

รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติสำหรับอุตสาหกรรม  
AUTOMATED GUIDED VEHICLE FOR INDUSTRY

โดย

นายกฤษ	ดวงพรหม
นายจักรินทร์	พรหมจันทร์
นายชนาริพ	อัคคะอัคร
นายชนานันท์	ทริสมบัติ

ปฏิญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

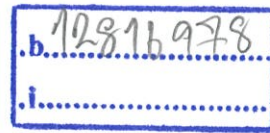
รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติสำหรับอุตสาหกรรม  
AUTOMATED GUIDED VEHICLE FOR INDUSTRY



โดย

นายเกษ	ดวงพร
นายจักรินทร์	พรจันทร์
นายชนาธิป	อัคคะอัคร
นายชนานันท์	หริสมบัติ

สาขา.....  
เลขทะเบียน 144428  
วันเดือนปี 24 พ.ย. 2559



ปฏิญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

# AUTOMATED GUIDED VEHICLE FOR INDUSTRY

KRIT	DUANGPROM
JAKKARIN	PROMJAN
CHANATHIP	AKKAAKARA
CHANANAN	HARISOMBAT

THIS PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT  
FOR THE BACHELOR DEGREE IN ELECTRICAL ENGINEERING  
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2015

ปีการศึกษา 2558

รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติสำหรับอุตสาหกรรม  
AUTOMATED GUIDED VEHICLE FOR INDUSTRY

โดย

นายกฤษ	ดวงพรหม
นายจักรินทร์	พรหมจันทร์
นายชนาธิป	อัคคะอัคร
นายชนานันท์	หริสมบัติ

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน

ปริญญาโทปีการศึกษา 2558

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติสำหรับอุตสาหกรรม

ผู้จัดทำ

- |                  |           |
|------------------|-----------|
| 1. นาย กฤษ       | ดวงพร     |
| 2. นาย จักรินทร์ | พรมจันทร์ |
| 3. นาย ชนาธิป    | อัคคะอัคร |
| 4. นาย ชนานันท์  | หริสมบัติ |

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ์ ชื่นเงิน)

## รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติสำหรับอุตสาหกรรม

### Automated Guided Vehicle for Industry

นาย กฤษ ดวงพรหม  
นาย จักรินทร์ พรหมจันทร์  
นาย ชนาธิป อัคระอัคร  
นาย ชนานันท์ หริสมบัติ  
รศ.ร.อ.ดร. วีระเชษฐ์ ชื่นเงินอาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2558

#### บทคัดย่อ

ปริญญาานิพนธ์นี้จัดทำขึ้นเพื่อสร้างต้นแบบของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยสามารถรับส่งสิ่งของตามเส้นทางที่สร้างไว้จากแถบโลหะบนพื้นโรงงานอุตสาหกรรม โดยมีระบบตรวจจับเส้นทางโดยใช้ Inductive proximity sensor ที่ทำงานโดยการตรวจจับโลหะ โดยรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติสามารถขนส่งสิ่งของที่มีน้ำหนักได้ถึง 80 กิโลกรัม และกำหนดความเร็วสูงสุดไม่เกิน 3 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เพื่อป้องกันการเกิดอุบัติเหตุตามมาตรฐานการใช้งานระบบอัตโนมัติในโรงงาน ส่วนระบบขับเคลื่อนรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัตินี้จะใช้มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน พิกัด 750 วัตต์ 700 รอบต่อนาที 36 โวลต์ 50 ชั่วโมง จำนวน 2 ตัว โดยที่รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัตินี้จะถูกควบคุมโดย ATmega2560, Nano328, ATTiny85 และ dSPIC30F2010 และ AGV ยังมีระบบป้องกันจาก UltrasonicSensor ตรวจจับสิ่งกีดขวางโดยรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัตินี้จะใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟตในการขับเคลื่อนทำงานได้ต่อเนื่อง 8 ชั่วโมง ซึ่งแบตเตอรี่นี้มีสมรรถนะสูง และมีน้ำหนักเบา

คำสำคัญ : Automated guided vehicles, Brushless direct current motor (BLDC motor), Inductive proximity sensor, Guided tape, Battery monitoring

## AUTOMATED GUIDED VEHICLE FOR INDUSTRY

Mr.Krit Duangprom  
Mr.Jakkarin Promjan  
Mr.Chanathip Akkaakara  
Mr.Chananan Harisombat  
Assoc.Prof.Dr.Werachet Khan-ngern, advisor  
Year 2015

### Abstract

The project presents a new concept to propose a prototype of automated guided vehicle (AGV) for industry. This automated guided vehicle delivers items by moves along aluminum guide tape on the floor of manufactory. Using inductive proximity sensor that can detect metal from the aluminum guide line. The vehicle payload can be used up to 80 kg. The speed is limited at 5 km/h to comply with safety requirement of safety standard in the industry. This AGV can be driven by two brushless direct current motors (BLDC) 750 W, 700 rpm, 36 V<sub>dc</sub> and 50 poles. ATmega2560, nano328,ATTiny85 and dSPIC30F2010 are control devices for this vehicle. Protection of AGV is an ultrasonic sensor that detects obstacles. 36 V 10 Ah lithium Iron phosphate battery is the energy source for this vehicle can drive up to 8 hours, as it has light weight and high efficiency.

Keyword: Automated guided vehicle, Brushless direct current motor (BLDC motor), Inductive proximity sensor, Guided tape, Battery monitoring

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับการอนุเคราะห์จากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ์ ชนเงิน อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำแนะนำเสมอมา

ขอขอบคุณ พี่กฤตพัฒน์ อนันต์ลักษณะการ พี่ชัช ลายเงิน และพี่คณศ หมันเขตรกรณ์ที่ได้ให้คำแนะนำในการทำโครงการนี้ตลอดมา ขอขอบคุณเจ้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและขอขอบคุณเพื่อนทุกคนที่ได้ช่วยกันแก้ไขปัญหาและอุปสรรคให้ผ่านไปได้อย่างดีมาตลอด

และสุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัว ของทางคณะผู้จัดทำที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เลี้ยงดูให้ได้รับความรู้ความสามารถ ได้ให้คำปรึกษาในการดำเนินชีวิต และได้สมทบทุนในการดำเนินโครงการนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณทุกท่านไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	1
1.4 วิธีการใช้ในโครงการ	2
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	2
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ทฤษฎี AGV	3
2.1.1 ชนิดของเอจีวี	3
2.1.2 ระบบเอจีวี	4
2.1.3 เทคโนโลยีในการนำร่องของเอจีวี	5
2.2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของมอเตอร์แบบฮับ	6
2.2.1 ชนิดของมอเตอร์แบบฮับ	6
2.2.2 โครงสร้างของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน	7
2.2.3 ลักษณะแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์BLDC	7
2.2.4 หลักการทำงานของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน	8
2.2.5 ข้อดีและข้อเสียของมอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน	9
2.2.6 ข้อจำกัดของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน	9
2.3 อินเวอร์เตอร์	9
2.3.1 แนวคิดพื้นฐานของสวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์	10
2.3.2 การสวิตช์ซิงแบบPulse Width Modulate	11
2.3.3 การสวิตช์ซิงแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์	11
2.3.4 อินเวอร์เตอร์สามเฟสเมื่อทำงานในย่านรูปคลื่นสี่เหลี่ยม	13
2.3.5 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบขั้นบันได	14
2.3.6 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์	17
2.4 วงจรขับ	18
2.4.1 การออกแบบวงจรขับเกตสำหรับมอสเฟตกำลัง	19
2.5 Microcontroller	22
2.5.1 ATmega2560	22

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.2 ATmega 328 nano	23
2.5.3 ATTiny 85	24
2.6 Sensor	25
2.6.1 QTR	25
2.6.2 Inductive Proximity Sensor	26
2.6.3 Voltage sensor	27
2.6.4 Current Sensor	28
2.6.5 Ultrasonic	28
2.6.6 Joystick	30
<b>บทที่ 3 การออกแบบและสร้างระบบการทำงานของรถส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ</b>	<b>36</b>
3.1 ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้การตรวจจับแบบแถบสี	36
3.1.1 อายุการใช้งานและการบำรุงรักษาแถบนำร่อง	36
3.1.2 การใช้งานในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน	36
3.2 การแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้การตรวจจับแบบแถบสี	37
3.2.1 การแก้ไขปัญหาที่เกิดจากแสงของพื้นที่ใช้งาน	37
3.2.2 การเปลี่ยนชนิดของเซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจจับ และแถบนำร่อง	37
3.3 คุณลักษณะเฉพาะของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ	38
3.4 Block Diagram of AGV System	39
3.4.1 Input Devices	40
3.4.2 Process Devices	42
3.4.3 Output Devices	45
3.5 ชุดวงจรของระบบของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ	46
3.5.1 Power Supply	46
3.5.2 CPU of AGV system	47
3.5.3 BLDC Motor Drive	48
3.6 Algorithm ของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ	49
3.6.1 Algorithm การ Setup AGV	49
3.6.2 Algorithm Automatic Mode	52
3.6.3 Algorithm Manual Mode	60
3.6.4 Algorithm Motion Control	62
3.6.5 Algorithm Duty Cycle Control	66
3.6.6 Algorithm Distance Measure	67

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง	68
4.1 ผลการทดลองการวัดค่าความเร็วรอบมอเตอร์	68
4.2 ผลการวัด energy consumption ของ sensor	69
4.3 ผลการทดลองหาค่าพลังงานที่ใช้ของรถ และ ความเที่ยงตรง ในการอ่านค่าของ sensor	70
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	79
เอกสารอ้างอิง	81
ภาคผนวก	82
ภาคผนวก ก. คู่มือใช้งานรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติสำหรับอุตสาหกรรม	83
ภาคผนวก ข. บทความทางวิชาการ	86
ประวัติผู้เขียน	91

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน	7
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็ว	7
2.3 สวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว	11
2.4 การสวิตซ์ซึ่งแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์	13
2.5 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ต่อโหลดแบบสตาร์	14
2.6 สัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบนำกระแส 120 องศา	15
2.7 สัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบนำกระแส 180 องศา	16
2.8 แรงดันเฟสของอินเวอร์เตอร์แบบนำกระแส 180 องศา	16
2.9 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส	17
2.10 การทำงานของมอเตอร์ใน 1 cycle	18
2.11 วงจรขับเคลื่อน	20
2.12 วงจรบูสเตรป	20
2.13 การแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างวงจรควบคุม	21
2.14 บอร์ด ArduinoMega2560	22
2.15 ATmega 328 nano Board	23
2.16 ATTiny 85	24
2.17 QTR-8RC sensor array	25
2.18 8mm Sensor Inductive Proximity	26
2.19 หลักการทำงาน Inductive Proximity Sensor	27
2.20 Arduino Standard Voltage Sensor Module	28
2.21 Arduino Standard Current Sensor Module	28
2.22 Ultrasonic Ranging Module HC-SR04	29
2.23 Timing Diagram ของ Ultrasonic Module HC-SR04	29
2.24 XY Joystick Module	30
2.25 แบบจำลองการทำงานXY Joystick Module	31
2.26 การบังคับทิศทางไปยัง ทิศตะวันออก	31
2.27 การบังคับทิศทางไปยัง ทิศตะวันออกเฉียงใต้	32
2.28 การบังคับทิศทางไปยัง ทิศใต้	32
2.29 การบังคับทิศทางไปยัง ทิศตะวันตกเฉียงใต้	33
2.30 การบังคับทิศทางไปยัง ทิศตะวันตก	33
2.31 การบังคับทิศทางไปยัง ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ	34
2.32 การบังคับทิศทางไปยัง ทิศเหนือ	34
2.33 การบังคับทิศทางไปยัง ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ	35
3.1 แลบนำร่องที่ผ่านการใช้งาน	36
3.2 การทดสอบผลกระทบจากแสงภายนอก	36
3.3 ผลทดสอบผลกระทบจากแสงภายนอก	37

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 การต่อเติมส่วนกำลังแสง	37
3.5 เทปอะลูมิเนียม	37
3.6 Block Diagram of AGV System	39
3.7 Inductive Proximity Sensors	40
3.8 Joy Stick module & Ultrasonic module HC-SR04	40
3.9 Push button (-),(+) และ enter	40
3.10 ตัวอย่าง Cursor ด้านซ้ายเพื่อเลือกโหมดบังคับตัวเอง	41
3.11 Current Sensor Module	41
3.12 Voltage Sensor Module	41
3.13 Block diagram ของการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	45
3.14 Schematic ของวงจร Power supply	46
3.15 Schematic ของวงจรตัวประมวลผลกลางของ AGV	47
3.16 Schematic ของวงจรชุดขับเคลื่อนมอเตอร์	48
4.1 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการอ่านค่ากระแสในสภาวะ no-load	71
4.2 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการอ่านค่ากำลังไฟฟ้าในสภาวะ no-load	71
4.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการอ่านค่ากระแสเมื่อใส่โหลด 20 kg	72
4.4 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการอ่านค่ากำลังไฟฟ้าเมื่อใส่โหลด 20 kg	73
4.5 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการอ่านค่ากระแสเมื่อใส่โหลด 40 kg	74
4.6 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการอ่านค่ากำลังไฟฟ้าเมื่อใส่โหลด 40 kg	74
4.7 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการอ่านค่ากระแสเมื่อใส่โหลด 60 kg	75
4.8 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการอ่านค่ากำลังไฟฟ้าเมื่อใส่โหลด 60 kg	76
4.9 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการอ่านค่ากระแสเมื่อใส่โหลด 80 kg	77
4.10 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการอ่านค่ากำลังไฟฟ้าเมื่อใส่โหลด 80 kg	77
4.11 แสดงการเปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ระหว่าง load แต่ละระดับ	78
4.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยพลังงานระหว่างมิเตอร์และ sensor	78

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินโครงการ	2
2.1 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่าง Brush กับ Brushless Hub Motor	7
2.2 ลำดับการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน	8
2.3 เงื่อนไขการสวิตซ์แรงดันเฟสและแรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์	12
2.4 ลำดับสำหรับหมุนมอเตอร์ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา	17
2.5 ลำดับสำหรับหมุนมอเตอร์ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา	17
2.6 ArduinoMega2560 Specification	22
2.7 Specification of ATmega 328 nano	24
2.8 Specification of ATTiny85	25
2.9 Specification ของ QTR – 8RCsensor array	25
2.10 Specification ของ Inductive Proximity model LJ18A3-8-Z/BX 8mm	26
2.11 Specification ของ Arduino Standard Voltage Sensor Module	27
2.12 Specification ของ Arduino Standard Current Sensor Module	28
2.13 Specification ของ Ultrasonic Ranging Module HC-SR04	29
3.1 คุณสมบัติเฉพาะของรถ AGV for Industry	38
4.1 ผลการจับความเร็ว BLDC ซ้ายและขวาที่ค่า base speed ต่างๆ	68
4.2 การจับคู่ base speed สำหรับโพลระดับต่างๆของมอเตอร์ทั้งสองตัว	69
4.3 energy consumption ของเซนเซอร์แต่ละตัวที่แรงดัน 15V	69
4.4 เปรียบเทียบการอ่านค่าสำหรับ no-load	70
4.5 เปรียบเทียบการอ่านค่าสำหรับ load 20 kg	72
4.6 เปรียบเทียบการอ่านค่าสำหรับ load 40 kg	73
4.7 เปรียบเทียบการอ่านค่าสำหรับ load 60 kg	75
4.8 เปรียบเทียบการอ่านค่าสำหรับ load 80 kg	76
4.9 ค่าเฉลี่ยที่โพลระดับต่างๆเปรียบเทียบระหว่างมัลติมิเตอร์และ sensor	78

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันระบบอัตโนมัติมีความสำคัญต่อโรงงานอุตสาหกรรมอย่างมากสาเหตุเนื่องจากผลของการแข่งขันกันด้านการตลาดอย่างจริงจังและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆซึ่งปัจจัยในด้านการตลาดที่ขาดไม่ได้นั่นคือการกำหนดเวลาส่งมอบผลิตภัณฑ์และปริมาณที่ต้องการซึ่งจะต้องผลิตแข่งกับเวลาดังนั้นประโยชน์ของระบบอัตโนมัติจึงช่วยให้ลดระยะเวลาในการทำงานจากปกติ ทั้งในรูปแบบการเปลี่ยนเครื่องมือการขนย้ายผลิตภัณฑ์รวมถึงกระบวนการต่างๆที่มนุษย์ไม่สามารถเข้าไปปฏิบัติงานได้ซึ่งหากพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผลิตทั้งหมด ประมาณ 2 ใน 3 ของค่าใช้จ่ายในการผลิตทั้งหมด จะเห็นว่าการขนถ่ายวัสดุเป็นกิจกรรมที่มีความสำคัญมากต่อกระบวนการผลิตดังนั้นหากสามารถนำรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ(Automatic Guided Vehicle : AGV) มาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมจะช่วยให้ขนถ่ายวัสดุอุปกรณ์ได้รวดเร็วมากยิ่งขึ้นมีความคล่องตัวสามารถลดต้นทุนจากการจ้างแรงงานมีความถูกต้องในการส่งวัสดุอุปกรณ์และไม่ทำให้วัสดุเกิดความเสียหายและที่สำคัญต้องมีความปลอดภัยจากการใช้ระบบอัตโนมัติและหากพิจารณาถึงต้นกำลังของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติซึ่งใช้เป็นมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor : BLDC Motor) ซึ่งเป็นมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงจะมีอายุการใช้งานนานกว่า Brush DC Motor อีกทั้งยังมีขนาดเล็กและมีน้ำหนักเบากว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor) ดังนั้นจึงสามารถนำมาติดตั้งและใช้เป็นต้นกำลังของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติได้ดีกว่า การใช้ระบบนำร่องด้วยแถบสีและ Reflectance sensor ต้องการความสะอาดสูงมีข้อจำกัดในการใช้งานกับอุตสาหกรรมบางประเภท

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อเพิ่มความแม่นยำการตรวจจับของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ
2. เพื่อพัฒนาระบบควบคุมการทำงานและการแสดงผลของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ
3. เพื่อพัฒนาระบบของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติให้มีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น

### 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1. ใช้มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านชนิด Gear Wheel Hub Motor ขนาด 750 W, 100-700 rpm, 24-36 V<sub>dc</sub>
2. ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ได้แก่ ATmega2560, Nano328, ATTiny85 และ dsPIC30F2010 ทำงานร่วมกันเพื่อควบคุมการทำงานของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ
3. สร้างรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติสามารถบรรทุกของได้ไม่เกิน 80 kg
4. ใช้ Inductive Proximity Sensor ในการตรวจจับแถบอะลูมิเนียมเป็นระบบนำร่อง
5. การวัดพลังงานและแสดงปริมาณแบตเตอรี่
6. ใช้ความเร็วไม่เกิน 3 km/hr

#### 1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

1. ศึกษาเกี่ยวกับข้อมูลของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ
2. ศึกษาทฤษฎีการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
3. ศึกษาและพัฒนากการเขียนโปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ได้แก่ ATmega2560, Nano328, ATTiny85 และ dsPIC30F2010
4. ศึกษาและทดลองการควบคุมการทำงานของ BLDC Motor ด้วย Microcontroller
5. ทดลองและศึกษาถึงข้อบกพร่องของต้นแบบรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ
6. พัฒนาระบบ โครงสร้าง การทำงาน ตลอดจนการแสดงผลต่างๆของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ
7. ทดสอบและแก้ไขปรับปรุงเพื่อเพิ่มเสถียรภาพของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ
8. สรุปผลจากการวิจัย ข้อเสนอแนะ และจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์

#### 1.5 แผนการดำเนินโครงการ

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินโครงการ

ลำดับ	ขั้นตอนการดำเนินการ	พ.ศ.2558					พ.ศ.2559			
		ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1	สืบค้นและศึกษา ข้อมูลที่เกี่ยวข้อง	←→								
2	ทดสอบการทำงานและศึกษาข้อบกพร่องของรถต้นแบบ		←→							
3	วิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นและวิธีการแก้ไข			←→						
4	เลือกชนิดของระบบนำร่องชนิดใหม่				←→					
5	เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงาน					←→				
6	พัฒนาการแสดงผลต่างๆ						←→			
7	ทดสอบการทำงานและปรับปรุงแก้ไข							←→		

#### 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. สามารถสร้างรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติที่สามารถนำไปประยุกต์ให้สามารถใช้งานกับโรงงานอุตสาหกรรมที่หลากหลายได้
2. สามารถประยุกต์ใช้ระบบควบคุมกับระบบอัตโนมัติอื่นๆได้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎีAGV

เอจิวี (Automated Guide Vehicle : AGV) เป็นรถขนาดเล็กที่เคลื่อนที่ได้เอง เอจิวีถูกนำมาใช้งานจริงในปี ค.ศ.1953 ที่ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยตอนนั้นถูกนำมาใช้ขนถ่ายสินค้าในโกดังเก็บสินค้าทำให้สามารถประหยัดในเรื่องของแรงงานคนและเวลา

ระบบเอจิวีเป็นระบบขนถ่ายวัสดุที่ใช้รถทำงานได้โดยอิสระต่อกัน ขับเคลื่อนด้วยตัวเองระบบเอจิวีนี้ จะประกอบด้วยตัวรถกลไก, ระบบขับเคลื่อน, มอเตอร์และแบตเตอรี่, ชุดควบคุมการทำงานของรถ, ระบบนำร่องทางเดินรถ

โดยทั่วไปส่วนของตัวรถและกลไกของรถนั้นก็ถูกออกแบบมาให้เหมาะกับการประยุกต์ในการใช้งานในอุตสาหกรรมแต่ละประเภท แล้วตัวขับเคลื่อนให้รถเคลื่อนที่นั้นก็จะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่ถูกควบคุมด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งพลังงานในการหมุนมอเตอร์ จะได้จากแบตเตอรี่ซึ่งจะมีแรงดันอยู่ระหว่าง 12 ถึง 48 โวลต์ ส่วนชุดควบคุมการทำงานของรถจะมีอยู่ด้วยกันหลายลักษณะเช่น พีแอลซี (Programmable Logic Control : PLC) ไมโครโปรเซสเซอร์บอร์ด ซิงเกิลบอร์ดคอมพิวเตอร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าผู้ผลิตรายใดจะออกแบบระบบไว้อย่างไร

ระบบนำร่องทางเดินของเอจิวีจะแบ่งออกเป็นสองแบบ คือ

1. แบบกำหนดเส้นทางเดินแน่นอน เช่น แบบใช้สายแบบใช้แถบสี แถบแม่เหล็ก แถบโลหะ บนพื้นกำหนดทางเดิน
2. แบบเส้นทางเดินอิสระซึ่งจะมีการใช้เซนเซอร์หลายชนิดหลายแบบมารวมกัน เช่น ระบบจีพีเอส(Global Positioning System : GPS) สัญญาณวิทยุและเลเซอร์

#### 2.1.1 ชนิดของเอจิวี

##### 2.1.1.1 เอจิวีแบบลากจูง (AGV Towing Vehicle)

เป็นเอจิวีที่นิยมใช้กันมาก เป็นเอจิวีแบบลากจูง มีความกว้างให้เลือกหลายชนิด ชนิดของอุปกรณ์บรรทุกถูกใช้สำหรับบรรทุกและปลดลงของสัมภาระ รถพ่วง (Trailer) ยังรวมถึงเอจิวีที่ใช้จูงรถไฟ เคน อุปกรณ์ขนส่งอัตโนมัติ คนทำงานกันเอง การส่งผ่านโดยรถไฟและอุปกรณ์ที่โปรแกรมการบรรทุกและปลดแบบอัตโนมัติโดยมากประยุกต์การลากจูง จะเป็นในลักษณะของการเคลื่อนที่ของหีบผลิตภัณฑ์ให้ไปภายนอกโกดัง ซึ่งการลากจูงจะใช้กับการขน ซึ่งการลากจูงจะใช้กับการขนส่งที่ปริมาณมากๆ โดยมีระยะทางขนส่งที่ไกลมากกว่า 1000 เมตร

##### 2.1.1.2 เอจิวีแบบมีลูกกลิ้งลำเลียง (AGV Unit Load Transports)

เอจิวีถูกใช้งานร่วมกับร่องที่ใช้ในการโหลดชิ้นงาน โดยเอจิวีเดินทางมายังแท่นได้ที่ช่องดังกล่าว และสามารถเชื่อมต่อกับสายพานลำเลียงปรกติจะถูกใช้อยู่ในคลังและระบบการกระจายในพื้นที่ที่มีการใช้งานที่ไม่กว้างนัก

##### 2.1.1.3 เอจิวีแบบบรรทุกพาเลท (AGV Pallet Truck)

เอจิวีแบบบรรทุกพาเลทถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในหลายหน้าที่ เช่น หลบหลีกวัสดุที่อยู่บนแท่น ถูกนำไปใช้ในการขนของขึ้นและลงในระดับชั้นต่างๆ โดย เอจิวีแบบบรรทุกพาเลทมีความสามารถในการบรรทุกได้ 1,000 – 2,000 ปอนด์ มีความเร็ว 264 ฟุต/นาที โดยเฉลี่ย

#### 2.1.1.4 เอจีวีแบบโฟล์คลิฟท์ (AGV Forklift Trucks)

เอจีวีแบบโฟล์คลิฟท์มีความสามารถในการยกแทนสัมภาระขึ้นและลงได้ทั้งที่เป็นบนพื้นที่ต่างระดับความสูงกัน ตัวนำทางของรถยกมีความสามารถที่จะระบุตำแหน่งความสูงของงานได้,เอจีวีแบบโฟล์คลิฟท์เป็นเอจีวีที่มีราคาแพงมาก ดังนั้นมันจึงถูกนำมาใช้งานร่วมกับระบบการผลิตที่เป็นแบบอัตโนมัติเต็มระบบ และสามารถทำงานได้ โดยการติดอุปกรณ์ตรวจจับไว้ที่ส่วนปลายของงาน ดังนั้นมันจึงสามารถที่จะยกสิ่งของได้สูงและวางซ้อนกันได้, เอจีวีแบบโฟล์คลิฟท์ที่มีความสามารถในการทำงานได้ถึงความสูงหลายระดับ และมีความสามารถในการบรรทุกได้ 1,000-2,000 ปอนด์ ความเร็ว 264 ฟุต/นาที่ รัศมีการเลี้ยวที่น้อยที่สุด 7 ฟุต

#### 2.1.1.5 เอจีวีแบบบรรทุกขนาดเล็กเบา (AGV Light Load Transporter)

เป็นเอจีวีที่มีความสามารถในการบรรทุกได้น้อยกว่า 500 ปอนด์ ใช้ในการขนส่งที่มีขนาดเล็กและเบา มีความยาวพอประมาณใช้ในการขนถ่ายระหว่างที่จัดเก็บโดยมีความเร็วปรกติอยู่ที่ 100 ฟุต/นาที่ รัศมีการเลี้ยว 2 ฟุต มักถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการทำงานในพื้นที่จำกัดเช่นสายการประกอบ การใช้ส่วนของไปรษณีย์

#### 2.1.2 ระบบเอจีวี (Automated Guided Vehicle System)

ระบบเอจีวีที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมแบบอัตโนมัติในปัจจุบันส่วนใหญ่จะเป็นแบบระบบที่ใช้ทางเดินนำร่องได้แก่แถบโลหะ หรือแถบแม่เหล็กติดตามตามพื้น ซึ่งทางเดินนำร่องแบบแถบโลหะหรือแถบแม่เหล็กจะมีข้อดี คือ สามารถตรวจจับได้ง่าย โดยหากแถบโลหะมีฝุ่นหรือสิ่งสกปรกติดอยู่ก็จะยังคงสามารถตรวจจับและทำงานได้ นอกจากนี้ผลของแสงสว่างหรือสีของแสงจะไม่มีผลต่อการทำงาน ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบของระบบทางเดินนำร่องแบบแถบโลหะและแถบแม่เหล็ก แต่ข้อเสียคือราคาซึ่งในท้องตลาดนั้นจะมีราคาค่อนข้างสูงกว่าแบบแถบสี และการฝังเส้นลวดหรือโลหะตัวนำได้พื้นนี้มีลักษณะของความไม่ยืดหยุ่นการแก้ไขจะต้องทำการรื้อถอนแถบโลหะตัวนำออกทั้งหมดก่อนจึงจะสามารถเปลี่ยนแปลงการทำงานใหม่ได้ทำให้เสียเวลาในการแก้ไข

เอจีวีจัดเป็นหุ่นยนต์ประเภทเคลื่อนที่ (Mobile Robot) เอจีวีมีการนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมแบบใหม่มากกว่า 30 ปี เอจีวีเป็นยานพาหนะที่ไม่ต้องใช้คนขับสามารถวิ่งไปตามเส้นทางที่กำหนดไว้ได้เองโดยอัตโนมัติ นอกจากนี้ เอจีวียังสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างอื่นได้อีก อาทิเช่น รถโฟล์คลิฟท์ (Fork-Lift) รถบรรทุก (Truck) รถแทรกเตอร์ เป็นต้น หรืออาจใช้แทนสายพานลำเลียง หน้าที่ของเอจีวีคือขนส่งวัตถุดิบ ผลิตภัณฑ์สินค้าหรือชิ้นส่วนเล็กๆน้อยๆของสายการผลิตหนึ่งไปยังอีกสายการผลิตหนึ่งเอจีวีมีใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรมแบบอัตโนมัติ และมีการขยายการทำงานในโรงงานแบบกึ่งอัตโนมัติ โดยสามารถทำงานร่วมกับคนได้แล้ว

สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมแบบกึ่งอัตโนมัติก็สามารถนำเอาเอจีวี ไปใช้งานร่วมกับมนุษย์ได้ โดยมนุษย์จะออกคำสั่งแบบโต้ตอบกับเอจีวีให้ทำงานได้ตามคำสั่งเช่นกัน

ในปัจจุบันเอจีวีส่วนใหญ่จะถูกกำหนดให้เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางเดินนำร่อง (Guide Path) ทั้งนี้เพราะจะได้ความแม่นยำดีกว่าวิธีที่ไม่ใช้ทางเดินนำร่องนั่นเองทางเดินนำร่องของเอจีวีถูกกำหนดตามความเหมาะสมของสภาวะแวดล้อมของโรงงานนั้นๆ อาทิเช่น การใช้แถบโลหะหรือแถบสีติดบนพื้น ผลพลอยได้ของเอจีวี ในระบบแถบโลหะที่ใช้จะไม่ได้รับความเสียหายจากฝุ่นละอองที่อาจจะมาเกาะติดกับแถบสีที่ใช้นำร่องเอจีวีเลย หรืออาจจะมีการฝังลวดหรือโลหะตัวนำได้พื้นเพื่อให้เอจีวี สามารถเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนดไว้ได้

ปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านเอจิวีก้าวหน้าไปมาก ได้มีการวิจัยและพัฒนาเอจิวีแบบที่สามารถเคลื่อนที่อิสระ (Free Ranging) ขึ้นมาใช้กันแล้ว เอจิวีแบบใหม่ไม่ต้องอาศัยทางเดินนำร่องอีกต่อไป แต่จะใช้ระบบนำทาง (Navigation System) ซึ่งอยู่บนตัวเอจิวีในการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่แทน เทคนิคสำหรับเอจิวี แบบเคลื่อนที่อิสระมากมาย อาทิเช่น การใช้ดาวเทียมเป็นต้น และในบางกรณีอาจมีทั้งใช้เส้นทางและไม่ใช่ เส้นทางนำร่องบนตัวเอจิวีก็ได้ ทั้งนี้แล้วแต่วัตถุประสงค์ของการใช้งานอย่างไรก็ตามในโรงงานอุตสาหกรรมแบบอัตโนมัติ ส่วนมากก็ยังคงใช้เอจิวี แบบมีทางเดินนำร่องด้วย เหตุผลของค่าใช้จ่ายที่ถูกกว่ากับงานและความแม่นยำที่ดีกว่าอีกด้วย

โครงสร้างภายนอกของเอจิวีส่วนมากจะกลายเป็นแท่นไว้วางภาชนะหรือที่ใส่วัสดุต่างๆ อาทิเช่น ถาด (Trays) ชั้นวางของ (Racks) กล่อง (Boxes) มีล้อที่ใช้ในการเคลื่อนที่มีส่วนที่สามารถติดต่อกับผู้ใช้งาน เช่น คีย์บอร์ด ไฟช่องทาง เสียงไซเรน นอกจากนี้เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับเอจิวี ดังนั้นเอจิวีบางตัวอาจติดตั้งตัวกันชน (Bumper) ทางด้านหน้าและด้านหลังของเอจิวี อีกด้วยเอจิวี ส่วนมากจะใช้ระบบขับเคลื่อนที่มีเสียงเงียบหรือไม่มีเสียงเลยจึงได้มีการนำเอามอเตอร์ไฟฟ้ามาใช้เป็นส่วนขับเคลื่อน ข้อดีคือไม่ทำให้เกิดมลภาวะแต่ข้อเสียคือสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า

ระบบเอจิวีที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมแบบอัตโนมัติในปัจจุบัน ส่วนใหญ่จะเป็นแบบระบบที่ใช้ทางเดินนำร่องได้แก่แถบโลหะติดตามพื้นการฝังเส้นลวดใต้พื้นแต่การติดตามพื้นซึ่งจะมีข้อเสียคือ ผลกระทบจากสภาพแวดล้อมภายนอก เช่น อุณหภูมิสีของแสงที่เปลี่ยนแปลงไป หรือ ฝุ่นที่มากเกาะติดบริเวณแถบสีก็จะส่งผลกระทบต่อการทำงานเช่นกัน

### 2.1.3 เทคโนโลยีในการนำร่องของเอจิวี

เทคโนโลยีในการนำร่องเอจิวีมีหลายวิธีพอสรุปได้ดังนี้

#### 2.1.3.1 การใช้แถบโลหะ (Metal Tape)

การใช้แถบโลหะดีเป็นแถบแบบเดียวกับแถบสี วิธีการนี้จะต้องเปลี่ยนตัวตรวจจับสีไปเป็นพรอกซิมีตี้ (Proximity Sensor) แทน ซึ่งพรอกซิมีตี้เซนเซอร์จะให้เอาต์พุตออกมาในกรณีที่ตรวจพบแถบโลหะเท่านั้น เอาต์พุตมีให้เลือกทั้งแบบที่เป็นอนาลอกและดิจิตอล ข้อดีของวิธีการนี้ คือความแม่นยำคงที่ แม้มีฝุ่นละอองมากเกาะติดก็ยังทำงานได้ดี

#### 2.1.3.2 การใช้แถบแม่เหล็ก (Magnetic Tape)

ฝังลงในพื้นมีลักษณะเป็นตารางต่างๆไปบนพื้นเอจิวี จะทำการตรวจจับแถบแม่เหล็กด้วยแมกเนติกเซนเซอร์ (Magnetic Sensor) โดยเอจิวีจะเคลื่อนที่ไปตามแนวของตารางจุดตัดของเส้นตารางจะเป็นตัวนับตำแหน่งในการเคลื่อนที่การทำงานของวิธีนี้ลักษณะของแมกเนติกเซนเซอร์นั้นประกอบด้วย ขดลวดกระตุ้น 1 ชุด (Exciting Coil) ชุดตรวจจับ 2 ชุด (Detecting Coil) การทำงานเริ่มจากขดลวดกระตุ้น ผลิตสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยมีชุดตรวจจับคอยตรวจจับ

#### 2.1.3.3 การใช้แถบสีหรือเทปสะท้อนแสงติดบนพื้น

วิธีการนี้จะทำได้โดยการติดแถบสีที่มีความแตกต่างกับสีของพื้น เมื่อเอจิวีตรวจพบแถบสีนั้นจะนำเอาข้อมูลที่ได้ออกไปใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ต่อไป ข้อดีของวิธีนี้คือระบบการนำร่องไม่ซับซ้อน การเปลี่ยนแปลงแก้ไขได้ง่าย การซ่อมบำรุงกระทำได้ในระยะเวลาสั้น ตลอดจนค่าใช้จ่ายในการติดตั้งถูก แต่ข้อเสียคือจะเกิดความผิดพลาดในการทำงานได้ง่ายซึ่งอาจเกิดได้จากสภาพแวดล้อมภายนอก เช่น อุณหภูมิสีของแสง ฝุ่นที่มากเกาะ หรือ ความไม่สม่ำเสมอของสีพื้นที่ใช้ งาน ก็จะส่งผลให้เซนเซอร์อ่านค่าผิดพลาดได้

#### 2.1.3.4 การนำร่องแบบไร้สาย (Wireless Guidance)

เป็นการนำร่องที่ไม่ต้องติดตั้งทางเดินนำร่องตามพื้น วิธีการนี้เอจิวี สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระและมีความยืดหยุ่นในการดำเนินการสูงมาก ในปัจจุบันมีการวิจัยและพัฒนาวิธีการนี้มาก สิ่งที่สำคัญที่สุดของการนำร่องแบบไร้สายคือ เทคนิคการนำทาง ซึ่งมีได้หลายวิธี

#### 2.1.3.5 การประมวลผลภาพ (Image Processing)

เป็นวิธีการหาตำแหน่งของเอจิวี โดยใช้กล้องติดบนเพดานหรือบริเวณมุมห้องหรือพื้นที่ปฏิบัติงาน โดยกล้องที่ใช้ปัจจุบันมีหลายแบบสามารถส่งข้อมูลทางดิจิทัลให้กับคอมพิวเตอร์นำไปประมวลผลได้ เช่น ซีซีดี เมื่อคอมพิวเตอร์รับข้อมูลจากกล้องแล้วจะเป็นผู้ออกคำสั่งให้เอจิวีทำงานได้โดยอาจจะใช้วิธีการสื่อสารผ่านคลื่นวิทยุหรืออาศัยรีโมทคอนโทรลสั่งงานได้ ความถูกต้องของวิธีนี้จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของกล้องที่ใช้ ปัจจุบันมีความละเอียดให้เลือกมากมาย ข้อเสียของวิธีการนี้คือ จะต้องใช้กล้องหลายตัวเนื่องจากกล้องแต่ละตัวจะมีพิกัดของโฟกัสและรัศมีไม่มากนัก

## 2.2 ทฤษฎีและหลักการพื้นฐานของมอเตอร์แบบฮับ

มอเตอร์แบบฮับ (Hub Motor) เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดหนึ่ง ซึ่งมีส่วนที่แตกต่างจากมอเตอร์แบบธรรมดา คือ ในส่วนของโรเตอร์ (Rotor) หรือส่วนที่ได้นั้นจะอยู่ด้านนอก (Outer Rotor) และจะมีแม่เหล็กถาวรติดอยู่ และในส่วนของสเตเตอร์ (Stator) หรือส่วนที่อยู่ภายใน จะอยู่ด้านใน โดยจะมีขดลวดอาร์มาเจอร์ยึดอยู่กับแกนของล้อ ซึ่งมอเตอร์แบบฮับส่วนมากจะถูกนำมาใช้กับยานพาหนะไฟฟ้า เช่น จักรยานไฟฟ้า เนื่องจากมีความสะดวกในการติดตั้งและมีเสถียรภาพในการทำงาน

### 2.2.1 ชนิดของมอเตอร์แบบฮับ

มอเตอร์แบบฮับสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดด้วยกัน คือ

#### 2.2.1.1 มอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่าน (Brush DC Hub Motor)

มอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่านเป็นมอเตอร์แบบฮับชนิดที่มีแปรงถ่านและซีคอมมิวเตเตอร์เหมือนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทั่วไป โดยจะมีสายไฟออกจากตัวมอเตอร์เพียงสองเส้น คือ ไฟบวกและไฟลบ ซึ่งมีความซับซ้อนในการควบคุมน้อย ราคาไม่แพง แต่จะมีการเสียดสีกันระหว่างแปรงถ่านกับซีคอมมิวเตเตอร์ ทำให้เกิดการสึกกร่อนของซีคอมมิวเตเตอร์ และเกิดความสูญเสียในรูปพลังงานความร้อน ทำให้ประสิทธิภาพลดลง

#### 2.2.1.2 มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Hub Motor)

มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน เป็นมอเตอร์แบบฮับชนิดที่ไม่มีแปรงถ่านและซีคอมมิวเตเตอร์ โดยจะมีสายไฟออกจากตัวมอเตอร์ 2 ชุดประกอบไปด้วย ชุดของขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟส และชุดของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก (Hall Effect Sensor) และเนื่องจากมอเตอร์แบบฮับชนิดนี้ไม่มีแปรงถ่านและซีคอมมิวเตเตอร์ จึงไม่มีความสูญเสียจากการเสียดสี ลดสัญญาณรบกวน EMI ลดการสิ้นเปลือง ไม่ก่อให้เกิดความร้อน มีความน่าเชื่อถือสูง มอเตอร์ชนิดนี้จึงมีประสิทธิภาพสูงกว่ามอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่าน จึงเป็นที่นิยมนำมาใช้งานมากกว่า แต่ข้อเสียของมอเตอร์ชนิดนี้คือ มีความซับซ้อนของชุดควบคุมสูง และมีราคาแพง



รูปที่ 2.1 มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Hub Motor)

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่าง Brush กับ Brushless Hub Motor

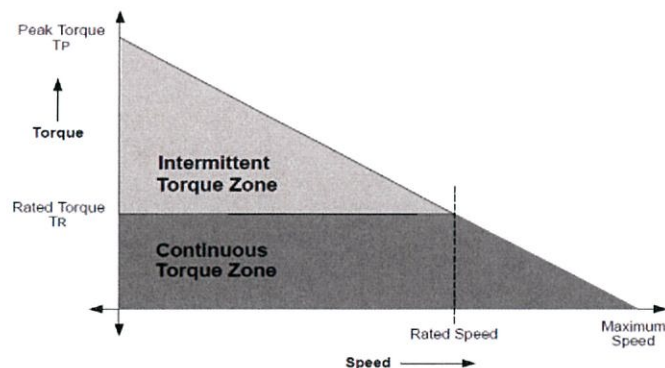
ข้อเปรียบเทียบ	Brush Hub Motor	Brushless Hub Motor
ขนาดและน้ำหนัก	มากกว่า	น้อยกว่า
ประสิทธิภาพ	น้อยกว่า	สูงกว่า
อายุการใช้งาน	น้อยกว่า	นานกว่า
ราคา	ถูกกว่า	แพงกว่า
สายไฟที่ออกจากมอเตอร์	2 เส้น	8 เส้น

### 2.2.2 โครงสร้างของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน

โครงสร้างของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Hub Motor) หลักๆจะประกอบไปด้วยสามส่วน คือ ส่วนโรเตอร์ ส่วนสเตเตอร์และส่วนของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กที่ติดอยู่กับส่วนของสเตเตอร์

### 2.2.3 ลักษณะของแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน

จากรูปที่ 2.2 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็ว สำหรับแรงบิดมีพารามิเตอร์สองตัวในการอธิบาย คือ แรงบิดสูงสุด ( $T_p$ ) และแรงบิดเฉลี่ย ( $T_r$ ) โดย แรงบิดสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อมอเตอร์มีความเร่งหรือความเฉื่อย และแรงบิดเฉลี่ยจะเกิดขึ้นเมื่อมอเตอร์มีความเร็วคงที่ ทำนองเดียวกันในด้านของความเร็วเมื่อไม่มีการเพิ่มภาระทางกล มอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วเฉลี่ย และโดยทั่วไปแล้วความเร็วของมอเตอร์สามารถเพิ่มขึ้นเกินพิกัดได้ประมาณ 150 % แต่จะทำให้แรงบิดลดลง



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็ว

## 2.2.4 หลักการทำงานของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน

หลักการทำงานของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Hub Motor) มีหลักการทำงานเหมือนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั่วไป โดยมีสนามแม่เหล็กหมุนสองสนามหมุนตามกันไปและไม่มีค่า slip โดยปัจจัยที่ทำให้มอเตอร์ชนิดนี้ทำงานหรือหมุนได้นั้น นอกจากขดลวด 3 เฟส ที่สเตเตอร์และแท่งแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์แล้ว ยังมีอุปกรณ์ที่สำคัญ ซึ่งทำหน้าที่แทนแปรงถ่านและซีคอมมิวเตเตอร์คือ อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กอีก 3 ชุด (Hall Effect Sensor) ติดตั้งเป็นส่วนหนึ่งของสเตเตอร์ โดยจะคอยตรวจจับสนามแม่เหล็กชั่วขณะ-ใต้ ของแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์ โดยขณะที่มอเตอร์หมุนจะส่งสัญญาณ (Sensor Phasing หรือ Code) ที่เปลี่ยนแปลงไปยังกล่องควบคุมมอเตอร์ เพื่อทำการเปลี่ยนแปลง (Decode) และส่ง Output Voltage ไปยังขดลวดสเตเตอร์แต่ละเฟส เพื่อให้เกิดการดูดและผลักกันระหว่างสนามแม่เหล็กในขดลวดสเตเตอร์ และสนามแม่เหล็กถาวรของโรเตอร์ ในการทำงานของมอเตอร์ 1 รอบจะมีการทำงานเป็น 6 ขั้นตอน ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ลำดับการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน

State	Hall-1	Hall-2	Hall-3	Phase A	Phase B	Phase C
1	1	0	1	0	+Vdc	-Vdc
2	1	0	0	-Vdc	+Vdc	0
3	1	1	0	-Vdc	0	+Vdc
4	0	1	0	0	-Vdc	+Vdc
5	0	1	1	+Vdc	-Vdc	0
6	0	0	1	+Vdc	0	-Vdc

จากตารางที่ 2.2 ลำดับการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่านจะเห็นได้ว่า Hall Effect Sensor ทั้ง 3 ตัว ทำหน้าที่เสมือนเป็นคอมมิวเตเตอร์ โดยจะส่งสัญญาณเพื่อให้อุปกรณ์ควบคุมทำการตัดต่อและสลับขั้วบวกและขั้วลบของแรงดันที่เข้าขดลวดสเตเตอร์แต่ละเฟส และทำให้มอเตอร์เกิดการหมุนไปตามการควบคุมดังกล่าวได้

การทำงานของ Hall Sensor step ที่ 1 คือ Hall-1 และ Hall-3 จะตรวจเจอขั้วแม่เหล็ก จากนั้นจะส่งผลการตรวจจับไปยังส่วน Controller ทำการประมวลผลจ่ายไฟ +Vdc ให้กับ Phase-B และจ่ายไฟ -Vdc ให้กับ Phase-C

การทำงานของ Hall Sensor step ที่ 2 คือ Hall-1 จะตรวจเจอขั้วแม่เหล็ก จากนั้นจะส่งผลการตรวจจับไปยังส่วน Controller ทำการประมวลผลจ่ายไฟ -Vdc ให้กับ Phase-A และจ่ายไฟ +Vdc ให้กับ Phase-B

การทำงานของ Hall Sensor step ที่ 3 คือ Hall-1 และ Hall-2 จะตรวจเจอขั้วแม่เหล็ก จากนั้นจะส่งผลการตรวจจับไปยังส่วน Controller ทำการประมวลผลจ่ายไฟ -Vdc ให้กับ Phase-A และจ่ายไฟ +Vdc ให้กับ Phase-C

การทำงานของ Hall Sensor step ที่ 4 คือ Hall-2 จะตรวจเจอขั้วแม่เหล็ก จากนั้นจะส่งผลการตรวจจับไปยังส่วน Controller ทำการประมวลผลจ่ายไฟ -Vdc ให้กับ Phase-B และจ่ายไฟ +Vdc ให้กับ Phase-C

การทำงานของ Hall Sensor step ที่ 5 คือ Hall-2 และ Hall-3 จะตรวจเจอขั้วแม่เหล็ก จากนั้นจะส่งผลการตรวจจับไปยังส่วน Controller ทำการประมวลผลจ่ายไฟ +Vdc ให้กับ Phase-A และจ่ายไฟ -Vdc ให้กับ Phase-B

การทำงานของ Hall Sensor step ที่ 6 คือ Hall-3 จะตรวจเจอขั้วแม่เหล็ก จากนั้นจะส่งผลการตรวจจับไปยังส่วน Controller ทำการประมวลผลจ่ายไฟ +Vdc ให้กับ Phase-A และจ่ายไฟ -Vdc ให้กับ Phase-C

## 2.2.5 ข้อดีและข้อเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน

### 2.2.5.1 ประสิทธิภาพ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Motor) สามารถลดความสูญเสียที่เกิดจากการเสียดสีกันระหว่างแปรงถ่านกับซี่คอมมิวเตเตอร์ ซึ่งผลจากการเสียดสีกันระหว่างแปรงถ่านกับซี่คอมมิวเตเตอร์จะทำให้เกิดความร้อน เกิดประกายไฟและยังก่อให้เกิดคลื่นสนามแม่เหล็กรบกวน

### 2.2.5.2 ปราศจากมลพิษ

เนื่องจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน มีแหล่งพลังงานจากแบตเตอรี่ และไม่ใช่เครื่องยนต์สันดาปภายใน หากนำไปประกอบเป็นยานพาหนะไฟฟ้า จึงไม่เกิดมลพิษ

### 2.2.5.3 ประหยัดค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงาน

เนื่องจากการประจุแบตเตอรี่จนเต็มในแต่ละครั้ง จะใช้พลังงานไฟฟ้าไม่สูงมาก และเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์สันดาปภายในแล้ว จะสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในด้านของพลังงานได้มาก

### 2.2.5.4 มีเสถียรภาพในการทำงาน

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่านเป็นมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงในขณะที่มีความเร็วคงที่ ทำให้การใช้งานประหยัดพลังงานและมีเสถียรภาพในการทำงาน

### 2.2.5.5 มีความน่าเชื่อถือสูง

เนื่องจากมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน เป็นมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง ปราศจากมลพิษ สะดวกต่อการติดตั้งใช้งาน อีกทั้งยังมีเสถียรภาพในการทำงานที่ดี ประหยัดค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงาน ทำให้มอเตอร์ชนิดนี้มีความน่าเชื่อถือสูง และนิยมนำมาใช้ประกอบเป็นต้นกำลังของยานพาหนะไฟฟ้ากันอย่างแพร่หลาย

## 2.2.6 ข้อจำกัดของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน

ข้อจำกัดของยานพาหนะที่ใช้มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านที่สำคัญ คือ แหล่งจ่ายพลังงานให้กับตัวมอเตอร์หรือแบตเตอรี่ ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านแบตเตอรี่ยังมีราคาแพง สามารถจ่ายพลังงานที่แรงดันคงที่ได้ไม่ตึก อีกทั้งยังมีปัญหาทางด้านน้ำหนักมาก ค่าความจุพลังงานน้อย ทำให้อายุของยานพาหนะที่ใช้มอเตอร์ชนิดนี้ สามารถวิ่งได้ในระยะทางที่ไม่ไกลมากนักต่อการประจุแบตเตอรี่หนึ่งครั้ง

## 2.3 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

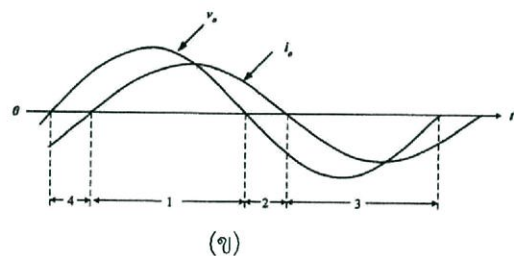
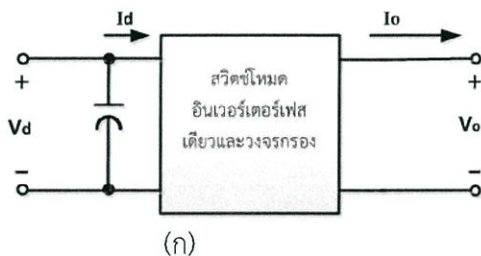
อินเวอร์เตอร์ (Inverter) คือวงจรแปลงผันพลังงานไฟตรงให้เป็นไฟสลับ เรียกอีกชื่อหนึ่งว่าเครื่องผกผันเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ มีหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงอินพุตให้มีความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับเอาต์พุตที่เป็นค่าคงที่หรือปรับค่าได้ โดยใช้ หลักการปรับค่าแรงดันไฟตรงด้านอินพุตหรือใช้หลักการควบคุมเทคนิคการสวิตซ์ภายในตัวอินเวอร์เตอร์ เช่น เทคนิค Pulse Width

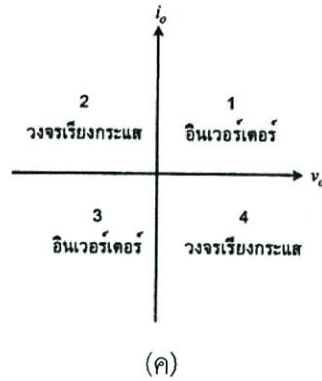
Modulation(PWM) เป็นต้น หรืออาจใช้วิธีปรับค่าแรงดันไฟกระแสตรงด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ก็ได้เช่นกัน สำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้งานในควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะใช้หลักการควบคุมอัตราส่วนของแรงดันเอาต์พุตและความถี่เอาต์พุตให้คงที่ (V/f Constant) เพื่อให้สามารถควบคุมให้แรงบิดคงที่ได้ แต่สำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในงานควบคุมอื่นๆที่ต้องการความถี่เอาต์พุตคงที่ ก็อาจใช้อินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมการปิด-เปิด สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วยวิธีที่ไม่ซับซ้อน เช่นวิธีมอดูเลตแบบ 180 องศา และ 120 องศา เป็นต้น สำหรับลูกคลื่นของแรงดันเอาต์พุตไฟสลับของอินเวอร์เตอร์ในอุดมคติคือรูปคลื่นไซน์ แต่ในทางปฏิบัติจะไม่ใช้รูปคลื่นไซน์ แต่จะเป็นรูปกึ่งสี่เหลี่ยม ซึ่งมีฮาร์โมนิกส์ปะปนอยู่มาก ซึ่งด้วยเทคนิคการสวิตซ์แบบ PWM จะทำให้ฮาร์โมนิกส์ดังกล่าวลดลง และทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของอินเวอร์เตอร์สูงขึ้น เนื่องจากอินเวอร์เตอร์มีอินพุตเป็นแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสตรง ซึ่งมาจาก แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงตรง (แบตเตอรี่) หรือได้มาจากการแปลงแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (Rectification) ดังนั้น เมื่อพิจารณาการเชื่อมโยงด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ จึงแบ่งออกได้ 3 รูปแบบ คือ

1. อินเวอร์เตอร์แบบป้อนด้วยแรงดัน (Voltage – Fed Inverter (VFI) / Voltage Source Inverter (VSI))
2. อินเวอร์เตอร์ แบบป้อนด้วยกระแส (Current – Fed Inverter (CFI) / Current Source Inverter (CSI))
3. อินเวอร์เตอร์แบบป้อนแรงดันแบบไฟตรงปรับค่าได้ (Variable DC Linked Inverter)

### 2.3.1 แนวคิดพื้นฐานของสวิตซ์โหมดอินเวอร์เตอร์

การแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับในรูปแบบที่ 2.3(ก) สมมติว่าแรงดันไฟฟ้าด้านออกคือ  $V_o$  และกระแสไฟฟ้าด้านออก คือ  $I_o$  ผ่านวงจรรองความถี่สูงออกไปเหลือเฉพาะความถี่ต่ำ ดังนั้นแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่จะได้เป็นรูปไซน์ กรณีที่แสดงในรูปที่ 2.3(ก) โหลดจะเป็นค่าความต้านทานและความเหนี่ยวนำ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าจะล่าหลังแรงดันไฟฟ้า สำหรับในรูปที่ 2.3(ข) กำลังไฟฟ้าด้านออก ( $P_o$ ) จะพิจารณาเป็นผลคูณของแรงดันและกระแสไฟฟ้าด้านออกดังนี้





### รูปที่ 2.3 สวิตซ์โหมดอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว

- (ก) แรงดันและกระแสด้านเข้าและด้านออก  
 (ข) รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านเข้าและด้านออก  
 (ค) โหมดการทำงานแบบ 4 จตุภาค (Quadrant)

โหมดที่ 1 โหมดอินเวอร์เตอร์ :  $V_o$  เป็นบวก  $i_o$  เป็นบวก  $P_o$  เป็นบวก คือ กำลังไฟฟ้าจะถูกส่งจากด้านไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_d$ ) ไปด้านไฟฟ้ากระแสสลับ ( $V_o$ )

โหมดที่ 2 โหมดเรียงกระแส :  $V_o$  เป็นลบ  $i_o$  เป็นบวก  $P_o$  เป็นลบ คือ กำลังไฟฟ้าจะถูกส่งจากด้านไฟฟ้ากระแสสลับ ( $V_o$ ) ไปด้านไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_d$ )

โหมดที่ 3 โหมดอินเวอร์เตอร์ :  $V_o$  เป็นลบ  $i_o$  เป็นลบ  $P_o$  เป็นบวก คือ กำลังไฟฟ้าจะถูกส่งจากด้านไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_d$ ) ไปด้านไฟฟ้ากระแสสลับ ( $v_o$ )

โหมดที่ 4 โหมดเรียงกระแส :  $V_o$  เป็นบวก  $i_o$  เป็นลบ  $P_o$  เป็นลบ คือ กำลังไฟฟ้าจะถูกส่งจากด้านไฟฟ้ากระแสสลับ ( $V_o$ ) ไปด้านไฟฟ้ากระแสตรง ( $V_d$ )

สรุปรูปแบบในการทำงานทั้งหมดของ Inverter จะแสดงได้ดัง รูปที่ 2.3(ค) โหมดการทำงานแบบ 4 จตุภาค (Quadrant)

#### 2.3.2 การสวิตซ์แบบ Pulse Width Modulate (PWM)

ในวงจรอินเวอร์เตอร์ ต้องการจะสร้างแรงดันไฟฟ้าด้านออกเป็นรูปไซน์ที่สามารถปรับขนาดและความถี่ตามต้องการได้ โดยจะใช้สัญญาณควบคุมรูปไซน์ (sinusoidal control signal) ตามความถี่ที่ต้องการนำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม (triangular waveform) ความถี่ของการสวิตซ์ ( $f_c$ ) จะเท่ากับความถี่ของรูปคลื่นสามเหลี่ยม

#### 2.3.3 การสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar)

ข้อแตกต่างระหว่างการสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ (Bipolar) กับยูนิโพลาร์ (Unipolar) คือ ในแบบยูนิโพลาร์ การควบคุมสวิตซ์ในกึ่ง A กับกึ่ง B จะแยกสัญญาณควบคุมออกจากกัน คือ สวิตซ์ในกึ่ง A จะถูกควบคุมจากสัญญาณ  $V_{Control}$  เทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม ( $V_{tri}$ ) ขณะที่สวิตซ์ในกึ่ง B จะถูกควบคุมจากสัญญาณ  $\bar{V}_{Control}$  เทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม ( $V_{tri}$ ) การสวิตซ์จะมีเงื่อนไขดังนี้

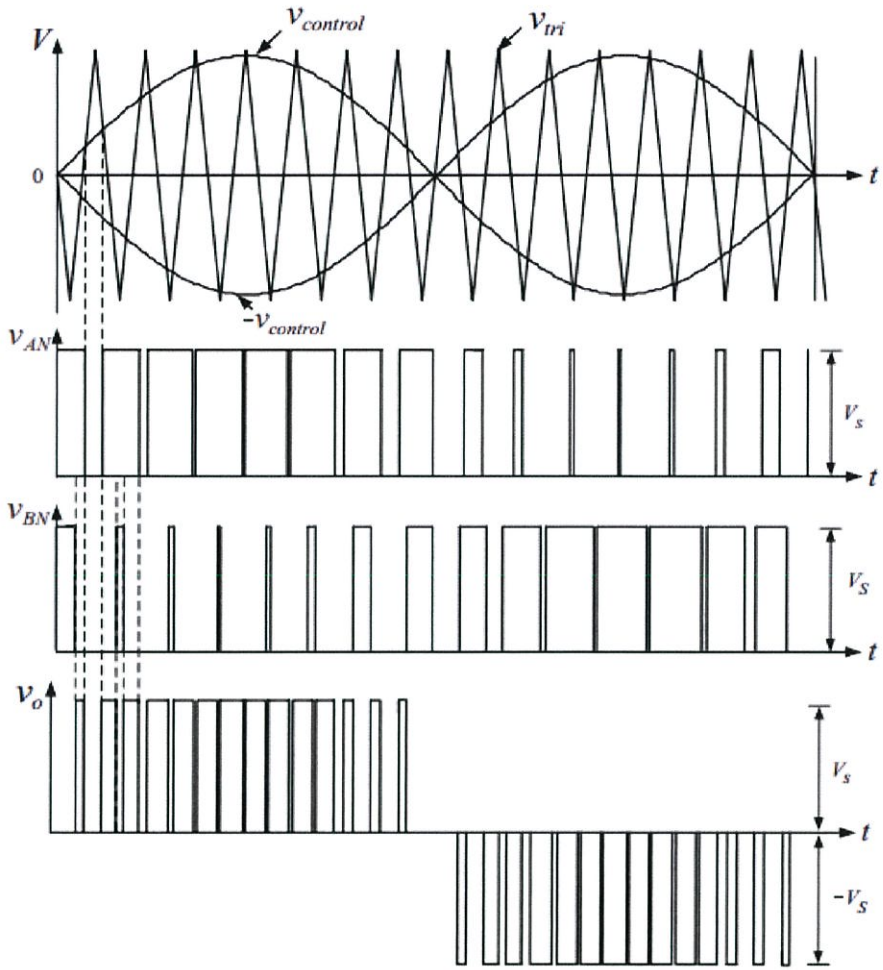
เมื่อ $V_{Control} > V_{tri}$ : สวิตช์ $T_{A+}$	จะนำกระแส $V_{AN} = V_d$
เมื่อ $V_{Control} < V_{tri}$ : สวิตช์ $T_{A-}$	จะนำกระแส $V_{AN} = 0$
เมื่อ $V_{Control} > V_{tri}$ : สวิตช์ $T_{B+}$	จะนำกระแส $V_{BN} = V_d$
เมื่อ $V_{Control} < V_{tri}$ : สวิตช์ $T_{B-}$	จะนำกระแส $V_{BN} = 0$

ตารางที่ 2.3 เงื่อนไขการสวิตช์แรงดันเฟสและแรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์

เงื่อนไข	สวิตช์นำกระแส	สวิตช์นำกระแส	$V_{AN}$	$V_{BN}$	$V_o$
1	$T_{A+}$	$T_{B-}$	$V_d$	0	$V_d$
2	$T_{A-}$	$T_{B+}$	0	$V_d$	$V_d$
3	$T_{A+}$	$T_{B+}$	$V_d$	$V_d$	0
4	$T_{A-}$	$T_{B-}$	0	0	0

จากตารางที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงสถานะของแรงดันระหว่างสาย ( $V_o$  หรือ  $V_{AB}$ ) จะเป็นการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันอยู่ระหว่างศูนย์ไปยังบวก หรือศูนย์ไปยังลบ จึงทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันจากการสวิตช์สูง เช่นกรณีไบโพลาร์

จุดเด่นของยูนิโพลาร์ คือ การเกิดความถี่ด้านออกจะมีความถี่เป็นสองเท่าของความถี่สวิตช์ของแต่ละเฟส เช่น ความถี่สวิตช์ของอุปกรณ์เป็น 10 kHz หากเป็นการทำงานแบบยูนิโพลาร์ ค่าแรงดันออกจะประกอบไปด้วยสัญญาณ PWM ที่มีความถี่หลักมูลและความถี่ฮาร์โมนิกส์ ลำดับที่ 2 ของไบโพลาร์ ที่ 20 kHz โดยเกิดความถี่ขึ้นรอบข้าง ผลของความถี่ไหลดเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า ทำให้การออกแบบวงจรรองความถี่ง่าย เล็กและประหยัด



รูปที่ 2.4 การสวิตชิงแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์

2.3.4 อินเวอร์เตอร์สามเฟสเมื่อทำงานในย่านรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

อินเวอร์เตอร์สามเฟสที่ทำงานในย่านรูปคลื่นสี่เหลี่ยม จะเหมาะสำหรับใช้กับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่สามารถปรับแรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย เพื่อใช้ในการปรับค่าระดับแรงดันไฟฟ้าด้านออก สามารถหาค่ารากกำลังสองเฉลี่ยของแรงดันไฟฟ้าด้านออกที่ความถี่หลักมูลที่ทำงานในย่านรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจะหาได้จากสมการ

$$V_{LL1} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} (V_{AN})_1 = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \times \frac{4}{\pi} \times \frac{V_d}{\pi} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \times V_d = 0.78V_d \quad (2.1)$$

รูปคลื่นแรงดันไฟฟ้าระหว่างสายที่ทำงานในย่านรูปคลื่นสี่เหลี่ยมจะไม่แปรผันตามโหลด และจะมีฮาร์โมนิกส์เกิดขึ้นด้วย

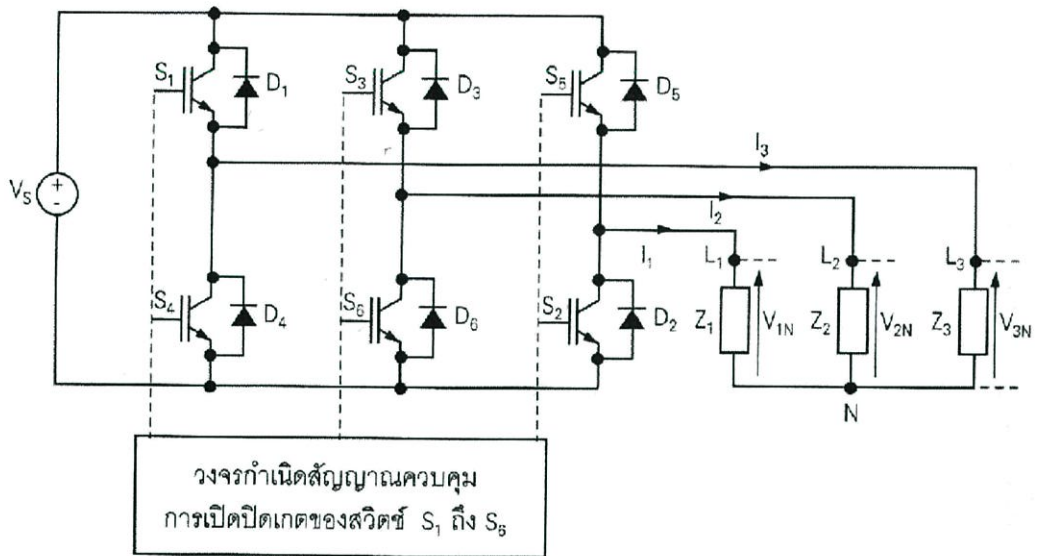
$$V_{LL1} = 0.78 \times \frac{V_d}{h} \quad \text{เมื่อ } h = 6n \pm 1, n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.2)$$

ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในอินเวอร์เตอร์สามเฟสกรณีแรงดันไฟฟ้าด้านออกและโหลดสมดุล จะเกิดที่ลำดับ  $h = 5, 7, 11, \dots$

ดังนั้นฮาร์โมนิกส์ที่มีขนาดมากที่สุดและอยู่ใกล้ความถี่หลักมากที่สุดคือฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 5

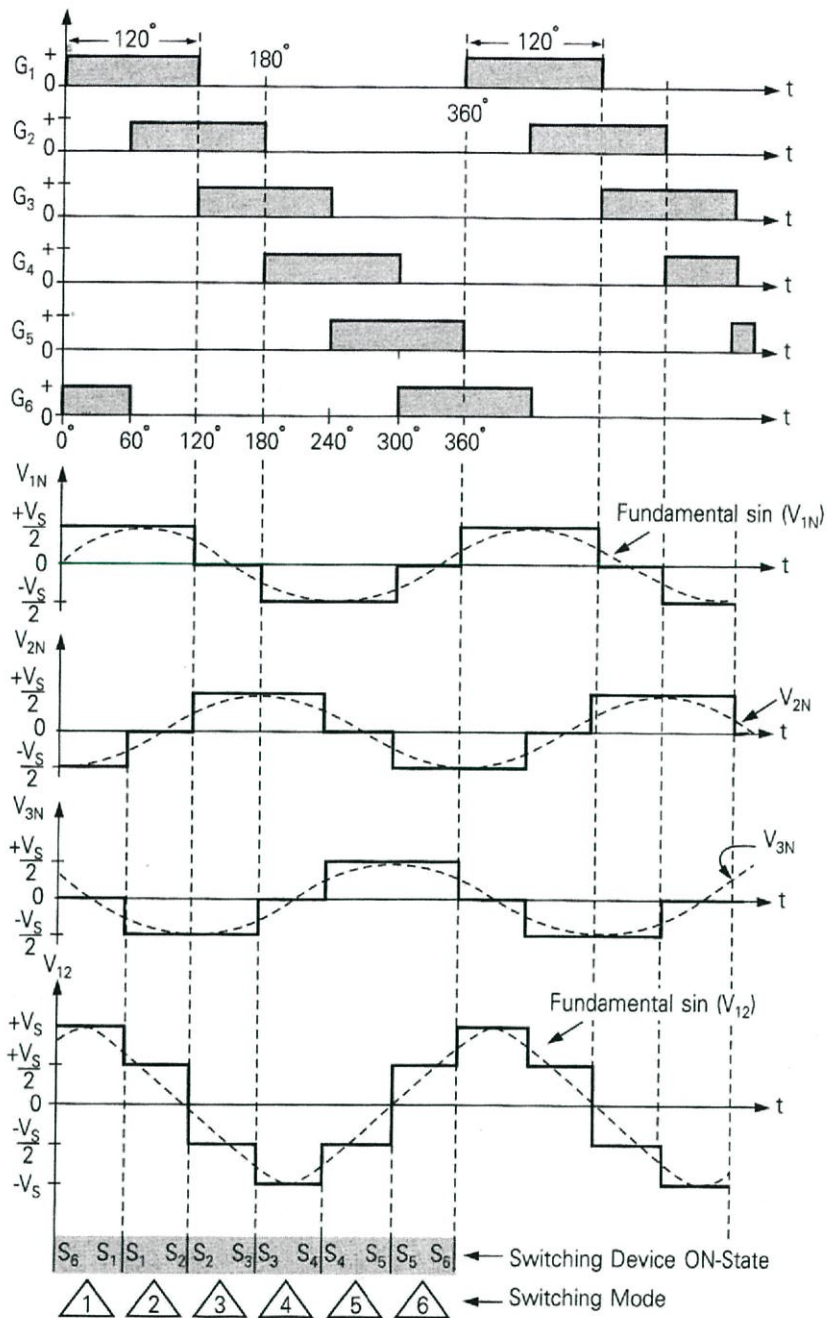
### 2.3.5 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบชั้นบันได

อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ประกอบไปด้วยสวิตช์อินเล็กทรอนิกส์กำลัง 6 ตัว คือ สวิตช์  $S_1$  และ  $S_4$  ต่ออยู่กับเอาต์พุตเฟสที่ 1 ( $L_1$ ) สวิตช์  $S_3$  และ  $S_6$  ต่อกับเอาต์พุตของเฟสที่ 2 ( $L_2$ ) และสวิตช์  $S_5$  และ  $S_2$  ต่อกับเอาต์พุตเฟสที่ 3 ( $L_3$ ) โหลด 3 เฟสต่อด้านเอาต์พุตที่ขั้ว  $L_1, L_2, L_3$  ดังแสดงในรูปที่ 2.5 สัญญาณสำหรับควบคุมการเปิด-ปิดสวิตช์  $S_1$  ถึง  $S_6$  สามารถควบคุมให้สวิตช์แต่ละตัวทำงานได้ 2 แบบ คือ แบบนำกระแสที่  $180^\circ$  ( $180^\circ$  Conduction) และแบบการนำกระแสที่  $120^\circ$  ( $120^\circ$  Conduction) สวิตช์อินเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในวงจรในรูปที่ 2.5 คือ ไอจีบีที ( $S_1$  ถึง  $S_6$ ) และไดโอด ( $D_1$  ถึง  $D_6$ )



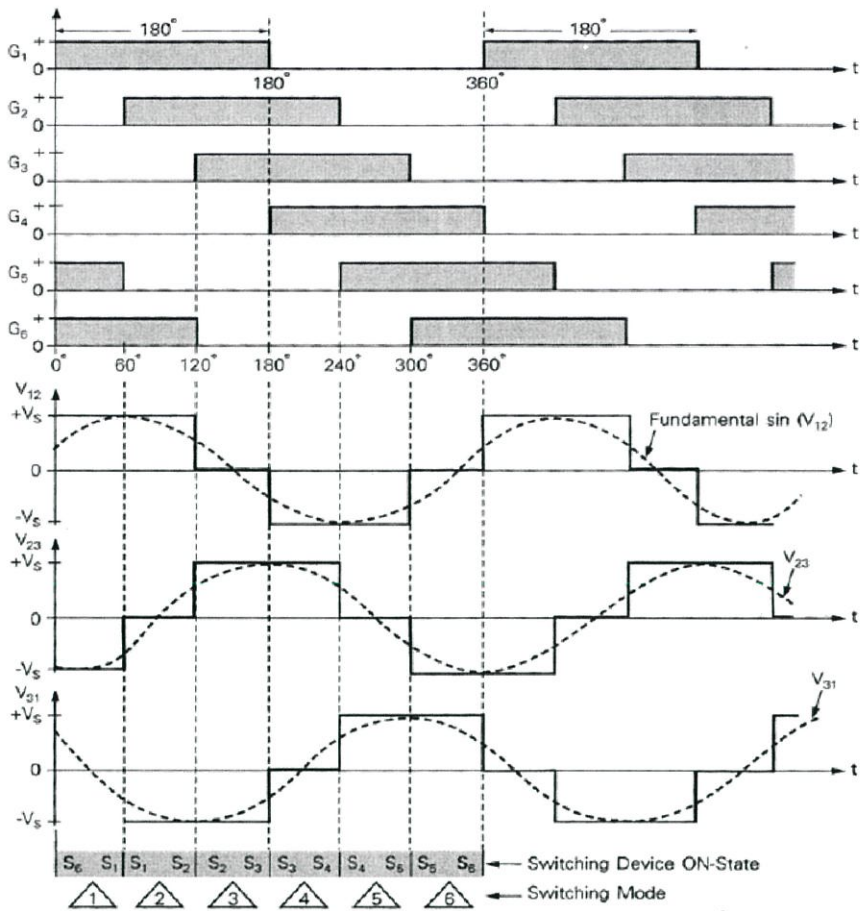
รูปที่ 2.5 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ต่อโหลดแบบสตาร์

1. อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบนำกระแสที่  $120^\circ$  องศาจากวงจรในรูปที่ 2.5 เมื่อควบคุมให้สวิตช์อินเล็กทรอนิกส์กำลังแต่ละตัวนำกระแสแต่ละ  $120^\circ$  องศา โดยใช้สัญญาณควบคุมการเปิด-ปิดเกตของไอจีบีทีตามลำดับ  $G_1$  ถึง  $G_6$  ดังรูปที่ 2.6 จะพบว่าไอจีบีที 2 ตัวทำงานพร้อมกันในแต่ละช่วงตามลำดับดังนี้ คือ  $S_6S_1, S_1S_2, S_2S_3, S_3S_4, S_4S_5, S_5S_6$  และ  $S_6S_1$  จึงได้รูปคลื่นแรงดันคร่อมโหลดระหว่างเฟส  $V_{1N}, V_{2N}$  และ  $V_{3N}$  ดังแสดงในรูปที่ 2.6



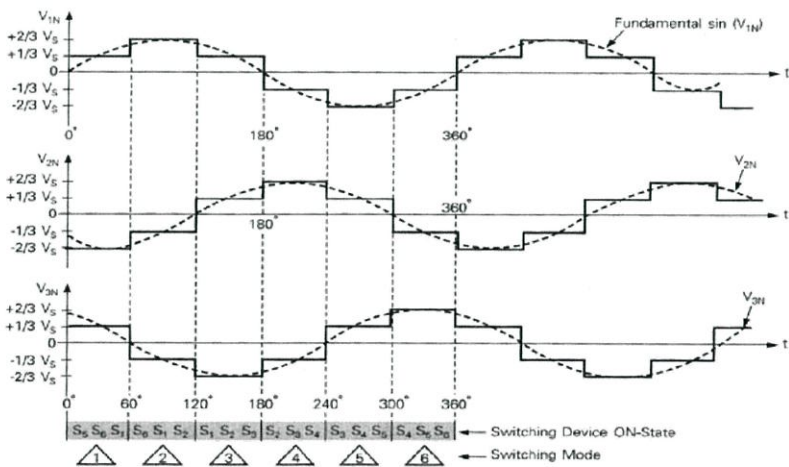
รูปที่ 2.6 สัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบนำกระแส 120 องศา และรูปคลื่นแรงดันเฟส ( $V_p$ ) และแรงดันระหว่างสาย ( $V_L$ )

2. อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบนำกระแส 180 องศา จากอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 2.5 เมื่อสร้างสัญญาณควบคุมการเปิด-ปิดไอจีบีที ให้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแต่ละตัวนำกระแสตัวละ 180 องศา ลักษณะของสัญญาณควบคุม  $G_1$  ถึง  $G_6$  แสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งการทำงานใน 1 วัฏจักรไฟสลับ ด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะมีไอจีบีที 3 ตัวทำงานพร้อมกันตามลำดับต่อไปนี้ 123, 234, 345, 456, 561 และ 612 รูปคลื่นแรงดันคร่อมโหลดแต่ละเฟส ( $V_p$ ) และแรงดันระหว่างสาย ( $V_L$ ) เมื่อต่อโหลดแบบสตาร์ในช่วงการทำงานต่างๆ แสดงในรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 สัญญาณควบคุมการเปิด-ปิดอินเวอร์เตอร์แบบนำกระแส 180 องศา และรูปคลื่นแรงดันระหว่างสาย ( $V_L$ )

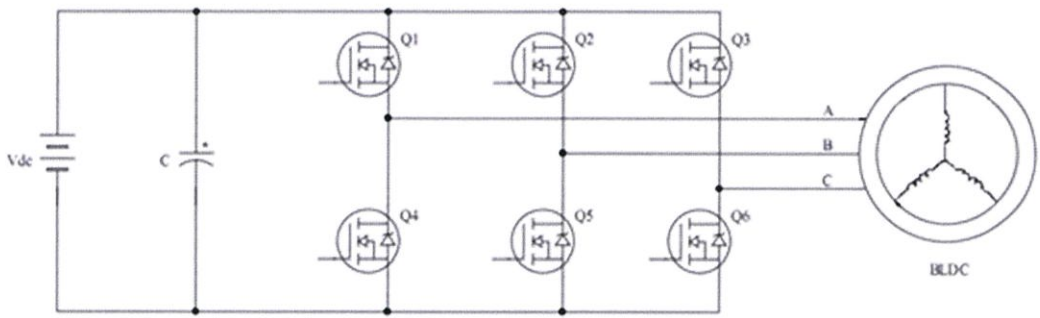
สำหรับรูปคลื่นแรงดันเฟสลับ 3 เฟส คร่อมโหนดตัวคระหว่งเฟส ( $V_p$ ) ในโหมดการ ทำงานที่ 1 ถึง 6 จะแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แรงดันเฟส ( $V_p$ ) ของอินเวอร์เตอร์แบบนำกระแส 180 องศา

2.3.6 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์

เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส อุปกรณ์ที่ใช้ในการสวิตช์ คือ MOSFETIRF2807



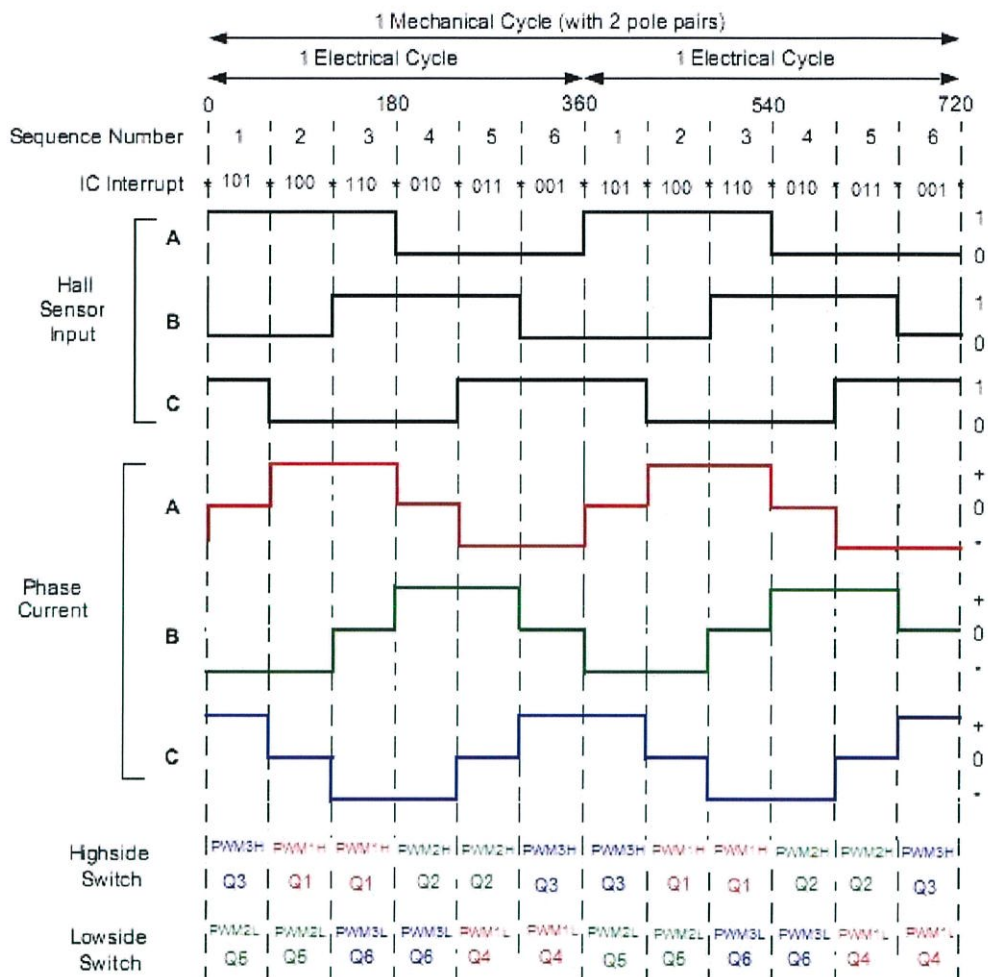
รูปที่ 2.9 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

ตารางที่ 2.4 ลำดับสำหรับหมุนมอเตอร์ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา(หมุนขวา)

Sequence Number	Hall Sensor Input			Active PWMs		Phase Current		
	A	B	C			A	B	C
1	1	0	1	PWM3H(Q3)	PWM2L(Q5)	Off	DC-	DC+
2	1	0	0	PWM1H(Q1)	PWM2L(Q5)	DC+	DC-	Off
3	1	1	0	PWM1H(Q1)	PWM3L(Q6)	DC+	Off	DC-
4	0	1	0	PWM2H(Q2)	PWM3L(Q6)	Off	DC+	DC-
5	0	1	1	PWM2H(Q2)	PWM1L(Q4)	DC-	DC+	Off
6	0	0	1	PWM3H(Q3)	PWM1L(Q4)	DC-	Off	DC+

ตารางที่ 2.5 ลำดับสำหรับหมุนมอเตอร์ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา(หมุนซ้าย)

Sequence Number	Hall Sensor Input			Active PWMs		Phase Current		
	A	B	C			A	B	C
1	0	0	1	PWM1H(Q1)	PWM3L(Q6)	DC+	Off	DC-
2	0	1	1	PWM1H(Q1)	PWM2L(Q5)	DC+	DC-	Off
3	0	1	0	PWM3H(Q3)	PWM2L(Q5)	Off	DC-	DC+
4	1	1	0	PWM3H(Q3)	PWM1L(Q4)	DC-	Off	DC+
5	1	0	0	PWM2H(Q2)	PWM1L(Q4)	DC-	DC+	Off
6	1	0	1	PWM2H(Q2)	PWM3L(Q6)	Off	DC+	DC-



รูปที่ 2.10 การทำงานของมอเตอร์ใน 1 Cycle

## 2.4 วงจรขับ

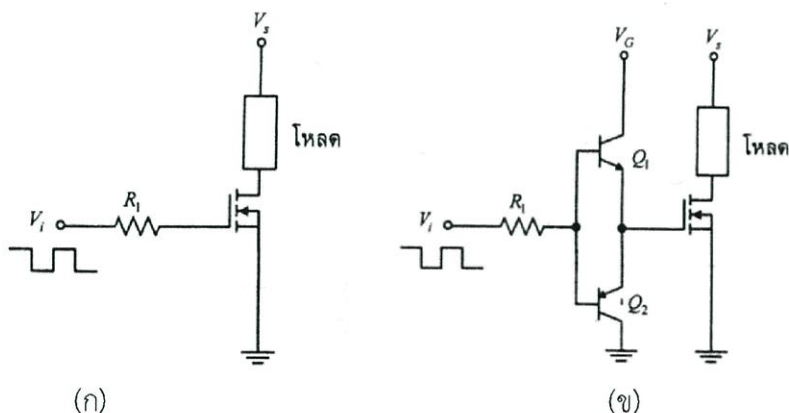
การทำงานของสวิตช์ จะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยขณะที่สวิตช์นำกระแสจะเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะนำกระแส ซึ่งเกิดจากการที่แรงดันคร่อมสวิตช์มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ และอีกกรณีหนึ่ง คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการเปลี่ยนสถานะของสวิตช์ หรือกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการสวิตช์ ซึ่งโดยทั่วไป สำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการสวิตช์มีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะนำกระแสมา

วงจรเรโซแนนซ์คอนเวอร์เตอร์ (Resonant Converter) จะสามารถลดกำลังสูญเสียจากการสวิตช์ได้ด้วยการให้สวิตช์เริ่มนำกระแส (turn-on) หรือ เริ่มหยุดนำกระแส (turn-off) ที่แรงดันหรือกระแสไฟฟ้ามี่ค่าเท่ากับศูนย์ และสำหรับการทำงานของสวิตช์ จะมีการสวิตช์ที่แรงดันหรือกระแสไฟฟ้ามี่ค่าไม่เท่ากับศูนย์ อย่างไรก็ตามกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการสวิตช์ของคอนเวอร์เตอร์ชนิดต่างๆ สามารถลดได้ด้วยการออกแบบวงจรขับให้สวิตช์มีการเปลี่ยนสถานะของสวิตช์ได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น

### 2.4.1 การออกแบบวงจรขับเคลื่อนสำหรับมอสเฟตกำลัง

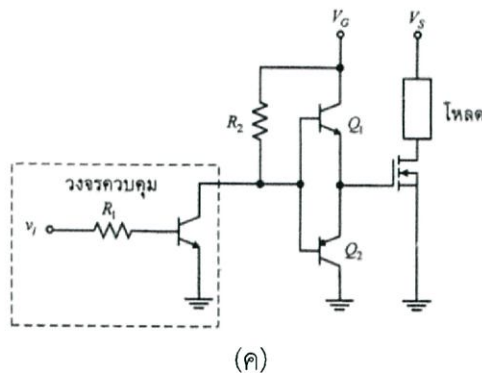
มอสเฟตกำลังเป็นสวิตช์ที่ควบคุมด้วยแรงดัน (voltage-controlled) ทำให้ง่ายต่อการควบคุมให้เริ่มนำกระแสหรือเริ่มหยุดนำกระแส ซึ่งจะเป็นข้อดีที่เหนือกว่ากรณีของทรานซิสเตอร์กำลัง มอสเฟตกำลังจะนำกระแสก็ต่อเมื่อแรงดันตกรวมขาเกตเทียบกับขาซอส (VGS) มีค่าสูงกว่าค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน (threshold voltage) และเมื่อระดับแรงดัน VGS สูงกว่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน จะเป็นผลทำให้มอสเฟตกำลังเข้าสู่โหมดการทำงานในโหมดโอห์มมิก (ohmic region) ซึ่งโดยทั่วไปแรงดัน VGS เพื่อให้สวิตช์เริ่มนำกระแสจะมีค่าอยู่ระหว่าง 10 ถึง 20 โวลต์ และเพื่อให้สวิตช์ไม่นำกระแสสามารถกระทำได้โดยการทำให้ VGS มีค่าแรงดันต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน และในขณะที่สวิตช์นำกระแสและไม่นำกระแส กระแสที่ป้อนเข้าขาเกตจะมีค่าเท่ากับศูนย์ อย่างไรก็ตาม ความเร็วในการสวิตช์ จะสามารถหาได้จากความเร็วในการเก็บและคายประจุของค่าตัวเก็บประจุแฝงด้านเข้าของมอสเฟตกำลัง (parasitic input capacitance) ซึ่งตัวเก็บประจุแฝงจะต้องทำการสะสมประจุเพื่อให้สวิตช์นำกระแส และจะต้องทำการคายประจุ เพื่อให้สวิตช์ไม่นำกระแส สำหรับวงจรขับของไอจีบีที (IGBT) จะคล้ายกับอุปกรณ์มอสเฟตกำลังโดยมีรายละเอียดดังนี้

วงจรถับเกตของมอสเฟตกำลังจะต้องสามารถจ่ายกระแส (sourcing) และดึงกระแส (sinking) ได้อย่างรวดเร็ว เพื่อให้มอสเฟตกำลังสามารถทำงานได้ที่ความถี่สูง รูปที่ 2.11 (ก) แสดงตัวอย่างของวงจรถับเกตที่ใช้ในการขับมอสเฟตกำลัง ซึ่งจะไม่เหมาะกับงานที่ต้องการความถี่สวิตช์สูงๆ และนอกจากนั้นถ้าสัญญาณด้านเข้าได้รับแรงดันจากอุปกรณ์ลอจิกดิจิทัลแรงดันต่ำ (low-voltage digital device) แรงดันด้านออกอาจจะไม่เพียงพอที่จะขับให้มอสเฟตกำลังนำกระแสได้ จึงต้องมีการปรับปรุงวงจรถับเกต ดังแสดงในรูปที่ 2.11(ข) ด้วยการใช้คู่ของวงจรมิตเตอร์ตาม (double emitter follower) หรือ โทเท็มโพล (totem pole) ซึ่งเป็นวงจรที่ประกอบด้วยคู่อุปกรณ์ทรานซิสเตอร์แบบ NPN และ PNP สำหรับการดำเนินงานของวงจรถับเกต เมื่อแรงดันด้านเข้าของวงจรถับเกตมีค่าสูง ทรานซิสเตอร์ Q1 จะเริ่มนำกระแส และทรานซิสเตอร์ Q2 ไม่นำกระแส เป็นผลทำให้มอสเฟตกำลังเริ่มนำกระแส และเมื่อแรงดันด้านเข้าของวงจรถับเกตมีค่าต่ำ ทรานซิสเตอร์ Q1 จะไม่นำกระแสและทรานซิสเตอร์ Q2 นำกระแส ซึ่งจะเป็นการย้ายประจุจากขาเกต เป็นผลทำให้มอสเฟตกำลังเริ่มหยุดนำกระแสได้ นอกจากนี้สัญญาณด้านเข้าอาจจะมาจากวงจร คอลเลกเตอร์แบบเปิด (open collector TTL) ที่ประกอบด้วย โทเท็มโพล ซึ่งจะใช้เป็นบัฟเฟอร์ (buffer) สำหรับแหล่งจ่ายกระแส (source) และดึงกระแส (sink) ที่ขาเกต ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ค)



(ก)

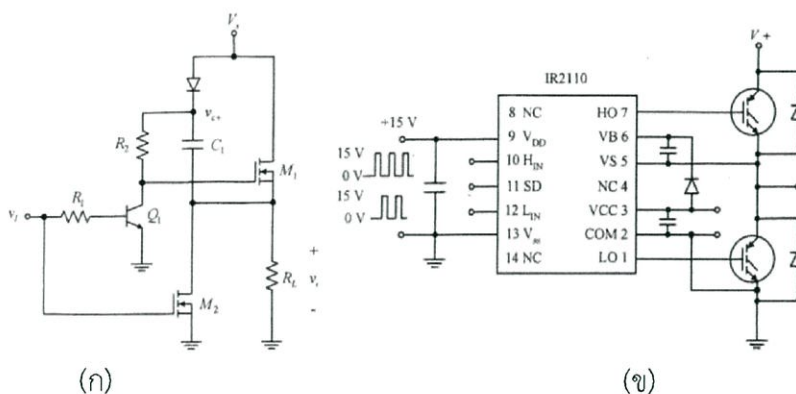
(ข)



รูปที่ 2.11 (ก) วงจรขับเคลื่อนของมอสเฟตกำลัง (ข) วงจรโทเท็มโพล  
(ค) ไอซีของวงจรขับเคลื่อนที่มีบัฟเฟอร์แบบโทเท็มโพล

นอกจากนี้ยังมีคอนเวอร์เตอร์บางชนิด เช่น วงจรบัคคอนเวอร์เตอร์ (Buck Converter) ที่ใช้มอสเฟตกำลังแบบ n-channel ซึ่งจะเป็นวงจรที่ต้องการวงจรขับเคลื่อนมอสเฟตกำลังที่มีกราวด์ลอย (floating ground) เมื่อเทียบกับกราวด์ของวงจร (circuit ground) โดยวงจรขับเคลื่อนสำหรับวงจรดังกล่าวจะเรียกว่า วงจรขับเคลื่อนด้านบัสบวก (high-side drivers) โดยจะมีโครงสร้างของวงจรที่เรียกว่า "บูตสเตรป (bootstrap)" ดังแสดงในรูปที่ 2.12(ก)

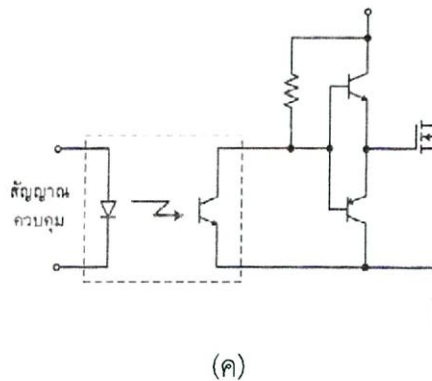
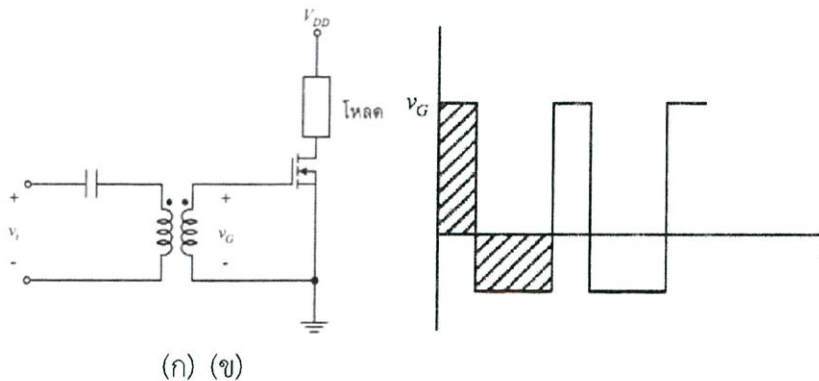
หลักการการทำงานของวงจรบูตสเตรป จะเริ่มจากเมื่อแรงดัน  $v_i$  มีค่าสูง (high) ทรานซิสเตอร์  $Q_1$  และมอสเฟต  $M_2$  จะนำกระแส และเมื่อมอสเฟต  $M_2$  นำกระแส จะทำให้ตัวเก็บประจุ  $C_1$  สะสมประจุผ่านทางไดโอด โดยจะมีแรงดันเท่ากับ  $V_s$  ในทำนองกลับกัน เมื่อแรงดัน  $v_i$  มีค่าต่ำ (low) ทรานซิสเตอร์  $Q_1$  จะไม่นำกระแส ทำให้มีแรงดันที่ขาเกตของมอสเฟต  $M_1$  เพิ่มขึ้นเท่ากับ  $v_{c+}$  ทำให้มอสเฟต  $M_1$  นำกระแสและเมื่อมอสเฟต  $M_1$  นำกระแส แรงดันด้านออก  $v_o$  จะมีค่าเท่ากับ  $V_s$  โดยที่แรงดันขาเกตของมอสเฟต  $M_1$  จะมีค่าเท่ากับ  $2V_s$  เพราะพลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุ  $C_1$  ทำให้แรงดันขาเกต-ซอส (gate-to-source voltage :  $V_{GS}$ ) ของมอสเฟต  $M_1$  ยังคงมีค่าเท่ากับ  $V_s$  ขณะที่มอสเฟต  $M_1$  นำกระแสและเมื่อ  $v_i$  กลับมีค่าสูงอีกครั้ง ทำให้ทรานซิสเตอร์  $Q_1$  นำกระแส แรงดันขาเกตของมอสเฟต  $M_1$  จะมีค่าลดต่ำลง จนกระทั่งมอสเฟต  $M_1$  ไม่นำกระแสในที่สุด



รูปที่ 2.12 (ก) วงจรบูตสเตรปสำหรับวงจรขับเคลื่อนด้านบัสบวกของมอสเฟตกำลัง  
(ข) วงจรขับเคลื่อนเบอร์ IR2101

วงจรถับเกตของมอสเฟตจะมีอยู่ในรูปของไอซี (Integrated-Circuit :IC) ดังแสดงตัวอย่างไอซี IR2101 ในรูปที่ 2.12(ข) ซึ่งเป็นไอซีที่ใช้สำหรับการออกแบบได้ทั้งวงจรถับเกตสำหรับสวิตช์ด้านบัสบวก (high-side switch) และบัสลบ (low-side switch) เช่น กรณีวงจรถับเกตบัสบวก จะใช้วงจรถับเกตด้านบัสบวก วงจรถับเกตบัสลบจะใช้วงจรถับเกตทั้งด้านบัสบวกและบัสลบ ดังแสดงในรูปที่ 2.12(ข) โดยที่วงจรถับเกตด้านบัสบวกจะใช้วิธีการบูตสเตรป

การแยกจากกันทางไฟฟ้า (Electrical Isolation) ระหว่างมอสเฟตกับวงจรถับเกต (control circuit) โดยมากจะมีความจำเป็น เพราะระดับแรงดันที่แตกต่างกันอย่างมากระหว่างวงจรถับเกตกับวงจรถักำลัง (power circuit) เช่น สำหรับมอสเฟตกำลังด้านบัสบวกของวงจรถักำลังคอนเวอร์เตอร์หรือของวงจรถักำลังคอนเวอร์เตอร์ เป็นต้น สำหรับวงจรถักำลังที่ใช้ในการแยกจากกันทางไฟฟ้า โดยมากจะได้แก่แบบการเชื่อมต่อทางแม่เหล็ก (magnetically coupled) และการเชื่อมต่อทางแสง (optically coupled circuit) ดังรูปที่ 2.13(ก) แสดงวงจรถักำลังและวงจรถักำลังที่แยกจากกันทางไฟฟ้าโดยอาศัยการเชื่อมต่อทางแม่เหล็กด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่กับหม้อแปลงไฟฟ้าจะใช้สำหรับป้องกันไฟฟากระแสตรงหรือดีซีออฟเซต (DC offset) สำหรับตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณเข้าขาเกตได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.13(ข) ตามลำดับ และสำหรับตัวอย่างของการแยกจากกันทางไฟฟ้าโดยอาศัยการเชื่อมต่อทางแสง ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.13 (ค)

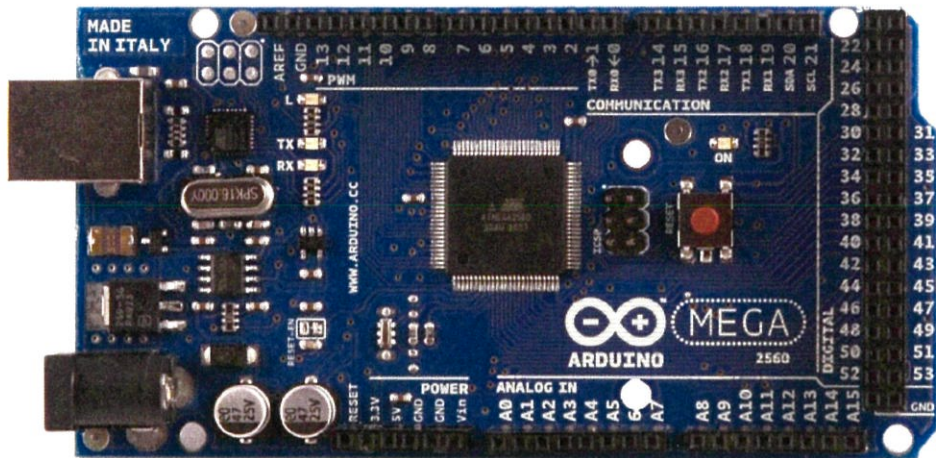


รูปที่ 2.13 (ก)การแยกจากกันทางไฟฟ้าระหว่างวงจรถักำลังและวงจรถักำลังด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า  
 (ข)แรงดันไฟฟ้าทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า  
 (ค)การแยกจากกันทางไฟฟ้าระหว่างวงจรถักำลังและวงจรถักำลังด้วยการเชื่อมต่อทางแสง

## 2.5 Microcontroller

### 2.5.1 ATmega2560

ATmega2560 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งถูกพัฒนามาใช้ในบอร์ดพัฒนาที่ชื่อว่า ArduinoMega2560 โดยมีขาทั้งหมดดังนี้ 54 digital input/output pins, 16 analog inputs, 4 UARTs, 16 MHz crystal oscillator, USB connection, Power Jack, ICSP header และปุ่มรีเซ็ต โดยจะมี USB Cable ที่ต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ หรือ AC-to-DC Adapter หรือแบตเตอรี่ ใช้เป็นแหล่งพลังงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถดูรายละเอียดได้ดังตารางที่ 2.6



รูปที่ 2.14 ArduinoMega2560Board

ตารางที่ 2.6 ArduinoMega2560 Specification

Microcontroller	ATMega2560
Operating Voltage	5 V
Input Voltage (recommended)	5-12 V
Input Voltage (limits)	3.3-20 V
Digital I/O Pins	54 (Provide 14 PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 kb of which 8 kb used by bootloader
SRAM	8 kb
EEPROM	4 kb
Clock Speed	16 MHz

#### 2.5.1.1 แหล่งพลังงานของ ArduinoMega2560

แหล่งพลังงานของ ArduinoMega2560 นั้นสามารถรับมาจาก USB Connection หรือจากแหล่งจ่าย Power Supply หรือจากแหล่งจ่าย AC-to-DC Adapter หรือจากแบตเตอรี่

โดย ArduinoMega2560 จะทำงานเมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้าที่ 3.3-20 V แต่ถ้าหาก ArduinoMega2560 ได้รับแรงดันต่ำกว่า 5 V อาจส่งผลทำให้เกิดความไม่เสถียรต่อบอร์ด ArduinoMega2560 แต่ถ้าหาก ArduinoMega2560 ได้รับแรงดันมากกว่า 12 V อาจจะทำให้เกิดความร้อนมากเกินไปจนทำให้เกิดความเสียหายแก่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ArduinoMega2560 ได้ ดังนั้นแรงดันที่เหมาะสมสำหรับ ArduinoMega2560 คือ 5-12 V

#### 2.5.1.2 หน่วยความจำ

ATMega2560 มีพื้นที่หน่วยความจำ 256 kb ซึ่งพื้นที่ 8 kb ถูกใช้สำหรับ Bootloader และมี SRAM 8 kb และ หน่วยความจำแบบ EEPROM 4 kb

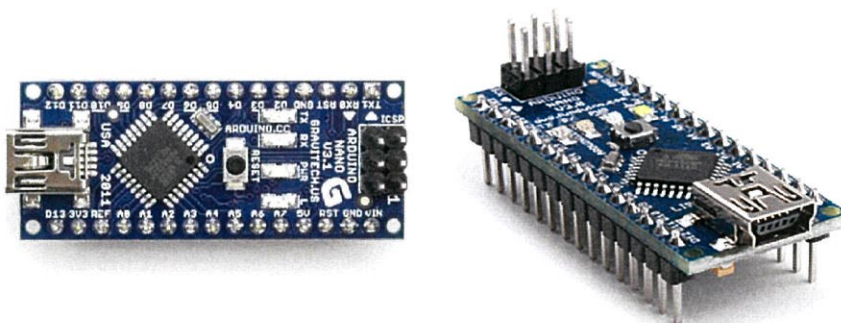
#### 2.5.1.3 Input และ Output

แต่ละขา (pin)ของ ArduinoMega2560 สามารถใช้งานเป็น Input หรือ Output ได้ ซึ่งจะถูกใช้งานที่แรงดัน 5 V เท่ากันหมด โดยแต่ละขามีกระแสสูงสุด 40 mA มีความต้านทานอยู่ที่ 20-50 k $\Omega$  นอกจากนี้ยังมีขาสามารถทำหน้าที่เฉพาะแต่ละฟังก์ชันได้ ดังนี้

- Serial : 0 (RX) และ 1 (TX), Serial 2 : 17 (RX) และ 16 (TX); Serial 3 : 15 (RX) และ 14 (TX) เป็นขาที่มีไว้สำหรับการเชื่อมต่อแบบ Serial port
- External Interrupts : 2 (Interrupt 0), 3 (Interrupt 1), 18 (Interrupt 5), 19 (Interrupt 4), 20 (Interrupt 3) และ 21 (Interrupt 2) เป็นขาที่ไว้ใช้สำหรับการ Interrupt ภายนอก สามารถตรวจจับขอบขาขึ้นหรือขอบขาลงของสัญญาณได้
- PWM: ขา 0 – 13 : 8-bit PWM (0-255)
- SPI: 50 (MISO), 51 (MOSI), 52 (SCK), 53 (SS) เป็นขาสำหรับใช้ช่วยในการติดต่อสื่อสารแบบ SPI
- LED: 13 เป็น Pin ที่ใช้ในการต่อกับ LED บนบอร์ด ArduinoMega2560
- I<sup>2</sup>C: 20 (SDA) และ 21 (SCL) เป็นขาที่มีไว้สำหรับการสื่อสารแบบ I<sup>2</sup>C
- AREF เป็นขาที่ใช้ในการเปรียบเทียบแรงดัน
- Reset รับแรงดันต่ำเพื่อรีเซ็ตไมโครคอนโทรลเลอร์ (Active Low)

#### 2.5.2 ATmega 328 nano

ATmega 328nano เป็น Arduino ที่ใช้หน่วยประมวลผล ATmega328 เช่นเดียวกับ Arduino Uno ความสามารถจึงเท่ากัน แตกต่างที่ Arduino Atmage 328 nano ถูกออกแบบให้มีขนาดเล็ก โดยตัดส่วนของ Socket ที่ไม่จำเป็นออก และยังคงความสามารถในการติดต่อผ่าน USB port เหมือนบอร์ด Arduino ตัวใหญ่ไว้ โดยมีรายละเอียดสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.7



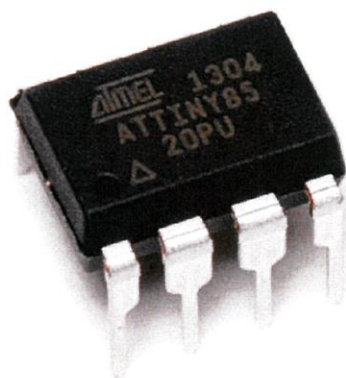
รูปที่ 2.15 ATmega 328 nano Board

ตารางที่ 2.7 Specification of ATmega 328 nano

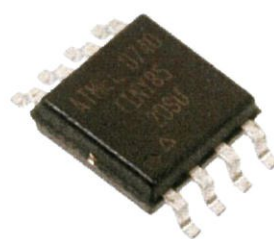
Microcontroller	ATmega328
Operating Voltage	5 V
Input Voltage (recommended)	7-12 V
Input Voltage (limits)	6-20 V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	8
DC Current per I/O Pin	40 mA
Flash Memory	32 KB of which 2 KB used by bootloader
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Clock Speed	16 MHz
LengthxWidth	45x18 mm.

### 2.5.3 ATTiny 85

ATTiny85 เป็น Arduino ขนาดเล็ก มีขาทั้งหมด 8 ขา ซึ่งมีทั้งแบบ DIP และ SMD ดังแสดงในรูปที่ 2.15 มีแรงดันใช้งานต่ำจึงสามารถประหยัดไฟได้มากขึ้น มีขนาดพื้นที่ ROM 8 kb และมีขนาดพื้นที่หน่วยความจำอยู่ที่ 8 kb มี Digital IO และ Analog IO และด้วยที่ ATTiny85 มีขนาดเล็กจึงสามารถประหยัดพื้นที่ในการออกแบบได้มากขึ้น และใช้ Internal Clock เป็นตัวควบคุมจังหวะการทำงานที่ 1 MHz ซึ่งรายละเอียดสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.8



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.16 ATTiny85 โดย (ก) แบบ DIP (ข) แบบ SMD

## ตารางที่ 2.8 Specification of ATTiny85

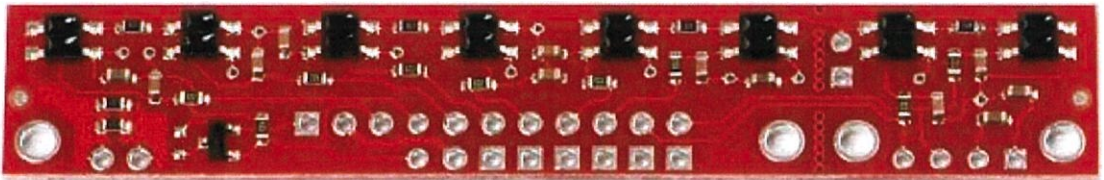
Operating Voltage	2.7-5.5 V
Flash Memory	8 kb
Internal ClockSpeed	1 MHz
Digital I/O	5 Pins
PWMDigital I/O	2 Pins
ADC Digital I/O	3Pins

## 2.6 Sensor

### 2.6.1 QTR

QTR – 8RC Reflectance Sensor Array เป็น Reflectance Sensor ที่มี IR LED เป็นตัวส่งสัญญาณ และ Phototransistor เป็นตัวรับสัญญาณจำนวน 8 คู่ แต่ละคู่ห่างกัน 9.525 mm

โดย LEDs บนอุปกรณ์ได้ถูกควบคุมการเปิดและปิดโดย MOSFET เพื่อช่วยเรื่องของการประหยัดพลังงาน ซึ่งเซนเซอร์ QTR-8RC ถูกนำมาใช้ในการตรวจจับเส้นทางเป็นหลัก แต่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานอื่นๆได้ เช่น การวัดระยะทาง การตรวจจับวัตถุ เป็นต้น



รูปที่ 2.17 QTR 8-RC Sensor Array

## ตารางที่ 2.9 Specification ของ QTR – 8RCsensor array

LengthxWidth	7.5 x 1.25 cm <sup>2</sup>
Operating Voltage	3.3-5.0 V
DC Current per I/O Pin	100 mA
Detecting Range(recommend)	3 mm
Detecting Range(Maximum)	9.5 mm
Weight	3.1 g

หลักการทำงาน: IR LED แต่ละตัวจะส่งสัญญาณออกไปจากตัว Sensor และสัญญาณจะสะท้อนกับสีบนวัตถุที่เราใช้ และสะท้อนกลับมากกระทบกับ Receiver หรือก็คือตัว Phototransistor โดยที่ Phototransistor แต่ละตัว จะ ทำการคายประจุจากตัวเก็บประจุที่อยู่ในวงจร RC บนโมดูล และใช้ Microcontroller ในการคำนวณระยะเวลาในการคายประจุของเซนเซอร์ โดยที่หาระยะเวลาในการคายประจุสั้น บ่งบอกว่าสามารถสะท้อนกับวัตถุได้ดี แต่หากระยะเวลาในการคายประจุสูง บ่งบอกสามารถสะท้อนกับวัตถุได้ไม่ดี หรือก็คือ วัตถุดูดกลืนแสงได้มาก

ตัวอย่างการทำงาน : เมื่อ Sensor อ่านค่าที่อยู่บนพื้นสีขาว จะอ่านค่าได้ต่ำเพราะเวลาในการคายประจุมีค่าต่ำ แต่หาก Sensor อ่านค่าที่อยู่บนพื้นสีดำ จะอ่านค่าได้สูงเพราะเวลาในการคายประจุมีระยะเวลานาน ซึ่งค่าระยะเวลานี้จะขึ้นอยู่กับการประมวลผลของ Microcontroller แต่ละชนิด

### 2.6.2 Inductive Proximity Sensor

เป็นเซนเซอร์ที่ทำงานโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะมีผลต่อชิ้นงานหรือวัตถุที่เป็นโลหะเท่านั้น ข้อเด่นของ Inductive Proximity Sensor คือ ทนทานสามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง (wide temperature ranges) สามารถทำงานในสถานะที่มีการรบกวนทางแสง (Optical) และเสียง (Acoustic) ซึ่งเทียบเท่ากับชนิดเก็บประจุ

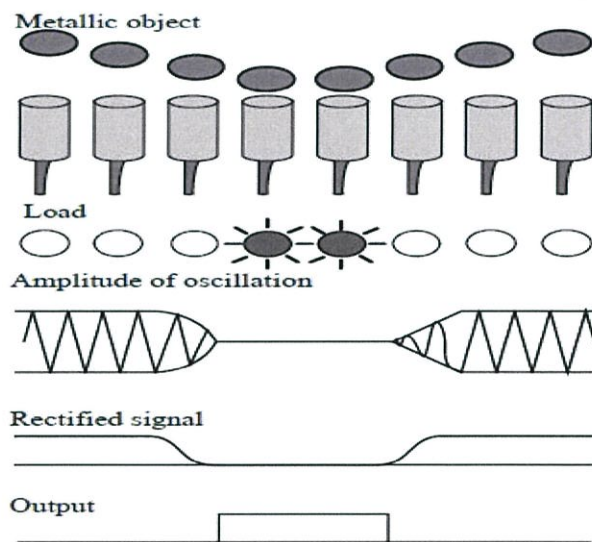


รูปที่ 2.18 LJ18A3-8-Z/BX 8mm Approach Sensor Inductive Proximity NPN NO Switch  
DC 6-36V

### ตารางที่ 2.10 Specification ของ Inductive Proximity model LJ18A3-8-Z/BX 8mm

Specified	DC 3 Wire Type (Black, Brown, Blue); Diameter of Head : 18mm
Size	7 x 3cm/2.8" x 1.2"
Net Weight	80g
Switch Appearance Type	Cylinder Type
Detecting Distance	8mm
Supply Voltage	DC 6-36V
Current Output	300mA
Operating Temperature	-25C to +55C
External Material	Plastic, Alloy

หลักการทํางาน : เป็นเซนเซอร์ (sensor) ที่ใช้ตรวจจับวัตถุที่เป็นโลหะเท่านั้น เช่น เหล็ก สแตนเลส โครงสร้างประกอบด้วย สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ขดลวดออสซิลเลเตอร์ ตัวเรื่อน และ แกนเฟอร์ไรท์ ทํางานโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนําของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่กําเนิดขึ้นจากวงจรออสซิลเลเตอร์ โดยกําเนิดสัญญาณส่งให้ขดลวดซึ่งพันอยู่บนแกนเฟอร์ไรท์ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณด้านหน้าของอุปกรณ์ เรียกบริเวณนี้ว่า "ส่วนตรวจจับ" เมื่อมีวัตถุเป้าหมายซึ่งต้องเป็นโลหะเท่านั้นเคลื่อนที่เข้ามาบริเวณส่วนตรวจจับ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะเหนี่ยวนําในวัตถุที่ต้องการตรวจจับ ทำให้เกิดมีกระแสไหลวน (eddy current) ขึ้นภายในวัตถุ หรือวัตถุเป้าหมายทำการดูดซับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า จนเมื่อถึงจุด ๆ หนึ่งที่วัตถุเป้าหมายได้ดูดซับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจนหมด หรือเกิดการเหนี่ยวนํามากที่สุด วงจรออสซิลเลเตอร์จะหยุดทํางาน จากนั้นวงจรทริกเกอร์จะทํางานและให้สัญญาณทางด้านเอาต์พุตออกมา



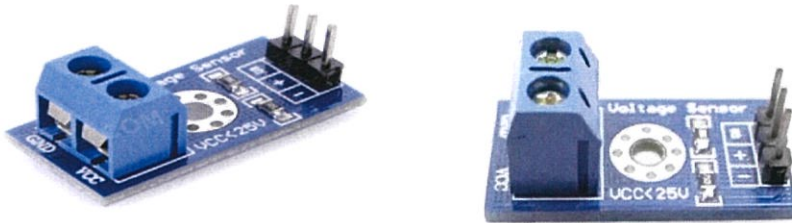
รูปที่ 2.19 หลักการทํางาน Inductive Proximity Sensor

### 2.6.3 Voltage Sensor

Voltage Sensor Module นั้นเป็น Module ที่ไว้สำหรับใช้วัด Voltage ของจุดสองจุดที่ต้องการ โดยมี Specification ดังนี้

ตารางที่ 2.11 Specification ของ Arduino Standard Voltage Sensor Module

Analog input voltage	5V
Input voltage range (DC)	0-25V
Voltage detection range	0.02445V-25V
Voltage analog resolution	0.00489V



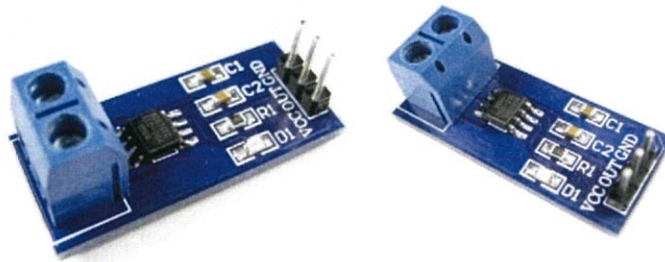
รูปที่ 2.20 Arduino Standard Voltage Sensor Module

#### 2.6.4 Current Sensor

Current Sensor Module นั้นเป็น Module ที่ไว้สำหรับใช้วัด Current ของจุดที่ต้องการ โดยมี Specification ดังนี้

ตารางที่ 2.12 Specification ของ Arduino Standard Current Sensor Module

Range	-5 to +5A both AC and DC current
Operating Voltage	5V
Sensitivity	185 mV/A
Bandwidth	80 kHz



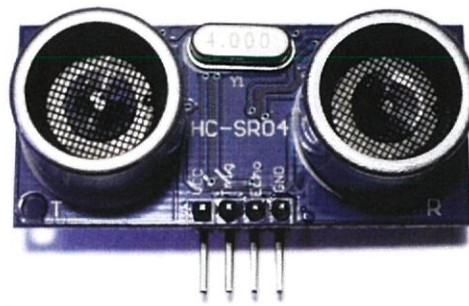
รูปที่ 2.21 Arduino Standard Current Sensor Module

#### 2.6.5 Ultrasonic

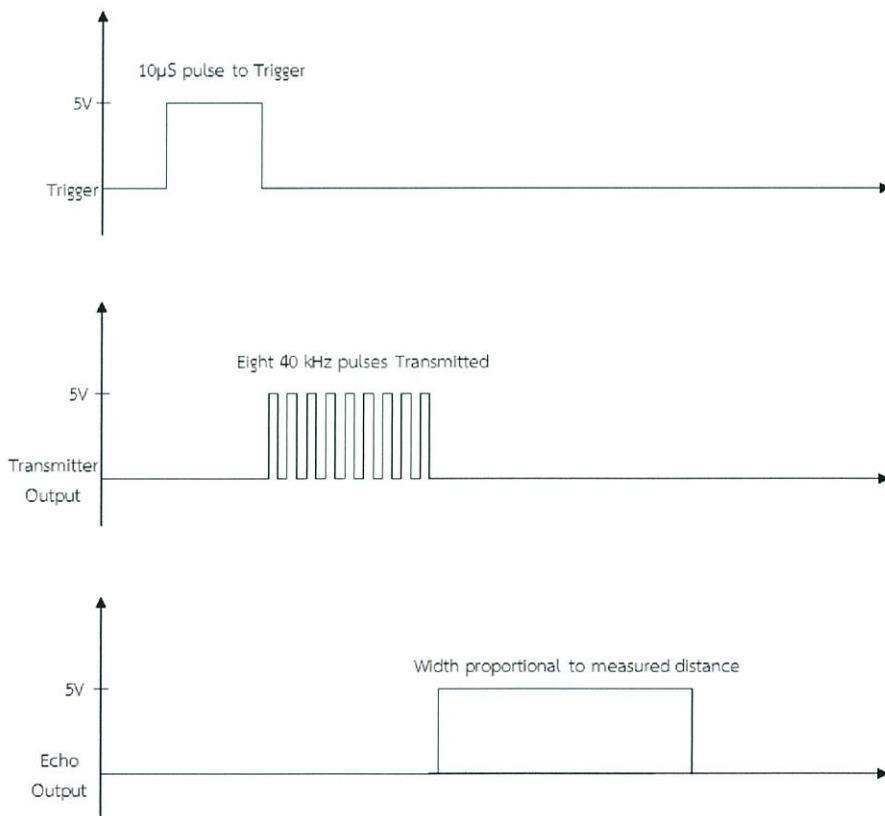
Ultrasonic Ranging Module HC-SR04 นั้นเป็น Module ที่ไว้สำหรับใช้วัดระยะทาง โดยใช้หลักการของการสะท้อนของคลื่นเสียง โดยมี Specification ดังนี้

ตารางที่ 2.13 Specification ของ Ultrasonic Ranging Module HC-SR04

Working Voltage	+5 Vdc
Working Current	15 mA
Working Frequency	40 kHz
Max Range	4 m
Min Range	2 cm
Measuring Angle	15 degree
Trigger Input Signal	10 us pulse width
Echo Output Signal	Input TTL lever signal and the range in proportion
Dimension	42 x 20 x 15 mm



รูปที่ 2.22 Ultrasonic Ranging Module HC-SR04



## รูปที่ 2.23 Timing Diagram ของ Ultrasonic Module HC-SR04

หลักการทำงาน: เริ่มต้นอุปกรณ์จะทำงานโดยการส่งสัญญาณเริ่มต้นยาวอย่างน้อย 10  $\mu\text{s}$  เพื่อไปสั่งขา Trig ให้แหล่งกำเนิดคลื่นเสียงทำงาน โดยแหล่งกำเนิดจะสร้างคลื่นเสียงออกไป 8 Cycle ที่ความถี่ 40 kHz และเมื่อคลื่นเสียงมีการตกกระทบกับวัตถุแล้ว จะสะท้อนกลับมา โดย Module นี้จะทำการคำนวณระยะห่างจากวัตถุ แล้วสร้าง Pulse ออกมาทางขา Echo เป็นสัดส่วนกับระยะทาง หลังจากนั้นจะทำการจับเวลาความกว้างของ Pulse และนำมาคำนวณเป็นระยะทาง ซึ่งอัตราเร็วที่เสียงเดินทางในอากาศที่จะนำมาใช้ในการคำนวณนั้น โดยประมาณหาได้จาก

$$C \approx 331.5 + 0.61\theta \text{ (m/s)} \quad (2.3)$$

โดยที่ ( $\theta$ ) คืออุณหภูมิ (หน่วย  $^{\circ}\text{C}$ ) เช่นที่ อุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  อัตราความเร็วเสียงในอากาศนั้นจะประมาณ 346 m/s

แต่เนื่องจากระยะเวลาของ Pulse ที่นำมาคำนวณนั้นเป็นระยะเวลารับ-ส่งของคลื่นเสียง ดังนั้นสูตรในการคำนวณหาระยะทางนั้น จะเป็นไปตามสมการ ดังนี้

$$\text{ระยะทางวัตถุ} = \frac{(\text{อัตราเร็วของเสียง} \times \text{ระยะเวลาความกว้างของ Pulse})}{2} \quad (2.4)$$

ตัวอย่างเช่น ทดลองวัดระยะทางวัตถุ ในห้องอุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  และจับสัญญาณความกว้างของ Pulse จากขา Echo ได้ความกว้างเท่ากับ 1 ms จะสามารถคำนวณระยะวัตถุได้ดังนี้ จากสมการ จะได้อัตราเร็วของเสียงในอากาศ = 346 m/s จะได้ระยะทาง ดังนี้

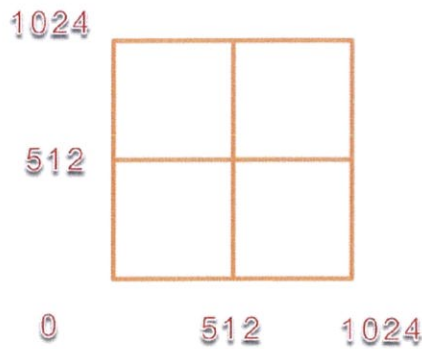
$$\begin{aligned} \text{ระยะทางวัตถุ} &= \frac{(346 \times 1 \times 10^{-3})}{2} \\ \text{ระยะทางวัตถุ} &= 0.173 \text{ m หรือ } 17.3 \text{ cm} \end{aligned}$$

### 2.6.6 Joystick

XY Joystick Module ใช้สำหรับการควบคุมทิศทางเหมือนจอยเกม โดยให้สัญญาณเอาต์พุตออกเป็น Analog โดยใช้ Potentiometer 2 ตัวเพื่ออ่านค่าตำแหน่งของคันโยกให้ค่าออกมาเป็น X Y



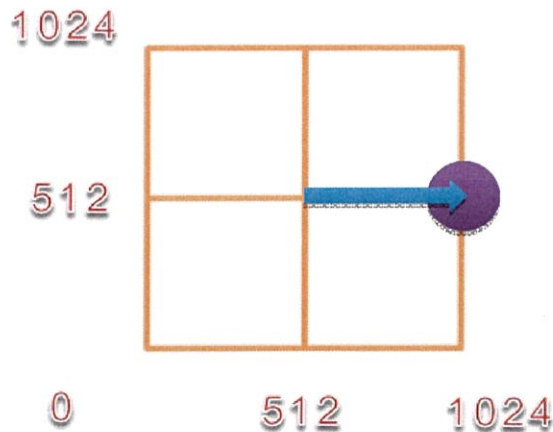
รูปที่ 2.24 XY Joystick Module



รูปที่ 2.25แบบจำลองการทำงานXY Joystick Module

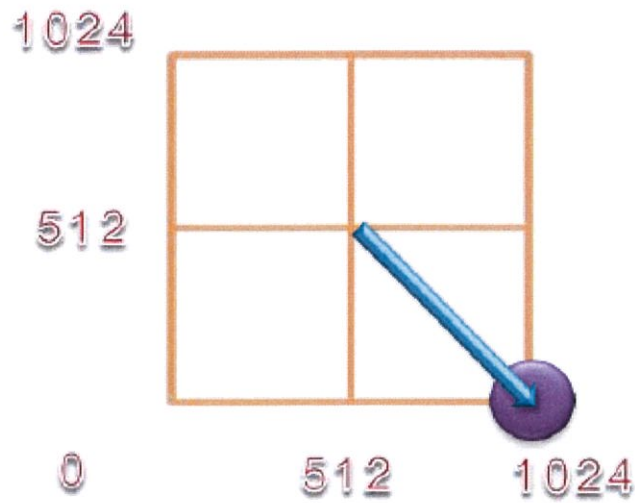
หลักการทํางาน: เครื่องบังคับทิศทาง (Joystick) ทำหน้าที่คือ มีตัวแปรของแรงดันไฟฟ้าเหมือนเซ็นเซอร์ให้เรา โดยค่าต่างๆที่รับมาขึ้นอยู่กับ ทิศทางการหมุนของอุปกรณ์ที่อยู่รอบตัวของเพลลา

เราสามารถส่งค่าเหล่านี้กลับไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ แต่เราก็ต้องเผชิญกับปัญหาคลาสสิก ที่การสื่อสารส่งผ่านเข้าพอร์ทมีค่าเป็น 8 บิต ในขณะที่ DAC (Digital to Analog Converter - ที่ทำการวัดค่าจากมิเตอร์ในจอยสติค) มีความละเอียดของ 10 บิตกล่าวอีกนัยหนึ่ง นั้นหมายความว่าเซ็นเซอร์ของเรามีความโดดเด่นในช่วงค่าระหว่าง 0 และ 1024

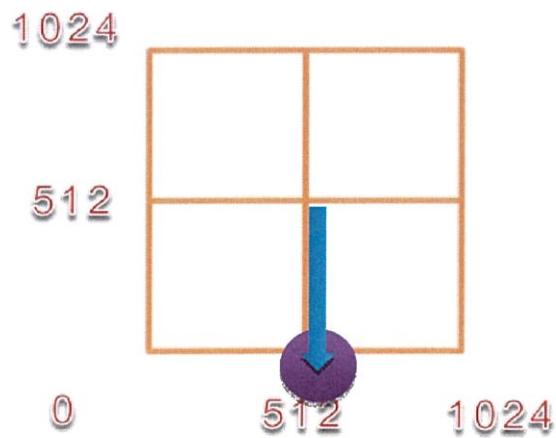


รูปที่ 2.26การบังคับทิศทางไปยัง ทิศตะวันออก

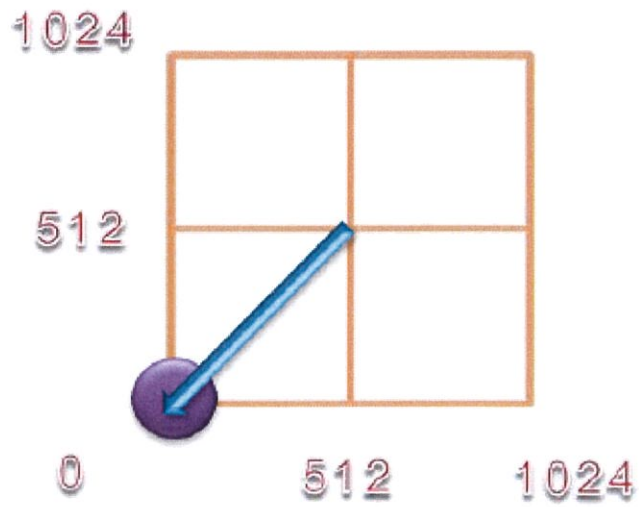
เมื่อบังคับคันโยกมาทางด้านขวา ค่า Analog ที่วัดได้คือ (1024,512)



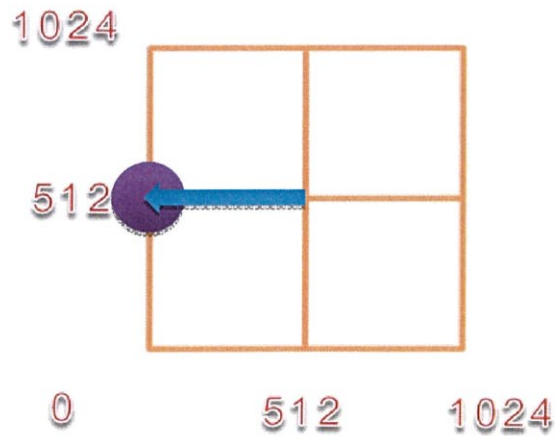
รูปที่ 2.27 การบังคับทิศทางไปยัง ทิศตะวันออกเฉียงใต้  
เมื่อบังคับคั่นโยกมาทางด้านล่างขวา ค่า Analog ที่วัดได้คือ (1024,0)



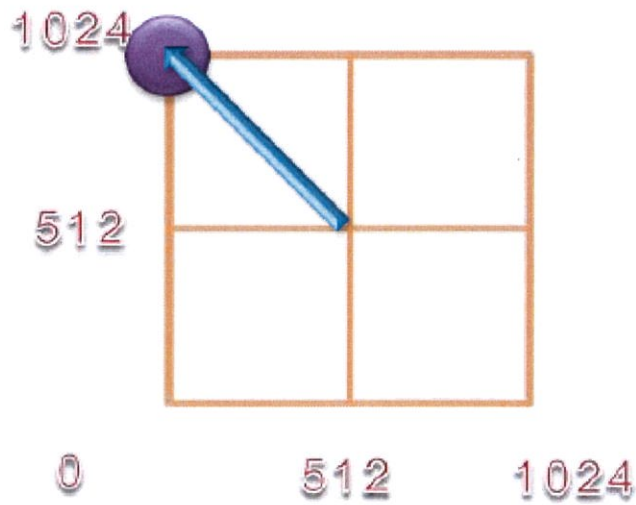
รูปที่ 2.28 การบังคับทิศทางไปยัง ทิศใต้  
เมื่อบังคับคั่นโยกมาทางด้านล่าง ค่า Analog ที่วัดได้คือ (512,0)



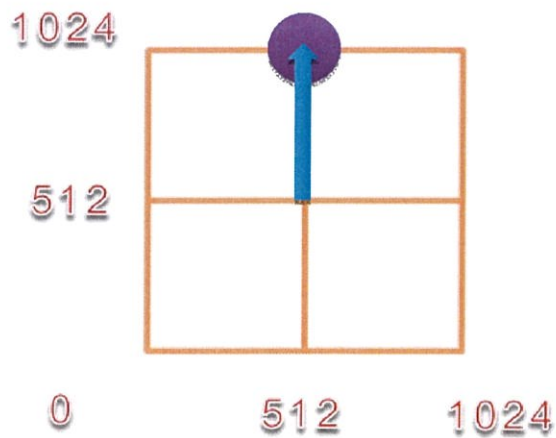
รูปที่ 2.29 การบังคับทิศทางไปยัง ทิศตะวันตกเฉียงใต้  
เมื่อบังคับคณโยกมาทางด้านล่างซ้าย ค่า Analog ที่วัดได้คือ (0,0)



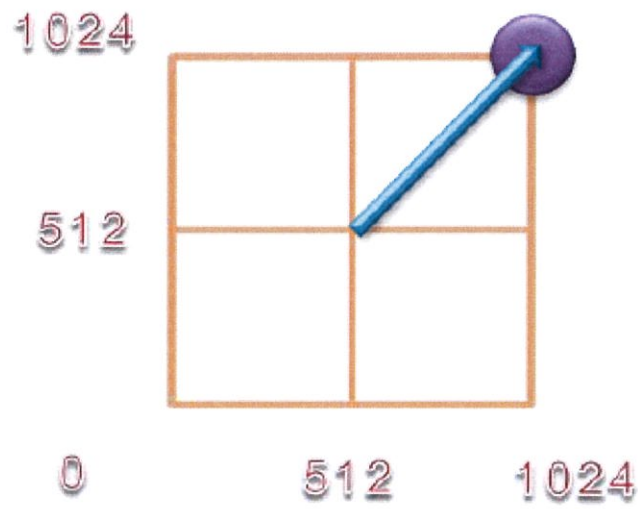
รูปที่ 2.30 การบังคับทิศทางไปยัง ทิศตะวันตก  
เมื่อบังคับคณโยกมาทางด้านซ้าย ค่า Analog ที่วัดได้คือ (0,512)



รูปที่ 2.31 การบังคับทิศทางไปยัง ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ  
เมื่อบังคับคั่นโยกมาทางด้านบนซ้าย ค่า Analog ที่วัดได้คือ (0,1024)



รูปที่ 2.32 การบังคับทิศทางไปยัง ทิศเหนือ  
เมื่อบังคับคั่นโยกมาทางด้านบน ค่า Analog ที่วัดได้คือ (512,1024)



รูปที่ 2.33 การบังคับทิศทางไปยัง ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ  
เมื่อบังคับคั่นโยกมาทางด้านบนขวา ค่า Analog ที่วัดได้คือ (1024,1024)

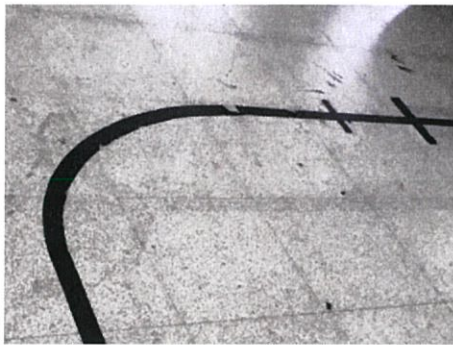
### บทที่ 3

## การออกแบบและสร้างระบบการทำงานของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ

### 3.1 ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้การตรวจจับแบบแถบสี

#### 3.1.1 อายุการใช้งานและการบำรุงรักษาแถบนำร่อง

เนื่องจากแถบสีที่ใช้งานต้องการความสะอาดเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำในการทำงาน เมื่อระยะเวลาผ่านไป ความสกปรกที่เกิดจากล้ออิสระของรถที่เหยียบลงไปบนเส้นระหว่างการทำงาน ผู้ปฏิบัติงานเดินเหยียบ หรือ ฝุ่นละอองจากเครื่องจักร ทำให้การทำงานของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติเกิดความผิดพลาด จึงต้องมีการบำรุงรักษาบ่อยครั้ง



รูปที่ 3.1 แถบนำร่องที่ผ่านการใช้งาน

#### 3.1.2 การใช้งานในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน

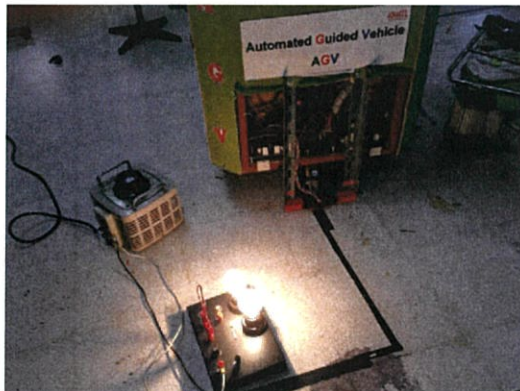
ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทดสอบวิ่งนอกสถานที่ พบปัญหาดังต่อไปนี้

##### 3.1.2.1 สีพื้นของพื้นที่ใช้งาน

ความไม่สม่ำเสมอของสีพื้นของพื้นที่ใช้งานหรือสีพื้นที่ไม่ใกล้เคียงกับสีดำทำให้การอ่านค่าของเซนเซอร์ผิดพลาด ส่งผลให้การทำงานของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติไม่ถูกต้อง

##### 3.1.2.2 แสงของพื้นที่ใช้งาน

อุณหภูมิสีของแสงช่วง 2700 – 3200 K ทำให้การอ่านค่าของเซนเซอร์ผิดพลาด



รูปที่ 3.2 การทดสอบผลกระทบจากแสงภายนอก

COM7 (Arduino Mega or Mega 2560)								COM7 (Arduino Mega or Mega 2560)							
204	352	1148	2500	2500	1736	452	452	200	208	628	1400	1124	854	260	208
516	360	1156	2500	2500	1892	412	464	264	212	680	1352	1068	796	264	212
516	360	1148	2500	2500	1744	412	464	260	204	636	1400	1124	848	260	204
516	360	1152	2500	2500	1892	412	464	256	204	672	1344	1068	796	256	204
516	356	1140	2500	2500	1740	404	464	256	204	628	1396	1120	848	256	204
508	352	1148	2500	2500	1744	458	458	256	204	628	1396	1120	840	256	204
508	356	1148	2500	2500	1688	456	456	264	156	584	1352	1124	800	264	216
508	352	1040	2500	2500	1792	452	452	256	204	632	1404	1120	848	256	204
452	352	1096	2500	2500	1792	452	452	256	204	576	1340	1068	796	256	204
516	308	1104	2500	2500	1748	412	464	260	208	628	1456	1176	852	260	208
516	312	1096	2500	2500	1748	464	464	260	156	576	1340	1072	792	260	208
516	312	1100	2500	2500	1740	412	464	264	212	636	1404	1120	848	264	212
516	356	1096	2500	2500	1748	464	464	260	208	584	1344	1124	852	260	208
508	356	1096	2500	2500	1744	456	456	260	208	636	1400	1124	848	260	208
508	352	1096	2500	2500	1800	456	456	260	208	628	1400	1124	852	260	208
508	356	1096	2500	2500	1796	456	456	260	156	576	1340	1068	792	260	208

(ก)

(ข)

### รูปที่ 3.3 ผลทดสอบผลกระทบจากแสงภายนอก

(ก) ค่าที่เซนเซอร์ได้เมื่อทำงานปกติ (ข) ค่าที่ได้เมื่อถูกรบกวนจากแสงภายนอก

## 3.2 การแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้การตรวจจับแบบแถบสี

### 3.2.1 การแก้ไขปัญหาที่เกิดจากแสงของพื้นที่ใช้งาน

แก้ปัญหาโดยการต่อเติมส่วนกำบังแสงในส่วนด้านหน้า เพื่อลดผลกระทบจากแสงภายนอก



รูปที่ 3.4 การต่อเติมส่วนกำบังแสง

### 3.2.2 การเปลี่ยนชนิดของเซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจจับ และแถบนำร่อง

ใช้พรอกซีมิติเซนเซอร์ชนิดที่ใช้ในการตรวจจับวัสดุประเภทโลหะ โดยใช้หลักการเหนี่ยวนำร่วมกับแถบอะลูมิเนียมนำร่อง ทำให้มีความแม่นยำของค่าที่ได้มากกว่าการใช้ QTR – 8RC Reflectance Sensor ที่ใช้กับแถบเส้นสีดำ ไม่มีผลจากสภาพแวดล้อมภายนอกต่อการทำงานของเซนเซอร์ แถบอะลูมิเนียมสามารถใช้งานได้ในสภาวะที่มีสิ่งสกปรกและต้องการการบำรุงรักษาน้อยกว่า



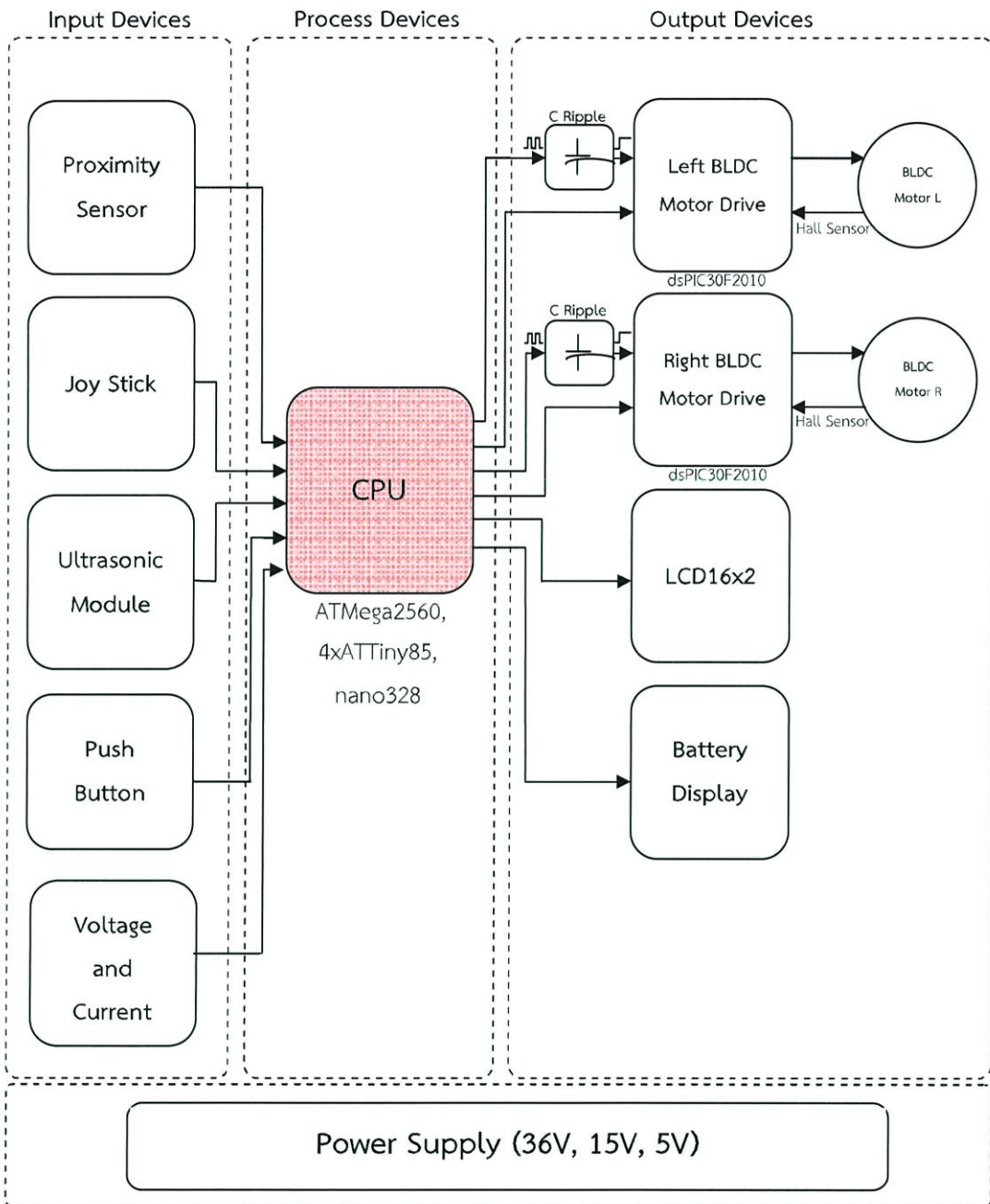
รูปที่ 3.5 เทปอะลูมิเนียม

### 3.3 คุณลักษณะเฉพาะของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ (Specification)

#### ตารางที่ 3.1 คุณลักษณะเฉพาะของรถ AGV for Industry

Specification	รถ AGV ที่สร้างขึ้น
ความยาว	64 cm
ความกว้าง	64 cm
ความสูง	68 cm
น้ำหนักรถ	30 kg
น้ำหนักในการบรรทุกทุกสิ่งของ	80kg
ความสูงจากพื้นถึงใต้ท้องรถ	16 cm
รัศมีวงเลี้ยว	360องศา
ระบบเลี้ยว	ล้อคู่ปรับความเร็วให้ต่างกัน
โครงสร้าง	เหล็ก
วัสดุกระบะ	ไม้อัด
ตัวถัง	ไม้อัด
ความเร็วที่แนะนำ	1.5 km/hr
ความเร็วสูงสุดที่ทำได้	3 km/hr
ระบบฉุกเฉิน	ปุ่ม Emergency สั่งหยุดการทำงานรถ
ระยะในการเบรกฉุกเฉิน	20 cm
การเคลื่อนที่	ด้านหน้า/ด้านหลัง/กลับตัว
หลักการทำงาน	ระบบอัตโนมัติเดินทางตามเส้นที่ติดตั้ง
ชนิดเซนเซอร์ที่ใช้	Inductive Proximity sensor 6 ตัว
ชนิดวัสดุนำทาง	เทปอะลูมิเนียม
ความสามารถในการทำงาน	สามารถทำงานในโหมด Manual ได้ (Joystick)
ความสามารถในการทำงาน	ทำงานได้ n Station
ความปลอดภัย	หยุดรถเมื่อมีสิ่งกีดขวาง
ข้อจำกัดในการทำงาน	ไม่สามารถใช้บนพื้นที่ลาดชัน
แบตเตอรี่	Lithium-Iron Phosphate 36V
ระยะเวลาในการใช้งาน	8 hrต่อการบรรจุแบตเตอรี่ 1 ครั้ง

## 3.4 Block Diagram of AGV System



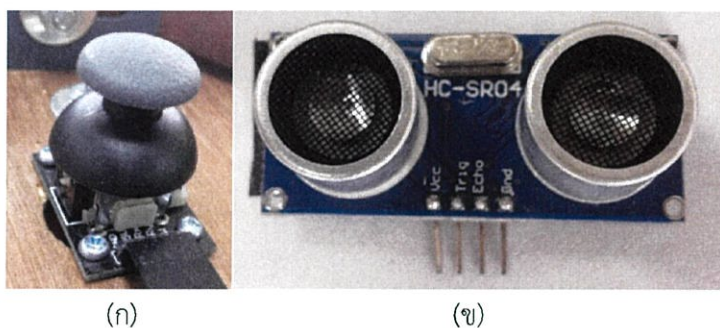
รูปที่ 3.6 Block Diagram of AGV System

### 3.4.1 Input Devices

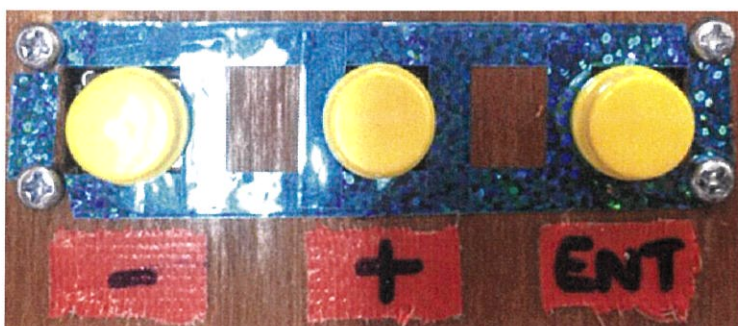
อุปกรณ์ขาเข้าของ CPU นั้นประกอบไปด้วย Inductive Proximity Sensors มีหน้าที่เป็นเซนเซอร์ในการตรวจจับเส้นทาง, Joy Stick ซึ่งนำมาใช้เป็นอินพุตสำหรับโหมดบังคับตัวเอง, Ultrasonic Module HC-SR04 จำนวน 3 ตัว นำมาใช้ในการวัดระยะเพื่อใช้ในการตรวจจับวัตถุที่ขวางเพื่อหยุดรถ, Voltage และ current sensor เพื่อวัดพลังงานที่ใช้ในการทำงาน และสุดท้าย Push Button 3 ปุ่ม คือ ปุ่มลบ (-) ใช้เพื่อเลื่อนเคอร์เซอร์ไปด้านซ้าย หรือใช้ลดระดับโพลด, ปุ่มบวก (+) ใช้เพื่อเลื่อนเคอร์เซอร์ไปด้านขวา หรือใช้เพิ่มระดับโพลดและปุ่มตกลง (Enter) ใช้สำหรับการยืนยันการตั้งค่า



รูปที่ 3.7 Inductive Proximity Sensors



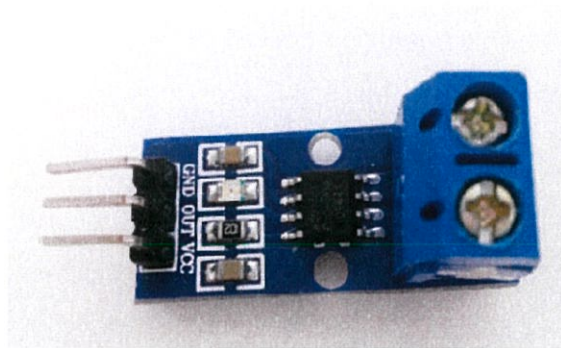
รูปที่ 3.8(ก) Joy Stick Module (ข) Ultrasonic Module HC-SR04



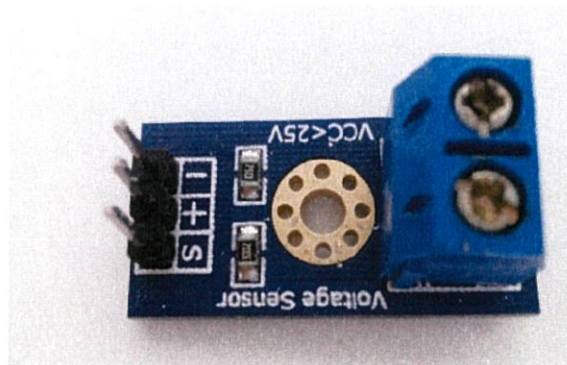
รูปที่ 3.9 Push Button (-), (+) และenter



รูปที่ 3.10 ตัวอย่าง Cursor ด้านซ้ายเพื่อเลือกโหมดบังคับตัวเอง



รูปที่ 3.11 Current Sensor Module

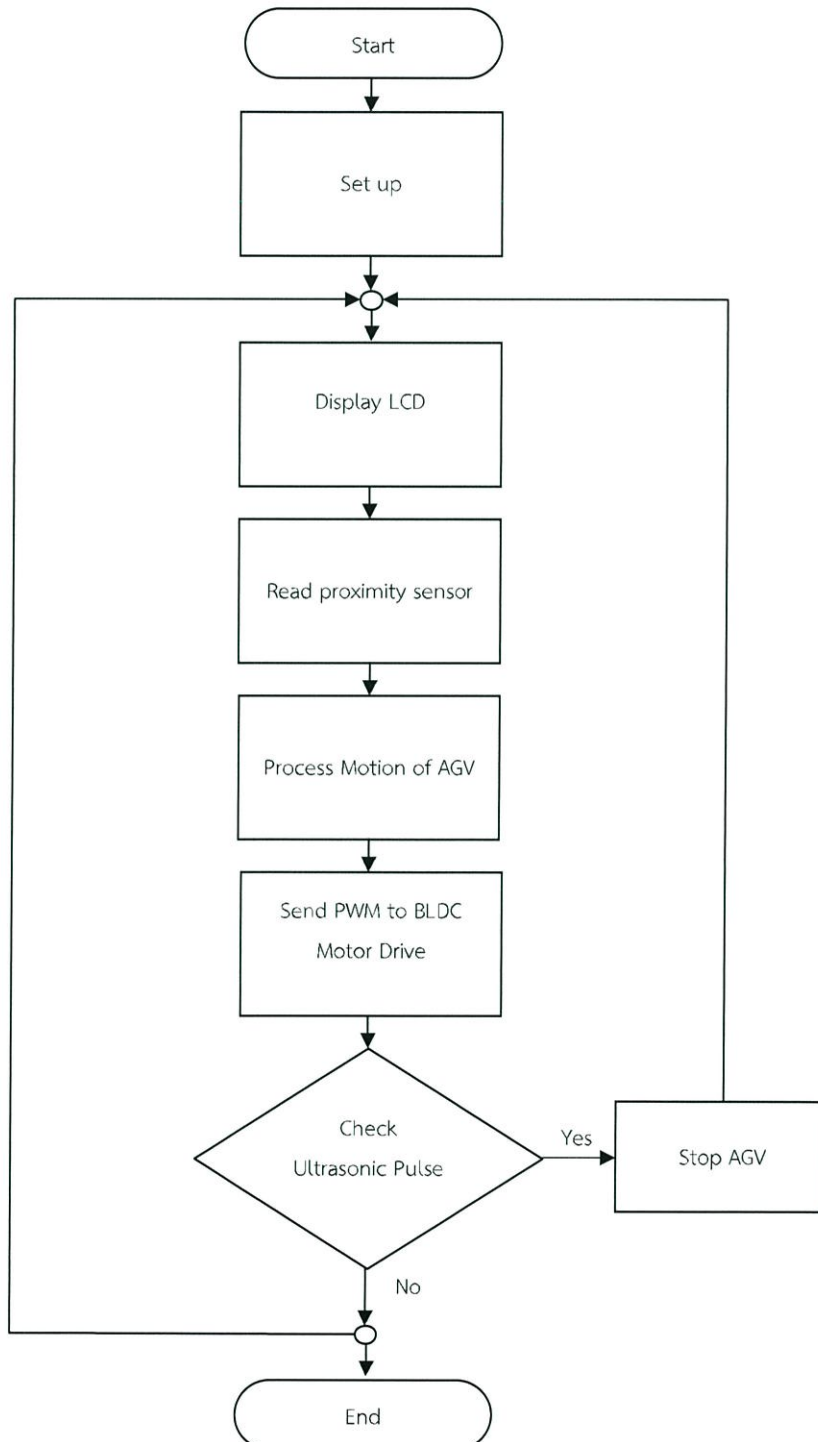


รูปที่ 3.12 Voltage Sensor Module

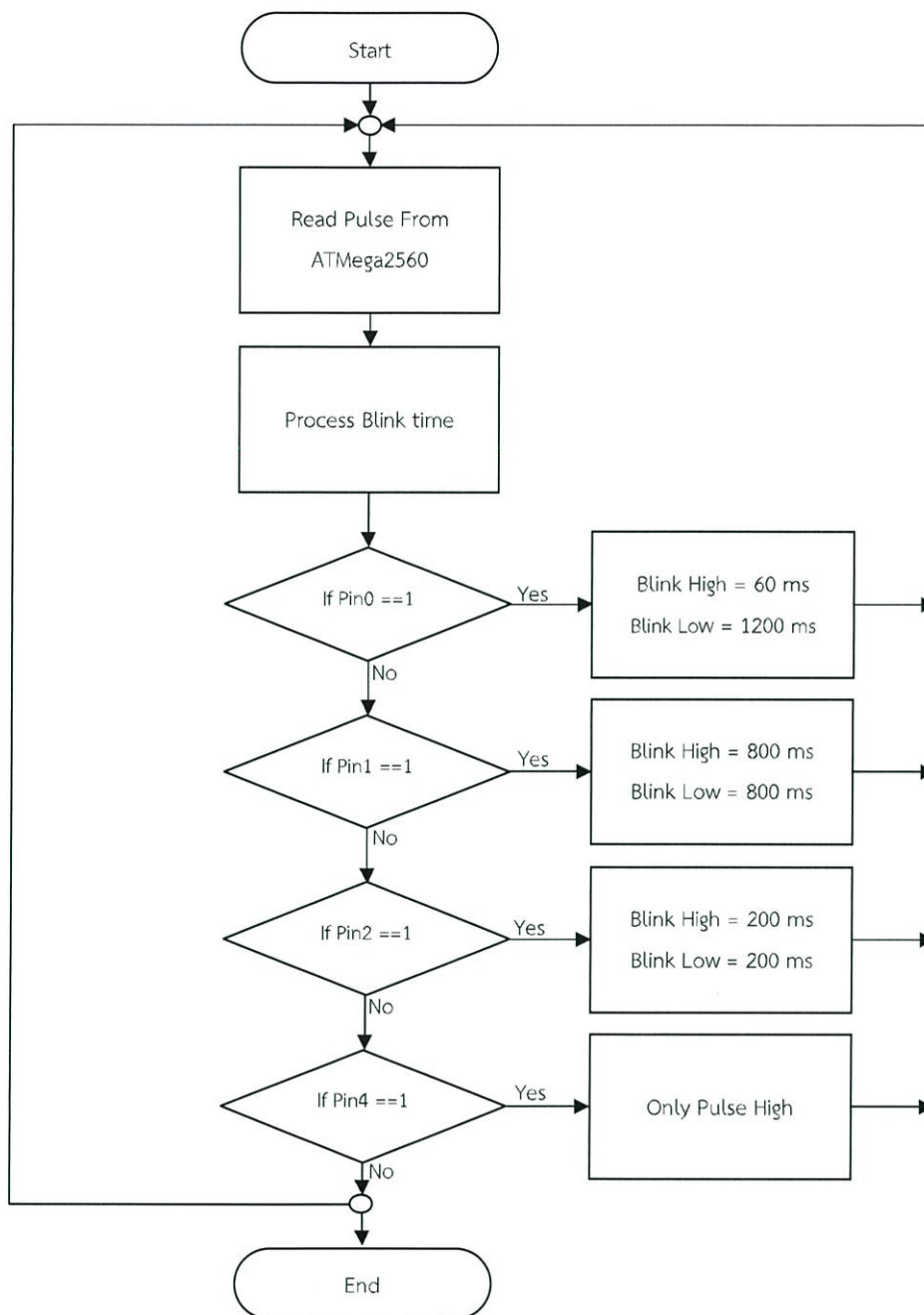
### 3.4.2 Process Devices

ตัวประมวลผลกลาง หรือ CPU(Central Processing Unit) ของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ ประกอบไปด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega2560 จำนวน 1 ตัว และ ATTiny85 จำนวน 4 ตัว ประมวลผลร่วมกัน โดย ATTiny85 1 ตัวนั้นทำงานในส่วนของการกระพริบไฟ LED และ ATTiny85 อีก 3 ตัว ทำงานในส่วนของการวัดระยะวัตถุด้านหน้าหรือตรวจจับวัตถุ ซึ่งสามารถแสดง Flow Chart การทำงานของส่วนประกอบของตัวประมวลผลกลางได้ ดังนี้

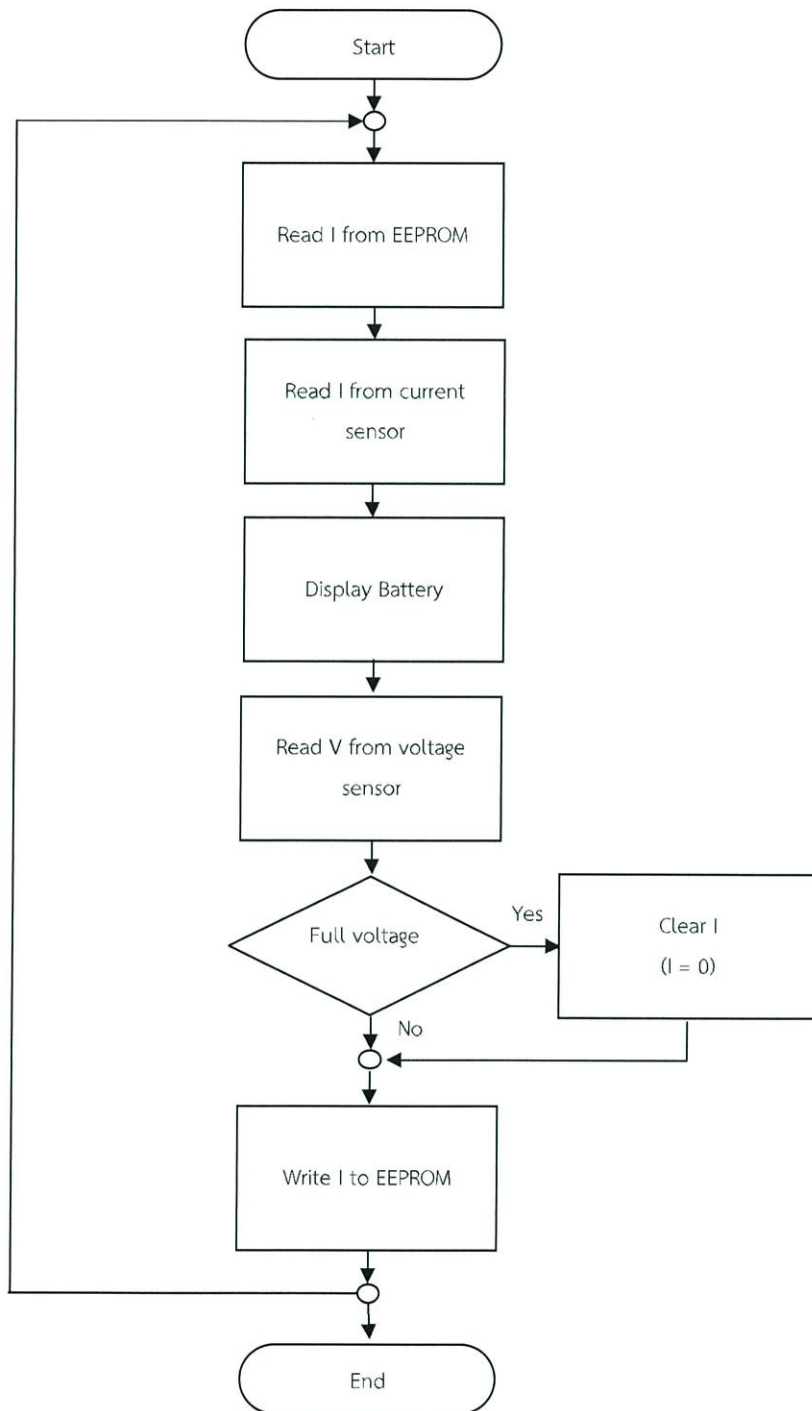
#### 3.4.2.1 Flow chart การทำงานของ ATmega2560



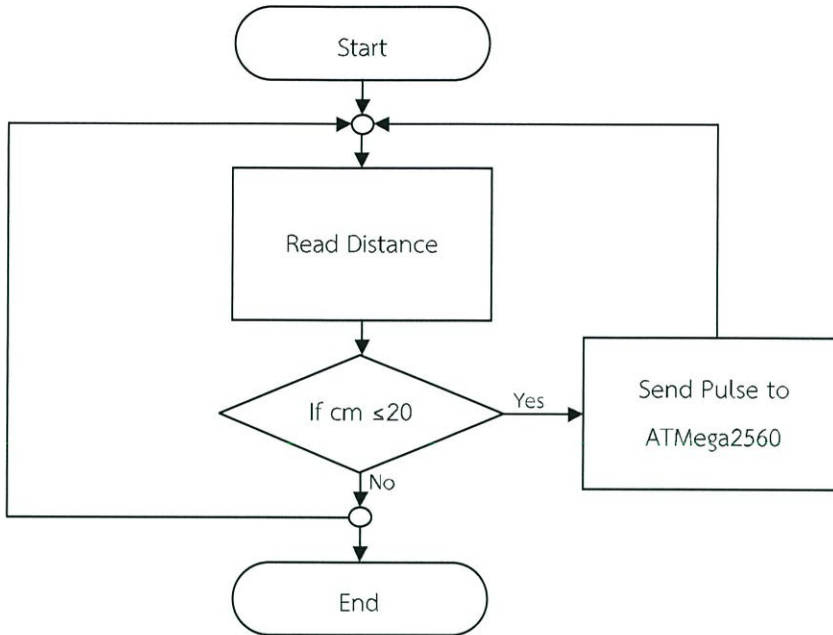
## 3.4.2.2 Flow chart การทำงานของ ATTiny85 ในฟังก์ชันการกะพริบไฟ LED



## 3.4.2.3 Flow chart การทำงานของ Nano328 ในการวัดพลังงานที่ใช้

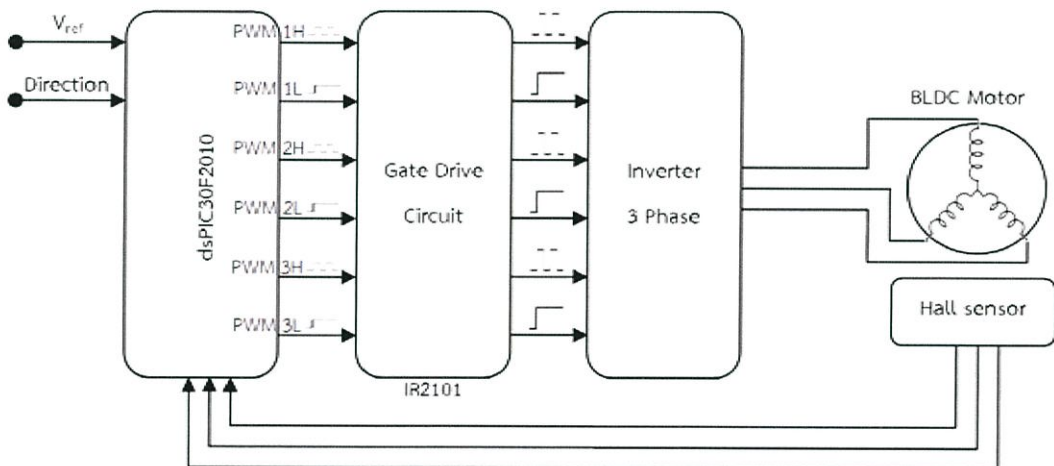


### 3.4.2.4 Flowchart การทำงานของ ATTiny85 ในฟังก์ชันการตรวจวัดระยะวัตถุ



### 3.4.3 Output Devices

อุปกรณ์ขาออกของ CPU นั้นประกอบไปด้วยจอแสดงผล LCD 16x2, แลปไฟ LED, แถบแสดงปริมาณแบตเตอรี่ และชุดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน 2 ชุด โดยตัวประมวลผลกลางจะส่งสัญญาณในรูปแบบของ PWM ที่ความถี่ 490 Hz และกรองผ่าน C Ripple ทำให้ได้เป็นไฟตรงผ่านไปให้ BLDC Motor Drive ประมวลผลเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์ BLDC ต่อไป ซึ่งสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของ BLDC Motor Drive ได้ดังนี้



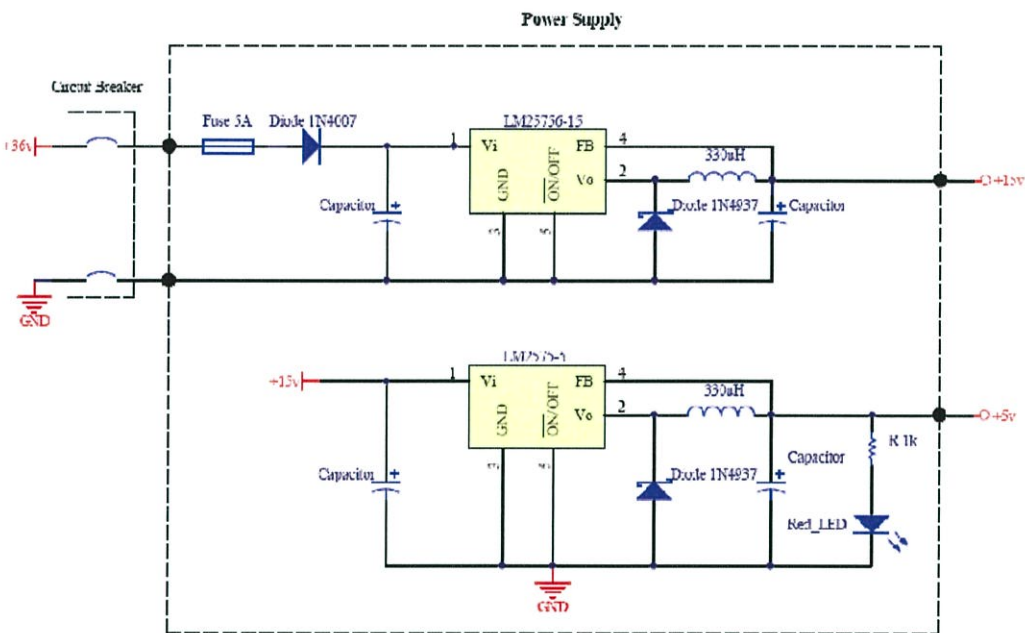
รูปที่ 3.13 Block Diagram ของการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

### 3.5 ชุดวงจรของระบบของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ

#### 3.5.1 Power Supply

วงจรไฟเลี้ยงของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ มีอินพุทเป็นแบตเตอรี่ 36 V ต่อผ่าน Circuit Breaker และมีการป้องกันคือ ป้องกันกระแสเกินโดยต่อฟิวส์ 5 A และป้องกันการต่อกลับขั้วของอินพุท โดยการต่ออนุกรมไดโอดเบอร์ 1N4007 ซึ่งสามารถทนแรงดันย้อนกลับได้ 1,000 V และมี Forward Voltage 1 V และมีการต่อตัวเก็บประจุประเภท Electrolyte Capacitor เพื่อรักษาระดับแรงดันไฟตรงและลดการกระเพื่อมของแรงดัน (Ripple Voltage)

วงจรไฟเลี้ยงมีวงจรลดทอนแรงดัน (Regulator) ให้เป็นแรงดัน 15 V<sub>dc</sub> โดยใช้ LM2576-15 ซึ่งเป็นวงจรลดทอนแรงดันแบบสวิตชิ่ง ซึ่งนำไปใช้สำหรับวงจรขับเคลื่อน และใช้ LM2575-5 ซึ่งเป็นวงจรลดทอนแรงดันแบบสวิตชิ่งเช่นกันและมีเอาต์พุตเท่ากับ 5 V นำไปใช้กับวงจรควบคุมต่างๆ และมีการต่อกับไฟ LED เพื่อแสดงผลว่าวงจรกำลังทำงานอยู่ สามารถแสดงวงจรไฟเลี้ยงได้ดังรูปที่ 3.19

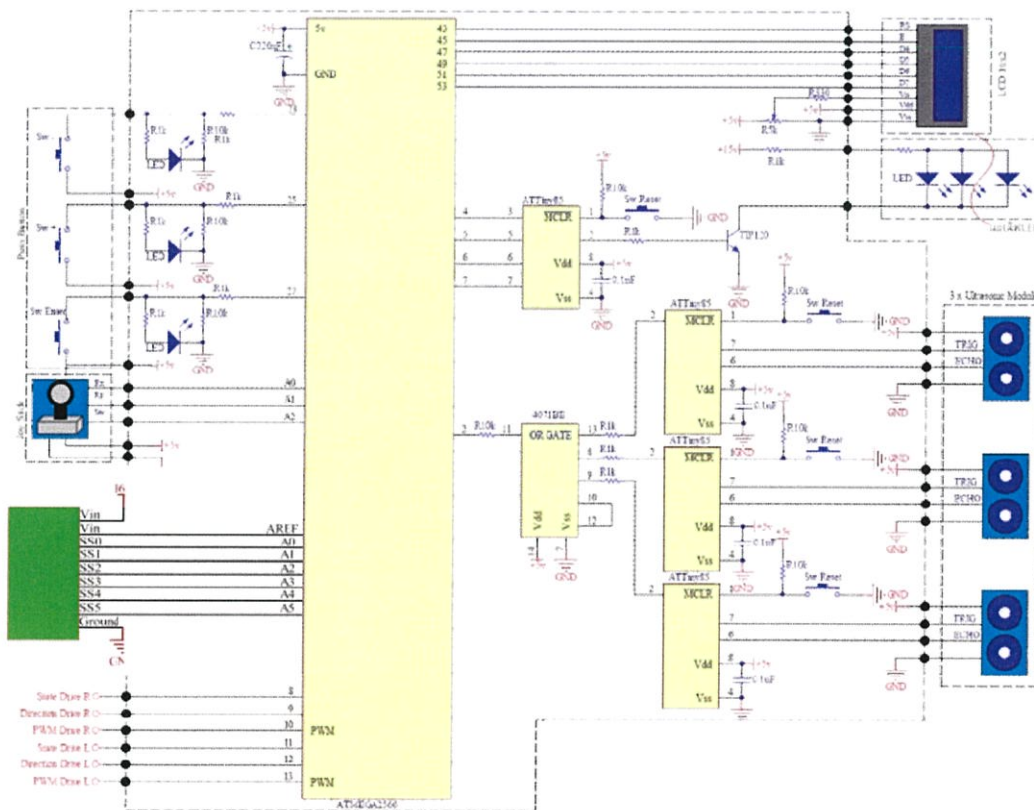


รูปที่ 3.14 Schematic ของวงจร Power Supply

### 3.5.2 CPU of AGV system

วงจรของตัวประมวลผลกลางของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติต้องประมวลผลหลายเช่น เช่น รับค่าเซนเซอร์มาเพื่อไปประมวลผลควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์, แสดงผลออกทางจอ LCD หรือตรวจจับวัตถุที่อยู่ในระยะใกล้ๆ เป็นต้น ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega2560 นั้นไม่เหมาะสมสำหรับการทำงานในลักษณะของ Multi Tasking ดังนั้นตัวประมวลผลกลางจึงเป็นการทำงานร่วมกันระหว่าง ATmega2560 กับไมโครคอนโทรลเลอร์ ATTiny85

โดย ATmega2560 ต้องวงจรเข้ากับ Push Button, Joy Stick, Proximity Sensor, BLDC Motor Drive ทั้ง 2 ชุดและจอแสดงผล LCD16x2 และ ATTiny85 ต้องวงจรเข้ากับ Ultrasonic Module 3 ตัว และผ่านวงจร OR GATE โดยใช้ไอซีเบอร์ 4071BE และให้เอาท์พุทส่งไปที่ ATmega2560 ส่วนแถบไฟ LED จะใช้ไฟ 15 V ดังนั้น ATTiny85 ซึ่งสามารถจ่ายได้แค่ 5 V ไม่สามารถจ่ายไฟให้ได้ ดังนั้นจึงใช้ ATTiny85 เป็นวงจรขับขาเบสของทรานซิสเตอร์เบอร์ TIP120 ซึ่งเป็นชนิด NPN Transistor

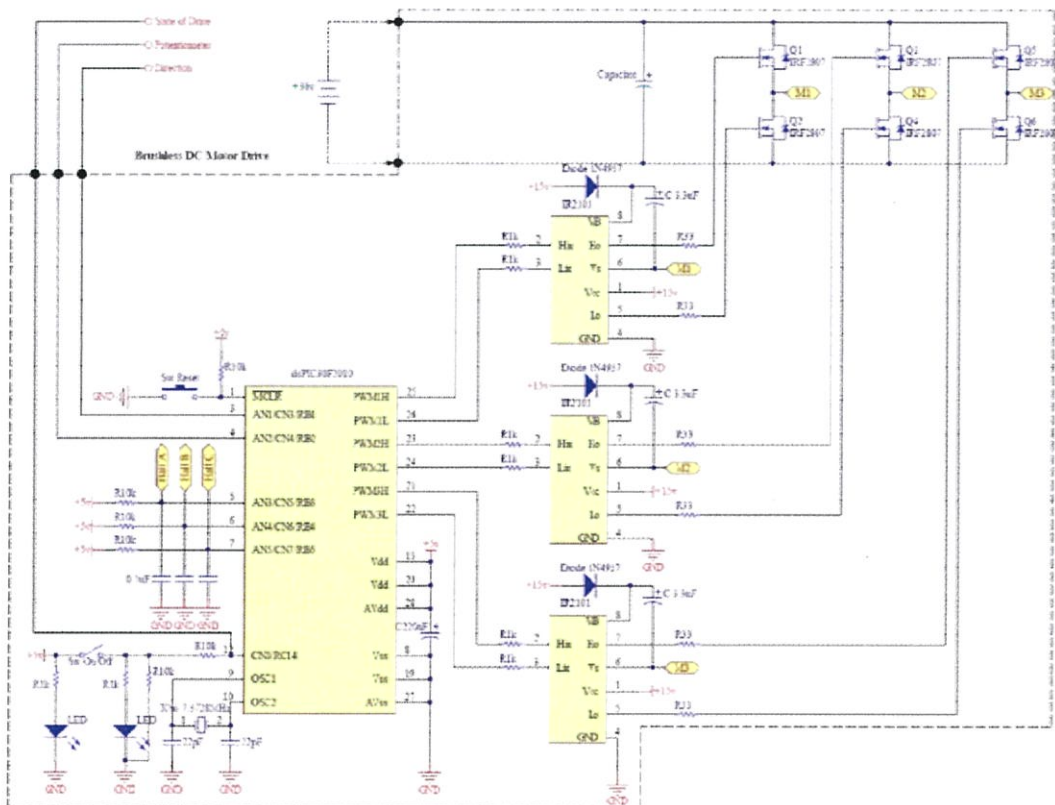


รูปที่ 3.15 Schematic ของวงจรตัวประมวลผลกลางของ AGV

### 3.5.3 BLDC Motor Drive

วงจรขับมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน หรือ BLDC Motor Drive ใช้วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟสในการควบคุมมอเตอร์ โดยใช้ Power MOSFET เบอร์ IRF2807 เป็นอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง ซึ่งมี  $V_{DS} = 75 \text{ V}$ ,  $R_{DS(on)} = 13 \text{ m}\Omega$ ,  $I_D = 82 \text{ A}$  และใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์ dsPIC30F2010 เป็นตัวควบคุมชุดขับมอเตอร์กระแสตรงชนิดไร้แปรงถ่าน โดยใช้ความถี่สวิตซ์ซึ่งที่ 20 kHz แต่เนื่องจาก dsPIC30F2010 สามารถจ่ายแรงดันออกมาได้แค่ 5 V ดังนั้นจึงต้องมีวงจรขับเกต ซึ่งใช้ไอซีเบอร์ IR2101 เป็นวงจรขับเกต

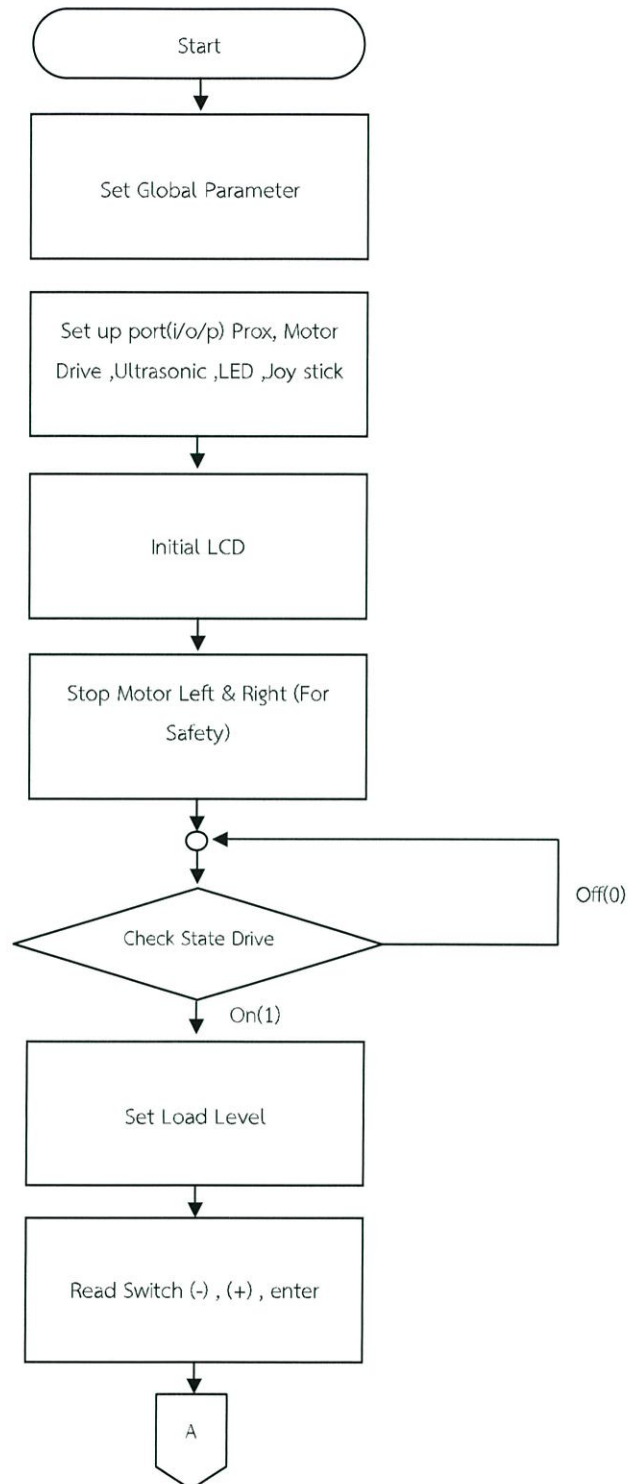
นอกจากนี้ยังมีการต่อ LED 2 หลอด เพื่อแสดงผล โดยหากหลอด LED ติด 1 หลอด หมายความว่าชุดขับยังอยู่ในสถานะปิดการใช้งานอยู่ แต่เมื่อทำการสับสวิตซ์ LED จะติด 2 หลอด แสดงว่าชุดขับพร้อมทำงานแล้ว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.21

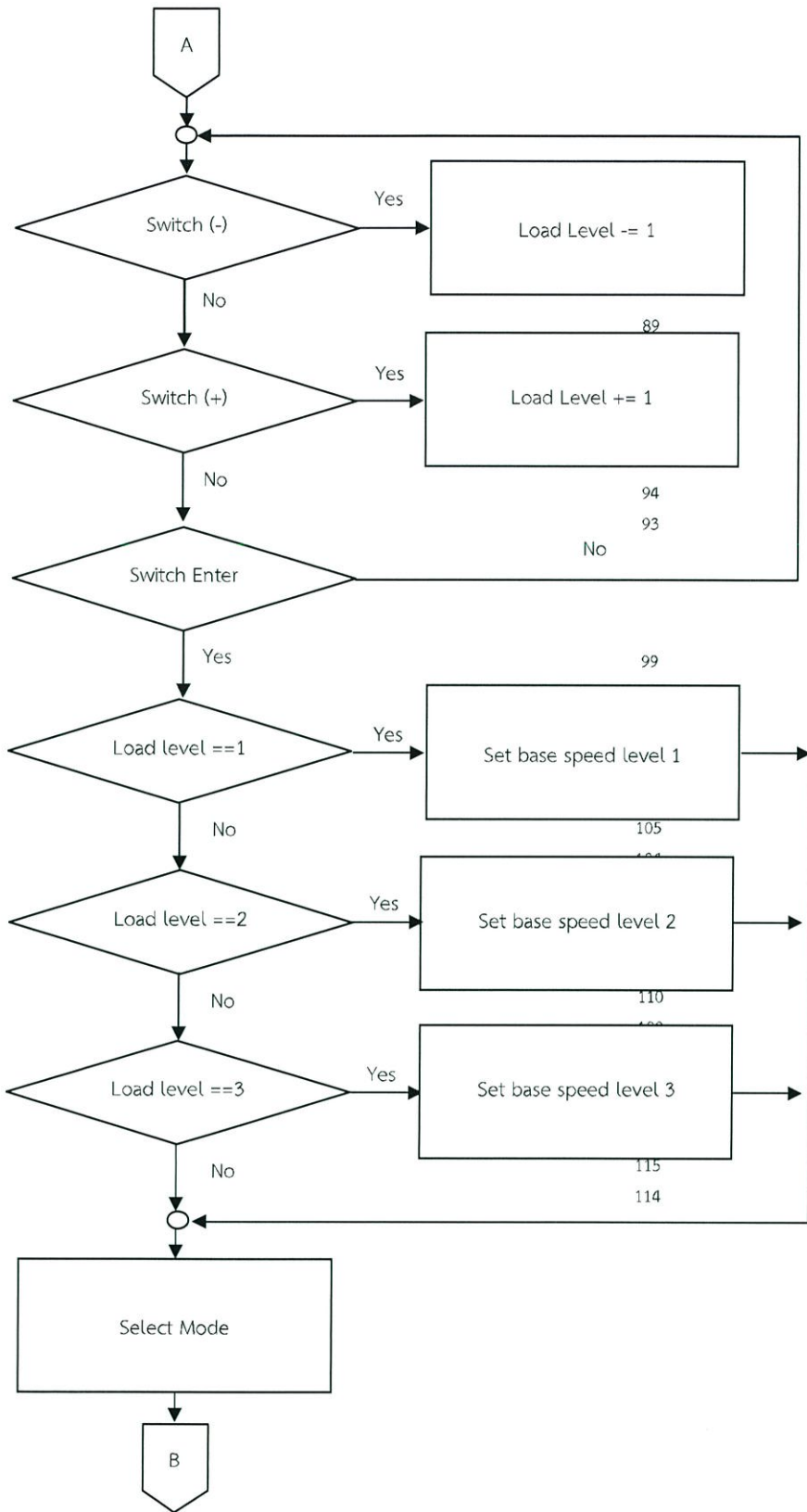


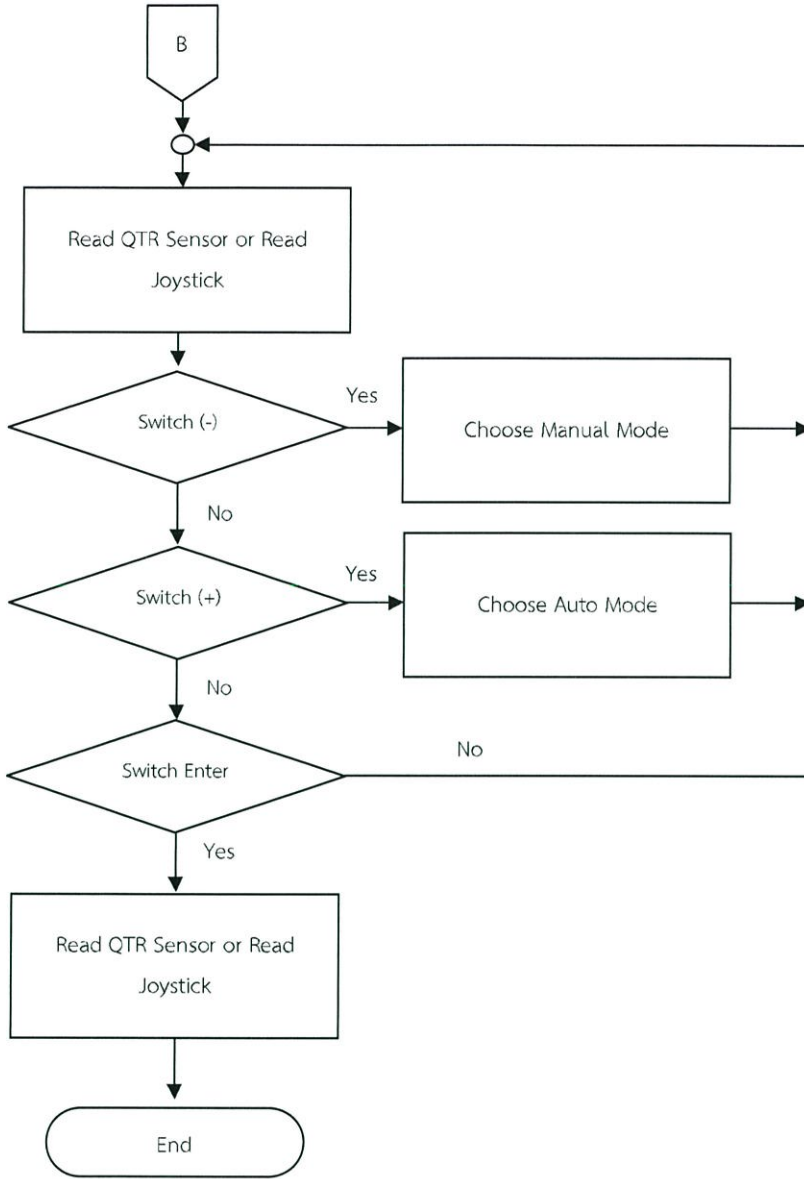
รูปที่ 3.16 Schematic ของวงจรชุดขับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

### 3.6 Algorithm ของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ

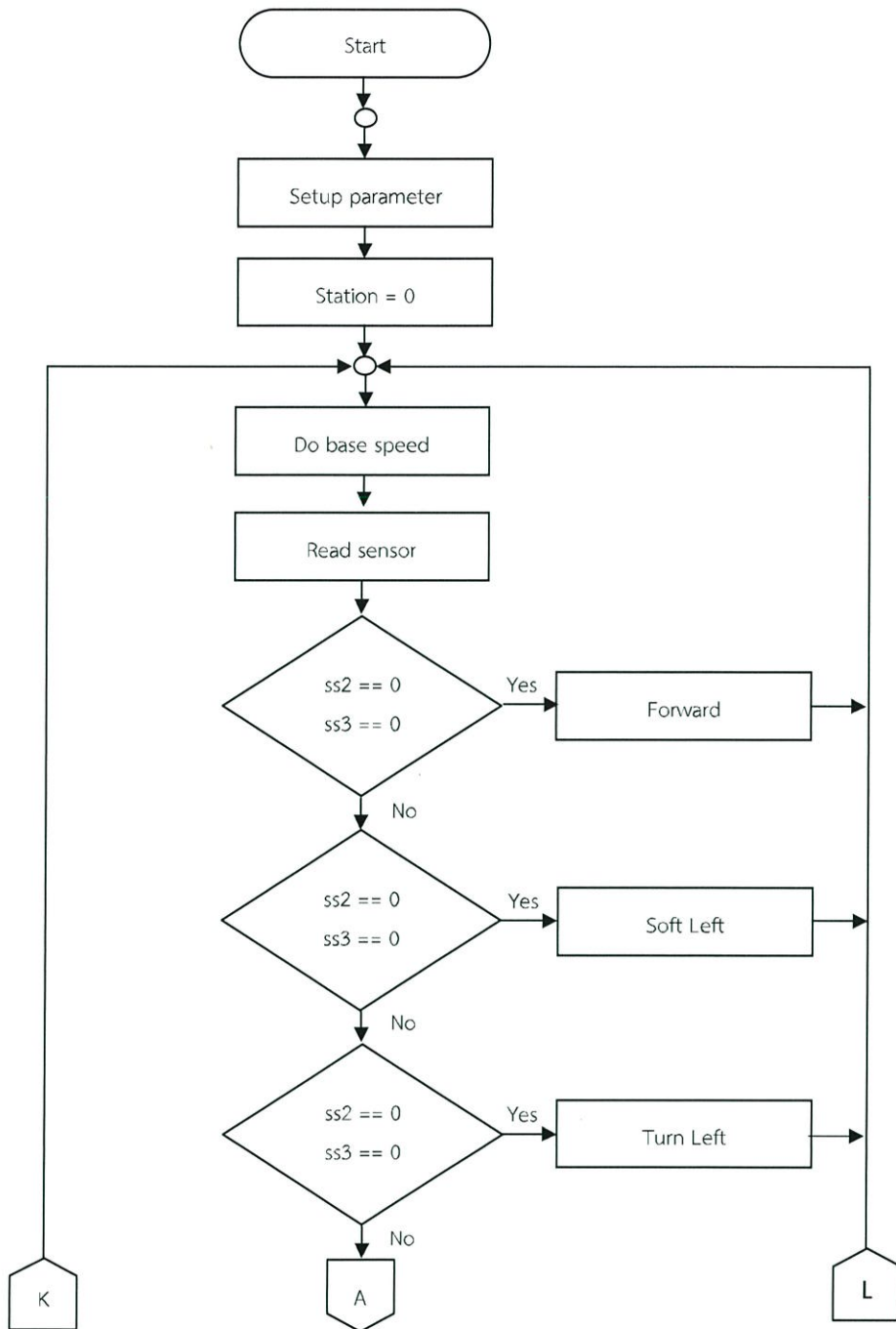
#### 3.6.1 Algorithm การ Setup AGV

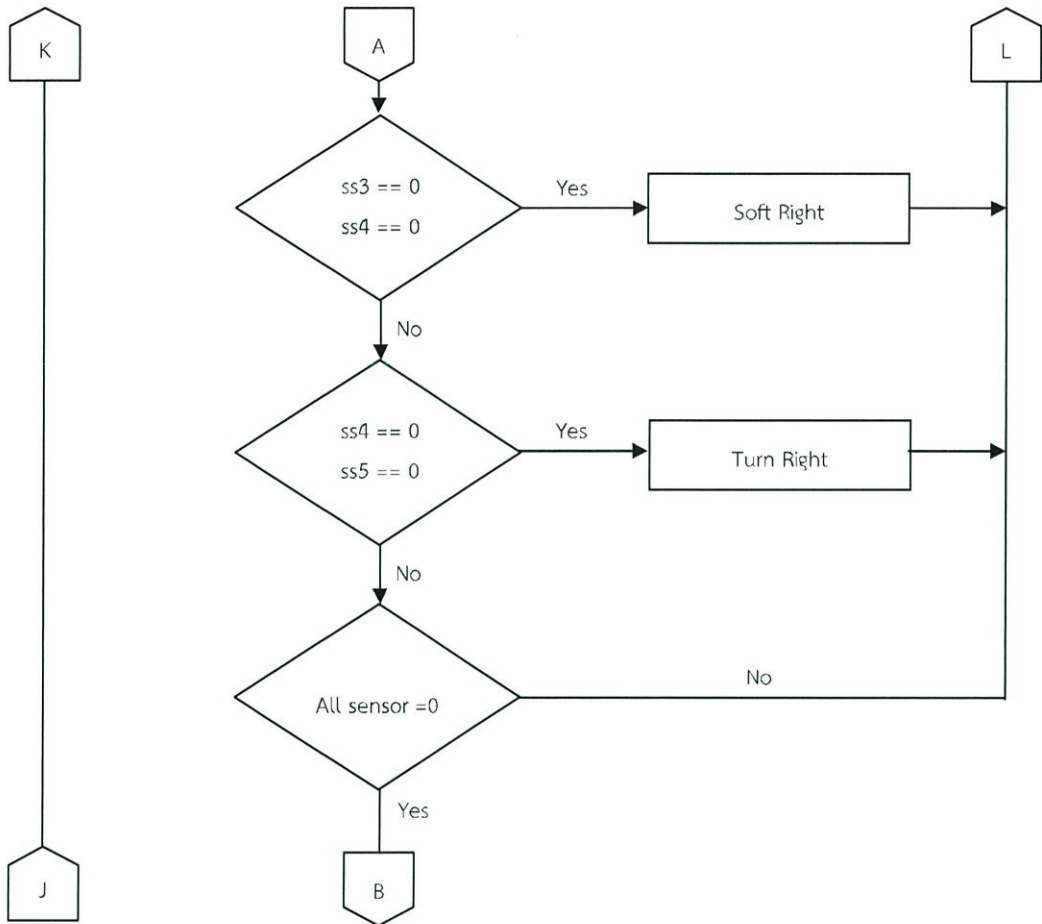


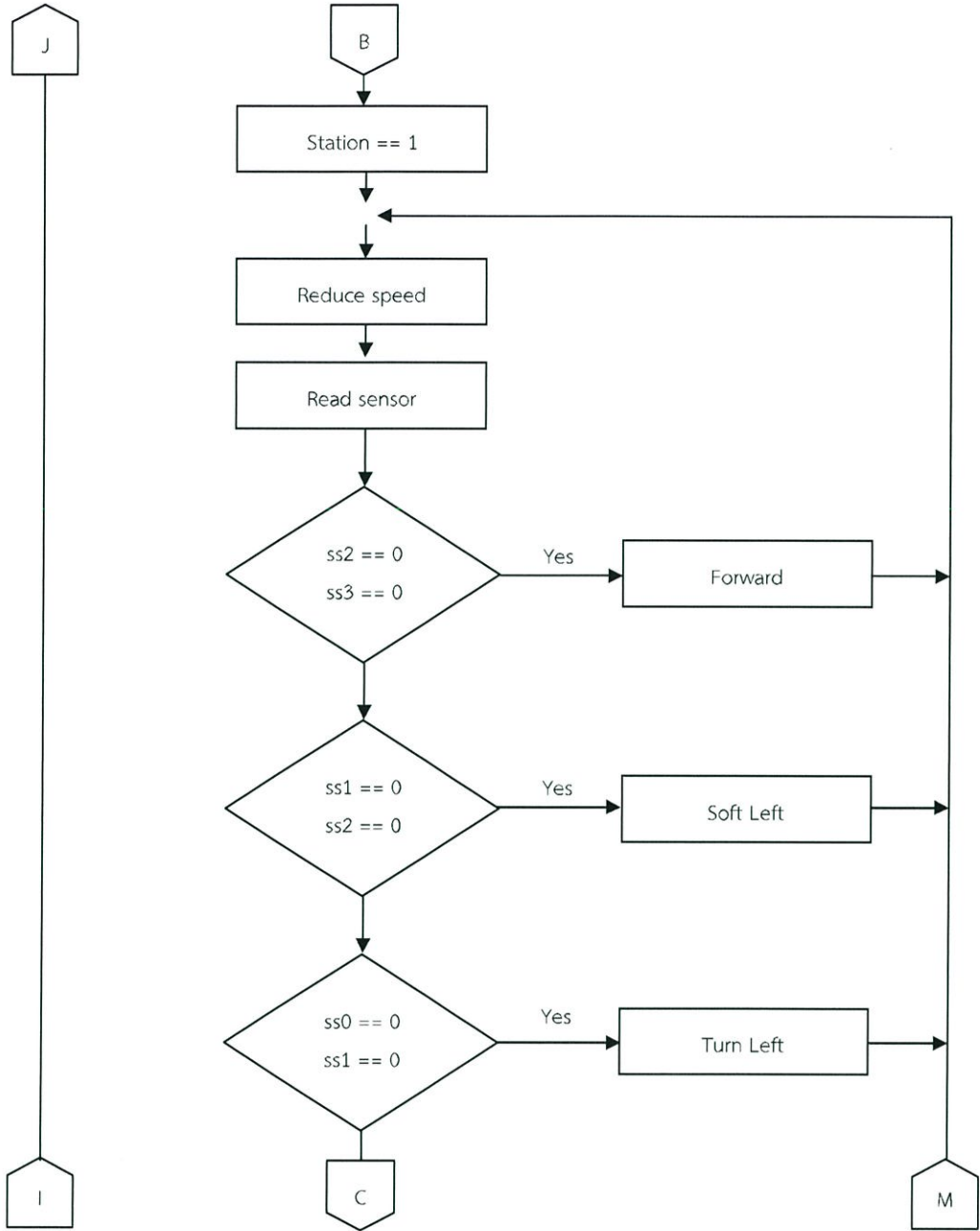


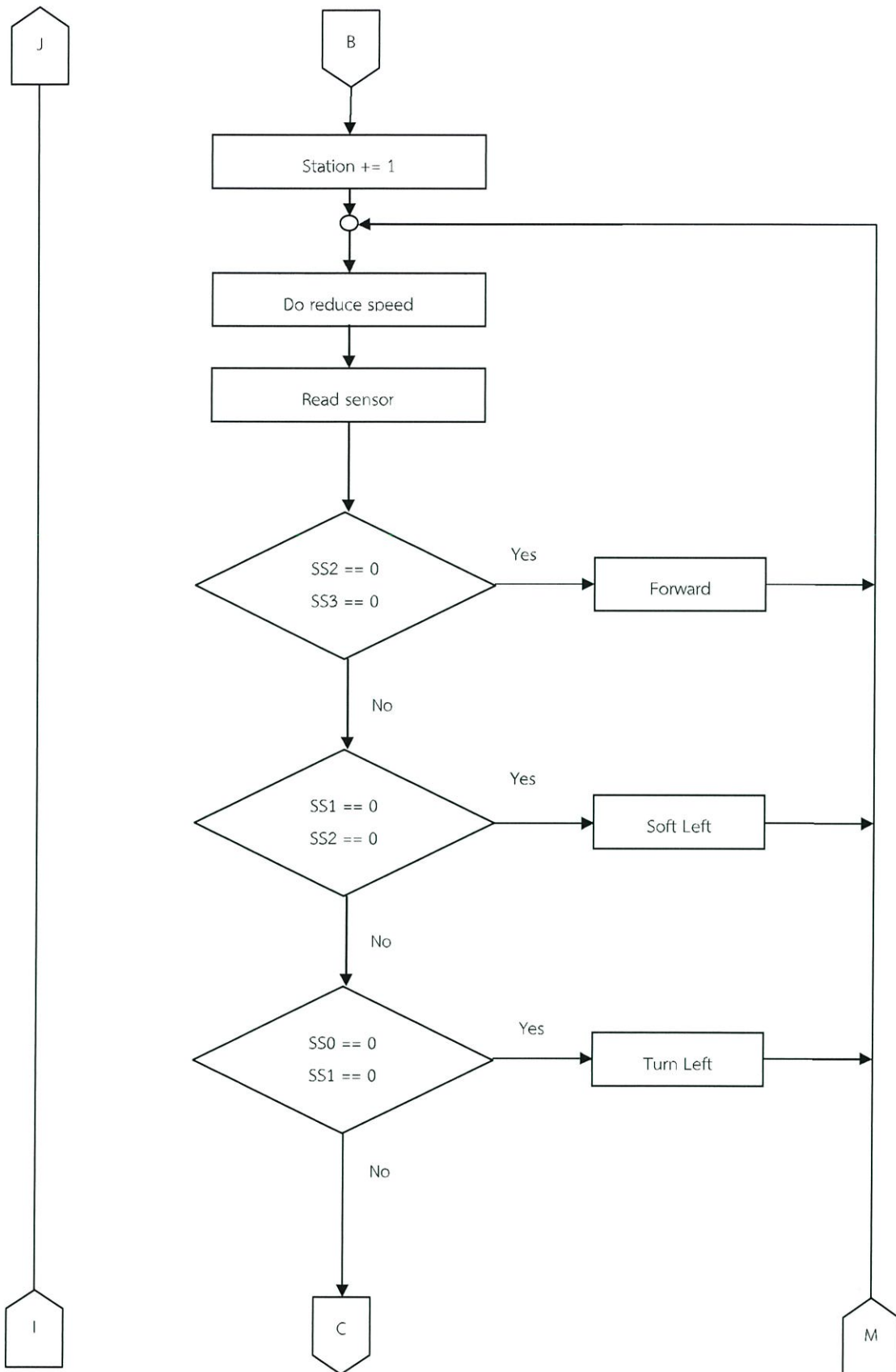


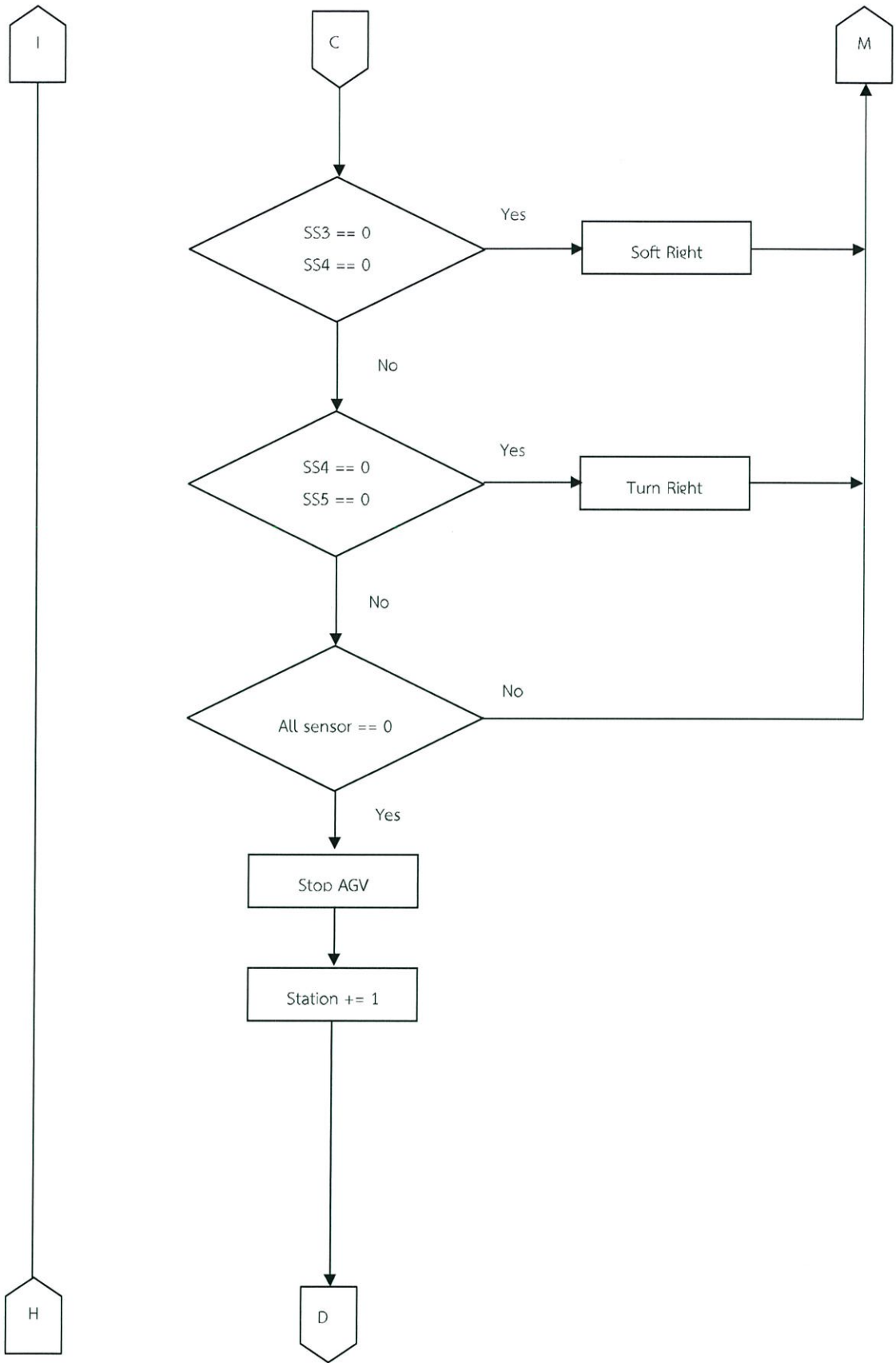
## 3.6.2 Algorithm Automatic Mode

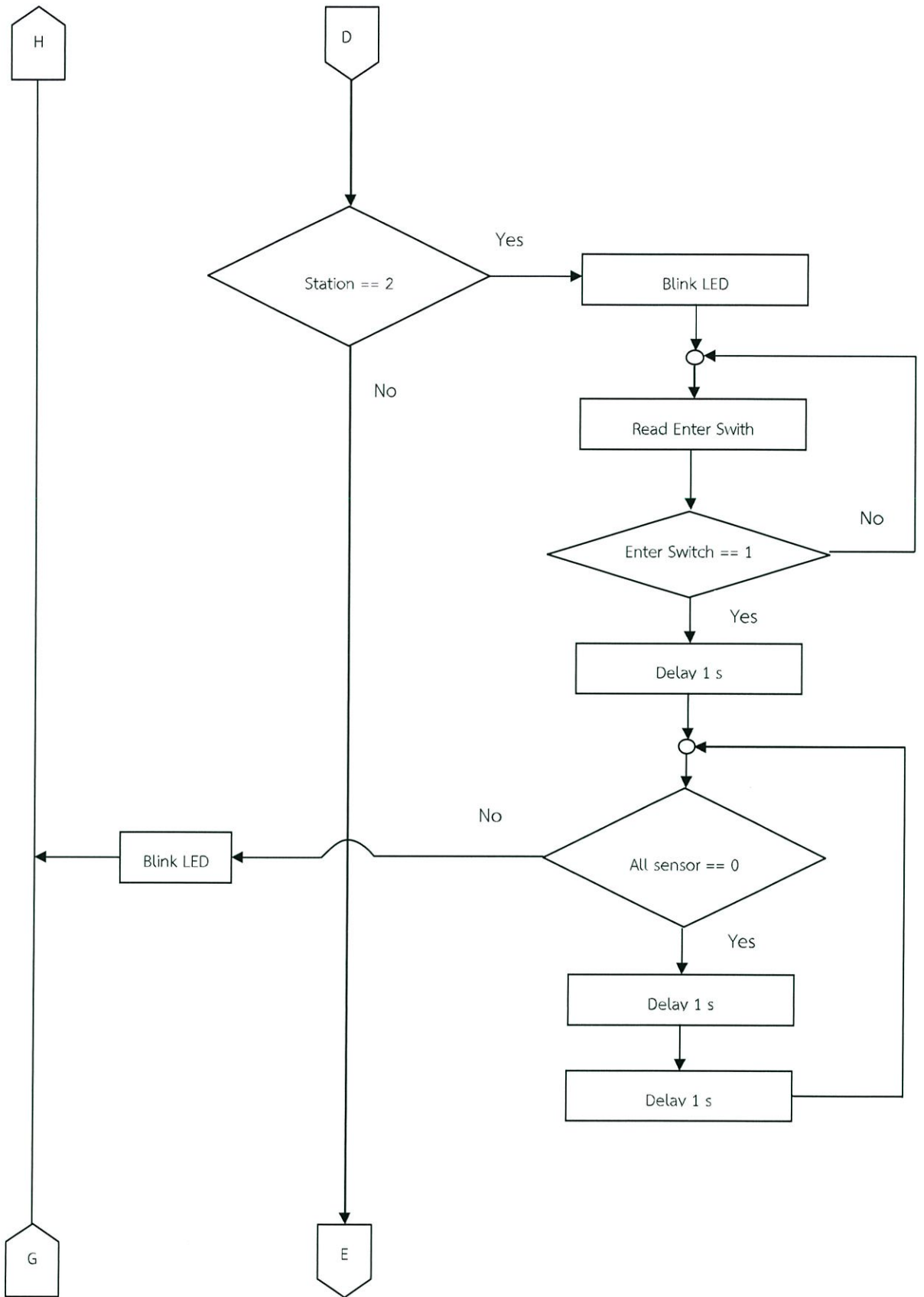


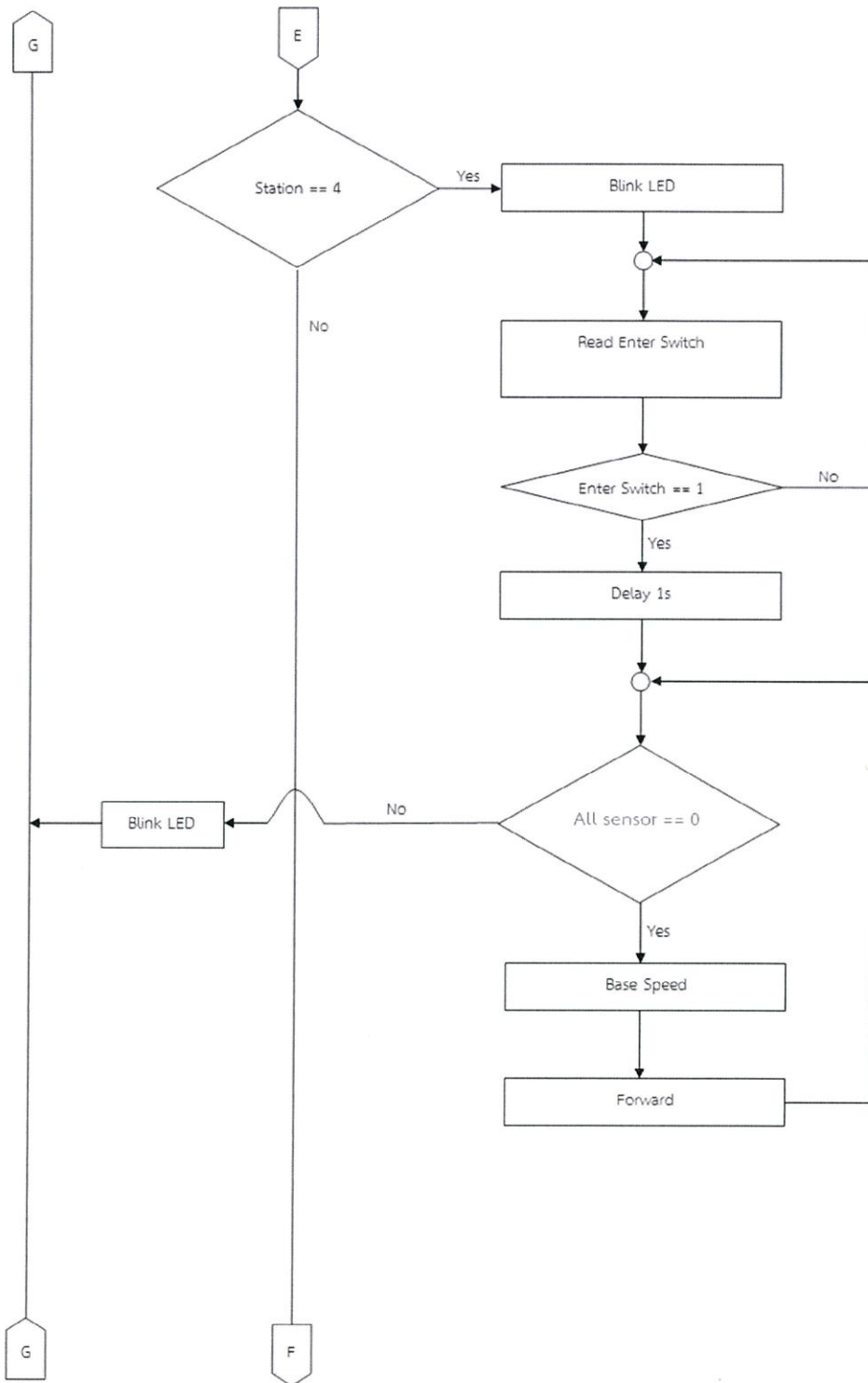


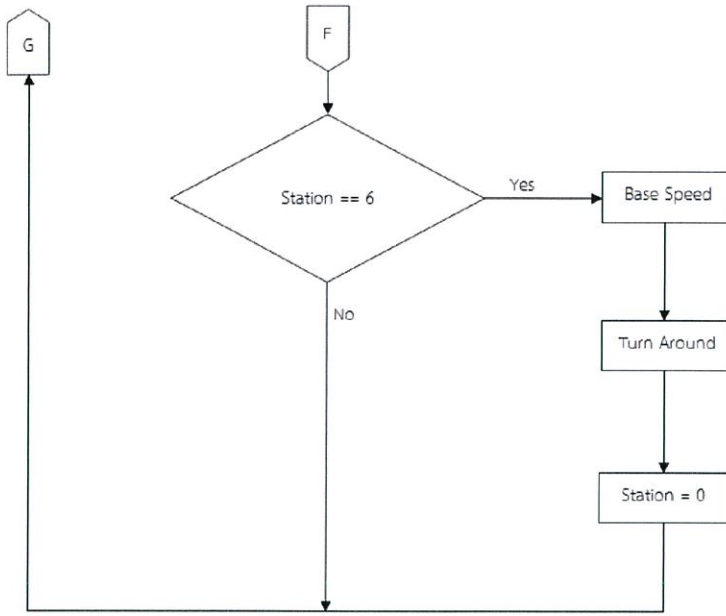




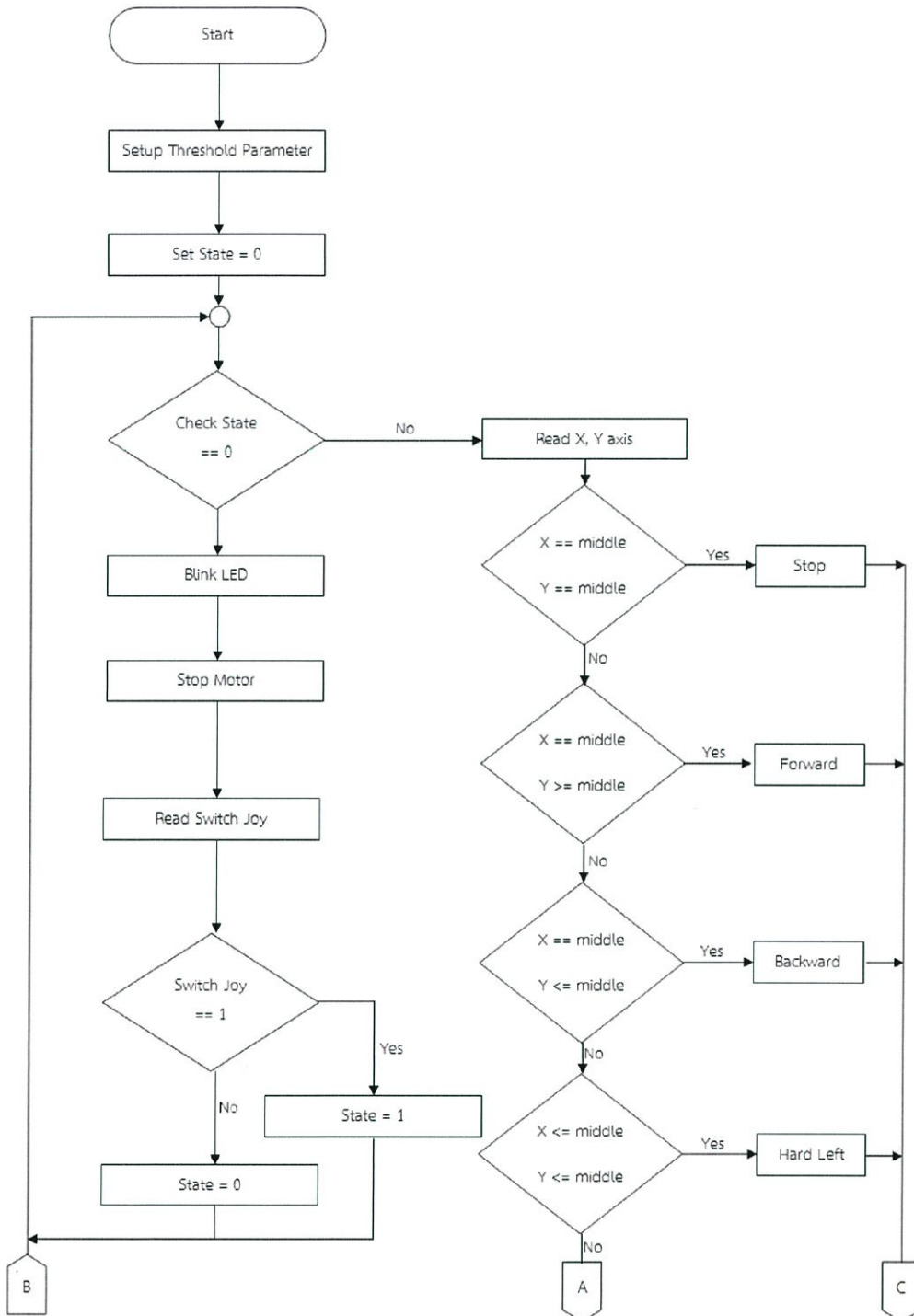


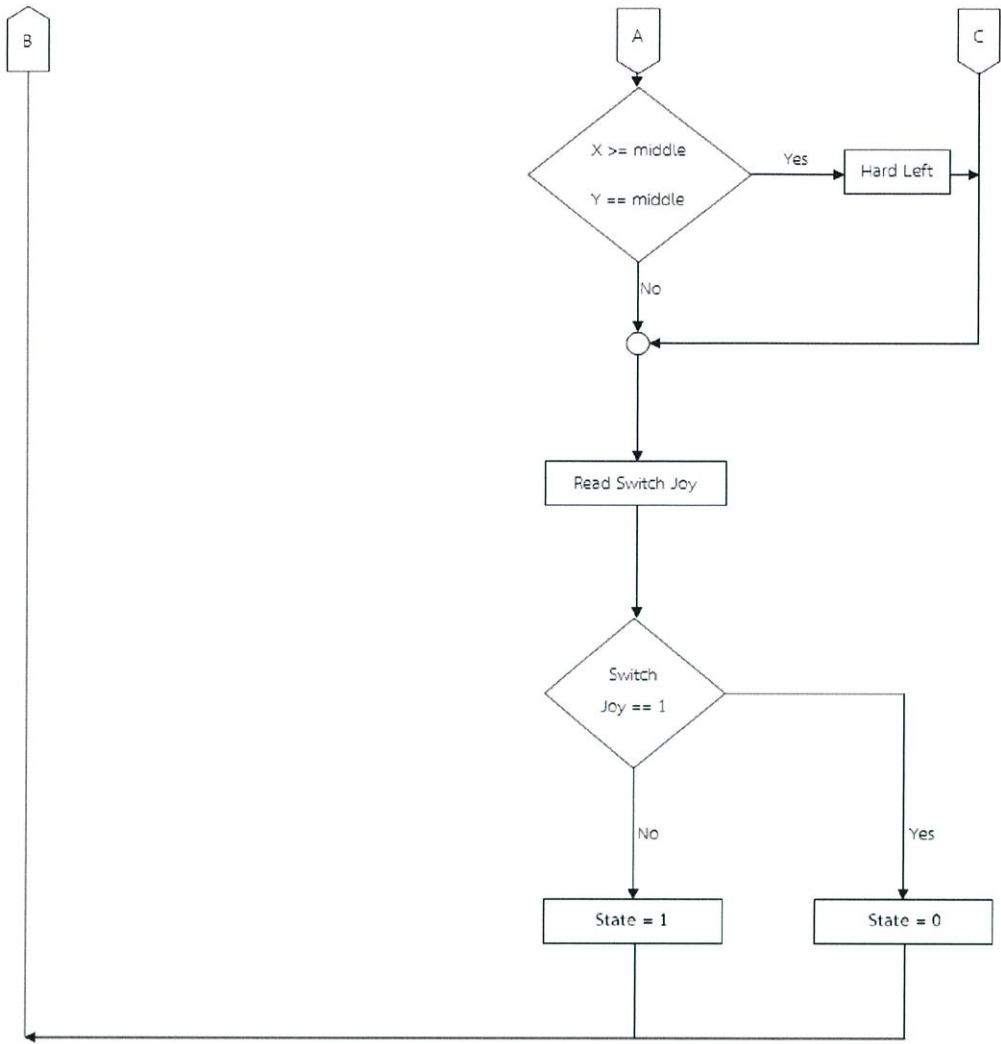




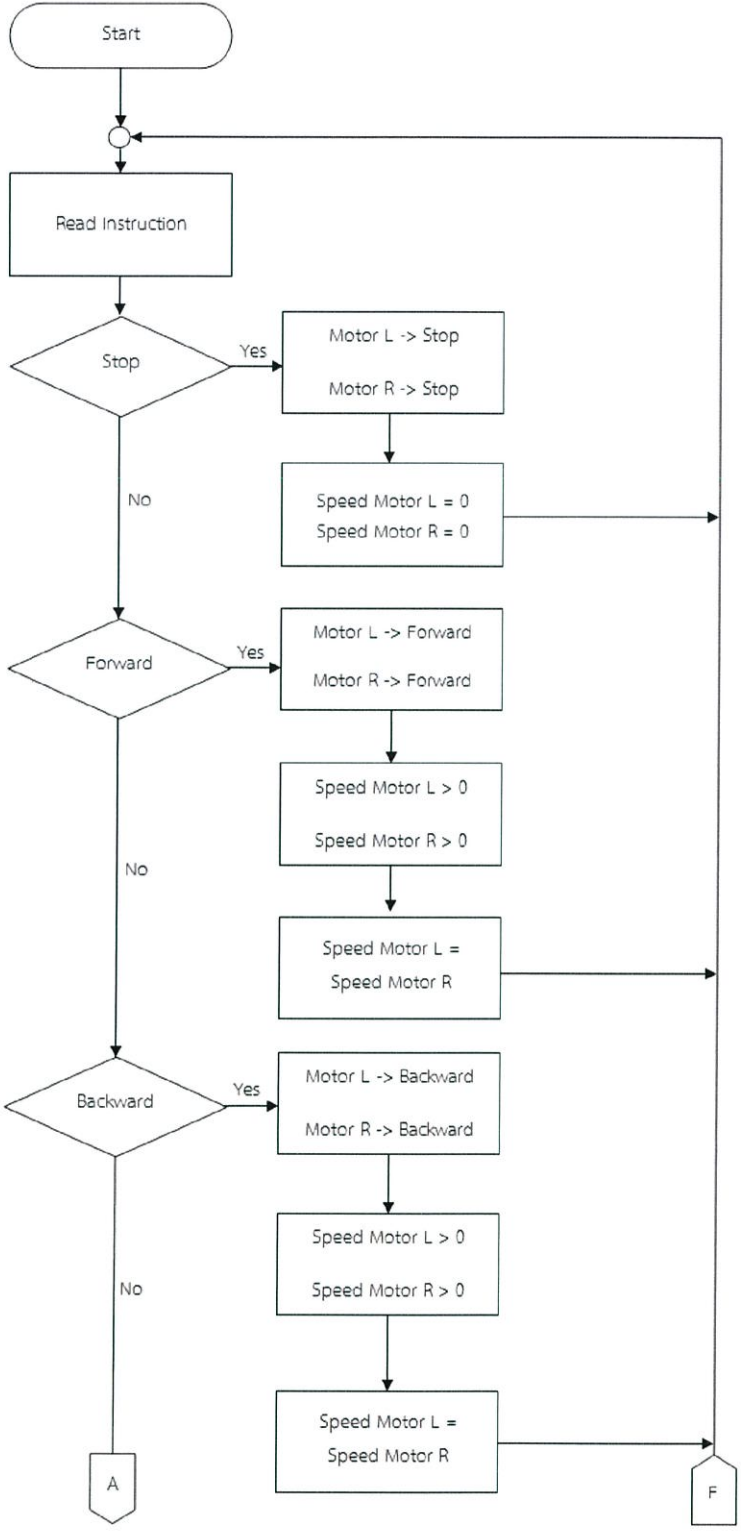


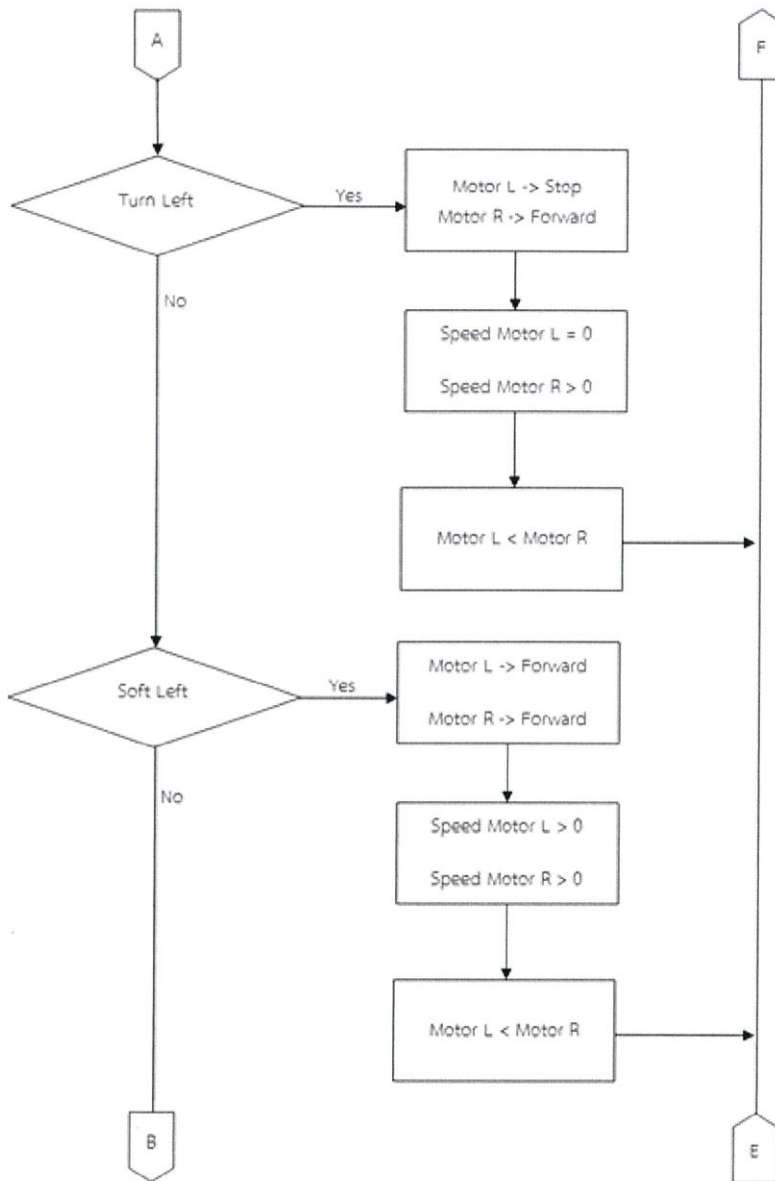
## 3.6.3 Algorithm Manual Mode

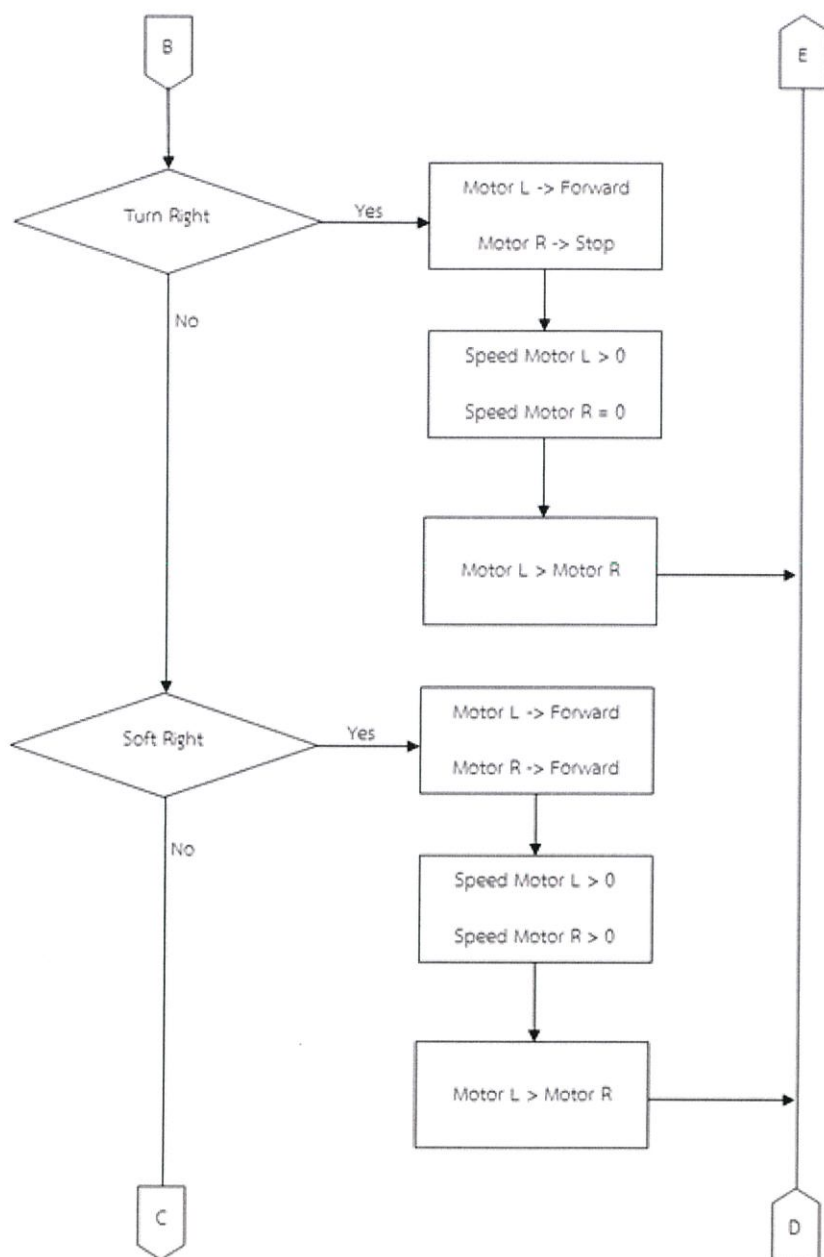


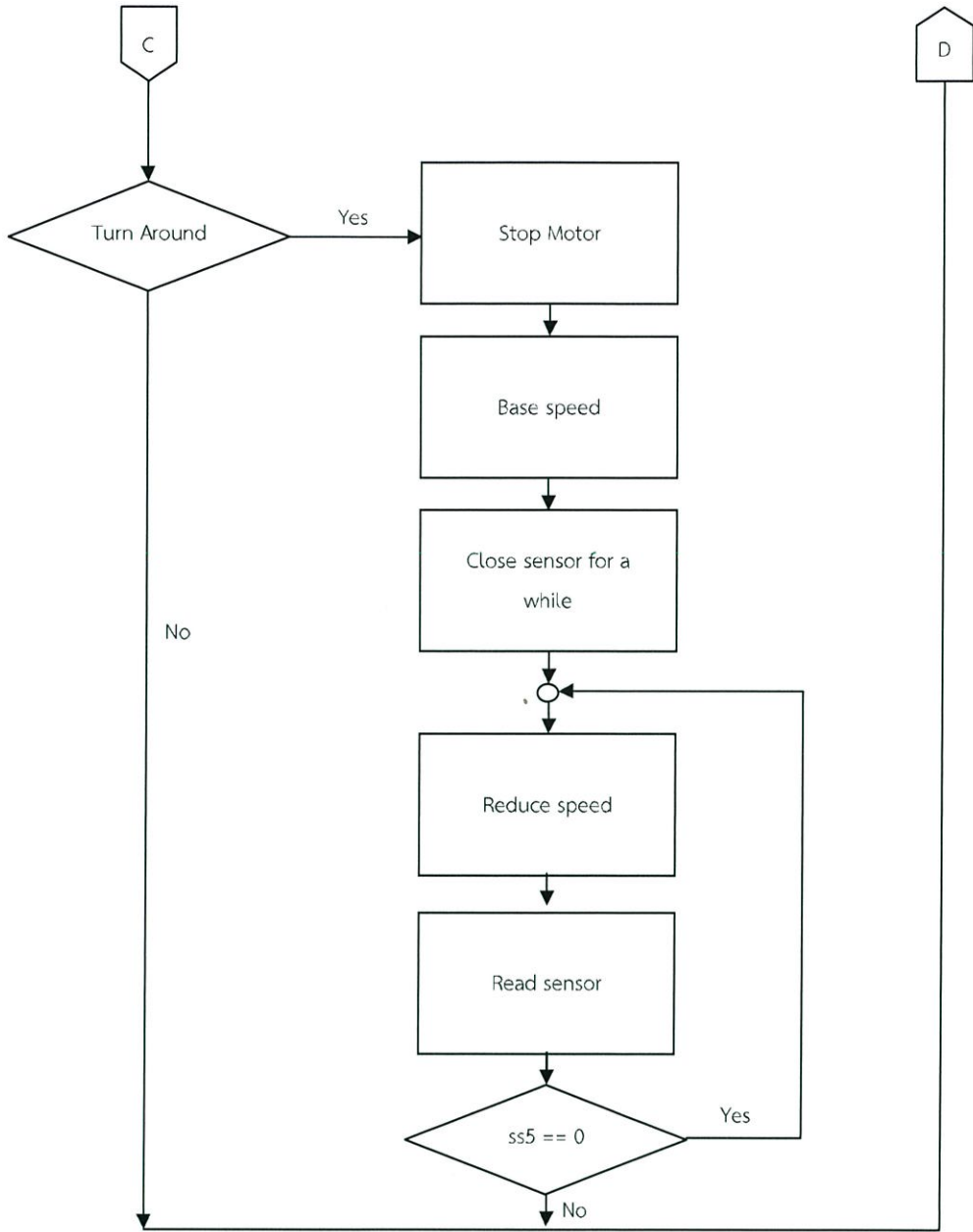


### 3.6.4 Algorithm Motion Control

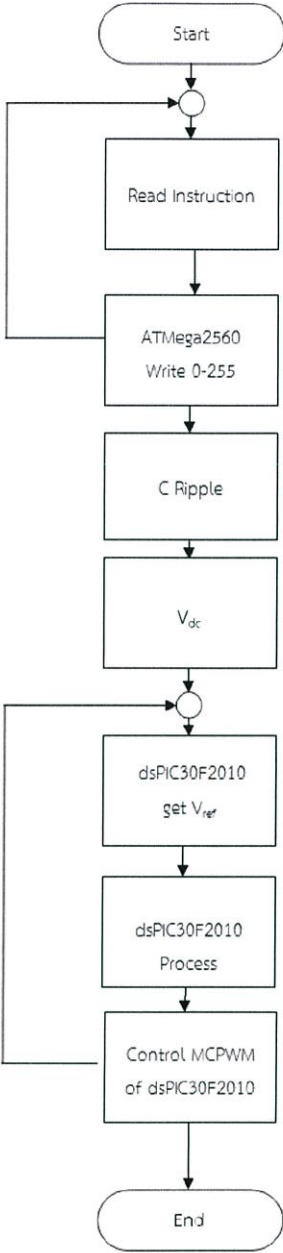




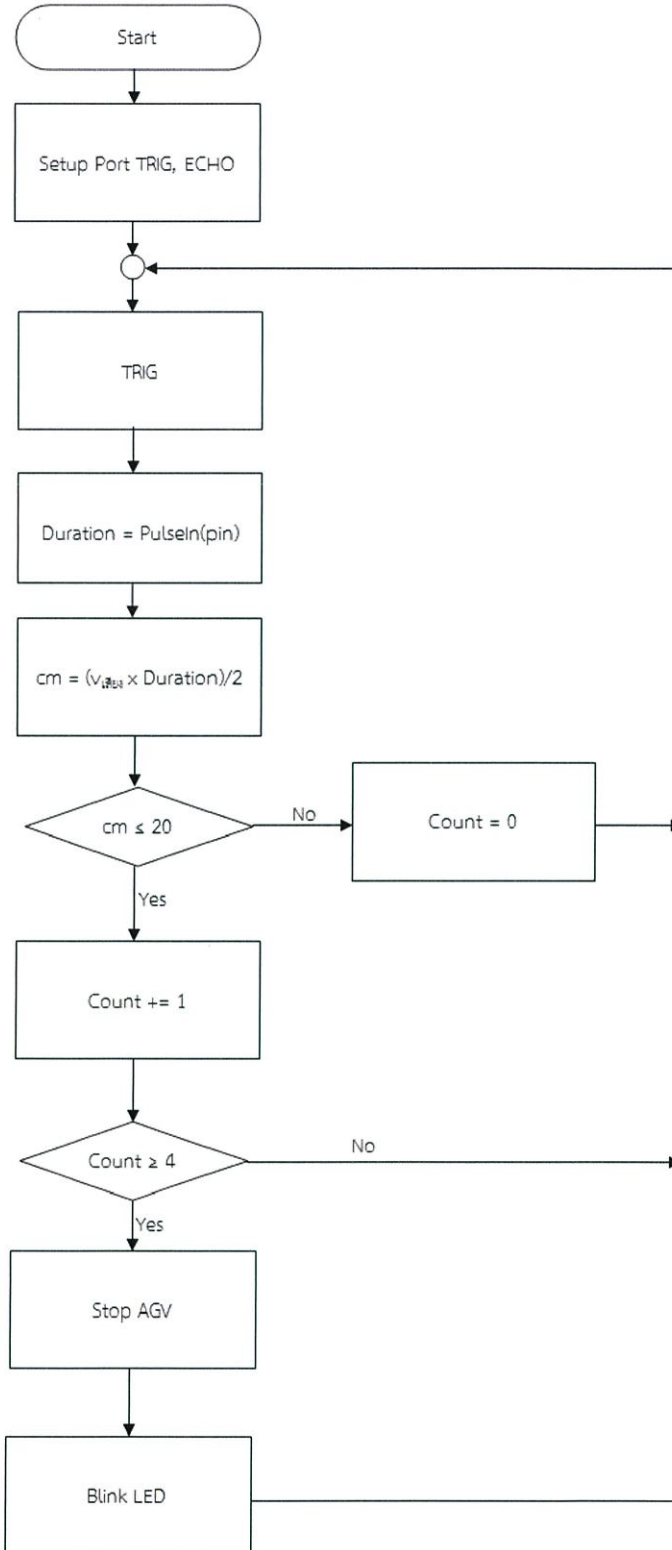




3.6.5 Algorithm Duty Cycle Control



## 3.6.6 Algorithm Distance Measure



## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการทดลองการวัดค่าความเร็วรอบมอเตอร์ที่ base speed แต่ละระดับ

จากการสังเกตเมื่อ AGV ทำงาน มีการส่ายค่อนข้างมาก จึงทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบความเร็วรอบของมอเตอร์แต่ละตัว โดยการติดเทปขาวไว้ที่ยางมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านทั้งสองตัวเพื่อเป็นจุดอ้างอิง จากนั้นจับเวลา 1 นาที แล้วนับจำนวนรอบของมอเตอร์ทั้ง 2 ตัวในเวลา 1 นาที โดยการเปลี่ยนค่า base speed ที่ป้อนจาก arduino จาก 6 ถึง 20 ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองจับความเร็ว BLDC ซ้าย และขวาที่ค่า base speed ต่างๆ

Base speed	Left (rpm)	Right (rpm)
6	53.18	41.76
7	59.50	47.00
8	67.54	51.95
9	73.62	57.42
10	80.90	61.75
11	86.33	65.10
12	91.60	70.58
13	95.49	78.77
14	98.90	92.07
15	102.27	103.45
16	105.26	111.80
17	107.46	121.50
18	110.09	131.53
19	115.02	140.08
20	115.02	149.38

จากผลการวัดความเร็วรอบที่ได้พบว่าค่าความเร็วรอบที่ base speed ต่าง มอเตอร์ตัวซ้ายและขวาของรถ มีความเร็วแตกต่างกันค่อนข้างมากซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนของชุดควบคุม ดังนั้น เพื่อให้มอเตอร์หมุนได้ความเร็วรอบที่ใกล้เคียงกันจึงทำการจับคู่ความเร็วรอบที่ใกล้เคียงกันที่ base speed ต่างๆดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงการจับคู่ base speed สำหรับโหลดระดับต่างๆของมอเตอร์ทั้งสองตัว

Load level	Left	Right
No-load	7	9
2	8	11
3	10	13
4	12	14
5	18	16

เมื่อได้ทำการจับคู่ base speed ให้กับมอเตอร์ที่การทำงานรองรับโหลดระดับต่างๆ พบว่ารถ AGV นั้นมีการทำงานที่ดีขึ้น และสามารถวิ่งในทางตรงได้ดียิ่งขึ้น มีสายน้อยลงอย่างเห็นได้ชัด

#### 4.2 ผลการทดลองวัด energy consumption ของ inductive proximity sensor

ทำการทดลองหา energy consumption ของ inductive proximity sensor LJ18A3-8-Z/BX ซึ่งมีพิคัดแรงดันใช้งานที่ 6-30V โดยใช้ dc supply จ่ายแรงดัน 15V ให้กับ sensor แล้วอ่านค่ากระแส จากนั้นคำนวณ energy consumption ของ sensor ทั้ง 6 ตัวซึ่งจะทำการทดลอง sensor 2 สถานะ คือ สภาวะปกติ และ สภาวะขณะตรวจพบแถบโลหะ แล้วทำการรวมพลังงานที่ต้องใช้รวม ผลการทดลองได้ดังตาราง 4.3

ตารางที่ 4.3 energy consumption ของเซนเซอร์แต่ละตัวที่แรงดัน 15V

Sensor	stanby		operating	
	current (mA)	power(mW)	current (mA)	power(mW)
1	2.42	36.3	3.89	58.35
2	2.38	35.7	3.83	57.45
3	2.37	35.55	3.84	57.6
4	2.37	35.55	3.88	58.2
5	2.4	36	3.87	58.05
6	2.36	35.4	3.87	58.05

รวมทั้ง 6 ตัว      Standby mode      14.3 mA      214.50 mW  
 Operating mode      23.18 mA      347.70 mW

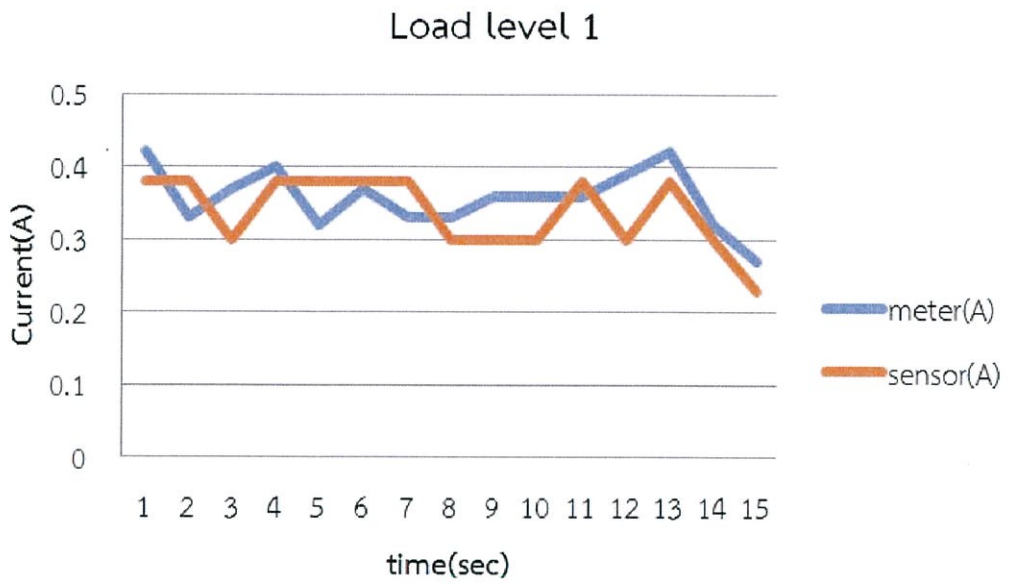
#### 4.3 ผลการทดลองหาค่าพลังงานที่ใช้ของรถ และ ความเที่ยงตรงในการอ่านค่าของ sensor

ขั้นตอนการทำการทดลองโดยการอ่านค่าที่ได้จาก voltage sensor และ current sensor ที่วัดแรงดัน และกระแสของแบตเตอรี่ผ่านโปรแกรม arduino ที่ตัว arduino nano328 และ นำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากมัลติมิเตอร์โดยตรง เพื่อตรวจสอบว่าค่าที่วัดได้จาก sensor สามารถนำมาใช้แสดงผลแบตเตอรี่ได้จริงและเที่ยงตรงหรือไม่โดยทำการเปรียบเทียบสำหรับโหลดทั้ง 5 ระดับ

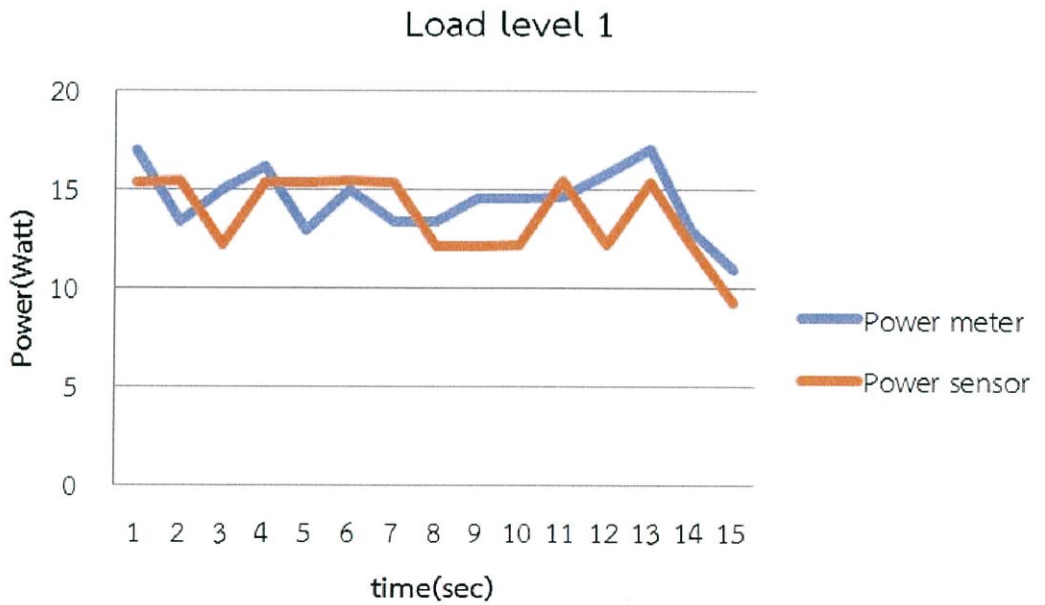
จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่า กระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้า ที่ sensor อ่านค่าได้มีความใกล้เคียงกับค่าที่มิเตอร์วัดได้ โดยผลค่าที่ได้สำหรับโหลดแต่ละระดับเปรียบเทียบกันระหว่างมิเตอร์และ sensor มีดังนี้

ตารางที่4.4 เปรียบเทียบการอ่านค่าสำหรับ no-load

time(second)	meter(A)	sensor(A)	meter (V)	sensor (V)	Power meter (W)	Power sensor (W)
1	0.42	0.38	40.4	40.3	16.968	15.314
2	0.33	0.38	40.5	40.5	13.365	15.39
3	0.37	0.3	40.5	40.5	14.985	12.15
4	0.4	0.38	40.4	40.3	16.16	15.314
5	0.32	0.38	40.4	40.3	12.928	15.314
6	0.37	0.38	40.5	40.5	14.985	15.39
7	0.33	0.38	40.4	40.3	13.332	15.314
8	0.33	0.3	40.4	40.3	13.332	12.09
9	0.36	0.3	40.4	40.3	14.544	12.09
10	0.36	0.3	40.4	40.5	14.544	12.15
11	0.36	0.38	40.5	40.5	14.58	15.39
12	0.39	0.3	40.5	40.5	15.795	12.15
13	0.42	0.38	40.5	40.3	17.01	15.314
14	0.32	0.3	40.4	40.5	12.928	12.15
15	0.27	0.23	40.5	40.3	10.935	9.269



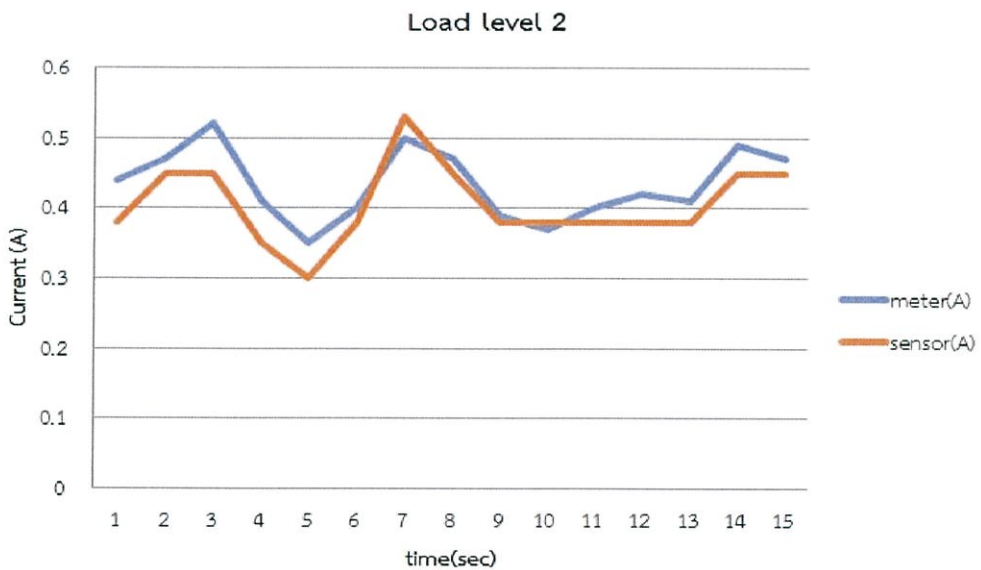
รูปที่ 4.1เปรียบเทียบการอ่านค่ากระแสในสภาวะ no-load



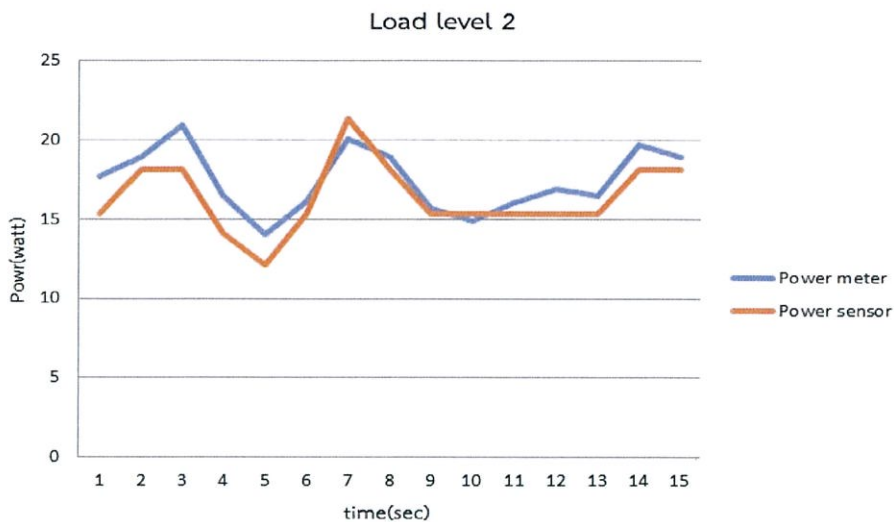
รูปที่ 4.2เปรียบเทียบการอ่านค่ากำลังไฟฟ้าในสภาวะ no-load

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบการอ่านค่าสำหรับ load 20 kg

time(second)	meter(A)	sensor(A)	meter (V)	sensor (V)	Power meter (W)	Power sensor (W)
1	0.44	0.38	40.3	40.3	17.732	15.314
2	0.47	0.45	40.2	40.3	18.894	18.135
3	0.52	0.45	40.3	40.3	20.956	18.135
4	0.41	0.35	40.3	40.3	16.523	14.105
5	0.35	0.3	40.2	40.3	14.07	12.09
6	0.4	0.38	40.3	40.3	16.12	15.314
7	0.5	0.53	40.2	40.3	20.1	21.359
8	0.47	0.45	40.3	40.3	18.941	18.135
9	0.39	0.38	40.3	40.3	15.717	15.314
10	0.37	0.38	40.3	40.3	14.911	15.314
11	0.4	0.38	40.2	40.3	16.08	15.314
12	0.42	0.38	40.3	40.3	16.926	15.314
13	0.41	0.38	40.3	40.3	16.523	15.314
14	0.49	0.45	40.2	40.3	19.698	18.135
15	0.47	0.45	40.3	40.3	18.941	18.135



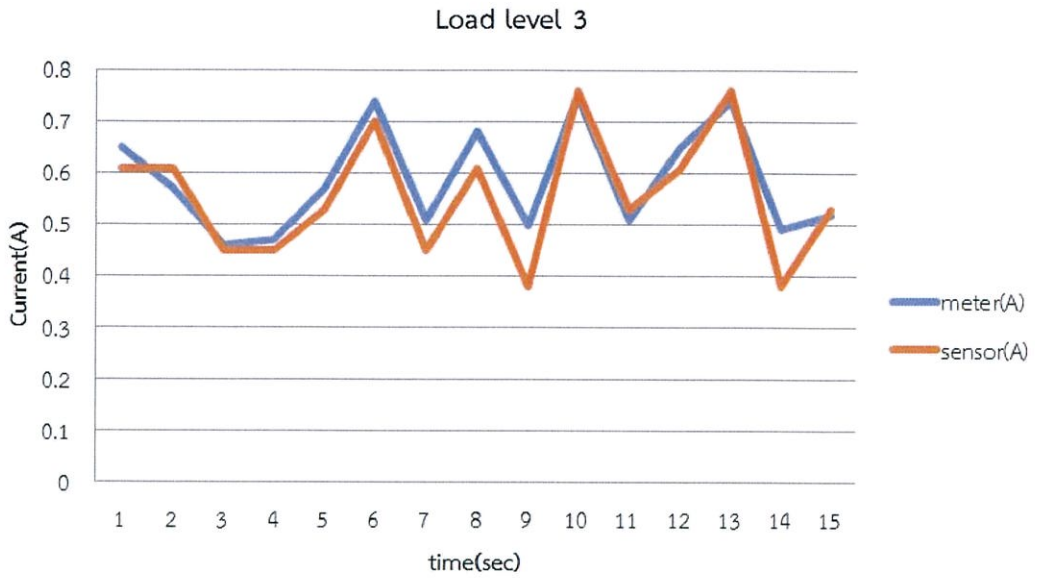
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบการอ่านค่ากระแสเมื่อใส่โหลด 20 kg



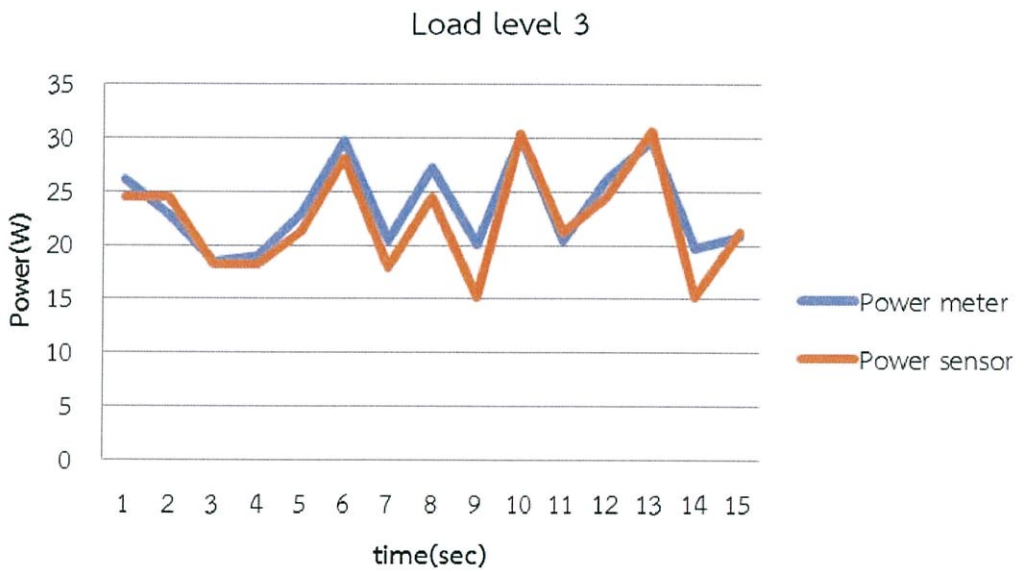
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบการอ่านค่ากำลังไฟฟ้าเมื่อใส่โหลด 20 kg

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบการอ่านค่าสำหรับ load 40 kg

time(second)	meter(A)	sensor(A)	meter (V)	sensor (V)	Power meter (W)	Power sensor (W)
1	0.65	0.61	40.1	40.1	26.065	24.461
2	0.57	0.61	40.1	40.1	22.857	24.461
3	0.46	0.45	40.2	40.3	18.492	18.135
4	0.47	0.45	40.2	40.3	18.894	18.135
5	0.57	0.53	40.2	40.3	22.914	21.359
6	0.74	0.7	40.1	40.1	29.674	28.07
7	0.51	0.45	40	39.9	20.4	17.955
8	0.68	0.61	40.1	40.1	27.268	24.461
9	0.5	0.38	40.1	40.1	20.05	15.238
10	0.75	0.76	40.1	39.9	30.075	30.324
11	0.51	0.53	40	40.1	20.4	21.253
12	0.65	0.61	40.1	40.1	26.065	24.461
13	0.74	0.76	40.2	40.3	29.748	30.628
14	0.49	0.38	40.1	40.1	19.649	15.238
15	0.52	0.53	40.1	40.1	20.852	21.253



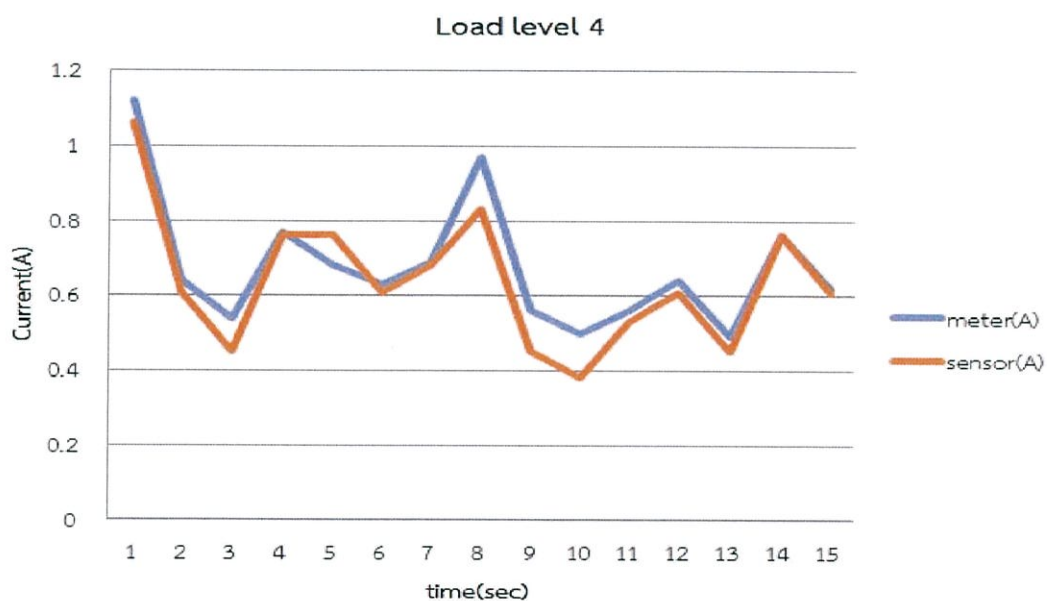
รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบการอ่านค่ากระแสเมื่อใส่โหลด 40 kg



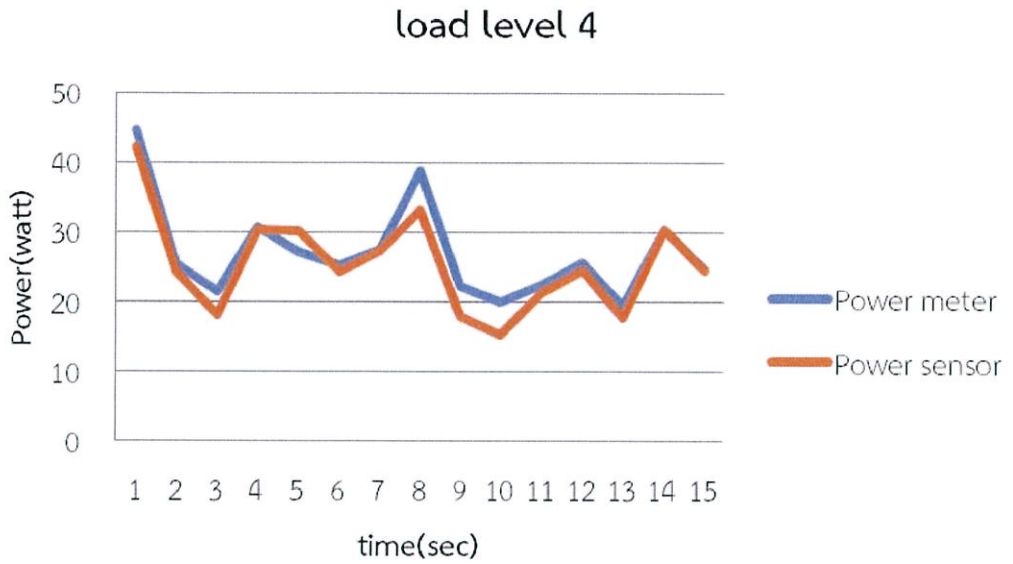
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบการอ่านค่ากำลังไฟฟ้าเมื่อใส่โหลด 40 kg

ตารางที่ 4.7เปรียบเทียบการอ่านค่าสำหรับ load 60 kg

time(second)	meter(A)	sensor(A)	meter (V)	sensor (V)	Power meter (W)	Power sensor (W)
1	1.12	1.06	39.9	39.9	44.688	42.294
2	0.64	0.61	40	40.1	25.6	24.461
3	0.54	0.45	40.1	40.3	21.654	18.135
4	0.77	0.76	40.1	40.1	30.877	30.476
5	0.68	0.76	40	39.9	27.2	30.324
6	0.63	0.61	40.1	40.1	25.263	24.461
7	0.69	0.68	40.1	40.3	27.669	27.404
8	0.97	0.83	40.1	40.1	38.897	33.283
9	0.56	0.45	40	39.9	22.4	17.955
10	0.5	0.38	40.1	40.3	20.05	15.314
11	0.56	0.53	40.2	40.3	22.512	21.359
12	0.64	0.61	40.2	40.3	25.728	24.583
13	0.49	0.45	39.8	39.7	19.502	17.865
14	0.76	0.76	40	40.1	30.4	30.476
15	0.62	0.61	40.1	40.3	24.862	24.583



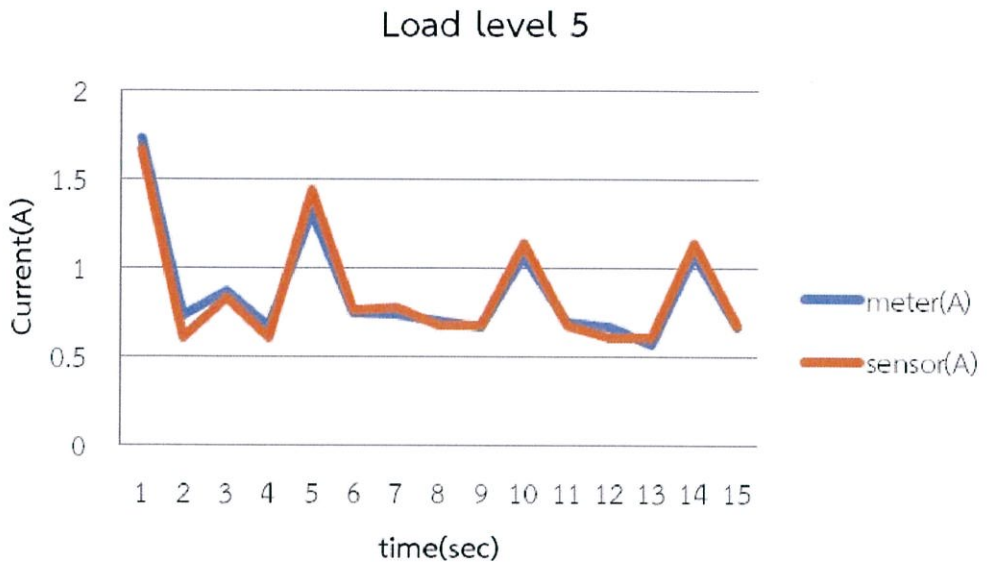
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบการอ่านค่ากระแสเมื่อใส่โหลด 60 kg



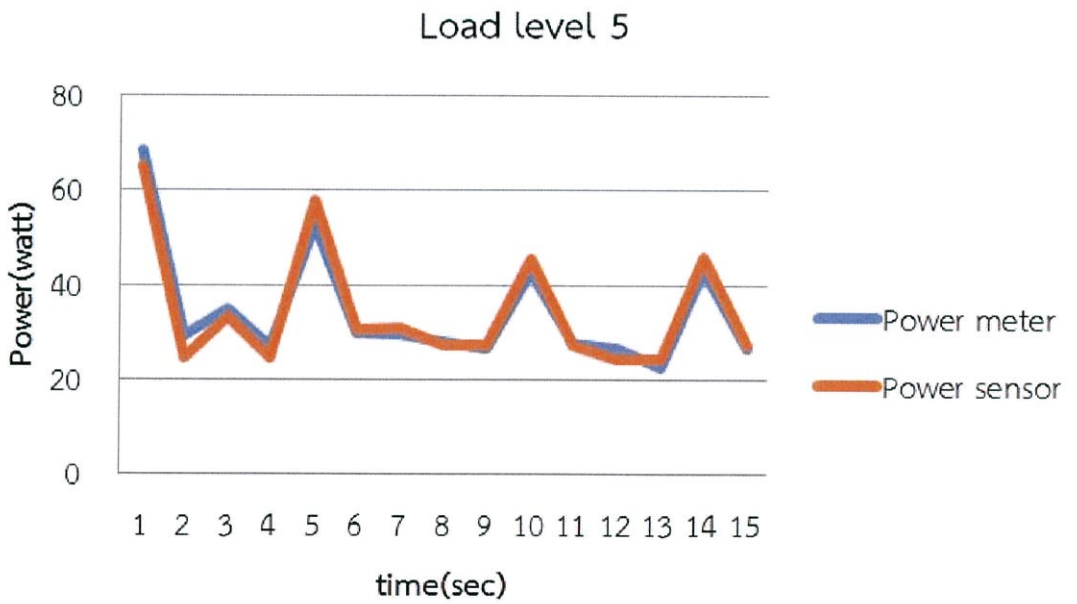
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบการอ่านค่ากำลังไฟฟ้าเมื่อใส่โหลด 60 kg

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบการอ่านค่าสำหรับ load 80 kg

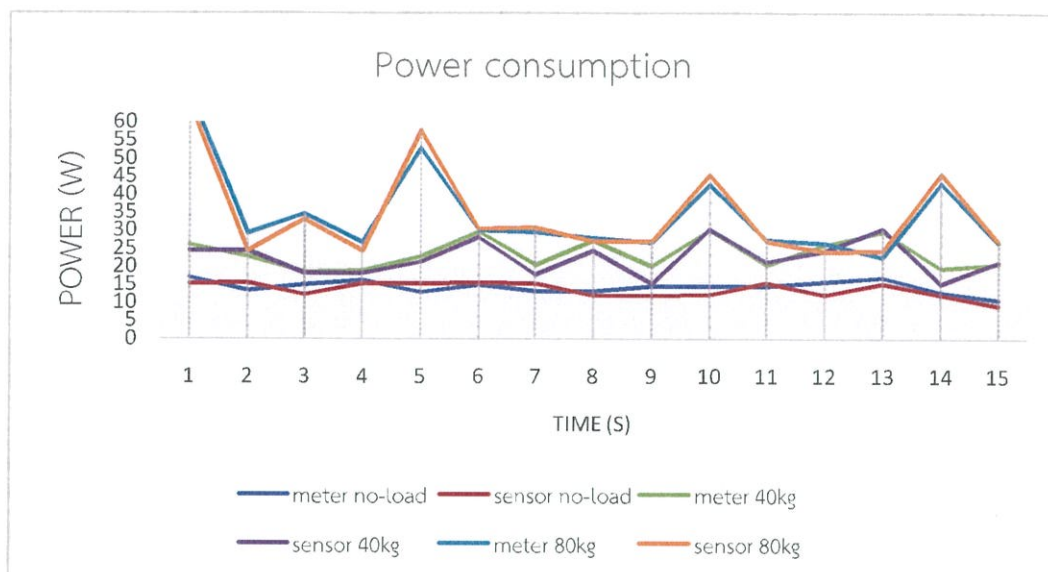
time(second)	meter(A)	sensor(A)	meter (V)	sensor (V)	Power meter (W)	Power sensor (W)
1	1.735	1.67	39.4	39	68.359	65.13
2	0.73	0.61	40	40.1	29.2	24.461
3	0.87	0.83	39.9	39.9	34.713	33.117
4	0.67	0.61	40	40.1	26.8	24.461
5	1.32	1.44	40	40.1	52.8	57.744
6	0.75	0.76	40	40.1	30	30.476
7	0.74	0.78	39.8	39.6	29.452	30.888
8	0.7	0.68	39.9	39.9	27.93	27.132
9	0.67	0.68	39.9	39.9	26.733	27.132
10	1.07	1.14	39.9	39.9	42.693	45.486
11	0.69	0.68	39.9	39.9	27.531	27.132
12	0.67	0.61	39.8	39.6	26.666	24.156
13	0.57	0.61	39.9	39.9	22.743	24.339
14	1.08	1.14	40	40.1	43.2	45.714
15	0.67	0.68	39.9	39.9	26.733	27.132



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบการอ่านค่ากระแสเมื่อใส่โหลด 80 kg



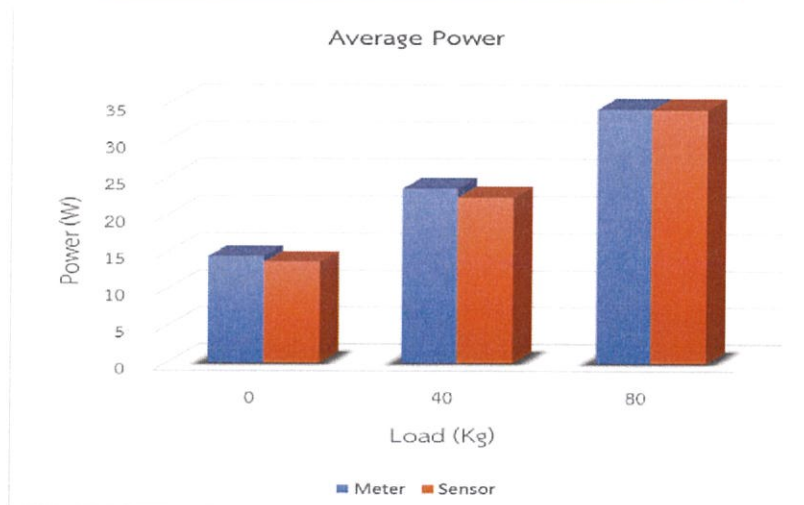
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบการอ่านค่ากำลังไฟฟ้าเมื่อใส่โหลด 80 kg



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบพลังงานที่ใช้ระหว่าง load แต่ละระดับ

ตารางที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยที่โหลดระดับต่างๆเปรียบเทียบระหว่างมัลติมิเตอร์และ sensor

load (kg)	Power meter(W)	Power meter(W)
no-load	14.43	13.65
20	17.48	16.36
40	23.56	22.36
60	27.15	25.53
80	34.37	34.3



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยพลังงานระหว่างมิเตอร์และ sensor

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติสามารถบรรทุกของที่มีน้ำหนักไม่เกิน 80 กิโลกรัมได้และรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติสามารถทำความเร็วสูงสุดได้ 3 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และที่การเคลื่อนที่ที่ราบรื่นที่สุด จะมีความเร็วที่ 1.5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง สามารถทำงานตามสถานีได้ n สถานี ทำให้มีความยืดหยุ่นตามพื้นที่ที่นำไปใช้งาน โดยสามารถตั้งค่าได้ในโปรแกรมในไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยก่อนที่จะถึงสถานีนั้นจะมีแถบเส้นสีดำเส้นแรกไว้ ให้รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติทำการชะลอรถ เพื่อเตรียมพร้อมเข้าสู่สถานีต่อไป เมื่อทำการเปลี่ยนโหนดสามารถป้อนค่าระดับโหนดใหม่ และเมื่อถึงสถานีสุดท้ายรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติสามารถกลับตัว เพื่อกลับมาเริ่มทำงานใหม่ได้อีกครั้งได้ สามารถใช้งานได้ดีในพื้นที่ที่แคบเนื่องจากรัศมีวงเลี้ยวแคบและสามารถกลับตัวได้โดยอาศัยการควบคุมล้อทั้งสองแยกออกจากกัน

ผลการทดสอบใช้ Inductive Proximity Sensor จำนวน 6 ตัว และอลูมิเนียมเทป นำมาใช้เป็นระบบนำทางของรถแทน QTR-8 Reflectance sensor จะมีระยะการตรวจจับ 0.6 cm เหนือพื้น แต่ในการใช้งานจริงติดตั้งที่ระยะ 0.4 cm ซึ่งลดผลกระทบจากแสงภายนอก ความสกปรก และสีของพื้นที่ใช้งาน สามารถทำงานได้อย่างแม่นยำตามเส้นทางที่กำหนดไว้ จากการวัดพลังงานที่ใช้สามารถคำนวณชั่วโมงใช้งานรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติได้ต่อเนื่อง 8 ชั่วโมง ใช้เวลาในการชาร์จแบตเตอรี่ 3 ชั่วโมง และจากการใช้ Ultrasonic module HC-SR04 ซึ่งเป็นโมดูลสำหรับตรวจวัดระยะทางโดยใช้หลักการสะท้อนของคลื่นเสียง ซึ่งนำมาใช้เป็นระบบความปลอดภัยจากการใช้รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ ซึ่งตั้งไว้ให้รัศมีระยะหยุดที่ 20 cm สามารถนำมาเป็นระบบความปลอดภัยเมื่อมีสิ่งกีดขวาง เพื่อเพิ่มมุมการใช้งาน จึงต้องใช้ Ultrasonic module HC-SR04 3 ตัวทำงานร่วมกัน ทำให้รัศมีระยะวัตถุข้างหน้าได้มากขึ้น มีการแสดงผลปริมาณของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ด้วยแถบไฟ LED จำนวน 10 ดวง เพื่อเตือนเมื่อปริมาณแบตเตอรี่เหลือน้อย

### วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองโดยใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนฟอสเฟต 36V10Ah เป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อน ต้องคำนึงถึงความปลอดภัย ดังนั้นจึงควรเปิด/ปิดอุปกรณ์ตามลำดับขั้นตอนคู่มือการใช้ เพื่อให้รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติทำงานได้อย่างถูกต้อง และเนื่องจากแหล่งจ่ายคือแบตเตอรี่ซึ่งไม่มีการจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับวงจร อาจเกิดเหตุการณ์กระแสไฟฟ้าเกินหรือกระแสกระชากในชุดวงจรควบคุม ซึ่งเป็นอันตรายต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดภายในชุดวงจรควบคุมได้ ไม่ควรลากหรือเข็นรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติแล้วเปิดใช้งานทันทีที่จะเกิดกระแสกระชากทำให้ฟิวส์ขาดได้ การจะย้ายตำแหน่งควรยกให้ลอย

## ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางแก้ไข

1. ปัญหาทางด้านโครงสร้างของตัวรถ เนื่องจากลมของล้อมีการซึมและรั่วออก ซึ่งทำให้ความดันลมยางที่ล้อทั้ง 2 ข้าง ไม่เท่ากันส่งผลให้ความเร็วของล้อทั้ง 2 ข้าง ไม่เท่ากันด้วย ทำให้การควบคุมความเร็วล้อทั้ง 2 ข้างเป็นไปได้ยาก ทำให้ต้องบำรุงรักษา และคอยตรวจเช็คระดับของความดันลมยางอยู่เสมอ

แนวทางการแก้ไข : เปลี่ยนจากยางชนิดที่เติมลมได้เป็นยางตัน ซึ่งจะตัดปัญหาในเรื่องของยางที่ซึมและรั่วออก และทำให้ไม่ต้องตรวจสอบระดับของลมยางเป็นประจำ

2. ปัญหาการวัดค่าผิดพลาดจาก Current Sensor ซึ่งมีผลทำให้การประมวลผลของระบบจัดการแบตเตอรี่ผิดพลาด ทำให้แสดงค่าแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่ผิด

แนวทางแก้ไข : ทำการหาค่าเฉลี่ย 10 ค่า ของ Current Sensor ใน 1 วินาที เพื่อให้ค่าที่ได้ ตรงกับค่าที่จริงมากขึ้น

## แนวทางการพัฒนาในอนาคต

1. ควรมีการใช้ระบบควบคุมที่ดีมากขึ้นกว่าการควบคุมแบบ open-loop เช่นการควบคุมแบบ close-loop โดยการป้อนกลับของความถี่กลับ เพื่อนำเป็นควบคุมความเร็วรอบให้คงที่เมื่อโหลดมีการเปลี่ยนแปลง

2. นำระบบสื่อสารมาใช้ในรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ ในอนาคตหากเราสามารถสร้างขึ้นมาได้อีกคัน เราควรสร้างระบบการสื่อสารให้ตัวรถเพื่อทั้งสองเพื่อที่รถทั้งสองสามารถสื่อสารระหว่างกันได้ว่า อยู่ ณ ตำแหน่งใด รถคันไหนอยู่ใกล้กับสถานีที่ต้องการให้ไปได้มากกว่ากัน มีการตัดสินใจเกิดขึ้นระหว่างรถทั้งสอง และสามารถทำภารกิจที่สมมติขึ้นมาให้ได้อย่างลุล่วง

3. ควรมีการพัฒนาทางด้าน Software ให้ดีขึ้น เพื่อเพิ่มขีดความสามารถและเพิ่มประสิทธิภาพในการประมวลผลของตัวประมวลผลกลางของระบบให้ดีขึ้น เช่น ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีประสิทธิภาพดีขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] วีระเชษฐ์ ชันเงิน และ วุฒิพล ธาราธิรเศรษฐ์,อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, กรุงเทพมหานคร, ห้าง-หุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินติ้ง , 2555.
- [2] รณกฤษณ์ จิตแจ่มใสและคณะ, “ระบบการทำงานของรถในรถไฟฟ้า สะเทินน้ำสะเทินบก”, **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555
- [3] กฤตภาส ผิวสันเทียะ และคณะ, “การออกแบบและควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าแบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน”,**ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [4] กฤตพัฒน์ อนันต์ลักษณ์การ และคณะ, “รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ”, **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2557

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

คู่มือการใช้งานรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติสำหรับอุตสาหกรรม

## คู่มือการใช้งานรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติสำหรับอุตสาหกรรม

1. สับสวิตช์ Circuit breaker เพื่อเริ่มใช้งาน ดังรูปที่ ก.1



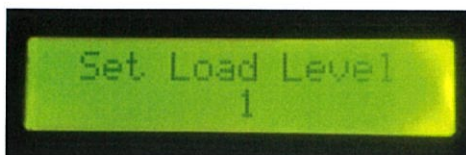
รูปที่ ก.1 Circuit breaker ของระบบ

2. เปิดสวิตช์เพื่อทำการเปิดใช้งานชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบฮับชนิดไร้แปรงถ่าน และ หมุน Emergency Switch เพื่อทำการเปิดใช้งานชุดวงจรขับเคลื่อน ดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 ปุ่ม Emergency switch และ ปุ่มเปิด-ปิดชุด BLDC motor drive

3. ใช้ปุ่ม Push button บนแผง User interface เพื่อทำการตั้งค่าระดับของโหลดที่จะบรรทุก



รูปที่ ก.3จอ LCD แสดงการตั้งค่าระดับของโหลด

4. ใช้ปุ่ม Push button บนแผง User interface เพื่อทำการเลือกโหมดทำงาน



รูปที่ ก.4จอ LCD แสดงการเลือกโหมดการทำงาน

### ข้อควรระวัง

1. หากสับสวิตช์ Circuit Breaker ขณะที่ Emergency Switch อยู่ในสถานะปิดวงจร และสวิตช์ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบฮับชนิดไร้แปรงถ่านอยู่ในสถานะ ON อยู่ จะทำให้แผงควบคุมเกิดความเสียหาย เนื่องจากสัญญาณตอนเริ่มต้นของวงจรควบคุมยังไม่เข้าสู่สถานะทำงาน ทำให้เกิดความผิดพลาดของสัญญาณไปสั่งให้มอเตอร์หมุนที่ Duty cycle สูงๆ จึงทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ากระชากตอนเริ่มต้นสูงมากจนทำให้วงจรเกิดความเสียหาย
2. ไม่ควรลากจูงรถในขณะที่ทำงานหรือไม่ก็ตามเพราะจะทำให้เกิดการ Induce Voltage ขึ้นในวงจรชุดควบคุมมอเตอร์ ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์ Switching เช่น Mosfet เกิดความเสียหายและทำให้วงจรทำงานผิดพลาดได้

ภาคผนวก ข.  
บทความทางวิชาการ

# รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติสำหรับอุตสาหกรรม Automated Guided Vehicle for Industry

กฤษ ดวงพรหม      จักรินทร์ พรหมจันทร์      ชนาธิป อัครกะอัคร      และชานันท์ หริสมบัติ  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1 ขอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8330 E-mail: krit\_duangprom@hotmail.com

## บทคัดย่อ

ปริญญาโทฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อสร้างต้นแบบของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยสามารถรับส่งสิ่งของตามเส้นทางที่สร้างไว้จากแถบโลหะบนพื้นโรงงานอุตสาหกรรม โดยมีระบบตรวจจับเส้นทางโดยใช้ Inductive proximity sensor ที่ทำงานโดยการตรวจจับโลหะ โดยรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติสามารถขนส่งสิ่งของที่มีน้ำหนักได้ถึง 80 กิโลกรัม และกำหนดความเร็วสูงสุดไม่เกิน 3 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เพื่อป้องกันการเกิดอุบัติเหตุตามมาตรฐานการใช้งานระบบอัตโนมัติในโรงงาน ส่วนระบบขับเคลื่อนรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัตินี้จะใช้มอเตอร์แบบฮับชานไม่มีแปรงถ่าน พิกัด 750 วัตต์ 700 รอบต่อนาที 36 โวลต์ 50 ขั้วจำนวน 2 ตัว โดยที่รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติจะถูกควบคุมโดย ATmega2560, Nano328, ATTiny85 และ dSPIC30F2010 และ AGV ยังมีระบบป้องกันจาก UltrasonicSensor ตรวจจับสิ่งกีดขวางโดยรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติจะใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟตในการขับเคลื่อนทำงานได้ต่อเนื่อง 8 ชั่วโมง ซึ่งแบตเตอรี่นี้มีสมรรถนะสูง และมีน้ำหนักเบา

**คำสำคัญ:** Automated guided vehicles, Brushless direct current motor (BLDC motor), Inductive proximity sensor, Guided tape, Battery monitoring

## Abstract

The project presents a new concept to propose a prototype of automated guided vehicle (AGV) for industry. This automated guided vehicle delivers items by moves along aluminum guide tape on the floor of manufactory. Using inductive proximity sensor that can detect metal from the aluminum guide line. The vehicle payload can be used up to 80 kg. The speed is limited at 5 km/h to comply with safety requirement of safety standard in the industry. This AGV can be driven by two brushless direct current motors (BLDC) 750 W, 700 rpm, 36 V<sub>dc</sub> and 50 poles. ATmega2560, nano328, ATTiny85 and dSPIC30F2010 are control devices for this vehicle. Protection of AGV is an ultrasonic sensor that detects obstacles. 36 V 10 Ah lithium Iron phosphate battery is the energy source for this vehicle can drive up to 8 hours, as it has light weight and high efficiency.

**Keyword:** Automated guided vehicles, Brushless direct current motor (BLDC motor), Inductive proximity sensor, Guided tape, Battery monitoring

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันระบบอัตโนมัติมีความสำคัญต่อโรงงานอุตสาหกรรมอย่างมาก สาเหตุเนื่องจากผลของการแข่งขันกันด้านการตลาดอย่างจริงจัง และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆซึ่งปัจจัยในด้านการตลาดที่ขาดไม่ได้ นั่นคือ การกำหนดเวลาส่งมอบผลิตภัณฑ์และปริมาณที่ต้องการซึ่งจะต้องผลิตแข่งกับเวลา ดังนั้นประโยชน์ของระบบอัตโนมัติจึงช่วยให้ลดระยะเวลาในการทำงานจากปกติ ทั้งในรูปแบบการเปลี่ยนเครื่องมือการขนย้ายผลิตภัณฑ์รวมถึงกระบวนการต่างๆที่มนุษย์ไม่สามารถเข้าไปปฏิบัติงานได้ซึ่งหากพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผลิตทั้งหมด ประมาณ 2 ใน 3 ของค่าใช้จ่ายในการผลิตทั้งหมด จะเห็นว่าการขนถ่ายวัสดุเป็นกิจกรรมที่มีความสำคัญมากต่อกระบวนการผลิต

ดังนั้นหากสามารถนำรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ มาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมจะช่วยให้ขนถ่ายวัสดุอุปกรณ์ได้รวดเร็วมากยิ่งขึ้นมีความคล่องตัวสามารถลดต้นทุนจากการจ้างแรงงานมีความถูกต้องในการส่งวัสดุ อุปกรณ์และไม่ทำให้วัสดุเกิดความเสียหายและที่สำคัญต้องมีความปลอดภัยจากการใช้ระบบอัตโนมัติและหากพิจารณาถึงต้นทุนกำลังของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติซึ่งใช้เป็นมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (BLDC Motor) ซึ่งเป็นมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงจะมีอายุการใช้งานนานกว่า DC Motor อีกทั้งยังมีขนาดเล็กและมีน้ำหนักเบากว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor) ที่พิกัดเท่ากันดังนั้นจึงสามารถนำมาติดตั้งและใช้เป็นตัวขับเคลื่อนของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติได้ดีกว่า

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 มอเตอร์แบบฮับ

มอเตอร์แบบฮับ (Hub Motor) เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดหนึ่ง ซึ่งมีส่วนที่แตกต่างจากมอเตอร์แบบธรรมดา คือ ในส่วนของโรเตอร์ (Rotor) หรือส่วนที่ได้นั้นจะอยู่ด้านนอก (Outer Rotor) และจะมีแม่เหล็กถาวรติดอยู่ และในส่วนของสเตเตอร์ (Stator) หรือส่วนที่อยู่กับที่ จะอยู่ด้านใน โดยจะมีขดลวดอาร์มาเจอร์ยึดอยู่กับแกนของล้อ ซึ่งมอเตอร์

แบบฮับส่วนมากจะถูกนำมาใช้กับยานพาหนะไฟฟ้า เช่น จักรยานไฟฟ้า เนื่องจากมีความสะดวกในการติดตั้งและมีเสถียรภาพในการทำงาน สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือมอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่านและไม่มีแปรงถ่าน

## 2.2 ทฤษฎีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน

Brushless DC motor (BLDC) หรือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน จะอาศัยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นอุปกรณ์สวิตซ์ในการสับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดของมอเตอร์แทนหน้าที่ของแปรงถ่าน โดยจะมี Hall Effect Sensor ตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ เพื่อให้สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้อย่างถูกต้องโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าจะสร้างขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์ทำให้เกิดการดึงดูดระหว่างขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นกับฟลักซ์ที่โรเตอร์สร้างขึ้นโดยที่โดยที่กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์ นั้นจะเป็นไฟฟ้ากระแสสลับส่วนที่โรเตอร์นั้นเป็นแม่เหล็กถาวร (Permanent magnet)

## 2.3 อินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ (Inverter) คือวงจรแปลงผันพลังงานไฟตรงให้เป็นไฟสลับ และควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้มีค่าแรงดันคงที่หรือปรับค่าได้เพื่อให้ได้ความถี่ไฟสลับเอาร์ทพุตที่มีค่าคงที่หรือปรับค่าได้ โดยใช้หลักการปรับค่าแรงดันไฟตรงด้านอินพุตหรือใช้หลักการควบคุมเทคนิคการสวิตซ์ภายในตัวอินเวอร์เตอร์ เช่น เทคนิคแบบมอดูเลตความกว้างพัลส์ (PWM) หรือใช้วิธีปรับค่าแรงดันไฟตรงด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ เป็นต้น ซึ่งอินเวอร์เตอร์ที่ใช้สำหรับงานควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะใช้หลักการควบคุมอัตราส่วนของแรงดันเอาร์ทพุตและความถี่เอาร์ทพุตให้คงที่ (V/f Constant) เพื่อให้สามารถควบคุมให้แรงบิดคงที่ได้ แต่สำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในงานควบคุมอื่นๆที่ต้องการความถี่เอาร์ทพุตคงที่ก็อาจใช้อินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมการปิด-เปิด สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วยวิธีที่ไม่ซับซ้อน เช่นวิธีมอดูเลตแบบ 180 องศา หรือ 120 องศา เป็นต้น สำหรับลูกคลื่นของแรงดันเอาร์ทพุตไฟสลับของอินเวอร์เตอร์ในอุดมคติคือรูปคลื่นไซน์ แต่ในทางปฏิบัติจะใช้สัญญาณรูปกึ่งสี่เหลี่ยมซึ่งมีฮาร์โมนิกสเปกตรัมอยู่มาก ซึ่งด้วยเทคนิคการสวิตซ์แบบ PWM จะช่วยลดฮาร์โมนิกดังกล่าวลง และเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของอินเวอร์เตอร์ให้สูงขึ้น

## 2.4 Inductive Proximity Sensor

เป็นเซนเซอร์ที่ทำงานโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะมีผลต่อชิ้นงานหรือวัตถุที่เป็นโลหะเท่านั้น ข้อเด่นของ Inductive Proximity Sensor คือ ทนทานสามารถทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิที่กว้าง (wide temperature ranges) สามารถทำงานในสภาวะที่มีการรบกวนทางแสง (Optical) และ

เสียง (Acoustic) โดยมีสายป้อนไฟบวก ลบ และสายสัญญาณ Output

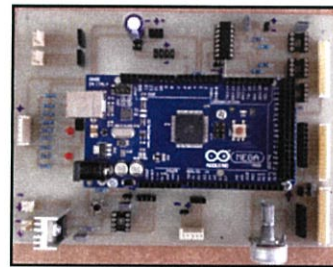


รูปที่ 1 Inductive Proximity Sensor

## 3. การออกแบบและการสร้างระบบการทำงานของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ

### 3.1 วงจรประมวลผลกลาง (CPU)

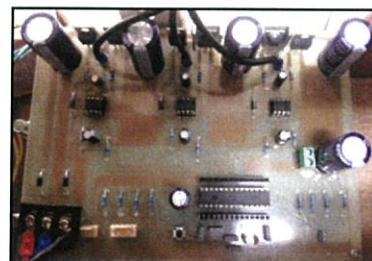
รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega2560 และ ATTiny85 ทำงานร่วมกัน โดย ATmega2560 มีหน้าที่ในการรับค่าการตรวจจับแถบเส้นและส่งสัญญาณควบคุมมอเตอร์ไปให้ BLDC Motor Drive และ ATTiny85 มีหน้าที่ในการแสดงผลให้ USER ผ่านการกระพริบไฟ LED และ ตรวจจับระยะวัตถุที่อยู่ด้านหน้าเพื่อเพิ่มความปลอดภัยจากการใช้รถอัตโนมัติ



รูปที่ 2 วงจรประมวลผลกลางของระบบ

### 3.2 วงจรขับมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน

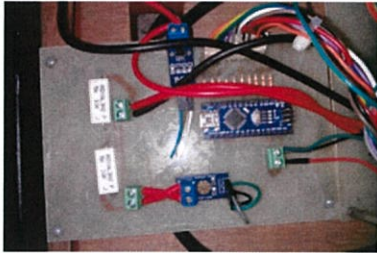
ในวงจรขับมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน จะใช้ มอสเฟตกำลังเป็นอุปกรณ์สวิตซ์ ซึ่ง ที่ความถี่ 20kHz โดยใช้ dsPIC30F2010 เป็นตัวประมวลผลสำหรับการควบคุม BLDC Motor โดยขับผ่านวงจรถับเกต IR-2101 ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ในแต่ละกึ่ง และใช้การควบคุมแบบความกว้างพัลส์แบบยูนิโพลาร์ (Unipolar PWM) เนื่องจากมีฮาร์โมนิกที่ต่ำกว่าการควบคุมแบบอื่น



รูปที่ 3 วงจรขับมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน

### 3.3 วงจรวัดค่าพลังงาน

วงจรวัดค่าแรงดันและกระแสที่ใช้งานขณะที่รถทำงานโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Nano328 รับค่าที่ได้จาก Voltage sensor และ Current Sensor นำมาคูณกันและบวกสะสมเก็บไว้ในส่วนของ ROM แสดงผลผ่านไฟ LED 10 ดวง เพื่อบอกปริมาณของแบตเตอรี่ที่เหลืออยู่

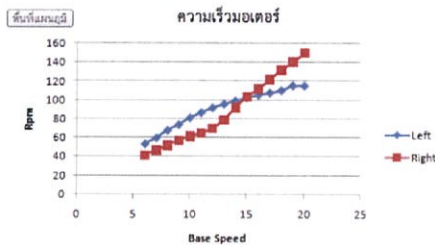


รูปที่ 4 วงจรวัดค่าพลังงาน

### 4. ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการวัดค่าความเร็วรอบมอเตอร์

จากการสังเกตเมื่อ AGV ทำงานนั้นในเส้นทางตรงจะเคลื่อนได้ไม่ตรง มีการส่ายค่อนข้างมาก จึงทำการเปรียบเทียบความเร็วรอบของมอเตอร์แต่ละตัว โดยการเปลี่ยนค่า base speed ที่ป้อนจาก arduino จาก 6 ถึง 20 ตามลำดับ



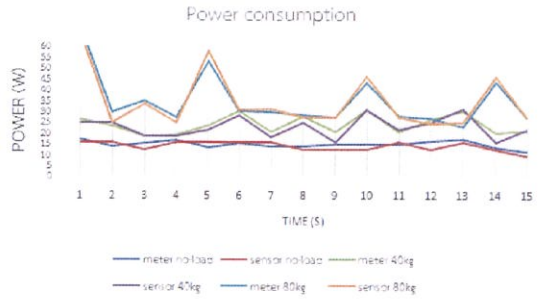
รูปที่ 5 ผลการจับความเร็ว BLDC ซ้าย และขวาที่ค่า base speed ต่างๆ จึงได้ควบคุมมอเตอร์ทั้งสองล้อแยกจากกันโดยกำหนดเป็นระดับโหลด เซตค่าให้มีความเร็วใกล้เคียงกัน

#### 4.2 พลังงานที่ใช้ และความแม่นยำของ Sensor

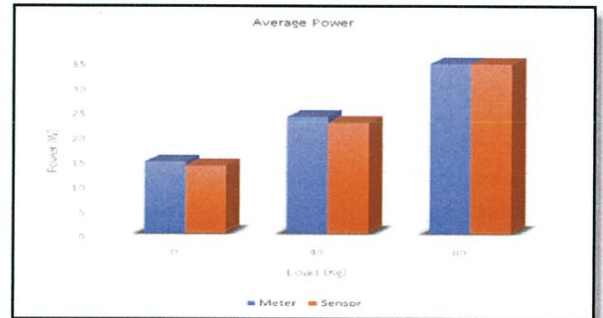
พลังงานที่ใช้สำหรับเซนเซอร์ทั้ง 6 ตัวที่แรงดัน 15V

Standby mode	14.3 mA	214.50 mW
Operating mode	23.18 mA	347.70 mW

พลังงานที่ใช้ทั้งหมดของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติทำการทดลองโดยการอ่านค่าที่ได้จาก voltage sensor และ current sensor ที่วัดแรงดัน และกระแสของแบตเตอรี่ผ่านโปรแกรม arduino ที่ตัว arduino nano328 และนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากมัลติมิเตอร์โดยตรง เมื่อบรรทุกสิ่งของหนัก 0 กิโลกรัม, 40 กิโลกรัม, และ 80 กิโลกรัม



รูปที่ 5 พลังงานที่ใช้ระหว่าง load แต่ละระดับ



รูปที่ 6 เปรียบเทียบค่าที่วัดได้จาก Sensor และ เครื่องม้าวัด

จะเห็นว่าค่าที่อ่านได้จาก วงจรวัดค่าพลังงานที่ความใกล้เคียงกับค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดทำให้สามารถแสดงผลปริมาณแบตเตอรี่ได้ กำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติใช้ที่บรรทุกทุกของ 80 กิโลกรัม เท่ากับ 34 W ซึ่งเมื่อใช้แบตเตอรี่ 360 Wh สามารถคิดระยะเวลาการทำงานต่อเนื่องสูงสุดของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติได้ดังนี้

$$\text{ระยะเวลาการทำงานต่อเนื่อง} = 360/34 = 10.5 \text{ ชั่วโมง}$$

จึงได้ระบุค่าไว้ไม่ให้แบตเตอรี่หมด ให้ใช้งานได้ต่อเนื่อง 8 ชั่วโมง

### 5. สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ ซึ่งใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ 36 V 10 Ah และนำร่องโดยใช้ Inductive Proximity sensor กับ Aluminum tape ซึ่งติดตั้งที่ระยะ 0.4 cm พบว่ารถสามารถวิ่งอัตโนมัติตามเส้นทางได้ และสามารถทำความเร็วได้ 1.5 km/hr โดยสามารถหยุดได้ n station ตามที่ได้กำหนดไว้ กลับตัวเมื่อถึงปลายทาง และ AGV สามารถบรรทุกสิ่งของที่มีน้ำหนักได้ 80 kg หยุดรถเมื่อมีสิ่งกีดขวาง แสดงปริมาณแบตเตอรี่ และสามารถทำงานต่อเนื่องได้สูงกว่า 8 ชั่วโมง

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับการอนุเคราะห์จากหลายท่านโดยเฉพาะอย่างยิ่ง รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้ให้คำแนะนำเสมอมา

ขอขอบคุณ พี่กฤตพัฒน์ อนันต์ลักษณ์การ พี่ชวล ลายเงิน และพี่คณะศ ฆนัษेत्रกรรมที่ได้ให้คำแนะนำในการทำโครงการนี้ตลอดมา

ขอขอบคุณเจ้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและขอขอบคุณเพื่อนทุกคนที่ได้ช่วยกันแก้ไขปัญหาและอุปสรรคให้ผ่านไปได้ด้วยดีมาตลอด

และสุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดามารดา และครอบครัว ของทางคณะผู้จัดทำที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เลี้ยงดูให้ได้รับความรู้ความสามารถ ได้ให้คำปรึกษาในการดำเนินชีวิต และได้สมทบทุนในการดำเนินโครงการนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณทุกท่านไว้ ณ ที่นี้ด้วย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] วีระเชษฐ์ ชันเงิน และ วุฒิพล ธาราธิระเชษฐ์, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, กรุงเทพมหานคร, ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินตติ้ง , 2555
- [2] รณกฤษณ์ จิตแจ่มใสและคณะ, “ระบบการทำงานของรถในรถไฟฟ้าสะเทินน้ำสะเทินบก”, ปริญญาบัตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555
- [3] กฤตภาส มีวสันทียะ และคณะ, “การออกแบบและควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าแบบขับเคลื่อนไม่มีแปรงถ่าน”, ปริญญาบัตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [4] กฤตพัฒน์ อนันต์ลักษณ์การ และคณะ, “รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ”, ปริญญาบัตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2557



นายกฤษ ดวงพรม

เกิดวันที่ 15 สิงหาคม 2537

ภูมิลำเนาอยู่จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ศึกษาในระดับมัธยมศึกษาโรงเรียนสิริรัตนาร

ศึกษาในระดับปริญญาตรีภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โดยสนใจงานวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง



นายจักรินทร์ พรมจันทร์

เกิดวันที่ 29 มิถุนายน 2536

ภูมิลำเนาอยู่จังหวัดสกลนคร

ศึกษาในระดับมัธยมศึกษาโรงเรียนโรงเรียนเตรียม

อุดมศึกษาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ศึกษาในระดับปริญญาตรีภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โดยสนใจงานวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง



นายชานธิป อัคระอัคร

เกิดวันที่ 5 กันยายน 2536

ภูมิลำเนาอยู่ที่จังหวัดสมุทรปราการ

ศึกษาในระดับมัธยมศึกษาโรงเรียนนวมินทราชินูทิศ

เตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ

ศึกษาในระดับปริญญาตรีภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โดยสนใจงานวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง



นายชานันท์ หริสมบัติ

เกิดวันที่ 16 มกราคม 2537

ภูมิลำเนาอยู่จังหวัดชลบุรี

ศึกษาในระดับมัธยมศึกษาโรงเรียนสัจฉิวิทย์วิทยาน

ศึกษาในระดับปริญญาตรีภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โดยสนใจงานวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

## ประวัติผู้เขียน



**นายกฤษ ดวงพรหม**

เกิดวันที่ 15 สิงหาคม 2537

ภูมิลำเนาอยู่จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ศึกษาในระดับมัธยมศึกษาโรงเรียนสิริรัตนาร

ศึกษาในระดับปริญญาตรีภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โดยสนใจงานวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง



**นายจักรินทร์ พรหมจันทร์**

เกิดวันที่ 29 มิถุนายน 2536

ภูมิลำเนาอยู่จังหวัดสกลนคร

ศึกษาในระดับมัธยมศึกษาโรงเรียนเตรียมอุดมศึกษา

ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ศึกษาในระดับปริญญาตรีภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โดยสนใจงานวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง



**นายชนาธิป อัคระอัคร**

เกิดวันที่ 5 กันยายน 2536

ภูมิลำเนาอยู่ที่จังหวัดสมุทรปราการ

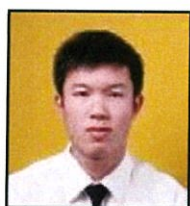
ศึกษาในระดับมัธยมศึกษาโรงเรียนนวมินทราชินูทิศ

เตรียมอุดมศึกษาพัฒนาการ

ศึกษาในระดับปริญญาตรีภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โดยสนใจงานวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง



**นายชนานันท์ หริสมบัติ**

เกิดวันที่ 16 มกราคม 2537

ภูมิลำเนาอยู่ที่จังหวัดชลบุรี

ศึกษาในระดับมัธยมศึกษาโรงเรียนสัทธิพิทยาคม

ศึกษาในระดับปริญญาตรีภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โดยสนใจงานวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง