

การปรับปรุงประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม
The moving Improvement of mower with remote control



รัชเทพ บุญประเสริฐ
ปฏิพล ชาญธัญกรรม
อนุรักษ์ แซ่ลิ้ม

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2565

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The moving Improvement of mower with remote control



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2022

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2565

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ใ้รับรองปริญญาานิพนธ์

.....

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ การปรับปรุงประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม
The moving Improvement of mower with remote control

นักศึกษาผู้จัดทำ นายธัญเทพ บุญประเสริฐ รหัสนักศึกษา 63015079

 นายปฏิพล ชาญธัญกรรม รหัสนักศึกษา 63015104

 นายอนุรักษ แซ่ลิ้ม รหัสนักศึกษา 63015199

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม (ต่อเนื่อง)
ปีการศึกษา 2565

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์	ลายมือชื่อ
พศ.สุธรรม สัทธรรมสกุล	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การปรับปรุงประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม		
	The moving Improvement of mower with remote control		
นักศึกษาผู้จัดทำ	นายธัญเทพ	บุญประเสริฐ	รหัสนักศึกษา 63015079
	นายปฏิพล	ชาญธัญกรรม	รหัสนักศึกษา 63015104
	นายอนุรักษ์	แช่ลิ้ม	รหัสนักศึกษา 63015199
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.สุธรรม	สัทธรรมสกุล	
ปีการศึกษา	2565		

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้า แบบใช้รีโมทควบคุม จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อปรับปรุงพัฒนาโครงสร้างรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม และปรับปรุงประสิทธิภาพด้านการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้า รวมถึงเพิ่มระบบความปลอดภัยเมื่อมีการนำรถตัดหญ้าไปใช้งานจริง โดยปัญหาคือจากเดิมการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้าที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ตามรีโมทควบคุม จึงมีความจำเป็นต้องปรับปรุงประสิทธิภาพในด้านการขับเคลื่อน โดยการใช้อีเอ็มทีควบคุมร่วมกับโปรแกรมควบคุม ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีการใช้โปรแกรมควบคุมการทำงานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นได้เข้ามามีบทบาทเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีความยืดหยุ่นในการปรับแก้ฟังก์ชันการทำงาน ทำให้สามารถช่วยเพิ่มความสะดวกในด้านการใช้งานให้แก่ผู้ปฏิบัติงานได้เป็นอย่างมาก โครงการปรับปรุงประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม ประกอบด้วยการออกแบบโครงสร้างรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม และปรับปรุงโครงสร้างของรถตัดหญ้า การทดสอบเซนเซอร์วัดระยะทางเพื่อเลือกเซนเซอร์ที่มีประสิทธิภาพที่ดี และเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน

Thesis Title	THE MOVING IMPROVEMENT OF MOWER WITH REMOTE CONTROL	
Authors	Mr. Thunyathep	Boonprasert
	Mr. Patipon	Chantanyakam
	Mr. Anurak	Saelim
Thesis Advisor	Asst.Prof. Sutham	Satthamsakul
Year	2022	

ABSTRACT

This thesis is moving improvement efficiency for lawn mower with remote control. The purposes are the modification of structure and moving improvement for lawn mower, adding the safety system when the lawn mower is actually used. The problem is the original movement of the lawn mower, that could not move according to the remote control. Therefore, efficiency of movement needs to be improved by using a remote control with a control program. At present, the technology of using program control to work with microcontrollers has come to play a very important role. Because of the flexibility to modify the functionality. It can greatly increase the convenience of use for operators. This project consists of a structure design of the lawn mower and distance sensor testing to select the suitable sensor that has good performance.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เพราะได้รับคำปรึกษาและความอนุเคราะห์จาก อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.สุธรรม สัทธรรมสกุล ที่ช่วยแนะนำจัดหา และสอนสั่งในเนื้อหาวิชาการรวมถึงสิ่ง สำคัญอันเป็นประโยชน์ต่อการจัดทำปริญญาานิพนธ์ในครั้งนี้ อีกทั้งยังเอื้อเพื่ออุปกรณ์ และเครื่องมือ ต่าง ๆ ในการทำปริญญาานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำซาบซึ้ง และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่านของภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม ที่ให้คำแนะนำ เพิ่มเติมเนื้อหาความรู้วิชาการและถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า อันเป็นประโยชน์ต่อการทำ ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

และที่ลืมเสียไม่ได้คือ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ที่ช่วย สนับสนุน และเป็นแรงบันดาลใจในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จนประสบผลสำเร็จเช่นนี้ได้ คุณค่า และคุณประโยชน์จากการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำขอมอบแต่ผู้มีพระคุณทุก ท่านที่มีส่วนช่วย ให้โครงการชิ้นนี้ประสบผลสำเร็จ

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	XIII
สารบัญรูป.....	XIV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปริญญาโท.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาโท.....	2
1.3 ขอบเขตของปริญญาโท.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	3
2.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	3
2.1.1 โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์.....	3
2.1.1.1 หน่วยประมวลผลกลางซีพียู (CPU).....	4
2.1.1.2 หน่วยความจำ (Memory).....	4
2.1.1.3 ส่วนติดต่อกับอุปกรณ์ หรือพอร์ต (Port).....	4
2.1.1.4 ช่องทางเดินสัญญาณ หรือบัส (Bus).....	4
2.1.1.5 วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (Clock).....	4
2.1.2 ตระกูลของไมโครคอนโทรลเลอร์.....	4
2.1.2.1 Z-80.....	5
2.1.2.2 MCS-51.....	5
2.1.2.3 PIC.....	7
2.1.2.4 AVR.....	9
2.1.2.5 Arduino.....	10

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2 Arduino Mega 2560	11
2.2.1 บอร์ด Arduino Mega 2560.....	12
2.2.2 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าใช้งาน (Power Specification).....	13
2.2.3 ข้อมูลหน่วยความจำ (Memory Specifications).....	14
2.2.4 ข้อมูลอินพุต และเอาต์พุต (Input and Output).....	14
2.2.5 ข้อมูลการสื่อสาร (Communication).....	16
2.2.6 ข้อมูลด้านโปรแกรมมิ่ง (Programming).....	16
2.2.7 ข้อมูลการรีเซ็ตอัตโนมัติภายในซอฟต์แวร์ (Automatic Software Reset).....	17
2.2.8 ข้อมูลการป้องกันกระแสไฟ (USB Current Protection).....	17
2.2.9 โครงสร้างและขนาด	17
2.3 Arduino Integrated Development Environment (IDE).....	18
2.3.1 ส่วนประกอบของหน้าจอโปรแกรม Arduino IDE.....	19
2.3.2 เมนูบาร์เป็นส่วนที่แสดงรายการ (เมนู) ของคำสั่งต่าง ๆ ของโปรแกรม.....	20
2.3.2.1 เมนู File.....	20
2.3.2.2 เมนู Edit.....	21
2.3.2.3 เมนู Sketch.....	22
2.3.2.4 เมนู Tools.....	22
2.3.2.5 เมนู Help.....	23
2.4 Encoder.....	23
2.4.1 โครงสร้างภายในของเอ็นโคตเตอร์.....	23
2.4.2 ชนิดของเอ็นโคตเตอร์.....	24
2.4.2.1 ทำงานด้วยหลักการเหนี่ยวนำ (Analog Encoder).....	24
2.4.2.2 ทำงานด้วยหลักการดิจิทัล (Digital Encoder).....	28
2.4.3 ประเภทเอาต์พุต Rotary encoder.....	32
2.4.3.1 Output Code (Parallel).....	32

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.4 วงจรเอาต์พุต (Output Circuits).....	34
2.4.4.1 PNP open collector (Code P).....	34
2.4.4.2 Push-Pull / HTL (Code Y)	35
2.4.4.3 Power Push-Pull / HTL (Code T)	35
2.4.4.4 Line Driver (RS-422) / TTL (Code L).....	36
2.4.4.5 Power Line Driver (RS-422) / TTL (Code K).....	37
2.4.4.6 Universal circuit Push-Pull + Line Driver /	37
HTL + TTL (Code H)	
2.4.4.7 1Vpp sin/cos (Code V).....	39
2.4.4.8 Analog Output.....	40
2.4.4.9 Fieldbus Interface (Serial Interfaces).....	40
2.4.4.10 BISS Interface หรือ Bidirectional Serial and Synchronous	42
2.5 เลเซอร์ (Laser).....	43
2.5.1 ความแตกต่างระหว่างแสงธรรมดาและลำแสงเลเซอร์.....	44
2.5.2 คุณลักษณะของแสงเลเซอร์.....	44
2.5.2.1 ความเป็นแสงสีเดียว (Monochromaticity).....	44
2.5.2.2 การมีทิศทางที่แน่นอน (Directionality).....	44
2.5.2.3 ความพร้อมเพรียง (Coherence).....	45
2.5.2.4 ความหนาแน่นของพลังงานสูง.....	45
2.5.3 โครงสร้างของเลเซอร์.....	46
2.5.4 หลักการทำงานของเลเซอร์.....	47
2.5.5 หลักการเบื้องหลังการสร้างเลเซอร์.....	48
2.5.5.1 การเร่งประจุ.....	48
2.5.5.2 การปล่อยพลังงานออกมาตามธรรมชาติ.....	49
2.5.6 หลักการเพิ่มความเข้มของเลเซอร์.....	49
2.5.7 โครงสร้างของเลเซอร์ออสซิลเลเตอร์.....	50
2.5.7.1 เซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์ (Semi-Conductor Laser).....	50

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.7.2 เลเซอร์ก๊าซ CO2 (Gas CO2 Laser).....	51
2.5.7.3 เลเซอร์แบบโซลิตสเตรท , เลเซอร์ YAG, วิธีการปั๊มด้านข้าง.....	52
(Solid-State Laser)	
2.5.7.4 เลเซอร์แบบโซลิตสเตรท (เลเซอร์ YVO4, วิธีการปั๊มที่ปลาย)	53
2.5.7.5 ไฟเบอร์เลเซอร์.....	54
2.5.8 ระดับความอันตรายของเลเซอร์ (Laser Classes and Safety)	55
2.5.8.1 ระดับที่ 1 (Class 1).....	55
2.5.8.2 ระดับที่ 2 (Class 2).....	55
2.5.8.3 ระดับที่ 3R (Class 3R: Restricted).....	56
2.5.8.4 ระดับที่ 3B (Class 3B).....	56
2.5.8.5 ระดับที่ 4 (Class 4).....	56
2.5.9 ความปลอดภัยเกี่ยวกับกระแสไฟฟ้าจากเลเซอร์.....	57
2.6 มอเตอร์ไฟฟ้า (Electric Motor).....	57
2.6.1 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้า.....	58
2.6.1.1 ขดลวดสนามแม่เหล็ก (Field Coil).....	58
2.6.1.2 ขั้วแม่เหล็ก (Pole Pieces).....	59
2.6.1.3 โครงมอเตอร์ (Motor Frame).....	60
2.6.1.4 แกนอาร์เมเจอร์ (Armature Core).....	60
2.6.1.5 ขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature or Armature winding).....	61
2.6.1.6 คอมมิวเตเตอร์ (Commutator).....	61
2.6.1.7 แปรงถ่าน (Brush).....	62
2.6.1.8 ตลับลูกปืนหรือปลอกทองเหลือง (Bearing or Bush).....	63
2.6.1.9 แกนเพลลา (Shaft).....	63
2.6.1.10 ช่องว่างอากาศ (Air-gap).....	63
2.6.2 แหล่งจ่ายไฟ (Power Supply).....	64
2.6.2.1 แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (DC).....	64
2.6.2.2 แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ (AC).....	65

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6.3 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า.....	65
2.6.3.1 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรง (DC).....	65
2.6.3.2 บอร์ดควบคุมมอเตอร์ EVO24V50.5 Brushed DC Motor Driver	65
2.6.3.3 โหมดการทำงานของบอร์ดควบคุมมอเตอร์ EVO24V50.5	68
2.6.3.4 ระบบแจ้งเตือนเมื่อแรงดันแบตเตอรี่ต่ำของ EVO24V50.5.....	70
2.6.3.5 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC).....	70
2.6.4 ประเภทของมอเตอร์ไฟฟ้า.....	71
2.6.4.1 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor).....	71
2.6.4.2 มอเตอร์ชนิดไฟฟ้ากระแสตรง.....	75
2.6.4.3 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Motor)	83
2.6.4.4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ.....	84
2.6.5 แรงดันไฟฟ้าในการเริ่มต้นใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส.....	93
(Start AC Induction motor 3 phase)	
2.6.6 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงบิดของมอเตอร์ 3 เฟส	94
2.7 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Electric generator).....	95
2.7.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Generator)	97
2.7.1.1 โครงสร้างและส่วนประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง.....	97
2.7.2 การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ (Sine Wave).....	100
2.7.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Generator).....	101
2.7.3.1 การเปลี่ยนแรงเคลื่อนไฟสลับของคอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่าน	101
2.7.3.2 โครงสร้างและส่วนประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ	102
2.7.4 หลักการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า	104
2.7.4.1 แบบพุ่มหมุน Revolving Armature Type (Ra Type).....	104
2.7.4.2 แบบขั้วแม่เหล็กหมุน Revolving Field Type (Rf Type).....	104
2.7.4.3 แบบไม่มีแปรงถ่าน Brushless Type (Bl Type)	105
2.8 Radio remote controller	106
2.8.1 FLYSKY 2.4Ghz FS-i6X digital proportional radio control system	107

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8.2 Transmitter Overview.....	107
2.8.3 Battery indicator.....	108
2.8.4 Receiver (FS-iA6).....	109
2.9 แบตเตอรี่ (Battery).....	110
2.9.1 ประเภทของแบตเตอรี่.....	110
2.9.1.1 แบตเตอรี่แบบใช้ครั้งเดียวทิ้งหรือแบตเตอรี่ขั้นปฐมภูมิ.....	110
(primary batteries)	
2.9.1.2 แบตเตอรี่แบบชาร์จไฟใหม่ได้หรือแบตเตอรี่ขั้นทุติยภูมิ.....	110
(rechargeable batteries)	
2.9.1.3 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium-Ion Battery).....	111
2.10 โซ่ส่งกำลัง (Chain Drives).....	113
2.10.1 ส่วนประกอบของโซ่ส่งกำลัง.....	113
2.10.1.1 แผ่นประกบด้านใน (outer link).....	113
2.10.1.2 แผ่นประกบด้านนอก (outer link).....	113
2.10.1.3 สลัก(pin).....	113
2.10.1.4 โรลเลอร์ (roller).....	114
2.10.1.5 บุษ (bush).....	114
2.10.2 ชนิดของโซ่ส่งกำลัง.....	114
2.10.2.1 โซ่ส่งกำลังชนิดลูกกลิ้ง (Roller chains).....	114
2.10.2.2 โซ่ส่งกำลังชนิดโซ่ฟัน (Toothed chains).....	115
2.10.2.3 โซ่ส่งกำลังชนิดปลอก (Leaf Chain).....	115
2.10.2.4 โซ่ฟันเฟือง (Chain Sprockets Gear).....	115
2.10.3 อุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกับโซ่ส่งกำลัง.....	116
2.10.3.1 เฟืองโซ่ (sprocket).....	116
2.10.3.2 ลูกล้อตัวตาม (Idler sprockets).....	117
2.11 รีเลย์ (relay).....	117
2.11.1 หลักการทำงานของรีเลย์.....	117

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.11.2 ส่วนประกอบสำคัญของรีเลย์.....	118
2.11.2.1 ขดลวด (coil).....	118
2.11.2.2 หน้าสัมผัส (contact).....	118
2.11.3 ข้อจำกัดในการใช้งานรีเลย์ทั่วไป.....	118
2.11.3.1 แรงดันใช้งาน หรือแรงดันที่ทำให้รีเลย์ทำงานได้.....	118
2.11.3.2 การใช้งานกระแสผ่านหน้าสัมผัส.....	118
2.11.3.3 จำนวนหน้าสัมผัสการใช้งาน.....	118
2.11.4 จุดต่อใช้งานมาตรฐาน.....	118
2.11.4.1 จุดต่อ NC.....	118
2.11.4.2 จุดต่อ NO.....	119
2.11.4.3 จุดต่อ C.....	119
2.11.5 ประเภทของรีเลย์.....	119
2.11.5.1 เพาเวอร์รีเลย์ (Power Relay).....	119
2.11.5.2 โซลิดสเตตรีเลย์ (SSR).....	120
2.11.5.3 แลตชิ่งรีเลย์ (Latching Relay).....	120
2.11.5.4 เซฟตี้รีเลย์ (Safety Relay).....	121
2.11.5.5 ไทม์เมอร์รีเลย์ (Timer Relay).....	121
2.11.5.6 เทอร์มินอลรีเลย์ (Terminal Relay).....	122
2.11.5.7 สเต็ปป์รีเลย์ (Stepping Relay).....	122
2.11.6 ประโยชน์ของรีเลย์.....	123
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	124
3.1 ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้าง.....	124
3.2 ขั้นตอนการทดสอบเซนเซอร์.....	127
3.2.1 ทำการทดสอบการทำงานของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอัลตราโซนิก.....	128
3.2.2 ทำการทดสอบการทำงานของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอินฟราเรด.....	130
	(แบบดิจิทัล)

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.3 ทำการทดสอบการทำงานของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอินฟราเรด 133 (แบบอนาล็อก)	133
3.2.4 ทำการทดสอบการทำงานของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดเลเซอร์ 135	135
3.3 ขั้นตอนการทำระดับความเร็วของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม 137	137
3.4 ขั้นตอนการออกแบบวงจรควบคุมรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม 139	139
3.4.1 วงจรเชื่อมต่อของระบบปั่นไฟ 140	140
3.4.2 วงจรเชื่อมต่อชุดเซนเซอร์วัดระยะทางเข้ากับชุดคอนโทรลเลอร์ 140	140
3.4.3 วงจรเชื่อมต่อบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์กระแสตรง 141 และเอนโคเดอร์เซนเซอร์เข้ากับชุดคอนโทรลเลอร์	141
3.4.4 วงจรเชื่อมต่อไฟเลี้ยงแรงดัน 5 โวลต์ดีซี เข้ากับอุปกรณ์ภายในระบบ 141	141
3.4.5 การเชื่อมต่อชุดคอนโทรลเลอร์รับ และส่งข้อมูลเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ 142	142
3.5 แผนผังโปรแกรมควบคุมการทำงานของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม 142	142
3.5.1 แผนผังโปรแกรมตรวจจับสิ่งกีดขวาง 142	142
3.5.2 แผนผังโปรแกรมการรีเซ็ตระบบความปลอดภัย 143	143
3.5.3 แผนผังโปรแกรมการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม 144	144
3.6 อุปกรณ์ด้านฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในโครงการ การปรับปรุงประสิทธิภาพ 146 การเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม	146
3.7 ขั้นตอนการประกอบโครงสร้าง และวงจรควบคุมรถตัดหญ้า 149	149
3.7.1 ขั้นตอนการประกอบโครงสร้างส่วนที่ใช้ในการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม 149	149
3.7.2 ขั้นตอนการเดินสายไฟของอุปกรณ์ควบคุม 150	150
บทที่ 4 ผลการทดสอบ 153	153
4.1 การทดสอบประสิทธิภาพด้านการเคลื่อนที่ตามแนวเส้นตรงของรถตัดหญ้า 153 แบบใช้รีโมทควบคุมบนพื้นที่สนามปูน	153
4.2 การทดสอบประสิทธิภาพด้านการเคลื่อนที่ตามแนวเส้นตรงของรถตัดหญ้า 154 แบบใช้รีโมทควบคุมบนพื้นที่สนามหญ้า	154
4.3 การทดสอบประสิทธิภาพด้านการบังคับเลี้ยว 156	156
4.4 การทดสอบประสิทธิภาพด้านความปลอดภัยเมื่อพบสิ่งกีดขวาง 157	157

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปและอภิปรายผลการศึกษาค้นคว้า	159
5.1 สรุป	159
5.2 อภิปรายผล	160
5.3 ประโยชน์ของการศึกษาค้นคว้า	160
5.4 ข้อเสนอแนะ	160
บรรณานุกรม.....	161
ภาคผนวก	163
ภาคผนวก ก. คู่มือการใช้งาน	164
ภาคผนวก ข. โปรแกรมควบคุมการทำงาน	168



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงข้อมูลเฉพาะทางทางเทคนิคของบอร์ด Arduino Mega 2560	12
2.2 แสดงฟังก์ชันการทำงานตามโครงสร้างของบอร์ด Arduino Mega 2560	13
2.3 ส่วนประกอบของหน้าจอโปรแกรม Arduino	20
2.4 แถบเครื่องมือ (Tools bar)	21
2.5 แสดงค่าความละเอียดเป็นระบบดิจิทัล 360 องศา	27
2.6 แสดงคุณสมบัติของวงจรเอาต์พุตของเอนโคเดอร์ชนิดต่างๆ	38
2.7 แสดงคุณสมบัติของวงจรเอาต์พุตแบบ 1 Vpp sin/cos (Code V)	39
2.8 แสดงการแปลงค่าที่อ่านได้ให้เป็นสัญญาณมาตรฐาน	40
2.9 แสดงตารางเปรียบเทียบ Field Bus ชนิดต่าง ๆ	41
2.10 แสดงค่าสัญญาณนาฬิกาสูงสุดที่ความยาวของสายสัญญาณ	42
สำหรับการส่งข้อมูลแบบ BiSS Interface	
2.11 แสดงเปรียบเทียบความยาวสาย และความถี่ที่สามารถใช้งานได้	43
2.12 ชนิดของตัวกลางที่ใช้ในการสร้างแสงเลเซอร์	50
2.13 คุณสมบัติของบอร์ดไดรฟ์ EVO24V50.5 Brushed DC Motor Driver	66
2.14 รายละเอียดบนบอร์ด EVO24V50.5	67
2.15 Transmitter specification (FS-i6)	108
2.16 Receiver specification (FS-iA6)	109
2.17 เปรียบเทียบข้อดี และข้อเสียของโซ่ส่งกำลัง	117
3.1 การทดสอบโดยไม่มีเครื่องเคลื่อนที่ และเสียงรบกวนของเครื่องตัดหญ้า	129
ของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอัลตราโซนิก	
3.2 การทดสอบโดยติดตั้งเซนเซอร์ร่วมกับรถตัดหญ้า และสตาร์ทเครื่องตัดหญ้า	129
ของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอัลตราโซนิก	
3.3 การทดสอบโดยติดตั้งเซนเซอร์ร่วมกับรถตัดหญ้า และสตาร์ทเครื่องตัดหญ้า	130
พร้อมบังคับรถตัดหญ้าของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอัลตราโซนิก	
3.4 การทดสอบโดยไม่มีเครื่องเคลื่อนที่ และเสียงรบกวนของเครื่องตัดหญ้า	131
ของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอินฟราเรด (แบบดิจิทัล)	

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3.5 การทดสอบโดยติดตั้งเซนเซอร์ร่วมกับبردตัดหญ้า และสตาร์ทเครื่องตัดหญ้า 132 ของเซนเซอร์วัฏระยะทางชนิดอินฟราเรด (แบบดิจิทัล)	132
3.6 การทดสอบโดยติดตั้งเซนเซอร์ร่วมกับبردตัดหญ้า และสตาร์ทเครื่องตัดหญ้า 132 พร้อมบังคับบอร์ดตัดหญ้าของเซนเซอร์วัฏระยะทางชนิดอินฟราเรด (แบบดิจิทัล)	132
3.7 การทดสอบโดยไม่มีการเคลื่อนที่ และเสียงรบกวนของเครื่องตัดหญ้า..... 133 ของเซนเซอร์วัฏระยะทางชนิดอินฟราเรด (แบบอนาล็อก)	133
3.8 การทดสอบโดยติดตั้งเซนเซอร์ร่วมกับบอร์ดตัดหญ้า และสตาร์ทเครื่องตัดหญ้า 134 ของเซนเซอร์วัฏระยะทางชนิดอินฟราเรด (แบบอนาล็อก)	134
3.9 การทดสอบโดยติดตั้งเซนเซอร์ร่วมกับบอร์ดตัดหญ้า และสตาร์ทเครื่องตัดหญ้า 134 พร้อมบังคับบอร์ดตัดหญ้าของเซนเซอร์วัฏระยะทางชนิดอินฟราเรด (แบบอนาล็อก)	134
3.10 การทดสอบโดยไม่มีการเคลื่อนที่ และเสียงรบกวนของเครื่องตัดหญ้า 135 ของเซนเซอร์วัฏระยะทางชนิดเลเซอร์	135
3.11 การทดสอบโดยติดตั้งเซนเซอร์ร่วมกับบอร์ดตัดหญ้า และสตาร์ทเครื่องตัดหญ้า..... 136 ของเซนเซอร์วัฏระยะทางชนิดเลเซอร์	136
3.12 การทดสอบโดยติดตั้งเซนเซอร์ร่วมกับบอร์ดตัดหญ้า และสตาร์ทเครื่องตัดหญ้า..... 136 พร้อมบังคับบอร์ดตัดหญ้าของเซนเซอร์วัฏระยะทางชนิดเลเซอร์	136
3.13 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของเซนเซอร์วัฏระยะทางทั้ง 4 ชนิด..... 137	137
3.14 การทำงานของรีโมทควบคุม..... 138	138
3.15 ความถี่ของจอยสติ๊กหมายเลข 1 ที่ตำแหน่งต่าง ๆ 138	138
3.16 ความถี่ของจอยสติ๊กหมายเลข 1 ที่ใช้ในการกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้า 138	138
3.17 ระดับความเร็วของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม 139	139
3.18 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงาน 146	146
4.1 ตารางบันทึกผลการหาประสิทธิภาพด้านการเคลื่อนที่ตามแนวเส้นตรงของรถตัดหญ้า 154 แบบใช้รีโมทควบคุมบนพื้นที่สนามปูน	154
4.2 ตารางบันทึกผลการหาประสิทธิภาพด้านการเคลื่อนที่ตามแนวเส้นตรงของรถตัดหญ้า 155 แบบใช้รีโมทควบคุมบนพื้นที่สนามหญ้า	155
4.3 ตารางบันทึกผลการหาประสิทธิภาพด้านการบังคับเลี้ยวซ้าย..... 156	156

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.4 ตารางบันทึกผลการหาประสิทธิภาพด้านการบังคับบัญชา.....	157
4.5 ตารางบันทึกผลการหาประสิทธิภาพด้านความปลอดภัยเมื่อพบสิ่งกีดขวาง	158



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์.....	3
2.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล Z-80.....	5
2.3 (ก) ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51.....	5
(ข) บอร์ดควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51	
2.4 โครงสร้างภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51.....	7
2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC.....	7
2.6 ตำแหน่งขา PIC16F877A.....	9
2.7 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR.....	9
2.8 รายละเอียดขา AVR ATmega128.....	10
2.9 ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด Arduino.....	11
2.10 บอร์ด Arduino Mega 2560.....	11
2.11 โครงสร้างและส่วนประกอบของบอร์ด Arduino Mega 2560.....	12
2.12 อุปกรณ์แปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 100 - 240 โวลต์ เป็นไฟฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์.....	13
2.13 พอร์ตที่มีให้เลือกใช้งานภายในบอร์ด Arduino Mega2560.....	15
2.14 ไฟ LED RX และ TX บนบอร์ด Arduino Mega2560.....	16
2.15 ภาพรวมโครงสร้างบอร์ด Arduino Mega2560 (Overview).....	17
2.16 มุมมองด้านข้างโครงสร้างบอร์ด Arduino Mega2560 (Side view).....	17
2.17 มุมมองด้านหน้าโครงสร้างบอร์ด Arduino Mega2560 (Front view).....	18
2.18 มุมมองด้านบนโครงสร้างบอร์ด Arduino Mega2560 (Top view).....	18
2.19 โปรแกรม Arduino IDE.....	19
2.20 ส่วนประกอบของหน้าจอโปรแกรม Arduino IDE.....	19
2.21 (ก) แสดงส่วนประกอบของ Encoder.....	24
(ข) หลักการทำงานของ Encoder (รูปจาก Rockwell Automation)	
2.22 แสดง Metal speed encoder tachometer.....	25
2.23 (ก) แสดง Resolver หรือ Rotary Transformer (ข) โครงสร้างส่วนประกอบ.....	26
2.24 แสดง ขนาดของสัญญาณในแต่ละช่วงเวลาของรีโซลเวอร์.....	27
2.25 แสดงตัวอย่างการทำงาน ตัวอย่างเช่น RDC 14 บิต.....	27

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.26 แสดง incremental encoder	29
2.27 แสดง Disk of absolute encoder.....	29
2.28 แสดง ส่วนประกอบของ Increment encoder.....	29
และสัญญาณของแทรค A , B และ Z.	
2.29 แสดง absolute encoder และ absolute disk.....	31
2.30 โครงสร้างของ absolute encoder.....	31
2.31 แสดง Gray Scales disk	31
2.32 แสดง ตารางเปรียบเทียบรหัสเกรย์กับรหัสไบนารี	33
2.33 แสดง การต่อวงจรเอาต์พุตแบบ NPN Open collector	34
2.34 แสดงการต่อวงจรเอาต์พุตแบบ PNP Open collector	35
2.35 แสดงการต่อวงจรเอาต์พุตแบบ Push-Pull / HTL (Code Y).....	35
2.36 แสดงการต่อวงจรเอาต์พุตแบบ Power Push-Pull / HTL (Code T).....	36
2.37 แสดงการต่อวงจรเอาต์พุตแบบ Line Driver (RS-422) / TTL (Code L).....	36
2.38 แสดงการต่อวงจรเอาต์พุตแบบ Power Line Driver (RS-422) / TTL (Code K).....	37
2.39 แสดงการต่อวงจรเอาต์พุตแบบ Universal circuit	38
Push-Pull+Line Driver/HTL+TTL (Code H)	
2.40 แสดงการต่อวงจรเอาต์พุตแบบ 1 Vpp sin/cos (Code V)	39
2.41 แสดงสัญญาณเอาต์พุตแบบ 1 Vpp sin/cos (Code V).....	39
2.42 แสดงการต่อวงจรเอาต์พุตแบบ Analogue Output.....	40
2.43 แสดงการเชื่อมต่อการสื่อสารสำหรับการส่งข้อมูลแบบ BiSS Interface	42
2.44 แสดงสเปคตรัมและคลื่นของรังสี	43
2.45 แสดงการเปรียบเทียบความเป็นแสงสีเดียว (Monochromaticity)	44
ระหว่างแสงธรรมชาติและแสงเลเซอร์	
2.46 แสดงการเปรียบเทียบการมีทิศทางที่แน่นอน (Directionality).....	45
ระหว่างแสงธรรมชาติและแสงเลเซอร์	
2.47 แสดงแหล่งกำเนิดแสงที่ส่งคลื่นออกไปทุกทิศทางของแสงเลเซอร์	45

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.48 แสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นของพลังงานสูง ระหว่างแสงธรรมชาติและแสงเลเซอร์	46
2.49 แสดง 3 องค์ประกอบสำคัญของเลเซอร์	46
2.50 แสดงหลักการทำงานของเลเซอร์	48
2.51 แสดงหลักการเร่งประจุเพื่อสร้างเลเซอร์	48
2.52 แสดงหลักการปล่อยพลังงานออกมาตามธรรมชาติของเลเซอร์	49
2.53 แสดงการปล่อยพลังงานที่ถูกกระตุ้นของเลเซอร์	50
2.54 แสดงโครงสร้างเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์ (Semi-Conductor Laser)	51
2.55 เลเซอร์พอยน์เตอร์เป็นเลเซอร์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์ (Semi-Conductor Laser)	51
2.56 แสดงโครงสร้างของเลเซอร์ก๊าซ CO ₂ (Gas CO ₂ Laser)	52
2.57 แสดงโครงสร้างของแบบโซลิดสเตท , เลเซอร์ YAG วิธีการปั๊มด้านข้าง (Solid-State Laser)	53
2.58 แสดงโครงสร้างของเลเซอร์แบบโซลิดสเตท (เลเซอร์ YVO ₄ , วิธีการปั๊มที่ปลาย)	54
2.59 แสดงโครงสร้างไฟเบอร์เลเซอร์ (Fiber Laser)	55
2.60 แสดงโครงสร้างภายนอกและภายในของมอเตอร์ไฟฟ้า	58
2.61 แสดงโครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าส่วนที่อยู่กับที่และส่วนที่เคลื่อนที่	58
2.62 (ก) ขดลวดสนามแม่เหล็ก (ข) แสดงโครงสร้างของขดลวดสนามแม่เหล็ก (Field Coil) ถูกติดตั้งเข้ากับแกนเหล็กอาร์เมเจอร์	59
2.63 แสดงขั้วแม่เหล็ก (Pole Pieces) และโครงสร้างเมื่อนำมาประกอบกัน	60
2.64 แสดงส่วนที่อยู่กับที่ของมอเตอร์ ประกอบด้วยโครงมอเตอร์ สเตเตอร์ และขดลวด	60
2.65 แสดงแกนเหล็กอาร์เมเจอร์ (Armature)	61
2.66 แสดงการพันอาร์เมเจอร์ แบบแลป (Lap) และ เวฟ (Wave)	61
2.67 (ก) แสดงโครงสร้างคอมมิวเตเตอร์ (ข) คอมมิวเตเตอร์รูปแบบต่างๆ	62
2.68 แสดงแปรงถ่านรูปแบบต่างๆ	62
2.69 แสดงสลักลูกปืน และปลอกทองเหลือง	63
2.70 แสดงแกนเพลลาที่เชื่อมติดอยู่กับแกนเหล็กอาร์เมเจอร์และคอมมิวเตเตอร์	63

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.71 แสดงบอร์ดควบคุมมอเตอร์ EVO24V50.5 Brushed DC Motor Driver	67
2.72 แสดงโครงสร้างของ EVO24V50.5 Brushed DC Motor Driver	67
2.73 การต่อบอร์ด EVO24V50.5 ใช้งานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์	68
2.74 การต่อบอร์ด EVO24V50.5 ใช้งานร่วมกับ R/C Receiver	69
2.75 การต่อบอร์ด EVO24V50.5 ใช้งานร่วมกับตัวต้านทานปรับค่าได้และปุ่มกด	69
2.76 แสดง AC Power Inverter Drive	70
2.77 แสดงวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม	72
2.78 แสดงมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน (Shunt Motor).....	72
2.79 แสดงวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม ชนิดซีรต์ชนิดคอมปาวด์มอเตอร์	73
2.80 วงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมชนิดลวงชนิดคอมปาวด์มอเตอร์	74
2.81 (ก) แสดงวงจ Long shunt motor แบบ Cumulative compound	75
(ข) วงจ Long shunt motor แบบ Differential compound	
2.82 (ก) แสดงโครงสร้างของ Brushed DC electric motor	76
(ข) Brushed DC electric motor	
2.83 (ก) แสดงโครงสร้างของ Brushless DC electric motor (BLDC).....	77
(ข) แสดง Brushless DC electric motor (BLDC)	
2.84 แสดง Permanent-magnet electric motor (PMDC).....	78
2.85 (ก) แสดงโครงสร้างของ Permanent-magnet electric motor (PMDC).....	78
(ข) แสดงโรเตอร์แม่เหล็กถาวร (Permanent-magnet)	
2.86 แสดงสเต็ปมอเตอร์ และไดร์เวอร์	80
2.87 แสดงโครงสร้างอย่างง่ายของ สเต็ปมอเตอร์ แบบผสม (HYBRID-H).....	80
2.88 แสดงลักษณะการพันขดลวดสเต็ปมอเตอร์ยูนิโพลาร์	81
2.89 แสดงการกระตุ้นสเต็ปมอเตอร์แบบเวฟ หรือฟูลสเต็ป 1 เฟส.....	81
2.90 แสดงการกระตุ้นสเต็ปมอเตอร์แบบฟูลสเต็ป 2 เฟส	82
2.91 แสดงการกระตุ้นสเต็ปมอเตอร์แบบครึ่งสเต็ปหรือฮาล์ฟสเต็ป	83
2.92 แสดงโครงสร้างของโรเตอร์กรงกระรอก (Squirrel cage rotor)	84

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.93 แสดงสวิทช์แรงเหวี่ยง (Centrifugal switch).....	85
2.94 แสดงวงจรการต่อสลิปเฟสมอเตอร์.....	85
2.95 แสดงวงจรคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์ (Capacitor start motor).....	86
2.96 แสดง Capacitor electrolytic	86
2.97 แสดงคาปาซิเตอร์มอเตอร์ (Capacitor Motor).....	86
2.98 แสดงวงจรคาปาซิเตอร์รันมอเตอร์ (Capacitor run motor).....	87
2.99 แสดงแสดงลักษณะของคาปาซิเตอร์ ที่ใช้กับคาปาซิเตอร์รันมอเตอร์.....	87
2.100 แสดงโครงสร้างของรีพัลชันมอเตอร์ (Repulsion Motor).....	88
2.101 แสดงรีพัลชันมอเตอร์ (Repulsion Motor).....	88
2.102 แสดงยูนิเวอร์แซลมอเตอร์ (Universal Motor).....	89
2.103 แสดงโครงสร้างของยูนิเวอร์แซลมอเตอร์ (Universal Motor).....	90
2.104 แสดงวงจรยูนิเวอร์แซลมอเตอร์ (Universal Motor).....	90
2.105 (ก) และ (ข) แสดงหลักการทำงานของยูนิเวอร์แซลมอเตอร์ (Universal Motor).....	90
2.106 แสดงเซดเด็ดโพลมอเตอร์ (Shaded Pole Motor).....	91
2.107 แสดงโครงสร้างวงจรของเซดเด็ดโพลมอเตอร์ (Shaded Pole Motor).....	92
2.108 แสดงสquirrel cage โรเตอร์มอเตอร์.....	93
(Squirrel Cage Rotor Motor, Induction motor)	
2.109 (ก) แสดงการต่อวงจร AC Induction motor 3 phase.....	94
(ข) Nameplate motor	
2.110 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดปกติและกระแสใช้งานปกติ.....	95
ของมอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส	
2.111 แสดงเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternator).....	96
2.112 แสดงขดลวดสเตเตอร์ (Stator coil).....	96
2.113 (ก) แสดงหลักการทำงานของ AC Generator.....	97
(ข) แสดงหลักการทำงานของ DC Generator	
2.114 แสดงโครงสร้างและส่วนประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง.....	98
2.115 แสดงอาร์เมเจอร์กำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง.....	98

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.116 แสดงขดลวดอาร์เมเจอร์ และการพันขดลวดแบบ One-turn coil..... และ Two-turn coil	99
2.117 แสดงคอมมิวเตเตอร์ (Comutator) ที่ติดตั้งอยู่กับฉนวนและเพลลา.....	99
2.118 แสดงแปรงถ่าน (Carbon Brush).....	100
2.119 แสดงการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ (Sine Wave).....	100
2.120 แสดงการเปลี่ยนแรงเคลื่อนไฟสลัของคอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่าน.....	101
2.121 แสดงโครงสเตเตอร์ (Stator Frame).....	102
2.122 แสดงแกนเหล็กสเตเตอร์ (Stator Core).....	102
2.123 แสดงทุ่นหมุนซึ่งมีขดลวดฝังอยู่รอบแกนโรเตอร์.....	103
2.124 แสดงโครงสร้าง และลักษณะของขดลวดแดมเปอร์ (Damper Winding).....	103
2.125 แสดง Generator Excitation Control Systems.....	104
2.126 แสดงการเหนี่ยวนำแม่เหล็กแบบขั้วแม่เหล็กหมุน..... Revolving Field Type (Rf Type)	105
2.127 แสดง Block diagram of the components of..... an excitation control system	106
2.128 แสดง Radio remote controller.....	106
2.129 แสดง FLYSKY 2.4Ghz FS-i6X digital proportional radio Control system.....	107
2.130 (ก) และ (ข) แสดงภาพรวมของ FLYSKY 2.4Ghz ด้านหน้า และด้านหลัง.....	108
2.131 แสดง Battery indicator.....	108
2.132 (ก) แสดง Receiver Overview..... (ข) ตัวอย่างการเชื่อมต่อตัวรับสัญญาณกับอุปกรณ์ที่ต้องการควบคุม	109
2.133 ตัวอย่างแบตเตอรี่ Zinc-carbon Battery, Alkaline Battery.....	110
2.134 ตัวอย่างแบตเตอรี่ Nickel cadmium battery , Lithium-Ion Battery.....	111
2.135 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium-Ion Battery).....	111
2.136 การอัดประจุ (charge).....	112
2.137 แสดงตำแหน่งของโซ่ (Chain) และเฟืองโซ่ (Sprocket).....	113
2.138 แสดงส่วนประกอบของโซ่ส่งกำลัง.....	114

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.139 (ก) Roller chains แบบ 1 ชั้น , (ข) Roller chains แบบ 2 ชั้น (ค) Roller chains แบบ 3 ชั้น	114
2.140 แสดง โซ่ส่งกำลัง ชนิด Toothed chains	115
2.141 แสดงโซ่ปลอก (Leaf Chain)	115
2.142 แสดงโซ่ฟันเฟือง (Chain Sprockets Gear).....	116
2.143 แสดงเฟืองโซ่แบบฟันเฟืองแบบ 1 , 2 และ 3 ชั้น	116
2.144 แสดง Chain guide tensioner ใช้สำหรับปรับความตึงให้กับโซ่ส่งกำลัง.....	117
2.145 จุดต่อใช้งานมาตรฐาน.....	119
2.146 เพาเวอร์รีเลย์ (Power Relay).....	120
2.147 โซลิดสเตตรีเลย์ (SSR).....	120
2.148 แลทชิ่งรีเลย์ (Latching Relay).....	121
2.149 เซฟตี้รีเลย์ (Safety Relay).....	121
2.150 ไทม์เมอร์รีเลย์ (Timer Relay).....	122
2.151 เทอร์มินอลรีเลย์ (Terminal Relay).....	122
2.152 สเต็ปป์รีเลย์ (Stepping Relay).....	123
3.1 เขียนแบบเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดเลเซอร์ และชุดยึดติดตั้งเซนเซอร์.....	124
3.2 เขียนแบบเอนโคเดอร์ (Omron รุ่น E6B2-CWZ3E).....	125
3.3 เขียนแบบมอเตอร์รุ่น Brushed DC MY1016Z 250W 12.....	125
3.4 แสดงภาพร่างรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมด้านหน้า	125
3.5 แสดงภาพร่างรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมด้านบน	126
3.6 แสดงภาพร่างรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมด้านหลัง	126
3.7 แสดงภาพร่างรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมด้านข้าง	126
3.8 แสดงภาพรวมของการออกแบบรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม	126
3.9 เซนเซอร์ทั้ง 4 ประเภท (ก) เซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอัลตราโซนิก	128
(ข) เซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอินฟราเรด (แบบดิจิตอล) (ค) เซนเซอร์วัดระยะทาง ชนิดอินฟราเรด (แบบอนาล็อก) (ง) เซนเซอร์วัดระยะทางชนิดเลเซอร์	
3.10 ทดสอบการทำงานของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอัลตราโซนิก.....	128

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.11 ทดสอบการทำงานของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอินฟราเรด (Digital Type)	130
3.12 ทดสอบการทำงานของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอินฟราเรด (Analog Type).....	133
3.13 ทดสอบการทำงานของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดเลเซอร์.....	135
3.14 การทำงานของปุ่มกดของรีโมทควบคุม.....	138
3.15 วงจรที่ใช้ในการควบคุมรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม.....	139
3.16 วงจรเชื่อมต่อของระบบปั่นไฟ.....	140
3.17 วงจรเชื่อมต่อชุดเซนเซอร์วัดระยะทางเข้ากับชุดคอนโทรลเลอร์.....	140
3.18 วงจรเชื่อมต่อบอร์ดไดรฟ์มอเตอร์กระแสตรง (EVO24V50.5 Brushed DC Motor Driver)	141
กับชุดคอนโทรลเลอร์	
3.19 วงจรเชื่อมต่อไฟเลี้ยงแรงดัน 5 โวลต์ดีซี เข้ากับอุปกรณ์ภายในระบบ.....	141
3.20 การเชื่อมต่อชุดคอนโทรลเลอร์รับ และส่งข้อมูลเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่.....	142
3.21 แผนภาพโปรแกรมตรวจจับสิ่งกีดขวาง.....	143
3.22 แผนภาพโปรแกรมการรีเซ็ตระบบความปลอดภัย.....	144
3.23 แผนภาพโปรแกรมการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม.....	145
3.24 โครงสร้างเดิมของรถตัดหญ้าบังคับวิทยุพร้อมตัวปรับความสูงใบตัด.....	149
3.25 ประกอบโครงสร้างตามที่ได้ออกแบบไว้.....	149
3.26 ติดตั้งเอนโคเดอร์เซนเซอร์ยึดติดกับแกนเพลลาของชุดล้อ.....	150
3.27 ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมเข้ากับกล่องควบคุมที่ได้ติดตั้งเข้ากับรถตัดหญ้า.....	150
3.28 ติดตั้งเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดเลเซอร์เข้ากับตัวรถตัดหญ้า.....	150
3.29 เชื่อมต่อสายเข้ากับอุปกรณ์เซนเซอร์ และติดตั้งบอร์ดขยายพอร์ตสื่อสารอนุกรม.....	151
3.30 ชุดควบคุมการทำงาน และการอัปโหลดโปรแกรม.....	151
3.31 รถตัดหญ้าก่อนทำการปรับปรุงโครงสร้าง.....	152
3.32 รถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมที่มีการเพิ่มระบบควบคุมผ่านบอร์ดคอนโทรลเลอร์.....	152
และระบบความปลอดภัยเรียบร้อยแล้ว	

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญญาประดิษฐ์

ในปัจจุบันการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีในด้านสิ่งอำนวยความสะดวก ได้มีการพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็วเพื่อเพิ่มความสะดวกให้กับมนุษย์ ซึ่งเทคโนโลยีการใช้โปรแกรมควบคุมการทำงานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นได้เข้ามามีบทบาทอย่างมาก ในการควบคุมเครื่องจักรกลอุตสาหกรรม ซึ่งการใช้โปรแกรมควบคุม (Software) ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ (Hardware) เพื่อนำมาควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกลนั้นสามารถช่วยเพิ่มความสะดวกให้แก่ผู้ใช้งานได้เป็นอย่างมาก โดยช่วยให้การทำงานของเครื่องจักรนั้นเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นกว่าเดิม และยังมีความยืดหยุ่นในการเพิ่มหรือปรับปรุงแก้ไขฟังก์ชันการทำงานของเครื่องจักรได้ตามสถานการณ์ และความเหมาะสมได้

ประเทศไทยมีลักษณะภูมิภาคร้อนชื้นเหมาะกับการทำเกษตร มีพื้นที่อุดมสมบูรณ์ปกคลุมไปด้วยพืช เช่น กล้วย ที่นิยมนำมาปลูกเพื่อปกคลุมหน้าพื้นดิน และในปัจจุบันผู้คนส่วนใหญ่นิยมหันมาใส่ใจสิ่งแวดล้อมและนิยมปลูกกล้วยเพื่อตกแต่งตามอาคารบ้านเรือนสถานที่ หรือนำมาปลูกสนามหญ้าเด็กเล่น และรวมไปถึงสนามฟุตบอลที่มีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้าให้สามารถเดินเป็นเส้นตรงในการตัดหญ้าได้นั้นพื้นสนามจำเป็นต้องมีความเรียบ และบุคคลที่ตัดหญ้าจะต้องมีความสามารถในการควบคุมรถตัดหญ้าในระดับหนึ่ง ถึงจะสามารถควบคุมให้รถตัดหญ้าเดินตัดหญ้าไปเป็นเส้นตรงได้

โครงการรถตัดหญ้าบังคับวิทยุพร้อมตัวปรับความสูงใบตัดที่ดำเนินการไปก่อนหน้านี้ ยังพบปัญหาด้านการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้า ที่ไม่สัมพันธ์กับรีโมทที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำ ทั้งการเคลื่อนที่ในแนวทแยง และการบังคับเลี้ยว ซึ่งมีความจำเป็นอย่างมากหากต้องการพัฒนาให้ตัวรถสามารถเคลื่อนที่ได้เองโดยอัตโนมัติ จึงเป็นที่มาของแนวคิดที่จะนำโปรแกรมควบคุมมาใช้ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทำงานของรถตัดหญ้า ปรับปรุงประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้า และเพิ่มฟังก์ชันการทำงานให้มีความสะดวกต่อผู้ใช้งานมากขึ้น ทั้งในด้านประสิทธิภาพด้านการเคลื่อนที่ และรวมไปถึงด้านความปลอดภัยในขณะที่ผู้ปฏิบัติงานมีการใช้งานรถตัดหญ้า

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาโท

1. เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้า
2. เพื่อนำอุปกรณ์เซนเซอร์ และเครื่องมือวัดมาประยุกต์ใช้ในการเพิ่มความสะดวกสบายให้กับงานในด้านเกษตรกรรม
3. เพื่อศึกษาการใช้งานโปรแกรมควบคุมร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ และนำมาควบคุมการทำงานของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม

1.3 ขอบเขตของปริญญาโท

1. สร้างรถตัดหญ้าที่สามารถควบคุมการทำงานระยะไกลด้วยรีโมท
2. ศึกษา และทดสอบการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้าเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพ
3. เพิ่มฟังก์ชันด้านความปลอดภัยของรถตัดหญ้าให้มีความปลอดภัยสูงขึ้น เมื่อตรวจพบสิ่งกีดขวางระหว่างปฏิบัติงาน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้าให้ดียิ่งขึ้น
2. สามารถใช้รีโมทควบคุมการทำงานระยะไกลตามโปรแกรมควบคุมได้
3. สามารถประหยัดเวลา และเพิ่มความความสะดวกสบายให้แก่ผู้ใช้งานรถตัดหญ้า
4. สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพด้านความปลอดภัยให้แก่ผู้ใช้งานได้มากขึ้น

1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้า ทดสอบ และเก็บข้อมูล เพื่อนำมาพัฒนาการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้าให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น
2. ศึกษาข้อมูลการใช้งานอุปกรณ์เซนเซอร์ และทรานสดิวเซอร์
3. ศึกษาข้อมูล และการใช้งานอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์
4. ศึกษาข้อมูลการเขียนโปรแกรมภาษาซี โดยใช้โปรแกรม Arduino IDE
5. ทดลอง และศึกษาการทำงานร่วมกันระหว่างอุปกรณ์เซนเซอร์ และอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์โดยใช้โปรแกรมควบคุม
6. ศึกษาการเขียนโปรแกรมควบคุมรถตัดหญ้า เพื่อให้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ได้ตามขอบเขตที่ผู้ใช้งานกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

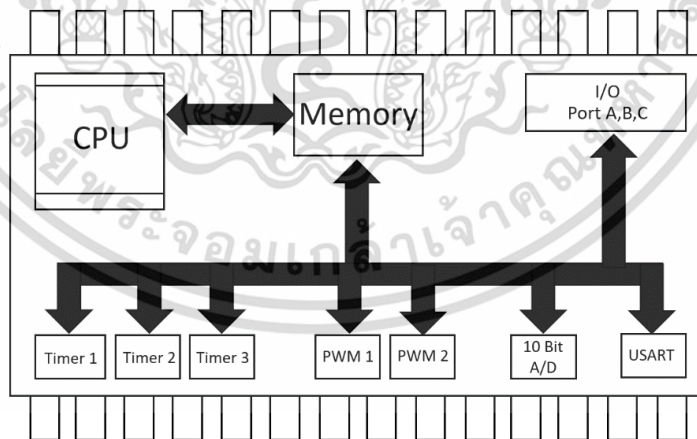
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) มักย่อว่า MCU เป็นอุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็กหรือเรียกอีกอย่างว่าเป็นระบบคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก โดยภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รวมเอาซีพียู หน่วยความจำ และพอร์ต ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักสำคัญของระบบคอมพิวเตอร์เข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย โดยผ่านการออกแบบวงจรให้เหมาะกับงานต่าง ๆ และยังสามารถโปรแกรมคำสั่งเพื่อควบคุมอินพุต และเอาต์พุต เพื่อให้ไปควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ ซึ่งถือว่าเป็นระบบที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ทั้งในด้านดิจิทัล และอนาล็อก ในยุคปัจจุบันนั้นสามารถทำการเชื่อมต่อกับระบบเน็ตเวิร์กของคอมพิวเตอร์ทั่วไปได้อีกด้วย ดังนั้นการสั่งงานจึงไม่ใช่แค่หน้าแผงวงจร แต่อาจจะเป็นการสั่งงานผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้

2.1.1 โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์

โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถแบ่งออกมาได้เป็น 5 ส่วน ได้แก่ หน่วยประมวลผลกลาง หน่วยความจำ ส่วนติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก ช่องทางเดินของสัญญาณ และวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา ดังแสดงตามรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโดยทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์

ที่มา: https://research-system.siam.edu/images/EE/ProjectEE2/wya1/07_ch2.pdf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.1 หน่วยประมวลผลกลางหรือซีพียู (CPU)

เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่ใช้ในการประมวลผลตามชุดคำสั่งจากซอฟต์แวร์ เหมือนเป็นสมองของคอมพิวเตอร์ในการทำหน้าที่ตัดสินใจ หรือคำนวณจากคำสั่งที่ได้รับมา เช่น การเปรียบเทียบตรรกะทางคณิตศาสตร์ ฯลฯ โดยมีกระบวนการพื้นฐาน ดังนี้

- อ่านชุดคำสั่ง (Fetch)
- ตีความชุดคำสั่ง (Decode)
- ประมวลผลชุดคำสั่ง (Execute)
- อ่านข้อมูลจากหน่วยความจำ (memory)
- เขียนข้อมูล หรือส่งผลการประมวลกลับ (write back)

2.1.1.2 หน่วยความจำ (Memory)

แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ มีไว้สำหรับเก็บโปรแกรมหลัก (Program Memory) ข้อมูลที่ถูกเก็บไว้ในนี้จะไม่สูญหายไปแม้ไม่มีไฟเลี้ยง อีกส่วนหนึ่งคือหน่วยความจำข้อมูล (Data Memory) เป็นหน่วยความจำชั่วคราวขณะทำงาน แต่ถ้าหากไม่มีไฟเลี้ยงวงจรข้อมูลจะสูญหาย

2.1.1.3 ส่วนติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก หรือพอร์ต (Port)

มี 2 ลักษณะคือ พอร์ตอินพุต (Input Port) และพอร์ตเอาต์พุต (Output Port) ส่วนนี้ถือว่าเป็นส่วนที่สำคัญมาก ใช้ร่วมกันในการที่พอร์ตอินพุต ใช้อรับสัญญาณเพื่อนำไปประมวลผล และส่งไปพอร์ตเอาต์พุตเพื่อแสดงผล

2.1.1.4 ช่องทางเดินของสัญญาณหรือบัส (BUS)

เป็นเส้นทางการแลกเปลี่ยนสัญญาณข้อมูลระหว่างซีพียู หน่วยความจำ และพอร์ต เป็นลักษณะของสายสัญญาณจำนวนมากอยู่ในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์

2.1.1.5 วงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (Clock)

เป็นวงจรที่บอกถึงคุณสมบัติการประมวลผล เนื่องจากการทำงานในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์จะขึ้นอยู่กับกำหนดจังหวะ หากสัญญาณนาฬิกามีความถี่สูง จังหวะการทำงานก็จะสามารถทำได้ถี่ขึ้น ส่งผลให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวนั้นมีความเร็วในการประมวลผลสูงตามไปด้วย

2.1.2 ตระกูลของไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลต่าง ๆ ที่ได้รับความนิยมและมีพัฒนาการมาจนถึงปัจจุบันมีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.1 Z-80

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล Z80 ดังแสดงตามรูปที่ 2.2 เป็นลักษณะของ ซีพียู ที่ต้องมีการอาศัยพอร์ตอินพุต/เอาต์พุตต่าง ๆ เพื่อเข้ามาต่อเพิ่มเติมจำนวนมากจึงทำให้บอร์ดมีขนาดค่อนข้างใหญ่เป็นการเริ่มต้นการเรียนรู้ชุดคำสั่งที่เป็นรหัสดำเนินการ (operation code)



รูปที่ 2.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล Z-80

ที่มา: <https://bannok-elec.blogspot.com/2018/07/blog-post.html>

2.1.2.2 MCS-51

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51 ดังแสดงตามรูปที่ 2.3 (ก) พัฒนามาจาก Z80 ทำให้การศึกษาเรียนรู้ไมโครคอนโทรลเลอร์ง่ายมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการเขียนโปรแกรมในลักษณะของรหัสแอสเซมบลี (Assembly Code) แล้วโหลดลงบอร์ดเพื่อใช้งาน ดังแสดงตามตัวอย่างในรูปที่ 2.3 (ข) สถาปัตยกรรมการออกแบบของไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่นนี้จะช่วยลดการต่ออุปกรณ์เสริมลงได้มาก จึงเหมาะที่จะนำไปใช้งานจริง



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.3 (ก) ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51

(ข) บอร์ดควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51

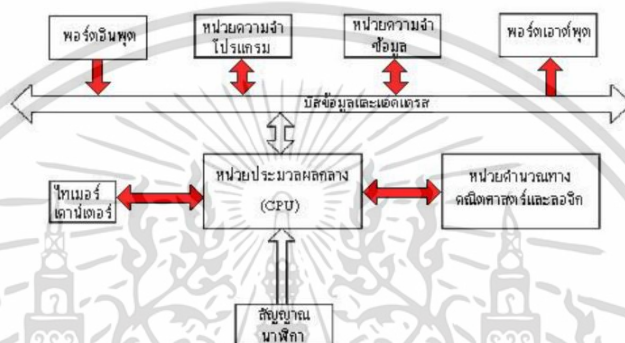
ที่มา: <https://bannok-elec.blogspot.com/2018/07/blog-post.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. คุณสมบัติทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51
 - มีหน่วยความจำแบบแฟลช (Flash Memory) ขนาด 8 กิโลไบต์
 - โปรแกรมผ่านพอร์ตอนุกรมมาตรฐาน SPI (SPI Serial Interface)
 - สามารถโปรแกรมและลบซ้ำได้นับ 1000 ครั้ง
 - มีหน่วยความจำแบบอีอีพรอม (EEPROM) ขนาด 2 กิโลไบต์
 - ใช้แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 5 โวลต์ (ทำงานในช่วง 4-6 โวลต์)
 - ทำงานด้วยสัญญาณนาฬิกาตั้งแต่ 0-24 เมกะเฮิร์ตซ์
 - สามารถป้องกันหน่วยความจำได้ 3 ระดับ
 - มีหน่วยความจำข้อมูล (RAM) ขนาด 256 ไบต์
 - มี 32 บิตอิสระ และสามารถเข้าถึงระดับบิตได้
 - มีไทม์เมอร์/เคาน์เตอร์ขนาด 16 บิต ทั้งหมด 2 ตัว
 - รองรับอินเตอร์รัพต์ได้ 8 แหล่ง
 - สามารถสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรมได้ด้วย UART Channel
 - มีโหมดการทำงานแบบ Low Power Idle และ Power Down เพื่อประหยัดพลังงาน
 - มี Watchdog Timer เพื่อให้การทำงานของระบบสามารถรีเซ็ตได้อัตโนมัติ
2. โครงสร้างภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51
 - หน่วยประมวลผลกลางขนาด 8 บิต
 - หน่วยประมวลผลสำหรับข้อมูลแบบบิต (BOOLEAN PROCROSSOR)
 - ความสามารถในการอ้างตำแหน่งของหน่วยความจำโปรแกรม 64 กิโลไบต์
 - ความสามารถในการอ้างตำแหน่งของหน่วยความจำข้อมูล 64 กิโลไบต์
 - หน่วยความจำโปรแกรมภายในขนาด 4 กิโลไบต์แบบอีอีพรอม (เบอร์ 8451)
 - หน่วยความจำแบบแรม (RAM) ภายในจำนวน 128 ไบต์
 - พอร์ตอินพุต/เอาต์พุตแบบขนานจำนวน 32 เส้น ซึ่งสามารถแยกทำงานได้อย่างอิสระ
 - วงจรนับ/จับเวลาขนาด 16 บิต จำนวนสองวงจร
 - วงจรสื่อสารแบบอนุกรมแบบฟลูดูเพล็กซ์ (FULL DUPLEX)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วงจรควบคุมการอินเตอร์รัพต์จากแหล่งกำเนิดสัญญาณ 6 ประเภท พร้อมการกำหนดลำดับ
- วงจรผลิตสัญญาณนาฬิกาภายใน โครงสร้างการทำงานทั้งหมดของ ไมโครคอนโทรลเลอร์ จะอาศัยหลักการทำงานที่เกี่ยวข้องกัน เป็นการทำงานในแต่ละส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ ตระกูล MCS-51 ซึ่งมีความเชื่อมโยงกันในการทำงาน โดยสื่อสารผ่านบัสข้อมูลและบัสแอสแตเรส ดังแสดงตามรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างภายในของไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS-51

ที่มา: <https://www.oocities.org/siliconvalley/station/3169/mcs51.htm>

2.1.2.3 PIC

ย่อมาจากคำว่า (Peripheral Interface Controller) ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC ดังแสดงตามรูปที่ 2.5 มีการพัฒนาเทคโนโลยีขึ้นในทุก ๆ ด้าน ทำให้ได้รับความนิยมกว่าไมโครคอนโทรลเลอร์ในอดีต เพราะจำนวนของอุปกรณ์ต่อพ่วงที่มีน้อย ประกอบกับมีหน่วยความจำอีอีพรอมภายในตัวทำให้สะดวกต่อการบันทึกจัดเก็บข้อมูล และพอร์ตต่าง ๆ ได้ผนวกลงไปในตัวไอซีแล้ว จึงสามารถต่อออกมาใช้งานภายนอกได้โดยตรง มีกระแสและแรงดันที่เพียงพอ สามารถโปรแกรมตัวบูตโพลเดออร์เข้าไปในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ ทำให้ง่ายในการโหลดโปรแกรมจากคอมพิวเตอร์เข้าไป โดยผ่านทางพอร์ตอนุกรมเพียงอย่างเดียวไม่ต้องการเครื่องโปรแกรมไอซีเพิ่มเติม



รูปที่ 2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC

ที่มา: <http://jumpstartinnovation.blogspot.com/2013/07/blog-post.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

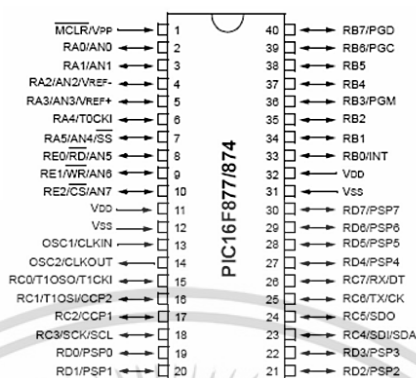
1. โครงสร้างหลักของ PIC

- ซีพียู
- หน่วยความจำโปรแกรม
- หน่วยความจำข้อมูล
- ส่วนติดต่ออินพุต และเอาต์พุต
- วงจรสัญญาณนาฬิกา
- วงจรรีเซ็ตหลัก
- วงจรไฟเลี้ยง
- ส่วนจัดการอินเตอร์รัพต์

2. คุณสมบัติต่าง ๆ ของ PIC16F877A

- มีคำสั่งในภาษาแอสเซมบลี 35 คำสั่ง
- ใช้ความถี่ออสซิลเลเตอร์ได้สูงสุด 20 เมกะเฮิร์ตซ์
- มีหน่วยความจำโปรแกรม Flash Memory ขนาด 8 K word (14 – bit words)
- มีหน่วยความจำข้อมูลแบบแรม (RAM) 368 ไบต์
- มีหน่วยความจำข้อมูลแบบอีอีพรอม (EEPROM) 256 ไบต์
- มีการตอบสนองอินเตอร์รัพต์ทั้งหมด 14 แหล่ง
- สามารถเลือกระดับการป้องกันข้อมูล (Code Protection) ได้
- มีโหมดประหยัดพลังงาน (Sleep Mode)
- สามารถเลือกแหล่งสัญญาณนาฬิกาได้หลายโหมด XT RC และ ออสซิลเลเตอร์พลังงานต่ำ
- สามารถทำงานที่ไฟเลี้ยงวงจรตั้งแต่ 2.0 โวลต์ ถึง 5.5 โวลต์
- ขาพอร์ตอินพุต/เอาต์พุต แต่ละขา สามารถรับและปล่อยกระแสได้สูงสุด 25 มิลลิแอมป์

3. ตำแหน่งขา PIC16F877A ซึ่งมีจำนวนขาใช้งานทั้งหมด 40 ขา ดังแสดงตามรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ตำแหน่งขา PIC16F877A

ที่มา: <https://tdelectronica.com/wp-content/uploads/2018/07/PIC16F877A.jpg>

2.1.2.4 AVR

เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่พัฒนาต่อมาจาก MCS-51 โดยบริษัท ATMEL ดังแสดงตามรูปที่ 2.7 โดยมีสาเหตุมาจากที่ MCS-51 มีการออกแบบวงจรที่ค่อนข้างยุ่งยาก และต้องอาศัยการต่ออุปกรณ์ร่วมเยอะ ดังนั้น AVR จึงเข้ามาเป็นที่นิยมในการทำงานด้านนี้ โดยคุณสมบัติหลักที่น่าสนใจของ AVR คือ สามารถการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ (Interface) ผ่าน USB ได้โดยตรง



รูปที่ 2.7 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR

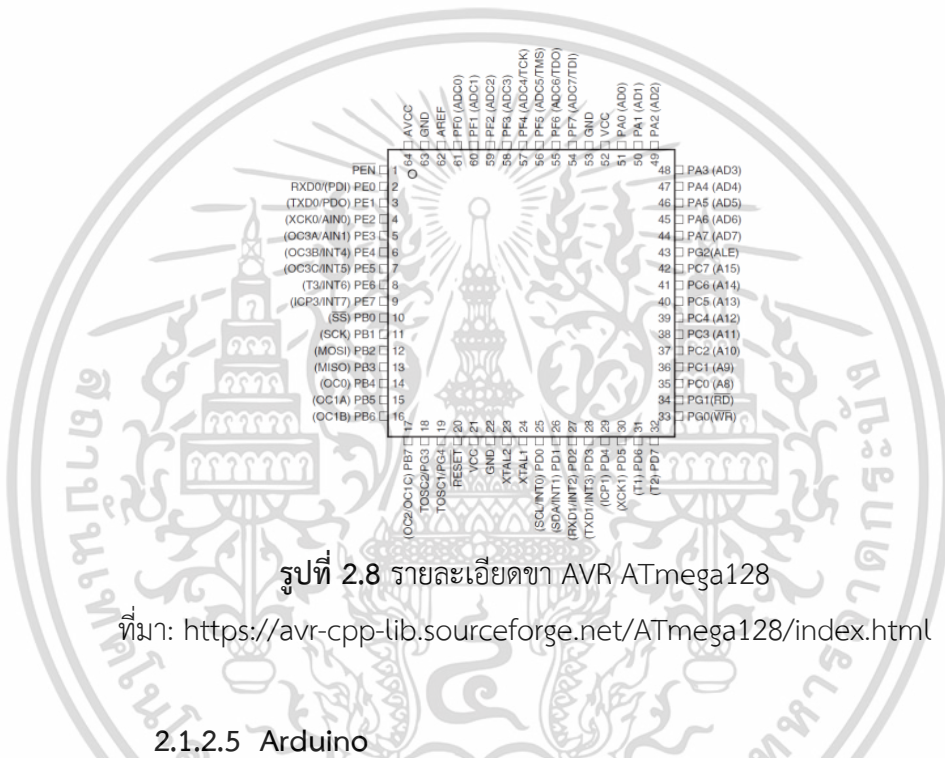
ที่มา: <https://www.microchip.com/en-us/product/ATmega128>

- คุณสมบัติที่สำคัญของไมโครคอนโทรลเลอร์ AVR ATmega128
 - ไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต กำลังไฟต่ำประสิทธิภาพสูง
 - สถาปัตยกรรมแบบ Advanced RISC (Reduce Instruction Set Computer) 133 คำสั่งมีความเร็วในการประมวลผล 1 คำสั่ง ต่อ 1 สัญญาณนาฬิกา
 - รีจิสเตอร์ใช้งาน 32 ตัวขนาด 8 บิต และรีจิสเตอร์ควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความเร็วในการทำงานสูงที่ความถี่สัญญาณนาฬิกา 16 เมกะเฮิร์ตซ์
- หน่วยความจำโปรแกรมแบบไม่ถูกลบข้อมูล และหน่วยความจำข้อมูล
- หน่วยความจำข้อมูลอีอีพรอม ขนาด 4 กิโลไบต์ เขียน/ลบได้ 100,000 ครั้ง
- หน่วยความจำข้อมูล SRAM ขนาด 4 กิโลไบต์

2. รายละเอียดขา AVR ATmega128 โดยขาใช้งานแบบ AVR ATmega 128 มีทั้งหมด 64 ขา ดังแสดงตามรูปที่ 2.8



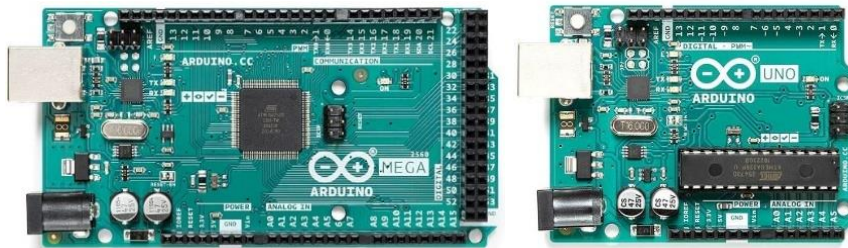
รูปที่ 2.8 รายละเอียดขา AVR ATmega128

ที่มา: <https://avr-cpp-lib.sourceforge.net/ATmega128/index.html>

2.1.2.5 Arduino

เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ดแบบสำเร็จรูป สร้างมาจากคอนโทรลเลอร์ตระกูล ARM ของ ATMEL ข้อดีของไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด คือ เรื่องของแหล่งข้อมูลแบบเปิดที่สามารถนำไปพัฒนาต่อเป็นอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ และความสามารถในการเพิ่มบูตโหลดเดอร์เข้าไปที่ตัว ARM จึงทำให้การอัปเดตเข้าตัวบอร์ดสามารถทำได้ง่ายขึ้น และยังมีการพัฒนาซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการควบคุมตัวบอร์ดของ Arduino มีลักษณะเป็นภาษา C++ ที่โปรแกรมเมอร์มีความคุ้นเคยในการใช้งาน ตัวบอร์ดสามารถนำโมดูลมาต่อเพิ่ม ซึ่งทาง Arduino เรียกว่าเป็น shield เพื่อเพิ่มความสามารถมากขึ้น ชิปประมวลผลบนแผงวงจรของไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino มีหลายรุ่น แต่ละรุ่นมีคุณสมบัติจำนวนขาพอร์ตอินพุต/เอาต์พุต และหน่วยความจำแตกต่างกันตามความต้องการของผู้ใช้งาน บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล Arduino ที่นิยมใช้ได้แก่รุ่น Arduino mega 2560 และ Arduino Uno R3 ดังแสดงตามรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

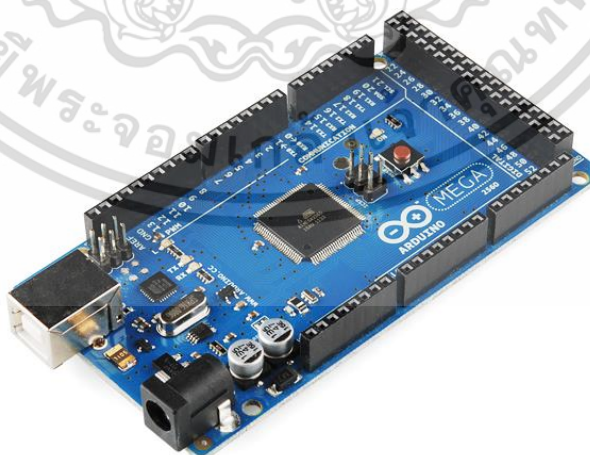


รูปที่ 2.9 ไมโครคอนโทรลเลอร์บอร์ด Arduino

ที่มา: <https://www.ai-corporation.net/2021/11/25/arduino-mega2560/>

2.2 Arduino Mega 2560

Arduino Mega 2560 เป็นบอร์ดที่ใช้ชิป ATmega2560 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์หลัก เป็นบอร์ดที่พัฒนาต่อยอดมาจาก Arduino Uno R3 มีดิจิทัลอินพุต/ดิจิทัลเอาต์พุต 54 ขา ดังแสดงตามรูปที่ 2.10 สามารถใช้เป็นเอาต์พุตแบบ PWM ได้ 15 ขา มีอนาล็อกอินพุต 16 ขา มี UARTs (hardware serial ports) 4 ขา ทำงานที่ความถี่ 16 เมกะเฮิรตซ์ สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ด้วยสายเคเบิล USB หรือใช้ตัวแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อเริ่มต้นใช้งาน และมีปุ่มรีเซ็ตสามารถต่อเข้ากับชิลด์ (shields) ที่ออกแบบเพื่อใช้งานกับ Arduino Duemilanove หรือ Diecimila โดย Arduino Mega 2560 เป็นบอร์ดที่มีขาสำหรับต่อใช้งานเยอะ จึงเป็นบอร์ดที่นิยมใช้กับโปรเจกต์ที่ต้องการใช้งานเซนเซอร์จำนวนมาก และเนื่องจากบอร์ดมีหน่วยความจำค่อนข้างสูงจึงเหมาะกับงานที่ต้องการเก็บข้อมูลมาก ๆ จะเห็นได้ว่าบอร์ด Arduino Mega 2560 มีพอร์ตใช้งานมากขึ้นเพื่อให้สะดวกต่อการใช้งานร่วมกับชุดเซนเซอร์จำนวนมากได้ โดยข้อมูลทางเทคนิคของ Arduino Mega 2560 แสดงได้ดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.10 บอร์ด Arduino Mega 2560

ที่มา: <https://www.ab.in.th/product/453/mega-2560-r3-ch340>

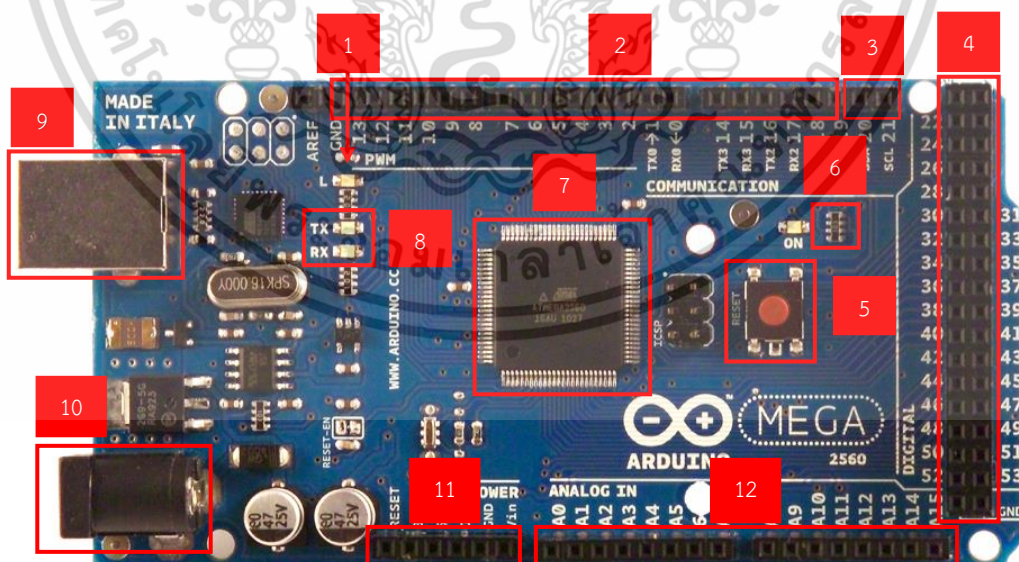
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงข้อมูลเฉพาะทางเทคนิคของบอร์ด Arduino Mega 2560

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (Recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 14 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pins	40mA
DC Current for 3.3V Pins	50mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz

2.2.1 บอร์ด Arduino Mega 2560

โครงสร้าง และส่วนประกอบของบอร์ด Arduino Mega 2560 ในส่วนต่าง ๆ ได้แก่ ด้านการสื่อสารข้อมูล ด้านประเภทของการสื่อสารข้อมูลดิจิทัล/อนาล็อก หรือพอร์ตในการจ่ายไฟให้ตัวบอร์ด สามารถแสดงตามรูปที่ 2.11 และข้อมูลทางเทคนิคแสดงได้ดังตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.11 โครงสร้างและส่วนประกอบของบอร์ด Arduino Mega 2560

ที่มา: <https://www.arduitronics.com/product/7/arduino-mega-2560-adk-free-usb-cable>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 แสดงฟังก์ชันการทำงานตามโครงสร้างของบอร์ด Arduino Mega 2560

หมายเลข	คำอธิบายฟังก์ชันการทำงาน
1.	ไฟ LED ทดสอบการทำงานใช้งานที่พอร์ต 13 (Test LED 13)
2.	พอร์ต PWM และ ดิจิตอลอินพุต/เอาต์พุต ตั้งแต่พอร์ต 2-13
3.	พอร์ตการสื่อสารแบบอนุกรม USART0 - USART3 (I2C)
4.	พอร์ตดิจิตอลอินพุตและเอาต์พุตตั้งแต่พอร์ต 21 - 52 (Digital Pins)
5.	ปุ่มรีเซ็ตเพื่อให้โปรแกรมเริ่มทำงานใหม่ (Reset Button)
6.	LED แสดงไฟเลี้ยงวงจร (Power LED)
7.	MCU ATmega2560
8.	LED แสดงการทำงานควาน์โพลด์โปรแกรมและการรับส่งข้อมูลแบบอนุกรม USART0 (TX,RX)
9.	USB Interface
10.	ขั้วต่อแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจรของบอร์ดใช้ได้กับไฟ 9-12V DC (External Power Supply)
11.	ช่องต่อไฟแหล่งจ่ายไปภายนอกบอร์ดทดลอง +3.3V, +5V, GND,GND (Power Pins)
12.	พอร์ตต่อสัญญาณอนาล็อกความละเอียด 10 บิต จำนวน 16 ช่อง A0 - A15 (Analog Pins)

2.2.2 ข้อมูลกำลังไฟฟ้าใช้งาน (Power Specification)

Arduino Mega สามารถเชื่อมรับพลังงานโดยการเชื่อมต่อ Micro USB connector หรือจากแหล่งจ่ายภายนอกได้ โดยแหล่งพลังงานจะถูกเลือกโดยอัตโนมัติ แหล่งจ่ายจากภายนอกสามารถมาได้จากการแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ หรือจากแบตเตอรี่ โดยต่อเข้ากับ 2.1 มม. ของอุปกรณ์แปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 100 – 240 โวลต์ เป็นไฟฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์ ไปยังช่องเสียบแหล่งจ่าย ดังแสดงตามรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 อุปกรณ์แปลงไฟฟ้ากระแสสลับ 100 – 240 โวลต์ เป็นไฟฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์

ที่มา: <https://thaipick.com/product/lazada/1157762>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บอร์ด Arduino Mega2560 สามารถทำงานกับแหล่งจ่ายไฟภายนอกได้ตั้งแต่ 6 ถึง 20 โวลต์ หากจ่ายไฟน้อยกว่า 7 โวลต์ ขา 5 โวลต์ อาจจ่ายไฟน้อยกว่า 5 โวลต์ และแรงดันไฟฟ้าที่เลี้ยงบอร์ดอาจไม่เสถียร และหากใช้มากกว่า 12 โวลต์ ตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าอาจมีอุณหภูมิสูงเกินไป และอาจทำให้บอร์ดเสียหาย ช่วงที่แนะนำให้ใช้งานคือ 7 ถึง 12 โวลต์ Arduino Mega2560 แตกต่างจากบอร์ดรุ่นก่อน ๆ คือไม่ใช่ชิปไดร์เวอร์ FTDI USB-to-serial แต่มีลักษณะ Atmega8U2 ที่ตั้งโปรแกรมเป็นตัวแปลง USB เป็นพอร์ตอนุกรมแทน

ในด้านกำลังไฟพามีขาใช้งานดังต่อไปนี้

1. **VIN.** แรงดันไฟฟ้าขาเข้าไปยังบอร์ด Arduino เมื่อใช้แหล่งพลังงานภายนอก (ต่างจากการเชื่อมต่อ USB หรือแหล่งพลังงานที่มีการควบคุมอื่น ๆ 5 โวลต์) ผู้ใช้สามารถจ่ายแรงดันไฟผ่านขานี้ หรือหากจ่ายแรงดันไฟผ่านสายแจ็คจ่ายไฟ ให้เข้าถึงผ่านขานี้ได้
2. **5V.** แหล่งจ่ายไฟที่มีการควบคุม ซึ่งใช้ในการจ่ายไฟให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ และส่วนประกอบอื่น ๆ บนบอร์ด ซึ่งอาจมาจากขาแรงดันไฟฟ้าขาเข้าผ่านตัวควบคุมภายในบอร์ด โดย USB หรือแหล่งจ่ายไฟ 5 โวลต์ ที่มีการควบคุมอื่น ๆ
3. **3V3.** แหล่งจ่ายไฟ 3.3 โวลต์ ที่สร้างขึ้นโดยตัวควบคุมภายในบอร์ด ซึ่งกระแสกระชากสูงสุดคือ 50 มิลลิแอมป์
4. **GND.** กราวด์

2.2.3 ข้อมูลหน่วยความจำ (Memory Specifications)

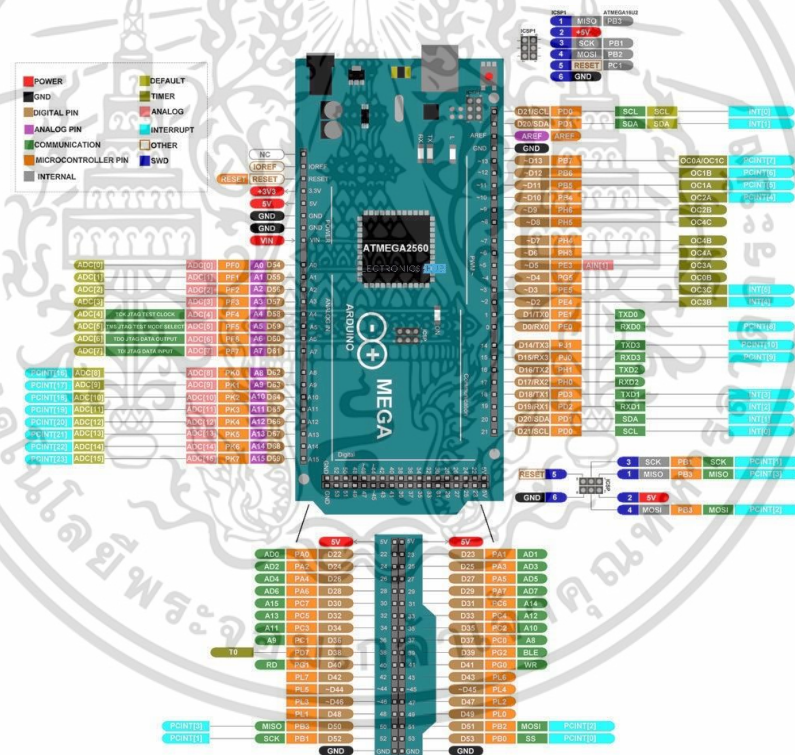
ATmega2560 มีหน่วยความจำแฟลช 256 KB สำหรับจัดเก็บรหัส (ซึ่งใช้ 8 KB สำหรับ bootloader), SRAM 8 KB และ EEPROM 4 KB (ซึ่งสามารถอ่านและเขียนด้วยไลบรารี EEPROM)

2.2.4 ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุต (Input and Output)

ขาดิจิตอล 54 ขา แต่แต่ละตัวบน Arduino Mega2560 สามารถใช้เป็นอินพุตหรือเอาต์พุต โดยใช้ฟังก์ชัน pinMode(), digitalWrite() และ digitalRead() โดย Arduino Mega2560 ทำงานที่ 5 โวลต์ แต่ละขาสามารถจ่ายหรือรับสูงสุด 40 มิลลิแอมป์ และมีตัวต้านทานภายในตัว (ตัดการเชื่อมต่อโดยค่าเริ่มต้น) โดยมีค่าอยู่ที่ 20 - 50 กิโลโอห์ม นอกจากนี้ขาบางตัวยังมีฟังก์ชันพิเศษดังต่อไปนี้ และดังแสดงตามรูปที่ 2.13

1. Serial : 0 (RX) และ 1 (TX); Serial 1: 19 (RX) และ 18 (TX); Serial 2: 17 (RX) และ 16 (TX); Serial 3: 15 (RX) และ 14 (TX) ใช้เพื่อรับ (RX) และส่งข้อมูลอนุกรม TTL (TX) ขา 0 และ 1 ยังเชื่อมต่อกับขาที่สอดคล้องกันของชิปอนุกรม ATmega8U2 USB-to-TTL

2. External Interrupts : 2 (Interrupt0), 3 (Interrupt1), 18 (Interrupt 5), 19 (Interrupt4), 20 (Interrupt3) และ 21 (Interrupt2) ขาเหล่านี้สามารถกำหนดค่าให้ทริกเกอร์การขัดจังหวะที่ค่าต่ำ ขอบที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงของจังหวะการทำงาน
3. PWM : 0 ถึง 13 ให้เอาต์พุต PWM 8 บิตพร้อมฟังก์ชัน analogWrite ()
4. SPI : 50 (MISO), 51 (MOSI), 52 (SCK), 53 (SS) ขาเหล่านี้รองรับการสื่อสาร SPI ซึ่งแม้ว่าจะให้มาโดยฮาร์ดแวร์พื้นฐาน แต่ปัจจุบันยังไม่รวมอยู่ในภาษา Arduino
5. LED : 13 มี LED ในตัวเชื่อมต่อกับขาดิจิตอล 13 เมื่อขาดิจิตอล 13 มีค่าสูง LED จะติด และเมื่อขาดิจิตอล 13 มีค่าต่ำ LED จะดับ
6. I²C : 20 (SDA) และ 21 (SCL) รองรับการสื่อสาร I2C โดยใช้ไลบรารี Wire



รูปที่ 2.13 พอร์ตที่มีให้เลือกใช้งานภายในบอร์ด Arduino Mega2560

ที่มา: <https://circuits-elec.com/products/arduino-mega-2560-r3-latest-revision-clone>

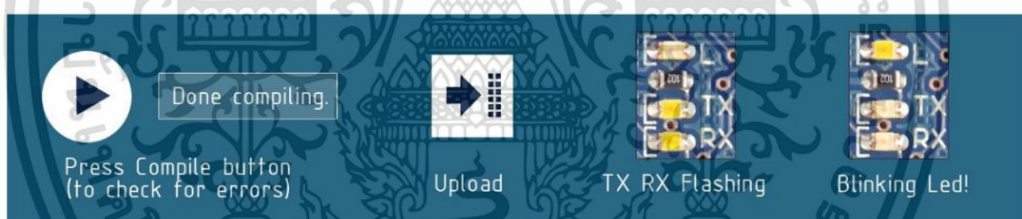
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Arduino Mega2560 มีอินพุตแบบอนาล็อก 16 ช่อง โดยแต่ละช่องมีความละเอียด 10 บิต (เช่น 1024 ค่าที่แตกต่างกัน) โดยค่าเริ่มต้นจะวัดจากกราวด์เป็น 5 โวลต์ แม้ว่าจะสามารถเปลี่ยนช่วงบนสุดของช่วงโดยใช้จากแรงดันอ้างอิงสำหรับอินพุตแบบอนาล็อก (AREF) และฟังก์ชัน analogReference() ได้ และขาอื่น ๆ ที่อยู่บนบอร์ด Arduino Mega2560 มีดังนี้

1. AREF แรงดันอ้างอิงสำหรับอินพุตแบบอนาล็อก ใช้กับ analogReference()
2. Reset นำบรรทัดนี้ LOW เพื่อรีเซ็ตไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยทั่วไปจะใช้เพื่อเพิ่มปุ่มรีเซ็ต เพื่อป้องกันการบล็อกปุ่มของบอร์ด

2.2.5 ข้อมูลการสื่อสาร (Communication)

Arduino Mega2560 มีสิ่งอำนวยความสะดวกมากมายสำหรับการสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ Arduino ตัวอื่น หรือไมโครคอนโทรลเลอร์อื่น ๆ ATmega2560 มีฮาร์ดแวร์ 4 ตัวสำหรับการสื่อสารแบบอนุกรมบนบอร์ดเช่นเนลหนึ่งโดยผ่าน USB และจัดเตรียมคอมพอร์ตเสมือนให้กับซอฟต์แวร์บนคอมพิวเตอร์ (เครื่อง Windows จะต้องมีไฟล์ .inf แต่เครื่อง OSX และ Linux จะรู้จักบอร์ดเป็นคอมพอร์ตโดยอัตโนมัติ) ไฟ LED RX และ TX บนบอร์ดจะกะพริบเมื่อมีการส่งข้อมูลผ่านชิป ATmega8U2 ดังแสดงตามรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ไฟ LED RX และ TX บนบอร์ด Arduino Mega2560

ที่มา: <https://www.mantech.co.za/datasheets/products/A000047.pdf>

2.2.6 ข้อมูลด้านโปรแกรมมิ่ง (Programming)

Arduino Mega2560 สามารถตั้งโปรแกรมด้วยซอฟต์แวร์ Arduino โดย Arduino Mega มาพร้อมกับบูตโหลดเดอร์ ซึ่งก็คือโปรแกรมเล็ก ๆ ตัวหนึ่งหรือเรียกอีกชื่อว่า เฟิร์มแวร์ เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ช่วยในการอัปโหลดโปรแกรมที่เขียน เข้าไปในระบบปฏิบัติการผ่านทางพอร์ตอนุกรม หรือ USB โดยจะใช้สายไฟแค่ 2 เส้นคือสัญญาณ RX , TX โดยไม่จำเป็นต้องมีเครื่องโปรแกรมไอซี ทำให้สามารถอัปโหลดโค้ดใหม่ได้โดยไม่ต้องใช้โปรแกรมฮาร์ดแวร์ภายนอก

2.2.7 ข้อมูลการรีเซ็ตอัตโนมัติภายในซอฟต์แวร์ (Automatic Software Reset)

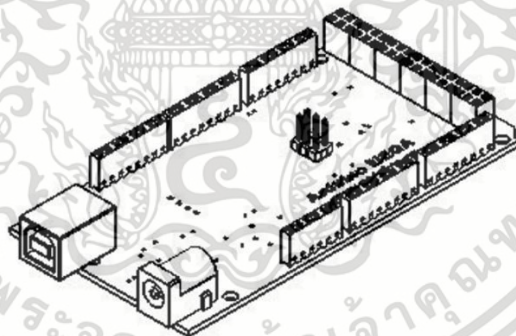
จากเดิมที่จะต้องกดปุ่มรีเซ็ตก่อนอัปโหลด Arduino Mega2560 ได้รับการออกแบบมาเพื่อให้สามารถรีเซ็ตได้โดยซอฟต์แวร์ที่ทำงานบนคอมพิวเตอร์ที่มีการเชื่อมต่อ เพื่อควบคุมการสื่อสารของฮาร์ดแวร์และเชื่อมต่อกับสายรีเซ็ตของ ATmega2560 โดยซอฟต์แวร์ของ Arduino ใช้ความสามารถนี้เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถอัปโหลดโค้ดได้ทันทีเพียงแค่กดปุ่มอัปโหลดภายในโปรแกรม

2.2.8 ข้อมูลการป้องกันกระแสไฟ (USB Current Protection)

Arduino Mega2560 มีโพลีฟิวส์ที่สามารถรีเซ็ตได้ ซึ่งจะช่วยปกป้องพอร์ต USB ของคอมพิวเตอร์ของผู้ใช้งานจากไฟช็อต และกระแสเกิน แม้ว่าคอมพิวเตอร์ส่วนใหญ่จะมีการป้องกันภายในของตัวเอง แต่ฟิวส์ก็มีการป้องกันอีกชั้นหนึ่ง หากใช้มากกว่า 500 มิลลิแอมป์ กับพอร์ต USB ฟิวส์จะตัดการเชื่อมต่อโดยอัตโนมัติจนกว่าจะมีการถอดไฟฟาลัดวงจรหรือโอเวอร์โวลตออก

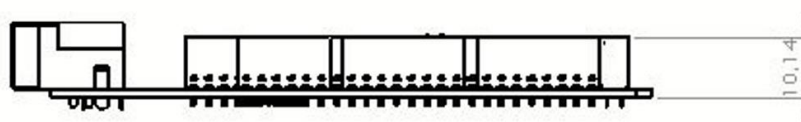
2.2.9 โครงสร้างและขนาด

ภาพรวมโครงสร้างบอร์ด Arduino Mega2560 แสดงภาพรวมของบอร์ด Arduino Mega 2560 และมุมด้านข้าง ด้านหน้า รวมถึงด้านบนของบอร์ด Arduino Mega 2560 ดังแสดงตามรูปที่ 2.15 ถึงรูปที่ 2.18



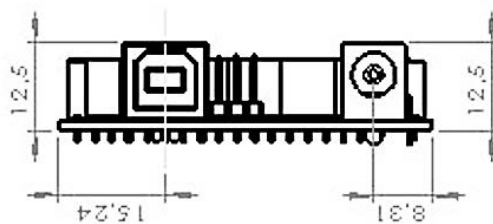
รูปที่ 2.15 ภาพรวมโครงสร้างบอร์ด Arduino Mega2560 (Over view)

ที่มา: <https://www.mantech.co.za/datasheets/products/A000047.pdf>



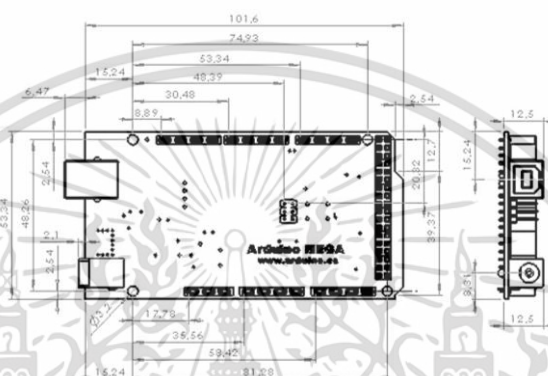
รูปที่ 2.16 มุมมองด้านข้างโครงสร้างบอร์ด Arduino Mega2560 (Side view)

ที่มา: <https://www.mantech.co.za/datasheets/products/A000047.pdf>



รูปที่ 2.17 มุมมองด้านหน้าโครงสร้างบอร์ด Arduino Mega2560 (Front view)

ที่มา: <https://www.mantech.co.za/datasheets/products/A000047.pdf>



รูปที่ 2.18 มุมมองด้านบนโครงสร้างบอร์ด Arduino Mega2560 (Top view)

ที่มา: <https://www.mantech.co.za/datasheets/products/A000047.pdf>

2.3 Arduino Integrated Development Environment (IDE)

ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการพัฒนางานสำหรับบอร์ด Arduino นั้นคือโปรแกรมที่เรียกว่า Arduino IDE ในการเขียนโปรแกรม และคอมไพล์ลงบอร์ด IDE ย่อมาจาก (Integrated Development Environment) เป็นโปรแกรมที่ออกแบบมาเพื่อให้ง่ายต่อการเขียนซอฟต์แวร์สำหรับแพลตฟอร์มโอเพ่นซอร์สนี้ โดยเป็นส่วนเสริมของระบบการพัฒนา หรือตัวช่วยต่าง ๆ ที่จะคอยช่วยเหลือผู้ที่พัฒนาแอปพลิเคชัน ซึ่งถือว่าเป็นแพลตฟอร์มอิเล็กทรอนิกส์ยอดนิยมที่ออกแบบมาเพื่อลดความซับซ้อนของกระบวนการออกแบบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ช่วยให้เกิดความรวดเร็ว ถูกต้อง แม่นยำ ตรวจสอบระบบที่จัดทำได้ ทำให้การพัฒนางานต่าง ๆ มีความสะดวกรวดเร็วมากขึ้น Arduino IDE รองรับภาษา C และ C++ โปรแกรม Arduino IDE มักใช้โดยโปรแกรมเมอร์เพื่อให้กระบวนการเขียนโปรแกรมสะดวกและรวดเร็วขึ้น คุณสมบัติทั่วไปของ IDE การกำหนดหมายเลขบรรทัดอัตโนมัติ การเน้นไวยากรณ์ ซึ่งช่วยให้โปรแกรมเมอร์สามารถเข้าถึงส่วนที่เฉพาะเจาะจงของซอร์สโค้ดได้ง่าย เมื่อประเมินข้อความ แสดงข้อผิดพลาด หรือการสื่อสารกับโปรแกรมเมอร์อื่น ๆ และภายในโปรแกรม Arduino IDE ยังมีฟังก์ชันที่อนุญาตให้โปรแกรมเมอร์ใช้โปรแกรมเดียวตั้งแต่ต้นจนจบ โดยที่สามารถติดตามไฟล์หลาย ๆ ไฟล์ในโครงการ ซึ่งช่วยให้โปรแกรมเมอร์เขียนโปรแกรมที่ซับซ้อนมากขึ้น หรือโมดูลาร์เพื่อจัดการโครงการ และภายใน IDE ยังรวบรวมรหัสตัวเองโดยทำการดีบั๊กพื้นฐานและส่งรหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยตรงไปยังบอร์ด Arduino ซึ่งจะใช้บูตโหลดเดอร์ เพื่อเขียนโปรแกรมใหม่ลงในหน่วยความจำ โดยสัญลักษณ์ของโปรแกรม Arduino Integrated Development Environment (IDE) ดังแสดงตามรูปที่ 2.19



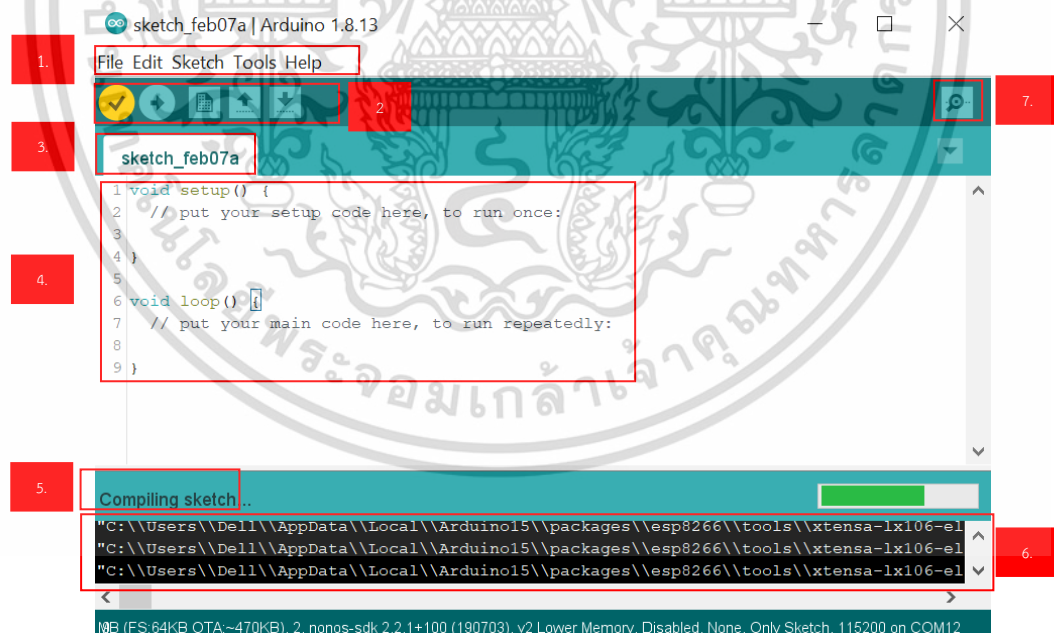
ARDUINO IDE

รูปที่ 2.19 โปรแกรม Arduino IDE

ที่มา: <https://www.ai-corporation.net/2021/11/18/what-is-arduino-ide/>

2.3.1 ส่วนประกอบของหน้าจอโปรแกรม Arduino IDE

ส่วนประกอบของหน้าจอโปรแกรม Arduino IDE มีส่วนประกอบหลัก ๆ อยู่ 7 ส่วน แสดงได้ตามรูปที่ 2.20 และคำอธิบายของแต่ละส่วนประกอบของโปรแกรม แสดงตามตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.20 ส่วนประกอบของหน้าจอโปรแกรม Arduino IDE

ที่มา: <https://zzenzablog.wordpress.com/2017/09/14/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบของหน้าจอโปรแกรม Arduino

หมายเลข	คำอธิบายฟังก์ชันการทำงาน
1.	เมนู (Menu) ใช้ เลือกคำสั่งต่าง ๆ ในการใช้งานโปรแกรม
2.	แถบเครื่องมือ (Toolbar) เป็นการนำคำสั่งที่ใช้งานบ่อย ๆ มาสร้างเป็นปุ่มเพื่อให้เรียกใช้คำสั่งได้รวดเร็วขึ้น
3.	แถบเลือกโปรแกรม (Tabs) เป็นแถบที่ใช้เลือกไฟล์ โปรแกรมแต่ละตัว
4.	พื้นที่เขียนโปรแกรม (Text editor) เป็นพื้นที่สำหรับเขียนโปรแกรมภาษา C/C++
5.	พื้นที่แสดงสถานะการทำงาน (Message area) เป็นพื้นที่โปรแกรมใช้ แจ้งสถานะการทำงานของโปรแกรม เช่น ผลการคอมไพล์ โปรแกรม
6.	พื้นที่แสดงข้อมูล (Text area) ใช้แจ้งว่าโปรแกรมที่ผ่านการคอมไพล์ แล้วมีขนาดกี่ไบต์
7.	Serial Monitor ปุ่มนี้จะอยู่ทางมุมบนด้านขวามือคลิกปุ่มนี้เมื่อต้องการเปิดหน้าต่างสื่อสาร และแสดงข้อมูลอนุกรม โดยต้องมีการต่อฮาร์ดแวร์ Arduino และเลือกพอร์ตการเชื่อมต่อให้ถูกต้องก่อน

2.3.2 เมนูบาร์เป็นส่วนที่แสดงรายการ (เมนู) ของคำสั่งต่าง ๆ ของโปรแกรม

2.3.2.1 เมนู File

ใน Arduino จะเรียกโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นว่าสเก็ตช์ (Sketch) และในโปรแกรมของผู้ใช้งานอาจมีไฟล์โปรแกรมหลายตัวจึงเรียกรวมว่า เป็นสเก็ตช์บุ๊ก (Sketchbook) ในเมนูนี้จะเกี่ยวข้องกับการเปิด บันทึก หรือปิดไฟล์ ซึ่งแถบเครื่องมือที่นิยมใช้หรือใช้งานบ่อยครั้งภายในโปรแกรม Arduino IDE สามารถแสดงได้ตามตารางที่ 2.4

1. **New** หน้าที่ ใช้สร้างไฟล์สเก็ตช์ตัวใหม่เพื่อเริ่มเขียนโปรแกรมใหม่
2. **Open** หน้าที่ ใช้เปิดสเก็ตช์ที่บันทึกไว้ก่อนหน้า
3. **Sketchbook** หน้าที่ ใช้เปิดไฟล์สเก็ตช์ ล่าสุดที่เปิดใช้งานเสมอ
4. **Example** หน้าที่ ใช้ในการเลือกเปิดไฟล์สเก็ตช์ตัวอย่าง ที่ได้เก็บและรวบรวมไว้ในโปรแกรม
5. **Save** หน้าที่ ใช้ในการบันทึกไฟล์สเก็ตช์ปัจจุบัน
6. **Save as** หน้าที่ ใช้บันทึกไฟล์สเก็ตช์โดยเปลี่ยนชื่อไฟล์
7. **Page setup** หน้าที่ ตั้งค่านำกระดาษของไฟล์สเก็ตช์ปัจจุบัน
8. **Print** หน้าที่ สั่งพิมพ์โค้ดของไฟล์สเก็ตช์ปัจจุบันออกทางเครื่องพิมพ์
9. **Preference** หน้าที่ ใช้กำหนดค่าการทำงานของโปรแกรม
10. **Quit** หน้าที่ ใช้จบการทำงาน และออกจากโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. Upload to I/O board หน้าที่ใช้อัปโหลดโปรแกรมไปยังแผงวงจร POPBOT-XT

ตารางที่ 2.4 แถบเครื่องมือ (Tools bar)

รูป	ชื่อเครื่องมือ	คำอธิบายฟังก์ชันการทำงาน
	Verify/Compile	ใช้ในการตรวจสอบการเขียนคำสั่งในโปรแกรมว่าถูกต้องตามหลักไวยากรณ์หรือไม่และคอมไพล์โปรแกรม
	Upload to I/O Board	ใช้อัปโหลดโปรแกรมที่เขียนขึ้นไปยังบอร์ด ก่อนจะอัปโหลดไฟล์ ต้องแน่ใจว่าได้บันทึกไฟล์ และคอมไพล์ไฟล์สเก็ทซ์เรียบร้อยแล้ว
	New	ใช้สร้างสเก็ทไฟล์ (ไฟล์โปรแกรม) ตัวใหม่
	Open	ใช้แทนเมนู File Sketchbook เพื่อเปิดสเก็ทซ์บุ๊ก (ไฟล์โปรแกรม) ที่มีอยู่ในเครื่อง
	Save	ใช้บันทึกไฟล์สเก็ทซ์บุ๊กที่เขียนขึ้น

2.3.2.2 เมนู Edit

ในขณะที่พิมพ์โปรแกรม สามารถใช้คำสั่งในเมนูนี้ในการสั่งยกเลิกคำสั่ง ที่แล้ว หรือทำซ้ำคำสั่งได้ โดยมีเมนูต่าง ๆ ดังนี้

1. **Undo** หน้าที่ยกเลิกคำสั่งหรือการพิมพ์ครั้งสุดท้าย
2. **Redo** หน้าที่ทำซ้ำคำสั่งหรือการพิมพ์ครั้งสุดท้าย
3. **Cut** หน้าตัดข้อความที่เลือกไว้ไปเก็บในคลิปบอร์ดของโปรแกรม
4. **Copy** หน้าคัดลอกข้อความที่เลือกไว้มาเก็บในคลิปบอร์ด
5. **Paste** หน้านำข้อความที่อยู่ในคลิปบอร์ดมาแปะลงในตำแหน่งที่เคอร์เซอร์ชี้อยู่
6. **Select All** หน้าเลือกข้อความทั้งหมด
7. **Find** หน้าค้นหาข้อความ
8. **Find Next** หน้าค้นหาข้อความถัดไป

2.3.2.3 เมนู Sketch

เป็นเมนูที่บรรจุคำสั่งที่ใช้ในการคอมไพล์โปรแกรม เพิ่มไฟล์ ไบเบรารี ฯลฯ โดยมีเมนูย่อย ดังนี้

1. **Verify/Compile** หน้าที่ใช้คอมไพล์แปลโปรแกรมภาษาซีให้เป็นภาษาเครื่อง
2. **Stop** หน้าที่ยุติการคอมไพล์โปรแกรม
3. **Add file** หน้าที่จะเพิ่มไฟล์ให้กับสเก็ทซ์บุ๊กปัจจุบันเมื่อใช้คำสั่งนี้ ตัวโปรแกรม Arduino จะทำการคัดลอกไฟล์ที่ได้เลือกไว้เข้ามาเก็บไว้ในโฟลเดอร์เดียวกันกับโปรแกรมที่กำลังพัฒนา
4. **Import Library** หน้าที่เป็นคำสั่งเรียกใช้ไลเบรารีเพิ่มเติมเมื่อคลิกเลือกคำสั่งนี้แล้วโปรแกรม
5. **Show Sketch folder** หน้าที่จะเปิดโฟลเดอร์ที่เก็บโปรแกรมของผู้ใช้

2.3.2.4 เมนู Tools

ใช้จัดรูปแบบของโค้ดโปรแกรม เลือกุ่นไมโครคอนโทรลเลอร์ เลือกพอร์ตสื่อสารอนุกรม มีดังนี้

1. **Auto Format** หน้าที่จะจัดรูปแบบของโค้ดโปรแกรมให้สวยงาม เช่น กั้นหน้าเยื้องขวา จัดตำแหน่งของวงเล็บปีกกาปิดให้ตรงกับปีกกาเปิด ถ้าเป็นคำสั่งอยู่ภายในวงเล็บปีกกาเปิดและปิดจะถูกกั้นหน้าเยื้องไปทางขวา
2. **Archive Sketch** หน้าที่จะบีบอัดไฟล์ โปรแกรมทั้งโฟลเดอร์หลักและโฟลเดอร์ย่อยของสเก็ทซ์บุ๊ก ปัจจุบันไฟล์ที่สร้างใหม่จะมีชื่อเดียวกับสเก็ทซ์บุ๊กปัจจุบันต่อท้ายด้วย -510123.zip
3. **Export Folder** หน้าที่จะเปิดโฟลเดอร์ที่เก็บสเก็ทซ์บุ๊กปัจจุบัน
4. **Board** หน้าที่จะเลือกฮาร์ดแวร์ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino
5. **Serial Port** หน้าที่จะเลือกหมายเลขพอร์ตอนุกรมของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ติดต่อกับฮาร์ดแวร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.5 เมนู Help

เมื่อต้องการความช่วยเหลือหรือต้องการข้อมูลเกี่ยวกับ โปรแกรมให้เลือกเมนูนี้ เมื่อเลือกเมนูย่อย ตัวโปรแกรมจะเปิดไฟล์เว็บเพจ (ไฟล์ นามสกุล .html) ที่เกี่ยวข้องกับหัวข้อนั้น ๆ ซึ่งอยู่ภายในโฟลเดอร์ที่เก็บ Arduino IDE

2.4 Encoder

อุปกรณ์ป้อนกลับ (Feedback Device) หรือที่นิยมเรียกกันในอุตสาหกรรมว่า เอนโคเดอร์ (encoder) ถือได้ว่าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งในระบบขับเคลื่อนเซอร์โวมอเตอร์ และระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าแบบเอซีชนิดที่มีการควบคุมแบบปิด (Close loop Control) ซึ่งภายในระบบเซอร์โว (Servo) จะไม่สามารถควบคุมได้หากระบบไม่มีอุปกรณ์เอนโคเดอร์ติดตั้งอยู่

อุปกรณ์เข้ารหัส (encoder) เป็นทรานสดิวเซอร์ (transducer) ที่ให้สัญญาณดิจิทัลในรูปแบบของไบนารี (Binary) ที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่ง และระยะทาง ใช้บอกองศาการหมุน (ตำแหน่งเชิงมุม) โดยมีลักษณะรูปร่างแบบแผ่นยาวหรือเป็นแผ่นกลมขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้งานวัดตำแหน่งระยะแบบเชิงเส้น หรือระยะเชิงมุม อุปกรณ์ชนิดนี้จะทำงานร่วมกับเซนเซอร์ทางแสง (photo sensor/optical sensor) หรือเซนเซอร์ที่อาศัยอำนาจแม่เหล็ก (magnetic sensor) โดยการได้มาของสัญญาณทางด้านเอาต์พุตสำหรับเซนเซอร์นั้น อาศัยหลักการตัดต่อลำแสงระหว่างตัวรับและตัวส่งแสงจากแถบทึบแสงของอุปกรณ์เข้ารหัส หรืออาศัยหลักการตัดผ่านสนามแม่เหล็กในขณะที่มีการเคลื่อนที่หรือเปลี่ยน หน้าที่หลักของเอนโคเดอร์ มีดังนี้

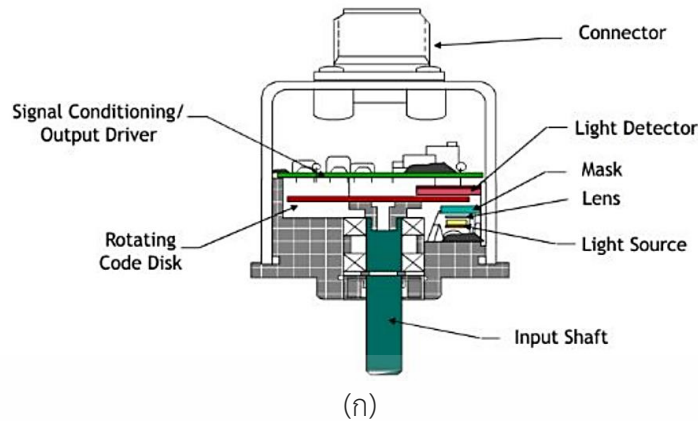
1. ตรวจวัดความเร็วรอบ
2. ทิศทางการหมุนของมอเตอร์
3. ตำแหน่ง หรือมุมของการหมุน
4. จำนวนรอบของการหมุน

2.4.1 โครงสร้างภายในของเอนโคเดอร์

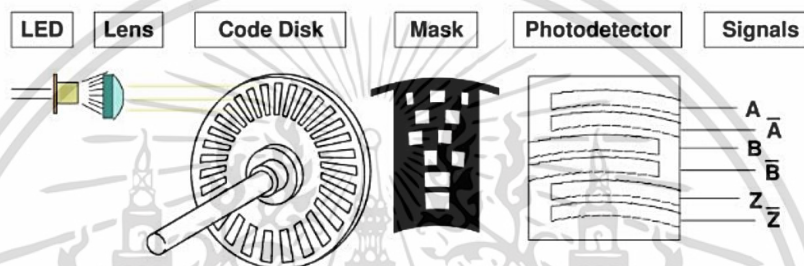
ส่วนประกอบของเอนโคเดอร์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.21 (ก) และหลักการทำงานของเอนโคเดอร์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.21 (ข)

1. เพลา (Shaft) เป็นแกนหมุนต่อเข้ากับอุปกรณ์
2. แผ่นดิสก์ (Disc หรือ Slit) เป็นแผ่นที่เจาะเป็นแถบเล็ก ๆ ให้แสงผ่านได้
3. Photodetector ใช้รับแสงสำหรับแปลงเป็นรหัสข้อมูล
4. LED เป็นแหล่งกำเนิดแสงผ่านเลนส์ให้ลำแสงส่องผ่านแถบเล็ก ๆ บนแผ่นดิสก์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.21 (ก) แสดงส่วนประกอบของเอนโคเดอร์

(ข) หลักการทำงานของเอนโคเดอร์

ที่มา: <https://www.primusthai.com/primus/Knowledge/info?ID=157>

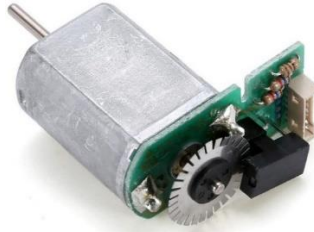
2.4.2 ชนิดของเอนโคเดอร์

ชนิดของเอนโคเดอร์ สามารถแยกประเภทตามสัญญาณ ได้ 2 กลุ่ม

2.4.2.1 ทำงานด้วยหลักการเหนี่ยวนำ (Analog Encoder)

1. เอนโคเดอร์ชนิดวัดความเร็ว (tachometer encoder type) มีนิยาม คือ “เจนเนอเรเตอร์ขนาดเล็ก” ทำหน้าที่แปลงความเร็วรอบมาเป็นแรงดันไฟฟ้าสำหรับควบคุม 0 - 10 โวลต์ เพื่อป้อนกลับไปยังชุดไดรฟ์ โดยอุปกรณ์เข้ารหัสชนิดวัดความเร็ว ให้สัญญาณเอาต์พุตเดี่ยว (single output signal) มีรูปแบบโครงสร้างที่ง่ายถ้าหากการเคลื่อนที่เป็นไปในทิศทางเดียว ในกรณีที่มีการเคลื่อนที่ในทิศทางย้อนกลับด้วยอาจส่งผลต่อการตรวจจับพัลส์ และทำให้เกิดความผิดพลาด (error) ในการวัดขึ้น เหมาะสำหรันำมาใช้วัดความเร็วมากกว่าการวัดระยะทางหรือระยะกระจัด ตัวอย่างการใช้งาน เช่น การวัดความเร็วรอบของเพลา เป็นต้น ดังแสดงตามรูปที่ 2.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

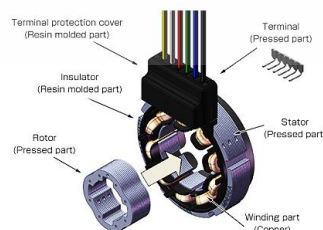


รูปที่ 2.22 แสดง Metal speed encoder tachometer
ที่มา: <https://th.aliexpress.com/i/32964227424.html>

2. รีโซลเวอร์ (Resolver) จะมีการออกแบบที่คล้ายคลึงกับมอเตอร์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.23 (ก) ซึ่งประกอบไปด้วย “โรเตอร์” และ “สเตเตอร์” ที่มีขดลวดทุติยภูมิ 2 อัน ได้แก่ ไซน์ (SIN) และโคไซน์ (COS) ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 90 องศาโดยอัตโนมัติ รีโซลเวอร์เป็นเซนเซอร์ชนิดที่มีการใช้งานมากในระบบเซอร์โว เนื่องจากมีความแข็งแรงและทนทานต่อสภาพแวดล้อมภายในอุตสาหกรรมได้ดี เช่น แรงสั่นสะเทือน, แรงกระแทก และอุณหภูมิรอบข้าง ฯลฯ รีโซลเวอร์มีลักษณะคล้ายกับหม้อแปลงตัวเล็ก หรืออธิบายในเชิงเปรียบเทียบว่า "Rotary Transformer" ดังแสดงตามรูปที่ 2.23 (ข) ซึ่งต้องการสื่อถึงหม้อแปลงไฟฟ้าแบบหมุน ในการทำงานของรีโซลเวอร์จะมีลักษณะคล้ายกับการมีหม้อแปลง 2 ชุด โดยชุดแรกจะรับสัญญาณอ้างอิงความถี่สูงย่าน 2 – 10 กิโลเฮิร์ตซ์ เพื่อสร้างแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสไปสร้างสนามแม่เหล็กให้กับขดลวดชุดที่ 2 ซึ่งมีขดลวดปฐมภูมิที่ติดกับโรเตอร์ 1 ชุด มีขดลวดทุติยภูมิ 2 ชุด วางทำมุมกัน 90 องศา เรียกว่า ขดลวดไซน์ และขดลวดโคไซน์ ค่าแรงดันไฟฟ้าเหล่านี้เท่ากับค่าของแรงดันอ้างอิงคูณด้วยไซน์ หรือโคไซน์ของมุมเพลลาอินพุตจากจุดศูนย์ อัตราส่วนของแรงดันไฟฟ้า แสดงถึงตำแหน่งที่แน่นอนของเพลลาสัญญาณทั้งสอง จะถูกป้อนกลับคอนโทรลเลอร์แปลงสัญญาณเป็นดิจิทัล โดย Resolver-to-digital convertor (RDC) และเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าทั้งสองเพื่อกำหนดตำแหน่งเพลลา และมีจำนวนช่วง 1,000 – 4,000 พัลส์ ต่อการหมุน 1 รอบ เมื่อเริ่มต้นเปิดสวิตช์จ่ายไฟเข้าสู่ชุดคอนโทรลเลอร์ หรือจ่ายไฟเข้าสู่ชุดเซอร์โวไดรฟ์คอนโทรลเลอร์ จะจ่ายสัญญาณอ้างอิงความถี่สูงเข้าไปที่ขดลวด สเตเตอร์ชุดที่หนึ่ง จากนั้นจะเกิดการเหนี่ยวนำ และเกิดแรงเคลื่อนเหนี่ยวนำที่ขดลวดที่พันอยู่ กับโรเตอร์ แรงเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหนี่ยวนำนี้จะทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่าย เพื่อจ่ายกระแสให้กับขดลวดปฐมภูมิชุดที่สองทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก และเหนี่ยวนำข้ามไปยังขดลวดทุติยภูมิไซน์ และโคไซน์ สัญญาณที่ได้จากการเหนี่ยวนำของขดลวดทุติยภูมิไซน์ และโคไซน์ จะมีมุมต่างเฟสกัน 90 องศา ตามลักษณะของขดลวดที่วางทำมุมต่างกัน ส่วนขนาดของสัญญาณในแต่ละช่วงเวลาก็จะมีขนาดไม่เท่ากัน โดยขึ้นอยู่กับมุมของสนามแม่เหล็กจากโรเตอร์ที่ไปตัดกับขดลวดไซน์ และโคไซน์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.24 และความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งเพลลา กับค่าแรงดันยอดสูงสุดที่เกิดขึ้นบนขดลวดแต่ละชุด หลังจากที่ได้สัญญาณทั้งไซน์ และโคไซน์ สัญญาณทั้งสองก็จะถูกป้อนกลับไปชุดคอนโทรลเลอร์ และถูกแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลโดย RDC ซึ่งก็คือไอซีตัวหนึ่ง ซึ่งมีจำนวนช่วงรอบ 1,000 – 4,000 พัลส์ ต่อการหมุนหนึ่งรอบ ตัวอย่างเช่น RDC 14 บิต ก็จะสามารถแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัล ได้ความละเอียดเท่ากับ 16,384 พัลส์ ต่อรอบ โดยบิตที่ 12 และ 13 จะมีหน้าที่รายงานตำแหน่งว่าอยู่ในควอดแรนต์ใด ส่วนบิตที่ 0 ถึง 12 จะทำหน้าที่รายงานตำแหน่งของโรเตอร์ในควอดแรนต์นั้น ๆ ดังแสดงตามรูปที่ 2.25 และค่าความละเอียดในรูปแบบดิจิทัลสามารถแสดงได้ตามตารางที่ 2.5

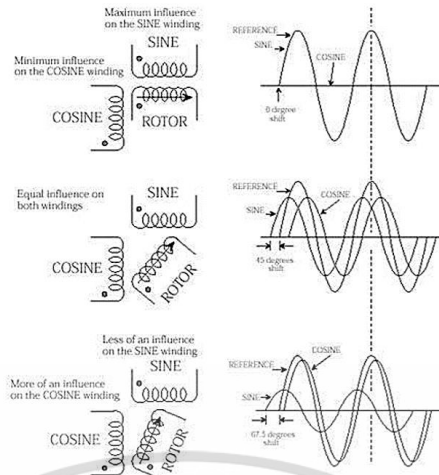


(ข)

รูปที่ 2.23 (ก) แสดง Resolver หรือ Rotary Transformer (ข) โครงสร้างส่วนประกอบ

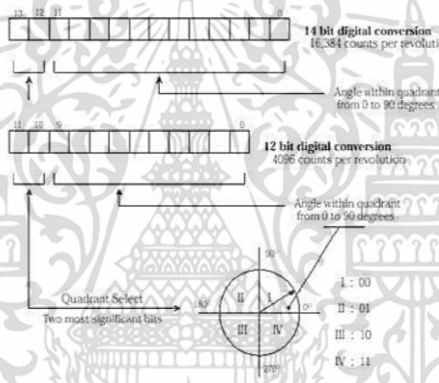
ที่มา: http://www.9engineer.com/index.php?m=article&a=print&article_id=2176

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 แสดงขนาดของสัญญาณในแต่ละช่วงเวลาของรีโซลเวอร์

ที่มา: http://www.9engineer.com/index.php?m=article&a=print&article_id=2176



รูปที่ 2.25 แสดงตัวอย่างการทำงาน ตัวอย่าง เช่น RDC 14 บิต

ที่มา: http://www.9engineer.com/index.php?m=article&a=print&article_id=2176

ตารางที่ 2.5 แสดงค่าความละเอียดเป็นระบบดิจิทัล 360 องศา

ค่าความละเอียดเป็นระบบดิจิทัล 360 องศา		
Number of bit	Angles in radians	Angles in degrees
1	3.1415	180
2	1.5707	90
4	0.3927	22.5
6	0.0981	5.625
8	0.02454	1.4063
10	0.00614	0.3416
12	0.001534	9.08789
16	0.000096	0.00549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้เพื่อเผยแพร่หรือการดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.2 ทำงานด้วยหลักการดิจิทัล (Digital Encoder)

1. เอนโคเดอร์ชนิดเพิ่มค่า (incremental encoder type) ดังแสดงตามรูปที่ 2.26 จะบอกองศาการหมุน (ตำแหน่งเชิงมุม) ในรูปของสัญญาณพัลส์ที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งความละเอียด (Resolution) ของเอนโคเดอร์ขึ้นอยู่กับจำนวนพัลส์ต่อหนึ่งรอบการหมุน เรียกว่า Pulse per revolution (PPR) เอนโคเดอร์ชนิดเพิ่มค่ามีค่า PPR มาก ยิ่งมีความละเอียดสูง จะทำให้สามารถทราบตำแหน่งเชิงมุมได้ จากการนับจำนวนพัลส์โดยใช้ตัวนับสัญญาณ เทียบกับ PPR โดยทั่วไปเอนโคเดอร์ชนิดนี้มีสัญญาณเอาต์พุต อยู่ 2 สัญญาณ คือ A และ B ซึ่งมีเฟสต่างกัน 90 องศา แต่บางรุ่นได้เพิ่มสัญญาณตอนหมุนครบรอบ เรียกว่า “Marker” หรือช่องสัญญาณ Z เข้ามาด้วย มีการเข้ารหัสอย่างน้อยสองหรือสามช่องทาง (track) เพื่อแก้ปัญหาการตรวจจับการเคลื่อนที่ในทิศทางย้อนกลับ เหมาะสำหรับการตรวจจับจำนวนรอบการเคลื่อนที่ หรือการคำนวณระยะทางการเคลื่อนที่ที่โครงสร้าง จะประกอบไปด้วยตัวกำเนิดแสง ตัวจับแสง ซึ่งถูกคั่นกลางด้วยแผ่นจานกลม ๆ ที่มีการทำรูเจาะไว้รอบ ๆ แผ่น จำนวนรูจะขึ้นอยู่กับความละเอียดของเอนโคเดอร์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.27 และหน้ากากแยกช่องสัญญาณพัลส์ A , B และ Z สัญญาณพัลส์ที่ได้จาก เอนโคเดอร์ชนิดนี้จะประกอบด้วย 3 แทรค (tracks) คือ A , B และ Z ดังแสดงตามรูปที่ 2.28 พัลส์ที่เกิดจากแทรค A และ B จะเกิดการเหลื่อมกันมีค่าความต่างเฟสกัน 90 องศา เพื่อทำหน้าที่รายงานผลของความเร็ว และทิศทางการหมุนของมอเตอร์ให้คอนโทรลเลอร์ โดยทั่วไปจะไม่นิยมใช้กับระบบเซอร์โวที่มีการควบคุมตำแหน่ง เนื่องจากไม่สามารถจำตำแหน่งเดิมได้กรณีที่มีการปิดเครื่องหรือไฟดับ ซึ่งทำให้ต้องทำการหาจุดอ้างอิงใหม่ทุกครั้ง

- กรณีที่พัลส์ A เกิดขึ้นก่อน B คอนโทรลเลอร์จะรับรู้ว่ามีมอเตอร์กำลังหมุนด้วยทิศทางตามเข็มนาฬิกา
- กรณีที่พัลส์ B เกิดขึ้นก่อน A คอนโทรลเลอร์จะรับรู้ว่ามีมอเตอร์กำลังหมุนด้วยทิศทางทวนเข็มนาฬิกา
- แทรค หรือพัลส์อ้างอิง จะเกิดขึ้น 1 พัลส์ในการหมุนหนึ่งรอบ ทำหน้าที่ใช้อ้างอิงตำแหน่งของโรเตอร์



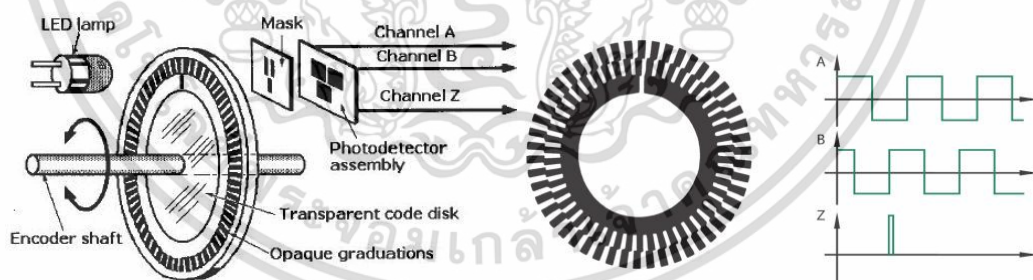
รูปที่ 2.26 แสดง incremental encoder

ที่มา: <https://th.rs-online.com/web/p/motion-control-sensors/7450089>



รูปที่ 2.27 แสดง Disk of absolute encoder

ที่มา: <https://blog.orientalmotor.com/incremental-vs-absolute-systems>



รูปที่ 2.28 แสดงส่วนประกอบของ Increment encoder

และสัญญาณของแตรค A , B และ Z

ที่มา: <https://www.primusthai.com/primus/Knowledge/info?ID=157>

2. เอนโคเดอร์ชนิดสัมบูรณ์ (absolute encoder type) บอกรหัสการหมุน (ตำแหน่งเชิงมุม) ในรูปของรหัสแบบต่าง ๆ เช่น Binary , BCD และ Gray code แต่ละองศาให้ค่าสัมบูรณ์ไม่ซ้ำกัน โดยจุดเด่นของเอนโคเดอร์ชนิดสัมบูรณ์ คือ ไม่ต้องใช้ตัวนับพัลส์เพื่อคำนวณหาตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

องศาและในกรณีแหล่งจ่ายไฟเกิดขัดข้อง เอนโคเดอร์ชนิดสัมบูรณ์ ยังคงให้ค่าตำแหน่งเดิมได้หลังจากแหล่งจ่ายไฟกลับมาเป็นปกติ โดยแตกต่างกับเอนโคเดอร์ชนิดเพิ่มค่า ที่ต้องเคลื่อนไปยังตำแหน่งเริ่มต้นก่อนเสมอ แต่จะไม่ทนต่อสภาพแวดล้อมอุตสาหกรรม เช่น การสั่นสะเทือนและฝุ่นควัน นอกจากนี้งานเข้ารหัสยังเปราะ และแตกหักง่าย ลักษณะภายนอกของเอนโคเดอร์ชนิดสัมบูรณ์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.29 จะมีโครงสร้างแผ่นดิสก์พิเศษ ดังแสดงตามรูปที่ 2.30 ซึ่งมีลักษณะเป็น Gray Scales ดังแสดงตามรูปที่ 2.31 ส่วนความละเอียด (Resolution) ของเอนโคเดอร์ จะขึ้นอยู่กับจำนวนบิตของเอาต์พุต เช่น 8 บิต, 10 บิต หรือ 24 บิต เมื่อเอนโคเดอร์ทำงาน จะมีการสร้างสัญญาณทางไฟฟ้าออกมาหลังจากการหมุนของแกนสัญญาณ จากนั้นจะถูกนำไปประมวลผล ซึ่งในอดีตก่อนที่จะสัญญาณได้จากตัวเซนเซอร์ประเภทนี้นั้น จะได้เป็นแบบสัญญาณอนาล็อก ซึ่งจะมีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์ ซึ่งจะแปรเปลี่ยนระดับของแรงดันตามความเร็วรอบ ได้ถูกจำกัดในเรื่องของการใช้งาน ซึ่งจำกัดไว้ที่การใช้งานในเรื่องของความเร็วรอบเนื่องจากความละเอียดค่อนข้างต่ำ แต่สำหรับปัจจุบัน เอนโคเดอร์ชนิดสัมบูรณ์ จะมีสัญญาณเอาต์พุตที่เป็นแบบดิจิทัลเกือบทั้งหมด และยังคงมีอยู่เล็กน้อยที่เป็นแบบ PWM ที่เป็นอนาล็อก การเลือกใช้งานตัวเอนโคเดอร์เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ผู้ใช้งานจำเป็นต้องศึกษาลักษณะสัญญาณเอาต์พุตแบบต่าง ๆ และ รหัสของเอาต์พุต รวมถึงสัญญาณสื่อสารแบบต่าง ๆ เพื่อที่จะทำให้การใช้งานสามารถทำงานได้ถูกต้อง โดยสามารถอธิบายลักษณะของสัญญาณเอาต์พุตได้เป็น 14 ประเภท ดังนี้

- ประเภทที่ 1 Output Code (Parallel)
- ประเภทที่ 2 Shifted Gray code or Gray Excess code
- ประเภทที่ 3 BCD Code หรือ Binary Coded Decimal
- ประเภทที่ 4 Output Circuits
- ประเภทที่ 5 PNP open collector (Code P)
- ประเภทที่ 6 Push-Pull / HTL (Code Y)
- ประเภทที่ 7 Power Push-Pull / HTL (Code T)
- ประเภทที่ 8 Line Driver (RS-422) / TTL (Code L)

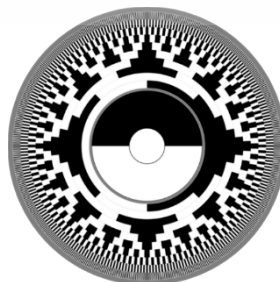
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ประเภทที่ 9 Power Line Driver (RS-422) / TTL (Code K)
- ประเภทที่ 10 Universal circuit Push-Pull + Line Driver / HTL + TTL (Code H)
- ประเภทที่ 11 1 Vpp sin/cos (Code V)
- ประเภทที่ 12 Analogue Output
- ประเภทที่ 13 Fieldbus Interface (Serial Interfaces)
- ประเภทที่ 14 BiSS Interface หรือ Bidirectional Serial and Synchronous



รูปที่ 2.30 โครงสร้างของ absolute encoder

ที่มา: <https://www.primusthai.com/primus/Knowledge/info?ID=157>



รูปที่ 2.31 แสดง Gray Scales disk

ที่มา: <https://www.primusthai.com/primus/Knowledge/info?ID=157>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นใบเซปกระเียนด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 ประเภทเอาต์พุต Rotary encoder

2.4.3.1 Output Code (Parallel) เป็นการถอดรหัสตำแหน่งของเอนโคดเดอร์ด้วยรหัสดิจิทัล เพื่อให้สามารถนำไปต่อใช้งานกับระบบประมวลผลแบบดิจิทัลได้ โดยมีการกำหนดให้สายสัญญาณแต่ละเส้นแทนค่าบิตของข้อมูลที่ส่งออกมา โดยรหัสดิจิทัลที่นิยมนำมาใช้ในตัว เอนโคดเดอร์ มีดังนี้

1. รหัสไบนารี (Binary Code) เป็นสัญญาณโค้ดเอาต์พุต ที่อยู่ในรูปของเลขฐาน 2 โดยจะใช้เลข “0” และ “1” ในการแสดงสถานะต่าง ๆ โดยเลขฐาน 2 นั้นมีประสิทธิภาพในการเข้ารหัสเลขฐาน 10 ที่ใช้งานอยู่ แต่ก็ยังมีปัญหาเกิดขึ้นบ้างในเรื่องของการหน่วงของสัญญาณที่เกิดขึ้นในแต่ละบิต ซึ่งอาจทำให้เกิดการเข้ารหัสผิดพลาด และทำให้ค่าที่อ่านออกมาได้นั้น มีค่าที่ไม่ตรงตามค่าที่ตำแหน่งของเอนโคดเดอร์อยู่จริง ข้อเสียของรหัสไบนารี

- การเปลี่ยนแต่ละภาคสัญญาณจะเปลี่ยนแปลงมากกว่า 1 ช่อง
- หากมีสัญญาณรบกวน หรือสายขาด ค่าตำแหน่งจะต่างกันมาก จึงไม่เป็นที่นิยม เช่น encoder อยู่ที่ 011(3) มีสัญญาณรบกวนที่บิต 2 เช่น encoder อยู่ที่ 011(3) มีสัญญาณรบกวนที่บิต 2 encoder จะแสดง 111(7)

2. รหัสเกรย์ (Gray Code) เป็นสัญญาณโค้ดเอาต์พุต ที่ออกแบบโดย Frank Gray ในปี 1947 ซึ่งประสบความสำเร็จเป็นอย่างมาก ในการแก้ปัญหาการปลอมบิตจากการถูกรบกวนทางไฟฟ้า ซึ่งจากรูปที่ 2.32 โดยจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนค่าจาก 1 เป็น 2 ในเลขฐาน 10 นั้น ในรหัสไบนารี จะมีการเปลี่ยนบิต 2 บิต เช่น เดียวกับตำแหน่ง 3 เป็น 4 ก็จะมีการเปลี่ยนจำนวน 2 บิต เช่นเดียวกัน ซึ่งในการทำงานจริงมีโอกาที่จะเกิดสัญญาณรบกวน ซึ่งทำให้บิตเหล่านี้เปลี่ยนแปลงเช่นกัน โดยทำให้เกิดปัญหาการปลอมบิตเกิดขึ้น จากค่าที่อ่านได้ เช่น $0001 \rightarrow 0011 \rightarrow 0010$ ($1 \rightarrow 3 \rightarrow 2$) ซึ่งค่าที่ควรจะเป็นคือ $0001 \rightarrow 0010 \rightarrow 0011$ ($1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$) แต่สำหรับ Encoder Lika ที่ออกแบบมาพิเศษ ให้แก้ปัญหาเหล่านี้โดยอาศัยการเข้ารหัสแบบรหัสเกรย์แทน ซึ่งจากรูปที่ 2.32 โดยจะเห็นได้ว่าในรหัสเกรย์ ตำแหน่ง ($1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$) จะถูกเข้ารหัสด้วย $0001 \rightarrow 0011 \rightarrow 0010$ แทนซึ่งถ้าเป็นในรหัสไบนารีค่านี้นี้ถือว่าเป็นการเข้ารหัสผิด การเปลี่ยนแปลงของรหัสเกรย์ แต่ละค่าจะต่างจากจำนวนก่อนหน้าอยู่ 1

บิตเสมอ ทำให้โอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดได้ยากเมื่อเทียบกับรหัสเลขฐานสอง ซึ่งอาจเกิดความคลาดเคลื่อนของรหัส หรือเกิดการคลุมเครือของรหัสระหว่างส่งรหัสได้

Decimal	0	1	2	3	4	5	6	7
Binary (4 digits)	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111
Gray (4 digits)	0000	0001	0011	0010	0110	0111	0101	0100

รูปที่ 2.32 แสดง ตารางเปรียบเทียบรหัสเกรย์ กับรหัสไบนารี

ที่มา: <https://mall.factomart.com/output-type-of-rotary-encoder/>

3. รหัสเกรย์แบบเลื่อน (Shifted Gray code) คือ การแปลงค่าจากรหัสไบนารี ไปเป็นฐาน 10 นั้น จะสามารถแทนค่าสูงสุดได้เท่ากับ 2^n โดยค่า n จะเป็นจำนวนบิตที่ใช้แทนค่า เช่น $n = 9$ บิต จะสามารถแทนค่าได้ $2^9 = 512$ ซึ่งค่าเท่ากับ 512 โดยจะแทนค่ากลับเป็นตำแหน่งได้ ตัวอย่างเช่น Shifted Gray Code 360 counts/rev ค่า Integral Gray ของเอนโคเดอร์ = 512 ต้องการทราบว่าค่าตำแหน่งเริ่มต้นกับตำแหน่งสุดท้าย จะต้องมีค่าเท่าไร จะแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งเริ่มต้นของข้อมูลนั้นคือ 76 ซึ่งแทนตำแหน่ง 1 องศา และข้อมูลสุดท้ายคือ 435 ซึ่งแทนข้อมูลที่ตำแหน่ง 360 องศา ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าดังกล่าวได้ดังนี้

$$\text{Integral Gray} - \text{Shifted Gray} - 1$$

Integral Gray = ค่าสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ โดยหาได้จาก 2^n

Shifted Gray = ค่าสูงสุดที่สามารถนับได้ต่อรอบ คือ ค่าของข้อมูลชุดแรกที่แทนตำแหน่งเริ่มต้น

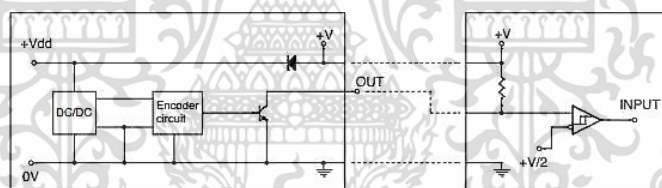
- 1 = ค่าของข้อมูลชุดสุดท้ายที่แทนตำแหน่งสุดท้าย

4. รหัสไบนารีทศนิยม (Binary Coded Decimal) เป็นการแทนเลขฐานสิบ ด้วยการ ใช้ BCD code ซึ่งจะแทน 1 ชุด BCD = 4 บิต โดยแทนค่า 0 - 9 ซึ่งใน 4 บิต แต่ละบิตจะถูกแทนด้วยค่า 8 4 2 1 ซึ่งในการหาค่านั้น ให้เอาค่ามาแทนในบิตที่มีค่าเป็น 1 แล้วนำค่ามารวมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 วงจรเอาต์พุต (Output Circuits)

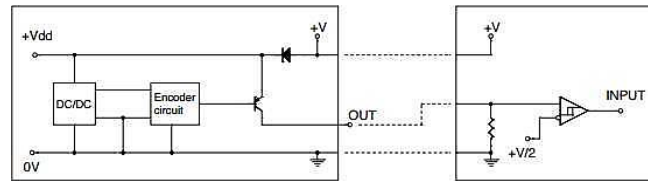
ในส่วนของวงจรเอาต์พุต จะเกี่ยวข้องกับระดับสัญญาณ และวิธีการเชื่อมต่อกันทางสัญญาณไฟฟ้าระหว่างตัวเซนเซอร์กับตัวอ่านค่าไม่ว่าจะเป็นตัวนับจำนวน หรือระบบคอนโทรลเลอร์ ซึ่งในเอนโคเดอร์ในแต่ละรูปแบบจะมีสัญญาณเอาต์พุตที่เหมือนหรือต่างกันได้ โดยวงจรเอาต์พุตของเอนโคเดอร์ที่มีใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ได้แก่ NPN open collector (Code N) เป็นเอาต์พุตแบบ NPN หรือ Sinking output ซึ่งมีคุณสมบัติ ดังแสดงตามตารางที่ 2.6 จะใช้งานกับอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่จ่ายกระแสออกมา ซึ่งปกติวงจร NPN open collector จะถูกใช้บ่อยในกรณีที่อุปกรณ์ที่นำมาต่อนั้นมีแหล่งจ่ายแรงดันไม่เท่ากับแหล่งจ่ายแรงดันของตัวเอนโคเดอร์ ซึ่งภายในวงจรของเอนโคเดอร์จะมีทรานซิสเตอร์ชนิด NPN อยู่ โดยส่วนอุปกรณ์ที่นำมาต่อด้านนั้นจำเป็นต้องมีตัวต้านทานจำกัดกระแสไว้เพื่อป้องกันการลัดวงจร ดังแสดงตามรูปที่ 2.33 ข้อดีของ NPN open collector สามารถต่อเอนโคเดอร์ใช้งานได้ แม้ว่าไฟเลี้ยงของเอนโคเดอร์กับอุปกรณ์ที่นำมาต่อ เช่น พีแอลซีจะมีระดับแรงดันที่ไม่เท่ากัน เช่น เอนโคเดอร์ทำงานที่ 12 โวลต์ แต่พีแอลซี ทำงานที่ 24 โวลต์ ภาคเอาต์พุตของเอนโคเดอร์ก็สามารถต่อกับพีแอลซีได้ และข้อเสียของ NPN open collector ไม่สามารถต่อวงจรเอาต์พุต แบบ Source ได้



รูปที่ 2.33 แสดง การต่อวงจรเอาต์พุตแบบ NPN Open collector
ที่มา: <https://mall.factomart.com/output-type-of-rotary-encoder/>

2.4.4.1 PNP open collector (Code P)

เป็นเอาต์พุตแบบ PNP หรือ Sourcing output จะใช้งานกับอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นโหลด โดยตัวเอนโคเดอร์จะทำหน้าที่จ่ายกระแสให้กับอุปกรณ์ ซึ่งมีคุณสมบัติ ดังแสดงตามตารางที่ 2.6 เอนโคเดอร์แบบนี้จะเป็นชนิดที่ไม่ค่อยมีใช้งาน และข้อเสียของ PNP open collector คือ ไม่สามารถต่อวงจรเอาต์พุตแบบ Sinking ได้ โดยการต่อวงจรเอาต์พุตแบบ PNP Open collector ดังแสดงตามรูปที่ 2.34

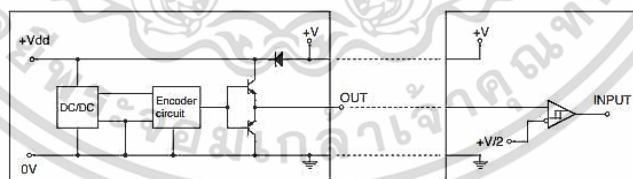


รูปที่ 2.34 แสดงการต่อวงจรเอาต์พุตแบบ PNP Open collector

ที่มา: <https://mall.factomart.com/output-type-of-rotary-encoder/>

2.4.4.2 Push-Pull / HTL (Code Y)

เป็นวงจรเอาต์พุตของเอนโคเดเตอร์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.35 ซึ่งจะสร้างสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยมซึ่งมีมุมเฟสต่างกันอยู่ที่ 90 องศา วงจร Push-Pull มีคุณสมบัติ ดังแสดงตามตารางที่ 2.6 ที่จะสามารถรองรับสัญญาณการทำงานได้ทั้งแบบ Sinking และ Sourcing โดยทนกระแสได้สูงถึง 80 มิลลิแอมป์ต่อเอาต์พุต ซึ่งสัญญาณเอาต์พุตแบบนี้จะเหมาะกับอุปกรณ์ที่เป็นอุปกรณ์ควบคุมการเคลื่อนที่ และอุปกรณ์ที่กินกระแสไม่เยอะมาก ในขณะที่เอาต์พุตมีสถานะ Logic High ตัวเอนโคเดเตอร์จะทำหน้าที่เป็นวงจรจ่ายกระแสให้กับอุปกรณ์ที่มาต่อพ่วง และในขณะที่เอาต์พุตมีสถานะ Logic Low ตัวเอนโคเดเตอร์จะทำหน้าที่เป็นวงจรรับกระแส Sinking หรือเป็นโหลดให้กับอุปกรณ์ที่มาต่อพ่วง โดยวงจร Push-Pull จะสามารถจ่ายสัญญาณที่เป็นแบบย้อนกลับได้ เช่น A/A, B/B ข้อดีของ Push-Pull / HTL (Code Y) สามารถต่อเอนโคเดเตอร์ใช้งานได้กับอุปกรณ์ที่เป็นทั้งรับ และจ่าย โดยสามารถต่อกับอุปกรณ์ที่มีอินพุตเป็น NPN หรือ PNP ก็ได้ ทำให้ใช้สายสัญญาณได้ไกลขึ้น ข้อเสียของ Push-Pull / HTL (Code Y) สามารถป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอกได้ในระดับปานกลาง และจำเป็นต้องใช้วงจรกรองเพื่อสัญญาณรบกวน ในกรณีที่ถูกระบกวนจากภายนอก



รูปที่ 2.35 แสดงการต่อวงจรเอาต์พุตแบบ Push-Pull / HTL (Code Y)

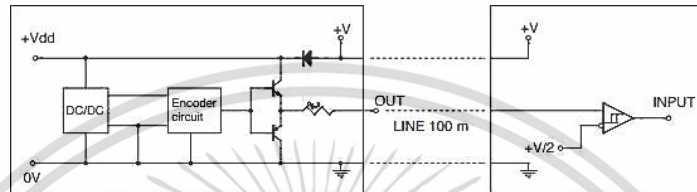
ที่มา: <https://mall.factomart.com/output-type-of-rotary-encoder/>

2.4.4.3 Power Push-Pull / HTL (Code T)

เป็นวงจรเอาต์พุตของเอนโคเดเตอร์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.36 ซึ่งเหมือนกับวงจรเอาต์พุตแบบ Push-Pull / HTL (Code Y) แต่จะมีคุณสมบัติที่สามารถขับโหลดที่มีระยะทางไกลได้ ดังแสดงตารางที่ 2.6 โดยเอาต์พุตประเภทนี้ถูกออกแบบมาสำหรับแก้ปัญหาของวงจรเอาต์พุตแบบ Push-Pull / HTL (Code Y) ที่ไม่สามารถต่อสายในระยะไกลได้ และสำหรับวงจรเอาต์พุตแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Power Push-Pull / HTL นั้นจะสามารถต่อสายเซนเซอร์ได้ไกลถึง 100 ม. ข้อดีของวงจรเอาต์พุตประเภทนี้คือ สามารถต่อเอนโคดเดอร์ใช้งานได้กับอุปกรณ์ที่เป็นทั้ง Sink และ Source โดยสามารถต่อกับอุปกรณ์ที่มีอินพุตเป็น NPN หรือ PNP ก็ได้ และยังสามารถช่วยป้องกันสัญญาณที่ส่งจากตัวเอนโคดเดอร์ให้สามารถส่งได้ไกลกว่า 100 ม. ข้อเสียของวงจรเอาต์พุตประเภทนี้คือ สามารถป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอกได้ในระดับปานกลาง และจำเป็นต้องใช้วงจรกรองเพื่อสัญญาณรบกวนในกรณีที่ถูกสัญญาณรบกวนจากภายนอก

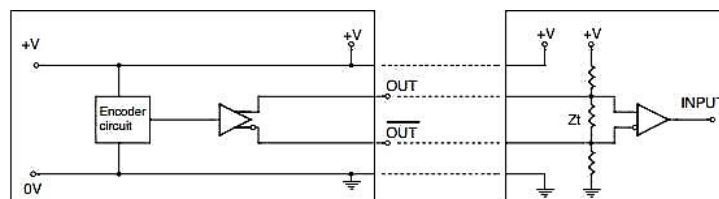


รูปที่ 2.36 แสดงการต่อวงจรเอาต์พุตแบบ Power Push-Pull / HTL (Code T)

ที่มา: <https://mall.factomart.com/output-type-of-rotary-encoder/>

2.4.4.4 Line Driver (RS-422) / TTL (Code L)

เป็นวงจรเอาต์พุตของเอนโคดเดอร์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.37 ที่ใช้ IC 26LS31 ซึ่งเป็นวงจรแบบ Sourcing ซึ่งมีคุณสมบัติ ดังแสดงตามตารางที่ 2.6 เหมาะสำหรับการต่อสายเอนโคดเดอร์ที่มีระยะทางไกล ซึ่งอาจมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นได้ง่าย โดยวงจรแบบนี้ออกแบบมาเพื่อป้องกันระบบสื่อสารให้สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องด้วยวงจรมีสัญญาณในรูปแบบ Inverted ABO/ABO ที่เป็นแบบพัลส์ ซึ่งในการใช้งานจริงของสัญญาณนั้นจะมีสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นได้ทั้งฝั่งที่เป็นสัญญาณปกติ (Normal Signal) และสัญญาณกลับ (Inverted Signal) ซึ่งสัญญาณสัญญาณรบกวนเหล่านี้ สามารถจัดการได้ง่ายโดยวงจรภาครับ ซึ่งเป็นภาครับโดยทั่วไปของตัวคอนโทรลเลอร์อยู่แล้ว ซึ่งระดับแรงดันที่ใช้ในวงจรมีจะเป็นแบบ 5 โวลต์ โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน EIA RS-422 ข้อดีของ Line Driver (RS-422) / TTL (Code L) ทนต่อสัญญาณรบกวนจากภายนอกได้เป็นอย่างดี และข้อเสียของ Line Driver (RS-422) / TTL (Code L) ต้องอาศัยวงจรภาครับที่สามารถรองรับสัญญาณในแบบ RS-422 ได้



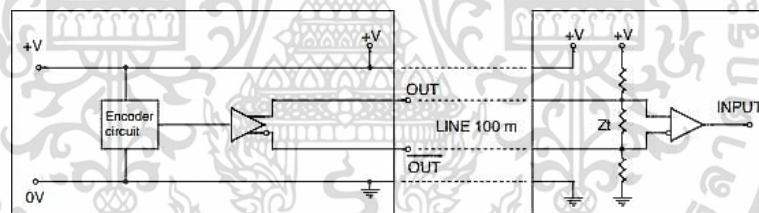
รูปที่ 2.37 แสดงการต่อวงจรเอาต์พุตแบบ Line Driver (RS-422) / TTL (Code L)

ที่มา: <https://mall.factomart.com/output-type-of-rotary-encoder/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ สงวนลิขสิทธิ์ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4.5 Power Line Driver (RS-422) / TTL (Code K)

เป็นวงจรเอาต์พุตของเอนโคเดอร์แบบ Sourcing ดังแสดงตามรูปที่ 2.38 ซึ่งมีคุณสมบัติ ดังแสดงตามตารางที่ 2.6 เหมาะสำหรับการต่อสายเอนโคเดอร์ที่มีระยะทางไกล ซึ่งอาจมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นได้ง่าย โดยวงจรมีการปรับปรุงภาคกำลังส่งให้สามารถขับกระแสได้สูงถึง 300 มิลลิแอมป์ เพื่อปรับปรุงระยะทางในการส่งให้ดีกว่าวงจรแบบ Line Driver (RS-422) TTL (Code L) และยังใช้เทคนิคการใช้ค่าความต้านทาน 75 โอห์ม เพื่ออาศัยหลักการแลกเปลี่ยนแรงดันสูงสุด จึงจะทำให้ได้กำลังส่งสูงสุด โดยสัญญาณเอาต์พุตจะยังคงเป็นแบบ Inverted AB0/AB0 ที่เป็นพัลส์ ซึ่งในการใช้งานจริงนั้นจะมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นทั้งฝั่งที่เป็นสัญญาณปกติ (Normal Signal) และสัญญาณกลับ (Inverted Signal) ซึ่งสัญญาณสัญญาณรบกวนเหล่านี้สามารถจัดการได้ง่ายโดยวงจรภาครับแบบ Differential ซึ่งเป็นภาครับโดยทั่วไปของตัวคอนโทรลเลอร์อยู่แล้ว ซึ่งระดับแรงดันที่ใช้ในวงจรมีจะเป็นแบบ 5 โวลต์ดีซี โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน EIA RS-422 ข้อดีของ Power Line Driver (RS-422) / TTL (Code K) ทนต่อสัญญาณรบกวนจากภายนอกได้เป็นอย่างดี และข้อเสียของ Power Line Driver (RS-422) / TTL (Code K) ต้องอาศัยวงจรภาครับที่สามารถรองรับสัญญาณแบบ RS-422 ได้ และต้องมีวงจรป้องกันเอาต์พุต



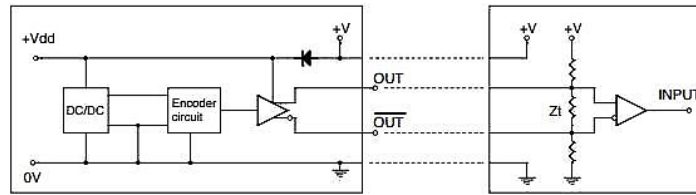
รูปที่ 2.38 แสดงการต่อวงจรเอาต์พุตแบบ Power Line Driver (RS-422) / TTL (Code K)

ที่มา: <https://mall.factorart.com/output-type-of-rotary-encoder/>

2.4.4.6 Universal circuit Push-Pull + Line Driver / HTL + TTL (Code H)

วงจรภาคเอาต์พุตแบบนี้ได้ถูกพัฒนาและออกแบบ ดังแสดงตามรูปที่ 2.39 โดยมีลิขสิทธิ์เฉพาะของไลก้า (Lika) ซึ่งมีคุณสมบัติ ดังแสดงตามตารางที่ 2.6 และรวบรวมข้อดีทั้งของวงจรแบบ Push-Pull และ Line Driver ไว้ด้วยกัน ซึ่งแทบจะครอบคลุมมาตรฐานของผู้ผลิตเอนโคเดอร์ทั่วโลก ซึ่งมีคุณสมบัติต่าง ๆ และการต่อวงจรเอาต์พุต โดยข้อดีของ Universal circuit Push-Pull + Line Driver / HTL + TTL (Code H) คือ ทนต่อสัญญาณรบกวนจากภายนอกได้เป็นอย่างดี และยังสามารถต่อเอนโคเดอร์ใช้งานได้กับอุปกรณ์ที่เป็นทั้งภาครับและภาคจ่าย โดยสามารถต่อกับอุปกรณ์ที่มีอินพุตเป็น NPN หรือ PNP ก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.39 แสดงการต่อวงจรเอาต์พุตแบบ Universal circuit Push-Pull + Line Driver/HTL+TTL (Code H)

ที่มา: <https://mall.factorart.com/output-type-of-rotary-encoder/>

ตารางที่ 2.6 แสดงคุณสมบัติของวงจรเอาต์พุตของเอนโคเดอร์ชนิดต่างๆ

Type of circuit	Max sinking Current	Power Supply	Peak sinking current	Typical rising/falling edge time	Vout low @40mA	Vout high @40mA
NPN Open collector	+10 +30 Vdc.	40 mA	80mA	3000 ns/700 ns	< 0.5 Vdc.	Acc. To following electronics
PNP Open collector	+10 +30 Vdc.	40 mA	80 mA	500 ns/470 ns	Acc. To following electronics	Vin – 1.25 Vdc.
Push-Pull / HTL (Code Y)	+10 +30 Vdc.	40 mA	80 mA	550 ns/470 ns	< 0.5 Vdc.	Vin – 1.25 Vdc.
Power Push-Pull / HTL (Code T)	+10 +30 Vdc.	100 mA	300 mA	300 ns/100 ns	< 0.5 Vdc.	Vin – 1.25 Vdc.
Line Driver (RS-422) / TTL (Code L)	+5 Vdc.	20 mA	-	60 ns/30 ns	< 0.5 Vdc.	>2.5 Vdc
Power Line Driver (RS-422) / TTL (Code K)	+5 Vdc.	100 mA	300 mA	30 ns/10 ns	< 1.5 Vdc.	>2.5 Vdc
Universal circuit Push-Pull + Line Driver/HTL+TTL (Code H)	+10 +30 Vdc.	40 mA	80 mA	550 ns/470 ns	< 0.4 Vdc.	Vin – 1.25 Vdc.

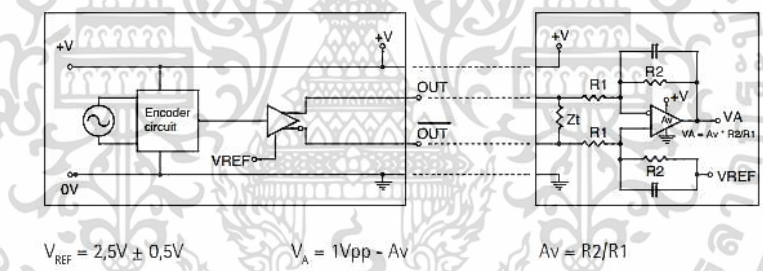
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4.7 1Vpp sin/cos (Code V)

คือวงจรภาคเอาต์พุตของเอนโคดเดอร์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.40 ที่ให้สัญญาณเอาต์พุตที่เป็นแบบแรงดันไฟฟ้าโดยมีมุมเฟสต่างกันอยู่ที่ 90 องศา ระหว่างเฟส A และ B โดยเฟส A เป็นฟังก์ชันไซน์ และเฟส B เป็นฟังก์ชันโคไซน์ โดยค่าระดับแรงดันไฟฟ้าจะมีขนาดแอมพลิจูดอยู่ที่ 0.5 Vpp โดยจะอยู่บนแรงดัน 2.5 โวลต์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.41 ซึ่งแรงดัน 1 Vpp ได้มาจากค่าแรงดันระหว่าง เฟส A และ เฟส B โดยความถี่ของสัญญาณนั้น จะขึ้นอยู่กับความเร็วของการหมุนของเอนโคดเดอร์ โดยหากหมุนเร็วความถี่ก็จะสูงขึ้น ข้อดีของ 1 Vpp sin/cos (Code V) คือ เป็นสัญญาณอนาล็อกที่ความละเอียดสูง จากสัญญาณความถี่ที่เกิดขึ้นจากการหมุน และข้อเสียของ 1 Vpp sin/cos คือจำเป็นต้องใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ในการแยกความถี่ และมีคุณสมบัติแสดงดังตารางที่ 2.7

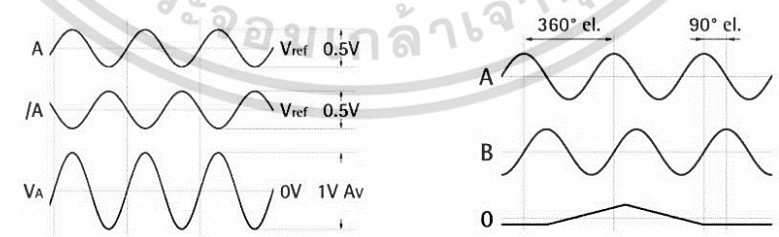
ตารางที่ 2.7 แสดงคุณสมบัติของวงจรเอาต์พุตแบบ 1 Vpp sin/cos (Code V)

Power Supply	Max output current	Peck output current	Thermal protection	Short-circuit protection	Inverted signals	Max. cable length
+5 Vdc	40 mA	80 mA	-	-	-	50 m 165 ft



รูปที่ 2.40 แสดงการต่อวงจรเอาต์พุตแบบ 1 Vpp sin/cos (Code V)

ที่มา: <https://mall.factomart.com/output-type-of-rotary-encoder/>



รูปที่ 2.41 แสดงสัญญาณเอาต์พุตแบบ 1 Vpp sin/cos (Code V)

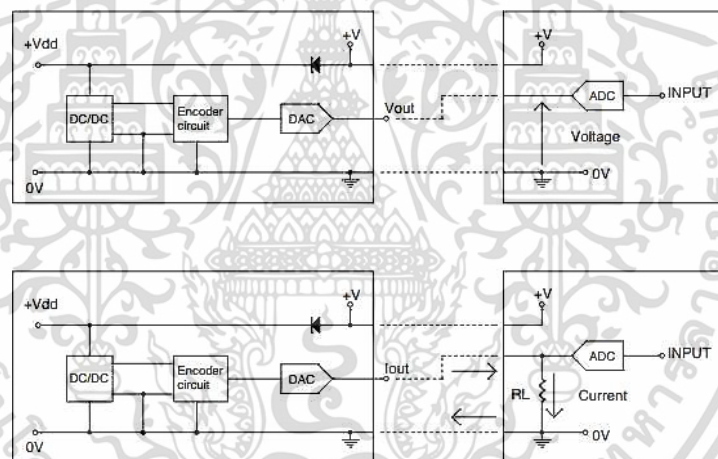
ที่มา: <https://mall.factomart.com/output-type-of-rotary-encoder/>

2.4.4.8 Analog Output

เป็นสัญญาณเอาต์พุตของเอนโคเดอร์ ดังแสดงตามตารางที่ 2.8 ที่นิยมเอามาใช้ในวงจรป้อนกลับในเรื่องของความเร็ว หรือตำแหน่งของเอนโคเดอร์ เช่น งานควบคุมความเร็ว หรือตำแหน่งของมอเตอร์ โครงสร้างภายในของเอนโคเดอร์จะทำหน้าที่แปลงค่าที่อ่านจากเอนโคเดอร์แสดงตามรูปที่ 2.42 ให้เป็นสัญญาณมาตรฐาน เช่น 0 ถึง 5 โวลต์, 0 ถึง 10 โวลต์, -5 ถึง +5 โวลต์, -10 ถึง +10 โวลต์, 4 ถึง 20 มิลลิแอมป์, 0 ถึง 20 มิลลิแอมป์ และ 0 ถึง 24 มิลลิแอมป์ ซึ่งจะมีการแปลงค่าที่อ่านได้ให้เป็นค่ามาตรฐาน

ตารางที่ 2.8 แสดงการแปลงค่าที่อ่านได้ให้เป็นสัญญาณมาตรฐาน

Max cable length m (ft)	Voltage analogue	Current analogue
-	100 (328) max. load	150 (490)



รูปที่ 2.42 แสดงการต่อวงจรเอาต์พุตแบบ Analogue Output

ที่มา: <https://mall.factomart.com/output-type-of-rotary-encoder/>

2.4.4.9 Fieldbus Interface (Serial Interfaces)

เป็นมาตรฐานการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ภาคสนาม เช่น เซนเซอร์ต่าง ๆ กับ ส่วนที่เป็นตัวประมวลผล เช่น หน้าจอแสดงผลต่าง ๆ พีแอลซี ดีซีเอส โดยระบบสื่อสารใน Fieldbus จะเป็นการส่งข้อมูลแบบอนุกรม และเป็นสัญญาณแบบดิจิทัล โดยมีมาตรฐานและการทำงานแต่ละแบบที่แตกต่างกัน โดยสามารถเปรียบเทียบตัวอย่าง Field Bus ต่าง ๆ ได้ ดังแสดงตามตารางที่ 2.9 เพื่อให้สามารถเลือกใช้งานตัวสัญญาณสื่อสารระหว่างตัวเอนโคเดอร์ กับระบบคอนโทรลเลอร์ต่าง ๆ ให้ได้อย่างถูกต้อง เหมาะสม และมีประสิทธิภาพ ในที่นี้จำเป็นต้องเรียนรู้รูปแบบการสื่อสารของ Fieldbus ชนิดต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น ข้อดี ข้อเสีย ลักษณะของข้อความที่ได้ในการสื่อสาร หรือมาตรฐานเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับ Fieldbus นั้น ๆ โดยตัวอย่างของ Fieldbus ที่นิยมนำมาใช้กับเอนโคเดอร์ ได้แก่ SSI (The acronym for Synchronous Serial Interface) ซึ่งเป็นการสื่อสารแบบอนุกรมที่มีการเชื่อมต่อสัญญาณนาฬิกาที่ถูกสร้างขึ้นโดยตัวคอนโทรลเลอร์ และมีความสามารถในการทำงานร่วมกันระหว่างคอนโทรลเลอร์และเซนเซอร์ เช่น ตัวเอนโคเดอร์กับตัวคอนโทรลเลอร์ โดยมีการสื่อสารแบบจุดต่อจุด (Point to Point) และใช้ระดับสัญญาณทางไฟฟ้าแบบ RS-422 โดยมีสายสัญญาณแบบตีเกลียว เพื่อเป็นสายสัญญาณนาฬิกา สายสัญญาณข้อมูล และสายไฟเลี้ยง ซึ่งในระบบนี้จะใช้สายทั้งหมด 6 เส้น โดยสามารถเปรียบเทียบข้อดีระหว่างการส่งสัญญาณข้อมูลแบบ SSI, Parallel, Asynchronous ได้ดังนี้

- SSI จะใช้สายสัญญาณในการส่งข้อมูลน้อยกว่าแบบขนาน
- SSI จะใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์น้อยกว่าแบบขนาน
- SSI สามารถที่จะใช้การเชื่อมต่อสัญญาณแบบแสง Optocouplers เพื่อแยกแต่ละวงจรได้
- SSI สามารถส่งข้อมูลที่มีความถี่สูงได้ความเร็วสูงสุดอยู่ที่ 2Mbps

นอกเหนือจากข้อดีต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีคุณสมบัติอื่น ๆ ที่ SSI สามารถทำงานดีกว่า ได้แก่ การป้องกัน หรือการจัดการกับสัญญาณรบกวนได้ค่อนข้างดีกว่า การเข้ารหัสสัญญาณจากเอนโคเดอร์หลาย ๆ ตัว รวมถึงการจัดการข้อมูลต่าง ๆ ได้ง่าย

ตารางที่ 2.9 แสดงตารางเปรียบเทียบ Field Bus ชนิดต่าง ๆ

Bus Technology	Standard	Bus Power	Communication Speed	Std. Max. Distance	Max. Device
AS-Interface	AS-International	Yes	-	100m	62
CAN Open	CiA 301, CiA 401	No	1Mbps at 20m	5km at 10kbps	127
CC-Link	IEC 61784	No	10Mbps	1.2km	64
DeviceNet	ODVA, CIP	Yes	125-500kbps	500m	64
EtherCAT	IEC 61158	No	100Mbps, 1Gbps	100m	65, 356
Ethernet/IP	ODVA, CIP	No	100Mbps, 1Gbps	100m	Unlimited
FF H1	IEC 61158	Yes	31.25kbps	1.9-9.5km	240
FF HSE	IEC 8802	No	100Mbps, 1Gbps	100m	Unlimited
MODBUS	TIA-485	No	9.6kbps-12Mbps	1.5km	246
PROFIBUS PA	IEC 61158	Yes	31.25Kbps	1.9-9.5km	126
PROFIBUS DP	IEEE1451.2	No	9.6Kbps-12Mbps	1.5km	126
PROFINET	IEC 8802	No	100Mbps, 1Gbps	100m	Unlimited
HART	Bell 202 4-20mA	Yes	1.2Kbps - 9.6Kbps	3km	64

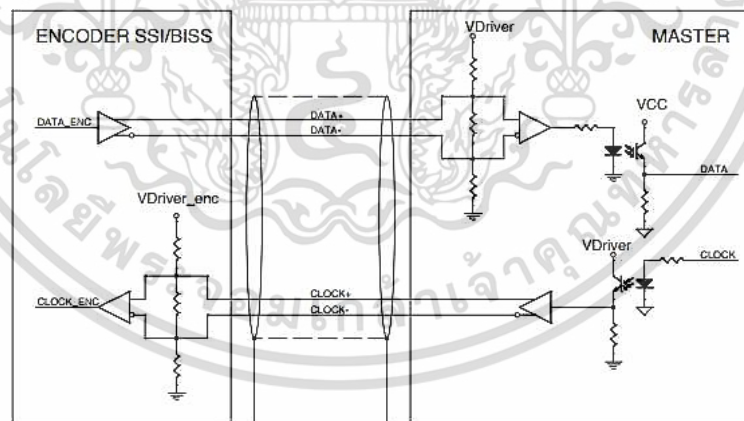
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4.10 BiSS Interface หรือ Bidirectional Serial and Synchronous

เป็นการสื่อสารแบบดิจิทัลประเภทหนึ่ง ถูกพัฒนาขึ้นมาในปี 2002 เพื่อใช้กับ ตัวเซนเซอร์ และตัวขับเคลื่อน ซึ่งมีการสื่อสารแบบ 2 ทิศทาง เชื่อมต่อสัญญาณแบบอนุกรม และใช้ สัญญาณนาฬิกาแบบซิงโครนัสในการให้จังหวะในการส่งข้อมูล ในปัจจุบันยังมีการใช้งานการสื่อสาร ประเภทนี้อยู่ เนื่องจากความสามารถในการส่งข้อมูลที่มีความเร็วสูง มีค่าสัญญาณนาฬิกาสูงสุดสำหรับการ ส่งข้อมูล ดังแสดงตามตารางที่ 2.10 และมีความทนต่อการรบกวนของสัญญาณจากสนามแม่เหล็ก ได้เป็นอย่างดี และวงจรการเชื่อมต่อการสื่อสาร ดังแสดงตามรูปที่รูปที่ 2.43 ข้อดีของ BiSS Interface รูปแบบของสัญญาณสามารถเอาใช้งานได้ง่าย และราคาไม่สูง เป็นการสื่อสารแบบสองทิศทาง รองรับ เซนเซอร์ได้สูงสุด 8 ตัว ใช้สายสัญญาณจำนวนน้อย แต่ให้ความเร็วในการส่งข้อมูลได้สูงสุด 10Mbps และข้อเสียของ BiSS Interface คือ ความเร็วในการสื่อสารน้อยกว่าการสื่อสารแบบขนาน

ตารางที่ 2.10 แสดงค่าสัญญาณนาฬิกาสูงสุดที่ความยาวของสายสัญญาณ สำหรับการส่งข้อมูลแบบ BiSS Interface

Number of station	Setting the nodes	Setting the baud rate	Transmission rate	Cable length	Cable
-	-	-	Up to 10Mbit/s	Up to 1000m	Lika T212 Type cable



รูปที่ 2.43 แสดงการเชื่อมต่อการสื่อสารสำหรับการส่งข้อมูลแบบ BiSS Interface

ที่มา: <https://mall.factomart.com/output-type-of-rotary-encoder/>

เมื่อต้องการเปรียบเทียบการสื่อสารที่กล่าวมาในข้างต้น สามารถเปรียบเทียบ ได้ในเรื่องของความยาวสาย และความถี่ที่สามารถใช้งานได้ ซึ่งจะสะท้อนให้เห็นถึงความเร็วในการ สื่อสารข้อมูล ดังแสดงตามตารางที่ 2.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

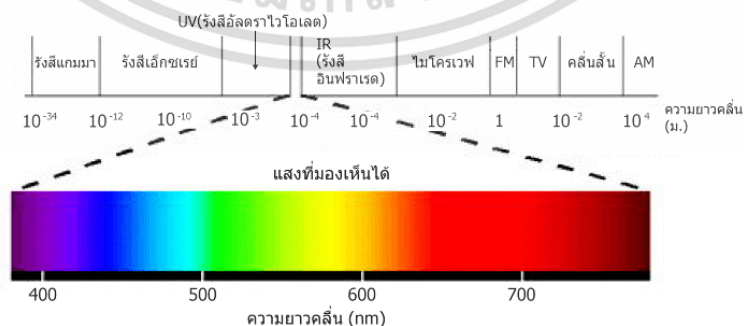
ตารางที่ 2.11 แสดงเปรียบเทียบความยาวสาย และความถี่ที่สามารถใช้งานได้

Interface/output circuit	Max. cable length m (ft)	Frequency (kHz)
Parallel output (20V)	100 (328)	20
	50 (164)	60
SSI (RS-422)	400 (1310)	100
	75 (245)	400
Biss	1000 (3280)	100
	600 (200)	2000

-	Max. cable length m (ft)	
Analog output	Voltage analogue	100 (328) Max. load
	Current analogue	150 (490)

2.5 เลเซอร์ (Laser)

เลเซอร์ (laser) ย่อมาจากคำว่า light amplification by stimulated emission of radiation ในทางฟิสิกส์ คือ อุปกรณ์ที่ให้กำเนิดลำแสงที่มีลักษณะเฉพาะ ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่รวมกันระหว่างกลศาสตร์ควอนตัมกับอุณหพลศาสตร์ จากการศึกษาพลังงานแสงเลเซอร์ สามารถมีคุณสมบัติได้หลากหลายขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการออกแบบ เลเซอร์ส่วนมากจะเป็นลำแสงที่มีขนาดเล็ก มีการเบี่ยงเบนน้อย และสามารถระบุความยาวคลื่นได้ง่าย โดยดูจากสีของเลเซอร์ ถ้าหากอยู่ในสเปกตรัมที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (visible spectrum) ซึ่งเลเซอร์นี้อาจกล่าวได้ว่าเป็นการรวมพลังงานแสงที่ส่งออกมาจากหลายความยาวคลื่นเข้าด้วยกัน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ในระยะที่มนุษย์สามารถมองเห็นได้ด้วยตา เรียกว่า "รังสีที่มองเห็นได้" ในด้านฝั่งที่มีความยาวคลื่นสั้น รังสีที่มองเห็นได้จะมีความยาว 360 ถึง 400 นาโนเมตร ส่วนฝั่งที่มีความยาวคลื่นยาววัดได้ 760 ถึง 830 นาโนเมตร ความยาวคลื่นที่สั้นหรือยาวกว่า "รังสีที่มองเห็นได้" จะไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตามนุษย์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.44 ที่แสดงให้เห็นถึงการแบ่งรังสีและคลื่นตามความยาวคลื่น



รูปที่ 2.44 แสดงสเปกตรัมและคลื่นของรังสี

ที่มา: <https://www.keyence.co.th/ss/products/markings/lasermarker>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 ความแตกต่างระหว่างแสงธรรมชาติและลำแสงเลเซอร์

เลเซอร์จะปล่อยลำแสงที่มีความแน่นอนของทิศทางสูงมาก ๆ หรือสามารถกล่าวได้ว่า องค์ประกอบของคลื่นแสงจะเดินทางด้วยกันเป็นเส้นตรง โดยแทบไม่มีองค์ประกอบใดหลุดออกนอก ทิศทาง แหล่งกำเนิดแสงทั่วไปจะปล่อยคลื่นแสงที่กระจายออกทุกทิศทาง คลื่นแสงในลำแสงเลเซอร์ จะเป็นสีเดียวกันทั้งหมด (คุณสมบัติแสงสีเดียว) แสงทั่วไป เช่น แสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ มักเป็นส่วนผสมระหว่างสีต่าง ๆ ที่มีการรวมกันจนปรากฏเป็นสีขาว เมื่อคลื่นแสงในลำแสงเลเซอร์เดินทางถึง จุดสูงสุด และร่องคลื่นจะสั้นไปพร้อมกันลักษณะนี้เรียกว่า ความพร้อมเพรียง (Coherent)

2.5.2 คุณลักษณะของแสงเลเซอร์

เลเซอร์มีคุณลักษณะต่าง ๆ ซึ่งแตกต่างจากแสงธรรมชาติเป็นอย่างมาก โดยแสงเลเซอร์จะมีลักษณะเด่นอยู่ 4 ลักษณะ ดังต่อไปนี้

2.5.2.1 ความเป็นแสงสีเดียว (Monochromaticity)

แสงธรรมชาติจะมีความยาวคลื่นที่หลากหลาย นับตั้งแต่รังสีอัลตราไวโอเล็ต ไปจนถึงรังสีอินฟราเรด ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบ ดังแสดงตามรูปที่ 2.45 แล้วเลเซอร์เป็นลำแสงที่มีความยาวคลื่นขนาดเดียว โดยจะเรียกคุณลักษณะนี้ว่า ความเป็นแสงสีเดียว (Monochromaticity) ทั้งนี้ข้อดีของคุณลักษณะความเป็นแสงสีเดียวก็คือ ช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นในการออกแบบด้านออปติก ดัชนีหักเหของแสงจะแปรผันไปตามความยาวคลื่น ดังนั้นจึงเกิดปรากฏการณ์หนึ่งขึ้นที่แสงธรรมชาติ ซึ่งส่องผ่านเลนส์จะแผ่ขยายตามความยาวคลื่นของแสงชนิดนั้น ๆ สามารถเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ความคลาดเคลื่อนของสีเนื่องจากเลเซอร์มีความยาวคลื่นขนาดเดียว



รูปที่ 2.45 แสดงการเปรียบเทียบความเป็นแสงสีเดียว (Monochromaticity) ระหว่างแสงธรรมชาติและแสงเลเซอร์

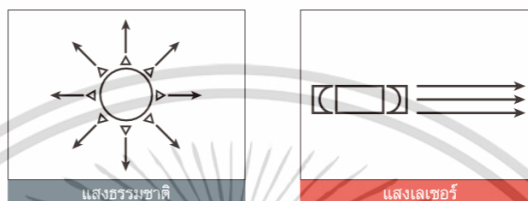
ที่มา: <https://www.keyence.co.th/ss/products/marketing/lasermarker/knowledge/principle.jsp>

2.5.2.2 การมีทิศทางที่การมีทิศทางที่แน่นอน (Directionality)

เป็นคุณสมบัติในการรักษาทิศทางของเสียงหรือแสง ขณะเคลื่อนที่ผ่านช่องว่างในอากาศ การที่แสงเลเซอร์มีทิศทางที่แน่นอนสูงเป็นสิ่งที่แสดงให้เห็นว่ามีการรักษาทิศทางนี้ไว้ในระดับที่สูง โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มีการแผ่ขยายเพียงเล็กน้อยแสงธรรมชาติเป็นชุดลำแสงที่มีการแผ่ขยายไปในทุกทิศทาง ซึ่งมีการเปรียบเทียบทิศทางของแสงเลเซอร์กับแสงธรรมชาติ ดังแสดงตามรูปที่ 2.46 ในการที่จะเพิ่มการมีทิศทางที่แน่นอนของแสงธรรมชาตินั้นสิ่งจำเป็นที่ต้องใช้ก็คือ ระบบลำแสงแบบซับซ้อน ที่ทำหน้าที่กำจัดแสงที่มีการแผ่ขยายไปในทิศทางอื่น ๆ นอกเหนือจากทิศทางที่ต้องการ เมื่อเปรียบเทียบกันแล้วแสงเลเซอร์จะมีการมีทิศทางที่แน่นอนสูง ทำให้ง่ายต่อการออกแบบระบบลำแสงที่แสงเดินทาง โดยไม่มีการแผ่ขยาย ดังนั้นจึงสามารถส่งผ่านแสงเลเซอร์ได้ในระยะไกลแน่นอน (Directionality)



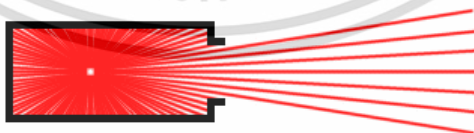
รูปที่ 2.46 แสดงการเปรียบเทียบการมีทิศทางที่แน่นอน (Directionality)

ระหว่างแสงธรรมชาติและแสงเลเซอร์

ที่มา: <https://www.keyence.co.th/ss/products/markings/lasermarker/knowledge>

2.5.2.3 ความพร้อมเพรียง (Coherent)

ความพร้อมเพรียง (Coherent) หมายถึง ระดับที่แสงมีการรบกวนภายในตัวเอง เมื่อพิจารณาว่าแสงเป็นคลื่นอาจกล่าวได้ว่ายิ่งแสงมีเฟสเดียวกันมากเท่าไรก็ยิ่งมีความพร้อมเพรียงของแสงมากเท่านั้น เรื่องนี้มีความคล้ายคลึงกับรูปแบบการกระทบกับพื้นผิวน้ำของคลื่น ซึ่งจะ ทำให้เพิ่มหรือหักล้างความเข้มกันเอง คือ ยิ่งคลื่นมีทิศทางไม่แน่นอน (Random) มากเท่าไร ก็ยิ่งลดระดับการรบกวนของคลื่นมากเท่านั้น เนื่องจากเฟสความยาวคลื่น และทิศทางของแสงเลเซอร์นั้นเท่ากันจึงสามารถรักษาความแรงของคลื่นไว้ได้ แหล่งกำเนิดแสงขนาดเล็กเพียงแหล่งเดียวจะสามารถส่งคลื่นออกไปทุกทิศทาง ดังแสดงตามรูปที่ 2.47



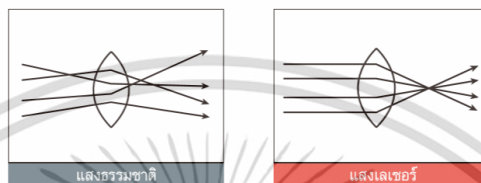
รูปที่ 2.47 แสดงแหล่งกำเนิดแสงที่ส่งคลื่นออกไปทุกทิศทางของแสงเลเซอร์

ที่มา: <http://amasci.com/miscon/coherenc.html>

2.5.2.4 ความหนาแน่นของพลังงานสูง

เนื่องจากเลเซอร์มีคุณลักษณะเด่นในด้านความเป็นแสงสีเดียว การที่มีทิศทางที่แน่นอน และความพร้อมเพรียง จึงสามารถนำมารวมเป็นจุดที่มีขนาดเล็กมาก ๆ ได้ ช่วยให้แสงเลเซอร์เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถผลิตแสงที่มีความหนาแน่นของพลังงานสูง โดยรวมแสงเลเซอร์ได้เกือบเท่ากับขีดจำกัดการกระจายแสง ซึ่งไม่สามารถทำได้ในแสงธรรมชาติ (มีขีดจำกัดการกระจายแสงเนื่องจากเป็นไปไม่ได้ที่จะรวมแสงให้มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นของตัวมันเองได้) เมื่อรวมแสงเลเซอร์ให้กลายเป็นลำแสงขนาดเล็กแล้วก็จะสามารถเพิ่มความเข้ม (ความเข้มขึ้นของพลังงาน) ของแสงขึ้นจนถึงระดับที่เลเซอร์สามารถตัดโลหะได้ และการเปรียบเทียบความหนาแน่นของพลังงานระหว่างแสงธรรมชาติและแสงเลเซอร์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.48

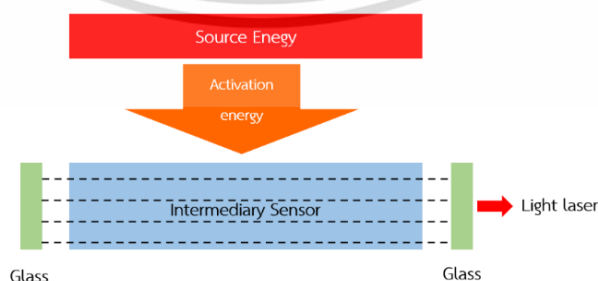


รูปที่ 2.48 แสดงการเปรียบเทียบความหนาแน่นของพลังงานสูงระหว่างแสงธรรมชาติและแสงเลเซอร์
ที่มา : <https://www.keyence.co.th/ss/products/markin>

2.5.3 โครงสร้างของเลเซอร์

เมื่อนำปัจจัยที่กล่าวมาทั้งหมดในหัวข้อก่อนหน้านี้มาพิจารณา จะพบว่าในทางปฏิบัติ โครงสร้างของเครื่องกำเนิดแสงเลเซอร์จะต้องมีองค์ประกอบสำคัญ 3 ส่วน ดังต่อไปนี้ และแสดงตามรูปที่ 2.49

1. ตัวกลางเลเซอร์ (laser medium) เป็นวัสดุที่ถูกกระตุ้นแล้วให้แสงเลเซอร์ออกมา ซึ่งอาจเป็นแก๊ส ของแข็ง ของเหลว หรือสารกึ่งตัวนำ
2. ออปติคัลเรโซเนเตอร์ (optical resonator) เป็นส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดเลเซอร์ที่ทำให้เกิดการปล่อยแสงแบบถูกกระตุ้นซ้ำแล้วซ้ำอีก ซึ่งประกอบด้วยกระจก 2 แผ่น วางหันหน้าเข้าหากัน โดยระหว่างกลางมีตัวกลางเลเซอร์อยู่
3. แหล่งกำเนิดพลังงาน (energy source) เป็นตัวกระตุ้นอะตอม



รูปที่ 2.49 แสดง 3 องค์ประกอบสำคัญของเลเซอร์

ที่มา: <https://www.keyence.co.th/ss/products/markin/lasermarker>

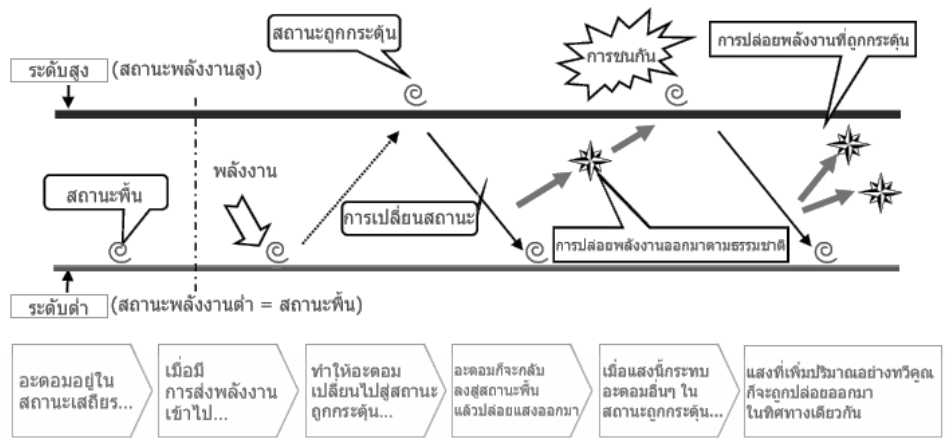
/knowledge/principle.jsp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 หลักการทำงานของเลเซอร์

อะตอม (โมเลกุล) ดูดซับพลังงานจากภายนอกจะเลื่อนจากระดับต่ำ (สถานะพลังงานต่ำ) ไปสู่ระดับสูง (สถานะพลังงานสูง) สถานะนี้อธิบายได้ว่าเป็นสถานะถูกกระตุ้น สถานะถูกกระตุ้นนี้เป็นสถานะที่ไม่เสถียร เพราะอะตอมอาจกลับไปสู่สถานะพลังงานต่ำได้ทันที ซึ่งเรียกว่า การเปลี่ยนสถานะ เมื่อเกิดขึ้นแสงที่มีค่าเท่ากับความต่างของพลังงานจะถูกปล่อยออกมา ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การปล่อยพลังงานออกมาตามธรรมชาติ แสงที่ปล่อยออกมาเมื่อชนเข้ากับอะตอมอื่น ๆ ที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นเหมือนกัน จะทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะในแบบเดียวกัน แสงที่ปล่อยออกมานี้เรียกว่าแสงที่เกิดจากการกระตุ้นให้ปล่อยแสง สามารถแสดงหลักการทำงานของเลเซอร์ได้ ดังแสดงตามรูปที่ 2.50

เมื่อมีการเพิ่มพลังงานเข้าไปจะทำให้อยู่ในสภาวะ “การขยายแสง” ซึ่งหมายถึงการเพิ่มจำนวนของโฟตอนหรือให้ความเข้มแสงดีขึ้นกว่าปกติ โดยทั่วไปอะตอมหรือโมเลกุลที่อยู่ในระดับชั้นพลังงานต่ำถือว่าเป็นชั้นปกติ คือ E1 เนื่องจากเป็นสภาวะที่มีความเสถียรมากกว่า อะตอมหรือโมเลกุลจะถูกกระตุ้นให้ดูดกลืนแสงหรือพลังงาน ที่ช่วยให้อะตอมหรือโมเลกุลขยับขึ้นไปอยู่ในชั้นที่มีพลังงานสูงกว่าเดิม หรือ E2 อย่างไรก็ตามสถานะของพลังงานในชั้นนี้จะไม่มีความเสถียร อาจคงตัวได้เพียงระยะสั้นหรือชั่วคราวเท่านั้นก็จะคลายพลังงานออกมา เพื่อให้ตัวมันเองกลับเข้าสู่สภาวะเสถียรในชั้นพลังงาน E1 อีกครั้ง อย่างไรก็ตาม การเปล่งแสงเมื่อถูกกระตุ้น (Stimulated Emission) ซึ่งถือว่าเป็นหลักการสำคัญของเลเซอร์จะต่างจากการเปล่งแสงที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติข้างต้น เมื่ออะตอมหรือโมเลกุลถูกดันให้ขึ้นไปอยู่ในระดับที่สูงกว่าคือ E2 โดยการฉายแสงเข้าไป แสงที่เข้าไปนั้นจะต้องมีค่าพลังงานเท่ากับผลต่างของชั้นพลังงาน E2 - E1 ไม่ว่าจะเป็พลังงานที่อะตอมหรือโมเลกุลดูดกลืนเข้าไป แสงดังกล่าวที่เข้าไปนี้จะทำให้เกิดการคลายพลังงานที่ดูดกลืนเอาไว้ก่อนเวลา ทำให้แสงที่คลายออกมามีขนาดเท่า ๆ กันกับแสงที่ฉายเข้าไปเป็นตัวเร้า ไม่ว่าจะเป็ทิศทางหรือการเคลื่อนที่ก็จะเป็นแบบเดียวกันทั้งสิ้น รวมไปถึงเฟสของคลื่นก็จะเป็นแบบเดียวกัน ด้วยหลักการดังกล่าวจึงถูกนำมาใช้ในเทคโนโลยีการทำเลเซอร์ในปัจจุบัน อะตอมหรือโมเลกุลของเนื้อวัสดุที่นำมาใช้สำหรับการทำเลเซอร์ จะต้องอยู่ในสภาวะที่ถูกกระตุ้น แสงจะเคลื่อนที่ผ่านเนื้อวัสดุของเลเซอร์ที่ถูกกระตุ้นแล้ว ก็จะทำให้เกิดการคลายแสงที่มากขึ้นกว่าเดิม ให้ความเข้มขึ้นแสงมากขึ้นไปในตัว ก็จะได้จำนวนโฟตอนสูงขึ้น หลักการนี้เป็นการขยายแสงเพื่อให้โฟตอนมีจำนวนมากขึ้นพอที่จะนำไปใช้งาน โดยการใส่กระจก 2 ชิ้นวางขนานกันเอาไว้ที่ปลายสองด้านของเนื้อวัสดุ โดยกระจกที่นำมาใช้ถูกเรียกว่า “optical resonator” โดยมีหน้าที่สะท้อนให้โฟตอนวิ่งไปมาในเนื้อวัสดุที่เป็นตัวกลางของเลเซอร์ในปริมาณที่มากพอ จนได้ความเข้มขึ้นสูงก็จะเกิดช่วงที่มีค่ามากกว่าพลังงานของระบบลำแสง ทำให้เกิดการพุ่งออกมาของเลเซอร์ ซึ่งพบว่าเลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีคุณสมบัติพิเศษ เรียกว่า โคฮีเรนต์ (coherent) ซึ่งหมายถึงแหล่งกำเนิดแสงที่มีเพียงแค่แสงเดียว มีเฟสเดียว มีทิศทางที่แนชัด ไม่มีบิดเบี้ยว และมีความเข้มขึ้นของแสงสูง



รูปที่ 2.50 แสดงหลักการทำงานของเลเซอร์

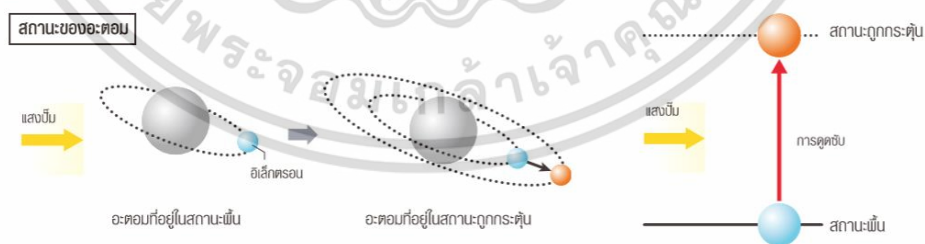
ที่มา: <https://www.keyence.co.th/ss/products/marketing/lasermarker/knowledge/principle.jsp>

2.5.5 หลักการเบื้องต้นหลังการสร้างเลเซอร์

เป็นการอธิบายถึงหลักการทำงานที่นำไปสู่การออสซิลเลเตอร์ของแสงเลเซอร์ โดยจะมี 2 ขั้นตอน ได้แก่ การเร่งประจุ และการปล่อยพลังงานออกมาตามธรรมชาติ สามารถอธิบายได้ดังนี้

2.5.5.1 การเร่งประจุ

ในการสร้างเลเซอร์จะต้องใช้อะตอมหรือโมเลกุลที่เรียกว่า ตัวกลางเลเซอร์ (Laser Medium) การทำให้ตัวกลางเลเซอร์นี้สัมผัสกับพลังงานภายนอก จะทำให้อะตอมเปลี่ยนจากสถานะพื้นซึ่งมีพลังงานต่ำไปสู่สถานะถูกกระตุ้นซึ่งมีพลังงานสูง ในสถานะถูกกระตุ้นอิเล็กตรอนในอะตอมจะเคลื่อนที่จากเชลล์ด้านในสู่เชลล์ด้านนอก ดังแสดงตามรูปที่ 2.51



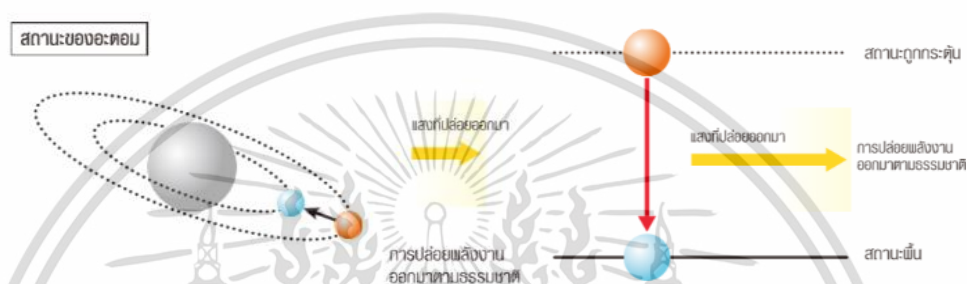
รูปที่ 2.51 แสดงหลักการเร่งประจุเพื่อสร้างเลเซอร์

ที่มา: <https://www.keyence.co.th/ss/products/marketing/lasermarker/knowledge/principle.jsp>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.5.2 การปล่อยพลังงานออกมาตามธรรมชาติ

หลังจากที่เวลาผ่านไปช่วงหนึ่ง โดยที่อะตอมอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น อะตอมจะกลับสู่สถานะพื้น ดังแสดงตามรูปที่ 2.52 ช่วงเวลาที่อะตอมใช้ในการกลับจากสถานะถูกกระตุ้นสู่สถานะพื้นเรียกว่า ระยะเวลาฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence Lifetime) ซึ่งในช่วงเวลานี้ พลังงานที่ได้รับมาจากอะตอมจะถูกปล่อยออกมาในรูปแบบของแสง (การปล่อยพลังงานออกมาตามธรรมชาติ) ที่มีความยาวคลื่นที่ทราบล่วงหน้า ทั้งนี้หลักการสร้างเลเซอร์จะใช้กระบวนการเร่งประจุ และการปล่อยพลังงานออกมาตามธรรมชาติเพื่อสร้างแสงเลเซอร์

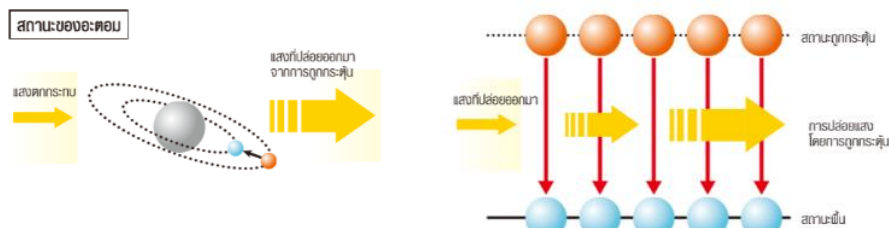


รูปที่ 2.52 แสดงหลักการปล่อยพลังงานออกมาตามธรรมชาติของเลเซอร์

ที่มา: <https://www.keyence.co.th/ss/products/markimg/lasermarker/knowledge/principle.jsp>

2.5.6 หลักการเพิ่มความเข้มของเลเซอร์

การเพิ่มความเข้ม สามารถทำได้โดยวิธีการปล่อยพลังงานที่ถูกกระตุ้น ดังแสดงตามรูปที่ 2.53 ในการนำเอาแสงที่ปล่อยออกมาตามธรรมชาติมาใช้เป็นเลเซอร์ จะต้องมีการเพิ่มจำนวนแสงที่ปล่อยออกมาตามธรรมชาติ อะตอมที่คงอยู่ในสถานะถูกกระตุ้นเป็นระยะเวลาที่กำหนดไว้จะปล่อยแสงออกมาเนื่องจากการปล่อยพลังงานออกมาตามธรรมชาติ จากนั้นก็จะกลับสู่สถานะพื้น อย่างไรก็ตามหากแสงได้รับการเพิ่มความเข้ม จำนวนอะตอมในสถานะถูกกระตุ้นตลอดจนจำนวนแสงที่ปล่อยออกมาตามธรรมชาตินี้ก็จะเพิ่มขึ้น ซึ่งนำไปสู่ปรากฏการณ์ที่เรียกว่า การปล่อยแสงโดยการถูกกระตุ้น (Stimulated Emission) ทั้งนี้การปล่อยแสงโดยการถูกกระตุ้นเกิดขึ้นเมื่อมีการใช้แสงกับอะตอมที่ถูกกระตุ้น เพื่อกระตุ้นอะตอมและสร้างแสงที่มีความเข้มเพิ่มขึ้น กล่าวได้ว่า ยังมีจำนวนอะตอมที่อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นมากเท่าไร ก็ยังมีจำนวนการปล่อยแสงโดยการถูกกระตุ้นมากขึ้นเท่านั้น ด้วยวิธีการดังกล่าวแสงจะถูกเพิ่มจำนวนที่ความเร็วสูง ทำให้เกิดแสงที่มีความพร้อมเพรียงและมีความเป็นแสงสีเดียว ซึ่งผลที่ได้ก็คือเลเซอร์



รูปที่ 2.53 แสดงการปล่อยพลังงานที่ถูกกระตุ้นของเลเซอร์

ที่มา: <https://www.keyence.co.th/ss/products/marketing/lasermarker/knowledge/principle.jsp>

2.5.7 โครงสร้างของเลเซอร์ออสซิลเลเตอร์

เลเซอร์ได้รับการจำแนกประเภทตามตัวกลางที่ใช้ และโดยทั่วไปแล้วจะแบ่งได้เป็นกลุ่มหลัก ๆ 4 กลุ่มด้วยกัน โดยส่วนประกอบบางส่วนของที่แปรผันไปตามการจำแนก ประเภทของเลเซอร์ ได้แก่ ตัวกลางเลเซอร์ โครงสร้าง ความยาวคลื่นของการแกว่งกวัด และแหล่งเร่งประจุ ทั้งนี้ตัวกลางเลเซอร์เป็นวัสดุที่มีอะตอมซึ่งจะแปลงแสงให้กลายเป็นแสงเลเซอร์ ดังแสดงตามตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 ชนิดของตัวกลางที่ใช้ในการสร้างแสงเลเซอร์

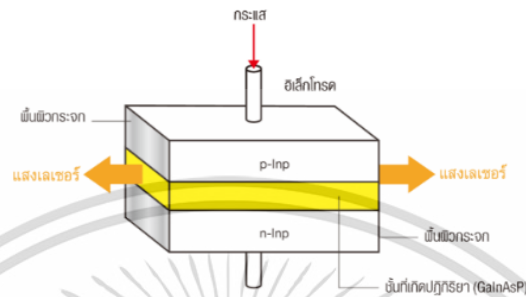
ชนิด	ตัวกลาง	ความยาวคลื่นของการแกว่งกวัด (nm)
เลเซอร์แบบโซลิตสเดท	Nd , YAG , ND , YVO4	1064
เลเซอร์ก๊าซ	CO ₂	10600
เซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์	AlGaAs , AlGaInP , GaN ฯลฯ	หลากหลาย
ไฟเบอร์เลเซอร์	ไฟเบอร์เจือ Nd/Yb	1000 ถึง 1150

2.5.7.1 เซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์ (Semi-Conductor Laser)

ผลึกเซมิคอนดักเตอร์ที่ใช้วัสดุชนิดต่าง ๆ จะวางซ้อนกัน ดังแสดงตามตัวอย่างในรูปที่ 2.54 เพื่อสร้างเป็นชั้นที่เกิดปฏิกิริยา (ชั้นที่มีการปล่อยแสง) โดยแสงที่เกิดขึ้นในชั้นนี้ จะถูกสร้างขึ้นเพื่อให้เคลื่อนที่กลับไปกลับมาระหว่างกระจกหนึ่งคู่ที่วางไว้ที่ปลายทั้งสองด้าน ซึ่งทำหน้าที่เพิ่มจำนวนแสง และสร้างเลเซอร์เป็นเลเซอร์ที่ใช้สารกึ่งตัวนำเป็นตัวกลาง และเป็นเลเซอร์ที่มีจำนวนมากที่สุด มีลักษณะคล้ายกันกับ LED (light emitting diode) แต่มีลักษณะพิเศษบางประการ ทำให้แสงที่ออกมาเป็นเลเซอร์ โดย LED จะให้แสงจากการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง แต่เลเซอร์สารกึ่งตัวนำให้แสงจากการเปล่งแสงแบบถูกเร่ง แสงในเลเซอร์ชนิดนี้เกิดจากการรวมตัวของ

อิเล็กตรอนกับหลุม (hole) ที่บริเวณรอยต่อ P-N ของสาร กึ่งตัวนำ เช่น GaAs, GaP และ GaAlAs เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่นของแสงขึ้นกับชนิดของสารกึ่งตัวนำที่ใช้เป็นตัวกลาง โดยความยาวคลื่นหลัก ๆ คือ 650, 770, 1,100 และ 1,500 นาโนเมตร สามารถประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์หลายชนิด เช่น ปริ้นเตอร์ เลเซอร์ พอยน์เตอร์ ดังแสดงตามตัวอย่างในรูปที่ 2.55 กำลังของเลเซอร์ที่ได้มีตั้งแต่ระดับ มิลลิวัตต์ ถึง วัตต์ แต่สามารถนำเลเซอร์สารกึ่งตัวนำหลาย ๆ อันมารวมกันให้มีกำลังสูงเป็นระดับ กิโลวัตต์ ได้



รูปที่ 2.54 แสดงโครงสร้างเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์ (Semi-Conductor Laser)

ที่มา: <https://www.fiberlabs.com/glossary/laser-diode/>



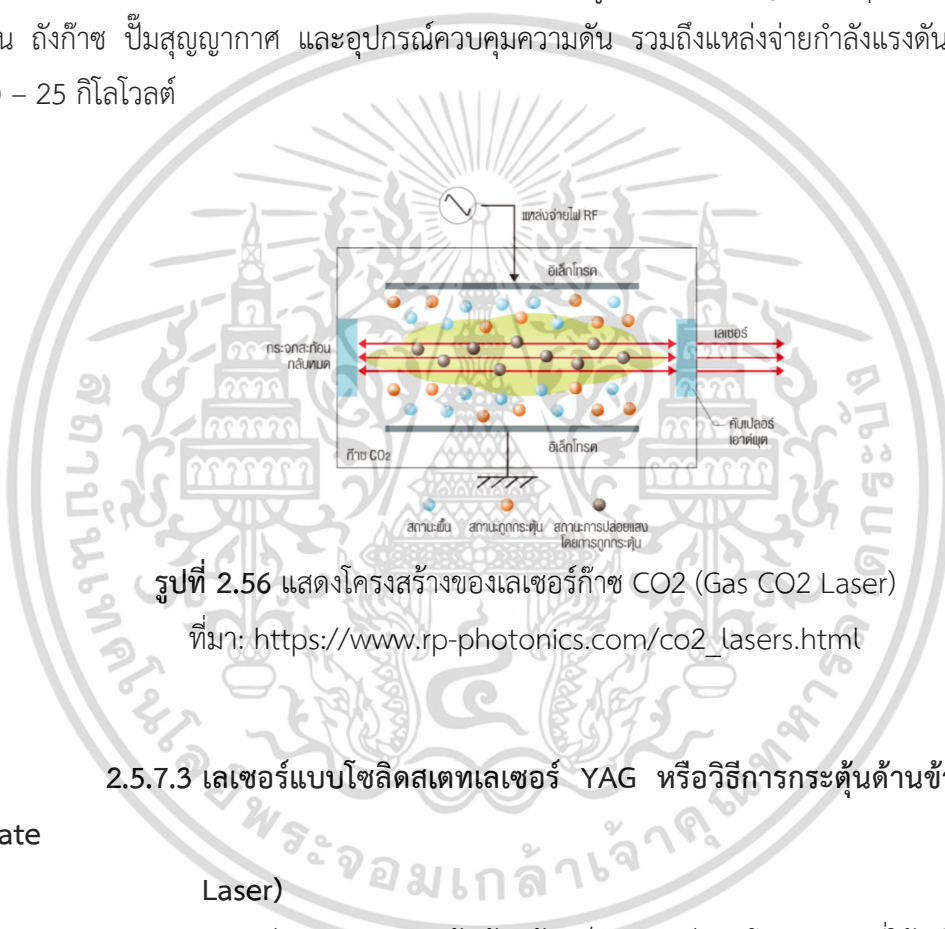
รูปที่ 2.55 เลเซอร์พอยน์เตอร์ เป็นเลเซอร์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบเซมิคอนดักเตอร์เลเซอร์ (Semi-Conductor Laser)

ที่มา: <https://www.vegashdtv.com/high-power-5mw-red-laser-pointer-pen-visible-beam.html>

2.5.7.2 เลเซอร์ก๊าซ CO₂ (Gas CO₂ Laser)

เลเซอร์ CO₂ จะใช้ก๊าซ CO₂ เป็นตัวกลาง โดยมีการจัดเรียงอิเล็กโทรดที่ใช้สำหรับการปล่อยประจุไฟฟ้าในท่อปิดที่บรรจุก๊าซ CO₂ แผ่นอิเล็กโทรดจะเชื่อมต่ออยู่กับองค์ประกอบภายนอก ดังแสดงตามรูปที่ 2.56 เพื่อให้สัมผัสกับพลังงานไฟฟ้าความถี่สูง ซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งเร่งประจุทั้งนี้การปล่อยประจุไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดจะทำให้เกิดพลาสมาขึ้นในก๊าซ ซึ่งทำให้โมเลกุลของ CO₂ เปลี่ยนไปสู่สถานะถูกกระตุ้น เมื่อจำนวนโมเลกุลที่ถูกกระตุ้นเหล่านี้เพิ่มขึ้นก็เริ่มเกิดการปล่อยแสงโดยการถูกกระตุ้น แสงจะแกว่งกลับไปกลับมาระหว่างกระจกสะท้อนกลับหมด (Total Reflect Mirror) และคัมเปลอร์เอาต์พุตจนกระทั่งได้ออกมาเป็นเลเซอร์ ซึ่งความยาวคลื่นของการแกว่งกวัดที่พบโดยทั่วไปจะเท่ากับ 10.6 ไมโครเมตร โดยองค์ประกอบของก๊าซมีดังนี้ COLT2 <10 %, เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ท่านไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไนโตรเจน (N₂) ประมาณ 30 %, ซีซีนอน (Xe) ไม่ก็เปอร์เซ็นต์ และที่เหลือ คือฮีเลียม (He) โดยเปอร์เซ็นต์องค์ประกอบจะแตกต่างกันไประหว่างก๊าซชนิดต่าง ๆ และองค์ประกอบจะเปลี่ยนไปตามโครงสร้างและคุณลักษณะของเลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์เลเซอร์ โดยทั่วไปจะมีค่ากำลังเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 10 – 2,000 วัตต์ ถ้าประยุกต์ใช้ในงานการตัดกระดาษ ตัดผ้า หรือในงานแกะสลักพลาสติกและแกะสลักไม้ จะใช้กำลังอยู่ที่ประมาณ 10 – 5 วัตต์ แต่ถ้าใช้ในการตัด เจาะโลหะหรือวัสดุที่มีความแข็งสูงมาก จะต้องใช้กำลังอยู่ที่ประมาณ 100 วัตต์ ขึ้นไปทำให้เลเซอร์ชนิดนี้ไม่เหมาะในการนำมาประยุกต์ใช้ในงานการแกะสลักหรือเจาะวัสดุที่มีความแข็งสูง โดยส่วนใหญ่แล้วมักใช้กับวัสดุจำพวกโลหะ เนื่องจากระบบคาร์บอนไดออกไซด์ชนิดที่มีกำลังสูงจะมีขนาดใหญ่ และมีอุปกรณ์เสริมต่อพ่วง เช่น ถังก๊าซ บั๊มสุญญากาศ และอุปกรณ์ควบคุมความดัน รวมถึงแหล่งจ่ายกำลังแรงดันสูงประมาณ 10 – 25 กิโลโวลต์



รูปที่ 2.56 แสดงโครงสร้างของเลเซอร์ก๊าซ CO₂ (Gas CO₂ Laser)

ที่มา: https://www.rp-photonics.com/co2_lasers.html

2.5.7.3 เลเซอร์แบบโซลิตสเทตเลเซอร์ YAG หรือวิธีการกระตุ้นด้านข้าง (Solid-State Laser)

เลเซอร์ YAG แบบกระตุ้นด้านข้างเป็นเลเซอร์แบบโซลิตสเทตที่ใช้ผลึก YAG เป็นตัวกลาง ดังแสดงตามรูปที่ 2.57 เลเซอร์ YAG (Yttrium Aluminum Garnet) เป็นผลึกที่เจือด้วย Nd (Neodymium) ออสซิลเลเตอร์จะประกอบด้วยเลเซอร์ไดโอดกระตุ้น ซึ่งวางเรียงขนานกับแกนผลึก YAG แต่ละด้าน สำหรับตัวสะท้อนจะสร้างขึ้นจากกระจกหนึ่งคู่ และมี Q switch วางอยู่ระหว่างกระจกทั้งสอง ทั้งนี้ความยาวคลื่นของการแกว่งกวัดจะเท่ากับ 1,064 นาโนเมตร เนื่องจากเป็นวิธีการกระตุ้นด้านข้าง จึงมีการใช้แสงเป็นพื้นที่กว้าง ทำให้สามารถใช้พลังงานในปริมาณที่สูง ดังนั้นจึงได้เอาต์พุตออกมาสูงด้วย เมื่อเปรียบเทียบแล้วจะมีความกว้างของพัลส์ที่ยาว คือ 100 นาโนวินาที ถึงไม่กี่มิลลิวินาที ซึ่งทำให้สามารถสร้างพัลส์ที่มีพลังงานพัลส์ในปริมาณมาก โดยทั่วไปแล้วเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหล่านี้จะใช้ในการมาร์ก การตัด การสลัก และการเชื่อมโลหะ Q-switch เป็นส่วนประกอบที่สามารถเปลี่ยนทิศทางที่แสงเพิ่มจำนวน เมื่อเปิด Q-switch แสงภายในตัวสะท้อนจะโค้งงอ ซึ่งจะหยุดไม่ให้เกิดการปล่อยการกวัดแกว่งที่ด้านนอกของตัวสะท้อน ในสถานการณ์นี้จะไม่มีการกวัดแกว่งเกิดขึ้น (ไม่มีการปล่อยแสงโดยการถูกกระตุ้น) ดังนั้นจำนวนของอะตอมที่ถูกกระตุ้นภายในจะเพิ่มขึ้น และผลที่ได้ก็จะสูงขึ้นหากปิด Q-switch จะทำให้แสงเดินทางกลับไปอยู่ภายในตัวสะท้อน ซึ่งจะเพิ่มจำนวนอะตอมที่ถูกกระตุ้นอย่างรวดเร็ว และผลที่ได้ก็คือ แสงจะออกมาในรูปแบบของพัลส์ โดยทั่วไปนีโอดีเมียมแย็กเลเซอร์ มีกำลังเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 3 – 1,000 วัตต์ สามารถให้แสงได้ทั้งแบบพัลส์ และแบบต่อเนื่อง ขึ้นอยู่กับว่าตัวกระตุ้นที่ใช้เป็นแบบหลอดไฟแฟลช หรือหลอดไฟอาร์ค เลเซอร์ชนิดนี้มีความยาวคลื่น 1,064 นาโนเมตร อยู่ในย่านอินฟราเรด เนื่องจากเลเซอร์ชนิดนี้สามารถทำให้เกิดค่ากำลังสูงสุดถึง 2,000 วัตต์ได้ ภายในระบบเลเซอร์ที่มีค่ากำลังเฉลี่ย 3 วัตต์ เท่านั้น จึงทำให้ระบบเลเซอร์ซึ่งมีขนาดเล็ก สามารถนำไปทำการเจาะ ตัด หรือแกะสลักวัสดุที่มีความแข็งสูง วัสดุจำพวกโลหะ หรือวัสดุเช่นแก้ว เซรามิก อัญมณี ได้เป็นอย่างดี ปัจจุบันระบบนีโอดีเมียมแย็กเลเซอร์ส่วนใหญ่ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม จะเป็นแบบใช้หลอดไฟแฟลช หรือหลอดไฟอาร์ค ซึ่งระบบนี้มีการสิ้นเปลืองพลังงานมาก เนื่องจากพลังงานทั้งหมดที่ใส่ให้แก่หลอดอาร์คจะมีเพียง 4 – 7% เท่านั้นที่ถูกนำไปใช้ในการกระตุ้น ส่วนที่เหลือคือความร้อนซึ่งจะต้องถูกระบายทิ้งออกไป



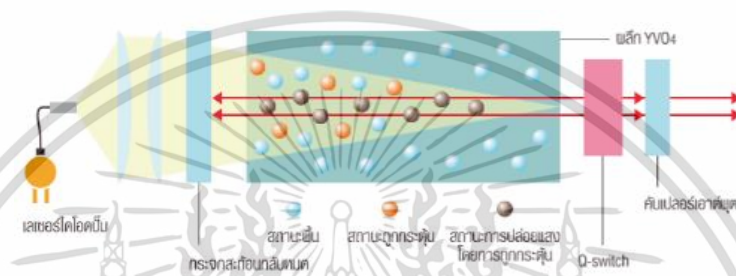
รูปที่ 2.57 แสดงโครงสร้างของแบบโซลิดสเตท , เลเซอร์ YAG, วิธีการกระตุ้นด้านข้าง (Solid-State Laser)

ที่มา: <https://www.keyence.co.th/ss/products/markings/lasermarker/knowledge/principle.jsp>

2.5.7.4 เลเซอร์แบบโซลิดสเตท (เลเซอร์ YVO_4 , วิธีการกระตุ้นที่ปลาย)

เลเซอร์ YVO_4 แบบกระตุ้นที่ปลายเป็นเลเซอร์แบบโซลิดสเตทที่ใช้ผลึก YVO_4 เป็นตัวกลางเลเซอร์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.58 YVO_4 คือผลึก Yttrium Vanadate ที่เจือกับ Nd (Neodymium) ในลักษณะเดียวกับเลเซอร์ YAG ในวิธีการนี้จะมีการใช้แสงกระตุ้นจากผิวหน้าของส่วนปลายผลึก YVO_4 ด้านใดด้านหนึ่ง สำหรับตัวสะท้อนนั้นจะประกอบไปด้วยกระจกหนึ่งคู่โดยมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลึกและ Q-switch วางอยู่ระหว่างกระจกทั้งคู่ ทั้งนี้ความยาวคลื่นของการแกว่งกวัดของเลเซอร์แบบโซลิตสเททจะเท่ากับ 1,064 นาโนเมตร ซึ่งเท่ากับความยาวคลื่นของการแกว่งกวัดของเลเซอร์ YAG ปัจจัยการเพิ่มจำนวนที่สูงจะช่วยให้ใช้ผลึกขนาดเล็ก ซึ่งทำให้การแกว่งกวัดสั้นกว่าที่เกิดขึ้นในเลเซอร์ YAG ดังนั้นแสงจะเดินทางไปกลับผ่านผลึกภายในระยะเวลาที่สั้นกว่า ซึ่งเป็นการเพิ่มความเข้มแสงขึ้นอย่างรวดเร็ว ข้อดีของเลเซอร์เหล่านี้ก็คือมีกำลังสูงสุดในระดับสูง ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่าเลเซอร์ YAG นอกจากนี้ ระดับการเพิ่มจำนวนที่ศูนย์กลางของผลึกจะมีมาก และแสงเลเซอร์ที่เกิดขึ้นเป็นแบบโหมดเดี่ยว ซึ่งทำให้ได้เลเซอร์ที่มีคุณภาพสูง



รูปที่ 2.58 แสดงโครงสร้างของเลเซอร์แบบโซลิตสเทท (เลเซอร์ YVO4, วิธีการกระตุ้นที่ปลาย)

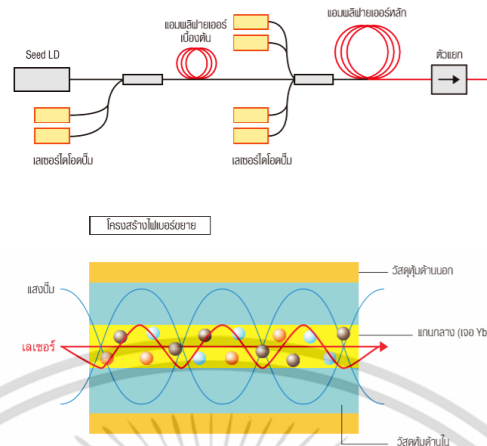
ที่มา: <https://www.keyence.co.th/ss/products/marketing/lasermarker/knowledge/principle.jsp>

2.5.7.5 ไฟเบอร์เลเซอร์ (Fiber Laser)

ไฟเบอร์เลเซอร์จะใช้ไฟเบอร์เป็นตัวกลาง ดังแสดงตามรูปที่ 2.59 และมีเทคโนโลยีการขยายรีเลย์การสื่อสารระยะไกล ซึ่งได้รับการพัฒนามาเพื่อให้ได้เลเซอร์เอาต์พุตสูง ใยแก้วนำแสงจะประกอบด้วยแกนที่แผ่ขยายแสงไปตามศูนย์กลางของไฟเบอร์ และวัสดุหุ้มที่หุ้มแกนกลาง ซึ่งไฟเบอร์เลเซอร์จะใช้แกนนี้เป็นตัวกลางเลเซอร์เพื่อเพิ่มจำนวนแสง ทั้งนี้แกนจะเจือด้วย Yb (Ytterbium) ในองค์ประกอบทั่วไปของไฟเบอร์เลเซอร์ ตัวเลเซอร์ไดโอด (Seed LD) จะใช้ในการสร้างแสงพัลส์ที่เรียกว่าแสง “Seed” และมีการใช้ไฟเบอร์แอมพลิฟายเออร์สองหรือสามชั้นเพื่อเพิ่มจำนวนแสง ภายในเลเซอร์ไดโอดกระตุ้นจะประกอบไปด้วยเลเซอร์ไดโอดตัวยิงลำแสงเดี่ยวหลายตัว เลเซอร์ไดโอดมีเอาต์พุตต่ำ ดังนั้นระบบนี้จึงมีข้อดีในการลดโพลดความร้อน ซึ่งช่วยให้มีอายุการใช้งานยาวนาน นอกจากนี้การเพิ่มจำนวนเลเซอร์ไดโอดจะช่วยเพิ่มเอาต์พุตของเลเซอร์ และไฟเบอร์เลเซอร์ยังมีประสิทธิภาพในการแกว่งกวัดสูงกว่า และใช้พลังงานต่ำกว่าเลเซอร์แบบโซลิตสเทท เลเซอร์ก๊าซไฟเบอร์ จะประกอบไปด้วยชั้นต่าง ๆ สามชั้น ได้แก่ ชั้นกลาง และชั้นหุ้มสองชั้น และจะเคลื่อนที่ไปตามวัสดุหุ้มด้านใน และแกนกลางที่เจือปน Yb ซึ่งจะเปลี่ยนอะตอมภายในชั้นกลางให้เข้าสู่สถานะการถูกกระตุ้น เลเซอร์จะแผ่ขยายในขณะที่ถูกปิดล้อมด้วยแกนกลาง ยิ่งเลเซอร์ที่เพิ่มจำนวนจะอะตอมที่ถูกกระตุ้นเคลื่อนที่ไปไกลเท่าไร เลเซอร์ที่ได้ก็ยิ่งจะมีความเข้มมากขึ้นเท่านั้น ทั้งนี้แสงจะเคลื่อนที่ไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศทางเดียวเท่านั้น และจะไม่มีการเดินทางไปกลับ ซึ่งแตกต่างจากเลเซอร์แบบโซลิตสเตทและเลเซอร์ก๊าซ



รูปที่ 2.59 แสดงโครงสร้างไฟเบอร์เลเซอร์ (Fiber Laser)

ที่มา: <https://www.print3dd.com/laser-co2-fiber-diode/>

2.5.8 ระดับความอันตรายของเลเซอร์ (Laser Classes and Safety)

เนื่องจากเลเซอร์มีมากมายหลายชนิด แต่ละชนิดก็มีหลายแบบซึ่งกำลังความเข้มก็จะแตกต่างกัน อันตรายที่เกิดขึ้นจากการใช้ก็แตกต่างกันไป หรือบางอันอาจจะไม่เกิดอันตรายเลยแม้จะจ้องลำแสงเป็นเวลา 5 นาที แต่บางชนิดเพียงแค่แสงสะท้อนจากขอบแผ่นพลาสติกก็อาจทำให้ตาบอดได้ ดังนั้นระดับของความระมัดระวังการป้องกันก็จะแตกต่างกันไป ไม่ใช่ว่าเลเซอร์ชนิดใดก็มีมาตรการป้องกันเข้มงวดที่สุดเหมือนกันหมด ด้วยเหตุนี้จึงมีการแบ่งระดับความอันตรายของเลเซอร์ โดยแบ่งเป็น 4 ระดับ (Class) ดังนี้

2.5.8.1 ระดับที่ 1 (Class 1)

เป็นเลเซอร์ที่กำลังน้อยมากจนถือได้ว่าปลอดภัย โดยเลเซอร์ระดับนี้จะไม่เป็นอันตรายต่อตา ผิวหนัง หรือส่วนใดส่วนหนึ่งของร่างกาย ซึ่งในการใช้งานเลเซอร์ระดับที่ 1 นี้ไม่ต้องมีการควบคุมหรือมีเครื่องหมายเตือน นอกจากป้ายติดไว้ที่เลเซอร์ว่าเป็นเลเซอร์ระดับที่ 1 ตัวอย่างเช่น ฮีเลียมนีออนเลเซอร์ขนาด 1 ไมโครวัตต์ ระดับที่ 1M (Class 1M, Magnifier) เลเซอร์ระดับที่ 1M ประกอบด้วยเลเซอร์ที่ทำให้กำลังมากกว่าเลเซอร์ระดับที่ 1 แต่มีลำแสงที่สามารถขยายออกได้โดยใช้อุปกรณ์ทางทัศนศาสตร์

2.5.8.2 ระดับที่ 2 (Class 2)

เลเซอร์ในระดับนี้ จะเป็นเลเซอร์ที่กำลังต่ำ และมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่สามารถเห็นได้ (ความยาวคลื่นในช่วง 400 - 700 นาโนเมตร) โดยมีกำลังไม่เกิน 1 มิลลิวัตต์ และต้องเป็นชนิดต่อเนื่องเท่านั้น เลเซอร์ในระดับที่ 2 นี้ไม่จัดว่าปลอดภัยเหมือนเลเซอร์ระดับที่ 1 แต่มีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อันตรายไม่มาก และถ้าแสงเลเซอร์ในระดับที่ 2 เข้าตาการหลับตาทันทีที่รู้ว่าแสงเข้า ซึ่งปกติจะเร็วมาก (ประมาณ 0.25 วินาที) ก็จะเป็นการป้องกันอันตรายที่เพียงพอ เพราะช่วงเวลาที่รับเอาแสงจะสั้นมากจนไม่เป็นอันตราย ตัวอย่างของเลเซอร์ในระดับที่ 2 นี้ได้แก่ ฮีเลียมนีออนเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร (สีแดง) และมีกำลังไม่เกิน 1 มิลลิวัตต์ ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในห้องทดลองระดับชั้นมัธยมหรือการทดลองพื้นฐานในระดับมหาวิทยาลัย สำหรับมาตรการป้องกันที่ควรใช้คือ การติดป้ายที่เลเซอร์ แสดงว่าเป็นเลเซอร์ระดับที่ 2 และการมีป้ายเตือน ให้หลีกเลี่ยงการจ้องไปที่ลำแสง ระดับที่ 2M (Class 2M, Magnifier) เลเซอร์ระดับที่ 2M ประกอบด้วยเลเซอร์ประเภทเดียวกับในระดับที่ 2 แต่ให้กำลังมากกว่าเลเซอร์ระดับที่ 2

2.5.8.3 ระดับที่ 3R (Class 3R: Restricted)

เลเซอร์ในระดับนี้ประกอบด้วยเลเซอร์ทั้งในย่านที่ตามองเห็น และมองไม่เห็น โดยในย่านที่ตามองเห็นความยาวคลื่นจะอยู่ในช่วง 400 - 700 นาโนเมตร ประกอบด้วยเลเซอร์ที่มีกำลังอยู่ระหว่าง 1 มิลลิวัตต์ ถึง 5 มิลลิวัตต์ และในย่านที่ตามองไม่เห็น เช่น อินฟราเรด และอัลตราไวโอเล็ต ประกอบด้วยเลเซอร์ที่มีกำลังมากกว่ากำลังของเลเซอร์ระดับที่ 1 แต่น้อยกว่า 5 เท่าของกำลังของเลเซอร์ระดับที่ 1 ตัวอย่างของเลเซอร์ระดับที่ 3R คือ เลเซอร์อาร์กอนที่ให้แสงสีเขียว มีความยาวคลื่น 514.5 นาโนเมตร ที่มีกำลัง 5 มิลลิวัตต์ ผู้ใช้งานห้ามมองเข้าไปในลำแสงเลเซอร์หรือแสงสะท้อนของเลเซอร์

2.5.8.4 ระดับที่ 3B (Class 3B)

ประกอบด้วยเลเซอร์ ทั้งในย่านที่ตามองเห็น และมองไม่เห็นย่านที่ตามองเห็น (ความยาวคลื่นช่วง 400 - 700 นาโนเมตร) ประกอบด้วยเลเซอร์ที่มีกำลังอยู่ระหว่าง 5 มิลลิวัตต์ ถึง 500 มิลลิวัตต์ ย่านที่ตามองไม่เห็น เช่น อินฟราเรด และอัลตราไวโอเล็ต ประกอบด้วยเลเซอร์ที่มีกำลังมากกว่า 5 เท่าของกำลังของเลเซอร์ระดับที่ 1 แต่ต่ำกว่า 500 มิลลิวัตต์ ห้ามมองเข้าไปในลำแสงเลเซอร์หรือแสงสะท้อนของเลเซอร์ เลเซอร์ที่มีกำลังสูงอาจทำอันตรายต่อผิวหนังได้ เลเซอร์ในระดับที่ 3 เป็นเลเซอร์ที่มีกำลังปานกลาง และจะพบในห้องทดลองวิจัยทั่ว ๆ ไป ซึ่งมีอันตรายมากขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีอุปกรณ์ป้องกัน

2.5.8.5 ระดับที่ 4 (Class 4)

เลเซอร์ในระดับนี้คือ เลเซอร์ทั้งหลายที่ไม่สามารถจัดอยู่ในระดับอื่น ๆ ข้างต้นได้ แต่จะเป็นเลเซอร์ที่มีกำลังสูงมาก (มากกว่า 5 มิลลิวัตต์) ลำแสงเลเซอร์ระดับนี้ถือว่ามีอันตรายต่อนัยน์ตา และผิวหนังอย่างยิ่ง แม้กระทั่งลำแสงที่สะท้อนแล้วก็ยังสามารถทำอันตรายได้ ตัวอย่างเช่น เลเซอร์อาร์กอนขนาด 2 วัตต์ หรือฮีเลียมนีออนเลเซอร์ชนิดพัลส์ 20 นาโนวินาที ที่มีความเข้ม 1 จูลต่อตารางเซนติเมตร โดยการใช้งานกับเลเซอร์เหล่านี้มีมาตรการโดยทั่วไปคล้ายกับระดับที่ 3 แต่จะรัดกุมยิ่งขึ้น เช่น ต้องใช้กุญแจ ในระบบควบคุมการเปิดปิดเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.9 ความปลอดภัยเกี่ยวกับกระแสไฟฟ้าจากเลเซอร์

ถ้าหากจะมีคนเสียชีวิตเนื่องจากเลเซอร์ ก็อาจจะไม่ใช่สาเหตุจากลำแสง แต่อาจเป็นเพราะถูกไฟดูดทั้งจากตัวเลเซอร์และที่เกิดจากแหล่งจ่ายไฟให้แก่เลเซอร์ ทั้งนี้ก็เพราะเลเซอร์บางชนิดจะทำงานที่ความต่างศักย์สูงมากเป็นกิโลโวลต์ และกระแสไฟมากพอจนสามารถทำให้เสียชีวิตได้ เช่น เลเซอร์คาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้เลเซอร์ชนิดพัลส์ยังมีการใช้ตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่ เพื่อทำหน้าที่ให้พลังงานจำนวนมากในช่วงเวลาสั้น ๆ ได้แก่ หลอดแฟลช ตัวเก็บประจุจะเป็นสาเหตุของอันตรายหลายอย่างที่เกิดขึ้นหลักในการทำงานทั่ว ๆ ไปมีดังนี้

1. ในการทำงานเกี่ยวกับเลเซอร์ ก่อนจะจับหรือทำอะไร ให้คิดก่อนว่ามือของผู้ปฏิบัติงานจะไปถูกอะไรหรือไม่
2. เมื่ออยู่ในห้องของผู้อื่นที่มีการใช้งานเกี่ยวกับเลเซอร์ ห้ามคิดว่าทุกอย่างปลอดภัย เพราะอาจจะมีสายไฟที่เปลือยอยู่แต่มีไฟ ควรถามก่อนจับสิ่งของในห้องทดลองของผู้อื่น
3. เลเซอร์ที่ออกแบบจากผู้ผลิต และเลเซอร์ที่มาอยู่ในห้องของผู้ใช้ อาจมีสภาพแตกต่างกัน เช่น ระบบอินเตอร์ล๊อค (Interlock) ซึ่งเป็นระบบป้องกัน อาจจะถูกลัดวงจรโดยผู้ใช้ เพื่อความสะดวกในการซ่อมแซมหรือปรับปรุง เพราะฉะนั้นเมื่อเกิดปัญหาเลเซอร์ก็อาจไม่เปิดเอง เพราะไม่มีระบบอินเตอร์ล๊อค (Interlock) ที่ดีแล้ว
4. ไม่ควรปฏิบัติเพียงลำพัง ถ้าหากต้องทำงานกับเลเซอร์ที่มีกำลังสูง
5. ถ้าเกิดปัญหาขึ้นแล้ว เช่น ถูกไฟดูด ให้ตัดกระแสไฟก่อน แล้วนำผู้ที่ถูกไฟดูดออกจากสายไฟ โดยการใช้นวนฉนวนหรือดิ่งผู้ที่ถูกไฟดูดออกมา ระวังอย่าให้ผู้ที่จะช่วยเหลือถูกไฟดูดด้วย แล้วรีบนำผู้ที่ถูกไฟดูดส่งโรงพยาบาลทันที
6. ถ้าเลเซอร์มีระบบหล่อเย็น ระวังกรณีที่ไฟรั่วลงน้ำหรือน้ำรั่วไปหาไฟ เพราะเกิดขึ้นได้ง่าย โดยเฉพาะเลเซอร์ที่ใช้เวลานาน ๆ ซึ่งระบบป้องกันรั่วต่าง ๆ เริ่มเสื่อมสภาพ
7. ถ้ามีตัวเก็บประจุ ห้ามสัมผัสประจุก่อนทำงานในทุก ๆ ครั้ง

2.6 มอเตอร์ไฟฟ้า (Electric Motor)

มอเตอร์ไฟฟ้า คือ อุปกรณ์ที่แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โดยปกติแล้วจะใช้ปรากฏการณ์แม่เหล็กไฟฟ้า ในการทำงานปกติของมอเตอร์ไฟฟ้าส่วนใหญ่เกิดจากการทำงานร่วมกันระหว่างสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กภายในตัวมอเตอร์ และสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสในขดลวด ซึ่งทำให้เกิดแรงดูด และแรงผลักของสนามแม่เหล็กทั้งสอง โดยมอเตอร์ไฟฟ้าส่วนใหญ่จะถูกพัฒนาแรงบิดเชิงกล โดยการทำงานร่วมกันของตัวนำที่นำกระแสไปในทิศทางที่ตั้งมุมฉากกับสนามแม่เหล็ก มอเตอร์ไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ จะแตกต่างกันไปตามวิธีการจัดเรียงตัวนำและสนามแม่เหล็ก และรวมไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงการควบคุมที่มีการควบคุมแรงบิด ความเร็ว และตำแหน่งเอาต์พุตทางกลได้ นอกจากนั้นแล้วมอเตอร์ไฟฟ้าสามารถทำงานได้ถึง 2 แบบ ได้แก่ การสร้างพลังงานกล และการผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยมีโครงสร้างภายนอก และภายใน ดังแสดงตามรูปที่ 2.60



รูปที่ 2.60 แสดงโครงสร้างภายนอกและภายในของมอเตอร์ไฟฟ้า

ที่มา: <https://www.primusthai.com/primus/Knowledge/info?ID=35>

2.6.1 โครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้า

มอเตอร์ไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ มีโครงสร้างหลักที่คล้ายกัน ซึ่งจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่อยู่กับที่ (Stator) และส่วนที่เคลื่อนที่ (Rotor) ดังแสดงตามรูปที่ 2.61



รูปที่ 2.61 แสดงโครงสร้างของมอเตอร์ไฟฟ้าส่วนที่อยู่กับที่และส่วนที่เคลื่อนที่

ที่มา: <https://www.ai-corporation.net/2021/11/16/what-is-a-motor/>

2.6.1.1 ขดลวดสนามแม่เหล็ก (Field Coil)

ขดลวดสนามแม่เหล็ก ดังแสดงตามรูปที่ 2.62 (ก) คือ ขดลวดที่ถูกพันอยู่กับขั้วแม่เหล็กที่ยึดติดกับโครงมอเตอร์ ทำหน้าที่กำเนิดขั้วแม่เหล็กขั้วเหนือ (N) และขั้วใต้ (S) แทนแม่เหล็กถาวร ซึ่งขดลวดที่ใช้เป็นขดลวดอาบนํ้ายาคอนวอร์เตอร์ โดยทำหน้าที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็กเมื่อได้รับกระแสไฟฟ้ากระตุ้น (Excitation current) ขดลวดฟิลด์คอยล์มี 2 ชนิด คือ ขดลวดชัฟต์ฟิลด์ (Shunt field) พันด้วยลวดเส้นเล็กมีค่าความต้านทานสูง และขดลวดซีรีย์ฟิลด์ (Series field) พันด้วยลวดเส้นใหญ่มีค่าความต้านทานจะต่ำขดลวดทั้งสองชุดนี้พันอยู่บนแกนขั้วแม่เหล็กอันเดียวกัน ขดลวดชัฟต์ฟิลด์จะพันอยู่ด้านในสุด ส่วนขดลวดซีรีย์ฟิลด์จะพันไว้ด้านนอกสุด และมีจำนวนรอบไม่มาก และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะต้องมีฉนวนคั่นระหว่างขดลวดชั้นดีฟิวด์กับขดลวดซีรีส์ฟิวด์ด้วย ขดลวดทั้งสองชุดจะต้องพันไปทิศทางเดียวกัน และขดลวดแต่ละชุดนั้นจะต้องต่ออนุกรมระหว่างขั้วแม่เหล็กให้ถูกต้องด้วย เพราะจะทำให้ขั้วแม่เหล็กเป็นขั้วเหนือ และขั้วใต้สลับกันไป โดยมีโครงสร้างของขดลวดสนามแม่เหล็กดังแสดงตามรูปที่ 2.62 (ข)



(ก)



(ข)

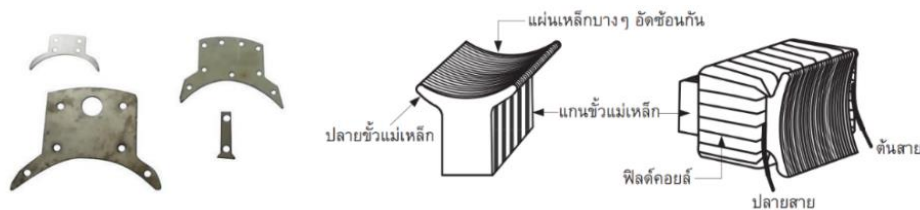
รูปที่ 2.62 (ก) ขดลวดสนามแม่เหล็ก (ข) แสดงโครงสร้างของขดลวดสนามแม่เหล็ก (Field Coil) ถูกติดตั้งเข้ากับแกนเหล็กอาร์เมเจอร์

ที่มา: <https://powertool.today/>

2.6.1.2 ขั้วแม่เหล็ก (Pole Pieces)

ขั้วแม่เหล็ก เป็นแกนที่ใช้สำหรับรองรับขดลวดสนามแม่เหล็กถูกยึดติดกับโครงมอเตอร์ด้านใน ขั้วแม่เหล็กทำมาจากแผ่นเหล็กอ่อนบาง ๆ อัดซ้อนกัน (Lamination Sheet Steel) ดังแสดงตามรูปที่ 2.63 เพื่อลดการเกิดกระแสไหลวน (Eddy Current) ที่จะทำให้ความเข้มของสนามแม่เหล็กลดลง และขั้วแม่เหล็กจะทำหน้าที่ให้กำเนิดขั้วสนามแม่เหล็กมีความเข้มสูงสุดแทนขั้วสนามแม่เหล็กถาวร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.63 แสดงขั้วแม่เหล็ก (Pole Pieces) และโครงสร้างเมื่อนำมาประกอบกัน

ที่มา: <https://sites.google.com/site/thawatchaimotor1/>

2.6.1.3 โครงมอเตอร์ (Motor Frame)

โครงมอเตอร์ คือ ส่วนเปลือกหุ้มภายนอกของมอเตอร์ และยึดส่วนที่อยู่กับที่หรือสเตเตอร์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.64 โครงมอเตอร์ทำด้วยเหล็กหล่อ (Cast iron) มีวนเป็นรูปทรงกระบอก โดยทำหน้าที่ยึดขั้วแม่เหล็กและส่วนประกอบทั้งหมดของมอเตอร์ รวมถึงเป็นทางเดินของเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic circuit)



รูปที่ 2.64 แสดงส่วนที่อยู่กับที่ของมอเตอร์ ประกอบด้วยโครงมอเตอร์ สเตเตอร์ และขดลวด

ที่มา: https://www.ksmotor.tw/th/blog/what_are_the_types_of_ac_motors

2.6.1.4 แกนอาร์เมเจอร์ (Armature Core)

แกนอาร์เมเจอร์ เป็นส่วนที่เคลื่อนที่ที่ถูกยึดติดกับเพลลาและเป็นส่วนที่รองรับการหมุน ดังแสดงตามรูปที่ 2.65 อาร์เมเจอร์ทำจากเหล็กแผ่นบาง ๆ และเคลือบฉนวน (Laminated sheet steel) และวางอัดซ้อนกัน โดยจะถูกเจาะรูออกเป็น ส่วน ๆ (Slot) เพื่อพันขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature Winding) รูปร่างขดลวดอาร์เมเจอร์จะมีขดลวดพันอยู่ และมีลิมไฟเบอร์อัดแน่นจะขึงขดลวดอาร์เมเจอร์ไว้ ปลายขดลวดอาร์เมเจอร์จะต่อไว้กับคอมมิวเตเตอร์ จากนั้นอาร์เมเจอร์จะผลัดต้นของสนามแม่เหล็กทั้งสอง ทำให้อาร์เมเจอร์หมุนเคลื่อนที่ โดยแกนเหล็กอาร์เมเจอร์จะเป็นที่สำหรับบรรจุขดลวดอาร์เมเจอร์ และที่แกนเหล็กอาร์เมเจอร์จะเจาะรูไว้ด้วยเพื่อช่วยในการระบายความร้อนอันเนื่องมาจากการสูญเสียภายในของแกนอาร์เมเจอร์

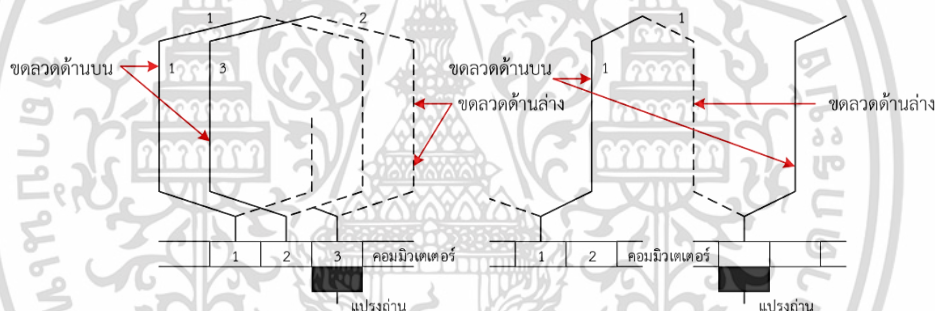


รูปที่ 2.65 แสดงแกนเหล็กอาร์เมเจอร์ (Armature)

ที่มา: <http://www.nayoktech.ac.th/webnew/attachments/article/>

2.6.1.5 ขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature or Armature winding)

ขดลวดอาร์เมเจอร์ เป็นขดลวดทองแดงเคลือบฉนวนที่พันและบรรจุลงในร่องของแกนเหล็กอาร์เมเจอร์ ทำหน้าที่สร้างเส้นแรงแม่เหล็กในอาร์เมเจอร์เมื่อได้รับกระแสไฟฟ้า กระตุ้น โดยมีการพันแบบแลป (Lap) หรือแบบเวฟ (Wave) ขึ้นอยู่กับการออกแบบมอเตอร์แต่ละชนิด ปลายของขดลวดจะถูกนำไปเชื่อมต่อเข้ากับซีคอมมิวเตเตอร์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.66

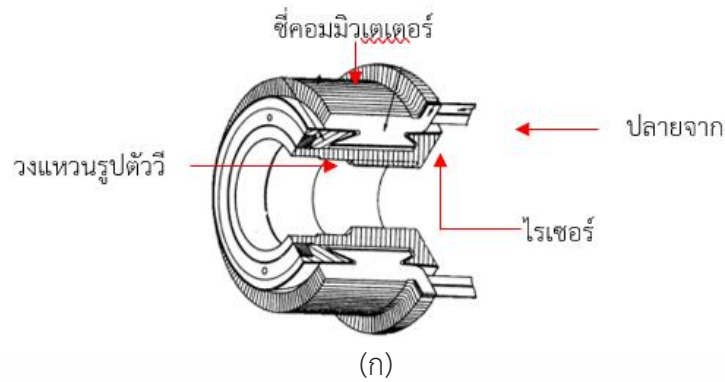


รูปที่ 2.66 แสดงการพันอาร์เมเจอร์ แบบแลป (Lap) และ เวฟ (Wave)

ที่มา: <https://blog.mutl.ac.th/montri/assets/dc03.pdf>

2.6.1.6 คอมมิวเตเตอร์ (Commutator)

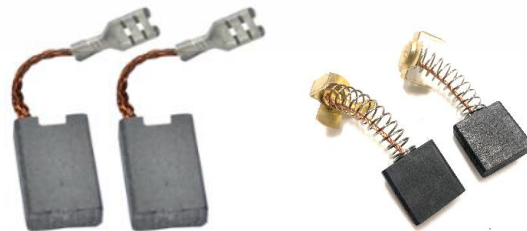
คอมมิวเตเตอร์ คือ ส่วนเคลื่อนที่อีกส่วนหนึ่ง ซึ่งถูกยึดติดเข้ากับอาร์เมเจอร์ และเพลาาร่วมกัน ดังแสดงตามรูปที่ 2.67 (ก) คอมมิวเตเตอร์ทำจากแท่งทองแดงแข็งประกอบเข้าด้วยกันเป็นรูปทรงกระบอก และระหว่างแท่งทองแดงแต่ละซี่จะถูกคั่นด้วยฉนวนไมก้า (Mica) ส่วนหัวซี่ของคอมมิวเตเตอร์จะมีร่องสำหรับใส่ปลายสาย คอมมิวเตเตอร์ทำหน้าที่เรียงไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง และนำกระแสไฟฟ้าจากแปรงถ่านเข้าไปยังขดลวดอาร์เมเจอร์ คอมมิวเตเตอร์มีหลายรูปแบบ ดังแสดงตามรูปที่ 2.67 (ข)



รูปที่ 2.67 แสดงโครงสร้างคอมมิวเตเตอร์ และคอมมิวเตเตอร์รูปแบบต่าง ๆ
ที่มา: <https://www.songthamelec.com/product/3169/>

2.6.1.7 แปรงถ่าน (Brush)

แปรงถ่าน คือ ตัวที่สัมผัสกับคอมมิวเตเตอร์ มีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมหรือรูปแบบต่าง ๆ ดังแสดงตามรูปที่ 2.68 ผลิตมาจากคาร์บอนหรือแกรไฟต์ผสมผงทองแดง เพื่อให้แข็งและนำไฟฟ้าได้ดี โดยจะมีสายตัวนำต่อร่วมกับแปรงถ่านเพื่อปรับแรงดันไฟตรงที่จ่ายเข้ามา ซึ่งแปรงถ่านทำหน้าที่รับแรงดันไฟตรงจากแหล่งจ่าย และจ่ายผ่านไปให้คอมมิวเตเตอร์ โดยแปรงถ่านจะถูกบรรจุอยู่ในชุดยึดแปรงถ่านมีสปริงกดแปรงถ่านเพื่อให้หน้าสัมผัสของแปรงถ่านกับขี้ออมมิวเตเตอร์มีการสัมผัสกันอยู่ตลอดเวลาในขณะที่อาร์เมเจอร์หมุน



รูปที่ 2.68 แสดงแปรงถ่านรูปแบบต่าง ๆ
ที่มา: <https://www.tldalai.com/category/4/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1.8 ตลับลูกปืนหรือปลอกทองเหลือง (Bearing or Bush)

ตลับลูกปืน ดังแสดงตามรูปที่ 2.69 จะยึดติดอยู่ที่ฝาครอบทั้ง 2 ด้านของมอเตอร์ ทำหน้าที่เป็นตัวรองรับน้ำหนักจากเพลาส่วนหมุนกับฝาครอบด้านใน และลดแรงเสียดทานที่เพลานี้ในขณะที่อาร์เมเจอร์หมุน



รูปที่ 2.69 แสดงตลับลูกปืน และปลอกทองเหลือง

ที่มา: <https://www.nanasupplier.com/allbearing/p-247984>

2.6.1.9 แกนเพลลา (Shaft)

เป็นแกนเหล็กที่มีลักษณะกลมยาวสำหรับสวมแกนเหล็กอาร์เมเจอร์ และยึดในส่วนของคอมมิวเตเตอร์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.70 ซึ่งประกอบเป็นตัวโรเตอร์ แกนเพลลาจะวางอยู่บนตลับลูกปืนเพื่อบังคับให้หมุนอยู่ในแนวศูนย์กลางของมอเตอร์



รูปที่ 2.70 แสดงแกนเพลลาที่เชื่อมติดอยู่กับแกนเหล็กอาร์เมเจอร์ และคอมมิวเตเตอร์

ที่มา: <http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~rchanat/>

2103320%20Des%20Mach%20Element/CRW07_Shaft_1.pdf

2.6.1.10 ช่องว่างอากาศ (Air-gap)

โครงสร้างภายในของมอเตอร์ไฟฟ้า จะมีระยะห่างระหว่างโรเตอร์ และสเตเตอร์ ซึ่งจะเป็นช่องว่างอากาศที่มีขนาดเล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ถ้าระยะห่างระหว่างตัวโรเตอร์ และสเตเตอร์มีช่องว่างขนาดใหญ่เกิดขึ้น จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า

2.6.2 แหล่งจ่ายไฟ (Power Supply)

ภายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ มอเตอร์ไฟฟ้าถูกนำไปใช้งานในรูปแบบที่หลากหลาย เช่น ปั๊มน้ำ เครื่องเป่า รถเครนลากจูง ยานยนต์ไฟฟ้า และรวมไปถึงใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรม ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าให้สามารถขับเคลื่อนได้ ทำได้โดยการใช้แหล่งจ่ายไฟ จ่ายไฟให้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ และแปลงแรงดันไฟฟ้าให้ตรงกับแรงดันไฟฟ้าที่ต้องการใช้งาน แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามลักษณะการใช้งาน คือ แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง และแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ

2.6.2.1 แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (DC)

แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่นิยมใช้งานกันทั่วไป ได้แก่ แบตเตอรี่, ยานยนต์ หรือวงจรเรียงกระแส โดยประเภทของแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง สามารถแบ่งได้ดังนี้

1. Switching power supply การทำงานจะมีการกรองสัญญาณก่อนจ่ายค่าออกไป สามารถปรับค่าแรงดันโดยการปรับที่หม้อแปลงด้านไพรมารี (Primary) ข้อดีของพาวเวอร์ซัพพลายชนิดนี้ คือ มีน้ำหนักเบา เพราะแกนของหม้อแปลงมีขนาดเล็ก สามารถใช้ได้กับระบบไฟฟ้าทุกรูปแบบ
2. Linear regulated สามารถจ่ายค่าแรงดันตามที่กำหนดได้ และมีการลดค่าแรงดันอินพุตที่เกินออกจากระบบ เพื่อให้สามารถจ่ายค่าแรงดันเอาต์พุตสูงสุดให้กับโหลด พาวเวอร์ซัพพลายชนิดนี้ไม่สามารถรักษา ระดับแรงดันได้ ทำได้เพียงลดค่าแรงดันที่เกินมาเท่านั้น จึงต้องรักษา ระดับของแรงดันอินพุตให้สูงกว่าเอาต์พุตที่ต้องการอย่างน้อย 1 โวลต์ ถึง 3 โวลต์ ทำให้มีความร้อนระบายออกมาค่อนข้างเยอะ จึงไม่ค่อยมีประสิทธิภาพ มีขนาดใหญ่ หนัก และราคาสูง
3. Unregulated power supply จ่ายค่าแรงดันได้ไม่คงที่ และมีสัญญาณรบกวนค่อนข้างสูง ในขณะที่จ่ายไฟกระแสตรง ถ้าค่าแรงดันอินพุตที่เข้ามาไม่คงที่ ค่าแรงดันเอาต์พุตที่จ่ายออกไปจะไม่คงที่เช่นกัน แต่ว่าในพาวเวอร์ซัพพลายชนิดนี้ก็ยังมีข้อดีคือ ราคาถูก และใช้งานง่าย
4. Ripple regulated power supply มีทรานซิสเตอร์ทำงานในโหมดเปิด/ปิด ทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังไฟตรงไปยังตัวเก็บประจุขนาดใหญ่เพื่อรักษาระดับแรงดันเอาต์พุตให้อยู่ในช่วงที่กำหนด มีความร้อนระบายออกมาเล็กน้อย ทำให้มีความปลอดภัยในการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2.2 แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ (AC)

แหล่งจ่ายไฟกระแสสลับที่นิยมใช้งานกันทั่วไป ได้แก่ แหล่งจ่ายจากไฟฟ้าบ้าน อินเวอร์เตอร์ หรือเครื่องปั่นไฟ โดยประเภทของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับสามารถแบ่งได้ดังนี้

1. Single-phase output AC Frequency Conversion Power Supply ใช้สำหรับควบคุมมอเตอร์แบบเอาต์พุต 1 เฟส
2. Three-phase output AC Frequency Conversion Power Supply ใช้สำหรับควบคุมมอเตอร์แบบเอาต์พุต 3 เฟส เป็นมอเตอร์ที่นิยมใช้งานกันทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น มอเตอร์เหนี่ยวนำ
3. Multi-mode 1 or 3 phase output AC Frequency Conversion Power Supply ใช้สำหรับควบคุมมอเตอร์แบบเอาต์พุต 1 เฟสหรือแบบเอาต์พุต 3 เฟส

2.6.3 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า

โดยทั่วไปในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าทั้งกระแสตรง และกระแสสลับ จะมีการควบคุมองค์ประกอบ 3 ประการคือ ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ (Speed Control) ควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ (Torque Control) และรวมไปถึงควบคุมทิศทางของมอเตอร์ (Direction Control)

2.6.3.1 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC)

ในการควบคุมความเร็วสามารถทำได้โดยการปรับแรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ โดยการควบคุมความเร็วของมอเตอร์จะถูกจำกัดด้วยขนาดแรงดันไฟฟ้า โดยสามารถปรับได้ไม่เกินค่าแรงดันสูงสุดที่จ่ายให้มอเตอร์ ส่วนการควบคุมแรงบิดสามารถทำได้โดยการควบคุมกระแสที่ผ่านขดลวดอาร์เมเจอร์ และกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์ ในกรณีสเตเตอร์แบบใช้ขดลวดพัน และสำหรับการควบคุมตำแหน่งหรือการสลับทิศทางของมอเตอร์ ในกรณีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สามารถทำได้โดยการสลับขั้วแหล่งจ่ายไฟที่จ่ายให้แก่มอเตอร์ สำหรับกรณีของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาดเล็กแบบใช้แม่เหล็กถาวรเป็นสเตเตอร์จะไม่สามารถรองรับการควบคุมที่หลากหลายได้ ส่วนการควบคุมแรงบิดอาจทำได้โดยใช้ตัวต้านทานปรับค่าแบบขดลวด (Wire Wound Resistor) แต่ก็จะเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ตัวต้านทาน ฉะนั้นในปัจจุบันในการใช้งานมอเตอร์จึงมักนิยมใช้การควบคุมด้วยวงจรถวลีวิมอดูเลเตอร์ (Pulse Width Modulator, PWM)

2.6.3.2 บอร์ดควบคุมมอเตอร์ EVO24V50.5 Brushed DC Motor Driver

เป็นบอร์ดขับมอเตอร์กระแสตรงชนิดแปรปรวน แบบ H-bridge Driver ดังแสดงตามรูปที่ 2.71 มีความทนทานสูง สามารถต่อใช้งานง่าย รองรับคำสั่งควบคุมได้หลายรูปแบบ เช่น การสั่งงานด้วยแรงดันอนาล็อก การสั่งงานด้วยสัญญาณ PWM และการสั่งงานด้วยสัญญาณจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R/C Receiver โดยบอร์ดควบคุมมอเตอร์ EVO24V50.5 สามารถับกระแสต่อเนื่องได้สูงสุดถึง 36 แอมแปร์ และับกระแสชั่วขณะสูงกว่า 50 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้าสูงสุดของการใช้งาน 42 โวลต์ ในการรับสัญญาณอินพุตเพื่อควบคุม ได้ออกแบบระบบแยกสัญญาณด้วย Opto-Isolator เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนที่อาจเกิดขึ้นจากมอเตอร์ และสามารถป้องกันกระแสไฟฟ้าย้อนกลับไปยังอุปกรณ์ส่วนควบคุม มีระบบป้องกันในการใช้งานอื่น ๆ เช่น ระบบป้องกันการต่อไฟเลี้ยงกลับขั้ว ระบบตัดการทำงานเมื่อเกิดอุณหภูมิสูงจากการับกระแสเกินพิกัด โดยคุณสมบัติของบอร์ดควบคุมมอเตอร์ชนิดนี้ ดังแสดงตามตารางที่ 2.13 และโครงสร้างของบอร์ดควบคุมมอเตอร์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.72 ซึ่งมี ส่วนประกอบอยู่ 11 ส่วน โดย สามารถอธิบายฟังก์ชันการทำงานของแต่ละส่วน ได้ดังตารางที่ 2.14

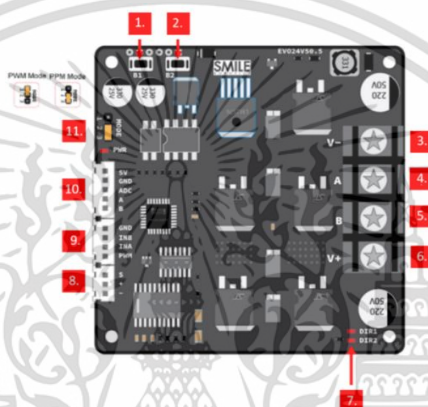
ตารางที่ 2.13 คุณสมบัติของบอร์ดไดรฟ์ EVO24V50.5 Brushed DC Motor Driver

Function	Specification
ไดรฟ์เวอร์	H-bridge MOSFET driver
กระแสชั่วขณะ	50 แอมแปร์
กระแสต่อเนื่อง	36 แอมแปร์
แรงดันอินพุต	11-36 โวลต์ดีซี
แรงดันสูงสุด	แรงดันไฟฟ้าสูงสุดเอาต์พุตสูงสุด จะมีค่าเท่ากับ 0.98 เท่าของแรงดันใช้งาน (VCC) โดยสามารถเขียนแทนด้วยสมการ $V_{\text{output}} = 0.98 \times VCC$
โหมดการทำงาน	Analog Mode, PWM Mode และ R/C Mode
การแยกสัญญาณควบคุม	วงจรร Opto-Isolator
ไฟแสดงสถานะ	ไฟ LED
การกลับขั้ว	มีวงจรป้องกันการจ่ายไฟเลี้ยงกลับขั้ว
หน่วยความจำแบตเตอรี่	มีระบบเตือนระดับแรงดันแบตเตอรี่ต่ำ ที่ผู้ใช้สามารถเลือกจดจำค่าแรงดันปกติไว้ได้ (ประมาณ 80 ถึง 85% ของแรงดันที่ถูกบันทึกไว้)
การทนต่ออุณหภูมิ	110 องศาเซลเซียส
การระบายอุณหภูมิ	แผงระบายความร้อน (Heat sink)
ขนาด	80 x 80 มิลลิเมตร
น้ำหนัก	82 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.71 แสดงบอร์ดควบคุมมอเตอร์ EVO24V50.5 Brushed DC Motor Driver
ที่มา: <http://www.smile-robotics.com/product/3/smile-robotics-evo24v50>



รูปที่ 2.72 แสดงโครงสร้างของ EVO24V50.5 Brushed DC Motor Driver
ที่มา: <http://www.smile-robotics.com/product/3/smile-robotics-evo24v50>

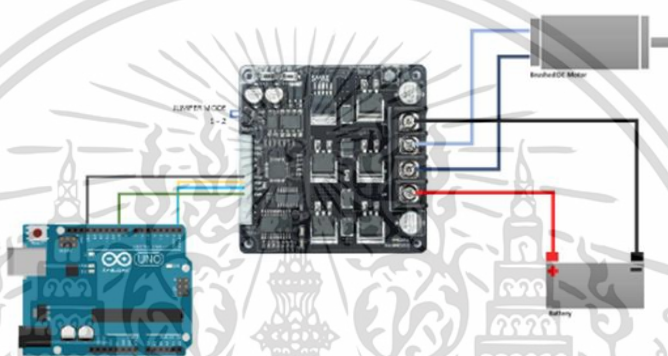
ตารางที่ 2.14 รายละเอียดบนบอร์ด EVO24V50.5

Number	Function
1	ควบคุมมอเตอร์หมุนทิศทางที่ 1
2	ควบคุมมอเตอร์หมุนทิศทางที่ 2
3	กราวด์
4	ต่อไปที่มอเตอร์ 1
5	ต่อไปที่มอเตอร์ 2
6	ไฟบวก (+) 9 – 42 โวลต์
7	ไฟแสดงทิศทางมอเตอร์
8	สัญญาณเซอร์โว ซึ่งไม่มีการต่อใช้งานกราวด์จากชุดควบคุม
9	กราวด์จากชุดควบคุมควบคุมทิศทางขา A และ B และสัญญาณควบคุมความเร็ว
10	แรงดันไฟเลี้ยงจากบอร์ด , กราวด์ , แรงดันอนาล็อก และสัญญาณควบคุม A,B
11	เลือกโหมดการใช้งาน PPM และ PWM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

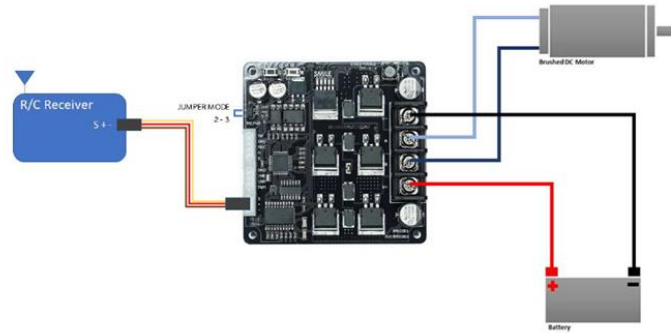
2.6.3.1 โหมดการทำงานของบอร์ดควบคุมมอเตอร์ EVO24V50.5

1. โหมด PWM เป็นการสั่งงานด้วยสัญญาณ PWM (Pulse Width Modulation) ในการควบคุมความเร็ว และใช้สัญญาณลอจิกป้อนให้กับ INA และ INB ในการควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ โดยทั่วไปใช้สั่งงานผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ หรือไมโครโปรเซสเซอร์ เช่น ARM, AVR, PIC, Arduino, Node MCU เป็นต้น การต่อบอร์ด EVO24V50.5 ใช้งานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังแสดงตามรูปในตัวอย่างที่ 2.73



รูปที่ 2.73 การต่อบอร์ด EVO24V50.5 ใช้งานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์
ที่มา: <http://www.smile-robotics.com/product/3/smile-robotics-evo24v50>

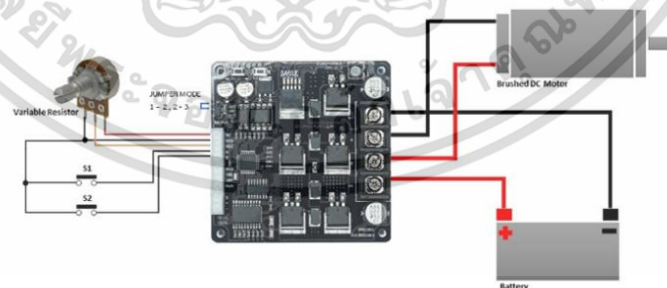
2. โหมด R/C เป็นการสั่งงานด้วยสัญญาณพัลส์ (Pulse) ในการควบคุมความเร็ว และทิศทางเช่นเดียวกับ R/C Servo โดยทั่วไปใช้สั่งงานผ่าน R/C Receiver ทำให้สามารถใช้รีโมทคอนโทรล R/C ทั่วไปในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ได้โดยตรง อีกทั้งยังสามารถใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ สร้างสัญญาณพัลส์ (Pulse) เพื่อควบคุมบอร์ดขับเคลื่อนพร้อมกันหลายตัว โดยใช้สายไฟจำนวนน้อยลงได้อีกด้วย โดยในโหมดนี้บอร์ดขับเคลื่อนจะสร้างสัญญาณ PWM ไปยังมอเตอร์ที่มีความถี่ 500 เฮิรตซ์ การต่อบอร์ด EVO24V50.5 ใช้งานร่วมกับ R/C Receiver ดังแสดงตามรูปที่ 2.74



รูปที่ 2.74 การต่อบอร์ด EVO24V50.5 ใช้งานร่วมกับ R/C Receiver

ที่มา: <http://www.smile-robotics.com/product/3/smile-robotics-evo24v50>

3. โหมดอนาล็อก (Analog) เป็นการสั่งการทำงานด้วยสัญญาณที่มีระดับแรงดัน 0 – 5 โวลต์ เพื่อใช้ในการควบคุมความเร็ว และใช้สัญญาณลอจิกป้อนให้กับ A และ B (ในโหมดใช้งานนี้การทำงานไม่ผ่านระบบแยกสัญญาณด้วย Opto-Isolator) การต่อใช้งานที่เหมาะสม คือการต่อตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ (Variable Resistor) เป็นวงจรแบ่งแรงดัน เพื่อปรับระดับแรงดันให้กับสัญญาณ ADC และสวิตช์ เพื่อป้อนลอจิก 0 ให้กับสัญญาณ A หรือ B เข้ากับวงจร เพื่อควบคุมความเร็ว และทิศทางของมอเตอร์ได้โดยตรง ในโหมดนี้นั้นจะสามารถแทรกแซงระบบ เพื่อควบคุมการทำงานได้ทันที ไม่ว่าจะบอร์ดขับมอเตอร์นั้นจะทำงานอยู่ในโหมดใดก็ตาม การต่อบอร์ด EVO24V50.5 ใช้งานร่วมกับตัวต้านทานปรับค่าได้ ดังแสดงตามรูปที่ 2.75



รูปที่ 2.75 การต่อบอร์ด EVO24V50.5 ใช้งานร่วมกับตัวต้านทานปรับค่าได้ และปุ่มกด

ที่มา: <http://www.smile-robotics.com/product/3/smile-robotics-evo24v50>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.3.4 ระบบแจ้งเตือนแรงดันแบตเตอรี่ต่ำของบอร์ดควบคุมมอเตอร์

EVO24V50.5

ระบบแจ้งเตือนแรงดันแบตเตอรี่ต่ำของบอร์ดควบคุมมอเตอร์ EVO24V50.5 สามารถเลือกจดจำค่าแรงดันเมื่อแหล่งจ่ายมีระดับแรงดันปกติไว้ได้ เช่น ขณะแบตเตอรี่ถูกชาร์จจนเต็ม เมื่อระบบมีการทำงานและมีการลดลงของแรงดันจนเหลือประมาณ 80 - 85% ของแรงดันที่ถูกบันทึกไว้ระบบจะแจ้งเตือนด้วยการกระพริบของหลอด LED เพื่อช่วยป้องกันไม่ให้แรงดันไฟฟ้าในแบตเตอรี่ถูกใช้งานจนลดน้อยลงจนเกินไป เพื่อยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ โดยการแจ้งเตือนนั้น จะไม่มีผลต่อการใช้งานแต่อย่างใดสามารถใช้งานบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์ได้ตามปกติอย่างต่อเนื่อง

ขั้นตอนการจดจำค่าแรงดัน

1. ปลดแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์
2. กดปุ่ม B1 ค้างไว้
3. ต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าเข้ากับบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์
4. เมื่อหลอด LED ติดด้วยจังหวะสั้น (2 ครั้ง) แสดงถึงการจดจำค่าระดับแรงดัน 100% เรียบร้อยแล้ว

ขั้นตอนการลบการจดจำค่าแรงดัน

1. ปลดแหล่งจ่ายไฟฟ้าที่ต่อเข้ากับบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์ และกดปุ่ม B2 ค้างไว้
2. ต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าเข้ากับบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์
3. เมื่อหลอด LED ติดด้วยจังหวะสั้น (3 ครั้ง) แสดงถึงการลบค่าระดับแรงดันที่ถูกจดจำเรียบร้อยแล้ว

2.6.3.5 การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC)

ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบความเร็วคงที่ จะถูกควบคุมความเร็วด้วยตัวสตาร์ทแบบ direct-on-line หรือ soft-start และมอเตอร์กระแสสลับแบบความเร็วแปรผันได้จะใช้ตัวปรับความเร็วที่เป็นพาวเวอร์อินเวอร์เตอร์ (Power Inverter) หรือตัวปรับแบบใช้ความถี่ และรวมไปถึงการใช้เทคโนโลยีตัวสับเปลี่ยนทางอิเล็กทรอนิกส์หลาย ๆ แบบที่แตกต่างกัน ไดรฟ์อินเวอร์เตอร์แบบกระแสสลับที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ ดังแสดงตามตัวอย่างในรูปที่ 2.76



รูปที่ 2.76 แสดง AC Power Inverter Drive

ที่มา: <https://th.rs-online.com/web/p/inverter-drives/8325300>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นใบแจ้งบวาระเยชนด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.4 ประเภทของมอเตอร์ไฟฟ้า

วงจรไฟฟ้า คือการนำแหล่งจ่ายไฟฟ้าจ่ายแรงดัน และกระแสให้กับโหลด โดยใช้ลวดตัวนำซึ่งมีใช้งานกันแพร่หลายตั้งแต่อุปกรณ์ของเล่นเด็ก เครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน รวมถึงในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็ก ขนาดกลาง จนถึงขนาดใหญ่ ซึ่งนำมาใช้งานในลักษณะเป็นเครื่องผ่อนแรง อุปกรณ์อำนวยความสะดวก เครื่องออกกำลังกาย และควบคุมการทำงานของเครื่องจักรกลในกระบวนการผลิตต่าง ๆ มอเตอร์ไฟฟ้าจะทำหน้าที่แปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานกลเพื่อนำไปใช้ในการทำงานแทนการใช้แรงงานจากมนุษย์ อาจแบ่งมอเตอร์ตามระบบไฟฟ้าที่ใช้ได้ 2 ประเภท คือ

1. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor)
2. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Motor)

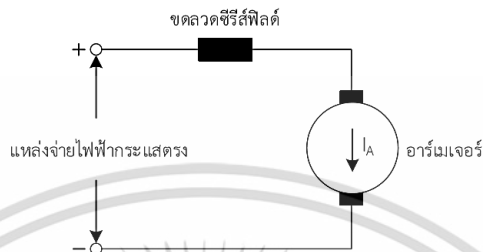
2.6.4.1 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor)

1. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) เมื่อมีการป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้กับมอเตอร์ กระแสส่วนหนึ่งจะผ่านแปรงถ่านโดยผ่านคอมมิวเตเตอร์และเข้าไปภายในขดลวดอาร์มาเจอร์ จากนั้นจึงเกิดสนามแม่เหล็กขึ้น ต่อมากระแสไฟฟ้าอีกส่วนหนึ่งจะไหลเข้าไปในขดลวด และจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก 2 สนาม เกิดขั้วเหนือ และขั้วใต้ จากคุณสมบัติของเส้นแรงแม่เหล็กจะเสริมกันเมื่ออยู่ในทิศทางเดียวกัน และจะหักล้างกันเมื่ออยู่ในทิศทางตรงกันข้ามกัน ส่งผลให้เกิดแรงบิดภายในตัว อาร์มาเจอร์ซึ่งวางอยู่บนแกนเพลลาจะเกิดการหมุนตัว ในขณะที่อาร์มาเจอร์หมุนเรียกว่า โรเตอร์ (Rotor) ซึ่งเป็นการหมุนที่เกิดจากอำนาจของเส้นแรงแม่เหล็กทั้งสอง ซึ่งมีการทำปฏิกิริยาต่อกันและทำให้ขดลวดอาร์มาเจอร์หรือโรเตอร์หมุน เป็นไปตามกฎมือซ้ายของเฟลมมิง (Fleming left hand rule) และลักษณะโครงสร้างทั่วไปของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จะเหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Generator) โดยสามารถแบ่งตามลักษณะการต่อขดลวดสนามแม่เหล็กกับอาร์มาเจอร์ได้ 3 แบบ คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม (DC Series motor) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน (DC Shunt motor) และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม (DC Compound motor) โดยสามารถแสดงข้อมูลได้ดังต่อไปนี้

- 1.1 มอเตอร์แบบอนุกรม (Series Motor) คือ มอเตอร์ไฟฟ้าที่ขดลวดสนามแม่เหล็กต่ออนุกรมกับอาร์มาเจอร์ ของมอเตอร์กระแสตรง ดังแสดงตามรูปที่ 2.77 มีคุณลักษณะเด่นคือให้แรงบิดสูง ส่วน

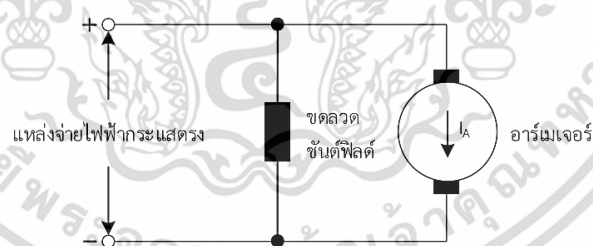
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปขอปรับแก้ไขเนื้อหาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใหญ่นำไปใช้กับรถไฟฟ้า เครื่องไฟฟ้า เครื่องดูดฝุ่น ส่วนไฟฟ้าจักรเย็บผ้า เครื่องเป่าผม มอเตอร์ประเภทนี้เหมาะกับงานหนัก อย่างไรก็ตามมอเตอร์ชนิดนี้ เมื่อไม่มีโหลดรอบจะสูงมาก ดังนั้นเวลาสตาร์ทมอเตอร์จึงจำเป็นต้องต่อโหลดไว้เสมอ



รูปที่ 2.77 แสดงวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม
ที่มา: <http://nongcom.blogspot.com/2016/07/dc.html>

1.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน (Shunt Motor) คือ มอเตอร์ไฟฟ้าที่ขดลวดสนามแม่เหล็กจะต่อขนานกับขดลวดชุดอาร์เมเจอร์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.78 ข้อดีของมอเตอร์ชนิดนี้มีคุณลักษณะเด่นที่ให้ความเร็วรอบคงที่ มีแรงบิดตอนเริ่มหมุนต่ำ เหมาะสำหรับประกอบเป็นพัดลม เนื่องจากพัดลมต้องการความเร็วคงที่



รูปที่ 2.78 แสดงมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน (Shunt Motor)
ที่มา: <http://nongcom.blogspot.com/2016/07/dc.html>

1.3 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม (Compound Motor) เป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่ประกอบด้วยขดลวดสนามแม่เหล็ก 2 ชุด คือ ขดลวดขนานและขดลวดอนุกรม ดังแสดงตามรูปที่ 2.79 ซึ่งสนามแม่เหล็กจากขดลวดทั้ง 2 ชุดจะเสริมกัน และเมื่อโหลดเพิ่มขึ้น กระแสที่ไหลผ่านขดลวดขนานก็จะลดลง แต่กระแสที่ไหลผ่านขดลวดอนุกรมจะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้สนามแม่เหล็กมีความเข้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากขึ้น ซึ่งทำให้สนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นกับขดลวดทั้ง 2 ขดลวดมีการชดเชยกัน ส่งผลให้สนามแม่เหล็กคงที่ โดยนำข้อดีของมอเตอร์ไฟฟ้า 2 แบบแรกมาผสมกัน จะทำให้มีคุณลักษณะพิเศษคือมีแรงบิดสูง (High starting torque) แต่ให้ความเร็วรอบที่คงที่ ในขณะที่ยังไม่มีโหลดจนกระทั่งมีโหลดเต็มที่ โดยมอเตอร์แบบนี้สามารถต่อขดลวดได้ 2 แบบ ดังต่อไปนี้

- 1.3.1 ต่อขดลวดแบบสั้นที่ขนานกับอาเมเจอร์เรียกว่าชอร์ตชันทคอมปาวด์มอเตอร์ (Short Shunt Compound Motor) การต่อวงจรในลักษณะนี้ จะทำให้มอเตอร์นั้นมีแรงบิดในขณะเริ่มหมุนสูงกว่าการต่อมอเตอร์แบบลองชันทคอมปาวด์มอเตอร์ ในขณะที่ความเร็วรอบจะมีการเปลี่ยนแปลงบ้าง แต่เปลี่ยนแปลงน้อยกว่าซีรี่ย์มอเตอร์ เนื่องจากการที่ขดลวดชันทฟิลด์ได้รับกระแสที่ไหลเข้ามาจากขดลวดซีรี่ย์ฟิลด์ ดังนั้นหากโหลดของมอเตอร์มีมาก ขดลวดซีรี่ย์ฟิลด์ ซึ่งมีค่าความต้านทานต่ำกว่าขดลวดชันทฟิลด์ จะดึงกระแสมากทำให้มีกระแสไหลผ่านขดลวดชันทฟิลด์น้อยลง ส่งผลให้ความเร็วรอบของมอเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง



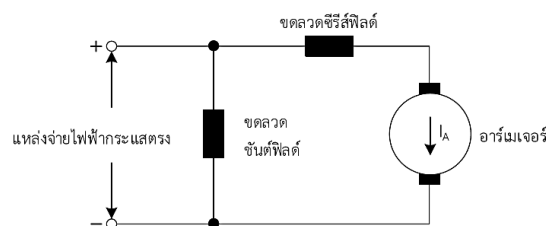
รูปที่ 2.79 แสดงวงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม ชนิดชอร์ตชันทคอมปาวด์มอเตอร์

ที่มา: <http://nongcom.blogspot.com/2016/07/dc.html>

- 1.3.2 ต่อขดลวดขนานกับขดลวดอนุกรม และขดลวดอาเมเจอร์ เรียกการต่อแบบนี้ว่า ลองชันทคอมปาวด์มอเตอร์ (Long shunt motor) เป็นต่อขดลวดชันทที่ขนานระหว่างขดลวดอนุกรม และขดลวดอาเมเจอร์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.80 การต่อวงจรในลักษณะนี้จะส่งผลให้มอเตอร์มีแรงบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

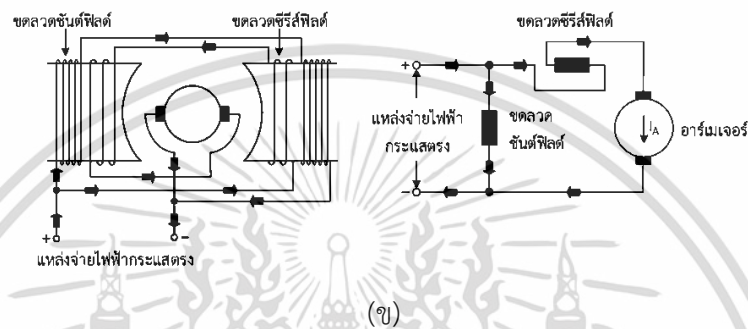
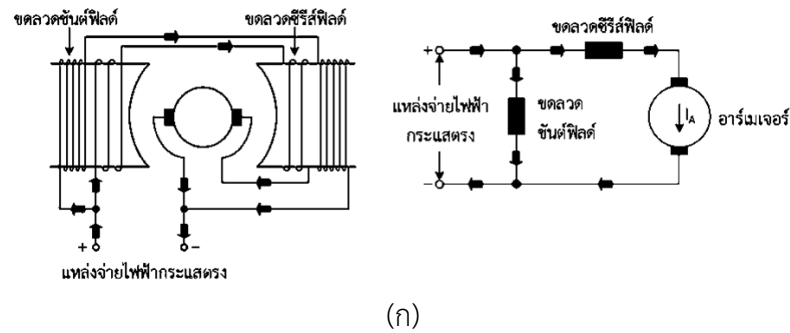
ในขณะที่เริ่มหมุนต่ำกว่าการต่อแบบซีรตซ์คอมปาวด์มอเตอร์ ในขณะที่ความเร็วรอบจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าซีรตซ์คอมปาวด์มอเตอร์ เนื่องจากการที่ขดลวดซีรตซ์ฟิลต์ได้รับกระแสไฟฟ้าโดยตรงจากแหล่งจ่าย ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไปยังขดลวดซีรตซ์ฟิลต์จะไม่มี การเปลี่ยนแปลง แต่แรงบิดจะลดลง เนื่องจากกระแสที่ไหลผ่านขดลวดซีรตซ์ฟิลต์ลดลง มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม ขณะหมุนแบบไม่มีโหลด กระแสที่ไหลภายในขดลวดอนุกรมจะมีจำนวนเล็กน้อย มอเตอร์จะหมุนโดยอาศัยเส้นแรงแม่เหล็กส่วนมากจากขดลวดชานาน ทำให้มีความเร็วรอบคงที่เช่นเดียวกับมอเตอร์แบบชานาน โดยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมนั้น จะเหมาะสมกับงานที่ต้องการแรงบิดตอนเริ่มต้นสูง และมีความเร็วรอบคงที่ขณะไม่มีโหลด โดยจะนำไปใช้หมุนขับโหลดหนัก ๆ เช่น เครื่องตัดโลหะ เครื่องม้วนโลหะ และหลังจากนั้นมอเตอร์ก็จะหมุนด้วยความเร็วรอบคงที่ ในการต่อวงจรของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมนั้น สามารถพิจารณาผลจากต่อวงจรได้ 2 แบบ คือ การต่อแบบคิวมูลทีฟคอมปาวด์ (Cumulative compound) สนามแม่เหล็กของขดลวดอนุกรม และขดลวดชานานจะมีการเสริมกัน และในแบบดิฟเฟอเรนเชียลคอมปาวด์ (Differential compound) สนามแม่เหล็กของขดลวดอนุกรม และขดลวดชานานจะมีการหักล้าง โครงสร้างและการต่อวงจรในรูปแบบ คิวมูลทีฟคอมปาวด์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.81 (ก) และแบบดิฟเฟอเรนเชียลคอมปาวด์ ดังแสดงตามตัวอย่างในรูปที่ 2.81 (ข)



รูปที่ 2.80 วงจรมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมชนิดลวงซีรตซ์คอมปาวด์มอเตอร์

ที่มา: <http://nongcom.blogspot.com/2016/07/dc.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เยี่ยมชมเว็บไซต์นี้เพื่อประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.81 (ก) แสดงวงจร Long shunt motor แบบ Cumulative compound

(ข) วงจร Long shunt motor แบบ Differential compound

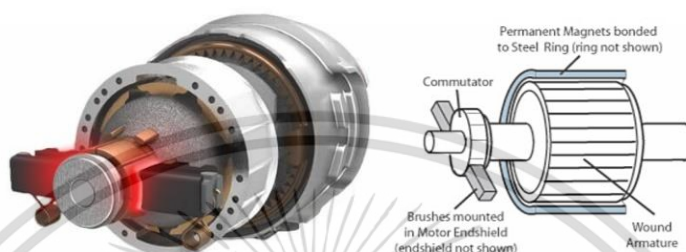
ที่มา: <http://www.howrepairmotor.com/>

2.6.4.2 มอเตอร์ชนิดไฟฟ้ากระแสตรง

1. มอเตอร์กระแสตรงมีแปรงถ่าน (Brushed DC electric motor) มีจุดกำเนิดจาก “แปรงถ่าน” ที่ใช้ในการสับเปลี่ยนทิศทาง ดังแสดงตามรูปที่ 2.82 (ข) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีแปรงถ่านมักถูกใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้าน และรถยนต์ นอกจากนี้ยังมีการใช้งานมอเตอร์ ในอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวางด้วย เนื่องจากมีอัตราส่วนในการเปลี่ยนแรงบิดเป็นความเร็วที่มีแต่ในมอเตอร์ที่ใช้แปรงถ่านเท่านั้น และสามารถควบคุมได้ง่ายเนื่องจากแรงบิด และความเร็วจะเป็นไปตามแรงดันและกระแสที่ได้รับ มอเตอร์กระแสตรงจะมีแปรงถ่านประกอบด้วย 4 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ สเตเตอร์ โรเตอร์ แปรงถ่าน และตัวสับเปลี่ยนทิศทาง ดังแสดงตามรูปที่ 2.82 (ก) โดยโรเตอร์หรืออาร์มาเจอร์เกิดจากการพันขดลวดหนึ่งชุดหรือมากกว่า ซึ่งจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นเมื่อขดลวดเหล่านี้ ได้รับพลังงานขั้วแม่เหล็กของสนามแม่เหล็ก จากโรเตอร์นี้จะดึงดูดขั้วตรงข้ามที่สร้าง โดยสเตเตอร์ ทำให้โรเตอร์หมุน เมื่อโรเตอร์หมุนขดลวดจะได้รับพลังงานเรื่อย ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามลำดับที่ต่างกันเพื่อไม่ให้ขั้วสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้น โดยโรเตอร์มากกว่าขั้วที่สร้างโดยสเตเตอร์ การสลับทิศทางของสนามแม่เหล็กของขดลวดโรเตอร์นี้เรียกว่า การสับเปลี่ยนทิศทางไม่ว่าจะตามเข็มหรือทวนเข็มนาฬิกาก็ตาม สามารถสลับได้อย่างง่ายดายโดยสลับขั้วของแปรงถ่าน



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.82 (ก) แสดงโครงสร้างของ Brushed DC electric motor

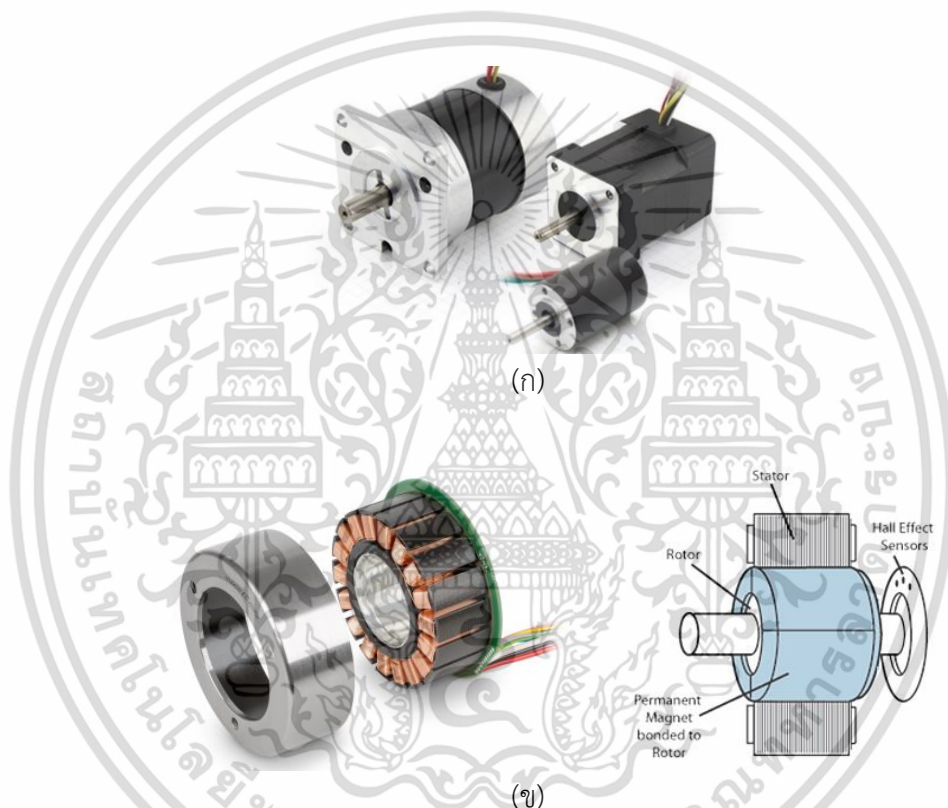
(ข) Brushed DC electric motor

ที่มา: <https://kacharatblog.wordpress.com/2016/08/09/>

2. มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC electric motor) ดังแสดงตามรูปที่ 2.83 (ก) มีอีกชื่อหนึ่งว่ามอเตอร์เปลี่ยนทิศทางด้วยกระแสไฟฟ้า เนื่องจากไม่มีแปรงถ่านที่โรเตอร์ และสับเปลี่ยนทิศทางด้วยไฟฟ้าที่ตำแหน่งเฉพาะบนโรเตอร์ มอเตอร์แบบไร้แปรงถ่าน เป็นมอเตอร์ซิงโครนัสแบบแม่เหล็กถาวรที่มีรูปคลื่นเป็นเอกลักษณ์ จึงทำงานคล้ายกับมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน มอเตอร์แบบไร้แปรงถ่าน จะไม่ทำงานจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงโดยตรง แต่หลักในการทำงานนั้นจะเหมือนมอเตอร์กระแสตรงภายในมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านจะมีโรเตอร์พร้อมแม่เหล็กถาวร และสเตเตอร์พันขดลวดมอเตอร์แบบไร้แปรงถ่าน ดังแสดงตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างในรูปที่ 2.83 (ข) จึงเป็นมอเตอร์กระแสตรงที่กลับด้านในออก ด้านนอก ไม่มีแปรงถ่านและตัวสับเปลี่ยนทิศทาง และเชื่อมต่อขดลวดกับอิเล็กทรอนิกส์ควบคุม อิเล็กทรอนิกส์ควบคุมนี้จะทดแทนฟังก์ชันของตัวสับเปลี่ยนทิศทาง และให้พลังงานกับขดลวดที่เหมาะสม ขดลวดจะได้รับพลังงานในรูปแบบซึ่งหมุนรอบสเตเตอร์ ขดลวดสเตเตอร์ที่ได้รับพลังงานจะส่งไปยังแม่เหล็กของมอเตอร์ และสลับเมื่อโรเตอร์มีแนวตรงกับสเตเตอร์



รูปที่ 2.83 (ก) แสดง Brushless DC electric motor (BLDC)

(ข) แสดงโครงสร้างของ Brushless DC electric motor (BLDC)

ที่มา: <https://th.sogears.com/>

3. มอเตอร์แม่เหล็กถาวร (Permanent-magnet electric motor) ดังแสดงตามรูปที่ 2.84 จะใช้แม่เหล็กถาวร เพื่อสร้างสนามแม่เหล็กของมอเตอร์โดยไม่ต้องใช้ขดลวดกระตุ้น หรือกระแสกระตุ้น เมื่อเทียบกับมอเตอร์กระตุ้นไฟฟ้าแบบเดิม มีข้อดีที่สำคัญ เช่น ประสิทธิภาพสูง และโครงสร้างที่เรียบง่าย การใช้งานมอเตอร์แม่เหล็กถาวรมักกว้าง โดยทั่วไปแล้วมอเตอร์แม่เหล็กถาวรกระแสตรงจะทำงานบน 6 โวลต์,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

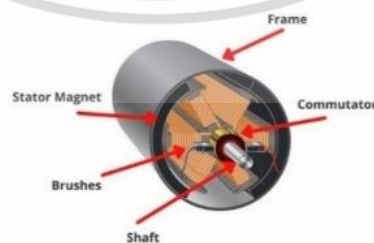
12 โวลต์ หรือ 24 โวลต์ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้รับจาก แบตเตอรี่หรือวงจรเรียงกระแส จะเป็นการทำงานร่วมกันระหว่าง ตัวนำแกนนำกระแสไฟฟ้าที่อยู่ตามแนวแกนกับฟลักซ์แม่เหล็กที่ผลิต โดยแม่เหล็กถาวรทำให้เกิดแรงบิด หลักการทำงาน และโครงสร้าง ของมอเตอร์กระแสตรง แม่เหล็กถาวรนั้นคล้ายกับมอเตอร์กระแสตรง ทั่วไป แตกต่างตรงที่ มอเตอร์แม่เหล็กถาวรจะใช้ขั้วแม่เหล็กถาวร ดัง แสดงตามรูปที่ 2.85 (ก) เพื่อแทนที่ขั้วแม่เหล็กที่ถูกกระตุ้นด้วย กระแสไฟฟ้าโดยโรเตอร์ ของมอเตอร์กระแสตรงแบบแปรงแม่เหล็ก ถาวร ประกอบด้วยแกนโรเตอร์ ขดลวดโรเตอร์สับเปลี่ยน และเพลลา หมุนซึ่ง ดังแสดงตามรูปที่ 2.85 (ข) เหมือนกับโรเตอร์ของมอเตอร์ กระแสตรงทั่วไป และต้องใส่ชุดโรเตอร์ และแปรงแม่เหล็กถาวรลง ในสเตเตอร์ เพื่อสร้างมอเตอร์กระแสตรง

รูปที่ 2.84 แสดง Permanent-magnet electric motor (PMDc)

ที่มา: <https://www.flipkart.com/naksautomation-24v-high-torque-pmdc-motor>



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.85 (ก) แสดงโรเตอร์ของแม่เหล็กถาวร

(ข) แสดงโครงสร้างของมอเตอร์แม่เหล็กถาวร

ที่มา: https://thai.alibaba.com/promotion/promotion_magnetic%20rotor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. สเต็ปเปอร์มอเตอร์ (Stepper Motor) ดังแสดงตามรูปที่ 2.86 เป็นมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนด้วยพัลส์ ลักษณะการขับเคลื่อนจะหมุนรอบแกนได้ 360 องศา และมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง โดยแต่ละสเต็ปจะขับเคลื่อนได้ 1, 1.5, 1.8 หรือ 2 องศา แล้วแต่โครงสร้างของมอเตอร์ลักษณะที่นำมามอเตอร์ไปใช้ จะเป็นงานที่ต้องการตำแหน่งแม่นยำ เช่น ระบบขับเคลื่อนหัวแม่พิมพ์ในเครื่องพิมพ์ (PRINTER) ระบบขับเคลื่อนหัวอ่านในเครื่องอ่านบันทึกเหล็ก โดยสเต็ปมอเตอร์มีส่วนประกอบที่สำคัญ 2 ส่วนคือ โรเตอร์ (ส่วนที่หมุนได้) และสเตเตอร์ (ส่วนที่อยู่กับที่) สเตเตอร์จะประกอบด้วยขดลวดหลายขด ส่วนโรเตอร์จะเป็นแม่เหล็กถาวรหรืออื่น ๆ ซึ่งมีอยู่หลายแบบ ตัวอย่างเช่น

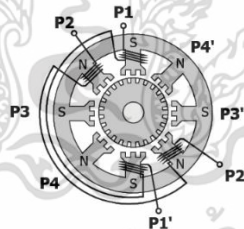
- แบบแม่เหล็กถาวร (PERMANENT MAGNET) สเต็ปมอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรจะมีสเตเตอร์ที่พันขดลวดไว้หลาย ๆ โพล และมีโรเตอร์ ทำด้วยแม่เหล็กถาวร รูปทรงเป็นกระบอกฟันเลื่อย เมื่อป้อนไฟกระแสตรงให้กับขดสเตเตอร์ จะทำให้เกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้าผลักต่อโรเตอร์ ทำให้มอเตอร์หมุน มอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวรจะเกิดแรงฉุดยึดให้โรเตอร์หยุดอยู่กับที่ แม่เหล็กไม่ได้ป้อนไฟเข้าขดลวด ขนาดการเปลี่ยนแปลงของมุมจะเป็น 1.8, 7.5, 15, 30, 45 และ 90 องศา ตามลำดับ
- แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ (VARIABLE RELUCTANCE- VR) ภายในสเต็ปมอเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ โรเตอร์จะมีการทำจากสารเฟอร์โรแมกเนติกกำลังอ่อน หรือที่เรียกว่าเหล็กอ่อน มอเตอร์แบบนี้ในขณะที่ไม่จ่ายพลังงานไฟฟ้าเข้ามอเตอร์ โรเตอร์สามารถหมุนได้อย่างอิสระ โรเตอร์มีลักษณะเป็นฟันเลื่อย ซึ่งมีรูปทรงกระบอกโดยจะมีความสัมพันธ์ โดยตรงกับจำนวนโพลในสเตเตอร์ แรงบิดที่เกิดขึ้นจะส่งไปหมุนโรเตอร์ ไปในเส้นทางของอำนาจแม่เหล็กที่มีค่ารีลักแตนซ์ต่ำที่สุด ซึ่งตำแหน่งที่จะเกิดแน่นอน และมีเสถียรภาพแต่จะเกิดขึ้นได้หลายจุด ดังนั้นเมื่อป้อนไฟเข้าขดลวดต่าง ๆ ในมอเตอร์แตกต่างกันไป ก็ทำให้มอเตอร์หมุนไปตำแหน่งต่าง ๆ กัน และโรเตอร์แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ จะมีความเฉื่อยของโรเตอร์น้อย จึงมีความเร็วรอบสูงกว่ามอเตอร์แบบแม่เหล็กถาวร

- แบบผสม (HYBRID-H) สเต็ปมอเตอร์ (STEPPING MOTOR) สเต็ปมอเตอร์แบบผสมจะเป็นลูกผสมของแบบแปรค่ารีลักแตนซ์ กับแบบแม่เหล็กถาวร ดังแสดงตามรูปที่ 2.87 โดยจะมีส่วนสเตเตอร์คล้ายกับที่ใช้ในแบบแปรค่ารีลักแตนซ์ โรเตอร์จะมีฝาครอบหุ้มปลายซึ่งมีลักษณะของสารแม่เหล็กที่มีกำลังสูง โดยการควบคุมขนาดรูปร่างของฝาครอบแม่เหล็กอย่างดี ทำให้ได้มุมการหมุนและแม่นยำ ข้อดีก็คือ ให้แรงบิดสูงและมีขนาดกระทัดรัด และให้แรงฉุด ยึดโรเตอร์นิ่ง ขนาดของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ที่มีการผลิตและวางจำหน่ายภายในท้องตลาด โดยมีตั้งแต่ขนาดแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า 3 โวลต์ ไปจนถึง 24 โวลต์ และ 48 โวลต์



รูปที่ 2.86 แสดงสแต็ปมอเตอร์ และไดรเวอร์

ที่มา: <https://www.mmthailand.com/products/closed-loop-stepping-motor/>



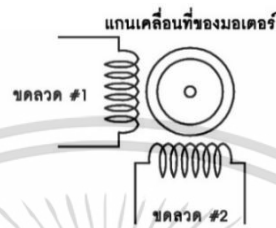
รูปที่ 2.87 แสดงโครงสร้างอย่างง่ายของสเต็ปมอเตอร์แบบผสม (HYBRID-H)

ที่มา: <http://www.advance-electronic.com/blog/detail/107/th/>

ในปัจจุบันนี้สเต็ปเปอร์มอเตอร์ส่วนใหญ่เป็นแบบไฮบริด เนื่องจากสามารถทำให้มีความละเอียดในการเคลื่อนที่ของแกนได้สูงถึง 0.9 องศาต่อสเต็ป (ซึ่งเป็นข้อดีของแบบแปรค่ารีลักแตนซ์) และให้แรงบิดที่สูง โดยมีการใช้พลังงานต่ำ (เป็นข้อดีของแบบแม่เหล็กถาวร) โดยในรูปที่ 2.87 แสดงโครงสร้างอย่างง่ายของสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบไฮบริด ดังนั้นการกำหนดชนิดของสเต็ปเปอร์มอเตอร์ในยุคต่อมาจนถึงปัจจุบัน จึงพิจารณาที่ลักษณะของการพันขดลวด, การต่อสายออกมาใช้งาน และวงจรขับ ซึ่งแบ่งเป็น 2 ชนิดหลัก ๆ คือ ชนิดไบโพลาร์ (bipolar) และชนิด

ยูนิโพลาร์ (uni-polar)
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ชนิดไบโพลาร์ (Bipolar) สเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบไบโพลาร์ มีลักษณะการพันขดลวดของมอเตอร์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.88 จะแบ่งออกเป็น 2 ขด ที่ไม่มีแท่งกลาง การขับให้มอเตอร์แบบนี้หมุนจะต้องป้อนแรงดันต่างขั้วกันให้แก่ขดลวดแต่ละขด ทำให้วงจรขับสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบนี้ค่อนข้างซับซ้อน



รูปที่ 2.88 แสดงลักษณะการพันขดลวดสเต็ปเปอร์มอเตอร์ยูนิโพลาร์

ที่มา: <http://www.advance-electronic.com/blog/detail/107/th/>

2. ชนิดยูนิโพลาร์ (Uni-polar) การกระตุ้นและควบคุมการหมุนของมอเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปในแต่ละสเต็ป ทำได้โดยจ่ายกำลังไฟฟ้าเข้าไปยังขดลวดแต่ละขดบนสเตเตอร์ ซึ่งต้องป้อนเป็นแบบซีแควนเชียลในรูปแบบที่ถูกต้องด้วย โดยสามารถแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบคือ แบบเวฟ (wave) หรือแบบฟูลสเต็ป 1 เฟส (full step 1-phase), แบบฟูลสเต็ป 2 เฟส และแบบครึ่งสเต็ป (half step) โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

- การกระตุ้นสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบเวฟหรือฟูลสเต็ป 1 เฟส เป็นการกระตุ้นที่มีรูปแบบง่ายที่สุด โดยทำการกระตุ้นขดลวดที่ละขด ดังแสดงตามรูปที่ 2.89 ในเวลาหนึ่งไล่เรียงถัดกันไป เช่น เริ่มต้นที่ขดที่ 1, 2, 3, 4 แล้ววนกลับมาขดที่ 1 วนไปเรื่อย ๆ หรือเริ่มที่ขดที่ 1 แล้วย้อนไปยังขดที่ 4, 3, 2 แล้วกลับมาขดที่ 1 อีกครั้ง ซึ่งทำให้ทิศทางของการหมุนสวนกัน ในการกระตุ้นรูปแบบนี้จึงมีขดลวดเพียงขดเดียวในเวลาหนึ่งที่ถูกกระตุ้นเท่านั้น

สเต็ปที่	เฟสที่1	เฟสที่2	เฟสที่3	เฟสที่4
1	1	0	0	0
2	0	1	0	0
3	0	0	1	0
4	0	0	0	1

รูปที่ 2.89 แสดงการกระตุ้นสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบเวฟ หรือฟูลสเต็ป 1 เฟส

ที่มา: <http://www.advance-electronic.com/blog/detail/107/th/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การกระตุ้นแบบฟูลสเต็ม 2 เฟส เป็นการกระตุ้นซึ่งคล้ายกับแบบฟูลสเต็มหนึ่งเฟส แต่การกระตุ้นแบบนี้จ่ายกำลังไฟฟ้าไปที่ขดลวด 2 ขด ที่อยู่ใกล้กันในเวลาเดียวกัน ดังแสดงตามรูปที่ 2.90 และเรียงถัดกันไปเช่นเดียวกับแบบฟูลสเต็ม 1 เฟส ขดลวดชุดแรกที่ถูกระตุ้นจะเป็นขดที่ 1 และ 2 ตามด้วยการกระตุ้นขดที่ 2 และ 3 ต่อไปเป็นขดที่ 3 และ 4 ถัดไปเป็นขดที่ 4 และ 1 แล้วกลับมาที่ขดที่ 1 และ 2 วนไปตามลำดับเช่นนี้ หรือเริ่มที่ขด 1 และ 4 ตามด้วยขดที่ 4 และ 3 ถัดไปเป็นขดที่ 3 และ 2 ต่อไปเป็นขดที่ 2 และ 1 แล้ววนกลับมาที่ขดที่ 1 และ 4 ทิศทางการหมุนจะสวนทางกัน การกระตุ้นสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบนี้ สามารถเพิ่มแรงบิดได้มากกว่าแบบฟูลสเต็ม 1 เฟส โรเตอร์จะเคลื่อนที่ด้วยแรงดึงอย่างเต็มแรงจาก 2 ขดลวดที่ถูกระตุ้นพร้อมกัน และเคลื่อนที่ด้วยแรงดึงจากอีก 2 ขดลวดถัดไป

สเต็ปที่	เฟสที่1	เฟสที่2	เฟสที่3	เฟสที่4
1	1	1	0	0
2	0	1	1	0
3	0	0	1	1
4	1	0	0	1

รูปที่ 2.90 แสดงการกระตุ้นสเต็ปเปอร์มอเตอร์แบบฟูลสเต็ม 2 เฟส

ที่มา: <http://www.advance-electronic.com/blog/detail/107/th/>

- การกระตุ้นแบบครึ่งสเต็ป หรือฮาล์ฟสเต็ป จะเป็นรูปแบบที่ผสมผสานระหว่างการกระตุ้นแบบฟูลสเต็ม 1 เฟส และ 2 เฟส ดังแสดงตามรูปที่ 2.91 เพื่อเพิ่มจำนวนของสเต็ปต่อรอบอีกเท่าตัวหนึ่ง ในระบบนี้จะกระตุ้นขดลวดเรียงกันไปเป็นลำดับดังนี้ เริ่มจากขดลวดที่ 1, 1 และ 2, 2 และ 3, 3 และ 4, 4, 4 และ 1 แล้ววนกลับมาขดลวดที่ 1 แรงบิดที่ได้จากการกระตุ้นแบบนี้ จะเพิ่มมากขึ้นอีก เพราะช่วงสเต็ปมีระยะสั้นลง แต่ละสเต็ปเกิดแรงดึงจากขดลวด 2 ขด ที่ถูกระตุ้นพร้อมกัน ความถูกต้องของตำแหน่งมีเพิ่มมากขึ้น แต่ต้องพึงระวังไว้อีกประการหนึ่งว่า เมื่อกระตุ้นให้ทำงานในรูปแบบนี้จะต้องทำการหมุนถึง 2 สเต็ป จึงจะได้เท่ากับระยะเท่ากับ 1 สเต็ปเต็มของการควบคุมใน 2 แบบแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าต้องใช้ขนาดเท่ากับแบบ 2 เฟส เป็น
อย่างน้อยจึงจะเพียงพอ

สเต็ปที่	เฟสที่1	เฟสที่2	เฟสที่3	เฟสที่4
1	1	0	0	0
2	1	1	0	0
3	0	1	0	0
4	0	1	1	0
5	0	0	1	0
6	0	0	1	1
7	0	0	0	1
8	1	0	0	1

รูปที่ 2.91 แสดงการกระตุ้นสเต็ปมอเตอร์แบบครึ่งสเต็ปหรือฮาล์ฟสเต็ป

ที่มา: <http://www.advance-electronic.com/blog/detail/107/th/>

2.6.4.3 หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Motor)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Motor) คือ มอเตอร์ที่ป้อนไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไปเพื่อให้ได้พลังงานกลออกมา โครงสร้างของมอเตอร์คล้ายมอเตอร์กระแสตรง แต่มีจำนวนเฟสทั้ง 3 เฟส และ 1 เฟส โดยแบบ 3 เฟส จะมีจำนวนขดลวดเพิ่มขึ้นเป็น 3 ชุด มอเตอร์กระแสสลับนิยมใช้งานทุกประเภท ตั้งแต่อุปกรณ์ขนาดเล็กไปจนถึงอุปกรณ์ที่ใช้งานภายในอุตสาหกรรมทุกประเภท เนื่องจากมีราคาถูกกว่าเครื่องจักรกลไฟฟ้ากระแสตรง สามารถต่อเข้ากับไฟฟ้ากระแสสลับได้โดยง่าย และต้องการการบำรุงรักษาน้อย นิยมใช้งานมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำ (Induction Motor) เป็นจำนวนมาก แสดงได้ดังต่อไปนี้

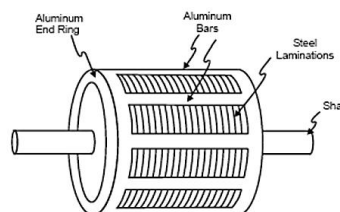
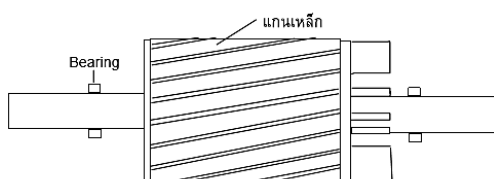
1. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส ส่วนมากจะเป็นมอเตอร์ที่มีขนาดเล็ก ขนาดไม่เกิน 10 แรงม้า เหมาะสำหรับการใช้งานทั่ว ๆ ไป เช่น ปั๊มน้ำ พัดลมระบายอากาศ ที่ไม่ต้องการกำลัง และแรงบิดมากนัก ดังนั้นไม่สามารถสร้างสนามแม่เหล็กหมุนได้ด้วยตัวเอง จึงไม่สามารถสร้างแรงบิดเริ่มหมุนให้เกิดขึ้นได้ โดยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส มีหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่ต้องการใช้
2. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส (Three Phase Motor) เป็นมอเตอร์ที่ได้รับความนิยมใช้งานในโรงงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส ชนิดที่มีโรเตอร์แบบกรงกระรอก (Squirrel Cage Rotor Motor) มีข้อดีคือ ไม่มีแปรงถ่านทำให้การสูญเสียเนื่องจากความฝืดมีค่าน้อย มีตัวประกอบกำลังสูง การบำรุงรักษาต่ำ การเริ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดินมอเตอร์สามารถทำได้ไม่ยาก ความเร็วรอบค่อนข้างคงที่ สร้างง่าย
ทนทาน ราคาถูกและมีประสิทธิภาพสูง

2.6.4.4 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ

1. สปลิตเฟสมอเตอร์ (Split phase motor) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ
สลับชนิดเฟสเดียวแบบสปลิต (แบบเหนี่ยวนำ) เฟสมอเตอร์มีขนาด
แรงม้าขนาดตั้งแต่ 1/4 แรงม้า , 1/3 แรงม้า, 1/2 แรงม้า ซึ่งจะมีขนาด
ไม่เกิน 1 แรงม้า และในบางที่นิยมเรียกสปลิตเฟสมอเตอร์นี้ว่า
อินดักชั่นมอเตอร์ (Induction motor) มอเตอร์ชนิดนี้นิยมใช้งานมาก
ในตู้เย็น เครื่องสูบน้ำขนาดเล็ก เครื่องซักผ้า เป็นต้น โครงสร้างของ
สปลิตเฟสมอเตอร์ สเตเตอร์ทำด้วยเหล็กแผ่นลามิเนตมีร่องเป็นแบบ
กึ่งปิด โครงทำด้วยเหล็กหล่อหรือเหล็กเหนียว ขดลวดที่พันไว้ในร่อง
ของสเตเตอร์มีสองชุด (เป็นลวดทองแดงอบด้วยฉนวนไฟฟ้า) คือ
ขดลวดช่วย (Auxiliary winding) ขดสตาร์ท (Starting winding) และ
ขดลวดหลัก (Main winding) หรือขดรัน (Running winding)
โรเตอร์ทำด้วยเหล็กแผ่นบาง ๆ อัดซ้อนกัน มีร่องไปทางยาวซึ่งจะมี
แท่งทองแดงหรือแท่งอลูมิเนียมฝังอยู่โดยรอบ โดยปลายของแท่ง
ทองแดงหรือแท่งอลูมิเนียมจะเชื่อมติดกันด้วยวงแหวน ซึ่งมีลักษณะ
คล้ายกรงกระรอกแบบนี้ว่า โรเตอร์กรงกระรอก (Squirrel cage
rotor) ดังแสดงตามรูปที่ 2.92 สวิตช์แรงเหวี่ยง (Centrifugal
switch) สวิตช์แรงเหวี่ยงติดตั้งอยู่ภายในมอเตอร์ ดังแสดงตามรูปใน
ตัวอย่างที่ 2.93 ซึ่งมีหน้าที่ตัดขดสตาร์ทออกจากวงจร ดังแสดงตาม
รูปในตัวอย่างที่ 2.94 หลังจากที่ได้ตัวของโรเตอร์หมุนได้ความเร็ววงที่
ประมาณ 75% ของความเร็วเต็มพิกัด และโดยทั่ว ๆ ไปสวิตช์แรง
เหวี่ยงประกอบด้วยส่วนประกอบสองส่วน คือส่วนที่อยู่กับที่จะอยู่กับ
ฝาครอบมอเตอร์ และส่วนที่หมุนจะอยู่ที่เพลารอเตอร์



รูปที่ 2.92 แสดงโครงสร้างของโรเตอร์กรงกระรอก (Squirrel cage rotor)

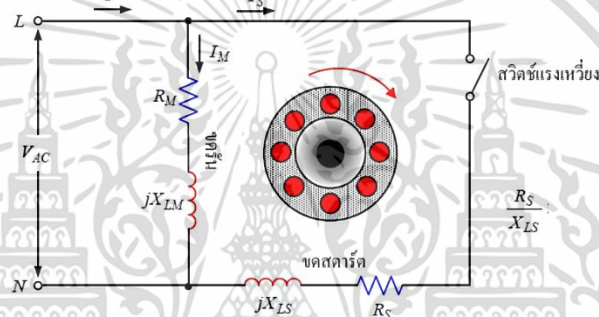
ที่มา: https://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2553/2489/7/296679_ch2.pdf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.93 แสดงสวิตช์แรงเหวี่ยง (Centrifugal switch)

ที่มา: <https://thaipick.com/product/lazada/2703597>



รูปที่ 2.94 แสดงวงจรการต่อสปลิทเฟสมอเตอร์

ที่มา: <http://www.csmt-shop.com/15792851/%E0%B8%AA>

2. คาปาซิเตอร์มอเตอร์ (Capacitor Motor) คาปาซิเตอร์เตอร์เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส ดังแสดงตามรูปที่ 2.95 ที่มีลักษณะคล้ายสปลิทเฟสมอเตอร์มาก เพียงแต่ต่างกันตรงที่มีคาปาซิเตอร์เพิ่มขึ้นมา ทำให้มอเตอร์แบบนี้มีคุณสมบัติพิเศษกว่าสปลิทเฟสมอเตอร์คือ มีแรงบิดขณะสตาร์ทสูงใช้กระแสขณะสตาร์ทน้อย มอเตอร์ชนิดนี้มีขนาดตั้งแต่ 1/20 แรงม้าถึง 10 แรงม้า มอเตอร์นี้นิยมใช้งานเกี่ยวกับปั้มน้ำ เครื่องอัดลม ตู้แช่ ตู้เย็น ฯลฯ

- คาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์ (Capacitor start motor) ลักษณะโครงสร้างทั่วไปของคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์จะเหมือนกับตัวของสปลิทเฟส แต่วงจรขดลวดสตาร์ทพันด้วยขดลวดใหญ่ขึ้นกว่าสปลิทเฟส ดังแสดงตามรูปที่ 2.96 และพันจำนวนรอบมากกว่าขดลวดชุดรันแล้วต่อตัวคาปาซิเตอร์ที่เป็นชนิดอิเล็กโทรไลต์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.97 อนุกรมเข้าในวงจรขดลวดสตาร์ท มีสวิตช์

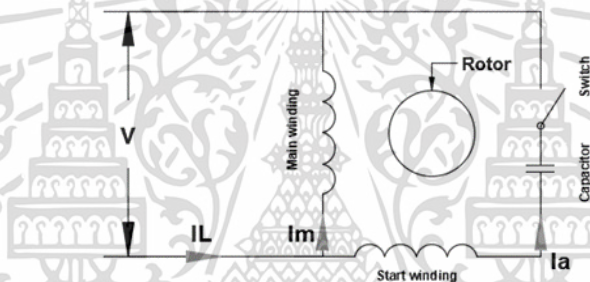
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางตัดตัวคาปาซิเตอร์ และขดสตาร์ทออก
จากวงจร



รูปที่ 2.95 แสดงคาปาซิเตอร์มอเตอร์ (Capacitor Motor)

ที่มา: <https://www.linquip.com/blog/what-is-capacitor-start-induction-motor/>



รูปที่ 2.96 แสดงวงจรคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์ (Capacitor start motor)

ที่มา: <http://www.csmt-shop.com/15792851/%E0%B8%AA>



รูปที่ 2.97 แสดงวงจรคาปาซิเตอร์สตาร์ทมอเตอร์ (Capacitor start motor)

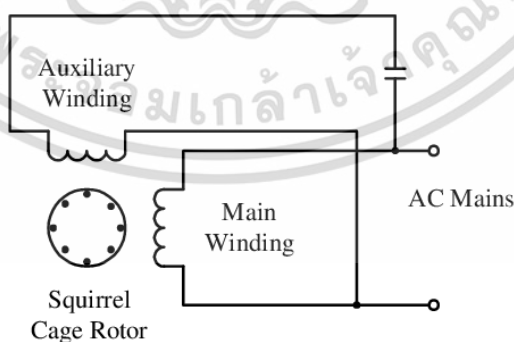
ที่มา: <http://www.csmt-shop.com/15792851/%E0%B8%AA>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- คาปาซิเตอร์รันมอเตอร์ (Capacitor run motor) ลักษณะโครงสร้างทั่วไปของคาปาซิเตอร์รันมอเตอร์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.98 เหมือนกับชนิดคาปาซิเตอร์สตาร์ท แต่จะไม่มีสวิตช์ แรงเหวี่ยง ตัวคาปาซิเตอร์จะต่ออยู่ในวงจรตลอดเวลา ทำให้มีค่าพาวเวอร์แฟคเตอร์ดีขึ้น โดยที่ตัวของคาปาซิเตอร์ต้องต่อถาวรอยู่ขณะทำงาน แต่สำหรับมอเตอร์ชนิดคาปาซิเตอร์รัน คาปาซิเตอร์จะต่ออยู่ในวงจรตลอด ดังแสดงตามรูปที่ 2.99 และเนื่องจากขดลวดชุดสตาร์ททำงานตลอดเวลา การออกแบบจึงต้องให้กระแสผ่านขดลวดน้อยกว่าแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ท โดยการลดค่าของคาปาซิเตอร์ลง ดังนั้นแรงบิดจึงมีค่าลดลงกว่าแบบคาปาซิเตอร์สตาร์ท แต่ยังสูงกว่าแบบสปลิทเฟสมอเตอร์

รูปที่ 2.98 แสดงลักษณะของคาปาซิเตอร์ ที่ใช้กับคาปาซิเตอร์รันมอเตอร์

ที่มา: <https://www.thaiaircare.com/article/1206/>



รูปที่ 2.99 แสดงวงจรคาปาซิเตอร์รันมอเตอร์ (Capacitor run motor)

ที่มา: [https://www.researchgate.net/figure/Capacitor-Run-Single-Phase-](https://www.researchgate.net/figure/Capacitor-Run-Single-Phase-Induction-Motor_fig3_241590054)

[Induction-Motor_fig3_241590054](https://www.researchgate.net/figure/Capacitor-Run-Single-Phase-Induction-Motor_fig3_241590054)

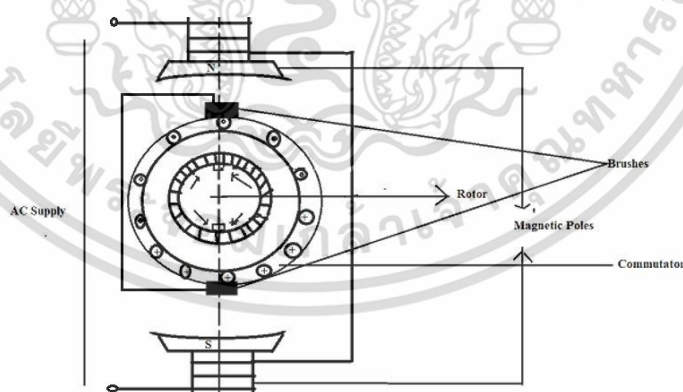
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. รีพัลชันมอเตอร์ (Repulsion Motor) ดังแสดงตามรูปที่ 2.100 เป็นมอเตอร์ที่มีขดลวดโรเตอร์ (Rotor) จะต่อเข้ากับคอมมิวเตเตอร์ และมีแปรงถ่านเป็นตัวต่อ ลัดวงจร ดังแสดงตามรูปที่ 2.101 จึงทำให้ปรับความเร็วและแรงบิดได้ โดยการปรับตำแหน่งแปรงถ่าน สเตเตอร์จะมีขดลวดพันอยู่ภายในร่องเพียงชุดเดียว เหมือนกับขดลวดของที่อยู่ในสปลิทเฟสมอเตอร์ เรียกว่า ขดลวดเมน (Main winding) ต่อกับแหล่งจ่ายไฟโดยตรง แรงบิดเริ่มหมุนสูง ความเร็วคงที่ มีขนาดตั้งแต่ 0.37 - 7.5 กิโลวัตต์ (10 แรงม้า) ใช้กับงานจำพวกปั๊ม เช่น ปั๊มคอมเพลสเซอร์ ปั๊มลม หรือปั๊มน้ำขนาดใหญ่



รูปที่ 2.100 แสดงรีพัลชันมอเตอร์ (Repulsion Motor)

ที่มา: <http://www.csmt-shop.com/15792859/%E0%B8%A3>



รูปที่ 2.101 แสดงโครงสร้างของรีพัลชันมอเตอร์ (Repulsion Motor)

ที่มา: <http://www.csmt-shop.com/15792859/%E0%B8%A3>

4. ยูนิเวอร์แซลมอเตอร์ (Universal Motor) ดังแสดงตามรูปที่ 2.102 เป็นมอเตอร์ขนาดเล็กมีขนาดกำลังไฟฟ้าตั้งแต่ 1/200 แรงม้าถึง 1/30 แรงม้า นำไปใช้ได้กับ แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง และใช้ได้กับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

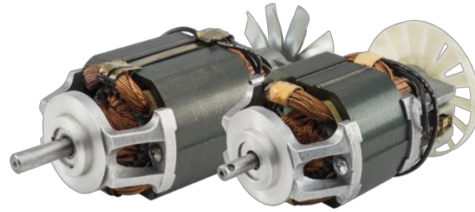
แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 1 เฟส มอเตอร์ชนิดนี้มีคุณสมบัติที่โดดเด่น คือให้แรงบิดเริ่มหมุนสูง นำไปปรับความเร็วได้ ทั้งปรับความเร็วได้ง่ายทั้งวงจรลดแรงดัน และวงจรควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ นิยมนำไปใช้เป็นตัวขับเคลื่อนใช้ไฟฟ้าภายในบ้าน เช่น เครื่องบดและผสมอาหาร มีดโกนหนวดไฟฟ้า เครื่องนวดไฟฟ้า มอเตอร์จักรเย็บผ้า ส่วนไฟฟ้า เป็นต้น มีลักษณะโครงสร้าง ดังแสดงตามรูปที่ 2.103 และวงจรภายในของยูนิเวอร์แซลมอเตอร์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.104 หลักการทำงานของยูนิเวอร์แซลมอเตอร์ เมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้กับวงจรของมอเตอร์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.105 (ก) โดยในซีกบวกของรูปคลื่นไซน์กระแสไฟฟ้าจะไหลเข้ามอเตอร์ ที่ขั้วไลน์ (L) และไหลออกจากมอเตอร์ที่ขั้วนิวทรัล (N) ที่สเตเตอร์จะเกิดขั้วเหนื่ออยู่ด้านบน และเกิดขั้วใต้อยู่ด้านล่างตัวนำของอาร์เมเจอร์ด้านบนจะมีกระแสไหลเข้า และด้านล่างจะมีกระแสไหลออก ผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์กับขดลวดอาร์เมเจอร์จะทำให้เกิดแรง (F) และหมุนทวนเข็มนาฬิกา แต่ถ้าในซีกลบของรูปคลื่นไซน์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.105 (ข) กระแสไฟฟ้าจะไหลเข้ามอเตอร์ที่ขั้วนิวทรัล (N) และไหลออกจากมอเตอร์เข้าที่ขั้วไลน์ (L) ที่สเตเตอร์จะเกิดขั้วเหนื่ออยู่ด้านล่าง และขั้วใต้อยู่ด้านบน ตัวนำของอาร์เมเจอร์ด้านล่างจะมีกระแสไหลเข้าและไหลออกที่ตัวนำด้านบน ดังนั้นผลรวมของเส้นแรงแม่เหล็กที่ขดลวดสเตเตอร์ กับขดลวดอาร์เมเจอร์จะทำให้เกิดแรง และหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาเช่นกัน



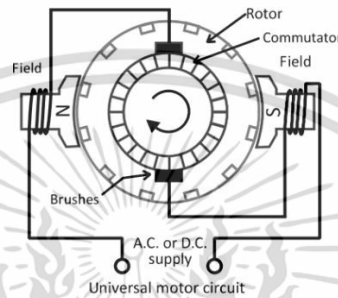
รูปที่ 2.102 แสดงยูนิเวอร์แซลมอเตอร์ (Universal Motor)

ที่มา: http://9engineer.com/index.php?m=article&a=show&article_id=2485

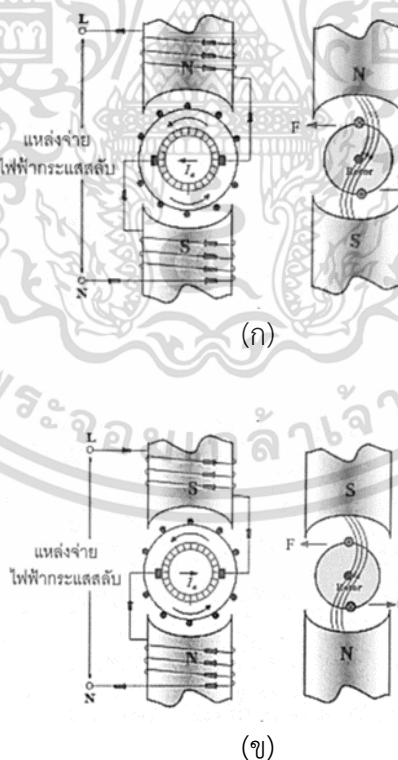
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.103 แสดงโครงสร้างของยูนิเวอร์แซลมอเตอร์ (Universal Motor)
 ที่มา: http://9engineer.com/index.php?m=article&a=show&article_id=2485



รูปที่ 2.104 แสดงวงจรยูนิเวอร์แซลมอเตอร์ (Universal Motor)
 ที่มา: http://9engineer.com/index.php?m=article&a=show&article_id=2485



รูปที่ 2.105 (ก) และ (ข) แสดงหลักการทำงานของยูนิเวอร์แซลมอเตอร์ (Universal Motor)
 ที่มา: http://9engineer.com/index.php?m=article&a=show&article_id=2485

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

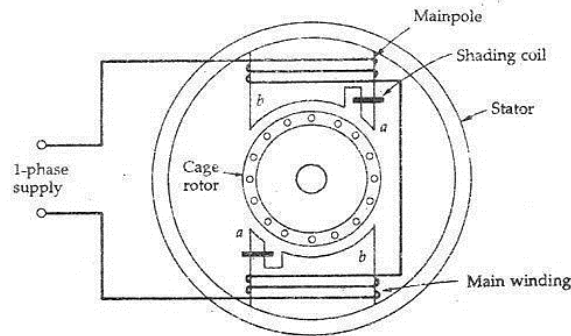
5. เซ็ตเด็ตโพลมอเตอร์ (Shaded Pole Motor) เป็นมอเตอร์ขนาดเล็กที่สุด มีแรงบิดเริ่มหมุนต่ำมากนำไปใช้งานได้กับเครื่องใช้ไฟฟ้าขนาดเล็ก ๆ เช่น ไดร์เป่าผม พัดลมขนาดเล็ก

- หลักการทำงานของเซ็ตเด็ตโพลมอเตอร์ (Shaded Pole Motor) โดยปกติมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 เฟส หรือซิงเกิลเฟส ทั่ว ๆ ไปจะประกอบไปด้วยขดลวดสองชุด คือ ขดลวดหลัก (Main Winding) และขดลวดสตาร์ท (Start Winding) ดังแสดงตามรูปที่ 2.106 แต่สำหรับมอเตอร์ชนิดนี้จะมีขดลวดเพียงแค่เส้นเดียวเท่านั้น ก็คือ ขดลวดหลัก (Main Winding) และไม่มีขดลวดสตาร์ท แต่จะใช้วงแหวนทองแดงซึ่งเรียกว่าเซ็ตเด็ตริง (Shaded Ring) โดยเซ็ตเด็ตริง จะทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็ก ซึ่งเกิดจากการเหนี่ยวนำขึ้นมาอีกชุด หลังจากที่ขดลวดหลักได้รับการจ่ายกระแสไฟฟ้า ดังแสดงตามรูปที่ 2.107 และสร้างสนามแม่เหล็กออกมา แต่สนามแม่เหล็กที่เกิดจากเซ็ตเด็ตริงจะเกิดขึ้นช้ากว่าสนามแม่เหล็ก จากนั้นผลจากสนามแม่เหล็กทั้งสองก็จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กรวม และทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุน (Rotating field) หลังจากที่เกิดสนามแม่เหล็กหมุนแล้ว สนามแม่เหล็กก็จะไปตัดกับตัวนำที่ฝังอยู่ในโรเตอร์ ซึ่งมีโครงสร้างคล้ายหรือเหมือนกับมอเตอร์เหนี่ยวนำทั่วไป และเป็นผลทำให้เกิดการเหนี่ยวนำ และหลังจากเกิดการเหนี่ยวนำแล้วก็จะทำให้เกิดแรงบิด และทำให้โรเตอร์เกิดการหมุนเคลื่อนที่ตามมา โดยทั่วไปมอเตอร์ชนิดนี้จะเป็นมอเตอร์ที่มีขนาดเล็กที่สุด มีขนาดอยู่ที่ระหว่าง $1/20$ ถึง $1/6$ และมีแรงบิดเริ่มหมุนต่ำมาก



รูปที่ 2.106 แสดงเซ็ตเด็ตโพลมอเตอร์ (Shaded Pole Motor)

ที่มา: <https://www.indiamart.com/proddetail/shaded-pole-motor-13788388762.html>
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์อื่น ๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.107 แสดงโครงสร้างวงจรของเซ็ดเด็ตโพลมอเตอร์ (Shaded Pole Motor)

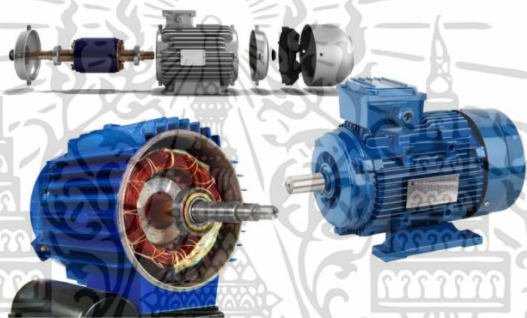
ที่มา: <https://circuitglobe.com/shaded-pole-induction-motor.html>

6. วาดโรเตอร์มอเตอร์ (Wound Rotor) มอเตอร์แบบวาดโรเตอร์ (Wound-rotor) หรือแบบแหวนเลื่อน (Slip-ring) จะมีแกนหมุนพันอยู่ในขดลวดที่มีตัวนำไฟฟ้านำไปสู่แหวนเลื่อนเพื่อสอดแทรกตัวความต้านทานไว้เพิ่มแรงบิดในขณะสตาร์ท และลดกระแสในการสตาร์ท และยังมีประสิทธิภาพต่อการลดความเร็วลง 50% ภายใต้แรงบิดขณะรับภาระเต็มที่ มอเตอร์แบบนี้เหมาะกับอุปกรณ์ขนถ่ายทุกชนิดที่ต้องควบคุมแรงบิดในขณะสตาร์ท มอเตอร์แบบวาดโรเตอร์ อาจจะใช้เป็นมอเตอร์ความเร็วคงที่ หรือเป็นมอเตอร์ปรับความเร็วได้ทั้ง 2 แบบ มอเตอร์แบบวาดโรเตอร์ สามารถควบคุมแรงบิดในช่วงเวลาการสตาร์ทได้โดยการเพิ่มความต้านทานภายนอก เข้าไปในขดลวดทุติยภูมิ (Secondary Winding) ของมอเตอร์ ทำให้สามารถกำหนดแรงบิดระหว่างการสตาร์ท ให้เหมาะสมกับมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนถ่ายแต่ละแบบ โดยในการขับมอเตอร์ประเภทนี้ได้มีการใช้กันอย่างกว้างขวางในสายพานลำเลียงขนาดใหญ่ ๆ

7. สควิเรลเคจโรเตอร์มอเตอร์ (Squirrel Cage Rotor Motor) Squirrel cage motor ดังแสดงตามรูปที่ 2.108 คือ อซิงโครนสมอเตอร์หรือมอเตอร์เหนี่ยวนำประเภทหนึ่งที่มีตัวแกนโรเตอร์ มีลักษณะเป็นแบบกรงกระรอก ซึ่งถือว่าเป็นมอเตอร์ที่มีการใช้ในอุตสาหกรรมสูงสุด เนื่องด้วยปัจจัยของราคาที่ไม่แพง และค่าบำรุงรักษาต่ำ ผู้ผลิตมอเตอร์ส่วนใหญ่จะใช้เป็นสินค้าหลักในการทำตลาด โดยมีหลากหลายราคา ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของมอเตอร์ ด้วยเหตุผลดังกล่าวมอเตอร์ที่มีขนาดเท่ากัน ราคาต่างกันก็จะมีประสิทธิภาพที่ไม่เหมือนกัน ตัวอย่างเช่น มอเตอร์ของ ABB รุ่นที่มีสัญลักษณ์หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องหมายประหยัดพลังงาน ก็จะใช้พลังงานที่ต่ำกว่า แต่ได้จะได้กำลังงานกลที่เท่ากัน และเพื่อให้ง่ายต่อการเลือกใช้หรือแยกแยะประสิทธิภาพของมอเตอร์ตามมาตรฐาน IEC 60034 - 30 นั้น ได้แบ่งคลาสของมอเตอร์ออกเป็น 4 คลาส คือ IE1, IE2, IE3 และ IE4 โดยเรียงตามประสิทธิภาพจากต่ำไปสู่อันดับสูง ซึ่ง IE4 จะเป็นคลาสที่มีประสิทธิภาพสูงสุดอันดับชั้นมอเตอร์ 3 เฟสแบบสควิเรลเคจโรเตอร์ เป็นโรเตอร์ที่ให้กำลังแรงม้าต่ำเมื่อเทียบกับมอเตอร์แบบอื่น ๆ แต่จะมีจุดเด่น คือ จะมีความเร็วรอบการทำงานคงที่ในโหลดที่มีขนาดต่าง ๆ กัน และการบำรุงรักษามอเตอร์แบบนี้ไม่ยุ่งยาก จึงทำให้มอเตอร์แบบสควิเรลเคจโรเตอร์เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย



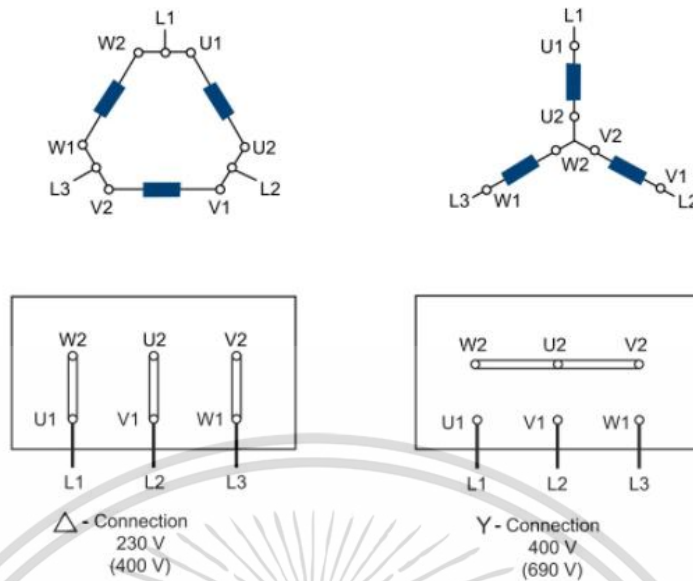
รูปที่ 2.108 แสดงสควิเรลเคจโรเตอร์มอเตอร์

(Squirrel Cage Rotor Motor, Induction motor)

ที่มา: https://favpng.com/png_view/engine-squirrel-cage-rotor-electric-motor

2.6.5 แรงดันไฟฟ้าในการเริ่มต้นใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส (Start AC Induction motor 3 phase)

แรงดันที่ใช้ในการเริ่มต้นใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส นั้นจะขึ้นอยู่กับวิธีการต่อมอเตอร์ หรือการเข้าสายที่ตัวมอเตอร์ แต่โดยปกติแล้วจะมีอยู่ด้วยกัน 2 วิธี คือ การต่อสายแบบสตาร์ (Star wiring) และต่อสายแบบเดลต้า (Delta wiring) ดังแสดงตามรูปที่ 2.109 (ก) และภายในเนมเพลทของมอเตอร์นั้น จะบอกรายละเอียดทั้งหมดอยู่แล้วว่าการต่อแบบสตาร์ หรือแบบเดลต้าสามารถใช้แรงดันกี่โวลต์ได้บ้าง และการต่อสามารถใช้แรงดันกี่โวลต์ได้บ้าง จากตัวอย่างเนมเพลทมอเตอร์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.109 (ข)



(ก)

Direct-on-line start or, with Δ-connection, also Y/Δ-start				
Motor size	S		D	
	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz
56-100	220-240 VΔ 380-415 VY	- 440-480 VY	380-415 VΔ 660-690 VY	440-480 VΔ -
112-132	220-240 VΔ 380-415 VY	- 440-480 VY	380-415 VΔ 660-690 VY	440-480 VΔ -
160-450 ¹⁾	220, 230 VΔ 380, 400, 415 VY	- 440 VY	380, 400, 415 VΔ 660 VY	440-480 -
Motor size	E		F	
	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz
56-100	500 VΔ	๓	500 VY	๓
112-132	500 VΔ	๓	500 VY	๓
160-450	500 VΔ	๓	๓	๓

(ข)

รูปที่ 2.109 (ก) แสดงการต่อวงจร AC Induction motor 3 phase
(ข) Nameplate motor

ที่มา: <https://mall.factomart.com/guide-to-motor-control/asynchronous-3-phase-electrical-motors/>

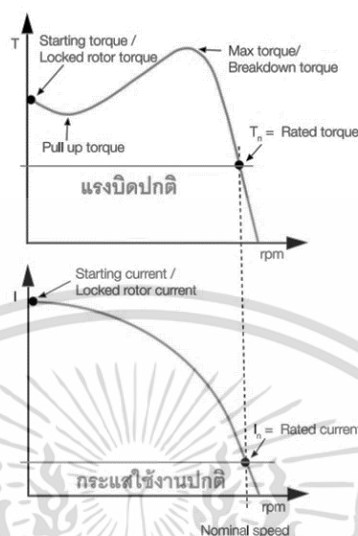
2.6.6 ความสัมพันธ์ของกระแส และแรงบิดของมอเตอร์ 3 เฟส

ความสัมพันธ์ของกระแส จะมีการแสดงถึงความสัมพันธ์ของกระแสที่ใช้งานที่มีความสัมพันธ์กับแรงบิดของมอเตอร์ออกมา เพื่ออธิบายถึงความสัมพันธ์ของทั้ง 2 ตัวแปร ดังแสดงตามรูปที่ 2.110

1.ช่วงเวลาเริ่มต้น (Starting time) เป็นช่วงเวลาที่ทำให้เกิดค่ากระแสเริ่มต้น ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่ากระแสปกติถึง 6 - 8 เท่า และค่าแรงบิดที่สูงกว่าแรงบิดปกติประมาณ 1.5 - 2.5 เท่า ของแรงบิดปกติ ดังนั้นเวลาออกแบบอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในการเริ่มการทำงานมอเตอร์ และกลไกต่าง ๆ ต้องสามารถทนได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ช่วงความเร็วปกติ (Runing time) เป็นช่วงเวลาที่ความเร็วมอเตอร์เข้าสู่ความเร็วปกติ และทำให้มอเตอร์กินกระแส และให้แรงบิดไว้ตามรายละเอียดบนเนมเพลทของมอเตอร์



รูปที่ 2.110 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดปกติ และกระแสใช้งานปกติ
ของมอเตอร์ไฟฟ้า 3 เฟส

ที่มา: <https://mall.factomart.com/guide-to-motor-control/asynchronous-3>

2.7 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Electric generator)

เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) คือเครื่องมือที่ใช้สำหรับแปลงพลังงานกลเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กตามหลักการของ ไมเคิล ฟาราเดย์ คือ เมื่อมีสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดผ่านขดลวดหรือขดลวดเคลื่อนที่ตัดสนามแม่เหล็ก จะทำให้ได้ไฟฟ้าออกมา เครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญสองส่วนคือ ส่วนที่สร้างสนามแม่เหล็ก เรียกว่าฟิลด์ (Field) และส่วนที่สร้างแรงดันไฟฟ้าเรียกว่าอาเมเจอร์ หรือโรเตอร์ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถจำแนกออกเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ 2 ชนิด เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternator) ดังแสดงตามรูปที่ 2.111 และเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (Dynamo) โดยทั่วไปเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะประกอบด้วยส่วนสำคัญอยู่ 2 ส่วน โดยที่ขดลวดอาเมเจอร์ หรือโรเตอร์ ซึ่งเป็นส่วนที่เคลื่อนที่นั้น จะมีขดลวดตัวนำฝังอยู่ในร่องรอบแกนโรเตอร์ที่ทำจากแผ่นเหล็กซิลิคอน (Silicon Steel Sheet) มีขนาดความหนาอยู่ที่ประมาณ 0.35 - 0.5 มิลลิเมตร นำมาอัดแน่นโดยระหว่างแผ่นเหล็กซิลิคอนจะมีฉนวนเคลือบ ทั้งนี้เพื่อลดการสูญเสียที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าไหลวน (Eddy Current) ภายในแกนเหล็กของโรเตอร์จะได้รับไฟฟ้ากระแสตรงจากเอ็กไซเตอร์ (Excitor) เพื่อทำหน้าที่ในการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระตุ้นเพื่อสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น และอีกส่วนหนึ่งของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า คือ ส่วนที่อยู่กับที่เรียกว่าสเตเตอร์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.112 ภายในร่องแกนสเตเตอร์มีขดลวดซึ่งทำจากแผ่นเหล็กอัดแน่นเช่นเดียวกับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โรเตอร์ฝังอยู่ โดยอาศัยหลักการของการเคลื่อนที่ของแม่เหล็กผ่านลวดตัวนำ และจะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้าที่สเตเตอร์และนำแรงดันไฟฟ้านี้ไปใช้ต่อไป



รูปที่ 2.111 แสดงเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ (Alternator)

ที่มา: <https://tooltalking.com/%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A3>

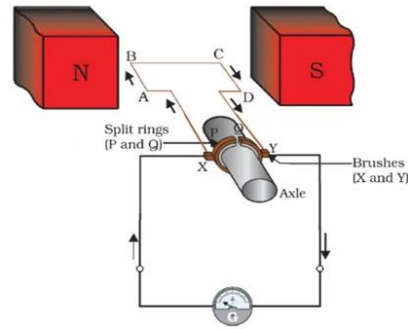


รูปที่ 2.112 แสดงขดลวดสเตเตอร์ (Stator coil)

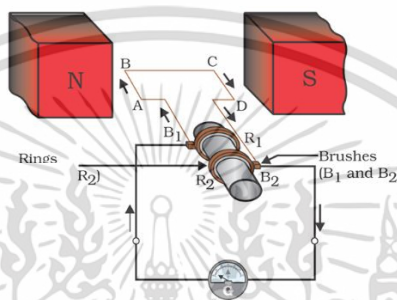
ที่มา: <https://thai.alibaba.com/product-detail/Motorcycle-Stator-Coil-Magneto>

หลักการโดยง่ายของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เมื่อสนามแม่เหล็กหมุนผ่านขดลวดบนสเตเตอร์จะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสและแรงดันขึ้นที่ขดลวด สนามแม่เหล็กเกิดขึ้นได้จากการป้อนไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปในขดลวดของโรเตอร์ กระแสไฟฟ้ากระแสตรง จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่โรเตอร์ และเมื่อโรเตอร์หมุน จะเหนี่ยวนำแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ และเกิดไฟฟ้าขึ้นที่ขดลวดสเตเตอร์ ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Generator) ฟิลด์จะเป็นส่วนที่อยู่กับที่ และในส่วนของอาเมเจอร์จะเป็นส่วนที่มีการเคลื่อนที่ หลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ ดังแสดงตามรูปที่ 2.113 (ก) และรูปที่ 2.113 (ข) ตามลำดับ ไม่ว่าจะเป็เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ต่างก็มีหลักการทํางานที่เหมือนกัน นั่นก็คือการนำขดลวดอาร์เมเจอร์และขดลวดสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ตัดผ่านกัน จึงจะได้พลังงานไฟฟ้าออกมา ดังนั้นจึงต้องมีขดลวดชุดหนึ่งอยู่กับที่ และมีขดลวดอีกชุดหนึ่งที่หมุนเคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.113 (ก) แสดงหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง
(ข) แสดงหลักการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ
ที่มา: <https://www.owlgen.in/draw-a-labeled-diagram-of-an-a-c-generator-explain-briefly-its-principle-and-working/>

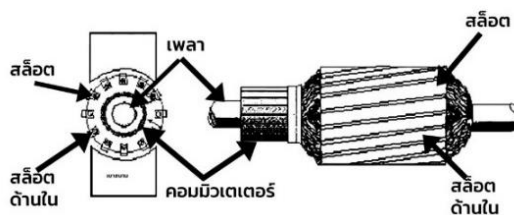
2.7.1 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Generator)

โดยปกติแล้วเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง จะถูกออกแบบให้กำเนิดไฟฟ้าในลักษณะให้ขดลวดอาร์เมเจอร์เป็นส่วนที่เคลื่อนที่ และส่วนที่อยู่กับที่นั่นคือขดลวดสนามแม่เหล็ก เมื่อพลังงานกลจากต้นกำลังหมุนขั้วเพลาส่งกำลังไปยังแกนขดลวดอาร์เมเจอร์ และแรงหมุนของแกนอาร์เมเจอร์จะมีการเคลื่อนที่ และตัดผ่านสนามแม่เหล็กที่ถูกปล่อยออกมาจากขดลวดแม่เหล็ก ภายในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง สามารถเพิ่มแรงดันไฟฟ้าขึ้นได้ โดยการปรับค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก และเพิ่มความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

2.7.1.1 โครงสร้าง และส่วนประกอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

ลักษณะการทำงานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงนั้น แกนเหล็กของขดลวดอาร์เมเจอร์ จะเป็นส่วนที่เคลื่อนที่ตัดผ่านสนามแม่เหล็ก ขดลวดแม่เหล็กจะเป็นส่วนที่อยู่กับที่ ซึ่งจะยึดติดอยู่กับโครงเครื่อง ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงจะมีอยู่ 6 ส่วน ดังแสดงตามรูปที่ 2.114

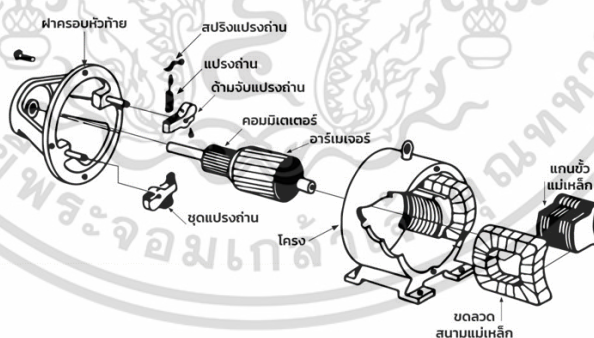
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.114 แสดงโครงสร้าง และส่วนประกอบเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

ที่มา: <https://tooltalking.com/%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0>

1. อาร์เมเจอร์ (ส่วนที่หมุน หรือโรเตอร์) ดังแสดงตามรูปที่ 2.115 เป็นส่วนที่ผลิตแรงเคลื่อนไฟฟ้า (แรงดันไฟฟ้า) โดยการหมุนตัดผ่านกับสนามแม่เหล็ก ซึ่งโครงสร้างของอาร์เมเจอร์จะประกอบไปด้วยแกนเหล็ก และขดลวดรวมเป็นชุดแกนขดลวดอาร์เมเจอร์ หรือโรเตอร์ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า
2. แกนเหล็กอาร์เมเจอร์ จะผลิตจากแผ่นเหล็กซิลิคอน โดยแผ่นมีความหนาที่ประมาณ 0.5 มม. ผิวทั้งสองด้านของแกน ด้วยฉนวนไฟฟ้า แล้วนำแผ่นเหล็กมาอัดซ้อนกันเป็นรูปทรงกลม จะต้องอัดแผ่นเหล็กซิลิคอนให้ขึ้นรูปทรงกระบอก เพื่อลดการสะสมของฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loss) หรือการสูญเสียของเส้นแรงแม่เหล็ก จากขดลวดที่มีกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (Eddy Current Loss)

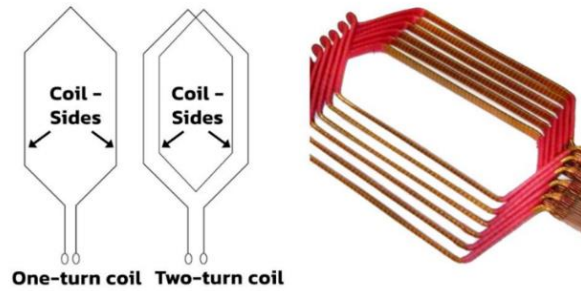


รูปที่ 2.115 แสดงอาร์เมเจอร์กำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง

ที่มา: <https://tooltalking.com/%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0>

3. ขดลวดอาร์เมเจอร์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.116 จะผลิตจากเส้นลวดทองแดงที่ฉาบด้วยฉนวนไฟฟ้า เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กหรือที่มีกำลังไฟใช้งานไม่สูงมาก จะใช้เส้นลวดทองแดงพื้นที่หน้าตัดกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.116 แสดงขดลวดอาร์เมเจอร์ และการพันขดลวดแบบ One-turn coil และ Two-turn coil

ที่มา: <https://tooltalking.com/%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0>

4. ขั้วแม่เหล็ก (ส่วนที่อยู่กับที่, สเตเตอร์) คือ ส่วนที่สร้างสนามแม่เหล็ก โดยขั้วแม่เหล็กจะเป็นส่วนที่อยู่กับที่ และยึดติดกับโครงเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง
5. คอมมิวเตเตอร์ (Comutator) คือ ส่วนที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับในขดลวดอาร์เมเจอร์ให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง (DC) นอกจากนี้คอมมิวเตเตอร์ ทำหน้าที่ในการเรียงกระแสไฟฟ้า โดยที่คอมมิวเตเตอร์ จะผลิตจากแท่งทองแดง และมีการคว้านลักษณะรูปลิ้ม เพื่อสะดวกในการนำมาประกอบเป็นรูปทรงกระบอก ดังแสดงตามรูปที่ 2.117 แต่จะมีแผ่นไม้ก้ำกึ่งกลางไว้ในแต่ละซี่ ความหนาของซี่คอมมิวเตเตอร์ จะอยู่กับขนาดกำลังไฟใช้งานของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า รวมถึงแรงดันระหว่าง ซี่คอมมิวเตเตอร์ที่อยู่ชิดกับโครงภายในของคอมมิวเตเตอร์



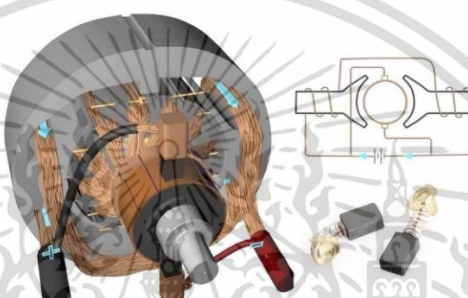
รูปที่ 2.117 แสดงคอมมิวเตเตอร์ (Comutator) ที่ติดตั้งอยู่กับฉนวนและเพลลา

ที่มา: <https://tooltalking.com/%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0>

6. แปรงถ่าน (Carbon Brush) สำหรับแปรงถ่าน ดังแสดงตามรูปที่ 2.118 และชุดยึดแปรงถ่าน จะมีหน้าที่ต่อวงจรปิดลวดอาร์เมเจอร์กับวงจรรภายนอกเข้าด้วยกัน โดยแปรงถ่านจะสัมผัสกับผิวหน้าของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอมมิวเตเตอร์อยู่ตลอด ทั้งนี้แปรงถ่านจะผลิตจากวัสดุ 2 ชนิด คือ คาร์บอน และแกรไฟต์ โดยแปรงถ่านชนิดที่ทำจากผงถ่านคาร์บอนบริสุทธิ์ จะเหมาะสำหรับใช้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กที่มีขนาดกำลังไฟใช้งานต่ำ ส่วนแปรงถ่านที่ผลิตจากแกรไฟต์ ซึ่งเป็นการเพิ่มปริมาณความร้อนให้ผงถ่านคาร์บอนบริสุทธิ์ จนเปลี่ยนสภาพเป็นแกรไฟต์ เป็นการเพิ่มคุณสมบัติให้แปรงถ่านดียิ่งขึ้นแปรงถ่านแกรไฟต์ จึงเหมาะสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าที่มีขนาดกำลังไฟใช้งานสูง แต่จะมีแรงดันต่ำ

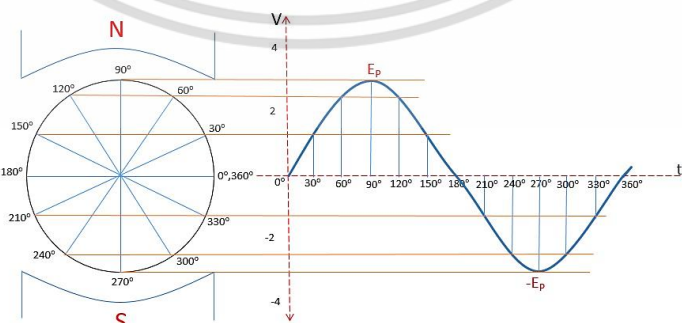


รูปที่ 2.118 แสดงแปรงถ่าน (Carbon Brush)

ที่มา: <https://tooltalking.com/%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0>

2.7.2 การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ (Sine Wave)

แรงเคลื่อนไฟฟ้าของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงนั้น จะสร้างแรงเคลื่อนเอาต์พุตรูปคลื่นไซน์ขึ้น จากนั้นจึงจะถูกเปลี่ยนให้เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรงด้วยคอมมิวเตเตอร์ การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ เมื่อขดลวดมีการเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ จะได้รูปคลื่นไซน์ครบ 1 รูปคลื่นพอดี โดยจะทำให้เกิดแรงเคลื่อนรูปไซน์ขึ้นในวงขดลวด และจะมีทิศทางแรงเคลื่อนไฟฟ้า ดังแสดงตามตัวอย่างในรูปที่ 2.119 และกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นซ้ำไปเรื่อย ๆ ในแต่ละรอบของการเคลื่อนที่



รูปที่ 2.119 แสดงการเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ (Sine Wave)

ที่มา: <https://tooltalking.com/%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

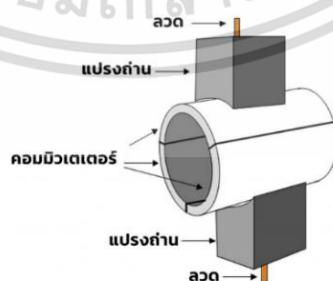
2.7.3 เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Generator)

ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ ฟิลด์และอาเมเจอร์สามารถเป็นได้ทั้งส่วนที่อยู่กับที่ และส่วนที่เคลื่อนที่ โดยในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดเล็กจะสามารถสร้างได้ทั้งแบบฟิลด์ และอาเมเจอร์เคลื่อนที่ แต่ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่จะสร้างได้แต่แบบอาเมเจอร์อยู่กับที่เท่านั้น เพราะจะมีปัญหาน้อยกว่า แรงดันที่เกิดขึ้นในเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 2 ปัจจัย คือ ความเร็วรอบ และเส้นแรงแม่เหล็ก ในเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ การเพิ่มแรงดันโดยการเพิ่มความเร็วมักจะทำได้เหมือนเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรง (DC Generator) เพราะจะทำให้ความถี่ของแรงดันไฟฟ้าที่ได้เปลี่ยนแปลงไป สามารถทำได้เพียงการปรับความเข้มของสนามแม่เหล็กเท่านั้น

2.7.3.1 การเปลี่ยนแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับของคอมมิวเตเตอร์ และแปรงถ่าน

ถ่าน

คอมมิวเตเตอร์ จะทำหน้าที่เปลี่ยนแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับ ดังแสดงตามรูปที่ 2.120 ที่เกิดขึ้นภายในวงขดลวดให้เป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งจะเชื่อมต่อระหว่างแปรงถ่านกับวงขดลวด โดยคอมมิวเตเตอร์มีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนแปรงถ่านนั้นจะทำหน้าที่เชื่อมต่อแรงเคลื่อนของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไปยังวงจรรภายนอก โดยแปรงถ่านแต่ละอันจะต้องเชื่อมเข้ากับปลายแต่ละข้างของวงขดลวด แต่ทั้งนี้แปรงถ่านไม่สามารถเชื่อมต่อเข้ากับวงขดลวดโดยตรง เนื่องจากวงขดลวดเป็นส่วนที่หมุนเคลื่อนที่ แปรงถ่านทั้งสองด้านจึงถูกต่อเชื่อมโยงเข้ากับปลายทั้งสองของวงขดลวด โดยผ่านคอมมิวเตเตอร์แทน นอกจากนี้การทำงานของคอมมิวเตเตอร์ และแปรงถ่านที่ทำให้ได้แรงเคลื่อนเอาต์พุต ในขณะที่แปรงถ่านแต่ละอันผ่านจากซีกคอมมิวเตเตอร์หนึ่งไปอีกซีกหนึ่ง แปรงถ่านจะสัมผัสกับซีกทั้งสองของคอมมิวเตเตอร์พร้อม ๆ กัน ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าจำนวนมากไหลในวงขดลวด โดยสาเหตุที่เป็นเช่นนี้ เพราะแปรงถ่านทั้งสองอันจะลัดวงจรปลายทั้งสองของวงขดลวดเข้าด้วยกันโดยตรง

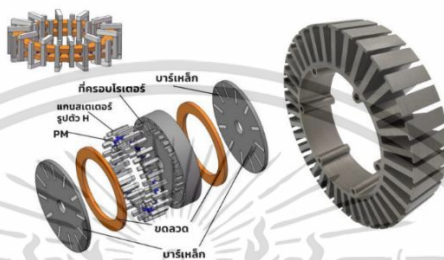


รูปที่ 2.120 แสดงการเปลี่ยนแรงเคลื่อนไฟฟ้ากระแสสลับของคอมมิวเตเตอร์ และแปรงถ่าน

ที่มา: <https://tooltalking.com/%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0>

2.7.3.2 โครงสร้างและส่วนประกอบ เครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ

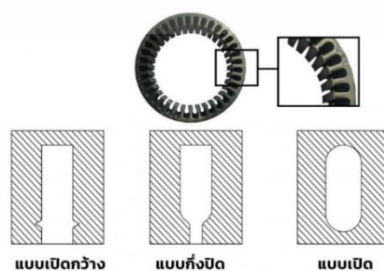
1. โครงสเตเตอร์ (Stator Frame) เป็นโครงโลหะ หุ้มภายนอกผลิตจากเหล็กหล่อ โดยโครงสเตเตอร์เป็นส่วนประกอบที่รองรับส่วนประกอบอื่น ๆ ของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะทำหน้าที่ยึดแกนเหล็กที่บรรจุขดลวดอาร์เมเจอร์ ทั้งนี้ได้มีการออกแบบโครงสเตเตอร์ให้มีช่องลมเพื่อช่วยในการระบายความร้อน ดังแสดงตามรูปที่ 2.121



รูปที่ 2.121 แสดงโครงสเตเตอร์ (Stator Frame)

ที่มา: <https://tooltalking.com/%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0>

2. แกนเหล็กสเตเตอร์ (Stator Core) คือ ชิ้นส่วนที่ใช้พันขดลวดอาร์เมเจอร์ โดยแกนเหล็กสเตเตอร์จะผลิตจากแผ่นเหล็กบาง ๆ วางอัดซ้อนกัน โดยเหตุผลที่จะต้องออกแบบแกนเหล็กสเตเตอร์ให้มีลักษณะเช่นนี้ ก็เพื่อลดการสูญเสีย เนื่องจากฮิสเทอรีซิส (Hysteresis Loss) หรือการสูญเสียของเส้นแรงแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นจากขดลวดที่มีกระแสไหลวนในแกนเหล็ก (Eddy Current Loss) อีกทั้งแกนแผ่นเหล็กยัง เป็นเหล็กอ่อนบางซึ่งมีส่วนผสมของสารซิลิคอน เมื่อนำมาอัดซ้อนกันจะทำให้ได้แกนเหล็กที่มีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้แผ่นเหล็กแต่ละแผ่นจะมีร่องอากาศเพื่อระบายความร้อน ดังแสดงตามรูปที่ 2.122

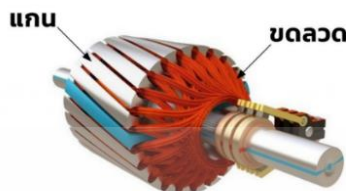


รูปที่ 2.122 แสดงแกนเหล็กสเตเตอร์ (Stator Core)

ที่มา: <https://tooltalking.com/%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

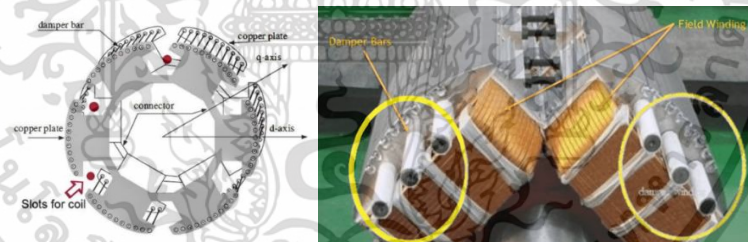
3. โรเตอร์ (Rotor) คือ ท่อนหมุนซึ่งมีขดลวดฝังอยู่รอบแกนโรเตอร์ โดยที่โรเตอร์ จะผลิตจากแผ่นซิลิคอนอัดแน่นเป็นชั้นพร้อมกับมีฉนวนกัน เพื่อสร้างกระแสไฟฟ้าไหลวน ดังแสดงตามรูปที่ 2.123



รูปที่ 2.123 แสดงท่อนหมุนซึ่งมีขดลวดฝังอยู่รอบแกนโรเตอร์

ที่มา: <https://tooltalking.com/%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0>

4. ขดลวดแดมเปอร์ (Damper Winding) จะมีลักษณะเป็นแท่งทองแดง ซึ่งฝังอยู่ที่ผิวด้านหน้าของขั้วแม่เหล็กหมุน โดยจะต่อลวดวงจรเข้ากับวงแหวนทองแดงทั้งสองด้านของโรเตอร์ ดังแสดงตามรูปที่ 2.124 ทั้งนี้ขดลวดแดมเปอร์จะช่วยไม่ให้เกิดการสั่น หรือเกิดการแกว่ง เมื่อความเร็วรอบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ



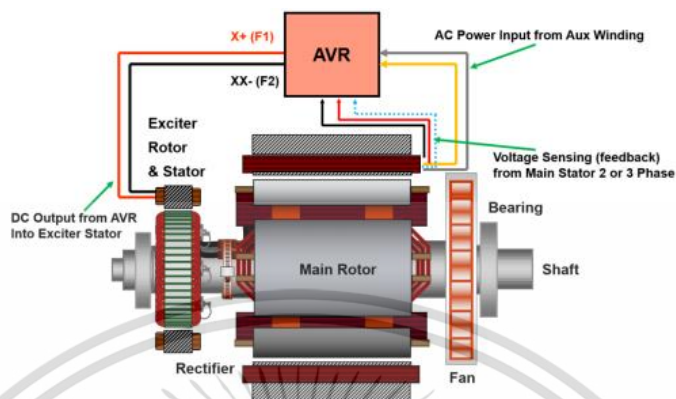
รูปที่ 2.124 แสดงโครงสร้าง และลักษณะของขดลวดแดมเปอร์ (Damper Winding)

ที่มา: <https://tooltalking.com/%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0>

5. เอ็กไซเตอร์ (Exciter) ดังแสดงตามรูปที่ 2.125 ชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่ผลิตและจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง ให้กับขดลวดสนามแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ โดยเอ็กไซเตอร์จะถูกติดตั้งในตำแหน่งเพลลาเดียวกันกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ทั้งนี้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่จะใช้เอ็กไซเตอร์แบบไร้แปรงถ่าน เพื่อความสะดวกในการบำรุงรักษา หากเทียบกับการใช้สปริง หรือแปรงถ่าน อีกทั้งระบบการกระตุ้นขดลวดสนามแม่เหล็กที่สมบูรณ์ ไม่จำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าจากภายนอกมากระตุ้น แต่จะใช้ไฟลิตเอ็กไซเตอร์ติดตั้งในตำแหน่งเพลลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของโรเตอร์ ซึ่งเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส ขนาดเล็กที่มีขั้วแม่เหล็กหมุนเป็นแบบแม่เหล็กถาวร



รูปที่ 2.125 แสดง Generator Excitation Control Systems

ที่มา: <https://tooltalking.com/%E0%B9%80%E0%B8%84%E0%B8%A3%E0>

2.7.4 หลักการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

กระแสไฟฟ้าในขดลวดตัวนำ จะเกิดจากการที่มีการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านขดลวดตัวนำเรียกการทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าลักษณะนี้ว่า การเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า (electro magnetic induction) และเรียกกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากวิธีนี้ว่า กระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (induced current) หลักการเหนี่ยวนำของแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสามารถแบ่งได้ดังนี้

2.7.4.1 แบบหมุนวน Revolving Armature Type (Ra Type)

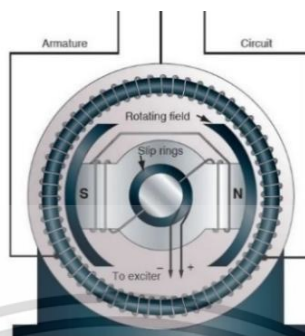
หลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะใช้วิธีหมุนขดลวดทองแดงที่พันอยู่บนแกนเพลลาหมุนตัดผ่านเส้นแรงแม่เหล็กที่อยู่บนเปลือก ทำให้เกิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นที่ปลายขดลวดทองแดง นำเอาแรงดันไฟฟ้านี้ไปใช้งาน โดยผ่านวงแหวนทองเหลือง และแปรงถ่าน ขั้วแม่เหล็ก ที่จะทำให้เกิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำนี้ไม่ได้เป็นแม่เหล็กถาวรหรือแม่เหล็กธรรมชาติที่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กคงที่ แต่ใช้ไฟฟ้ากระแสตรงป้อนผ่านขดลวดทองแดงที่พันรอบแกนเหล็กอ่อน เพื่อทำให้เกิดแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้น ปริมาณของไฟฟ้ากระแสตรงนี้จึงสามารถควบคุมปริมาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้โดยการเพิ่ม หรือลดปริมาณของไฟฟ้ากระแสตรง

2.7.4.2 แบบขั้วแม่เหล็กหมุน Revolving Field Type (Rf Type)

หลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็กของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะใช้วิธีหมุนขั้วแม่เหล็กที่อยู่บนเพลลา ทำให้เส้นแรงแม่เหล็กมีการตัดผ่านขดลวดทองแดงที่พันติดอยู่บนเปลือกของขั้วแม่เหล็ก ดังแสดงตามรูปที่ 2.126 ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าบนปลายขดลวดทองแดง แบบนี้ไม่ต้องมีวงแหวนทองเหลืองและแปรงถ่าน เพื่อนำแรงดันไฟฟ้าไปใช้งาน แต่จะมีแปรงถ่านและวงแหวนทองเหลืองซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อกับขดลวดทองแดงที่พันอยู่บนแกนแม่เหล็ก เพื่อใช้สำหรับป้อนไฟฟ้ากระแสตรงไปเลี้ยงขดลวดทองแดง เพื่อสร้างความเข้มของสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.126 แสดงการเหนี่ยวนำแม่เหล็กแบบขั้วแม่เหล็กหมุน
Revolving Field Type (Rf Type)

ที่มา: http://avstop.com/ac/Aviation_Maintenance_Technician_Handbook_General/

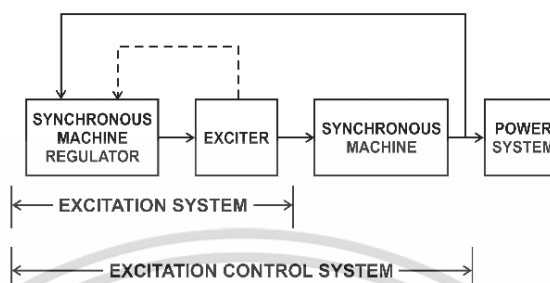
2.7.4.3 แบบไม่มีแปรงถ่าน Brushless Type (Bl Type)

วงแหวนทองเหลือง แบบนี้แบ่งตามขั้นตอนการทำงานออกเป็น ส่วน ๆ ได้ทั้งหมด 4 ส่วน ดังต่อไปนี้

1. เอ็กไซเตอร์ (Exciter) ประกอบด้วยฟิลด์คอยล์เป็นขดลวดที่ทำให้เกิดแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยจะติดอยู่กับส่วนที่อยู่กับที่ ซึ่งอาร์เมเจอร์เป็นชุดที่ประกอบด้วยขดลวด ที่จะถูกทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเหนี่ยวนำ โดยเป็นส่วนที่ติดอยู่กับเพลลาและหมุนไปพร้อมกับเพลลา กระแสที่เกิดขึ้นในอาร์เมเจอร์จะเป็นไฟฟ้า กระแสสลับ 3 เฟส
2. วงจรเรียงกระแสแบบหมุน (Rotating Rectifier) จะติดอยู่บนเพลลา จึงส่งผลให้หมุนตามเพลลาไปด้วย โดยมีหน้าที่แปลงกระแสไฟฟ้าสลับที่เกิดขึ้นจากอาร์เมเจอร์ให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรง
3. เครื่องกำเนิดหลัก (Main Generator) เป็นส่วนที่ผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อออกไปใช้งานจริง ประกอบด้วยขดลวดที่พันรอบแกนแม่เหล็กที่ติดกับเพลลาเพื่อทำให้เหล็กกลายเป็นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยได้รับไฟฟ้ากระแสตรงมาจากวงจรเรียงกระแสแบบหมุน และสเตเตอร์คอยล์ ซึ่งเป็นขดลวดที่จะถูกทำให้เกิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำขึ้นและจ่ายกระแสไฟฟ้าสลับออกไปใช้งาน
4. เครื่องปรับแรงดันไฟฟ้าอัตโนมัติ (Automatic Voltage Regulator) หรือ A.V.R. เป็นชุดควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่นำไปใช้งานในคังที่ ดังแสดงตามรูปที่ 2.127 ซึ่งเป็นการทำงานควบคุมอย่างอัตโนมัติ หลักการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นเป็นชอบระโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำงานของ A.V.R. เป็นการนำกระแสลับที่เกิดจากสเตเตอร์คอยล์มาแปลงเป็นกระแสตรง จ่ายเข้าเอ็กไซเตอร์คอยล์โดยปริมาณกระแสตรง จะมีการควบคุมให้มากหรือน้อยตามสภาพการณ์ของแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 2.127 แสดง Block diagram of the components of an excitation control system

ที่มา: <https://www.researchgate.net/figure/Block-diagram-of-the-components>

2.8 Radio remote controller

Radio remote controller ดังแสดงตามรูปที่ 2.128 คือ เทคโนโลยีที่ช่วยให้การติดต่อสื่อสารระหว่างภาครับ และภาคส่ง โดยปราศจากการใช้สายสัญญาณในการเชื่อมต่อการรับส่งข้อมูลระหว่างกันจะผ่านอากาศ โดยจะใช้คลื่นวิทยุเป็นช่องทางการสื่อสารแทน ทำให้ไม่ต้องเดินสายสัญญาณ และติดตั้งใช้งานได้สะดวกขึ้นวิทยุควบคุม (มักย่อมาจาก R/C หรือเพียงแค่ RC) คือการใช้สัญญาณควบคุมที่ส่งโดยวิทยุเพื่อควบคุมอุปกรณ์จากระยะไกล ตัวอย่างของระบบควบคุมวิทยุอย่างง่าย ได้แก่ ที่เปิดประตูโรงรถ และระบบทางเข้าแบบไม่ใช้กุญแจ สำหรับยานพาหนะซึ่งเครื่องส่งวิทยุแบบมือถือขนาดเล็กจะเป็นตัวปลดล็อกหรือเปิดประตู นอกจากนี้ยังใช้การควบคุมวิทยุสำหรับการควบคุมยานพาหนะจากเครื่องส่งวิทยุ มือถือ องค์กร อุตสาหกรรม การทหาร และการวิจัยทางวิทยาศาสตร์ ก็ใช้ประโยชน์จากยานพาหนะที่ควบคุมด้วยวิทยุเช่นกัน แอปพลิเคชันการใช้งานที่เติบโตอย่างรวดเร็วคือ การควบคุมอากาศยานที่ไร้คนขับ สำหรับการใช้งานทั้งพลเรือนและทหารแม้ว่าระบบเหล่านี้จะมีระบบควบคุมที่ซับซ้อนกว่าการใช้งานทั่วไปก็ตาม



รูปที่ 2.128 แสดง Radio remote controller

ที่มา: <https://www.tele-radio.com/us/safe-remote-control/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.1 FLYSKY 2.4 GHz FS-i6X digital proportional radio control system

FLYSKY 2.4 GHz 6-10 เป็นเครื่องส่งสัญญาณที่สร้างมาเพื่อควบคุมการส่งกำลังของเครื่องส่งสัญญาณที่สามารถตั้งโปรแกรมได้ ดังแสดงตามรูปที่ 2.129 ในการเขียนโปรแกรมนั้นสามารถเขียนได้ง่าย และใช้งานได้ง่ายสามารถใช้งานได้ด้วยการคลิกและปุ่มหมุนแบบเลื่อน เพื่อให้สามารถใช้งานเมนู และจัดการเมนูได้อย่างรวดเร็ว พร้อมทั้งหน้าจอขนาดใหญ่พร้อมแบบอักษรขนาดใหญ่ทำให้สามารถอ่านได้ง่าย และเมนูที่เรียบง่ายจะทำให้ในโปรแกรมเมอร์ครั้งแรกสามารถศึกษาข้อมูลและใช้งานได้โดยไม่ยาก และมีฟังก์ชันการเขียนโปรแกรมหลายรูปแบบ มีความสามารถในการป้องกันการรบกวน และใช้พลังงานต่ำ มีความไวของตัวรับสัญญาณสูง ระบบ 2.4 จิกะเฮิร์ตซ์ ทำให้วิฑูอยู่ภายนอกช่วงความถี่เหนือสิ่งรบกวนหรือ "เสียงรบกวน" ที่เกิดจากชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ เช่น มอเตอร์ ไร้แปรงถ่าน ตัวควบคุมความเร็วเซอร์โว หรือเสียงโลหะกับโลหะ อื่น ๆ ซึ่งจะสามารถช่วยขจัดสัญญาณรบกวนและความผิดพลาดได้

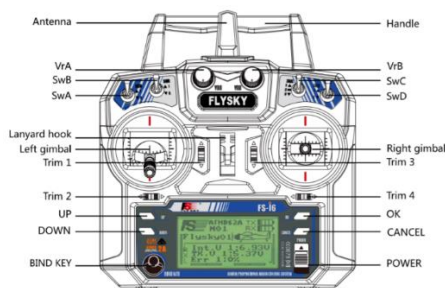


รูปที่ 2.129 แสดง FLYSKY 2.4Ghz FS-i6X digital proportional radio control system

ที่มา: <https://th.aliexpress.com/item/32788331725.html>

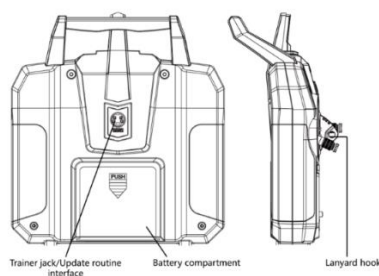
2.8.2 Transmitter Overview

โครงสร้างของรีโมท FLYSKY 2.4 GHz FS-i6X ดังแสดงตามรูปที่ 2.130 (ก) และ (ข) ซึ่งแสดงภาพรวมของรีโมทควบคุมทั้งด้านหน้า และด้านหลังรีโมท โดยข้อมูลของรีโมท FLYSKY 2.4 เฮิร์ตซ์ FS-i6X ดังแสดงตามตารางที่ 2.15



(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 2.142 (ก) และ (ข) แสดงภาพรวมของ FLYSKY 2.4Ghz ด้านหน้า และด้านหลัง
ที่มา: <https://fccid.io/N4ZFLYSKYI6X/User-Manual/User-Manual-3044503.html>

ตารางที่ 2.15 Transmitter specification (FS-i6)

ช่องสัญญาณ	10 ช่องสัญญาณ
รุ่น	Fixed-wing Glider Helicopter
ความละเอียด	4096
สัญญาณเตือนแรงดันต่ำ	4.2 โวลต์
พอร์ต DSC	PS/2 PPM
ความยาวเสาอากาศ	26x2 มม.
น้ำหนัก	392 กรัม
กำลังอินพุต	6 โวลต์ดีซี
หน้าจอแสดงผล	STN positive screen with backlight
ขนาด	174x89x190 มม.

2.8.3 Battery indicator

ไฟแสดงสถานะใช้เพื่อระบุพลังงาน และสถานะของเครื่องส่งสัญญาณ และเครื่องรับสัญญาณ หากผู้รับไม่ได้เชื่อมต่อหรือผูกไว้กับเครื่องส่งสัญญาณ สถานะของแบตเตอรี่จะไม่ปรากฏ ดังแสดงตามรูปที่ 2.131



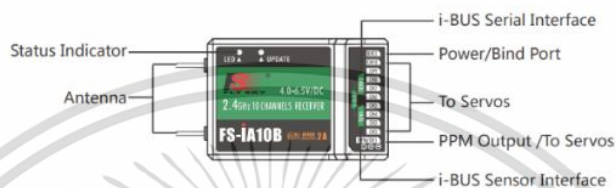
รูปที่ 2.131 แสดง Battery indicator

ที่มา: <https://fccid.io/N4ZFLYSKYI6X/User-Manual/User-Manual-3044503.html>

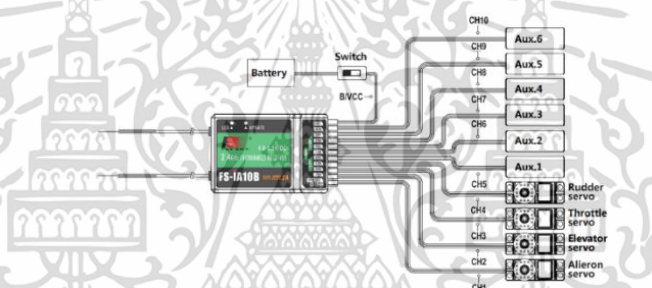
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.4 Receiver (FS-iA6)

ตัวเชื่อมต่อหรือตัวรับสัญญาณ ใช้สำหรับเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ที่ต้องการควบคุม และตัวเครื่องรับสัญญาณ ดังแสดงตามรูปที่ 2.132 (ก) ตั้งแต่ช่องรับสัญญาณที่ 1 - 10 ใช้ในการเชื่อมต่อมอเตอร์ เซอร์โวมอเตอร์ หรือส่วนอื่น ๆ ที่ต้องการควบคุม ดังแสดงตามรูปที่ 2.132 (ข) และข้อมูลตัวรับสัญญาณแสดงตามตารางที่ 2.16 โดยช่อง B/VCC จะใช้สำหรับเชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟ เพื่อให้ตัวเชื่อมต่อสัญญาณสามารถทำงานได้ปกติ



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.132 (ก) แสดง Receiver Overview

(ข) ตัวอย่างการเชื่อมต่อตัวตัวรับสัญญาณกับอุปกรณ์ที่ต้องการควบคุม

ที่มา: <https://fccid.io/N4ZFLYSKYI6X/User-Manual/User-Manual-3044503.html>

ตารางที่ 2.16 Receiver specification (FS-iA6)

ช่องสัญญาณ	10 ช่องสัญญาณ
รุ่น	Fixed-wing Glider Helicopter
ย่านความถี่ใช้งาน	2.4055-2.475 จิกะเฮิร์ตซ์
ความไวในการรับสัญญาณ	-105dBm
แบนด์วิดท์	5000 กิโลเฮิร์ตซ์
ประเภทของการปรับ	GFSK
กำลังอินพุต	4.0-6.5VDC
ความยาวเสาอากาศ	26x2 มม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ใด ๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 แบตเตอรี่ (Battery)

แบตเตอรี่ เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่จัดเก็บพลังงานเพื่อไว้ใช้ต่อไป เป็นอุปกรณ์ที่สามารถแปลงพลังงานเคมีให้เป็นไฟฟ้าได้โดยตรงด้วยการใช้เซลล์กัลวานิก (galvanic cell) ที่ประกอบด้วยขั้วบวกและขั้วลบ พร้อมกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte solution) แบตเตอรี่อาจประกอบด้วยเซลล์กัลวานิกเพียง 1 เซลล์ หรือมากกว่าก็ได้

2.9.1 ประเภทของแบตเตอรี่

2.9.1.1 แบตเตอรี่แบบใช้ครั้งเดียวทิ้ง หรือ แบตเตอรี่ชนิดปฐมภูมิ

เป็นแบตเตอรี่ที่เมื่อผ่านการใช้งานแล้ว จะไม่สามารถนำกลับมาชาร์จประจุเพื่อกลับมาใช้ใหม่ได้ ด้วยเหตุผลที่ว่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้นั้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางสารเคมีของเซลล์แบตเตอรี่ สารเคมีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปแล้วไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ และเมื่อสารเคมีถูกเปลี่ยนแปลงไปจนหมดพลังงานไฟฟ้าก็จะหมดจากแบตเตอรี่ไปด้วยเช่นกัน และจะกลายเป็นขยะมลพิษ แบตเตอรี่ประเภทนี้จะเหมาะสำหรับการนำไปใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าขนาดเล็ก เคลื่อนย้ายได้สะดวก และใช้พลังงานไฟฟ้าปริมาณน้อย ๆ เช่น ไฟฉาย นาฬิกา เครื่องคิดเลข ตัวอย่างแบตเตอรี่ประเภทนี้ได้แก่ Zinc-carbon Battery, Nickel oxyhydroxide battery เป็นต้น ดังแสดงตามรูปที่ 2.133



รูปที่ 2.133 ตัวอย่างแบตเตอรี่ Zinc-carbon Battery, Alkaline Battery

ที่มา: https://en.wikipedia.org/wiki/Alkaline_battery

2.9.1.2 แบตเตอรี่แบบชาร์จไฟใหม่ได้ หรือ แบตเตอรี่ชนิดทุติยภูมิ

เป็นแบตเตอรี่ที่เมื่อผ่านการใช้แล้วสามารถนำกลับมาชาร์จประจุไฟ เพื่อกลับมาใช้ใหม่ได้ เช่น แบตเตอรี่รถยนต์ แบตเตอรี่มือถือ และถ่านรุ่นใหม่ ๆ เป็นต้น แบตเตอรี่ชนิดอัดกระแสไฟใหม่ได้ สามารถอัดกระแสไฟใหม่ได้หลังจากไฟหมด เนื่องจากสารเคมีที่ใช้ทำแบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถทำให้กลับไปอยู่ในสภาพเดิมได้ โดยการอัดกระแสไฟเข้าไปใหม่ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้อัดไฟนี้เรียกว่า ชาร์จเจอร์ (Charger) การใช้งานแบตเตอรี่ประเภทนี้เหมาะกับการใช้งานในรถยนต์ไฟฟ้า เครื่องมือไฟฟ้า หรือวิทยุสื่อสาร ดังแสดงตามรูปที่ 2.134

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.134 ตัวอย่างแบตเตอรี่ Nickel cadmium battery , Lithium-Ion Battery
ที่มา: <https://exlbattery.com/technology/>

2.9.1.3 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium-Ion Battery)

จัดอยู่ในแบตเตอรี่แบบชาร์จไฟใหม่ได้ เป็นแบตเตอรี่คุณภาพสูงที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ (Rechargeable Battery) หรือใช้ซ้ำได้ ดังแสดงตามรูปที่ 2.135 สำหรับคุณสมบัติหลักของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน คือ การจ่ายไฟที่แรง และคงที่อยู่ตลอดเวลา แม้ไฟในแบตเตอรี่ใกล้จะหมดแถมยังมีระยะเวลาการชาร์จไฟจนเต็มความจุที่เร็วกว่าแบตเตอรี่แบบอื่น ๆ และยังสามารถใช้งานได้ยาวนานกว่าอีกด้วยเช่นกัน โดยอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนในระยะที่เต็มประสิทธิภาพ จะอยู่ระหว่าง 1.0 - 1.5 ปี ขึ้นอยู่กับปริมาณการใช้งานว่ามากหรือน้อย รวมไปถึงการดูแลรักษา



รูปที่ 2.135 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium-Ion Battery)

ที่มา: <https://reactual.com/outdoor-equipment-2/the-best-lithium-ion-deep-cycle-batteries-12v.html>

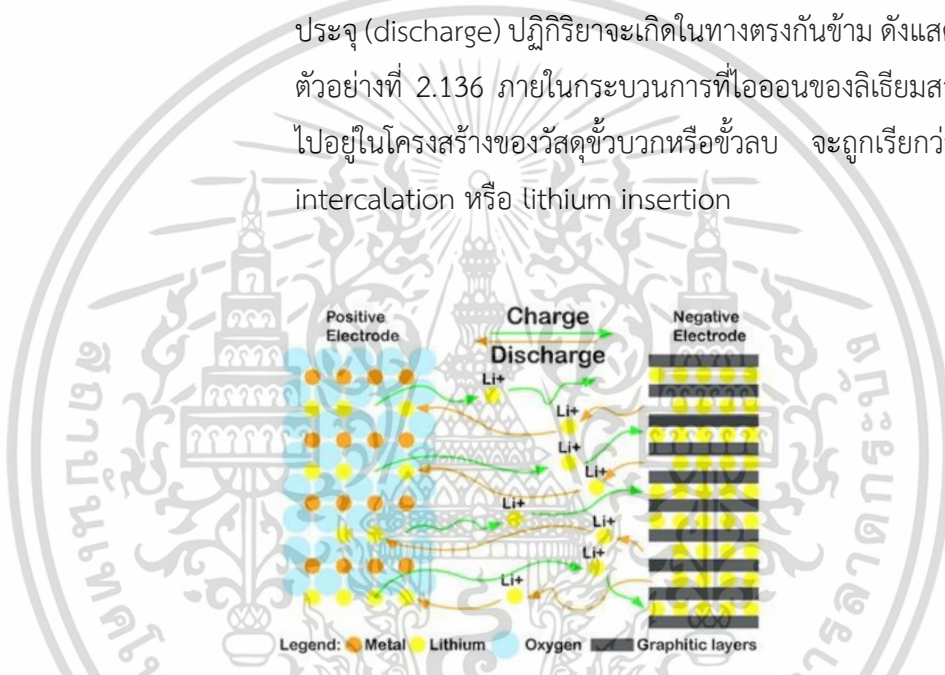
1. ส่วนประกอบที่สำคัญ

- ขั้วลบ จะมีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอนที่มีรูพรุน (เช่น แกรไฟต์) เคลือบบนแผ่นทองแดง
- ขั้วบวกเป็นลิเทียมเมทัลออกไซด์เคลือบบนแผ่นอะลูมิเนียม
- สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ประกอบด้วยเกลือของลิเทียม เช่น LiPF_6 หรือ LiBF_4 ในตัวทำละลาย เช่น เอทิลีนคาร์บอนेट (ethylene

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

carbonate) ไดเอทิลคาร์บอเนต (diethyl carbonate) หรือสาร ไดเมทิลคาร์บอเนต (dimethyl carbonate)

- เยื่อเลือกผ่าน (separator) จะกั้นระหว่างขั้วทั้งสองและทำจากสารพอลิโพรพิลีน หรือพอลิเอทิลีน
2. การอัดประจุ (charge) เมื่อมีการอัดประจุ (charge) ไอออนของลิเทียมจะเคลื่อนออกจากโครงสร้างของขั้วบวกผ่านเยื่อเข้าสู่ขั้วลบ เกิดเป็นสารประกอบของลิเทียมคาร์บอน และขณะเดียวกันอิเล็กตรอนจะเคลื่อนจากขั้วบวกสู่ขั้วลบผ่านวงจรภายนอก และขณะเกิดการคายประจุ (discharge) ปฏิกิริยาจะเกิดในทางตรงกันข้าม ดังแสดงในรูปตามตัวอย่างที่ 2.136 ภายในกระบวนการที่ไอออนของลิเทียมสอดแทรกเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของวัสดุขั้วบวกหรือขั้วลบ จะถูกเรียกว่า lithium intercalation หรือ lithium insertion



รูปที่ 2.136 การอัดประจุ (charge)

ที่มา: <http://www.thaiphysoc.org/article/169/>

3. การดูแลรักษาแบตเตอรี่แบบลิเทียมไอออน
- ควรจัดเก็บแบตเตอรี่ให้อยู่ภายในอุณหภูมิ และความชื้นที่เหมาะสม หลีกเลี่ยงการชาร์จไฟภายใต้อุณหภูมิที่สูง
 - อย่าใช้งานจนแบตเตอรี่หมด ผู้ใช้งานควรหมั่นชาร์จให้มีไฟเลี้ยงตัวแบตเตอรี่อยู่บ่อย ๆ เพราะการชาร์จไฟบ่อย ๆ ไม่ได้มีผลต่อการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่
 - ใช้อุปกรณ์ชาร์จไฟที่ได้มาตรฐาน มีการจ่ายไฟเข้าแบตเตอรี่ที่นิ่งและคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 โซ่ส่งกำลัง (Chain Drives)

การใช้โซ่ส่งกำลัง ถือเป็นอุปกรณ์อีกชนิดหนึ่งที่มีการถ่ายทอดกำลังจากชุดขับ (ต้นกำลัง) ไปยังชุดตาม (รับกำลัง) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งของการติดตั้งระบบส่งกำลังในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งนิยมใช้กันมากในการออกแบบเครื่องจักร เช่น เครื่องจักรทางการเกษตร เครื่องทอผ้า เป็นต้น การส่งกำลังแบบโซ่นั้น มีวิธีการส่งกำลังที่คล้ายกับการส่งกำลังด้วยสายพาน โดยที่โซ่ (chain) จะคล้องอยู่กับเฟืองโซ่ (sprocket) ซึ่งติดตั้งอยู่บนเพลาคับ และเพลตาม ดังแสดงตามรูปที่ 2.137 อัตราทดของการขับนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของเฟืองโซ่ทั้งสองฝั่ง โซ่สามารถส่งกำลังให้ได้โมเมนต์บิด (การหมุน) สูงมากโดยที่ให้เป็นชุดส่งกำลังมีขนาดเล็กได้ เป็นลักษณะการส่งกำลังด้วยรูปร่าง และที่รองเพลาก็จะรับภาระน้อยมากไม่มีการให้ลื่นไถลในขณะที่ส่งกำลัง ในขณะที่ส่งกำลังข้อต่อโซ่จะรับภาระความเสียดทานลื่น (Sliding Friction) จึงต้องมีการหล่อลื่นที่เพียงพอ โซ่ส่งกำลังจะมีการใช้งานในที่ต้องรับภาระมาก ๆ ในที่ที่มีอุณหภูมิสูง, โรงงานเคมี, ใช้น้ำมัน, ความชื้น หรือเป็นสภาวะการทำงานที่สายพานไม่สามารถนำไปใช้งานได้

รูปที่ 2.137 แสดงตำแหน่งของโซ่ (Chain) และเฟืองโซ่ (Sprocket)

ที่มา: <https://misumitechnical.com/technical/mechanical/transmission-chain/>

2.10.1 ส่วนประกอบของโซ่ส่งกำลัง

2.10.1.1 แผ่นประกบด้านใน (outer link)

ทำหน้าที่รับแรงดึง (tensile strength) และรองรับแรงกระชากที่เกิดขึ้น
ในการทำงาน

2.10.1.2 แผ่นประกบด้านนอก (outer link)

ทำหน้าที่รับแรงดึง (tensile strength) และรองรับแรงกระชากที่เกิดขึ้น
ในการทำงาน นอกจากนั้นยังเป็นตัวเชื่อมระหว่างโซ่แต่ละข้อต่อ

2.10.1.3 สลัก (pin)

ทำหน้าที่รับแรงเฉือน (shearing strength) และแรงบิด (bending strength) ที่ถูกถ่ายเทมาจากแผ่นประกบด้านใน และด้านนอก อีกทั้งยังรองรับแรงร่วมกับบูช ขณะเคลื่อนที่อยู่บริเวณร่องของฟันเฟือง ดังนั้นสลักที่ใช้งานตรงจุดนี้ต้องมีความแข็งแรงสูงมากเพื่อให้สามารถรับแรงเฉือน, แรงบิด, แรงดึง และแรงกระชาก
ดังแสดงตามรูปที่ 2.138

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.1.4 โรลเลอร์ (roller)

เป็นส่วนที่ทำหน้าที่รองรับแรงกด และแรงกระแทก ในขณะที่โซ่เคลื่อนที่เข้าไปในเฟืองโซ่

2.10.1.5 บูช (bush)

เป็นชิ้นส่วนที่เชื่อมต่อกับวัสดุที่มีการสั่นสะเทือนสูง มีหน้าที่เพื่อช่วยลดการสั่นสะเทือนให้กระจายน้อยที่สุด



รูปที่ 2.138 แสดงส่วนประกอบของโซ่ส่งกำลัง

ที่มา: <https://misumitechnical.com/technical/mechanical/transmission-chain/>

2.10.2 ชนิดของโซ่ส่งกำลัง

โซ่ส่งกำลังที่นิยมใช้ในการออกแบบเครื่องจักรอุตสาหกรรมนิยมใช้กัน 4 ชนิด ดังนี้ และสามารถเปรียบเทียบข้อดี และข้อเสียของโซ่ส่งกำลัง ดังแสดงตามตารางที่ 2.17

2.10.2.1 โซ่ส่งกำลังชนิดลูกกลิ้ง (Roller chains)

โซ่ส่งกำลังชนิดลูกกลิ้ง (Roller chains) โซ่ชนิดนี้ประกอบด้วยแผ่นประกบด้านใน และแผ่นประกบด้านนอกยึดติดกันด้วยสลักและบูช โดยมีโรลเลอร์แบบกลวงติดตั้งร่วมกับบูช ซึ่งมีให้เลือกใช้งานทั้งแบบ 1 ชั้น 2 ชั้น และ 3 ชั้น ดังแสดงตามรูปที่ 2.139 (ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ



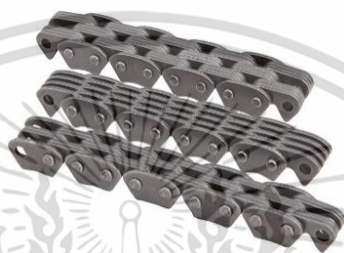
รูปที่ 2.139 (ก) Roller chains แบบ 1 ชั้น , (ข) Roller chains แบบ 2 ชั้น
(ค) Roller chains แบบ 3 ชั้น

ที่มา: <https://misumitechnical.com/technical/mechanical/transmission-chain/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.2.2 โซ่ส่งกำลังชนิดโซ่ฟัน Toothed chains

โซ่ส่งกำลังชนิดโซ่ฟัน (Toothed chains) โซ่ชนิดนี้ประกอบด้วยแผ่นประกบหลายแผ่นเรียงซ้อนกัน และยึดติดกันด้วยสลักแผ่นประกบแต่ละแผ่นจะมีฟันสองฟัน ในขณะที่ส่งกำลังข้อต่อโซ่ จะทำหน้าที่เป็นจุดหมุนของข้อโซ่ ทำให้โซ่แนบสนิทกับฟันบนเฟืองโซ่ จึงมีการสึกหรอน้อย โซ่ชนิดนี้มีเสียงเบาในขณะที่ใช้งาน เมื่อเปรียบเทียบกับโซ่แบบโรเลอร์ (Roller chains) แต่โซ่ชนิดนี้มีน้ำหนักมากกว่า ราคาสูงกว่า และบำรุงรักษายากกว่าโซ่แบบโรเลอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.140



รูปที่ 2.140 แสดง โซ่ส่งกำลัง ชนิด Toothed chains

ที่มา: <https://misumitechnical.com/technical/mechanical/transmission-chain/>

2.10.2.3 โซ่ส่งกำลังชนิดปลอก (Leaf Chain)

โซ่ส่งกำลังชนิดปลอก (Leaf Chain) มีส่วนประกอบคล้ายกับโซ่ลูกกลิ้ง (Roller Chain) เพียงแต่จะมีลูกกลิ้ง (Roller) ดังแสดงตามรูปที่ 2.141



รูปที่ 2.141 แสดงโซ่ปลอก (Leaf Chain)

ที่มา: <https://misumitechnical.com/technical/mechanical/transmission-chain/>

2.10.2.4 โซ่ฟันเฟือง (Chain Sprockets Gear)

โซ่ฟันเฟือง (Chain Sprockets Gear) มีส่วนประกอบคือแผ่นประกบคล้ายเฟือง โดยที่มีร่องบากถูกยึดด้วยสลัก ดังแสดงตามรูปที่ 2.142



รูปที่ 2.142 แสดงโซ่ฟันเฟือง (Chain Sprockets Gear)

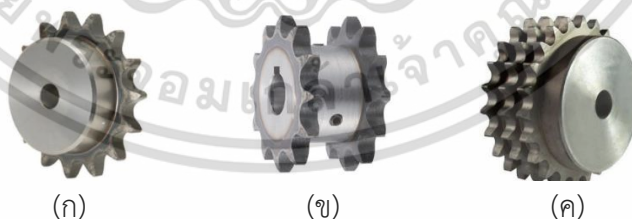
ที่มา: <https://misumitechnical.com/technical/mechanical/transmission-chain/>

2.10.3 อุปกรณ์ที่ใช้ร่วมกับโซ่ส่งกำลัง

ในการถ่ายทอดกำลังจากชุดขับ (ต้นกำลัง) ไปยังชุดตาม (รับกำลัง) เพื่อถ่ายทอดหรือส่งกำลังไปยังในการขับเคลื่อนชิ้นส่วนหรือตัวเครื่องจักร โซ่ส่งกำลังจะต้องมีการทำงานคู่กับเฟืองโซ่และลูกล้อตัวตาม ซึ่งจะยึดอยู่กับเพลาด้านขับและตาม โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.10.3.1 เฟืองโซ่ (sprocket)

เป็นอุปกรณ์ที่ต้องใช้ควบคู่กับโซ่ ฟันของเฟืองโซ่นั้นจะขบลงไปร่องของเฟืองโซ่ เพื่อทำหน้าที่ในการขับเคลื่อนระบบส่งกำลัง ซึ่งเฟืองโซ่มีรูปร่างหน้าตาที่หลากหลายให้เลือกใช้งานขึ้นอยู่กับการออกแบบ และชนิดของโซ่ที่นำมาใช้ร่วมกัน รูปร่างของฟันโซ่ที่นักออกแบบนิยมใช้กันได้แก่ เฟืองโซ่แบบฟันเฟืองชั้นเดียว, เฟืองโซ่แบบฟันเฟืองสองชั้น และเฟืองโซ่แบบฟันเฟืองสามชั้น ดังแสดงตามรูปที่ 2.143 (ก) (ข) และ (ค) ตามลำดับ และสำหรับล้อโซ่ที่ใช้กับโซ่ฟันจะต้องมีจำนวนฟันอย่างน้อยที่สุด 17 ฟัน มิฉะนั้นจะเกิดสัดส่วนการจับของโซ่ฟันที่ไม่เหมาะสมที่ทำให้เกิดแรงเสียดทานมากขึ้นได้ และถ้าใช้งานรับภาระกระแทก แล้วโซ่ฟันจะยึดและมีผลให้เกิดสัดส่วนการจับของโซ่ฟันที่ไม่เหมาะสม

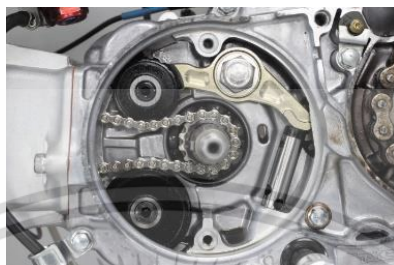


รูปที่ 2.143 แสดงเฟืองโซ่แบบฟันเฟืองแบบ 1 , 2 และ 3 ชั้น

ที่มา: <https://misumitechnical.com/technical/mechanical/transmission-chain/>

2.10.3.2 ลูกล้อตัวตาม (Idler sprockets)

ใช้สำหรับปรับความตึงให้กับโซ่ส่งกำลัง โดยจะติดตั้งในฝั่งที่โซ่หย่อน และนอกจากนี้ยังสามารถช่วยแก้ปัญหาเรื่องแรงสั่นสะเทือนของโซ่ในขณะที่มีการใช้งานได้อีกดังแสดงตามรูปที่ 2.144



รูปที่ 2.144 แสดง Chain guide tensioner ใช้สำหรับปรับความตึงให้กับโซ่ส่งกำลัง
ที่มา: <https://misumitechnical.com/technical/mechanical/transmission-chain/>

ตารางที่ 2.17 เปรียบเทียบข้อดี และข้อเสียของโซ่ส่งกำลัง

ข้อดี	ข้อเสีย
ติดตั้งได้ง่ายกว่าสายพาน เพียงแค่คล้องโซ่เข้ากับเฟืองโซ่ หลังจากนั้นใช้สลักสอดเข้าไปในรูเพื่อยึดโซ่เข้าด้วยกันเป็นวงปิด	ไม่สามารถส่งกำลังแบบ (crossed drive) ได้ เหมือนกับสายพาน (Belt)
ไม่มีการเลื่อน (Slip) เกิดขึ้นระหว่างโซ่กับเฟืองโซ่ ทำให้ได้อัตราทดที่แน่นอน	ถ้าใช้งานที่ความเร็วรอบสูงอาจเกิดอันตรายได้หากโซ่ขาด
การติดตั้งไม่ต้องการความเที่ยงตรงมากเมื่อเทียบกับ การขับด้วยเฟือง	เพลลาต้องขนานกันเท่านั้น

2.11 รีเลย์ (relay)

เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในวงจรควบคุมอัตโนมัติ โดยทำหน้าที่เปรียบเสมือนสวิตช์ไฟ ที่ใช้แรงดันไฟฟ้าในการเปิด และปิดอุปกรณ์ไฟฟ้าเพื่อควบคุมวงจรต่าง ๆ

2.11.1 หลักการทำงานของรีเลย์

รีเลย์ ทำงานโดยการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด เพื่อเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าให้เป็นพลังงานแม่เหล็ก สำหรับใช้ดึงดูดหน้าสัมผัส (contact) ให้เปลี่ยนทิศทางการไหลของไฟฟ้าเพื่อควบคุมการจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ คล้ายกับสวิตช์

2.11.2 ส่วนประกอบสำคัญของรีเลย์

2.11.2.1 ขดลวด (coil)

ขดลวด (coil) เป็นส่วนประกอบที่ทำหน้าที่รับแรงดันไฟฟ้าจากวงจรตัวควบคุม (controller) เพื่อเหนี่ยวนำกระแสไฟฟ้าให้เปลี่ยนเป็นพลังงานแม่เหล็กในการทำให้ดึงดูดหน้าสัมผัส (contact) ให้เปลี่ยนตำแหน่ง

2.11.2.2 หน้าสัมผัส (contact)

หน้าสัมผัส (contact) เป็นส่วนประกอบที่ทำหน้าที่เหมือนสวิตช์ ที่กำหนดทิศทางการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ที่ต้องการควบคุม

2.11.3 ข้อคำนึงในการใช้งานรีเลย์ทั่วไป

2.11.3.1 แรงดันใช้งาน หรือแรงดันที่ทำให้รีเลย์ทำงานได้

ที่ตัวรีเลย์จะระบุค่าแรงดันใช้งานไว้ (หากใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ส่วนมากจะใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในการใช้งาน เช่น 12 โวลต์ดีซี คือต้องใช้แรงดันที่ 12 โวลต์ดีซี เท่านั้นหากใช้มากกว่านี้ขดลวดภายในตัวรีเลย์อาจจะขาดได้ หรือหากใช้แรงดันต่ำกว่ามาก รีเลย์จะไม่ทำงาน ส่วนในการต่อวงจรนั้นสามารถต่อขั้วใดก็ได้ เพราะตัวรีเลย์จะไม่ระบุขั้วต่อไว้ (นอกจากชนิดพิเศษ)

2.11.3.2 การใช้งานกระแสผ่านหน้าสัมผัส

ภายในตัวรีเลย์จะระบุไว้ เช่น 10 แอมแปร์ 220 โวลต์เอซี คือ หน้าสัมผัสของรีเลย์นั้นสามารถทนกระแสได้ 10 แอมแปร์ที่ 220 โวลต์เอซี แต่การใช้ก็ควรจะใช้งานที่ระดับกระแสต่ำกว่านี้จึงจะเหมาะสม เพราะถ้าหากกระแสมากจะส่งผลให้หน้าสัมผัสของรีเลย์จะละลายเสียหายได้

2.11.3.3 จำนวนหน้าสัมผัสการใช้งาน

ในการเลือกใช้งานรีเลย์ ผู้ใช้งานควรดูว่ารีเลย์นั้นมีหน้าสัมผัสให้ใช้งานกี่หน้าสัมผัส และมีขั้วคอมมอนด้วยหรือไม่

2.11.4 จุดต่อใช้งานมาตรฐาน

2.11.4.1 จุดต่อ NC

จุดต่อ NC ย่อมาจาก normal close หมายความว่าปกติปิด หรือ หากยังไม่จ่ายไฟให้ขดลวดเหนี่ยวนำหน้าสัมผัสจะติดกัน โดยทั่วไปมักต่อจุดนี้เข้ากับอุปกรณ์หรือ

เครื่องใช้ไฟฟ้าที่ต้องการให้ทำงานตลอดเวลา

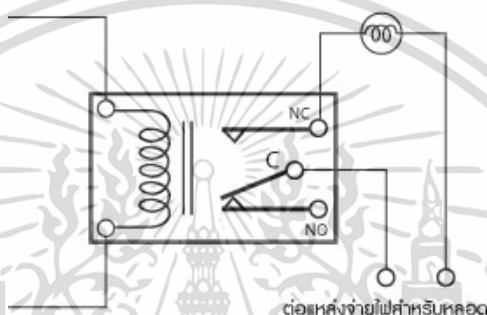
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.4.2 จุดต่อ NO

จุดต่อ NO ย่อมาจาก normal open หมายความว่าปกติเปิด หรือหากยังไม่จ่ายไฟให้ขดลวดเหนี่ยวนำหน้าสัมผัสจะไม่ติดกัน โดยทั่วไปมักต่อจุดนี้เข้ากับอุปกรณ์หรือเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ต้องการควบคุมการเปิด/ปิด เช่น โคมไฟสนามหน้าบ้าน

2.11.4.3 จุดต่อ C

จุดต่อ C ย่อมาจาก common คือจุดร่วมที่ถูกต้องมาจากแหล่งจ่ายไฟ ภายในวงจร ดังแสดงตามรูปที่ 2.145



รูปที่ 2.145 จุดต่อใช้งานมาตรฐาน

ที่มา: <http://www.psptech.co.th/>

2.11.5 ประเภทของรีเลย์

รีเลย์ เป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ ซึ่งจะมีหลักการทำงานคล้ายกับขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า หรือโซลินอยด์ (solenoid) รีเลย์ใช้ในการควบคุมวงจรไฟฟ้าได้อย่างหลากหลาย รีเลย์เป็นสวิตช์ควบคุมที่ทำงานด้วยไฟฟ้า โดยสามารถแบ่งประเภทของรีเลย์ (relay) ตามลักษณะหรือวัตถุประสงค์การใช้งานได้ดังนี้

2.11.5.1 พาวเวอร์รีเลย์ (Power Relay)

พาวเวอร์รีเลย์ คือ รีเลย์ที่ช่วยตรวจสอบการทำงานของวงจรไฟฟ้าที่มีความผิดปกติ จากการเกิดกระแสไฟฟ้าขาดหรือกระแสไฟฟ้าเกิน และเกิดแรงดันต่ำหรือแรงดันสูงได้เป็นอย่างดี ดังแสดงตามรูปที่ 2.146 โดยพาวเวอร์รีเลย์นั้น จะทำหน้าที่ตัดวงจรส่วนที่ผิดปกติออกทันที เพื่อป้องกันไม่ให้อุปกรณ์ และส่วนประกอบต่าง ๆ ของไฟฟ้าเกิดความเสียหายได้

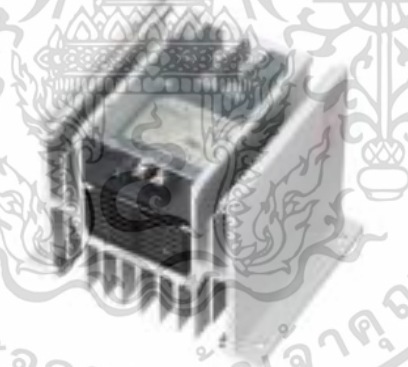


รูปที่ 2.146 พาวเวอร์รีเลย์ (Power Relay)

ที่มา: <http://www.pspotech.co.th/>

2.11.5.2 โซลิดสเตตรีเลย์ (SSR)

โซลิดสเตตรีเลย์ (SSR) เป็นรีเลย์ที่มีขนาดเล็ก โครงสร้างแตกต่างจากรีเลย์ทั่วไปคือ ไม่ใช้ส่วนของหน้าสัมผัส (Contact) ในการตัด - ต่่วงจร แต่โซลิดสเตตรีเลย์จะใช้อุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ (Semiconductor) ทำให้ไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนที่ ดังแสดงตามรูปที่ 2.147 ข้อดีคือ ลดเสียงรบกวน ตอบสนองการทำงานรวดเร็ว ป้องกันการสันนิษฐาน และแรงกระแทก มีอายุการใช้งานนาน นิยมนำไปใช้กับอุปกรณ์ต่อพ่วงคอมพิวเตอร์ เครื่องทำความร้อนไฟฟ้า และเครื่องจักรอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.147 โซลิดสเตตรีเลย์ (SSR)

ที่มา: <http://www.pspotech.co.th/>

2.11.5.3 แลตชิ่งรีเลย์ (Latching Relay)

แลตชิ่งรีเลย์ (Latching Relay) เป็นอุปกรณ์สลับหรือเปลี่ยนตำแหน่งการทำงานอัตโนมัติ ดังแสดงตามรูปที่ 2.148 โดยมีหลักการทำงาน คือ จ่ายกระแสไฟเข้าที่ฝั่งขาเปิด และฝั่งขาปิดทุกครั้ง ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดหรือหน้าสัมผัสของรีเลย์ เพื่อเปิด/ปิด และสลับการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่อยู่ในระบบควบคุมเดียวกัน แลตชิ่งรีเลย์จะนิยมใช้ติดตั้งเข้ากับระบบควบคุมการทำงานของเครื่องมือเครื่องจักร เช่น แอร์ ปั๊มน้ำ มอเตอร์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

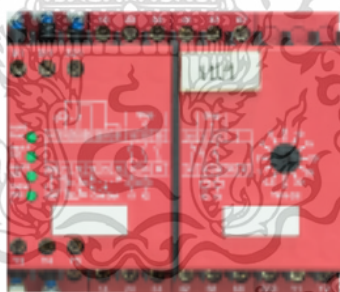


รูปที่ 2.148 แลทซ์รีเลย์ (Latching Relay)

ที่มา: <http://www.pspotech.co.th/>

2.11.5.4 เซฟตี้รีเลย์ (Safety Relay)

เซฟตี้รีเลย์ (Safety Relay) เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยควบคุม ตรวจสอบ และรักษาความปลอดภัยของเครื่องใช้ไฟฟ้า ดังแสดงตามรูปที่ 2.149 หลักการทำงานคือ จะตัดการทำงานของไฟฟ้าในระบบทันที ที่ภายในระบบมีไฟเกิน สามารถใช้งานง่ายโดยนำไปติดตั้งหรือเชื่อมต่อเข้ากับอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้า หรือเครื่องจักรในอุตสาหกรรม เช่น เซนเซอร์มันแสงนิรภัย (Safety Light Curtain) ปุ่มกดฉุกเฉิน (Emergency Stop Button)



รูปที่ 2.149 เซฟตี้รีเลย์ (Safety Relay)

ที่มา: <http://www.pspotech.co.th/>

2.11.5.5 ไทม์มอร์รีเลย์ (Timer Relay)

ไทม์มอร์รีเลย์ (Timer Relay) มีลักษณะคล้ายนาฬิกามีทั้งแบบอนาล็อกและแบบดิจิตอล ดังแสดงตามรูปที่ 2.150 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับกำหนดเวลาเปิด/ปิด ระบบควบคุมการทำงานของเครื่องจักรและอุปกรณ์ไฟฟ้า เมื่อจ่ายหรือหยุดจ่ายกระแสไฟ รีเลย์จะเริ่มทำงานตามเวลาที่ผู้ใช้งานตั้งค่าไว้ โดยที่หน้าสัมผัสจะสามารถอยู่ในสถานะคงที่หรือสลับตรงกันข้าม และทำให้เริ่มนับเวลาหรือหยุดเวลาจนครบกำหนดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.150 ไทม์เมอร์รีเลย์ (Timer Relay)

ที่มา: <http://www.pspotech.co.th/>

2.11.5.6 เทอร์มินอลรีเลย์ (Terminal Relay)

เทอร์มินอลรีเลย์ (Terminal Relay) เป็นรีเลย์ชนิดประหยัดพลังงาน (Work-saving relay) มีขนาดเล็ก ดังแสดงตามรูปที่ 2.151 ซึ่งจะติดตั้งอยู่ในหน่วยรีเลย์ (Relay Units) นำไปประยุกต์ใช้งานจากแบบพอร์ตอินพุต - พอร์ตเอาต์พุต เป็นแบบคอนโทรลเลอร์ที่ตั้งโปรแกรมได้เมื่อต้องการลดการใช้พลังงาน สามารถนำไปใช้เชื่อมต่อโซลินอยด์วาล์วหรืออุปกรณ์อื่น ๆ เข้ากับคอนโทรลเลอร์ เช่น PLC ได้



รูปที่ 2.151 เทอร์มินอลรีเลย์ (Terminal Relay)

ที่มา: <http://www.pspotech.co.th/>

2.11.5.7 สเต็ปป์รีเลย์ (Stepping Relay)

สเต็ปป์รีเลย์ (Stepping Relay) เป็นอุปกรณ์ช่วยควบคุม และสลับตำแหน่งการทำงานอัตโนมัติของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่อยู่ในวงจรควบคุมเดียวกัน ดังแสดงตามรูปในตัวอย่างที่ 2.152 โดยมีหน้าสัมผัส และจุดเชื่อมต่อใช้งานมากกว่ารีเลย์ชนิดอื่น ๆ นิยมใช้ติดตั้งเข้ากับแผงควบคุมระบบการทำงานที่มีขนาดใหญ่ เช่น การควบคุมระบบเครื่องสูบน้ำ การควบคุม

กระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.152 สเต็ปป์รีเลย์ (Stepping Relay)

ที่มา: <http://www.pspotech.co.th/>

2.11.6 ประโยชน์ของรีเลย์

1. ทำให้ระบบส่งกำลังมีเสถียรภาพสูงโดยรีเลย์จะตัดวงจรเฉพาะส่วนที่เกิดผิดปกติออกเท่านั้น ซึ่งจะเป็นการลดความเสียหายให้แก่ระบบน้อยที่สุด
2. ลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมส่วนที่เกิดความผิดปกติ
3. ลดความเสียหายเพื่อไม่ให้เกิดการลุกลามไปยังอุปกรณ์อื่น ๆ ภายในระบบ
4. ทำให้ระบบไฟฟ้าไม่ดับทั้งหมด เมื่อเกิดเหตุฉุกเฉินขึ้นภายในระบบ

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

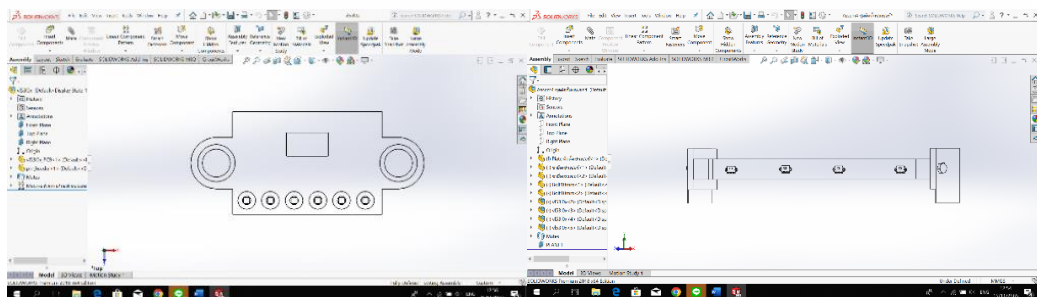
การดำเนินการในการจัดทำโครงการ เรื่องการปรับปรุงประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม เริ่มจากการศึกษาหลักการในการประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์คอนโทรลเลอร์ร่วมกับเซนเซอร์ โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาการทำงาน เก็บข้อมูลการทดสอบการทำงาน และนำชุดข้อมูลที่ได้มาใช้ในการเขียนโปรแกรมควบคุม และปรับปรุงประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม จากนั้นทำการกำหนดขอบเขตในการทำงาน ทำการออกแบบ และปรับปรุงชิ้นงาน หลังจากนั้นทำการทดสอบการทำงานว่าทำงานได้ตามวัตถุประสงค์หรือไม่ และสรุปผล โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1. ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้าง
2. ขั้นตอนการทดสอบเซนเซอร์
3. ขั้นตอนการทำระดับความเร็วของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม
4. ขั้นตอนการออกแบบวงจรควบคุมรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม
5. แผนผังโปรแกรมควบคุมการทำงานของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม
6. อุปกรณ์ด้านฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในโครงการ การปรับปรุงประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม
7. ขั้นตอนการประกอบโครงสร้าง และวงจรควบคุมรถตัดหญ้า

3.1 ขั้นตอนการออกแบบโครงสร้าง

ในขั้นตอนนี้เป็นการออกแบบโครงสร้างใหม่ และอุปกรณ์ภายในของรถตัดหญ้าที่ได้พัฒนาต่อมาจากรถตัดหญ้าบังคับรีโมทวิทยุ ซึ่งในการออกแบบจะใช้โปรแกรมโซลิดเวิร์ค (Solid works) ในการออกแบบร่างชิ้นงาน และส่วนประกอบต่าง ๆ แบบ 3 มิติ ดังนี้

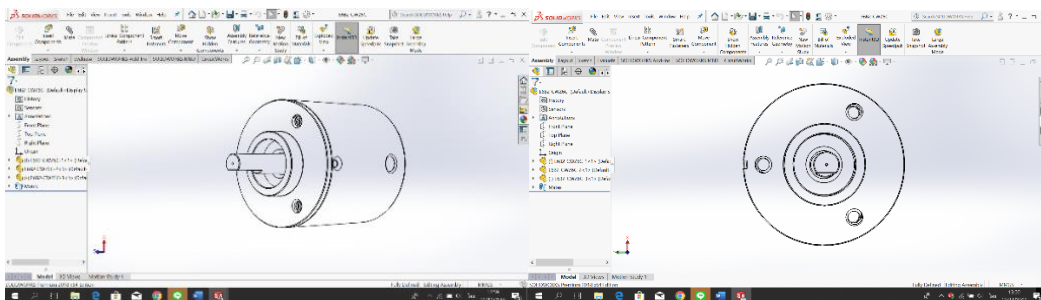
1. จากรูปที่ 3.1 เป็นการออกแบบเซนเซอร์เลเซอร์สำหรับวัดระยะทาง



รูปที่ 3.1 เขียนแบบเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดเลเซอร์ และชุดยึดติดตั้งเซนเซอร์

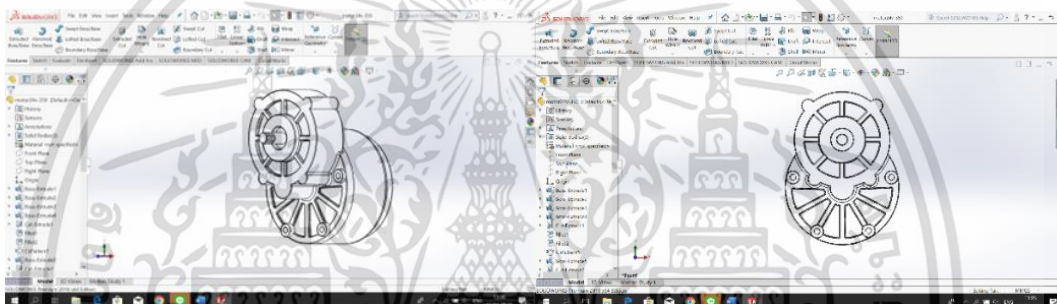
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. จากรูปที่ 3.2 เป็นการออกแบบเอนโคเดอร์สำหรับวัดความเร็วรอบของมอเตอร์



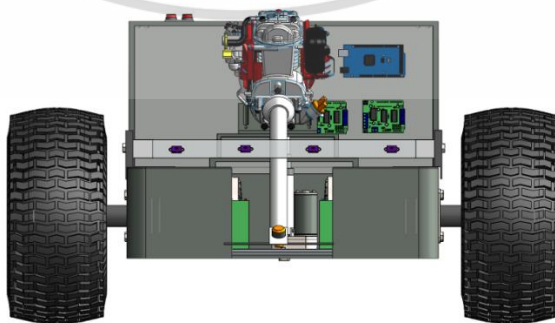
รูปที่ 3.2 เขียนแบบเอนโคเดอร์ (Omron รุ่น E6B2-CWZ3E)

3. จากรูปที่ 3.3 เป็นการออกแบบมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อน



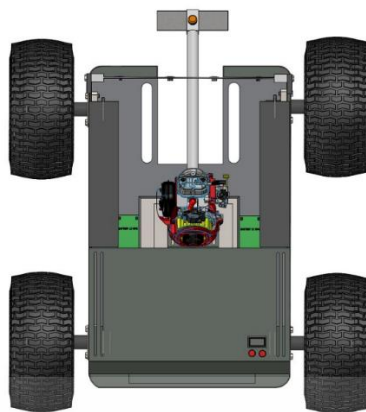
รูปที่ 3.3 เขียนแบบมอเตอร์รุ่น Brushed DC MY1016Z 250W 12

4. จากนั้นนำชิ้นส่วนที่ออกแบบไว้ทั้งหมดมาประกอบรวมกันทั้งหมด โดยแสดงภาพร่างชิ้นงานของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมทั้ง 4 มุมมอง ดังต่อไปนี้ คือ มุมมองด้านหน้า, มุมมองด้านบน, มุมมองด้านหลัง, มุมมองด้านข้าง และภาพรวมของการออกแบบรถตัดหญ้า แสดงดังรูปที่ 3.4 ถึงรูปที่ 3.8 ซึ่งเป็นโครงสร้างรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมแบบเสร็จสมบูรณ์

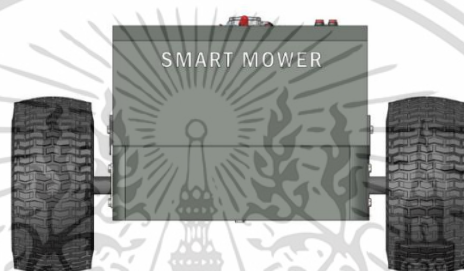


รูปที่ 3.4 แสดงภาพร่างรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมด้านหน้า

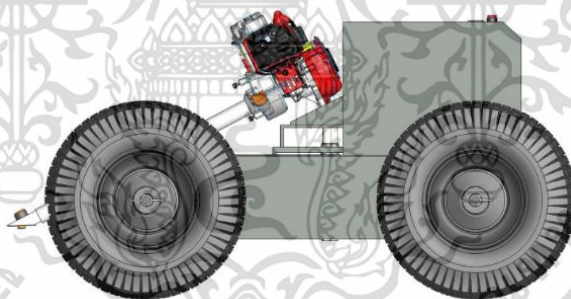
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 แสดงภาพร่างรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมด้านบน



รูปที่ 3.6 แสดงภาพร่างรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมด้านหลัง



รูปที่ 3.7 แสดงภาพร่างรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมด้านข้าง



รูปที่ 3.8 แสดงภาพรวมของการออกแบบรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ขั้นตอนการทดสอบเซนเซอร์

ในการทำโครงการ เรื่องการปรับปรุงประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมจะมีการเพิ่มระบบความปลอดภัยของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม โดยการนำเซนเซอร์วัดระยะทางมาใช้ในการตรวจจับสิ่งกีดขวาง เพื่อสั่งให้รถตัดหญ้าหยุดการทำงาน ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของเซนเซอร์วัดระยะทางทั้ง 4 ชนิด ประกอบด้วยเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอัลตราโซนิก, เซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอินฟราเรด (แบบดิจิตอล), เซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอินฟราเรด (แบบอนาล็อก) และเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดเลเซอร์ แสดงตามรูปที่ 3.9 (ก) (ข) (ค) และ (ง) ตามลำดับ โดยจะทำการทดสอบการทำงานของเซนเซอร์แต่ละชนิดทั้งหมด 3 สภาวะ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเซนเซอร์ในด้านการทนต่อสภาพแวดล้อมภายนอก เช่น แสง เสียง หรือการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากการสตาร์ทเครื่องตัดหญ้า รวมไปถึงทดสอบประสิทธิภาพในการตรวจวัดระยะทางเมื่อรถตัดหญ้ามีการเคลื่อนที่ โดยสามารถแบ่งสภาวะการทดสอบได้ดังนี้

1. สภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ และไม่มีเสียงรบกวนของเครื่องตัดหญ้า
2. สภาวะติดตั้งเซนเซอร์ร่วมกับรถตัดหญ้า และสตาร์ทเครื่องตัดหญ้า
3. สภาวะสตาร์ทเครื่องตัดหญ้าพร้อมบังคับรถตัดหญ้าให้มีการเคลื่อนที่

เนื่องจากการทำงานในแต่ละสภาวะที่ได้กำหนดมานั้น ส่งผลกระทบต่อเซนเซอร์วัดระยะทาง โดยมีความแตกต่างกันดังต่อไปนี้ สภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ และไม่มีเสียงรบกวนของเครื่องตัดหญ้า ในสภาวะนี้จะไม่มีผลกระทบในการตรวจวัดระยะทางมาก เนื่องจากไม่มีเสียง และการสั่นสะเทือนของเครื่องตัดหญ้า สภาวะที่ติดตั้งเซนเซอร์ร่วมกับรถตัดหญ้า และสตาร์ทเครื่องตัดหญ้า ในสภาวะนี้การตรวจวัดระยะทางของเซนเซอร์จะมีผลกระทบเล็กน้อย เนื่องจากมีการสั่นสะเทือนของเครื่องตัดหญ้าที่มีการสตาร์ทเครื่องยนต์ ส่งผลให้การตรวจวัดระยะทางไม่เสถียร และประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณต่ำลง และในสภาวะที่สตาร์ทเครื่องตัดหญ้าพร้อมบังคับรถตัดหญ้าให้มีการเคลื่อนที่ ในสภาวะนี้การตรวจวัดระยะทางของเซนเซอร์จะมีผลกระทบค่อนข้างสูง เนื่องจากมีการสั่นสะเทือนของเครื่องตัดหญ้าที่มีการสตาร์ทเครื่องยนต์ และจากการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้าส่งผลให้การตรวจวัดระยะทางไม่เสถียร และประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณต่ำลง แต่เนื่องจากทั้ง 3 สภาวะที่ทำการทดสอบเป็นสภาวะการทำงานจริงของเครื่องตัดหญ้า ดังนั้นก่อนเลือกใช้เซนเซอร์จึงจำเป็นต้องการทราบว่าเป็นสภาวะการทำงานจริงของเครื่องตัดหญ้านั้น มีผลกระทบกับการตรวจจับสิ่งกีดขวางของเซนเซอร์แต่ละชนิดมากน้อยเพียงใด เพื่อนำมาใช้ตัดสินใจเลือกเซนเซอร์ที่เหมาะสม และมีประสิทธิภาพในการตรวจจับสิ่งกีดขวางที่ดีที่สุดที่จะนำมาใช้ในระบบความปลอดภัยของรถตัดหญ้า

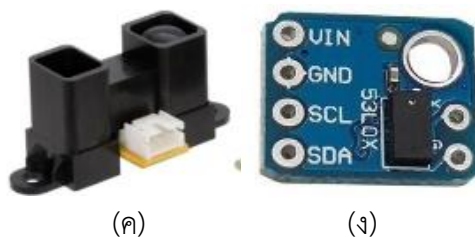


(ก)



(ข)

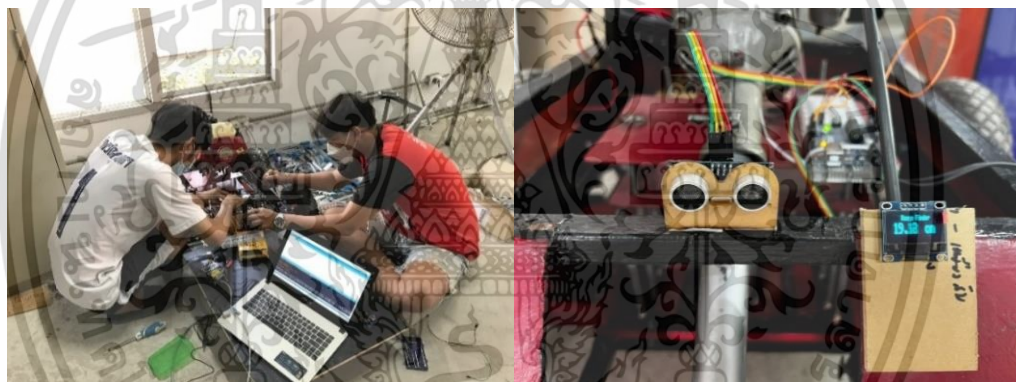
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 เซนเซอร์ทั้ง 4 ประเภท (ก) เซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอัลตราโซนิก (ข) เซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอินฟราเรด (แบบดิจิตอล) (ค) เซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอินฟราเรด (แบบอนาล็อก) (ง) เซนเซอร์วัดระยะทางชนิดเลเซอร์

3.2.1 ทำการทดสอบการทำงานของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอัลตราโซนิก

ทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอัลตราโซนิกเข้ากับรถตัดหญ้า ในตำแหน่งที่ต้องการติดตั้งจริง ดังแสดงตามรูปที่ 3.10 และทำการทดสอบการทำงานของเซนเซอร์ในการใช้งานทั้ง 3 สภาวะ แสดงผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 3.1 ถึงตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.10 ทดสอบการทำงานของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอัลตราโซนิก

จากการที่ได้ทดสอบเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอัลตราโซนิก สรุปผลการทดสอบได้คือ มีจุดเด่นในเรื่องที่สามารถติดตั้งร่วมกับรถตัดหญ้าได้สะดวก เซนเซอร์ค่อนข้างมีรูปทรงที่มีมาตรฐาน แต่มีจุดด้อยที่เซนเซอร์ไม่สามารถรองรับแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากรถตัดหญ้าได้ดีเท่าที่ควรจึงทำให้การส่งค่าสัญญาณนั้นผิดเพี้ยน เสียงของเครื่องตัดหญ้ามีผลต่อการวัดระยะทางเล็กน้อย และเมื่อมีระยะทางไกลขึ้นสิ่งที่เห็นได้ชัดคือ ในการตรวจวัดจะมีค่าความผิดพลาดมากขึ้น

ตารางที่ 3.1 การทดสอบโดยไม่มี การเคลื่อนที่ และเสียงรบกวนของเครื่องตัดหญ้าของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอัลตราโซนิก

number of times tested	Read out from Ultrasonic Sensor Module HC-SR04P (cm)				
	40 cm	60 cm	80 cm	90 cm	105 cm
1	39.59	59.40	77.35	86.73	100.40
2	39.11	58.56	77.98	87.15	101.25
3	39.5	58.44	77.75	86.17	101.00
4	39.99	59.04	78.57	85.79	101.36
5	38.97	57.95	77.53	86.07	100.70
6	39.45	58.45	77.37	86.07	100.10
7	38.85	58.51	76.06	86.55	100.76
8	39.76	58.72	78.02	86.86	100.57
9	40.27	58.09	77.2	86.36	100.60
10	39.5	58.52	76.6	86.91	100.89
Minimum	38.85	57.95	76.06	85.79	101.1
Maximum	40.27	59.40	78.57	87.15	101.36
Average (\bar{X})	39.50	58.568	77.44	86.466	101.763
S.D.	0.4430	0.3981	0.7218	0.4202	0.3612

ตารางที่ 3.2 การทดสอบโดยติดตั้งเซนเซอร์ร่วมกับรถตัดหญ้า และสตาร์ทเครื่องตัดหญ้าของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอัลตราโซนิก

number of times tested	Read out from Ultrasonic Sensor Module HC-SR04P (cm)				
	40 cm	60 cm	80 cm	90 cm	105 cm
1	39.57	59.88	78.8	88.90	102.76
2	40.46	58.52	77.54	89.34	102.32
3	38.49	58.44	78.63	88.12	103.83
4	39.28	58.87	78.88	87.53	102.77
5	39.39	58.59	78.73	87.32	104.89
6	40.41	58.73	78.52	87.77	103.81
7	39.67	58.77	77.8	88.42	103.72
8	39.56	58.45	79.66	87.76	103.45
9	40.41	59.90	78.92	87.21	104.24
10	40.22	58.99	77.34	87.32	102.37
Minimum	38.49	58.44	77.34	87.21	102.32
Maximum	40.46	59.88	79.66	89.34	104.89
Average (\bar{X})	39.75	58.914	78.48	87.969	103.416
S.D.	0.6332	0.5165	0.7134	0.6832	0.8009

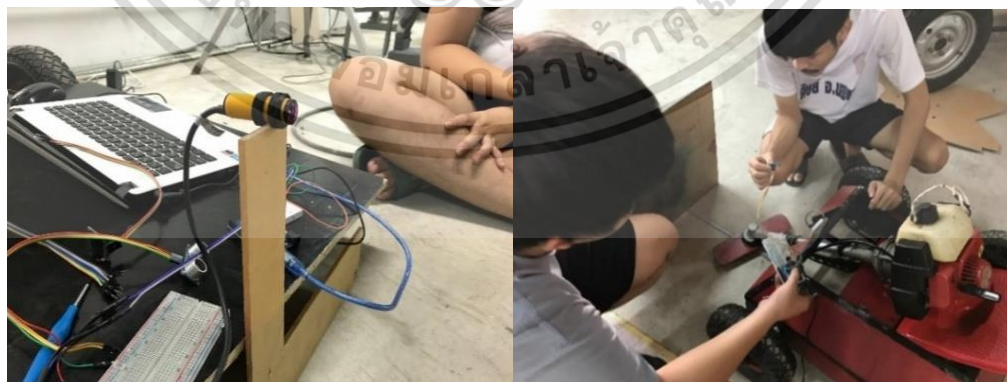
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 การทดสอบโดยติดตั้งเซนเซอร์ร่วมกับรถตัดหญ้า และสตาร์ทเครื่องตัดหญ้าพร้อม บังคับรถตัดหญ้าของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอัลตราโซนิก

number of times tested	Read out from Ultrasonic Sensor Module HC-SR04P (cm)				
	40 cm	60 cm	80 cm	90 cm	105 cm
1	39.8	59.45	78.57	87.26	101.72
2	39.97	58.81	78.28	87.73	101.62
3	40.24	58.88	78.32	86.40	101.17
4	40.34	59.12	78.72	86.31	102.01
5	38.9	58.64	77.8	86.40	101.24
6	39.8	59.00	78.3	87.27	101.43
7	38.75	58.87	78.2	87.20	102.02
8	38.6	59.16	77.97	86.41	101.73
9	38.63	58.57	78.85	86.44	102.30
10	38.25	58.26	78.39	87.79	102.27
Minimum	38.25	58.26	77.8	86.31	101.17
Maximum	40.34	59.45	78.85	87.79	102.30
Average (\bar{X})	39.33	58.876	78.34	86.921	101.751
S.D.	0.7753	0.3363	0.3186	0.5597	0.3782

3.2.2 ทำการทดสอบการทำงานของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอินฟราเรด (แบบดิจิตอล)

ทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอินฟราเรด (แบบดิจิตอล) เข้ากับรถตัดหญ้าในตำแหน่งที่ต้องการติดตั้งจริง ดังแสดงตามรูปที่ 3.11 และทำการทดสอบการทำงานของเซนเซอร์ในการใช้งาน 3 สภาวะ แสดงผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 3.4 ถึงตารางที่ 3.6



รูปที่ 3.11 ทดสอบการทำงานของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอินฟราเรด (Digital Type)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการที่ได้ทดสอบเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอินฟราเรด (แบบดิจิตอล) ผลการทดสอบได้ คือ มีจุดเด่นในเรื่องที่สามารถติดตั้งร่วมกับรถตัดหญ้าได้สะดวก แต่มีจุดด้อยที่เซนเซอร์ไม่สามารถปรับค่าระยะตรวจจับได้ภายในโปรแกรมควบคุม และเซนเซอร์ไม่สามารถรองรับแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากรถตัดหญ้าได้ดีเท่าที่ควร เมื่อเปรียบเทียบกับเซนเซอร์อื่น ๆ ที่ได้นำมาร่วมทดสอบทำให้การส่งค่าสัญญาณนั้นผิดเพี้ยน และเกิดการความผิดพลาดค่อนข้างบ่อยครั้ง และเมื่อนำมาใช้งานร่วมกับรถตัดหญ้าแสงจากสภาวะแวดล้อมรอบ ๆ ค่อนข้างมีผลกับเซนเซอร์ชนิดนี้มากพอสมควร เมื่อเปรียบเทียบกับเซนเซอร์ชนิดอัลตราโซนิกถือว่ามีประสิทธิภาพต่ำกว่า

ตารางที่ 3.4 การทดสอบโดยไม่มีสิ่งรบกวนจากการเคลื่อนที่ และเสียงของรถตัดหญ้าของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอินฟราเรด (แบบดิจิตอล)

number of times tested	Detectable distance from Infrared photoelectric switch Sensor				
	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm	80 cm
1	42.20	51.00	59.00	68.30	80.90
2	40.30	51.20	59.20	68.50	82.30
3	41.50	49.50	60.10	71.60	84.30
4	40.00	50.20	61.30	71.10	78.40
5	41.40	50.50	58.90	68.00	76.40
6	40.20	50.40	59.30	69.50	78.60
7	42.50	49.20	58.50	69.40	78.50
8	41.20	49.50	60.10	70.80	77.60
9	41.30	50.30	60.90	70.10	75.40
10	41.50	50.10	60.20	70.90	77.20
Minimum	40.00	49.20	58.50	68.00	75.40
Maximum	42.50	51.20	61.50	71.60	84.30
Average (\bar{X})	41.21	50.19	59.75	69.82	78.96
S.D.	0.7854	0.6139	0.8675	1.2106	2.6127

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 การทดสอบโดยติดตั้งเซนเซอร์ร่วมกับปรอทตัดหญ้า และสตาร์ทเครื่องตัดหญ้าของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอินฟราเรด (แบบดิจิทัล)

number of times tested	Detectable distance from Infrared photoelectric switch Sensor				
	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm	80 cm
1	41.20	50.30	58.20	68.50	80.50
2	40.20	51.10	59.40	68.70	84.30
3	41.30	49.50	61.10	70.20	82.10
4	41.20	49.50	61.30	71.10	78.00
5	41.30	50.70	58.80	69.00	76.00
6	40.50	51.40	58.30	69.50	79.60
7	42.50	49.20	58.50	69.40	78.50
8	41.80	49.50	59.30	71.10	75.50
9	41.10	51.70	60.30	70.10	75.70
10	41.50	50.00	59.30	71.30	76.00
Minimum	40.20	49.20	58.20	68.50	75.50
Maximum	42.50	51.70	61.30	71.30	84.30
Average (\bar{X})	41.26	50.29	59.45	69.89	78.62
S.D.	0.602	0.8479	1.0548	0.9792	2.8505

ตารางที่ 3.6 การทดสอบโดยติดตั้งเซนเซอร์ร่วมกับปรอทตัดหญ้า และสตาร์ทเครื่องตัดหญ้าพร้อมบังคับปรอทตัดหญ้าของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอินฟราเรด (แบบดิจิทัล)

number of times tested	Detectable distance from Infrared photoelectric switch Sensor				
	40 cm	50 cm	60 cm	70 cm	80 cm
1	40.20	50.40	58.20	69.30	81.20
2	40.30	49.10	59.40	68.60	84.20
3	41.30	49.50	61.20	70.20	82.10
4	41.20	49.50	60.20	70.10	83.20
5	40.30	49.40	58.80	69.10	77.20
6	40.50	51.50	58.50	68.50	79.70
7	42.50	49.20	58.50	69.40	79.50
8	42.80	49.30	59.20	70.30	78.50
9	42.30	51.70	59.60	70.40	77.70
10	41.50	51.10	59.40	70.80	79.50
Minimum	40.20	49.1	58.20	68.50	68.5
Maximum	42.80	51.7	61.20	70.80	70.80
Average (\bar{X})	41.29	50.07	59.3	69.67	69.67
S.D.	0.9268	0.9623	0.8532	0.7564	2.2117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 ทำการทดสอบการทำงานของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอินฟราเรด (แบบอนาล็อก)

ทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอินฟราเรด (แบบอนาล็อก) เข้ากับรถตัดหญ้าในตำแหน่งที่ต้องการติดตั้งจริง ดังแสดงตามรูปที่ 3.12 และทำการทดสอบการทำงานของเซนเซอร์ในการใช้งาน 3 สภาวะ แสดงผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 3.7 ถึงตารางที่ 3.8



รูปที่ 3.12 ทดสอบการทำงานของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอินฟราเรด (Analog Type)

จากการที่ได้ทดสอบเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอินฟราเรด (แบบอนาล็อก) ผลการทดสอบได้ คือ มีจุดเด่นที่เซนเซอร์ติดตั้งเข้ากับรถตัดหญ้าได้สะดวก และเมื่อได้รับการสั่งเสทือนเซนเซอร์สามารถรองรับแรงสั่งเสทือนที่เกิดขึ้นจากรถตัดหญ้าได้ดี การส่งสัญญาณผิดพลาดน้อย และสามารถใช้งานได้ดีกว่าเซนเซอร์ชนิดอินฟราเรดที่ให้เอาต์พุตเป็นสัญญาณดิจิทัลในทุก ๆ เงื่อนไข

ตารางที่ 3.7 การทดสอบโดยไม่มี การเคลื่อนที่ และเสียงรบกวนของเครื่องตัดหญ้าของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอินฟราเรด (แบบอนาล็อก)

number of times tested	Read out from GY-530 VL53L0X Laser ranging and gesture sensor				
	40 cm	60 cm	80 cm	100 cm	120 cm
1	42.11	61.23	81.21	102.11	120.20
2	42.23	62.19	82.20	102.12	122.20
3	42.13	63.18	80.25	102.12	121.22
4	42.22	62.21	80.25	103.12	121.21
5	42.14	62.25	81.25	101.14	120.21
6	42.24	62.22	81.24	100.19	120.22
7	42.21	60.24	81.24	103.13	120.23
8	42.30	60.17	82.26	102.11	122.21
9	42.20	61.12	81.21	101.12	121.21
10	42.18	60.12	82.21	102.12	122.21
Minimum	42.11	60.12	80.25	100.19	120.20
Maximum	42.30	63.18	82.26	103.13	122.21
Average (\bar{X})	42.196	61.493	81.332	101.928	121.112
S.D.	0.05463	1.0179	0.6914	0.8566	0.8273

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.8 การทดสอบโดยติดตั้งเซนเซอร์ร่วมกับبردตัดหญ้า และสตาร์ทเครื่องตัดหญ้าของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอินฟราเรด (แบบอนาล็อก)

number of times tested	Read out from GY-530 VL53L0X Laser ranging and gesture sensor				
	40 cm	60 cm	80 cm	100 cm	120 cm
1	42.12	61.20	81.00	101.10	119.87
2	40.15	61.19	81.12	100.53	121.34
3	42.14	61.21	81.15	102.10	119.96
4	42.13	60.21	79.89	100.20	120.13
5	42.14	61.00	82.10	102.12	122.10
6	42.15	61.11	80.11	100.45	119.97
7	42.16	60.20	80.15	101.66	120.15
8	42.19	61.19	80.16	101.22	120.13
9	42.18	59.95	81.10	101.13	120.20
10	42.18	59.95	80.78	100.24	120.12
Minimum	40.15	59.95	79.89	100.20	119.87
Maximum	42.19	61.21	82.10	102.20	122.10
Average (\bar{X})	41.954	60.721	80.756	101.075	120.397
S.D.	0.6017	0.5347	0.6451	0.6826	0.6899

ตารางที่ 3.9 การทดสอบโดยติดตั้งเซนเซอร์ร่วมกับบอร์ดตัดหญ้า และสตาร์ทเครื่องตัดหญ้าพร้อมบังคับบอร์ดตัดหญ้าของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดอินฟราเรด (แบบอนาล็อก)

number of times tested	Read out from GY-530 VL53L0X Laser ranging and gesture sensor				
	40 cm	60 cm	80 cm	100 cm	120 cm
1	42.21	62.16	82.36	103.21	122.45
2	42.19	62.12	83.12	102.56	120.67
3	41.89	61.79	81.75	102.54	122.42
4	42.11	62.61	81.34	103.12	120.53
5	42.13	62.23	82.11	102.63	121.74
6	41.45	60.87	82.10	102.14	120.45
7	42.13	62.65	80.96	101.78	120.37
8	41.56	62.31	81.64	100.98	121.75
9	41.39	62.16	81.77	101.21	123.10
10	41.44	61.14	82.58	101.35	122.23
Minimum	41.39	60.87	80.96	100.98	120.37
Maximum	42.21	62.65	83.12	103.21	123.10
Average (\bar{X})	41.85	62.004	81.973	102.152	121.571
S.D.	0.3309	0.5541	0.5914	0.7513	0.9445

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 ทำการทดสอบการทำงานของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดเลเซอร์

ทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดเลเซอร์เข้ากับรถตัดหญ้าที่ตำแหน่งที่ต้องการ ดังแสดงตามรูปที่ 3.13 และทำการทดสอบการทำงานของเซนเซอร์ในการใช้งาน 3 สภาวะ แสดงผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 3.10 ถึงตารางที่ 3.12



รูปที่ 3.13 ทดสอบการทำงานของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดเลเซอร์

จากการที่ได้ทดสอบเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดเลเซอร์ สรุปผลการทดสอบได้ คือ มีจุดเด่นที่เซนเซอร์สามารถรองรับแรงสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากรถตัดหญ้าได้ดี และส่งสัญญาณได้ดี แต่มีจุดด้อยที่เซนเซอร์มีขนาดเล็กหากจะนำมาใช้งานร่วมกับรถตัดหญ้าอาจต้องมีอุปกรณ์เสริมเพื่อช่วยในการติดตั้ง และระยะที่สามารถตรวจวัดได้ดีค่อนข้างต่ำกว่าที่ระบุมาในคู่มือ

ตารางที่ 3.10 การทดสอบโดยไม่มีเครื่องเคลื่อนที่ และเสียงรบกวนของเครื่องตัดหญ้าของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดเลเซอร์

number of times tested	Read out from GP2Y0A02 Infrared Sensor (cm)				
	40 cm	60 cm	80 cm	100 cm	120 cm
1	37.68	58.79	79.38	101.59	122.46
2	37.55	58.55	79.83	98.91	118.31
3	38.21	58.55	81.62	101.46	123.73
4	39.16	57.65	77.77	102.04	118.68
5	37.81	58.24	81.62	98.01	124.57
6	38.88	59.48	75.23	91.46	117.31
7	38.18	59.16	79.92	98.08	122.47
8	38.12	59.35	78.30	98.08	122.31
9	38.11	59.12	78.12	98.12	122.23
10	38.19	59.15	80.14	99.24	121.88
Minimum	37.55	57.65	75.23	91.46	117.31
Maximum	39.16	59.48	81.62	102.04	124.57
Average (\bar{X})	38.189	58.804	79.193	81.459	121.395
S.D.	0.4736	0.5367	1.8255	2.8541	2.3058

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.11 การทดสอบโดยติดตั้งเซนเซอร์ร่วมกับรถตัดหญ้า และสตาร์ทเครื่องตัดหญ้าของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดเลเซอร์

number of times tested	Read out from GP2Y0A02 Infrared Sensor (cm)				
	40 cm	60 cm	80 cm	100 cm	120 cm
1	39.46	58.55	79.81	106.00	117.61
2	39.61	59.48	79.38	101.46	123.86
3	40.35	58.85	81.47	98.08	122.33
4	39.46	61.40	81.23	99.74	122.81
5	39.61	60.44	79.25	101.46	123.57
6	39.90	58.28	77.77	98.61	118.17
7	40.05	58.24	89.23	101.46	117.51
8	40.23	58.26	90.10	101.23	118.10
9	40.12	59.12	91.13	101.34	119.54
10	40.15	59.45	91.24	100.28	119.89
Minimum	39.46	58.24	77.77	98.08	117.51
Maximum	40.35	61.40	91.24	106	123.86
Average (\bar{X})	39.894	59.207	81.061	100.996	120.339
S.D.	0.3162	0.986	5.3116	2.0527	2.4272

ตารางที่ 3.12 ทดสอบโดยติดตั้งเซนเซอร์ร่วมกับรถตัดหญ้า และสตาร์ทเครื่องตัดหญ้าพร้อมบังคับรถตัดหญ้าของเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดเลเซอร์

number of times tested	Read out from GP2Y0A02 Infrared Sensor (cm)				
	40 cm	60 cm	80 cm	100 cm	120 cm
1	38.40	57.15	79.38	98.91	114.90
2	39.18	58.85	79.92	97.91	122.31
3	39.95	59.16	78.92	101.46	122.04
4	38.62	58.24	77.23	98.98	118.92
5	39.15	57.35	79.93	94.01	119.31
6	40.10	61.21	73.21	101.04	123.57
7	39.58	61.42	79.38	101.40	118.31
8	40.41	61.22	79.11	94.91	113.10
9	40.11	61.14	79.27	97.99	119.10
10	40.17	61.22	79.12	98.13	119.15
Minimum	38.4	57.15	73.21	94.06	113.10
Maximum	40.41	61.42	79.93	101.46	123.57
Average (\bar{X})	39.567	59.696	78.547	98.474	119.071
S.D.	0.662	1.6463	1.916	2.4043	2.4043

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากทำการทดลองประสิทธิภาพของเซนเซอร์วัดระยะทางทั้ง 4 ชนิด โดยทดสอบ การตรวจจับสิ่งกีดขวางในสภาวะทั้ง 3 สภาวะ ได้แก่ สภาวะที่ไม่มีการเคลื่อนที่ และเสียงรบกวนของ เครื่องตัดหญ้า สภาวะที่ติดตั้งเซนเซอร์ร่วมกับรถตัดหญ้า และสตาร์ทเครื่องตัดหญ้า และสภาวะที่ ติดตั้งเซนเซอร์ร่วมกับรถตัดหญ้า และสตาร์ทเครื่องตัดหญ้าพร้อมบังคับรถตัดหญ้าให้เคลื่อนที่ โดย ทดสอบที่ระยะการตรวจจับ 5 ระยะ ได้แก่ 40, 60, 80, 100 และ 120 เซนติเมตร โดยจะทำการ ประเมินตามผลการทดสอบที่แสดง ดังตารางที่ 3.1 ถึงตารางที่ 3.12 โดยเลือกเป็นเซนเซอร์วัด ระยะทางชนิดเลเซอร์ เนื่องจากมีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด ดังแสดงตามตารางที่ 3.13

ตารางที่ 3.13 เปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของเซนเซอร์วัดระยะทางทั้ง 4 ชนิด

ชนิดเซนเซอร์	ค่าเฉลี่ย			ค่าความผิดพลาดของค่าเฉลี่ย			ค่าความผิดพลาดรวม (%)
	ที่ระยะการตรวจจับ			ที่ระยะการตรวจจับ (%)			
	40 ซม.	60 ซม.	80 ซม.	40 ซม.	60 ซม.	80 ซม.	
อัลตราโซนิก	39.33	58.876	78.34	1.675	1.873	2.075	1.874
อินฟราเรดแบบดิจิตอล	41.29	59.3	69.67	3.225	1.16	12.913	5.766
อินฟราเรดแบบอนาล็อก	41.85	62.004	81.973	4.625	3.34	2.466	3.477
เลเซอร์	39.567	59.969	78.547	1.083	0.052	1.816	0.984

3.3 ขั้นตอนการทำความเร็วของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม

เนื่องจากการควบคุมความเร็วแบบใช้จอยสติ๊ก ซึ่งไวต่อการขยับขึ้นลงจึงอาจทำให้ความเร็วเปลี่ยนแปลงไปได้ตลอดเวลา จึงต้องทำเป็นระดับความเร็ว เพื่อกำหนดช่วงความเร็วให้สามารถคงความเร็วเดิมไว้ได้ถึงแม้ว่าจอยสติ๊กจะมีการขยับขึ้นลง จากรูปที่ 3.14 เป็นการแสดงถึงสวิทช์คำสั่งของรีโมทที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของรถตัดหญ้า รายละเอียดคำสั่งดังตารางที่ 3.14 สวิทช์คำสั่งที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้าให้เคลื่อนที่เดินหน้า ถอยหลัง เลี้ยวซ้าย และเลี้ยวขวา ซึ่งจะใช้เป็นจอยสติ๊ก หมายเลข 1 ดังแสดงตามรูปที่ 3.14 และจะทำการอ่านค่าความถี่ของจอยสติ๊กที่ตำแหน่งต่าง ๆ แสดงรายละเอียดความถี่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ได้ ดังตารางที่ 3.15 เพื่อนำมาใช้ในการแบ่งระดับความเร็วของมอเตอร์ โดยการนำค่าความถี่ของจอยสติ๊ก ดังตารางที่ 3.15 มาทำการแบ่งช่วงระดับความเร็วของรถตัดหญ้าที่ใช้สำหรับการเคลื่อนที่เดินหน้า และถอยหลังออกเป็น 3 ระดับ ซึ่งค่าความเร็ว (ค่า PWM) เริ่มต้นของมอเตอร์ทั้ง 2 ตัวจะมีค่าที่ไม่เท่ากัน และจะมีการเพิ่มค่าความเร็วของมอเตอร์ทั้ง 2 ตัวขึ้นทีละ 1 ค่า จนค่าความเร็วของมอเตอร์ทั้ง 2 ตัวถึงค่าความเร็วสิ้นสุด ดังตารางที่ 3.17



รูปที่ 3.14 การทำงานของปุ่มกดของรีโมทควบคุม

ตารางที่ 3.14 การทำงานของรีโมทควบคุม

Number	Function
1	เดินหน้า ถอยหลัง เลี้ยวซ้าย เลี้ยวขวา
2	ควบคุมการปรับเพิ่มความสูงใบตัด
3	ควบคุมการสตาร์ทเครื่องตัดหญ้า
4	ควบคุมความเร็วของเครื่องตัดหญ้า
5	รีเซ็ตการทำงานเมื่อตรวจพบสิ่งกีดขวาง
6	ควบคุมการปรับลดความสูงใบตัด

ตารางที่ 3.15 ความถี่ของจอยสติ๊กหมายเลข 1 ที่ตำแหน่งต่าง ๆ

ตำแหน่งจอยสติ๊ก	ค่าความถี่ของรีโมทควบคุม
ตรงกลาง	1450
โยกขึ้นบนสุด	1980
โยกลงล่างสุด	980

ตารางที่ 3.16 ความถี่ของจอยสติ๊กหมายเลข 1 ที่ใช้ในการกำหนดทิศทางเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้า

การเคลื่อนที่	ค่าความถี่ของรีโมทควบคุม	
	แชนเนล 1 (Ch 1)	แชนเนล 2 (Ch 2)
เดินหน้า	มากกว่า 1530	มากกว่า 1530
ถอยหลัง	น้อยกว่า 1430	น้อยกว่า 1430
เลี้ยวซ้าย	มากกว่า 1530	น้อยกว่า 1430
เลี้ยวขวา	น้อยกว่า 1430	มากกว่า 1530

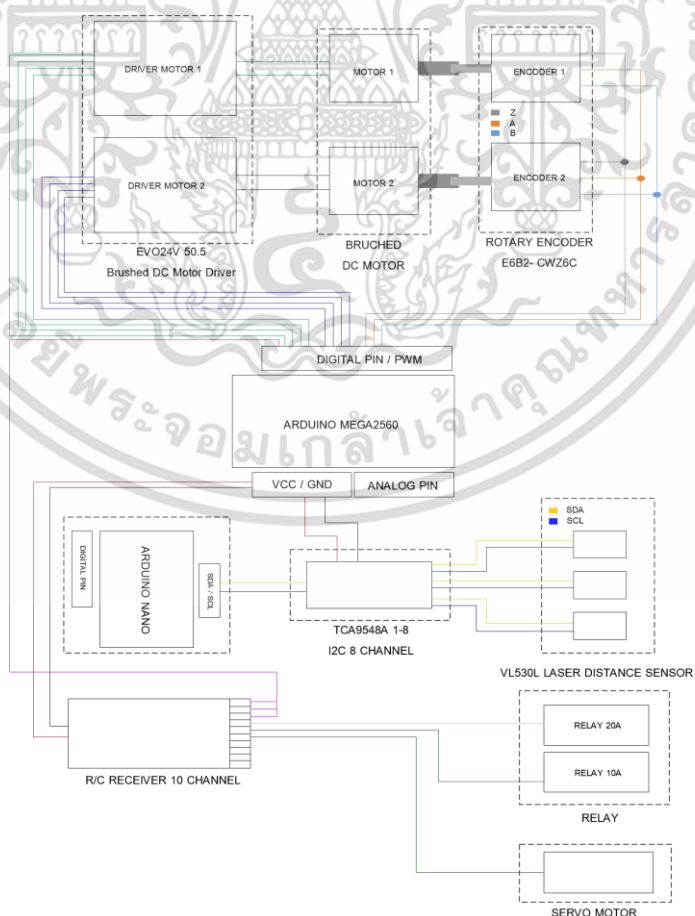
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.17 ระดับความเร็วของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม

เกียร์	ความถี่ของรีโมทควบคุม	ความเร็ว (ค่า PWM)			
		มอเตอร์ 1		มอเตอร์ 2	
		ค่าเริ่มต้น	ค่าสิ้นสุด	ค่าเริ่มต้น	ค่าสิ้นสุด
1	1550 ถึง 1690	14	27	12	25
2	1700 ถึง 1840	27	40	25	38
3	1850 ถึง 1950	40	53	38	51

3.4 ขั้นตอนการออกแบบวงจรควบคุมรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม

เป็นขั้นตอนในการออกแบบวงจรที่ใช้ในการควบคุมรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม ดังแสดงตามรูปที่ 3.15 ประกอบด้วย 5 วงจร ได้แก่ วงจรเชื่อมต่อของระบบป้อนไฟ วงจรเชื่อมต่อชุดเซนเซอร์วัดระยะทางเข้ากับชุดคอนโทรลเลอร์ วงจรเชื่อมต่อบอร์ดไดรฟ์มอเตอร์กระแสตรง และเอนโคเดอร์เข้ากับชุดคอนโทรลเลอร์ วงจรไฟเลี้ยงแรงดัน 5 โวลต์ดีซี เข้ากับอุปกรณ์ภายในระบบ และวงจรการเชื่อมต่อชุดคอนโทรลเลอร์รับ และส่งข้อมูลเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 3.16 ถึงรูปที่ 3.20

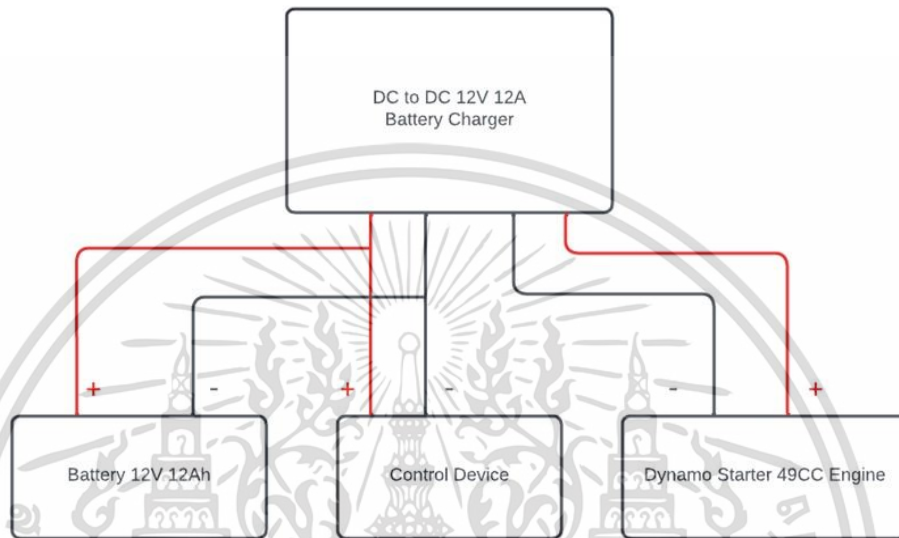


รูปที่ 3.15 วงจรที่ใช้ในการควบคุมรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ผู้ที่นำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย ผู้ที่นำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย ผู้ที่นำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย

3.4.1 วงจรเชื่อมต่อของระบบปั่นไฟ

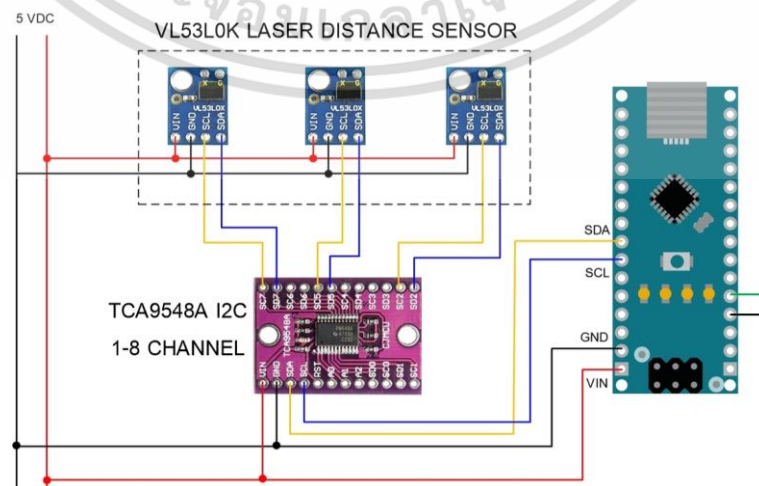
จากรูปที่ 3.16 แสดงถึงวงจรของระบบปั่นไฟภายในรถตัดหญ้า โดยเมื่อได้รสเตอร์ทไฟฟ้าของเครื่องตัดหญ้าเริ่มทำงานจะเปรียบเสมือนเป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ระบบ จากนั้นกระแสไฟฟ้าจะไหลเข้าสู่ชาร์จเจอร์ เพื่อชาร์จกระแสไฟเข้าไปที่แบตเตอรี่



รูปที่ 3.16 วงจรเชื่อมต่อของระบบปั่นไฟ

3.4.2 วงจรเชื่อมต่อชุดเซนเซอร์วัดระยะทางเข้ากับชุดคอนโทรลเลอร์

จากรูปที่ 3.17 แสดงวงจรเชื่อมต่อชุดเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดเลเซอร์ (VL53L0X I²C Time of Flight Laser Ranging Sensor) ติดตั้งเข้ากับชุดคอนโทรลเลอร์ โดยชุดเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดเลเซอร์ต่อเข้ากับช่องสัญญาณอนาล็อก

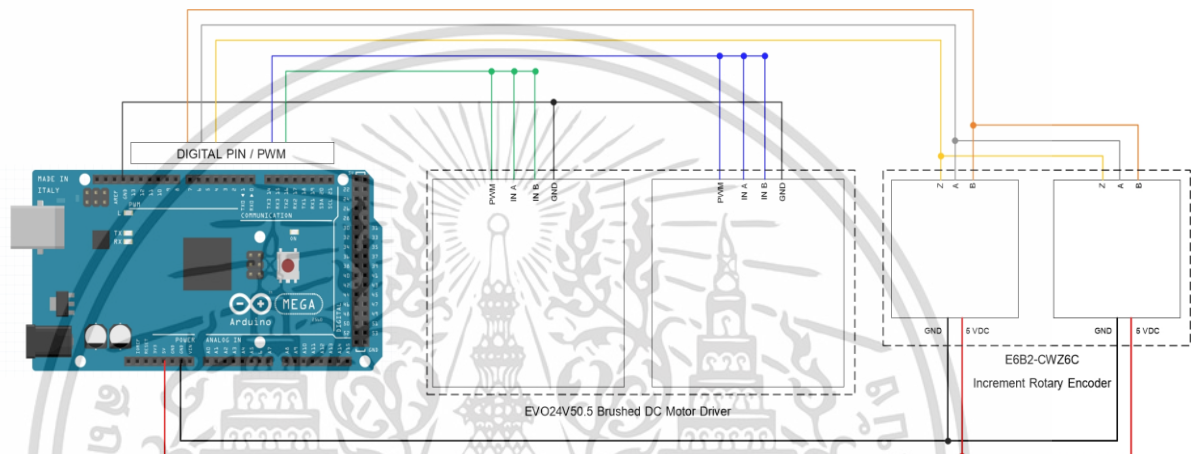


รูปที่ 3.17 วงจรเชื่อมต่อชุดเซนเซอร์วัดระยะทางเข้ากับชุดคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 วงจรเชื่อมต่อบอร์ดไดรฟ์มอเตอร์กระแสตรง และเอนโคเดอร์เซนเซอร์เข้ากับชุดคอนโทรลเลอร์

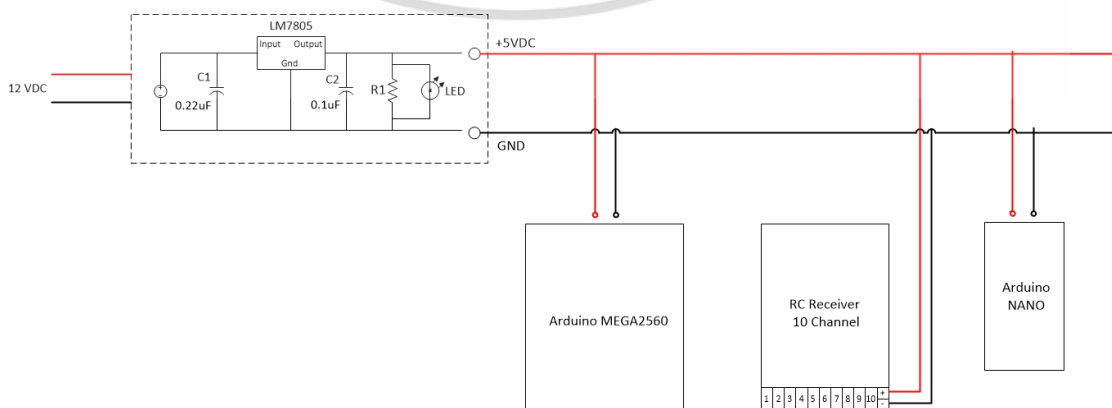
จากรูปที่ 3.18 แสดงวงจรเชื่อมต่อบอร์ดไดรฟ์มอเตอร์กระแสตรง (EVO24V50.5 Brushed DC Motor Driver) และเอนโคเดอร์เซนเซอร์ (E6B2CWZ6C OMRON Rotary Encoder) ติดตั้งเข้ากับชุดคอนโทรลเลอร์ โดยการเชื่อมต่อจะเชื่อมต่อเข้ากับช่องสัญญาณดิจิทัลของบอร์ดคอนโทรลเลอร์ เพื่อจ่ายสัญญาณ PWM ให้แก่มอเตอร์ และเอนโคเดอร์เซนเซอร์ต่อเข้ากับช่องสัญญาณดิจิทัลของบอร์ดคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 3.18 วงจรเชื่อมต่อบอร์ดไดรฟ์มอเตอร์กระแสตรง และเอนโคเดอร์เซนเซอร์เข้ากับชุดคอนโทรลเลอร์

3.4.4 วงจรเชื่อมต่อไฟเลี้ยงแรงดัน 5 โวลต์ดีซี เข้ากับอุปกรณ์ภายในระบบ

จากรูปที่ 3.19 แสดงวงจรลดแรงดันจากแบตเตอรี่ 12 โวลต์ ให้เหลือ 5 โวลต์ เพื่อเป็นแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงให้กับอุปกรณ์ภายในรถตัดหญ้า ได้แก่ บอร์ดคอนโทรลเลอร์ และเครื่องรับสัญญาณ โดยใช้ไอซีเบอร์ 7805 (IC Voltage Regulator) และตัวเก็บประจุขนาด 0.22 ไมโครฟารัด และ 0.1 ไมโครฟารัด ในการลดแรงดันจากแบตเตอรี่

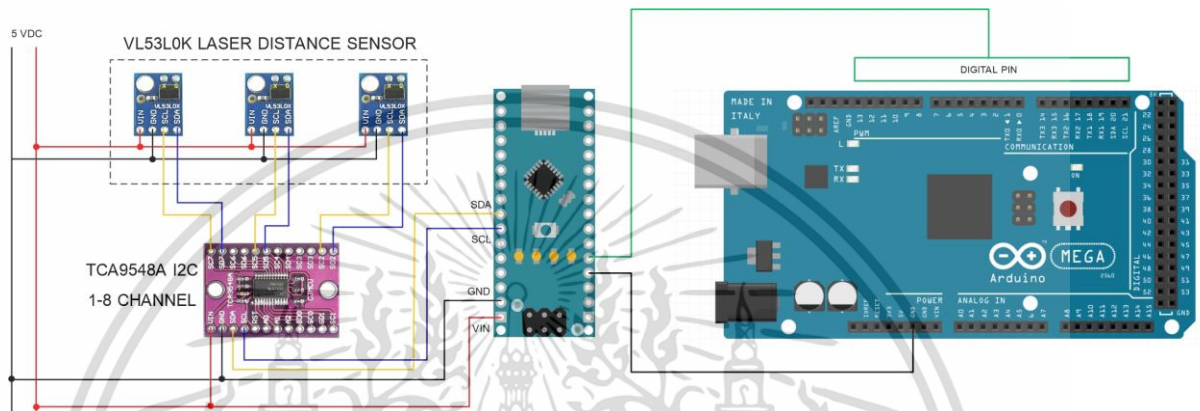


รูปที่ 3.19 วงจรเชื่อมต่อไฟเลี้ยงแรงดัน 5 โวลต์ดีซี เข้ากับอุปกรณ์ภายในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังหน่วยงานอื่น การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต ถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.5 การเชื่อมต่อชุดคอนโทรลเลอร์รับ และส่งข้อมูลเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่

จากรูปที่ 3.20 แสดงการเชื่อมต่อชุดคอนโทรลเลอร์ในการรับส่งข้อมูล เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้า โดยใช้บอร์ดขยายพอร์ตสื่อสารอนุกรมในการขยายช่องสัญญาณการสื่อสารอนุกรมแบบไอสแควซี เพื่อรับค่าระยะทางจากชุดเซนเซอร์ ซึ่งจะมีบอร์ดควบคุมการทำงาน 2 บอร์ด คือ Arduino NANO และ Arduino MEGA 2560 รับ และส่งสัญญาณเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้าไม่ให้ชนสิ่งกีดขวาง



รูปที่ 3.20 การเชื่อมต่อชุดคอนโทรลเลอร์รับ และส่งข้อมูลเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่

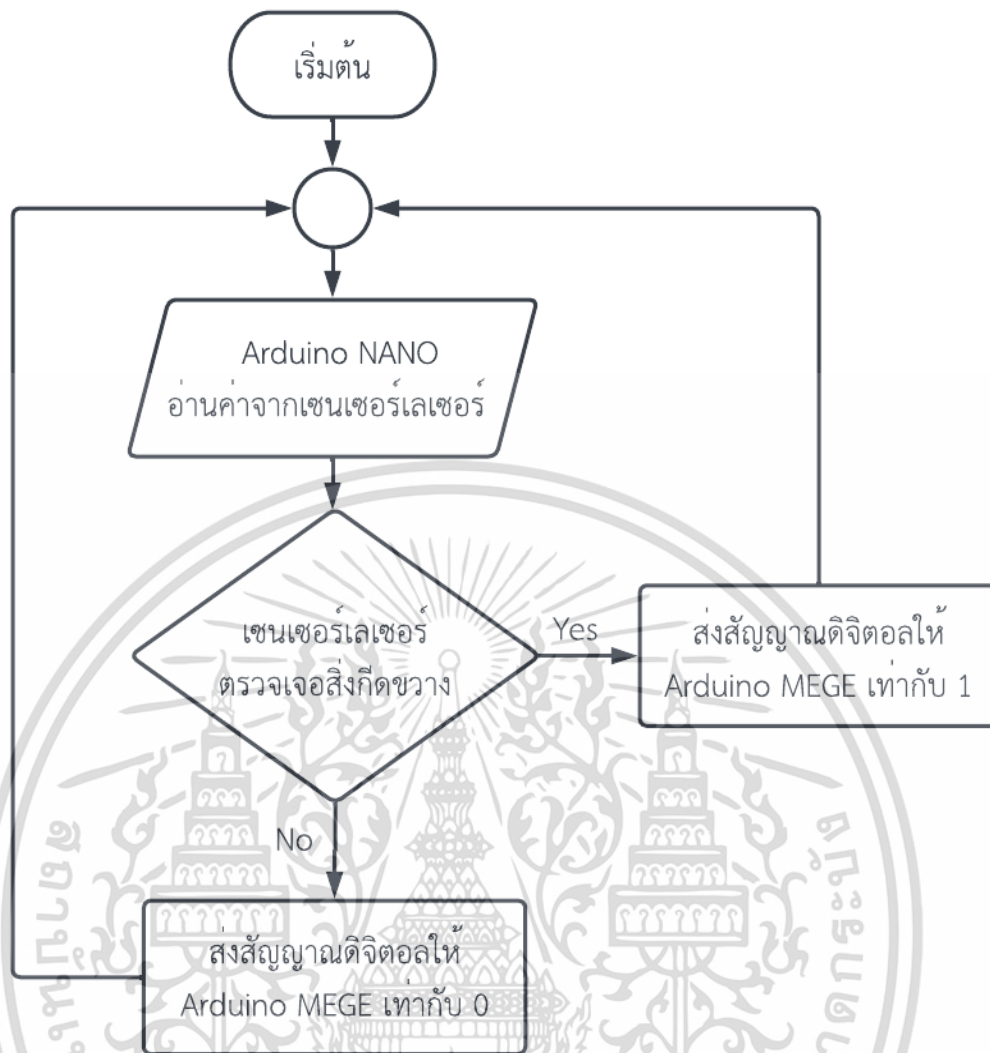
3.5 แผนผังโปรแกรมควบคุมการทำงานของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม

เป็นแผนผัง แสดงถึงลำดับการทำงานของโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมระบบการทำงานของรถตัดหญ้า โดยจะแบ่งระบบการทำงานออกเป็น 2 ระบบ คือ โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม ซึ่งจะใช้บอร์ด Arduino MEGA 2560 เป็นบอร์ดควบคุมหลักที่ใช้ในการควบคุมการทำงาน และโปรแกรมที่ใช้ในการตรวจจับสิ่งกีดขวาง ซึ่งจะใช้บอร์ด Arduino NANO เป็นบอร์ดควบคุมหลักในการเชื่อมต่อกับเซนเซอร์วัดระยะทั้ง 3 ตัว และส่งค่าเป็น 0 และ 1 ให้กับบอร์ด Arduino MEGA 2560 เพื่อใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้า ซึ่งจะแบ่งแผนผังการทำงานของโปรแกรมได้ 2 แผนผัง ดังต่อไปนี้

3.5.1 แผนผังโปรแกรมตรวจจับสิ่งกีดขวาง

ในแผนผังตามรูปที่ 3.21 แสดงการทำงานโปรแกรมตรวจจับสิ่งกีดขวางของรถตัดหญ้า โดยใช้บอร์ด Arduino NANO เป็นบอร์ดควบคุมหลัก โดยเริ่มต้นจาก Arduino NANO ทำการอ่านค่าจากเซนเซอร์ตรวจจับสิ่งกีดขวาง เมื่อมีสิ่งกีดขวางรถตัดหญ้า บอร์ด Arduino NANO จะส่งค่า 1 ไปให้บอร์ด Arduino MEGA 2560 แล้วจะหยุดการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้า ถ้าไม่พบสิ่งกีดขวางรถตัดหญ้า บอร์ด Arduino NANO จะส่งค่า 0 ไปให้บอร์ด Arduino MEGA 2560 ซึ่งรถตัดหญ้าก็จะเคลื่อนที่ต่อไปได้

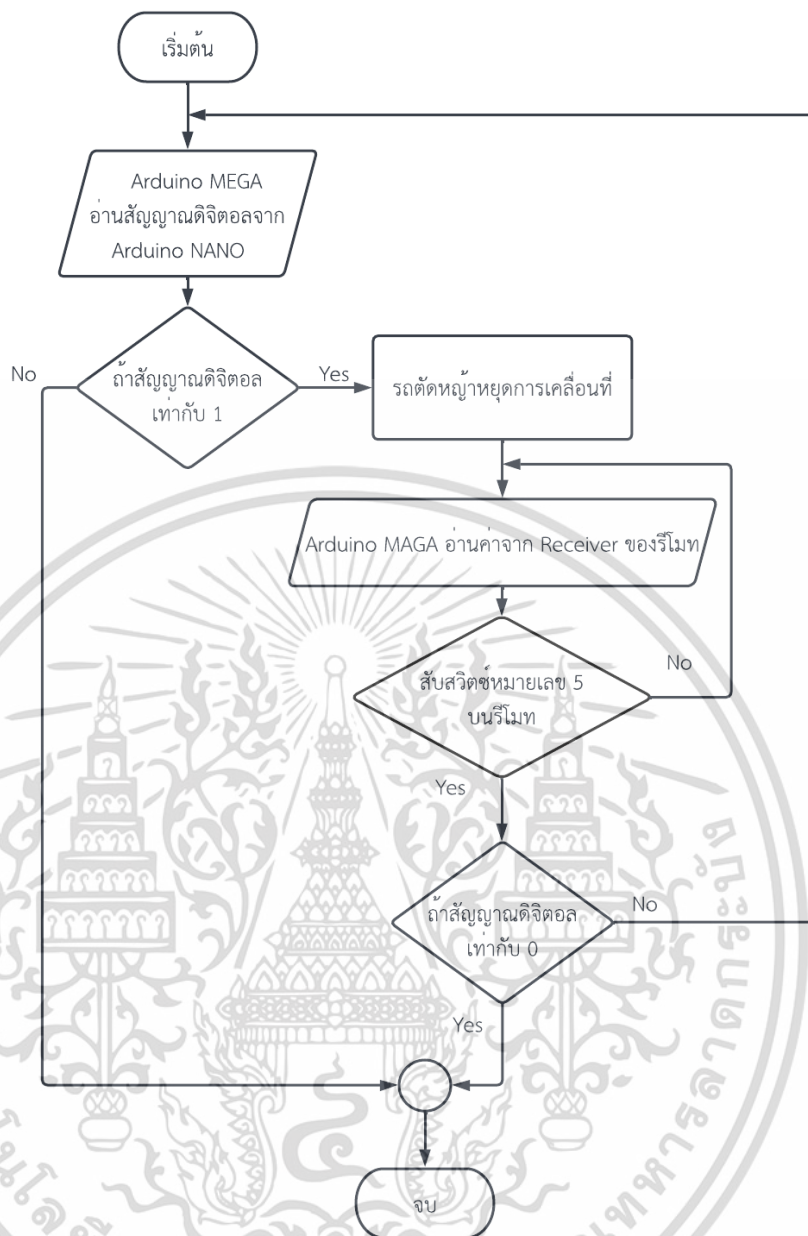
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.21 แผนภาพโปรแกรมตรวจจับสิ่งกีดขวาง

3.5.2 แผนผังโปรแกรมการรีเซ็ตระบบความปลอดภัย

จากรูปที่ 3.22 แสดงการทำงานของโปรแกรมการรีเซ็ตระบบความปลอดภัย โดยจะใช้บอร์ด Arduino MEGA 2560 เป็นบอร์ดควบคุมหลักในการอ่านค่าจากบอร์ด Arduino NANO โดยถ้าเซนเซอร์ตรวจพบสิ่งกีดขวางบอร์ด Arduino NANO จะส่งค่าดิจิทัลเท่ากับ 1 ให้กับบอร์ด Arduino MEGA 2560 เพื่อสั่งให้รถตัดหญ้าหยุดการเคลื่อนที่ และทำการรีเซ็ตการทำงาน โดยการสับสวิทช์หมายเลข 5 บนรีโมท ตามรูปที่ 3.14 และค่าดิจิทัลที่อ่านมาจากบอร์ด Arduino NANO ต้องมีค่าเท่ากับ 0 รถตัดหญ้าจึงจะสามารถกลับมาเคลื่อนที่ได้

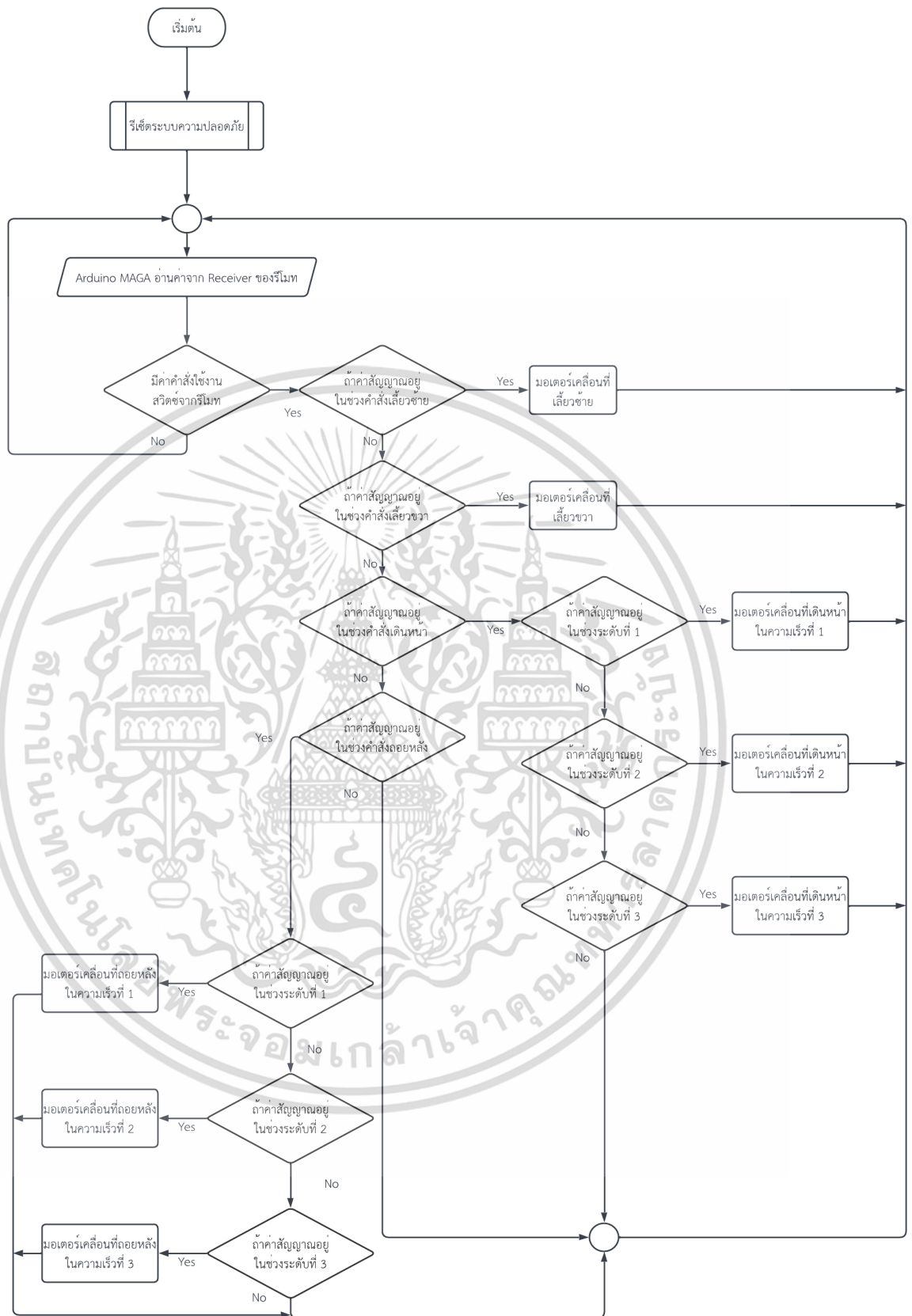


รูปที่ 3.22 แผนภาพโปรแกรมการรีเซ็ตระบบความปลอดภัย

3.5.3 แผนผังโปรแกรมการเคลื่อนที่ของรถตัดหน้าแบบใช้รีโมทควบคุม

จากรูปที่ 3.23 แสดงการทำงานของโปรแกรมควบคุมการเคลื่อนที่ โดยจะใช้บอร์ด Arduino MEGA 2560 เป็นบอร์ดควบคุมหลักในการอ่านค่าจากอุปกรณ์รับสัญญาณของรีโมท โดยถ้ามีการโยกจอยสติ๊กหมายเลข 1 บนรีโมท ตามรูปที่ 3.14 ขึ้นด้านบนรถจะเคลื่อนที่ไปข้างหน้า และความเร็วของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นตามระดับความเร็ว ดังแสดงตามตารางที่ 3.17 การโยกจอยสติ๊กหมายเลข 1 บนรีโมท ตามรูปที่ 3.14 ลงด้านล่างรถจะเคลื่อนที่ถอยหลัง และความเร็วของมอเตอร์จะเพิ่มขึ้นตามระดับความเร็ว ดังแสดงตามตารางที่ 3.17 และหากโยกจอยสติ๊กหมายเลข 1 บนรีโมท ตามรูปที่ 3.14 ไปทางด้านซ้าย และด้านขวาก็จะทำให้รถเลี้ยวไปตามทิศทางการโยกของจอยสติ๊ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้









รูปที่ 3.23 แผนภาพโปรแกรมการเคลื่อนที่ของรถดัดหัวแบบใช้รีโมทควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 อุปกรณ์ด้านฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในโครงการ การปรับปรุงประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม

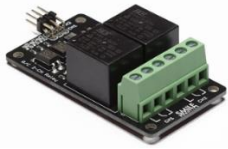






ตารางที่ 3.18 แสดงรายละเอียดชื่อ และรูปของอุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ในการดำเนินการทำโครงการการปรับปรุงประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม

ตารางที่ 3.18 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงาน

Equipment	Model and Type	Picture
บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์	Arduino MEGA2560	
บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์	Arduino NANO	
บอร์ดขยายพอร์ตสื่อสารอนุกรม	TCA9548A 1 to 8 I2C 8 Channel IIC	
รีโมทควบคุม	FLYSKY FS-i6X I6X 2.4GHz 10 CH	
อุปกรณ์รับสัญญาณ	Receiver FS-i6-X 2.4G FS 10 CH	
บอร์ดไดรฟ์มอเตอร์	EVO24V50.5 Brushed DC Motor Driver	







เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.18 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงาน (ต่อ)

Equipment	Model and Type	Picture
รีเลย์	R/C 2-CH Relay 10A	
สวิตช์ปุ่มกด	Push Button Switch LA16 AB6-M AC 250V 30A DC	
มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	Brushed DC MY1016Z 250W 12V	
มอเตอร์แกนชัก	Stroke mini linear actuator 100N 10mm stroke mini linear actuator 100N	
โซ่	โซ่เบอร์ 420	
ล้อ	ล้อสูลมขนาด 8 นิ้ว 8x2.50 นิ้ว	
เฟือง	เฟืองซี่ขนาด 16 ฟัน	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.18 อุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงาน (ต่อ)

Equipment	Model and Type	Picture
เครื่องกำเนิดไฟฟ้า	Dynamo Starter 49cc engine	
แบตเตอรี่	Battery lithium ion 12V 12Ah	
ชาร์จเจอร์	DC to DC 12V To 12V 12.6V 13V 14.5V Constant Current 5A 8A 12A 15A 20A 22A and 25A Charge	
โวลต์/แอมป์มิเตอร์	DC 100V 30A Voltmeter Ammeter Blue + Red LED Amp Dual Digital Volt Meter	
เอนโคเดอร์	E6B2CWZ6C OMRON Rotary Encoder E6B2-CWZ6C 1000 p/R 5-24V	
เซนเซอร์วัดระยะทางชนิดเลเซอร์	VL53L0X I2C Time of Flight Laser Ranging Sensor	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 ขั้นตอนการประกอบโครงสร้าง และวงจรควบคุมรถตัดหญ้า

3.7.1 ขั้นตอนการประกอบโครงสร้างส่วนที่ใช้ในการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม

1. จากรูปที่ 3.24 เป็นการนำโครงสร้างเดิมของรถตัดหญ้ามาทำการแยกส่วน เพื่อพัฒนา และปรับปรุงโครงสร้างให้เป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้ ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.24 โครงสร้างเดิมของรถตัดหญ้าบังคับวิทยุพร้อมตัวปรับความสูงใบตัด

2. นำแบบโครงสร้างรถตัดหญ้า จากรูปที่ 3.8 นำมาประกอบโครงสร้างรถตัดหญ้าจะได้ ดังแสดงตามรูปที่ 3.25 ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้สำหรับประกอบชุดอุปกรณ์ควบคุม

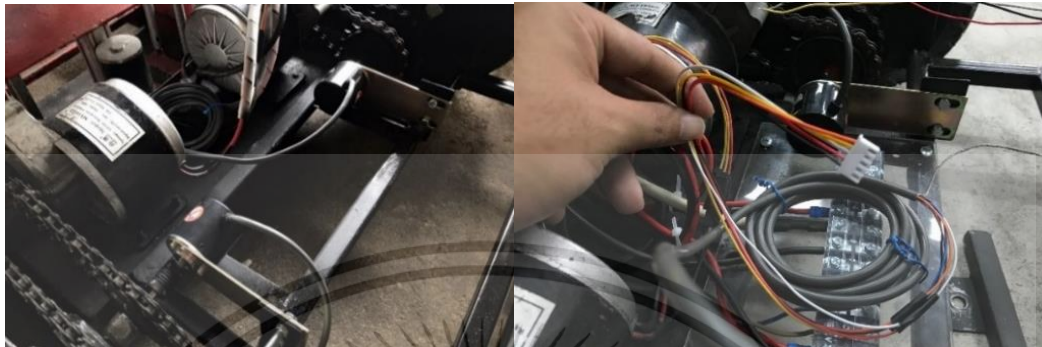


รูปที่ 3.25 ประกอบโครงสร้างตามที่ได้ออกแบบไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.2 ขั้นตอนการเดินสายไฟของอุปกรณ์ควบคุม

1. เมื่อประกอบโครงสร้างส่วนที่ใช้สำหรับประกอบชุดอุปกรณ์ควบคุมเสร็จแล้ว จากรูปที่ 3.26 นำเอนโคเดอร์เซนเซอร์มายึดติดกับแกนเพลลาของชุดล้อ



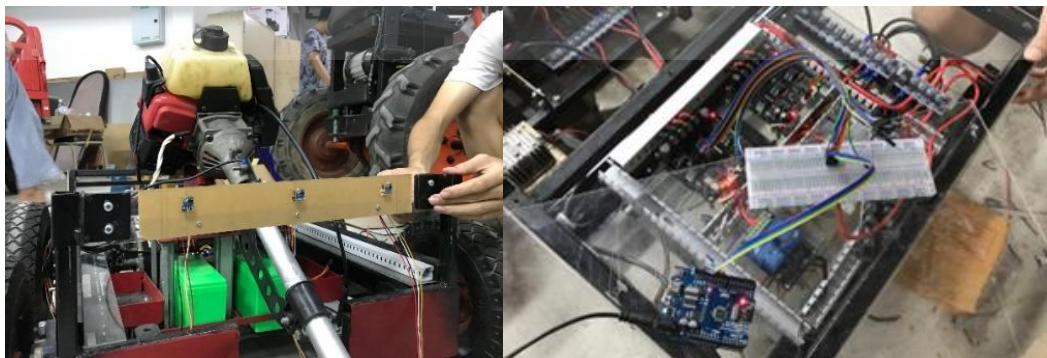
รูปที่ 3.26 ติดตั้งเอนโคเดอร์เซนเซอร์ยึดติดกับแกนเพลลาของชุดล้อ

2. จากรูปที่ 3.27 เป็นการติดอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุม เช่น บอร์ดไดรฟ์มอเตอร์ รีเลย์ และรางที่ใช้สำหรับเดินสายไฟ เป็นต้น



รูปที่ 3.27 ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมเข้ากับกล่องควบคุมที่ได้ติดตั้งเข้ากับรถตัดหญ้า

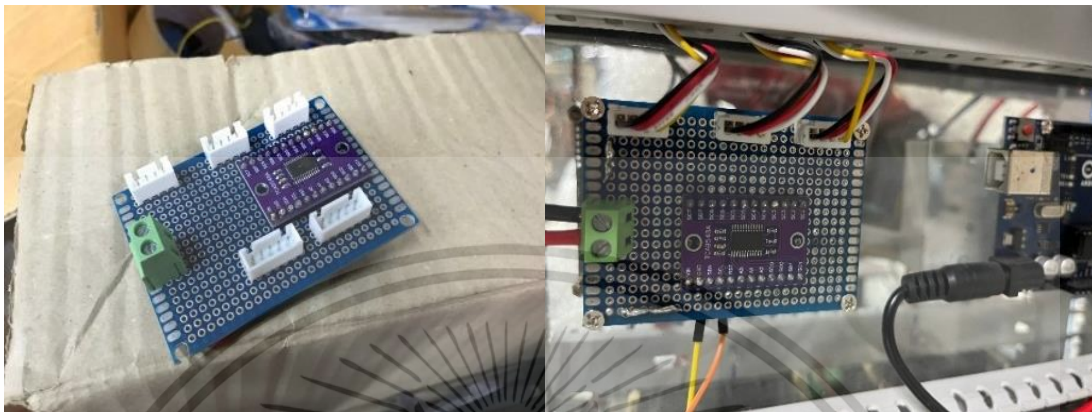
3. จากรูปที่ 3.28 ทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดเลเซอร์เข้ากับรถตัดหญ้า



รูปที่ 3.28 ติดตั้งเซนเซอร์วัดระยะทางชนิดเลเซอร์เข้ากับตัวรถตัดหญ้า

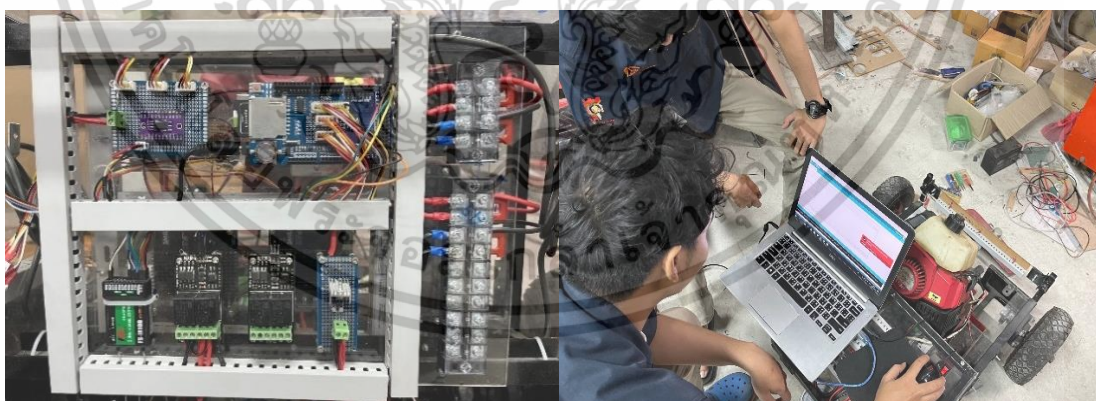
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. จากรูปที่ 3.29 เป็นการติดตั้งบอร์ดขยายพอร์ตสื่อสารอนุกรมที่จะใช้ในการเชื่อมต่อเซนเซอร์หลาย ๆ ตัวที่มีแอสเตอเรสซึกัน เพื่อจะทำให้เซนเซอร์ที่มีแอสเตอเรสซึกันสามารถทำงานร่วมกันได้



รูปที่ 3.29 เชื่อมต่อสายเข้ากับอุปกรณ์เซนเซอร์ และติดตั้งบอร์ดขยายพอร์ตสื่อสารอนุกรม

5. จากรูปที่ 3.16 ถึงรูปที่ 3.20 เป็นการออกแบบวงจรควบคุมการทำงานของรถตัดหญ้าทั้งหมดแบ่งออกเป็น 5 วงจร จากนั้นทำการต่อวงจรทั้ง 5 วงจรเข้าด้วยกัน เพื่อใช้สำหรับการควบคุมการทำงานของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม ดังแสดงตามรูปที่ 3.30 และทำการเขียนโปรแกรมในการควบคุมระบบการทำงานต่าง ๆ ของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม



รูปที่ 3.30 ชุดควบคุมการทำงาน และการอัปโหลดโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. จากรูปที่ 3.31 เป็นรูปที่แสดงถึงโครงสร้างรถตัดหญ้าก่อนทำการปรับปรุงโครงสร้าง และรูปที่ 3.32 เป็นรูปรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมที่มีการเพิ่มระบบควบคุมผ่านบอร์ดคอนโทรลเลอร์ และระบบความปลอดภัยเรียบร้อยแล้วเสร็จสมบูรณ์พร้อมนำไปใช้งาน



รูปที่ 3.31 รถตัดหญ่าก่อนทำการปรับปรุงโครงสร้าง



รูปที่ 3.32 รถตัดหญ่้าแบบใช้รีโมทควบคุมที่มีการเพิ่มระบบควบคุมผ่านบอร์ดคอนโทรลเลอร์ และระบบความปลอดภัยเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดสอบ

จากผลการดำเนินการ สามารถนำมาช่วยในประเมินการปรับปรุงประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม เพื่อนำผลการศึกษามาช่วยประเมินประสิทธิภาพในการทำงานและนำมาหาค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และสรุปผล ซึ่งสถานที่ที่ใช้ในการทดลองเป็นพื้นที่บริเวณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยเลือกพื้นที่สนามปูน และพื้นที่สนามหญ้าที่มีลักษณะพื้นราบเรียบ และมีระดับพื้นที่เท่ากันไม่ลาดชัน สำหรับการทดสอบ โดยในการทดสอบต้องทดสอบการทำงานในรูปแบบเดียวกันในจำนวน 10-15 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการทดสอบ

จากการศึกษาทดลองสามารถแบ่งได้เป็น 4 การทดลองดังนี้

1. ทดสอบประสิทธิภาพด้านการเคลื่อนที่ตามแนวเส้นตรงของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมบนพื้นที่สนามปูน
2. ทดสอบประสิทธิภาพด้านการเคลื่อนที่ตามแนวเส้นตรงของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมบนพื้นที่สนามหญ้า
3. ทดสอบประสิทธิภาพด้านการบังคับเลี้ยวซ้าย และบังคับเลี้ยวขวา
4. ทดสอบประสิทธิภาพด้านความปลอดภัยเมื่อพบสิ่งกีดขวาง

4.1 การทดสอบประสิทธิภาพด้านการเคลื่อนที่ตามแนวเส้นตรงของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมบนพื้นที่สนามปูน

การทดสอบประสิทธิภาพ ด้านการเคลื่อนที่ตามแนวเส้นตรงของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมได้ออกแบบการทดสอบ โดยแบ่งระยะทางที่เป็นแนวเส้นตรง 3 ระยะทาง และเมื่อถึงระยะทางที่กำหนดไว้จะมีการตรวจวัดว่ารถตัดหญ้ามีการเคลื่อนที่ออกจากแนวเส้นตรงกี่องศา และระยะทางที่ใช้ในการทดลองมีระยะไม่เกิน 30 เมตร เนื่องจากอยู่ในช่วงที่ระยะสายตาสามารถมองเห็นได้ ซึ่งสามารถบังคับ และควบคุมรถตัดหญ้าได้โดยง่าย

แสดงผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.1 เป็นการทดสอบประสิทธิภาพด้านการเคลื่อนที่ตามแนวเส้นตรงของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมบนพื้นที่สนามปูน โดยได้เปรียบเทียบการทำงานทั้งหมด 3 ช่วงระยะทาง ได้แก่ 10, 20, 30 เมตร โดยแบ่งการทดสอบออกเป็นระยะทางละ 15 ครั้ง จากการทดสอบพบว่าในช่วงระยะทางที่ 10 เมตร อยู่ในช่วงการทำงานที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.4 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.5071 และในช่วงระยะทางที่ 20 เมตร อยู่ในช่วงการทำงานที่มีประสิทธิภาพต่ำที่สุดโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.93 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.7037

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตารางบันทึกผลการหาประสิทธิภาพด้านการเคลื่อนที่ตามแนวเส้นตรงของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมบนพื้นที่สนามปูน

ครั้ง	ระยะทาง (เมตร)		
	10	20	30
	มุมที่เปลี่ยนแปลง (องศา)	มุมที่เปลี่ยนแปลง (องศา)	มุมที่เปลี่ยนแปลง (องศา)
1	1	1	1
2	0	0	1
3	0	1	1
4	0	0	1
5	0	1	1
6	1	2	2
7	1	1	1
8	1	2	3
9	0	2	2
10	1	1	1
11	0	1	1
12	0	1	1
13	0	0	1
14	1	1	2
15	0	0	1
Minimum	0	0	1
Maximum	1	2	3
Average (\bar{X})	0.4	0.93	1.33
S.D.	0.5071	0.7037	0.6172

4.2 การทดสอบประสิทธิภาพด้านการเคลื่อนที่ตามแนวเส้นตรงของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมบนพื้นที่สนามหญ้า

การทดสอบประสิทธิภาพ ด้านการเคลื่อนที่ตามแนวเส้นตรงของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมได้ออกแบบการทดสอบ โดยแบ่งระยะทางที่เป็นแนวเส้นตรง 3 ระยะทาง และเมื่อถึงระยะทางที่กำหนดไว้จะมีการตรวจวัดว่ารถตัดหญ้ามีการเคลื่อนที่ออกจากแนวเส้นตรงกี่องศา แสดงผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ตารางบันทึกผลการหาประสิทธิภาพด้านการเคลื่อนที่ตามแนวเส้นตรงของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมบนพื้นที่สนามหญ้า

ครั้ง	ระยะทาง (เมตร)		
	10	20	30
	มุมที่เปลี่ยนแปลง (องศา)	มุมที่เปลี่ยนแปลง (องศา)	มุมที่เปลี่ยนแปลง (องศา)
1	1	2	3
2	1	2	2
3	1	1	2
4	0	1	2
5	0	2	2
6	2	2	3
7	1	2	3
8	2	3	4
9	0	2	4
10	1	1	4
11	1	1	3
12	1	2	3
13	0	1	3
14	0	1	3
15	0	1	4
Minimum	0	1	2
Maximum	2	3	4
Average (\bar{X})	0.73	1.6	3
S.D.	0.7037	0.6325	0.7559

จากตารางที่ 4.2 เป็นการทดสอบประสิทธิภาพด้านการเคลื่อนที่ตามแนวเส้นตรงของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมบนพื้นที่สนามหญ้า โดยได้เปรียบเทียบการทำงานทั้งหมด 3 ช่วงระยะทาง ได้แก่ 10, 20, 30 เมตร โดยแบ่งการทดสอบออกเป็นระยะทางละ 15 ครั้ง จากการทดสอบพบว่าในช่วงระยะทางที่ 10 เมตรอยู่ในช่วงการทำงานที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.73 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.7037 ในช่วงระยะทางที่ 30 เมตร อยู่ในช่วงการทำงานที่มีประสิทธิภาพต่ำที่สุดโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 3 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.7559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดสอบประสิทธิภาพด้านการบังคับเลี้ยว

การทดสอบประสิทธิภาพด้านการบังคับเลี้ยวด้านซ้าย และการบังคับเลี้ยวด้านขวาได้มีการออกแบบการทดสอบ โดยกำหนดให้เมื่อบังคับเลี้ยวไปในทิศทางใด 1 ครั้ง รถจะเลี้ยวครั้งละ 90 องศา และจะต้องมีการบังคับเลี้ยวไปในทิศทางเดียวกัน 4 ครั้ง จนกระทั่งมีการเลี้ยวครบ 360 องศา หรือรถตัดหญ้าต้องกลับมาที่ตำแหน่งเริ่มต้น

แสดงผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 เป็นการทดสอบประสิทธิภาพด้านการบังคับเลี้ยวของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม โดยการทดสอบจะแบ่งการบังคับเลี้ยวเป็นแบบเลี้ยวซ้าย 90 องศา และเลี้ยวขวา 90 องศา และในการเลี้ยวแต่ละการทดสอบจะถูกแบ่งออกเป็น 4 ครั้ง จนมีการเลี้ยวครบ 360 องศา จากการทดลองประสิทธิภาพด้านการบังคับเลี้ยวซ้าย และเลี้ยวขวามีประสิทธิภาพการทำงานค่อนข้างดีสามารถเลี้ยวได้ถูกต้องตามการควบคุม หรืออาจมีบางครั้งที่การบังคับเลี้ยวอาจเกิดปัญหาอยู่เล็กน้อย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นที่ที่ใช้ในการทดสอบ

ตารางที่ 4.3 ตารางบันทึกผลการหาประสิทธิภาพด้านการบังคับเลี้ยวซ้าย

ครั้งที่	บังคับเลี้ยวซ้ายครั้งละ 90°								ร้อยละ (%)
	90°		180°		270°		360°		
	ปกติ	ผิดปกติ	ปกติ	ผิดปกติ	ปกติ	ผิดปกติ	ปกติ	ผิดปกติ	
1	✓		✓		✓		✓		100
2	✓		✓		✓		✓		100
3	✓		✓		✓		✓		100
4	✓		✓		✓		✓		100
5	✓		✓		✓		✓		100
6	✓		✓		✓		✓		100
7	✓		✓		✓		✓		100
8	✓		✓		✓		✓		100
9	✓		✓		✓		✓		100
10	✓		✓		✓		✓		100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ตารางบันทึกผลการหาประสิทธิภาพด้านการบังคับเลี้ยวขวา

ครั้งที่	บังคับเลี้ยวขวาครั้งละ 90°								ร้อยละ (%)
	90°		180°		270°		360°		
	ปกติ	ผิดปกติ	ปกติ	ผิดปกติ	ปกติ	ผิดปกติ	ปกติ	ผิดปกติ	
1	✓		✓		✓		✓		100
2	✓		✓		✓		✓		100
3	✓		✓		✓		✓		100
4	✓		✓		✓		✓		100
5	✓		✓		✓		✓		100
6	✓		✓		✓		✓		100
7	✓		✓		✓		✓		100
8	✓		✓		✓		✓		100
9	✓		✓		✓		✓		100
10	✓		✓		✓		✓		100

4.4 การทดสอบประสิทธิภาพด้านความปลอดภัยเมื่อพบสิ่งกีดขวาง

การทดสอบประสิทธิภาพด้านความปลอดภัยเมื่อพบสิ่งกีดขวางได้มีการออกแบบการทดสอบ โดยแบ่งระยะตรวจจับสิ่งกีดขวางอยู่ที่ 4 ระยะ คือระยะตรวจจับที่ 50, 60, 70 และ 80 เซนติเมตร เมื่อรถตัดหน้าตรวจจับสิ่งกีดขวางได้ และหยุดการเคลื่อนที่จะทำการตรวจวัดว่ารถตัดหน้าสามารถตรวจจับสิ่งกีดขวางได้ตามระยะที่กำหนดไว้หรือไม่

แสดงผลการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.5 ได้มีการออกแบบช่วงระยะตรวจจับที่ใช้ในการทดสอบ ออกเป็น 4 ระยะ ได้แก่ 50, 60, 70 และ 80 เซนติเมตร โดยเมื่อบังคับรถตัดหน้าไปจนพบกับ สิ่งกีดขวางด้านหน้า รถตัดหน้าจะหยุดการเคลื่อนที่ทันที และหลังจากนั้นจะตรวจวัดระยะที่ รถตัดหน้าสามารถตรวจจับสิ่งกีดขวางได้ว่ามีระยะทางเท่าใด โดยในการทดสอบ จะสรุปได้ว่าในช่วง ระยะตรวจจับที่ 50 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพสูงที่สุดโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 46.13 และมีค่าเบี่ยงเบน มาตรฐานอยู่ที่ 1.7006 และในช่วงระยะตรวจจับที่ 80 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด โดยมี ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 74.98 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 2.4952 สรุปได้ว่าประสิทธิภาพในการทำงาน ด้านการตรวจจับสิ่งกีดขวางของรถตัดหน้าแบบใช้รีโมทควบคุมมีค่าเฉลี่ยที่อยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับ ได้

ตารางที่ 4.5 ตารางบันทึกผลการหาประสิทธิภาพด้านความปลอดภัยเมื่อพบสิ่งกีดขวาง

ครั้ง	ระยะที่ใช้ตรวจจับสิ่งกีดขวาง (เซนติเมตร)			
	50	60	70	80
	ระยะที่ตรวจจับ ได้	ระยะที่ตรวจจับ ได้	ระยะที่ตรวจจับ ได้	ระยะที่ตรวจจับได้
1	46.5	52.3	62.4	79.5
2	49.3	58.7	61.6	75.2
3	47.3	59.1	65.1	72.5
4	44.3	54.8	69.3	72.3
5	48.3	57.4	65.3	73.3
6	45.1	54.7	63.5	71.1
7	45.5	58.3	66.5	73.2
8	45.5	54.9	60.5	73.3
9	44.6	57.5	66.3	75.2
10	48.9	56.2	64.2	76.7
11	47.2	55.1	65.1	76.5
12	45.5	56.2	66.2	76.8
13	44.5	56.3	63.3	73.3
14	44.1	57.1	67.8	77.2
15	45.3	55.7	65.7	78.6
Minimum	44.1	52.3	60.5	71.1
Maximum	49.3	59.1	69.3	79.5
Average (\bar{X})	46.13	56.29	64.85	74.98
S.D.	1.7006	1.8023	2.3351	2.4952

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและอภิปรายผลการศึกษาค้นคว้า

5.1 สรุป

จากการออกแบบ และปรับปรุงประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม เพื่อปรับปรุงการเคลื่อนที่ และเพิ่มประสิทธิภาพด้านความปลอดภัยของรถตัดหญ้าเมื่อมีการนำไปใช้งานจริงในการทดสอบการทำงานผู้จัดทำแบ่งการทดสอบการทำงานออกเป็น 4 ด้าน ได้แก่ การทดสอบในด้านประสิทธิภาพ ด้านการเคลื่อนที่ตามแนวเส้นตรงของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมบนพื้นที่สนามปูน การทดสอบประสิทธิภาพด้านการเคลื่อนที่ตามแนวเส้นตรงของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมบนพื้นที่สนามหญ้า การทดสอบประสิทธิภาพในด้านประสิทธิภาพด้านการบังคับเลี้ยว และการทดสอบประสิทธิภาพด้านความปลอดภัยเมื่อพบสิ่งกีดขวาง ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบสามารถนำมาสรุปผลการวิจัย และนำมาใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

5.2 อภิปรายผล

จากการดำเนินการทดลอง และวิจัยการทำงานของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม เพื่อนำมาปรับปรุงประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ มีการทดสอบการทำงานของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมจริงในการทดสอบประกอบไปด้วย การทดสอบในด้านประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ตามแนวเส้นตรงของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมบนพื้นที่สนามปูน ทดสอบประสิทธิภาพด้านการเคลื่อนที่ตามแนวเส้นตรงของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมบนพื้นที่สนามหญ้า ทดสอบประสิทธิภาพในการบังคับเลี้ยว และทดสอบประสิทธิภาพด้านความปลอดภัยเมื่อพบสิ่งกีดขวาง สามารถสรุปข้อมูลได้ดังต่อไปนี้ จากการทดสอบประสิทธิภาพ ด้านการเคลื่อนที่ตามแนวเส้นตรงของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมบนพื้นที่สนามปูน พบว่าในช่วงระยะทาง 10 เมตรอยู่ในช่วงการทำงานที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดโดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.4 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.5071 และจากการทดสอบประสิทธิภาพด้านการเคลื่อนที่ตามแนวเส้นตรงของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมบนพื้นที่สนามหญ้า พบว่าในช่วงระยะทางที่ 10 เมตร อยู่ในช่วงการทำงานที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.73 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.7037 และในช่วงระยะทางที่ 30 เมตร อยู่ในช่วงการทำงานที่มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 3 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.7559 และการทดสอบประสิทธิภาพด้านการบังคับเลี้ยวของรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุม สามารถสรุปได้ว่าประสิทธิภาพด้านการบังคับเลี้ยวซ้าย และเลี้ยวขวามีประสิทธิภาพค่อนข้างดีสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตามการควบคุม แต่อาจมีบางครั้งที่การบังคับเลี้ยวอาจเกิดปัญหาอยู่เล็กน้อย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นที่ที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ในการทดสอบ และการทดสอบประสิทธิภาพด้านความปลอดภัยเมื่อพบสิ่งกีดขวาง ในการทดสอบประสิทธิภาพด้านความปลอดภัยเมื่อพบสิ่งกีดขวาง สรุปได้ว่าในช่วงระยะตรวจจับที่ 50 เซนติเมตรมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 46.13 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 1.7006

5.3 ประโยชน์ของการศึกษาค้นคว้า

1. ปรับปรุงประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของรถตัดหญ้าให้ดียิ่งขึ้น
2. ใช้รีโมทควบคุมการทำงานระยะไกล และสามารถแก้ไขรวมถึงเพิ่มฟังก์ชันการทำงานให้ เป็นไปตามโปรแกรมควบคุมได้
3. สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพด้านความปลอดภัย ให้แก่ผู้ใช้งานรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมท ควบคุมได้มากขึ้น
4. สามารถประหยัดเวลา และเพิ่มความสะดวกสบายให้แก่ผู้ใช้งานรถตัดหญ้า

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการปรับปรุงล้อของรถตัดหญ้าให้ตรง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ของ รถตัดหญ้าให้ตรงขึ้น
2. ควรมีการปรับปรุงพัฒนาในด้านโครงสร้างให้มีมาตรฐาน และมีน้ำหนักเบามากขึ้น เพื่อ เพิ่มความสะดวกในการเคลื่อนย้าย และความคล่องตัวในการเคลื่อนที่
3. ใบมีดตัดหญ้าที่ทำจากเหล็ก เมื่อกระทบกับวัสดุที่เป็นของแข็ง เช่น ก้อนหิน เศษขวดแก้ว จะถูกใบมีดตัดด้วยแรงเหวี่ยง ทำให้อาจเป็นอันตรายต่อผู้คนที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียง ควร เปลี่ยนมาใช้แบบเอ็นแทน เนื่องจากเอ็นจะมีความยืดหยุ่นได้ดี และสามารถตัดหญ้าได้ เรียบเหมือนกับใบมีดแบบเหล็ก
4. ควรมีการปรับปรุงพัฒนาต่อยอรถตัดหญ้าแบบใช้รีโมทควบคุมให้เป็นการทำงานใน รูปแบบระบบอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] Aaliyan Javaid, “Introduction to Arduino Mega 2560”, 2565, [ออนไลน์].
แหล่งที่มา: <https://linuxhint.com/introduction-arduino-mega/> (สืบค้นเมื่อ 6 ก.ย. 2565)
- [2] Syed Zain Nasir, “Introduction to Arduino Mega 2560”, 2061, [ออนไลน์].
แหล่งที่มา: <https://www.theengineeringprojects.com/2018/06/introduction-to-arduino-mega-2560.html> (สืบค้นเมื่อ 6 ก.ย. 2565)
- [3] Arduino4, “VL53L0X V2 เซ็นเซอร์วัดระยะทางแสงเลเซอร์ 0.3-120 cm”, 2563, [ออนไลน์].
แหล่งที่มา: <https://www.arduino4.com/product/855/vl53l0x-v2-laser-ranging-distance-sensor> (สืบค้นเมื่อ 2 ส.ค. 2565)
- [4] Sara Santos, ” Guide for TCA9548A I2C Multiplexer : Arduino”, 2564, [ออนไลน์].
แหล่งที่มา: <https://randomnerdtutorials.com/tca9548a-i2c-multiplexer-esp32-esp8266-arduino/> (สืบค้นเมื่อ 13 ส.ค. 2065)
- [5] lady ada, Liz Clark, “TCA9548A 1-to-8 I2C Multiplexer Breakout”, 2558, [ออนไลน์].
แหล่งที่มา: <https://learn.adafruit.com/adafruit-tca9548a-1-to-8-i2c-multiplexer-breakout?view=all> (สืบค้นเมื่อ 14 ส.ค. 2565)
- [6] นายช่างมาแชร์, “มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor)”, 2564, [ออนไลน์].
แหล่งที่มา: <https://naichangmashare.com/2021/05/28/electric-motor-ep-1/> (สืบค้นเมื่อ 20 มี.ค. 2565)
- [7] Components101, “VL53L0X LIDAR Distance Sensor”, 2562, [ออนไลน์].
แหล่งที่มา: <https://www.theengineeringprojects.com/2018/06/introduction-to-arduino-mega-2560.html> (สืบค้นเมื่อ 8 ก.ย. 2565)
- [8] Jeremy S Cook, “Rotary Encoders with Arduino Boards”, 2562, [ออนไลน์].
แหล่งที่มา: <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/rotary-encoders-how-to-pair-with-an-arduino-board> (สืบค้นเมื่อ 8 ส.ค. 2565)
- [9] Wasin Wongkum, “Incremental Encoder”, May 5, 2020. [Online]
แหล่งที่มา: <https://makerasia.com/3678-autosave-v1/> (สืบค้นเมื่อ 9 ก.ค. 2565)
- [10] DroneBot Workshop, “I2C Communications Arduino to Arduino”, 2019, [ออนไลน์].
แหล่งที่มา: <https://dronebotworkshop.com/i2c-arduino-arduino/> (สืบค้นเมื่อ 12 ต.ค. 2565)
- [11] Dejan, “How I2C Communication Works? Arduino and I2C Tutorial”, 2558, [ออนไลน์].
แหล่งที่มา: <https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/how-i2c->

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- communication-works-and-how-to-use-it-with-arduino/ (สืบค้นเมื่อ 12 ต.ค. 2565)
- [12] DroneBot Workshop, “Use the Flysky FS-I6X with Arduino”, 2564, [ออนไลน์].
แหล่งที่มา: <https://dronebotworkshop.com/radio-control-arduino-car/> (สืบค้นเมื่อ 17 ก.ย. 2565)
- [13] บริษัท คีย์เอ็นซ์ (ไทยแลนด์) จำกัด, “หลักการทำงานของมอเตอร์”, 2563, [ออนไลน์].
แหล่งที่มา: <https://naichangmashare.com/2021/05/28/electric-motor-ep-1/> (สืบค้นเมื่อ 23 มี.ค. 2565)
- [14] Simon Harper, “เครื่องกำเนิดไฟฟ้ามีกี่ชนิด มีอะไรบ้าง”, 2563, [ออนไลน์].
แหล่งที่มา: <https://toolmartonline.com/gardentool/> (สืบค้นเมื่อ 17 ก.ค. 2565)
- [15] UNMANNED TECH, “Flysky I6 Manual”, 2560, [ออนไลน์].
แหล่งที่มา: <https://www.unmannedtech.co.uk/manuals/flysky-i6-manual> (สืบค้นเมื่อ 25 ก.ค. 2565)
- [16] ADMIN, “ROLLER CHAIN & SPROCKET”, 2565 [ออนไลน์].
แหล่งที่มา: <https://euromachthailand.com/> (สืบค้นเมื่อ 2 ก.ค. 2565)
- [20] บุลวัชร เจริญนิพนาน, “รีเลย์ คืออะไร มีหลักการทำงานอย่างไรบ้าง”, 2064, [ออนไลน์].
แหล่งที่มา: <https://misumitechnical.com/technical/electrical/relay-working-principles/> (สืบค้นเมื่อ 13 ก.ค. 2565)



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

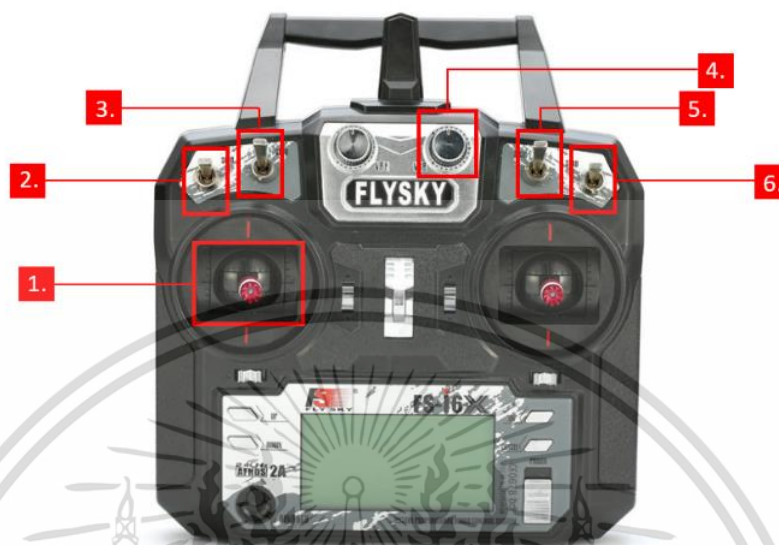


ภาคผนวก ก.
คู่มือการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คู่มือการใช้งาน

ก. 1 รายละเอียดปุ่มควบคุม



Number	Function
1	เดินหน้า ถอยหลัง เลี้ยวซ้าย เลี้ยวขวา
2	ควบคุมการปรับเพิ่มความสูงใบตัด
3	ควบคุมการสตาร์ทเครื่องตัดหญ้า
4	ควบคุมความเร็วของเครื่องตัดหญ้า
5	รีเซ็ตการทำงานเมื่อตรวจพบสิ่งกีดขวาง
6	ควบคุมการปรับลดความสูงใบตัด

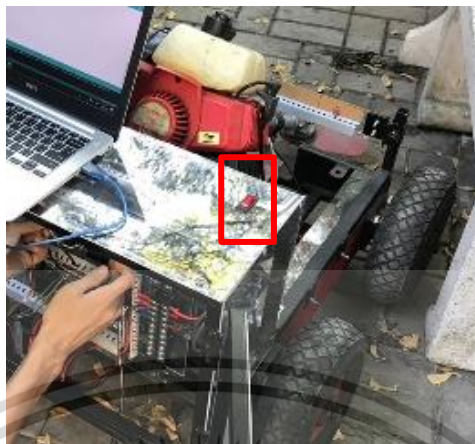
ก. 2 วิธีการใช้งานรถตัดหญ้า

1. เปิดรีโมทคอนโทรล และเลื่อนจอยหมายเลข 1 ไปที่ตำแหน่งกึ่งกลาง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเท่านั้น กรุณาอย่าเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เปิดสวิทช์ไฟที่ตัวรถ



3. โยกคันโยกหมายเลข 3 ลง เพื่อสตาร์ทเครื่องยนต์ สตาร์ทติดแล้วจึงโยกคันโยกกลับตำแหน่งเดิม



4. โยกคันโยกหมายเลข 2 ลง เพื่อยกระดับใบตัดขึ้น และโยกคันโยกหมายเลข 6 ลง เพื่อลดระดับใบตัดลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในเชิงการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. หมุนปุ่มหมายเลข 4 ตามเข็มนาฬิกา เพื่อเพิ่มความเร็วของเครื่องตัดหญ้า



6. บังคับเดินหน้า – ถอยหลัง และเลี้ยวซ้าย - เลี้ยวขวา ด้วยจอยหมายเลข 1



7. หากเซนเซอร์ตรวจจับสิ่งกีดขวางได้จะทำให้หยุดการเคลื่อนที่ และจะต้องมาทำการรีเซ็ตด้วยการโยกคันโยกหมายเลข 5 ลง และโยกขึ้นเพื่อที่จะสั่งให้เคลื่อนที่ใหม่อีกครั้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข. โปรแกรมควบคุม

```
double ch1=22;
```

```
int a=4; int b=3;
```

```
int m1=2;
```

```
double ch2=24;
```

```
int c=6; int d=7;
```

```
int m2=5;
```

```
int encoder0PinA = 9;
```

```
int encoder0PinB = 10;
```

```
int Zsignal = 8;
```

```
int encoder0Pos = 0;
```

```
int encoder0PinALast = LOW;
```

```
int n = LOW;
```

```
int time_H;
```

```
int time_L;
```

```
float t_period;
```

```
float Frequency;
```

```
float f1;
```

```
float f2;
```

```
int encoder0PinA2 = 12;
```

```
int encoder0PinB2 = 13;
```

```
int Zsignal2 = 11;
```

```
int encoder0Pos2 = 0;
```

```
int encoder0PinALast2 = LOW;
```

```
int n2 = LOW;
```

```
int time_H2;
```

```
int time_L2;
```

```
float t_period2;
```

```
float Frequency2;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

int buttonPin = 50;
int buttonState = 0;
int stopp = 0;
double ch8=48;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(22,INPUT);pinMode(24,INPUT);//RC
  pinMode(2,OUTPUT); pinMode(3,OUTPUT);pinMode(4,OUTPUT);//motor
  pinMode(5,OUTPUT); pinMode(6,OUTPUT);pinMode(7,OUTPUT);//motor2

  pinMode (encoder0PinA,INPUT_PULLUP);
  pinMode (encoder0PinB,INPUT_PULLUP);
  pinMode (Zsignal,INPUT_PULLUP);

  pinMode (encoder0PinA2,INPUT_PULLUP);
  pinMode (encoder0PinB2,INPUT_PULLUP);
  pinMode (Zsignal2,INPUT_PULLUP);

  pinMode(buttonPin, INPUT);
  pinMode(48, INPUT);
}

void loop() {
  ch1 = pulseIn(22,HIGH);
  ch2 = pulseIn(24,HIGH);
  ch8 = pulseIn(48,HIGH);
  Serial.println(buttonState);
  buttonState = digitalRead(buttonPin);

  Serial.print(" F1 = ");
  Serial.print(Frequency);//แสดงค่าความถี่ motor 1
  Serial.println(" Hz ")

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Serial.print(" F2 = ");
Serial.print(Frequency2);//แสดงค่าความถี่ motor 2
Serial.println(" Hz ");

if (buttonState == 1) {
  stopp = 1;
}
if (stopp == 1){
  Serial.println("STOP");
  analogWrite (m1, 0);
  analogWrite (m2, 0);
  if (ch8>1430){
    stopp = 0;
  }
}
else {
  int M1 = map(ch1, 1530, 1960, 22, 52);
  int M11 = map(ch1, 1530, 1960, 17, 47);
  M1 = constrain(M1, 22, 52);
  M11 = constrain(M11, 15, 47);

  int M2 = map(ch1, 1430, 985, 42, 72);
  int M22 = map(ch1, 1430, 985, 22, 52);
  M2 = constrain(M2, 42, 72);
  M22 = constrain(M22, 22, 52);

  int M3= map(ch2, 1460, 980, 0, 100);
  M3 = constrain(M3, 0, 255);
  int M4 = map(ch2, 1500, 1970, 0, 100);
  M4 = constrain(M4, 0, 255);

```

```

if((ch1>1430)&&(ch1<1520))

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
    digitalWrite(a,LOW); digitalWrite(b,LOW);
    digitalWrite(c,LOW);digitalWrite(d,LOW);
    analogWrite(m1, 0);
    analogWrite(m2, 0);
}
else if((ch1>1530)&&(ch2>1530)&&(ch8<1200)) //เดินหน้า
{
    digitalWrite(a,HIGH); digitalWrite(b,LOW);
    digitalWrite(c,HIGH);digitalWrite(d,LOW);
    analogWrite(m1,M1);
    analogWrite(m2,M1);
}
else if((ch1<1430)&&(ch2<1430)&&(ch8<1200)) //ถอยหลัง
{
    digitalWrite(a,LOW); digitalWrite(b,HIGH);
    digitalWrite(c,LOW);digitalWrite(d,HIGH);
    analogWrite(m1, M2);
    analogWrite(m2, M2);
}
else if((ch1>1530)&&(ch2<1430)&&(ch8<1200)) //เลี้ยวซ้าย
{
    digitalWrite(a,HIGH); digitalWrite(b,LOW);
    digitalWrite(c,LOW);digitalWrite(d,HIGH);
    analogWrite(m1, 255);
    analogWrite(m2, 255);
}
else if((ch2>1530)&&(ch1<1430)&&(ch8<1200)) //เลี้ยวขวา
{
    digitalWrite(a,LOW); digitalWrite(b,HIGH);
    digitalWrite(c,HIGH);digitalWrite(d,LOW);
    analogWrite(m1, 255);
    analogWrite(m2, 255);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    }
else
{
    digitalWrite(a,LOW); digitalWrite(b,LOW);
    digitalWrite(c,LOW);digitalWrite(d,LOW);
    analogWrite(m1, 0);
    analogWrite(m2, 0);
}
}
frequency1();
}

void frequency1()
{
    n = digitalRead(encoder0PinA);
    if ((encoder0PinALast == LOW) && (n == HIGH)) { // Signal A and B Direction
    if (digitalRead(encoder0PinB) == LOW) {
        encoder0Pos--;
        // Serial.print (" CW, "); // Direction CW
    } else {
        encoder0Pos++;
        // Serial.print (" CCW, "); // Direction CCW
    }
}

//----- Frequency Monitor 1 -----

time_H = pulseIn(encoder0PinA,HIGH);
time_L = pulseIn(encoder0PinA,LOW);
t_period = time_H+time_L;
t_period = t_period/1000;
Frequency = 1000/t_period;
delay(5);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}
encoder0PinALast = n;
frequency2();
}

void frequency2()
{
  n2 = digitalRead(encoder0PinA2);
  if ((encoder0PinALast2 == LOW) && (n2 == HIGH)) { // Signal A and B Direction
    if (digitalRead(encoder0PinB2) == LOW) {
      encoder0Pos2--;
      //Serial.print (" CW2, "); // Direction CW
    } else {
      encoder0Pos2++;
      //Serial.print (" CCW2, "); // Direction CCW
    }
  }
  //----- Frequency Monitor 2 -----
  time_H2 = pulseIn(encoder0PinA2,HIGH);
  time_L2 = pulseIn(encoder0PinA2,LOW);
  t_period2 = time_H2+time_L2;
  t_period2 = t_period2/1000;
  Frequency2 = 1000/t_period2;
  delay(5);

}
encoder0PinALast2 = n2;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้