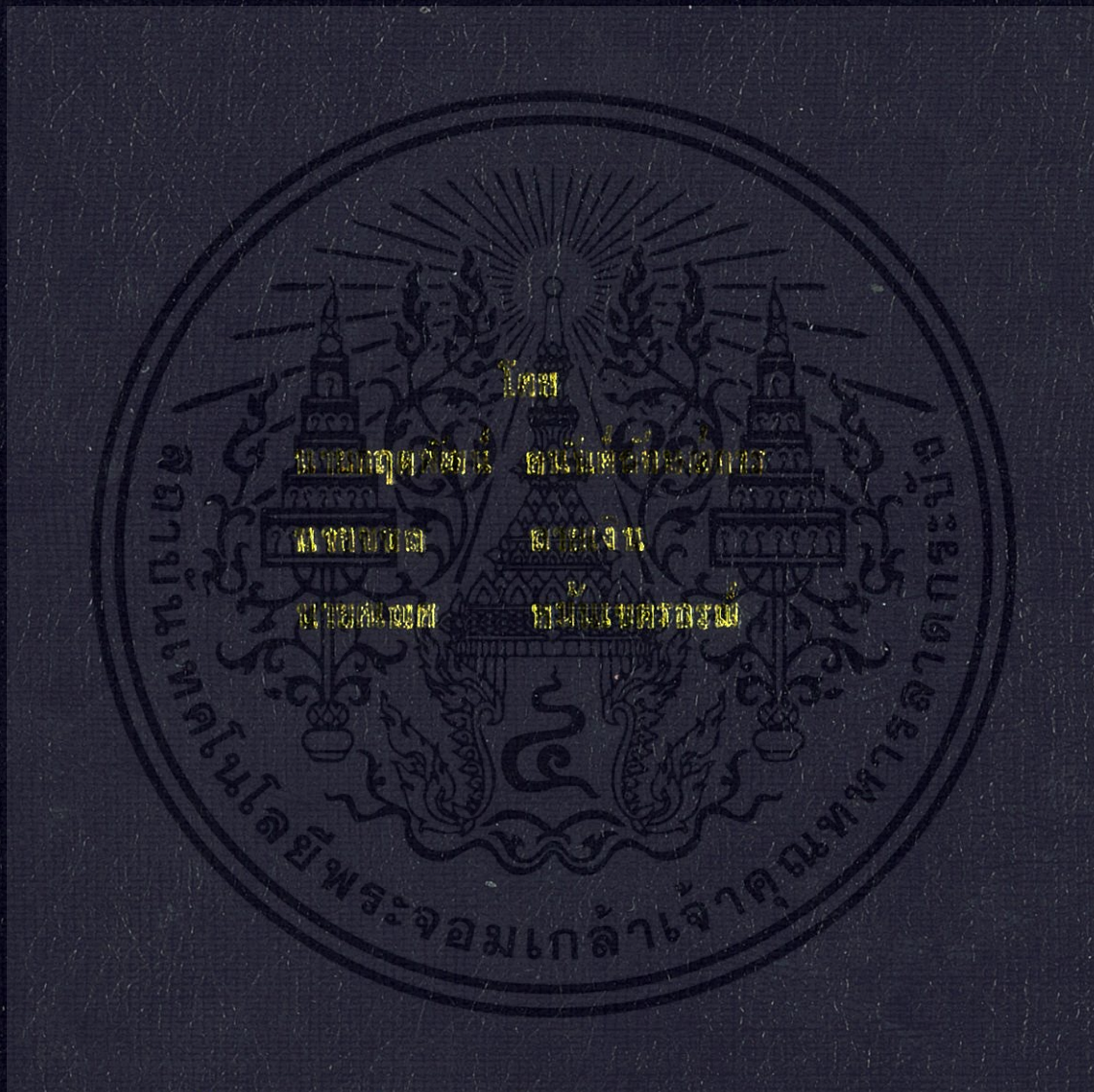


รถขับเคลื่อนอัตโนมัติ  
AUTOMATIC GUIDED VEHICLE



ปริญญาโท ซึ่งเป็นหน่วยงานของกรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กรมส่งเสริมการเกษตร กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ  
AUTOMATED GUIDED VEHICLE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AUTOMATED GUIDED VEHICLE



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

2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2557

รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ  
AUTOMATED GUIDED VEHICLE



อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ

ผู้จัดทำ

1. นาย กฤตพัฒน์ อนันต์ลักษณ์การ
2. นาย ชชล ลายเงิน
3. นาย คณศ หมั่นเขตรกรณ์



.....  
(รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน) อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ

นาย กฤตพัฒน์ อนันต์ลักษณะการ

นาย ชชล ปลายเงิน

นาย คณศ หมั่นเขตรกรณ์

รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2557

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้เพื่อสร้างต้นแบบของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยสามารถรับส่งสิ่งของตามเส้นทางที่สร้างไว้จากเส้นด้ายบนพื้นโรงงานอุตสาหกรรม โดยมีระบบตรวจจับเส้นทางโดยใช้ QTR Sensor Array ที่ทำงานด้วยการประมวลผลจากค่าการสะท้อนของแสงกับแถบเส้นสีดำที่สร้างไว้ โดยรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติสามารถขนส่งสิ่งของที่มีน้ำหนักได้ถึง 80 กิโลกรัม และกำหนดความเร็วสูงสุดไม่เกิน 5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เพื่อป้องกันการเกิดอุบัติเหตุตามมาตรฐานการใช้งานระบบอัตโนมัติในโรงงาน ส่วนระบบขับเคลื่อนรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัตินี้จะใช้มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน พิกัด 350 วัตต์ 700 รอบต่อนาที 3 โวลต์ 50 ชั่วโมง จำนวน 2 ตัว โดยที่รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติจะถูกควบคุมโดย ATmega2560, ATTiny85 และ dSPIC30F2010 และ AGV ยังมีระบบป้องกันจาก Ultrasonic Sensor ตรวจจับสิ่งกีดขวาง โดยรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติจะใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟตในการขับเคลื่อน ซึ่งแบตเตอรี่นี้มีสมรรถนะสูง และมีน้ำหนักเบา

คำสำคัญ : Automated guided vehicles, Brushless direct current motor (BLDC motor), QTR Sensor Array

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Automated Guided Vehicle

Mr.Krittapat Ananlaksakorn

Mr.Khachon Laingoen

Mr.Khanate Munkhetkorn

Assoc. Prof. Dr. Werachet Khan-ngern, advisor

Year 2014

### 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 black lines on the floor of manufactory. Guided route of this vehicle is QTR Sensor Array that can be calculated the reflection of lights from the black 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) 350-W, 700 rpm, 36 V<sub>dc</sub> and 50 poles. ATmega2560, 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 5 hours, as it has light weight and high efficiency.

Keyword : Automated guided vehicle, Brushless direct current motor (BLDC motor), QTR Sensor Array

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับการอนุเคราะห์จากหลายๆ ท่านโดยเฉพาะอย่างยิ่ง รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ์ ชันเงิน อาจารย์ที่ปรึกษา

ขอขอบคุณ นายกวีพจน์ วรรณตรสุทธิ ที่ได้ให้คำแนะนำในการสร้างวงจรต่างๆ และ ภาพรวมทางกลของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ

ขอขอบคุณ นายณัฐวรราช จำปาศรี ที่ได้ให้คำแนะนำในการสร้างโปรแกรมควบคุม รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ

ขอขอบคุณ นายณัฐพร ชิตานนท์ ที่ได้ให้ยืมอุปกรณ์ และ ช่วยเหลือในการสร้าง โครงรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ได้ช่วยกันแก้ไขปัญหา และฝ่าฟันอุปสรรคให้ผ่านพ้นไป ได้ด้วยดีมาตลอด

นอกจากนั้นผู้จัดทำต้องขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่แผนกยืม-คืน ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่อนุญาตให้เบิกใช้สิ่งของจากทางภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำ ขอขอบคุณ บิดามารดา และครอบครัว ของทางคณะผู้จัดทำ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เลี้ยงดูให้ได้รับความรู้ความสามารถ ได้ให้คำปรึกษาในการดำเนินชีวิต และได้ สมทบทุนในการดำเนินโครงการนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณทุกท่านไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูปภาพ	VII
สารบัญตาราง	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ	1
1.4 วิธีการใช้ในโครงการ	1
1.5 แผนการดำเนินโครงการ	2
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ทฤษฎี AGV	3
2.1.1 ชนิดของเอจิวี	3
2.1.2 ระบบเอจิวี	4
2.1.3 เทคโนโลยีในการนำร่องของเอจิวี	5
2.2 ทฤษฎี และหลักการพื้นฐานของมอเตอร์แบบฮับ	6
2.2.1 ชนิดของมอเตอร์แบบฮับ	6
2.2.2 โครงสร้างของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน	7
2.2.3 ลักษณะแรงบิด และความเร็วของมอเตอร์BLDC	7
2.2.4 หลักการทำงานของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน	8
2.2.5 ข้อดี และข้อเสียของมอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน	9
2.2.6 ข้อจำกัดของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน	10
2.3 อินเวอร์เตอร์	10
2.3.1 แนวคิดพื้นฐานของสวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์	11
2.3.2 การสวิตช์ซิงแบบPulse Width Modulate	12
2.3.3 การสวิตช์ซิงแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์	12
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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.2 ATTINY 85	23
2.6 Sensor	24
2.6.1 QTR	24
2.6.2 Ultrasonic	25
2.6.3 Joystick	27
<b>บทที่ 3 การออกแบบ และสร้างระบบการทำงานของรถส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ</b>	<b>31</b>
3.1 ลักษณะโครงสร้าง และวัสดุอุปกรณ์	31
3.1.1 รูปแบบโครงสร้างของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ	31
3.1.2 วัสดุ และตัวถังของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ	31
3.2 ขั้นตอนการสร้างรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ	32
3.2.1 ออกแบบรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติด้วยโปรแกรม SketchUp	32
3.2.2 ขั้นตอนการสร้างต้นแบบรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ	34
3.3 คุณลักษณะเฉพาะของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ	36
3.4 Block Diagram of AGV System	37
3.4.1 Input Devices	37
3.4.2 Process Devices	38
3.4.3 Output Devices	41
3.5 ชุดวงจรของระบบของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ	42
3.5.1 Power Supply	42
3.5.2 CPU of AGV system	43
3.5.3 BLDC Motor Drive	44
3.6 Algorithm ของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ	45
3.6.1 Algorithm การ Setup AGV	45
3.6.2 Algorithm Automatic Mode	49
3.6.3 Algorithm Manual Mode	56
3.6.4 Algorithm Bluetooth Mode	58
3.6.5 Algorithm Control Mode	59
3.6.6 Algorithm Duty Cycle Control	63
3.6.7 Algorithm Distance Measure	64
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>	<b>65</b>
4.1 ผลการทดลองจากการอ่านค่าผลที่ได้รับ QTR-8RC Sensor	65
4.2 ผลการทดลองจากการอ่านค่าผลที่ได้รับจาก Joystick	68
4.3 ผลการแสดงผลของ Motion control	71
4.3.1 ผลการทดลองแสดงผลสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ	71

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2 ผลการทดลองการสังเกตการเคลื่อนที่ของรถขนส่ง ขับเคลื่อนอัตโนมัติ	82
4.4 ผลการทดลองจากการอ่านค่าผลที่ได้รับจาก Ultrasonic Module HC-SR04	88
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	93
เอกสารอ้างอิง	95
ภาคผนวก	96
ภาคผนวก ก. คู่มือการใช้งานรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ	97
ภาคผนวก ข. บทความทางวิชาการ	100
ประวัติผู้เขียน	105



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน	7
2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด และความเร็ว	8
2.3 สวิตช์โหมคอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว	11
2.4 การสวิตช์ซึ่งแรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์	13
2.5 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ต่อโหลดแบบสตาร์	14
2.6 รูปคลื่นสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบนำกระแส 120 องศา	15
2.7 รูปคลื่นสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบนำกระแส 180 องศา	16
2.8 รูปคลื่นแรงดันเฟส ของอินเวอร์เตอร์แบบนำกระแส 180 องศา	16
2.9 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส	17
2.10 การทำงานของมอเตอร์ใน 1 cycle	18
2.11 วงจรขั้วเกต	20
2.12 วงจรบูสแดรป	20
2.13 การแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างวงจรควบคุม	21
2.14 บอร์ด ArduinoMega2560	22
2.15 ATTiny_85	24
2.16 QTR-8RC sensor array	24
2.17 Ultrasonic ranging module HC-SR04	26
2.18 Timing diagram ของ Ultrasonic module HC-SR04	26
2.19 XY Joystick Module	27
2.20 แบบจำลองการทำงาน XY Joystick module	27
2.21 การบังคับทิศทางไปยัง ทิศตะวันออก	28
2.22 การบังคับทิศทางไปยัง ทิศตะวันออกเฉียงใต้	28
2.23 การบังคับทิศทางไปยัง ทิศใต้	29
2.24 การบังคับทิศทางไปยัง ทิศตะวันตกเฉียงใต้	29
2.25 การบังคับทิศทางไปยัง ทิศตะวันตก	29
2.26 การบังคับทิศทางไปยัง ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ	30
2.27 การบังคับทิศทางไปยัง ทิศเหนือ	30
2.28 การบังคับทิศทางไปยัง ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ	30
3.1 โครงรถของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ	31
3.2 ตัวถังของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ	32
3.3 ออกแบบฐานรูปทรงของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ	32
3.4 ออกแบบลักษณะการวางตำแหน่งของล้อ 4 ล้อ	32
3.5 ออกแบบพื้นฐานโครงสร้าง 2 ชั้น	33
3.6 ออกแบบลักษณะการวางตำแหน่งของชุดควบคุมต่างๆ	33
3.7 Dimension ของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ	33
3.8 ภาพรวมของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ	33

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9	34
3.10	34
3.11	35
3.12	35
3.13	35
3.14	38
3.15	38
3.16	38
3.17	38
3.18	41
3.19	42
3.20	43
3.21	44
4.1	65
4.2	66
4.3	66
4.4	66
4.5	67
4.6	67
4.7	67
4.8	68
4.9	68
4.10	68
4.11	69
4.12	69
4.13	69
4.14	70
4.15	70
4.16	70
4.17	71
4.18	71
4.19	72

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 Duty cycle ของเกตด้าน high side ของ BLDC motor drive ที่คำสั่ง low speed	72
4.21 สัญญาณ hall effect	73
4.22 แรงดันขาเกตด้าน high side และ ด้าน low side ที่คำสั่ง low speed	73
4.23 แรงดันไฟฟ้าเฟส ของ BLDC motor โดยคำสั่ง low speed	74
4.24 แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส ของ BLDC motor โดยคำสั่ง low speed	74
4.25 PWM จาก ATmega2560 ที่คำสั่ง middle speed	75
4.26 แรงดันไฟฟ้าหลังจากกรองด้วยตัวเก็บประจุ	75
4.27 Duty cycle ของขาเกตด้าน high side ของ BLDC motor drive ที่คำสั่ง middle speed	76
4.28 สัญญาณ hall effect sensor	76
4.29 แรงดันขาเกตด้าน high side และด้าน low side ที่คำสั่ง middle speed	77
4.30 แรงดันไฟฟ้าเฟส ของ BLDC motor โดยคำสั่ง middle speed	77
4.31 แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส ของ BLDC Motor โดยคำสั่ง middle speed	78
4.32 PWM จาก ATmega2560 ที่คำสั่ง high speed	78
4.33 แรงดันไฟฟ้าฟ้หลังจากกรองด้วยตัวเก็บประจุ	79
4.34 Duty cycle ของขาเกตด้าน high side ของ BLDC motor drive ที่คำสั่ง high speed	79
4.35 สัญญาณ hall effect	80
4.36 แรงดันขาเกตด้าน high side และด้าน low side ที่คำสั่ง high speed	80
4.37 แรงดันไฟฟ้าเฟส ของ BLDC motor โดยคำสั่ง high speed	81
4.38 แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส ของ BLDC motor โดยคำสั่ง high speed	81
4.39 เปรียบเทียบ duty cycle ของ ATmega2560 กับ rpm มอเตอร์ BLDC ทั้ง 2 ล้อ	82
4.40 ผลการอ่านค่า QTR 8-RC sensor array ที่ได้ขณะที่รถวิ่งได้อย่างราบรื่น	83
4.41 ผลการอ่านค่า QTR 8-RC sensor array ที่ขณะที่รถวิ่งส่ายมาก	84
4.42 เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เมื่อน้ำหนักบรรทุกต่างกัน	88
4.43 สัญญาณขา TRIG และ ECHO ของ Ultrasonic module เมื่อตรวจจับวัตถุระยะ 0.2 m	89
4.44 ค่าที่ ATTiny85 อ่านได้ โดยวัดที่ระยะ 0.2 m และแสดงผลผ่าน Serial port	89
4.45 สัญญาณขา TRIG และ ECHO ของ Ultrasonic module เมื่อตรวจจับวัตถุระยะ 0.6 m	90
4.46 ค่า ATTiny85 อ่านได้ โดยวัดที่ระยะ 0.6 m และแสดงผลผ่าน Serial port	90
4.47 สัญญาณขา TRIG และ ECHO ของ Ultrasonic module เมื่อตรวจจับวัตถุระยะ 1 m	91
4.48 ค่า ATTiny85 อ่านได้ โดยวัดที่ระยะ 1 m และแสดงผลผ่าน Serial port	91
4.49 สัญญาณ pulse เมื่อ ATTiny85 วัดระยะได้น้อยกว่า 20 cm	92

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.1 Circuit breaker ของระบบ	98
ก.2 ปุ่ม Emergency switch และ ปุ่มเปิด-ปิดชุด BLDC motor drive	98
ก.3 จอ LCD แสดงการตั้งค่าน้ำหนัก	99
ก.4 จอ LCD แสดงการเลือกโหมดการทำงาน	99



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินโครงการ	2
2.1 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่าง Brush กับ Brushless Hub Motor	7
2.2 ลำดับการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน	8
2.3 เงื่อนไขการสวิตซ์แรงดันเฟส และแรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์	12
2.4 ลำดับสำหรับหมุนมอเตอร์ในทิศทางตามเข็มนาฬิกา	17
2.5 ลำดับสำหรับหมุนมอเตอร์ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา	17
2.6 ArduinoMega2560 Specification	22
2.7 Specification of ATTiny85	24
2.8 Specification ของ QTR – 8RC sensor array	25
2.9 Specification ของ Ultrasonic Ranging Module HC-SR04	25
3.1 คุณสมบัติเฉพาะของรถ AGV	36
4.1 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ที่ No-load	85
4.2 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ที่ Load 40 kg	86
4.3 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ที่ Load 80 kg	87



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันระบบอัตโนมัติมีความสำคัญต่อโรงงานอุตสาหกรรมอย่างมาก สาเหตุเนื่องจากผลของการแข่งขันกันด้านการตลาดอย่างจริงจังและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งปัจจัยในด้านการตลาดที่ขาดไม่ได้ นั่นคือ การกำหนดเวลาส่งมอบผลิตภัณฑ์และปริมาณที่ต้องการ ซึ่งจะต้องผลิตแข่งกับเวลา ดังนั้นประโยชน์ของระบบอัตโนมัติจึงช่วยให้ลดระยะเวลาในการทำงานจากปกติ ทั้งในรูปแบบการเปลี่ยนเครื่องมือ การขนย้ายผลิตภัณฑ์ รวมไปถึงกระบวนการต่างๆ ที่มนุษย์ไม่สามารถเข้าไปปฏิบัติงานได้ ซึ่งหากพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผลิตทั้งหมด ประมาณ 2 ใน 3 ของค่าใช้จ่ายในการผลิตทั้งหมด จะเห็นว่าการขนถ่ายวัสดุเป็นกิจกรรมที่มีความสำคัญมากต่อกระบวนการผลิต ดังนั้นหากสามารถนำรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ (Automatic Guided Vehicle : AGV) มาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม จะช่วยให้ขนย้ายวัสดุอุปกรณ์ได้รวดเร็วมากยิ่งขึ้น มีความคล่องตัวสามารถลดต้นทุนจากการจ้างแรงงาน มีความถูกต้องในการส่งวัสดุอุปกรณ์และไม่ทำให้วัสดุเกิดความเสียหายและที่สำคัญต้องมีความปลอดภัยจากการใช้ระบบอัตโนมัติ และหากพิจารณาถึงต้นกำลังของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ ซึ่งใช้เป็นมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor : BLDC Motor) ซึ่งเป็นมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง จะมีอายุการใช้งานนานกว่า Brush DC Motor อีกทั้งยังมีขนาดเล็กและมีน้ำหนักเบากว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor) ดังนั้นจึงสามารถนำมาติดตั้งและใช้เป็นตัวต้นกำลังของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติได้ดีกว่า

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อสร้างต้นแบบของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ โดยใช้ BLDC Motor 2 ตัว
2. เพื่อออกแบบระบบควบคุมการทำงานของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ
3. เพื่อพัฒนาระบบของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

### 1.3 ขอบเขตและข้อกำหนดของโครงการ

1. ใช้มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ชนิด Gear Wheel Hub Motor ขนาด 250 W, 100-700 rpm, 24-36 V<sub>dc</sub>
2. ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ได้แก่ ATmega2560, ATTiny85 และ dsPIC30F2010 ทำงานร่วมกันเพื่อควบคุมการทำงานของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ
3. สร้างรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติสามารถบรรทุกของได้ไม่เกิน 80 kg

### 1.4 วิธีการที่ใช้ในโครงการ

1. ศึกษาเกี่ยวกับข้อมูลของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ
2. ศึกษาทฤษฎีการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน
3. ศึกษาและพัฒนาระบบเขียนโปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ ได้แก่ ATmega2560, ATTiny85 และ dsPIC30F2010
4. ศึกษาและทดลองการควบคุมการทำงานของ BLDC Motor ด้วย Microcontroller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สร้างต้นแบบของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ
6. ทดสอบและแก้ไขปรับปรุงต้นแบบของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ
7. สรุปผลจากการวิจัย ข้อเสนอแนะ และจัดทำรูปเล่มปริญาานิพนธ์

### 1.5 แผนการดำเนินโครงการ

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินโครงการ

ลำดับ	ขั้นตอนการดำเนินการ	พ.ศ.2557					พ.ศ.2558					
		ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.		
1	สืบค้นและศึกษา ข้อมูลที่เกี่ยวข้อง	←-----→										
2	ออกแบบและเตรียมวัสดุอุปกรณ์			←-----→								
3	สร้างชุดขับเคลื่อนมอเตอร์			←-----→								
4	ศึกษาและทดสอบมอเตอร์			←-----→								
5	ลงมือทำชิ้นงาน			←-----→								
6	ทดสอบต้นแบบรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ						←-----→					
7	ปรับปรุงและพัฒนา							←-----→		←-----→		
		←-----→			วางแผน		←-----→				ดำเนินการจริง	

### 1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. สามารถสร้างต้นแบบของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติที่สามารถนำไปประยุกต์ให้สามารถใช้งานกับโรงงานอุตสาหกรรมได้
2. สามารถสร้างระบบการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน 2 ตัว ให้สามารถทำงานร่วมกันได้ โดยถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์
3. สามารถนำระบบการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน 2 ตัว ให้สามารถประยุกต์ใช้กับงานอื่นๆได้ เช่น Wheel chair หรือรถขับเคลื่อนอัตโนมัติอื่นๆได้

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ทฤษฎี AGV

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

ระบบเอจิวีเป็นระบบขนถ่ายวัสดุที่ไร้คนทำงานได้โดยอิสระต่อกัน ขับเคลื่อนด้วยตัวเอง ระบบเอจิวีนี้ จะประกอบด้วย ตัวรถกลไก, ระบบขับเคลื่อน, มอเตอร์ และแบตเตอรี่, ชุดควบคุมการทำงานของรถ, ระบบนำร่องทางเดินรถ

โดยทั่วไปส่วนของตัวรถ และกลไกของรถนั้นก็ถูกออกแบบมาให้เหมาะกับการประยุกต์ในการใช้งานในอุตสาหกรรมแต่ละประเภท แล้วตัวขับเคลื่อนให้รถเคลื่อนที่นั้นก็จะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่ถูกควบคุมด้วยวงจรรีเลย์หรืออิเล็กทรอนิกส์ซึ่งพลังงานในการหมุนมอเตอร์ จะได้จากแบตเตอรี่ซึ่งจะมีแรงดันอยู่ระหว่าง 12 ถึง 48 โวลต์ ส่วนชุดควบคุมการทำงานของรถจะมีอยู่ด้วยกันหลายลักษณะเช่น พีแอลซี (Programmable Logic Control : PLC) ไมโครโปรเซสเซอร์บอร์ด ซึ่งเกิลบอร์ดคอมพิวเตอร์ ซึ่งขึ้นอยู่กับว่าผู้ผลิตรายใดจะออกแบบระบบไว้อย่างไร

ระบบนำร่องทางเดินของเอจิวีจะแบ่งออกเป็นสองแบบ คือ

1. แบบกำหนดเส้นทางเดินแน่นอน เช่น แบบใช้สาย แบบใช้แถบสีบนพื้นกำหนดทางเดิน
2. แบบเส้นทางเดินอิสระซึ่งจะมีการใช้เซนเซอร์หลายชนิดหลายแบบมารวมกัน เช่น ระบบจีพีเอส (Global Positioning System : GPS) สัญญาณวิทยุ และเลเซอร์

#### 2.1.1 ชนิดของเอจิวี

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

เป็นเอจิวีที่นิยมใช้กันมาก เป็นเอจิวีแบบลากจูง มีความกว้างให้เลือกหลายชนิด ชนิดของอุปกรณ์บรรทุกถูกใช้สำหรับบรรทุก และปลดลงของสัมภาระ รถพ่วง (Trailer) ยังรวมถึงเอจิวีที่ใช้จูงรถไฟ เคน อุปกรณ์ขนส่งอัตโนมัติ คนทำงานกันเอง การส่งผ่านโดยรถไฟ และอุปกรณ์ที่โปรแกรมการบรรทุก และปลดแบบอัตโนมัติ โดยมากประยุกต์การลากจูง จะเป็นในลักษณะของการเคลื่อนที่ของที่ผลิตภัณฑ์ให้ไปภายนอกโกดัง ซึ่งการลากจูงจะใช้กับการขน ซึ่งการลากจูงจะใช้กับการขนส่งที่ปริมาณมากๆ โดยมีระยะทางขนส่งที่ไกลมากกว่า 1000 เมตร

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

เอจิวีถูกใช้งานร่วมกับร่องที่ใช้ในการโหลดชิ้นงาน โดยเอจิวีเดินทางมายังตำแหน่งที่ต้องการได้ที่ช่องดังกล่าว และสามารถเชื่อมต่อกับสายพานลำเลียง ปรกติจะถูกใช้อยู่ในคลัง และระบบการกระจายในพื้นที่ที่มีการใช้งานที่ไม่กว้างนัก

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

เอจิวีแบบบรรทุกพาเลทถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในหลายหน้าที่ เช่น หลบหลีกวัสดุที่อยู่นบนแท่น ถูกนำไปใช้ในการขนของขึ้น และลงในระดับชั้นต่างๆ โดย เอจิวีแบบบรรทุกพาเลทมีความสามารถในการบรรทุกได้ 1,000 – 2,000 ปอนด์ มีความเร็ว 264 ฟุต/นาที โดยเฉลี่ย

#### 2.1.1.4 เอจีวีแบบโฟล์คลิฟท์ (AGV Forklift Trucks)

เอจีวีแบบโฟล์คลิฟท์มีความสามารถในการยกแท่นสัมภาระขึ้น และลงได้ทั้งที่เป็นบนพื้นที่ต่างระดับความสูงกัน ตัวนำทางของรถยกมีความสามารถที่จะระบุตำแหน่งความสูงของงานได้, เอจีวีแบบโฟล์คลิฟท์เป็นเอจีวีที่มีราคาแพงมาก ดังนั้นมันจึงถูกนำมาใช้งานร่วมกับระบบการผลิตที่เป็นแบบอัตโนมัติเต็มระบบ และสามารถทำงานได้ โดยการติดอุปกรณ์ตรวจจับไว้ที่ส่วนปลายของงาน ดังนั้นมันจึงสามารถที่จะยกสิ่งของได้สูง และวางซ้อนกันได้, เอจีวีแบบโฟล์คลิฟท์ที่มีความสามารถในการทำงานได้ที่มีความสูงหลายระดับ และมีความสามารถในการบรรทุกได้ 1,000-2,000 ปอนด์ ความเร็ว 264 ฟุต/นาที่ รัศมีในการเลี้ยวน้อยที่สุด 7 ฟุต

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

เป็นเอจีวีที่มีความสามารถในการบรรทุกได้น้อยกว่า 500 ปอนด์ ใช้ในการขนส่งที่มีขนาดเล็ก และเบา มีความยาวพอประมาณใช้ในการขนถ่ายระหว่างที่จัดเก็บโดยมีความเร็วปรกติอยู่ที่ 100 ฟุต/นาที่ รัศมีในการเลี้ยว 2 ฟุต มักถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการทำงานในพื้นที่จำกัดเช่นสายการประกอบ การใช้ส่วนของไปรษณีย์

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

ระบบเอจีวีที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมแบบอัตโนมัติในปัจจุบันส่วนใหญ่จะเป็นแบบระบบที่ใช้ทางเดินนำร่องได้แก่แถบสีติดตามพื้น การฝังเส้นลวดหรือโลหะตัวนำใต้พื้นนี้มีลักษณะของความไม่ยืดหยุ่นการแก้ไขจะต้องทำการรื้อถอนแถบโลหะตัวนำออกทั้งหมดก่อนจึงจะสามารถเปลี่ยนแปลงการำงานใหม่ได้ทำให้เสียเวลาในการแก้ไข และเสียค่าใช้จ่ายมากอีกด้วย ระบบทางเดินนำร่องส่วนใหญ่มักจะถูกกำหนดโดยแรงงานอุตสาหกรรมที่ต้องการใช้งานซึ่งมีหลายกรณีที่สามารถตัดแปลงแก้ไขไปใช้งานได้ ตัวอย่างของการตัดแปลงแก้ไขระบบเอจีวีอาทิเช่น การต่อเติมทางเดินนำร่อง การเพิ่มจำนวนสถานีปฏิบัติงาน การเพิ่มจุดตัด

เอจีวีจัดเป็นหุ่นยนต์ประเภทเคลื่อนที่ (Mobile Robot) เอจีวีมีการนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมแบบใหม่มากกว่า 30 ปี เอจีวีเป็นยานพาหนะที่ไม่ต้องใช้คนขับสามารถวิ่งไปตามเส้นทางที่กำหนดไว้ได้เองโดยอัตโนมัติ นอกจากนี้ เอจีวียังสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างอื่นได้อีกอาทิเช่น รถโฟล์คลิฟท์ (Fork-Lift) รถบรรทุก (Truck) รถแทรกเตอร์ เป็นต้น หรืออาจใช้แทนสายพานลำเลียง หน้าที่ของเอจีวีคือขนส่งวัตถุดิบ ผลิตภัณฑ์สินค้าหรือชิ้นส่วนเล็กๆน้อยๆของสายการผลิตหนึ่งไปยังอีกสายการผลิตหนึ่งเอจีวีมีใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรมแบบอัตโนมัติและมีการขยายการทำงานในโรงงานแบบกึ่งอัตโนมัติ โดยสามารถทำงานร่วมกับคนได้แล้ว

สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมแบบกึ่งอัตโนมัติก็สามารถนำเอาเอจีวี ไปใช้งานร่วมกับมนุษย์ได้ โดยมนุษย์จะออกคำสั่งแบบโต้ตอบกับเอจีวีให้ทำงานได้ตามคำสั่งเช่นกัน

ในปัจจุบันเอจีวีส่วนใหญ่จะถูกกำหนดให้เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางเดินนำร่อง (Guide Path) ทั้งนี้เพราะจะได้ความแม่นยำดีกว่าวิธีที่ไม่ใช้ทางเดินนำร่องนั่นเองทางเดินนำร่องของเอจีวีถูกกำหนดตามความเหมาะสมของสภาวะแวดล้อมของโรงงานนั้นๆ อาทิเช่น การใช้แถบสีติดบนพื้น จะนิยมกันมากในโรงงานที่มีความสะอาดสูง เช่น ทำไอซีเพราะโรงงานชนิดนี้ไม่ต้องการฝุ่นละอองในห้องปฏิบัติการ ผลพลอยได้ของเอจีวี ในระบบแถบสีที่ใช้จะไม่ได้รับความเสียหายจากฝุ่นละอองที่อาจจะมาเกาะติดกับแถบสีที่ใช้ นำร่องเอจีวี วิธีนี้เป็นการลงทุนที่น้อยที่สุด หรืออาจจะมีการฝังลวดหรือโลหะตัวนำใต้พื้นเพื่อให้เอจีวี สามารถเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนดไว้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านเอจิวีก้าวหน้าไปมาก ได้มีการวิจัย และพัฒนาเอจิวีแบบที่สามารถเคลื่อนที่อิสระ (Free Ranging) ขึ้นมาใช้งานกันแล้ว เอจิวีแบบใหม่นี้ไม่ต้องอาศัยทางเดินนำร่องอีกต่อไป แต่จะใช้ระบบนำทาง (Navigation System) ซึ่งอยู่บนตัวเอจิวีในการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่แทน เทคนิคสำหรับเอจิวี แบบเคลื่อนที่อิสระมากมาย อาทิเช่น การใช้ดาวเทียมเป็นต้น และในบางกรณีอาจมีทั้งใช้เส้นทาง และไม่ใช่ เส้นทางนำร่องบนตัวเดียวก็ได้ ทั้งนี้แล้วแต่วัตถุประสงค์ของการใช้งานอย่างไรก็ตามในโรงงานอุตสาหกรรมแบบอัตโนมัติ ส่วนมากก็ยังคงใช้เอจิวีแบบมีทางเดินนำร่องด้วย เหตุผลของค่าใช้จ่ายที่ถูกกว่ากับงาน และความแม่นยำที่ดีกว่าอีกด้วย

โครงสร้างภายนอกของเอจิวีส่วนมากจะทำหน้าที่เป็นแทนไว้วางภาชนะหรือที่ใส่วัสดุต่างๆ อาทิเช่น ถาด (Frag) ชั้นวางของ (Racks) กล่อง (Boxes) มีล้อที่ใช้ในการเคลื่อนที่มีส่วนที่สามารถติดต่อกับผู้ใช้งาน เช่น คีย์บอร์ด ไฟซอทาง เสียงไซเรน นอกจากนี้เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับเอจิวี ดังนั้นเอจิวีบางตัวอาจติดตั้งตัวชน (Bumper) ทางด้านหน้า และด้านหลังของเอจิวี อีกด้วย เอจิวี ส่วนมากจะใช้ระบบขับเคลื่อนที่มีเสียงเงียบหรือไม่มีเสียงเลยจึงได้มีการนำเอามอเตอร์ไฟฟ้ามาใช้เป็นส่วนขับเคลื่อน ข้อดีคือไม่ทำให้เกิดมลภาวะแต่ข้อเสียคือสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า

ระบบเอจิวีที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมแบบอัตโนมัติในปัจจุบัน ส่วนใหญ่จะเป็นแบบระบบที่ใช้ทางเดินนำร่องได้แก่แถบสีติดตามพื้น การฝังเส้นลวดหรือโลหะตัวนำใต้พื้นนี้มีลักษณะของความไม่ยืดหยุ่น การแก้ไขจะต้องทำการรื้อถอนแถบโลหะตัวนำออกทั้งหมดก่อนจึงจะสามารถเปลี่ยนแปลงการทำงานใหม่ได้ทำให้เสียเวลาในการแก้ไข และเสียค่าใช้จ่ายมาก

### 2.1.3 เทคโนโลยีในการนำร่องของเอจิวี

เทคโนโลยีในการนำร่องเอจิวีมีหลายวิธีพอสรุปได้ดังนี้

#### 2.1.3.1 การใช้แถบโลหะ (Metal Tape)

การใช้แถบโลหะดีเป็นแถบแบบเดียวกับแถบสี วิธีการนี้จะต้องเปลี่ยนตัวตรวจจับสีไปเป็นพรอกซิมีตี้ (Proximity Sensor) แทน พรอกซิมีตี้เซนเซอร์จะให้เอาต์พุตออกมาในกรณีที่ตรวจพบแถบโลหะเท่านั้น เอาต์พุตมีให้เลือกทั้งแบบที่เป็นอนาล็อก และดิจิตอล ข้อดีของวิธีการนี้คือ ความแม่นยำคงที่ คือ แม้มิฝุ่นละอองมาเกาะติดก็ยังทำงานได้ดี ข้อเสียของวิธีนี้คือ ราคาแพง การซ่อมบำรุงทำได้ยาก

#### 2.1.3.2 การใช้แถบแม่เหล็ก (Magnetic Tape)

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

#### 2.1.3.3 การใช้แถบสีหรือเทปสะท้อนแสงติดบนพื้น

วิธีการนี้ทำได้โดยการติดแถบสีที่มีความแตกต่างกับสีของพื้น เมื่อเอจิวีตรวจพบแถบสีนั้นจะนำเอาข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ต่อไป ข้อดีของวิธีนี้คือระบบการนำร่องไม่ซับซ้อน การเปลี่ยนแปลงแก้ไขได้ง่าย การซ่อมบำรุงกระทำได้ในระยะเวลาสั้น ตลอดจนค่าใช้จ่ายในการติดตั้งถูก สำหรับเทคนิคในการตรวจจับเทปสีมี 2 วิธี ได้แก่

(ก) การใช้ตัวเซนเซอร์ตรวจจับแถบสีโดยเฉพาะ

วิธีการนี้มีความเชื่อถือได้สูงสุดโดยตัวตรวจจับแถบสีนี้จะรับเอาความถี่แสงที่กำหนดไว้ไปใช้เท่านั้น ความถี่แสงอื่นจะถูกปฏิเสธออกไป ข้อเสียของวิธีนี้คือราคาสูง

(ข) การใช้โฟโต้เซนเซอร์ (Photo Sensor)

ตัวตรวจจับความเข้มของแสงที่สะท้อนกลับออกมา วิธีการนี้จะต้องทำงานในบริเวณที่สะอาดมากๆ การใช้โฟโต้เซนเซอร์จึงเหมาะสำหรับห้องควบคุมความสะอาดของโรงงานผลิตไอซี ข้อดีของการใช้โฟโต้เซนเซอร์คือเป็นอุปกรณ์ที่หาง่าย ง่ายต่อการสร้าง ราคาถูก

2.1.3.4 การนำร่องแบบไร้สาย (Wireless Guidance)

เป็นการนำร่องที่ไม่ต้องติดตั้งทางเดินนำร่องตามพื้น วิธีการนี้อัจฉริยะ สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ และมีความยืดหยุ่นในการดำเนินการสูงมาก ในปัจจุบันมีการวิจัย และพัฒนาวิธีการนี้มาก สิ่งที่สำคัญที่สุดของการนำร่องแบบไร้สายคือ เทคนิคการนำทาง ซึ่งมีได้หลายวิธี

2.1.3.5 การประมวลผลภาพ (Image Processing)

เป็นวิธีการหาตำแหน่งของอัจฉริยะ โดยใช้กล้องติดบนเพดานหรือบริเวณมุมห้องหรือพื้นที่ปฏิบัติงาน โดยกล้องที่ใช้ปัจจุบันมีหลายแบบสามารถส่งข้อมูลทางดิจิทัลให้กับคอมพิวเตอร์นำไปประมวลผลได้ เช่น ซีซีดี เมื่อคอมพิวเตอร์รับข้อมูลจากกล้องแล้วจะเป็นผู้ออกคำสั่งให้อัจฉริยะทำงานได้โดยอาจจะใช้วิธีการสื่อสารผ่านคลื่นวิทยุหรืออาศัยรีโมทคอนโทรลสั่งงานได้ ความถูกต้องของวิธีนี้จะขึ้นอยู่กับความละเอียดของกล้องที่ใช้ ปัจจุบันมีความละเอียดให้เลือกมากมาย ข้อเสียของวิธีการนี้คือ จะต้องใช้กล้องหลายตัวเนื่องจากกล้องแต่ละตัวจะมีพิกัดของเฟกัส และรัศมีไม่มากนัก

## 2.2 ทฤษฎี และหลักการพื้นฐานของมอเตอร์แบบฮับ

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

### 2.2.1 ชนิดของมอเตอร์แบบฮับ

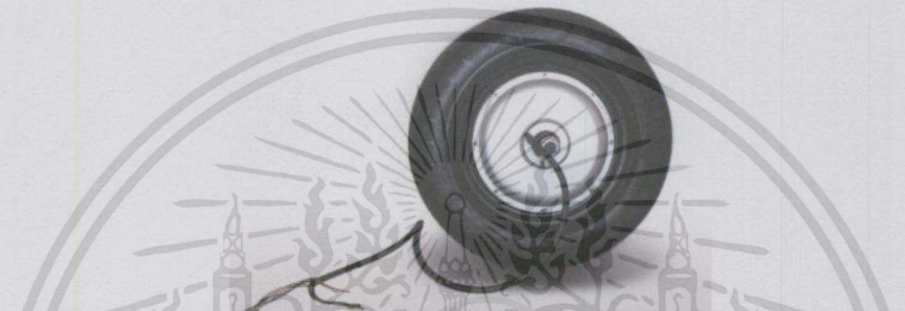
มอเตอร์แบบฮับสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดด้วยกัน คือ

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

มอเตอร์แบบฮับชนิดมีแปรงถ่านเป็นมอเตอร์แบบฮับชนิดที่มีแปรงถ่านและซีคอมมิวเตเตอร์เหมือนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทั่วไป โดยจะมีสายไฟออกจากตัวมอเตอร์เพียงสองเส้น คือ ไฟบวก และไฟลบ ซึ่งมีความซับซ้อนในการควบคุมน้อย ราคาไม่แพง แต่จะมีการเสียดสีกันระหว่างแปรงถ่านกับซีคอมมิวเตเตอร์ ทำให้เกิดการสึกกร่อนของซีคอมมิวเตเตอร์ และเกิดความสูญเสียในรูปพลังงานความร้อน ทำให้ประสิทธิภาพลดลง

### 2.2.1.2 มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Hub Motor)

มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน เป็นมอเตอร์แบบฮับชนิดที่ไม่มีแปรงถ่าน และซีคอมมิวเตเตอร์ โดยจะมีสายไฟออกจากตัวมอเตอร์ 2 ชุดประกอบไปด้วย ชุดของขดลวดอาร์มาเจอร์สามเฟส และชุดของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก (Hall Effect Sensor) และเนื่องจากมอเตอร์แบบฮับชนิดนี้ไม่มีแปรงถ่าน และซีคอมมิวเตเตอร์ จึงไม่มีความสูญเสียจากการเสียดสี ลดสัญญาณรบกวน EMI ลดการสั่นสะเทือน 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
ขนาด และน้ำหนัก	มากกว่า	น้อยกว่า
ประสิทธิภาพ	น้อยกว่า	สูงกว่า
อายุการใช้งาน	น้อยกว่า	นานกว่า
ราคา	ถูกกว่า	แพงกว่า
สายไฟที่ออกจากมอเตอร์	2 เส้น	8 เส้น

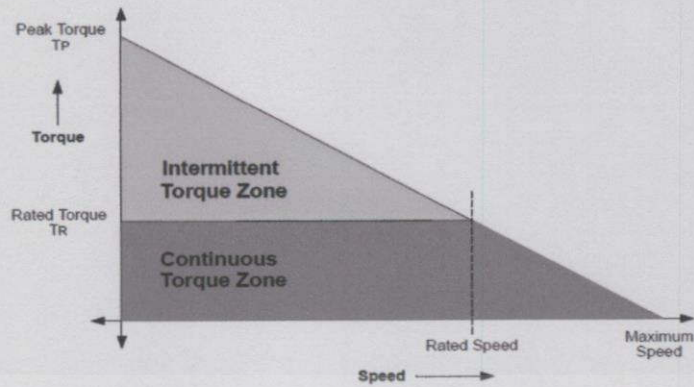
### 2.2.2 โครงสร้างของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน

โครงสร้างของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Hub Motor) หลักๆจะประกอบไปด้วยสามส่วน คือ ส่วนโรเตอร์ ส่วนสเตเตอร์ และส่วนของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กที่ติดอยู่กับส่วนของสเตเตอร์

### 2.2.3 ลักษณะของแรงบิด และความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน

จากรูปที่ 2.2 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด และความเร็ว สำหรับแรงบิดมีพารามิเตอร์สองตัวในการอธิบาย คือ แรงบิดสูงสุด ( $T_p$ ) และแรงบิดเฉลี่ย ( $T_a$ ) โดย แรงบิดสูงสุดจะเกิดขึ้นเมื่อมอเตอร์มีความเร่งหรือความเฉื่อย และแรงบิดเฉลี่ยจะเกิดขึ้นเมื่อมอเตอร์มีความเร็วคงที่ ทำนองเดียวกันในด้านของความเร็วเมื่อไม่มีการเพิ่มภาระทางกล มอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็วเฉลี่ย และโดยทั่วไปแล้วความเร็วของมอเตอร์สามารถเพิ่มขึ้นเกินพิกัดได้ประมาณ 150 % แต่จะทำให้แรงบิดลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด และความเร็ว

#### 2.2.4 หลักการทำงานของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน

หลักการทำงานของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Hub Motor) มีหลักการทำงานเหมือนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำทั่วไป โดยมีสนามแม่เหล็กหมุนสองสนามหมุนตามกันไป และไม่มีค่า slip โดยปัจจัยที่ทำให้มอเตอร์ชนิดนี้ทำงานหรือหมุนได้นั้น นอกจากขดลวด 3 เฟส ที่สเตเตอร์ และแม่เหล็กถาวรที่โรเตอร์แล้ว ยังมีอุปกรณ์ที่สำคัญ ซึ่งทำหน้าที่แทนแปรงถ่าน และเซ็นเซอร์คือ อุปกรณ์ตรวจจับสนามแม่เหล็กอีก 3 ชุด (Hall Effect Sensor) ติดตั้งเป็นส่วนหนึ่งของสเตเตอร์ โดยจะคอยตรวจจับสนามแม่เหล็กชั่วคราวที่โรเตอร์ โดยขณะที่มอเตอร์หมุนจะส่งสัญญาณ (Sensor Phasing หรือ Code) ที่เปลี่ยนแปลงไปยังกล่องควบคุมมอเตอร์ เพื่อทำการเปลี่ยนแปลง (Decode) และส่ง Output Voltage ไปยังขดลวดสเตเตอร์แต่ละเฟส เพื่อให้เกิดการดูด และผลักกันระหว่างสนามแม่เหล็กในขดลวดสเตเตอร์ และสนามแม่เหล็กถาวรของโรเตอร์ ในการทำงานของมอเตอร์ 1 รอบ จะมีการทำงานเป็น 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 โดยจะส่งสัญญาณเพื่อไปยังกล่องควบคุมทำการตัดต่อ และสลับขั้วบวก และขั้วลบของแรงดันที่เข้าขดลวดสเตเตอร์แต่ละเฟส 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 ข้อดี และข้อเสียของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน

### 2.2.5.1 ประสิทธิภาพ

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Motor) สามารถลดความสูญเสียที่เกิดจากการเสียดสีกันระหว่างแปรงถ่านกับซีคอมมิวเตเตอร์ ซึ่งผลจากการเสียดสีกันระหว่างแปรงถ่านกับซีคอมมิวเตเตอร์จะทำให้เกิดความร้อน เกิดประกายไฟ และยิ่งก่อให้เกิดคลื่นสนามแม่เหล็กรบกวน

### 2.2.5.2 ปราศจากมลพิษ

เนื่องจากมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน มีแหล่งพลังงานจากแบตเตอรี่ และไม่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายใน หากนำไปประกอบเป็นยานพาหนะไฟฟ้า จึงไม่เกิดมลพิษ

### 2.2.5.3 ประหยัดค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงาน

เนื่องจากการประจุแบตเตอรี่จนเต็มในแต่ละครั้ง จะใช้พลังงานไฟฟ้าไม่สูงมาก และเมื่อเทียบกับเครื่องยนต์สันดาปภายในแล้ว จะสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในด้านของพลังงานได้มาก

### 2.2.5.4 มีเสถียรภาพในการทำงาน

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่านเป็นมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงในขณะที่มีความเร็วคงที่ ทำให้การใช้งานประหยัดพลังงาน และมีเสถียรภาพในการทำงาน

### 2.2.5.5 มีความน่าเชื่อถือสูง

เนื่องจากมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน เป็นมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง ปราศจากมลพิษ สะดวกต่อการติดตั้งใช้งาน อีกทั้งยังมีเสถียรภาพในการทำงานที่ดี ประหยัดค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงาน ทำให้มอเตอร์ชนิดนี้มีความน่าเชื่อถือสูง และนิยมนำมาใช้ประกอบเป็นต้นกำลังของยานพาหนะไฟฟ้ากันอย่างแพร่หลาย

### 2.2.6 ข้อจำกัดของมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน

ข้อจำกัดของยานพาหนะที่ใช้มอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่านที่สำคัญ คือ แหล่งจ่ายพลังงานให้กับตัวมอเตอร์หรือแบตเตอรี่ ซึ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านแบตเตอรี่ยังมีราคาแพง สามารถจ่ายพลังงานที่แรงดันคงที่ได้ไม่ตุนัก อีกทั้งยังมีปัญหาทางด้านน้ำหนักมาก ค่าความจุพลังงานน้อย ทำให้ยานพาหนะที่ใช้มอเตอร์ชนิดนี้ สามารถวิ่งได้ในระยะทางที่ไม่ไกลมากนักต่อการประจุแบตเตอรี่หนึ่งครั้ง

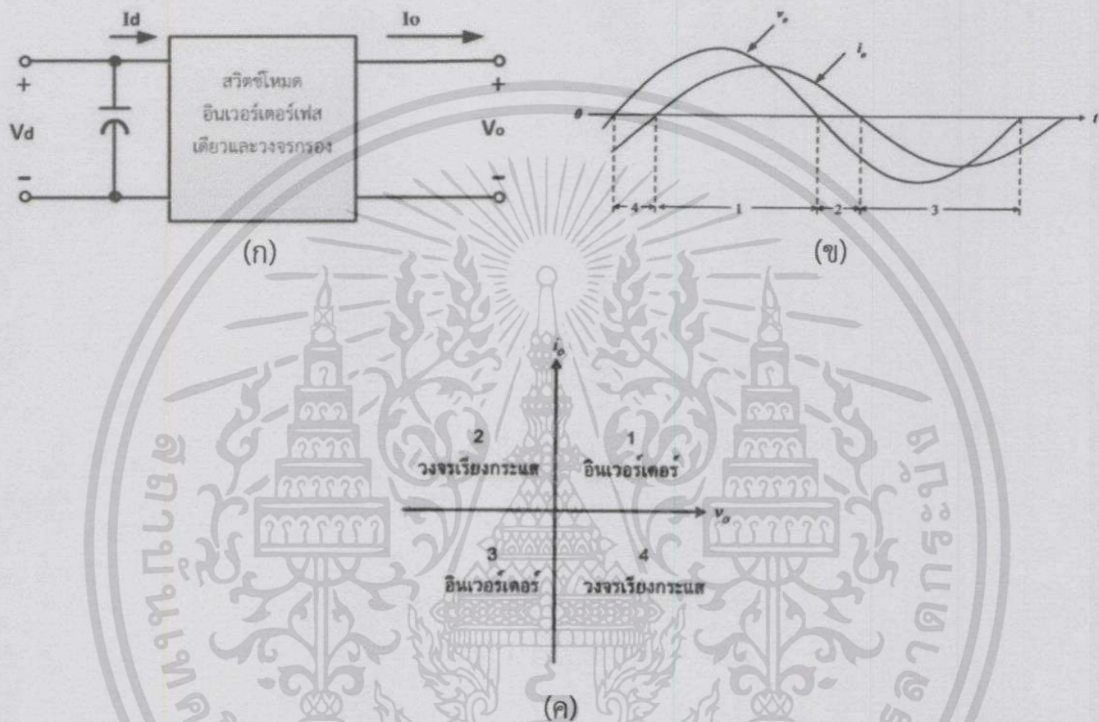
## 2.3 อินเวอร์เตอร์ (Inverter)

อินเวอร์เตอร์ (Inverter) คือวงจรแปลงผันพลังงานไฟตรงให้เป็นไฟสลับ เรียกอีกชื่อหนึ่งว่าเครื่องผกผันเพื่อให้ได้แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ มีหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงอินพุตให้มีความถี่ไฟฟ้ากระแสสลับเอาต์พุตที่เป็นค่าคงที่หรือปรับค่าได้ โดยใช้ หลักการปรับค่าแรงดันไฟตรงด้านอินพุตหรือใช้หลักการควบคุมเทคนิคการสวิตช์ภายในตัวอินเวอร์เตอร์ เช่น เทคนิค Pulse Width Modulation (PWM) เป็นต้น หรืออาจใช้วิธีปรับค่าแรงดันไฟกระแสตรงด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ก็ได้เช่นกัน สำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้งานในควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะใช้หลักการควบคุมอัตราส่วนของแรงดันเอาต์พุต และความถี่เอาต์พุตให้คงที่ (V/f Constant) เพื่อให้สามารถควบคุมให้แรงบิดคงที่ได้ แต่สำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในงานควบคุมอื่นๆที่ต้องการความถี่เอาต์พุตคงที่ก็อาจใช้อินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมการปิด-เปิด สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วยวิธีที่ไม่ซับซ้อน เช่นวิธีมอดูเลตแบบ 180 องศา และ 120 องศา เป็นต้น สำหรับลูกคลื่นของแรงดันเอาต์พุตไฟสลับของอินเวอร์เตอร์ในอุดมคติคือรูปคลื่นไซน์ แต่ในทางปฏิบัติจะไม่ใช้รูปคลื่นไซน์ แต่จะเป็นรูปกึ่งสี่เหลี่ยมซึ่งมีฮาร์โมนิกส์ปะปนอยู่มาก ซึ่งด้วยเทคนิคการสวิตช์แบบ 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 แนวคิดพื้นฐานของสวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์

การแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับในรูปแบบที่ 2.3 (ก) สมมติว่าแรงดันไฟฟ้าด้านออกคือ  $V_o$  และกระแสไฟฟ้าด้านออก คือ  $I_o$  ผ่านวงจรกรองความถี่สูงออกไปเหลือเฉพาะความถี่ต่ำ ดังนั้นแรงดัน และกระแสไฟฟ้าที่จะได้เป็นรูปไซน์ กรณีที่แสดงในรูปที่ 2.3 (ก) โหลดจะเป็นค่าความต้านทาน และความเหนี่ยวนำ ดังนั้นกระแสไฟฟ้าจะล่าหลังแรงดันไฟฟ้า สำหรับในรูปที่ 2.3 (ข) กำลังไฟฟ้าด้านออก ( $P_o$ ) จะพิจารณาเป็นผลคูณของแรงดัน และกระแสไฟฟ้าด้านออกดังนี้



รูปที่ 2.3 สวิตช์โหมดอินเวอร์เตอร์เฟสเดียว

(ก) แรงดัน และกระแสด้านเข้า และด้านออก

(ข) รูปคลื่นแรงดัน และกระแสด้านเข้า และด้านออก

(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 ต้องการจะสร้างแรงดันไฟฟ้าด้านออกเป็นรูปไซน์ที่สามารถปรับขนาด และความถี่ตามต้องการได้ โดยจะใช้สัญญาณควบคุมรูปไซน์ (sinusoidal control signal) ตามความถี่ที่ต้องการนำมาเปรียบเทียบกับรูปคลื่นสามเหลี่ยม (triangular waveform) ความถี่ของการสวิตซ์ ( $f_s$ ) จะเท่ากับความถี่ของรูปคลื่นสามเหลี่ยม

### 2.3.3 การสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าแบบยูนิโพลาร์ (Unipolar)

ข้อแตกต่างระหว่างการสวิตซ์แรงดันไฟฟ้าแบบไบโพลาร์ (Bipolar) กับยูนิโพลาร์ (Unipolar) คือ ในแบบยูนิโพลาร์การควบคุมสวิตซ์ในกึ่ง A กับกึ่ง B จะแยกสัญญาณควบคุมออกจากกัน คือสวิตซ์ในกึ่ง A จะถูกควบคุมจากสัญญาณ  $V_{Control}$  เทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม ( $V_{tri}$ ) ขณะที่สวิตซ์ในกึ่ง B จะถูกควบคุมจากสัญญาณ  $-V_{Control}$  เทียบกับสัญญาณรูปสามเหลี่ยม ( $V_{tri}$ ) การสวิตซ์จะมีเงื่อนไขดังนี้

เมื่อ  $V_{Control} > V_{tri}$  : สวิตซ์  $T_{A+}$  จะนำกระแส  $V_{AN} = V_d$

เมื่อ  $V_{Control} < V_{tri}$  : สวิตซ์  $T_{A-}$  จะนำกระแส  $V_{AN} = 0$

เมื่อ  $-V_{Control} > V_{tri}$  : สวิตซ์  $T_{B+}$  จะนำกระแส  $V_{BN} = V_d$

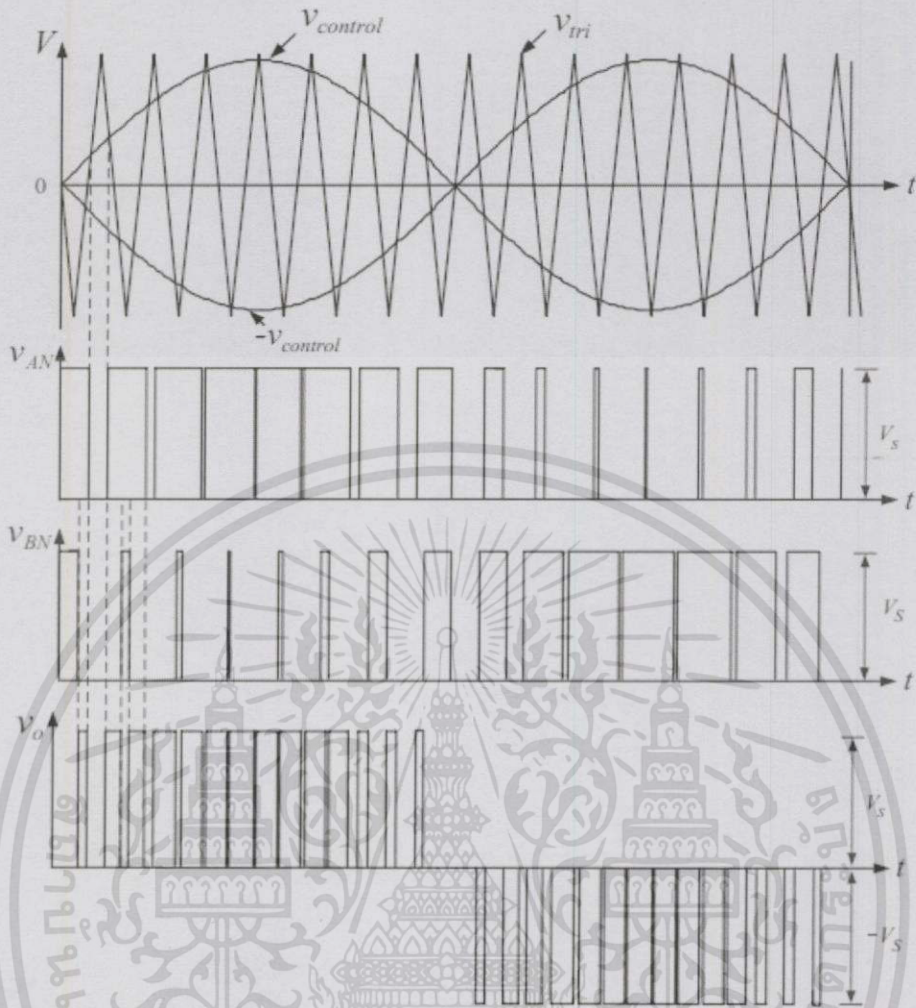
เมื่อ  $-V_{Control} < V_{tri}$  : สวิตซ์  $T_{B-}$  จะนำกระแส  $V_{BN} = 0$

ตารางที่ 2.3 เงื่อนไขการสวิตซ์แรงดันเฟสและแรงดันไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์แบบยูนิโพลาร์

เงื่อนไข	สวิตซ์นำกระแส	สวิตซ์นำกระแส	$V_{AN}$	$V_{BN}$	$V_o$
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 จึงทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันจากการสวิตซ์สูง เช่นกรณีไบโพลาร์

จุดเด่นของยูนิโพลาร์ คือ การเกิดความถี่ด้านออกจะมีความถี่เป็นสองเท่าของความถี่สวิตซ์ของแต่ละเฟส เช่น ความถี่สวิตซ์ของอุปกรณ์เป็น 10 kHz หากเป็นการทำงานแบบยูนิโพลาร์ ค่าแรงดันออกจะประกอบไปด้วยสัญญาณ PWM ที่มีความถี่หลักมูล และความถี่ฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 2 ของไบโพลาร์ ที่ 20 kHz โดยเกิดความถี่ขึ้นรอบข้าง ผลของความถี่ไหลดเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า ทำให้การออกแบบวงจรองความถี่ง่าย เล็ก และประหยัด



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

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

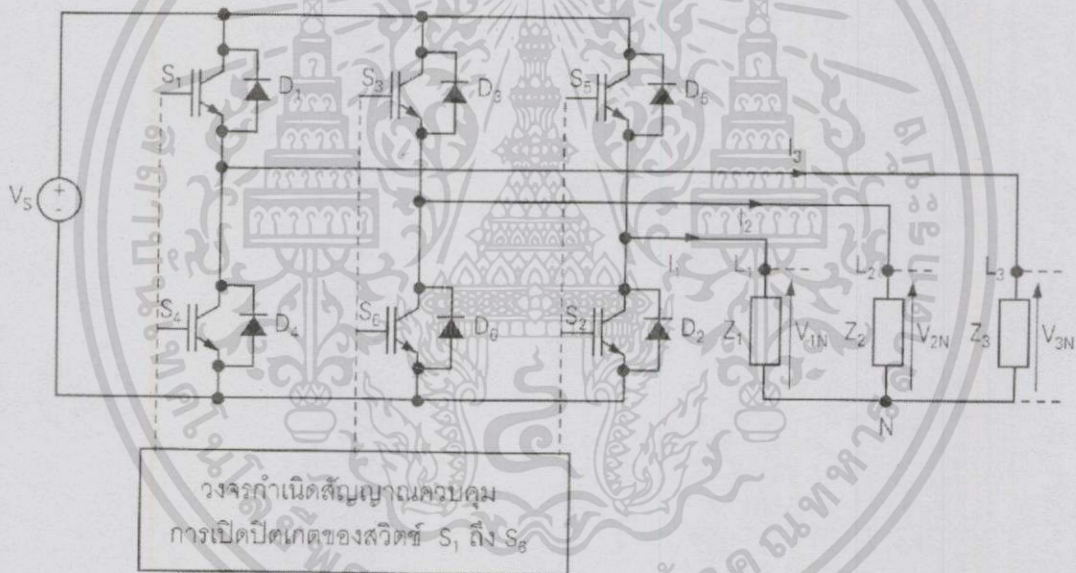
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นในอินเวอร์เตอร์สามเฟสกรณีแรงดันไฟฟ้าด้านออก และโหลด สมดุล จะเกิดที่ลำดับ  $h = 5, 7, 11, \dots$

ดังนั้นฮาร์โมนิกส์ที่มีขนาดมากที่สุด และอยู่ใกล้ความถี่หลักมากที่สุดคือฮาร์โมนิกส์ลำดับที่ 5

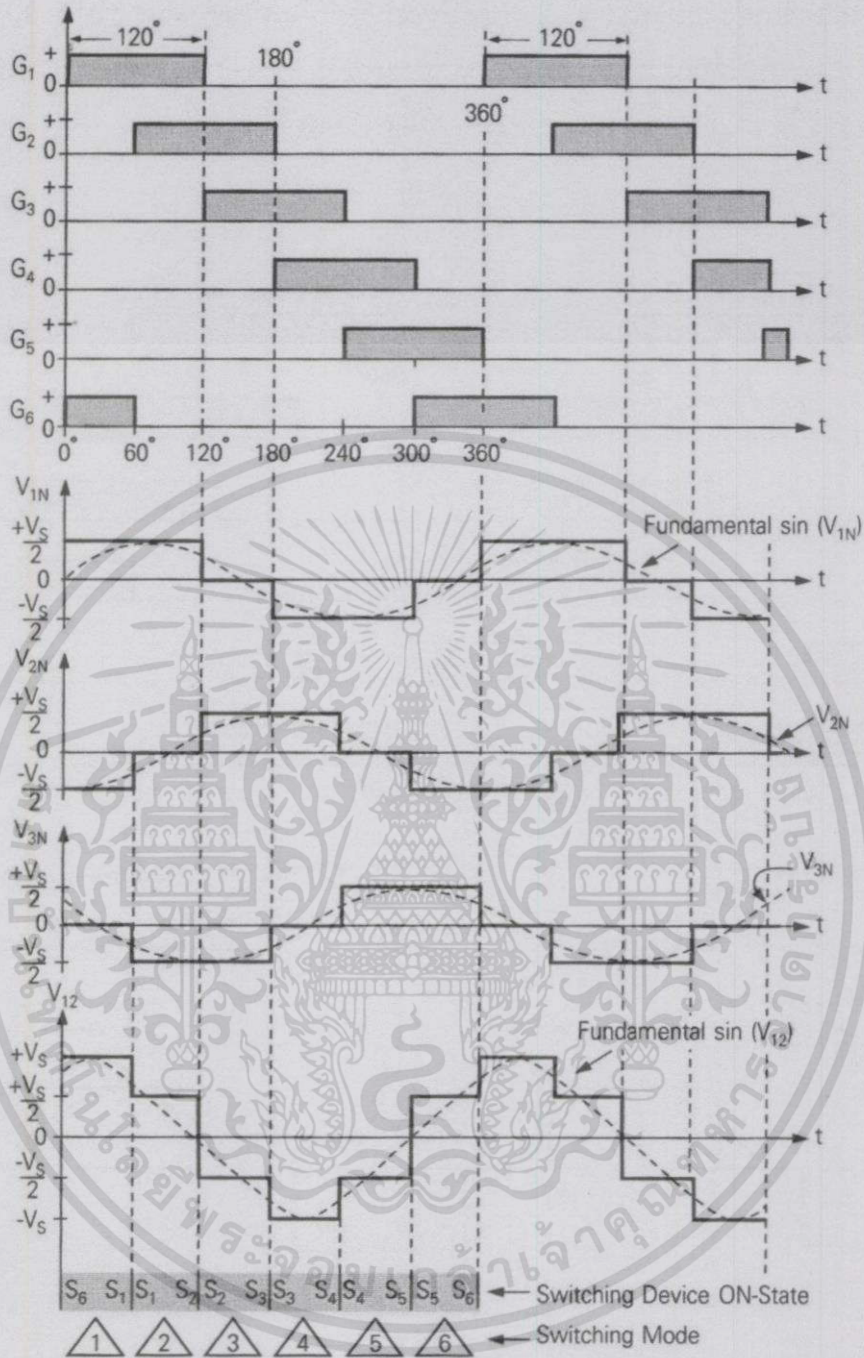
### 2.3.5 อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบขั้นบันได

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 ( $L_2$ ) และ สวิตช์  $S_5$  และ  $S_2$  ต่อกับเอาต์พุตเฟสที่ 3 ( $L_3$ ) โหลด 3 เฟสต่อด้านเอาต์พุตที่ขั้ว  $L_1, L_2, L_3$  ดังแสดง ในรูปที่ 2.14 สัญญาณสำหรับควบคุมการเปิด-ปิดสวิตช์  $S_1$  ถึง  $S_6$  สามารถควบคุมให้สวิตช์แต่ละตัว ทำงานได้ 2 แบบ คือ แบบนำกระแสที่  $180^\circ$  ( $180^\circ$  Conduction) และแบบการนำกระแสที่  $120^\circ$  ( $120^\circ$  Conduction) สวิตช์อินเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในวงจรในรูปที่ 2.14 คือ ไอจีบีที ( $S_1$  ถึง  $S_6$ ) และ ไดโอด ( $D_1$  ถึง  $D_6$ )



รูปที่ 2.5 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส ต่อโหลดแบบสตาร์

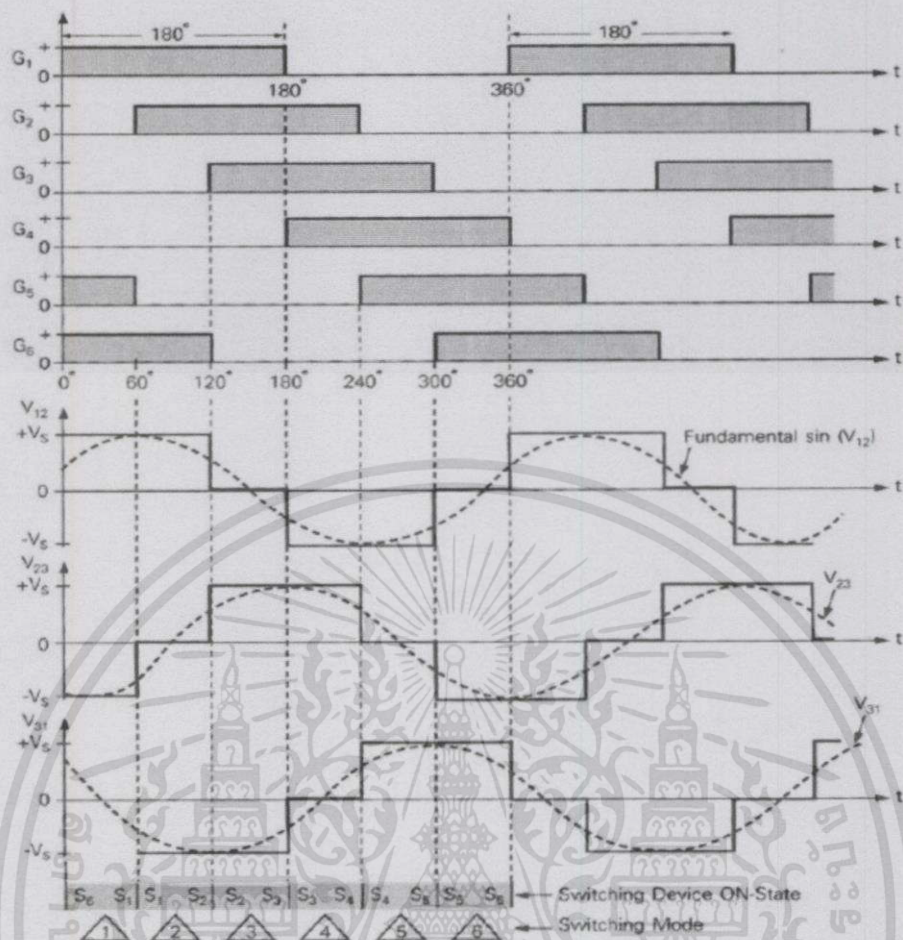
1. อินเวอร์เตอร์ 3 เฟสแบบนำกระแสที่  $120^\circ$  องศา จากวงจรในรูปที่ 2.5 เมื่อควบคุมให้สวิตช์อินเล็กทรอนิกส์กำลังแต่ละตัวนำกระแสแต่ละ  $120^\circ$  องศา โดยใช้สัญญาณควบคุมการเปิด-ปิดเกิดของไอจีบีทีตามลำดับ  $G_1$  ถึง  $G_6$  ดังรูปที่ 2.6 จะพบว่ามีไอจีบีที 2 ตัวทำงานพร้อมกันในแต่ละช่วงตามลำดับดังนี้ 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 รูปคลื่นสัญญาณควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบนำกระแส 120 องศา และรูปคลื่นแรงดันเฟส ( $V_p$ ) และแรงดันระหว่างสาย ( $V_L$ )

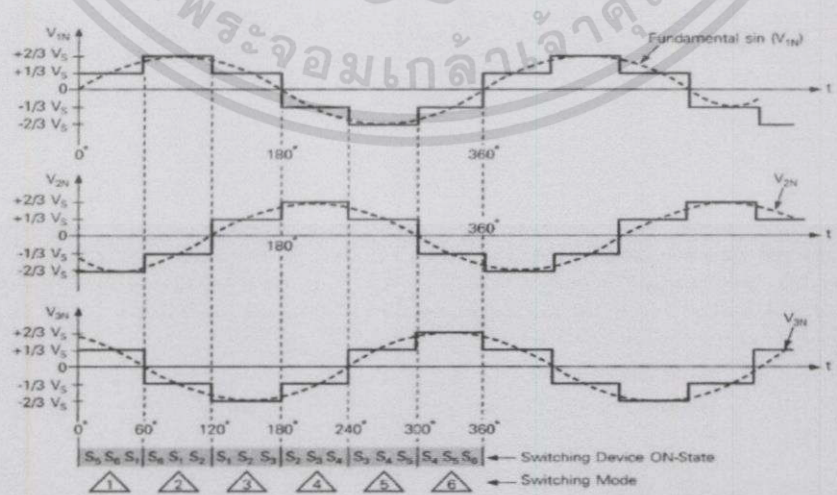
2. อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส แบบนำกระแส 180 องศา จากอินเวอร์เตอร์ในรูปที่ 2.5 เมื่อสร้างสัญญาณควบคุมการเปิด-ปิดไอจีบีที ให้สวิตช์อิเล็กทรอนิกส์กำลังแต่ละตัวนำกระแสตัวละ 180 องศา ลักษณะของสัญญาณควบคุม  $G_1$  ถึง  $G_6$  แสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งการทำงานใน 1 วัฏจักรไฟสลับ ด้านเอาต์พุตของอินเวอร์เตอร์จะมีไอจีบีที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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

สำหรับรูปคลื่นแรงดันโพลัส 3 เฟส คร่อมโหนดตัวระหว่างเฟส ( $V_p$ ) ในโหมดการทำงานที่ 1 ถึง 6 จะแสดงดังรูปที่ 2.8

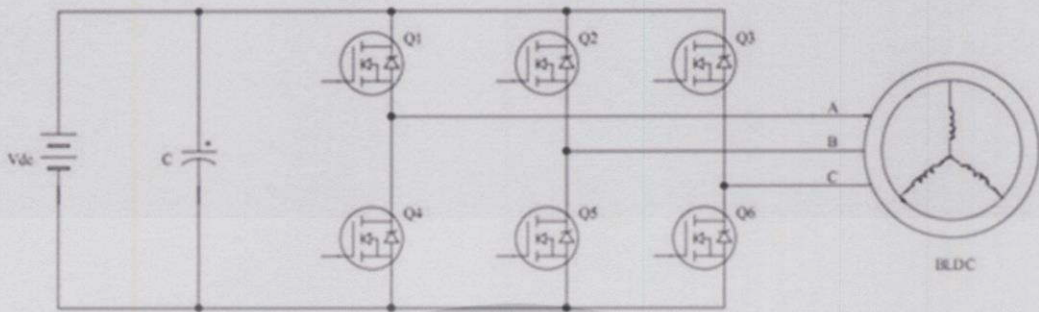


รูปที่ 2.8 รูปคลื่นแรงดันเฟส ( $V_p$ ) ของอินเวอร์เตอร์แบบนำกระแส 180 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.6 วงจรกำลังของอินเวอร์เตอร์

เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส อุปกรณ์ที่ใช้ในการสวิตช์ คือ MOSFET IRF2807



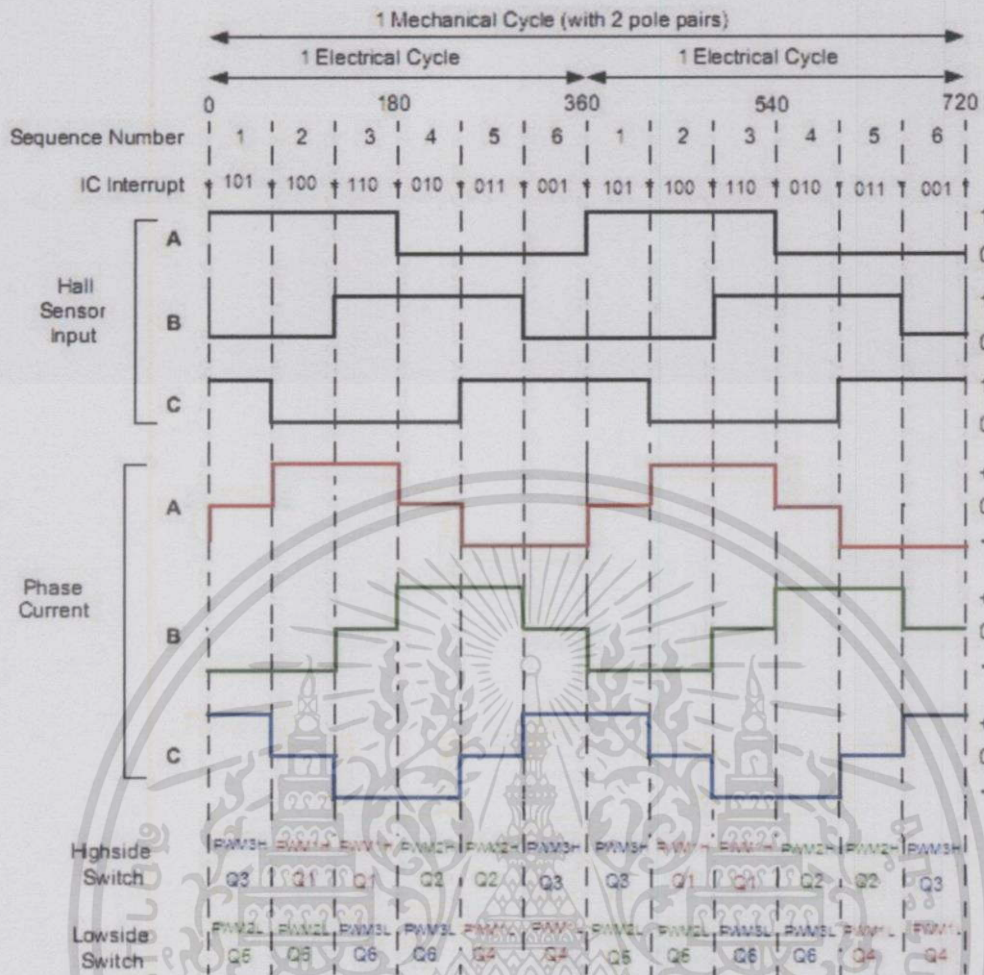
รูปที่ 2.9 วงจรอินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

ตารางที่ 2.4 ลำดับสำหรับหมวนมอเตอร์ในทิศทางการหมุนนาฬิกา (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 ลำดับสำหรับหมวนมอเตอร์ในทิศทางการหมุนทวนเข็มนาฬิกา (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

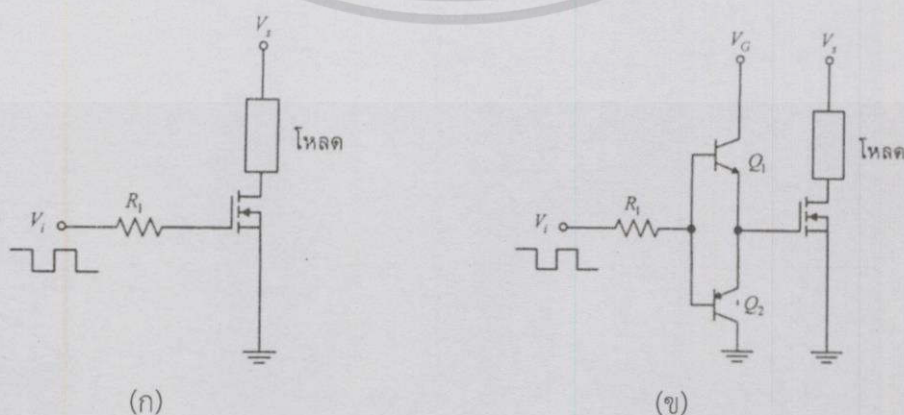
การทำงานของสวิตช์ จะทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียในวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยขณะที่สวิตช์นำกระแสจะเกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะนำกระแส ซึ่งเกิดจากการที่แรงดันคร่อมสวิตช์มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ และอีกกรณีหนึ่ง คือ กำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการเปลี่ยนสถานะของสวิตช์หรือกำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการสวิตช์ ซึ่งโดยทั่วไป สำหรับวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียจากการสวิตช์มีค่าสูงกว่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียขณะนำกระแสมาก

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

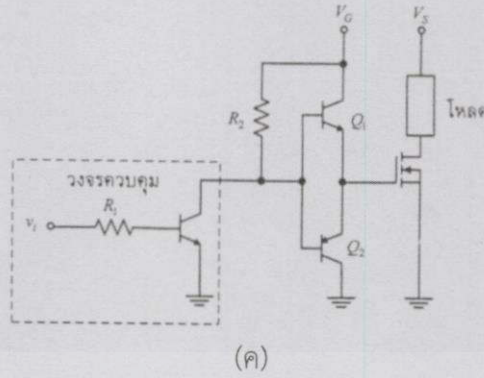
### 2.4.1 การออกแบบวงจรขับเกตสำหรับมอสเฟตกำลัง

มอสเฟตกำลังเป็นสวิตช์ที่ควบคุมด้วยแรงดัน (voltage-controlled) ทำให้ง่ายต่อการควบคุมให้เริ่มนำกระแสหรือเริ่มหยุดนำกระแส ซึ่งจะเป็นข้อดีที่เหนือกว่ากรณีของทรานซิสเตอร์กำลัง มอสเฟตกำลังจะนำกระแสก็ต่อเมื่อแรงดันตกคร่อมขาเกตเทียบกับขาซอส (VGS) มีค่าสูงกว่าค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน (threshold voltage) และเมื่อระดับแรงดัน VGS สูงกว่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน จะเป็นผลทำให้มอสเฟตกำลังเข้าสู่โหมดการทำงานในโหมดโอห์มมิก (ohmic region) ซึ่งโดยทั่วไปแรงดัน VGS เพื่อให้สวิตช์เริ่มนำกระแสจะมีค่าอยู่ระหว่าง 10 ถึง 20 โวลต์ และเพื่อให้สวิตช์ไม่นำกระแสสามารถกระทำได้โดยการทำ VGS มีค่าแรงดันต่ำกว่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยน และในขณะที่สวิตช์นำกระแส และไม่นำกระแส กระแสที่ป้อนเข้าขาเกตจะมีค่าเท่ากับศูนย์ อย่างไรก็ตาม ความเร็วในการสวิตช์ จะสามารถหาได้จากความเร็วในการเก็บ และคายประจุของค่าตัวเก็บประจุแผ่นด้านเข้าของมอสเฟตกำลัง (parasitic input capacitance) ซึ่งตัวเก็บประจุแผ่นจะต้องทำการสะสมประจุเพื่อให้สวิตช์นำกระแส และจะต้องทำการคายประจุ เพื่อทำให้สวิตช์ไม่นำกระแส สำหรับวงจรขับของไอจีบีที (IGBT) จะคล้ายกับอุปกรณ์มอสเฟตกำลังโดยมีรายละเอียดดังนี้

วงจรขับเกตของมอสเฟตกำลังจะต้องสามารถจ่ายกระแส (sourcing) และดึงกระแส (sinking) ได้อย่างรวดเร็ว เพื่อให้มอสเฟตกำลังสามารถทำงานได้ที่ความถี่สูง รูปที่ 2.11 (ก) แสดงตัวอย่างของวงจรขับที่ใช้ในการขับมอสเฟตกำลัง ซึ่งจะไม่เหมาะกับงานที่ต้องการความถี่สวิตซ์สูงๆ และนอกจากนั้นถ้าสัญญาณด้านเข้าได้รับแรงดันจากอุปกรณ์ลอจิกดิจิทัลแรงดันต่ำ (low-voltage digital device) แรงดันด้านนี้อาจจะไม่เพียงพอที่จะขับให้มอสเฟตกำลังนำกระแสได้ จึงต้องมีการปรับปรุงวงจรขับ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ข) ด้วยการใช้คู่ของวงจรอิมิตเตอร์ตาม (double emitter follower) หรือ โทเท็มโพล (totem pole) ซึ่งเป็นวงจรที่ประกอบด้วยคู่อุปกรณ์ทรานซิสเตอร์แบบ NPN และ PNP สำหรับการทำงานของวงจรขับเกต เมื่อแรงดันด้านเข้าของวงจรขับเกตมีค่าสูง ทรานซิสเตอร์ Q1 จะเริ่มนำกระแส และทรานซิสเตอร์ Q2 ไม่นำกระแส เป็นผลทำให้มอสเฟตกำลังเริ่มนำกระแส และเมื่อแรงดันด้านเข้าของวงจรขับเกตมีค่าต่ำ ทรานซิสเตอร์ Q1 จะไม่นำกระแส และทรานซิสเตอร์ Q2 นำกระแส ซึ่งจะเป็นการย้ายประจุจากขาเกต เป็นผลทำให้มอสเฟตกำลังเริ่มหยุดนำกระแสได้ นอกจากนี้สัญญาณด้านเข้าอาจจะมาจากวงจร คอลเลกเตอร์แบบเปิด (open collector TTL) ที่ประกอบด้วย โทเท็มโพล ซึ่งจะใช้เป็นบัฟเฟอร์ (buffer) สำหรับแหล่งจ่ายกระแส (source) และดึงกระแส (sink) ที่ขาเกต ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ค)



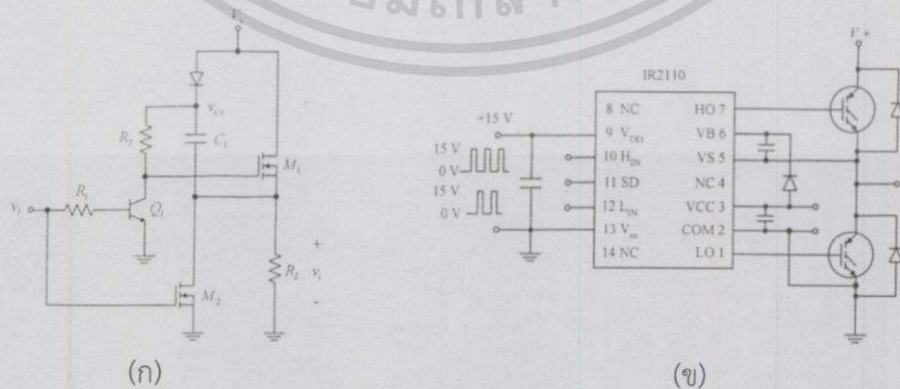
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

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

หลักการทำงานของวงจรบูตสเตรป 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  $v_{gs}$  ทำให้มอสเฟต  $M_1$  นำกระแส และเมื่อมอสเฟต  $M_1$  นำกระแส แรงดันด้านออก  $v_o$  จะมีค่าเท่ากับ  $V_s$  โดยที่แรงดันขาเกตของมอสเฟต  $M_1$  จะมีค่าเท่ากับ  $2V_s$  เพราะพลังงานที่สะสมในตัวเก็บประจุ  $C_1$  ทำให้แรงดันขาเกต-ซอร์ส (gate-to-source voltage :  $V_{GS}$ ) ของมอสเฟต  $M_1$  ยังคงมีค่าเท่ากับ  $V_s$  ขณะที่มอสเฟต  $M_1$  นำกระแส และเมื่อ  $v_i$  กลับมีค่าสูงอีกครั้ง ทำให้ทรานซิสเตอร์  $Q_1$  นำกระแส แรงดันขาเกตของมอสเฟต  $M_1$  จะมีค่าลดลง จนกระทั่งมอสเฟต  $M_1$  ไม่นำกระแสในที่สุด

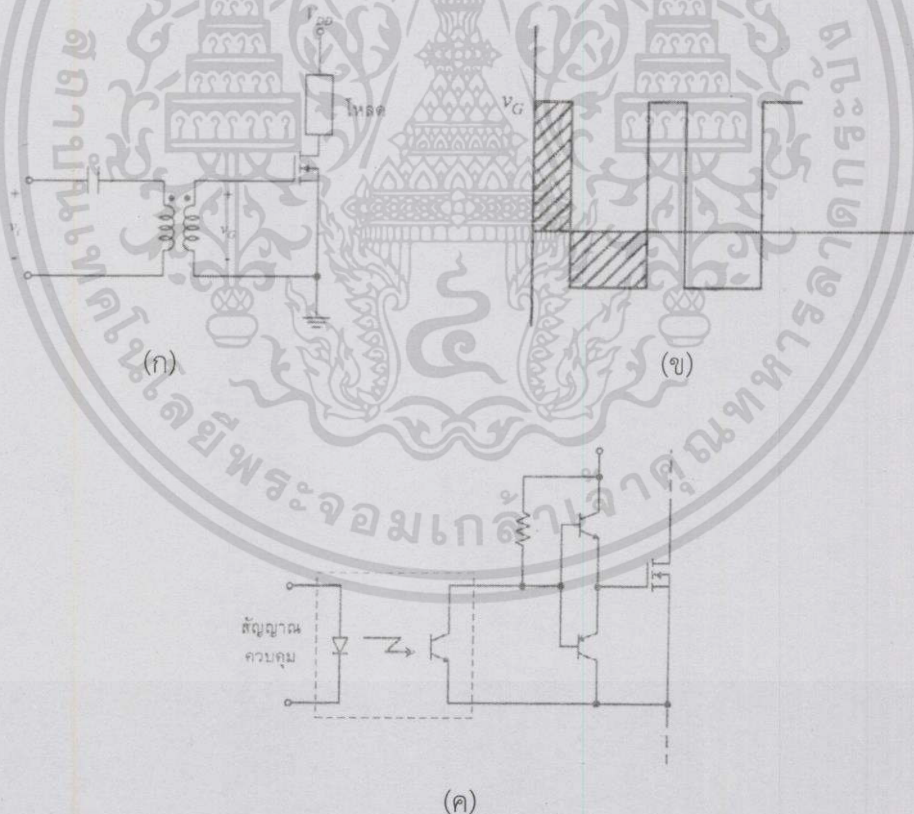


รูปที่ 2.12 (ก) วงจรบูตสเตรปสำหรับวงจรขับเคลื่อนด้านบัสบวกของมอสเฟตกำลัง (ข) วงจรขับเคลื่อนเบอร์ IR2101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

การแยกจากกันทางไฟฟ้า (Electrical Isolation) ระหว่างมอสเฟตกับวงจรควบคุม (control circuit) โดยมากจะมีความจำเป็น เพราะระดับแรงดันที่แตกต่างกันอย่างมากระหว่างวงจรควบคุมกับวงจรกำลัง (power circuit) เช่น สำหรับมอสเฟตกำลังด้านบัสบวกของวงจรฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์หรือของวงจรถับเกตคอนเวอร์เตอร์ เป็นต้น สำหรับวงจรที่ใช้ในการแยกจากกันทางไฟฟ้า โดยมากจะได้แก่แบบการเชื่อมต่อทางแม่เหล็ก (magnetically coupled) และการเชื่อมต่อทางแสง (optically coupled circuit) ดังรูปที่ 2.13 (ก) แสดงวงจรควบคุม และวงจรกำลังที่แยกจากกันทางไฟฟ้าโดยอาศัยการเชื่อมต่อทางแม่เหล็กด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า ซึ่งตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่กับหม้อแปลงไฟฟ้าจะใช้สำหรับป้องกันไฟฟ้ากระแสตรงหรือดีซีออฟเซต (dc offset) สำหรับตัวอย่างรูปคลื่นสัญญาณเข้าขาเกตได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.13 (ข) ตามลำดับ และสำหรับตัวอย่างของการแยกจากกันทางไฟฟ้าโดยอาศัยการเชื่อมต่อทางแสง ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.13 (ค)



รูปที่ 2.13 (ก) การแยกจากกันทางไฟฟ้าระหว่างวงจรควบคุม และวงจรกำลังด้วยหม้อแปลงไฟฟ้า

(ข) แรงดันไฟฟ้าทุติยภูมิของหม้อแปลงไฟฟ้า

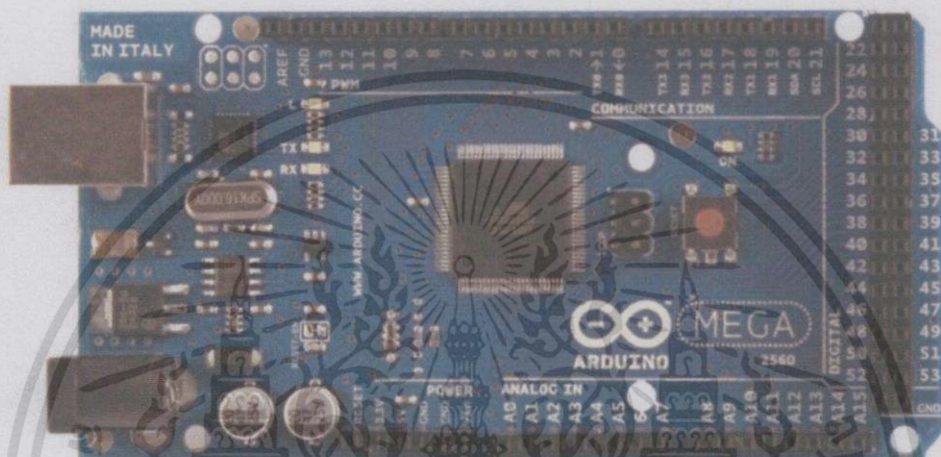
(ค) การแยกจากกันทางไฟฟ้าระหว่างวงจรควบคุม และวงจรกำลังด้วยการเชื่อมต่อทางแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 Microcontroller

### 2.5.1 ATmega2560

ATmega2560 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งถูกพัฒนานำมาใช้ในบอร์ดพัฒนาที่ชื่อว่า 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 บอร์ด ArduinoMega2560

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 Boot loader และมี SRAM 8 kb และ หน่วยความจำแบบ EEPROM 4 kb

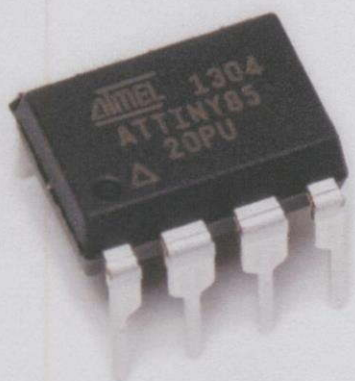
### 2.5.1.3 Input และ Output

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

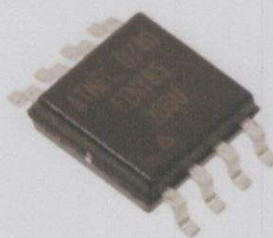
- Serial : 0 (RX) และ 1 (TX), Serial 2 : 17 (RX) และ 16 (TX) ; Serial 3 : 15 (RX) และ 14 (TX) เป็นขาที่มีไว้สำหรับการเชื่อมต่อแบบ Serial port
- External Interrupts : 2 (Interrupt 0), 3 (Interrupt 1), 18 (Interrupt 5), 19 (Interrupt 4), 20 (Interrupt 3) และ 21 (Interrupt 2) เป็นขาที่ไว้ใช้สำหรับการ Interrupt 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 ATTiny 85

ATTiny85 เป็น Arduino ขนาดเล็ก มีขาทั้งหมด 8 ขาซึ่งมีทั้งแบบ 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 2.7



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.15 ATTiny85 โดย (ก) แบบ DIP (ข) แบบ SMD

## ตารางที่ 2.7 Specification of ATTiny85

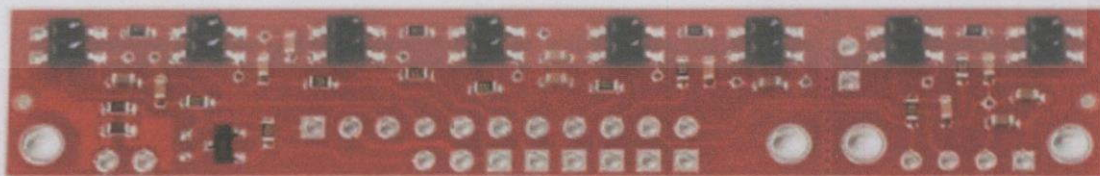
แรงดันไฟฟ้าใช้งาน	2.7-5.5 V
หน่วยความจำ	8 kb
ความเร็วของ Internal Clock	1 MHz
Digital I/O	5 Pins
PWM ร่วมกับ Digital I/O	2 Pins
ADC ร่วมกับ Digital I/O	3 Pins

## 2.6 Sensor

## 2.6.1 QTR

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

โดย LEDs บนอุปกรณ์ได้ถูกควบคุมการเปิด และปิดโดย MOSFET เพื่อช่วยเรื่องของการประหยัดพลังงาน ซึ่งเซ็นเซอร์ QTR-8RC ถูกนำมาใช้ในการตรวจจับเส้นทางเป็นหลัก แต่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานอื่นๆได้ เช่น การวัดระยะทาง การตรวจจับวัตถุ เป็นต้น



รูปที่ 2.16 QTR 8-RC Sensor Array

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 Specification ของ QTR – 8RC sensor array

ขนาด	7.5 x 1.25 cm <sup>2</sup>
แรงดันที่ใช้งาน	3.3 - 5.0 V
กระแสที่ใช้งาน	100 mA
ระยะตรวจจับที่เหมาะสม	3 mm
ระยะตรวจจับสูงสุด	9.5 mm
น้ำหนัก	3.1 g

หลักการทํางาน : IR LED แต่ละตัว จะส่งสัญญาณออกไปจากตัว Sensor และสัญญาณจะสะท้อนกับสีบนวัตถุที่เราใช้ และสะท้อนกลับมากระทบกับ Receiver หรือก็คือตัว Phototransistor โดยที่ Phototransistor แต่ละตัว จะทำการคายประจุจากตัวเก็บประจุที่อยู่ในวงจร RC บนโมดูล และใช้ Microcontroller ในการคำนวณระยะเวลาในการคายประจุของเซนเซอร์ โดยที่หาระยะเวลาในการคายประจุสั้น บ่งบอกว่าสามารถสะท้อนกับวัตถุได้ดี แต่หาระยะเวลาในการคายประจุสูง บ่งบอกว่าสามารถสะท้อนกับวัตถุได้ไม่ดี หรือก็คือ วัตถุดูดกลืนแสงได้มาก

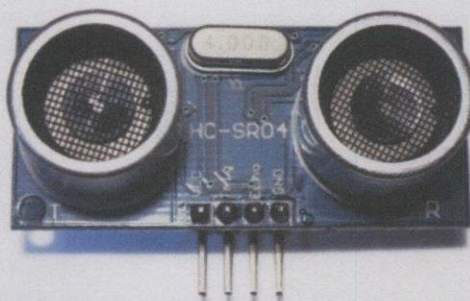
ตัวอย่างการทํางาน : เมื่อ Sensor อ่านค่าที่อยู่บนพื้นสีขาว จะอ่านค่าได้ต่ำเพราะเวลาในการคายประจุมีค่าต่ำ แต่หาก Sensor อ่านค่าที่อยู่บนพื้นสีดำ จะอ่านค่าได้สูงเพราะเวลาในการคายประจุมีระยะเวลานาน ซึ่งค่าระยะเวลานี้จะขึ้นอยู่กับการประมวลผลของ Microcontroller แต่ละชนิด

### 2.6.2 Ultrasonic

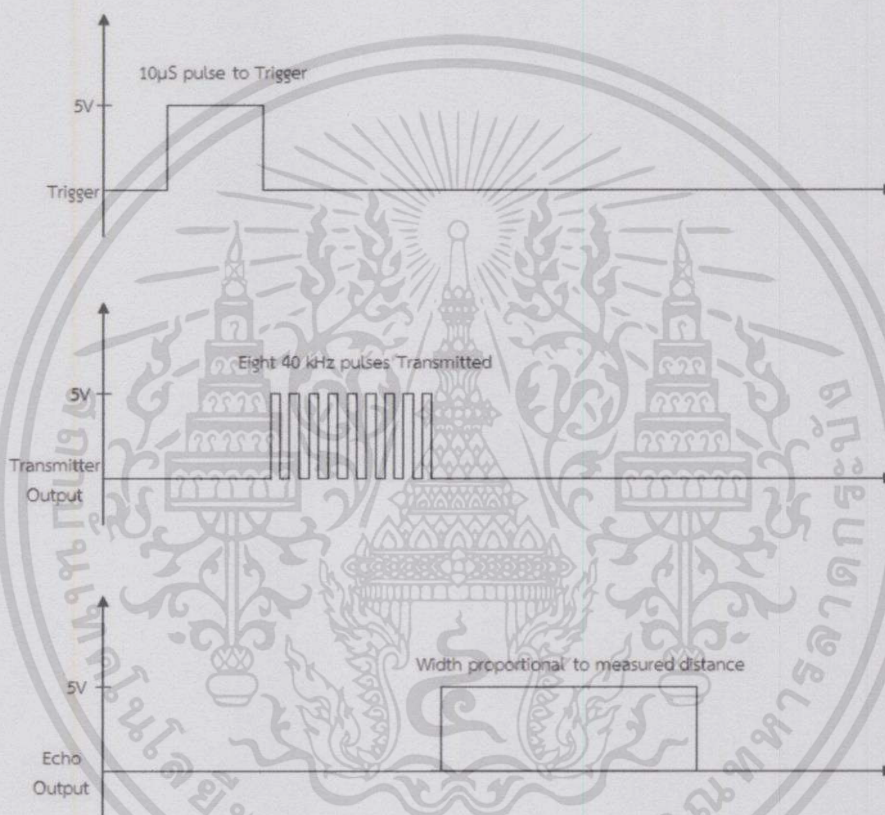
Ultrasonic Ranging Module HC-SR04 นั้นเป็น Module ที่ไว้สำหรับใช้วัดระยะทาง โดยใช้หลักการของการสะท้อนของคลื่นเสียง โดยมี Specification ดังนี้

ตารางที่ 2.9 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 2.17 Ultrasonic Ranging Module HC-SR04



รูปที่ 2.18 Timing Diagram ของ Ultrasonic Module HC-SR04

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

แต่เนื่องจากระยะเวลาของ Pulse ที่นำมาคำนวณนั้นเป็นระยะเวลารับ-ส่งของคลื่นเสียง ดังนั้นสูตรในการคำนวณหาระยะทางนั้น จะเป็นไปตามสมการ ดังนี้

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

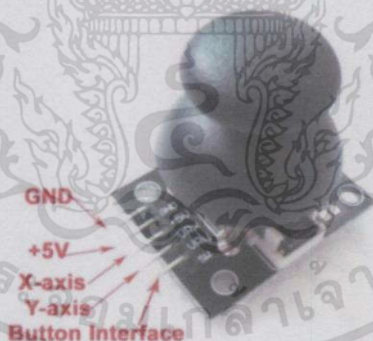
ตัวอย่างเช่น ทดลองวัดระยะทางวัตถุ ในห้องอุณหภูมิ  $25^{\circ}\text{C}$  และจับสัญญาณความกว้างของ Pulse จากขา Echo ได้ความกว้างเท่ากับ  $1\text{ ms}$  จะสามารถคำนวณระยะวัตถุได้ดังนี้ จากสมการ จะได้อัตราเร็วของเสียงในอากาศ =  $346\text{ m/s}$  จะได้ระยะทาง ดังนี้

$$\text{ระยะทางวัตถุ} = \frac{(346 \times 1 \times 10^{-3})}{2}$$

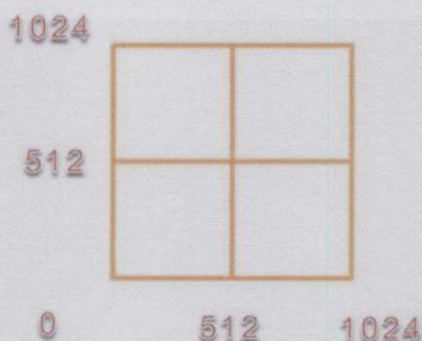
$$\text{ระยะทางวัตถุ} = 0.173\text{ m หรือ } 17.3\text{ cm}$$

### 2.6.3 Joystick

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



รูปที่ 2.19 XY Joystick Module

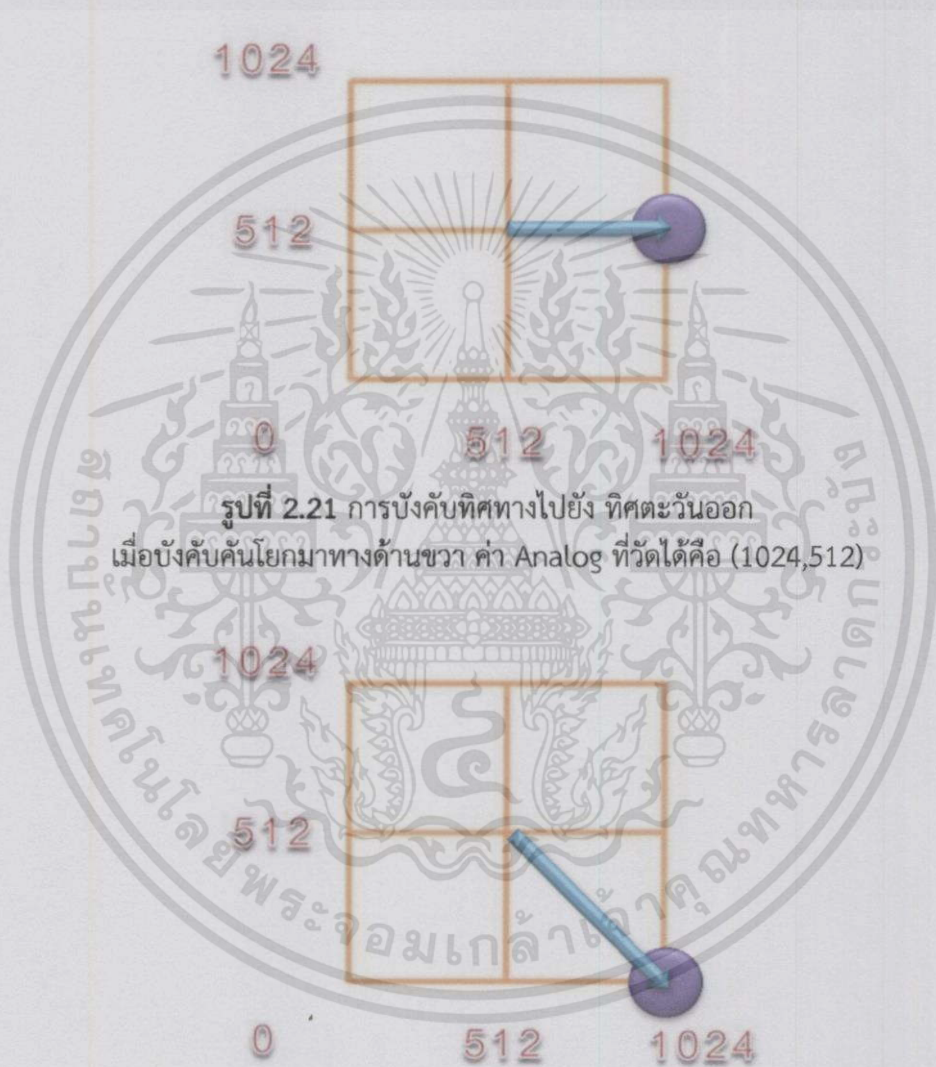


รูปที่ 2.20 แบบจำลองการทำงาน XY Joystick Module

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

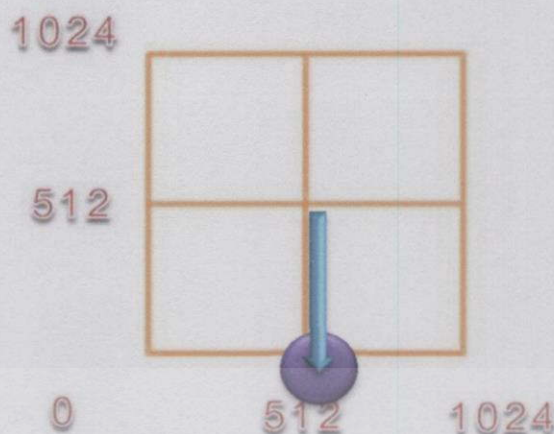
หลักการทำงาน : เครื่องบังคับทิศทาง (Joystick) ทำหน้าที่คือ มีตัวแปรของแรงดันไฟฟ้าเสมือนเซ็นเซอร์ให้เรา โดยค่าต่างๆที่รับมาขึ้นอยู่กับ ทิศทางการหมุนของอุปกรณ์ที่อยู่รอบตัวของเพลลา

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

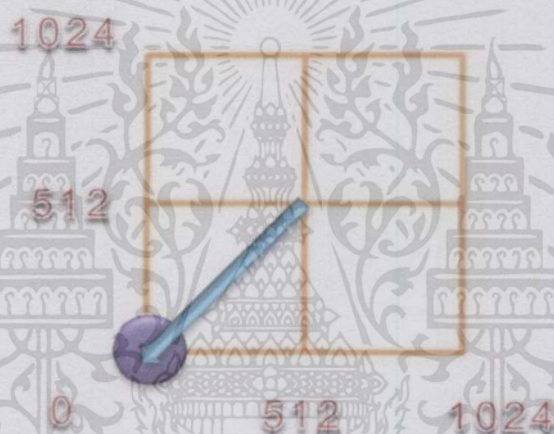


รูปที่ 2.22 การบังคับทิศทางไปยัง ทิศตะวันออกเฉียงใต้  
เมื่อบังคับคันโยกมาทางด้านล่างขวา ค่า Analog ที่วัดได้คือ (1024,0)

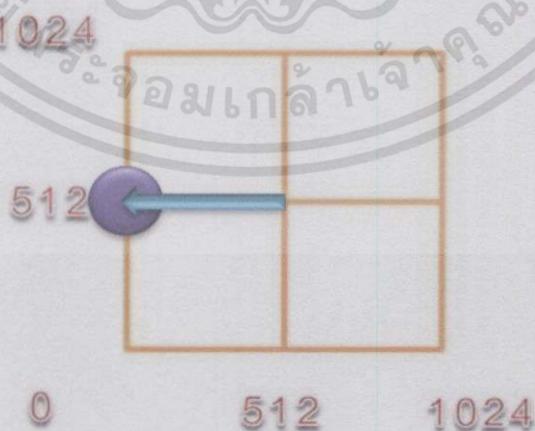
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 การบังคับทิศทางไปยัง ทิศใต้  
เมื่อบังคับคณโยกมาทางด้านล่าง ค่า Analog ที่วัดได้คือ (512,0)

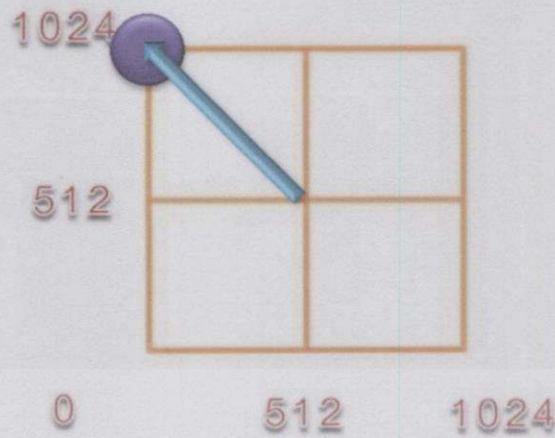


รูปที่ 2.24 การบังคับทิศทางไปยัง ทิศตะวันตกเฉียงใต้  
เมื่อบังคับคณโยกมาทางด้านล่างซ้าย ค่า Analog ที่วัดได้คือ (0,0)

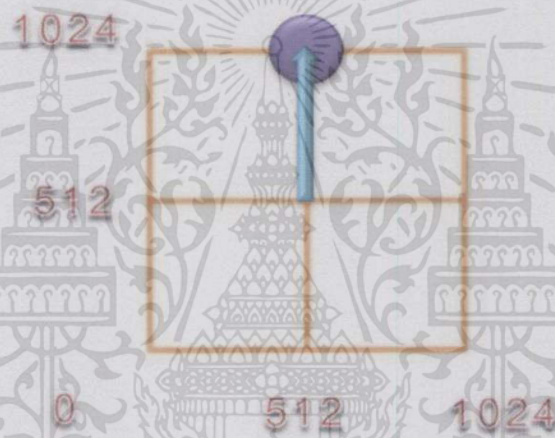


รูปที่ 2.25 การบังคับทิศทางไปยัง ทิศตะวันตก  
เมื่อบังคับคณโยกมาทางด้านซ้าย ค่า Analog ที่วัดได้คือ (0,512)

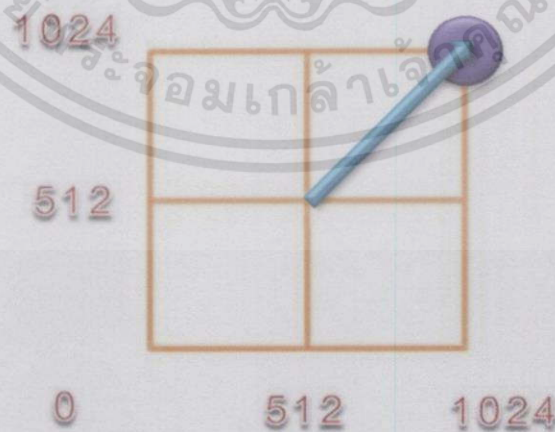
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 การบังคับทิศทางไปยัง ทิศตะวันตกเฉียงเหนือ  
เมื่อบังคับคันโยกมาทางด้านบนซ้าย ค่า Analog ที่วัดได้คือ (0,1024)



รูปที่ 2.27 การบังคับทิศทางไปยัง ทิศเหนือ  
เมื่อบังคับคันโยกมาทางด้านบน ค่า Analog ที่วัดได้คือ (512,1024)



รูปที่ 2.28 การบังคับทิศทางไปยัง ทิศตะวันออกเฉียงเหนือ  
เมื่อบังคับคันโยกมาทางด้านบนขวา ค่า Analog ที่วัดได้คือ (1024,1024)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

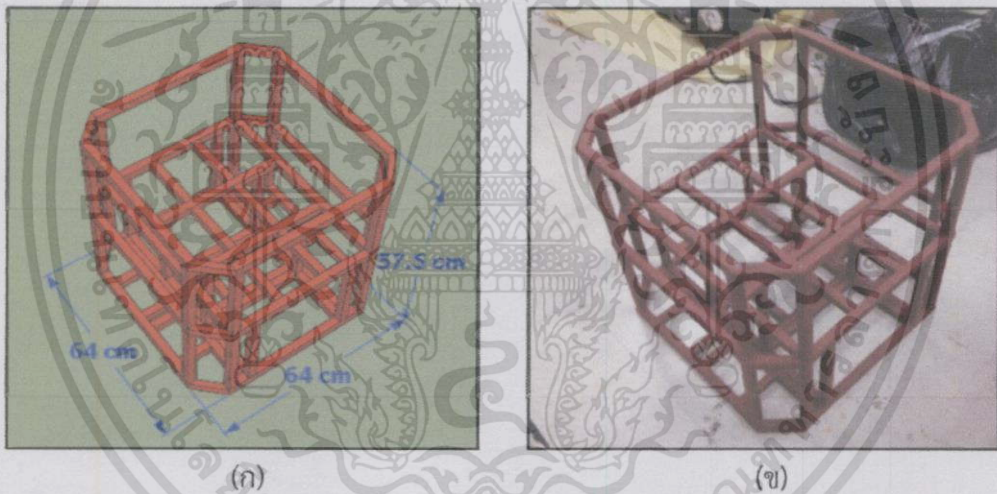
### บทที่ 3

## การออกแบบ และสร้างระบบการทำงานของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ

### 3.1 ลักษณะโครงสร้าง และวัสดุอุปกรณ์

#### 3.1.1 รูปแบบโครงสร้างของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ

โครงสร้างของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติถูกสร้างออกมาในรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีความมั่นคง แข็งแรง และมี 2 ชั้น โดยชั้นล่างเป็นที่วางชุดขับเคลื่อนรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ ส่วนพื้นที่ด้านบนมีไว้สำหรับใช้บรรทุกสิ่งของ โดยสามารถบรรทุกของที่มีน้ำหนักถึง 80 กิโลกรัมได้ ลักษณะโครงสร้างเป็นโครงเหล็กที่นำมาเชื่อมกัน ทำให้ได้รูปทรงขนาดความกว้าง 64 เซนติเมตร ความยาว 64 เซนติเมตร และความสูง 57.5 เซนติเมตร โดยมีล้อทั้งหมด 4 ล้อด้วยกัน ประกอบไปด้วยล้อมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (BLDC Motor) ซึ่งเป็นชนิด Gear Wheel Hub Motor จำนวน 2 ล้อ เป็นต้นกำลังของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ ส่วนล้ออีก 2 ล้อ เป็นล้ออิสระที่มีทิศทางการหมุนอิสระ สามารถหมุนได้ 360 องศา โดย 2 ล้อนี้จะเป็นส่วนเสริมสำหรับใช้สนับสนุนเพื่อเสริมการรับแรง และทำให้รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติมีความสมดุลทางกลมากยิ่งขึ้น

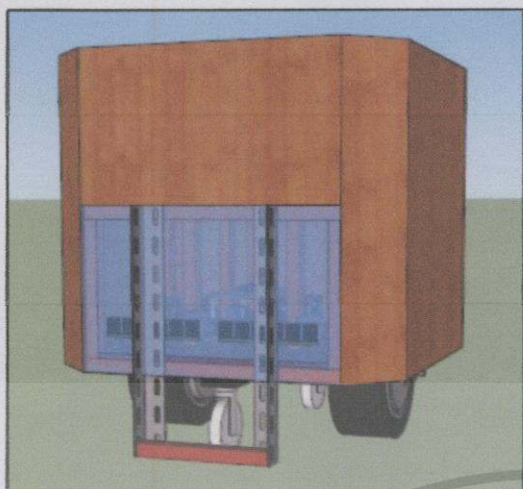


รูปที่ 3.1 โครงรถของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ

โดย (ก) โครงรถที่ออกแบบด้วยโปรแกรม SketchUp (ข) โครงรถชิ้นงานจริง

#### 3.1.2 วัสดุ และตัวถังของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ

วัสดุที่ใช้ในการทำตัวถังรถนั้นเป็นไม้อัด และแผ่นอะคริลิกใส ซึ่งวัสดุที่นำมาสร้างเป็นโครงรถ คือเหล็กเส้น ขนาด 1"x1" นำมาเชื่อมต่อกันเป็นลักษณะรูปทรงลูกบาศก์ใช้เป็นส่วนรับน้ำหนักของวัตถุที่จะบรรทุก, ตัวถัง, แบตเตอรี่ และชุดวงจรควบคุมต่างๆ โดยวางตำแหน่งล้อมอเตอร์เป็นจุดศูนย์กลางของตัวถังรถ โดยยึดล้อมอเตอร์ BLDC Gear Wheel Hub Motor กับโครงรถด้วยเหล็กฉาก และมีล้อเสริมอิสระติดตั้งด้านหน้า และด้านหลังของตัวถังอีกจำนวน 2 ล้อด้วยกัน เพื่อประคองความสมดุลทางกลให้กับรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ ดังรูปที่ 3.2



(ก)

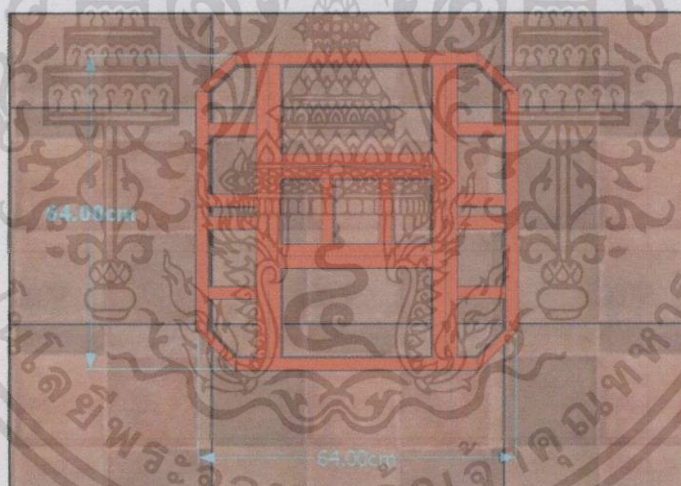


(ข)

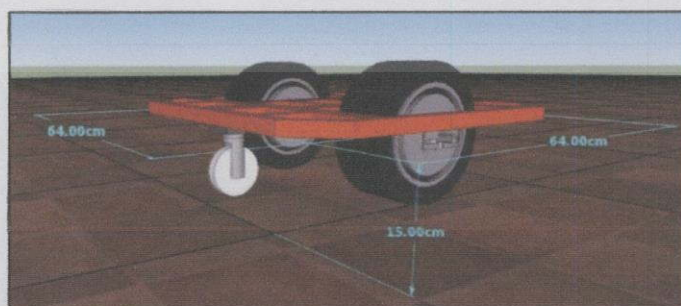
รูปที่ 3.2 ตัวถังรถของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ  
โดย (ก) ตัวถังรถที่ออกแบบด้วยโปรแกรม SketchUp (ข) ตัวถังรถชิ้นงานจริง

### 3.2 ขั้นตอนการสร้างรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ

#### 3.2.1 ออกแบบรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติด้วยโปรแกรม SketchUp

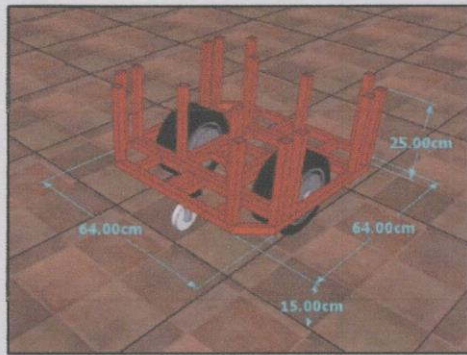


รูปที่ 3.3 ออกแบบฐานรูปทรงของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ

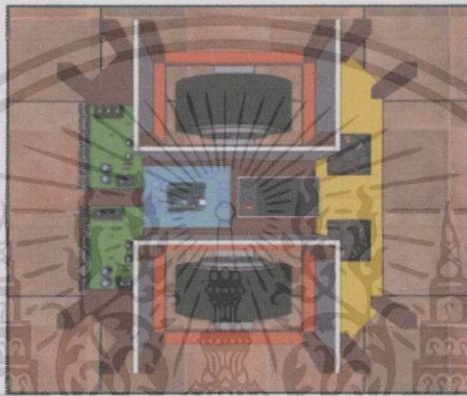


รูปที่ 3.4 ออกแบบลักษณะการวางตำแหน่งของล้อ 4 ล้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



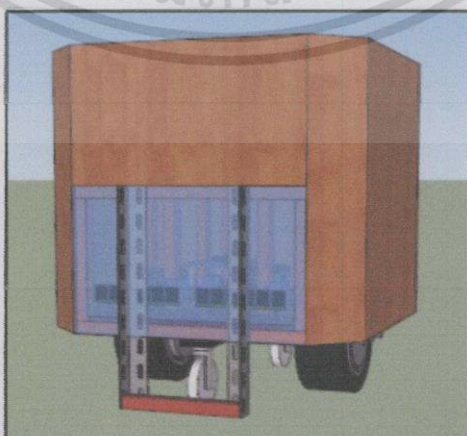
รูปที่ 3.5 ออกแบบพื้นฐานโครงสร้าง 2 ชั้น



รูปที่ 3.6 ออกแบบลักษณะการวางตำแหน่งของชุดควบคุมต่างๆ



รูปที่ 3.7 Dimension ของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ



รูปที่ 3.8 ภาพรวมของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

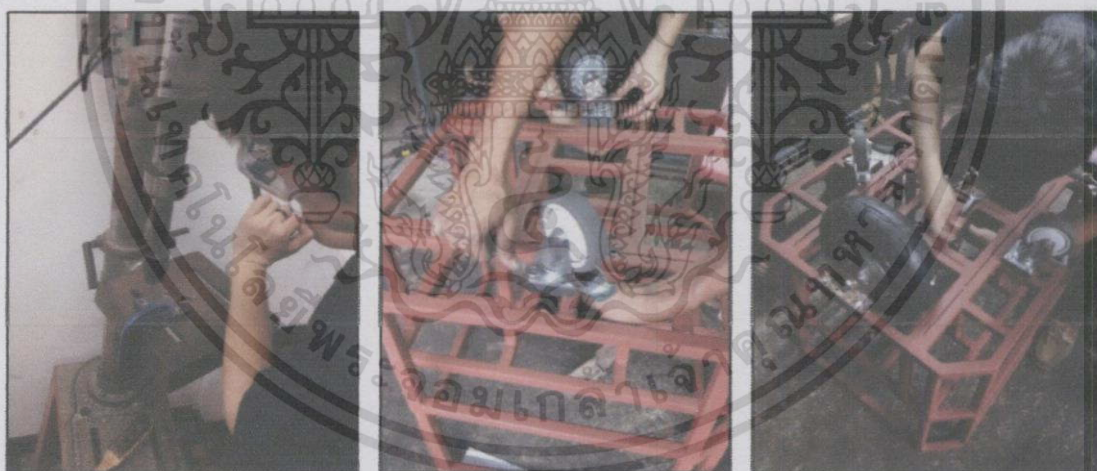
### 3.2.2 ขั้นตอนการสร้างต้นแบบรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ

(1) จัดหาเหล็กเส้นตามจำนวนที่ได้ออกแบบไว้ในโปรแกรม SketchUp และ นำไปเชื่อมจนได้รูปทรงลูกบาศก์ ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 โครงรถของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ

(2) ติดตั้งส่วนของล้อขับเคลื่อน ประกอบไปด้วย ล้อมอเตอร์ BLDC gear wheel hub motor จำนวน 2 ล้อ และล้ออิสระ จำนวน 2 ล้อ ดังรูปที่ 3.10 ถึง 3.11



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการติดตั้งส่วนของล้อขับเคลื่อน โดย

(ก) เจาะเหล็กต้นขนาด  $6 \times 6 \times 2 \text{ cm}^3$  เพื่อนำมาเสริมความสูงของล้ออิสระทั้ง 2 ล้อ

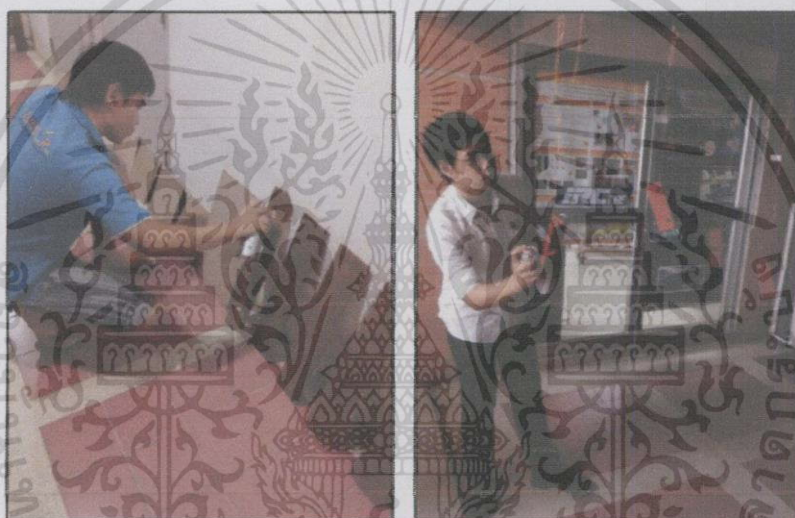
(ข) ติดตั้งล้ออิสระทั้ง 2 ล้อ (ค) ติดตั้งล้อมอเตอร์ BLDC Gear Wheel Hub Motor

(3) ตั้งศูนย์ และระดับล้อทั้ง 4 ล้อ ให้อยู่ในระดับเดียวกัน โดยการใช้เครื่องมือวัดระดับน้ำ ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ตั้งศูนย์ และระดับล้อ โดยใช้เครื่องวัดระดับน้ำ

(4) ตกแต่งชิ้นงาน เก็บรายละเอียด พ่นสเปรย์ แลคเกอร์เคลือบเงาชิ้นงาน



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.12 (ก) พ่นแลคเกอร์แผ่นไม้ (ข) พ่นสีเหล็กฉาบ

(5) นำชิ้นส่วนต่างๆมาประกอบกันเป็นต้นแบบรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.13 ต้นแบบรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ

เมื่อ (ก) มุมมองด้านหน้า/ด้านข้างของรถ (ข) มุมมองด้านบนของรถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

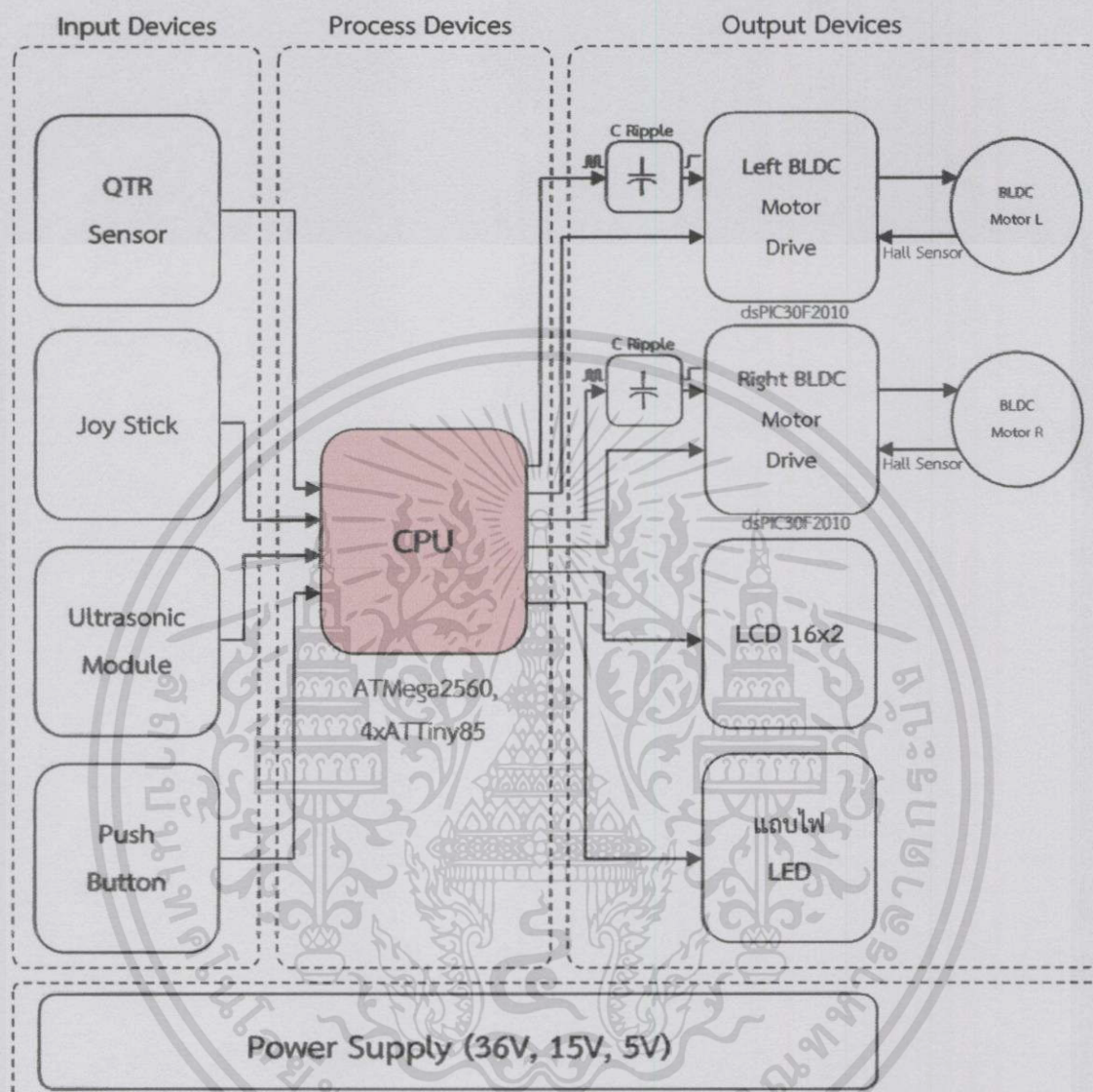
### 3.3 คุณลักษณะเฉพาะของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ (Specification)

ตารางที่ 3.1 คุณลักษณะเฉพาะของรถ AGV

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
หลักการการทำงาน	ระบบอัตโนมัติเดินทางตามเส้นแถบสีดำ
ความสามารถในการทำงาน	สามารถทำงานในโหมด Manual ได้ (Joystick)
ความสามารถในการทำงาน	สามารถทำงานในโหมด Bluetooth ได้
ความสามารถในการทำงาน	ทำงานในที่มืดได้
ความสามารถในการทำงาน	สามารถทำงานในที่มืดได้
ความสามารถในการทำงาน	ทำงานได้ n Station
ข้อจำกัดในการทำงาน	ทำงานในพื้นที่ไม่สะอาดได้ไม่ติดนัก
มอเตอร์	BLDC 350 W, 100-700 rpm ,24-36 V <sub>dc</sub>
แบตเตอรี่	Lithium-Iron Phosphate 36V 10Ah
ความสามารถแบตเตอรี่	ไม่เกิดการลุกไหม้หากเกิดความเสียหาย
ระยะเวลาในการใช้งาน	5 hr ต่อการบรรจุแบตเตอรี่ 1 ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

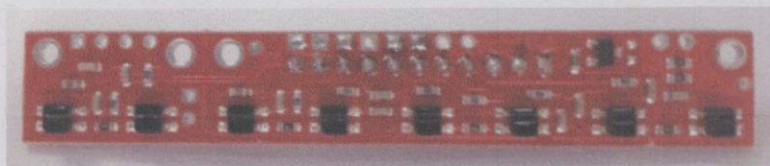
### 3.4 Block Diagram of AGV System



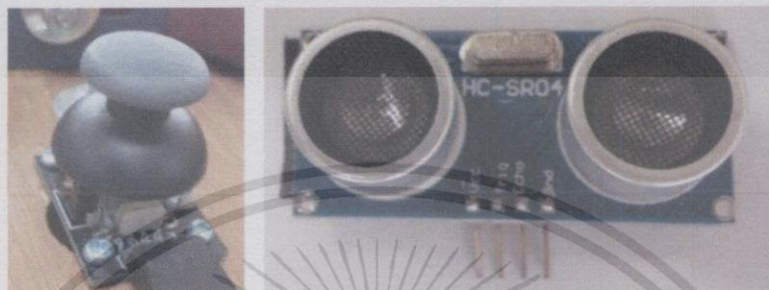
#### 3.4.1 Input Devices

อุปกรณ์ขาเข้าของ CPU นั้นประกอบไปด้วย QTR 8-RC Sensor Array มีหน้าที่เป็นเซนเซอร์ในการตรวจจับเส้นทาง, Joy Stick ซึ่งนำมาใช้เป็นอินพุตสำหรับโหมดบังคับเอง, Ultrasonic Module HC-SR04 จำนวน 3 ตัว นำมาใช้ในการวัดระยะ เพื่อใช้ในการตรวจจับวัตถุที่อยู่ด้านหน้า และสุดท้าย Push Button 3 ปุ่ม คือ ปุ่มลบ (-) ใช้เพื่อเลื่อนเคอร์เซอร์ไปด้านซ้าย หรือใช้ลดค่าการตั้งค่าน้ำหนัก, ปุ่มบวก (+) ใช้เพื่อเลื่อนเคอร์เซอร์ไปด้านขวา หรือใช้เพิ่มค่าการตั้งค่าน้ำหนัก และปุ่มตกลง (Enter) ใช้สำหรับการยืนยันการตั้งค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 QTR 8-RC Sensor Array



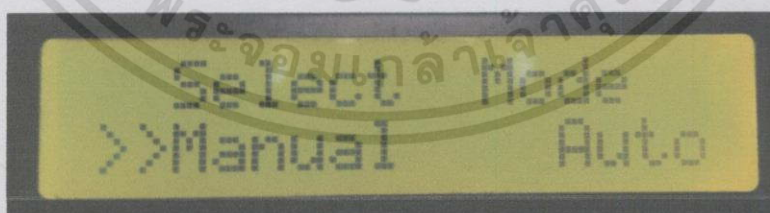
(ก)

(ข)

รูปที่ 3.15 (ก) Joy Stick Module (ข) Ultrasonic Module HC-SR04



รูปที่ 3.16 Push Button (-), (+) และ center



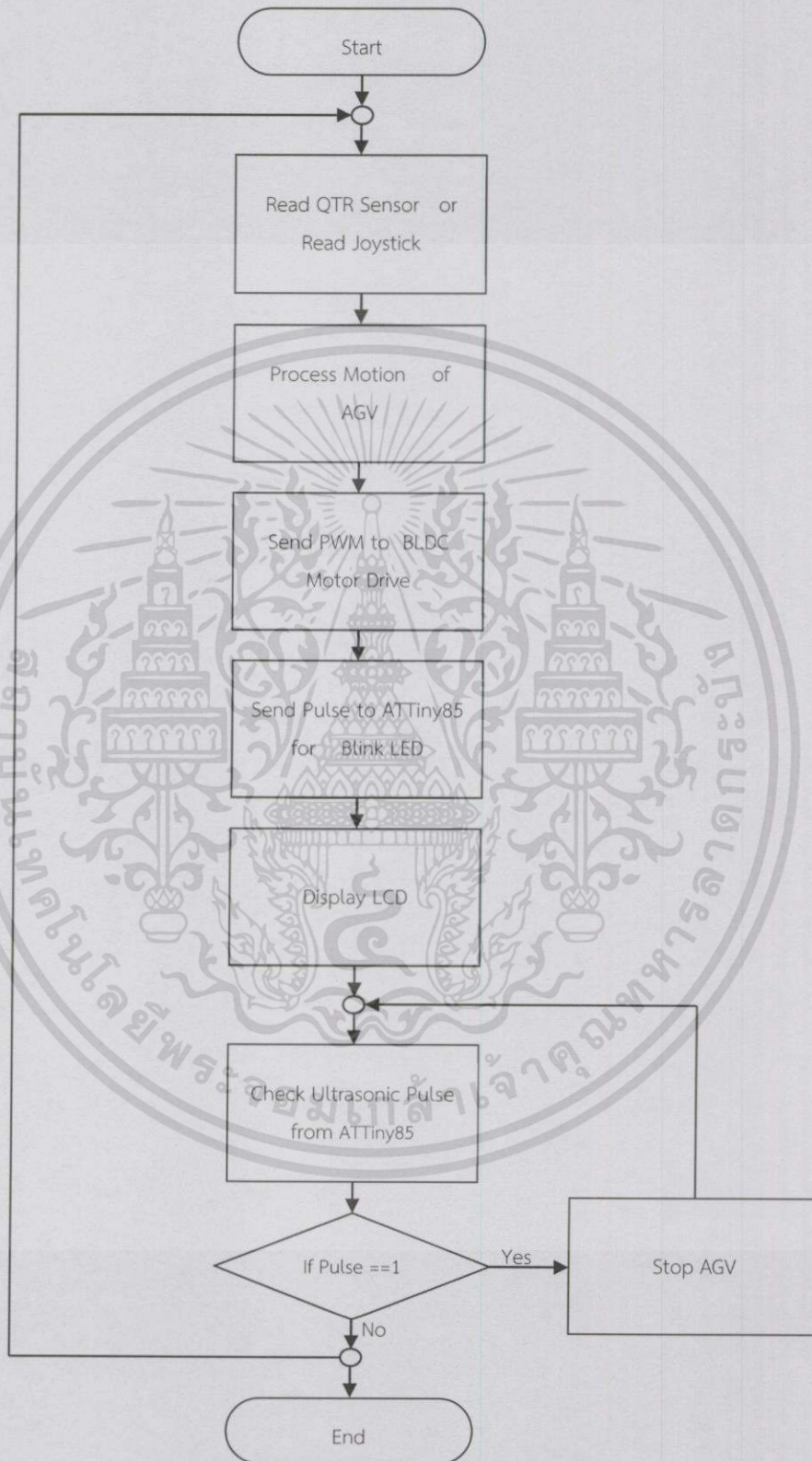
รูปที่ 3.17 ตัวอย่าง Cursor ด้านซ้ายเพื่อเลือกโหมดบังคับตัวเอง

### 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 ตัวนั้นทำงานในส่วนของการกะพริบ แลปไฟ LED และ ATTiny85 อีก 3 ตัว ทำงานในส่วนของการวัดระยะวัตถุด้านหน้าหรือตรวจจับวัตถุ ซึ่งสามารถแสดง Flow Chart การทำงานของส่วนประกอบของตัวประมวลผลกลางได้ ดังนี้

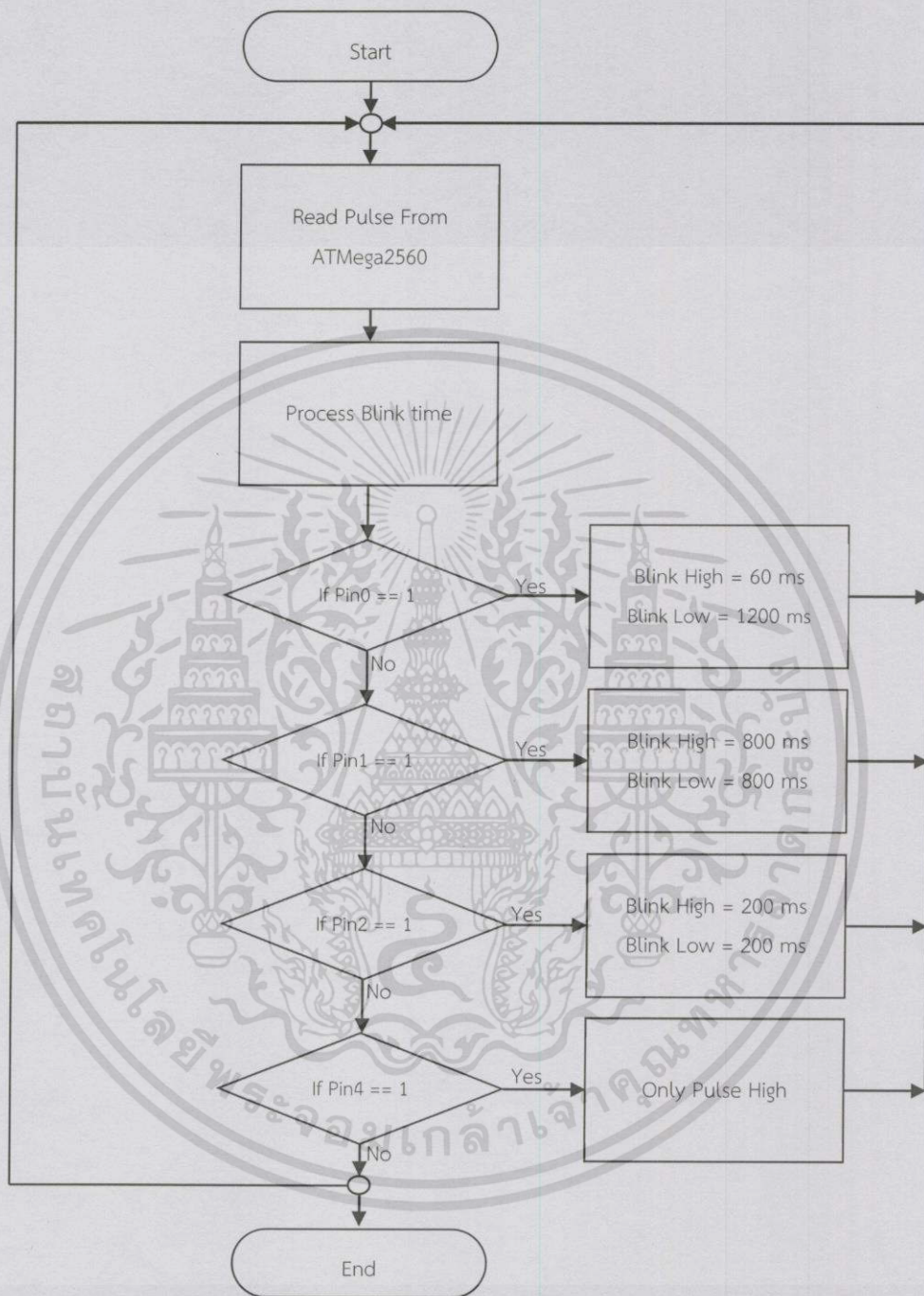
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.4.2.1 Flow chart การทำงานของ ATmega2560



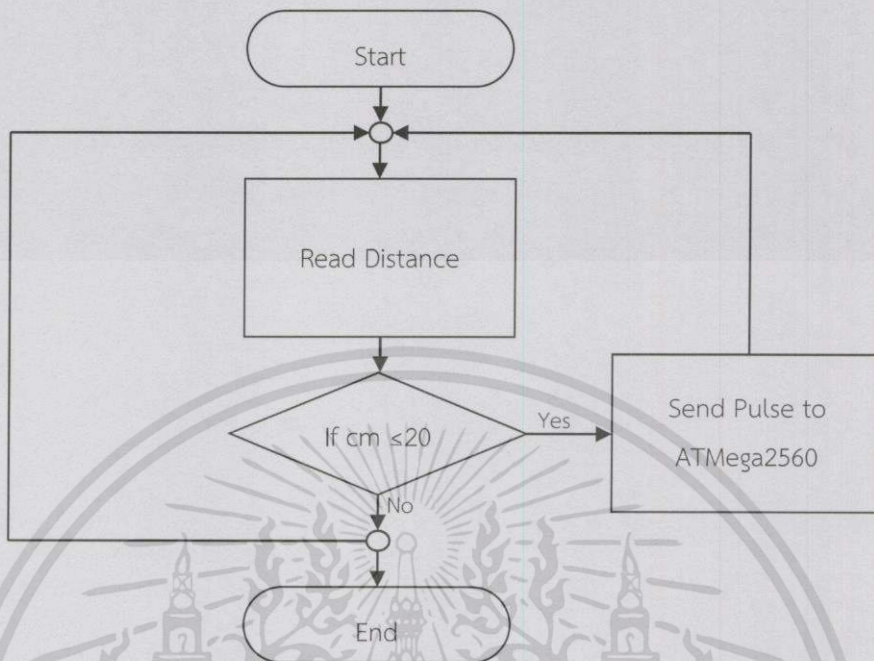
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.4.2.2 Flow chart การทำงานของ ATTiny85 ในฟังก์ชันการกระพริบไฟ LED



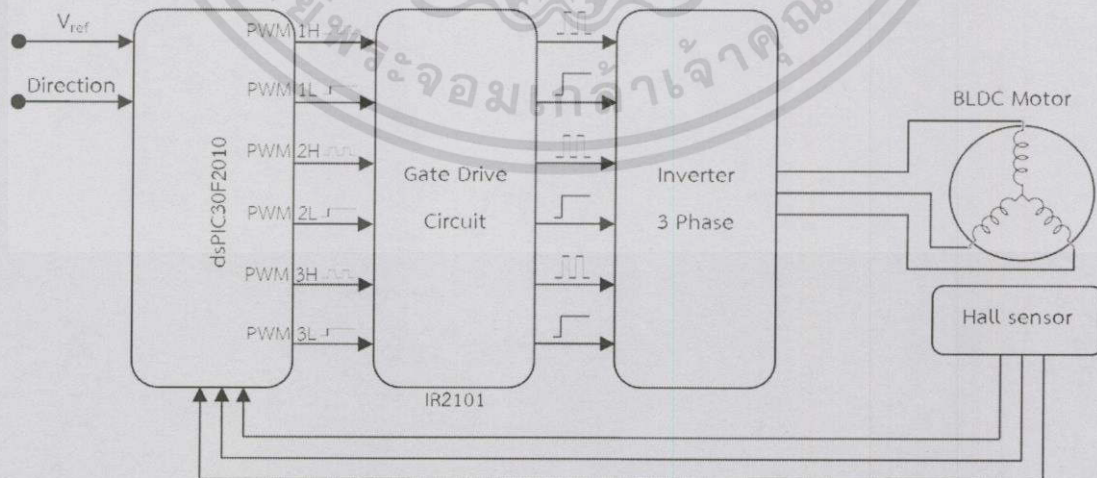
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2.3 Flow chart การทำงานของ ATTiny85 ในฟังก์ชันการตรวจวัดระยะวัตถุ



3.4.3 Output Devices

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



รูปที่ 3.18 Block Diagram ของการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

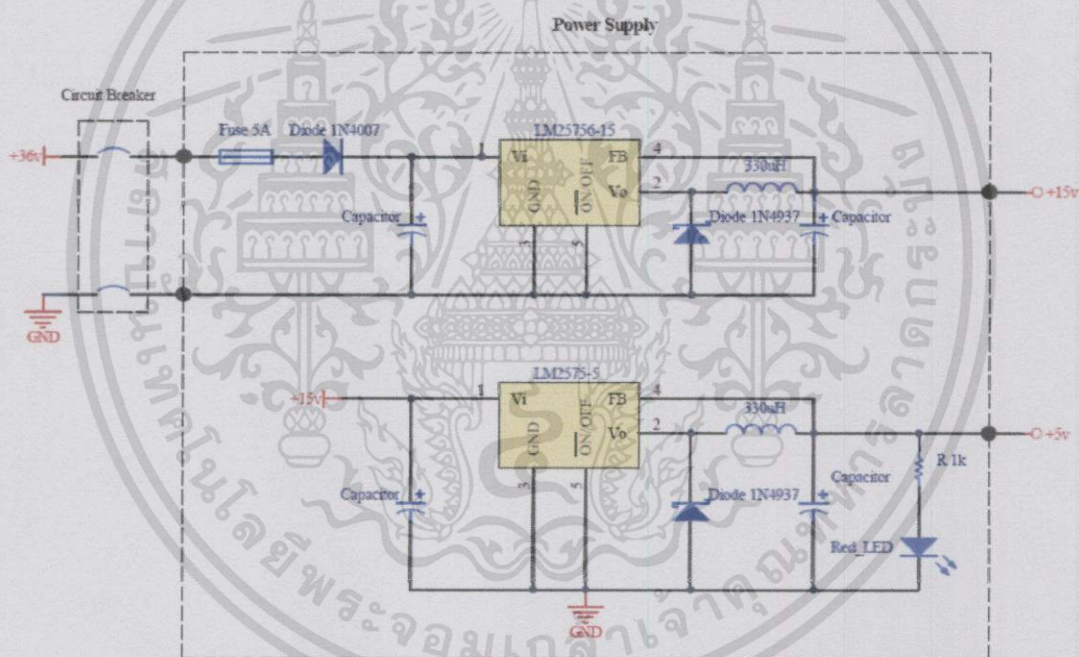
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 ชุดวงจรของระบบของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ

#### 3.5.1 Power Supply

วงจรไฟเลี้ยงของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ มีอินพุตเป็นแบตเตอรี่ 36 V ต่อผ่าน Circuit Breaker และมีการป้องกันคือ ป้องกันกระแสเกินโดยต่อฟิวส์ 5 A และป้องกันการต่อกลับขั้วของอินพุต โดยการต่ออนุกรมไดโอดเบอร์ 1N4007 ซึ่งสามารถทนแรงดันย้อนกลับได้ 1,000 V และมี Forward Voltage 1 V และมีการต่อตัวเก็บประจุประเภท Electrolyte Capacitor เพื่อรักษา ระดับแรงดันไฟตรง และลดการกระเพื่อมของแรงดัน (Ripple Voltage)

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



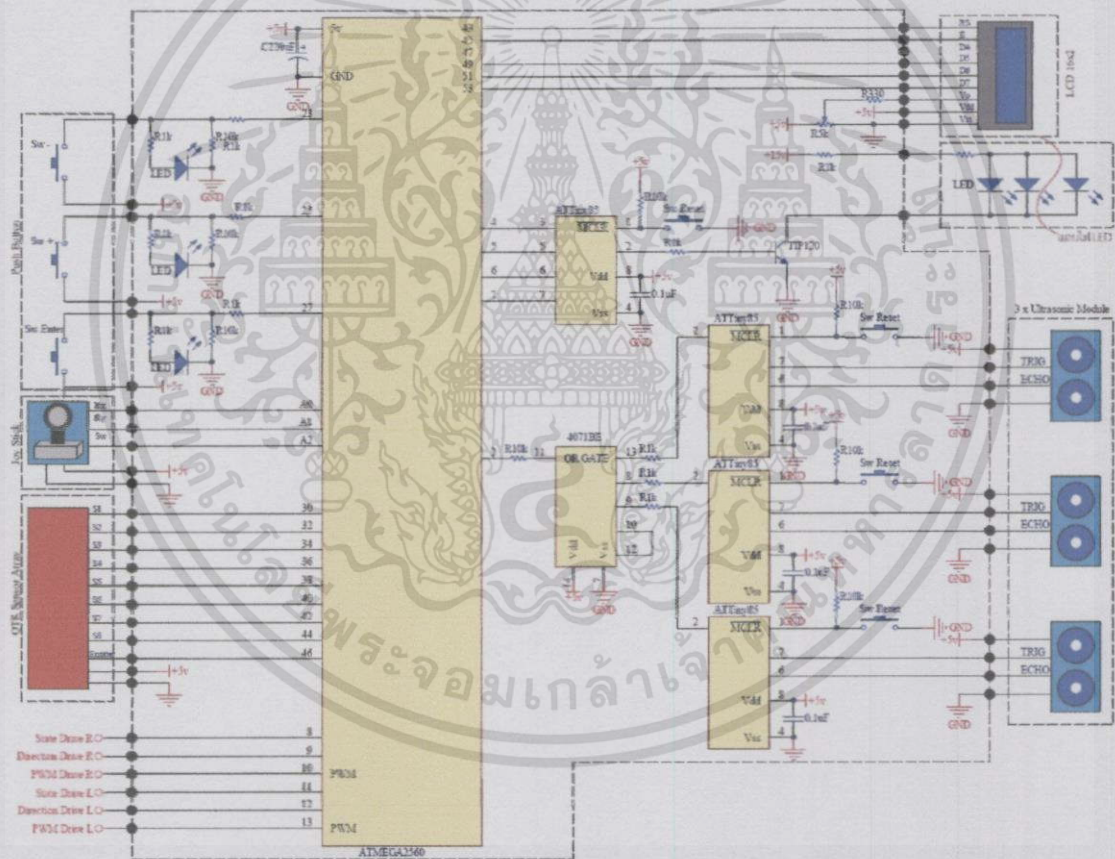
รูปที่ 3.19 Schematic ของวงจร Power Supply

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.2 CPU of AGV system

วงจรของตัวประมวลผลกลางของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติต้องประมวลผลหลายเช่น รับค่าเซนเซอร์มาเพื่อไปประมวลผลควบคุมการขับเคลื่อน, แสดงผลออกทางจอ LCD หรือ ตรวจจับวัตถุที่อยู่ในระยะใกล้ๆ เป็นต้น ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega2560 นั้นไม่เหมาะสมสำหรับการทำงานในลักษณะของ Multi Tasking ดังนั้นตัวประมวลผลจึงเป็นการทำงานร่วมกันระหว่าง ATmega2560 กับไมโครคอนโทรลเลอร์ ATTiny85

โดย ATmega2560 ต่อกับ Push Button, Joy Stick, QTR 8-RC Sensor Array, BLDC Motor Drive ทั้ง 2 ชุด และจอแสดงผล LCD16x2 และ ATTiny85 ต่อกับ 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 ดังรูปที่ 3.20

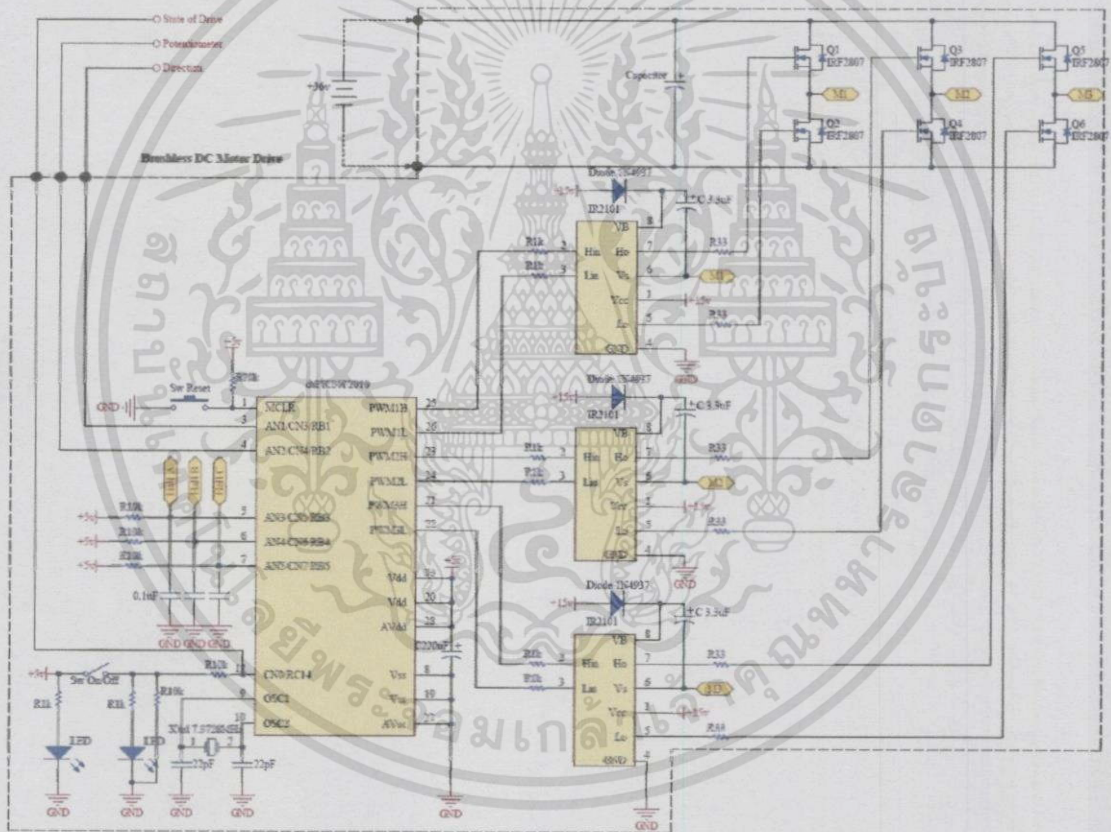


รูปที่ 3.20 Schematic ของวงจรตัวประมวลผลกลางของ AGV

### 3.5.3 BLDC Motor Drive

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

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

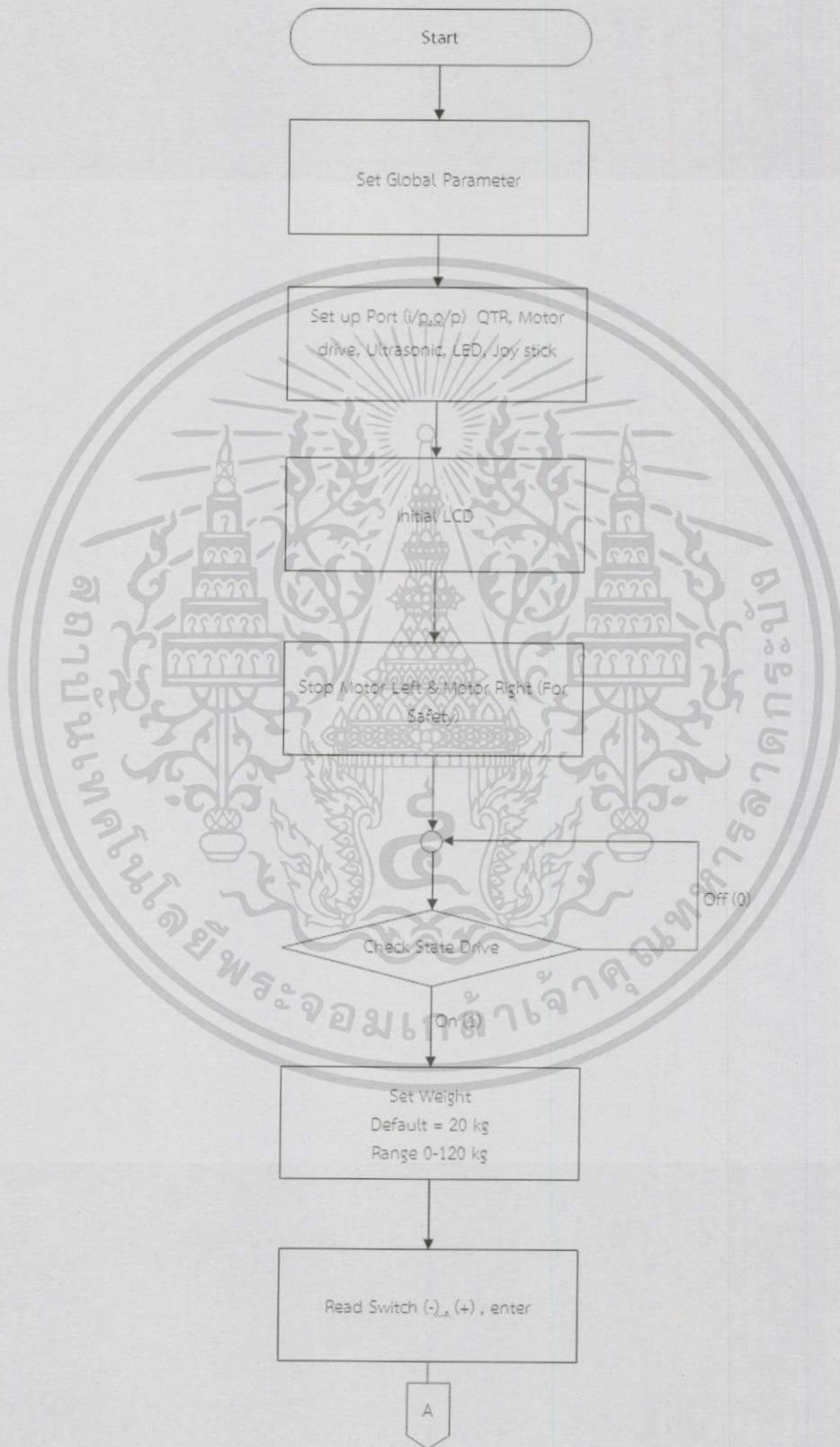


รูปที่ 3.21 Schematic ของวงจรชุดขับมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

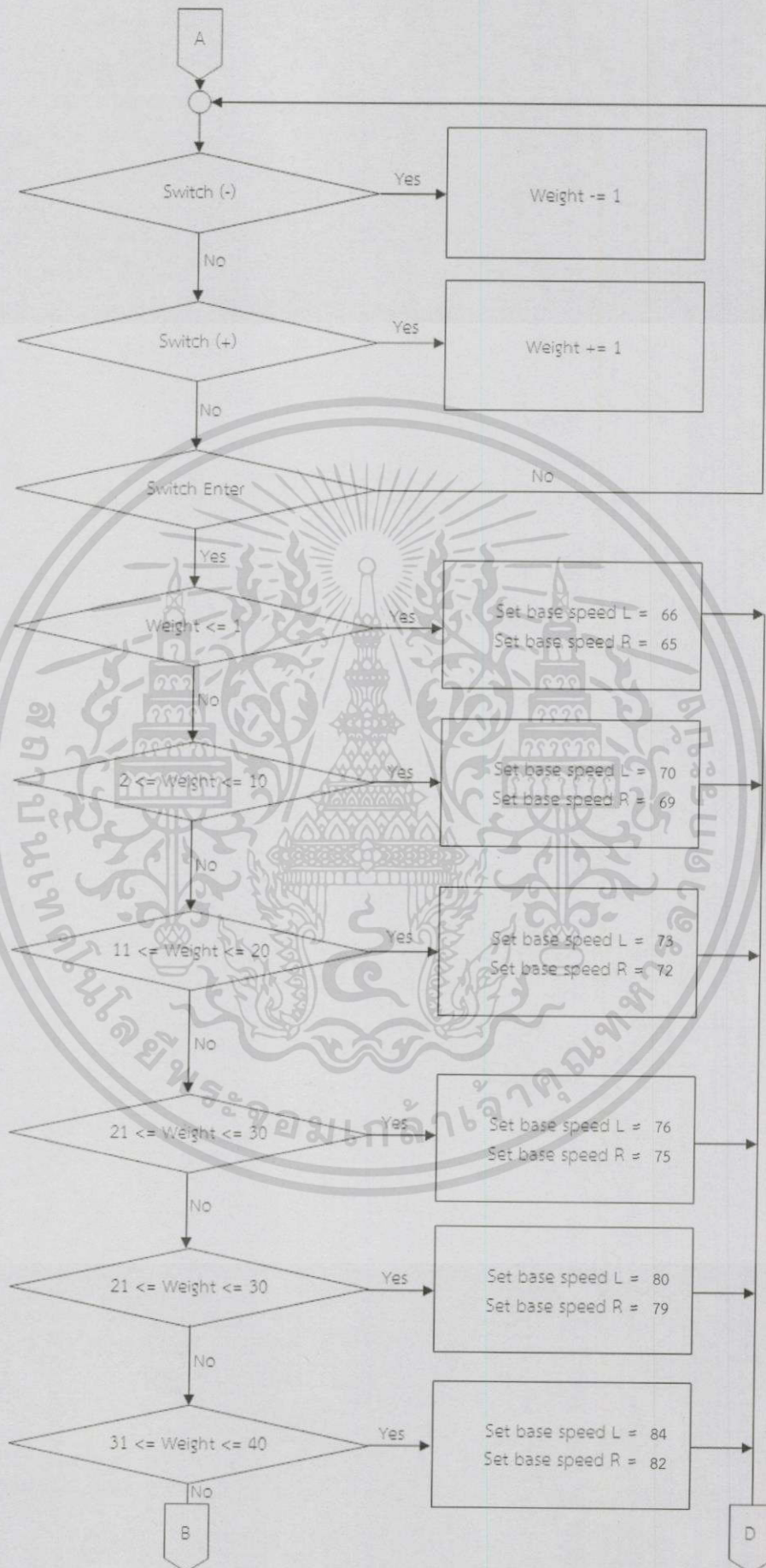
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 Algorithm ของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ

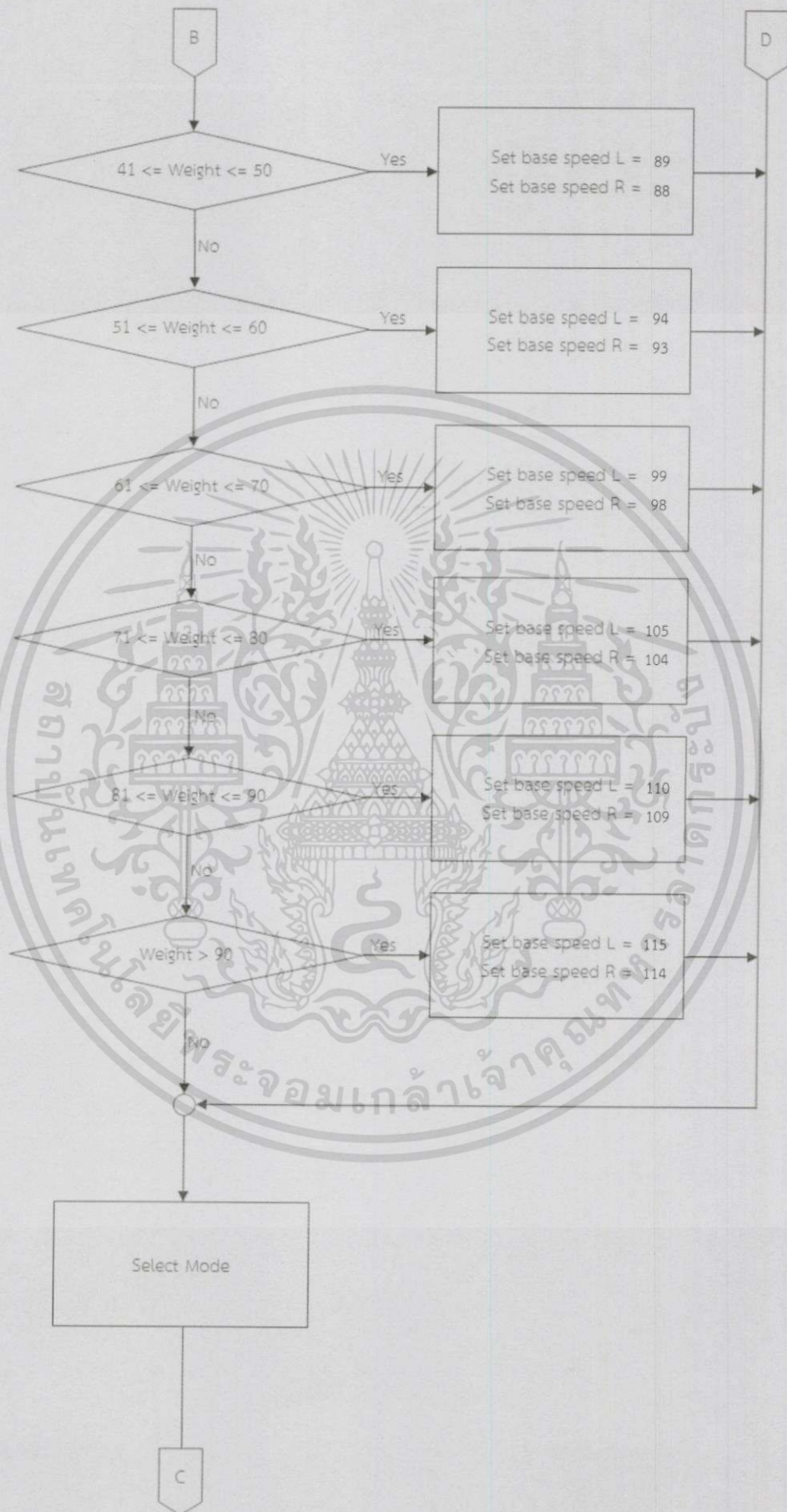
#### 3.6.1 Algorithm การ Setup AGV



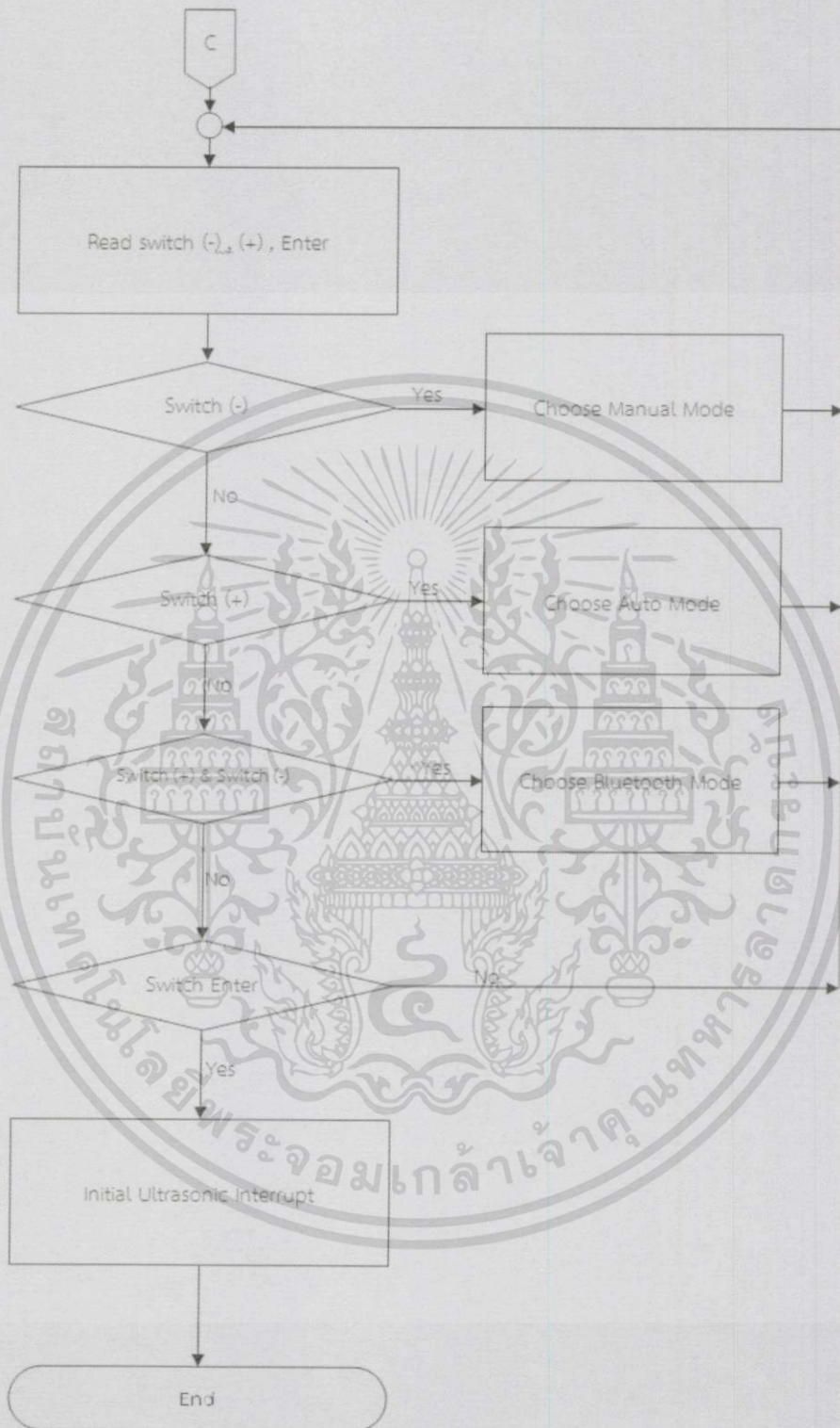
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

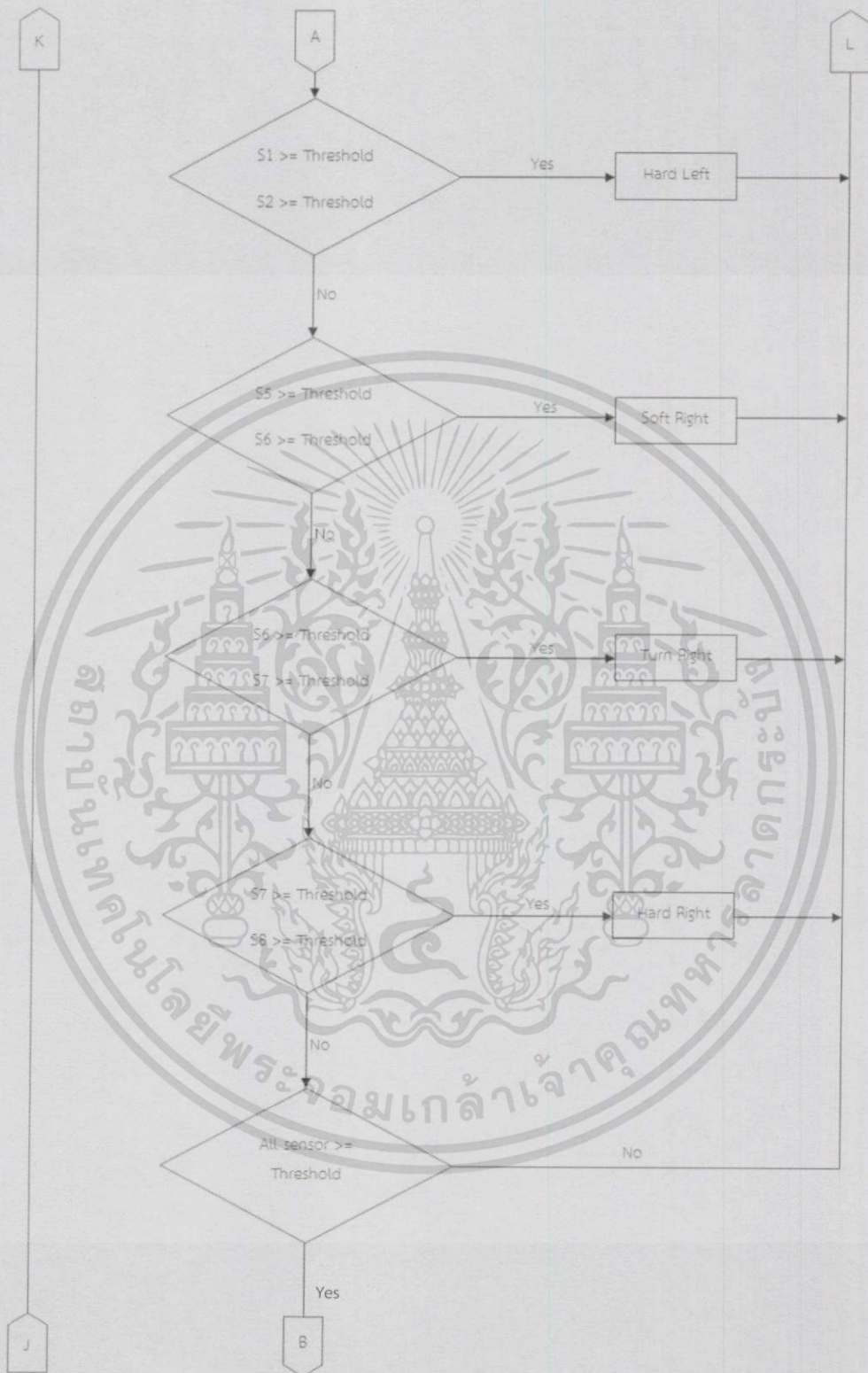


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

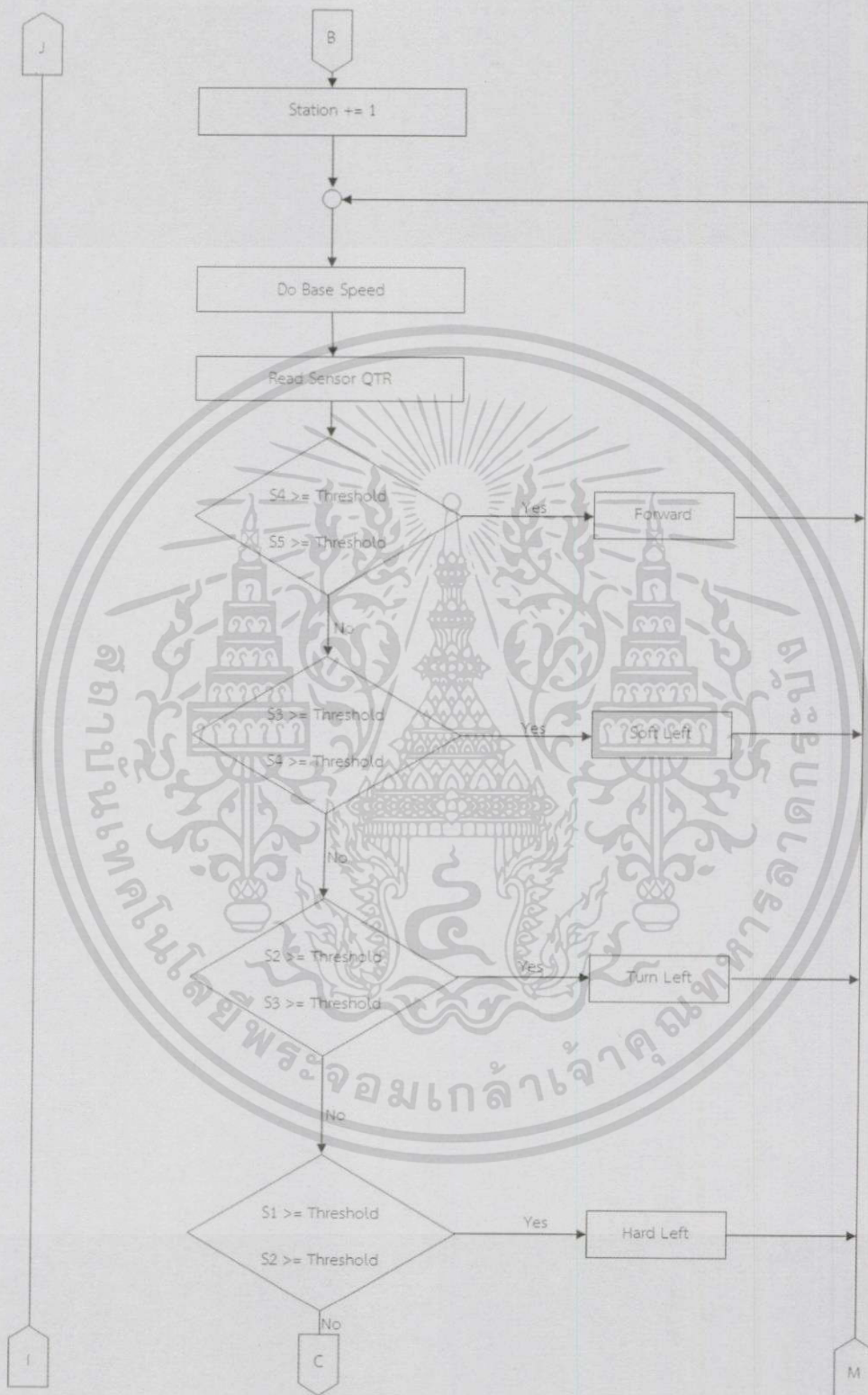
3.6.2 Algorithm Automatic Mode



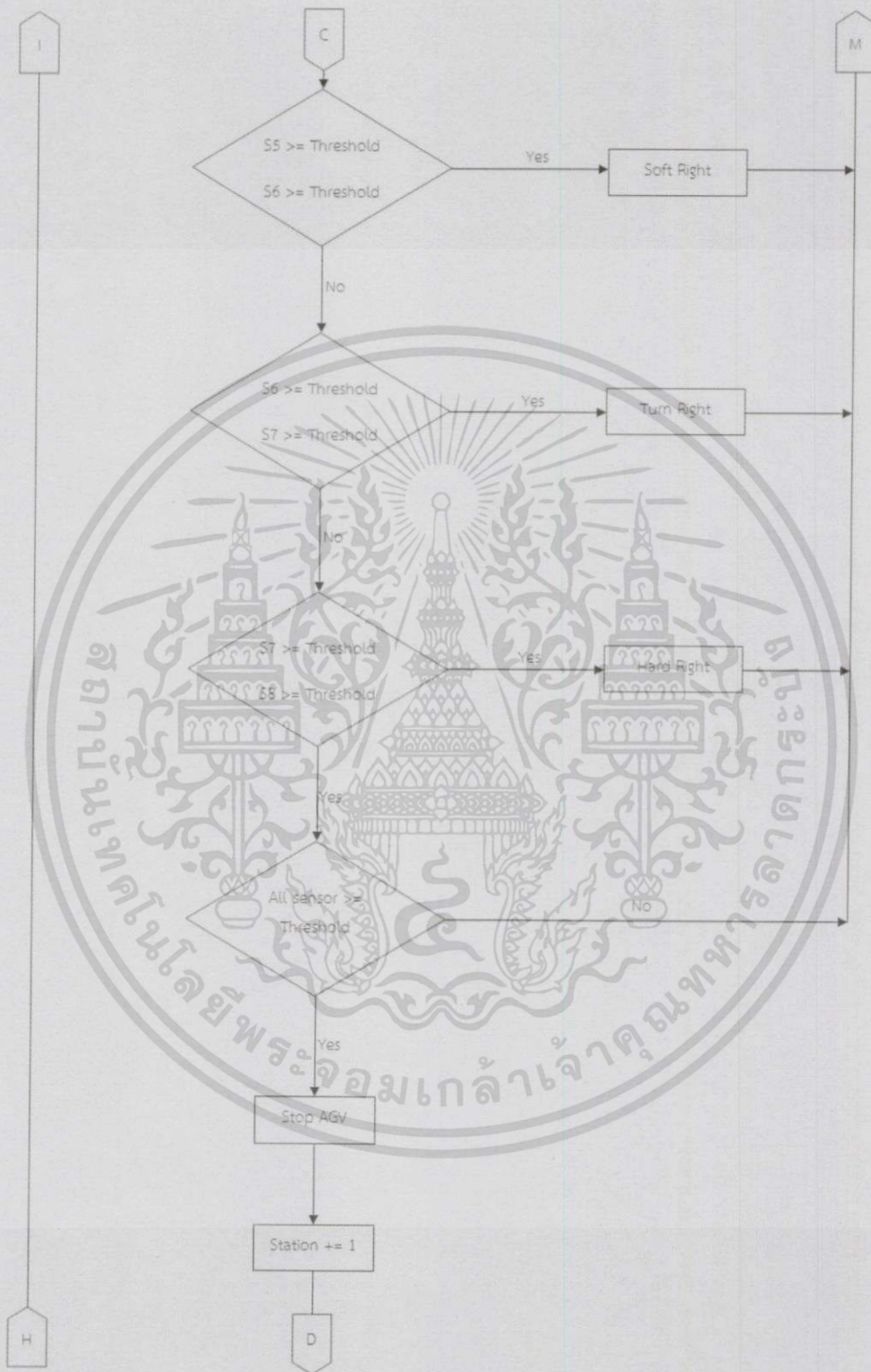
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



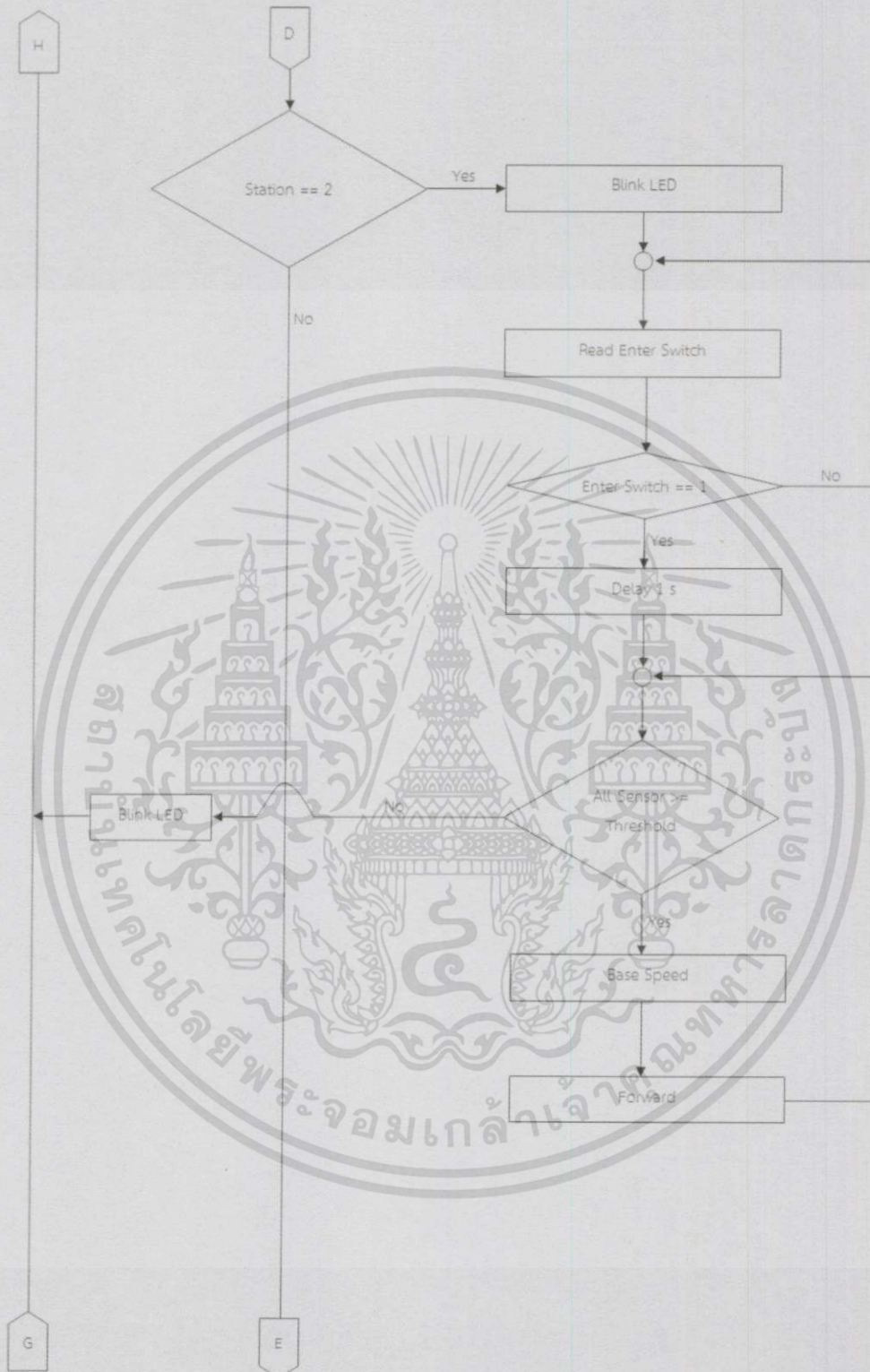
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



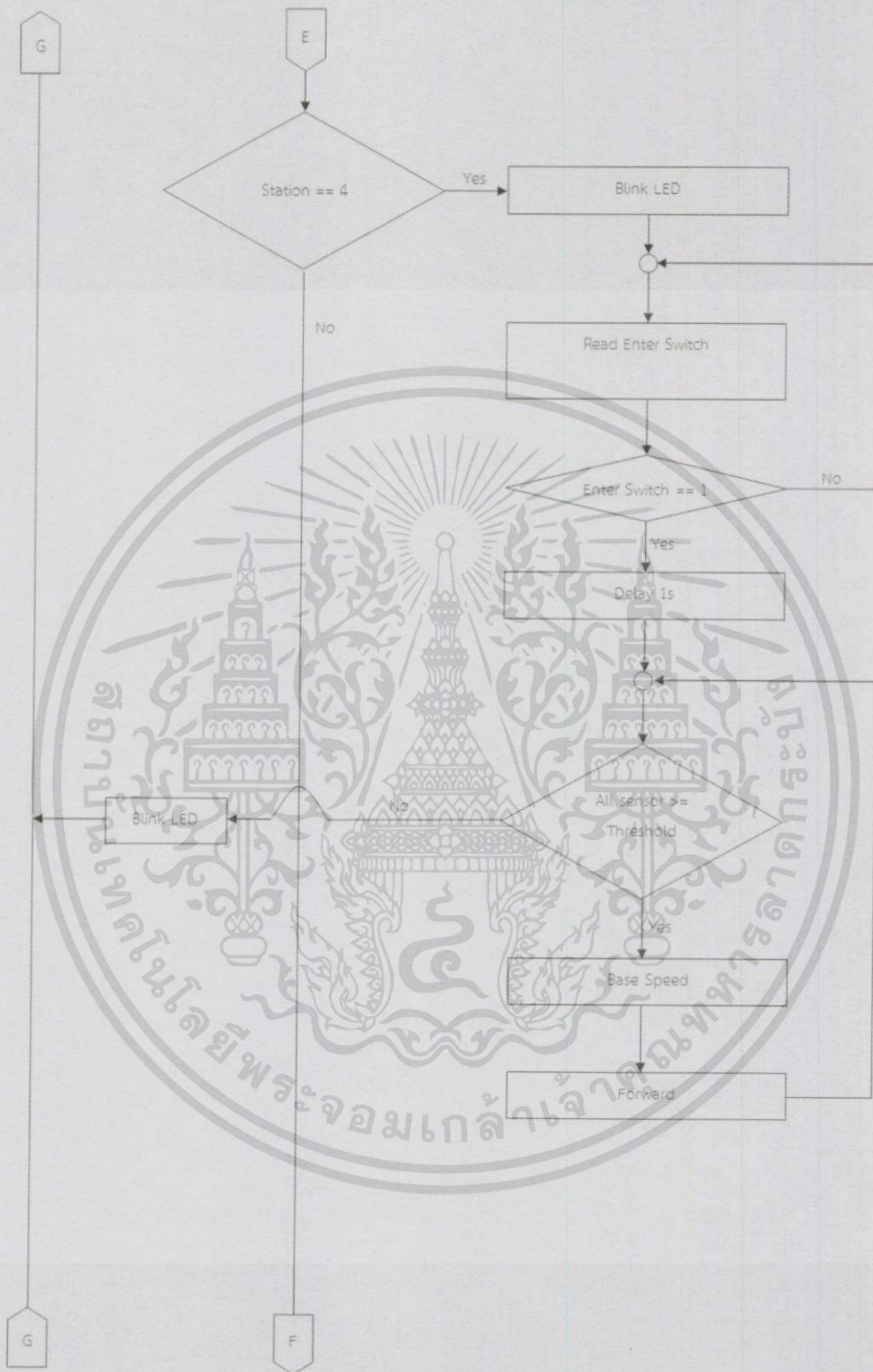
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



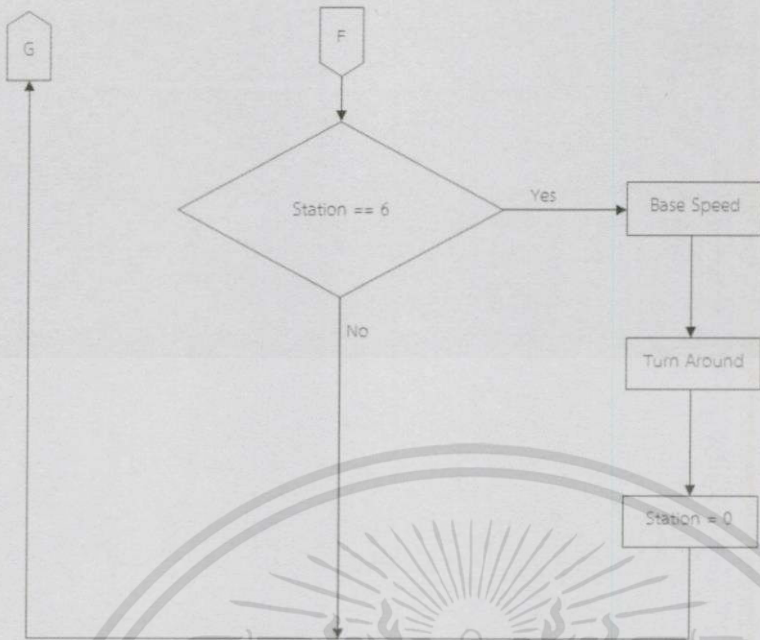
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

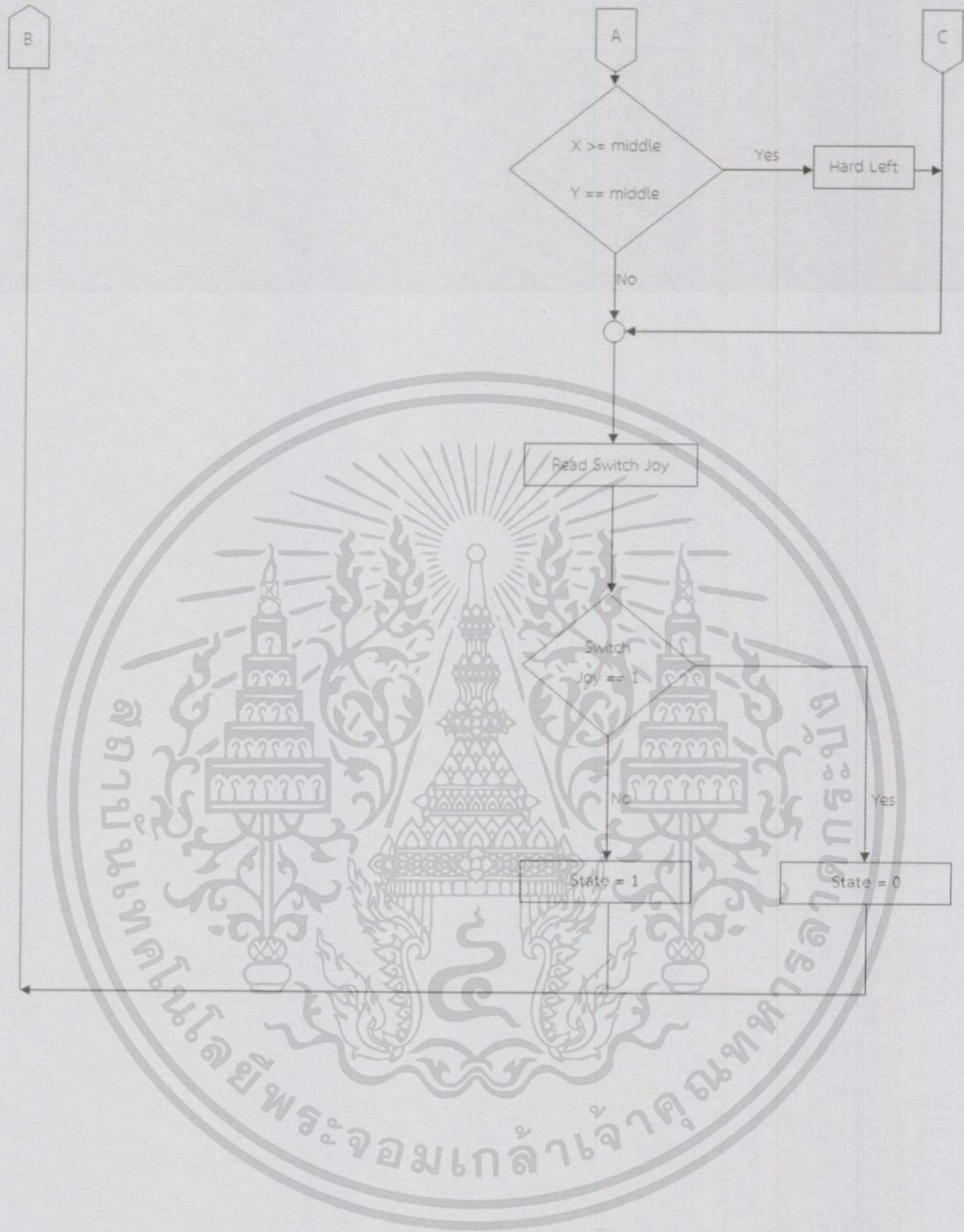


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



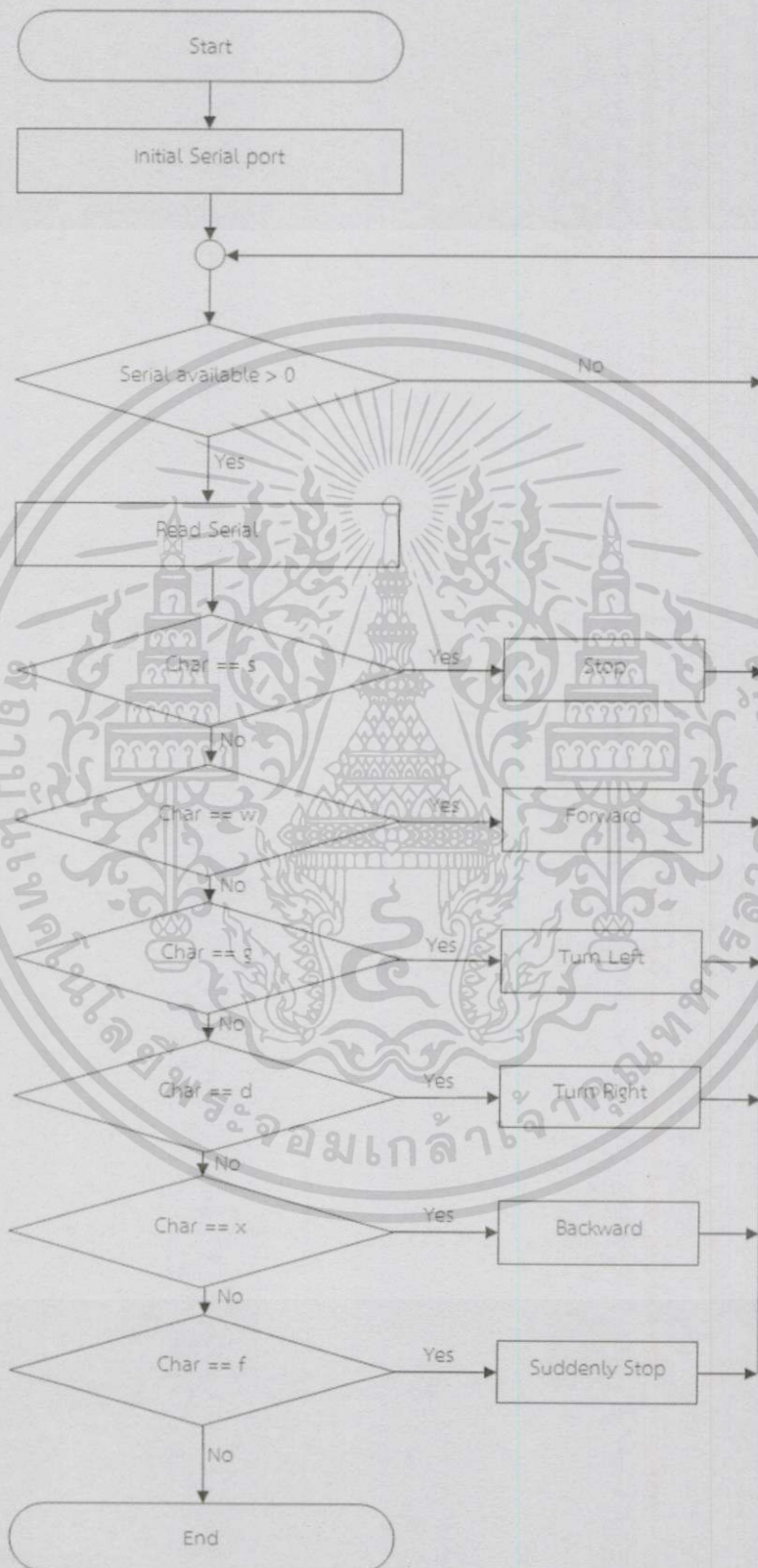
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





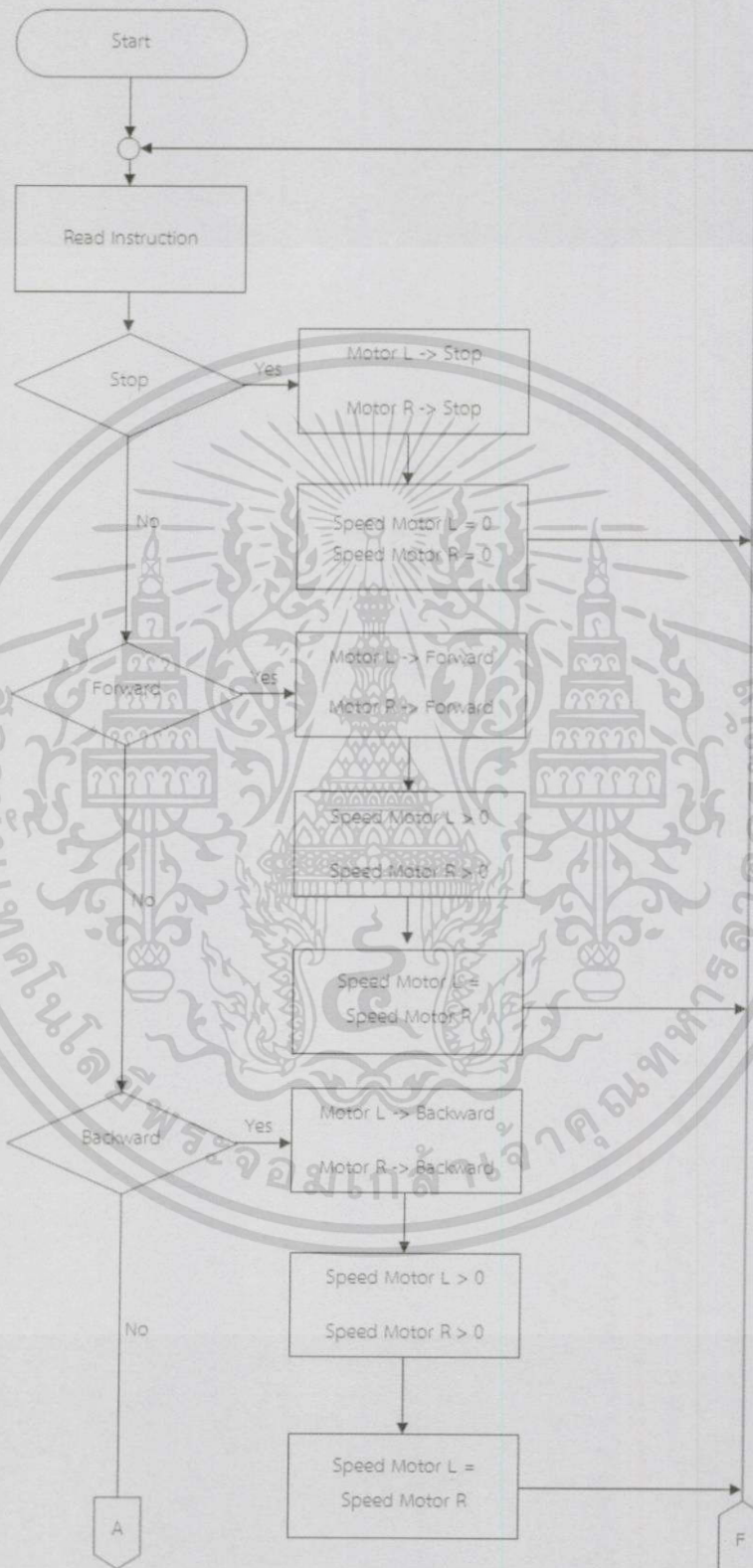
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.6.4 Algorithm Bluetooth Mode



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.6.5 Algorithm Motion Control



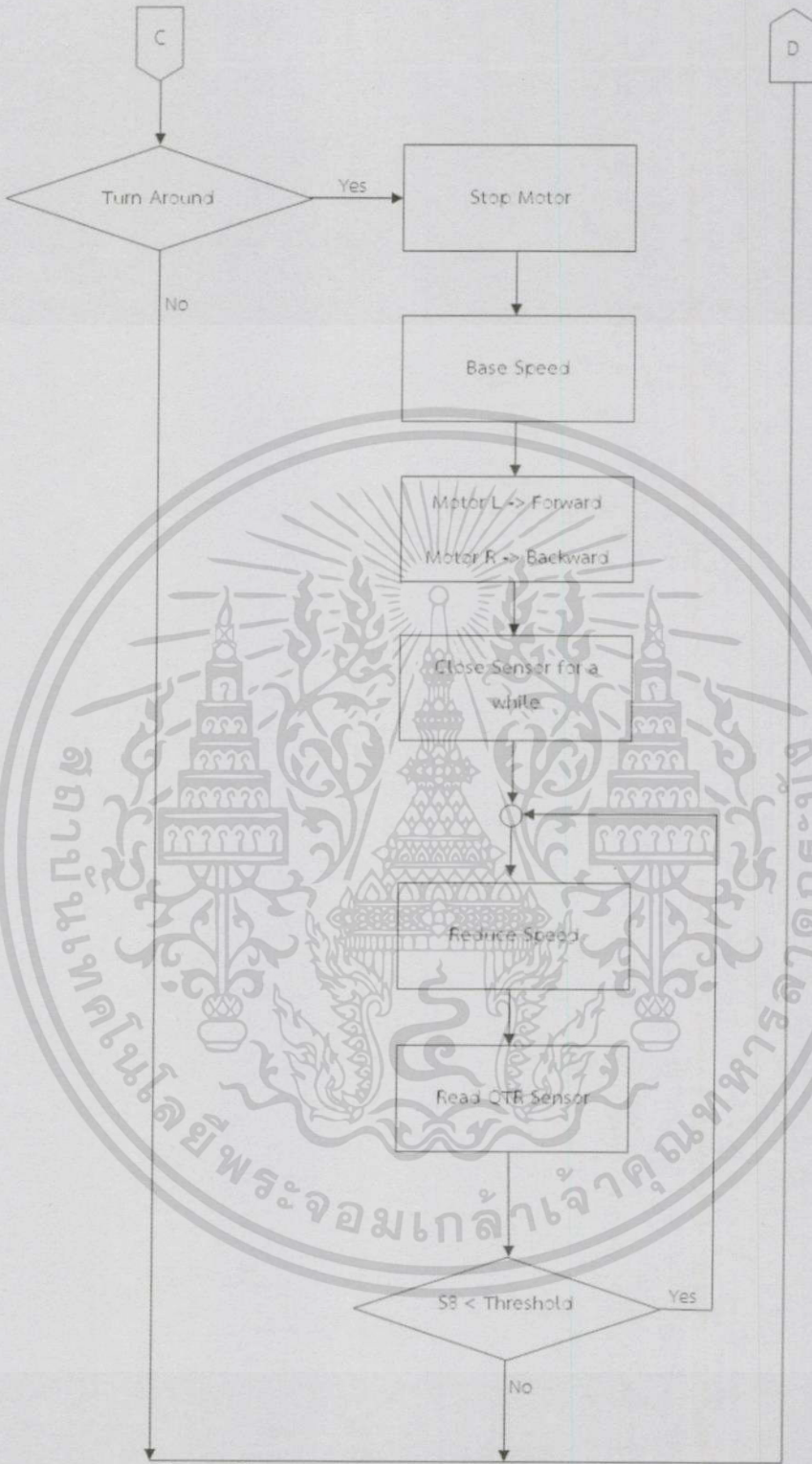
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

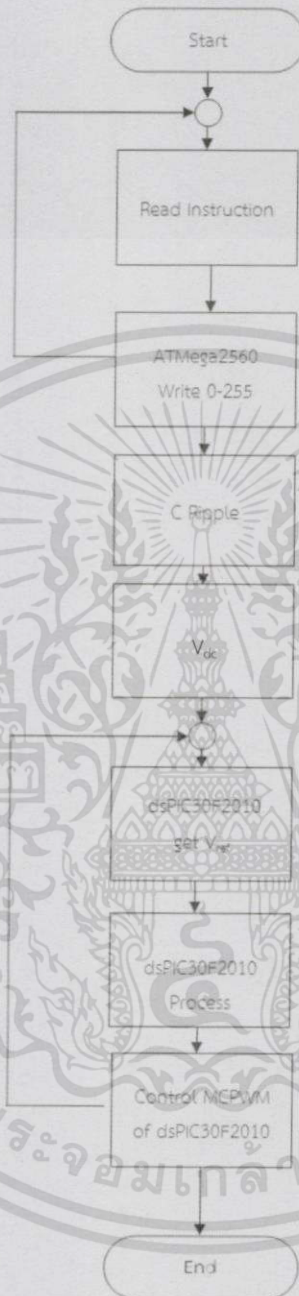


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



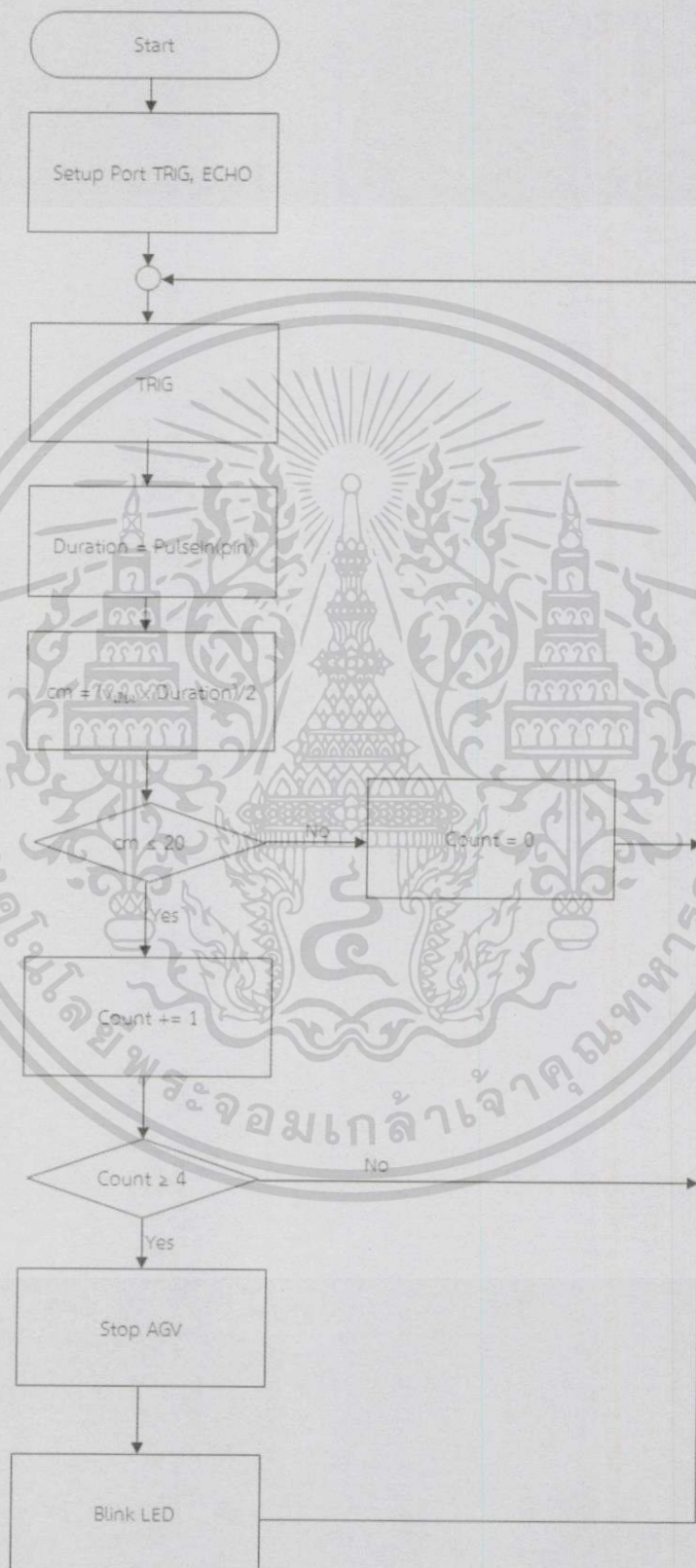
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.6.6 Algorithm Duty Cycle Control



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.6.7 Algorithm Distance Measure



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 ผลการทดลองจากการอ่านค่าผลที่ได้รับจาก QTR-8RC sensor array

ขั้นตอนการทดลอง นำ QTR-8RC sensor array มาทดลองอ่านค่าจากแถบสีดำ โดยการติดตั้ง QTR-8RC sensor array บนรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติเพื่อให้สถานะของเซนเซอร์มีสภาพเสมือนการใช้งานจริงมากที่สุด และ นำรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติไปเคลื่อนที่บนแถบเส้นสีดำที่ได้เตรียมไว้ และอ่านค่าที่ได้จาก QTR-8RC sensor array

จากผลของการทดลองดังรูปที่ 4.1 จะสังเกตเห็นได้ว่า เมื่อ QTR-8RC sensor array สามารถตรวจจับแถบเส้นสีดำได้ จะแสดงผลออกมาเป็นตัวเลขที่มีค่าสูงสุด คือ 2500 และเมื่อ QTR-8RC sensor array ตรวจจับแถบเส้นที่เป็นสีขาว จะแสดงผลออกมาเป็นตัวเลขที่มีค่าที่ต่ำ

ซึ่งจากการทดลองนี้สามารถนำค่าเหล่านี้ไปป้อนเป็นคำสั่งในการควบคุมตัวรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติได้ เพื่อควบคุมให้รถไม่วิ่งออกไปนอกจากเส้นดำ และวิ่งไปตามเส้นดำ เพื่อที่จะสามารถบรรลุภารกิจได้อย่างลุล่วง

112	220	1396	2500	2500	1396	276	276
112	220	1336	2500	2500	1392	276	276
112	220	1336	2500	2500	1392	276	276
120	228	1340	2500	2500	1396	280	280
116	220	1336	2500	2500	1392	276	276
112	220	1332	2500	2500	1388	272	272
112	220	1332	2500	2500	1388	272	272
112	216	1340	2900	2500	1340	280	280
116	220	1336	2500	2500	1336	276	276
112	220	1332	2500	2500	1392	272	272
120	228	1340	2500	2500	1340	280	280
112	220	1396	2500	2500	1336	276	276
112	220	1336	2500	2500	1392	276	276
112	220	1332	2500	2500	1388	272	272
112	228	1340	2300	2500	1396	280	280
116	220	1392	2500	2500	1392	276	276
112	220	1388	2500	2500	1332	272	272

รูปที่ 4.1 ค่าการสะท้อนของแสงที่ QTR-8RC sensor array แสดงผลเมื่อรถอยู่ตำแหน่งกึ่งกลางของแถบเส้นสีดำ

760	436	488	2296	2500	2500	604	168
604	436	488	2296	2500	2500	604	168
596	432	432	2292	2500	2500	596	164
604	440	440	2300	2500	2500	604	168
604	432	432	2296	2500	2500	604	164
596	432	432	2292	2500	2500	596	164
604	440	440	2292	2500	2500	604	164
596	432	432	2296	2500	2500	596	168
596	432	432	2292	2500	2500	596	164
604	440	440	2292	2500	2500	604	164
596	432	432	2296	2500	2500	596	164
604	440	440	2296	2500	2500	604	168
596	432	432	2292	2500	2500	596	164
596	432	432	2292	2500	2500	652	164
604	440	440	2240	2500	2500	660	168
596	432	432	2236	2500	2500	660	168
596	432	432	2236	2500	2500	652	164
604	440	440	2236	2500	2500	660	164

รูปที่ 4.2 ค่าการสะท้อนของแสงที่ QTR-8RC sensor array แสดงผลเมื่อรถเริ่มเบนทางซ้าย

760	544	436	652	2152	2500	2500	2208
760	544	436	652	2152	2500	2500	2208
760	536	428	648	2152	2500	2500	2264
756	536	428	644	2152	2500	2500	2264
760	544	436	652	2152	2500	2500	2272
760	544	436	652	2152	2500	2500	2284
760	536	428	644	2152	2500	2500	2264
756	536	428	592	2152	2500	2500	2208
760	540	432	596	2152	2500	2500	2208
760	540	428	596	2152	2500	2500	2208
700	536	428	592	2100	2500	2500	2212
700	536	428	588	2152	2500	2500	2208
708	544	436	596	2156	2500	2500	2156
708	544	428	596	2100	2500	2500	2212
700	536	428	592	2152	2500	2500	2212
696	532	428	588	2152	2500	2500	2152
704	540	432	596	2096	2500	2500	2152
708	544	428	596	2100	2500	2500	2156
700	536	428	592	2100	2500	2500	2156

รูปที่ 4.3 ค่าการสะท้อนของแสงที่ QTR-8RC sensor array แสดงผลเมื่อรถเบนทางซ้าย

444	328	272	272	272	836	2500	2500
444	328	272	272	272	836	2500	2500
492	380	272	324	324	832	2500	2500
440	332	276	276	276	836	2500	2500
436	380	272	324	324	892	2500	2500
436	324	268	268	268	884	2500	2500
440	332	276	276	276	836	2500	2500
436	380	272	324	324	836	2500	2500
436	324	268	268	268	828	2500	2500
444	324	272	324	324	836	2500	2500
436	380	272	324	324	836	2500	2500
440	332	276	276	276	836	2500	2500
444	328	272	272	272	840	2500	2500
436	328	272	272	272	836	2500	2500
444	332	276	276	276	836	2500	2500
440	328	272	272	272	780	2500	2500
436	324	268	268	268	772	2500	2500
444	332	280	280	280	780	2500	2500
436	324	268	268	268	780	2500	2500

รูปที่ 4.4 ค่าการสะท้อนของแสงที่ QTR-8RC sensor array แสดงผลเมื่อรถเบนไปทางซ้ายจนเกือบหลุดเส้นสีดำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Row	Col 1	Col 2	Col 3	Col 4	Col 5	Col 6	Col 7	Col 8
1632	2300	2300	952	168	168	116	60	
1680	2500	2500	952	168	168	112	60	
1632	2500	2500	952	168	168	116	60	
1624	2500	2500	948	168	168	112	60	
1680	2500	2500	944	168	168	116	60	
1632	2500	2500	952	168	168	116	60	
1680	2500	2500	952	168	168	112	60	
1632	2500	2500	952	176	176	60	60	
1688	2500	2500	952	168	168	116	60	
1624	2500	2500	948	168	168	112	60	
1632	2500	2500	952	168	168	60	60	
1624	2500	2500	1008	168	168	60	60	
1632	2500	2500	952	176	176	68	68	
1632	2500	2500	952	168	168	116	60	
1680	2500	2500	948	168	168	112	60	
1632	2500	2500	952	168	168	116	60	
1632	2500	2500	952	168	168	116	60	
1624	2500	2500	944	168	168	112	60	
1632	2500	2500	952	168	168	60	60	

รูปที่ 4.5 ค่าการสะท้อนของแสงที่ QTR-8RC sensor array แสดงผลเมื่อรถเริ่มเบนทางขวา

Row	Col 1	Col 2	Col 3	Col 4	Col 5	Col 6	Col 7	Col 8
2300	2300	952	384	276	276	164	164	
2500	2500	956	336	228	280	164	164	
2500	2500	900	332	220	276	168	168	
2500	2500	956	332	220	276	164	164	
2500	2500	956	336	220	276	164	164	
2500	2500	952	328	220	272	164	164	
2500	2500	948	332	220	276	164	164	
2800	2900	952	328	220	272	164	164	
2500	2500	956	332	220	276	164	164	
2500	2500	952	336	224	280	172	172	
2500	2500	956	332	220	276	168	168	
2800	2900	956	332	220	276	164	164	
2900	2900	956	336	228	280	168	168	
2500	2500	956	332	220	276	168	168	
2500	2300	982	328	220	272	164	164	
2500	2500	956	336	220	276	168	168	
2500	2500	958	332	220	276	184	164	
2500	2500	1012	340	228	284	172	120	
2500	2500	956	332	220	276	168	112	

รูปที่ 4.6 ค่าการสะท้อนของแสงที่ QTR-8RC sensor array แสดงผลเมื่อรถเบนไปทางขวาจนเกือบหลุดเส้นสีดำ

Row	Col 1	Col 2	Col 3	Col 4	Col 5	Col 6	Col 7	Col 8
364	328	272	272	216	272	272	328	
392	336	224	280	224	280	280	336	
384	328	216	272	216	272	272	328	
392	336	224	280	224	280	280	336	
388	328	272	272	220	272	272	328	
388	328	216	272	216	272	272	328	
388	328	220	272	220	272	272	328	
384	328	272	272	216	272	272	328	
392	328	216	272	216	272	272	328	
388	328	216	272	216	272	272	328	
392	336	272	272	220	272	272	336	
384	328	272	272	216	272	272	328	
396	336	224	280	224	280	280	336	
388	328	272	272	220	272	272	328	
392	332	224	276	224	276	276	332	
388	328	272	272	216	272	272	328	
396	336	280	280	228	280	280	336	
384	328	272	272	216	272	272	328	
396	336	224	280	224	280	280	336	

รูปที่ 4.7 ค่าการสะท้อนของแสงที่ QTR-8RC sensor array แสดงผลเมื่อรถอยู่ตำแหน่งแถบสีขาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



```

x = 503 , y = 489 , Switch = 440
x = 503 , y = 489 , Switch = 441
x = 503 , y = 489 , Switch = 437
x = 503 , y = 488 , Switch = 440
x = 503 , y = 489 , Switch = 450
x = 503 , y = 489 , Switch = 461
x = 503 , y = 489 , Switch = 468
x = 502 , y = 489 , Switch = 471
x = 503 , y = 489 , Switch = 473
x = 503 , y = 489 , Switch = 472
x = 503 , y = 489 , Switch = 468
x = 503 , y = 489 , Switch = 462
x = 503 , y = 489 , Switch = 465
x = 503 , y = 489 , Switch = 472
x = 503 , y = 489 , Switch = 471
x = 503 , y = 489 , Switch = 465
x = 503 , y = 489 , Switch = 458

```

รูปที่ 4.11 ค่าตำแหน่งที่ Joystick แสดงผลเมื่อปล่อย Joystick

```

x = 503 , y = 1023 , Switch = 896
x = 503 , y = 1023 , Switch = 901
x = 503 , y = 1023 , Switch = 895
x = 503 , y = 1023 , Switch = 893
x = 503 , y = 1023 , Switch = 893
x = 503 , y = 1023 , Switch = 898
x = 503 , y = 1023 , Switch = 911
x = 503 , y = 1023 , Switch = 930
x = 503 , y = 1023 , Switch = 943
x = 503 , y = 1023 , Switch = 952
x = 503 , y = 1023 , Switch = 957
x = 503 , y = 1023 , Switch = 959
x = 503 , y = 1023 , Switch = 957
x = 503 , y = 1023 , Switch = 946
x = 503 , y = 1023 , Switch = 927
x = 503 , y = 1023 , Switch = 914
x = 503 , y = 1023 , Switch = 920

```

รูปที่ 4.12 ค่าตำแหน่งที่ Joystick แสดงผลเมื่อ ดัน Joystick ไปทางทิศเหนือ

```

x = 497 , y = 0 , Switch = 103
x = 497 , y = 0 , Switch = 100
x = 496 , y = 0 , Switch = 98
x = 496 , y = 0 , Switch = 96
x = 497 , y = 0 , Switch = 88
x = 496 , y = 0 , Switch = 80
x = 496 , y = 0 , Switch = 70
x = 496 , y = 0 , Switch = 62
x = 496 , y = 0 , Switch = 59
x = 496 , y = 0 , Switch = 59
x = 497 , y = 0 , Switch = 61
x = 497 , y = 0 , Switch = 69
x = 496 , y = 0 , Switch = 82
x = 496 , y = 0 , Switch = 105
x = 496 , y = 0 , Switch = 120
x = 496 , y = 0 , Switch = 128
x = 496 , y = 0 , Switch = 131

```

รูปที่ 4.13 ค่าตำแหน่งที่ Joystick แสดงผลเมื่อ ดัน Joystick ไปทางทิศใต้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

COM13
x = 1023, y = 1023, Switch = 957
x = 1023, y = 1023, Switch = 971
x = 1023, y = 1023, Switch = 981
x = 1023, y = 1023, Switch = 983
x = 1023, y = 1023, Switch = 982
x = 1023, y = 1023, Switch = 973
x = 1023, y = 1023, Switch = 961
x = 1023, y = 1023, Switch = 948
x = 1023, y = 1023, Switch = 945
x = 1023, y = 1023, Switch = 933
x = 1023, y = 1023, Switch = 919
x = 1023, y = 1023, Switch = 909
x = 1023, y = 1023, Switch = 904
x = 1023, y = 1023, Switch = 902
x = 1023, y = 1023, Switch = 908
x = 1023, y = 1023, Switch = 923
Autoscroll
No line ending
9600 baud

```

รูปที่ 4.14 ค่าตำแหน่งที่ Joystick แสดงผลเมื่อ ดัน Joystick ไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือ

```

COM13
x = 1023, y = 489, Switch = 500
x = 1023, y = 489, Switch = 488
x = 1023, y = 489, Switch = 474
x = 1023, y = 489, Switch = 460
x = 1023, y = 489, Switch = 462
x = 1023, y = 490, Switch = 455
x = 1023, y = 489, Switch = 443
x = 1023, y = 489, Switch = 431
x = 1023, y = 489, Switch = 425
x = 1023, y = 489, Switch = 420
x = 1023, y = 489, Switch = 419
x = 1023, y = 489, Switch = 420
x = 1023, y = 489, Switch = 431
x = 1023, y = 489, Switch = 448
x = 1023, y = 489, Switch = 467
x = 1023, y = 489, Switch = 465
Autoscroll
No line ending
9600 baud

```

รูปที่ 4.15 ค่าตำแหน่งที่ Joystick แสดงผลเมื่อ ดัน Joystick ไปทางทิศตะวันออก

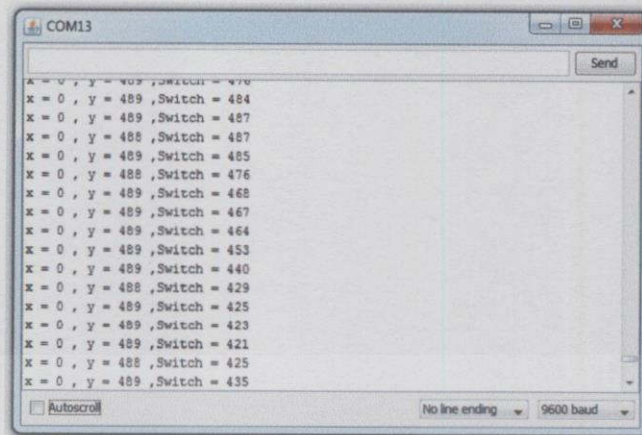
```

COM13
x = 0, y = 1023, Switch = 919
x = 0, y = 1023, Switch = 913
x = 0, y = 1023, Switch = 903
x = 0, y = 1023, Switch = 892
x = 0, y = 1023, Switch = 885
x = 0, y = 1023, Switch = 882
x = 0, y = 1023, Switch = 882
x = 0, y = 1023, Switch = 886
x = 0, y = 1023, Switch = 899
x = 0, y = 1023, Switch = 916
x = 0, y = 1023, Switch = 936
x = 0, y = 1023, Switch = 947
x = 0, y = 1023, Switch = 955
x = 0, y = 1023, Switch = 959
x = 0, y = 1023, Switch = 957
x = 0, y = 1023, Switch = 950
Autoscroll
No line ending
9600 baud

```

รูปที่ 4.16 ค่าตำแหน่งที่ Joystick แสดงผลเมื่อ ดัน Joystick ไปทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



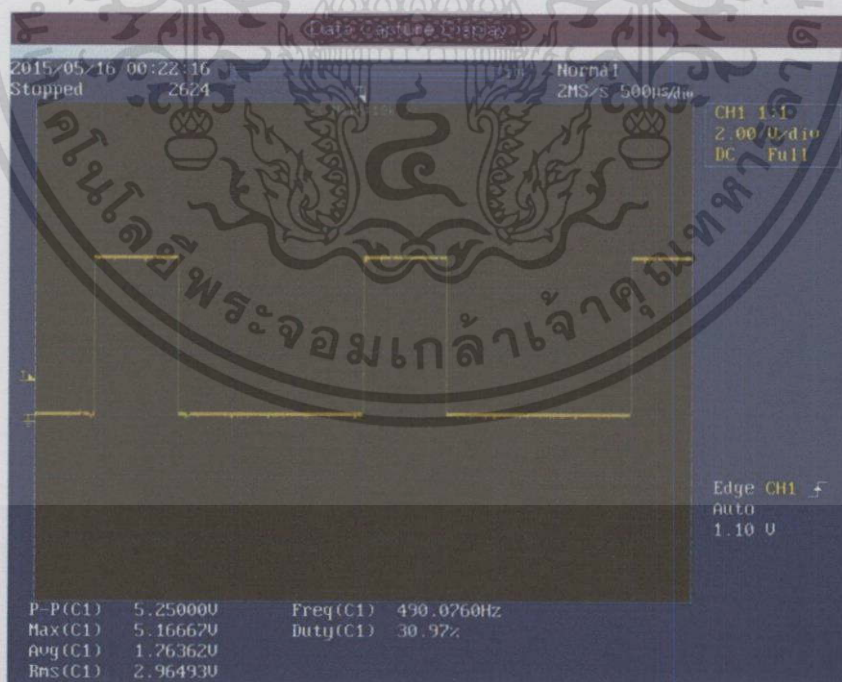
รูปที่ 4.17 ค่าตำแหน่งที่ Joystick แสดงผลเมื่อ ดัน Joystick ไปทางทิศตะวันตก

### 4.3 ผลการแสดงผลของ motion control

4.3.1 ผลการทดลองแสดงผลสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ การทดลองนี้เป็นการวัดสัญญาณ PWM ที่ได้จาก ATmega2560 ที่ Duty cycle ที่แตกต่างกันเพื่อนำไปใช้ในการควบคุม BLDC motor drive ซึ่งมีดังต่อไปนี้

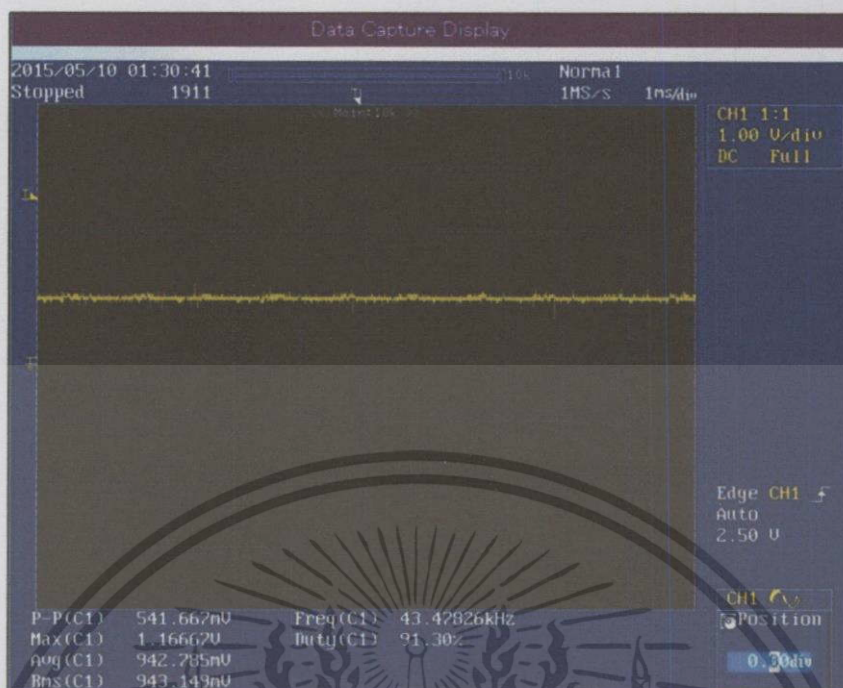
#### 4.3.1.1 คำสั่ง low speed

โดยที่ low speed จะควบคุมสัญญาณ PWM ที่ ATmega2560 ส่งมาที่ Duty cycle = 30.90% ที่ 490 Hz ซึ่งทำให้ dsPIC30F2010 ประมาณผลได้สัญญาณไปควบคุมมอเตอร์ BLDC ที่ Duty cycle = 11.40% ที่ 20 kHz

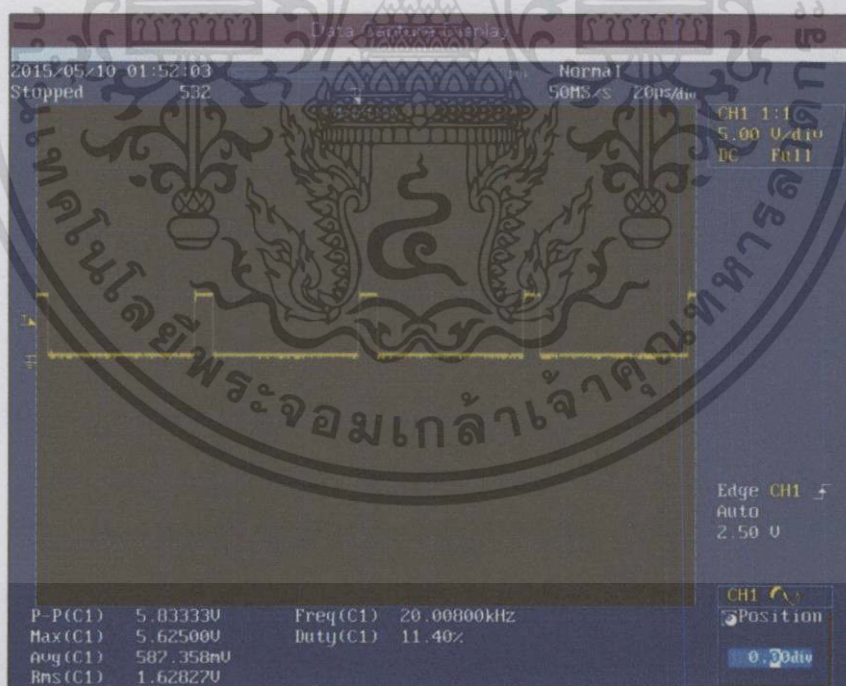


รูปที่ 4.18 PWM จาก ATmega2560 ที่คำสั่ง low speed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

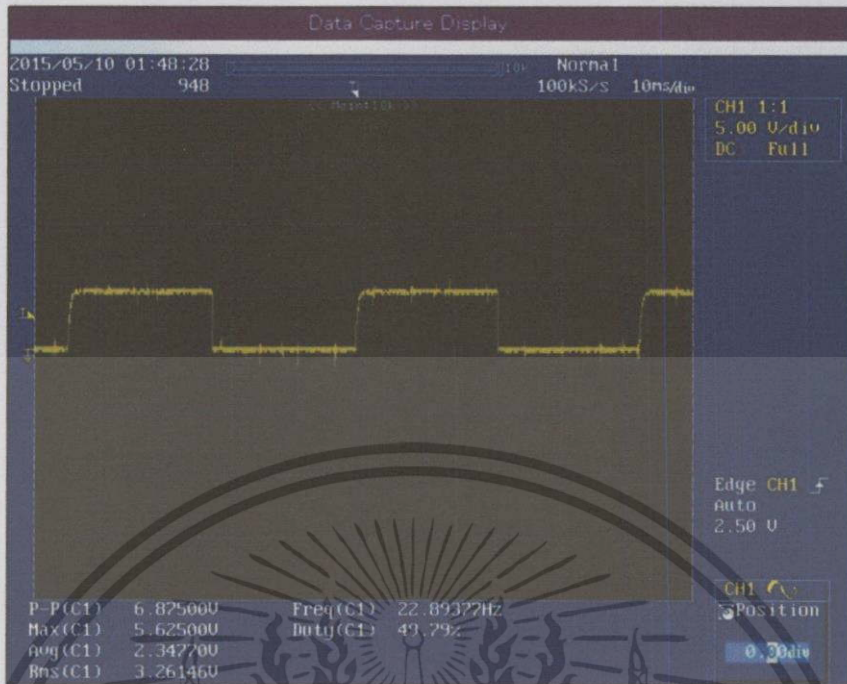


รูปที่ 4.19 แรงดันไฟฟ้าหลังจากกรองด้วยตัวเก็บประจุ (C) 2,200  $\mu$ F



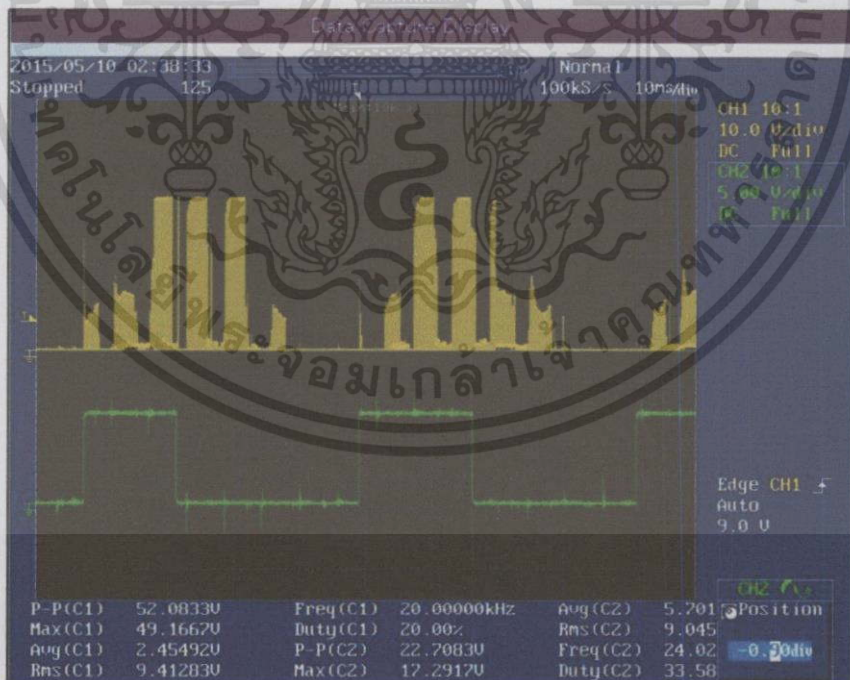
รูปที่ 4.20 Duty cycle ของขาเกิดด้าน High Side ของ BLDC Motor Drive ที่คำสั่ง low speed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



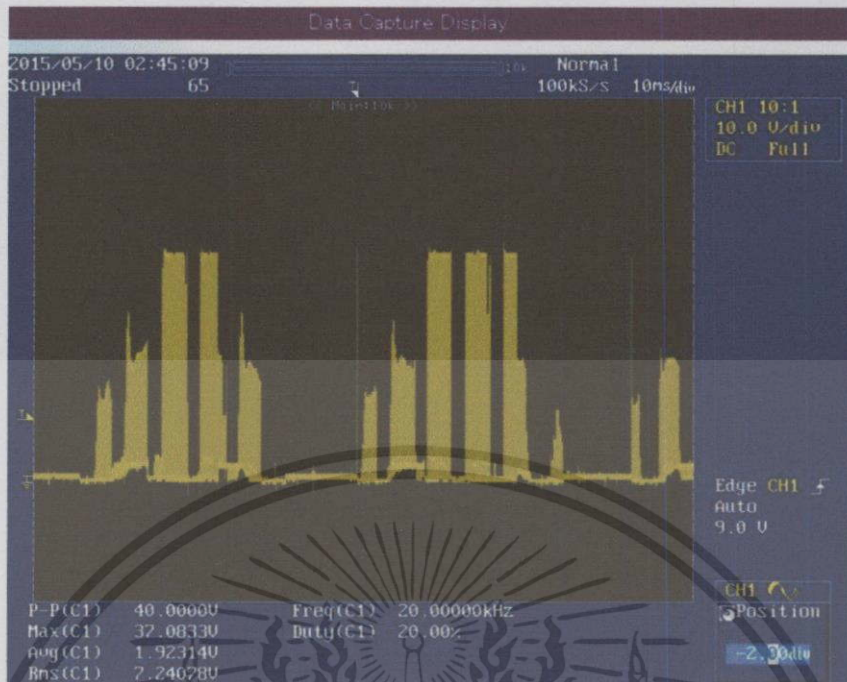
รูปที่ 4.21 สัญญาณ hall effect sensor

จากสมการความเร็ว rpm =  $120 \times f / P = (120 \times 22.89) / 50 = 54.94$  rpm



รูปที่ 4.22 แรงดันขาเกตด้าน high side และด้าน low side ที่คำสั่ง low speed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 แรงดันไฟฟ้าเฟส ( $V_p$ ) ของ BLDC motor โดยคำสั่ง low speed

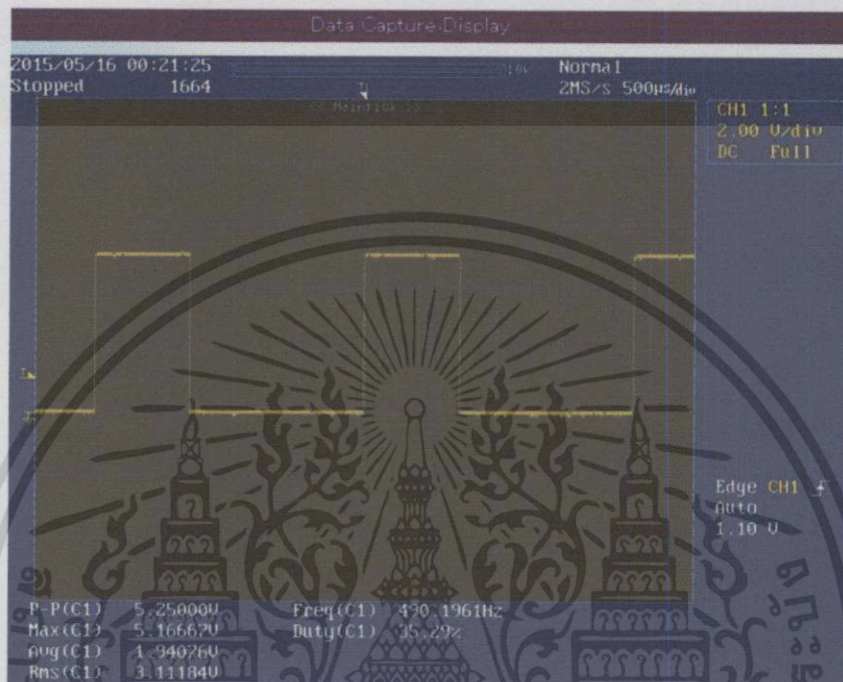


รูปที่ 4.24 แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส ( $V_{LL}$ ) ของ BLDC motor โดยคำสั่ง low speed

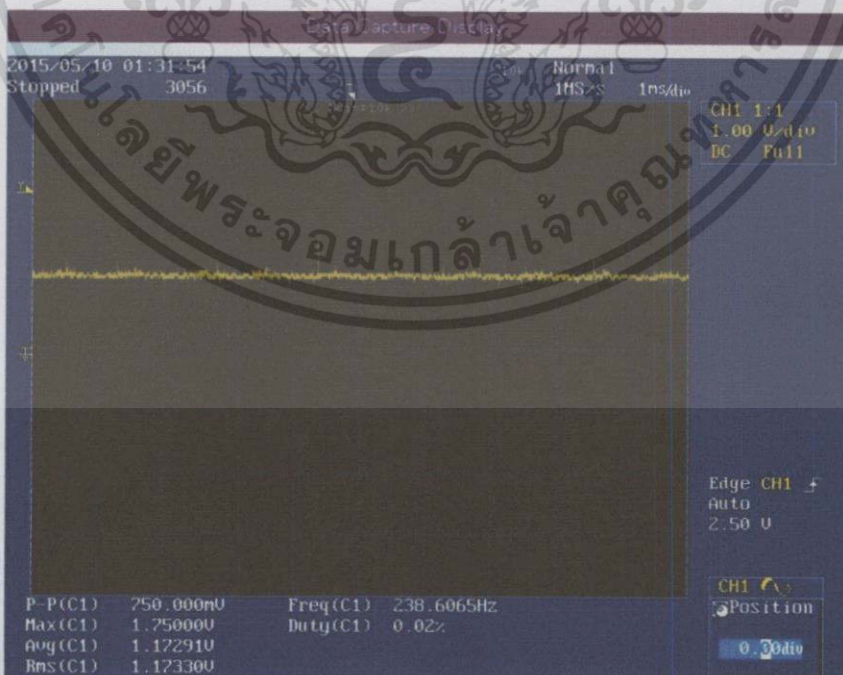
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.1.2 คำสั่ง middle speed

โดยที่ middle speed จะควบคุมสัญญาณ PWM ที่ ATmega2560 ส่งมาที่ Duty cycle = 35.29% ที่ 490 Hz ซึ่งทำให้ dsPIC30F2010 ประมวลผลได้สัญญาณไปควบคุมมอเตอร์ BLDC ที่ Duty cycle = 16.19% ที่ 20 kHz

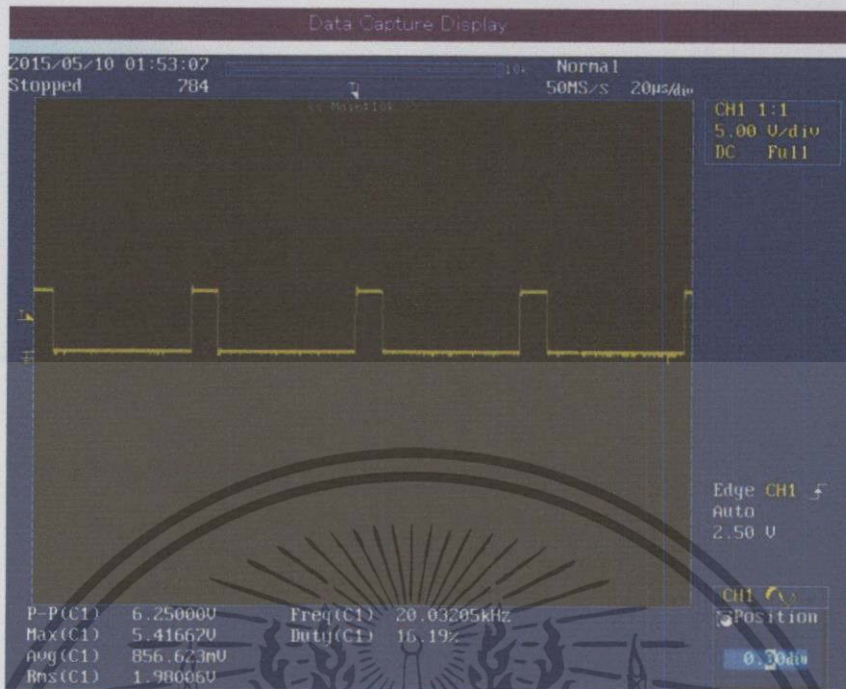


รูปที่ 4.25 PWM จาก ATmega2560 ที่คำสั่ง middle speed

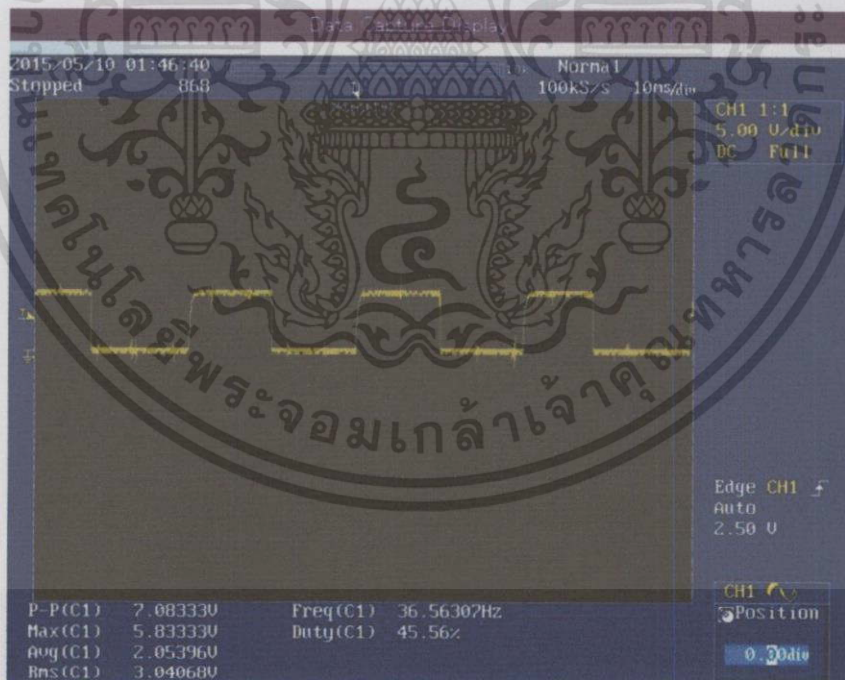


รูปที่ 4.26 แรงดันไฟฟ้าหลังจากกรองด้วยตัวเก็บประจุ (C) 2,200 µF

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



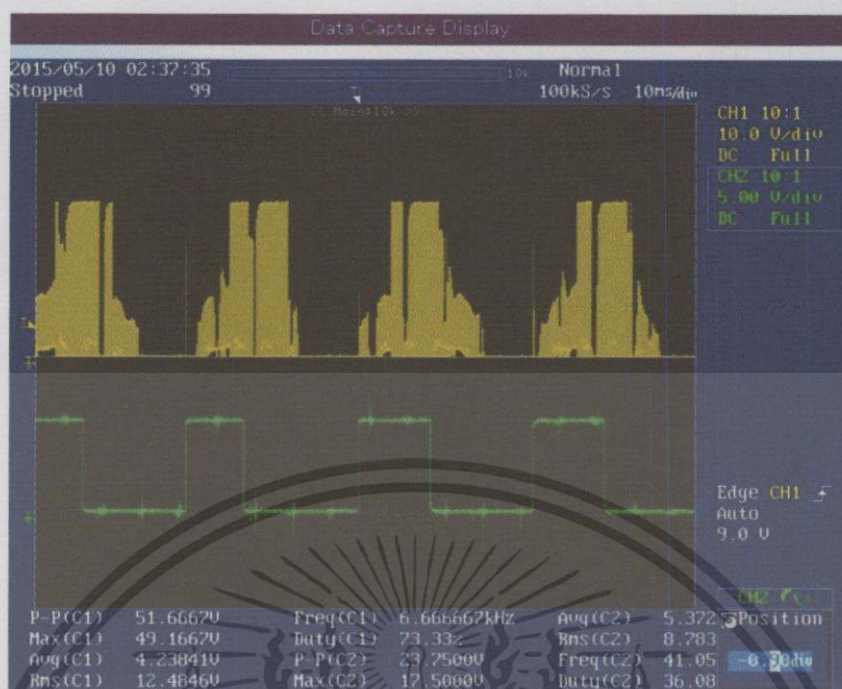
รูปที่ 4.27 Duty cycle ของขาเกิดด้าน high side ของ BLDC motor drive ที่กำลัง middle speed



รูปที่ 4.28 สัญญาณ hall effect sensor

จากสมการความเร็ว  $\text{rpm} = 120 \times f / P = (120 \times 36.56) / 50 = 87.74 \text{ rpm}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

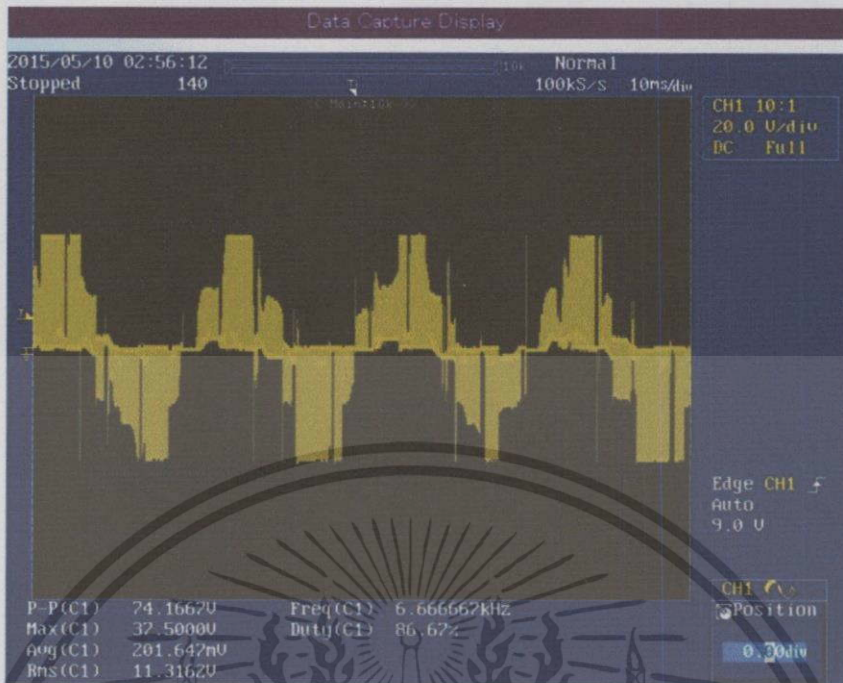


รูปที่ 4.29 แรงดันขาเกตด้าน high side และด้าน low side ที่คำสั่ง middle speed



รูปที่ 4.30 แรงดันไฟฟ้าเฟส ( $V_p$ ) ของ BLDC motor โดยคำสั่ง middle speed

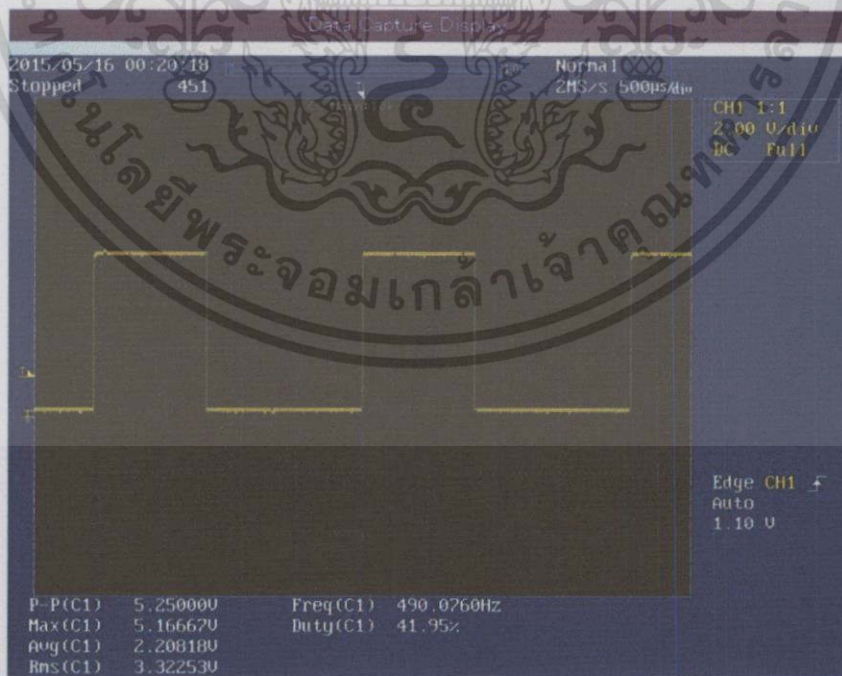
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส ( $V_L$ ) ของ BLDC motor โดยคำสั่ง middle speed

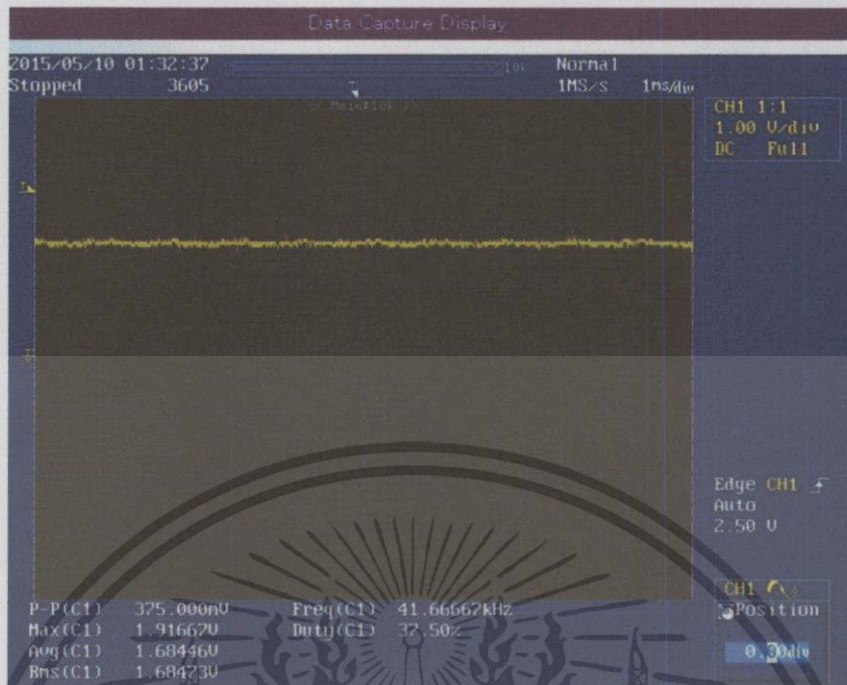
#### 4.3.1.3 คำสั่ง high speed

โดยที่ high speed จะควบคุมสัญญาณ PWM ที่ ATmega2560 ส่งมาที่ Duty cycle = 41.96% ที่ 490 Hz ซึ่งทำให้ dsPIC30F2010 ประมวลผลได้สัญญาณไปควบคุมมอเตอร์ BLDC ที่ Duty cycle = 28.00% ที่ 20 kHz

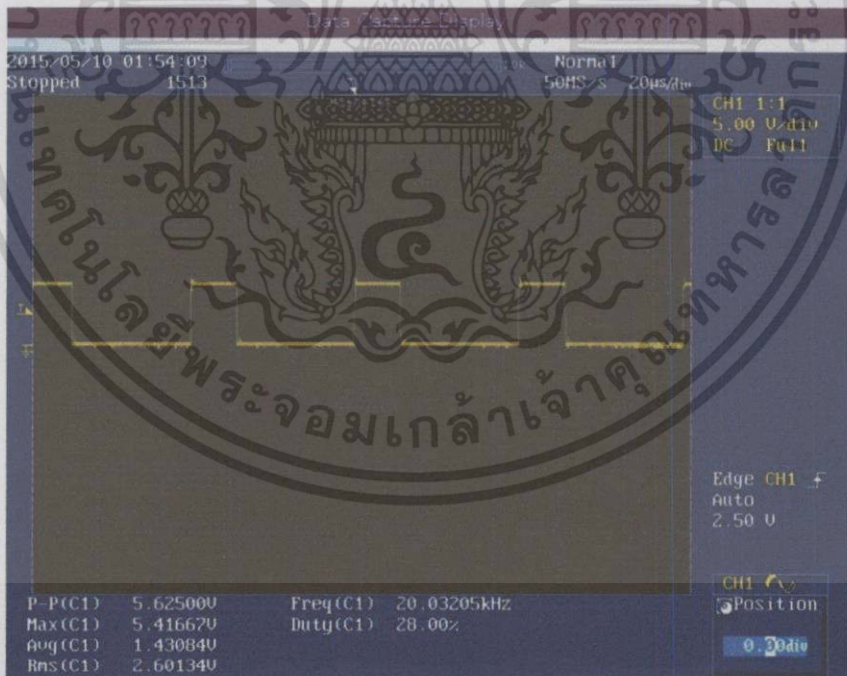


รูปที่ 4.32 PWM จาก ATmega2560 ที่คำสั่ง high speed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

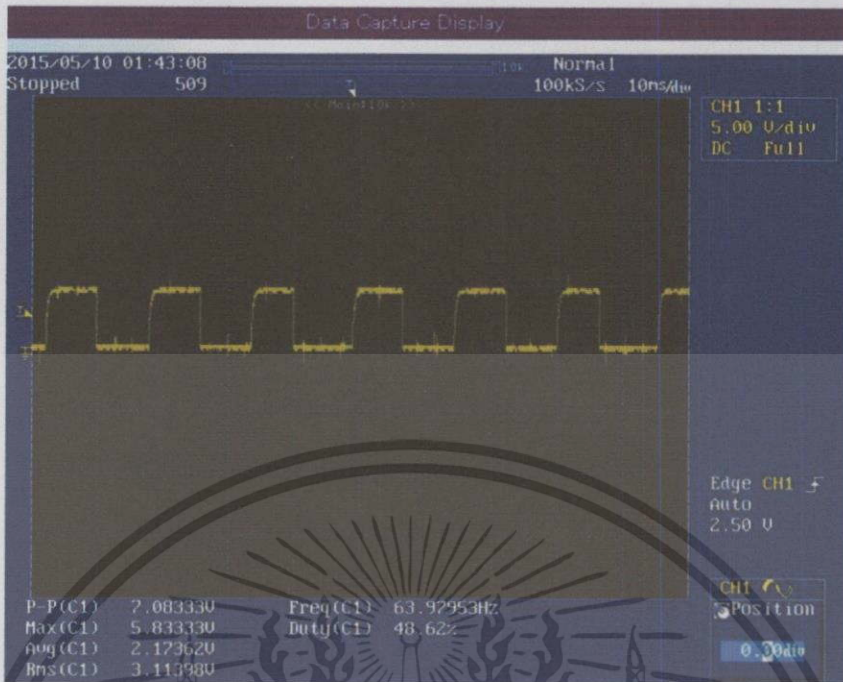


รูปที่ 4.33 แรงดันไฟฟ้าหลังจากกรองด้วยตัวเก็บประจุ (C) 2,200  $\mu\text{F}$



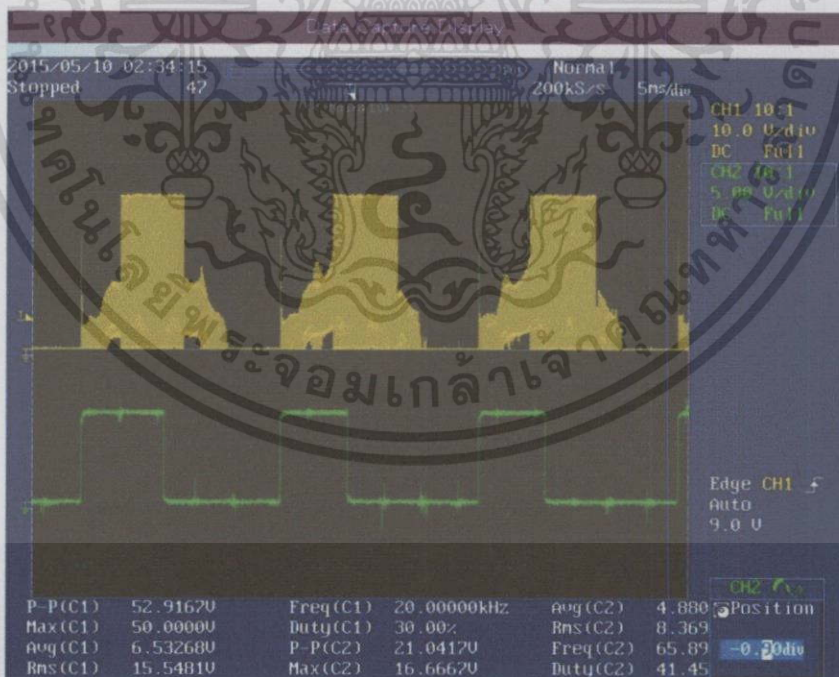
รูปที่ 4.34 Duty cycle ของขาเกตด้าน high side ของ BLDC motor drive ที่คำสั่ง high speed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



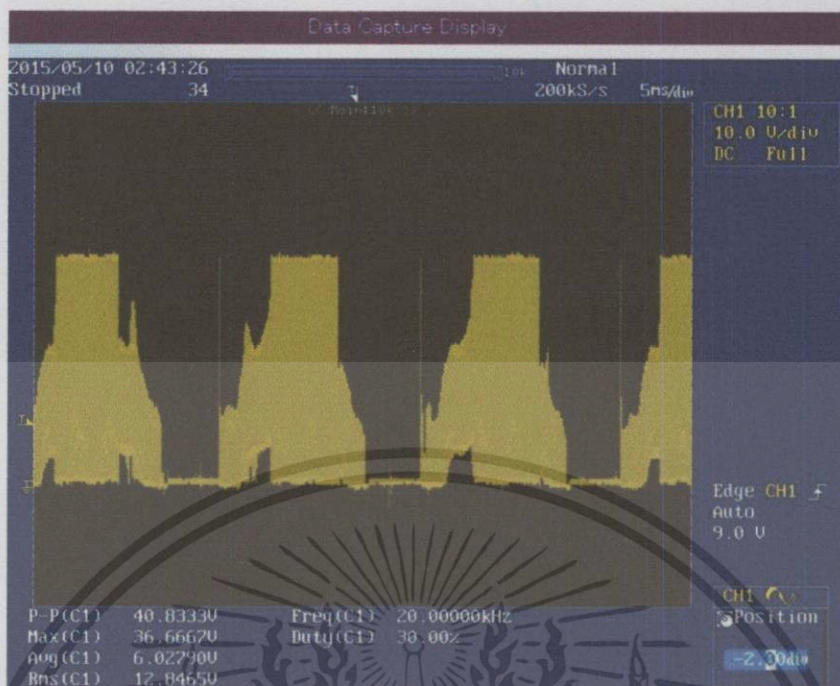
รูปที่ 4.35 สัญญาณ hall effect sensor

จากสมการความเร็ว rpm =  $120xf/P = (120 \times 63.98)/50 = 153.55$  rpm



รูปที่ 4.36 แรงดันขาเกตด้าน high side และด้าน low side ที่กำลัง high speed

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

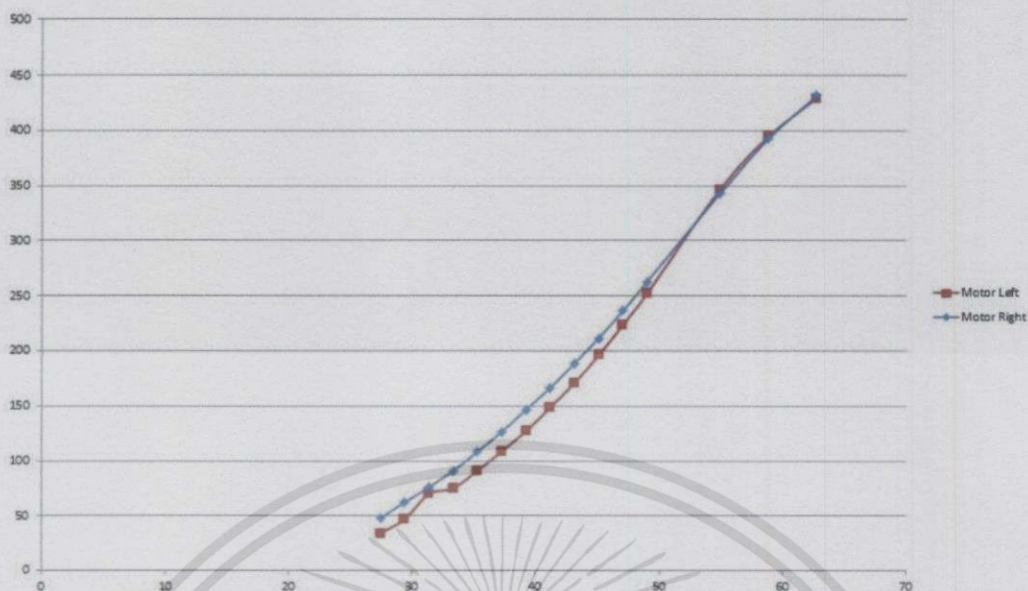


รูปที่ 4.37 แรงดันไฟฟ้าเฟส ( $V_p$ ) ของ BLDC motor โดยคำสั่ง high speed



รูปที่ 4.38 แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส ( $V_{LL}$ ) ของ BLDC motor โดยคำสั่ง high speed

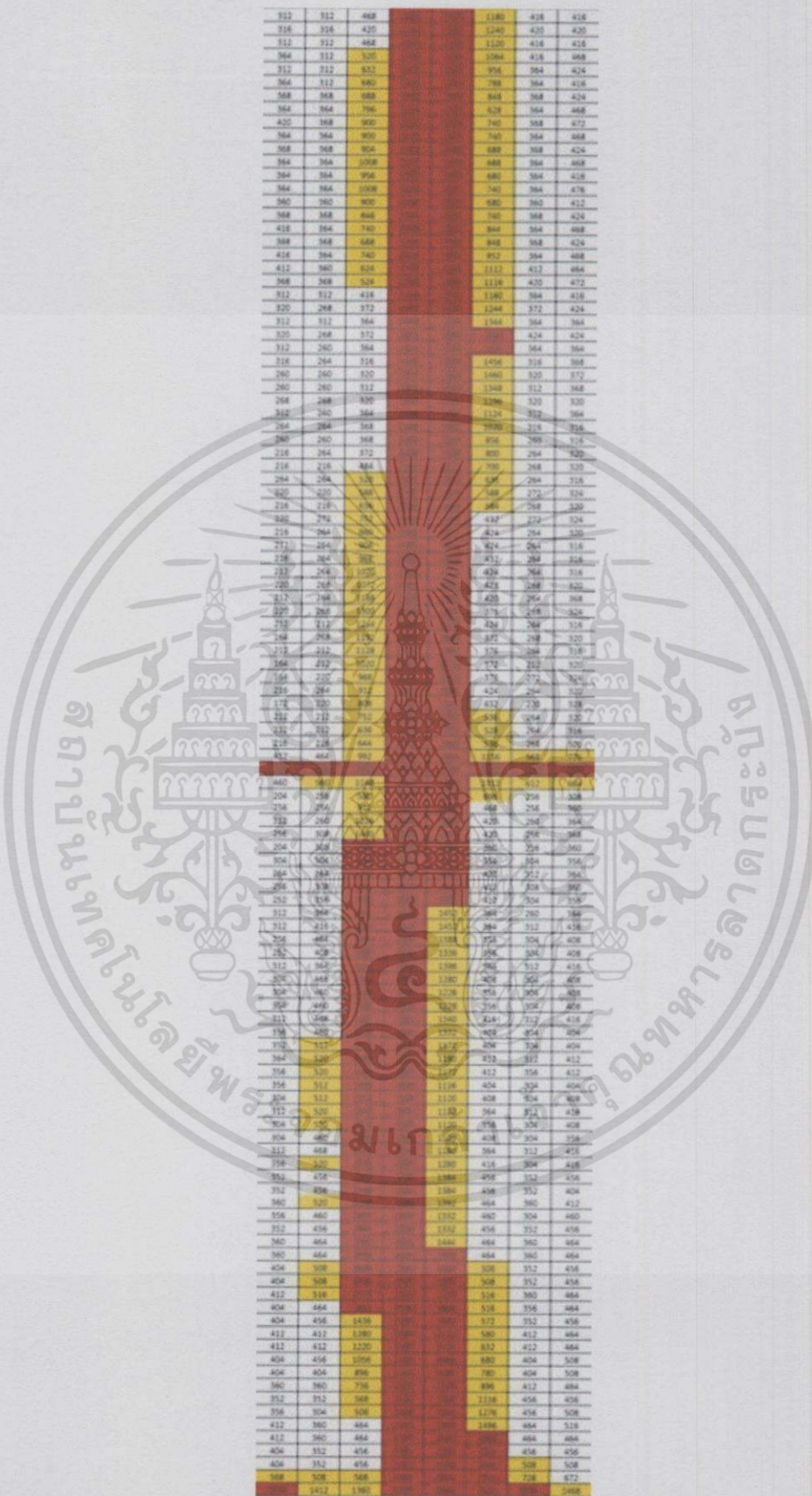
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 เปรียบเทียบ Duty cycle ของ ATmega2560 กับ rpm มอเตอร์ BLDC ทั้ง 2 ล้อ

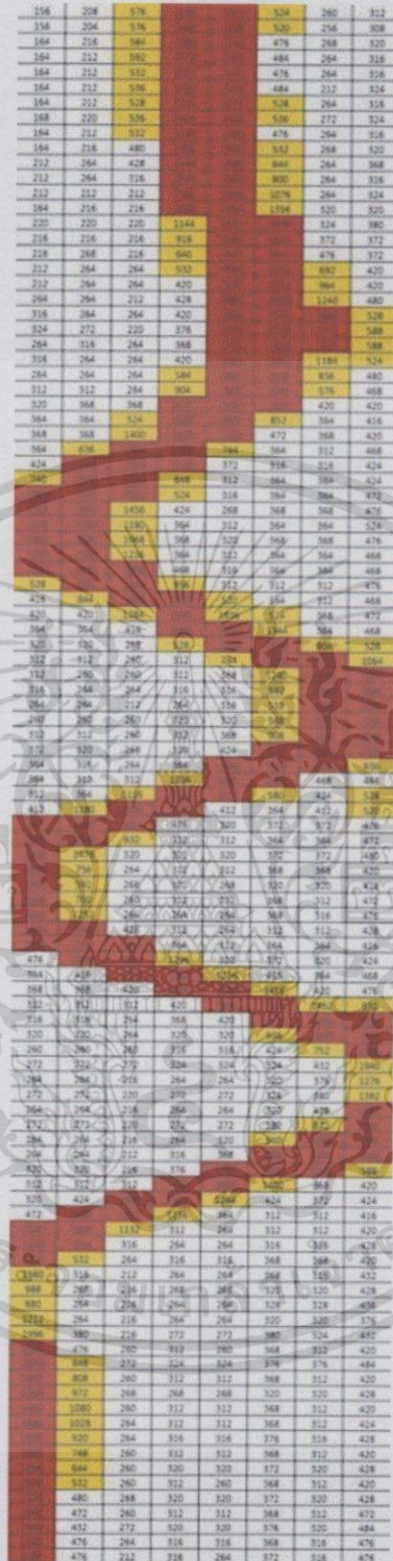
#### 4.3.2 ผลการทดลองการสังเกตการเคลื่อนที่ของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ

การทดลองนี้ทดลองโดยการสังเกตค่าที่อ่านได้จาก QTR 8-RC sensor array ผ่าน Serial port ในขณะที่รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติกำลังทำงาน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.40 และรูปที่ 4.41



รูปที่ 4.40 ผลการอ่านค่า QTR-8RC sensor array ที่ได้ขณะที่รถวิ่งได้อย่างราบรื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.41 ผลการอ่านค่า QTR-8RC sensor array ที่ได้ขณะที่รถวิ่งช้ามาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 ผลการทดลองแสดงการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ การทดลองนี้เป็นการทดสอบวัดค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ โดยสามารถแสดงได้ดังนี้

#### 4.3.3.1 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ที่ No-load

ตารางที่ 4.1 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ที่ No-load

เวลา (s)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
1	36.02	1.10	39.62
2	36.05	0.80	28.84
3	36.06	0.80	28.85
4	36.02	0.70	25.21
5	36.03	0.80	28.82
6	36.02	0.70	25.21
7	36.01	0.90	32.41
8	36.01	1.00	36.01
9	36.02	0.80	28.82
10	36.02	0.80	28.82
11	36.02	0.70	25.21
12	36.01	0.80	28.81
13	36.02	0.70	25.21
14	36.02	1.10	39.62
15	36.03	0.80	28.82
16	36.05	0.90	32.45
17	36.05	0.70	25.24
18	36.04	0.90	32.44
19	36.04	0.80	28.83
20	36.01	1.10	39.61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.3.3.2 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ที่ Load 40 kg

ตารางที่ 4.2 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ที่ Load 40 kg

เวลา (s)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
1	36.02	1.90	68.44
2	36.05	1.40	50.47
3	36.06	1.50	54.09
4	36.02	1.50	54.03
5	36.03	1.40	50.44
6	36.02	1.50	54.03
7	36.01	1.60	57.62
8	36.01	1.70	61.22
9	36.02	1.60	57.63
10	36.02	1.50	54.03
11	36.02	1.50	54.03
12	36.01	1.40	50.41
13	36.02	1.50	54.03
14	36.02	1.60	57.63
15	36.03	1.70	61.25
16	36.05	1.50	54.08
17	36.05	1.60	57.68
18	36.04	1.40	50.46
19	36.04	1.60	57.66
20	36.01	1.40	50.41

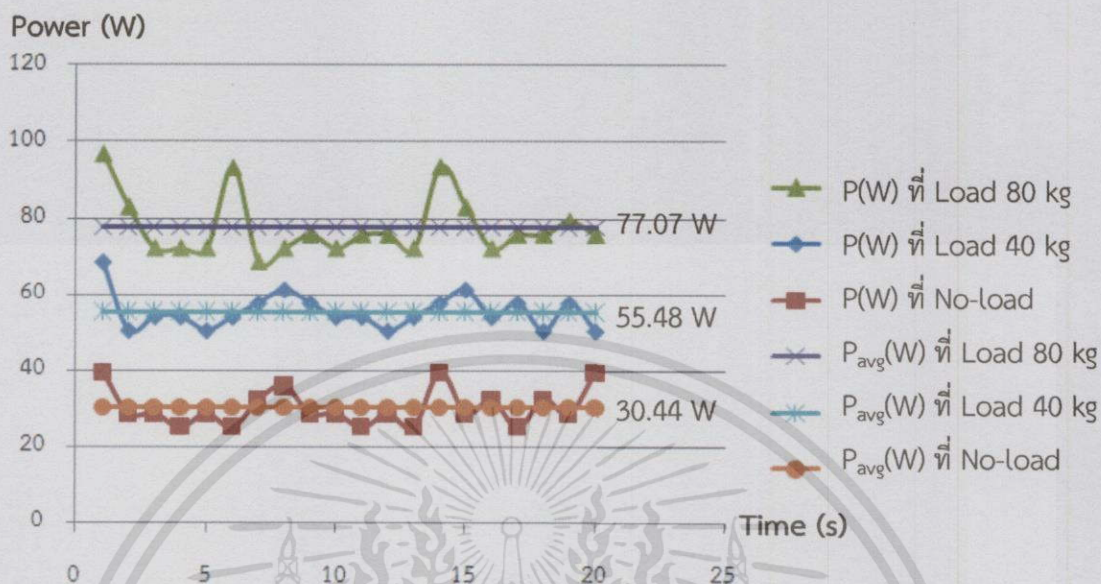
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.3.3.3 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ที่ Load 80 kg

ตารางที่ 4.3 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ที่ Load 80 kg

เวลา (s)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
1	35.80	2.70	96.66
2	36.01	2.30	82.82
3	36.02	2.00	72.04
4	36.02	2.00	72.04
5	36.03	2.00	72.06
6	35.80	2.60	93.08
7	36.03	1.90	68.46
8	36.02	2.00	72.04
9	36.00	2.10	75.60
10	36.01	2.00	72.02
11	36.02	2.10	75.64
12	36.01	2.10	75.62
13	36.02	2.00	72.04
14	35.90	2.60	93.34
15	36.00	2.30	82.80
16	36.01	2.00	72.02
17	36.02	2.10	75.64
18	36.02	2.10	75.64
19	36.01	2.20	79.22
20	36.01	2.10	75.62

เมื่อเปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ที่ No-load, Load 40 kg และ Load 80 kg สามารถแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 4.42



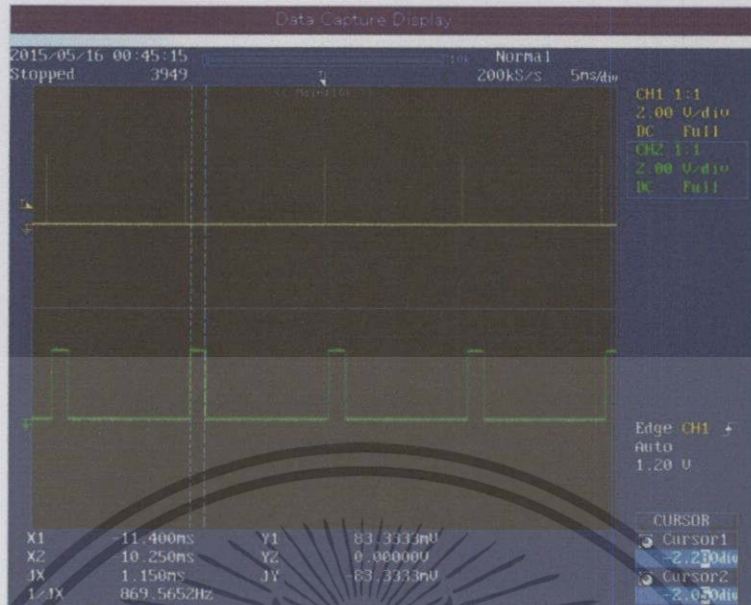
รูปที่ 4.42 เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ใช้เมื่อน้ำหนักบรรทุกต่างกัน

จากรูปที่ 4.42 จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติใช้ที่บรรทุกของ 80 กิโลกรัม เท่ากับ 77.07 W ซึ่งเมื่อใช้แบตเตอรี่ 360 Wh สามารถคิดระยะเวลาการทำงานต่อเนื่องสูงสุดของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติได้ดังนี้

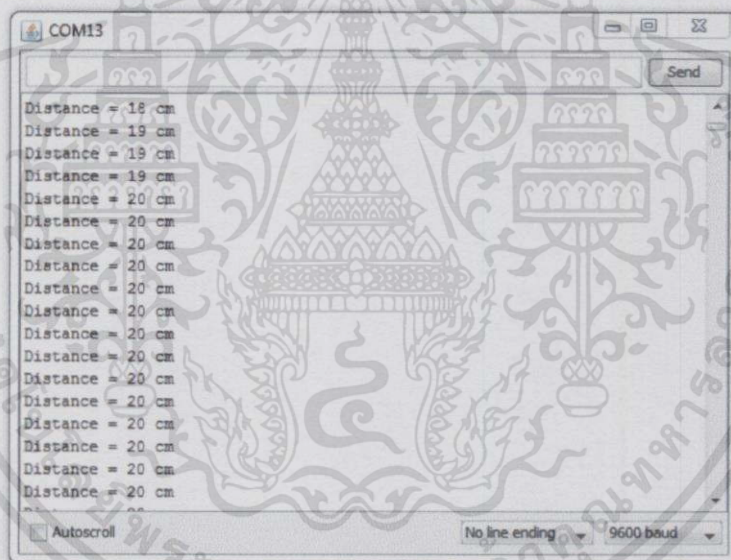
$$\text{ระยะเวลาการทำงานต่อเนื่อง} = 360/77.07 = 4.67 \text{ ชั่วโมง}$$

#### 4.4 ผลการทดลองจากการอ่านค่าผลที่ได้รับจาก Ultrasonic module HC-SR04

ขั้นตอนการทดลอง นำ Ultrasonic module HC-SR04 มาทดสอบการใช้งานโดยให้ตรวจวัดระยะ ที่ระยะ 0.2 m ดังแสดงในรูปที่ 4.43 และ 4.44, ระยะ 0.6 m ดังแสดงในรูปที่ 4.45 และรูปที่ 4.46 และ ระยะ 1 m ดังแสดงในรูปที่ 4.47 และรูปที่ 4.48 และเมื่อ ATTiny85 วัดระยะจาก Ultrasonic Module ได้ระยะทางน้อยกว่า 20 cm จะส่งสัญญาณเป็น Pulse ให้ ATmega2560 ประมวลผลต่อไป ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.49

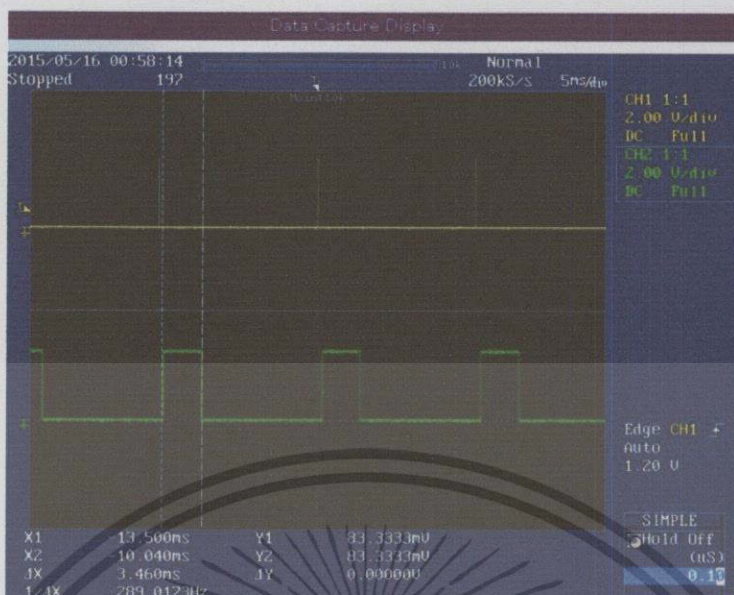


รูปที่ 4.43 สัญญาณ TRIG และ ECHO ของ Ultrasonic module เมื่อตรวจจับวัตถุระยะ 0.2 m



รูปที่ 4.44 ค่าที่ ATTiny85 อ่านได้ โดยวัดที่ระยะ 0.2 m และแสดงผลผ่าน Serial port

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

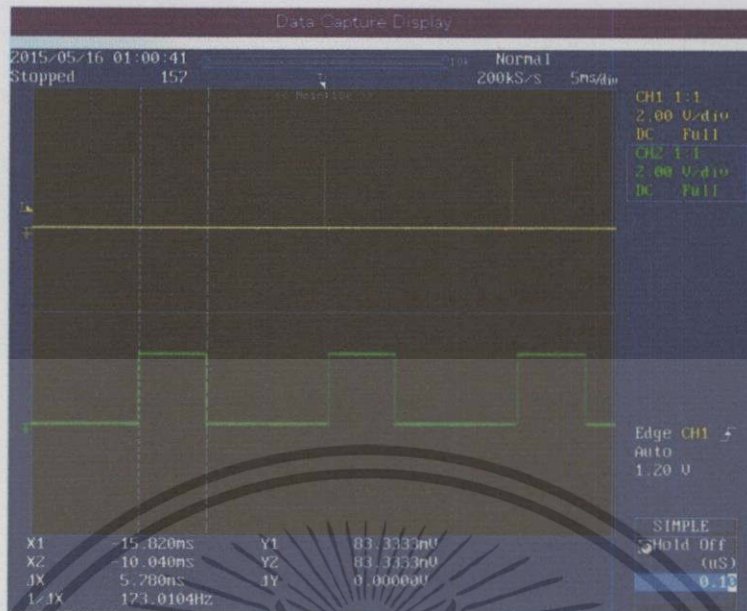


รูปที่ 4.45 สัญญาณขา TRIG และ ECHO ของ Ultrasonic module เมื่อตรวจจับวัตถุระยะ 0.6 m



รูปที่ 4.46 ค่าที่ ATTiny85 อ่านได้ โดยวัดที่ระยะ 0.6 m และแสดงผลผ่าน Serial port

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.47 สัญญาณขา TRIG และ ECHO ของ Ultrasonic module เมื่อตรวจจับวัตถุระยะ 1 m



รูปที่ 4.48 ค่าที่ ATTiny85 อ่านได้ โดยวัตถุที่ระยะ 1 m และแสดงผลผ่าน Serial port

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.49 สัญญาณ pulse เมื่อ ATTiny85 วัดระยะทางได้น้อยกว่า 20 cm



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษา ออกแบบ และสร้างรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ รูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีความมั่นคง แข็งแรง และมี 2 ชั้น โดยชั้นล่างเป็นพื้นที่วางชุดวงจรขับเคลื่อนรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ ส่วนพื้นที่ด้านบนมีไว้สำหรับใช้บรรทุกสิ่งของ และใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนฟอสเฟต 36V 10Ah เป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อน โดยรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติสามารถบรรทุกของที่มีน้ำหนักไม่เกิน 80 กิโลกรัมได้ และรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติสามารถทำความเร็วสูงสุดได้ 3 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และที่การเคลื่อนที่ที่ราบเรียบที่สุด จะมีความเร็วที่ 1.5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และนอกจากนี้รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติยังสามารถทำงานตามสถานีได้ ๓ สถานี โดยสามารถตั้งค่าได้ในโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยก่อนที่จะถึงสถานีนั้นจะมีแถบเส้นสีดำเส้นแรกไว้ ให้รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติทำการชะลอรถ เพื่อเตรียมพร้อมเข้าสู่สถานีต่อไป และเมื่อถึงสถานีสุดท้ายรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติสามารถกลับตัว เพื่อกลับมาเริ่มทำงานใหม่ได้อีกครั้งได้

และผลการทดสอบ QTR – 8RC reflectance sensor array ซึ่งมีตัวรับสัญญาณจำนวน 8 คู่ นำมาใช้เป็นระบบนำทางของรถ จะมีระยะติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดที่สูงจากพื้น 0.6 cm และจากการใช้ Ultrasonic module HC-SR04 ซึ่งเป็นโมดูลสำหรับตรวจวัดระยะทางโดยใช้หลักการสะท้อนของคลื่นเสียง ซึ่งนำมาใช้เป็นระบบความปลอดภัยจากการใช้รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ ซึ่งตั้งไว้ให้รถมีระยะหยุดที่ 20 cm สามารถนำมาใช้งานได้จริง แต่จะมีมุมในการวัดที่แคบ จึงต้องใช้ Ultrasonic module HC-SR04 ถึง 3 ตัวทำงานร่วมกัน เพื่อเพิ่มมุมในการวัดระยะวัตถุข้างหน้าได้มากขึ้น

### วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองโดยใช้แบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนฟอสเฟต 36V 10Ah เป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อน ต้องคำนึงถึงความปลอดภัยในขณะที่ทำการเปิด/ปิดวงจร ดังนั้นจึงควรเปิด/ปิดอุปกรณ์ตามลำดับขั้นตอน เนื่องจากแหล่งจ่ายคือแบตเตอรี่ซึ่งไม่มีการจำกัดการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับวงจร ซึ่งหากไม่ระมัดระวัง อาจเกิดเหตุการณ์กระแสไฟฟ้าเกินหรือกระแสชากในชุดวงจรควบคุม ซึ่งเป็นอันตรายต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดภายในชุดวงจรควบคุมได้

### ปัญหาที่เกิดขึ้นและแนวทางแก้ไข

1. ปัญหาที่เกิดขึ้นจากตัวเซนเซอร์ QTR – 8RC reflectance sensor array มีการรับค่าที่ผิดเพี้ยนจากสภาพแวดล้อม เช่น ปริมาณแสงที่ตกกระทบกับตัวแถบสีดำมากเกินไป และจากแถบสีดำที่สกปรก ทำให้การอ่านค่าของเซนเซอร์มีค่าที่ผิดเพี้ยนไป ส่งผลกระทบทำให้การประมวลผลและคำสั่งที่ป้อนให้กับตัวรถผิดพลาด ทำให้ตัวรถขับเคลื่อนนอกเหนือจากสิ่งที่ควบคุมไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวทางการแก้ไข : ใช้เซนเซอร์ที่มีประสิทธิภาพในการใช้งานมากกว่าเดิม หรือใช้เป็น Wireless Guidance เพื่อลดตัวแปรด้านสภาวะแวดล้อม เพื่อการควบคุมให้รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติมีความเสถียรต่อการใช้งานจริงในอุตสาหกรรมได้

2. ปัญหาการวัดค่าผิดพลาดจาก Ultrasonic ranging module HC-SR04 ซึ่งมีผลทำให้การประมวลผลของระบบผิดพลาดไป ทำให้รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติทำงานผิดปกติ

แนวทางการแก้ไข : จะทำการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตรวจสอบค่าซ้ำถึง 4 ครั้ง เพื่อตรวจสอบว่าได้ระยะทางจริงเท่าไร เพื่อป้องกันการผิดพลาดจากการวัดระยะทาง

3. ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการได้รับกระแสเกินจากแหล่งจ่ายซึ่งใช้เป็นแบตเตอรี่ ส่งผลทำให้วงจรขับเคลื่อนรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติเกิดความเสียหายอย่างมาก ทำให้ต้องซ่อมตัววงจรใหม่ บางครั้งร้ายแรงถึงขั้นต้องสร้างชุดวงจรขับเคลื่อนใหม่

แนวทางการแก้ไข : ตรวจสอบสาเหตุของอาการดังกล่าวไปใช้ที่มากเกินไปของมอเตอร์กระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน และติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันให้ถูกต้องและเหมาะสม เช่น ใส่อินเซอร์เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายต่อวงจรขับเคลื่อน

### แนวทางการพัฒนาในอนาคต

1. ควรนำระบบนำทางแบบ Image processing หรือ Wireless guidance เช่น Compass sensor, Acceleration sensor มาช่วยในการควบคุมรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ เนื่องจากจะสามารถช่วยลดข้อจำกัดในหลายๆด้านของ QTR 8-RC sensor array เช่น สภาวะแวดล้อมด้านแสงสว่าง หรือ สภาวะแวดล้อมด้านความสกปรกของแถบเส้น เป็นต้น

2. นำระบบสื่อสารมาใช้ในรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ ในอนาคตหากเราสามารถสร้างขึ้นมาได้อีกคัน เราควรสร้างระบบการสื่อสารให้ตัวรถเพื่อทั้งสองเพื่อที่รถทั้งสองสามารถสื่อสารระหว่างกันได้ว่า อยู่ ณ ตำแหน่งใด รถคันไหนอยู่ใกล้กับสถานที่ที่ต้องการให้ไปได้มากกว่ากัน มีการตัดสินใจเกิดขึ้นระหว่างรถทั้งสอง และสามารถทำภารกิจที่สมมติขึ้นมาให้ได้อย่างลุล่วง

3. ควรมีการใช้ระบบควบคุมที่ดีขึ้นมากกว่าการใช้ระบบ on-off control เช่น ใช้ระบบ PID Control จะสามารถช่วยให้รถอัตโนมัติทำงานหรือเดินทางได้ราบเรียบมากขึ้น

4. ควรมีการพัฒนาทางด้าน Software ให้ดีขึ้น เพื่อเพิ่มขีดความสามารถและเพิ่มประสิทธิภาพในการประมวลผลของตัวประมวลผลกลางของระบบให้ดีขึ้น เช่น ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีประสิทธิภาพดีขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] วีระเชษฐ์ ชันเงิน และ วุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, กรุงเทพมหานคร, ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ. พรินติ้ง, 2555.
- [2] รณกฤษณ์ จิตแจ่มใส และคณะ, “ระบบการทำงานของรถในรถไฟฟ้ามหานคร สายเฉลิมรัชมงคล”, **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555
- [3] กฤตภาส ผิวสันเทียะ และคณะ, “การออกแบบและควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าแบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน”, **ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต**, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คู่มือการใช้งานรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ใช้ปุ่ม Push button บนแผง User interface เพื่อทำการตั้งค่าน้ำหนักของโหลดที่จะบรรทุก



รูปที่ ก.3 จอ LCD แสดงการตั้งค่าน้ำหนัก

4. ใช้ปุ่ม Push button บนแผง User interface เพื่อทำการเลือกโหมดทำงาน



รูปที่ ก.4 จอ LCD แสดงการเลือกโหมดการทำงาน

#### ข้อควรระวัง

1. หากสับสวิตช์ Circuit Breaker ขณะที่ Emergency Switch อยู่ในสภาวะปิดวงจร และสวิตช์ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบฮับชนิดไร้แปรงถ่านอยู่ในสภาวะ ON อยู่ จะทำให้แผงควบคุมเกิดความเสียหาย เนื่องจากสัญญาณตอนเริ่มต้นของวงจรควบคุมยังไม่เข้าสู่สภาวะทำงาน ทำให้เกิดความผิดพลาดของสัญญาณไปสั่งให้มอเตอร์หมุนที่ Duty cycle สูงๆ จึงทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ากระชากตอนเริ่มต้นสูงมากจนทำให้วงจรเกิดความเสียหาย

2. เนื่องจาก Gear wheel hub motor ที่ใช้เป็นต้นกำลังของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ เป็นแบบยางแข็งรอบตัวมอเตอร์ และไม่มียางใน ทำให้เกิดการรั่วซึมของลมได้เล็กน้อย ทำให้รถเสียสมดุล เป็นต้นเหตุให้รถเกิดอาการส่ายเล็กน้อยเวลาทำงาน เพราะล้อจะไม่ติดกับพื้นตลอด เป็นต้นเหตุให้เกิดการไถลได้ในบางครั้ง ดังนั้นจึงควรหมั่นเติมลมยาง และตรวจสอบสมดุลรถทุกครั้งที่ใช้งาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ Automated Guided Vehicle

กฤตพัฒน์ อนันต์ลักษณ์การ ขชล ทยเงิน และ คณะศ ษณ์เขตรกรณ  
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
1 ซอย ฉลองกรุง 1 ลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทรศัพท์ 02-329-8000 E-mail: ten\_senior@hotmail.com

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้เพื่อสร้างต้นแบบของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยสามารถรับส่งสิ่งของตามเส้นทางที่สร้างไว้จากเส้นดำบนพื้นโรงงานอุตสาหกรรม โดยมีระบบตรวจจับเส้นทางโดยใช้ QTR Sensor Array ที่ทำงานด้วยการประมวลผลจากค่าการสะท้อนของแสงกับแถบเส้นสีดำที่สร้างไว้ โดยรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติสามารถขนส่งสิ่งของที่มีน้ำหนักได้ถึง 80 กิโลกรัม และกำหนดความเร็วสูงสุดไม่เกิน 5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เพื่อป้องกันการเกิดอุบัติเหตุตามมาตรฐานการใช้งานระบบอัตโนมัติในโรงงาน ส่วนระบบขับเคลื่อนรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัตินี้จะใช้มอเตอร์แบบสับซึกไม่มีแปรงถ่าน ทิศัก 350 วัตต์ 700 รอบต่อนาที 3 โวลต์ 50 ชั่วโมง จำนวน 2 ตัว โดยที่รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติจะถูกควบคุมโดย ATmega2560, ATTiny85 และ dSPIC30F2010 และ AGV ยังมีระบบป้องกันจาก Ultrasonic Sensor ตรวจจับสิ่งกีดขวาง โดยรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติจะใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟตในการขับเคลื่อน ซึ่งแบตเตอรี่นี้มีสมรรถนะสูง และมีน้ำหนักเบา

**คำสำคัญ:** Automated guided vehicles, Brushless direct current motor (BLDC motor), QTR sensor array

### 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 black lines on the floor of manufactory. Guided route of this vehicle is QTR Sensor Array that can be calculated the reflection of lights from the black 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) 350 W, 700 rpm, 36 V<sub>dc</sub> and 50 poles. ATmega2560, 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 5

hours, as it has light weight and high efficiency.

**Keyword:** Automated guided vehicle, Brushless direct current motor (BLDC motor), QTR sensor array

### 1. บทนำ

ในปัจจุบันระบบอัตโนมัติมีความสำคัญต่อโรงงานอุตสาหกรรมอย่างมาก สาเหตุเนื่องจากผลของการแข่งขันกันด้านการผลิตอย่างจริงจังและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งปัจจัยในด้านการตลาดที่ขาดไม่ได้ก็คือ การกำหนดเวลาส่งมอบผลิตภัณฑ์และปริมาณที่ต้องการ ซึ่งจะต้องผลิตแข่งกับเวลา ดังนั้นประโยชน์ของระบบอัตโนมัติจึงช่วยให้ลดระยะเวลาในการทำงานจากปกติ ทั้งในรูปแบบการเปลี่ยนเครื่องมือ การขนย้ายผลิตภัณฑ์ รวมไปถึงกระบวนการต่างๆที่มนุษย์ไม่สามารถเข้าไปปฏิบัติงานได้ ซึ่งหากพิจารณาถึงค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผลิตทั้งหมด ประมาณ 2 ใน 3 ของค่าใช้จ่ายในการผลิตทั้งหมด จะเห็นว่าการขนถ่ายวัสดุเป็นกิจกรรมที่มีความสำคัญมากคือกระบวนการผลิต

ดังนั้นหากสามารถนำรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ มาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม จะช่วยให้ขนย้ายวัสดุอุปกรณ์ได้รวดเร็วมากยิ่งขึ้น มีความคล่องตัว สามารถลดต้นทุนจากการจ้างแรงงาน มีความถูกต้องในการส่งวัสดุอุปกรณ์และไม่ทำให้วัสดุเกิดความเสียหายและที่สำคัญต้องมีความปลอดภัยจากการใช้ระบบอัตโนมัติ และหากพิจารณาถึงต้นกำลังของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ ซึ่งใช้เป็นมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (BLDC Motor) ซึ่งเป็นมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง จะมีอายุการใช้งานนานกว่า Brush DC Motor อีกทั้งยังมีขนาดเล็กและมีน้ำหนักเบากว่ามอเตอร์เหนี่ยวนำ (Induction Motor) ที่ทิศักเท่ากัน ดังนั้นจึงสามารถนำมาติดตั้งและใช้เป็นต้นกำลังของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติได้ดีกว่า

### 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 มอเตอร์แบบฮับ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์แบบสับส่วนมากจะถูกนำมาใช้กับยานพาหนะไฟฟ้า เช่น จักรยานไฟฟ้า เนื่องจากมีความสะดวกในการติดตั้งและมีเสถียรภาพในการทำงาน สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือมอเตอร์แบบสับชนิดมีแปรงถ่านและไม่มีแปรงถ่าน

## 2.2 ทฤษฎีมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดไม่มีแปรงถ่าน

Brushless DC motor (BLDC) หรือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน จะอาศัยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังเป็นอุปกรณ์สวิตซ์ในการสับเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดของมอเตอร์แทนหน้าที่ของแปรงถ่าน โดยจะมี Hall Effect Sensor ตรวจจับตำแหน่งของโรเตอร์ เพื่อให้สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าจะสร้างขั้วแม่เหล็กที่สเตเตอร์ทำให้เกิดการดึงดูดระหว่างขั้วแม่เหล็กที่เกิดขึ้นกับฟลักซ์ที่โรเตอร์สร้างขึ้น โดยที่โดยที่กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดสเตเตอร์ นั้นจะเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ ส่วนที่โรเตอร์นั้นเป็นแม่เหล็กถาวร (Permanent magnet)

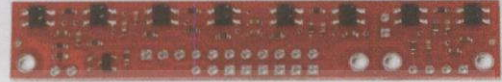
## 2.3 อินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ (Inverter) คือวงจรแปลงผันพลังงานไฟตรงให้เป็นไฟสลับ และควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับให้มีค่าแรงดันคงที่หรือปรับค่าได้เพื่อให้ได้ความถี่ไฟสลับเอาต์พุตที่มีค่าคงที่หรือปรับค่าได้ โดยใช้หลักการปรับค่าแรงดันไฟตรงด้านอินพุตหรือใช้หลักการควบคุมเทคนิคการสวิตซ์ภายในตัวอินเวอร์เตอร์ เช่น เทคนิคแบบมอดูเลตความกว้างพัลส์ (PWM) หรือใช้วิธีปรับค่าแรงดันไฟตรงด้านอินพุตของอินเวอร์เตอร์ เป็นต้น ซึ่งอินเวอร์เตอร์ที่ใช้สำหรับงานควบคุมความเร็วมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส จะใช้หลักการควบคุมอัตราส่วนของแรงดันเอาต์พุตและความถี่เอาต์พุตให้คงที่ (V/f Constant) เพื่อให้สามารถควบคุมให้แรงบิดคงที่ได้ แต่สำหรับอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในงานควบคุมอื่นๆ ที่ต้องการความถี่เอาต์พุตคงที่ก็จะใช้อินเวอร์เตอร์ที่ควบคุมการเปิด-ปิด สวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังด้วยวิธีที่ไม่ซับซ้อน เช่น วิธีมอดูเลตแบบ 180 องศา หรือ 120 องศา เป็นต้น สำหรับลูกคลื่นของแรงดันเอาต์พุตไฟสลับของอินเวอร์เตอร์ในอุดมคติคือรูปคลื่นไซน์ แต่ในทางปฏิบัติจะใช้สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมซึ่งมีฮาร์มอนิกสัประปนอยู่มาก ซึ่งด้วยเทคนิคการสวิตซ์แบบ PWM จะช่วยลดฮาร์มอนิกดังกล่าวลง และเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของอินเวอร์เตอร์ให้สูงขึ้น

## 2.4 QTR 8-RC Sensor Array

QTR-8RC Reflectance Sensor Array เป็นเซนเซอร์ตรวจจับการสะท้อนของแสงโดยมี IR LEDs ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวส่งสัญญาณ และ Phototransistor ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณ จำนวน 8 คู่ โดยหลักการทำงานคือ IR LEDs แต่ละตัวจะส่งสัญญาณออกไปจากตัวเซนเซอร์ และสัญญาณจะสะท้อนกับสิ่งบนวัตถุที่ตรวจจับ และสะท้อนกลับมาระทบกับโฟโตทรานซิสเตอร์ ซึ่งเป็นตัวรับสัญญาณ โดยโฟโต

ทรานซิสเตอร์แต่ละตัวนั้น จะทำการคายประจุจากตัวเก็บประจุที่อยู่ในวงจร RC บนโมดูลเซนเซอร์ ดังนั้นในการใช้งานจะคำนวณระยะเวลาในการคายประจุของวงจร RC บนโมดูล หากระยะเวลาในการคายประจุสั้นแสดงว่าเซนเซอร์สามารถสะท้อนกับวัตถุได้ดี แต่หากระยะเวลาในการคายประจุมากขึ้น แสดงว่าสะท้อนกับวัตถุได้น้อยลง



รูปที่ 1 QTR 8-RC sensor array

## 3. การออกแบบและการสร้างรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ

### 3.1 ลักษณะโครงสร้างของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ

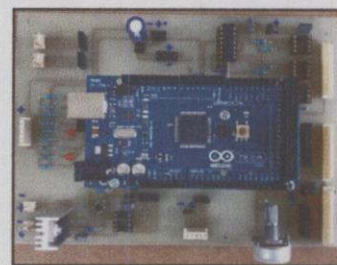
รถขนส่งอัตโนมัติถูกออกแบบให้มีรูปทรง 64x64x68 cm<sup>3</sup> มี 2 ชั้น โดยชั้นล่างเป็นพื้นที่สำหรับวางอุปกรณ์ควบคุม และพื้นที่ชั้นบนสำหรับวางถังของ และโครงสร้างเป็นเหล็กและปิดโครงด้วยไม้ มีต้นกำลังเป็น BLDC Hub Motor 350 W 700 rpm 36 V โดยน้ำหนักรวมของรถเท่ากับ 30 kg



รูปที่ 2 รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ (AGV)

### 3.2 วงจรประมวลผลกลาง (CPU)

รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega2560 และ ATTiny85 ทำงานร่วมกัน โดย ATmega2560 มีหน้าที่ในการตรวจจับแถบเส้นค่าและส่งสัญญาณควบคุมมอเตอร์ไปให้ BLDC Motor Drive และ ATTiny85 มีหน้าที่ในการแสดงผลให้ USER ผ่านการกะพริบไฟ LED และ ตรวจจับระยะวัตถุที่อยู่ด้านหน้าเพื่อเพิ่มความปลอดภัยจากการใช้รถอัตโนมัติ

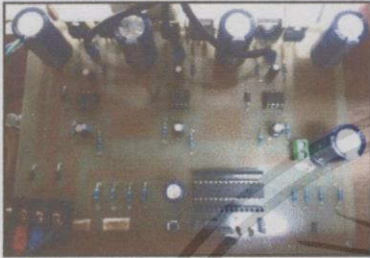


รูปที่ 3 วงจรประมวลผลกลางของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน

ในวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน จะใช้มอเตอร์กำลังเป็นอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่ง ที่ความถี่ 20 kHz โดยใช้ dsPIC30F2010 เป็นตัวประมวลผลสำหรับการควบคุม BLDC Motor โดยขับเคลื่อนผ่านวงจรขับเคลื่อน IR-2101 ควบคุมการทำงานของอุปกรณ์สวิตซ์ซึ่งในแต่ละกึ่ง และใช้การควบคุมแบบความกว้างพัลส์แบบยูนิโพลาร์ (Unipolar PWM) เนื่องจากมีสาร์โมนิกส์ที่ต่ำกว่าการควบคุมแบบอื่น

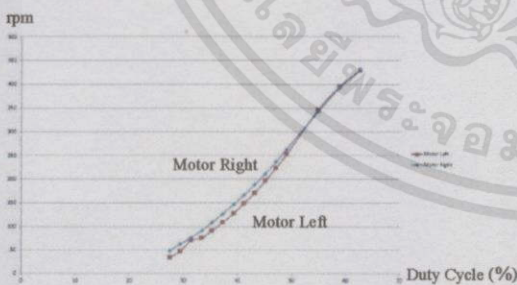


รูปที่ 4 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์แบบฮับชนิดไม่มีแปรงถ่าน

### 4. ผลการทดลอง

#### 4.1 ศึกษาค้นคว้าควบคุมที่ใช้สำหรับรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ

ศึกษาค้นคว้าควบคุมที่ใช้จะเริ่มจาก ATmega2560 ซึ่งศึกษาค้นคว้า PWM ที่ความถี่ 490 Hz ที่ Duty Cycle ต่างๆ ตามค่าส่งที่ประมวลผลได้จากนั้นจะผ่านวงจร C Ripple เพื่อให้สัญญาณมีลักษณะเป็นไฟตรงคล้ายกับการใช้ Potentiometer หลังจากนั้นจะนำสัญญาณนี้ไปเป็น  $V_{ref}$  ให้กับ dsPIC30F2010 ประมวลผลเพื่อขับ BLDC Motor ต่อไป ซึ่งสามารถแสดงได้ดังกราฟรูปที่ 5 โดยแกน x คือ Duty Cycle (%) จาก ATmega2560 และแกน y คือความเร็วรอบมอเตอร์ (rpm) ทั้ง 2 ล้อ



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง Duty Cycle กับความเร็วรอบมอเตอร์

#### 4.2 ผลการทดสอบการวิ่งตามแถบเส้นดำ

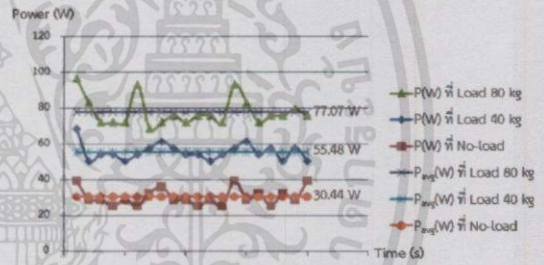
การทดลองนี้เป็นการทดสอบการวิ่งตามเส้น โดยเก็บค่าผ่าน QTR 8-RC sensor array และนำมาแสดงผลผ่าน Serial Port และนำค่ามาวิเคราะห์เส้นทาง ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6 ซึ่งจะเห็นว่าค่าตำแหน่งของ QTR 8-RC sensor array นั้นจะอยู่ประมาณแถบกลาง และมีบางครั้งที่เบนออกทางด้านซ้ายและขวา



รูปที่ 6 ผลการทดสอบการวิ่งตามแถบเส้นดำ

### 4.3 ผลการทดสอบด้านพลังงาน

การทดลองนี้เป็นการทดลองด้านพลังงานไฟฟ้าที่รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติใช้ เมื่อบรรทุกสิ่งของหนัก 0 กิโลกรัม, 40 กิโลกรัม, และ 80 กิโลกรัม ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 เปรียบเทียบพลังงานไฟฟ้าที่ AGV ใช้บรรทุกที่น้ำหนักต่างๆ

จากรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยที่รถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติใช้ที่บรรทุกของ 80 กิโลกรัม เท่ากับ 77.07 W ซึ่งเมื่อใช้แบตเตอรี่ 360 Wh สามารถคิดระยะเวลาการทำงานต่อเนื่องสูงสุดของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติได้ดังนี้

$$\text{ระยะเวลาการทำงานต่อเนื่อง} = 360/77.07 = 4.67 \text{ ชั่วโมง}$$

### 5. สรุปผลการทดลอง

จากการทดสอบและสร้างต้นแบบของรถขนส่งขับเคลื่อนอัตโนมัติ ซึ่งใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ 36 V 10 Ah และนำร่องโดยใช้ QTR 8-RC sensor array ซึ่งติดตั้งที่ระยะ 0.6 cm พบว่ารถสามารถวิ่งอัตโนมัติตามเส้นได้ค่อนข้างตรง และสามารถทำความเร็วสูงสุดได้ 3 km/h โดยสามารถหยุดได้ n station ตามที่โปรแกรมของ CPU ได้กำหนดไว้ และ AGV สามารถบรรทุกสิ่งของที่มีน้ำหนักได้ถึง 80 kg และสามารถทำงานต่อเนื่องได้สูงกว่า 5 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยได้รับการอนุเคราะห์จากหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รศ.ร.อ.ดร.วีระเชษฐ ชันเงิน อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้คำแนะนำเสมอมา

ขอขอบคุณ ที่ภวิทจน์ วรนครสุทธิ และที่ณัฐวรรษ จำปาศรี ที่ได้ให้คำแนะนำในการทำโครงการนี้ตลอดมา

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและขอขอบคุณเพื่อนทุกคนที่ได้ช่วยกันแก้ไขปัญหาและอุปสรรคให้ผ่านไปได้อย่างดีมาตลอด

และสุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ของทางคณะผู้จัดทำที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เลี้ยงดูให้ได้รับความรู้ ความสามารถ ได้ให้คำปรึกษาในการดำเนินชีวิต และได้สมทบทุนในการดำเนินโครงการนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณทุกท่านไว้ ณ ที่นี้ด้วย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] วีระเชษฐ ชันเงิน และ วุฒิพล ธารวีระเศรษฐ์, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, กรุงเทพมหานคร, ห้างหุ้นส่วนจำกัด วิ.เจ. ทรินิตี้, 2555
- [2] รณกฤษณ์ จิตแจ่มใส และคณะ, “ระบบการทำงานของรถในรถไฟฟ้า สะเทินน้ำสะเทินบก”, ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2555
- [3] กฤตภาส สิวสันเทีชะ และคณะ, “การออกแบบและควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าแบบสับชนิดไม่มีแปรงถ่าน”, ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



**นายฤกษ์พัฒน์ อนันต์ถักณ์การ**

เกิดวันที่ 14 พฤศจิกายน 2535

ภูมิลำเนาอยู่จังหวัดสมุทรปราการ

ศึกษาในระดับมัธยมศึกษาโรงเรียนอัสสัมชัญ

สมุทรปราการ, ศึกษาในระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โดยสนใจงานวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง



**นายชอล อายเงิน**

เกิดวันที่ 10 กันยายน 2535

ภูมิลำเนาอยู่จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ศึกษาในระดับมัธยมศึกษาโรงเรียนวัดนวมอนริศ

ศึกษาในระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โดยสนใจงานวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง



**นายคณศ หมั่นเขตรกรณ์**

เกิดวันที่ 2 เมษายน 2536

ภูมิลำเนาอยู่จังหวัดกรุงเทพมหานคร

ศึกษาในระดับมัธยมศึกษาโรงเรียนเศรษฐบุตร

บันเพ็ญ, ศึกษาในระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โดยสนใจงานวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน



นายกตพัฒน์ อนันต์ลักษณการ  
เกิดวันที่ 14 พฤศจิกายน 2535  
ภูมิลำเนาอยู่จังหวัดสมุทรปราการ  
ศึกษาในระดับมัธยมศึกษาโรงเรียนอัสสัมชัญสมุทรปราการ  
ศึกษาในระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
โดยสนใจงานวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง



นายชชล ลายเงิน  
เกิดวันที่ 10 กันยายน 2535  
ภูมิลำเนาอยู่จังหวัดกรุงเทพมหานคร  
ศึกษาในระดับมัธยมศึกษาโรงเรียนวัดนวลนรดิศ  
ศึกษาในระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
โดยสนใจงานวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง



นายคณศ หมันเขตรกรณ์  
เกิดวันที่ 2 เมษายน 2536  
ภูมิลำเนาอยู่ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร  
ศึกษาในระดับมัธยมศึกษาโรงเรียนเศรษฐบุตรบำเพ็ญ  
ศึกษาในระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
โดยสนใจงานวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง