบ เพื่อสร้างแรงสั่นสะเทือนให้โมเลกุลของวัสดุเกิดการเคลื่อนที่ จำนวนการเคาะต่อจุดขึ้นอยู่กับค่าโปรแกรมในขั้นตอนที่ 2

**ขั้นตอนที่ 5** นำสัญญาณที่ได้จากการกระตุ้นเครื่องจักรมาวิเคราะห์โดยการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว ผลที่ได้จะทำให้ทราบความถี่ธรรมชาติแต่ละโหมดของเครื่องจักร

### 3.4.3 ผลการทดสอบโครงสร้างเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก

ในการทดสอบโครงสร้างของเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีการข้างต้นเพื่อป้องกันผลกระทบที่อาจเกิดจากการสั่นพ้องของเครื่องมือวัด พบว่าความถี่ธรรมชาติของโครงสร้างในโหมดที่ 1 อยู่ที่ 17.09 เฮิรตซ์ และความถี่ในโหมดที่ 2 อยู่ที่ 64.70 เฮิรตซ์ แสดงดังรูปที่ 3.15 จากผลที่ได้สามารถกำหนดช่วงความถี่ที่ใช้ในการหมุนแท่งหมุนทรงกระบอกซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ความถี่ในการหมุนในช่วง 1 - 2 เฮิรตซ์ เมื่อเปรียบเทียบกับความถี่โหมดที่ 1 ของโครงสร้างจะเห็นได้ว่ามีค่าห่างกันค่อนข้างมาก ดังนั้นโครงสร้างของเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กที่ได้ทำการออกแบบและจัดสร้างสามารถนำไปใช้งานได้



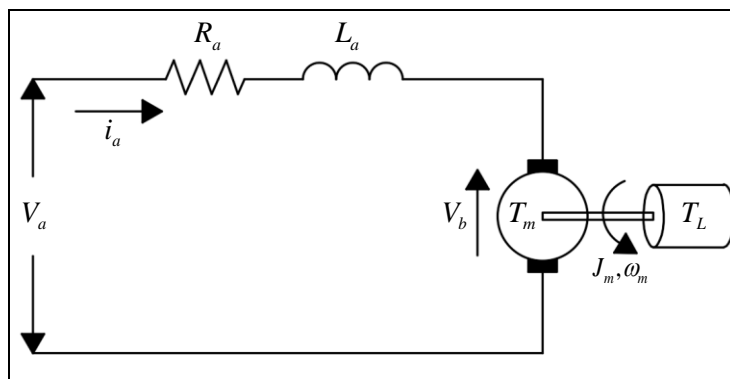
รูปที่ 3.24 การตอบสนองเชิงความถี่ที่ได้จากการทดสอบ โมดอล

### 3.5 การออกแบบระบบควบคุมการหมุนแท่งทรงกระบอก

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่านสำหรับการขับเคลื่อนแท่งทรงกระบอกที่บรรจุคลวดเหนียวนำ ซึ่งมอเตอร์ชนิดนี้มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในภาคการศึกษาและภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากโครงสร้างของมอเตอร์ไม่ซับซ้อนทำให้สามารถสร้างแบบจำลองในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม MATLAB บนพื้นฐานคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ โดยการรับค่าอินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดอาร์เมเจอร์และเอาต์พุตที่เป็นความเร็วรอบของการหมุน ดังต่อไปนี้

#### 3.5.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานไฟฟ้าให้เป็นแรงทางกล ซึ่งในงานวิจัยนี้จะควบคุมด้วยวิธี Armature control โดยใช้การปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ให้กับวงจรอาร์เมเจอร์ (Armature circuit) เพื่อควบคุมความเร็วรอบการหมุนของแกนมอเตอร์ การควบคุมจะอาศัยการปรับเปลี่ยนความต่างศักย์ที่ให้กับวงจรอาร์เมเจอร์วงจรของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แสดงดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 แผนภาพวงจรอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากกฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's voltage law) จะสามารถเขียนสมการทางไฟฟ้าของมอเตอร์ได้ดังสมการที่ 3.1

$$V_a(t) = R_a i_a + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + V_b(t) \quad (3.1)$$

โดยที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (back emf,  $V_b$ ) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.2

$$V_b(t) = K_b \omega_m(t) \quad (3.2)$$

กระแสไฟฟ้า ( $i_a$ ) ที่ไหลผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์ จะทำให้เกิดแรงบิด ( $T_m$ ) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.3

$$T_m(t) = K_t i_a(t) \quad (3.3)$$

แรงบิดของมอเตอร์จะเป็นต้นกำลัง (input) ในการขับเคลื่อนแท่งทรงกระบอกซึ่งเป็นภาระกรรมของระบบ ( $T_L$ ) ซึ่งเป็นการเอาชนะความเฉื่อยในส่วนของภาระทั้งหมด ดังนั้นในระบบทางกล สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 3.4

$$Net\_torque = T_m - damping\_torque - T_L \quad (3.4)$$

โดย Damping torque มีค่าเท่ากับ  $c\omega_m$  และหากพิจารณาให้เฟลาเป็นวัตถุแข็งเกร็ง จากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน จะสามารถเขียนสมการทางกลได้ดังสมการที่ 3.5

$$J_m \frac{d\omega_m(t)}{dt} = T_m(t) - c\omega_m(t) - T_L(t) \quad (3.5)$$

จากสมการที่ 3.5 จัดรูปใหม่ให้ง่ายต่อการพิจารณา จะได้

$$J_m \frac{d\omega_m(t)}{dt} + c\omega_m(t) + T_L(t) = T_m(t) \quad (3.6)$$

จากสมการที่ 3.2 แทนค่าลงในสมการที่ 3.1 จะสามารถเขียนสมการใหม่ได้ ดังสมการที่ 3.7

$$V_a(t) = R_a i_a + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + K_b \omega_m(t) \quad (3.7)$$

ทำการแปลงลาปลาซให้กับสมการที่ 3.6 และสมการที่ 3.7 สามารถแสดงได้ ดังสมการที่ 3.8 และสมการที่ 3.9

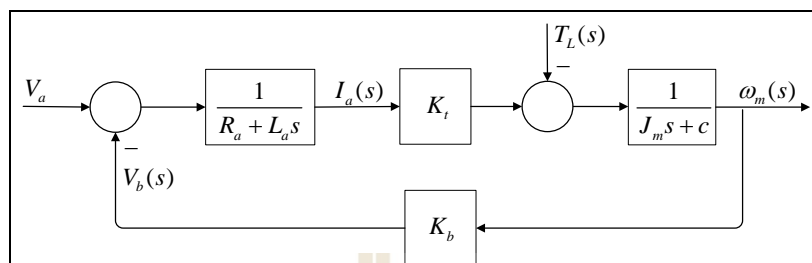
$$sJ_m \omega_m(s) + c\omega_m(s) + T_L(s) = T_m(s) \quad (3.8)$$

$$V_a(s) = R_a I_a(s) + sL_a I_a(s) + K_b \omega_m(s) \quad (3.9)$$

เมื่อไม่พิจารณาแรงบิดจากภายนอกกระทำกับระบบ จากสมการที่ 3.8 และสมการที่ 3.9 จะสามารถหาฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุม (output,  $\omega_m$ ) และแรงดันไฟฟ้า (input,  $V_a$ ) ได้ดังสมการที่ 3.10

$$\frac{\omega_m(s)}{V_a(s)} = \frac{K_t}{L_a J_m s^2 + (R_a J_m + L_a c)s + (R_a c + K_b K_t)} \quad (3.10)$$

จากสมการที่ 3.10 สามารถนำมาเขียนแผนภาพบล็อกไดอะแกรมสำหรับการควบคุมความเร็วเชิงมุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงเปิด แสดงดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 บล็อกไดอะแกรมควบคุมความเร็วเชิงมุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบวงเปิด

เมื่อ  $J_m$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยในการหมุนของมอเตอร์ (Moment of inertia,  $kg \cdot m^2$ ) เป็นค่าที่ได้จากการรักษาสภาพเดิมของการหมุนเอาไว้ โดยค่าโมเมนต์ความเฉื่อยจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับมวล และระยะจากมวลไปยังแกนหมุนของมอเตอร์

$L_A$  คือ ค่าความเหนี่ยวนำของอาร์เมเจอร์ (Inductance of armature winding,  $H$ ) ค่าความเหนี่ยวนำจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับจำนวนของขดลวด ถ้าขดลวดมีปริมาณมากค่าความเหนี่ยวนำก็จะมากตามไปด้วย ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำจะแปรผันตรงกับจำนวนขดลวด

$R_A$  คือ ความต้านทานขดลวดอาร์เมเจอร์ (Resistance of armature winding,  $\Omega$ ) เป็นเหตุของการทำให้เกิดแรงเคลื่อนตกคร่อมเฟส ซึ่งจะทับเฟสหรือตกคร่อมเฟสเดียวกับกระแสไฟฟ้าในอาร์เมเจอร์

$V_a$  คือ แรงดันไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ (Armature voltage,  $V$ ) เป็นแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับขดลวดอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์

$i_a$  คือ กระแสไฟฟ้าอาร์เมเจอร์ (Armature current,  $A$ ) คือ แรงบิดของแกนเพลลามอเตอร์ที่ใช้ในการเอาชนะภาระกรรมจะมีความสัมพันธ์กับความเร็วรอบของมอเตอร์

$\omega_m$  คือ ความเร็วรอบเชิงมุมของมอเตอร์ (Angular velocity of motor,  $rad/s$ ) คือ ความเร็วที่ใช้ในการขับเคลื่อนแท่งทรงกระบอกให้หมุนด้วยความเร็วที่ต้องการ

$c$  คือ ค่าคงที่ความเสียดทาน (Viscous friction coefficient,  $(N \cdot m)/(rad/s)$ )

$T_m$  คือ แรงบิดของมอเตอร์ (Motor torque,  $N \cdot m$ ) คือ แรงบิดของแกนเพลลามอเตอร์ที่ใช้ในการเอาชนะภาระกรรมจะมีความสัมพันธ์กับความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์

$T_L$  คือ ภาระกรรมของมอเตอร์ (Load torque,  $N \cdot m$ ) คือ แรงบิดที่ต้านการเคลื่อนที่ของมอเตอร์มีความสัมพันธ์กับความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์

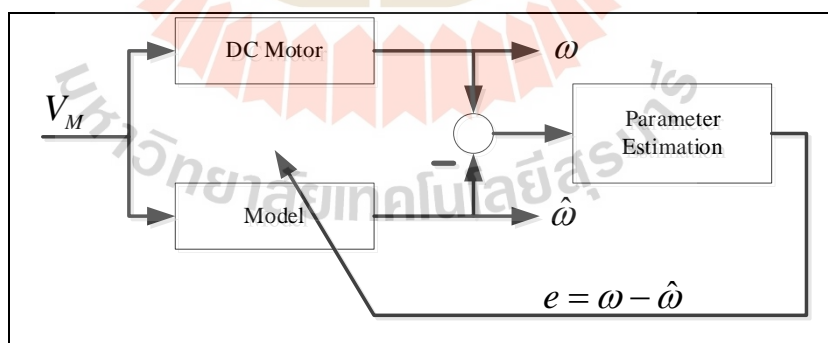


$K_t$  คือ ค่าคงที่ของแรงบิดของมอเตอร์ (Motor torque constant,  $N \cdot m / A$ ) การเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้เกิดการเคลื่อนไหวในช่องว่างอากาศระหว่างสเตเตอร์กับโรเตอร์

$K_b$  คือ ค่าคงที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Motor back emf constant,  $V/(\text{rad/s})$ ) ขณะที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกำลังเคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็ก จะเกิดแรงดันไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นบนขดลวดนั้นแรงดันไฟฟ้านี้มีแนวโน้มจะต่อต้านกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ดังนั้นจึงเรียกว่า “แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ,  $V_b$ ” หรือ “Back emf”

### 3.5.2 การระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

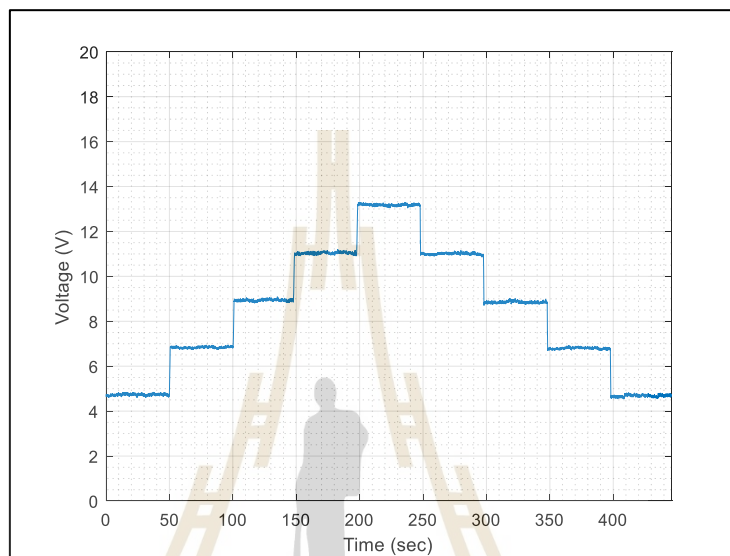
ในทางปฏิบัติพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงบางตัวไม่สามารถวัดค่าได้โดยตรงและมีความจำเป็นอย่างยิ่งต้องทราบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว เพื่อความสมบูรณ์แบบของแบบจำลองและนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุม พารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่สามารถวัดค่าได้โดยตรงจากเครื่องมือทางไฟฟ้าพื้นฐาน ได้แก่  $R_a$  และ  $L_a$  ส่วนพารามิเตอร์  $J_m$ ,  $K_t$ ,  $K_b$  และ  $c$  ไม่สามารถวัดได้โดยตรง ต้องอาศัยข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ฟังก์ชันในโปรแกรม MATLAB-Simulink ในส่วนของ Parameter estimation ซึ่งขั้นตอนในการประมาณค่าตัวแปรของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่เป็นค่าการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าและความเร็วรอบในการหมุนของมอเตอร์ที่ได้จากการทดลองจะถูกรับเข้ามาเป็นข้อมูลอินพุต ( $V_m$ ) และเอาต์พุต ( $\omega$ ) ในโปรแกรม MATLAB เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบเอาต์พุต ( $\hat{\omega}$ ) ของแบบจำลองคณิตศาสตร์บล็อกไดอะแกรมการประมาณค่าแบบจำลอง แสดงดังรูปที่ 3.27



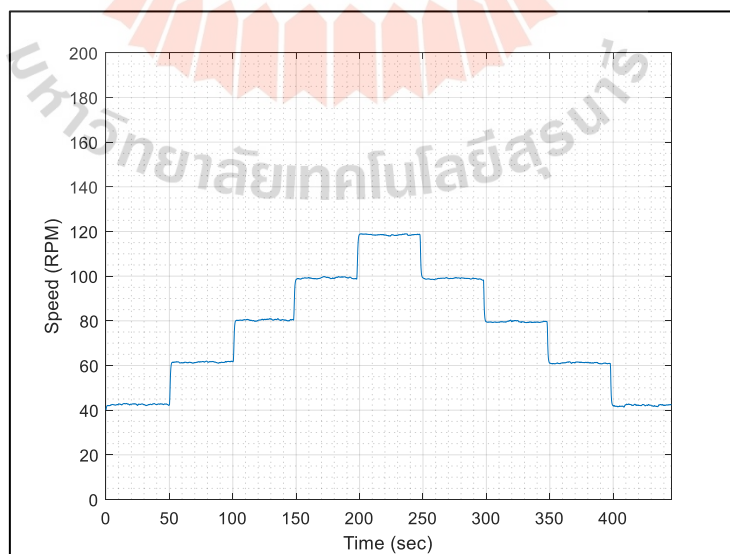
รูปที่ 3.27 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของ Parameter estimation

ในส่วนขั้นตอนการประมาณค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะใช้การระบุเอกลักษณ์ของแบบจำลองในวงเปิด ซึ่งการประมาณค่าจะใช้โปรแกรม MATLAB - Simulink ในส่วนของฟังก์ชัน Parameter estimation ดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

**ขั้นตอนที่ 1** ใช้โปรแกรม MATLAB ที่ได้พัฒนาขึ้นกำหนดแรงดันไฟฟ้า (input) ที่จ่ายให้กับมอเตอร์อยู่ในช่วง 4 - 16 โวลต์ แสดงดังรูปที่ 3.28 พร้อมกับบันทึกผลการตอบสนองของความเร็วรอบ (Output) แสดงดังรูปที่ 3.29 ซึ่งในการทดลองจะกำหนดให้มีความเร็วรอบตลอดช่วงของการใช้งาน

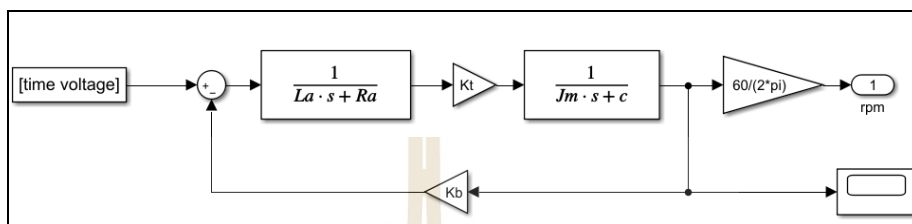


รูปที่ 3.28 แรงดัน ไฟฟ้าขาเข้า (Input)



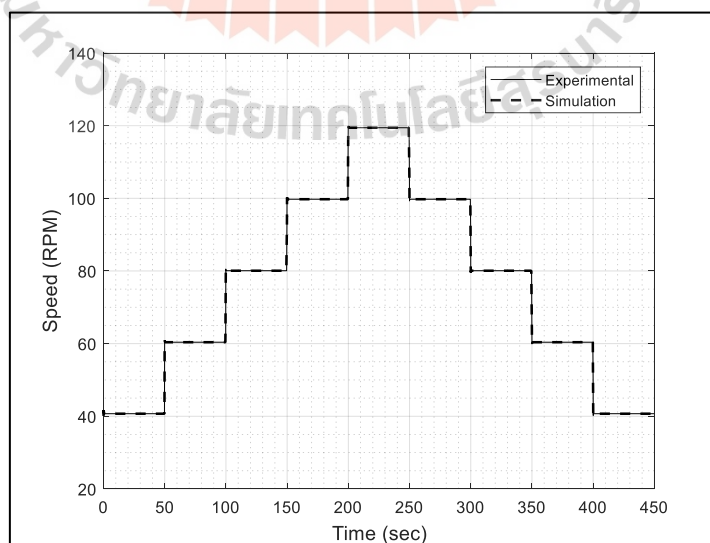
รูปที่ 3.29 ความเร็วรอบของมอเตอร์ (Output)

**ขั้นตอนที่ 2** ใช้โปรแกรม MATLAB – Simulink สร้างแบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในระบบควบคุมแบบเปิด สำหรับอ่านค่าอินพุต (Voltage) และทางออกเอาต์พุต ( $\omega_m$ ) ที่ได้จากการทดลองในขั้นตอนที่ 1 พร้อมระบุตัวแปรที่ทราบค่าลงไปโปรแกรม ได้แก่ ค่าความต้านทาน  $R_a = 3.2715 \Omega$  และค่าความเหนี่ยวนำ  $L_a = 2.0487 \times 10^{-3} \text{ H}$  แสดงดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 บล็อกไดอะแกรมการระบุเอกลักษณ์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

**ขั้นตอนที่ 3** การประมาณค่าตัวแปรของระบบโดยใช้เครื่องมือของโปรแกรม MATLAB ในส่วนของ Parameter Estimation ในการระบุเอกลักษณ์ค่าตัวแปรต่าง ๆ เพื่อให้ได้ค่าที่ได้จากประมาณค่าใกล้เคียงกับการทดลองนั้น จะต้องมีการกำหนดขอบเขตของพารามิเตอร์ทั้ง 4 ตัว ซึ่งขอบเขตเหล่านี้จะกำหนดตามลักษณะของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่นำมาใช้งาน (การใช้งาน Parameter Estimation ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ค.) ผลที่ได้จากการระบุเอกลักษณ์ในขั้นตอนนี้แสดงดังรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองคณิตศาสตร์กับผลการทดลองของมอเตอร์ไฟฟ้า

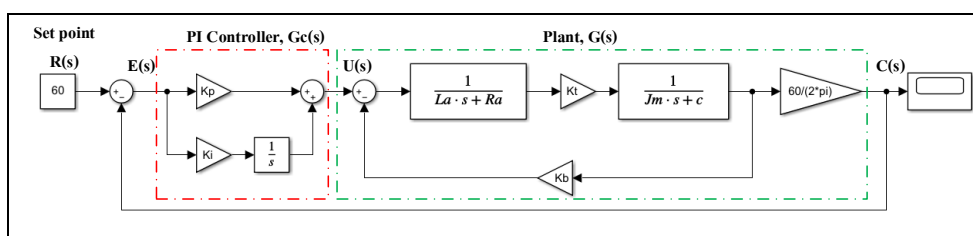
ผลที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์เปรียบเทียบกับผลการทดลอง ดังรูปที่ 3.31 ซึ่งจะมีความคลาดเคลื่อนระหว่างแบบจำลองคณิตศาสตร์กับผลการทดลองอยู่ที่ 2.27 เปอร์เซ็นต์ ค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าทั้ง 4 ตัว  $J_m, K_t, K_b, c$  และที่ทราบค่า  $R_a, L_a$  ของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าและทางกลของ DC Motor

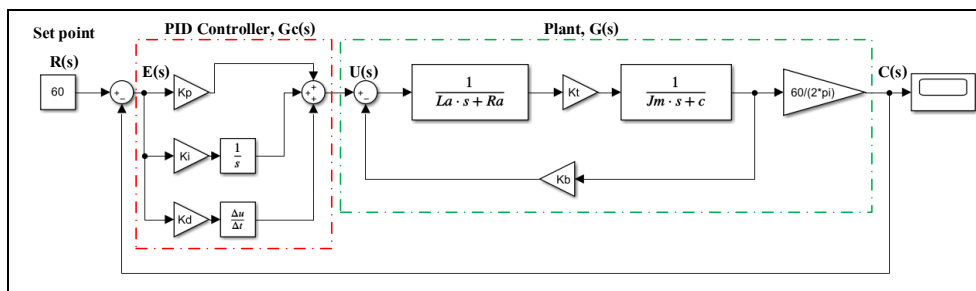
พารามิเตอร์	ค่า
โมเมนต์ความเฉื่อย, $J_m$	14.773 kg·m <sup>2</sup>
ค่าคงที่แรงบิด, $K_t$	9.536×10 <sup>-3</sup> N·m /A
ค่าคงที่แรงดันไฟฟ้าต้านกลับ, $K_b$	7.010×10 <sup>-2</sup> V/(rad/s)
ค่าคงที่ความเสียดทาน, $c$	5.863 (N·m)/(rand/s)
ความต้านทานขดลวดอาร์เมเจอร์, $R_a$	3.272 Ω
ความเหนี่ยวนำขดลวดอาร์เมเจอร์, $L_a$	2.049×10 <sup>-3</sup> H

### 3.5.3 การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากการระบุเอกลักษณ์แบบจำลองคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในหัวข้อที่ 3.5.2 จะถูกนำมาใช้ในการกำหนดรูปแบบการตอบสนองของความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์ร่วมกับตัวควบคุมแบบพีไอ (PI Controller) และตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller) เนื่องจากในการวัดสนามแม่เหล็กต้องการระบบควบคุมความเร็วรอบการหมุนอัตโนมัติเพื่อความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวมีค่าน้อยที่สุด แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของตัวควบคุมแบบพีไอและพีไอดีแสดงดังรูปที่ 3.32 และดังรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.32 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมการควบคุมความเร็วรอบด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ



รูปที่ 3.33 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมการควบคุมความเร็วรอบด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

จากแผนภาพบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 3.32 ส่วนประกอบของตัวควบคุมแบบพีไอสามารถสร้างฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมและระบบควบคุมได้ โดยเริ่มต้นจากสมการที่ 3.11

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (3.11)$$

เมื่อแปลงให้อยู่ในรูป S-domain โดยการแปลงลาปลาซ ดังสมการที่ 3.12

$$U(s) = \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) E(s) \quad (3.12)$$

จากสมการที่ 3.12 จะได้ตัวควบคุมแบบพีไอ ดังสมการที่ 3.13

$$G_C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) \quad (3.13)$$

จากสมการที่ 3.13 จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของพลาंतर่วมกับตัวควบคุมพีไอแบบวงเปิดสมการที่ 3.14

$$G_C(s)G(s) = \frac{K_p K_t s + K_i K_t}{L_a J_m s^3 + (R_a J_m + L_a c) s^2 + (R_a c + K_b K_t) s} \quad (3.14)$$

และฟังก์ชันถ่ายโอนของพลาंतर่วมกับตัวควบคุมพีไอแบบวงปิด ดังสมการที่ 3.15

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K_t K_p s + K_t K_i}{L_a J_m s^3 + (R_a J_m + L_a c) s^2 + (R_a c + K_b K_t + K_i K_p) s + K_t K_i} \quad (3.15)$$

จากแผนภาพบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 3.33 ส่วนประกอบของตัวควบคุมแบบพีไอดีสามารถสร้างฟังก์ชันถ่ายโอนของตัวควบคุมและระบบควบคุมได้ โดยเริ่มต้นจากสมการที่ 3.16

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.16)$$

เมื่อแปลงให้อยู่ในรูป S - domain โดยการแปลงลาปลาซ ดังสมการที่ 3.17

$$U(s) = \left( K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) E(s) \quad (3.17)$$

จากสมการที่ 3.17 จะได้ตัวควบคุมแบบพีไอดี ดังสมการที่ 3.18

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \left( K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) \quad (3.18)$$

จากสมการที่ 3.18 จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของพลาंतर่วมกับตัวควบคุมพีไอดีแบบวงเปิดสมการที่ 3.19

$$G_c(s)G(s) = \frac{(K_d K_t) s^2 + (K_p K_t) s + K_t K_i}{L_a J_m s^3 + (R_a J_m + L_a c) s^2 + (R_a c + K_b K_t) s} \quad (3.19)$$

และฟังก์ชันถ่ายโอนของพลาंतर่วมกับตัวควบคุมพีไอดีแบบวงปิด ดังสมการที่ 3.20

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K_i K_d s^2 + K_i K_p s + K_i K_i}{L_a J_m s^3 + (R_a J_m + L_a c + K_t K_d) s^2 + (R_a c + K_b K_t + K_t K_p) s + K_t K_i} \quad (3.20)$$

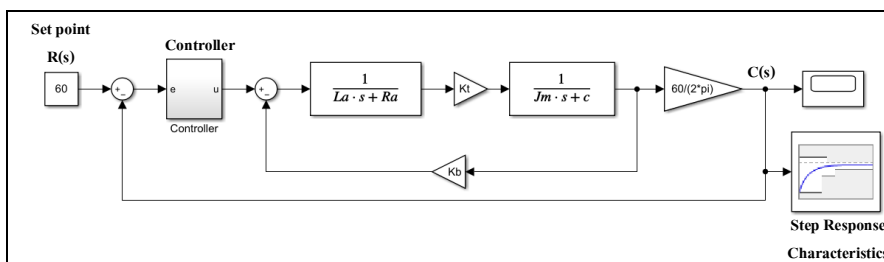
จากฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงเปิดของระบบควบคุมแบบฟีดแบ็คสมการที่ 3.14 และฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมแบบฟีดแบ็คสมการที่ 3.21 จากฟังก์ชันถ่ายโอนแบบวงเปิดของระบบควบคุมแบบฟีดแบ็คสมการที่ 3.19 และฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบควบคุมแบบฟีดแบ็คสมการที่ 3.22 เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากตารางที่ 3.1 จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบดังต่อไปนี้

$$G_C(s)G(s) = \frac{9.536 \times 10^{-3} (K_p s + K_i)}{(3.03 \times 10^{-2}) s^3 + (48.3493) s^2 + (19.1844) s} \quad (3.21)$$

$$G_C(s)G(s) = \frac{9.536 \times 10^{-3} (K_d s^2 + K_p s + K_i)}{(3.03 \times 10^{-2}) s^3 + (48.3493) s^2 + (19.1844) s} \quad (3.22)$$

จากสมการที่ 3.21 และสมการที่ 3.22 จะเห็นได้ว่าการเพิ่มตัวควบคุมแบบฟีดแบ็คและฟีดแบ็คเข้าไปในระบบ เมื่อทำการพิจารณาชนิดของระบบ (System-type number) พบว่าระบบควบคุมเป็นแบบ 1 หรือ Type 1 ถ้าสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วยและสัญญาณป้อนกลับมีค่าฟังก์ชันเป็นหนึ่ง (Unity feedback) จะทำให้ค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (Steady state error) มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงอาจจะเลือกใช้ตัวควบคุมแบบฟีดแบ็คหรือฟีดแบ็คได้อย่างใดอย่างหนึ่ง

การสร้างระบบควบคุมในคอมพิวเตอร์เพื่อใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมฟีดแบ็คและฟีดแบ็ค โดยโปรแกรม MATLAB – Simulink ในส่วนของ Response optimization แผนภาพบล็อกไดอะแกรมการค่าเหมาะสมที่สุดแสดงดังรูปที่ 3.34 (การใช้งานฟังก์ชัน Response optimization แสดงในภาคผนวก ง.) โดยการกำหนดลักษณะการตอบสนองในสภาวะชั่วคราวและสภาวะอยู่ตัว ภายใต้เงื่อนไข การพุ่งเกิน (Overshoot) ช่วงเวลาขึ้น (Rise time) เวลาเข้าที่ (Setting time) และค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (Steady state error) ดังตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.34 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วย Response Optimization

ตารางที่ 3.2 เงื่อนไขสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตัวควบคุม

เงื่อนไข	ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI)			ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID)	
	NI	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2
Overshoot (%)	2.58	2	2	2	2
Rise time (sec)	0.64	10	20	10	20
Setting time (sec)	1.63	20	30	20	30
Steady state error (%)	1.4	1	1	1	1

จากเงื่อนไขดังกล่าวในโปรแกรม MATLAB – Simulink ในส่วนของ Parameter estimation สามารถค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมพีไอและตัวควบคุมแบบพีไอดี แสดงดังตารางที่ 3.3 จากนำอัตราขยายของตัวควบคุมทั้งสองแบบไปทดสอบกับระบบจริงเพื่อวิเคราะห์ผลการตอบสนองว่าเป็นไปตามเงื่อนไขที่ได้กำหนดไว้หรือไม่ ซึ่งผลการทดสอบจะถูกแบ่งออกเป็น 2 การทดลอง คือ การควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ และการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี โดยแต่ละการทดลองจะถูกแบ่งออกเป็นความเร็วรอบการหมุน 60, 90 และ 120 รอบต่อนาที

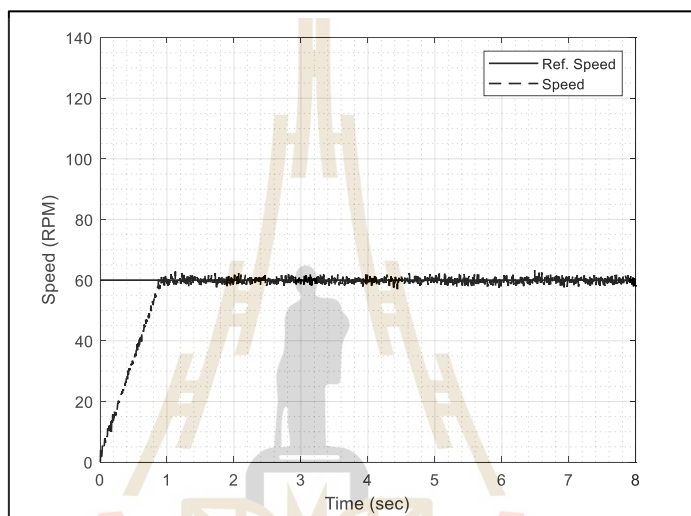
ตารางที่ 3.3 ขอบเขตสำหรับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับตัวควบคุม

ค่าตัวแปร	ตัวควบคุมแบบพีไอ (PI)			ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID)	
	ชุด NI	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2
ตัวควบคุม P	0.1001	0.1177	0.3440	0.1178	0.0142
ตัวควบคุม I	0.3724	0.0601	0.2353	0.0603	0.2084
ตัวควบคุม D	-	-	-	0.0007	0.0001

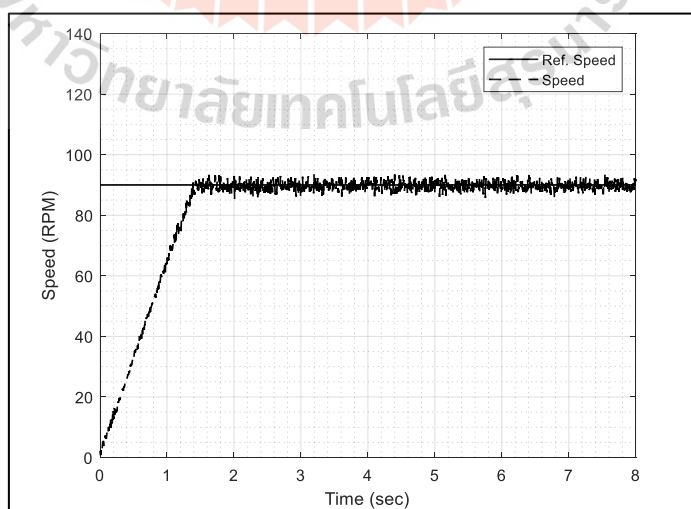


**การทดลองที่ 3.1** ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการขับเคลื่อนแท่งทรงกระบอกที่บรรจุคลวดเหนี่ยวนำด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ

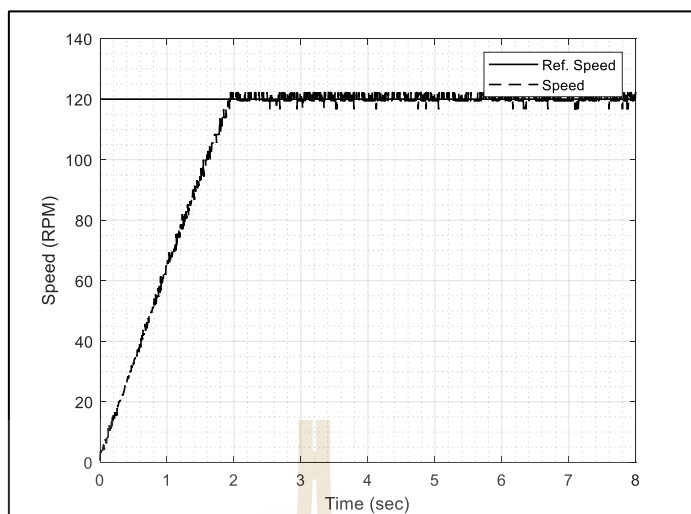
**การทดลองที่ 3.1.1** ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการขับเคลื่อนแท่งทรงกระบอกที่บรรจุคลวดเหนี่ยวนำด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ชุด NI  $K_p = 0.1001$  และ  $K_i = 0.3724$  ที่ความเร็วในการทดสอบ คือ 60, 90 และ 120 รอบต่อนาที ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 3.35 - 3.37 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.35 ผลการตอบสนองด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ชุด NI ที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที



รูปที่ 3.36 ผลการตอบสนองด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ชุด NI ที่ความเร็ว 90 รอบต่อนาที



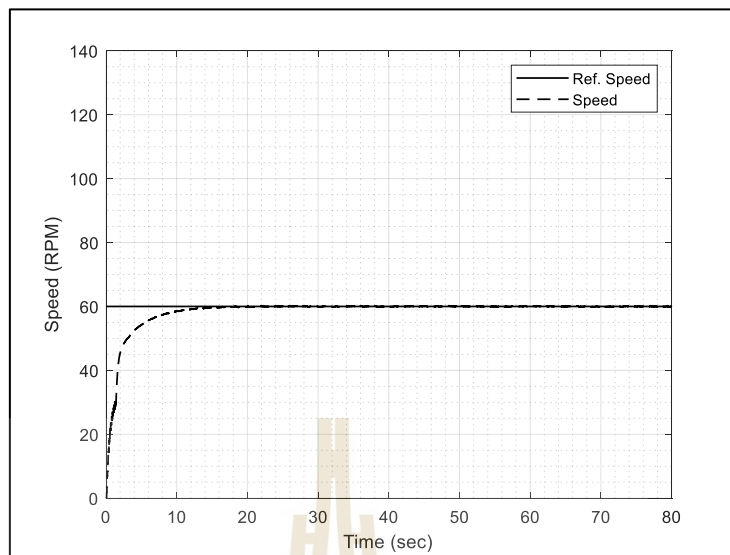
รูปที่ 3.37 ผลการตอบสนองด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ชุด NI ที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที

ผลการทดสอบระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับขับเคลื่อนแท่งทรงกระบอกด้วยตัวควบคุมแบบพีไอแบบดั้งเดิม ที่สถานะอยู่ตัวภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด พบว่า ตัวควบคุมแบบพีไอมีค่าความผิดพลาดสูงสุดที่  $\pm 5.184$  เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที ด้วยตัวควบคุมชุดที่ 2 และค่าความผิดพลาดน้อยสุดที่  $\pm 2.315$  เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที ด้วยตัวควบคุมชุดที่ 1 ค่าความผิดพลาดของแต่ละความเร็วรอบแสดงดังตารางที่ 3.4

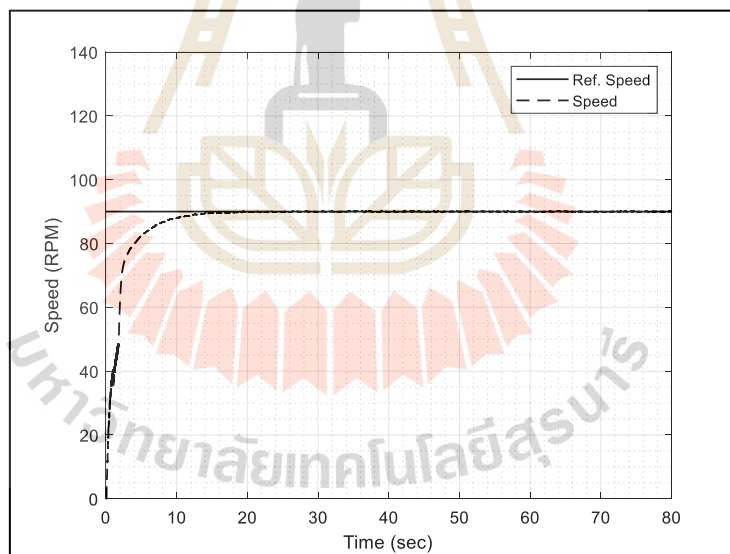
ตารางที่ 3.4 ผลการตอบสนองความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ชุด NI

	ตัวควบคุมแบบพีไอ ชุด NI		
	Min value	Max value	% Error
Speed 60 RPM	56.968	63.189	$\pm 5.184$
Speed 90 RPM	85.313	93.465	$\pm 4.529$
Speed 120 RPM	116.667	122.222	$\pm 2.315$

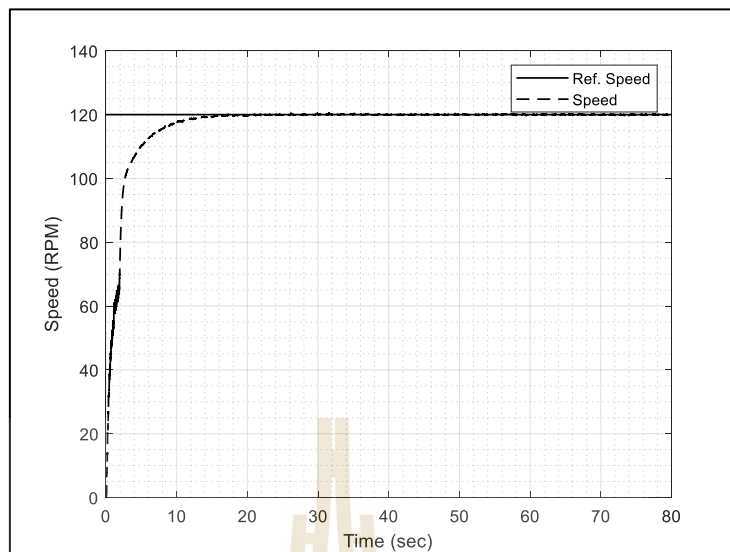
**การทดลองที่ 3.1.2** ระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการขับเคลื่อนแท่งทรงกระบอกที่บรรจุคลวดเหนี่ยวนำด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ชุดที่ 1  $K_p = 0.1177$  และ  $K_i = 0.0601$  ที่ความเร็วในการทดสอบ คือ 60, 90 และ 120 รอบต่อนาที ตามลำดับแสดงดังรูป 3.38 - 3.40 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.38 ผลการตอบสนองด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ (จุดที่ 1) ที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที

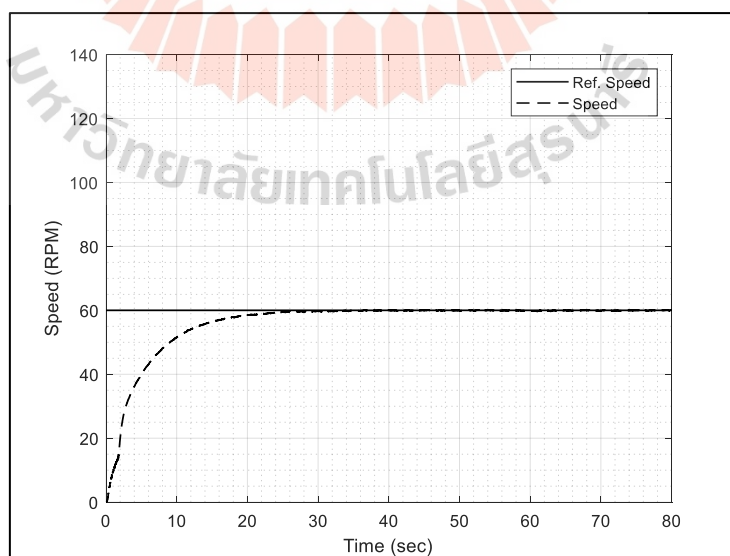


รูปที่ 3.39 ผลการตอบสนองด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ (จุดที่ 1) ที่ความเร็ว 90 รอบต่อนาที

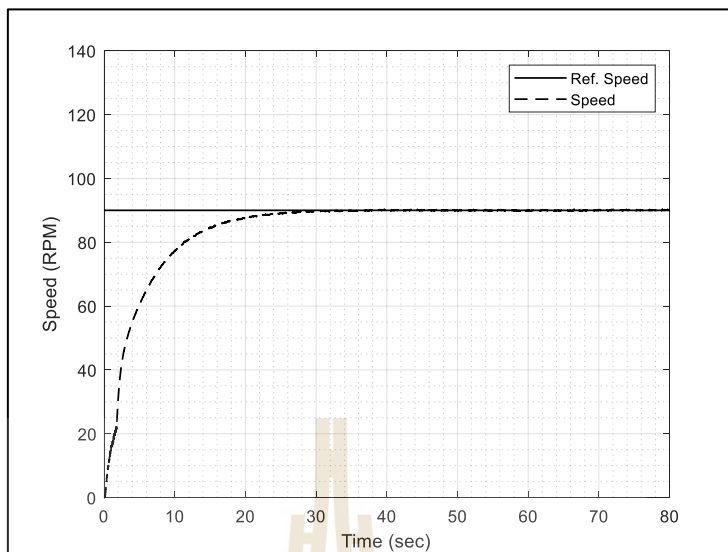


รูปที่ 3.40 ผลการตอบสนองด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ (ชุดที่ 1) ที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที

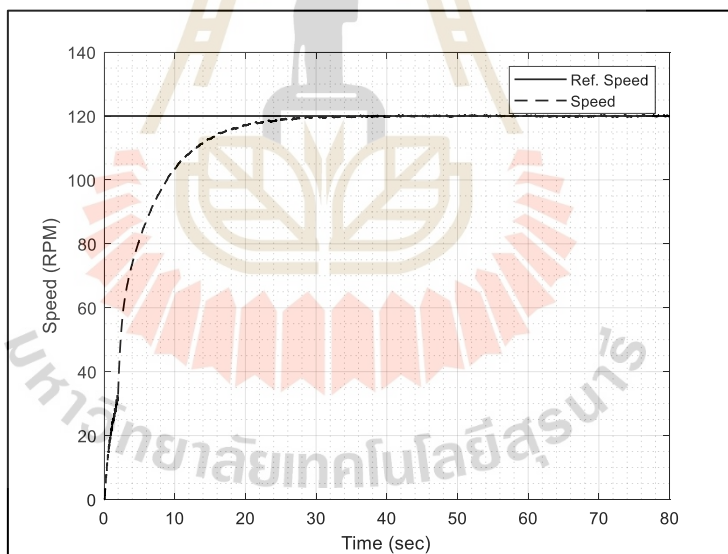
**การทดลองที่ 3.1.3** ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการขับเคลื่อนแท่งทรงกระบอกที่บรรจุขดลวดเหนี่ยวนำด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ชุดที่ 2  $K_p = 0.0344$  และ  $K_i = 0.0235$  ที่ความเร็วในการทดสอบ คือ 60, 90 และ 120 รอบต่อนาที ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 3.41 – 3.43 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.41 ผลการตอบสนองด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ (ชุดที่ 2) ที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที



รูปที่ 3.42 ผลการตอบสนองด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ (ชุดที่ 2) ที่ความเร็ว 90 รอบต่อนาที



รูปที่ 3.43 ผลการตอบสนองด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ (ชุดที่ 2) ที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที

ผลการทดสอบระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับขับเคลื่อนแท่งทรงกระบอกด้วยตัวควบคุมแบบพีไอชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ที่สถานะอยู่ตัวภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด พบว่า ตัวควบคุมแบบพีไอมีค่าความผิดพลาดสูงสุดที่  $\pm 0.539$  เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที ด้วยตัวควบคุมชุดที่ 2 และค่าความผิดพลาดน้อยสุดที่  $\pm 0.352$  เปอร์เซ็นต์

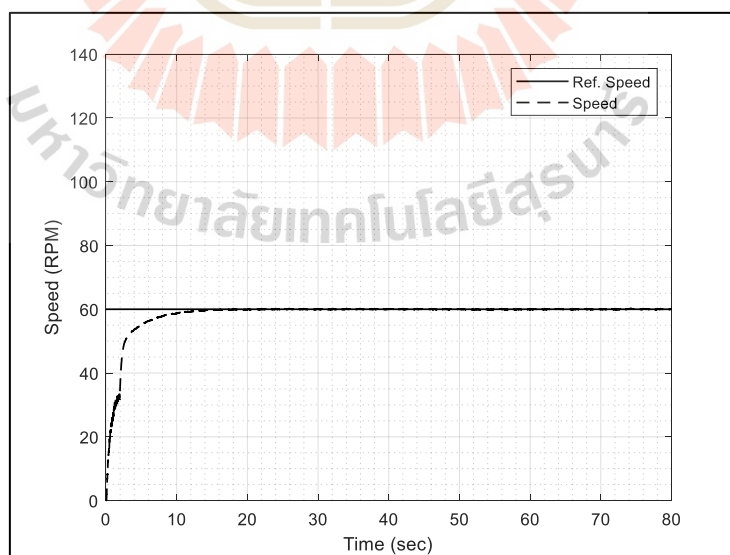
ที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที ด้วยตัวควบคุมชนิดที่ 1 ค่าความผิดพลาดของแต่ละความเร็วรอบแสดงดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ผลการตอบสนองความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ

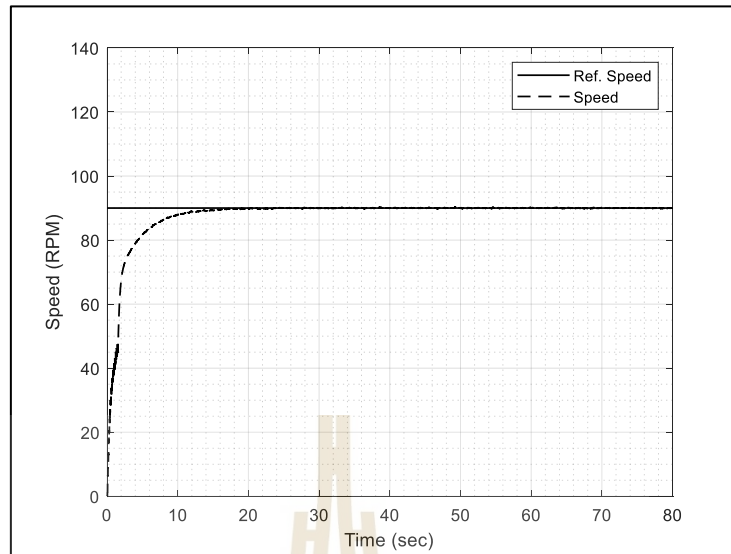
Motor Speed	PI Controller (1)			PI Controller (2)		
	Min value	Max value	% Error	Min value	Max value	% Error
60 RPM	59.786	60.215	$\pm 0.388$	59.588	60.234	$\pm 0.539$
90 RPM	89.700	90.371	$\pm 0.373$	89.514	90.354	$\pm 0.467$
120 RPM	119.642	120.485	$\pm 0.352$	119.399	120.474	$\pm 0.448$

**การทดลองที่ 3.2** ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการขับเคลื่อนแท่งทรงกระบอกที่บรรจุคลวดเหนี่ยวนำด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี

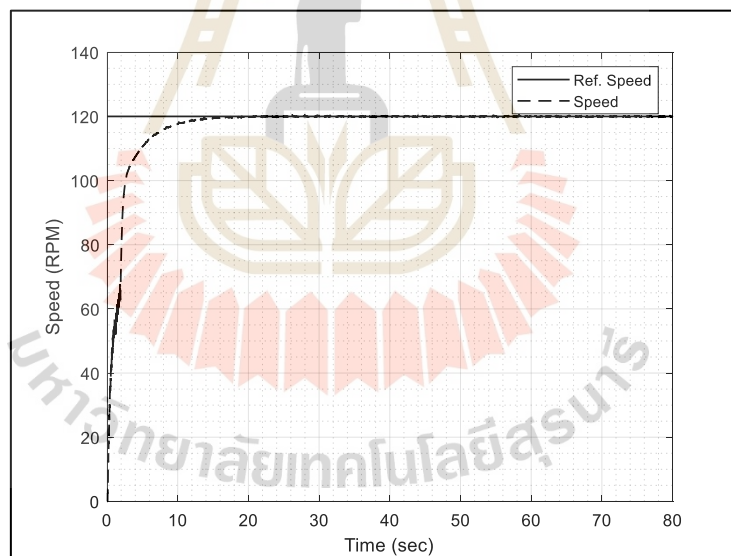
**การทดลองที่ 3.2.1** ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการขับเคลื่อนแท่งทรงกระบอกที่บรรจุคลวดเหนี่ยวนำด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี ชนิดที่ 1  $K_p = 0.1178$ ,  $K_i = 0.0603$  และ  $K_d = 0.0007$  ที่ความเร็วในการทดสอบ คือ 60, 90 และ 120 รอบต่อ นาที ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 3.44 - 3.46 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.44 ผลการตอบสนองด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี (ชนิดที่ 1) ที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที

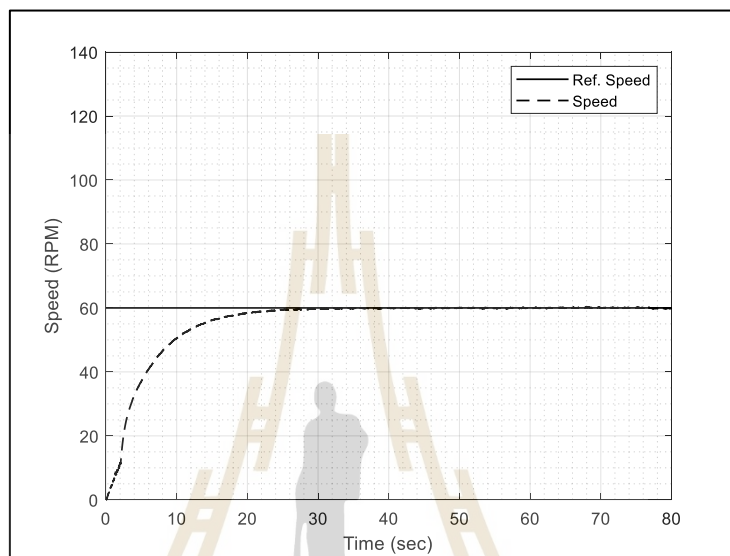


รูปที่ 3.45 ผลการตอบสนองด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี (ชุดที่ 1) ที่ความเร็ว 90 รอบต่อนาที

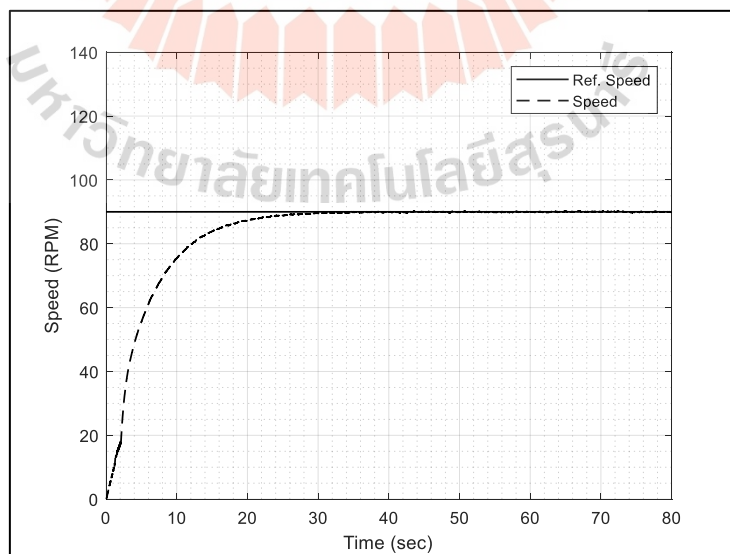


รูปที่ 3.46 ผลการตอบสนองด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี (ชุดที่ 1) ที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที

**การทดลองที่ 3.2.2** ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับการขับเคลื่อนแท่งทรงกระบอกที่บรรจุคลวดเหนียวนำด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี ชุดที่ 1  $K_p = 0.0142$ ,  $K_i = 0.2084$  และ  $K_d = 0.00017$  ที่ความเร็วในการทดสอบ คือ 60, 90 และ 120 รอบต่อนาที ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 3.47 - 3.49 ดังต่อไปนี้

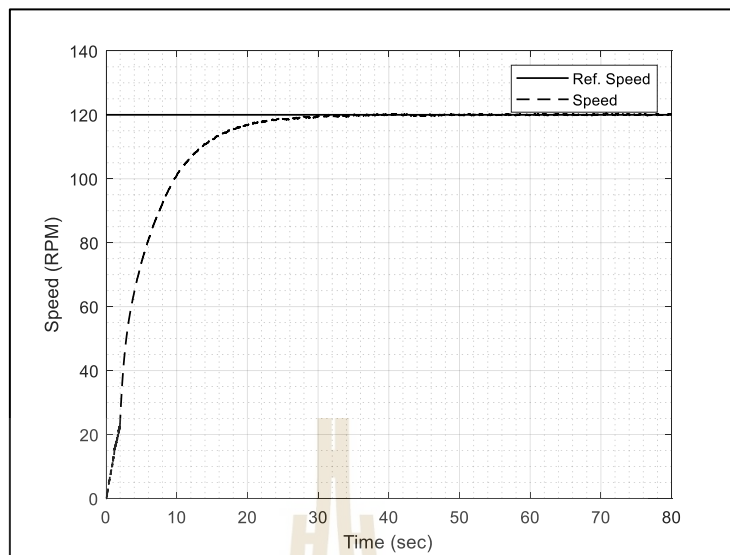


รูปที่ 3.47 ผลการตอบสนองด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี (ชุดที่ 2) ที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที



รูปที่ 3.48 ผลการตอบสนองด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี (ชุดที่ 2) ที่ความเร็ว 90 รอบต่อนาที





รูปที่ 3.49 ผลการตอบสนองด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดี (ชุดที่ 2) ที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที

ผลการทดสอบระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสำหรับขับเคลื่อนแท่งทรงกระบอกด้วยตัวควบคุมแบบพีไอดีชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ที่สถานะอยู่ตัวภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด พบว่า ตัวควบคุมแบบพีไอดีมีค่าความผิดพลาดสูงสุดที่  $\pm 0.598$  เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที ด้วยตัวควบคุมชุดที่ 2 และค่าความผิดพลาดน้อยสุดที่  $\pm 0.329$  เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที ด้วยตัวควบคุมชุดที่ 1 ค่าความผิดพลาดของแต่ละความเร็วรอบแสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ผลการตอบสนองความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

Motor Speed	PID Controller (1)			PID Controller (2)		
	Min value	Max value	% Error	Min value	Max value	% Error
60 RPM	59.765	60.252	$\pm 0.406$	59.584	60.303	$\pm 0.598$
90 RPM	89.700	90.422	$\pm 0.401$	89.448	90.340	$\pm 0.496$
120 RPM	119.671	120.460	$\pm 0.329$	119.369	120.554	$\pm 0.494$

### 3.6 สรุป

จากการออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กด้วยเทคนิคคลาดหมุน ซึ่งได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ในส่วนของโครงสร้างและระบบควบคุม ซึ่งมีข้อสรุปดังต่อไปนี้



## บทที่ 4

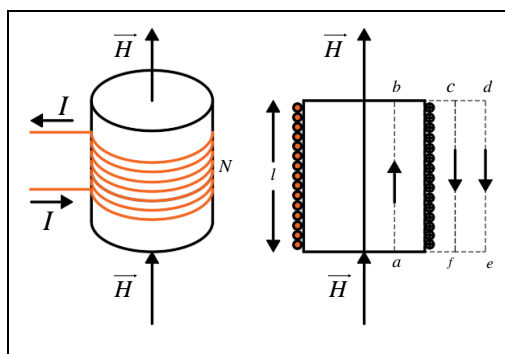
### การจำลองผลการเกิดสนามแม่เหล็ก

#### 4.1 บทนำ

ในบทนี้จะทำการคำนวณและจำลองผลการเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้ว (Dipole magnet) และแม่เหล็กไฟฟ้าสี่ขั้ว (Quadrupole magnet) บนระบบพิกัดคาร์ทีเซียนในปริภูมิ 2 มิติ (ระนาบ xy) โดยพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB ในส่วนของ PDE Tool บนพื้นฐานของแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก โดยรับค่าอินพุตที่เป็นความเข้มสนามแม่เหล็กบริเวณขอบด้านในของแม่เหล็กทั้ง 2 ชนิด เพื่อศึกษาขนาดของสนามแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนช่องว่างโพรงแม่เหล็ก และจำลองการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Electromotive force) ที่เกิดจากขดลวดเหนี่ยวนำหมุนตัดผ่านสนามแม่เหล็ก เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว (Fast Fourier transform, FFT) ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงค่าพารามิเตอร์แม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้ว แม่เหล็กไฟฟ้าสี่ขั้ว การประยุกต์ใช้โปรแกรม MATLAB สำหรับจำลองการเกิดสนามแม่เหล็ก และการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในขดลวดหมุน

#### 4.2 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็ก

การจำลองการเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วและแม่เหล็กไฟฟ้าสี่ขั้ว จะพิจารณาจากความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการพันขดลวดรอบแกนเหล็กที่เรียกว่า “คอยล์” โดยใช้กฎของแอมป์แปร์ ดังรูปที่ 4.1 และค่าพารามิเตอร์ของแม่เหล็กสองขั้วและสี่ขั้ว แสดงดังตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 คอยล์แม่เหล็กไฟฟ้า

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ของแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วและแม่เหล็กไฟฟ้าสี่ขั้ว

พารามิเตอร์	แม่เหล็กสองขั้ว	แม่เหล็กสี่ขั้ว
กระแสไฟฟ้า (A)	24.6	7.46
ขนาดสนามแม่เหล็ก	0.043 (T)	7 (T/m)
ความต้านทานขดลวด ( $\Omega$ )	0.114	1.31
จำนวนรอบขดลวด	216	266
ความยาวแกน (m)	0.24	0.073
จำนวนรอบโพล	2	4

หมายเหตุ แหล่งที่มา ข้อมูลแม่เหล็กไฟฟ้าจากสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน องค์การมหาชน

จากรูปที่ 4.1 พิจารณาที่ภาพตัดขวางของโซลินอยด์และประยุกต์ใช้กฎของแอมป์แปร์ในการหาค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการให้ค่ากระแสไฟฟ้า ( $I$ ) แบบคงที่ ในที่นี้ค่าความเข้มสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในคอยล์จะมีทิศทางเดียวกันกับแกนกลางเท่านั้น  $\vec{H} = H_y \vec{a}_y$  ในกรณีนี้จะทำให้ โดยที่  $\vec{H}_r$  และ  $\vec{H}_\phi = 0$  นอกจากนั้น  $\vec{H}$  ที่อยู่นอกโซลินอยด์จะมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังสมการที่ 4.1

$$\oint_{abcd} \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_a^b + \int_b^c + \int_c^d + \int_d^a \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad (4.1)$$

และ  $\vec{H}$  ที่อยู่ด้านนอกโซลินอยด์มีค่าเท่ากับศูนย์ทำให้การอินทิเกรตจาก  $c \rightarrow d$  มีค่าเท่ากับศูนย์ จากรูปที่ 4.1 โซลินอยด์มีความยาว  $l$  และมีจำนวนรอบ  $N$  จะได้ดังสมการที่ 4.2

$$\int_a^b \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{enclosed} = NI \quad (4.2)$$

และสนามแม่เหล็กจะเกิดขึ้นจะมีค่าคงที่ตลอดพื้นที่หน้าตัดของโซลินอยด์ดังสมการที่ 4.3

$$H = \frac{NI}{l} \quad (4.3)$$

เมื่อ	$I$	คือ กระแสไฟฟ้า (A)
	$l$	คือ ความยาวขดลวดตลอดแนวแกน (m)
	$N$	คือ จำนวนรอบของขดลวด

จากสมการที่ 4.3 สามารถคำนวณหาความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเข้มสนามแม่เหล็ก ดังสมการที่ 4.4

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (4.4)$$

เมื่อ  $\mu = \mu_0 \mu_r$  คือสภาพซึมผ่านได้ (Permeability) ของวัสดุ สำหรับ  $\mu_0$  คือ สภาพซึมผ่านได้ในอากาศ (Permeability of free space) มีค่าเท่ากับ  $\mu_0 = 4 \times 10^{-7} [H / m]$  และ  $\mu_r$  คือ สภาพซึมผ่านได้สัมพัทธ์ (Relative permeability) เป็นค่าคงที่ในการบอกคุณสมบัติว่าวัสดุนั้นยอมให้สนามแม่เหล็กซึมผ่านได้มากกว่าอากาศกี่เท่า และขั้วแม่เหล็กไม่สามารถแยกออกจากกันได้เหมือนประจุไฟฟ้า ทำให้ฟลักซ์แม่เหล็กที่เกิดขึ้นไม่มีจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุด จึงส่งผลให้สมการที่ 4.5 มีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนี้

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4.5)$$

จากสมการที่ 4.5 คือ สมการของแมกซ์เวลล์ ซึ่งสนามแม่เหล็กแม่เหล็กจะหาได้จากการเคิร์ลของศักย์เชิงเวกเตอร์แม่เหล็ก (Vector magnetic potential,  $\vec{A}$ ) โดยที่  $\vec{A}$  คือสนามเวกเตอร์ใด ๆ  $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$  แต่ในกรณีสนามแม่เหล็กสถิต จะกำหนดให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าเท่ากับศูนย์ ( $\vec{J} = 0$ ) ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์สเกลาร์แม่เหล็ก (Magnetic scalar potential,  $V_m$ ) กับความเข้มสนามแม่เหล็กสามารถอธิบายได้ดังสมการที่ 4.6

$$\vec{H} = -\nabla V_m \quad (4.6)$$

และจากสมการที่ 4.6 แทนลงในสมการที่ 4.4 จะได้

$$\vec{B} = \mu(-\nabla V_m) \quad (4.7)$$

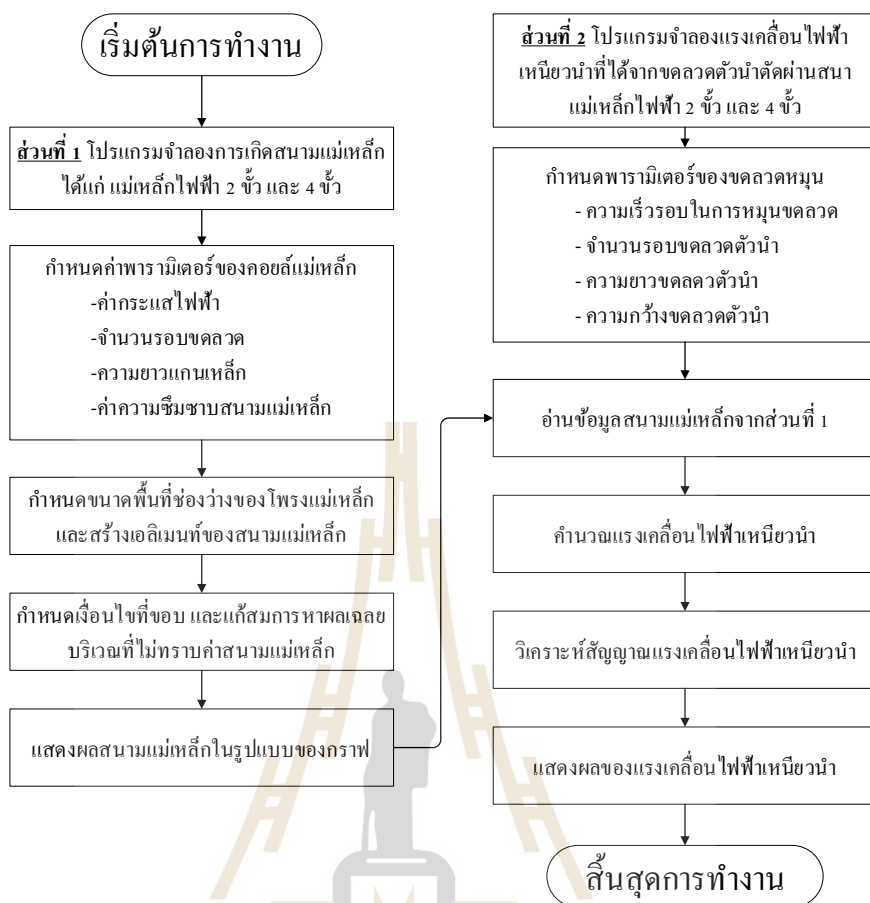
และจากสมการที่ 4.7 แทนลงในสมการที่ 4.5 จะได้

$$\nabla \cdot (\nabla V_m) = 0 \quad (4.8)$$

จากเงื่อนไขในสมการที่ 4.8 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของสนามแม่เหล็กจะพิจารณาแบบ 2 มิติ บนระนาบ  $xy$  ในพิกัดคาร์ทีเซียน ซึ่งเป็นสนามแม่เหล็กแบบไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จึงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.9

$$\nabla^2 V_m = \frac{\partial^2 V_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_m}{\partial y^2} = 0 \quad (4.9)$$

สำหรับขั้นตอนการทำงานในบทที่ 4 ซึ่งประกอบไปด้วย การจำลองการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Skew dipole magnet, Normal dipole magnet, Skew quadrupole magnet และ Normal quadrupole magnet ) การจำลองการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อขดลวดตัวนำหมุนตัดผ่านสนามแม่เหล็กแต่ละชนิด แสดงด้วยแผนภูมิรูปภาพ ดังรูปที่ 4.2



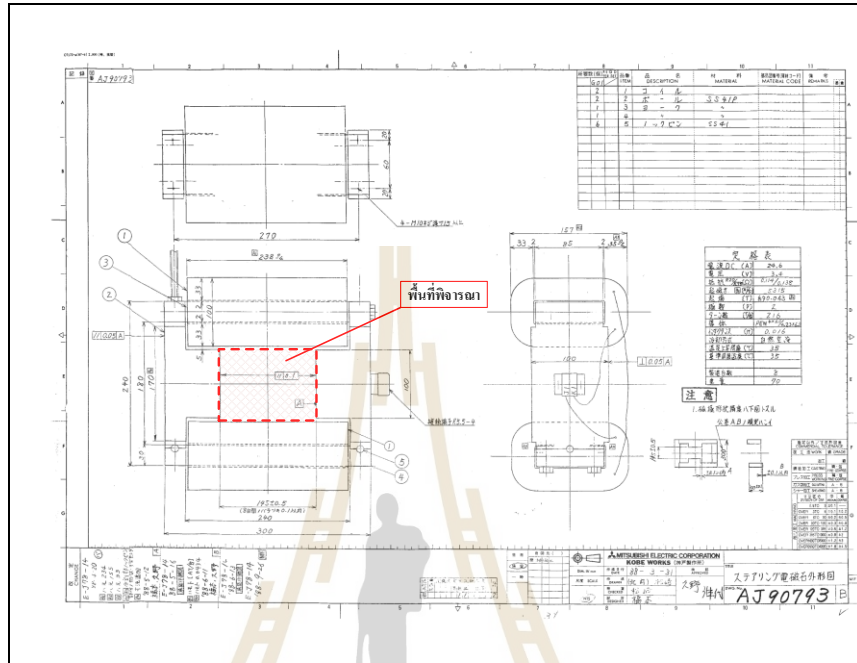
รูปที่ 4.2 ขั้นตอนการทำงานของ โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็กและจำลองผลแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำร่วมกับการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว

#### 4.2.1 โปรแกรมจำลองผลสนามแม่เหล็ก

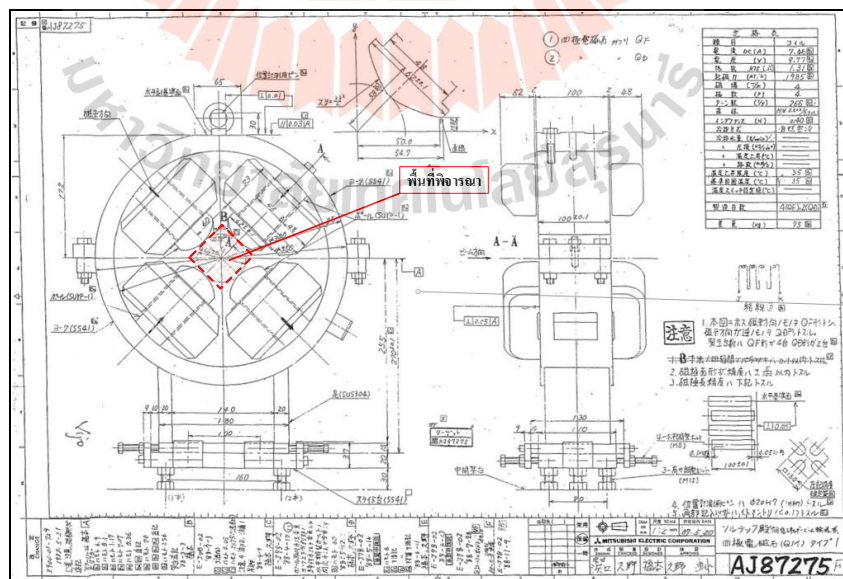
โปรแกรมจำลองผลการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก เกิดจากการประดิษฐ์ไฟไนท์เอลิเมนต์บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการแก้ปัญหา โดยการพัฒนาโปรแกรมร่วมกับการใช้ฟังก์ชันสำเร็จรูปของโปรแกรม MATLAB ซึ่งในการเขียนโปรแกรมจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 การสร้างรูปร่างของแม่เหล็กสองขั้วและสี่ขั้วโดยฟังก์ชัน PDE Tool ส่วนที่ 2 การคำนวณผลการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก ซึ่งจะอธิบายถึงรายละเอียดแต่ละขั้นตอนของโปรแกรมดังต่อไปนี้

**ขั้นตอนที่ 1** จะเป็นการกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น ได้แก่ ค่ากระแสไฟฟ้า จำนวนรอบของขดลวด ความยาวแกนเหล็ก ค่าความซึมซาบสนามแม่เหล็ก และการสร้างลักษณะทางกายภาพของแม่เหล็กที่จะนำมาใช้งาน เนื่องด้วยแม่เหล็กแต่ละชนิดมีความซับซ้อนในการออกแบบทั้งขนาดและรูปทรง เพื่อความง่ายในการกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ จะใช้ฟังก์ชันของโปรแกรม MATLAB

ในส่วนของ PDE Tool แบบจำลองของแม่เหล็กนั้นขึ้นมา แม่เหล็กไฟฟ้าที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังรูปที่ 4.3 และดังรูปที่ 4.4



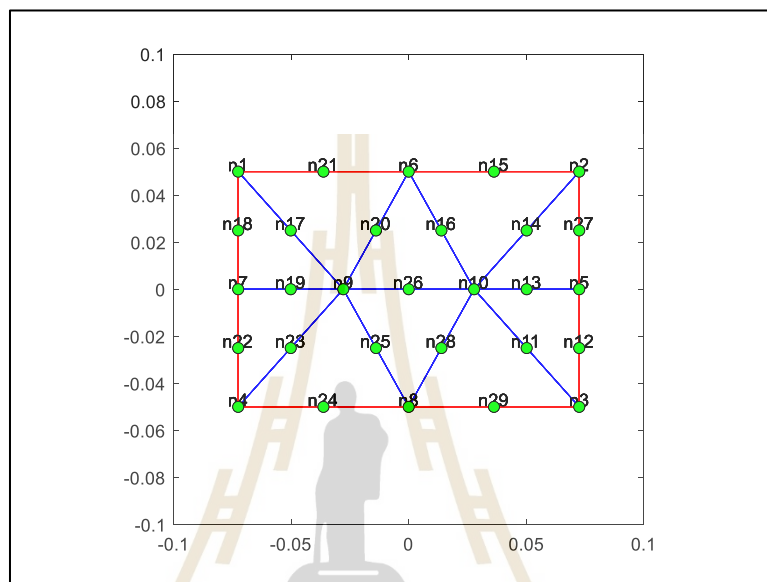
รูปที่ 4.3 ภาพมุมมอง 2 มิติ ของแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้ว (Dipole magnet)



รูปที่ 4.4 ภาพมุมมอง 2 มิติ ของแม่เหล็กไฟฟ้าสี่ขั้ว (Quadrupole magnet)



**ขั้นตอนที่ 2** อ่านข้อมูลของปัญหา หลังจากที่ได้กำหนดบริเวณที่ต้องการพิจารณา การกระจายตัวของสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 เช่น จำนวนจุดต่อ จำนวนเอลิเมนต์ และหมายเลขจุดต่อ ในส่วนนี้จะนำข้อมูลที่ได้จากฟังก์ชัน PDE Tool มาสร้างกริดด้วยคำสั่ง Generate Mesh โดยการกำหนดลักษณะของเอลิเมนต์ตามขนาดที่ต้องการ ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การสร้างเอลิเมนต์ด้วยฟังก์ชัน Generate Mesh

**ขั้นตอนที่ 3** คำนวณเอลิเมนต์เพื่อสร้างระบบสมการรวม ในส่วนนี้โปรแกรมจะใช้การคำนวณเอลิเมนต์เมทริกซ์ของสนามแม่เหล็กตามจุดต่อต่างรูปสามเหลี่ยมของทุกเอลิเมนต์ ดังแสดงรูปที่ 4.5 เมทริกซ์เหล่านี้จะถูกคำนวณทีละเอลิเมนต์ เพื่อใช้ในการสร้างระบบสมการรวม

**ขั้นตอนที่ 4** กำหนดเงื่อนไขและขอบเขต หลังจากได้สร้างสมการรวมในส่วนนี้จะกำหนดขอบเขตก่อนทำการแก้สมการด้วยฟังก์ชัน apply Boundary Condition เพื่อกำหนดขอบเขตทั้งสี่ด้านของแม่เหล็กไฟฟ้า โดยงานวิจัยนี้จะกำหนดขอบเขตให้กับบริเวณขั้วแม่เหล็กมีค่าตามกระแสที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก ซึ่งค่าที่ได้มาจากการคำนวณ

**ขั้นตอนที่ 5** แก้ระบบสมการรวมเพื่อหาผลเฉลย หลังจากที่ใช้ฟังก์ชัน apply Boundary Condition แล้ว ระบบสมการรวมที่เกิดขึ้นจะถูกแก้ด้วยฟังก์ชัน solved PDE เพื่อหาผลเฉลยของระบบสมการรวม

**ขั้นตอนที่ 6** พิมพ์ค่าผลเฉลยของศักย์เวกเตอร์แม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก ในขั้นตอนนี้โปรแกรมจะแสดงผลมาในรูปแบบของกราฟ ซึ่งจะแสดงค่าศักย์เวกเตอร์แม่เหล็กและ

ขนาดของสนามแม่เหล็ก สิ้นสุดการทำงานของโปรแกรมในส่วนของการจำลองผลการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

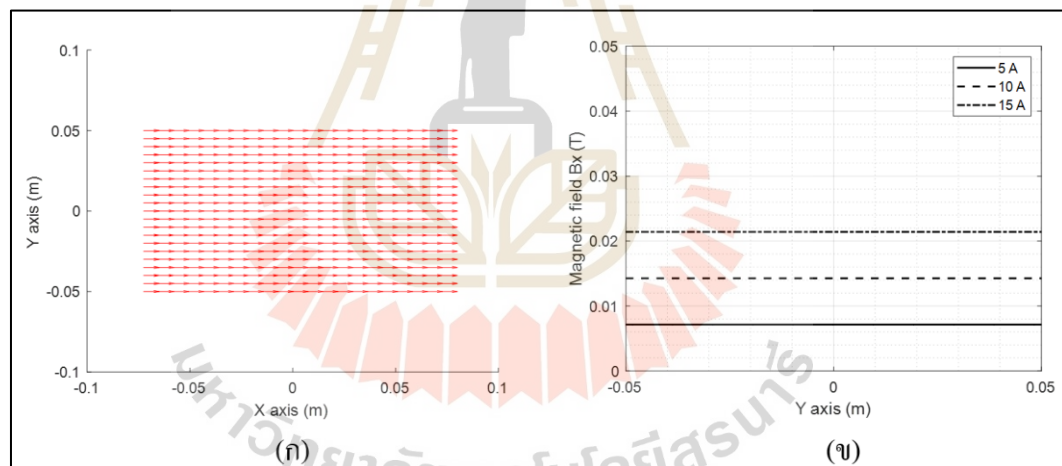
#### 4.2.2 ผลการจำลองการกระจายตัวของสนามแม่เหล็ก

ในการจำลองการกระจายตัวของสนามแม่เหล็กจะแบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ การจำลองสนามแม่เหล็กแบบที่ 1 แม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้ว ประกอบไปด้วย Skew dipole magnet และ Normal dipole magnet และการจำลองสนามแม่เหล็กแบบที่ 2 แม่เหล็กไฟฟ้าสี่ขั้ว ประกอบไปด้วย Skew quadrupole magnet และ Normal quadrupole magnet ดังต่อไปนี้

##### การทดลองที่ 4.1 แม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้ว (Dipole magnet)

เป็นการจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบที่ 1 ซึ่งแบ่งการทดลองย่อยออกเป็น 2 การทดลอง ได้แก่

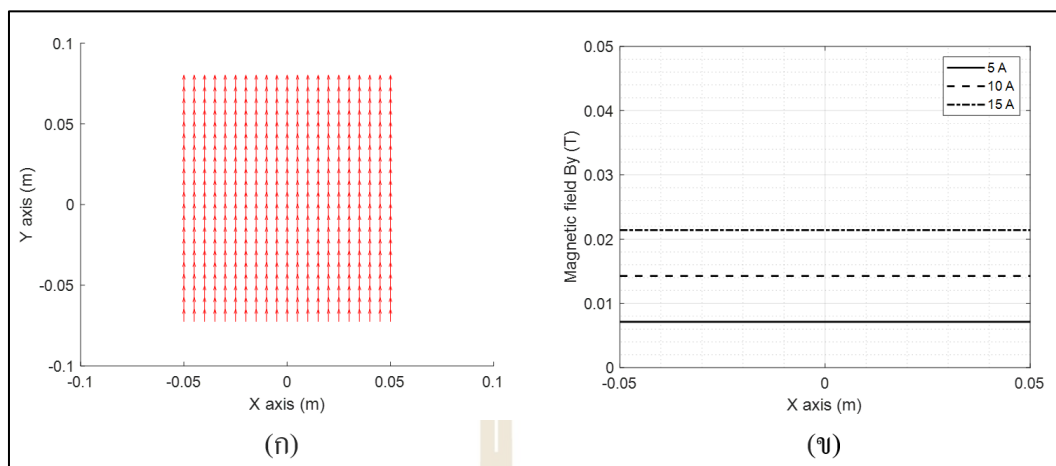
**การทดลองที่ 4.1.1** แม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วแบบ Skew dipole magnet แรงดันที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็กไฟฟ้าประมาณ 2 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็กไฟฟ้า 5, 10 และ 15 แอมป์ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.6 (ก) และรูปที่ 4.6 (ข) ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.6 (ก) สนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วแบบ Skew dipole ( $B_x$ )

(ข) สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ค่ากระแสไฟฟ้า 5, 10 และ 15 แอมป์

**การทดลองที่ 4.1.2** แม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วแบบ Normal dipole magnet แรงดันที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็กไฟฟ้าประมาณ 2 โวลต์ และกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็กไฟฟ้า 5, 10 และ 15 แอมป์ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.7 (ก) และรูปที่ 4.7 (ข) ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.7 (ก) สนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วแบบ Normal dipole ( $B_y$ )

(ข) สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ค่ากระแสไฟฟ้า 5, 10 และ 15 แอมป์

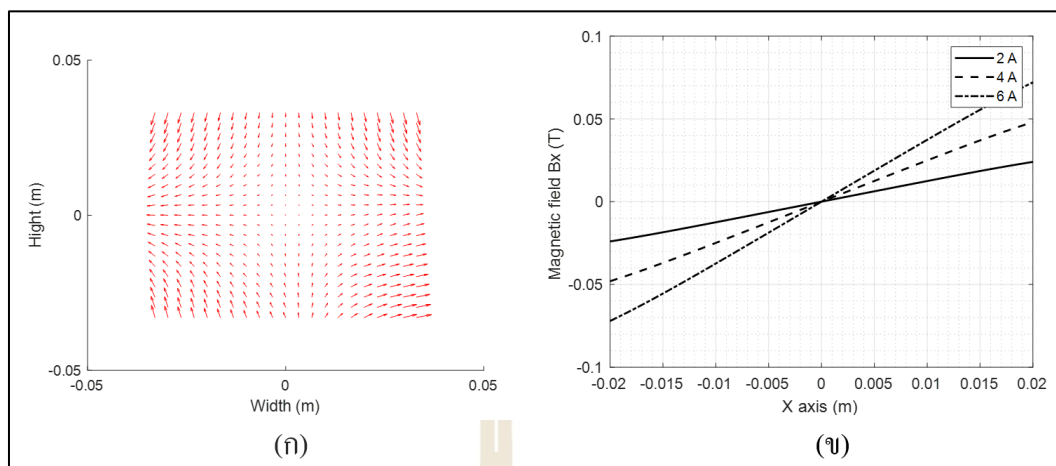
ตารางที่ 4.2 ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสองขั้วที่ค่ากระแสไฟฟ้าต่าง ๆ

	กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้คอลลัมน์แม่เหล็กสองขั้ว		
	กระแสไฟฟ้า 5 แอมป์	กระแสไฟฟ้า 10 แอมป์	กระแสไฟฟ้า 15 แอมป์
Skew dipole (Tesla)	0.0071	0.0143	0.0214
Normal dipole (Tesla)	0.0071	0.0143	0.0214

#### การทดลองที่ 4.2 แม่เหล็กไฟฟ้าสี่ขั้ว (Quadrupole magnet)

เป็นการจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบที่ 2 ซึ่งแบ่งการทดลองย่อยออกเป็น 2 การทดลอง ได้แก่

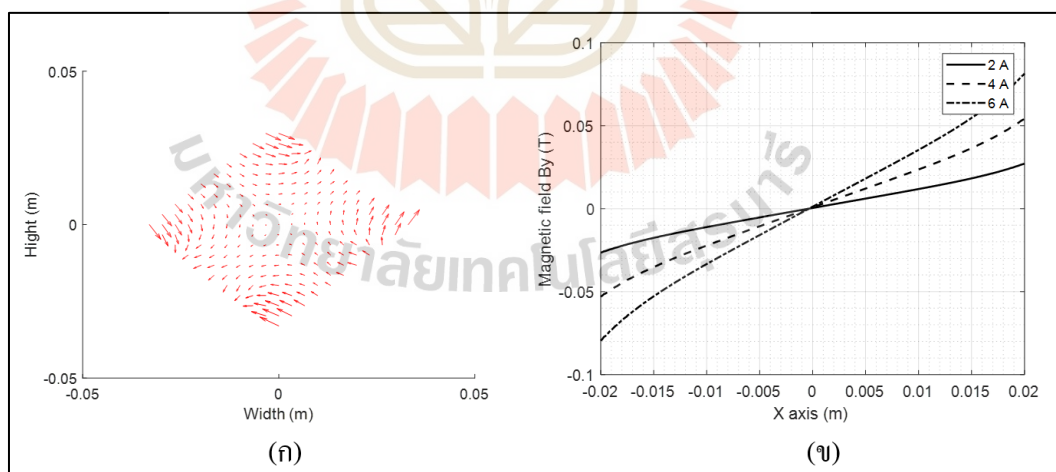
การทดลองที่ 4.2.1 แม่เหล็กไฟฟ้าสี่ขั้วแบบ Skew quadrupole magnet กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอลลัมน์แม่เหล็กไฟฟ้า 2, 4 และ 6 แอมป์ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.8 (ก) และรูปที่ 4.8 (ข) ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.8 (ก) สนามแม่เหล็กไฟฟ้าสี่ขั้วแบบ Skew quadrupole magnet

(ข) สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ค่ากระแสไฟฟ้า 2, 4 และ 6 แอมป์

การทดลองที่ 4.2.2 แม่เหล็กไฟฟ้าสี่ขั้วแบบ Normal quadrupole magnet ที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็กไฟฟ้า 2, 4 และ 6 แอมป์ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.9 (ก) และรูปที่ 4.9 (ข) ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.9 (ก) สนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วแบบ Normal quadrupole magnet

(ข) สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ค่ากระแสไฟฟ้า 2, 4 และ 6 แอมป์

ตารางที่ 4.3 ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กสี่ขั้วที่ค่ากระแสไฟฟ้าต่าง ๆ

	กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้คอยล์แม่เหล็กสี่ขั้ว		
	กระแสไฟฟ้า 2 แอมป์	กระแสไฟฟ้า 4 แอมป์	กระแสไฟฟ้า 6 แอมป์
Skew quadrupole (T/m)	1.2245	2.4489	3.6734
Normal quadrupole (T/m)	1.2245	2.4490	3.6735

จากการทดลองที่ 4.1 ในส่วนของการจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วแบบ Skew dipole magnet และ Normal dipole magnet และในการทดลองที่ 4.2 การจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสี่ขั้วแบบ Skew quadrupole magnet และ Normal quadrupole magnet พบว่า กระแสไฟฟ้ามีผลโดยตรงต่อค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก ดังสมการที่ 4.3 เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้คอยล์แม่เหล็กมีค่าสูงขึ้นค่าความเข้มสนามแม่เหล็กจะสูงขึ้นตามลำดับ และมีค่าสูงที่สุดที่ 15 แอมป์ สำหรับของแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้ว และมีค่าสูงที่ 6 แอมป์ สำหรับแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสี่ขั้ว

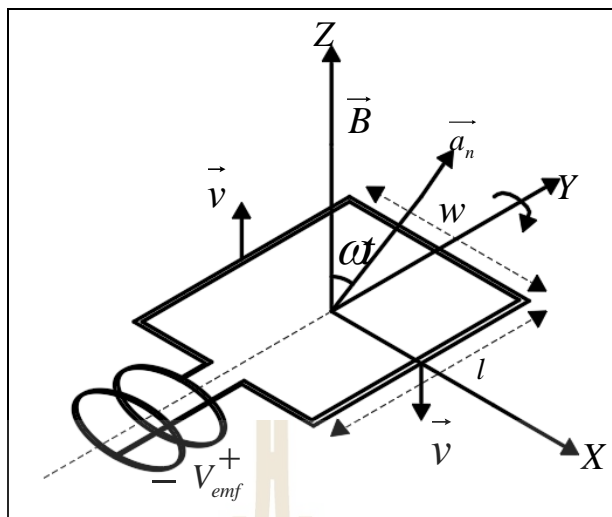
### 4.3 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของขดลวดหมุน

การวัดสนามแม่เหล็กด้วยเทคนิคขดลวดหมุน (Rotating coil) จะเป็นการเปลี่ยนจากพลังงานกลจากการหมุนขดลวดให้เป็นพลังงานทางไฟฟ้า โดยอาศัยกฎพื้นฐานการเหนี่ยวนำไฟฟ้าของฟาราเดย์ เพื่อเป็นพื้นฐานของการสร้างเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วและสี่ขั้วดังต่อไปนี้

1. ขดลวดตัวนำเคลื่อนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็ก ( $\vec{B}$ ) คงที่แบบสองขั้ว ดังรูปที่ 4.10 ซึ่งสนามแม่เหล็กมีทิศทาง ( $\vec{a}_z$ ) และให้ขดลวดตัวนำหมุนรอบแกน Y โดยที่ขดลวดตัวนำมีความยาว ( $l$ ) และความกว้าง ( $w$ ) จะสามารถคำนวณแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Electromotive force;  $V_{emf}$ ) ได้ดังสมการที่ 4.10

$$V_{emf, dipole} = \oint_C (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \quad (4.10)$$

จากสมการที่ 4.10 สามารถแยกพิจารณาแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ตกคร่อมขดลวดตัวนำออกเป็น 4 กรณี ได้แก่



รูปที่ 4.10 ขดลวดเหนี่ยวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสองขั้ว

**กรณีที่ 1** พิจารณาจากตำแหน่ง 0 ถึง 1 จะได้ว่า

$$V_{emf,1} = \int_0^l (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \quad (4.11)$$

$$V_{emf,1} = \left[ \left( -\vec{a}_x |\vec{v}| \cos \omega t - \vec{a}_x |\vec{v}| \right) \times B \vec{a}_z \right] \cdot l \vec{a}_y$$

เมื่อ  $\vec{a}_z \times \vec{a}_z = 0$  จะได้

$$V_{emf,1} = \left[ \left( -\vec{a}_x |\vec{v}| \sin \omega t \right) \times B \vec{a}_z \right] \cdot l \vec{a}_y \quad (4.12)$$

$$V_{emf,1} = |\vec{v}| B l \sin \omega t (\vec{a}_y \times \vec{a}_y)$$

$$V_{emf,1} = |\vec{v}| B l \sin \omega t$$

โดยที่ความเร็วเชิงมุมมีค่าเท่ากับ  $\omega = vr$  จะได้

$$V_{emf,1} = \left( \omega \frac{w}{2} \right) Bl \sin \omega t \quad (4.13)$$

**กรณีที่ 2** พิจารณาจากตำแหน่ง 0 ถึง w จะได้

$$V_{emf,2} = \int_0^w (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} = 0 \quad (4.14)$$

สมการที่ 4.14 มีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจาก  $\vec{v} \times \vec{B} = 0$  มีทิศตั้งฉากกับ  $d\vec{l}$

**กรณีที่ 3** พิจารณาจากตำแหน่ง 1 ถึง 0 จะได้

$$V_{emf,3} = \int_l^0 (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \quad (4.15)$$

$$V_{emf,3} = \left[ (\vec{a}_z |\vec{v}| \cos \omega t + \vec{a}_x |\vec{v}| \sin \omega t) \times B \vec{a}_z \right] \cdot (-\vec{a}_y l)$$

เมื่อ  $\vec{a}_z \times \vec{a}_z = 0$  จะได้

$$V_{emf,3} = \left[ (\vec{a}_x |\vec{v}| \sin \omega t) \times B \vec{a}_z \right] \cdot (-\vec{a}_y l) \quad (4.16)$$

$$V_{emf,3} = |\vec{v}| Bl \sin \omega t (\vec{a}_y \cdot \vec{a}_y)$$

$$V_{emf,3} = \left( \omega \frac{w}{2} Bl \sin \omega t \right)$$

**กรณีที่ 4** พิจารณาจากตำแหน่ง  $w$  ถึง 0 จะได้

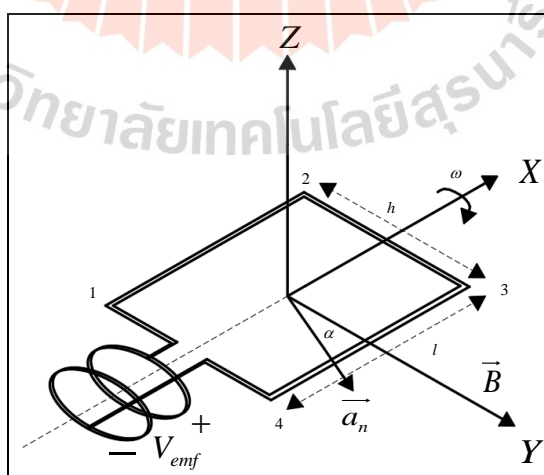
$$V_{emf,4} = \int_w^0 (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} = 0 \quad (4.17)$$

สมการที่ 4.17 มีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจาก  $\vec{v} \times \vec{B} = 0$  มีทิศทางฉากกับ  $d\vec{l}$  ดังนั้นจากกรณีที่ 1-4 จะได้ผลรวมของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำหมุนตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบคงที่ ดังสมการที่ 4.18

$$V_{emf,dipole} = \sum_{n=1}^4 V_{emf,m} = \omega B w l \sin \omega t \quad (4.18)$$

2. ขดลวดตัวนำเคลื่อนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็กคงที่แบบสี่ขั้ว  $\vec{B} = \vec{a}_y B_0 \sin \theta$  ดังรูปที่ 4.11 และให้ขดลวดตัวนำหมุนรอบแกน X โดยที่ขดลวดตัวนำมีความยาว ( $l$ ) และความกว้าง ( $h$ ) จะสามารถคำนวณแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Electromotive force;  $V_{emf}$ ) ได้ดังสมการที่ 4.19

$$V_{emf,quadrupole} = - \int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{s} + \oint_c (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \quad (4.19)$$



รูปที่ 4.11 ขดลวดเหนี่ยวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสี่ขั้ว



จากสมการที่ 4.19 สามารถแยกพิจารณาแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ตกคร่อมขดลวดตัวนำ ออกเป็น 2 กรณี ได้แก่

**กรณีที่ 1** ขดลวดตัวนำอยู่นิ่งสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลง ดังสมการที่ 4.20

$$V_{emf,1} = - \int_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial \theta} \cdot d\vec{s} \quad (4.20)$$

$$V_{emf,1} = - \int_s \frac{\partial}{\partial \theta} (\vec{a}_y B_0 \sin \theta) \cdot \vec{a}_n ds$$

$$V_{emf,1} = - \int_s (\vec{a}_y B_0 \cos \theta) \cdot \vec{a}_n ds$$

เมื่อ  $\vec{a}_y \cdot \vec{a}_n = \cos \alpha$  จะได้

$$V_{emf,1} = - \int_s B_0 \cos \theta \cos \alpha ds \quad (4.21)$$

$$V_{emf,1} = -B_0 \cos \theta \cos \alpha \int_s ds$$

$$V_{emf,1} = -B_0 \cos \theta \cos \alpha [hl]$$

จากสมการที่ 4.21 จะได้สมการที่ 4.22

$$V_{emf,1} = -B_0 hl \cos \theta \cos \alpha \quad (4.22)$$

**กรณีที่ 2** ขดลวดตัวนำเคลื่อนที่หมุนผ่านสนามแม่เหล็ก ดังสมการที่ 4.23 โดยที่  $\vec{v} = \vec{a}_\theta \omega r, r = h/2$  และ  $d\vec{l} = \vec{a}_x dl$  จะได้

$$V_{emf,2} = \oint_C (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \quad (4.23)$$

$$V_{emf,2} = \oint_C (\vec{a}_n \omega r \times \vec{a}_y B_0 \sin \theta) \cdot \vec{a}_x dl$$

จากรูปที่ 4.11 จะพิจารณาเฉพาะขดลวดตัวนำในส่วนของ 1 - 2 และ 3 - 4 เนื่องจากในส่วน  
ของ 2 - 3 และ 4 - 1 จะมีค่าเป็นศูนย์ จะได้สมการที่ 4.24

$$V_{emf,2} = \int_2^1 (\vec{a}_n \omega \frac{h}{2} \times \vec{a}_y B_0 \sin \theta) \cdot \vec{a}_x dl + \int_4^3 (-\vec{a}_n \omega \frac{h}{2} \times \vec{a}_y B_0 \sin \theta) \cdot (-\vec{a}_x dl) \quad (4.24)$$

$$V_{emf,2} = \int_2^1 (\omega \frac{h}{2} B_0 \sin \theta \sin \alpha) \cdot \vec{a}_x dl + \int_4^3 (\omega \frac{h}{2} B_0 \sin \theta \sin \alpha) \cdot (\vec{a}_x dl)$$

$$V_{emf,2} = \omega \frac{h}{2} B_0 \sin \theta \sin \alpha \left[ \int_2^1 dl + \int_4^3 dl \right]$$

$$V_{emf,2} = \omega \frac{h}{2} B_0 \sin \theta \sin \alpha [2l]$$

จากสมการที่ 4.24 จะได้

$$V_{emf,2} = \omega B_0 h l \sin \theta \sin \alpha \quad (4.25)$$

แทนค่าสมการที่ 4.22 และสมการที่ 4.25 ลงในสมการที่ 4.19 จะได้

$$V_{emf,quadrupole} = -B_0 h l \cos \theta \cos \alpha + \omega B_0 h l \sin \theta \sin \alpha \quad (4.26)$$

$$V_{emf, quadrupole} = -B_0 hl (\cos \theta \cos \alpha - \omega B_0 \sin \theta \sin \alpha)$$

เมื่อ  $\theta, \alpha = \omega t$  ที่  $t = 0$  จะได้

$$V_{emf, quadrupole} = -B_0 hl (\cos \omega t \cos \omega t + \sin \omega t \sin \omega t) \quad (4.27)$$

$$V_{emf, quadrupole} = -\omega B_0 hl (\cos^2 \omega t - \sin^2 \omega t)$$

จากสมการที่ 4.27 จะได้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสี่ขั้ว ดังสมการที่ 4.28

$$V_{emf, quadrupole} = -\omega B_0 hl (\cos 2\omega t) \quad (4.28)$$

ดังนั้นจากหลักการพื้นฐานข้างต้นของการจำลองวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วและสี่ขั้ว ด้วยเทคนิคคลวดหมุนจะสามารถวัดสัญญาณออกมาในลักษณะสัญญาณฮาร์โมนิกส์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

### 4.3.1 โปรแกรมจำลองผลการวัดสนามแม่เหล็ก

โปรแกรมจำลองผลการวัดสนามแม่เหล็ก เกิดจากการประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์บนโครงสร้างของโปรแกรม MATLAB ในส่วนของ M-file เพื่อช่วยในการจำลองสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากขดลวดตัดผ่านสนามแม่เหล็ก โดยสนามแม่เหล็ก ( $\vec{B}$ ) ที่ได้มาจากหัวข้อที่ 4.1 จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในหัวข้อนี้ด้วย โดยโปรแกรมที่ถูกพัฒนาขึ้นด้วย MATLAB ซึ่งจะอธิบายถึงรายละเอียดแต่ละขั้นตอนของโปรแกรมดังต่อไปนี้

**ขั้นตอนที่ 1** จะเป็นการอ่านข้อมูลของสนามแม่เหล็ก ( $\vec{B}$ ) ที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.1 และความเร็วรอบในการขับเคลื่อนแท่งทรงกระบอกที่บรรจุขดลวดเหนี่ยวนำ ข้อมูลทั้งสองจะรูปในนามสกุล M-file และต้องมีจำนวนข้อมูลที่เท่ากัน

**ขั้นตอนที่ 2** กำหนดค่าพารามิเตอร์ของขดลวดเหนี่ยวนำ ได้แก่ จำนวนรอบขดลวด ความยาวขดลวด รัศมีวงในขดลวด และรัศมีวงนอกขดลวด

**ขั้นตอนที่ 3** เขียนสมการที่ใช้ในการคำนวณแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ได้แก่ การหมุนขดลวดเหนี่ยวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสองขั้วและการหมุนขดลวดเหนี่ยวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสี่ขั้ว

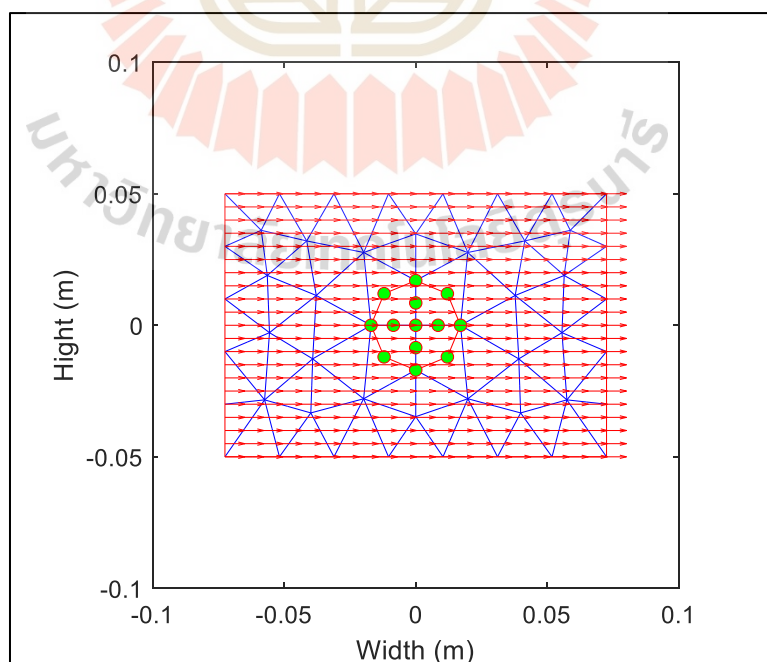
**ขั้นตอนที่ 4** พิมพ์ค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ในขั้นตอนนี้โปรแกรมจะแสดงผลมาในรูปของกราฟ ซึ่งจะเป็นในลักษณะของสัญญาณฮาร์โมนิกส์ สิ้นสุดการทำงานของโปรแกรมในส่วนของการจำลองแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

#### 4.3.2 ผลการจำลองแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

ในการจำลองผลขดลวดเหนี่ยวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะแบ่งออกเป็น 4 การทดลอง ได้แก่ ขดลวดเหนี่ยวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วแบบ Skew dipole magnet ขดลวดเหนี่ยวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วแบบ Normal dipole magnet ขดลวดเหนี่ยวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสี่ขั้วแบบ Skew quadrupole magnet และขดลวดเหนี่ยวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสี่ขั้วแบบ Normal quadrupole magnet ที่ความเร็วรอบในการหมุนขดลวดแบบคงที่ที่ 60, 90 และ 120 รอบต่อนาที ตามลำดับ ดังการทดลองต่อไปนี้

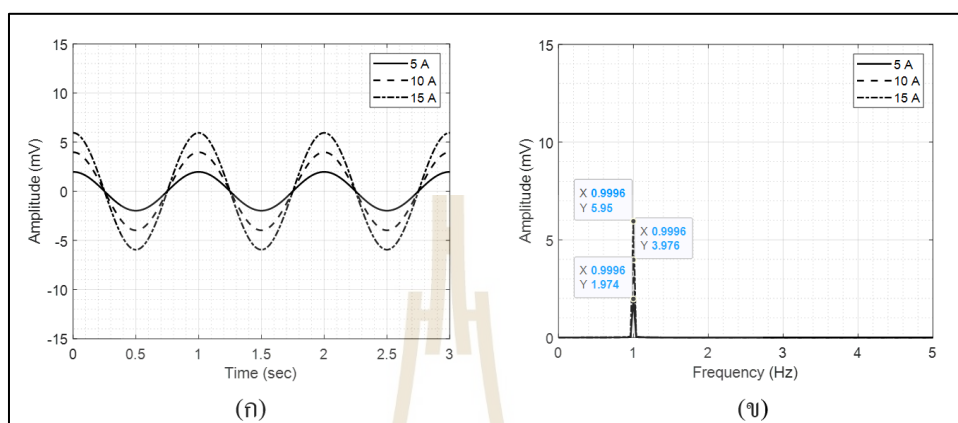
**การทดลองที่ 4.3 ขดลวดเหนี่ยวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วแบบ Skew dipole magnet**

จะแบ่งการทดลองย่อยออกเป็น 3 การทดลอง ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.12 ขดลวดเหนี่ยวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วแบบ Skew dipole magnet

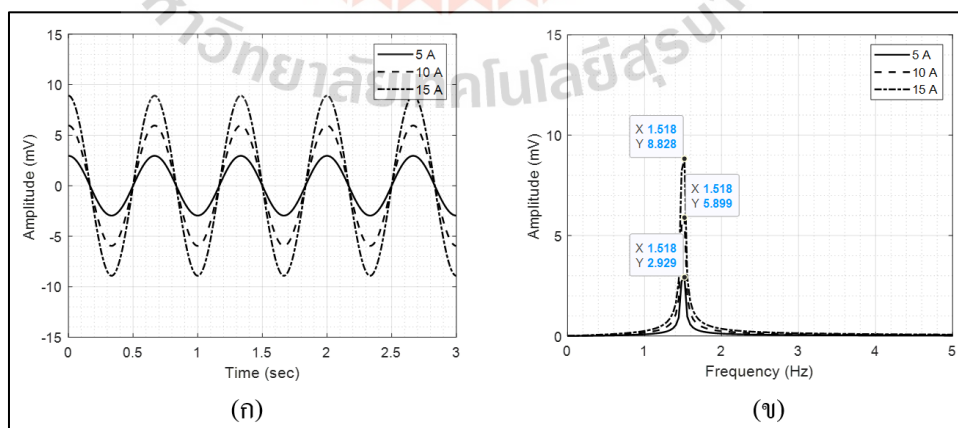
**การทดลองที่ 4.3.1** ความเร็วรอบในการหมุนขดลวด 60 รอบต่อนาที (1 Hz) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก 5, 10 และ 15 แอมป์ ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของขดลวด ดังรูปที่ 4.13 (ก) และการวิเคราะห์หาค่าสัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 4.13 (ข)



รูปที่ 4.13 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ 60 รอบต่อนาที

(ข) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ 60 รอบต่อนาที

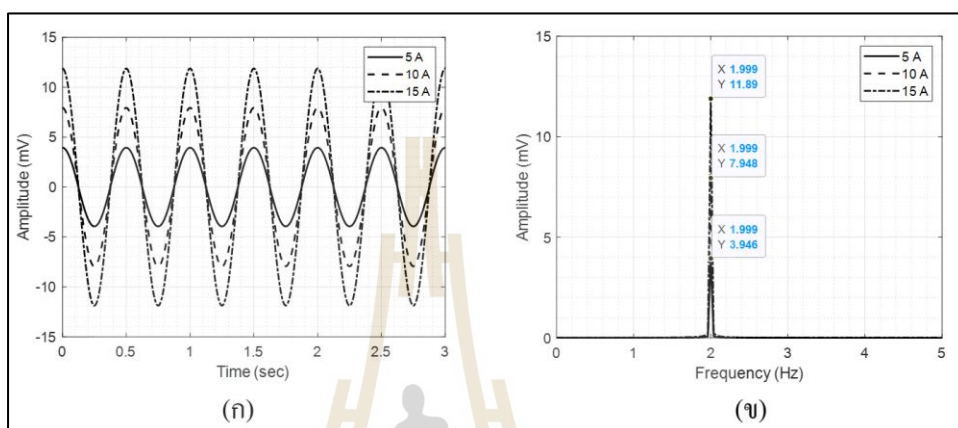
**การทดลองที่ 4.3.2** ความเร็วรอบในการหมุนขดลวด 90 รอบต่อนาที (1.5 Hz) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก 5, 10 และ 15 แอมป์ ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของขดลวดดังรูปที่ 4.14 (ก) และการวิเคราะห์หาค่าสัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 4.14 (ข)



รูปที่ 4.14 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ 90 รอบต่อนาที

(ข) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ 90 รอบต่อนาที

**การทดลองที่ 4.3.3** ความเร็วรอบในการหมุนขดลวด 120 รอบต่อนาที (2 Hz) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก 5, 10 และ 15 แอมป์ ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของขดลวด แสดงดังรูปที่ 4.15 (ก) และการวิเคราะห์หาค่าสัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว แสดงดังรูปที่ 4.15 (ข)



รูปที่ 4.15 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ 120 รอบต่อนาที

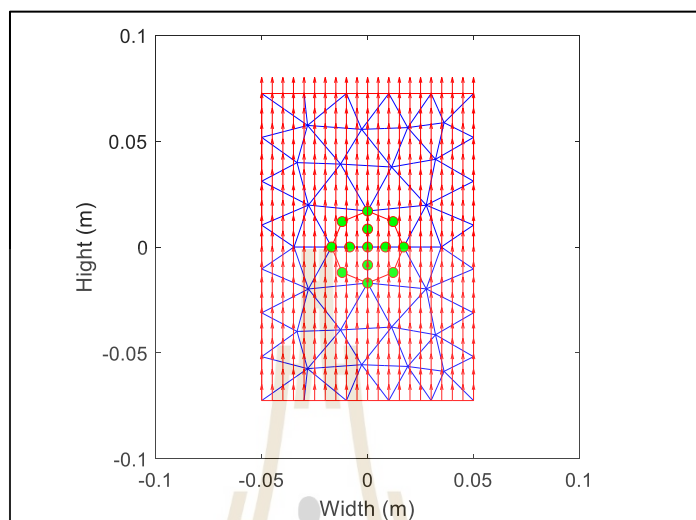
(ข) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ 120 รอบต่อนาที

ตารางที่ 4.4 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบและกระแสไฟฟ้าแม่เหล็กสองขั้วแบบ Skew dipole magnet

ความเร็วมอเตอร์ (RPM)	กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้คอยล์แม่เหล็กแบบสองขั้ว		
	กระแสไฟฟ้า 5 แอมป์	กระแสไฟฟ้า 10 แอมป์	กระแสไฟฟ้า 15 แอมป์
60	1.974 mV.	3.976 mV.	5.950 mV.
90	2.929 mV.	5.899 mV.	8.828 mV.
120	3.946 mV.	7.948 mV.	11.890 mV.

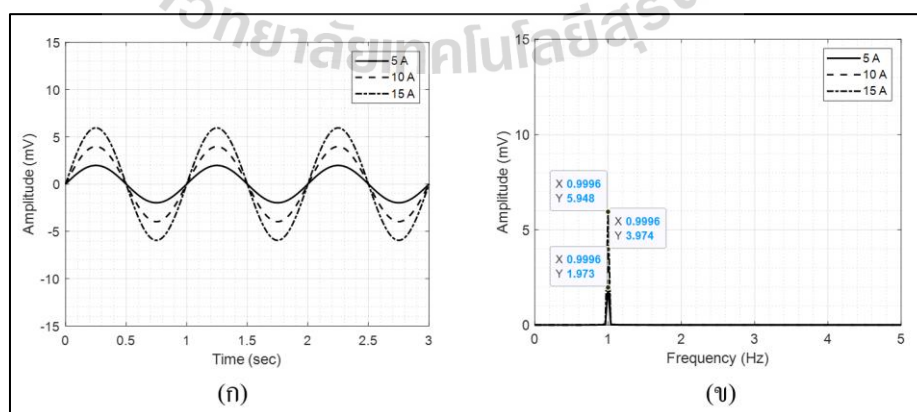
จากการทดลองที่ 4.3 ในส่วนของการจำลองแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อขดลวดตัวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วแบบ Skew dipole magnet พบว่า ความเร็วรอบในการหมุนขดลวดตัวนำจะส่งผลโดยตรงต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังสมการที่ 4.18 เมื่อความเร็วรอบในการหมุนสูงขึ้นจะส่งผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสูงขึ้น และมีค่าสูงที่สุดที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที ที่กระแสไฟฟ้า 15 แอมป์

**การทดลองที่ 4.4** ขดลวดเหนี่ยวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วแบบ Normal dipole magnet จะแบ่งการทดลองย่อยออกเป็น 3 การทดลอง ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.16 ขดลวดเหนี่ยวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วแบบ Normal dipole magnet

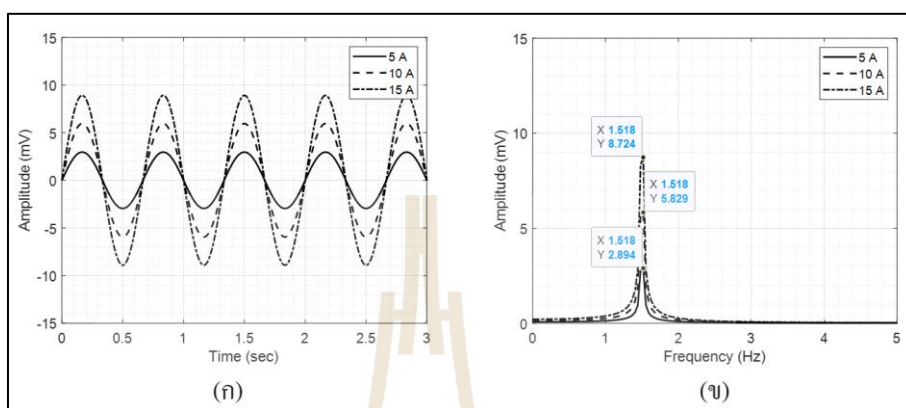
**การทดลองที่ 4.4.1** ความเร็วรอบในการหมุนขดลวด 60 รอบต่อวินาที (1 Hz) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดแม่เหล็ก 5, 10 และ 15 แอมป์ ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของขดลวด แสดงดังรูปที่ 4.17 (ก) และการวิเคราะห์หาค่าสัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว แสดงดังรูปที่ 4.17 (ข)



รูปที่ 4.17 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ 60 รอบต่อวินาที

(ข) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ 60 รอบต่อวินาที

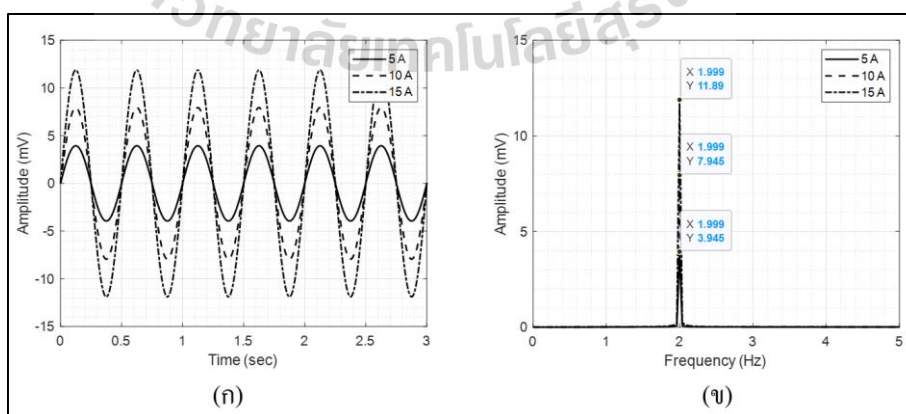
**การทดลองที่ 4.4.2** ความเร็วรอบในการหมุนขดลวด 90 รอบต่อนาที (1.5 Hz) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก 5, 10 และ 15 แอมป์ ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของขดลวด แสดงดังรูปที่ 4.18 (ก) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว แสดงดังรูปที่ 4.18 (ข)



รูปที่ 4.18 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ 90 รอบต่อนาที

(ข) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ 90 รอบต่อนาที

**การทดลองที่ 4.4.3** ความเร็วรอบในการหมุนขดลวด 120 รอบต่อนาที (2 Hz) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก 5, 10 และ 15 แอมป์ ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของขดลวด แสดงดังรูปที่ 4.19 (ก) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว แสดงดังรูปที่ 4.19 (ข)



รูปที่ 4.19 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ 120 รอบต่อนาที

(ข) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ 120 รอบต่อนาที

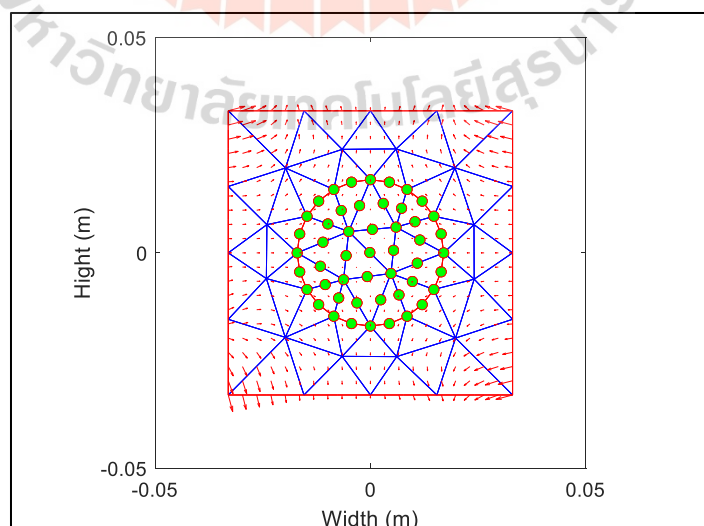


ตารางที่ 4.5 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบและกระแสไฟฟ้าแม่เหล็ก สองขั้วแบบ Normal dipole magnet

ความเร็วมอเตอร์ (RPM)	กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้คอยล์แม่เหล็กแบบสองขั้ว		
	กระแสไฟฟ้า 5 แอมป์	กระแสไฟฟ้า 10 แอมป์	กระแสไฟฟ้า 15 แอมป์
60	1.973 mV.	3.974 mV.	5.948 mV.
90	2.894 mV.	5.829 mV.	8.724 mV.
120	3.945 mV.	7.945 mV.	11.890 mV.

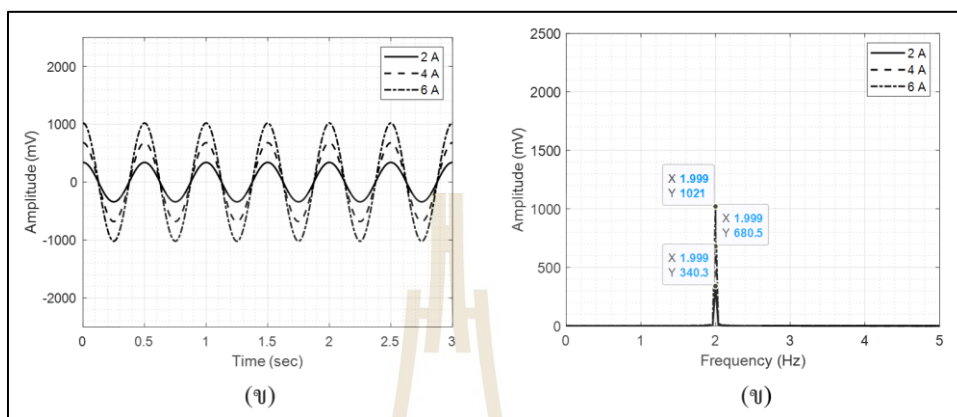
จากการทดลองที่ 4.4 ในส่วนของการจำลองแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อขดลวดตัวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วแบบ Normal dipole magnet พบว่า ความเร็วรอบในการหมุนขดลวดตัวนำจะส่งผลโดยตรงต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังสมการที่ 4.17 เมื่อความเร็วรอบในการหมุนสูงขึ้นจะส่งผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสูงขึ้น และมีค่าสูงที่สุดที่ความเร็ว 120 รอบต่อวินาที ที่กระแสไฟฟ้า 15 แอมป์ ซึ่งในการทดลองนี้จะมีค่าใกล้เคียงกับแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วแบบ Skew dipole magnet เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งสองแบบแตกต่างกันที่ทิศทางของสนามแม่เหล็กที่นำไปใช้งานเท่านั้น

การทดลองที่ 4.5 ขดลวดเหนี่ยวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสี่ขั้วแบบ Skew quadrupole magnet จะแบ่งการทดลองย่อยออกเป็น 3 การทดลอง ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.20 ขดลวดเหนี่ยวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วแบบ Skew quadrupole magnet

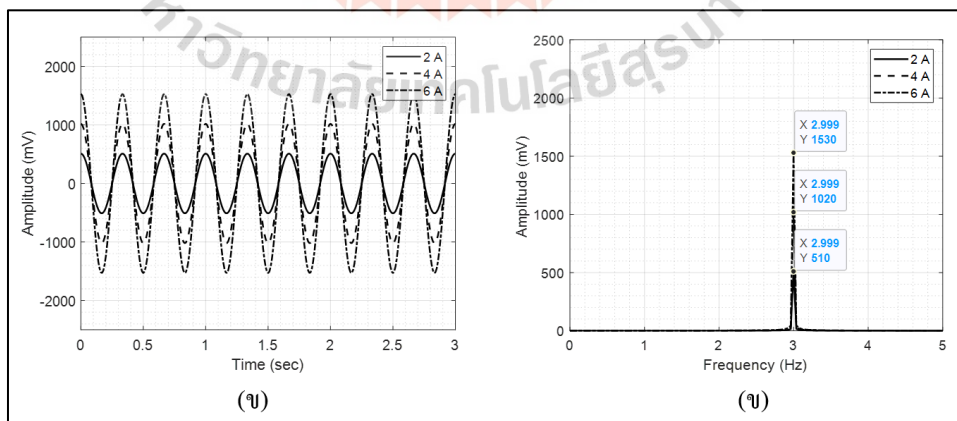
**การทดลองที่ 4.5.1** ความเร็วรอบในการหมุนขดลวด 60 รอบต่อนาที (1 Hz) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก 2, 4 และ 6 แอมป์ ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของขดลวด แสดงดังรูปที่ 4.21 (ก) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว แสดงดังรูปที่ 4.21 (ข)



รูปที่ 4.21 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ 60 รอบต่อนาที

(ข) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ 60 รอบต่อนาที

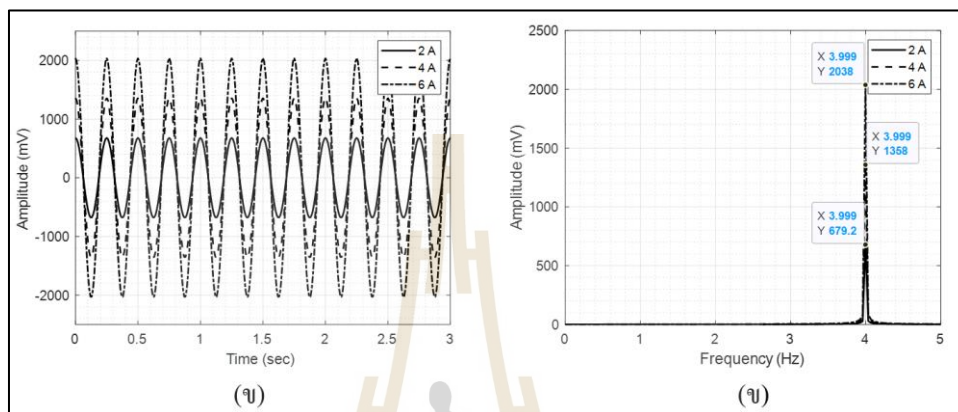
**การทดลองที่ 4.5.2** ความเร็วรอบในการหมุนขดลวด 90 รอบต่อนาที (1.5 Hz) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก 2, 4 และ 6 แอมป์ ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของขดลวด แสดงดังรูปที่ 4.22 (ก) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว แสดงดังรูปที่ 4.22 (ข)



รูปที่ 4.22 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ 90 รอบต่อนาที

(ข) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ 90 รอบต่อนาที

**การทดลองที่ 4.5.3** ความเร็วรอบในการหมุนขดลวด 120 รอบต่อนาที (2 Hz) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก 2, 4 และ 6 แอมป์ ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของขดลวด แสดงดังรูปที่ 4.23 (ก) และการวิเคราะห์หาค่าสัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว แสดงดังรูปที่ 4.23 (ข)



รูปที่ 4.23 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ 120 รอบต่อนาที

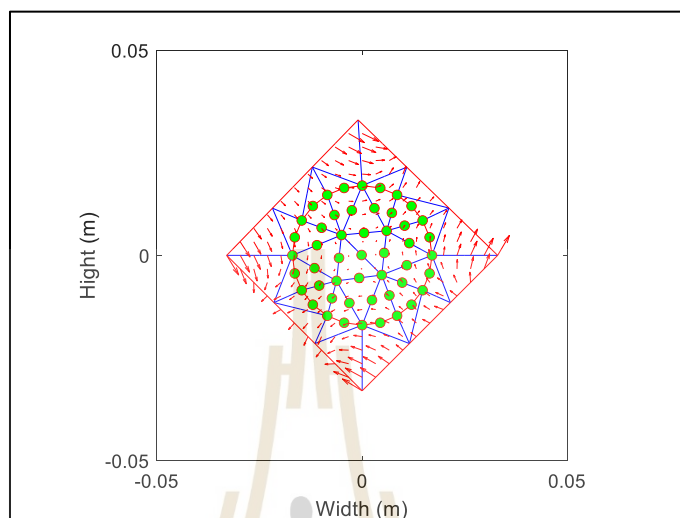
(ข) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ 120 รอบต่อนาที

ตารางที่ 4.6 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบและกระแสไฟฟ้าแม่เหล็ก ลีซัวแบบ Skew quadrupole magnet

ความเร็วมอเตอร์ (RPM)	กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้คอยล์แม่เหล็กแบบลีซัว		
	กระแสไฟฟ้า 2 แอมป์	กระแสไฟฟ้า 4 แอมป์	กระแสไฟฟ้า 6 แอมป์
60	340.30 mV.	680.50 mV.	1021.00 mV.
90	510.00 mV.	1020.00 mV.	1530.00 mV.
120	679.20 mV.	1358.00 mV.	2038.00 mV.

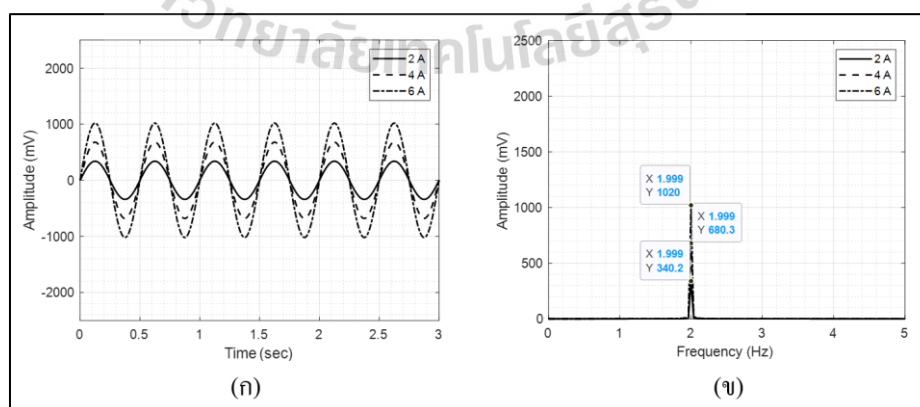
จากการทดลองที่ 4.5 ในส่วนของการจำลองแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อขดลวดตัวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วแบบ Skew quadrupole magnet พบว่า ความเร็วรอบในการหมุนขดลวดตัวนำจะส่งผลโดยตรงต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังสมการที่ 4.27 เมื่อความเร็วรอบในการหมุนสูงขึ้นจะส่งผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสูงขึ้น และมีค่าสูงที่สุดที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที ที่กระแสไฟฟ้า 6 แอมป์

**การทดลองที่ 4.6** ขดลวดเหนี่ยวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วแบบ Normal quadrupole magnet จะแบ่งการทดลองย่อยออกเป็น 3 การทดลอง ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.24 ขดลวดเหนี่ยวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วแบบ Normal quadrupole magnet

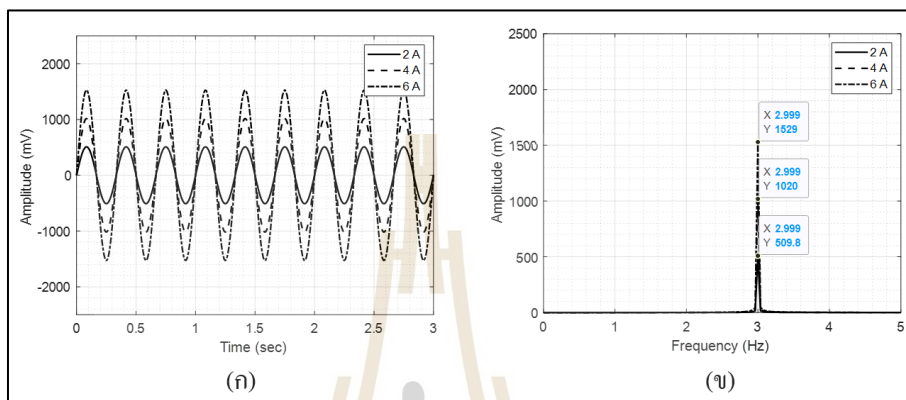
**การทดลองที่ 4.6.1** ความเร็วรอบในการหมุนขดลวด 60 รอบต่อนาที (1 Hz) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก 2, 4 และ 6 แอมป์ ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของขดลวด แสดงดังรูปที่ 4.25 (ก) และการวิเคราะห์หาค่าสัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว แสดงดังรูปที่ 4.25 (ข)



รูปที่ 4.25 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ 60 รอบต่อนาที

(ข) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ 60 รอบต่อนาที

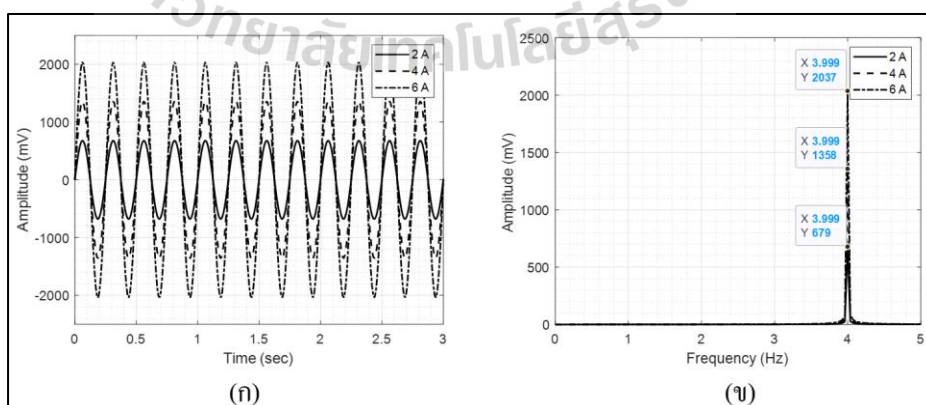
**การทดลองที่ 4.6.2** ความเร็วรอบในการหมุนขดลวด 90 รอบต่อนาที (1.5 Hz) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก 2, 4 และ 6 แอมป์ ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของขดลวด แสดงดังรูปที่ 4.26 (ก) และการวิเคราะห์หertzสัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว แสดงดังรูปที่ 4.26 (ข)



รูปที่ 4.26 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ 90 รอบต่อนาที

(ข) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ 90 รอบต่อนาที

**การทดลองที่ 4.5.3** ความเร็วรอบในการหมุนขดลวด 120 รอบต่อนาที (2 Hz) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก 2, 4 และ 6 แอมป์ ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของขดลวด แสดงดังรูปที่ 4.27 (ก) และการวิเคราะห์หertzสัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว แสดงดังรูปที่ 4.27 (ข)



รูปที่ 4.27 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ 120 รอบต่อนาที

(ข) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กที่ 120 รอบต่อนาที

ตารางที่ 4.7 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบและกระแสไฟฟ้าแม่เหล็ก สี่ขั้วแบบ Normal quadrupole magnet

ความเร็วมอเตอร์ (RPM)	กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้คอยล์แม่เหล็กแบบสี่ขั้ว		
	กระแสไฟฟ้า 2 แอมป์	กระแสไฟฟ้า 4 แอมป์	กระแสไฟฟ้า 6 แอมป์
60	340.20 mV.	680.30 mV.	1020.00 mV.
90	509.80 mV.	1020.00 mV.	1529.00 mV.
120	679.00 mV.	1358.00 mV.	2037.00 mV.

จากการทดลองที่ 4.6 ในส่วนของการจำลองแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อขดลวดตัวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วแบบ Normal quadrupole magnet พบว่าความเร็วรอบในการหมุนขดลวดตัวนำจะส่งผลโดยตรงต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังสมการที่ 4.27 เมื่อความเร็วรอบในการหมุนสูงขึ้นจะส่งผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสูงขึ้น และมีค่าสูงที่สุดที่ความเร็ว 120 รอบต่อวินาที ที่กระแสไฟฟ้า 6 แอมป์ ซึ่งในการทดลองนี้จะมีค่าใกล้เคียงกับแม่เหล็กไฟฟ้าสี่ขั้วแบบ Skew quadrupole magnet เนื่องจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งสองแบบแตกต่างกันที่ทิศทางของสนามแม่เหล็กที่นำไปใช้งานเท่านั้น

#### 4.4 สรุป

จากการทดลองในบทที่ 4 สามารถจำแนกออกเป็น 2 การทดลอง ได้แก่ การจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วและสี่ขั้ว และการจำลองแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำภายใต้สนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วและสี่ขั้ว ร่วมกับการวิเคราะห์สัญญาณอาร์โมนิคส์แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็วพบว่า ใน ส่วนที่ 1 การจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้าตัวแปรที่สำคัญคือค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็กซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความเข้มของสนามแม่เหล็ก กระแสไฟฟ้ามากความเข้มสนามแม่เหล็กสูง กระแสไฟฟ้าน้อยความเข้มสนามแม่เหล็กน้อย โดยที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วจะมีค่าสูงสุดที่ 0.0214 เทสลา ที่กระแสไฟฟ้า 15 แอมป์ และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสี่ขั้วจะมีค่าสูงสุดที่ 3.6735 เทสลาต่อเมตร ที่กระแสไฟฟ้า 6 แอมป์ และ ส่วนที่ 2 การจำลองแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยเทคนิคขดลวดหมุนตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วและสี่ขั้ว ในส่วนนี้ความเร็วรอบการหมุนจะส่งผลโดยตรงต่อแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในกรณีที่สนามแม่เหล็กมีค่าคงที่ ความเร็วรอบในการหมุนสูงแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีค่ามาก ความเร็วรอบในการหมุนต่ำ แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะมีค่าน้อย โดยที่แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วมีค่าสูงสุดที่

ความเร็วรอบการหมุน 120 รอบต่อนาที ที่กระแสไฟฟ้า 15 แอมป์ และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเมื่อตัดผ่านสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสี่ขั้วมีค่าสูงสุดที่ความเร็วรอบการหมุนที่ 120 รอบต่อนาที ที่กระแสไฟฟ้า 6 แอมป์ จากนั้นนำสัญญาณฮาร์โมนิกส์ที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว เพื่อแสดงให้เห็นว่าในส่วนของการจำลองผลจะไม่มี的增加พจน์ของสัญญาณฮาร์โมนิกส์อื่น ๆ เข้าไปในแบบจำลอง เพื่อนำผลที่ได้ในบทที่ 4 นี้ไปจำลองสถานการณ์ต่าง ๆ สำหรับจำแนกความผิดพลาด เช่น ความผิดพลาดที่เกิดจากการควบคุมความเร็วรอบ และความผิดพลาดที่เกิดจากการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก ซึ่งส่งผลกระทบต่อการวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้างี้จะกล่าวในบทที่ 5 ต่อไป



## บทที่ 5

# การวัดและวิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วย เทคนิคขดลวดหมุน

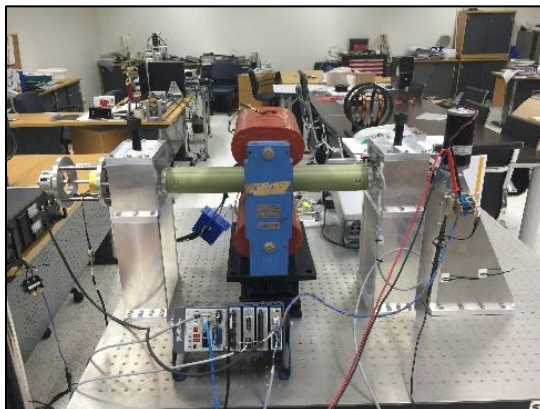
### 5.1 บทนำ

ในบทนี้จะการวัดและวิเคราะห์ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยเทคนิคขดลวดหมุนที่เกิดจากการออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบและการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอกที่บรรจุขดลวดตัวนำ (Search coil) ของการวัดค่าสนามแม่เหล็กสองขั้วและสี่ขั้ว โดยใช้ผลจากการควบคุมความเร็วรอบจากการทดลองในบทที่ 3 จำนวน 2 ชุด ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ชุดที่ 1 บอร์ด National instrument ร่วมกับโปรแกรม LabVIEW ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ และด้วยอุปกรณ์ชุดที่ 2 บอร์ด Rapcon ร่วมกับโปรแกรม MATLAB ด้วยตัวควบคุมพีไอ และใช้ผลการประมาณค่าสนามแม่เหล็กจากการทดลองในบทที่ 4 ซึ่งประกอบไปด้วยสนามแม่เหล็กสองขั้วและสนามแม่เหล็กสี่ขั้ว เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากการหมุนขดลวดตัวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กสองขั้วและสี่ขั้ว สำหรับการจำแนกและประมาณค่าความผิดพลาดที่มีผลกระทบมาจากการควบคุมความเร็วรอบและการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก

### 5.2 การวัดและวิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับสนามแม่เหล็กสองขั้ว

การทดลองนี้จะเป็นการวัดค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วแบบ Skew dipole magnets ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการแสงซินโครตรอนด้วยอุปกรณ์ชุดที่ 1 บอร์ด National instrument ร่วมกับโปรแกรม LabVIEW และใช้ตัวควบคุมแบบพีไอในการควบคุมความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง แสดงดังรูปที่ 5.1 รายละเอียดของอุปกรณ์และขั้นตอนในการติดตั้งแสดงในหัวข้อที่ 3.3.2 สำหรับขั้นตอนทดลองการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

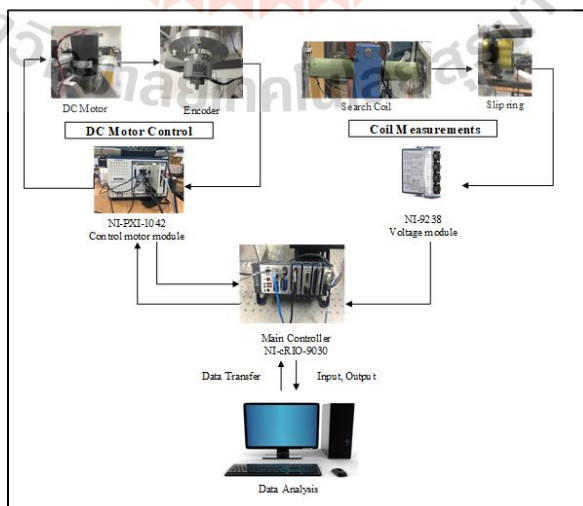




รูปที่ 5.1 การวัดสนามแม่เหล็กสองขั้วแบบ Skew dipole magnets

### 5.2.1 ขั้นตอนการทำงานของเครื่องวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำแม่เหล็กสองขั้ว

ขั้นตอนการทำงานของเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กแบบสองขั้วด้วยอุปกรณ์ชุดที่ 1 บอร์ด National instrument จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนการทำงาน ได้แก่ **ส่วนที่ 1** การควบคุมความเร็วรอบการหมุนแท่งทรงกระบอกที่บรรจุขดลวดตัวนำแบบวงปิด และใช้โปรแกรม LabVIEW สำหรับการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ผ่านอุปกรณ์ PXI-1042 **ส่วนที่ 2** การวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจะใช้โปรแกรม LabVIEW เช่นเดียวกัน สำหรับการเขียนโปรแกรมเก็บข้อมูลผ่านอุปกรณ์ NI-9238 และการควบคุมทั้งสองจะสื่อสารผ่านอุปกรณ์ NI-cRIO-9030 เพื่อรับและส่งข้อมูลต่าง ๆ มายังคอมพิวเตอร์สำหรับประมวลผล ดังรูปที่ 5.2



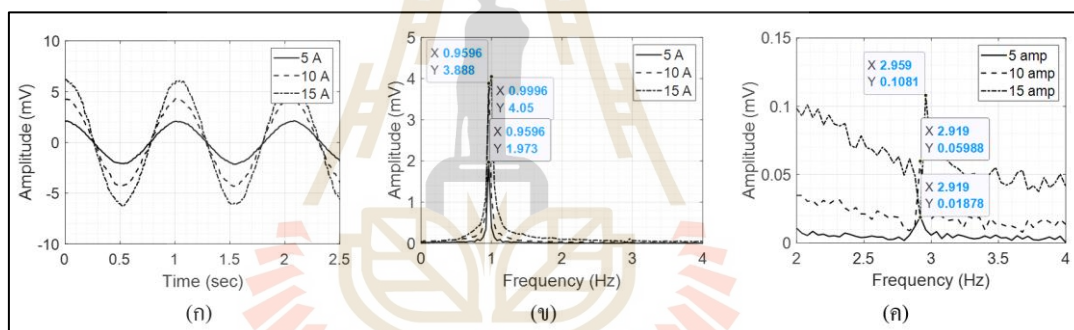
รูปที่ 5.2 การทำงานของเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กสองขั้ว

## 5.2.2 การทดสอบแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำแม่เหล็กสองขั้ว

การทดสอบเครื่องวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับแม่เหล็กสองขั้ว จะแบ่งออกเป็น 3 การทดลอง โดยใช้ชุดอุปกรณ์ National instrument ร่วมกับโปรแกรม LabVIEW และใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ โดยค่าอัตราขยาย  $K_p = 0.1001$  และ  $K_i = 0.3724$  ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบ คือ 60, 90 และ 120 รอบต่อนาที ตามลำดับ ดังการทดลองต่อไปนี้

**การทดลองที่ 5.1 การวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของการวัดสนามแม่เหล็กสองขั้วด้วยอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบชุดที่ 1**

**การทดลองที่ 5.1.1** ความเร็วรอบในการหมุนขดลวด 60 รอบต่อนาที (1 Hz) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก 5, 10 และ 15 แอมป์ ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของขดลวด แสดงดังรูปที่ 5.3 (ก) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว แสดงดังรูปที่ 5.3 (ข) และรูปที่ 5.3 (ค)

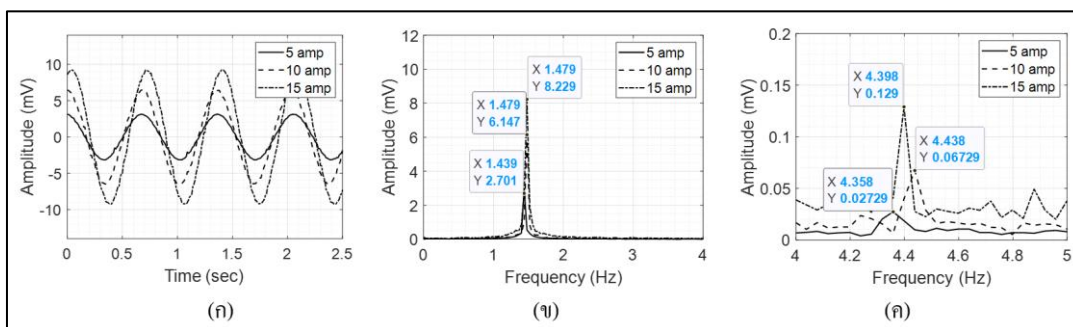


รูปที่ 5.3 (ก) สัญญาณฮาร์โมนิกส์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 1 Hz

(ข) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 1 Hz

(ค) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 3 Hz

**การทดลองที่ 5.1.2** ความเร็วรอบในการหมุนขดลวด 90 รอบต่อนาที (1.5 Hz) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก 5, 10 และ 15 แอมป์ ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของขดลวด แสดงดังรูปที่ 5.4 (ก) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว แสดงดังรูปที่ 5.4 (ข) และรูปที่ 5.4 (ค)

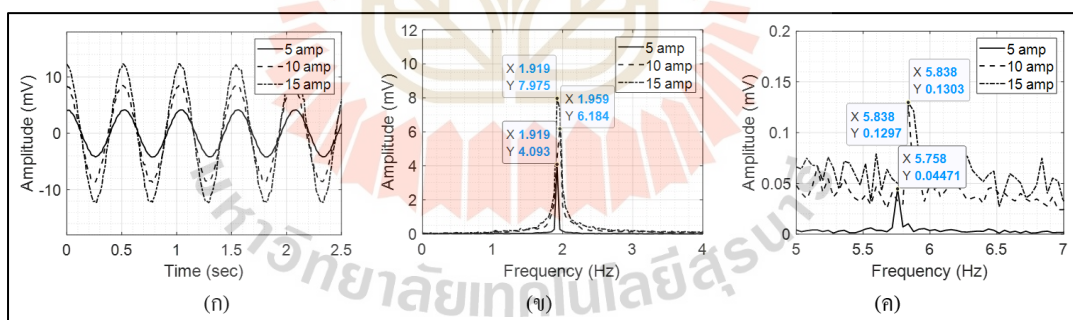


รูปที่ 5.4 (ก) สัญญาณฮาร์โมนิกส์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 1.5 Hz

(ข) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 1.5 Hz

(ค) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 4.5 Hz

**การทดลองที่ 5.1.3** ความเร็วรอบในการหมุนขดลวด 120 รอบต่อนาที (2 Hz) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก 5, 10 และ 15 แอมป์ ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของขดลวด แสดงดังรูปที่ 5.5 (ก) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว แสดงดังรูปที่ 5.5 (ข) และรูปที่ 5.5 (ค)



รูปที่ 5.5 (ก) สัญญาณฮาร์โมนิกส์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 2 Hz

(ข) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 2 Hz

(ค) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 6 Hz

จากการทดลองที่ 5.1.1 - 5.1.3 เมื่อพิจารณาในส่วนของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการหมุนขดลวดตัวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กสองขั้วจะมีลักษณะเป็นสัญญาณฮาร์โมนิกส์ ดังรูปที่ 5.3 (ก) - 5.5 (ก) จะสังเกตเห็นว่าเมื่อความเร็วรอบในการหมุนสูงขึ้นจะส่งผลให้

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสูงขึ้น ซึ่งมีค่าสูงสุดที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที นอกจากนี้การเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้กับคอยล์แม่เหล็ก ยังส่งผลทำให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าสูงขึ้นเช่นกัน มีค่าสูงสุดที่ 15 แอมป์ของทั้ง 3 การทดลอง แสดงดังตารางที่ 5.1 นอกจากนี้เมื่อนำสัญญาณมาทำการวิเคราะห์ในรูปของสเปกตรัม ดังรูปที่ 5.3 (ข) - 5.5 (ข) และรูปที่ 5.3 (ค) - 5.5 (ค) จะทำให้สามารถจำแนกลักษณะสัญญาณฮาร์โมนิกส์อื่น ๆ ที่ผสมมากับสัญญาณฮาร์โมนิกส์หลัก ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นกับการวัดสนามแม่เหล็กด้วยเทคนิคขดลวดหมุน จากรูปที่ 5.3 (ค) - 5.5 (ค) พบว่าในทุกความเร็วรอบของการทดลองจะพบสัญญาณฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ 3 เท่าของความถี่หลักเสมอ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการทดลองในหัวข้อนี้จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ความผิดพลาดในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 5.1 แอมพลิจูดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดลองที่ 5.1.1 - 5.1.3

ความเร็ว (RPM)	ความถี่ (Hz)	ขนาดของแอมพลิจูดที่กระแสไฟฟ้า 5 แอมป์	ขนาดของแอมพลิจูดที่กระแสไฟฟ้า 10 แอมป์	ขนาดของแอมพลิจูดที่กระแสไฟฟ้า 15 แอมป์
60	1	1.973 mV.	2.959 mV	3.594 mV.
	3	0.0187 mV.	0.0273 mV	0.0447 mV.
90	1.5	3.888 mV.	6.147 mV.	7.936 mV.
	4.5	0.0589 mV.	0.0672 mV.	0.1297 mV.
120	2	4.050 mV.	8.229 mV.	11.360 mV.
	6	0.1081 mV.	0.1290 mV.	0.1303 mV.

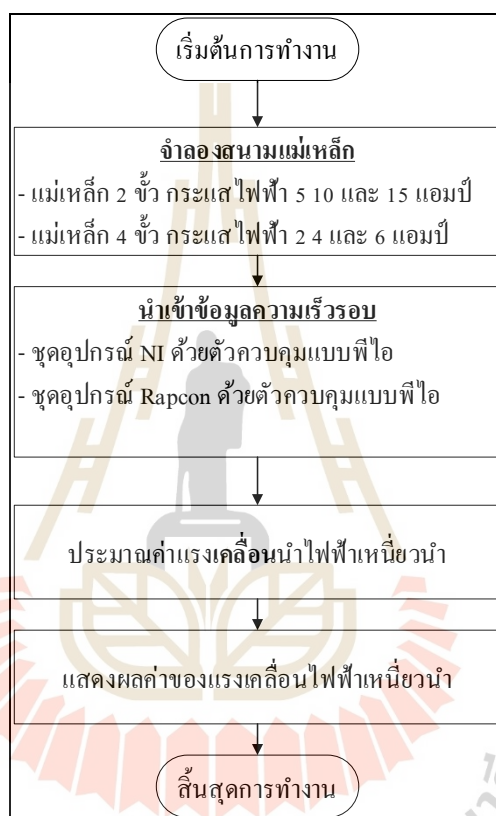
### 5.3 การประมาณค่าและวิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สถานะคงตัวของ การหมุนขดลวดตัวนำสำหรับการวัดสนามแม่เหล็กสองขั้วและสี่ขั้ว

ในการทดลองนี้จะทำการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการจำลอง สนามแม่เหล็กสองขั้วและสี่ขั้ว แบบ Skew magnet เท่านั้น เนื่องจากขนาดของสนามแม่เหล็ก ทั้งสองแบบมีค่าที่เท่ากัน แตกต่างกันที่ทิศทางของสนามแม่เหล็กที่นำไปใช้งาน สำหรับจำแนกความผิดพลาดที่เกิดจากการควบคุมความเร็วรอบการหมุนแท่งทรงกระบอกที่ส่งผลกระทบ เครื่องมือวัดสนามแม่เหล็ก

#### 5.3.1 ขั้นตอนการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับการวัดสนามแม่เหล็ก

การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในหัวข้อนี้จะเป็นการเขียนโปรแกรม MATLAB เพื่อจำลองการเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วและสี่ขั้วในอุดมคติ และใช้ข้อมูล

ความเร็วรอบการหมุนที่ได้จากการทดลองในหัวข้อที่ 3.1.1 ด้วยอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบชุดที่ 1 และหัวข้อที่ 3.1.2 ด้วยอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบชุดที่ 2 (มีค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัวน้อยที่สุด) สำหรับการประมาณค่าและวิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นกับชุดอุปกรณ์ทั้ง 2 ชนิด ขั้นตอนการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำแสดงดัง แผนภูมิรูปภาพต่อไปนี้



รูปที่ 5.6 ขั้นตอนการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

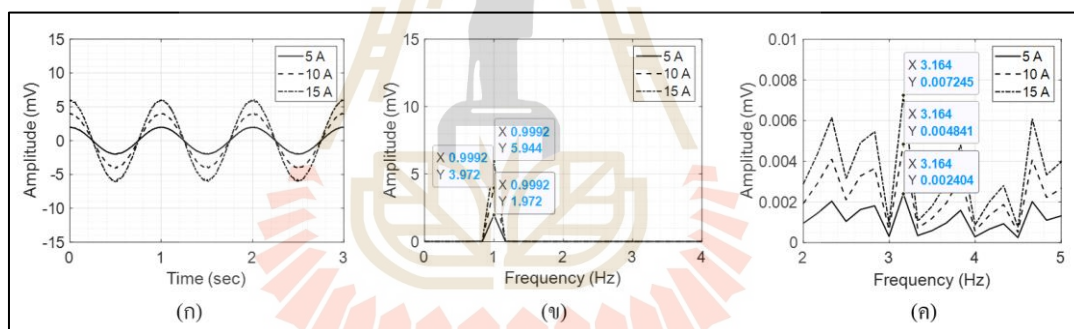
### 5.3.2 การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำการวัดสนามแม่เหล็กสองขั้วและสี่ขั้ว

การทดลองการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับการทดลองนี้เพื่อวิเคราะห์ความผิดพลาดที่สถานะคงตัวของการควบคุมความเร็วรอบจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์การทดลองจำนวน 2 ชุด ได้แก่ ด้วยอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบชุดที่ 1 ตัวควบคุมแบบพีไอ ค่าอัตราขยาย  $K_p = 0.1001$  และ  $K_i = 0.3724$  และด้วยอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบชุดที่ 2 ตัวควบคุมพีไอ ค่าอัตราขยาย  $K_p = 0.1177$  และ  $K_i = 0.0601$  ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบ คือ 60, 90 และ 120 รอบต่อนาที ตามลำดับ ดังการทดลองต่อไปนี้

## การทดลองที่ 5.2 การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของการวัดสนามแม่เหล็กสองขั้วด้วยอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบชุดที่ 1

การทดลองนี้จะใช้ข้อมูลของการควบคุมความเร็วรอบจากการทดลองที่ 3.1.1 โดยที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที ความผิดพลาดที่สถานะคงตัว  $\pm 5.184$  เปอร์เซ็นต์ ความเร็ว 90 รอบต่อนาที ความผิดพลาดที่สถานะคงตัว  $\pm 4.529$  เปอร์เซ็นต์ และความเร็ว 120 รอบต่อนาที ความผิดพลาดที่สถานะคงตัว  $\pm 2.315$  เปอร์เซ็นต์ และใช้ค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากจำลองในการทดลองที่ 4.1.1 สำหรับเป็นข้อมูลให้กับการทดลองที่ 5.2.1 ถึงการทดลองที่ 5.2.3 ตามลำดับดังต่อไปนี้

**การทดลองที่ 5.2.1** ความเร็วรอบในการหมุนขดลวด 60 รอบต่อนาที (1 Hz) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก 5, 10 และ 15 แอมป์ ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของขดลวด ดังรูปที่ 5.7 (ก) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 5.7 (ข) และรูปที่ 5.7 (ค)

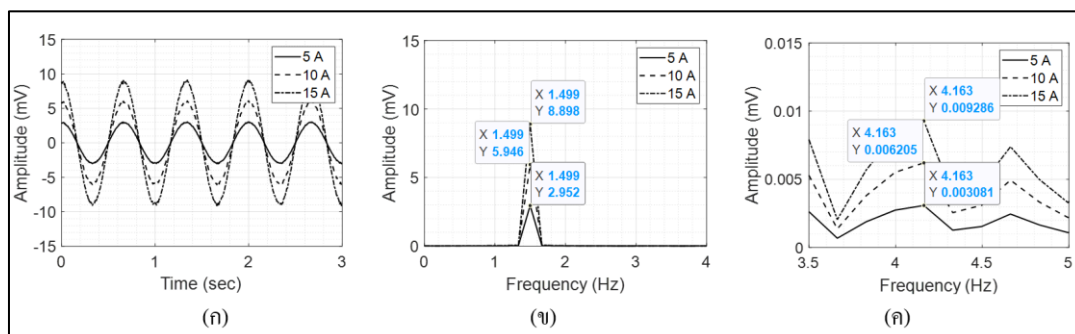


รูปที่ 5.7 (ก) สัญญาณฮาร์โมนิกส์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 1 Hz

(ข) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 1 Hz

(ค) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 3 Hz

**การทดลองที่ 5.2.2** ความเร็วรอบในการหมุนขดลวด 90 รอบต่อนาที (1.5 Hz) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก 5, 10 และ 15 แอมป์ ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของขดลวด ดังรูปที่ 5.8 (ก) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 5.8 (ข) และรูปที่ 5.8 (ค)

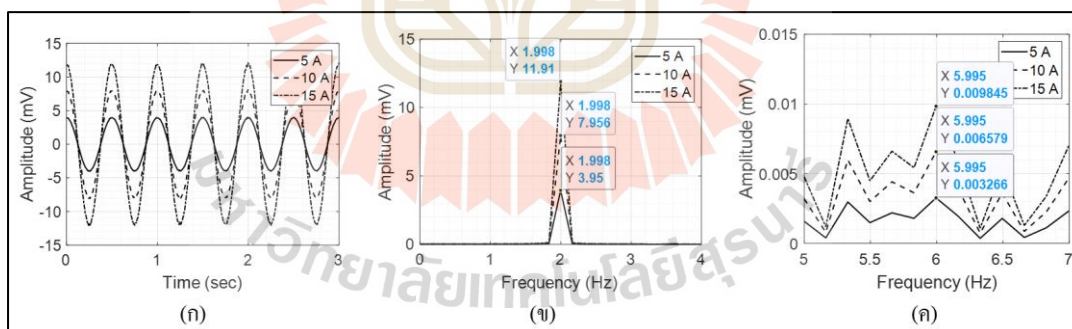


รูปที่ 5.8 (ก) สัญญาณฮาร์โมนิกส์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 1.5 Hz

(ข) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 1.5 Hz

(ค) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 4.5 Hz

**การทดลองที่ 5.1.3** ความเร็วรอบในการหมุนขดลวด 120 รอบต่อนาที (2 Hz) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก 5, 10 และ 15 แอมป์ ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของขดลวด ดังรูปที่ 5.9 (ก) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 5.9 (ข) และรูปที่ 5.9 (ค)



รูปที่ 5.9 (ก) สัญญาณฮาร์โมนิกส์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 2 Hz

(ข) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 2 Hz

(ค) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 6 Hz

จากการทดลองที่ 5.2.1 - 5.2.3 เมื่อพิจารณาในส่วนของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากจำลองการหมุนขดลวดตัวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กสองขั้วจะมีลักษณะเป็นสัญญาณฮาร์โมนิกส์ ดังรูปที่ 5.7 (ก) - 5.9 (ก) และเมื่อความเร็วรอบในการหมุนสูงขึ้นจะส่งผลให้

แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสูงขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที และเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้กับคอยล์แม่เหล็กก็จะส่งผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสูงขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ 15 แอมป์ ผลที่ได้จากการจำลองแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในการทดลองนี้มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการทดลองในหัวข้อที่ 5.1 เมื่อนำสัญญาณมาทำการวิเคราะห์ในรูปของสเปกตรัม ดังรูปที่ 5.7 (ข) - 5.9 (ข) และรูปที่ 5.7 (ค) - 5.9 (ค) พบว่า มีสัญญาณฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ 3 เท่าของความถี่หลักรอบเช่นเดียวกันแต่จะมีขนาดของแอมพลิจูดที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 5.2 จึงอาจจะสรุปได้ว่าการเกิดสัญญาณฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ 3 เท่าของถี่การหมุนในการทดลองที่ 5.2.1 - 5.2.3 เกิดมาจากค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัวของการควบคุมความเร็วรอบการหมุนขดลวดตัวนำด้วยอุปกรณ์ชุดที่ 1

ตารางที่ 5.2 แอมพลิจูดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดลองที่ 5.2.1 - 5.2.3

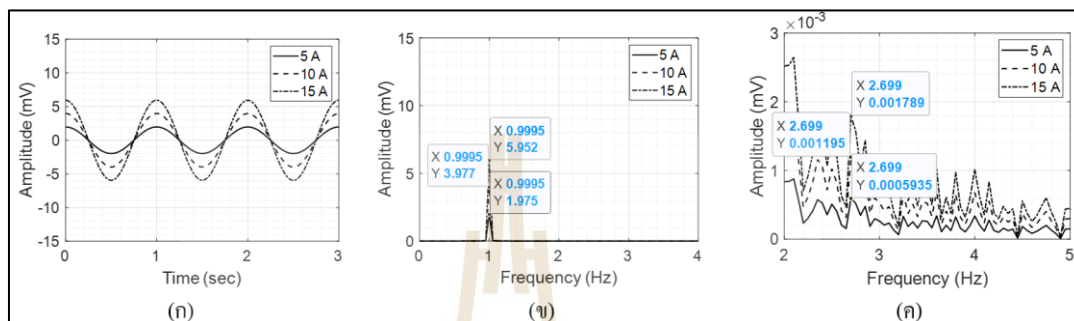
ความเร็ว (RPM)	ความถี่ (Hz)	ขนาดของแอมพลิจูดที่กระแสไฟฟ้า 5 แอมป์	ขนาดของแอมพลิจูดที่กระแสไฟฟ้า 10 แอมป์	ขนาดของแอมพลิจูดที่กระแสไฟฟ้า 15 แอมป์
60	1	1.972 mV.	3.972 mV.	5.944 mV.
	3	0.0024 mV.	0.0048 mV.	0.0072 mV.
90	1.5	2.952 mV.	5.946 mV.	8.890 mV.
	4.5	0.0030 mV.	0.0062 mV.	0.0092 mV.
120	2	3.950 mV.	7.956 mV.	11.910 mV.
	6	0.0033 mV.	0.0066 mV.	0.0098 mV.

**การทดลองที่ 5.3 การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของการวัดสนามแม่เหล็กสองขั้วด้วยอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบชุดที่ 2**

การทดลองนี้จะใช้ข้อมูลของการควบคุมความเร็วรอบจากการทดลองที่ 3.1.2 ซึ่งจะมีค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัวน้อยกว่าการทดลองที่ 5.1 และการทดลองที่ 5.2 โดยที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที ความผิดพลาดที่สถานะคงตัว  $\pm 0.388$  เปอร์เซ็นต์ ความเร็ว 90 รอบต่อนาที ความผิดพลาดที่สถานะคงตัว  $\pm 0.373$  เปอร์เซ็นต์ และความเร็ว 120 รอบต่อนาที ความผิดพลาดที่สถานะคงตัว  $\pm 0.352$  เปอร์เซ็นต์ และใช้ค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองในการทดลองที่ 4.1.1 สำหรับเป็นข้อมูลให้กับการทดลองที่ 5.3.1 ถึงการทดลองที่ 5.3.3 ตามลำดับดังต่อไปนี้



**การทดลองที่ 5.3.1** ความเร็วรอบในการหมุนขดลวด 60 รอบต่อนาที (1 Hz) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก 5, 10 และ 15 แอมป์ ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของขดลวด ดังรูปที่ 5.10 (ก) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 5.10 (ข) และรูปที่ 5.10 (ค)

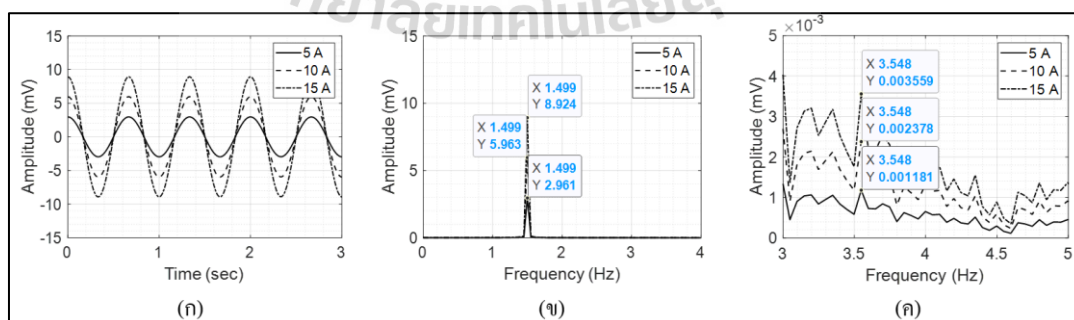


รูปที่ 5.10 (ก) สัญญาณฮาร์โมนิกส์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 1 Hz

(ข) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 1 Hz

(ค) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 3 Hz

**การทดลองที่ 5.3.2** ความเร็วรอบในการหมุนขดลวด 90 รอบต่อนาที (1.5 Hz) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก 5, 10 และ 15 แอมป์ ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของขดลวด ดังรูปที่ 5.11 (ก) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 5.11 (ข) และรูปที่ 5.11 (ค)

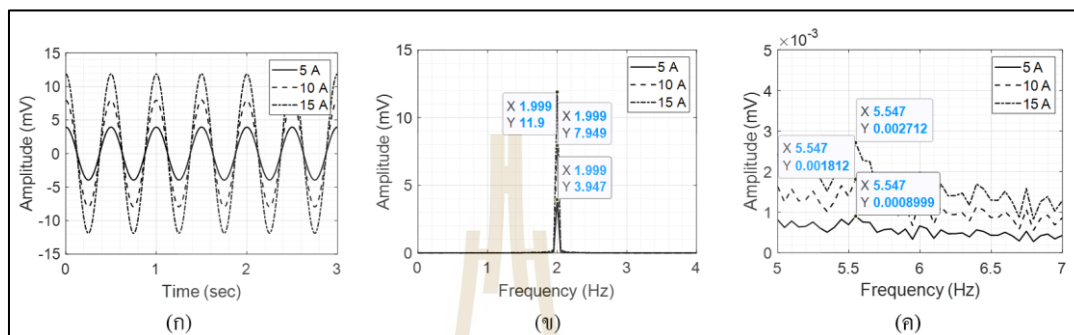


รูปที่ 5.11 (ก) สัญญาณฮาร์โมนิกส์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 1.5 Hz

(ข) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 1.5 Hz

(ค) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 4.5 Hz

**การทดลองที่ 5.3.3** ความเร็วรอบในการหมุนขดลวด 120 รอบต่อนาที (2 Hz) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก 5, 10 และ 15 แอมป์ ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของขดลวด ดังรูปที่ 5.12 (ก) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 5.12 (ข) และรูปที่ 5.12 (ค)



รูปที่ 5.12 (ก) สัญญาณฮาร์โมนิกส์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 2 Hz

(ข) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 2 Hz

(ค) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 6 Hz

จากการทดลองที่ 5.3.1 - 5.3.3 เมื่อพิจารณาในส่วนของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการจำลองการหมุนขดลวดตัวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กสองขั้วจะมีลักษณะเป็นสัญญาณฮาร์โมนิกส์ ดังรูปที่ 5.10 (ก) - 5.12 (ก) และเมื่อความเร็วรอบในการหมุนสูงขึ้นจะส่งผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสูงขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที และเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้กับคอยล์แม่เหล็กก็จะส่งผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสูงขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ 15 แอมป์ ผลที่ได้จากการจำลองแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในการทดลองที่ 5.3 นี้ มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการทดลองในหัวข้อที่ 5.1 และข้อที่ 5.2 แต่เมื่อนำสัญญาณฮาร์โมนิกส์มาทำการวิเคราะห์ในรูปของสเปกตรัม ดังรูปที่ 5.10 (ข) - 5.12 (ข) และรูปที่ 5.10 (ค) - 5.12 (ค) พบว่าสัญญาณฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ 3 เท่าของความถี่การหมุนมีขนาดที่แตกต่างกับการทดลองที่ 5.1 และการทดลองที่ 5.2 ค่อนข้างมาก แสดงดังตารางที่ 5.3 ซึ่งในการทดลองที่ 5.3 นี้ ทำให้สามารถระบุได้ว่า ความผิดพลาดที่สถานะคงตัวที่มีค่าสูงจะส่งผลต่อขนาดของแอมพลิจูดที่ความถี่ 3 เท่าของความถี่การหมุนแห่งขดลวด ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นกับเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กด้วยเทคนิคขดลวดหมุน

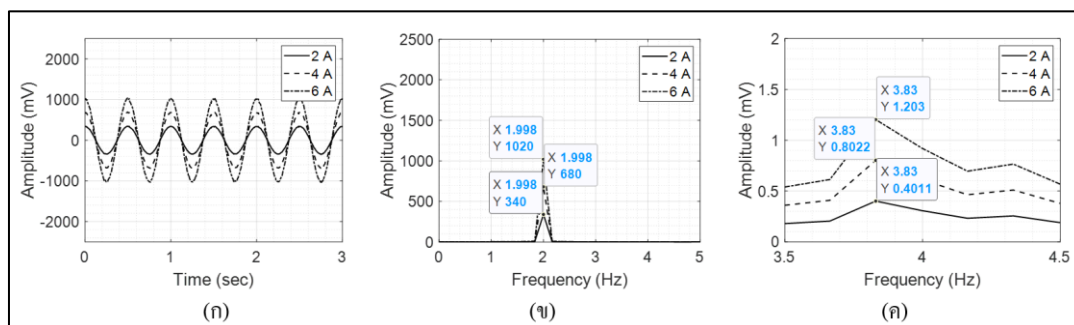
ตารางที่ 5.3 แอมพลิจูดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดลองที่ 5.3.1 - 5.3.3

ความเร็ว (RPM)	ความถี่ (Hz)	ขนาดของแอมพลิจูดที่ กระแสไฟฟ้า 5 แอมป์	ขนาดของแอมพลิจูดที่ กระแสไฟฟ้า 10 แอมป์	ขนาดของแอมพลิจูดที่ กระแสไฟฟ้า 15 แอมป์
60	1	1.975 mV.	3.977 mV.	5.952 mV.
	3	$5.9 \times 10^{-7}$ mV.	$1.2 \times 10^{-6}$ mV.	$1.8 \times 10^{-6}$ mV.
90	1.5	2.961 mV.	5.963 mV.	8.924 mV.
	4.5	$1.1 \times 10^{-6}$ mV.	$2.4 \times 10^{-6}$ mV.	$3.6 \times 10^{-6}$ mV.
120	2	3.947 mV.	7.949 mV.	11.900 mV.
	6	$8.9 \times 10^{-7}$ mV.	$1.8 \times 10^{-6}$ mV.	$2.7 \times 10^{-6}$ mV.

**การทดลองที่ 5.4 การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของการวัดสนามแม่เหล็กส์ขั้วด้วยอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบชุดที่ 1**

การทดลองนี้จะใช้ข้อมูลของการควบคุมความเร็วรอบจากการทดลองที่ 3.1.1 โดยที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที ความผิดพลาดที่สถานะคงตัว  $\pm 5.184$  เปอร์เซ็นต์ ความเร็ว 90 รอบต่อนาที ความผิดพลาดที่สถานะคงตัว  $\pm 4.529$  เปอร์เซ็นต์ และความเร็ว 120 รอบต่อนาที ความผิดพลาดที่สถานะคงตัว  $\pm 2.315$  เปอร์เซ็นต์ และใช้ค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองในการทดลองที่ 4.2.1 สำหรับเป็นข้อมูลให้กับการทดลองที่ 5.4.1 ถึงการทดลองที่ 5.4.3 ตามลำดับดังต่อไปนี้

**การทดลองที่ 5.4.1** ความเร็วรอบในการหมุนขดลวด 60 รอบต่อนาที (1 Hz) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก 2, 4 และ 6 แอมป์ ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของขดลวด ดังรูปที่ 5.13 (ก) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 5.13 (ข) และรูปที่ 5.13 (ค)

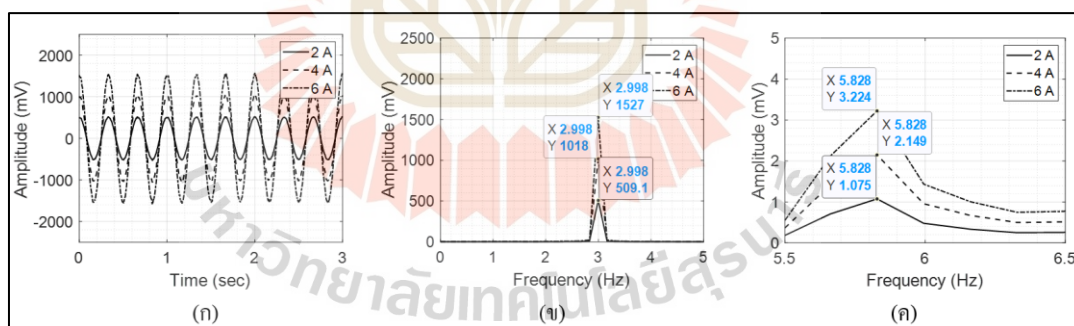


รูปที่ 5.13 (ก) สัญญาณฮาร์โมนิกส์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

(ข) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 2 Hz

(ค) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 4 Hz

**การทดลองที่ 5.4.2** ความเร็วรอบในการหมุนขดลวด 90 รอบต่อนาที (1.5 Hz) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก 2, 4 และ 6 แอมป์ ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของขดลวด ดังรูปที่ 5.14 (ก) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 5.14 (ข) และรูปที่ 5.14 (ค)



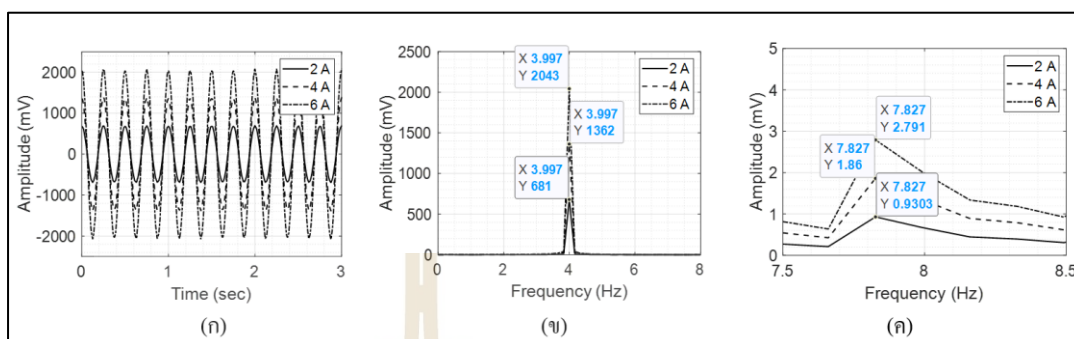
รูปที่ 5.14 (ก) สัญญาณฮาร์โมนิกส์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

(ข) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 3 Hz

(ค) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 6 Hz

**การทดลองที่ 5.4.3** ความเร็วรอบในการหมุนขดลวด 120 รอบต่อนาที (2 Hz) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก 2, 4 และ 6 แอมป์ ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า

ของขดลวด ดังรูปที่ 5.15 (ก) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 5.15 (ข) และรูปที่ 5.15 (ค)



รูปที่ 5.15 (ก) สัญญาณฮาร์โมนิกส์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

(ข) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 4 Hz

(ค) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 8 Hz

จากการทดลองที่ 5.4.1 - 5.4.3 เมื่อพิจารณาในส่วนของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากจำลองการหมุนขดลวดตัวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กสี่ขั้วจะมีลักษณะเป็นสัญญาณฮาร์โมนิกส์ ดังรูปที่ 5.13 (ก) - 5.15 (ก) ซึ่งจะมีขนาดของแอมพลิจูดที่สูงกว่าการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กสองขั้ว เนื่องจากจำนวนของคอยล์แม่เหล็กที่มีมากกว่าถึงสองเท่า และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบการหมุนให้สูงขึ้นจะส่งผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าสูงขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ความเร็ว 120 รอบต่อวินาที และเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้กับคอยล์แม่เหล็กก็จะส่งผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสูงขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ 6 แอมป์ ผลที่ได้จากการจำลองแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในการทดลองที่ 5.4 นี้ จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการจำลองแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแม่เหล็กสองขั้ว เมื่อนำสัญญาณฮาร์โมนิกส์มาทำการวิเคราะห์ในรูปของสเปกตรัม ดังรูปที่ 5.13 (ข) - 5.15 (ข) และรูปที่ 5.13 (ค) - 5.15 (ค) พบว่ามีสัญญาณฮาร์โมนิกส์ที่ 4 เท่าของความถี่การหมุนเกิดขึ้นของการทดลองที่ 5.4.1 - 5.4.3 แสดงดังตารางที่ 5.4 และเมื่อนำผลการจำลองแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำจากการทดลองที่ 5.4 ที่มีค่าความผิดพลาดของการควบคุมความเร็วรอบที่สถานะคงตัวไปเปรียบเทียบกับ การจำลองแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับการทดลองที่ 4.5 ซึ่งไม่มีค่าความผิดพลาดของความเร็วรอบที่สถานะคงตัว จะพบว่า สัญญาณฮาร์โมนิกส์ที่ 4 เท่าของความถี่การหมุนเกิดขึ้นมาจากความผิดพลาดของตัวควบคุมความเร็วรอบที่สถานะคงตัว

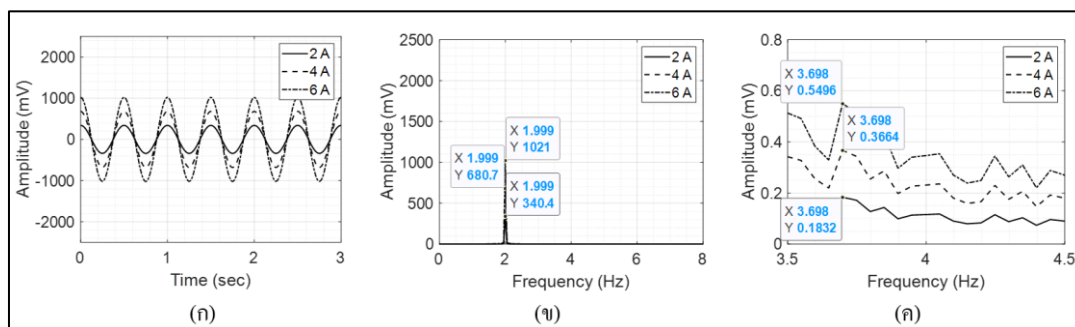
ตารางที่ 5.4 แอมพลิจูดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดลองที่ 5.4.1 - 5.4.3

ความเร็ว (RPM)	ความถี่ (Hz)	ขนาดของแอมพลิจูดที่ กระแสไฟฟ้า 2 แอมป์	ขนาดของแอมพลิจูดที่ กระแสไฟฟ้า 4 แอมป์	ขนาดของแอมพลิจูดที่ กระแสไฟฟ้า 6 แอมป์
60	2	340.0 mV.	680.0 mV.	1020.0 mV.
	4	0.401 mV.	0.802 mV.	1.203 mV.
90	3	509.1 mV.	1018.0 mV.	1527.0 mV.
	6	1.075 mV.	2.149 mV.	3.224 mV.
120	4	681.0 mV.	1362.0 mV.	2043.0 mV.
	8	0.930 mV.	7.860 mV.	2.791 mV.

**การทดลองที่ 5.5 การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของการวัดสนามแม่เหล็กชี้ด้วยอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบชุดที่ 2**

การทดลองนี้จะใช้ข้อมูลของการควบคุมความเร็วรอบจากการทดลองที่ 3.1.2 ซึ่งจะมีค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัวน้อยกว่าการทดลองที่ 5.4 โดยที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที ความผิดพลาดที่สถานะคงตัว  $\pm 0.388$  เปอร์เซ็นต์ ความเร็ว 90 รอบต่อนาที ความผิดพลาดที่สถานะคงตัว  $\pm 0.373$  เปอร์เซ็นต์ และความเร็ว 120 รอบต่อนาที ความผิดพลาดที่สถานะคงตัว  $\pm 0.352$  เปอร์เซ็นต์ และใช้ค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากจำลองในการทดลองที่ 4.2.1 สำหรับเป็นข้อมูลให้กับ การทดลองที่ 5.5.1 ถึงการทดลองที่ 5.5.3 ตามลำดับ ดังต่อไปนี้

**การทดลองที่ 5.5.1** ความเร็วรอบในการหมุนขดลวด 60 รอบต่อนาที (1 Hz) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก 2, 4 และ 6 แอมป์ ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของขดลวด ดังรูปที่ 5.16 (ก) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 5.16 (ข) และรูปที่ 5.16 (ค)

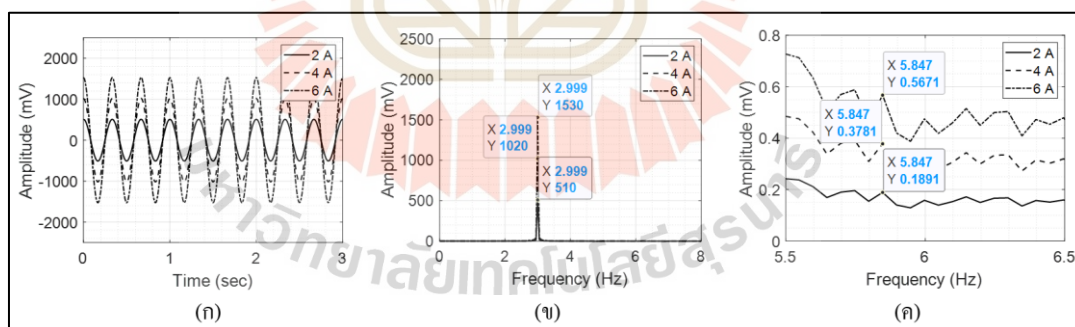


รูปที่ 5.16 (ก) สัญญาณฮาร์โมนิกส์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

(ข) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 2 Hz

(ค) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 4 Hz

**การทดลองที่ 5.5.2** ความเร็วรอบในการหมุนตลอด 90 รอบต่อนาที (1.5 Hz) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอล์ยแม่เหล็ก 2, 4 และ 6 แอมป์ ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าของขดลวด ดังรูปที่ 5.17 (ก) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 5.17 (ข) และรูปที่ 5.17 (ค)



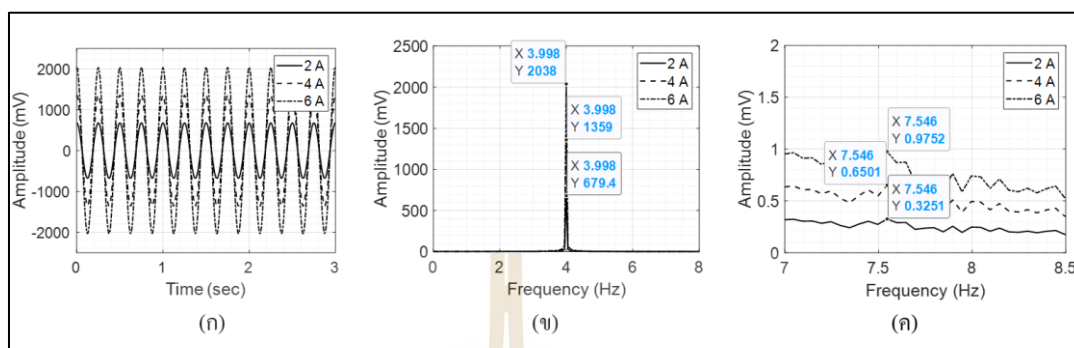
รูปที่ 5.17 (ก) สัญญาณฮาร์โมนิกส์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

(ข) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 3 Hz

(ค) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 6 Hz

**การทดลองที่ 5.5.3** ความเร็วรอบในการหมุนตลอด 120 รอบต่อนาที (2 Hz) กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอล์ยแม่เหล็ก 2, 4 และ 6 แอมป์ ผลการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้า

ของขดลวด ดังรูปที่ 5.18 (ก) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 5.18 (ข) และรูปที่ 5.18 (ค)



รูปที่ 5.18 (ก) สัญญาณฮาร์โมนิกส์ของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

(ข) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 4 Hz

(ค) ขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 8 Hz

จากการทดลองที่ 5.5.1 - 5.5.3 เมื่อพิจารณาในส่วนของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการจำลองการหมุนขดลวดตัวนำตัดผ่านสนามแม่เหล็กที่ขั้วจะมีลักษณะเป็นสัญญาณฮาร์โมนิกส์ ดังรูปที่ 5.16 (ก) - 5.18 (ก) เมื่อเพิ่มความเร็วรอบการหมุนให้สูงขึ้นจะส่งผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าสูงขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที และเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้กับคอยล์แม่เหล็กก็จะส่งผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสูงขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ 6 แอมป์ ผลที่ได้จากการจำลองแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในการทดลองที่ 5.5 นี้ จะมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการจำลองแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแม่เหล็กขั้วในการทดลองที่ 5.4 เมื่อนำสัญญาณฮาร์โมนิกส์มาทำการวิเคราะห์ในรูปของสเปกตรัม ดังรูปที่ 5.16 (ข) - 5.18 (ข) และรูปที่ 5.16 (ค) - 5.18 (ค) พบว่า มีสัญญาณฮาร์โมนิกส์ที่ 4 เท่าของความถี่การหมุนเกิดขึ้น เช่นเดียวกันกับการทดลองที่ 5.4 แต่จะมีขนาดของแอมพลิจูดที่น้อยกว่าค่อนข้างมาก แสดงดังตารางที่ 5.5 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลกระทบที่ส่งผลต่อการวัดสนามแม่เหล็ก เนื่องจากความผิดพลาดของความเร็วรอบการหมุนที่สถานะคงตัว



ตารางที่ 5.5 แอมพลิจูดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดลองที่ 5.5.1 - 5.5.3

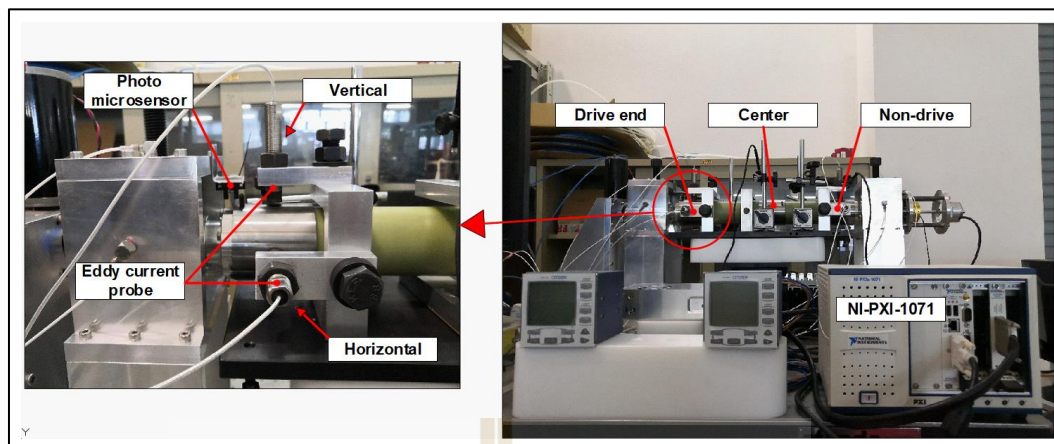
ความเร็ว (RPM)	ความถี่ (Hz)	ขนาดของแอมพลิจูดที่กระแสไฟฟ้า 2 แอมป์	ขนาดของแอมพลิจูดที่กระแสไฟฟ้า 4 แอมป์	ขนาดของแอมพลิจูดที่กระแสไฟฟ้า 6 แอมป์
60	2	340.4 mV.	680.7 mV.	1021.0 mV.
	4	0.183 mV.	0.366 mV.	0.549 mV.
90	3	510.0 mV.	1020.0 mV.	1530.0 mV.
	6	0.189 mV.	0.378 mV.	0.567 mV.
120	4	679.4 mV.	1359.0 mV.	2038.0 mV.
	8	0.189 mV.	0.378 mV.	0.567 mV.

#### 5.4 การประมาณค่าและวิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอกบรรจุขดลวดตัวนำสำหรับการวัดสนามแม่เหล็กสี่ขั้ว

ในการทดลองนี้จะทำการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการจำลองสนามแม่เหล็กสี่ขั้ว แบบ Skew quadrupole magnet เท่านั้น เนื่องจากขนาดของสนามแม่เหล็กแบบ Normal quadrupole magnet มีค่าเท่ากันแต่มีทิศทางของสนามแม่เหล็กแตกต่างกัน และการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอกที่บรรจุขดลวดตัวนำจะไม่ส่งผลต่อการวัดสนามแม่เหล็กสองขั้วจึงไม่นำสนามแม่เหล็กชนิดนี้มาวิเคราะห์ผลกระทบทที่เกิดจากการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก โดยการทดลองจะเริ่มจากการวัดระยะการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก ดังต่อไปนี้

##### 5.4.1 การทำงานของอุปกรณ์วัดการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอกที่บรรจุขดลวดตัวนำ

การวัดการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอกที่บรรจุขดลวดเหนี่ยวนำ สำหรับการติดตั้งและรายละเอียดของอุปกรณ์ได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.3.1 ซึ่งในส่วนนี้จะใช้ชุดอุปกรณ์ National instrument จะประกอบไปด้วย 2 ส่วนการทำงาน ได้แก่ **ส่วนที่ 1** การควบคุมความเร็วรอบการหมุนแท่งทรงกระบอกที่บรรจุขดลวดตัวนำแบบวงปิด และใช้โปรแกรม LabVIEW สำหรับการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ผ่านอุปกรณ์ NI-PXI-1042 เช่นเดียวกันกับการทดลองในหัวข้อที่ 5.2 **ส่วนที่ 2** การวัดระยะการเหวี่ยงตัวจะใช้โปรแกรม LabVIEW เช่นเดียวกัน โดยจะเก็บข้อมูลผ่านทาง NI-PXI-1071 แสดงดังรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 การวัดระยะการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก

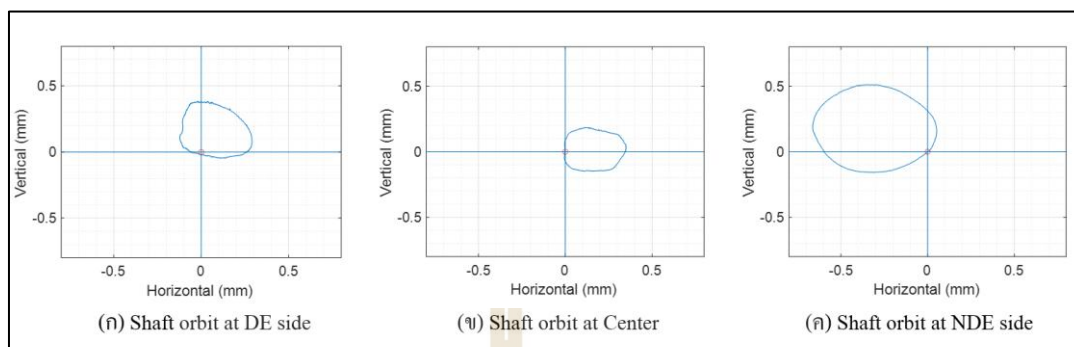
ซึ่งในการทดลองนี้จะเป็นการวัดระยะการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอกขณะหมุนรอบแกนอ้างอิง (Center of rotation) มีจุดวัดตลอดความยาว 3 จุด ได้แก่ ตำแหน่ง Driver end, ตำแหน่ง Center และตำแหน่ง Non-driver end

#### 5.4.2 การวัดระยะการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอกที่บรรจุจุดลวดตัวนำ

การวัดระยะการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอกที่บรรจุจุดลวดเห็นยวนำเป็นการทดลองเพื่อใช้เป็นข้อกำหนดของการระบุจุดศูนย์กลางและรัศมีการเหวี่ยงตัวออกจากแนวแกนของแท่งทรงกระบอก สำหรับใช้เป็นข้อมูลการประมาณค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก โดยวงโคจรการเคลื่อนที่ที่สามารถอธิบายดังรูปที่ 5.20 กำหนดให้ O คือจุดศูนย์กลางการหมุนของเพลลาที่จุดสมดุล (Bearing axis), S คือจุดศูนย์กลางของวงโคจรการเหวี่ยงตัว, G คือจุดศูนย์กลางการหมุนรอบแกนเพลลา (Spin axis), R คือรัศมีของเพลลาหรือแท่งทรงกระบอก และ  $e$  คือรัศมีการเหวี่ยงตัว สำหรับการเก็บข้อมูลระยะการเหวี่ยงตัวที่ความเร็วในการทดสอบ คือ 60, 90 และ 120 รอบต่อนาที ตามลำดับ ดังการทดลองต่อไปนี้

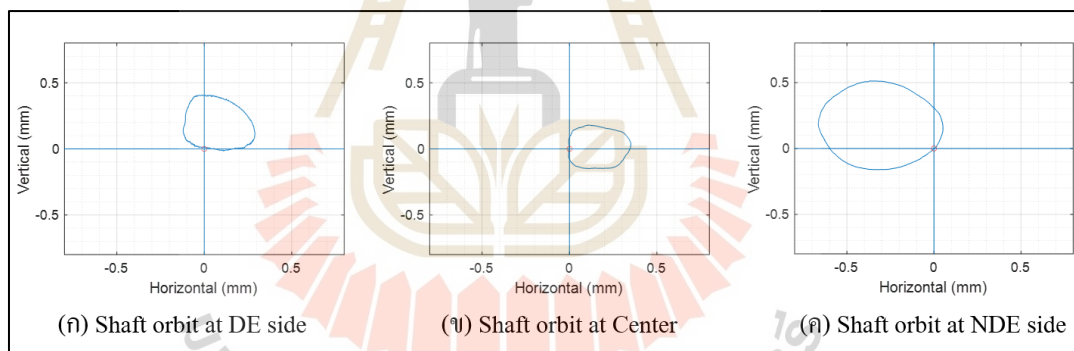


### การทดลองที่ 5.6.2 การหมุนแท่งทรงกระบอกที่ความเร็ว 90 รอบต่อนาที (1.5 Hz)



รูปที่ 5.22 ลักษณะการเคลื่อนที่ของขดลวดที่ความเร็วรอบการหมุน 90 RPM

### การทดลองที่ 5.6.3 การหมุนแท่งทรงกระบอกที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที (2 Hz)



รูปที่ 5.23 ลักษณะการเคลื่อนที่ของขดลวดที่ความเร็วรอบการหมุน 120 RPM

จากการทดลองที่ 5.6.1 - 5.6.3 เมื่อพิจารณารูปที่ 5.21 - 5.23 (ก) (ข) และ (ค) ของแต่ละความเร็วรอบการหมุนแท่งทรงกระบอก พบว่าจะมีลักษณะของวงโคจรที่เหวี่ยงตัวออกจากจุดศูนย์กลางการหมุน (เคลื่อนที่จากตำแหน่ง O ไปยังตำแหน่ง S เมื่อพิจารณารูปที่ 5.23) และมีระยะการเหวี่ยงตัวในแนวแกนตั้ง (Horizontal) และแนวแกนนอน (Vertical) เพิ่มขึ้นตามเวลาเร็วรอบ (รัศมี  $e$  เพิ่มขึ้น) เนื่องจากความเร็วรอบในการหมุนมีผลต่อแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง โดยในตำแหน่ง Drive end (DE) แท่งทรงกระบอกจะมีการยกตัวสูงขึ้นจากจุดศูนย์กลางและโคจรอยู่ในควอดแรนต์ที่ 1 และ 2 ในตำแหน่ง Center (C) แท่งทรงกระบอกจะโคจรอยู่ในควอดแรนต์ที่ 1 และ 4 ในส่วนของตำแหน่ง Non - drive end จะโคจรอยู่ในควอดแรนต์ที่ 2 และ 3

โดยระยะการเหวี่ยงตัวแสดงดังตารางที่ 5.6 และระยะการเหวี่ยงตัวสูงที่สุดจะอยู่ที่ตำแหน่ง Non - drive end ในแนวแกนนอนเป็นระยะ 0.718663 มิลลิเมตร ที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เนื่องจากตำแหน่ง Non - drive end จะไม่มีการจับยึดที่ตัวเพลาลมเหมือนกับตำแหน่ง Drive end ที่มีการคัปปลิงกับมอเตอร์ จึงทำให้ระยะการเหวี่ยงตัวเพลามีค่าสูงกว่าบริเวณ Drive end และ Center ผลที่ได้จากการทดลองนี้จะนำไปเป็นข้อมูลเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบที่ทำให้เกิดความผิดพลาดของเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กในหัวข้อที่ 5.4.4 ต่อไป

ตารางที่ 5.6 ระยะการเหวี่ยงตัวตำแหน่งต่าง ๆ ในแนวแกนตั้งและแนวแกนนอน

ความเร็ว (RPM)	ระยะการเหวี่ยงตัว ตำแหน่ง Drive End (mm)		ระยะการเหวี่ยงตัว ตำแหน่ง Center (mm)		ระยะการเหวี่ยงตัวตำแหน่ง Non-drive end (mm)	
	แกนตั้ง	แกนนอน	แกนตั้ง	แกนนอน	แกนตั้ง	แกนนอน
60	0.451021	0.411821	0.336405	0.360452	0.675485	0.716419
90	0.436181	0.416105	0.340736	0.357404	0.684221	0.717541
120	0.437472	0.412297	0.34025	0.361736	0.683250	0.718663

#### 5.4.3 ขั้นตอนการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับสนามแม่เหล็กสี่ขั้วที่มีการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก

การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับการทดลองนี้ เพื่อวิเคราะห์ความผิดพลาดที่เกิดจากระยะการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอกที่บรรจุขดลวดตัวนำเท่านั้น โดยการเขียนโปรแกรม MATLAB เพื่อจำลองการเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสี่ขั้วแบบ Skew quadrupole magnet ในอุดมคติ และใช้ข้อมูลระยะการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอกจากการทดลองที่ 5.6.1 ถึงการทดลองที่ 5.6.3 สำหรับการประมาณค่าและวิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นจากระยะการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก โดยไม่พิจารณาความผิดพลาดที่สถานะคงตัวของการควบคุมความเร็วรอบ ขั้นตอนการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำแสดงดัง แผนภูมิรูปภาพต่อไปนี้



รูปที่ 5.24 ขั้นตอนการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก

#### 5.4.4 การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับสนามแม่เหล็กสี่ขั้วที่มีการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก

สำหรับการทดลองในหัวข้อนี้จะนำผลที่ได้จากการวัดระยะการเหวี่ยงตัวในการทดลองที่ 5.6.1 ถึงการทดลองที่ 5.6.3 ที่ตำแหน่ง Center (C) มาเป็นข้อมูลในการกำหนดตำแหน่งจุดศูนย์กลางการหมุนให้กับแท่งทรงกระบอก เนื่องจากที่ตำแหน่ง Center จะเป็นตำแหน่งที่ใช้ในการติดตั้งแม่เหล็กไฟฟ้า จึงทำให้ไม่พิจารณาบริเวณ Drive End (DE) และ Non-Driver End (NDE) เนื่องจากตำแหน่งดังกล่าวอยู่ห่างจากสนามแม่เหล็กค่อนข้างมาก โดยตำแหน่งและรัศมีการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอกมาจากการประมาณค่ารัศมีวงโคจรการเคลื่อนที่ของแท่งทรงกระบอกในการทดลองที่ 5.6 ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 จุดศูนย์กลางและรัศมีการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก

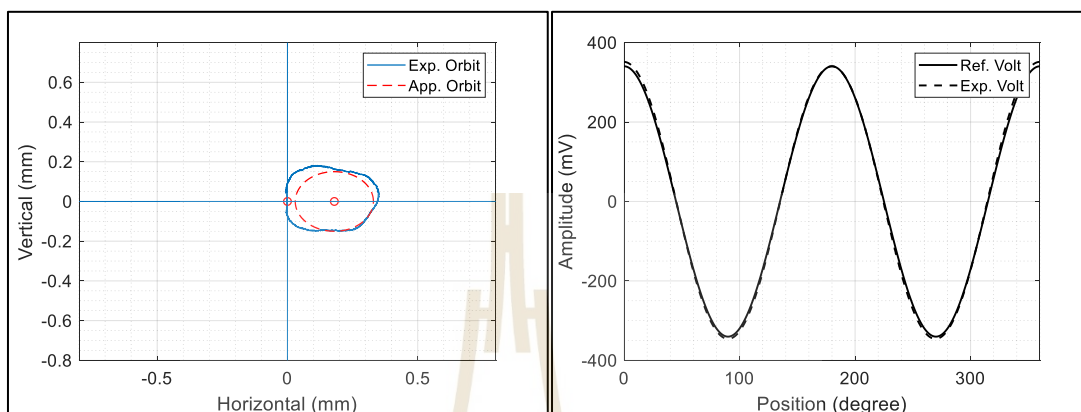
ความเร็วรอบ (RPM)	ตำแหน่งจุดศูนย์กลางการเหวี่ยงตัว (S)		รัศมีการเหวี่ยงตัว (e) (mm)
	แกน X (mm)	แกน Y (mm)	
60	0	0.180	0.180
90	0	0.179	0.179
120	0	0.181	0.181

**การทดลองที่ 5.7 การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับสนามแม่เหล็กสี่ขั้วที่มีการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก**

ในทดลองนี้จะใช้ข้อมูลการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอกจากตารางที่ 5.7 โดยการประมาณค่าจากจุดสูงสุดต่ำสุดของแต่ละแนวแกน และกำหนดความเร็วรอบของการหมุนแท่งทรงกระบอกแบบคงที่ โดยไม่มีค่าความผิดพลาดของความเร็วรอบที่สถานะคงตัว เพื่อจำแนกและวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอกที่บรรจุขดลวดตัวนำสำหรับการวัดสนามแม่เหล็กสี่ขั้วแบบ Skew quadrupole magnet และใช้ค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากการจำลองในการทดลองที่ 4.2.1 สำหรับเป็นข้อมูลให้กับการทดลองที่ 5.7.1 ถึงการทดลองที่ 5.7.3 ตามลำดับ ดังการทดลองต่อไปนี้

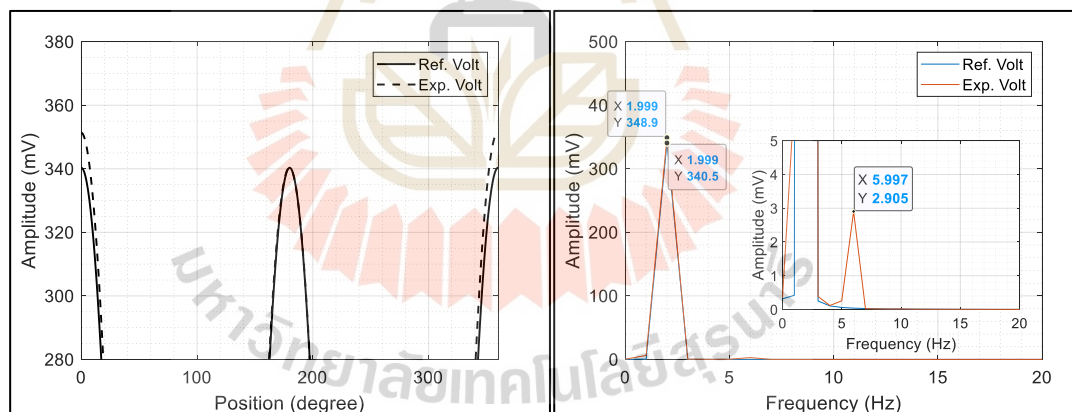
**การทดลองที่ 5.7.1** ความเร็วรอบในการหมุนขดลวด 60 รอบต่อนาที (1 Hz) รัศมีการเหวี่ยงตัว 0.180 มิลลิเมตร จุดศูนย์กลางการหมุนที่ตำแหน่ง (0, 0.180)

- กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก **2 แอมป์** วงโคจรการเคลื่อนที่  
 ดังรูปที่ 5.25 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 5.25 (ข) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  
 ดังรูปที่ 5.25 (ค) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 5.25 (ง)



(ก) วงโคจรการเคลื่อนที่ของขดลวดตัวนำ

(ข) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



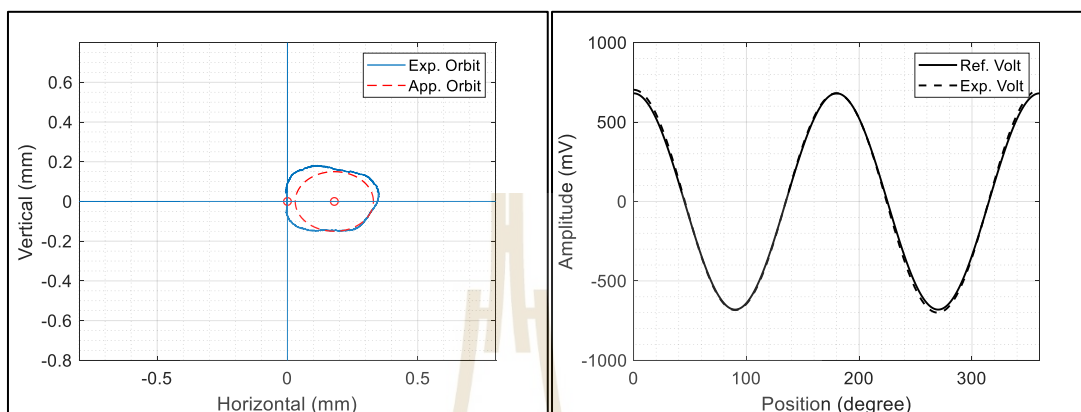
(ค) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

(ง) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

รูปที่ 5.25 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 2 แอมป์

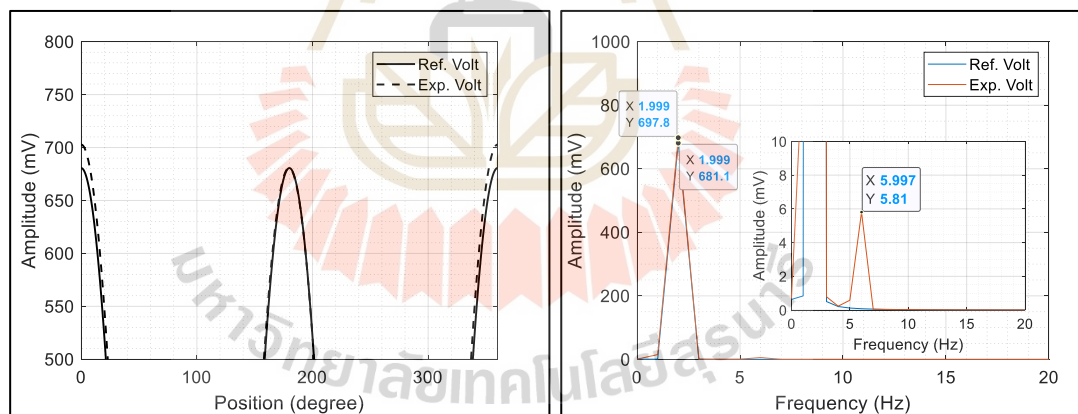


- กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก **4 แอมป์** วงโคจรการเคลื่อนที่  
 ดังรูปที่ 5.26 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 5.26 (ข) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  
 ดังรูปที่ 5.26 (ค) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูริเยร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 5.26 (ง)



(ก) วงโคจรการเคลื่อนที่ของขดลวดตัวนำ

(ข) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

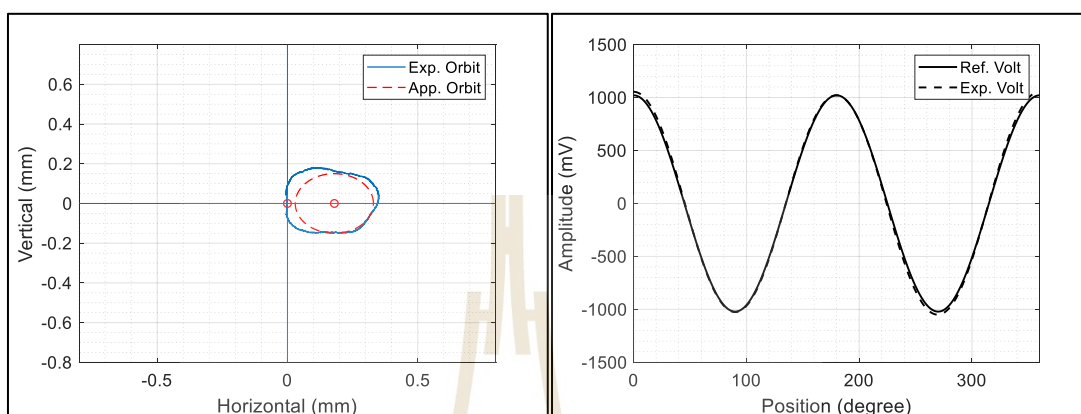


(ค) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

(ง) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

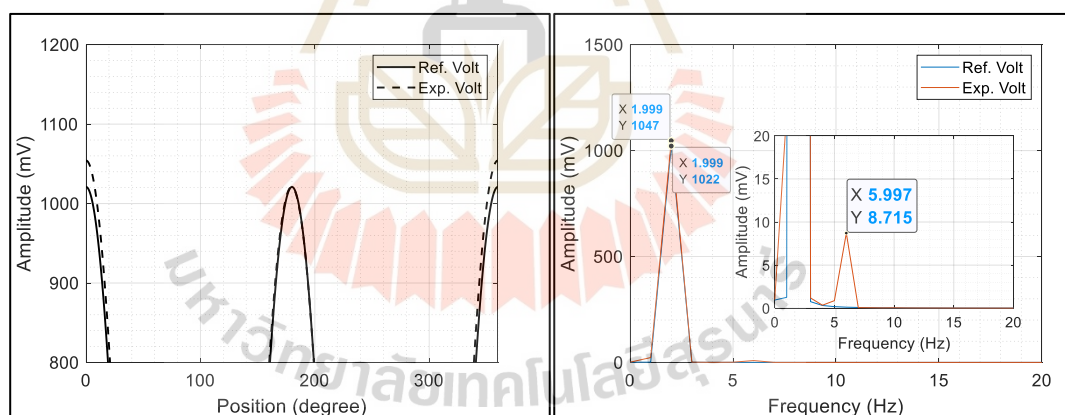
รูปที่ 5.26 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 4 แอมป์

- กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก **6 แอมป์** วงโคจรการเคลื่อนที่  
 ดังรูปที่ 5.27 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 5.27 (ข) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  
 ดังรูปที่ 5.27 (ค) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 5.27 (ง)



(ก) วงโคจรการเคลื่อนที่ของขดลวดตัวนำ

(ข) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



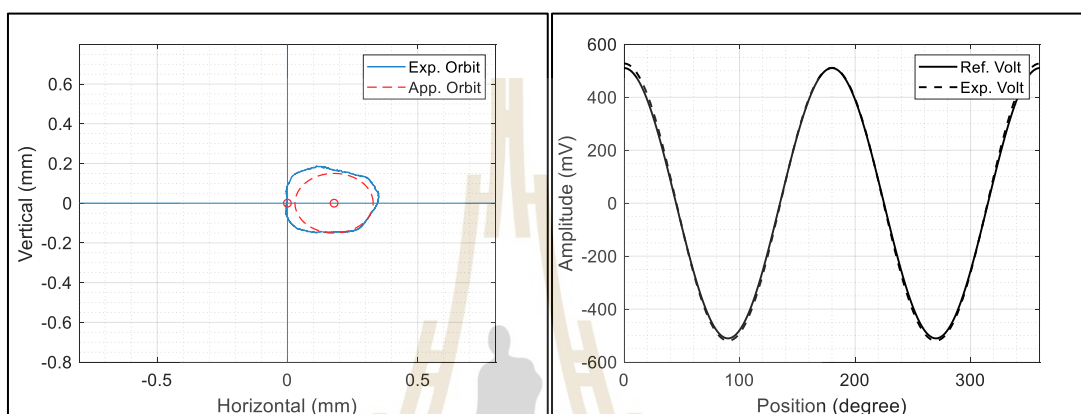
(ค) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

(ง) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

รูปที่ 5.27 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 6 แอมป์

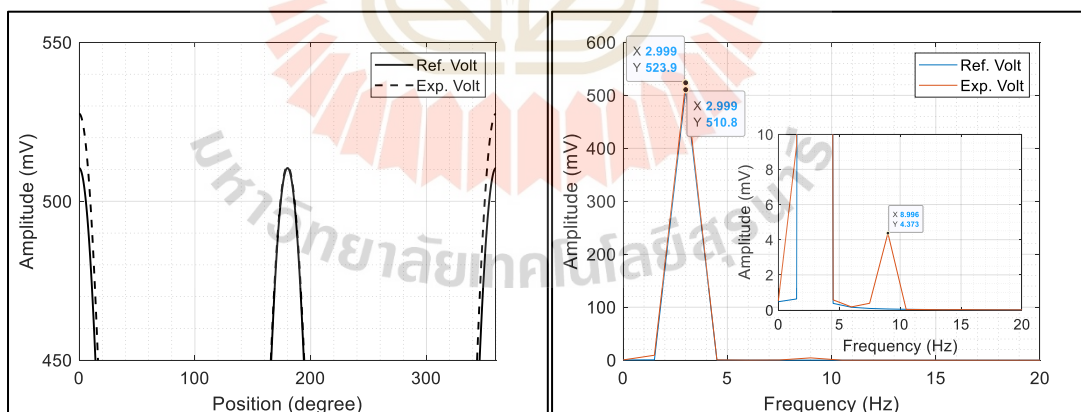
**การทดลองที่ 5.7.2** ความเร็วรอบในการหมุนตลอด 90 รอบต่อนาที (1.5 Hz) รัศมีการเหวี่ยงตัว 0.179 มิลลิเมตร จุดศูนย์กลางการหมุนอยู่ที่ตำแหน่ง (0, 0.179)

- กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก **2 แอมป์** วงโคจรการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 5.28 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 5.28 (ข) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 5.28 (ค) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 5.28 (ง)



(ก) วงโคจรการเคลื่อนที่ของขดลวดตัวนำ

(ข) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

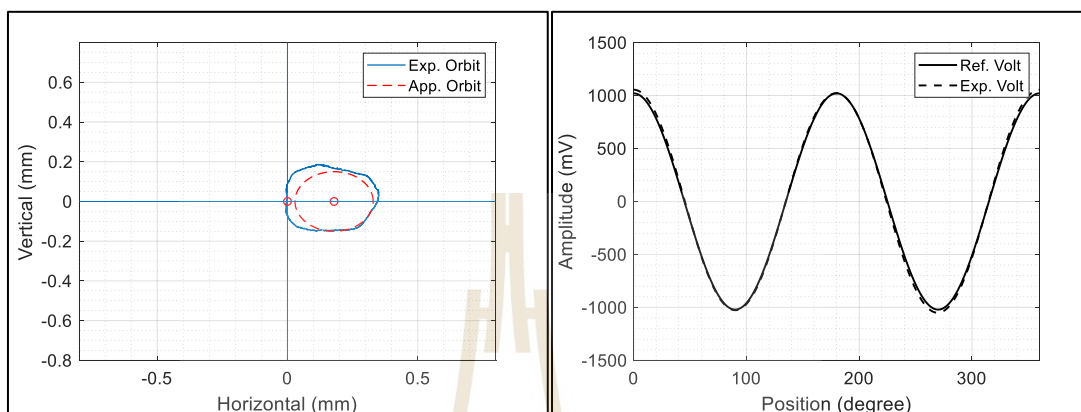


(ค) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

(ง) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

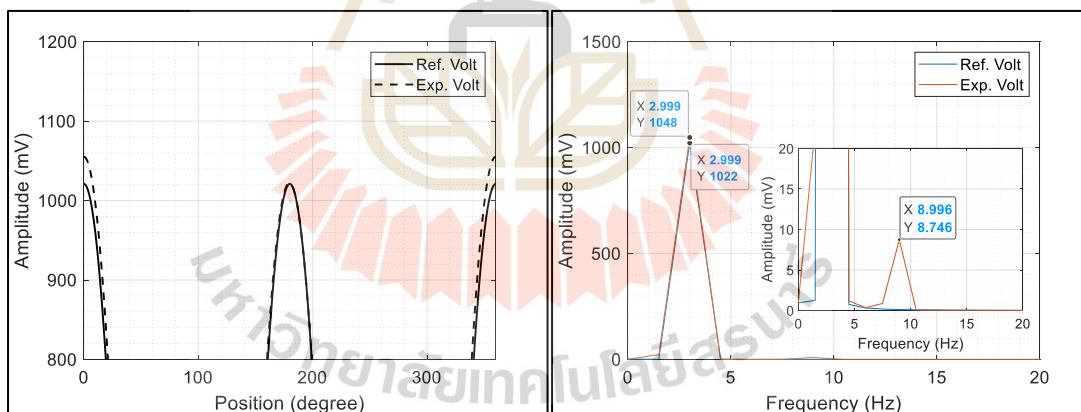
รูปที่ 5.28 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 90 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 2 แอมป์

- กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก **4 แอมป์** วงโคจรการเคลื่อนที่  
 ดังรูปที่ 5.29 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 5.29 (ข) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  
 ดังรูปที่ 5.29 (ค) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูริเยร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 5.29 (ง)



(ก) วงโคจรการเคลื่อนที่ของขดลวดตัวนำ

(ข) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

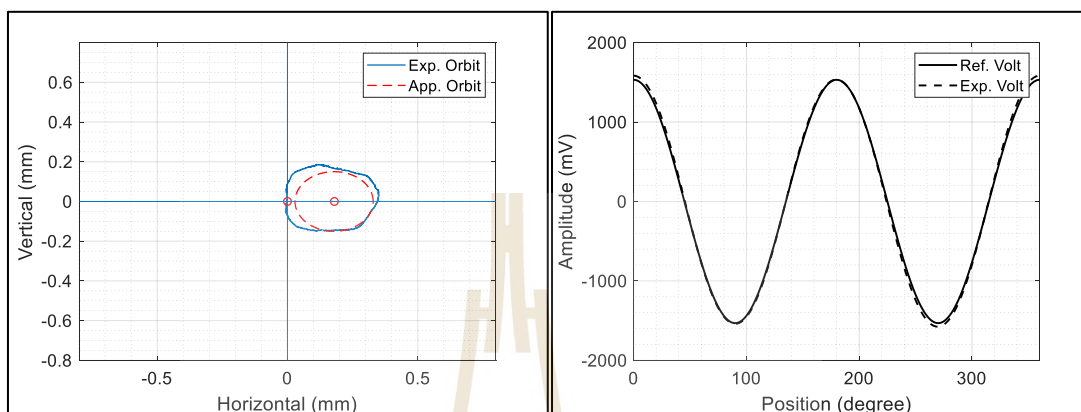


(ค) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

(ง) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

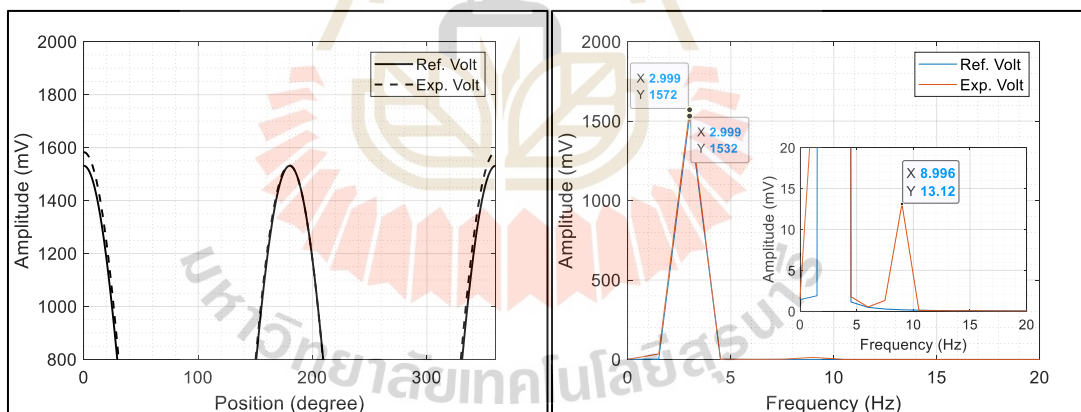
รูปที่ 5.29 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 90 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 4 แอมป์

- กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก **6 แอมป์** วงโคจรการเคลื่อนที่  
 ดังรูปที่ 5.30 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 5.30 (ข) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  
 ดังรูปที่ 5.30 (ค) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 5.30 (ง)



(ก) วงโคจรการเคลื่อนที่ของขดลวดตัวนำ

(ข) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



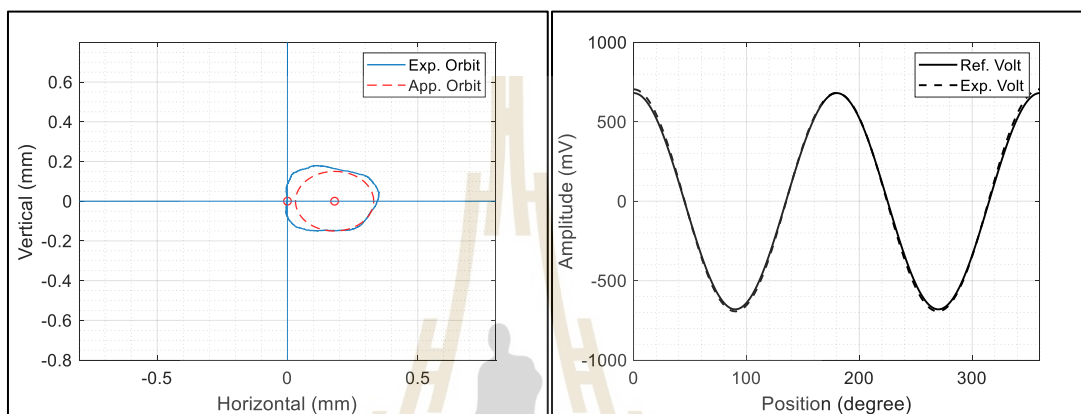
(ค) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

(ง) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

รูปที่ 5.30 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 90 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 6 แอมป์

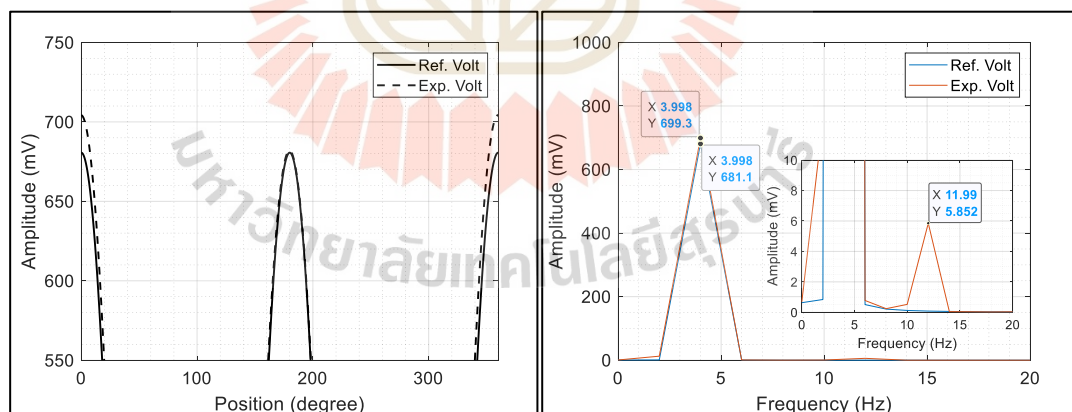
**การทดลองที่ 5.7.3** ความเร็วรอบในการหมุนขดลวด 120 รอบต่อนาที (2 Hz) รัศมีการเหวี่ยงตัว 0.181 มิลลิเมตร จุดศูนย์กลางการหมุนอยู่ที่ตำแหน่ง (0, 0.181)

- กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก **2 แอมป์** วงโคจรการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 5.31 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 5.31 (ข) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 5.31 (ค) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 5.31 (ง)



(ก) วงโคจรการเคลื่อนที่ของขดลวดตัวนำ

(ข) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

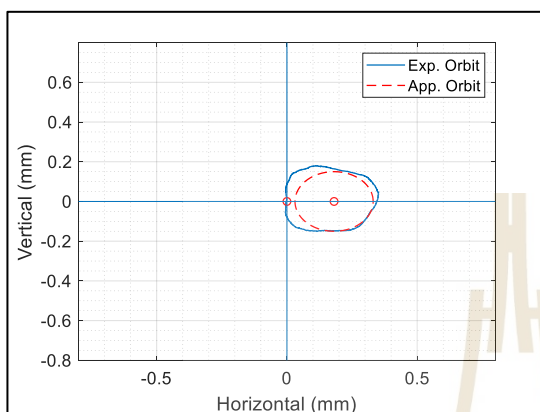


(ค) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

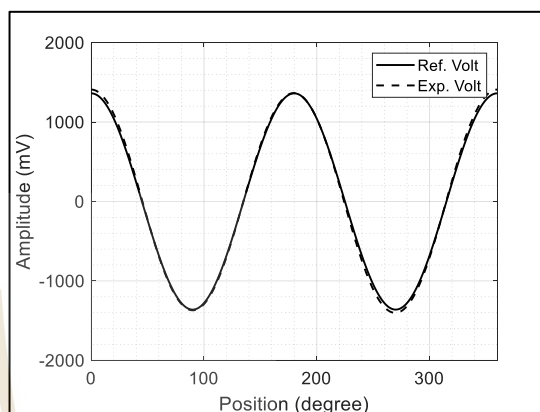
(ง) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

รูปที่ 5.31 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 2 แอมป์

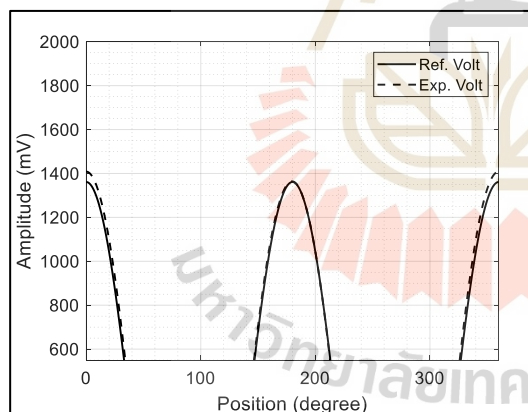
- กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก **4 แอมป์** วงโคจรการเคลื่อนที่  
 ดังรูปที่ 5.32 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 5.32 (ข) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  
 ดังรูปที่ 5.32 (ค) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูริเยร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 5.32 (ง)



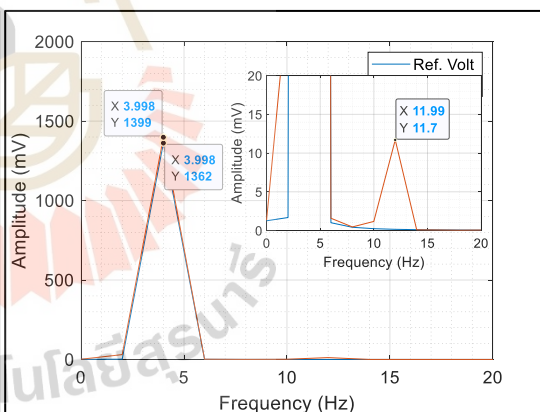
(ก) วงโคจรการเคลื่อนที่ของขดลวดตัวนำ



(ข) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



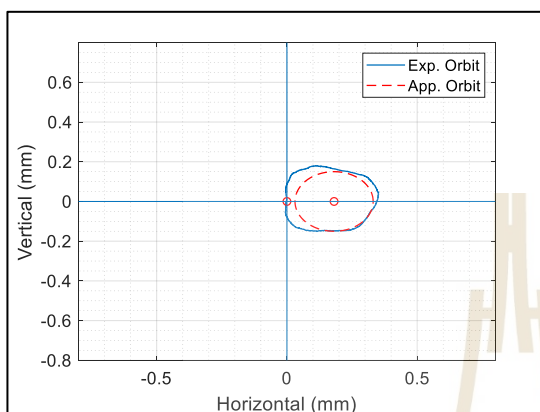
(ค) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



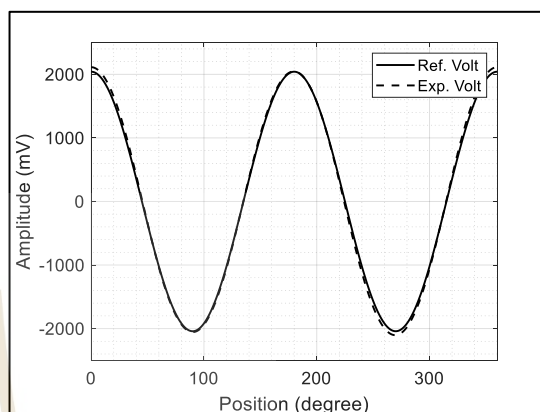
(ง) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

รูปที่ 5.32 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 4 แอมป์

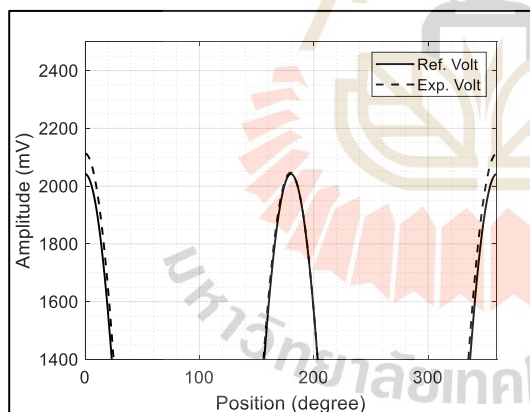
- กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก **6 แอมป์** วงโคจรการเคลื่อนที่  
 ดังรูปที่ 5.33 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 5.33 (ข) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  
 ดังรูปที่ 5.33 (ค) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูริเยร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 5.33 (ง)



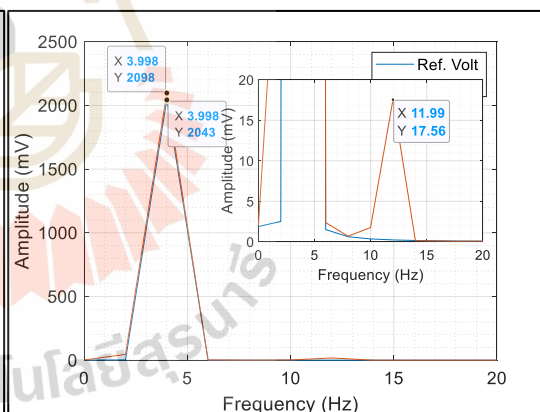
(ก) วงโคจรการเคลื่อนที่ของขดลวดตัวนำ



(ข) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



(ค) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



(ง) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

รูปที่ 5.33 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 6 แอมป์

จากการทดลองที่ 5.7.1 - 5.7.3 เมื่อพิจารณาวงโคจรการเคลื่อนที่ของแท่ง  
 ทรงกระบอกที่เกิดการเหวี่ยงตัวดังรูปที่ 5.25 (ก) - 5.33 (ก) โดยเส้นที่บคือวงโคจรที่ได้จาก  
 การทดลองและเส้นประคือวงโคจรสำหรับการประมาณค่ารัศมีการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก



ในลักษณะของวงกลม เพื่อความง่ายสำหรับการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ พบว่าเมื่อความเร็วรอบสูงขึ้นจะทำให้รัศมีของการเหวี่ยงตัวสูงขึ้น และสูงสุดที่ 0.181 มิลลิเมตร ที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที และการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอกยังส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูด ดังรูปที่ 5.25 (ข,ค) - 5.33 (ข,ค) เมื่อเทียบกับการจำลองแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในอุดมคติที่ไม่เกิดการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก (พิจารณาการเคลื่อนที่ 1 รอบ 360 องศา ในทิศทวนเข็มนาฬิกา) และเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้กับคอยล์แม่เหล็กก็จะส่งผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าสูงขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ 6 แอมป์เช่นเดียวกัน แสดงดังตารางที่ 5.8 แต่การเพิ่มกระแสไฟฟ้าจะไม่ส่งผลต่อการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอกให้มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง เมื่อนำสัญญาณฮาร์โมนิกส์มาทำการวิเคราะห์ในรูปของสเปกตรัม ดังรูปที่ 5.25 (ง) - 5.33 (ง) พบว่ามีสัญญาณฮาร์โมนิกส์ที่ความถี่ 6 เท่าของความถี่การหมุนเกิดขึ้น ซึ่งแตกต่างกับการทดลองที่ 5.4 และการทดลองที่ 5.5 ที่จะเกิดความถี่ที่ 4 เท่าของความถี่การหมุน ดังนั้นอาจจะสรุปได้ว่า การเกิดสัญญาณฮาร์โมนิกส์ที่ 6 เท่าของความถี่การหมุนผลมาจากการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก และเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้นกับเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กด้วยเทคนิคขดลวดหมุนเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 5.8 แอมพลิจูดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดลองที่ 5.7.1 - 5.7.3

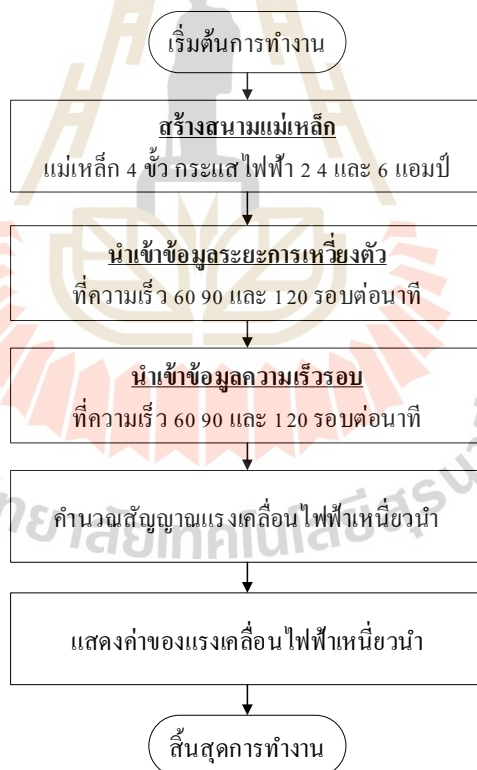
ความเร็ว (RPM)	ความถี่ (Hz)	ขนาดของแอมพลิจูดที่กระแสไฟฟ้า 2 แอมป์	ขนาดของแอมพลิจูดที่กระแสไฟฟ้า 4 แอมป์	ขนาดของแอมพลิจูดที่กระแสไฟฟ้า 6 แอมป์
60	2	348.9 mV.	697.8 mV.	1047.0 mV.
	6	2.905 mV.	5.810 mV.	8.715 mV.
90	3	523.9 mV.	1048.0 mV.	1572.0 mV.
	9	4.376 mV.	8.746 mV.	13.12 mV.
120	4	699.3 mV.	1399.0 mV.	2098.0 mV.
	12	8.852 mV.	11.7 mV.	17.56 mV.

## 5.5 การประมาณค่าและวิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สถานะคงตัวของการหมุนและการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอกบรรจุขดลวดตัวนำสำหรับการวัดสนามแม่เหล็กสี่ขั้ว

ในการทดลองนี้จะจำลองแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่มีผลกระทบของความผิดพลาดที่สถานะคงตัวและการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก โดยการจำลองสนามแม่เหล็กสี่ขั้ว แบบ Skew quadrupole magnet เช่นเดียวกันกับการทดลองที่ 5.4 ดังต่อไปนี้

### 5.5.1 ขั้นตอนการประมาณค่าและวิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สถานะคงตัวของการหมุนและการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอกที่บรรจุขดลวดตัวนำสำหรับแม่เหล็กสี่ขั้ว

การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับการทดลองนี้ เพื่อวิเคราะห์ความผิดพลาดที่เกิดจากการควบคุมความเร็วรอบที่สถานะคงตัวและระยะการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอกที่บรรจุขดลวดตัวนำ โดยการเขียนโปรแกรม MATLAB เพื่อจำลองการเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสี่ขั้วแบบ Skew quadrupole magnet ในอุดมคติ และใช้ข้อมูลความเร็วรอบการหมุนแท่งทรงกระบอกในหัวข้อที่ 3.1.1 ด้วยชุดอุปกรณ์ National instrument ร่วมกับโปรแกรม LabVIEW ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ และใช้ข้อมูลระยะการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอกจากการทดลองที่ 5.6.1 5.6.2 และ 5.6.3 ขั้นตอนการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ แสดงผังแผนภูมิรูปภาพต่อไปนี้



รูปที่ 5.34 ขั้นตอนการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

### 5.5.2 การการประมาณค่าและวิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่สถานะคงตัวของ การหมุนและการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอกที่บรรจุขดลวดตัวนำสำหรับ แม่เหล็กสี่ขั้ว

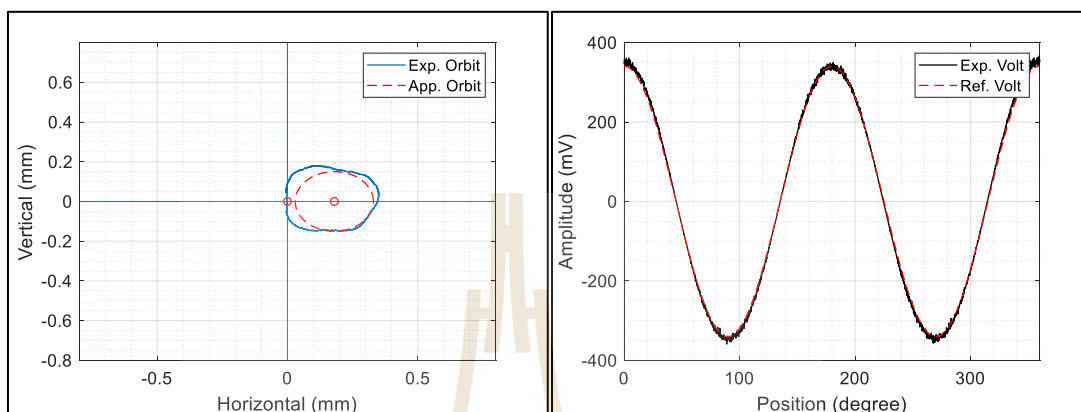
การทดลองการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับการทดลองนี้ เพื่อวิเคราะห์ความผิดพลาดที่สถานะคงตัวและการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก โดยจะใช้ อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบชุดที่ 1 บอร์ด National instrument ร่วมกับโปรแกรม LabVIEW และ ใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ ค่าอัตราขยาย  $K_p = 0.1001$  และ  $K_i = 0.3724$  ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบ คือ 60, 90 และ 120 รอบต่อนาที ตามลำดับ ดังการทดลองต่อไปนี้

#### การทดลองที่ 5.8 การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของการวัดสนาม แม่เหล็กสี่ขั้วด้วยอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบชุดที่ 1

ในการทดลองนี้จะใช้ข้อมูลของการควบคุมความเร็วรอบจากการทดลองที่ 3.1.1 โดย ที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที ความผิดพลาดที่สถานะคงตัว  $\pm 5.184$  เปอร์เซ็นต์ ความเร็ว 90 รอบต่อนาที ความผิดพลาดที่สถานะคงตัว  $\pm 4.529$  เปอร์เซ็นต์ และความเร็ว 120 รอบต่อนาที ความผิดพลาดที่ สถานะคงตัว  $\pm 2.315$  เปอร์เซ็นต์ และใช้ค่าสนามแม่เหล็กที่ได้จากจำลองในการทดลองที่ 4.2.1 และใช้ตำแหน่งจุดศูนย์กลางและรัศมีการเหวี่ยงตัวจากตารางที่ 5.7 สำหรับเป็นข้อมูลให้การทดลองที่ 5.8.1 ถึง 5.8.3 ตามลำดับ ซึ่งมีการทดลอง ดังต่อไปนี้

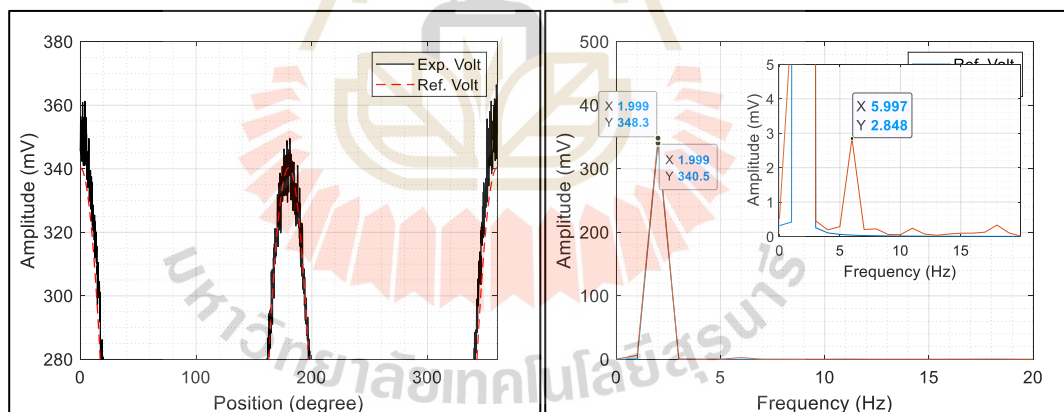
การทดลองที่ 5.8.1 ความเร็วรอบในการหมุนขดลวด 60 รอบต่อนาที (1 Hz) รัศมีการเหวี่ยงตัว 0.180 มิลลิเมตร จุดศูนย์กลางการหมุนอยู่ที่ตำแหน่ง (0, 0.180)

- กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก **2 แอมป์** วงโคจรการเคลื่อนที่  
 ดังรูปที่ 5.35 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 5.35 (ข) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  
 ดังรูปที่ 5.35 (ค) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 5.35 (ง)



(ก) วงโคจรการเคลื่อนที่ของขดลวดตัวนำ

(ข) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

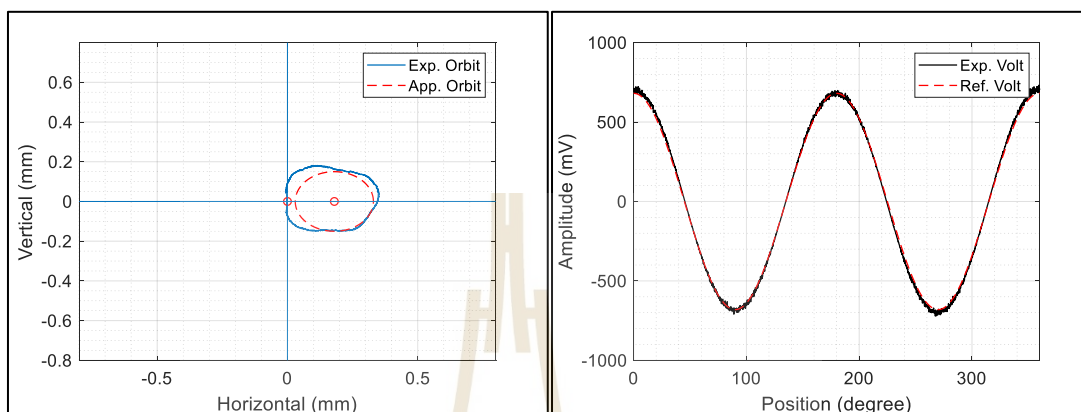


(ค) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

(ง) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

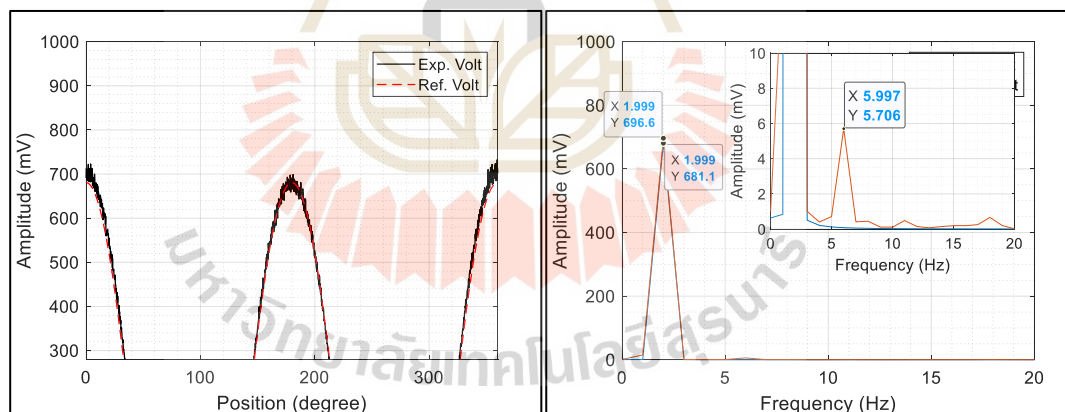
รูปที่ 5.35 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 2 แอมป์

- กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก **4 แอมป์** วงโคจรการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 5.36 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 5.36 (ข) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 5.36 (ค) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูริเยร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 5.36 (ง)



(ก) วงโคจรการเคลื่อนที่ของขดลวดตัวนำ

(ข) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

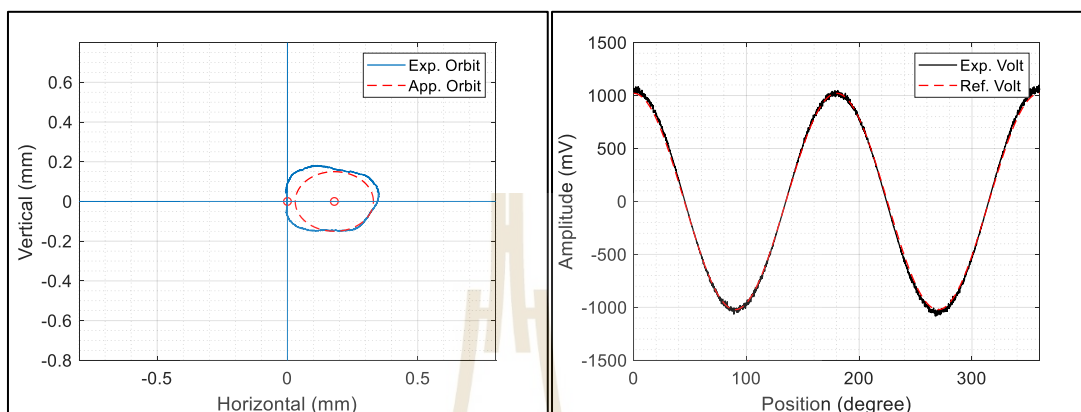


(ค) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

(ง) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

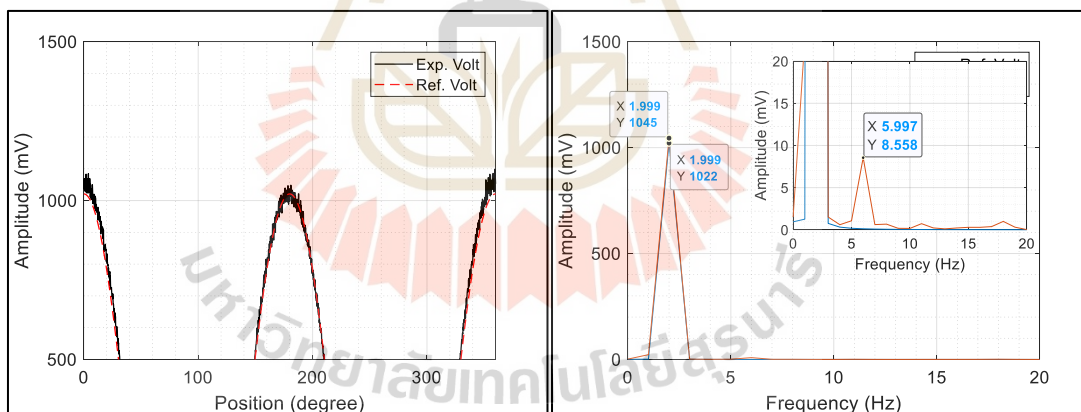
รูปที่ 5.36 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 4 แอมป์

- กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก **6 แอมป์** วงโคจรการเคลื่อนที่  
 ดังรูปที่ 5.37 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 5.37 (ข) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  
 ดังรูปที่ 5.37 (ค) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 5.37 (ง)



(ก) วงโคจรการเคลื่อนที่ของขดลวดตัวนำ

(ข) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



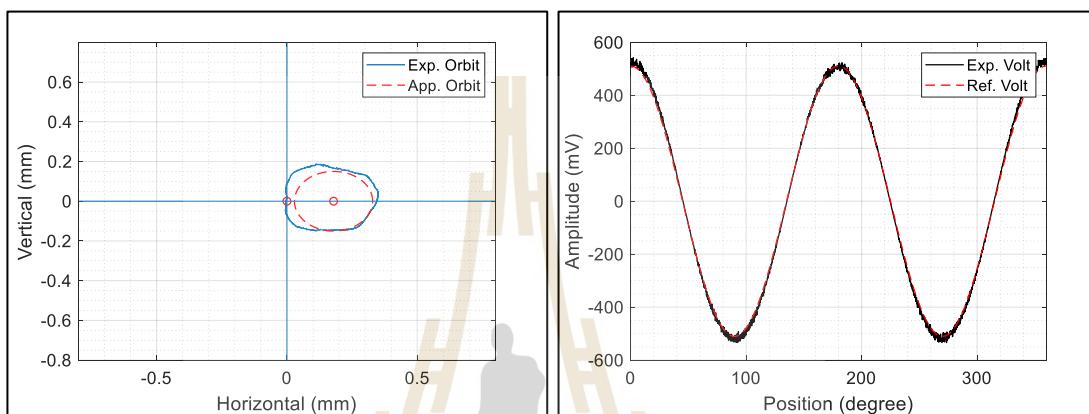
(ค) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

(ง) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

รูปที่ 5.37 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 6 แอมป์

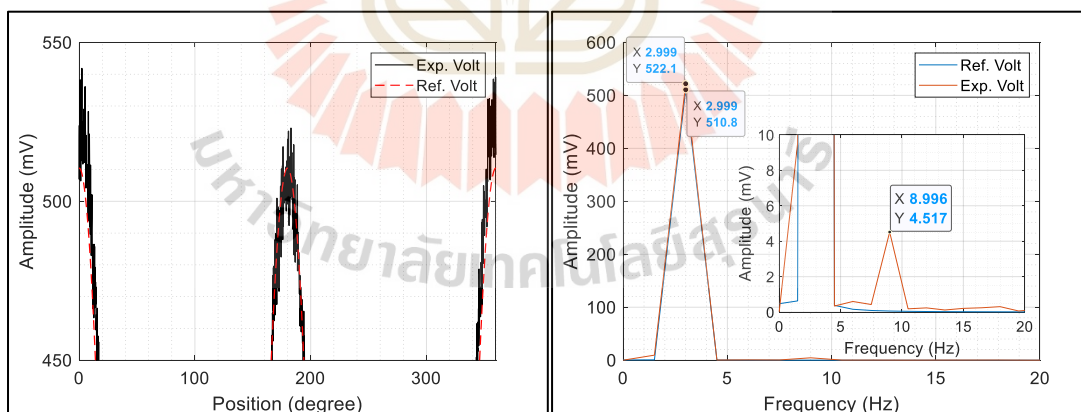
**การทดลองที่ 5.8.2** ความเร็วรอบในการหมุนตลอด 90 รอบต่อนาที (1.5 Hz) รัศมีการเหวี่ยงตัว 0.179 มิลลิเมตร จุดศูนย์กลางการหมุนอยู่ที่ตำแหน่ง (0, 0.179)

- กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก **2 แอมป์** วงโคจรการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 5.38 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 5.38 (ข) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 5.38 (ค) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูริเยร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 5.38 (ง)



(ก) วงโคจรการเคลื่อนที่ของขดลวดตัวนำ

(ข) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

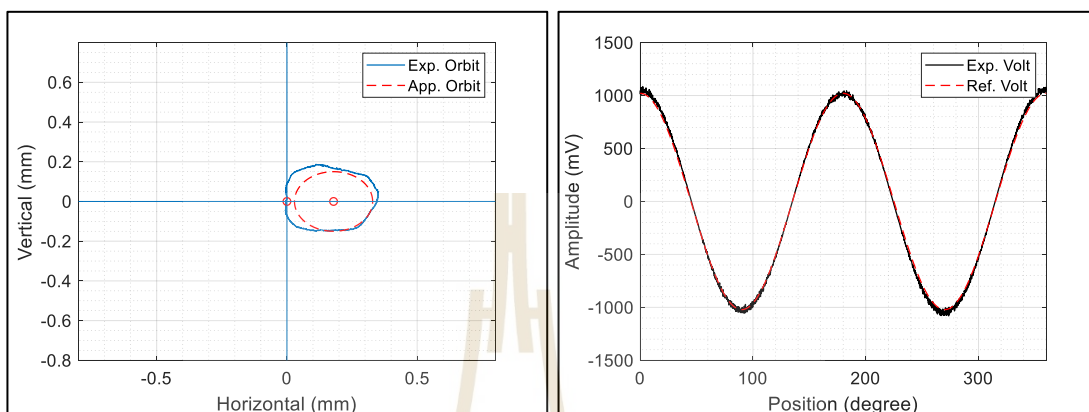


(ค) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

(ง) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

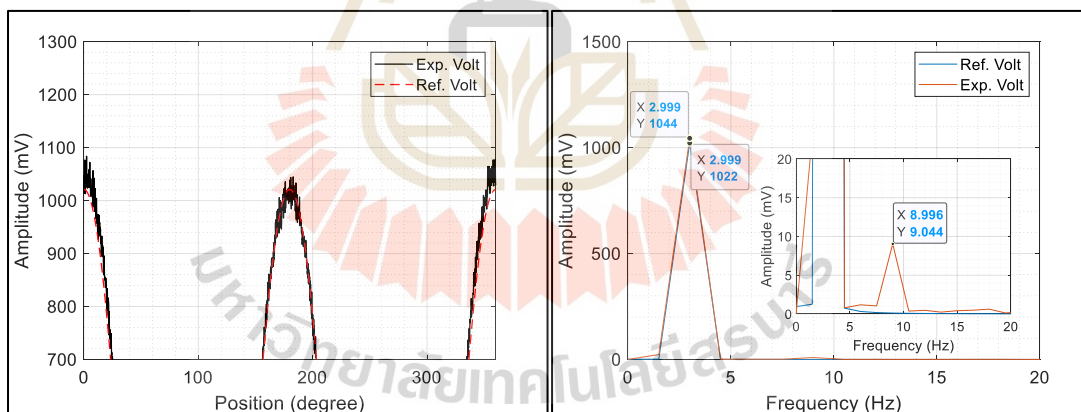
รูปที่ 5.38 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 90 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 2 แอมป์

- กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก **4 แอมป์** วงโคจรการเคลื่อนที่  
 ดังรูปที่ 5.39 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 5.39 (ข) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  
 ดังรูปที่ 5.39 (ค) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูริเยร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 5.39 (ง)



(ก) วงโคจรการเคลื่อนที่ของขดลวดตัวนำ

(ข) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



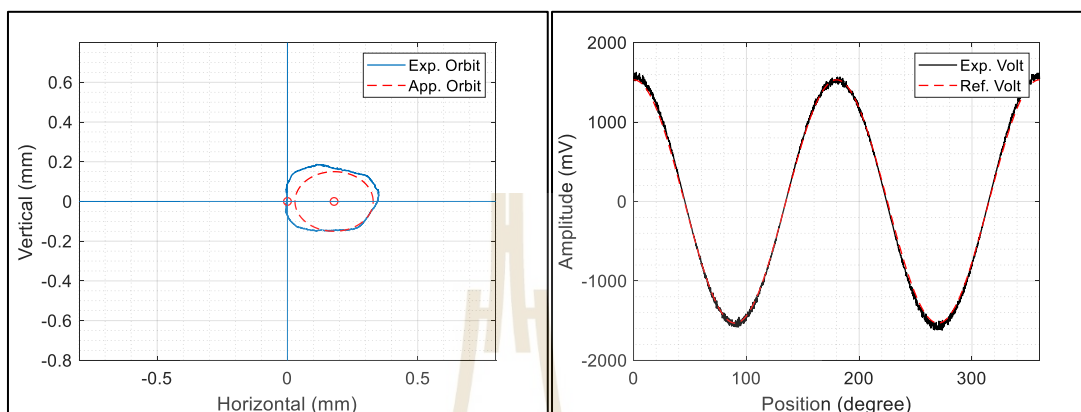
(ค) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

(ง) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

รูปที่ 5.39 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 90 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 4 แอมป์

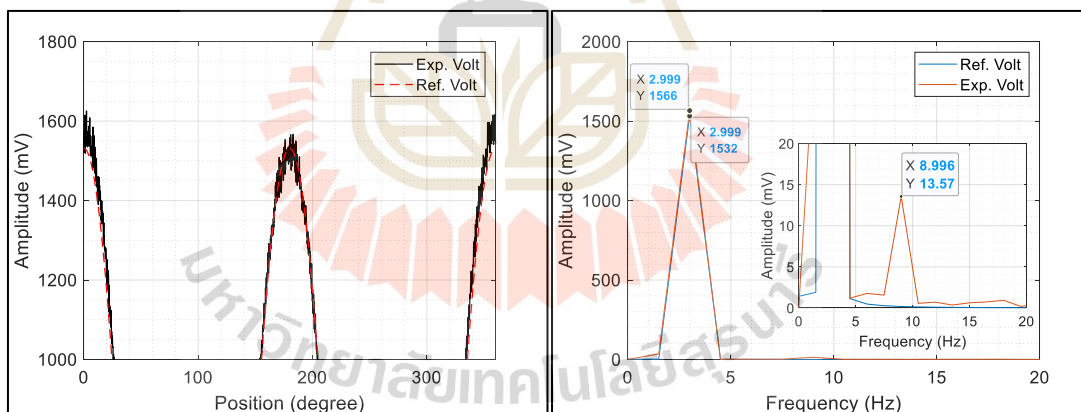


- กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก **6 แอมป์** วงโคจรการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 5.40 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 5.40 (ข) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 5.40 (ค) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 5.40 (ง)



(ก) วงโคจรการเคลื่อนที่ของขดลวดตัวนำ

(ข) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



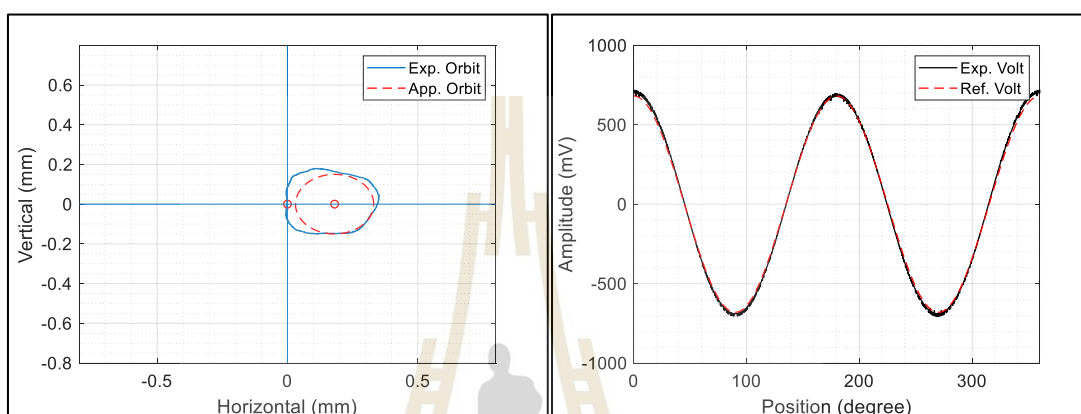
(ค) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

(ง) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

รูปที่ 5.40 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 90 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 6 แอมป์

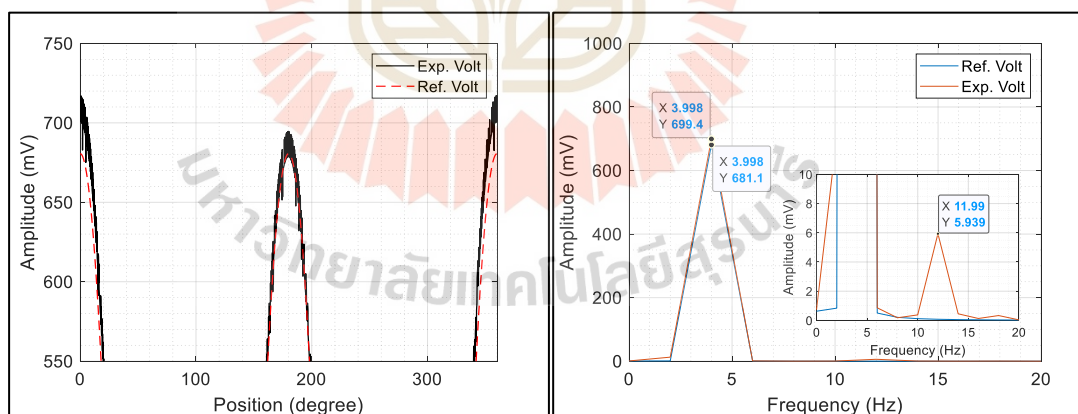
**การทดลองที่ 5.8.3** ความเร็วรอบในการหมุนขดลวด 120 รอบต่อนาที (2 Hz) รัศมี  
การเหี่ยงตัว 0.181 มิลลิเมตร จุดศูนย์กลางการหมุนอยู่ที่ตำแหน่ง (0, 0.181)

- กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก **2 แอมป์** วงโคจรการเคลื่อนที่  
ดังรูปที่ 5.41 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 5.41 (ข) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  
ดังรูปที่ 5.41 (ค) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 5.41 (ง)



(ก) วงโคจรการเคลื่อนที่ของขดลวดตัวนำ

(ข) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

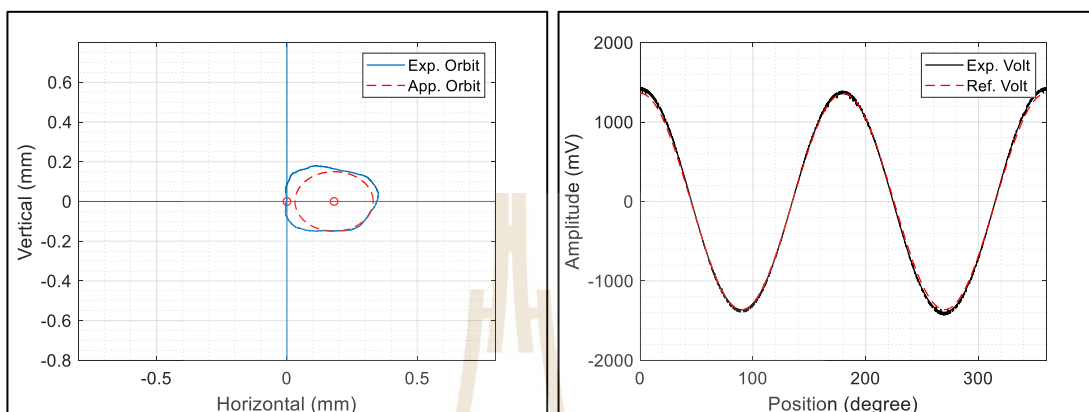


(ค) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

(ง) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

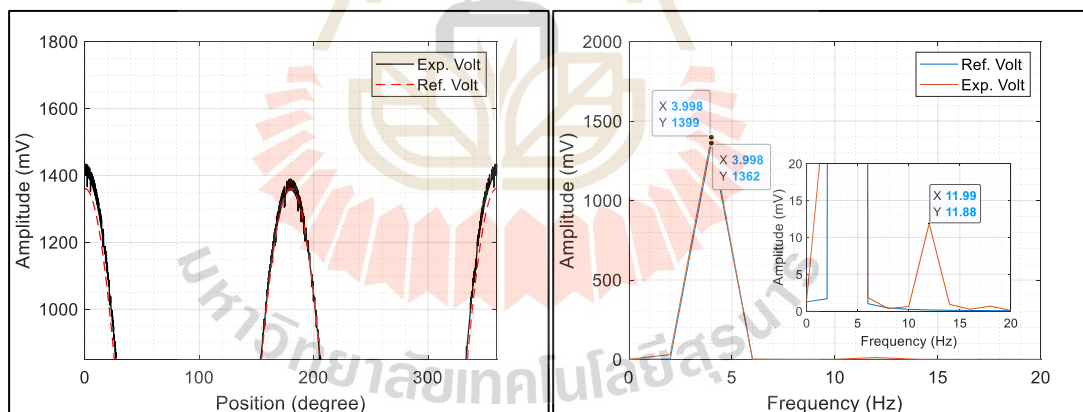
รูปที่ 5.41 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 2 แอมป์

- กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก **4 แอมป์** วงโคจรการเคลื่อนที่  
 ดังรูปที่ 5.42 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 5.42 (ข) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  
 ดังรูปที่ 5.42 (ค) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 5.42 (ง)



(ก) วงโคจรการเคลื่อนที่ของขดลวดตัวนำ

(ข) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

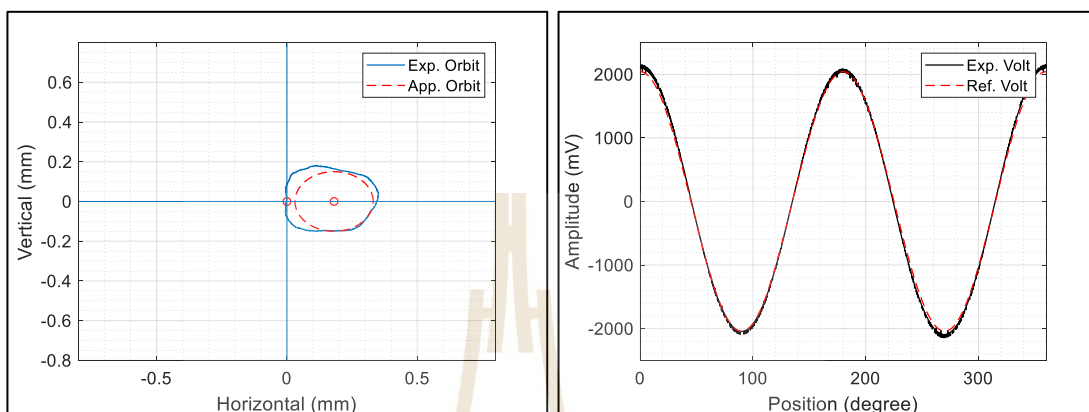


(ค) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

(ง) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

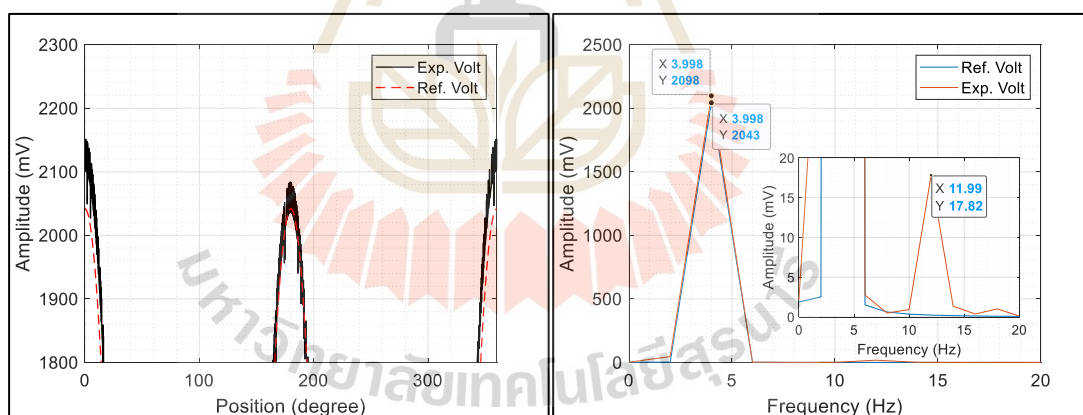
รูปที่ 5.42 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 120 รอบต่อวินาที กระแสไฟฟ้า 4 แอมป์

- กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับคอยล์แม่เหล็ก **6 แอมป์** วงโคจรการเคลื่อนที่  
 ดังรูปที่ 5.43 (ก) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ดังรูปที่ 5.43 (ข) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ  
 ดังรูปที่ 5.43 (ค) และการวิเคราะห์สัญญาณแบบฟูริเยร์ทรานส์ฟอร์มแบบเร็ว ดังรูปที่ 5.43 (ง)



(ก) วงโคจรการเคลื่อนที่ของขดลวดตัวนำ

(ข) แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ



(ค) ภาพขยายแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

(ง) สเปกตรัมแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

รูปที่ 5.43 การวัดสนามแม่เหล็กที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที กระแสไฟฟ้า 6 แอมป์

จากการทดลองที่ 5.8.1 - 5.8.3 เมื่อพิจารณาวงโคจรการเคลื่อนที่ของแท่ง  
 ทรงกระบอกที่เกิดการเหวี่ยงตัวดังรูปที่ 5.35 (ก) - 5.43 (ก) โดยเส้นที่บดคือวงโคจรที่ได้จาก  
 การทดลองและเส้นประ คือวงโคจรสำหรับการประมาณค่ารัศมีการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก

ในลักษณะของวงกลมพบว่า เมื่อความเร็วรอบสูงขึ้นจะทำให้รัศมีของการเหวี่ยงตัวสูงขึ้น และ สูงสุดที่ 0.181 มิลลิเมตร ที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที และการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก ยังส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูด ดังรูปที่ 5.35 (ข, ค) - 5.43 (ข, ค) เมื่อเทียบกับการจำลองแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในอุดมคติที่ไม่เกิดการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก (พิจารณาการเคลื่อนที่ 1 รอบ 360 องศาในทิศทวนเข็มนาฬิกา) และเมื่อเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้กับคอยล์ แม่เหล็กก็จะส่งผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีค่าสูงขึ้น และมีค่าสูงสุดที่ 6 แอมป์ เช่นเดียวกันกับการทดลองที่ 5.6 และการทดลองที่ 5.7 แสดงดังตารางที่ 5.8 และการเพิ่มกระแสไฟฟ้าจะไม่ส่งผลต่อการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอกให้มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงเช่นเดียวกัน เมื่อนำสัญญาณฮาร์โมนิกส์มาวิเคราะห์ในรูปของสเปกตรัม ดังรูปที่ 5.35 (ง) - 5.43 (ง) พบว่า มีสัญญาณฮาร์โมนิกส์ ที่ความถี่ 6 เท่าของความถี่การหมุนเกิดขึ้นเช่นเดียวกันกับการทดลองที่ 5.6 แต่จะมีขนาดของแอมพลิจูดที่ต่ำกว่าเล็กน้อย ซึ่งอาจมีผลมาจากความผิดพลาดที่สถานะคงตัวของการควบคุมความเร็วรอบ

ตารางที่ 5.9 แอมพลิจูดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการทดลองที่ 5.8.1 - 5.8.3

ความเร็ว (RPM)	ความถี่ (Hz)	ขนาดของแอมพลิจูดที่ กระแสไฟฟ้า 2 แอมป์	ขนาดของแอมพลิจูดที่ กระแสไฟฟ้า 4 แอมป์	ขนาดของแอมพลิจูดที่ กระแสไฟฟ้า 6 แอมป์
60	2	348.3 mV.	696.6 mV.	1045.0 mV.
	6	2.848 mV.	4.517 mV.	8.558 mV.
90	3	522.1 mV.	1044.0 mV.	1566.0 mV.
	9	4.517 mV.	9.044 mV.	13.57 mV.
120	4	699.4 mV.	1044.0 mV.	2098.0 mV.
	12	5.939 mV.	1399.0 mV.	17.82 mV.

## 5.6 สรุป

จากการทดลองในบทที่ 5 จะเป็นการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำและการวิเคราะห์สัญญาณความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดและจำลองสนามแม่เหล็ก ซึ่งสามารถแยกพิจารณาได้ 3 กรณี ดังต่อไปนี้

**กรณีที่ 1** ความผิดพลาดที่สถานะคงตัวของการควบคุมความเร็วรอบการหมุนแท่งทรงกระบอกที่บรรจุขดลวดตัวนำที่ส่งผลกระทบต่อขนาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ ซึ่งจะแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

**ส่วนที่ 1** การวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กสองขั้วในห้องปฏิบัติการแสงซินโครตรอน ด้วยชุดควบคุมความเร็วรอบจากอุปกรณ์ National instrument ร่วมกับโปรแกรม LabVIEW และใช้ตัวควบคุมแบบพีไอพบว่า ที่ความเร็วรอบการหมุน 60 รอบต่อนาที ที่กระแสไฟฟ้าคอล์ยแม่เหล็ก 5 แอมป์ มีความผิดพลาดที่สถานะคงตัวสูงสุดที่  $\pm 5.184$  เปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าอยู่ที่  $\pm 0.111$  มิลลิโวลต์ และยังพบสัญญาณฮาร์โมนิกส์ที่ 3 เท่าของความถี่การหมุนขนาด 0.0187 มิลลิโวลต์

**ส่วนที่ 2** การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้วด้วยโปรแกรม MATLAB โดยการใช้ข้อมูลการควบคุมความเร็วรอบจากชุดอุปกรณ์ National instrument ร่วมกับโปรแกรม LabVIEW และใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ ที่กระแสไฟฟ้าคอล์ยแม่เหล็ก 5 แอมป์ ความเร็วรอบการหมุน 60 รอบต่อนาที ความผิดพลาดที่สถานะคงตัว  $\pm 5.184$  เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ความผิดพลาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำอยู่ที่  $\pm 0.102$  มิลลิโวลต์ และการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยการใช้ข้อมูลการควบคุมความเร็วรอบด้วยชุดอุปกรณ์ RAPCON ร่วมกับโปรแกรม MATLAB และใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ ชุดที่ 1 ที่กระแสไฟฟ้าคอล์ยแม่เหล็ก 5 แอมป์ ความเร็วรอบการหมุน 60 รอบต่อนาที ความผิดพลาดที่สถานะคงตัว  $\pm 0.388$  เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ความผิดพลาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำอยู่ที่  $\pm 0.008$  มิลลิโวลต์ และจากการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในส่วนนี้ยังพบสัญญาณฮาร์โมนิกส์ที่ 3 เท่าของความถี่การหมุน ซึ่งมีขนาด 0.0024 มิลลิโวลต์ ของชุดอุปกรณ์ National instrument และ  $5.9 \times 10^{-7}$  มิลลิโวลต์ ของชุดอุปกรณ์ RAPCON

**ส่วนที่ 3** การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการจำลองสนามแม่เหล็กสี่ขั้วด้วยโปรแกรม MATLAB จะมีขนาดที่สูงกว่าแม่เหล็กไฟฟ้าสองขั้ว เนื่องจากจำนวนของโพลแม่เหล็กที่มีมากกว่าถึงสองเท่า และพบว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการจำลองสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสี่ขั้ว โดยการใช้ข้อมูลการควบคุมความเร็วรอบจากชุดอุปกรณ์ National instrument ร่วมกับโปรแกรม LabVIEW และใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ ที่กระแสไฟฟ้าคอล์ยแม่เหล็ก 2 แอมป์ ความเร็วรอบการหมุน 60 รอบต่อนาที ความผิดพลาดในสถานะคงตัว  $\pm 5.184$  เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ความผิดพลาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าอยู่ที่  $\pm 17.641$  มิลลิโวลต์ และการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยการใช้ข้อมูลการควบคุมความเร็วรอบจากชุดอุปกรณ์ RAPCON ร่วมกับโปรแกรม MATLAB และใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ ชุดที่ 1 ที่กระแสไฟฟ้าคอล์ยแม่เหล็ก 2 แอมป์ ความเร็วรอบการหมุน 60 รอบต่อนาที ความผิดพลาดที่สถานะคงตัว  $\pm 0.388$  เปอร์เซ็นต์ พบว่าความผิดพลาดของแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำอยู่ที่  $\pm 1.320$  มิลลิโวลต์ และจากการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในส่วนนี้ยังพบสัญญาณฮาร์โมนิกส์ที่ 4 เท่าของความถี่การหมุน

ซึ่งมีขนาด 0.401 มิลลิโวลต์ ของชุดอุปกรณ์ National instrument และ 0.183 มิลลิโวลต์ ของชุดอุปกรณ์ RAPCON

**กรณีศึกษาที่ 2** ความผิดพลาดที่เกิดจากการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอกที่บรรจุขดลวดตัวนำ โดยการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการจำลองสนามแม่เหล็กด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งความผิดพลาดที่เกิดจากการเหวี่ยงตัวจะไม่ส่งผลกระทบต่อค่าประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กสองขั้ว เนื่องจากสนามแม่เหล็กแบบสองขั้วจะมีขนาดเท่ากันทุกทิศทางในโพรงช่องว่างแม่เหล็ก และเมื่อนำผลการเหวี่ยงตัวจากการวัดในการทดลองที่ 5.6 ไปใช้เป็นข้อมูลในประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการจำลองสนามแม่เหล็กขั้วที่มีผลกระทบของการเหวี่ยงตัว โดยไม่พิจารณาความผิดพลาดของการควบคุมความเร็วรอบที่สถานะคงตัว ในการทดลองที่ 5.7 การประมาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที ซึ่งมีรัศมีการเหวี่ยงตัวโดยประมาณที่ 0.180 มิลลิเมตร จุดศูนย์กลางการหมุนที่ (0, 0.180) กระแสไฟฟ้าคอยล์แม่เหล็ก 2 แอมป์ จะมีขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 348.9 มิลลิโวลต์ และยังพบสัญญาณฮาร์โมนิกที่ 6 เท่าของความเร็วรอบการหมุนแท่งทรงกระบอก ขนาด 2.905 มิลลิโวลต์ และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบการหมุนเป็น 120 รอบต่อนาที ส่งผลให้รัศมีการเหวี่ยงตัวเพิ่มขึ้น 0.181 มิลลิเมตร จุดศูนย์กลางการหมุนที่ (0, 0.181) ส่งผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีขนาดเพิ่มขึ้น 699.3 มิลลิโวลต์ และยังพบสัญญาณฮาร์โมนิกที่ 6 เท่าของความถี่การหมุนแท่งทรงกระบอก ขนาด 8.852 มิลลิโวลต์

**กรณีศึกษาที่ 3** ความผิดพลาดที่สถานะคงตัวของการควบคุมความเร็วรอบร่วมกับการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอกที่บรรจุขดลวดตัวนำ โดยการประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการจำลองสนามแม่เหล็กด้วยโปรแกรม MATLAB ในกรณีนี้จะไม่พิจารณาสถาณแม่เหล็กสองขั้วเช่นเดียวกับกรณีศึกษาที่ 2 การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในกรณีนี้ จะใช้ข้อมูลการควบคุมความเร็วรอบจากชุดอุปกรณ์ National instrument ร่วมกับโปรแกรม LabVIEW และใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ และใช้ข้อมูลการเหวี่ยงตัวที่ได้จากการวัดในการทดลองที่ 5.6 เมื่อพิจารณาที่ความเร็ว 60 รอบต่อนาที จะมีรัศมีการเหวี่ยงตัวที่ 0.180 มิลลิเมตร จุดศูนย์กลางการหมุนที่ (0, 0.180) กระแสไฟฟ้าคอยล์แม่เหล็ก 2 แอมป์ จะมีขนาดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 348.3 มิลลิโวลต์ และยังพบสัญญาณฮาร์โมนิกที่ 6 เท่าของความเร็วรอบการหมุนแท่งทรงกระบอก ขนาด 2.848 มิลลิโวลต์ และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบการหมุนเป็น 120 รอบต่อนาที ส่งผลให้รัศมีการเหวี่ยงตัวเพิ่มขึ้น 0.181 มิลลิเมตร จุดศูนย์กลางการหมุนที่ (0, 0.181) ส่งผลให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำมีขนาดเพิ่มขึ้น 699.4 มิลลิโวลต์ และยังพบสัญญาณฮาร์โมนิกที่ 6 เท่าของความถี่การหมุนแท่งทรงกระบอก ขนาด 5.939 มิลลิโวลต์

## บทที่ 6

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 6.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กด้วยเทคนิคคลวดหมุน และวิเคราะห์ความถูกต้องในการวัดด้วยเทคนิคนี้ ซึ่งจะ เป็นประโยชน์ต่อการสร้างแม่เหล็กแบบสองขั้วและสี่ขั้วของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอนได้ด้วยตนเองอย่างยั่งยืน ลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ จึงสามารถสรุปผลที่ได้จากงานวิจัยดังต่อไปนี้

1. ชุดเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กด้วยเทคนิคคลวดหมุน ได้ออกแบบตัวควบคุมความเร็วรอบที่ 60, 90 และ 120 รอบต่อนาที โดยมีชุดอุปกรณ์ 3 ชุด ได้แก่ ชุดที่ 1 อุปกรณ์ National instrument ร่วมกับการเขียนโปรแกรม LabVIEW และใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ ชุดที่ 2 อุปกรณ์ RAPCON ร่วมกับการโปรแกรม MATLAB - Simulink และใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ และชุดที่ 3 อุปกรณ์ RAPCON ร่วมกับการโปรแกรม MATLAB - Simulink และใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัวของแต่ละชุดอุปกรณ์ แสดงดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 เปรอ์เซ็นต์ความผิดพลาดที่สถานะคงตัวของอุปกรณ์ควบคุม

ความเร็วรอบ (RPM)	ความผิดพลาดที่สถานะคงตัว		
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3
60	± 5.184 %	± 0.388 %	± 0.406 %
90	± 4.529 %	± 0.373 %	± 0.401 %
120	± 2.315 %	± 0.352 %	± 0.329 %

2. การประมาณค่าสนามแม่เหล็กและแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นในโพรงช่องว่างแม่เหล็กแบบสองขั้วและสี่ขั้วโดยใช้โปรแกรม MATLAB ในส่วนของ PDE Tool ทำให้ได้สนามแม่เหล็กและแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถนำไปใช้งานเพื่อเป็นสัญญาณอ้างอิงสำหรับวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดจากการควบคุมความเร็วรอบและการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอกที่บรรจุคลวดตัวนำได้ โดยการประมาณแรงเคลื่อนไฟฟ้า



เหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กสองขั้วที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ แสดงดังตารางที่ 6.2 และการประมาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของแม่เหล็กสี่ขั้วแสดงดังตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.2 การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ของแม่เหล็กสองขั้ว

ความเร็ว (RPM)	ความถี่ (Hz)	ขนาดของแอมพลิจูดที่ กระแสไฟฟ้า 5 แอมป์	ขนาดของแอมพลิจูดที่ กระแสไฟฟ้า 10 แอมป์	ขนาดของแอมพลิจูดที่ กระแสไฟฟ้า 15 แอมป์
60	1	1.974 mV.	3.976 mV.	5.950 mV.
90	1.5	2.929 mV.	5.899 mV.	8.828 mV.
120	2	3.946 mV.	7.948 mV.	11.890 mV.

ตารางที่ 6.3 การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ของแม่เหล็กสี่ขั้ว

ความเร็ว (RPM)	ความถี่ (Hz)	ขนาดของแอมพลิจูดที่ กระแสไฟฟ้า 2 แอมป์	ขนาดของแอมพลิจูดที่ กระแสไฟฟ้า 4 แอมป์	ขนาดของแอมพลิจูดที่ กระแสไฟฟ้า 6 แอมป์
60	1	340.30 mV.	680.50 mV.	1021.00 mV.
90	1.5	510.00 mV.	1020.00 mV.	1530.00 mV.
120	2	679.20 mV.	1358.00 mV.	2038.00 mV.

3. การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเหนี่ยวนำจากการจำลองสนามแม่เหล็กที่มีผลกระทบจากความผิดพลาดที่สถานะคงตัวของชุดควบคุมความเร็วรอบ ซึ่งทำการทดลอง 2 ชุด ได้แก่ ชุดที่ 1 ด้วยอุปกรณ์บอร์ด National instrument ร่วมกับโปรแกรม LabVIEW ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ และ ชุดที่ 2 ด้วยอุปกรณ์บอร์ด Rapcon ร่วมกับโปรแกรม MATLAB ด้วยตัวควบคุมพีไอ จะพบสัญญาณฮาร์โมนิกส์แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 3 เท่าของความถี่การหมุนแห่งขดลวดผลที่ได้สำหรับแม่เหล็กสองขั้ว แสดงดังตารางที่ 6.4

ตารางที่ 6.4 การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับแม่เหล็กสองขั้ว

ความเร็ว (RPM)	ความถี่ (Hz)	ขนาดของแอมพลิจูดที่ กระแสไฟฟ้า 5 แอมป์		ขนาดของแอมพลิจูดที่ กระแสไฟฟ้า 10 แอมป์		ขนาดของแอมพลิจูดที่ กระแสไฟฟ้า 15 แอมป์	
		ชุดที่ 1 (mV)	ชุดที่ 2 (mV)	ชุดที่ 1 (mV)	ชุดที่ 2 (mV)	ชุดที่ 1 (mV)	ชุดที่ 2 (mV)
60	1	1.9720	1.9750	3.9720	3.9770	5.944	5.952
	3	0.0024	$5.9 \times 10^{-7}$	0.0048	$1.2 \times 10^{-6}$	0.0072	$1.8 \times 10^{-6}$
90	1.5	2.9520	2.9610	5.9460	5.9630	8.8900	8.9240
	4.5	0.0030	$1.1 \times 10^{-6}$	0.0062	$2.4 \times 10^{-6}$	0.0092	$3.6 \times 10^{-6}$
120	2	3.9500	3.9470	7.9560	7.9490	11.910	11.900
	6	0.0033	$8.9 \times 10^{-7}$	0.0066	$1.8 \times 10^{-6}$	0.0098	$2.7 \times 10^{-6}$

การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำเหนี่ยวนำจากการจำลองสนามแม่เหล็กที่มีผลกระทบจากความผิดพลาดที่สถานะคงตัวของชุดควบคุมความเร็วรอบสำหรับแม่เหล็กแบบสี่ขั้วจะพบสัญญาณฮาร์โมนิกส์แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 4 เท่าของความถี่การหมุนแห่งชาติผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับแม่เหล็กสี่ขั้ว

ความเร็ว (RPM)	ความถี่ (Hz)	ขนาดของแอมพลิจูดที่ กระแสไฟฟ้า 2 แอมป์		ขนาดของแอมพลิจูดที่ กระแสไฟฟ้า 4 แอมป์		ขนาดของแอมพลิจูดที่ กระแสไฟฟ้า 6 แอมป์	
		ชุดที่ 1 (mV)	ชุดที่ 2 (mV)	ชุดที่ 1 (mV)	ชุดที่ 2 (mV)	ชุดที่ 1 (mV)	ชุดที่ 2 (mV)
60	2	340.0	340.4	680.0	680.7	1020.0	1021.0
	4	0.401	0.183	0.802	0.366	1.203	0.549
90	3	509.1	510.0	1018.0	1020.0	1527.0	1530.0
	6	1.075	0.189	2.149	0.378	3.224	0.567
120	4	681.0	679.4	1362.0	1359.0	2043.0	2038.0
	8	0.930	0.189	7.860	0.378	2.791	0.567

4. การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำสำหรับแม่เหล็กสี่ขั้วที่มีการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก ด้วยอุปกรณ์ควบคุมชุดที่ 1 เป็นอุปกรณ์บอร์ด National instrument ร่วมกับโปรแกรม LabVIEW ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอสามารถพิจารณาผลการประมาณค่าออกเป็น 2 กรณี

**กรณีที่ 1** คือ การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดจากการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอกที่ไม่มีความผิดพลาดของการควบคุมความเร็วรอบที่สถานะคงตัว

**กรณีที่ 2** คือ การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่เกิดการเหวี่ยงตัวร่วมกับผลความผิดพลาดที่เกิดจากการควบคุมความเร็วรอบ

ซึ่งทั้ง 2 กรณีจะพบสัญญาณฮาร์โมนิกส์แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ 6 เท่าของความถี่การหมุนแท่งขดลวด ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 6.6

ตารางที่ 6.6 การประมาณค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำแม่เหล็กแบบสี่ขั้วที่มีการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอก

ความเร็ว (RPM)	ความถี่ (Hz)	ขนาดของแอมพลิจูดที่ กระแสไฟฟ้า 2 แอมป์		ขนาดของแอมพลิจูดที่ กระแสไฟฟ้า 4 แอมป์		ขนาดของแอมพลิจูดที่ กระแสไฟฟ้า 6 แอมป์	
		กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2
		(mV)	(mV)	(mV)	(mV)	(mV)	(mV)
60	2	348.9	348.3	697.8	696.6	1047.0	1045.0
	6	2.905	2.848	5.810	4.517	8.715	8.558
90	3	523.9	522.1	1048.0	1044.0	1572.0	1566.0
	9	4.376	4.517	8.746	9.044	13.12	13.57
120	4	699.3	699.4	1399.0	1044.0	2098.0	2098.0
	12	8.852	5.939	11.7	1399.0	17.56	17.82

5. การวัดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กสองขั้วที่ห้องปฏิบัติการแสงซินโครตรอน ด้วยอุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบชุดที่ 1 ด้วยอุปกรณ์บอร์ด National instrument ร่วมกับโปรแกรม LabVIEW ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 6.7

ตารางที่ 6.7 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ได้จากการวัดสนามแม่เหล็กสองขั้ว

ความเร็ว (RPM)	ความถี่ (Hz)	ขนาดของแอมพลิจูดที่กระแสไฟฟ้า 5 แอมป์	ขนาดของแอมพลิจูดที่กระแสไฟฟ้า 10 แอมป์	ขนาดของแอมพลิจูดที่กระแสไฟฟ้า 15 แอมป์
60	1	1.973 mV.	2.959 mV	3.594 mV.
	3	0.0187 mV.	0.0273 mV	0.0447 mV.
90	1.5	3.888 mV.	6.147 mV.	7.936 mV.
	4.5	0.0589 mV.	0.0672 mV.	0.1297 mV.
120	2	4.050 mV.	8.229 mV.	11.360 mV.
	6	0.1081 mV.	0.1290 mV.	0.1303 mV.

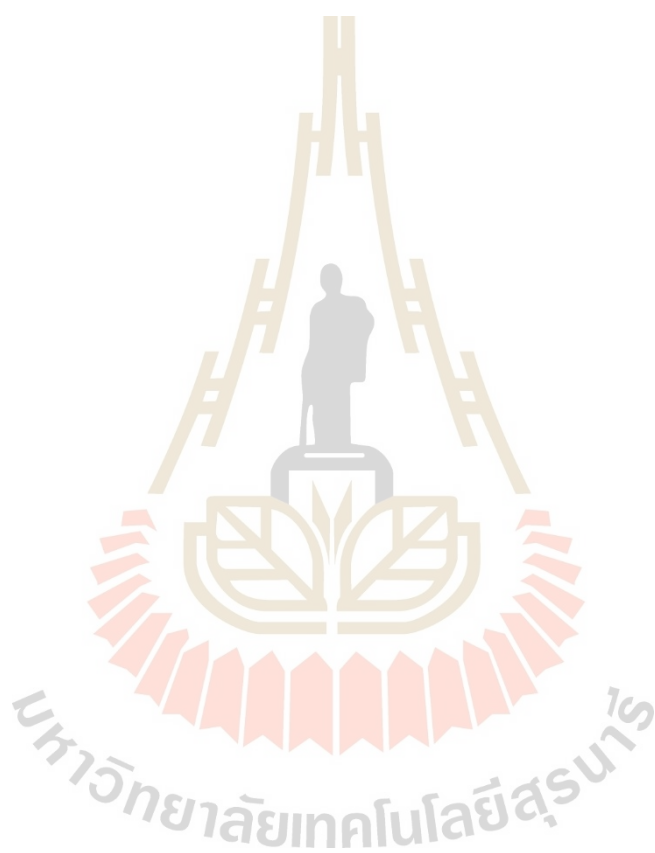
จากบทสรุปทั้ง 5 ส่วนในงานวิจัยนี้เราได้กระบวนการวิเคราะห์ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากเทคนิคการวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยแท่งขดลวดหมุน และโปรแกรมประมวลผลการคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าและการวิเคราะห์แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในลักษณะของสัญญาณฮาร์มอนิกส์ เพื่อจำแนกความผิดพลาดที่เกิดจากการควบคุมความเร็วรอบที่สถานะคงตัวและระยะการเหวี่ยงตัวของแท่งทรงกระบอกที่บรรจุขดลวดตัวนำที่ส่งผลกระทบต่อ การวัดสนามแม่เหล็กสำหรับนำไปใช้เป็นแนวทางในออกแบบ จัดสร้าง และชดเชยความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กด้วยเทคนิคขดลวดหมุนให้มีความแม่นยำในการวัดที่สูงขึ้น

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

ในการวัดสนามแม่เหล็กแบบสี่ขั้วความละเอียดสูงด้วยเทคนิคขดลวดหมุน เพื่อให้มีความแม่นยำในการวัดที่สูงขึ้น มีข้อเสนอแนะดังนี้

1. โครงสร้างของตัวรองรับแท่งทรงกระบอกไม่ควรประกอบด้วยชิ้นส่วนที่มากเกินไปเนื่องจากจะส่งผลกระทบต่อ การประกอบที่ไม่แม่นยำ
2. จูครองรับแท่งทรงกระบอก (Bearing) ควรเลือกให้มีความเหมาะสมกับความเร็วรอบที่ใช้ในการหมุน เนื่องจากจะมีผลต่อวงโคจรการเคลื่อนที่ของแท่งทรงกระบอกได้
3. คลັปปลิง (Coupling) ควรเป็นแบบยึดหยุ่น เพื่อป้องกันการเกิดการเชื่อมศูนย์ทางกลซึ่งจะส่งผลกระทบต่อ การเกิดการสั่นสะเทือนและการควบคุมความเร็วรอบได้
4. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ควรเลือกขนาดให้เหมาะสมกับความเร็วรอบที่ใช้งานซึ่งจะช่วยให้การออกแบบตัวควบคุมสามารถกระทำได้ง่าย สำหรับการใช้งานในทางปฏิบัติ

5. เนื่องจากเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กจัดเป็นประเภทของเครื่องจักรหมุน การบำรุงรักษา  
ชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่ควรดูแลอย่างสม่ำเสมอ



## รายการอ้างอิง

- สรวุฒิ สุจิตจร. (2546) การควบคุมอัตโนมัติ. กรุงเทพฯ : เพียร์สัน เอ็ดดูเคชั่น โอโคโนมิสา.
- วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. (2551) ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วุฒิปด ธาราธิรเศรษฐ์. (2562) สนามแม่เหล็กไฟฟ้า. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด (มหาชน).
- Animesh, K. J. (2001). Measurements of Field Quality Using Harmonic Coil. **US Particle Accelerator School on Superconducting Accelerator Magnets**, Houston, Texas, USA.
- Arpaia, P., Buzio, M., Gariz Perez, J., Pertone, C., Russenschuck, S., and Walckiers, L. (2012). Measuring Field Multipoles in Accelerator Magnets with Small-Apertures by an Oscillating Wire Moved on a Circular Trajectory. **Journal of Instrumentation**, Vol.7(5).
- Arpaia, P., Buzio, M., Koster, O., Russenschuck, S., and Severino, G. (2016). Rotating-coil Calibration in a Reference Quadrupole, considering Roll-Angle Misalignment and Higher-Order Harmonics. **Measurement**, Vol.87(6), 2016, pp. 74-82.
- Balasaheb, K. T. (2014). Experimental Investigation of Shafts on Whirling of Shaft Apparatus. **International Journal of science, Engineering and Technology Research**, Vol. 3(8), 2014, pp. 2091-2094.
- Bottura, L. (2009). Field Measurements. **CERN Accelerator School: Specialized Course on Magnets**, CERN, Geneva, Switzerland, 2009.
- Buzio, M. (2009). Fabrication and Calibration of Search Coil. **CERN Accelerator School: Specialized Course on Magnets**, CERN, Geneva, Switzerland, 2009.
- Chang, K. Y., Hee, J. K., and In-Beum, L. (2001). Direct Identification Method of Second Order Plus Time Delay Model Parameters. **Chemical Engineering Research and Design**, Vol. 79(7), 2001, pp. 754-764.
- Endo, M. T., Montagnoli, A. N., and Nicoletti, R. (2015). Measurement of Shaft Orbits with Photographic Images and Sub-Sampling Technique. **Experimental Mechanics**, Vol. 55(2), pp.471-481.

- Guo, J., Qin, C., and Schmitz, G. (2010). Numerical Investigation on the Performance of SparkIgnition Engine Used for Electricity Production Fuelled by Natural Gas/Liquefied Petroleum Gas-Biogas Blends with Modelica. **The 2<sup>nd</sup> International Conference on Computer Engineering and Technology**, April 16-18; Vol. 6: pp.682-687.
- Kaoru, I., Shigeru, Y., Toshimitsu, U., and Takashi, H. (2003). Torque-Based Control of Whirling Motion in a Rotating Electric Machine Under Mechanical Resonance. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, Vol. 11(3), 2003. pp. 335-344.
- Le Bec, G., Chavanne, J., and Penel, C. (2012). Stretched Wire Measurement of Multipole Accelerator Magnets. **Physical Journals**, Vol. 15(2), 2012, pp. 022401.1-022401.14.
- Li, L., Kang, W., Li, S., Zhang, Z., Yin, B., Zhou, J. and Shi C. (2014). Magnetic Field Measurement of the Quadrupole and Sextupole Magnet for HLS-II Storage Ring. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, Vol. 24(3), 2014.
- Li, L., Ying-Jie, L., Gan-Lin, N., Wan, C., and Xian-Jing (2005). Rotating Coil magnetic Measurement System and Measurement Results of Quadrupole Prototype for BEPCII Storage Ring. **Proceedings of 2005 Particle Accelerator Conference**, 2005, pp. 1844-1846.
- Nisa, S. Al., Mathew, L., and Chatterji, S. (2013). Comparative Analysis of Speed control of DC Motor Using AI Technique. **International Journal of Engineering Research and Applications**, Vol. 3(3), 2013. pp. 1137-1146.
- Oliver, K., Lucio, F., and Stepha, R. (2016). A Procedure for Combining Rotating-Coil measurement of Large-Aperture Accelerator Magnets. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**, CERN, Geneva, Switzerland.
- Purushotam, K., Prabhakar K. P., Mithum, K and Choudhary, S. D. (2014). Speed control of DC Motor Using PID & Smart Controller. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, Vol. 5(11), 2014, pp. 1044-1053.
- Saraporn, C., Dolwichai, T, Srisertpol, J., and Teeka, K. (2013). Signal Conditioning of Low-cost Gyroscope Using Kalman Filter and Nonlinear Least Square Method. **Advanced Materials Research**. Vol. 622-623(12), 2013, pp.1519-1523.
- Takeuchi, T., et al. (2004). Design and Measurement of the S-LSR Quadrupole Magnet Considering the Influence of a Neighboring Field Clamp. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, Vol.14(2), 2004, pp. 445-448.

- Takeuchi, T., et al. (2004). Magnetic Field Measurement of Quadrupole Magnets for S-LSR. **Proceedings of EPAC**, Lucerne, Switzerland, 2004. pp. 1693-1695.
- Walckiers, L. (2011). Magnetic Measurement with Coil and Wire. **CERN Accelerator School: Specialized Course on Magnets**, CERN, Geneva, Switzerland.
- Walckiers, L. (2001). The harmonic-Coil Method. **CERN Accelerator School: Specialized Course on Magnets**, CERN, Geneva, Switzerland.
- Werner, U. (2009). Mathematical Analysis of Rotor Shaft Displacements in Asynchronous Machines; A Critical Speed or Just a Rotation of The Orbit Axis. **Journal of Applied Mathematics and Mechanics**. Vol. 89(7), 2009, pp. 514-535.
- Zhan, H., Wang, M., Li, H., and Shi, X. (2016). Shaft Orbit Analysis Based on LabVIEW for Fault Diagnosis of Rotating Machinery. **International Conference on Computer Science & Education (ICCSE 2016)**, Nagoya, Japan, 2016, pp. 972-975.
- Zhigang, L., Jun, L., and Zhenping, F. (2016). Comparisons of Rotodynamic Characteristics Predictions for Annular Gas Seals Using the Transient Computational Fluid Dynamic Method Based on Different Single-Frequency and Multifrequency Rotor Whirling Models. **Journal of Tribology**, Vol. 138(1), 2016, pp. 011701.1-011701.18.
- Zhou, H., Guo X., Meng, T., Hong, X., and Yan, Y. (2013). Study on Shaft Orbits Measurement and Identification Based on LabVIEW. **Fifth Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation**, Hong Kong, China, 2013, pp. 1087-1090.

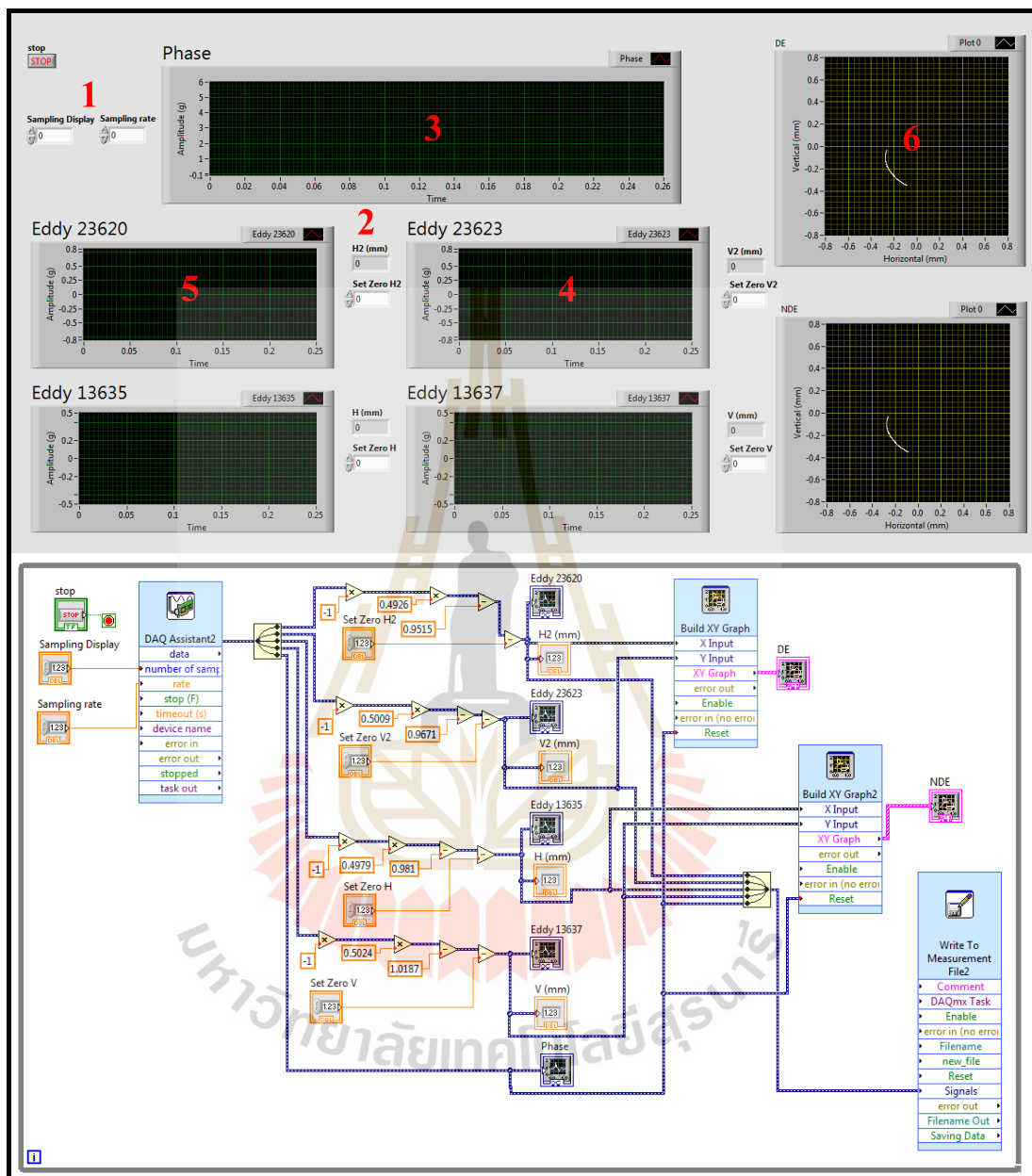




ภาคผนวก ก

การใช้งาน LabVIEW

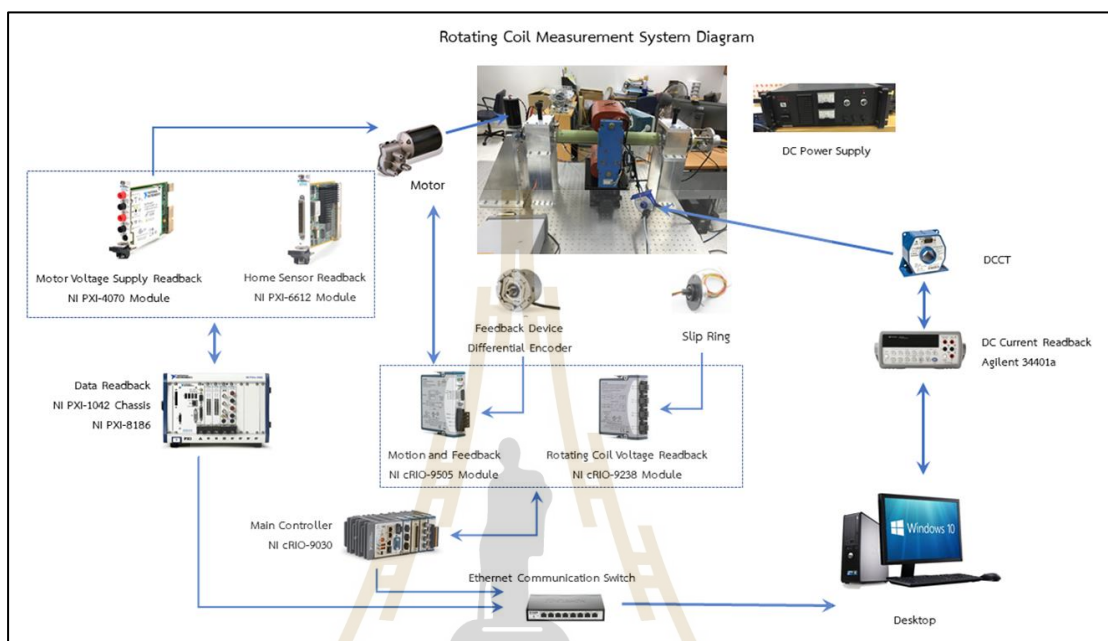
## ก.1 หน้าต่างการเก็บข้อมูลการเหวี่ยงตัวของเพลลา



รูปที่ ก.1 หน้าต่างโปรแกรม Lab VIEW สำหรับเก็บข้อมูลการเหวี่ยงตัวของเพลลา

## ก.2 การติดตั้ง Hardware กับโปรแกรม

1. ติดตั้ง โปรแกรม Lab VIEW 2017 ลงบนคอมพิวเตอร์
2. ติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ เข้ากับคอมพิวเตอร์ ดังรูป ก.2



รูปที่ ก.2 การเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ต่าง ๆ กับคอมพิวเตอร์



ภาคผนวก ข

การใช้งาน Rapcon

## ข.1 ข้อมูลทางเทคนิคของ RABCON Board

### 1. INTRODUCTION

The RAPCON platform offers a seamless interface between physical plants and Matlab/Simulink for implementation of hardware-in-the-loop real-time control systems. It is fully integrated into Matlab/Simulink and has a broad range of inputs and outputs. The platform is a complete and low-cost real-time control system development package for both educational and industrial applications.

The RAPCON platform consists of the real-time control board (hardware) and the associated Matlab interface (software). The hardware of the RAPCON platform has  $8 \times 12$  bit analog inputs,  $2 \times 16$  bit capture inputs,  $2 \times 16$  bit encoder inputs,  $1 \times 8$  bit digital input,  $2 \times 12$  bit analog outputs,  $2 \times 16$  bit frequency outputs,  $2 \times 16$  bit pulse outputs and  $1 \times 8$  bit digital output. The board also contains 2 H-bridges with 5 A capability to drive external heavy loads. Some inputs and outputs are multiplexed to simplify the hardware. The board is interfaced to the host computer that runs Matlab through a serial port. The software of the RAPCON platform is fully integrated into Matlab/Simulink/Real-Time Windows Target and comes with Simulink library blocks associated with each hardware input and output. The library contains Analog Input Block, Capture Input Block, Encoder Input Block, Digital Input Block, Analog Output Block, Frequency Output Block, Digital Output Block and Pulse Output Block. The platform achieves real-time operation with sampling rates up to 15.2 kHz.

The RAPCON platform has been developed to extend and optimize the real-time operation of Matlab, Simulink and Real-Time Windows Target. The developed platform is uniquely integrated into Matlab to achieve real-time operation in Matlab under Windows. The salient features of the RAPCON platform make it ideal for implementation of hardware-in-the-loop real-time control systems in both educational and industrial applications.

#### 1.1. Specifications

- Power supply: 6 – 15 V, minimum 0.15 A, regulated
- Interface: 460800 baud, 8 bit data, no parity, 1 stop bit
- Analog inputs: A0–A7, 0 – 5 V analog, 12 bit resolution
- Capture inputs: C0–C1, 0 – 5 V digital, 16 bit resolution
- Digital inputs: D0\_d0–D0\_d7, 0 – 5 V digital, 8 lines
- Encoder inputs: E0–E1, 0 – 5 V digital, 16 bit resolution
- Frequency outputs: F0–F1, 0 – 5 V digital, 16 bit resolution

- Analog outputs: B0–B1, 0 – 5 V analog, 12 bit resolution
- Digital outputs: G0.g0–G0.g7, 0 – 5 V digital, 8 lines
- Pulse outputs: H0–H1, 0 – 5 V digital, 16 bit resolution
- Filtered pulse outputs: L0–L1, 0 – 5 V analog
- H-bridge outputs: P0–P1, 0–(supply voltage) V digital, 5 A
- Voltage regulator output: VDD, 5 V, 0.25 A, regulated power supply
- Ground: GND, 0 V
- Sampling rate: up to 15.2 kHz

### 1.2. Requirements

- PC with Windows XP or later and an expansion slot for a serial card
- Serial crossover (null modem) cable
- Matlab R2007b or later with Simulink, Real-Time Workshop and Real-Time Windows Target
- RAPCON hardware (real-time control board) 1.5 or later
- RAPCON software 1.5 or later
- Power supply (regulated, 6 – 15 V and at least 0.15 A without any load)

### 1.3. Absolute Maximum Ratings

- Power supply voltage: minimum 3 V, maximum 16 V
- Each analog, digital, capture and encoder input: minimum  $-0.3$  V, maximum  $+5.3$  V
- Each analog, digital, frequency and pulse output: minimum  $-25$  mA, maximum  $+25$  mA
- Each filtered pulse output: minimum  $-25$  mA, maximum  $+25$  mA
- Each H-bridge output: minimum  $-5$  A, maximum  $+5$  A
- Total current from/into all inputs and outputs (except power supply, voltage regulator and H-bridges): minimum  $-200$  mA, maximum  $+200$  mA
- Voltage regulator output: maximum 0.5 A (total)
- Operating ambient temperature: minimum  $10$  °C, maximum  $50$  °C

## 2. HARDWARE

The real-time control board is based on a dsPIC30F2012 digital signal controller. It has a total number of  $8 \times 16$  bit inputs and  $8 \times 16$  bit outputs capability. The inputs and outputs can be selected among the inputs and outputs listed above. The board is interfaced to the main computer that runs Matlab through a serial port. Two pulse-width modulation driven H-bridges with 5 A drive capability are included on the board to drive external actuators or loads. The functional block diagram of the board is shown in Figure 1, where A0–A7 are the analog inputs, B0–B1 are the analog outputs, C0–C1 are the capture inputs, D0\_d0–D0\_d7 are the digital inputs, E0–E1 are the encoder inputs, F0–F1 are the frequency outputs, G0\_g0–G0\_g7 are the digital outputs and H0–H1 are the pulse outputs; ADC represents the analog-to-digital converter, DAC represents the digital-to-analog converter, ICM represents the input-capture module, OCM represents the output-compare module, DIP represents the digital-input port, DOP represents the digital-output port, QEM represents the quadrature-encoder module and PWM represents the pulse-width modulator; FLs are the lowpass filters with outputs L0–L1 and HBs are the H-bridges with outputs P0–P1; and  $\mu C$  is the central microcontroller, UART is the universal-asynchronous-receiver-transmitter unit and PC is the host computer.

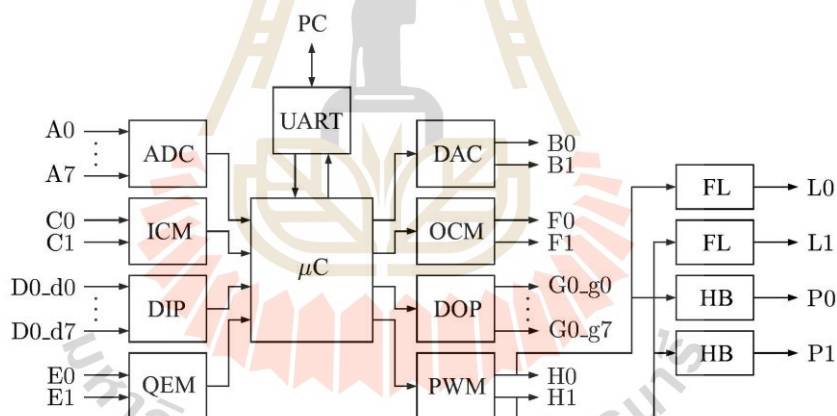


Figure 1. Functional block diagram of the board.

The layout of the board is shown in Figure 2. The inputs and outputs are connected to the board through standard pin header type connectors. The pins of all connectors are clearly indicated on the board for convenience. Access to the on-board 5 V, 0.25 A voltage regulator output is also provided for external light power supply requirements.

## ข.2 การติดตั้ง Hardware กับโปรแกรม

1. ติดตั้งโปรแกรม MATLAB 2009a กับ Windows 7 32 Bit
2. ติดตั้ง Driver ของ PCI Serial Card ด้วยการเชื่อมต่อผ่านสาย Serial Crossover Cable
3. ติดตั้ง Real - Time Workshop และ Real – Time Windows Target
4. ติดตั้งโปรแกรมเสริมเพื่อใช้งานอุปกรณ์ Rapcon ด้วยไฟล์ rapcon2009a.exe ซึ่งในที่นี้ใช้ MATLAB เวอร์ชัน 2009a สำหรับ Windows 7 32 Bit และจะมีไฟล์ rtwt\_2009b\_win7\_fix.zip สำหรับการแก้ไข BUG สำหรับ Windows 7 มาด้วย ซึ่งการติดตั้ง ต้องทำทีละขั้นตอน ด้วยวิธีการดังนี้

5. เข้าไปหาไฟล์ที่ชื่อว่า rtwin\_main.c ภายในคอมพิวเตอร์ เช่น

“C:\Program Files\MATLAB\R2009a\toolbox\rtw\targets\rtwin\src” แล้วเปลี่ยนชื่อไฟล์ rtwin\_main.c เป็น rtwin\_main.org และ copy ไฟล์ rtwin\_main.c ในโฟลเดอร์ติดตั้งของ Rapcon มาใส่ไว้ใน Directory นี้

6. เข้าไปที่ Control Panel -> Device Manager เพื่อทำการเปลี่ยน Base Address และตรวจสอบ Comport Number ของ Serial Port หลังจากนั้นดูที่ Base Address ตัวแรกว่ามี I/O Range เท่าไรเช่น I/O Range EC80 - EC87, Base Address คือ EC80 ในเลขฐาน 16 ซึ่งมีค่าเท่ากับเลขฐานสองคือ 60544 แล้วเข้าโปรแกรม MATLAB ไปในโฟลเดอร์ไฟล์ติดตั้งของ Rapcon เปิดไฟล์ชื่อ rtwinpi.tlc และ rtwinpo.tlc แล้วทำการแก้ไขใน m.file ดังนี้

```
if DrvAddress == 5
assign ::com = 1016
endif
```

สำหรับ DrvAddress คือ Comport Number และ assign ::com คือเลขฐานสองของ I/O Range ที่อ่านมาจาก Device Manager ดังที่กล่าวมาในข้างต้น

7. สำหรับ Windows 7 Real-Time Windows Target จะถูกป้องกันไว้ดังนั้นจะต้อง copy ไฟล์ rtwtkml.sys ใน rtwt\_2009b\_win7\_fix.zip ที่โหลดมา ไปไว้ที่

“C:\Program Files\MATLAB\R2009b\toolbox\rtw\targets\rtwin\kernel\win32”

8. พิมพ์ “rtwintgt -install” ใน Command Window ของโปรแกรม MATLAB เพื่อติดตั้ง RTWT kernel เป็นอันเสร็จสมบูรณ์





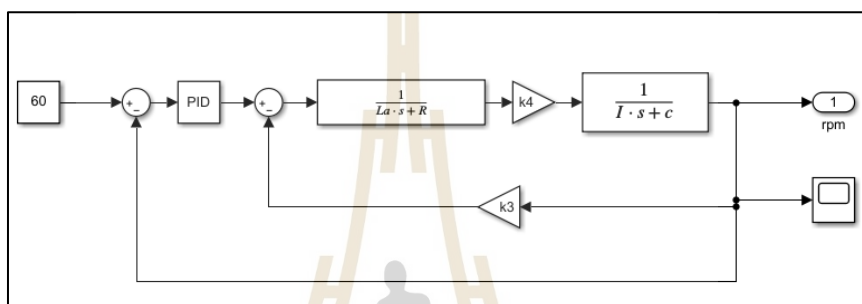
ภาคผนวก ค

การใช้งาน Simulink Parameter Estimation

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

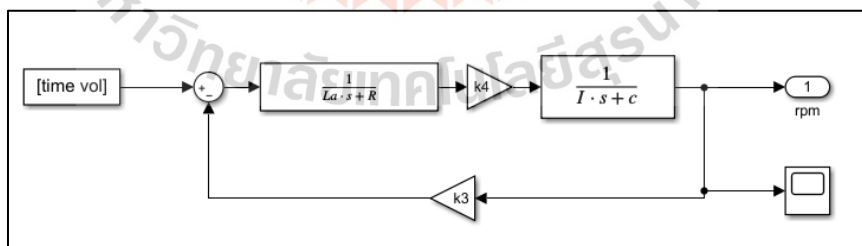
### ค.1 การใช้โปรแกรม Simulink Parameter Estimation

1. Import Data จากการทดลองไว้ใน Work Space ของโปรแกรม MATLAB แต่ในการแสดงตัวอย่างการใช้งานจะสร้างแบบจำลองของระบบโดยใช้ Simulink โดยกำหนดตัวแปรและค่าของตัวแปรของระบบลงไปโดยข้อมูลที่ได้จากการรันโปรแกรมเปรียบเทียบกับเป็นข้อมูลจากการทดลอง โปรแกรมนี้เป็นแบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังรูปที่ ค.1 ซึ่งเป็นระบบที่มีตัวควบคุมแบบพีไอและพีไอดี เมื่อรันโปรแกรมข้อมูลการตอบสนองถูกแสดงผลที่ Scope



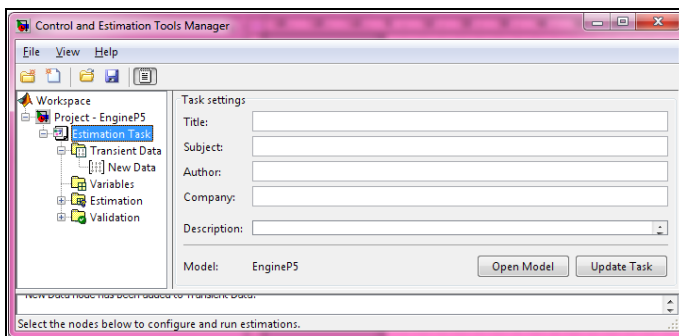
รูปที่ ค.1 แผนภาพการจำลองระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

2. สร้างแบบจำลองของระบบโดยกำหนดตัวแปรและค่าเริ่มต้นของตัวแปรที่ต้องการให้โปรแกรมประมาณค่าตัวแปร แบบจำลองระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังรูปที่ ค.2



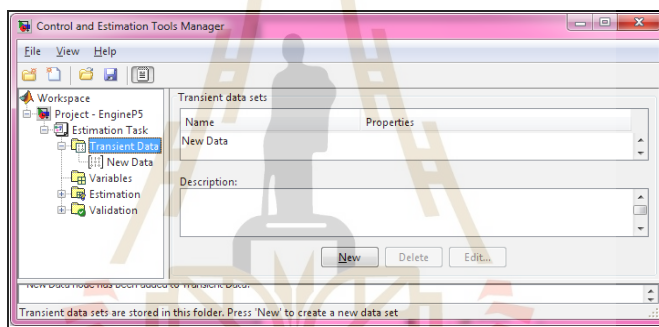
รูปที่ ค.2 แผนภาพแบบจำลองมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

3. เปิด Parameter Estimation บนหน้าต่างของ Simulink ที่จะทำการประมาณค่า โดยเลือก tool => **Parameter Estimation** จะปรากฏหน้าต่างนี้ขึ้นมา



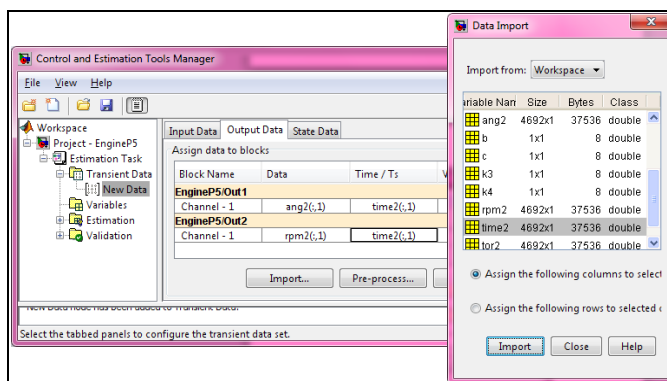
รูปที่ ค.3 แผนภาพแสดงหน้าต่างของ Control and Estimation Tool Manager

4. Click เลือก **Transient Data** => **New**



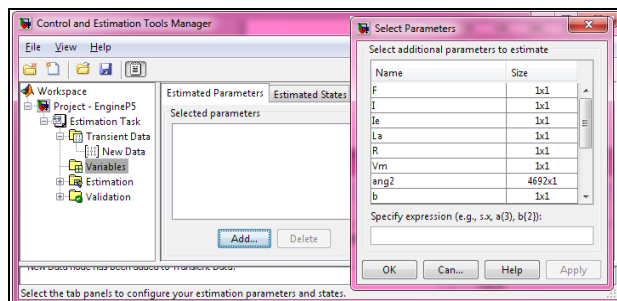
รูปที่ ค.4 แผนภาพแสดงหน้าต่างของการเลือก New Data

5. Click **New Data** => **Output Data** => **Import**



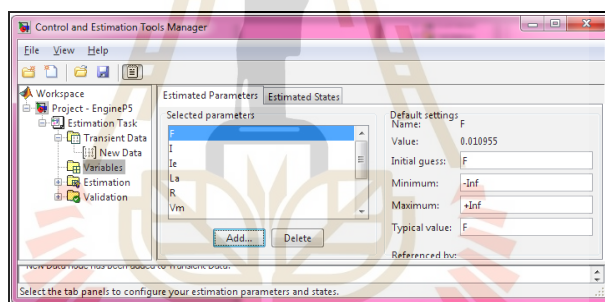
รูปที่ ค.5 แผนภาพแสดงหน้าต่างการเลือกข้อมูลเข้า

6. Click **Variables** => **Add** => เลือกตัวแปรที่ต้องการประมาณค่า => **OK**



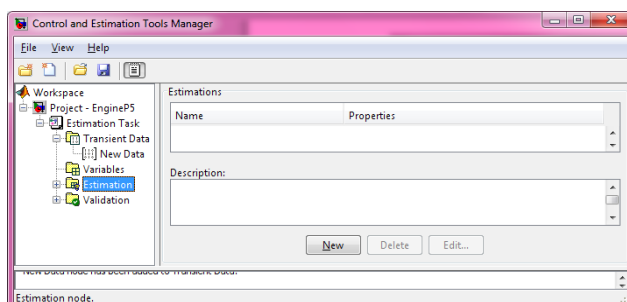
รูปที่ ค.6 แผนภาพแสดงหน้าต่างการเลือกตัวแปรที่ต้องการประมาณค่า

7. กำหนดขอบเขตของตัวแปรที่จะประมาณค่าในส่วนของ **Default settings**



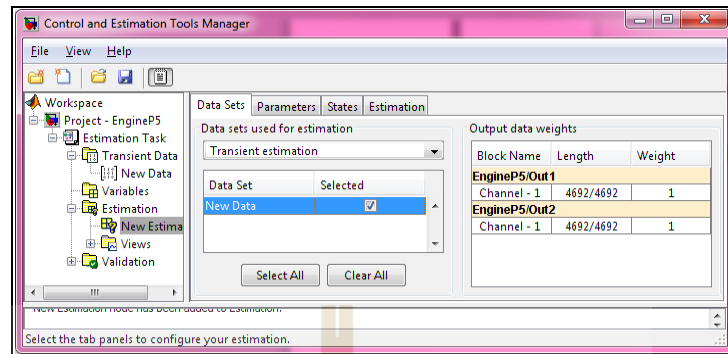
รูปที่ ค.7 แผนภาพแสดงการกำหนดขอบเขตตัวแปร

8. Click **New Estimation** => **New** (จะปรากฏ New Estimation)



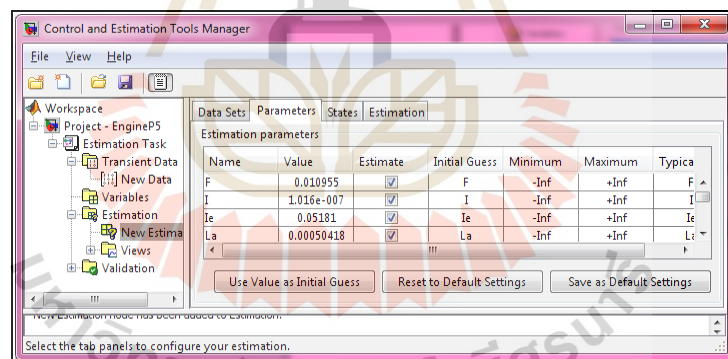
รูปที่ ค.8 แผนภาพแสดงหน้าต่างการสร้าง New Estimation

## 9. Click New =&gt; Select All

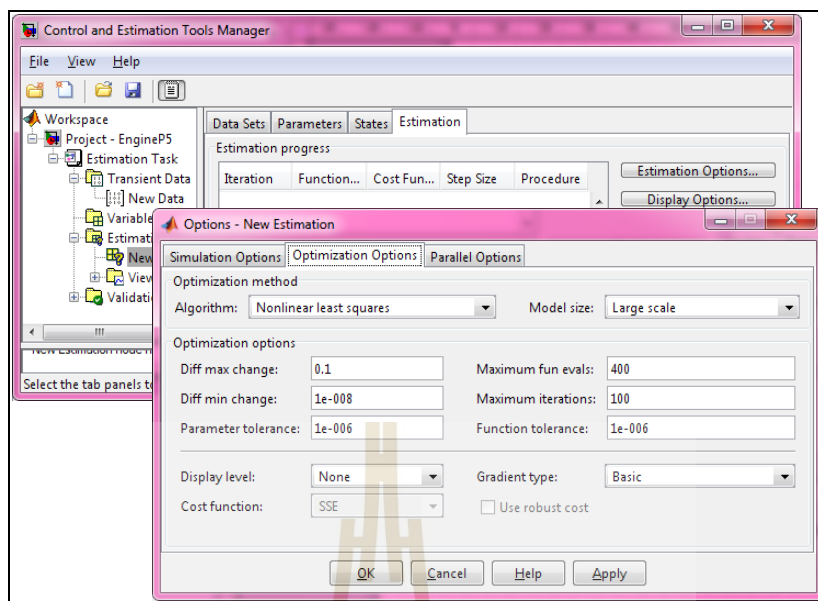


รูปที่ ค.9 แผนภาพแสดงหน้าต่างการเลือกข้อมูลในการ Estimate

## 10. Click Parameters =&gt; Click เลือก Estimate ทุกตัวแปร ดังรูปที่ ง.9 และ Click Estimation =&gt; Estimation Option เพื่อกำหนดคัลลอกริทม์ในการประมาณค่าตัวแปร ดังรูปที่ ง.10

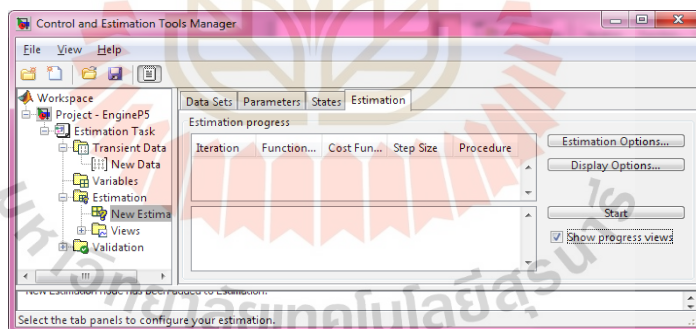


รูปที่ ค.10 แผนภาพแสดงหน้าต่างการกำหนดตัวแปรที่ต้องการประมาณค่า

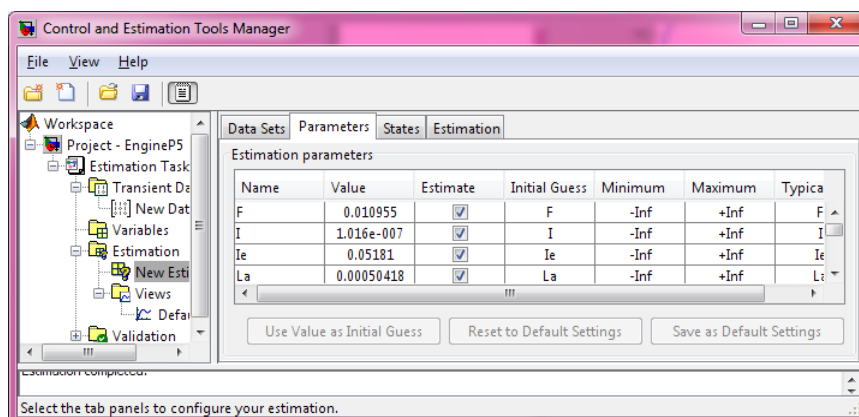


รูปที่ ค.11 แผนภาพแสดงการกำหนดอัลกอริทึมในการประมาณค่าตัวแปร

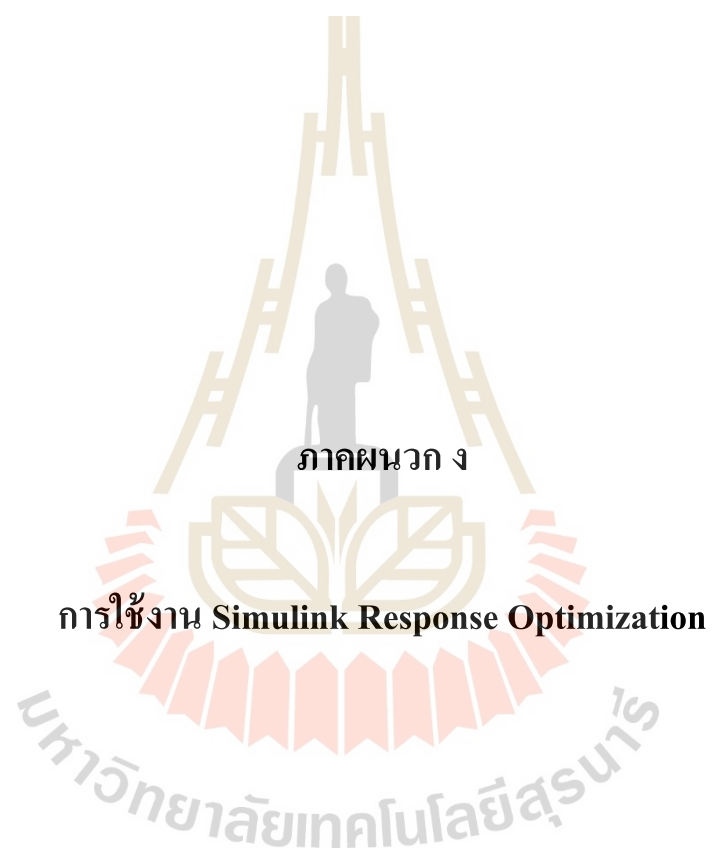
10. Click Estimation => Show Progress View => Start ดังรูปที่ ค.11



รูปที่ ค.12 แผนภาพแสดงการเริ่มการประมาณค่าตัวแปร



รูปที่ ค.13 แผนภาพแสดงค่าตัวแปรที่โปรแกรมประมาณได้



ภาคผนวก ง

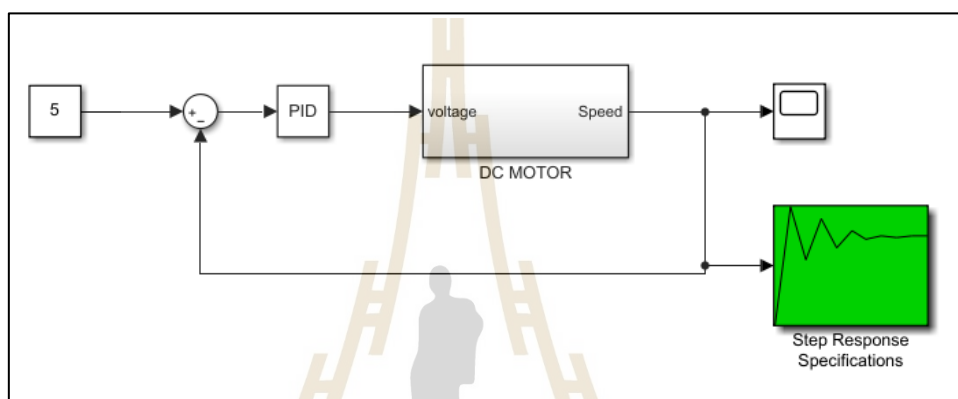
การใช้งาน Simulink Response Optimization

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



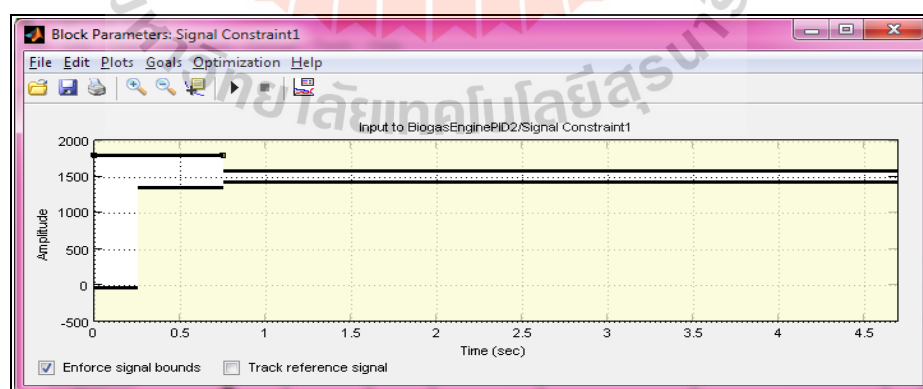
### ง.1 การใช้โปรแกรม Simulink Response Optimization

1. สร้างแบบจำลองของระบบโดยใช้ MATLAB/Simulink โดยกำหนดตัวแปรและค่าเริ่มต้นตัวแปรที่ต้องการให้โปรแกรมประมาณค่าที่ทำให้ได้การตอบสนองตามขอบเขตที่ต้องการ
2. ติดตั้งตัวบังคับสัญญาณ Signal Constraint ที่ตำแหน่งของสัญญาณที่ต้องการบังคับในแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยตัว Signal Constraint Block จะอยู่ใน Simulink Library ที่ชื่อว่า Simulink Response Optimization



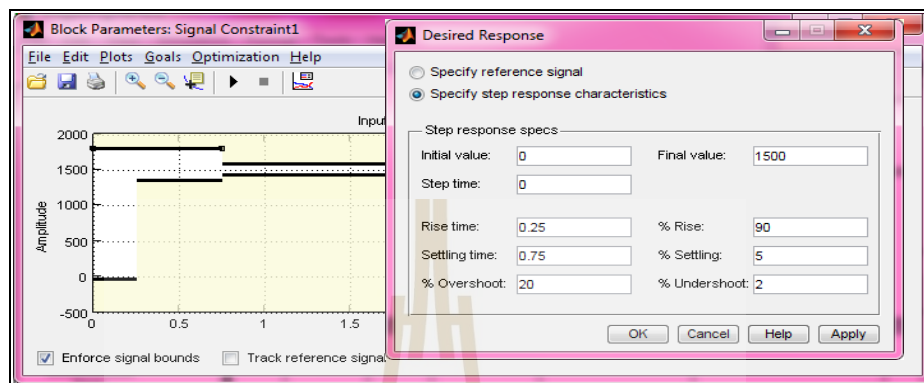
รูปที่ ง.1 แผนภาพแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB/Simulink

3. Double - click ที่ตัว Signal Constrain Block เพื่อแสดง Signal Constraint window



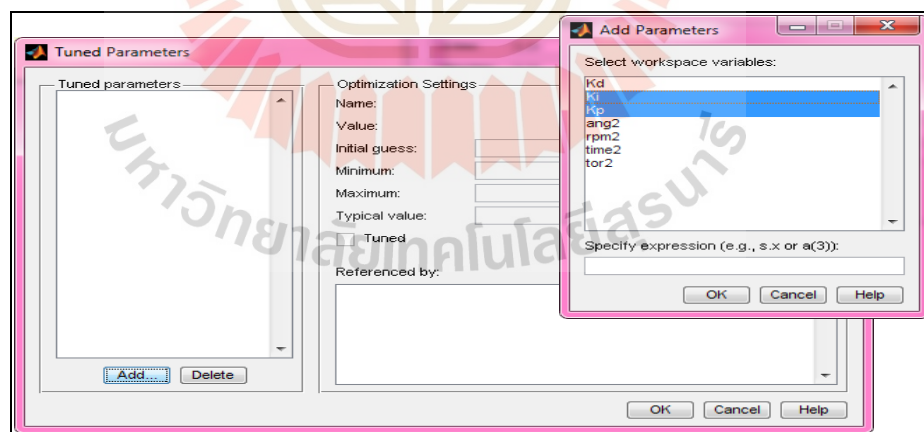
รูปที่ ง.2 แผนภาพแสดง Signal Constraint Window

4. กำหนดรูปแบบของสัญญาณ Output ที่ต้องการบังคับ ซึ่งสัญญาณจะถูกบังคับให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนด การกำหนดขอบเขตของสัญญาณทำได้โดย Click ที่ Goals => Desired Response กำหนด Percent Overshoot, Rise Time และ Settling Time ตามขอบเขต ดังรูปที่ ง.3



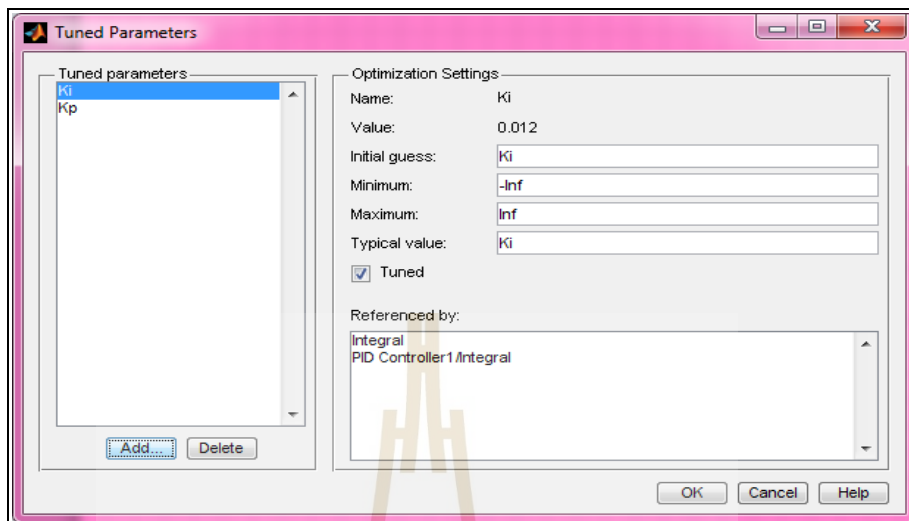
รูปที่ ง.3 แผนภาพแสดงการกำหนดขอบเขตการตอบสนอง

5. เปิด Tuned Parameters Dialog Box จากการเลือก Optimization => Tuned Parameters ในหน้าจอของ Signal window จากนั้น Click Add เลือกพารามิเตอร์ที่ต้องการปรับแต่ง



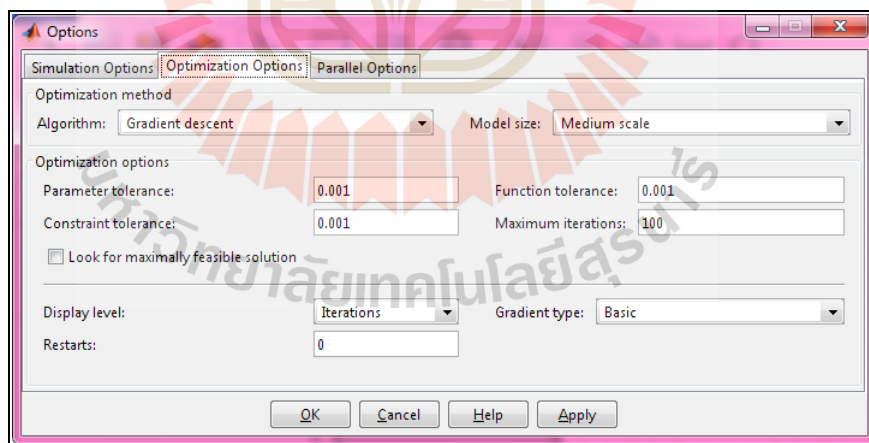
รูปที่ ง.4 แผนภาพแสดงการ Add Parameter

6. กำหนดค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์แต่ละตัวและขอบเขตในการปรับแต่งสัญญาณ



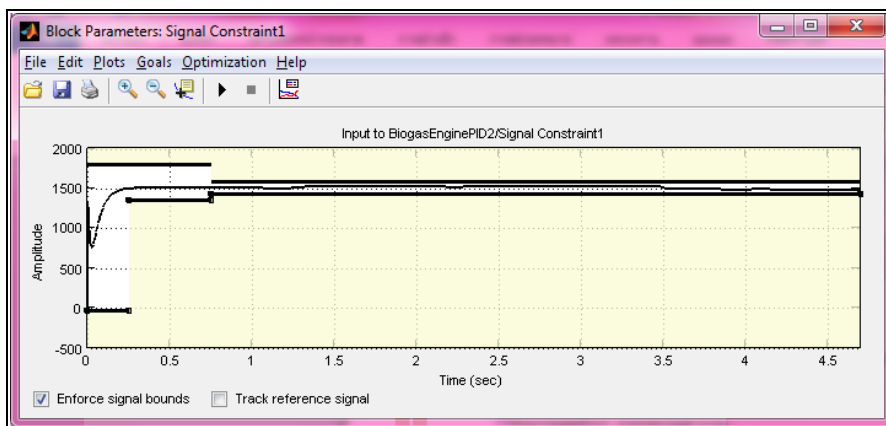
รูปที่ ๓.5 แผนภาพแสดงการกำหนดขอบเขตพารามิเตอร์

7. Click => Optimization => Optimization Options เพื่อกำหนดวิธีการ Optimization



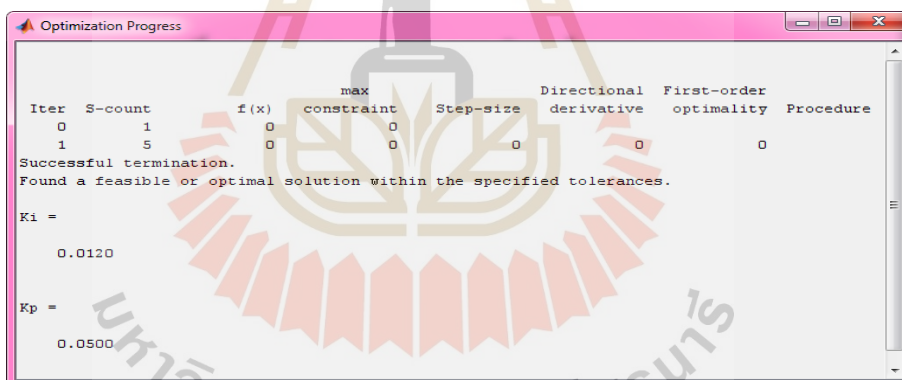
รูปที่ ๓.6 แผนภาพแสดง Options ของการ Optimize

8. Click ที่ Start button ที่ Optimization menu เพื่อเริ่มการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ เพื่อให้ได้สัญญาณอยู่ในขอบเขตที่กำหนด ดังรูปที่ ๓.7

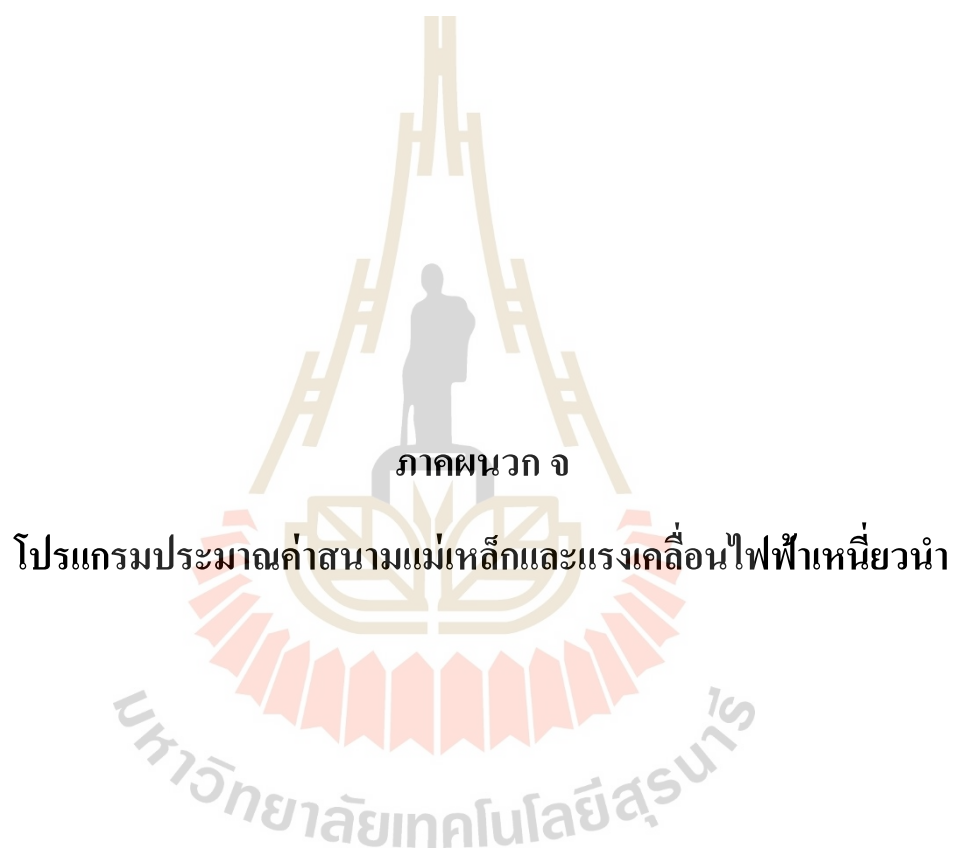


รูปที่ ง.7 แผนภาพแสดงการตอบสนองของสัญญาณในขอบเขต

จากนั้นแสดงความก้าวหน้าการทำงานของโปรแกรมและแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้  
ปรับแต่ง



รูปที่ ง.8 แผนภาพแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้ปรับแต่ง



ภาคผนวก จ

โปรแกรมประมาณค่าสนามแม่เหล็กและแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ

## จ.1 การใช้โปรแกรม Simulink Response Optimization

### 1. โปรแกรมประมาณค่าสนามแม่เหล็กสองขั้ว

```

%clear all;
%clc;
%plot axis (m)
x = [-0.1,0.1];
y = [-0.1,0.1];
%Create a PDE Model model container..
model = createpde();
%Create model from PDE Tool
g = decsg(gd,sf,ns);
%create the geometryt.
geometryFromEdges(model,g);
%View the geometry
figure(1)
pdegplot(model,'FaceLabels','on') % 'FaceLabels' for 3-D
xlim(x)
ylim(y)
figure(2)
pdegplot(model,'EdgeLabels','on') % 'EdgeLabels' for 2-D
xlim(x)
ylim(y)
%Parameter of magnetic coil
air = 4*10^-7; %coefficient air
iron =1; %coefficient iron
N_coil = 216; %Number of turn in coil
L_coil = 0.240; %Legth of coil (m)
air_gap = 0.145; %air gap (m)
I_coil = 24.6; %Current of coil (A)
H = ((N_coil*I_coil)/L_coil);
B = ((air/iron)*H)/air_gap;
%Set zero Dirichlet boundary conditions to all edges.
applyBoundaryCondition(model,'dirichlet','edge',2,'u',-B);
applyBoundaryCondition(model,'dirichlet','edge',4,'u',B);

```

```

applyBoundaryCondition(model,'neumann','Edge',1,'g',0,'q',0);
applyBoundaryCondition(model,'neumann','Edge',3,'g',0,'q',0);
%Set coefficient on face (m d and a = 0 When both m and d are 0, the PDE is stationary.)
specifyCoefficients(model,'m',0,'d',0,'c',mu,'a',0,'f',0);
%Generate a mesh and solve the problem
mesh = generateMesh(model,'Hmax',0.02,'Hmin',0.02);
%Plot mesh
figure(3)
pdemesh(model);
xlim(x)
ylim(y)
%Call the appropriate solver
results = solvepde(model);
ux = results.XGradients;
uy = results.YGradients;
%Plot the result.
figure(4)
B_skew = abs(ux);
plot(B_skew);
grid on
grid minor
xlim([0 2000]);
ylim([0 0.05]);
xlabel('B(T)');
ylabel('B(T)');
%Plot Gradients.
figure(5)
pdeplot(model,'FlowData',-[ux,uy])
xlim(x)
ylim(y)
xlabel('X axis (m)');
ylabel('Y axis (m)');
%Find the nodes located within the following box in Vertical axis
Nby = findNodes(mesh,'box',[-0.001 0.001],[-0.075 0.075]);

```

```

figure(8)
pdemesh(model)
pdemesh(mesh,'NodeLabels','on')
hold on
plot(mesh.Nodes(1,Nby),mesh.Nodes(2,Nby),'or','MarkerFaceColor','g')
xlim([-0.1 0.1]);
ylim([-0.1 0.1]);
%get data Bx in Horizontal axis
Bx = (results.XGradients(Nby));
Data_Bx = abs(sort(Bx));
Y_By = [mesh.Nodes(2,Nby)']; %position y
Y_axis = sort(Y_By);
xlabel('Width (m)');
ylabel('Hight (m)');
%plot Bx field
figure(9)
plot(Y_axis,Data_Bx);
grid on
grid minor
xlim([-0.1 0.1]);
ylim([0 0.05]);
xlabel('Vertical(m)');
ylabel('Magnetic field By (Tesla)');

```

## 2. โปรแกรมประมาณค่าสนามแม่เหล็กสี่ขั้ว

```

% clear all;
% clc;
%plot axis (m)
x = [-0.1,0.1];
y = [-0.1,0.1];
%Create a PDE Model model container..
model = createpde();
%Create model from PDE Tool
g = decsg(gd,sf,ns);

```



```

%create the geometryt.
geometryFromEdges(model,g);
figure(2)
pdeplot(model,'EdgeLabels','on') % 'EdgeLabels' for 2-D
xlim(x)
ylim(y)
%Parameter of magnetic coil
air = 4*10^-7; %coefficient air
iron = 4308; %coefficient iron
N_coil = 266; %Number of turn in coil
R = 0.033; %Radial of qudrupole (m)
L_coil = 0.073; %Radial of qudrupole (m)
I_coil = 6; %Current of coil (A)
H = ((N_coil*I_coil)/L_coil);
B = ((air/iron)*H)/(R*R);
%Set zero Dirichlet boundary conditions to all edges.
applyBoundaryCondition(model,'dirichlet','edge',1,'u',-B);
applyBoundaryCondition(model,'dirichlet','edge',2,'u',B);
applyBoundaryCondition(model,'dirichlet','edge',3,'u',-B);
applyBoundaryCondition(model,'dirichlet','edge',4,'u',B);
specifyCoefficients(model,'m',0,'d',0,'c',mu,'a',0,'f',0);
mesh = generateMesh(model,'Hmax',0.005);
%Call the appropriate solver
results = solvepde(model);
ux = (results.XGradients);
uy = (results.YGradients);
%Plot Gradients.
figure(5)
pdeplot(model,'FlowData',[ux,uy])
xlim([-0.05 0.05]);
ylim([-0.05 0.05]);
xlabel('Width (m)');
ylabel('Hight (m)');

```

```

%Find the nodes located within the following box in Horizontal axis
Nbx = findNodes(mesh,'box',[-0.075 0.075],[-0.001 0.001]);
figure(6)
pdemesh(model)
pdemesh(mesh,'NodeLabels','on')
hold on
plot(mesh.Nodes(1,Nbx),mesh.Nodes(2,Nbx),'or','MarkerFaceColor','g')
%get data Bx in Horizontal axis
Bx = (results.XGradients(Nbx));
Data_Bx = sort(Bx);
X_Bx = [mesh.Nodes(1,Nbx)]; %position x
X_axis = sort(X_Bx);
%plot Bx field
figure(7)
plot(X_axis,Data_Bx);
grid on
grid minor
xlim([-0.075 0.075]);
ylim([-0.1 0.1]);
xlabel('Horizontal(m)');
ylabel('Magnetic field (Bx) (T/m)');
%Find the nodes located within the following box in Vertical axis
Nby = findNodes(mesh,'box',[-0.001 0.001],[-0.075 0.075]);
figure(8)
pdemesh(model)
pdemesh(mesh,'NodeLabels','on')
hold on
plot(mesh.Nodes(1,Nby),mesh.Nodes(2,Nby),'or','MarkerFaceColor','g')
%get data Bx in Horizontal axis
By = (results.YGradients(Nby));
Data_By = sort(By);
Y_By = [mesh.Nodes(2,Nby)]; %position x
Y_axis = sort(Y_By);

```

```

%plot Bx field
figure(9)
plot(Y_axis,Data_By);
grid on
grid minor
xlim([-0.075 0.075]);
ylim([-0.1 0.1]);
xlabel('Vertical(m)');
ylabel('Magnetic field (By) (T/m)');

```

### 3. โปรแกรมวิเคราะห์สนามเหล็กสองขั้ว

```

clc;
clear all;
%Load data
load('Ideal_V90_Skew_5amp.mat');
load('Ideal_V90_Skew_10amp.mat');
load('Ideal_V90_Skew_15amp.mat');
T = 27; %Time get data
Fs = 100; %Sampling rate data
Fi = 200; %low pass filter Freq.
Har1 = Ideal_V90_Skew_5amp; %Get data
Har2 = Ideal_V90_Skew_10amp; %Get data
Har3 = Ideal_V90_Skew_15amp; %Get data
da = T*Fs;
Ts=1/Fs; %Step Time
t=0:Ts:T; %Geneate Time
N=length(t); %Count number of data(time)
%No filter
Y1 = (2/da)*abs(fft(Har1));
Y2 = (2/da)*abs(fft(Har2));
Y3 = (2/da)*abs(fft(Har3));
%Fit Harmonics Signal
Tc = t.'; %Row to Column

```

```

%Generate Frequency
f = Fs*(0:N-1)/N;

%Set Plot
Xaxis = 10; %Maximum X axis
Yaxis = 7; %Maximum Y axis

%Plot Standard Signal
figure(2);
plot(f,Y1,'k',f,Y2,'-k',f,Y3,'-k','LineWidth',1.5)
legend('5 A','10 A','15 A');
grid on
grid minor
xlim([0 5]);
ylim([0 15]);
xlabel('Frequency (Hz)');
ylabel('Amplitude (mV)');

```

#### 4. โปรแกรมวิเคราะห์แม่เหล็กสี่ขั้ว

```

clc;
clear all;
%Load data
load('Ideal_V90_Skew_2amp.mat');
load('Ideal_V90_Skew_4amp.mat');
load('Ideal_V90_Skew_6amp.mat');
T = 27; %Time get data
Fs = 100; %Sampling rate data
Fi = 200; %low pass filter Freq.
Har1 = Ideal_V90_Skew_2amp; %Get data
Har2 = Ideal_V90_Skew_4amp; %Get data
Har3 = Ideal_V90_Skew_6amp; %Get data
da = T*Fs;
Ts=1/Fs; %Step Time
t=0:Ts:T; %Geneate Time
N=length(t); %Count number of data(time)

```

```

%No filter
Y1 = (2/da)*abs(fft(Har1));
Y2 = (2/da)*abs(fft(Har2));
Y3 = (2/da)*abs(fft(Har3));

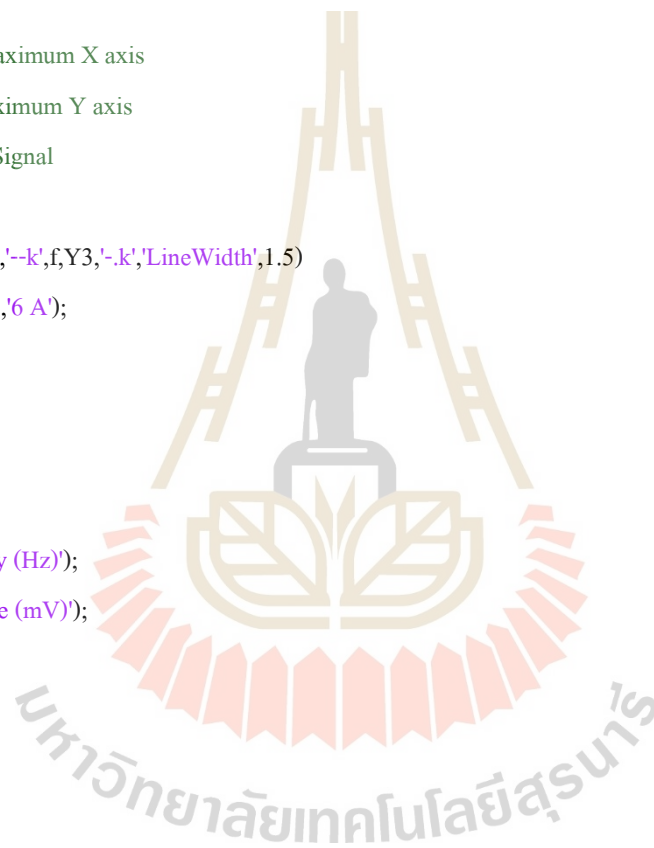
%Fit Harmonics Signal
Tc = t'; %Row to Column

%Generate Frequency
f = Fs*(0:N-1)/N;

%Set Plot
Xaxis = 10; %Maximum X axis
Yaxis = 7; %Maximum Y axis

%Plot Standard Signal
figure(2);
plot(f,Y1,'k',f,Y2,'-k',f,Y3,'-k','LineWidth',1.5)
legend('2 A','4 A','6 A');
grid on
grid minor
xlim([0 5]);
ylim([0 2500]);
xlabel('Frequency (Hz)');
ylabel('Amplitude (mV)');

```



ภาคผนวก จ

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

## รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

- Odngam,S., Preecha, C., Sanwong, P., Thongtan, W., Srisertpol, J. Precision Analysis and Design of Rotating Coil Magnetic Measurements System. **Applied. Sciences.** 2020, 10, 8454
- Preecha, C., Odngam S., Sanwong P., and Sriwertpol j. (2020) “Development of Magnetic Field Measurement Device using Rotating Coil Method for Dipole Magnet” **The 43<sup>rd</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-43)**, Phitsanulok, Thailand, October 28-30, 2020
- Thongtan, W., Wonglomklang. T., Odngam. S. and Srisertpol. J. (2020) “The effect of shaft whirling on accuracy of rotating coil magnetic measurement system” **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 717(2020)**, doi:10.1088/1757-899X/717/1/012012
- Thongtan, W., Wonglomklang. T., Odngam. S. and Srisertpol. J. (2019) “The effect of shaft whirling on accuracy of rotating coil magnetic measurement system” **2019 International Conference on Mechanical, Electronic and Robotics Engineering (MERE 2019)**, Wuhan, China, November 9 - 11, 2019
- Pawako, S., Taweepiradeerattana A., Odngam S. and Srisertpol J. (2017) “Speed Control System Design of the Brushless DC Motor for Hematocrit Centrifuge Machine”, **Innovation and Technology Conference (ITC 2017)**, Surin, Thailand, December 25-26, 2017
- Saengsri, S., Prawanta. S., Odngam. S. and Srisertpol. J. (2017) “PI-Servo with State-D Feedback Observer for Magnetic Stirrer Machine” **2017 International Conference on Circuits, Devices and Systems (ICCDS 2017)**, Chengdu, China, September 5 -8, 2017, pp.6-10.
- Odngam, S. and Srisertpol J. (2016) “Speed Control System of the Generator with the Radial Magnetic Coupling using Second Order Model” **2016 International Conference on Modeling, Simulation and Optimization Technologies and Applications (MSOTA 2016)**, Xiamen, China, December 18-19, 2016.

## ประวัติผู้เขียน

นายสุนทร โอษฐ์งาม เกิดเมื่อวันอาทิตย์ที่ 28 มิถุนายน พ.ศ. 2531 ที่อำเภอเมือง จังหวัดสุรินทร์ เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาชั้นปีที่ 1 - 6 ที่โรงเรียนเมืองสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์ และระดับมัธยมศึกษาชั้นปีที่ 1 - 6 ที่โรงเรียนสุรวิทยาคาร จังหวัดสุรินทร์ สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (หลักสูตรวิศวกรรมยานยนต์) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2553 และในปีเดียวกันนี้ได้ศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล โดยได้รับการสนับสนุนทุนการศึกษา จำนวน 2 ทุน คือ ทุนการศึกษาสำหรับผู้มีศักยภาพเข้าศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ในมหาวิทยาลัย ฯ และทุนการศึกษาแก่นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาที่คณาจารย์ได้รับทุนวิจัยจากแหล่งทุนภายนอก ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับระบบควบคุมความเร็วรอบเครื่องยนต์เบนซินผลิตกระแสไฟฟ้าขนาด 20 กิโลวัตต์ จากก๊าซชีวภาพ ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดา ฯ สยามบรมราชกุมารี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต เมื่อปี พ.ศ. 2558 และในปีเดียวกันนี้ ได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้รับทุนสนับสนุนจากสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ภายใต้โครงการพัฒนาบุคลากร ด้านเทคโนโลยีวิศวกรรมของเครื่องเร่งอนุภาคและเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน และทำงานวิจัยทางด้านเครื่องมือวัดสนามแม่เหล็กด้วยเทคนิคคลาดหมุม เพื่อลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ การดำเนินงานวิจัยได้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้