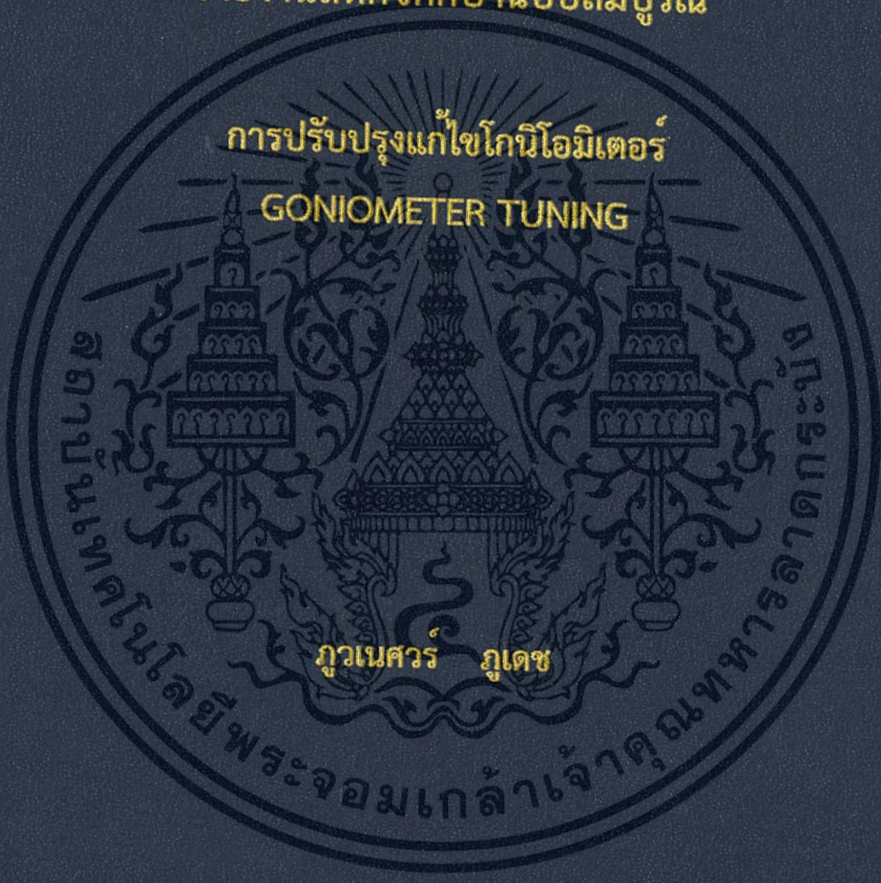




รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

การปรับปรุงแก้ไขโกนิโอมิเตอร์  
GONIOMETER TUNING



ภูวนิศวรร ภูเดช

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559



T148511

รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

การปรับปรุงแก้ไขโกนิโอมิเตอร์  
GONIOMETER TUNING



ภูวนศวรร์ ภูเดช

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 148511  
วันเดือนปี 30 ต.ค. 2560

b. 12871205  
f. ....

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ	การปรับปรุงแก้ไขโกนิโอมิเตอร์
นักศึกษา	นายภูวนศวรร ภูเดช
ภาควิชา	วิศวกรรมการวัดและควบคุม
อาจารย์นิเทศ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพดล มณีรัตน์
ผู้นิเทศงาน	นายประเสริฐ เลอสรวง
สถานประกอบการ	บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด

### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันการผลิต Head Gimbal Assembly (HGA) ใช้มอเตอร์ 3 แกนในการประกอบ Trace Gimbal Assembly (TGA) กับ Slider เป็น Head Gimbal Assembly (HGA) ซึ่งปริญาณิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอการปรับปรุงแก้ไข Goniometer เป็นแกนหมุน T ของมอเตอร์ 3 แกนที่ใช้ในการประกอบ Head Gimbal Assembly (HGA)

เมื่อ Goniometer เกิดข้อผิดพลาด (Error) จะมีการเปลี่ยนตัวใหม่แทนที่ทันที ซึ่งการเปลี่ยนใช้เวลาทำให้สูญเสียเวลาในการผลิตของสายการผลิตนั้นๆ และยังสูญเสียค่าใช้จ่ายในการส่ง Goniometer ตัวเก่าให้ทางผู้จำหน่ายเพื่อปรับปรุงแก้ไข โดยการปรับปรุงแก้ไขต้องใช้หลักการควบคุมมอเตอร์แบบ PID ในการควบคุมและแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น ทำให้สามารถลดเวลาในเปลี่ยน Goniometer จากปกติ 4 ชั่วโมงลดลงเหลือ 30 นาทีส่งผลให้ช่วยลดการสูญเสียเวลาในการผลิต Head Gimbal Assembly (HGA) และลดการสูญเสียค่าใช้จ่ายในการส่ง Goniometer ตัวเก่าให้ทางผู้จำหน่ายเพื่อปรับปรุงแก้ไข

**คำสำคัญ:** การควบคุมแบบ PID, Goniometer, Head Gimbal Assembly (HGA), Gimbal Assembly (TGA), Slider

Research Title	Goniometer Tuning
Student Intern Name	Mr.Phuwanet Phudet
Department	Instrumentation and Control Engineering
Advisor	Asst. Prof. Dr.Noppadol Maneerut
Mentor	Mr.Prasert Lersuang
Company	Seagate (Thailand) Ltd.

## ABSTRACT

Nowadays Head Gimbal Assembly (HGA) manufacturing have been using 3-axis motors to combine Trace Gimbal Assembly (TGA) and Slider to be a HGA. This Thesis poses to improve Goniometer which is a T-axis of the motors.

When Goniometer error occurs, New Goniometer will be replaced the old one and this process pauses the production line and the old Goniometer will be sent to vender that causes of time- and cost- consuming. To improve Goniometer, PID controller is used and a result is Goniometer replacement time is reduced from 4 hours to 30 minutes. Due to this improvement, production time and cost which are wasted by replacement and sending Goniometer to vender are saved.

**Keywords:** Goniometer, PID controller, Head Gimbal Assembly (HGA), Gimbal Assembly (TGA), Slider

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จเนื่องจากได้รับโอกาสจากคุณประเสริฐ เลอสรวง ที่รับข้าพเจ้าเข้าฝึกงานกับบริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน พ.ศ. 2559 ถึงวันที่ 30 พฤศจิกายน พ.ศ.2559 ระยะเวลา รวม 6 เดือนที่ได้รับความรู้ในด้านต่างๆ มากมายนอกจากความรู้ยังได้รับประสบการณ์การทำงานจริงและได้รับการดูแลเป็นอย่างดีจากบุคลากรภายในบริษัทรวมทั้งอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.นพดล มณีรัตน์ ที่ให้การสนับสนุนและให้ความช่วยเหลือตลอดช่วงระยะเวลาการฝึกงาน



ภูวนศวรร ภูเดช

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	IV
สารบัญตาราง.....	IV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการทำวิจัย.....	1
1.4 วิธีดำเนินการทำวิจัย.....	1
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor).....	3
2.1.1 ประเภทของเซอร์โวมอเตอร์.....	4
2.1.1.1 มอเตอร์ชนิดที่มีแปรงถ่าน.....	4
2.1.1.2 เซอร์โวมอเตอร์ชนิดที่ไม่มีแปรงถ่าน.....	4
2.1.2 โครงสร้างของเซอร์โวมอเตอร์.....	4
2.1.3 หลักการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์.....	6

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.4 โครงสร้างของระบบควบคุมเซอร์โวมอเตอร์.....	7
2.1.5 องค์ประกอบในการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์.....	7
2.2 เอ็นโคดเดอร์ (Encoder).....	9
2.2.1 เอ็นโคดเดอร์ตรวจรู้ตำแหน่งแบบเพิ่มค่า.....	10
2.2.2 เอ็นโคดเดอร์ตรวจรู้ตำแหน่งแบบสมบูรณ์.....	11
2.2.3 ออปติคอลลเอ็นโคดเดอร์ (Optical Encoder).....	12
2.3 ระบบควบคุมพีไอดี (PID controller).....	13
2.3.1 บล็อกไดอะแกรม.....	17
2.3.2 การวิเคราะห์ผลตอบสนองชั่วคราว.....	18
2.3.2.1 สัญญาณต่างๆ ในระบบควบคุม.....	18
2.3.2.2 การหาผลตอบสนองเชิงเวลาของระบบ.....	18
2.3.2.3 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์แสดงผลตอบสนอง.....	19
2.3.2.4 ผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่ง.....	19
2.3.2.5 ผลตอบสนองของระบบอันดับสอง.....	19
2.3.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ.....	20
2.3.3.1 ส่วนประกอบของผลตอบสนอง.....	20
2.3.3.1.1 ผลตอบสนองเมื่อค่านิ่งถึงค่าเริ่มต้น.....	20
2.3.3.1.2 ผลตอบสนองแบบซีโรสเตทและซีโรอินพุท.....	20
2.3.3.1.3 ผลตอบสนองแบบบังคับและธรรมชาติ.....	21

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3.2 เสถียรภาพ.....	21
2.3.3.2.1 เสถียรภาพภายในและเสถียรภาพภายนอก.....	21
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....</b>	<b>22</b>
3.1 การค้นคว้าหาข้อมูล.....	22
3.1.1 ข้อมูลพื้นฐานของมอเตอร์.....	22
3.1.2 Servo Loop Block Diagramและพารามิเตอร์.....	24
3.1.3 การควบคุมด้วย PID Controller.....	25
3.2 การปรับแต่งพารามิเตอร์ของมอเตอร์และแก้ไขข้อผิดพลาด.....	26
3.2.1 การแก้ไขข้อผิดพลาด.....	26
3.2.2 การปรับแต่งพารามิเตอร์ของมอเตอร์.....	28
<b>บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน.....</b>	<b>29</b>
4.1 การแก้ไขข้อผิดพลาด.....	29
4.2 การปรับแต่งพารามิเตอร์.....	30
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>32</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	32
5.2 ปัญหาที่พบและแนวทางการแก้ไข.....	33
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	33
<b>เอกสารอ้างอิง.....</b>	<b>34</b>
<b>ประวัติผู้เขียน.....</b>	<b>35</b>

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor).....	3
2.2 โครงสร้างของ AC servo Motor.....	5
2.3 แสดงวัสดุที่นำมาสร้างแม่เหล็กถาวร.....	6
2.4 โครงสร้างและการทำงานของ AC Servo Motor.....	6
2.5 โครงสร้างของระบบควบคุมเซอร์โวมอเตอร์.....	7
2.6 คอนโทรลเลอร์ (Controller).....	8
2.7 เซอร์โวไดรฟ์เวอร์ (Servo Driver).....	8
2.8 เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor).....	9
2.9 ออปติคัลเอ็นโคเดอร์แบบเพิ่มค่า (a) แบบหมุน (b) แบบเคลื่อนแนวตรงเชิงเส้น.....	10
2.10 ออปติคัลเอ็นโคเดอร์แบบสัมบูรณ์แบบเคลื่อนแนวตรงขนาด 4 บิต.....	11
2.11 การตรวจจับแบบขวางแสง.....	12
2.12 การตรวจจับแบบสะท้อนแสง.....	12
2.13 แผนภาพบล็อกของการควบคุมแบบพีไอดี.....	14
2.14 กราฟ PV ต่อเวลา ( $K_p$ และ $K_d$ คงที่).....	15
2.15 กราฟ PV ต่อเวลา ( $K_p$ และ $K_d$ คงที่).....	16
2.16 กราฟ PV ต่อเวลา ( $K_p$ และ $K_i$ คงที่).....	17
3.1 Goniometer ANT-20G-90.....	22

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.2 ประสิทธิภาพของ ANT-20G-90.....	24
3.3 Servo Loop Block Diagram.....	24
4.1 จำนวนที่พบข้อผิดพลาด.....	29
4.2 Quality Estimate ของมอเตอร์ที่ผ่านการปรับแต่งพารามิเตอร์.....	30
4.3 ผลลัพธ์ของการปรับปรุงมอเตอร์.....	30
4.4 จำนวนชั่วโมงการทำงานก่อนและหลัง.....	31



# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ข้อมูลจำเพาะของ Goniometer ANT-20G-90.....	22
3.1 ข้อมูลจำเพาะของ Goniometer ANT-20G-90 (ต่อ).....	23



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

เนื่องจากข้อผิดพลาด (Error) ที่เกิดจาก Goniometer ทำให้มีการเปลี่ยน Goniometer ตัวใหม่ในสายการผลิตซึ่งในบางครั้ง Goniometer ยังมีฟังก์ชันที่สามารถทำงานได้ ส่งผลให้เสียเวลาในการเปลี่ยนตัวใหม่แทนที่ทำให้ปริมาณการผลิตต่อวันลดลงและยังทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการส่งให้ผู้แทนจำหน่าย จึงมีการทำการวิจัยการปรับปรุงแก้ไข Goniometer ที่ซึ่งถูกเปลี่ยนจากสายการผลิตให้สามารถนำกลับมาใช้งานได้ตามปกติ

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อลดระยะเวลาในการหยุดสายการผลิตลง
2. เพื่อลดรายจ่ายที่สูญเสียของบริษัท

### 1.3 ขอบเขตของการทำวิจัย

1. วิเคราะห์และหาสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น
2. ปรับปรุงแก้ไขข้อผิดพลาด (Error) ที่เกิดขึ้น

### 1.4 วิธีดำเนินการทำวิจัย

กำหนดขั้นตอนการทำงานเป็น 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการค้นคว้าหาข้อมูล (Search Information Phase) ขั้นตอนการวิเคราะห์ (Solve Problem and Analyze Phase) และแก้ปัญหาและขั้นตอนการสรุปผล (Summary Phase) ซึ่งแต่ละขั้นจะมีการกำหนดระยะเวลาในการทำเพื่อให้สำเร็จตามเป้าหมายที่ได้ตั้งไว้

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถวิเคราะห์และหาสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น
2. สามารถปรับปรุงแก้ไขข้อผิดพลาด (Error) ที่เกิดขึ้น
3. ลดระยะเวลาในการหยุดสายการผลิตลง
4. ลดรายจ่ายที่สูญเสียของบริษัท



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

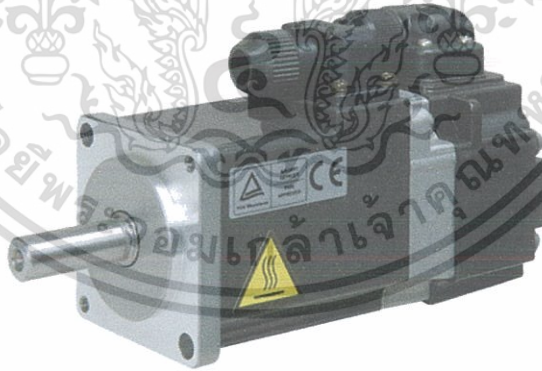
## บทที่ 2

### แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor)

เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) เป็นมอเตอร์ที่มีการควบคุมการเคลื่อนที่ของมัน (State) ไม่ว่าจะเป็นเป็นระยะ ความเร็วการหมุนโดยใช้การควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถควบคุมเครื่องจักร หรือระบบการทำงานนั้นๆ ให้เป็นไปตามความต้องการ เช่น ควบคุมความเร็ว (Speed), ควบคุมแรงบิด (Torque), ควบคุมแรงตำแหน่ง (Position), ระยะทางในการเคลื่อนที่ (Position Control) ของตัวมอเตอร์ได้ ซึ่งมอเตอร์ทั่วไปไม่สามารถควบคุมในลักษณะงานเบื้องต้นได้ โดยให้ผลลัพธ์ตามความต้องการที่มีความแม่นยำสูง

ขนาดของ Servo Motor จะมีหน่วยในการบอกขนาดเป็นวัตต์ (Watt) Servo Motor ของ Panasonic จะมีขนาดตั้งแต่ 50W-15kW ทำให้ผู้ใช้งานมีความหลากหลายในการใช้งาน มีดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor)

### 2.1.1 ประเภทของเซอร์โวมอเตอร์

โดยทั่วไปจะมีทั้งดีซีและเอซี เซอร์โวในเครื่องจักรรุ่นเก่าๆ จะพบว่า DC Servo Motor มีการใช้เครื่องจักรกลอุตสาหกรรมมากกว่า AC Servo Motor เนื่องจากช่วงที่ผ่านมากการควบคุมกระแสกระแสสูงๆ นั้นจะต้องใช้ SCRs แต่ปัจจุบันทรานซิสเตอร์ได้พัฒนาขีดความสามารถให้ตัดต่อกระแสสูงและใช้งานที่ความถี่ได้สูงๆ ขึ้นจึงทำให้ระบบควบคุมทางเอซีและระบบเซอร์โวได้ถูกนำมาใช้งานมากขึ้น ซึ่งสามารถแยกประเภทของเซอร์โวได้ดังนี้

#### 2.1.1.1 มอเตอร์ชนิดที่มีแปรงถ่าน

เซอร์โวมอเตอร์ชนิดนี้ที่สเตเตอร์จะเป็นแม่เหล็กถาวร ส่วนโรเตอร์ยังใช้แปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์เรียงกระแสเข้าสู่ขดลวดอาร์เมเจอร์ เหมือนกับดีซีมอเตอร์ทั่วไป

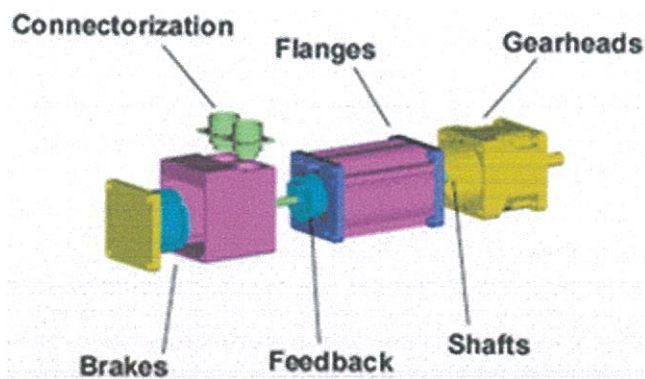
#### 2.1.1.2 เซอร์โวมอเตอร์ชนิดที่ไม่มีแปรงถ่าน

เซอร์โวมอเตอร์ในกลุ่มนี้ประกอบด้วยดีซีเซอร์โว (DC Brushless Servo โรเตอร์ทำด้วยแม่เหล็กถาวร) เอซีเซอร์โว (AC Servo) ซึ่งมีทั้งแบบซิงโครนัสเซอร์โวและอะซิงโครนัสเซอร์โว (การนำอินดักชันมอเตอร์มาใช้ทำเป็นระบบขับเคลื่อนเซอร์โวมอเตอร์) และสเตปป์เซอร์โวมอเตอร์

### 2.1.2 โครงสร้างของเซอร์โวมอเตอร์

ข้อจำกัดอย่างหนึ่งของระบบควบคุมเซอร์โว ก็คือการใช้งานจะต้องเป็นแบบ Closed loop เท่านั้น การใช้งานระบบควบคุมเซอร์โวไม่สามารถเลือกควบคุมเป็นแบบ Open loop ได้เหมือนกันระบบขับเคลื่อนเอซี (AC Drives) การตอบสนองของระบบเซอร์โว เช่น อัตราเร่ง แรงบิดและตำแหน่งที่ควบคุม จะไม่เป็นไปตามวัตถุประสงค์หากไม่มีสัญญาณป้อนกลับไปยังชุดขับเคลื่อนเซอร์โว

การควบคุมการทำงานในระบบนี้อุปกรณ์ป้อนกลับหรือเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder) จะมีบทบาทความสำคัญอย่างยิ่งเหมือนกับเป็นของคู่กันชนิดที่เรียกว่าขาดซึ่งกันและกันไม่ได้ ในทางปฏิบัติจึงทำเซอร์โวมอเตอร์และเอ็นโค้ดเดอร์ ถูกออกแบบและผลิตสร้างขึ้นมาคู่กันในลักษณะเป็นแพ็คเกจ (Package ซึ่งมี Encoder ติดอยู่ที่ส่วนท้ายของมอเตอร์ ดังรูป



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของ AC servo Motor

Gearheads = เกียร์สำหรับลดความเร็วรอบเพื่อเพิ่มแรงบิด

Shafts = เพลาของมอเตอร์

Flanges = หน้าแปลนสำหรับติดตั้งมอเตอร์

Feed back = อุปกรณ์ป้อนกลับหรือ Encoder

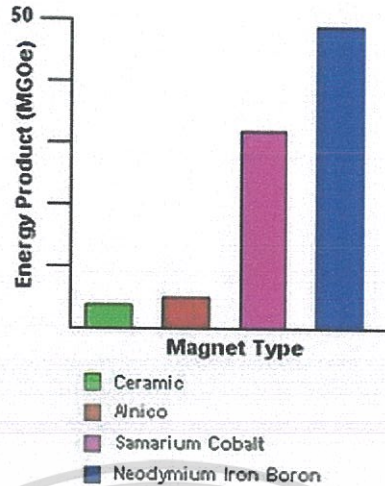
Connectorization = ขั้วต่อสายไฟเข้ามอเตอร์ และขั้วต่อสายสำหรับ Encoder

Brakes = ชุดเบรก

โครงสร้างของ AC servo Motor จะคล้ายกับมอเตอร์ 3 เฟสทั่วๆ ไป ซึ่งจะประกอบด้วย 2 ส่วนที่สำคัญ คือ สเตเตอร์และโรเตอร์ โดยสเตเตอร์จะประกอบด้วยขดลวด 3 ชุด ขดลวดภายในจะต่อเป็นแบบสตาร์ (Star หรือ WYE) และมีสายต่อมาที่ขั้วต่อสายด้านนอก 3 เส้น (จุดนิวทรัลจะอยู่ด้านใน) ส่วนโรเตอร์ทำด้วยแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) ไม่มีขดลวดพัน, ไม่มีคอมมิวเตเตอร์และไม่มีแปรงถ่าน (Brushless)

โครงสร้างที่ไม่มีขดลวดพันไม่และแปรงถ่าน จะทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์สูงขึ้น ไม่มีการสูญเสียในขดลวดทองแดง ไม่ต้องบำรุงรักษาเนื่องจากแปรงถ่าน ไม่เกิดประกายไฟเนื่องจากการเรียงกระแสจากแปรงถ่านผ่านคอมมิวเตเตอร์ไปยังขดลวดทองแดงที่พันอยู่ในตัวโรเตอร์

สำหรับวัสดุที่นำมาสร้างแม่เหล็กถาวรนี้จะแตกต่างกันไป โดยขึ้นอยู่กับราคาและเทคโนโลยีของบริษัทผู้ผลิตนั้นๆ ซึ่งมีตั้งแต่ชนิดที่ราคาถูกเช่น เซรามิก (เฟอไรต์) จนถึงการใช้วัสดุที่มีราคาแพงอย่างเช่น ซามาเรียม โคบอลต์ หรือ นีโอไดเมียม เป็นต้น (ปัจจุบันเอซีเซอร์โวมอเตอร์ส่วนใหญ่จะใช้วัสดุสารแม่เหล็กแบบ นีโอไดเมียม เนื่องจากมีคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กและความเหมาะสมเรื่องราคาดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุสารแม่เหล็กแบบอื่นๆ

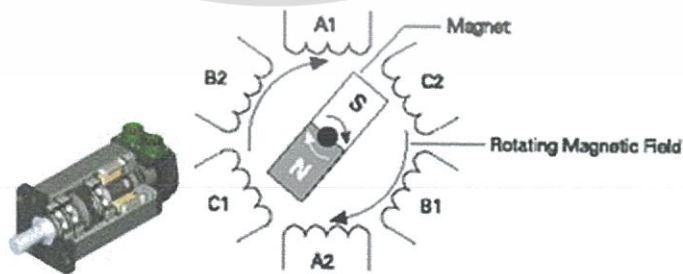


รูปที่ 2.3 วัสดุที่นำมาสร้างแม่เหล็กถาวร

### 2.1.3 หลักการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์

การทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ชนิดนี้จะคล้ายกับการทำงานของซิงโครนัสมอเตอร์ 3 เฟส กล่าวคือ เมื่อมีการควบคุมให้คอนโทรลเลอร์จ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังขดลวดที่สเตเตอร์ แกนเหล็กของสเตเตอร์ จะกลายเป็นแม่เหล็กไฟฟ้าและหมุนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่แปรผันตามความถี่ ซึ่งเรียกว่า ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed) หรือความเร็วสนามแม่เหล็กหมุนและจะดูดิให้โรเตอร์ซึ่งเป็นแม่เหล็กถาวรหมุนเคลื่อนที่ตาม

จากลักษณะโครงสร้างของโรเตอร์และหลักการทำงานที่เหมือนกับซิงโครนัสมอเตอร์ซึ่งเป็นมอเตอร์แบบเอซี แต่ไม่มีแปรงถ่าน (Brushless) ไม่มีซีคอมมิวเตเตอร์ จึงทำให้มอเตอร์ชนิดนี้มีชื่อเรียกขานแตกต่างกันออกไป เช่น เรียกทับศัพท์ว่า Permanent Magnet Synchronous Motor(PMSM) ซึ่งหมายถึงซิงโครนัสมอเตอร์ที่ไม่มีแปรงถ่าน บ้างก็เรียกว่าเอซีเซอร์โวมอเตอร์ (AC Servo Motor) หรือบ้างก็เรียกว่า AC Brushless หรือ Brushless Motor เป็นต้น

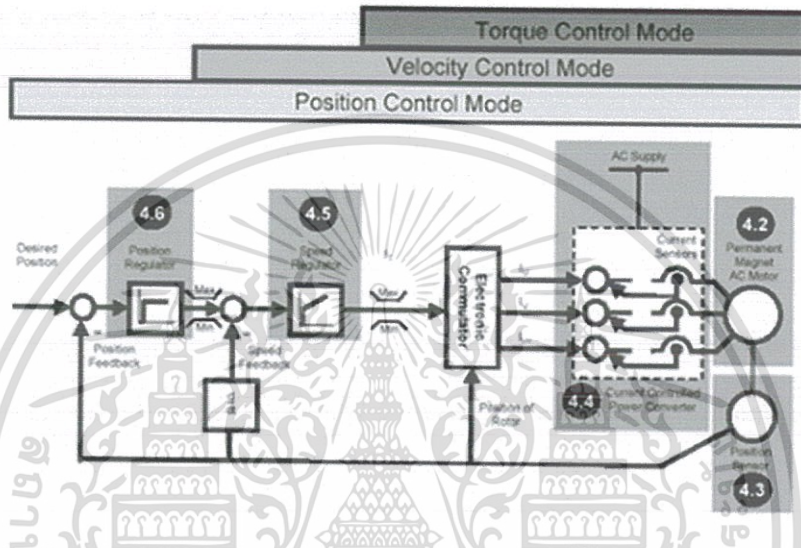


รูปที่ 2.4 โครงสร้างและการทำงานของ AC Servo Motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.4 โครงสร้างของระบบควบคุมเซอร์โวมอเตอร์

ลักษณะของระบบควบคุมเซอร์โวมอเตอร์จะเป็นระบบควบคุมแบบลูปปิด(Closed loop control) ซึ่งประกอบด้วย 3 โหมดการควบคุมคือ โหมดการควบคุมแรงบิด (Torque Control Mode) ซึ่งอยู่วงรอบหรือลูปในสุด โหมดการควบคุมอัตราเร่ง(Velocity Control Mode) และโหมดการควบคุมตำแหน่ง(Position Control Mode) ซึ่งอยู่ลูปด้านนอกสุด โดยมีองค์ประกอบที่สำคัญๆ ดังรูป



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของระบบควบคุมเซอร์โวมอเตอร์

1. เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) (ตำแหน่ง 4.2)
2. ชุดควบคุมการขับเคลื่อนเซอร์โว (Servo Drive, Servo Amplifier หรือบ้างก็เรียกว่า Servo Controller) (ตำแหน่ง 4.4, 4.5, 4.6)
3. อุปกรณ์ป้อนกลับ (Feedback Device เช่น Position Sensor) (ตำแหน่ง 4.3)

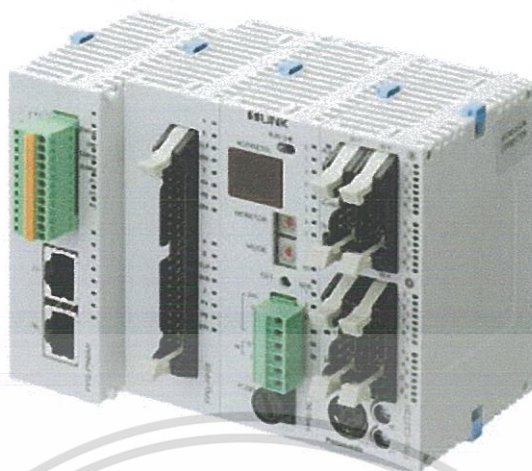
### 2.1.5 องค์ประกอบในการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์

การทำงานเพียงตัว Servo Motor เพียงอย่างเดียวนั้นไม่สามารถทำงานได้ การที่จะให้ Servo Motor จะควบคุมลักษณะที่กล่าวมาข้างต้นนั้นต้องมีองค์ประกอบดังนี้

#### 1.คอนโทรลเลอร์ (Controller)

หลักการทำงานหลักๆ หน้าที่ของ Controller คือ มีหน้าที่รับคำสั่งจากผู้ใช้งานว่าต้องการให้ Servo Motor นั้นเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่าไรและระยะทางไกลหรือใกล้แค่ไหนหน้าที่ตรงจุดนี้จะเป็น Controller จะเป็นตัวกำหนดให้กับตัว Servo Motor

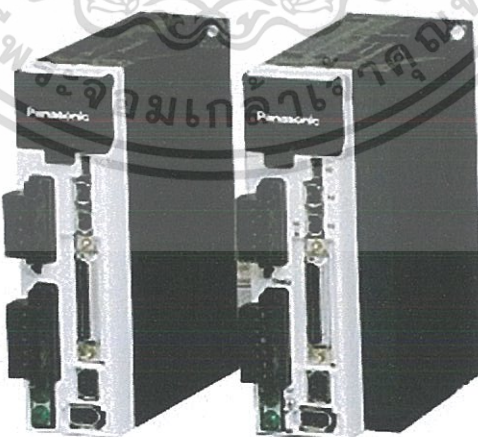
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 คอนโทรลเลอร์ (Controller)

## 2. เซอร์โวไดรฟ์เวอร์ (Servo Driver)

หน้าที่ของ Servo Driver คือ จะรับสัญญาณมาจาก Controller และสั่งการให้กับตัว Servo Motor เคลื่อนที่ตามที่ Controller สั่งการมา แต่ทำไม Controller ไม่สั่งการควบคุมไปที่ Servo Motor โดยตรง เนื่องจาก Servo Driver จะเป็นตัวที่ปรับตั้งค่าของตัว Servo Motor ให้ทำงานตามรูปแบบของการควบคุมไม่ว่า จะเป็นการควบคุม ความเร็ว (Speed Control), แรงบิด (Toucque) และ ตำแหน่ง (Position Control) ตัว Servo Driver จะเป็น ตัวกำหนดค่าตัวแปรหรือพารามิเตอร์ต่างๆ ให้กับตัว Servo Motor ให้ทำงานได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ เพราะฉะนั้นเมื่อใช้ Servo Motor ก็จะต้องมี Servo Driver เสมอ



รูปที่ 2.7 เซอร์โวไดรฟ์เวอร์ (Servo Driver)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor)

หน้าที่ของเซอร์โวมอเตอร์ คือ ขับเคลื่อนอุปกรณ์ของเครื่องจักรกลหรือระบบของการทำงานนั้นๆ ให้เป็นไปตามรูปแบบที่ได้รับคำสั่งจากตัว Servo Driver พร้อมกับส่งสัญญาณป้อนกลับให้กับตัว Servo Driver ว่าตอนนี้ Servo Motor เคลื่อนที่ด้วย ความเร็วเท่าไรและระยะทางในการเคลื่อนที่เป็นระยะทางเท่าไรแล้ว ด้วยสัญญาณของตัว Encoder ที่อยู่ภายในตัว Servo Motor ทำให้การเคลื่อนที่ของ Servo Motor นั้นมีความแม่นยำสูง



รูปที่ 2.8 เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor)

ด้วยองค์ประกอบข้างต้นทั้งหมดทั้งหมดทั้งมวลนั้น พอจะทำให้ผู้ที่ใช้งานหรือผู้ที่กำลังศึกษา พอที่จะมองภาพของการ ทำงานของระบบ Servo Motor ว่าองค์ประกอบของระบบหรือการที่จะใช้งาน Servo Motor นั้นต้องมีองค์ประกอบอะไรบ้างจึงจะใช้งาน Servo Motor ได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ

### 2.2 เอ็นโคดเดอร์ (Encoder)

ในกรณีที่ต้องการวัดระยะทางยาวๆ มักนิยมใช้ตัวตรวจรู้ตำแหน่งแบบดิจิตอลโดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าเป็นระบบการวิเคราะห์แบบดิจิตอล เนื่องจากตัวตรวจรู้ชนิดนี้จะไม่ถูกจำกัดช่วงของการวัดด้วยกลไก แต่ความสามารถในการวัดจะขึ้นอยู่กับซอฟต์แวร์ที่ใช้เป็นหลัก

ตัวตรวจรู้ตำแหน่งแบบดิจิตอลในที่นี้จะกล่าวถึง เอ็นโคดเดอร์ตรวจรู้ตำแหน่ง (Position Encoder) ซึ่งสามารถแบ่งตามโครงสร้างการเคลื่อนที่ออกได้เป็นสองแบบด้วยกันคือ

1. เอ็นโคดเดอร์ตำแหน่งแบบหมุน (Rotation Position Encoder)
2. เอ็นโคดเดอร์ตำแหน่งแบบเคลื่อนที่แนวเส้นตรง (Linear Position Encoder)

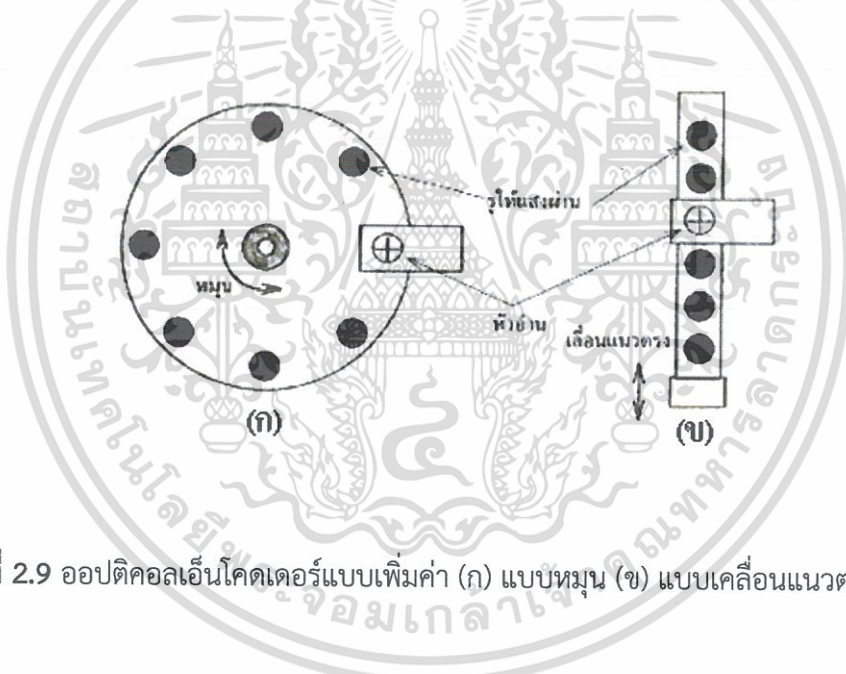
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และถ้าจำแนกตัวตรวจรู้แบบเอ็นโคดเดอร์ออกตามลักษณะของสัญญาณเอาท์พุต จะได้เป็น 2 แบบหลัก คือ

1. แบบเอ็นโคดเดอร์แบบเพิ่มค่า (Incremental Encoder)
2. แบบเอ็นโคดเดอร์แบบสัมบูรณ์ (Absolute Encoder)

### 2.2.1 เอ็นโคดเดอร์ตรวจรู้ตำแหน่งแบบเพิ่มค่า

เอ็นโคดเดอร์ตำแหน่งแบบเพิ่มค่า (Incremental Position Encoder) ประกอบด้วยแผ่นกลมหรือแผ่นบรรทัดแนวตรง ที่เคลื่อนที่ตามกลไกที่ต้องการวัดระยะทาง ในกรณีของออปติคัลเอ็นโคดเดอร์ จะมีการเจาะรูเพื่อให้แสงผ่านไปเป็นระยะๆ เพื่อบอกตำแหน่งของแผ่นหมุน โดยจะให้สัญญาณเอาท์พุตเป็นสัญญาณพัลส์ออกมาทุกครั้งที่มีการหมุนแกนเอ็นโคดเดอร์ ทำให้สามารถทราบมุมที่หมุนหรือระยะทางเคลื่อนที่ไปได้ โดยเอาท์พุตปกติจะมีแค่เพียงบิตเดียวหรือสองบิตเพื่อให้ออกทิศทางได้



รูปที่ 2.9 ออปติคัลเอ็นโคดเดอร์แบบเพิ่มค่า (ก) แบบหมุน (ข) แบบเคลื่อนแนวตรงเชิงเส้น

เอ็นโคดเดอร์แบบนี้มีข้อเสียตรงที่ข้อมูลของการเคลื่อนที่จะหายไปหมดเมื่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าดับหรือมีการแยกสายสัญญาณออกแม้เพียงชั่วขณะเดียวหรือเมื่อมีการรบกวนของสัญญาณเกิดขึ้น ทำให้ต้องมีการเปรียบเทียบกับจุดอ้างอิงอยู่ตลอดเวลาเพื่อความถูกต้อง นอกจากนี้ข้อมูลที่จะนำไปใช้ยังมักจำเป็นที่จะต้องผ่านวงจรรนับ (Counter) เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงขนานที่ใช้ในระบบคอมพิวเตอร์

## 2.2.2 เอ็นโคเดอ์ตรวจรู้ตำแหน่งแบบสัมบูรณ์

เอ็นโคเดอ์ตรวจรู้ตำแหน่งแบบสัมบูรณ์จะให้เอาท์พุทในรูปแบบที่เป็นรหัส ที่ตรงกับตำแหน่งที่กลไกเคลื่อนที่ไป หลักการทำงานโดยรวมจะเหมือนกับเอ็นโคเดอ์แบบเพิ่มค่า แต่ในตัวเอ็นโคเดอ์ตรวจรู้ตำแหน่งแบบสัมบูรณ์ จะมีหัวอ่านหลายชุดเท่ากับจำนวนบิตเอาท์พุท การเจาะรูบนแผ่นแต่ละชุดก็จะมีระยะห่างเป็นทวีคูณทำให้สามารถทราบตำแหน่งของการหมุนโดยทันที



รูปที่ 2.10 ออปติคอลเอ็นโคเดอ์แบบสัมบูรณ์แบบเลื่อนแนวตรงขนาด 4 บิต

ตัวอย่างในรูปที่ 2.10 จะเป็นเอ็นโคเดอ์แบบเลื่อนในแนวตรง ขนาด 4 บิตข้อมูล ซึ่งจะมีหัวอ่านข้อมูล 4 หัวด้วยกัน คือ D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub> และ D<sub>4</sub> ทำให้สามารถอ่านข้อมูลได้ทั้งสิ้น 16 ระดับขึ้น ตั้งแต่ 0000, 0001 .. ไปเรื่อยๆ จนถึง 1111 เอ็นโคเดอ์แบบนี้จะมีข้อดีตรงที่ข้อมูลยังคงถูกต้องถึงแม้สัญญาณจะหายไปชั่วขณะ เนื่องจากข้อมูลที่ได้จะหมายถึงตำแหน่งของการเคลื่อนที่นั้นๆ กล่าวคือ สามารถบอกได้ทันทีว่าการเคลื่อนที่ถึงไหนแล้วโดยดูจากข้อมูลดิจิทัลที่ได้ ต่างจากเอ็นโคเดอ์แบบเพิ่มค่า ซึ่งจะต้องทราบมาก่อนหน้าว่าการเคลื่อนที่อยู่ที่ตำแหน่งใดแล้วบวกเพิ่มค่าตำแหน่งขึ้นไปจากเดิม จึงจะทราบว่าเคลื่อนที่ถึงไหนแล้วเมื่อเป็นเช่นนี้ทำให้เอ็นโคเดอ์ชนิดนี้บอกถึงทิศทางการเคลื่อนที่ของกลไกได้ทันที เพราะข้อมูลเอาท์พุทที่ได้จะมีการเพิ่มหรือลดตามทิศทางการเคลื่อนที่โดยตรง เนื่องจากความซับซ้อนของอุปกรณ์ ทำให้เอ็นโคเดอ์แบบนี้มีราคาแพงกว่าแบบเพิ่มค่ามากสำหรับเอ็นโคเดอ์แบบสัมบูรณ์แล้ว การเรียงรูปแบบของข้อมูลหรือการเข้ารหัส ดังรูปที่ 7 จะเป็นการเข้ารหัสแบบเลขฐานสองตามธรรมชาติ (Natural Binary Code) ปกติ แต่ในทางปฏิบัติยังมีการเข้ารหัสอีกหลายแบบ เช่น แบบเลขฐานสิบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้ารหัสเลขฐานสอง (Binary Code Decimal) หรือ BCD และรหัสเกรย์ (Gray Code) ดังนั้นการใช้งานต้องทราบถึงชนิดของการเข้ารหัสด้วย

### 2.2.3 ออปติคอลลีนโคดเดอร์ (Optical Encoder)

แบบของเอ็นโคดเดอร์ที่รู้จักตำแหน่งที่นิยมใช้กันมากคือ ออปติคอลลีนโคดเดอร์ (Optical Encoder) หรือเอ็นโคดเดอร์ทางแสง ซึ่งใช้หลักการทางแสงมาเป็นตัววัด เนื่องจากมีแรงเสียดทานต่ำมาก และไม่ถูกกระทบจากอุณหภูมิสภาพแวดล้อม ซึ่งจะมี 2 แบบคือ

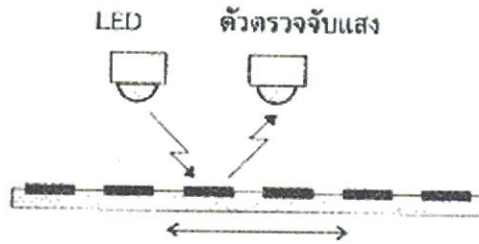
1. ออปติคอลลีนโคดเดอร์แบบขวางแสง (Interruption Type)
2. ออปติคอลลีนโคดเดอร์แบบสะท้อนแสง (Reflection Type)

สำหรับออปติคอลลีนโคดเดอร์แบบขวางแสง (Interruption Type) ดังรูปที่ 8 ที่หัวอ่านจะมีตัวกำเนิดแสงอยู่ด้านหนึ่ง โดยมักจะใช้ LED และมีตัวตรวจจับแสง (Photodetector) อยู่อีกด้านหนึ่งทำหน้าที่แปลงพลังงานแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า ในแผ่นหมุนซึ่งยึดต่อกับแกนหมุนจะมีการเจาะรูเป็นระยะๆ



รูปที่ 2.11 การตรวจจับแบบขวางแสง

ออปติคอลลีนโคดเดอร์แบบสะท้อนแสง (Reflection Type) จะใช้แผ่นหมุนที่ทาสีดำและขาวสลับกันไป โดยแหล่งกำเนิดแสงจะส่องแสงไปสะท้อนกลับมายังตัวตรวจจับแสง

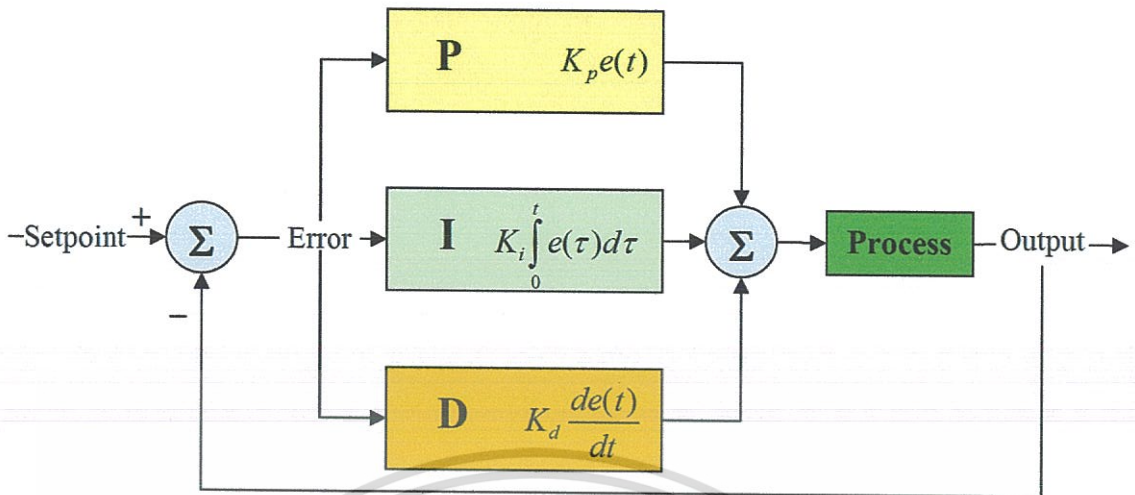


รูปที่ 2.12 การตรวจจับแบบสะท้อนแสง

หลักการทำงานของออปติคัลเอ็นโคดเดอร์ ยกตัวอย่างแบบขวางแสง คือ เมื่อแสงผ่านช่องเจาะรู ตัวตรวจจับทางแสงจะรับสัญญาณเป็น ลอจิก 1 และเมื่อแสงถูกขวางตัวตรวจจับทางแสงจะรับสัญญาณเป็นลอจิก 0 เมื่อแผ่นกลมหมุนจะทำให้ตัวตรวจจับแสงส่งสัญญาณไฟฟ้าออกมาเป็นช่วงๆ เท่าจำนวนรูที่ผ่านไป เช่น ในออปติคัลเอ็นโคดเดอร์ของรูปที่ 2.12 จะมีสัญญาณออกมา 8 พัลส์ใน 1 รอบของการหมุนหรือทุกๆ 45 องศาต่อพัลส์ เอ็นโคดเดอร์ที่ในอุตสาหกรรมจะมีความละเอียด (Resolution) หรือจำนวนขั้นใน 1 รอบไม่เท่ากัน โดยที่จะพบได้มีตั้งแต่ 100 ขั้นต่อรอบ ไปจนถึง 6000 ขั้นต่อรอบ ซึ่งแบบที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมจะเป็นแบบ 100 ขั้นต่อรอบหรือ 256 ขั้นต่อรอบและเส้นรอบวงของแผ่นกลมมีกจะมีขนาด 25 ถึง 90 mm.

### 2.3 ระบบควบคุมพีไอดี (PID controller)

ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID controller) เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณเป็นค่าความผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการ ตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ค่าตัวแปรของ PID ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบ



รูปที่ 2.13 แผนภาพบล็อกของการควบคุมแบบพีไอดี

วิธีคำนวณของ PID ขึ้นอยู่กับสามตัวแปรคือค่าสัดส่วน, ปริพันธ์และอนุพันธ์ ค่าสัดส่วนกำหนดจากผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน ค่าปริพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของผลรวมความผิดพลาดที่ซึ่งทิ้งผ่านไปและค่าอนุพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด น้ำหนักที่เกิดจากการรวมกันของทั้งสามนี้จะใช้ในการปรับกระบวนการ

โดยการปรับค่าคงที่ใน PID ตัวควบคุมสามารถปรับรูปแบบการควบคุมให้เหมาะกับที่กระบวนการต้องการได้ การตอบสนองของตัวควบคุมจะอยู่ในรูปของการไหวตัวของตัวควบคุมจนถึงค่าความผิดพลาดค่าโอเวอร์ชูต (Overshoots) และค่าแกว่งของระบบ (Oscillation) วิธี PID ไม่รับประกันได้ว่าจะเป็นระบบควบคุมที่เหมาะสมที่สุดหรือสามารถทำให้กระบวนการมีความเสถียรแน่นอน

การประยุกต์ใช้งานบางครั้งอาจใช้เพียงหนึ่งถึงสองรูปแบบ ขึ้นอยู่กับกระบวนการเป็นสำคัญ พีไอดีบางครั้งจะถูกเรียกว่าการควบคุมแบบ PI, PD, P หรือ I ขึ้นอยู่กับว่าใช้รูปแบบใดบ้าง

การควบคุมแบบ PID ได้ซึ่งอัตราการรวมกันของเทอมของตัวแปรทั้งสามตามสมการ

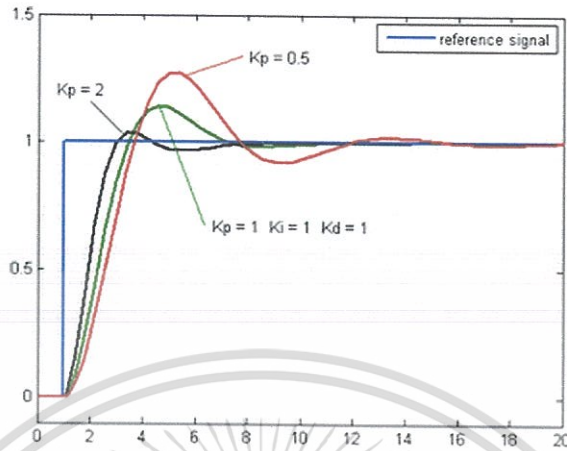
$$MV(t) = Pout + Iout + Dout \quad (2.1)$$

(Pout, Iout, Dout หมายถึง ผลของสัญญาณขาออกของระบบ)

1.เทอมของสัดส่วน หรือ P บางครั้งบางครั้งเรียกว่า "อัตราการขยาย" จะเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนของค่าความผิดพลาด การตอบสนองของสัดส่วนสามารถทำได้โดยการคูณค่าความผิดพลาดด้วยค่าคงที่  $K_p$  หรือที่เรียกว่าอัตราขยายสัดส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{out} = K_p e(t) \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.14 กราฟ PV ต่อเวลา ( $K_p$  และ  $K_d$  คงที่)

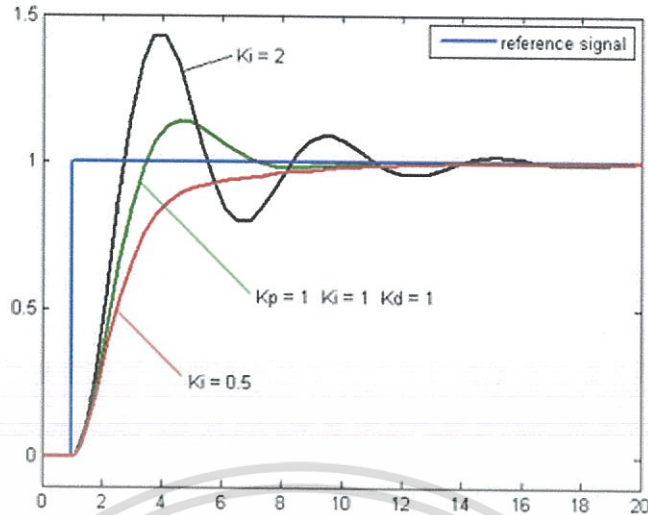
$P_{out}$ : สัญญาณขาออกของเทอมสัดส่วน

$K_p$ : อัตราขยายสัดส่วน, ตัวแปรปรับค่าได้

$e$ : ค่าความผิดพลาด =  $SP - PV$

$t$ : เวลา

2. เทอมของปริพันธ์ หรือ I บางครั้งบางครั้งเรียกว่า "Treset" เป็นสัดส่วนของขนาดความผิดพลาดและระยะเวลาของความผิดพลาด ผลรวมของความผิดพลาดในทุกช่วงเวลา (ปริพันธ์ของความผิดพลาด) จะให้อฟเซตสะสมที่ควรจะเป็นในก่อนหน้า ความผิดพลาดสะสมจะถูกคูณโดยอัตราขยายปริพันธ์ ขนาดของผลของเทอมปริพันธ์จะกำหนดโดยอัตราขยายปริพันธ์,  $K_i$ .



รูปที่ 2.15 กราฟ PV ต่อเวลา ( $K_p$  และ  $K_d$  คงที่)

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(T) dT$$

(2.3)

$I_{out}$ : สัญญาณขาออกของเทอมปริพันธ์

$K_i$ : อัตราขยายปริพันธ์, ตัวแปรปรับค่าได้

$e$ : ความผิดพลาด =  $SP - PV$

$t$ : เวลา

$T$ : ตัวแปรปริพันธ์หุ่น

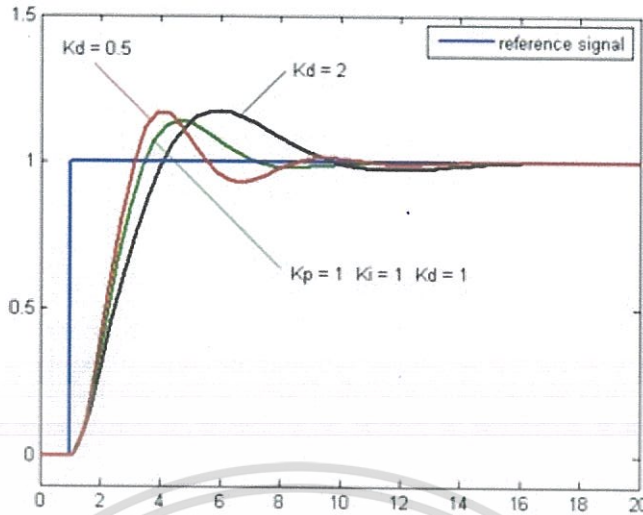
เทอมปริพันธ์ (เมื่อรวมกับเทอมสัดส่วน) จะเร่งกระบวนการให้เข้าสู่จุดที่ต้องการและขจัดความผิดพลาดที่เหลืออยู่ที่เกิดจากการใช้เพียงเทอมสัดส่วน แต่อย่างไรก็ตาม เทอมปริพันธ์เป็นการตอบสนองต่อความผิดพลาดสะสมในอดีต จึงสามารถทำให้เกิดโอเวอร์ชูตได้ (หมายถึง ข้ามจุดที่ต้องการ)

3. เทอมของอนุพันธ์ หรือ D อัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาดจากกระบวนการนั้นคำนวณหาจากความชันของความผิดพลาดทุกๆ เวลา (นั่นคือ เป็นอนุพันธ์อันดับหนึ่งสัมพันธ์กับเวลา) และคูณด้วยอัตราขยายอนุพันธ์  $K_d$  ขนาดของผลของเทอมอนุพันธ์ (บางครั้งเรียก อัตรา) ขึ้นกับ อัตราขยายอนุพันธ์  $K_d$

$$D_{out} = K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

(2.4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 กราฟ PV ต่อเวลา ( $K_p$  และ  $K_i$  คงที่)

Dout: สัญญาณขาออกของเทอมอนุพันธ์  
 Kd: อัตราขยายอนุพันธ์, ตัวแปรปรับค่าได้  
 e: ความผิดพลาด = SP - PV  
 t: เวลา

เทอมอนุพันธ์จะชะลออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขาออกของระบบควบคุมและด้วยผลนี้จะช่วยให้ระบบควบคุมเข้าสู่จุดที่ต้องการ ดังนั้นเทอมอนุพันธ์จะใช้ในการลดขนาดของโอเวอร์ชูตที่เกิดจากเทอมปริพันธ์และทำให้เสถียรภาพของการรวมกันของระบบควบคุมดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอนุพันธ์ของสัญญาณรบกวนที่ถูกขยายในระบบควบคุมจะไวมากต่อการรบกวนในเทอมของความผิดพลาดและสามารถทำให้กระบวนการไม่เสถียรได้ถ้าสัญญาณรบกวนและอัตราขยายอนุพันธ์มีขนาดใหญ่เพียงพอ

### 2.3.1 บล็อกไดอะแกรม

ส่วนประกอบและรูปแบบของบล็อกไดอะแกรม การแทนระบบควบคุมด้วยบล็อกไดอะแกรมเป็นรูปแบบที่รวมเอาส่วนประกอบต่างๆ ของระบบที่มีการเชื่อมต่อพารามิเตอร์กันภายใน ซึ่งการเชื่อมต่อพารามิเตอร์ต่างๆ เหล่านี้จะมีลักษณะ เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนย่อยหลายๆ ตัว ส่งผ่านค่าพารามิเตอร์ให้แก่กันและกันภายในระบบเอง รวมถึงมีการส่งสัญญาณเข้าไปในระบบและออกจากระบบด้วยเช่นกัน การแทนระบบแบบนี้จะทำให้เห็น ภาพรวมของระบบทั้งระบบ รวมทั้งการเชื่อมต่อของสัญญาณต่างๆ ภายในระบบ และยังสามารถยุบรวม ส่วนต่างๆ ให้กระชับเพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบระบบควบคุมได้อีกด้วย ส่วนประกอบหลักๆ ของ บล็อกไดอะแกรมมีด้วยกัน 3 อย่างคือ

1. ฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function)
2. จุดรวมสัญญาณ (summing)
3. จุดตรวจวัดสัญญาณ (branching or sensing)

### 2.3.2 การวิเคราะห์ผลตอบสนองชั่วคราว

#### 2.3.2.1 สัญญาณต่างๆ ในระบบควบคุม

ในระบบควบคุมแบบวงรอบปดทั่วไปจะประกอบด้วยสัญญาณอินพุตในสองลักษณะ คือ สัญญาณอ้างอิง (reference)  $R(s)$  และสัญญาณรบกวน (disturbance)  $W(s)$  ในการหาผลตอบสนองต่ออินพุตใดๆ จะกระทำที่ละคู่ของสัญญาณเอาทพุตต่อสัญญาณ อินพุตตัวใดตัวหนึ่ง โดยใช้ลักษณะของรูปแบบของสัญญาณอินพุตที่มีรูปแบบที่ชัดเจนเป็นมาตรฐาน

สัญญาณอินพุตมาตรฐานที่สำคัญ มีอยู่ด้วยกัน 6 แบบ ดังนี้

1. สัญญาณอินพุตแบบพัลส์ สัญญาณจะมีขนาดหนึ่งหน่วยและมีคาบเวลาเป็น  $T$
2. สัญญาณอินพุตแบบอิมพัลส์ สัญญาณจะมีขนาดหนึ่งหน่วยและมีคาบเวลาแคบๆ เข้าใกล้ศูนย์
3. สัญญาณอินพุตแบบขั้นบันได สัญญาณจะมีขนาดคงที่หนึ่งหน่วย
4. สัญญาณอินพุตแบบลาดเอียงสัญญาณมีขนาดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากค่าศูนย์ด้วยอัตราคงที่
5. สัญญาณอินพุตแบบพาราโบลา สัญญาณจะมีขนาดเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จากค่าศูนย์ด้วยอัตรากำลังสอง
6. สัญญาณอินพุตแบบซายน์ สัญญาณจะมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะรูปคลื่นซายน์

#### 2.3.2.2 การหาผลตอบสนองเชิงเวลาของระบบ

การหาผลตอบสนองของระบบใดๆ ต่ออินพุตมาตรฐานรูปแบบใดรูปแบบหนึ่ง ถ้าหากว่าทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบแล้ว ย่อมกระทำได้ง่ายและมีความถูกต้อง การทดสอบระบบที่ฟังก์ชันถ่ายโอนมาจากการยุบรวมของระบบควบคุมทั้งระบบ มักจะใช้การแทนฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าวด้วย  $T(s)$  เพื่อที่จะแยกแยะความแตกต่างระหว่างฟังก์ชันถ่ายโอนของ ระบบทั้งระบบกับ

ฟังก์ชันถ่ายโอนย่อยหรือฟังก์ชันถ่ายโอนต่างๆ ไปซึ่งมักจะใช้การแทนฟังก์ชันถ่ายโอนดังกล่าวด้วย  $G(s)$  นั่นเอง

การหาผลตอบสนองของระบบที่เป็นเชิงเส้นและไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา (Linear-Time Invariant Systems) ต่ออินพุตมาตรฐาน มีขั้นตอน 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. แปลงสัญญาณอินพุต  $r(t)$  ให้อยู่ในรูปฟังก์ชันเอส  $R(s)$
2. หาสมการผลตอบสนองในรูปฟังก์ชันเอส  $R(s) = T(s)Y(s)$
3. กระจายเทอมของ  $Y(s)$  เพื่อให้เข้ารูปแบบที่จะสามารถแปลงลาปลาซผักลับ (inverse Laplace's transform) ได้
4. แปลงลาปลาซผักลับทุกเทอมย่อยของ  $Y(s)$  จะได้ผลตอบสนองเชิงเวลา  $y(t)$

### 2.3.2.3 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์แสดงผลตอบสนอง

จากตัวอย่างการหาผลตอบสนองเชิงเวลาของระบบต่ออินพุตมาตรฐานรูปแบบใดๆ จะเห็นได้ว่าขั้นตอนในการที่จะได้มาซึ่งสมการผลตอบสนอง  $y(t)$  รวมไปถึงรูปวาดของผลตอบสนอง ที่แสดงให้เห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงของเอาต์พุตเมื่อเวลาผ่านไปนั้น ค่อนข้างใช้เวลาและต้องการความแม่นยำในการคำนวณเป็นอย่างยิ่ง ปัจจุบันนี้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ได้พัฒนามาไกลจนสามารถ สร้างสมการผลตอบสนอง รวมถึงการวาดรูปผลตอบสนองของระบบที่เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนต่ออินพุตใดๆ ได้โดยง่าย ซอฟต์แวร์ที่แนะนำในที่นี้ก็คือโปรแกรม MATLAB การคำนวณและการแสดงผลตอบสนองสามารถกระทำได้โดยการใช้คำสั่งการทำงานที่ละบรรทัด

### 2.3.2.4 ผลตอบสนองของระบบอันดับหนึ่ง

ระบบอันดับหนึ่ง เป็นระบบที่พบเจอได้บ่อยมากในระบบควบคุมในงานอุตสาหกรรมต่างๆ ไประบบอันดับหนึ่งคือระบบที่มีโพลหนึ่งตัว อาจจะมีซีโรด้วยหรือไม่ก็ได้ แต่ในขั้นตอนนี้จะ พิจารณาระบบที่มีโพลเพียงอย่างเดียวเท่านั้นก่อน

### 2.3.2.5 ผลตอบสนองของระบบอันดับสอง

ระบบอันดับสอง เป็นระบบที่พบเจอได้บ่อยเช่นกันในระบบควบคุมในงานอุตสาหกรรมต่างๆ ไปและการศึกษาพื้นฐานของระบบอันดับสองเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อการออกแบบการ ควบคุมระบบที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีอันดับสูงๆ ขึ้นไป ซึ่งจะได้กล่าวในภายหลัง ระบบอันดับสองคือระบบที่มีโพลสองตัว อาจจะมีซีโรด้วยหรือไม่ก็ได้ แต่ในขั้นตอนนี้จะพิจารณาระบบที่มีโพลเพียงอย่างเดียวเท่านั้นก่อน

### 2.3.3 การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบ

#### 2.3.3.1 ส่วนประกอบของผลตอบสนอง

ในระบบควบคุมที่ได้ศึกษามาแล้วในบทเรียนที่ผ่านมา จะเจาะจงไปที่การใช้สมการฟังก์ชันถ่ายโอนที่สร้างขึ้นจากการแปลงลาปลาซของสมการเชิงอนุพันธ์ซึ่งในการแปลงลาปลาซนี้ จะไม่คำนึงถึงค่าเริ่มต้นสมการฟังก์ชันถ่ายโอนที่ใช้จึงอาจไม่สามารถแสดงผลตอบสนองจริงใน กรณีที่ระบบมีค่าเริ่มต้นในการทำงาน ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วระบบมักจะต้องมีค่าเริ่มในการทำงาน

##### 2.3.3.1.1 ผลตอบสนองเมื่อคำนึงถึงค่าเริ่มต้น

ในเมื่อการวิเคราะห์ระบบโดยคำนึงถึงค่าเริ่มต้นในการทำงาน ไม่สามารถใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนมาวิเคราะห์ได้เนื่องจากฟังก์ชันถ่ายโอนใช้การแปลงลาปลาซแบบไม่คิดค่าเริ่มต้น การที่จะได้มาซึ่งผลตอบสนองที่คำนึงค่าเริ่มต้นนั้น ต้องย้อนกลับไปทำการแปลงลาปลาซของสมการเชิงอนุพันธ์ ถ้าหากมีสมการเชิงอนุพันธ์ของระบบแล้ว การแปลงลาปลาซในการวิเคราะห์ในคราวนี้จะต้องแปลงแบบคิดค่าเริ่มต้นในการทำงาน หรือถ้าหากมีฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบแล้วจะต้องหาผลการแปลงลาปลาซแบบผันกลับเพื่อให้ได้สมการเชิงอนุพันธ์ของระบบก่อน แล้วจึงแปลงลาปลาซอีกครั้งหนึ่งด้วยการใช้การแปลงแบบมีค่าเริ่มต้น

##### 2.3.3.1.2 ผลตอบสนองแบบซีโรสเตทและซีโรอินพุต

ผลตอบสนองที่ได้จากการแปลงลาปลาซโดยมีค่าเริ่มต้นของระบบจะประกอบด้วยสองส่วนหลักคือ

1. ผลตอบสนองอันเนื่องมาจากสัญญาณอินพุตต่อระบบที่ไม่มีค่าเริ่มต้นใดๆ เรียกผลตอบสนองนี้ว่า ผลตอบสนองแบบซีโรสเตท (Zero-state Response) ซึ่งก็คือผลตอบสนองของระบบที่ได้ศึกษามาในบทเรียนก่อนหน้า
2. ผลตอบสนองอันเนื่องจากค่าเริ่มต้นของระบบโดยไม่มีสัญญาณอินพุต เรียกผลตอบสนองนี้ว่า ผลตอบสนองแบบซีโรอินพุต (Zero-input Response)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.3.1.3 ผลตอบสนองแบบบังคับและธรรมชาติ

ผลตอบสนองเมื่อค่านิ่งถึงค่าเริ่มต้น อาจจะสามารถแยกสมการผลตอบสนองออกเป็น สอง ส่วนหลักๆ ได้อีกแบบหนึ่งคือ

1. ส่วนของผลตอบสนองที่เกิดจากสัญญาณอินพุต เรียกผลตอบสนองนี้ว่า ผลตอบสนองแบบบังคับ (Forced Response)

2. ส่วนของผลตอบสนองเนื่องจากสมการคุณลักษณะของระบบ (Characteristic Root) เรียกผลตอบสนองนี้ว่า ผลตอบสนองแบบธรรมชาติ (Natural Response)

### 2.3.3.2 เสถียรภาพ

เสถียรภาพ (Stability) ในระบบควบคุม หมายถึง เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงใดๆ ทางด้านอินพุตของระบบ ณ เวลาใดๆ เพียงเล็กน้อย ต้องไม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองที่มากขึ้นไป สามารถแบ่งความมีเสถียรภาพได้ 2 แบบคือ

1. เสถียรภาพภายนอก (External, Bounded Input Bounded Output: BIBO)
2. เสถียรภาพภายใน (Internal, Zero-input)

#### 2.3.3.2.1 เสถียรภาพภายในและเสถียรภาพภายนอก

เสถียรภาพภายนอก หมายถึง สำหรับระบบที่ไม่มีค่าเริ่มต้นในการทำงาน (Relaxed System) ถ้าจ่ายสัญญาณอินพุตที่มีลักษณะไม่วิ่งเข้าหาค่าอนันต์ (Bounded Input) ผลตอบสนองที่ได้จะต้องวิ่งเข้าหาค่าอนันต์ (Bounded Output) ด้วยเช่นกัน

เสถียรภาพภายใน หมายถึง สำหรับระบบที่มีค่าเริ่มต้นในการทำงาน ผลตอบสนองในส่วนของซีโรอินพุตจะต้องวิ่งเข้าค่าศูนย์เมื่อเวลาผ่านไป

สำหรับเสถียรภาพภายนอก ถ้าจ่ายอินพุตที่มีลักษณะไม่วิ่งเข้าหาค่าอนันต์ (Bounded Input) เข้าไปในระบบ ผลตอบสนองในส่วนของผลตอบสนองแบบบังคับ (Forced Response) จะไม่วิ่งเข้าหาค่าอนันต์ (Bounded Output) อย่างแน่นอน เพราะผลตอบสนองในส่วนนี้จะมีลักษณะเช่นเดียวกับอินพุต

# บทที่ 3

## วิธีการดำเนินงาน

### 3.1 การค้นคว้าหาข้อมูล

#### 3.1.1 ข้อมูลพื้นฐานของมอเตอร์

Goniometer (ANT-20G-90) เป็นมอเตอร์ที่ใช้ในการเคลื่อนที่ในแนวแกนที่ ซึ่งมีความแม่นยำสูงอย่างมากเหมาะสำหรับอุตสาหกรรมที่ต้องการความแม่นยำสูงในระดับไมโครเมตร มีการใช้ระบบควบคุมการทำงานโดยอาศัยหลักการของ PID controller เพื่อประสิทธิภาพที่ดีในการทำงาน



รูปที่ 3.1 Goniometer ANT-20G-90

#### ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลจำเพาะของ Goniometer ANT-20G-90

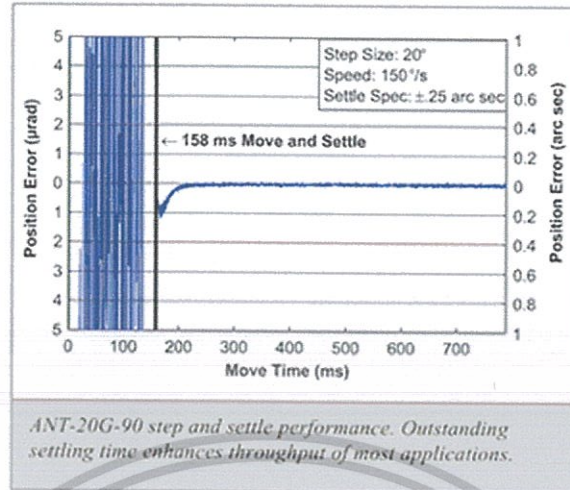
Model	ANT-20G-90
Rotation Angle	20°
Accuracy	$\pm 50 \mu\text{rad}$ ( $\pm 10 \text{ arc sec}$ )
Resolution	$0.25 \mu\text{rad}$ ( $0.05 \text{ arc sec}$ )
Bidirectional Repeatability	$\pm 10 \mu\text{rad}$ ( $\pm 2 \text{ arc sec}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลจำเพาะของ Goniometer ANT-20G-90 (ต่อ)

Unidirectional Repeatability	$\pm 5 \mu\text{rad}$ ( $\pm 1 \text{ arc sec}$ )
Tilt Error Motion	$\pm 50 \mu\text{rad}$ ( $\pm 10 \text{ arc sec}$ )
Maximum Speed	150 degrees per second
Maximum Acceleration	$500 \text{ rad/s}^2$
Settling Time	See graph for typical performance
In-Position Stability	$\pm 0.2 \mu\text{rad}$ ( $\pm 0.04 \text{ arc sec}$ )
Nominal Radius of Rotation	90 mm
Height from Tabletop to Rotation Point	57.5 mm
Maximum Torque (Continuous)	0.85 N-m
Load Capacity Axial	2.0 kg
Load Capacity Moment	80 kg-mm
Stage Mass	1.1 kg
Material	Aluminum
MTBF (Mean Time Between Failure)	30,000 Hours
Drive System	Slotless, Brushless, Direct Drive
Maximum Bus Voltage	$\pm 40 \text{ VDC}$
Limit Switches	5 V, Normally Closed

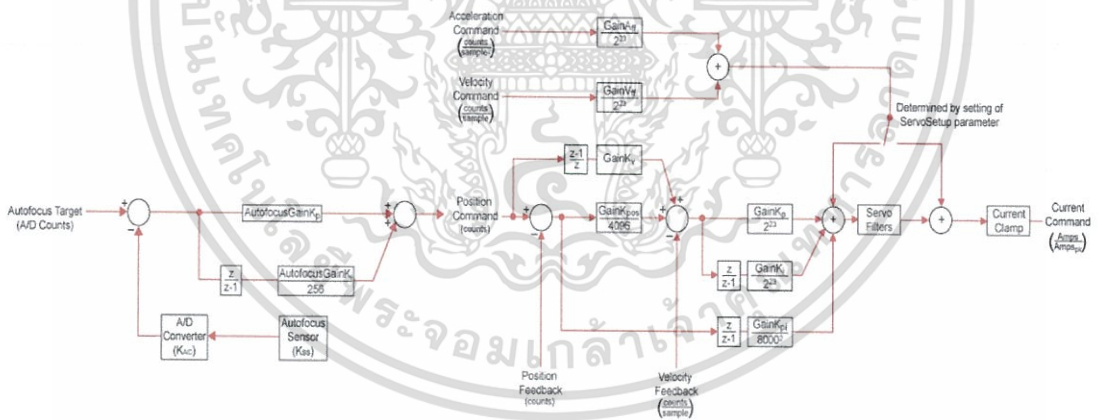
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ประสิทธิภาพของ ANT-20G-90

### 3.1.2 Servo Loop Block Diagram และ พารามิเตอร์

#### Servo Loop Block Diagram



รูปที่ 3.3 Servo Loop Block Diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมมีทั้งหมด 7 ตัวดังต่อไปนี้

1. Gain Aff เป็นพารามิเตอร์ใช้กำหนดการเร่งความเร็วไปข้างหน้าและมีหน้าที่ทดแทนความเฉื่อยของระบบ มีผลช่วยลดความผิดพลาดของตำแหน่งขณะเร่งความเร็วของมอเตอร์

2. Gain Vff เป็นพารามิเตอร์ใช้กำหนดความเร็วไปข้างหน้าของมอเตอร์

3. Gain Ki เป็นพารามิเตอร์ใช้กำหนดค่าปริพันธ์ลูปของตำแหน่ง สามารถกำจัดความผิดพลาดของความเร็วในขณะหมุนและส่งผลให้ช่วยลดความผิดพลาดของตำแหน่งถ้าหากมีค่ามากเกินไปจะทำให้ระบบไม่เสถียรและเกิดการแกว่ง

4. Gain Kp เป็นพารามิเตอร์ใช้กำหนดค่าสัดส่วนลูปของความเร็ว ส่งผลโดยตรงต่อความแข็งของระบบและลดค่าความผิดพลาดของความเร็วโดยใช้การควบคุมปริมาณกระแสที่จ่ายมอเตอร์ในลูปของความเร็ว ถ้ามีค่าสูงเกินไปจะทำให้ระบบไม่เสถียรและเกิดการแกว่ง

5. Gain Kpi เป็นพารามิเตอร์ใช้กำหนดค่าปริพันธ์ลูปของตำแหน่ง

6. Gain Kpos เป็นพารามิเตอร์ใช้กำหนดค่าสัดส่วนลูปของตำแหน่ง มีผลทำให้ช่วยลดความผิดพลาดทั้งหมดของตำแหน่งที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ ใช้เฉพาะในลูปของตำแหน่งและยังสามารถลดระยะเวลาการเข้าสู่สมดุลของระบบ

7. Gain Kv เป็นพารามิเตอร์ใช้กำหนดการปรับค่าจากลูปของตำแหน่งไปยังลูปของความเร็ว

### 3.1.3 การควบคุมด้วย PID Controller

การควบคุมมอเตอร์ด้วยหลักการ PID Controller ใช้โปรแกรม Ensemble Digital Scope ในการปรับแต่งพารามิเตอร์และดูค่าความผิดพลาดต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับตัวมอเตอร์

โปรแกรม Ensemble Digital Scope มีการฟังก์ชันการทำงานดังนี้

1. ควบคุมพารามิเตอร์ Aff, Vff, Ki, Kp, Kpi, Kpos, Kv

2. แสดงค่าความผิดพลาดทั้งหมดของมอเตอร์อยู่ในรูปกราฟ
3. Loop Transmission แสดงค่า Gain Margin, Phase Margin, Pole-Zero Map
4. แสดงค่าผลของการตอบสนองของมอเตอร์จากฟังก์ชัน Feedback Tuning

### 3.2 การปรับแต่งพารามิเตอร์ของมอเตอร์และแก้ไขข้อผิดพลาด

ในส่วนของขั้นตอนสามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนหลักดังนี้

#### 3.2.1 การแก้ไขข้อผิดพลาด

การแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากมอเตอร์สามารถแก้ไขได้จากโปรแกรม Ensemble Configuration Manager ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถแก้ไขพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ใช้ควบคุมมอเตอร์ ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีทั้งหมด 19 ดังนี้

1. Position Error Fault
2. Over Current Fault
3. CW/Positive End-of-Travel Limit Fault
4. CCW/Negative End-of-Travel Limit Fault
5. CW/Positive Software Limit Fault
6. CCW/Negative Software Limit Fault
7. Amplifier Fault
8. Position Feedback Fault
9. Velocity Feedback Fault
10. Hall Sensor Fault

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. Maximum Velocity Command Fault

12. Emergency Stop Fault

13. Velocity Error Fault

14. External Fault

15. Motor Temperature Fault

16. Amplifier Temperature Fault

17. Encoder Fault

18. Communication Lost Fault

19. Feedback Scaling Fault

ทำการศึกษาค้นผิดพลาดที่พบเป็นประจำ 5 อย่างคือ

1. Position Error Fault

สาเหตุที่พบ: ค่าความต่างของพารามิเตอร์ Position Command กับ Position Feedback มากเกินไป ค่า PositionErrorThreshold Parameter

2. Over Current Fault

สาเหตุที่พบ: ค่าเฉลี่ยของกระแสภายในมอเตอร์เกินค่า AverageCurrentThreshold และ AverageCurrentTime Parameters

3. Position Feedback Fault

สาเหตุที่พบ: การกำหนดพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมมอเตอร์ผิด

4. Velocity Feedback Fault

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาเหตุที่พบ: ใช้พารามิเตอร์ร่วมกับ Position Feedback Fault ส่งผลให้เมื่อเกิดปัญหาเกี่ยวกับ Position Feedback Fault จึงทำให้เกิดปัญหาที่ Velocity Feedback Fault ร่วมกัน

### 5. Hall Sensor Fault

สาเหตุที่พบ : Hall Sensor ภายในมอเตอร์ไม่สามารถใช้งานได้ 1 ตำแหน่ง

### 3.2.2 การปรับแต่งพารามิเตอร์ของมอเตอร์

การปรับแต่งพารามิเตอร์หลังจากการแก้ไขข้อผิดพลาดใช้โปรแกรม Ensemble Digital Scope ในการปรับแต่งพารามิเตอร์เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดของการทำงานของมอเตอร์ มีหลักการปรับค่าดังนี้

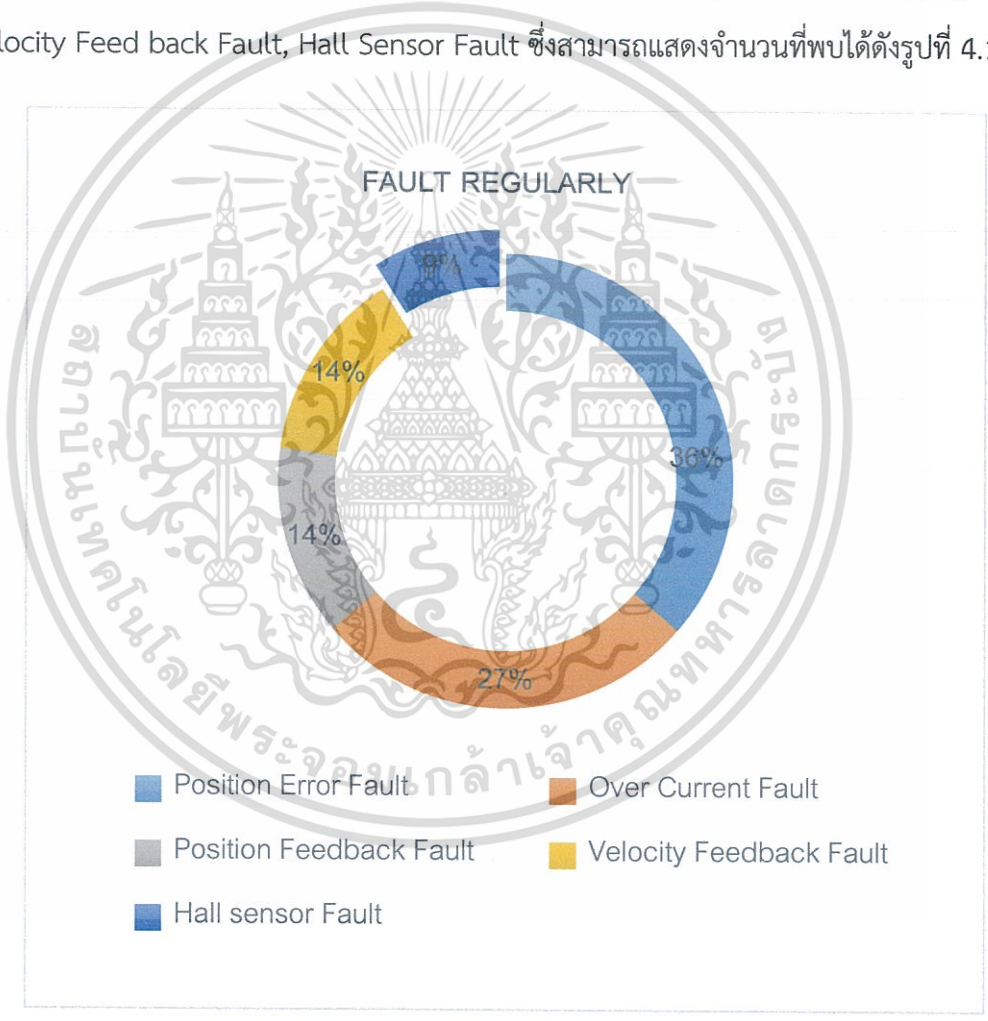
1. ใช้ฟังก์ชัน Home เพื่อให้มอเตอร์รู้ตำแหน่ง
2. ใช้ฟังก์ชัน auto tune โดยมีการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้อยู่ในค่าต่ำ จากนั้นจึงเพิ่มความถี่และความกว้างจนได้ประสิทธิภาพที่เกินร้อยละ 90
3. ใช้ฟังก์ชัน Loop Transmission ในการปรับค่า Gain Margin, Phase Margin, Pole-Zero Map ให้เหมาะสม
4. ใช้ฟังก์ชัน Feedback Tuning เพื่อการตอบสนองของมอเตอร์ในช่วงการทำงานในระยยะต่างๆ

# บทที่ 4

## ผลการดำเนินงาน

### 4.1 การแก้ไขข้อผิดพลาด

การแก้ไขข้อผิดพลาดของมอเตอร์ทั้งหมด 19 อย่างได้เลือกทำการศึกษาและแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นเป็นประจำ 5 อย่างคือ Position Error Fault, Over Current Fault, Position Feedback Fault, Velocity Feed back Fault, Hall Sensor Fault ซึ่งสามารถแสดงจำนวนที่พบได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 จำนวนที่พบข้อผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 แสดงจำนวนที่พบข้อผิดพลาดทั้งหมดจากมอเตอร์ 4 ตัว ซึ่ง Position Error Fault พบมากที่สุดคือร้อยละ 36 Over Current Fault คือร้อยละ 27 Position Feedback Fault คือร้อยละ 14 Velocity Feedback Fault คือร้อยละ 14 และ Hall Sensor Fault คือร้อยละ 9 ตามลำดับ

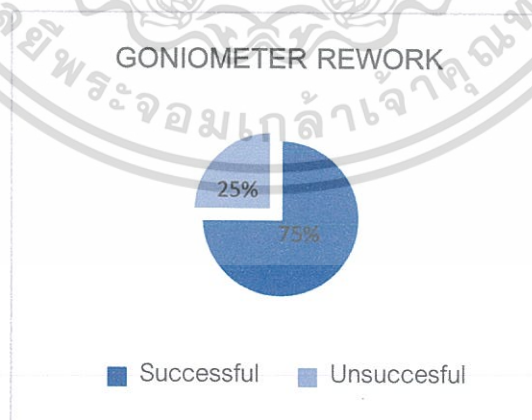
## 4.2 การปรับแต่งพารามิเตอร์

เมื่อแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นของมอเตอร์ กระบวนการในลำดับถัดไปคือการปรับแต่งพารามิเตอร์ สามารถปรับแต่งพารามิเตอร์ได้ดังรูปที่ 4.2



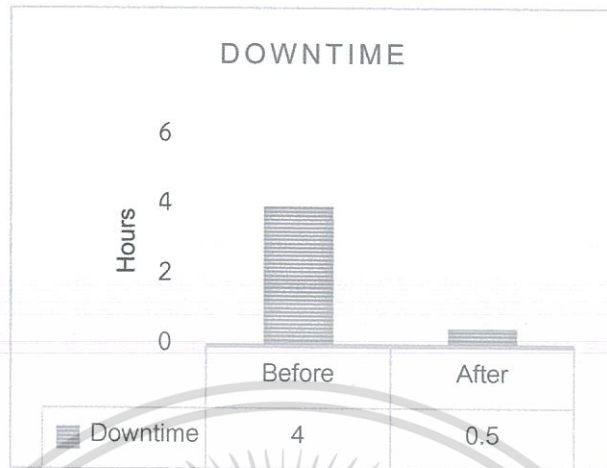
รูปที่ 4.2 Quality Estimateของมอเตอร์ที่ผ่านการปรับแต่งพารามิเตอร์

จากรูปที่ 4.2 จะแสดงว่าประสิทธิภาพของมอเตอร์หลังการปรับแต่งพารามิเตอร์มีค่าเกิน 90 ทุกตัว



รูปที่ 4.3 ผลลัพธ์ของการปรับปรุงมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 จำนวนชั่วโมงการทำงานก่อนและหลัง

จากรูปที่ 4.3 แสดงผลลัพธ์ของการปรับปรุงมอเตอร์ซึ่งมีทั้งหมด 4 ตัว สามารถแก้ไขให้สามารถนำกลับมาใช้ได้ 3 ตัวและรูปที่ 4.4 แสดงจำนวนชั่วโมงการทำงานก่อนและหลังของเครื่องผลิต HGA จากก่อนและหลังที่ได้นำความรู้ที่ได้ศึกษาตลอดการฝึกงานมาใช้ สามารถลดเวลาในการทำงานลงได้ถึง 3.5 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

เนื่องจากข้อผิดพลาด (Error) ที่เกิดจาก Goniometer ทำให้มีการเปลี่ยน Goniometer ตัวใหม่ในสายการผลิตทันทีซึ่งในบางครั้ง Goniometer ยังมีฟังก์ชันที่สามารถทำงานได้ ส่งผลให้เสียเวลาในการเปลี่ยนตัวใหม่แทนที่ทำให้ปริมาณการผลิตต่อวันลดลงและยังทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการส่งให้ผู้แทนจำหน่าย จึงมีการทำการวิจัยการปรับปรุงแก้ไข Goniometer ที่ซึ่งถูกเปลี่ยนจากสายการผลิตให้สามารถนำกลับมาใช้งานได้ตามปกติโดยใช้ความรู้เรื่องการควบคุมมอเตอร์และหลักการควบคุมแบบ PID ในการแก้ไขข้อผิดพลาด (Error) ที่เกิดขึ้นแล้วนำไปปรับปรุงแก้ไขหาความเสถียรของ Goniometer ต่อไป

จากการวิจัยได้มีการค้นคว้าหาข้อมูลอย่างละเอียดเกี่ยวกับ Goniometer เพื่อนำมาแก้ไขข้อผิดพลาด (Error) ซึ่งได้มีการศึกษาทั้งหมด 5 อย่างดังนี้

1. Position Error Fault
2. Over Current Fault
3. Position Feedback Fault
4. Velocity Feedback Fault
5. Hall Sensor Fault

สามารถแก้ไขได้ 4 อย่างยกเว้น Hall Sensor Fault ซึ่งพบว่าเกิดจาก Hall Sensor ภายในไม่สามารถใช้งานได้ต้องส่งให้ทางผู้จำหน่ายเท่านั้น จากการที่สามารถแก้ไขข้อผิดพลาด (Error) ที่เกิดขึ้นได้ทำให้สามารถลดเวลาในการเปลี่ยน Goniometer ตัวใหม่เข้าแทนได้ถึง 3 ชั่วโมง 30 นาที (ปกติใช้เวลา 4 ชั่วโมง) ส่งผลให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการส่งให้ผู้จำหน่ายและลดการสูญเสียการผลิตได้เพิ่มขึ้น

## 5.2 ปัญหาที่พบและแนวทางการแก้ไข

เนื่องจากไม่มีผู้เชี่ยวชาญเรื่องของ Goniometer โดยตรงจึงทำให้การศึกษาหาข้อมูลในการแก้ไขปัญหาเป็นไปได้ยากต้องใช้เวลาในการศึกษาหาข้อมูลค่อนข้างนาน จึงเริ่มศึกษาจากข้อมูลที่มีอยู่ (คู่มือ) และค้นคว้าเพิ่มเติมจากอินเทอร์เน็ตจนสามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้สำเร็จ

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

ในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นหากมีการติดต่อสอบถามรายละเอียดเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์กับผู้จำหน่ายจะสามารถแก้ไขปัญหาได้ตรงจุดและลดเวลาในการแก้ไขปัญหา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] สุชิน เสือชัย.(2559,กันยายน 14).ระบบขับเคลื่อนเซอร์โว.สืบค้นจาก  
[http://www.9engineer.com/index.php?m=article&a=print&article\\_id=2175](http://www.9engineer.com/index.php?m=article&a=print&article_id=2175)
- [2] บริษัท แสงชัย จำกัด.(2559,กันยายน 14).Servo motor คืออะไร.สืบค้นจาก  
[http://www.sangchaimeter.com/support\\_detail/servo-motor](http://www.sangchaimeter.com/support_detail/servo-motor)
- [3] ปัญญา แสงทอง.(2559,กันยายน 20).เอ็นโค้ดเดอร์ตรวจรู้ตำแหน่ง.สืบค้นจาก  
<http://dk.coe.psu.ac.th/assign/encoder/intro/Intro01.htm>
- [4] กลุ่ม4inone.(2553,กรกฎาคม 28).ระบบควบคุมแบบป้อนกลับและการควบคุมแบบPID.สืบค้นจาก  
<http://bme-4inone.blogspot.com/2010/07/pid.html>
- [5] AEROTECH.(2559,Jun 23).ANT-20G Goniometers. Retrieved from  
<https://www.aerotech.com/product-catalog/goniometer/>



## ประวัติผู้เขียน



นายภูวนศวรร ภูเดช

เกิดวันที่ 6 ธันวาคม พ.ศ.2537

ประวัติการศึกษา: สำเร็จการศึกษามัธยมศึกษาจากโรงเรียนปราจีนกัลยาณี อำเภอมืองปราจีนบุรี จังหวัดปราจีนบุรี เข้าศึกษาที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาแมคคาทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปี พ.ศ.2556

ที่อยู่: 456/38 ซอยปราจีนอนุสรณ์ 5 ตำบลหน้าเมือง อำเภอมือง จังหวัดปราจีนบุรี 25000

เบอร์โทรศัพท์: 08-2772-9964

อีเมล: pphuwant@hotmail.com

Facebook: -

ความสามารถทางคอมพิวเตอร์และการใช้โปรแกรม: Microsoft office, MATHLAB, Solid Work

ทักษะทางภาษาต่างประเทศ: ภาษาอังกฤษ

ฝึกงานที่ บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ระหว่างเดือนมิถุนายน ถึง พฤศจิกายน พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้