

ต้นแบบบรรดรางไฟฟ้าแม่เหล็ก
MAGNETIC LEVITATION RAIL PROTOTYPE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคำหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

ต้นแบบบรรดรางไฟฟ้าแม่เหล็ก
MAGNETIC LEVITATION RAIL PROTOTYPE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MAGNETIC LEVITATION RAIL PROTOTYPE



THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN CONTROL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ต้นแบบบรรรางไฟฟ้าแม่เหล็ก
 MAGNETIC LEVITATION RAIL PROTOTYPE

ผู้จัดทำ	นายกฤษตัญญ์	ประภานุกิต	53010071
	นายदनัย	พลชลี	53010532
	นายพงศกร	ริยะภาค	53011021
	นายพิพัฒน์	กล่อมมานพ	53011132




..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.ถาวร เบญจนาสุทธิ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้นแบบบรรดารางไฟฟ้าแม่เหล็ก

โดย

นายกฤษตณัย	ประภานุกิต	53010071
นายคณัย	พลชลี	53010532
นายพงศกร	ริยะภาค	53011021
นายพิพัฒน์	กล่อมมานพ	53011132

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.ถาวร เบญจนราสุทธิ์

ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการค้นคว้าและการออกแบบต้นแบบบรรดารางไฟฟ้าแม่เหล็ก โดยโครงสร้างประกอบด้วยรถและรางไฟฟ้าแม่เหล็ก บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้อง จุดมุ่งหมายของโครงการนี้คือสามารถควบคุมบรรดารางแม่เหล็กไฟฟ้าให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้

ขั้นตอนดำเนินการ เริ่มจากการศึกษาหาทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงการ ออกแบบโครงสร้างของรถและราง และออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่จำเป็นสำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ ซึ่งวงจรอิเล็กทรอนิกส์ประกอบไปด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรขับกระแสให้ขดลวด และวงจรรับค่าจากเซนเซอร์ จากนั้นได้ออกแบบโปรแกรมภาษาซี เพื่อใช้ในการวัดตำแหน่งและระยะการลยตัวของรถผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ที่อยู่บนรถแล้วส่งค่าที่วัดได้ไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์หลักผ่านโมดูลรับส่งสัญญาณแบบไร้สาย จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์หลักจะประมวลผลค่าตัวแปรต่าง ๆ เพื่อควบคุมตำแหน่งรถ โดยการควบคุมสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชันซึ่งขับกระแสให้กับขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าในแต่ละตำแหน่ง เมื่อมีระบบการทำงานในการควบคุมการเคลื่อนที่แบบป้อนกลับแล้ว จึงออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอดีเพื่อควบคุมให้รถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ และท้ายที่สุดได้ทำการทดลองการทำงานของระบบควบคุมที่ออกแบบนั้นสามารถควบคุมตำแหน่งของรถได้ตามที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MAGNETIC LEVITATION RAIL PROTOTYPE

By

Mr. Kittanai	Prapanuki	53010071
Mr. Danai	Ponchalee	53010532
Mr. Pongsakorn	Riyakart	53011021
Mr. Pipat	Klommanop	53011132

Advisor

Assoc. Prof. Dr. Taworn Benjanarasuth

Academic Year 2013

ABSTRACT

This thesis presents theories and designs of magnetic levitation rail prototype. It mainly consists of a car and a railway with electromagnetic coils. The purpose of this project is to control the position of the car.

The project is conducted in the following steps. First, the structure of the magnetic levitation rail is designed, built and assembled. Second, necessary electronic circuits including peripheral circuits of a microcontroller, coils driver circuit and sensors circuit are studied and implemented. Third, a computer program written in Microsoft Visual C is composed for sensing the position and the levitation height with a microcontroller on the car. These measured values are sent to a main microcontroller by a wireless module. Then, the main microcontroller computes the control signal based on a designed PID control law for driving the car via a control circuit by the Pulse Width Modulation signal. From the experimental results, the magnetic levitation rail prototype works properly and the car can be controlled to the desired position.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ถาวร เบญจนราษฎร์ เป็นอย่างสูง ที่คอยให้คำปรึกษาแนะนำวิธีการแก้ปัญหาต่าง ๆ ในโครงการทั้งทางทฤษฎี และทางปฏิบัติแก่คณะผู้จัดทำมาโดยตลอด ทำให้ผู้จัดทำเข้าใจถึงที่มาของปัญหา และสามารถแก้ไขปัญหามาได้อย่างถูกวิธี รวมทั้งเอื้อเฟื้ออุปกรณ์ที่จำเป็น และความช่วยเหลืออื่น ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อโครงการ

ขอขอบพระคุณ รุ่นพี่สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม ที่ช่วยตอบปัญหา และช่วยแก้ไข ปัญหาในส่วนที่คณะผู้จัดทำยังไม่มี ความเข้าใจเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณสาขาวิชาการวัดและควบคุม ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ และสถานที่ในการทำวิจัยจนผู้จัดทำสามารถทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสิ้น

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ทุกคนที่กำลังใจ สนับสนุนอุปกรณ์ที่ขาดเหลือ กระตุ้นเตือน รวมทั้งคอยถามไถ่ความคืบหน้าของโครงการอยู่เสมอ

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา รวมถึงการสนับสนุนในเรื่องของงบประมาณที่ขาดเหลือ ตลอดจนเป็นแรงบันดาลใจที่ทำให้โครงการนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้

ผู้จัดทำ

นายกฤษตัญญ์

ประธานุกิต

นายदनัย

พลชลี

นายพงศกร

ริยะภาศ

นายพิพัฒน์

กลุ่มมานพ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขั้นตอนการศึกษา	2
1.4 รายละเอียดปริญญานิพนธ์	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน	4
2.1 ทฤษฎีปฏิสัมพันธ์ระหว่างแม่เหล็กถาวร	4
2.1.1 การวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแม่เหล็กถาวร ณ ตำแหน่งมุมของแม่เหล็ก	6
2.1.2 การวิเคราะห์แรงกระทำระหว่างแม่เหล็กถาวร	6
2.2 ทฤษฎีการควบคุมแรงจากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า	8
2.3 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ	11
2.3.1 ตัวบ่งชี้สมรรถนะของระบบ	12
2.3.2 ตัวควบคุมพีไอดี	13
2.4 หลักการทำงานของเซนเซอร์	14
2.4.1 เอนโคเดอร์	14
2.4.2 เซนเซอร์แสงอินฟราเรด	15
2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์	16
2.5.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32f4 DISCOVERY	16
2.5.2 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-ARM STAMP STM32	17
2.6 อุปกรณ์รับส่งสัญญาณแบบไร้สาย	17
บทที่ 3 การออกแบบ	19
3.1 ส่วนการออกแบบโครงสร้าง	19
3.1.1 หลักการออกแบบ	19
3.1.2 โครงสร้างของชิ้นงาน	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2 การออกแบบวงจร	25
3.2.1 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์หลัก	26
3.2.2 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์บนตัวรถ	27
3.2.3 วงจรรับค่าจากเซนเซอร์แสง และเอนโคเดอร์	28
3.2.4 วงจรแปลงแรงดันจากแบตเตอรี่	28
3.2.5 วงจรขับกระแสให้ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า	29
3.2.6 วงจรรีเลย์	30
3.3 การออกแบบโปรแกรม	30
3.3.1 ส่วนการอ่านค่าจากเอนโคเดอร์	31
3.3.2 ส่วนการอ่านค่าจากเซนเซอร์แสงอินฟราเรด	32
3.3.3 ส่วนการรับส่งข้อมูลระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์	33
3.3.4 ส่วนการคำนวณระบบควบคุม	34
3.3.5 ส่วนการควบคุมการทำงานของขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า	36
3.4 ภาพรวมของระบบ	42
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	43
4.1 การทดลองแรงจากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า	43
4.2 การทดลองการป้อนค่าพัลส์วีธีมอดูเลชันเทียบกับกระแสเอาต์พุต	47
4.3 การทดลองการลอยตัวของรถ	48
4.3 การทดลองควบคุมตำแหน่งรถ	49
4.3.1 การทดลองควบคุมตำแหน่งรถโดยเคลื่อนที่จากระยะ 0 – 100 มิลลิเมตร	50
4.3.2 การทดลองควบคุมตำแหน่งรถโดยเคลื่อนที่จากระยะ 0 – 200 มิลลิเมตร	52
4.4 สรุปผลการทดลอง	54
บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ปัญหา	55
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน	55
5.2 ปัญหาและอุปสรรค	55
5.3 แนวทางการพัฒนา	56
เอกสารอ้างอิง	57
ภาคผนวก ก แบบโครงสร้าง	59
ก.1 แบบโครงสร้างของราง	59
ก.2 แบบโครงสร้างของรถ	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ข แผนผังอุปกรณ์และการเชื่อมต่อวงจร	64
ข.1 แผนผังบอร์ดวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์หลัก	64
ข.2 แผนผังบอร์ดวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์บนตัวรถ	65
ข.3 แผนผังบอร์ดวงจรขับกระแสให้ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า	66
ข.4 แผนผังบอร์ดวงจรรีเลย์	68
ภาคผนวก ค เอกสารคู่มืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	69
ค.1 เอกสารคู่มือการใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32f4 DISCOVERY	69
ค.2 เอกสารคู่มือการใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-ARM STAMP STM32	76
ค.3 เอกสารคู่มือการใช้งาน L298	79
ค.4 เอกสารการใช้งาน LM324	82
ค.5 เอกสารคู่มือการใช้งาน LM1117	85
ค.6 เอกสารคู่มือการใช้งาน KIA278R05	88
ค.7 เอกสารคู่มือการใช้งาน KIA278R33	90
ค.8 เอกสารคู่มือการใช้งานรีเลย์ HRS4(H)	92
ค.9 เอกสารคู่มือการใช้งาน TCRT5000	95
ค.10 เอกสารคู่มือการใช้งาน GP2Y0A41SK	99
ภาคผนวก ง โปรแกรมควบคุมรถรางแม่เหล็กไฟฟ้า	104
ง.1 โปรแกรมหลักของระบบควบคุมรถรางไฟฟ้าแม่เหล็ก	104
ง.2 ส่วนหัวโปรแกรมน้อยสำหรับใช้งานโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อก	107
ง.3 โปรแกรมย่อยสำหรับใช้งานโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อก	108
ง.4 ส่วนหัวโปรแกรมน้อยควบคุมการขับกระแสให้ขดลวด	109
ง.5 โปรแกรมย่อยควบคุมการขับกระแสให้ขดลวด	114
ง.6 โปรแกรมย่อยคำนวณการควบคุมขดลวด	118
ง.7 ส่วนหัวโปรแกรมน้อยส่วนจัดการการเข้าถึงข้อมูล	118
ง.8 โปรแกรมย่อยส่วนจัดการการเข้าถึงข้อมูล	119
ง.9 ส่วนหัวโปรแกรมน้อยตัวควบคุมพีไอดี	120
ง.10 โปรแกรมย่อยตัวควบคุมพีไอดี	121
ง.11 ส่วนหัวโปรแกรมน้อยสำหรับใช้งานโมดูลจับเวลา	121
ง.12 โปรแกรมย่อยสำหรับใช้งานโมดูลจับเวลา	122
ง.13 ส่วนหัวโปรแกรมน้อยสำหรับใช้งานโมดูลรับส่งข้อมูลผ่านพอร์ตอนุกรม	124
ง.14 โปรแกรมย่อยสำหรับใช้งานโมดูลรับส่งข้อมูลผ่านพอร์ตอนุกรม	125

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การกำหนดขนาดและค่าพารามิเตอร์ของแม่เหล็ก	4
2.2 นิยามตำแหน่งมุมระหว่างแม่เหล็กที่อยู่นิ่งกับแม่เหล็กที่เคลื่อนที่	6
2.3 องค์ประกอบของแรง	7
2.4 หลักการเกิดสนามแม่เหล็ก	8
2.5 ตัวแปรความสัมพันธ์ระหว่างขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้ากับลูกเหล็ก	9
2.6 การระบุสมรรถนะของระบบต่อสัญญาณชั้นบันไดหนึ่งหน่วย	12
2.7 ระบบควบคุมแบบพีไอดี	13
2.8 โครงสร้างภายในของเอนโคดเดอร์	14
2.9 โครงสร้างและการทำงานของเอนโคดเดอร์	15
2.10 โครงสร้างภายในของเซนเซอร์แสงอินฟราเรด	15
2.11 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32f4 DISCOVERY	16
2.12 โครงสร้างของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-ARM STAMP STM32	17
2.13 อุปกรณ์รับส่งสัญญาณแบบไร้สาย	18
3.1 แรงที่มีผลกระทบต่อรถ	19
3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างแม่เหล็กกับแรง	20
3.3 ต้นแบบของรถและราง	21
3.4 ทิศทางและระยะการเคลื่อนที่ของรถ	22
3.5 โครงสร้างของราง	22
3.6 โครงสร้างของขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าที่พันรอบแกนเหล็กรูปตัวอี	23
3.7 โครงสร้างของรถ	24
3.8 แผนภาพการเชื่อมต่อวงจรต่าง ๆ	25
3.9 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์หลัก	26
3.10 วงจรแปลงแรงดันจาก 5 โวลต์ เป็น 3.3 โวลต์	27
3.11 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์บนรถ	27
3.12 วงจรรับค่าเซนเซอร์แสงอินฟราเรดและเอนโคดเดอร์	28
3.13 วงจรแปลงแรงดันจากแบตเตอรี่	29
3.14 วงจรขับกระแสให้ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า	29
3.15 วงจรรีเลย์	30
3.16 แผนภาพการรับส่งข้อมูลของโปรแกรม	31

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17 สัญญาณเอาต์พุตของเอนโคเดอร์	32
3.18 แผนภาพการอ่านค่าจากเซนเซอร์แสงอินฟราเรด	32
3.19 ลำดับการเรียงของข้อมูลที่ใช้ในการรับส่งระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์	33
3.20 แผนภาพระบบควบคุมตำแหน่งรถ	34
3.21 แผนภาพการสร้างตัวแปรควบคุม	34
3.22 แผนภาพส่วนปรับแต่งตัวแปรควบคุมของระบบ	35
3.23 สัญญาณพัลส์วិธมอดูเลชันที่ใช้ในการควบคุมขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า	36
3.24 แผนภาพของส่วนควบคุมการทำงานของขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า	37
3.25 แผนภาพการทำงานของโปรแกรมหลัก	38
3.26 แผนภาพการทำงานของโปรแกรมน้อยรับค่าจากพอร์ตอนุกรม	39
3.27 แผนภาพการทำงานของระบบควบคุมตำแหน่งรถ	40
3.28 แผนภาพการอ่านและส่งค่าตัวแปรของไมโครคอนโทรลเลอร์บนรถ	41
3.29 ภาพรวมของระบบรางไฟฟ้าแม่เหล็ก	42
4.1 การทดลองแรงดูดจากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า	43
4.2 ผลของแรงดูดจากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าโดยพันขดลวด 400 รอบ	44
4.3 ผลของแรงดูดจากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าโดยพันขดลวด 500 รอบ	45
4.4 ผลของแรงดูดจากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าโดยพันขดลวด 600 รอบ	46
4.5 การทดลองวัฏระยะการลอยตัวของรถบนราง	48
4.6 ผลการทดลองวัฏระยะการลอยตัวของรถ	48
4.7 การทดลองควบคุมตำแหน่งรถ	49
4.8 ผลตอบสนองตำแหน่งรถจากตำแหน่ง 0 – 100 มิลลิเมตร	50
4.9 สัญญาณควบคุมจากตำแหน่ง 0 – 100 มิลลิเมตร	50
4.10 ผลตอบสนองการลอยตัวด้านหน้าของรถจากตำแหน่ง 0 – 100 มิลลิเมตร	51
4.11 ผลตอบสนองการลอยตัวด้านหลังของรถจากตำแหน่ง 0 – 100 มิลลิเมตร	51
4.12 ผลตอบสนองตำแหน่งรถจากตำแหน่ง 0 – 200 มิลลิเมตร	52
4.13 สัญญาณควบคุมจากตำแหน่ง 0 – 200 มิลลิเมตร	53
4.14 ผลตอบสนองการลอยตัวด้านหน้าของรถจากตำแหน่ง 0 – 200 มิลลิเมตร	53
4.15 ผลตอบสนองการลอยตัวด้านหลังของรถจากตำแหน่ง 0 – 200 มิลลิเมตร	54

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางขนาดและค่าพารามิเตอร์ของแม่เหล็ก	5
4.1 ผลการทดลองแรงดูดจากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้ขดลวดเบอร์ 33 พัน 400 รอบ	44
4.2 ผลการทดลองแรงดูดจากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้ขดลวดเบอร์ 33 พัน 500 รอบ	45
4.3 ผลการทดลองแรงดูดจากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้ขดลวดเบอร์ 33 พัน 600 รอบ	46
4.4 ผลการทดลองการป้อนค่าพัลส์วิธมอดูเลชันเทียบกับกระแสเอาต์พุต	47



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

รถไฟฟ้ามแม่เหล็ก (Magnetically levitating : Maglev) เป็นระบบการขนส่งรูปแบบหนึ่งที่ขับเคลื่อนยานพาหนะด้วยแรงแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถทำให้รถเคลื่อนที่ไปได้อย่างรวดเร็วและเงียบกว่าระบบขนส่งแบบด้วยล้อ โดยรถไฟฟ้ามแม่เหล็กของญี่ปุ่นทำความเร็วเป็นสถิติโลกอยู่ที่ 581 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งทำลายสถิติโลกที่รถไฟฟ้ามแม่เหล็ก TGV ของฝรั่งเศสลงด้วยความเร็วที่มากกว่ากันอยู่ 6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ประวัติการพัฒนาของรถไฟฟ้ามแม่เหล็กเริ่มต้นในปี 1940 ที่ประเทศอังกฤษ โดยนาย Eric Laithwaite วิศวกรชาวอังกฤษ และศาสตราจารย์ของราชวิทยาลัยลอนดอน (Imperial College London) ได้พัฒนารถไฟฟ้ามแม่เหล็กให้ใช้งานได้จริง โดยรถไฟฟ้ามแม่เหล็กดังกล่าววิ่งบนรางความยาว 1 ไมล์ แต่การวิจัยนี้ถูกยกเลิกในปี 1973 เนื่องจากขาดงบประมาณ และโครงการไม่คุ้มทุนเท่าที่ควร ต่อมาเยอรมนีได้เริ่มต้นคว้าวิจัยเรื่องรถไฟฟ้ามแม่เหล็ก โดยหลังจากผ่านความล้มเหลวมากมาย ในที่สุดเยอรมนี เป็นชาติแรกที่ได้พัฒนาเทคโนโลยีขั้นยอดนี้จนสำเร็จราว ทศวรรษที่ 1980 อย่างไรก็ตามอุปสรรคสำคัญในการนำเอาเทคโนโลยีนี้ไปใช้ในหลายประเทศคือค่าใช้จ่ายที่สูงมาก เนื่องจากตัวนำยิ่งยวด (Super conductor) ที่มีส่วนสำคัญอย่างมากกับเทคโนโลยีนี้มีมูลค่าสูง

ในปัจจุบันนี้ความต้องการใช้ระบบขนส่งทางรางในประเทศไทยมีความต้องการสูงมาก เพราะสามารถช่วยลดปัญหาการจราจรติดขัดได้ ทางกลุ่มโครงการจึงได้ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับระบบขนส่งทางรางแบบต่าง ๆ พบว่าระบบขนส่งทางรางที่ใช้ระบบแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาน้อยกว่าแบบอื่น แต่เนื่องจากต้นทุนในการสร้างรรางไฟฟ้ามแม่เหล็กมีมูลค่าสูงมาก ดังนั้นจึงเป็นการดีหากสามารถพัฒนาและสร้างรถไฟฟ้ามแม่เหล็กขึ้นเองได้ ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการค้นคว้าและจัดทำโครงการขึ้นมาโดยใช้ชื่อว่า “ต้นแบบรรางไฟฟ้ามแม่เหล็ก” หรือ “MAGNETIC LEVITATION RAIL PROTOTYPE”

โครงการนี้ได้ศึกษาและจำลองระบบการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้ามแม่เหล็ก โดยอาศัยหลักการทำงานของขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ทำงานในรูปแบบเดียวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น (Linear induction motor) ในการขับเคลื่อนรถ และอาศัยแรงผลักระหว่างแผ่นแม่เหล็กถาวร (Permanent magnet) ช่วยในเรื่องการรักษาสมดุลของรถ เพื่อความแม่นยำจึงได้ติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับตำแหน่งและวัดระยะการลอยตัวเพื่อให้รถเคลื่อนที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถควบคุมได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 ศึกษาการทำงานของระบบขับเคลื่อนโดยใช้แรงจากสนามแม่เหล็ก ซึ่งใช้รูปแบบการทำงานของมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบเชิงเส้น

1.2.2 ศึกษาและประยุกต์ใช้ระบบควบคุมในการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถรางไฟฟ้าแม่เหล็ก

1.2.3 พัฒนาดันแบบรถรางไฟฟ้าแม่เหล็กเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษา และเป็นแนวทางสำหรับการนำไปสร้างใช้งานจริงในอนาคต

1.2.4 พัฒนาระบบควบคุมซึ่งสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของรถรางไฟฟ้าแม่เหล็กไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.3 ขั้นตอนการศึกษา

1.3.1 ศึกษาการทำงานของรถไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยแรงจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

1.3.2 ศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงงาน

1.3.3 ออกแบบโครงสร้างทางกล และวงจรต่าง ๆ

1.3.4 ทดลองการทำงานของโครงสร้างทางกล และวงจรต่าง ๆ ที่ได้ออกแบบไว้ และหาแนวทางการแก้ไขข้อผิดพลาดต่าง ๆ

1.3.5 ออกแบบตัวควบคุมและพัฒนาโปรแกรมที่ใช้สำหรับควบคุมเพื่อให้รถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.3.6 ทดลองการทำงานของระบบ บันทึกผลการทดลอง และหาแนวทางแก้ไขข้อผิดพลาดต่าง ๆ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาดันแบบรถรางไฟฟ้าแม่เหล็กต่อไปในอนาคต

1.4 รายละเอียดของปริญาานิพนธ์

ปริญาานิพนธ์ฉบับนี้ แบ่งออกเป็น 5 บท ซึ่งครอบคลุมเนื้อหา ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงวัตถุประสงค์ ขั้นตอนการศึกษา และการจัดทำโครงงาน พร้อมด้วยรายละเอียดโดยย่อของปริญาานิพนธ์ในแต่ละบท

บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง ในบทนี้กล่าวถึงทฤษฎีปฏิสัมพันธ์ระหว่างแม่เหล็กถาวร ทฤษฎีการควบคุมแรงที่เกิดจากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า หลักการเคลื่อนที่ของรถ ทฤษฎีระบบควบคุมที่ใช้ในโครงงาน หลักการทำงานของเซนเซอร์ อุปกรณ์รับส่งข้อมูล และไม่โครคอนโทรลเลอร์

บทที่ 3 หลักการออกแบบ ในบทนี้กล่าวถึงการออกแบบโครงสร้างทางกล การออกแบบวงจร การออกแบบโปรแกรม และภาพรวมของระบบรถรางไฟฟ้าแม่เหล็ก

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง ในบทนี้กล่าวถึงการทดลองแรงที่เกิดจากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า การทดลองป้อนค่าพัลส์วิธีมอดูเลชันเทียบกับกระแสเอาต์พุต การทดลองการลอยตัว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของรถ การทดลองควบคุมตำแหน่งรถ และสรุปผลการทดลอง

บทที่ 5 บทสรุปและวิเคราะห์ปัญหา นำเสนอผลการดำเนินงานของโครงการ ปัญหาอุปสรรค และแนวทางการพัฒนาในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

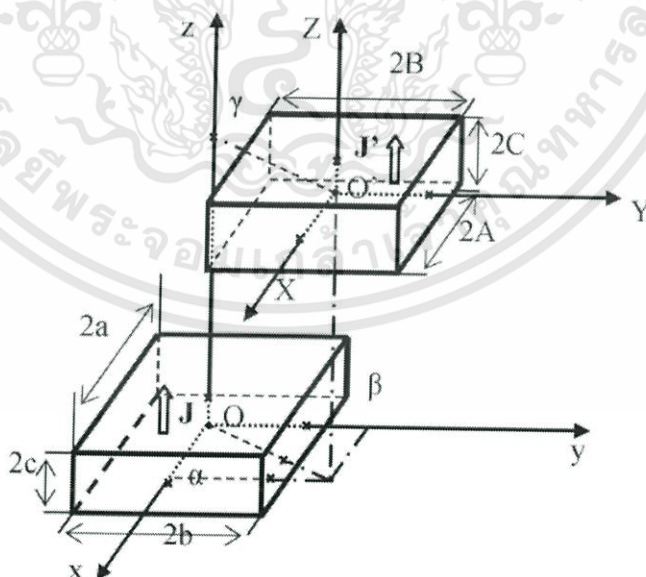
บทที่ 2

ทฤษฎีและความรู้พื้นฐาน

ก่อนจัดทำโครงการ ชั้นแรกในการเริ่มการทำงานคือศึกษาทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องข้องกับโครงการ เพื่อที่สามารถจัดทำโครงการได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นการทำโครงการรณรงไฟฟ้าแม่เหล็ก จึงได้ศึกษาทฤษฎี และความรู้ที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

2.1 ทฤษฎีปฏิสัมพันธ์ระหว่างแม่เหล็กถาวร

พิจารณาปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ระหว่างแม่เหล็กรูปลูกบาศก์ 2 ชั้น [1] ดังรูปที่ 2.1 โดยชั้นที่หนึ่งมีขนาด $2a \times 2b \times 2c$ และชั้นที่สองมีขนาด $2A \times 2B \times 2C$ ซึ่งมีค่าโพลาริเซชันของแม่เหล็กแต่ละชั้นคือ J และ J' ตามลำดับ โดยมีจุดศูนย์กลางของแม่เหล็กชั้นที่หนึ่งอยู่ที่จุด O ซึ่งคือจุดเดียวกับจุดตั้งต้นของแกน O_{xyz} ส่วนจุดศูนย์กลางของแม่เหล็กชั้นที่สองอยู่ที่จุด O' ซึ่งมีระยะพิกัดของจุดศูนย์กลางของจุดนี้ คือ (α, β, γ) โดยสมมติให้ค่าโพลาริเซชันของแม่เหล็ก J และ J' มีค่าคงที่ และสมมติให้ด้าน $2a$ ขนาน $2A$ ด้าน $2b$ ขนาน $2B$ และ ด้าน $2c$ ขนาน $2C$ โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การกำหนดขนาดและค่าพารามิเตอร์ของแม่เหล็ก [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ขนาด ตำแหน่งและพารามิเตอร์ของแม่เหล็ก

แกน	O_x	O_y	O_z
ขนาดของแม่เหล็กชั้นที่หนึ่ง	$2a$	$2a$	$2a$
ค่าพารามิเตอร์ของแม่เหล็กชั้นแรก $[0,1]$	i	k	p
ขนาดของแม่เหล็กชั้นที่สอง	$2A$	$2B$	$2C$
ค่าพารามิเตอร์ของแม่เหล็กชั้นที่สอง	j	l	q
ตำแหน่งศูนย์กลางของแม่เหล็กชั้นที่สอง (O')	α	β	γ

ทิศทางของแม่เหล็กที่แสดงในรูปที่ 2.1 สอดคล้องกับในกรณีเมื่อโพลาริเซชัน J และ J' มีทิศทางเดียวกัน คือขนานไปกับแกน z สังเกตว่า การพิจารณาตามแนวทางต่อไปนี้จะยังคงถูกต้องหากอยู่ในทิศทางที่ตรงข้ามกัน เพียงเปลี่ยนเครื่องหมายให้ตรงข้ามกัน

สมมติว่าแม่เหล็กเป็นแม่เหล็กในอุดมคติ คือวัตถุแข็งเกร็ง มีโพลาริเซชัน J และ J' แผ่กระจายสม่ำเสมอ และมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กสัมพัทธ์เท่ากับ 1 นิยามความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กได้จากกฎของคูโลมบ์ดังสมการที่ (2.1)

$$\sigma = \vec{j} \cdot \vec{n} \quad (2.1)$$

จากรูปที่ 2.1 เนื่องจากค่าโพลาริเซชัน J ของแม่เหล็กชั้นที่หนึ่ง มีทิศตั้งฉากกับพื้นผิว $2a \times 2b$ และมีทิศทางพุ่งขึ้นไปขนานไปกับแกน z ทำให้ความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กชั้นที่หนึ่งบริเวณพื้นผิวด้านบนหรือหัวเหนือเท่ากับ $\sigma = +J$ และความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กบนผิวด้านล่างหรือหัวใต้เท่ากับ $\sigma = -J$ ทุก ๆ การคำนวณจะอาศัยตัวแปรกลาง ซึ่งนิยามดังสมการ

$$U_{ij} = \alpha + (-1)^j A - (-1)^i a \quad (2.2x)$$

$$V_{kl} = \beta + (-1)^l B - (-1)^k b \quad (2.2y)$$

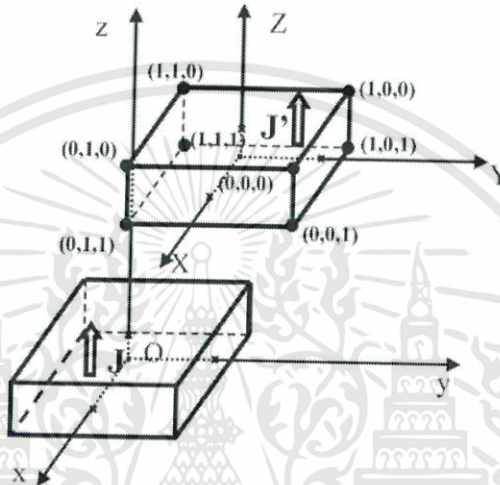
$$W_{pq} = \gamma + (-1)^q C - (-1)^p c \quad (2.2z)$$

$$r = \sqrt{U_{ij}^2 + V_{kl}^2 + W_{pq}^2} \quad (2.2r)$$

จากสมการข้างต้นคือความยาวที่สอดคล้องระยะทางระหว่างมุมของลูกบาศก์ที่มีด้านขอบขนานกัน และแม่เหล็กชั้นที่หนึ่งถูกกำหนดโดยสามค่าพารามิเตอร์ (i, k, p) และแม่เหล็กชั้นที่สอง (j, l, q)

2.1.1 การวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแม่เหล็กถาวร ณ ตำแหน่งมุมของแม่เหล็ก

การวิเคราะห์ที่ผ่านมาพบว่ากรณีที่เป็นแม่เหล็กลูกบาศก์สองชิ้น ซึ่งขนานกันความสัมพันธ์ต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นสนามแม่เหล็กของตัวแม่เหล็ก และปฏิสัมพันธ์ระหว่างแม่เหล็ก ได้แก่ ค่าพลังงานแรงกระทำระหว่างแม่เหล็ก แรงบิด และอื่น ๆ สามารถคำนวณได้จากตำแหน่งมุมของแม่เหล็ก โดยตำแหน่งมุมนี้ได้นิยามว่า “แมกเนติกโนด” (Magnetic node) เพื่อพิจารณาผลที่เกิดขึ้น จึงศึกษาปฏิสัมพันธ์ระหว่างแม่เหล็กที่ตรึงอยู่กับที่กับแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ ดังรูปที่ 2.2



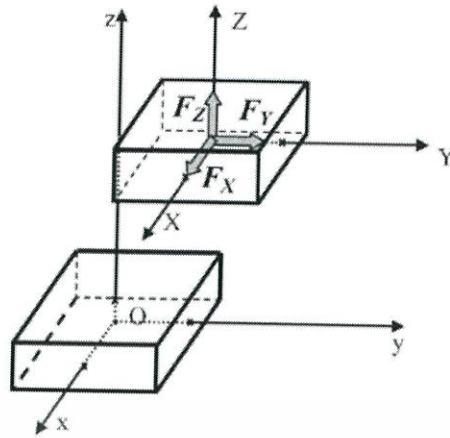
รูปที่ 2.2 นิยามตำแหน่งมุมระหว่างแม่เหล็กที่อยู่นิ่งกับแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ [1]

สำหรับหลักการวิเคราะห์ ณ ตำแหน่งมุมนั้น เมื่อพิจารณาแม่เหล็กชิ้นที่สอง พิกัด $(1,0,0)$ แสดงถึงค่าพารามิเตอร์ $j = 1$, $l = 0$ และ $q = 0$ ซึ่งใช้แสดงถึงจุดอ้างอิง O'_{xyz} โดยกำหนดให้ $X = (-1)^j \cdot A = -A$, $Y = (-1)^l \cdot B = +B$ และ $Z = (-1)^q \cdot C = +C$

จากการวิเคราะห์ ณ ตำแหน่งมุมของแม่เหล็ก เห็นว่าค่าพารามิเตอร์ของแม่เหล็ก i, j, k, l, p, q นั้น มีค่าเท่ากับ 0 หรือ 1 โดยแม่เหล็กชิ้นที่หนึ่งพิจารณาโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ i, k, p และมุมของแม่เหล็กชิ้นที่สองพิจารณาโดยใช้ค่าพารามิเตอร์ j, l, q

2.1.2 การวิเคราะห์แรงกระทำระหว่างแม่เหล็ก

การวิเคราะห์แรงกระทำระหว่างแม่เหล็กนั้น สามารถวิเคราะห์โดยกำหนดให้แม่เหล็กชิ้นหนึ่งที่ติดตรึงอยู่กับที่และมีจุดศูนย์กลางคือ O และแม่เหล็กชิ้นที่สองนั้นถูกกระทำโดยแรง F ซึ่งประกอบไปด้วยแรง F_x , F_y , และ F_z ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบของแรง [1]

จากการวิเคราะห์จะได้ผลรวมของแรง F ดังสมการ (2.3)

$$F = \frac{J \cdot J'}{4\pi\mu_0} \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 \sum_{l=0}^1 \sum_{p=0}^1 \sum_{q=0}^1 (-1)^{i+j+k+l+p+q} \cdot \phi(U_{ij}, V_{kl}, W_{pq}, r) \quad (2.3)$$

สำหรับ F_x

$$\begin{aligned} \phi_x(U, V, W, r) = & \frac{(v^2 - w^2)}{2} \ln(r - U) + UV \ln(r - V) \\ & + VW \cdot \text{tg}^{-1} \left(\frac{UV}{W \cdot r} \right) + \frac{1}{2} U \cdot r \end{aligned} \quad (2.4)$$

สำหรับ F_y

$$\begin{aligned} \phi_y(U, V, W, r) = & \frac{(u^2 - w^2)}{2} \ln(r - V) + UV \ln(r - U) \\ & + UW \cdot \text{tg}^{-1} \left(\frac{UV}{W \cdot r} \right) + \frac{1}{2} V \cdot r \end{aligned} \quad (2.5)$$

สำหรับ F_z

$$\begin{aligned} \phi_z(U, V, W, r) = & -UW \ln(r - U) + VW \ln(r - V) \\ & + UV \cdot \text{tg}^{-1} \left(\frac{UV}{W \cdot r} \right) - W \cdot r \end{aligned} \quad (2.6)$$

แต่ละองค์ประกอบของ ϕ จะประกอบไปด้วยผลรวมของ 64 ค่า ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.2) ผลรวมของแรงนั้นจะสามารถแยกออกเป็นทั้ง 8 มุมของแม่เหล็ก ซึ่งในแต่ละมุมจะถูกกำหนดโดยสามค่าพารามิเตอร์ (j, l, q) ด้วยค่าที่สามารถเป็นไปได้ก็คือ 0 หรือ 1 ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1.1 หลักการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ระหว่างแม่เหล็กถาวร ซึ่งในองค์ประกอบของค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พารามิเตอร์ทั้งสามตัวนี้จะแตกต่างกันไปในแต่ละมุมของแม่เหล็ก ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการ (2.7)

$$F = \sum_{j=0}^1 \sum_{l=0}^1 \sum_{q=0}^1 (-1)^{j+l+q} (F_c(j, l, q)) \quad (2.7)$$

ซึ่งผลรวมของแรงนั้นได้จากการรวมกันของแรงในแต่ละมุม ดังสมการ (2.8)

$$F_c(j, l, q) = \frac{J \cdot J'}{4\pi\mu_0} \left(\sum_{i=0}^1 \sum_{k=0}^1 \sum_{p=0}^1 (-1)^{i+k+p} \cdot \phi(U_{ij}, V_{kl}, W_{pq}, r) \right) \quad (2.8)$$

โดย

F คือ แรงผลักรวมที่เกิดขึ้นระหว่างแม่เหล็กทั้งสอง หน่วย นิวตัน (N)

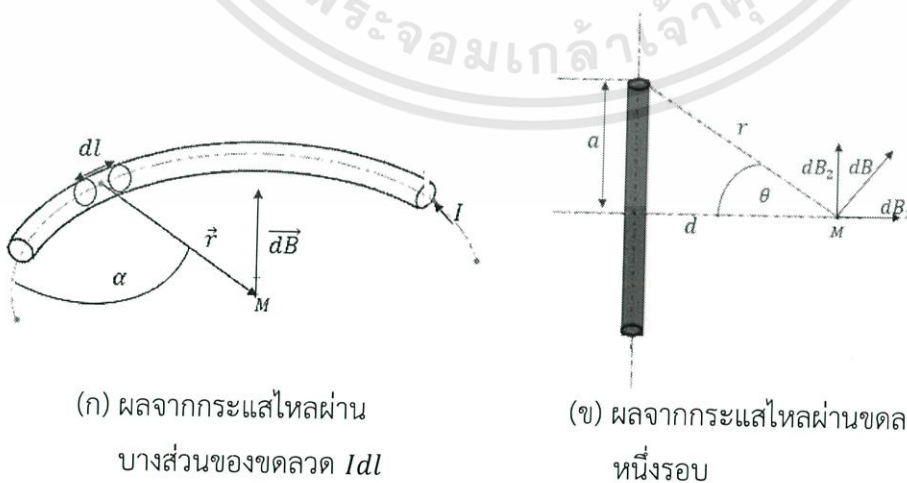
J คือ โพลาริเซชันของแม่เหล็ก หน่วย เทสลา (T)

μ_0 คือ ค่าซึมซาบของสนามแม่เหล็กในสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$

ϕ คือ ฟลักซ์แม่เหล็ก หน่วย เวเบอร์ (Wb)

2.2 ทฤษฎีการควบคุมแรงจากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า

สำหรับทฤษฎีการควบคุมแรงจากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถอาศัยแนวคิดจากการควบคุมแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นระหว่างขดลวด และลูกเหล็ก [2] ซึ่งพิจารณาได้จากสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะห่างระหว่างปลายของขดลวดถึงลูกเหล็กสามารถคำนวณค่าสนามแม่เหล็กได้จากหลักการเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 หลักการเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามแม่เหล็กบางจุดที่กำหนดสามารถคำนวณตามสมการ Biot-Savart-Laplace คือ สนามแม่เหล็กที่เกิดจากขดลวดส่วนเล็ก ๆ dl ดังรูป 2.4 (ก) โดยมีการไหลผ่านของกระแสกำหนดโดยสมการ (2.9)

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \quad (2.9)$$

โดย μ_0 คือ ค่าความซึมซาบของอากาศ และ $d\vec{l} \times \vec{r}$ คือ ผลลัพธ์เวกเตอร์ของเวกเตอร์ $d\vec{l}$ และ \vec{r} ด้วยเหตุนี้ ขนาดของสนามแม่เหล็กจึงมีค่าดังสมการ (2.10)

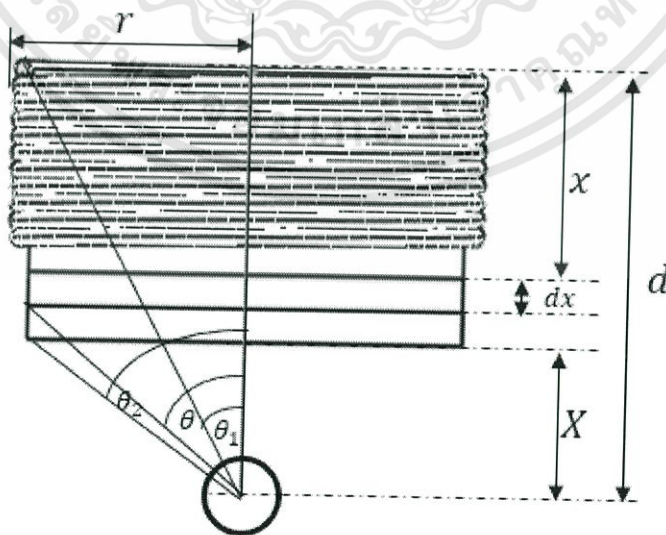
$$dB = \frac{\mu_0 I dl \sin(\alpha)}{4\pi r^2} \quad (2.10)$$

สนามแม่เหล็กของขดลวดในแต่ละรอบที่รัศมีเท่ากับ a ดังรูปที่ 2.4 (ข) มีค่าดังสมการ (2.11)

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{a^2}{(a^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (2.11)$$

จากการพิจารณาความสมมาตรบางส่วนของสนามแม่เหล็กที่ตั้งฉากกับแกนของแม่เหล็กไฟฟ้า dB_2 ต้องมีค่าเป็นศูนย์

เมื่อพิจารณาขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีรัศมี r เมตร ความยาว l เมตร และมีกระแสไหลผ่าน I แอมแปร์ โดยมีลูกเหล็กลอยอยู่ตรงแกนของขดลวดที่มีระยะห่าง X เมตร ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ตัวแปรความสัมพันธ์ระหว่างขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้ากับลูกเหล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการประมาณค่าสนามแม่เหล็ก เนื่องจากมีจำนวนการพันขดลวดรอบแกนเหล็กอยู่หลายรอบ จึงกำหนดให้ n คือ จำนวนการพันของขดลวดต่อเมตร พิจารณาขดลวด ดังรูปที่ 2.5 ซึ่งขดลวดแต่ละรอบมีรูปร่างเป็นวงกลมที่เท่ากัน มีระยะห่างซึ่งกันและกันเท่ากับ dx และมีกระแสไหลผ่านเท่ากับ $nI dx$ ผลรวมของสนามแม่เหล็กจึงมีค่าดังสมการ (2.12)

$$B = \int dB = \frac{\mu_0}{2} nI \int dx \frac{\sin^3 \theta}{r} \quad (2.12)$$

เมื่อปริพันธ์สมการที่ (2.12) โดยมีขอบเขต $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$ ได้

$$B = \frac{\mu_0}{2} nI \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin^3 \theta d\theta = \frac{\mu_0}{2} nI (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \quad (2.13)$$

สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้

$$B = \frac{\mu_0}{2} nI \left(\frac{X+l}{\sqrt{r^2 + (X+l)^2}} - \frac{X}{\sqrt{r^2 + X^2}} \right) \quad (2.14)$$

เนื่องจากแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นจากขดลวดที่พันทับซ้อนกัน โดยรัศมีมีค่าเท่ากับ $r_1 \leq r \leq r_2$ ดังนั้น จากสมการที่ (2.14) จะได้

$$dB = \frac{\mu_0}{2} nI \left(\frac{X+l}{\sqrt{r^2 + (X+l)^2}} - \frac{X}{\sqrt{r^2 + X^2}} \right) ndr \quad (2.15)$$

และผลรวมของสนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากับ

$$B = \frac{\mu_0 n^2 l}{2} \left((X+l) \ln \left| \frac{r_2 + \sqrt{r_2^2 + (X+l)^2}}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + (X+l)^2}} \right| + X \ln \left| \frac{r_1 + \sqrt{r_1^2 + X^2}}{r_2 + \sqrt{r_2^2 + X^2}} \right| \right) \quad (2.16)$$

โดยแรงที่กระทำต่อลูกเหล็กสามารถหาได้จาก

$$F = \frac{B^2}{2\mu_0} S \quad (2.17)$$

เมื่อ S คือ พื้นที่ผิวที่ถูกสนามแม่เหล็กตัดผ่าน ดังนั้นแรงที่กระทำต่อลูกเหล็กในสนามแม่เหล็ก B คือ

$$F = -CI^2 \left((X+l) \ln \left| \frac{r_2 + \sqrt{r_2^2 + (X+l)^2}}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + (X+l)^2}} \right| + X \ln \left| \frac{r_1 + \sqrt{r_1^2 + X^2}}{r_2 + \sqrt{r_2^2 + X^2}} \right| \right)^2 \quad (2.18)$$

เมื่อ

$$C = \frac{\mu_0 n^4}{8} S$$

โดย

s คือ พื้นที่ที่ถูกสนามแม่เหล็กตัดผ่าน หน่วย ตารางเมตร (m^2)

n คือ จำนวนรอบของขดลวด หน่วย รอบ

I คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด หน่วย แอมแปร์ (A)

X คือ ระยะห่างระหว่างปลายขดลวดถึงลูกเหล็ก หน่วย เมตร (m)

r, r_1, r_2 คือ รัศมีของขดลวดโดย $r_1 \leq r \leq r_2$ หน่วย เมตร (m)

l คือ ความยาวของขดลวด หน่วย เมตร (m)

μ_0 คือ ค่าความซึมซาบของสนามแม่เหล็กในสุญญากาศมีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7} H/m$

จากกฎของนิวตัน สามารถพิจารณาแรงกระทำต่อลูกเหล็กได้ ดังสมการ (2.19)

$$m \frac{d^2X}{dt^2} = mg + F(X, I) \quad (2.19)$$

โดย

F คือ แรงที่กระทำต่อลูกเหล็ก หน่วย นิวตัน (N)

m คือ มวลของลูกเหล็ก หน่วย กิโลกรัม (kg)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีค่าเท่ากับ $9.81 m/s^2$

จากสมการ (2.19) หากเป็นการวิเคราะห์แรงที่ไม่ได้กระทำกับลูกเหล็ก สามารถนำสมการดังกล่าวไปประยุกต์ใช้งานการวิเคราะห์แรงกระทำในรูปแบบแบบอื่นได้

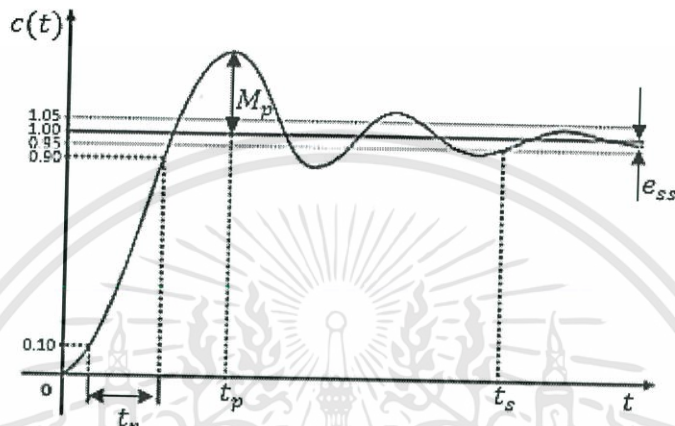
2.3 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control system) [3] เป็นระบบควบคุมที่ใช้ค่าเอาต์พุตที่ได้จากการประมวลผลแล้วทำการป้อนกลับไปเปรียบเทียบกับค่าอินพุตอ้างอิง เพื่อให้ระบบมีสมรรถนะเป็นไปตามความต้องการ และมีเสถียรภาพ โดยสามารถวิเคราะห์ได้จากผลตอบสนองของระบบว่าดีหรือไม่ ซึ่งสามารถทราบได้จากตัวบ่งชี้สมรรถนะของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1 ตัวบ่งชี้สมรรถนะของระบบ

การระบุสมรรถนะ (Performance) [4] ของระบบนั้นนิยมพิจารณาจากผลตอบสนองต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย (Unit step response) โดยทำการป้อนสัญญาณดังกล่าวเป็นอินพุตให้กับระบบที่ต้องการวิเคราะห์ จากนั้นตรวจสอบสัญญาณเอาต์พุตหรือผลตอบสนองที่ได้ โดยวิเคราะห์จากตัวบ่งชี้สมรรถนะต่าง ๆ ของระบบ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การระบุสมรรถนะของระบบต่อสัญญาณขั้นบันไดหนึ่งหน่วย [3]

จากรูปที่ 2.6 สามารถวิเคราะห์สมรรถนะของระบบโดยอาศัยตัวบ่งชี้สมรรถนะที่นิยมพิจารณา ดังนี้

ผลตอบสนองในสภาวะอยู่ตัว (Steady state response) นิยมพิจารณาค่าความผิดพลาดในสภาวะอยู่ตัว (steady-state error) หรือ e_{ss} คือผลต่างระหว่างสัญญาณอินพุตอ้างอิง กับสัญญาณเอาต์พุตเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว

ผลตอบสนองในสภาวะชั่วคราว (Transient response) นิยมพิจารณาตัวบ่งชี้สมรรถนะ ดังนี้

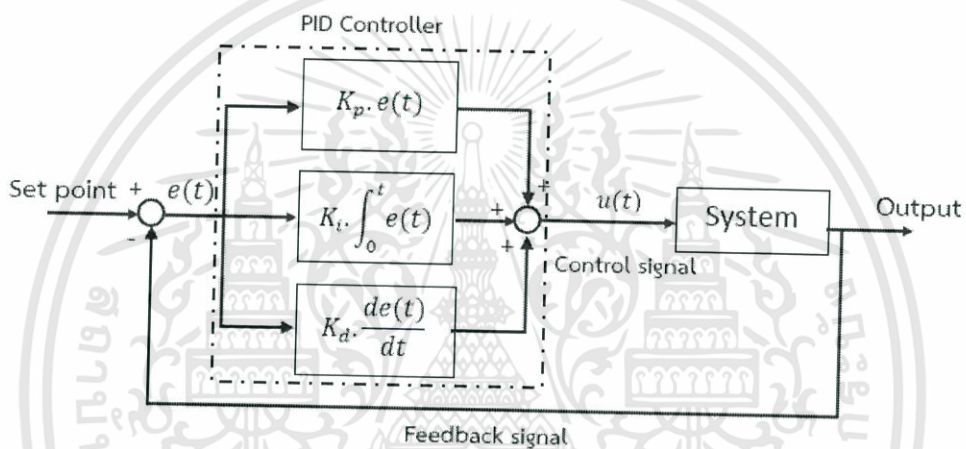
- ช่วงเวลาขึ้น (Rise time) หรือ t_r คือช่วงเวลาตั้งแต่เอาต์พุตมีค่าเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ จนถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ของค่าเอาต์พุตในสภาวะอยู่ตัว
- ค่าพุ่งเกินสูงสุด (Maximum overshoot) หรือ M_p คือค่าความผิดพลาดที่มากที่สุดระหว่างสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต ค่านี้ใช้ในการประมาณความเสถียรของระบบ ซึ่งค่าพุ่งเกินสูงสุดวัดเป็นสัดส่วนเทียบกับค่าสุดท้าย
- เวลาพุ่งเกินสูงสุด (Peak time) หรือ t_p คือเวลาที่ผลตอบสนองใช้จากระดับเริ่มต้นจนถึงจุดซึ่งเกิดค่าพุ่งเกินสูงสุด
- ช่วงเวลาเข้าที่ (Settling time) หรือ t_s คือช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งการแกว่งของเอาต์พุตลดลงอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ว่าเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว โดยปกติแล้วขอบเขตนี้จะอยู่ในช่วงไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ของเอาต์พุตในสภาวะอยู่ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 ตัวควบคุมแบบพีไอดี

จากเป้าหมายที่ต้องการทำให้ระบบมีสมรรถนะเป็นไปตามตัวบ่งชี้สมรรถนะที่ต้องการ และมีเสถียรภาพ ดังนั้นจำเป็นต้องมีตัวควบคุมเพื่อช่วยในการควบคุมระบบ ซึ่งในโครงการนี้ได้เลือกใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี

ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID controller) [3] เป็นตัวควบคุมที่ใช้ในระบบป้อนกลับซึ่งใช้กันอย่างกว้างขวาง อธิบายแนวคิดอย่างง่ายได้ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งอินพุตของตัวควบคุม คือค่าความผิดพลาด $e(t)$ ที่ได้มาจากความต่างค่าเป้าหมาย (Set point) กับเอาต์พุตของกระบวนการ และเอาต์พุตของตัวควบคุมคือสัญญาณควบคุม (Control signal)



รูปที่ 2.7 ระบบควบคุมแบบพีไอดี

จากรูปที่ 2.7 เห็นว่าตัวควบคุมแบบพีไอดีนั้น ประกอบไปด้วยการควบคุม 3 ส่วน ได้แก่ การควบคุมแบบสัดส่วน การควบคุมแบบปริพันธ์ และการควบคุมแบบอนุพันธ์ โดยมีสัญญาณควบคุม $u(t)$ ดังสมการที่ (2.20)

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.20)$$

โดย

K_p คือ อัตราขยายเชิงสัดส่วน (Proportional gain)

K_i คือ อัตราการขยายเชิงปริพันธ์ (Integral gain)

K_d คือ อัตราขยายเชิงอนุพันธ์ (Derivative gain)

T_i คือ ค่าเวลาปริพันธ์ (Integral time)

T_d คือ ค่าเวลาอนุพันธ์ (Derivative time)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม สามารถใช้หลักการดังนี้

การควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional control action หรือ P action) เป็นการกำหนดให้เอาต์พุตของตัวควบคุม เป็นสัดส่วนกับค่าความผิดพลาด โดยปรับค่าอัตราขยายสัดส่วนที่คูณอยู่กับค่าความผิดพลาดที่ได้จากการนำเอาค่าเป้าหมายลบด้วยค่าที่วัดได้ ซึ่งในทางปฏิบัติการควบคุมแบบสัดส่วนจะเข้าใกล้ค่าหนึ่งที่ไม่ใช่ค่าเป้าหมายจริง ซึ่งค่าความผิดพลาดจากค่าเป้าหมายนิยมเรียกว่า ค่าออฟเซต (Offset)

การควบคุมแบบปริพันธ์ (Integral control action หรือ I action) ใช้ในการแก้ปัญหาออฟเซตของระบบ โดยการควบคุมแบบปริพันธ์จะเข้าไปช่วยกำจัดค่าออฟเซตที่ยังมีอยู่ ให้เอาต์พุตของระบบเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้ โดยค่าเอาต์พุตที่ออกมาจะขึ้นอยู่กับค่าเวลาปริพันธ์ ที่กำหนดขึ้นมาตั้งแต่ต้น หากกำหนดให้ค่าเวลาปริพันธ์น้อย เอาต์พุตของระบบจะเข้าสู่เป้าหมายได้อย่างรวดเร็วแต่จะเกิดการกระเพื่อม (Hunting) ของสัญญาณมาก และหากกำหนดให้ค่าปริพันธ์มากจะเกิดการกระเพื่อมของสัญญาณน้อย แต่ใช้เวลานานกว่าที่เอาต์พุตของระบบจะเข้าสู่ค่าเป้าหมาย

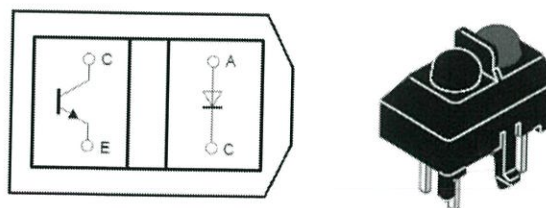
การควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative control action หรือ D action) ในกรณีที่มีการรบกวนจากระบบภายนอก (Disturbance) เป็นผลให้การประมวลผลของระบบมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดควรใช้การควบคุมแบบอนุพันธ์ ซึ่งจะมีการตอบสนองที่รวดเร็ว เป็นผลให้เอาต์พุตของระบบเข้าสู่ค่าเป้าหมายได้รวดเร็วขึ้น

2.4 หลักการทำงานของเซนเซอร์

ในโครงงานนี้จำเป็นต้องมีการทราบตำแหน่งของตัวรถ และระยะการลอยตัวของรถ ดังนั้นจำเป็นต้องมีเซนเซอร์ที่สามารถตรวจจับระยะทางในการเคลื่อนที่ และวัดระยะการลอยตัวของรถได้ โดยได้ใช้เซนเซอร์ทั้งหมด 2 ชนิด ได้แก่ เอนโคดเดอร์ (Encoder) และเซนเซอร์แสงอินฟราเรด (Infrared sensor) ซึ่งหัวข้อนี้ได้กล่าวถึงหลักการทำงานของเซนเซอร์เหล่านี้

2.4.1 เอนโคดเดอร์

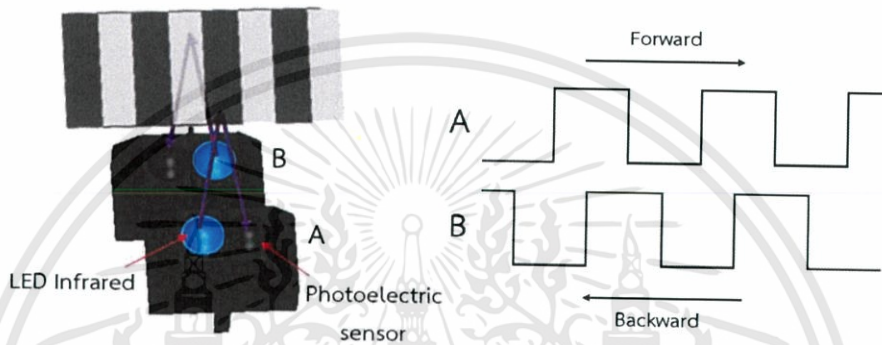
เอนโคดเดอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจจับระยะทางที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลาย เอนโคดเดอร์ที่นำมาใช้ในโครงงานเป็นเอนโคดเดอร์แบบเพิ่มค่า (Incremental encoder) โดยมีลักษณะโครงสร้างภายใน ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างภายในของเอนโคดเดอร์ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

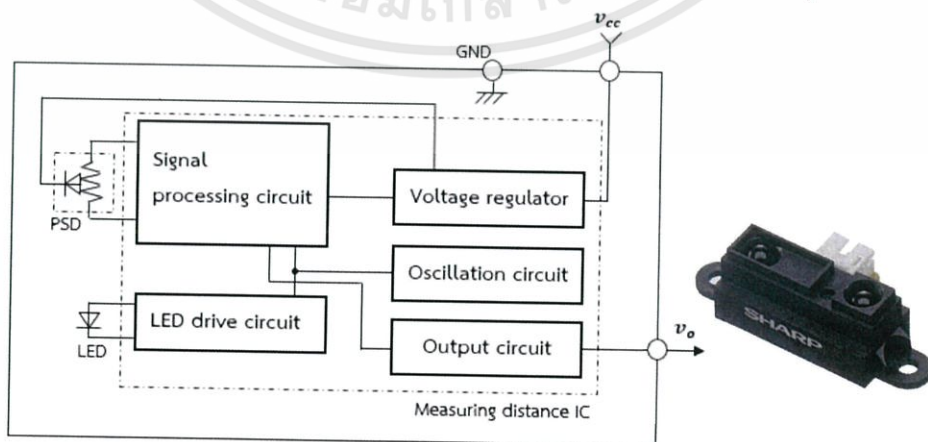
ในโครงงานนี้ได้นำเอนโคดเดอร์มาใช้หาระยะทางในการเคลื่อนที่ และความเร็วเพื่อป้อนค่ากลับให้กับตัวควบคุม โดยเอนโคดเดอร์ให้สัญญาณพัลส์วริมอดูเลชัน (Pulse width modulation : PWM) ออกมาตามค่าระยะทางที่รถเคลื่อนที่ ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาค่าความเร็วได้ สำหรับการหาทิศทางของการเคลื่อนที่ทำได้โดยใช้เอนโคดเดอร์ที่มีสลิตชุดเดียวกัน และมีชุดรับส่งแสงอินฟราเรด 2 ชุด ดังรูปที่ 2.9 ทำให้ได้สัญญาณเอาต์พุตสองชุดที่มีเฟสต่างกัน 90 องศา กำหนดให้เป็นชุด A และชุด B โดยทิศทางการเคลื่อนที่ของรถสามารถหาได้จากการนำหรือตามเฟสของสัญญาณเอาต์พุตทั้งสอง



รูปที่ 2.9 โครงสร้างและการทำงานของเอนโคดเดอร์

2.4.2 เซนเซอร์แสงอินฟราเรด

เซนเซอร์แสงอินฟราเรดเป็นอุปกรณ์หนึ่งที่สามารถนำมาใช้วัดระยะทาง หรือตรวจจับวัตถุ กีดขวางได้ จากความสามารถดังกล่าวจึงได้นำเซนเซอร์แสงอินฟราเรดมาใช้วัดระยะการลอยตัว เนื่องจากเซนเซอร์แสงอินฟราเรดแต่ละประเภทมีคุณสมบัติแตกต่างกันไป เช่น ช่วงระยะการวัดหรือช่วงของระดับแรงดันเอาต์พุต ดังนั้นในโครงงานได้นี้ใช้เซนเซอร์แสงอินฟราเรด GP2Y0A41SK0F เนื่องจากมีคุณสมบัติตามความต้องการ โดยมีโครงสร้างภายในดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 โครงสร้างภายในเซนเซอร์แสงอินฟราเรด [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซนเซอร์แสงอินฟราเรดที่เลือกใช้ในโครงการ ใช้แรงดันอินพุตอยู่ในช่วง 4.5 ถึง 5.5 โวลต์ และให้ค่าแรงดันเอาต์พุตอยู่ในช่วง 0.25 ถึง 0.55 โวลต์ แปลงผกผันไปตามระยะที่ตรวจจับได้ซึ่งระยะที่สามารถตรวจจับได้อย่างมีประสิทธิภาพคือ 4 ถึง 30 เซนติเมตร ซึ่งมีหลักการของวงจรอินฟราเรดคือ ตัวส่งสำหรับใช้กับโมดูลรับสำเร็จรูปจะส่งด้วยความถี่ 40 กิโลเฮิรตซ์

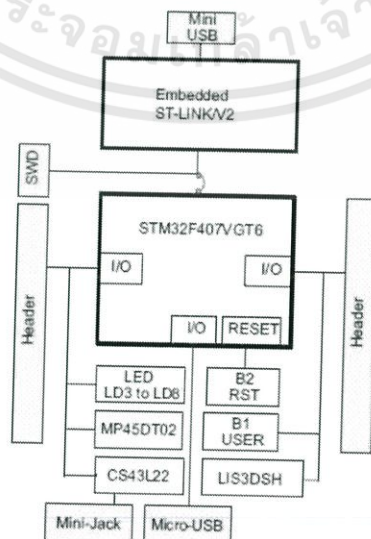
สำหรับโครงการนี้ได้ใช้เซนเซอร์แสงอินฟราเรดตรวจจับระยะอยู่ในช่วง 4 ถึง 6 เซนติเมตร ซึ่งให้ค่าแรงดันเอาต์พุตอยู่ในช่วง 2 – 2.7 โวลต์

2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ในโครงการนี้ได้มีการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ ดังนั้นจำเป็นต้องใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีพอร์ตอินพุตเอาต์พุตเพียงพอต่อการควบคุมการทำงานของขดลวดทั้งหมด 24 ขดลวด และบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีขนาดเล็กสำหรับการโปรแกรมรับส่งค่าตัวแปรที่ได้จากเซนเซอร์ที่ติดอยู่บนรถ โดยในโครงการนี้เลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อยู่จำนวน 2 บอร์ด ประกอบไปด้วยบอร์ดหลักที่ใช้ประมวลผลคือบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32f4 DISCOVERY และบอร์ดที่อยู่บนรถคือบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-ARM STAMP STM32

2.5.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32f4 DISCOVERY

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32f4 DISCOVERY [6] เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับประมวลผลโดยการโปรแกรมภาษาซี ซึ่งในโครงการนี้ได้ใช้ในการประมวลผลค่าตัวแปรที่ได้จากเซนเซอร์เพื่อไปควบคุมการทำงานของขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อที่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของรถได้ โดยมีแผนภาพการเชื่อมต่ออุปกรณ์ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32f4 DISCOVERY [6]

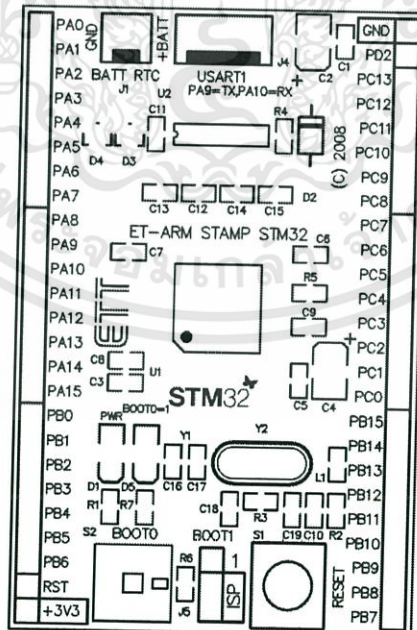
โดยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32f4 DISCOVERY ประกอบไปด้วย 2 ส่วนได้แก่

1. ส่วน ST-LINK/V2 ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ STM32F103 มาเป็นตัวเชื่อมต่อการทำงานกับเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตยูเอสบี (USB PORT) โดยรองรับการตรวจสอบโปรแกรม (IN-CIRCUIT DEBUG) และการโปรแกรมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 ได้ นอกจากนี้ยังมีขั้วต่อ 6 ขา SWD สำหรับต่อออกใช้งานในการตรวจสอบ และการโปรแกรมได้จากนอกระบบ

2. ส่วนบอร์ดใช้งาน STM32F4 ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ STM32F407VGT6 มีหน่วยความจำ 1 เมกะไบต์ และมีหน่วยความจำหลัก 192 กิโลไบต์ ตัวบอร์ดสามารถใช้ไฟบวก 5 โวลต์ จากขั้วต่อทางพอร์ตยูเอสบี หรือจากแหล่งจ่าย 5 โวลต์ ภายนอกได้ และประกอบด้วยส่วนอื่น ๆ ประกอบเซนเซอร์วัดความเร่งสามแกน (3-AXIS ACCELEROMETER) เบอร์ LIS302DL และไมโครโฟน เบอร์ MP45DT02 อยู่บนบอร์ด

2.5.2 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-ARM STAMP STM32

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-ARM STAMP STM32 [7] เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการโปรแกรมภาษาซี โดยในโครงการนี้ได้ใช้สำหรับการโปรแกรมรับส่งค่าตัวแปรจากเซนเซอร์ที่ติดอยู่บนรถ และส่งข้อมูลไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32f4 DISCOVERY ผ่านทางอุปกรณ์รับส่งสัญญาณแบบไร้สาย โดยมีโครงสร้างของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-ARM STAMP STM32 [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น ET-ARM STAMP STM32 มีดังนี้

1. ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ STM32F103RET6 32Bit ARM Cortex-M3 ขนาด 64 ขา
2. ใช้คริสตัล (Crystal) 8.00 เมกะเฮิร์ตซ์ กับตัวสร้างสัญญาณความถี่แบบทวีคูณ (Phase-Locked Loop : PLL) ทำงานความถี่ 72 เมกะเฮิร์ตซ์ มีความเร็วในการประมวลผลเท่ากับ 90 ล้านคำสั่งต่อวินาที (Millions of instructions per second : MIPS)
3. มีวงจรถ่ายสัญญาณนาฬิกาจริง (Real Time Clock : RTC) พร้อม XTAL ค่า 32.768 กิโลเฮิร์ตซ์ และแบตเตอรี่สำรอง
4. รองรับการโปรแกรมแบบ In-System Programming (ISP) และ In-Application Programming (IAP) ผ่านทาง On-Chip Boot-Loader Software ทางพอร์ตอนุกรม (USART)
5. รองรับการสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรมโดยใช้ขั้วต่อแบบ 4 ขา มาตรฐาน ETT
6. มีพอร์ตแอนะล็อกประสงค์ 48 บิต และสามารถต่อกับสัญญาณ 5 โวลต์ ที่ไม่เสถียรได้ (Volt-Tolerant)
7. ใช้กับแหล่งจ่ายไฟขนาด 3.3 โวลต์
8. ขั้วต่อการใช้งานมีระยะห่างของขา 2.54 มิลลิเมตร มีทั้งหมด 50 ขา ด้านละ 25 ขา มีระยะห่างของทั้งสองด้าน 1.5 นิ้ว ง่ายต่อการนำไปต่อประยุกต์ใช้งาน

2.6 อุปกรณ์รับส่งสัญญาณแบบไร้สาย

XBee 2mW U.FL Connection - Series 2 (ZigBee Mesh) เป็นโมดูลรับส่งสัญญาณแบบไร้สาย ย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์ ตามมาตรฐานโปรโตคอล ZigBee/IEEE 802.15.4 โดยใช้พลังงานต่ำ ที่ 3.3 โวลต์ มีกำลังส่งอยู่ที่ 1 – 2 มิลลิวัตต์ โดยรับส่งข้อมูลด้วยอัตราความเร็ว 250 กิโลบิตต่อวินาที มีสัญญาณอินพุตเอาต์พุตเป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 8 บิต และรองรับเครือข่ายแบบรับส่งระยะสั้น มีลักษณะ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 อุปกรณ์รับส่งสัญญาณแบบไร้สาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบ

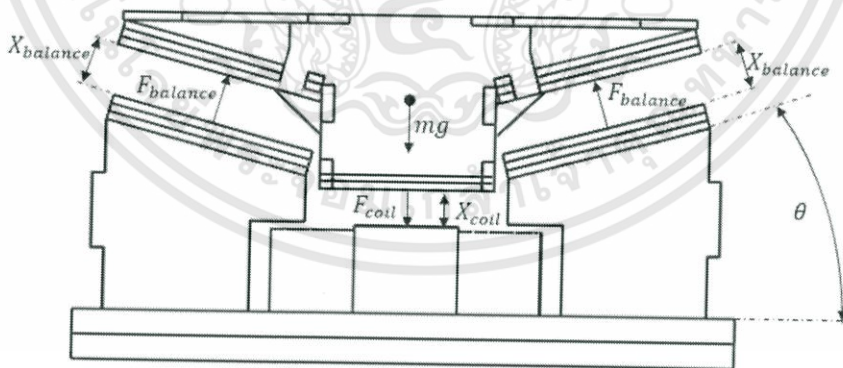
ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบในส่วนต่าง ๆ ของโครงงานรถรางไฟฟ้าแม่เหล็ก ซึ่งประกอบด้วยส่วนการออกแบบโครงสร้าง การออกแบบวงจร และการออกแบบโปรแกรม

3.1 ส่วนการออกแบบโครงสร้าง

การออกแบบโครงสร้างต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ระหว่างรถและราง เพราะการที่ต้องการควบคุมรถให้สามารถเคลื่อนที่อยู่บนรางนั้น โครงสร้างของรถและรางต้องมีความสัมพันธ์กัน โดยหลักการออกแบบ และโครงสร้างของชิ้นงาน อธิบายได้ดังนี้

3.1.1 หลักการออกแบบ

การออกแบบโครงสร้างถือเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญ เนื่องจากต้องมีความแม่นยำ ซึ่งก่อนที่จะมีการออกแบบได้มีการคำนวณหาแรงที่มีผลต่อรถซึ่งประกอบไปด้วยแรงที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นแม่เหล็กถาวร F_{bl} ดังสมการ (2.7) แรงที่เกิดจากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า F_{coil} ดังสมการ (2.18) และแรงที่กระทำต่อรถที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก mg และเพื่อการรักษาความสมดุลของรถ จึงได้ออกแบบให้บริเวณขอบรางเอียงทำมุม θ กับพื้นระนาบ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แรงที่มีผลกระทบท่อรถ

จากรูปที่ 3.1 ความสัมพันธ์ของแรงทั้งสามแรงดังกล่าวข้างต้นสามารถอธิบายได้ดังสมการ

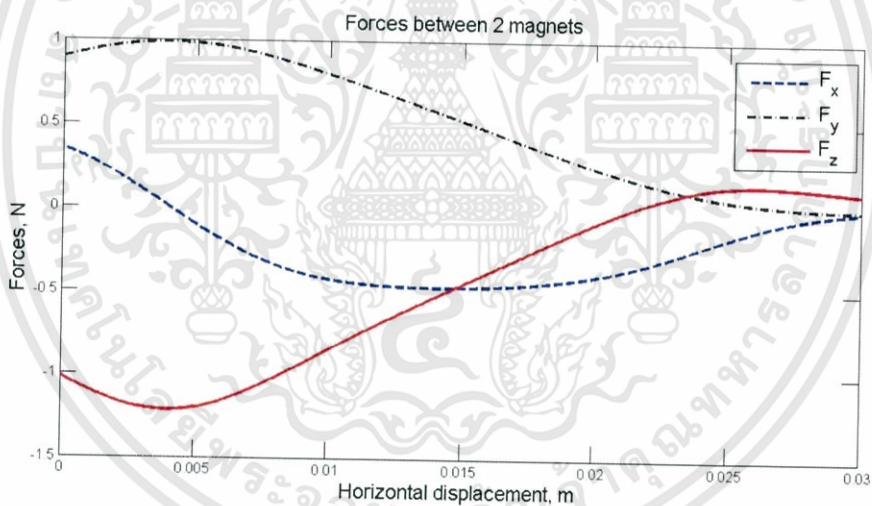
$$F_{coil}(X_{coil}, I, n, r_1, r_2) + mg = NF_{bl}(X_{bl})\cos(\theta) \quad (3.1)$$

เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- X_{coil} คือ ระยะระหว่างปลายขดลวดถึงแผ่นแม่เหล็ก หน่วย เมตร (m)
 X_{bl} คือ ระยะระหว่างแผ่นแม่เหล็กถาวร หน่วย เมตร (m)
 I คือ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า หน่วย แอมแปร์ (A)
 n คือ จำนวนรอบของขดลวด หน่วย รอบ
 r_1, r_2 คือ รัศมีของขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า โดย $r_1 < r_2$ หน่วย เมตร (m)
 N คือ จำนวนแผ่นแม่เหล็กถาวรที่มีปฏิสัมพันธ์กัน หน่วย คู่
 m คือ มวลของรถ หน่วย กิโลกรัม (kg)
 g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีค่าเท่ากับ 9.81 m/s^2

โดยแรงที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นแม่เหล็กถาวร F_{bl} ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างแม่เหล็กทั้งสอง X_{bl} และขนาดของแผ่นแม่เหล็กถาวร โดยโครงงานนี้เลือกใช้แผ่นแม่เหล็กถาวร เกรด N35 ขนาด $10 \times 20 \times 1.75$ มิลลิเมตร โดยสามารถคำนวณหาแรงที่เกิดขึ้นตามระยะห่างที่เปลี่ยนแปลงจากสมการ (2.7) สำหรับแรงระหว่างแม่เหล็ก 1 คู่ ได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างแผ่นแม่เหล็กกับแรง

จากการคำนวณผลของแรงกระทำระหว่างแม่เหล็ก สามารถนำไปเป็นหลักการออกแบบโครงสร้างของรถและราง โดยกำหนดให้รถมีมวลประมาณ 0.4 กิโลกรัม และต้องการให้มีระยะการลอยตัวระหว่างแผ่นแม่เหล็กถาวร ณ ตอนที่ยังไม่ได้ขับกระแสให้ขดลวด ($I = 0$) เท่ากับ 15 มิลลิเมตร โดยกำหนดให้บริเวณขอบรางเอียงทำมุมเท่ากับ 15 องศา กับพื้นระนาบ เนื่องจากมุมนี้มีแรงที่สามารถช่วยในเรื่องความสมดุลบริเวณด้านข้างทั้งสองด้านของรถ และมีแรงที่มีทิศตรงข้ามกับแรงโน้มถ่วงของโลกที่เหมาะสม จากสมการ (3.1) เมื่อแทนค่าตัวแปรที่ได้เลือกไว้ข้างต้น สามารถคำนวณหาจำนวนแผ่นแม่เหล็กถาวรที่ทำให้รถลอยตัวตามระยะที่ต้องการได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

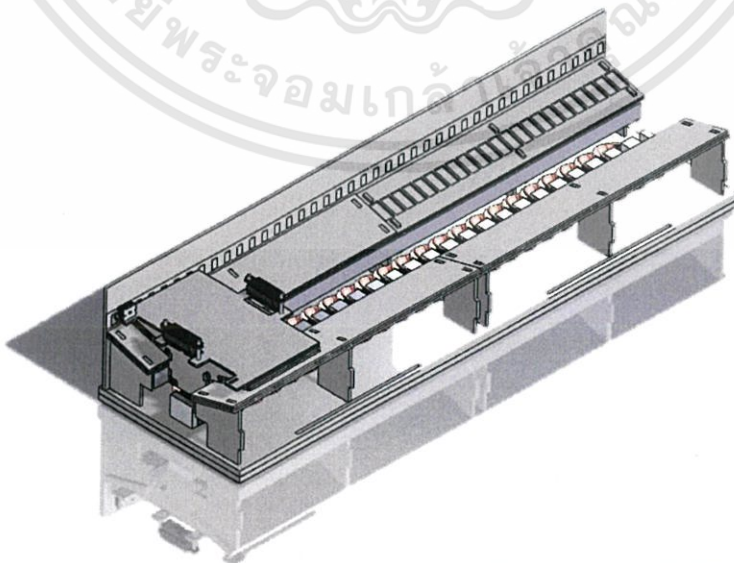
$$N = \frac{mg}{F_{bl}(X_{bl})\cos(\theta)} = \frac{0.4(9.81)}{F_{bl}(0.015)\cos(15^\circ)} = 11.6 \cong 12$$

จากการคำนวณหาจำนวนแผ่นแม่เหล็กถาวรที่สามารถทำให้รถมีระยะการลอยตัวระหว่างแผ่นแม่เหล็กถาวรได้สูงสุด เท่ากับ 15 มิลลิเมตร ซึ่งต้องใช้แรงกระทำระหว่างแผ่นแม่เหล็กจำนวน 12 คู่ ดังนั้นต้องใช้แผ่นแม่เหล็กถาวรจำนวน 12 แผ่น ติดบริเวณด้านข้างของรถ ซึ่งรายละเอียดได้กล่าวในส่วนของโครงสร้างในหัวข้อต่อไป

สำหรับแรงที่เกิดจากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า F_{coil} ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างขดลวดถึงแผ่นแม่เหล็กถาวร X_{coil} กระแสที่ไหลผ่านขดลวด I รัศมีของขดลวด r_1, r_2 และจำนวนรอบในการพันขดลวด n ดังนั้นจึงสามารถควบคุมแรงได้จากกระแสที่ไหลผ่านขดลวด โดยกำหนดขนาด และจำนวนรอบในการพันของขดลวดให้เพียงพอต่อการนำไปใช้งานในโครงงาน และพิจารณาที่ระยะห่างระหว่างขดลวดถึงแผ่นแม่เหล็กถาวรคงที่เท่ากับ 5 มิลลิเมตร ซึ่งรายละเอียดของขดลวดที่ใช้งานได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

3.1.2 โครงสร้างของชิ้นงาน

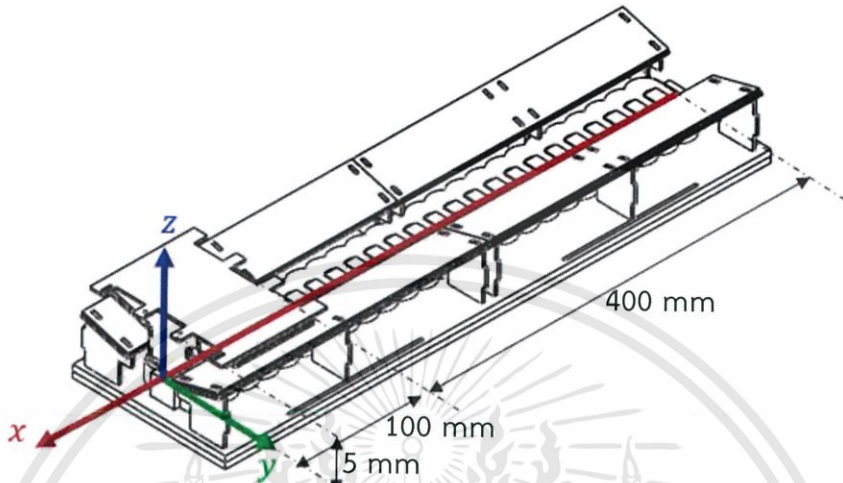
โครงสร้างของชิ้นงานประกอบไปด้วย 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนโครงสร้างของรางกับส่วนโครงสร้างของรถ โดยมีแผ่นแม่เหล็กถาวรติดอยู่บริเวณด้านข้าง และด้านใต้ของตัวรถ ซึ่งแผ่นแม่เหล็กถาวรบริเวณด้านข้างจะช่วยในเรื่องการสมดุลของตัวรถ และแผ่นแม่เหล็กด้านใต้ที่รถใช้สำหรับการขับเคลื่อนของตัวรถโดยอาศัยแรงกระทำที่เกิดจากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าที่วางเรียงตัวกันในรูปแบบเดียวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น ซึ่งอยู่ในส่วนของราง ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ต้นแบบของรถและราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูและบุคลากรทางการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

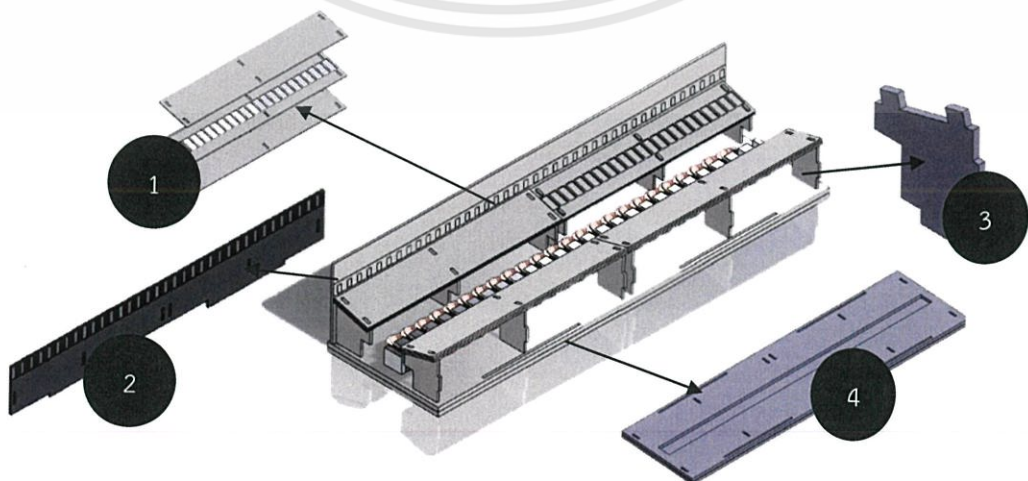
สำหรับการออกแบบโครงสร้างนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อให้รถเคลื่อนที่บนแกน x ในระยะ 0 ถึง 400 มิลลิเมตร และลอยตัวบนแกน z ในระยะความสูงเป้าหมายที่ 5 มิลลิเมตร โดยความยาวของรถ มีขนาด 100 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ทิศทางและระยะการเคลื่อนที่ของรถ

ส่วนโครงสร้างของราง

รูปแบบโครงสร้างส่วนของรางออกแบบโดยอาศัยหลักการของแรงที่เกิดขึ้นระหว่างขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า กับแผ่นแม่เหล็กถาวรในการขับเคลื่อนของตัวรถ โดยขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าจะวางตัวเรียงในรูปแบบเดียวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้น วางอยู่บริเวณตรงกลางของราง ดังรูปที่ 3.5 สำหรับบริเวณด้านข้างของรางได้ยกระดับขึ้นมาเพื่อทำให้งานมีลักษณะเป็นร่องสำหรับให้รถเคลื่อนที่ และมีแผ่นแม่เหล็กติดบริเวณขอบของรางทั้งสองด้าน ซึ่งวางเอียงทำมุม 15 องศา กับแนวระนาบ เพื่อช่วยในการรักษาสมดุลของตัวรถ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการรูปที่ 3.5 โครงสร้างของรางไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประกอบของราง มีดังนี้

- แผ่นอะคริลิกตัวขอบราง ดังรูปที่ 3.5 หมายเลข 1 แผ่นอะคริลิกตัวกลาง หนา 2 มิลลิเมตร เจาะเป็นร่องสำหรับใส่แม่เหล็กถาวรห่างกันเป็นระยะ 2 มิลลิเมตร จำนวน 4 แผ่น และแผ่นอะคริลิกตัวประกบ หนา 3 มิลลิเมตร จำนวน 8 แผ่น
- แผ่นอะคริลิกด้านข้าง ดังรูปที่ 3.5 หมายเลข 2 หนา 3 มิลลิเมตร จำนวน 4 แผ่น ใส่ในร่องด้านข้างของตัวฐาน และติดด้วยสลิตขนาดความกว้างของแต่ละช่องเท่ากับ 4 มิลลิเมตร
- แผ่นอะคริลิกตัวยกระดับของขอบราง ดังรูปที่ 3.5 หมายเลข 3 หนา 3 มิลลิเมตร จำนวน 12 แผ่น ใส่ในร่องตัวฐาน
- แผ่นอะคริลิกตัวฐาน ดังรูปที่ 3.5 หมายเลข 4 หนา 6 มิลลิเมตร จำนวน 2 แผ่น ประกบกกันโดยมีด้านหนึ่งสำหรับเจาะร่องใส่อะคริลิกและแกนเหล็ก
- แกนเหล็กบางรูปตัววี เบอร์ 30 ที่ใช้สำหรับพื้นหม้อแปลง วางเรียงซ้อนกัน หนา 25 มิลลิเมตร สำหรับทำเป็นแกนของขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.6
- ขดลวดเบอร์ 33 พันรอบแกนเหล็กบางรูปตัววี ขนาดรัศมีขดลวดเท่ากับ 25 มิลลิเมตร พัน 600 รอบ จำนวนทั้งหมด 24 ขดลวด วางตัวเรียงทับซ้อนกัน ดังรูปที่ 3.6
- แม่เหล็กถาวร เกรด N35 ขนาด 20x10x1.75 มิลลิเมตร จำนวน 92 ชิ้น

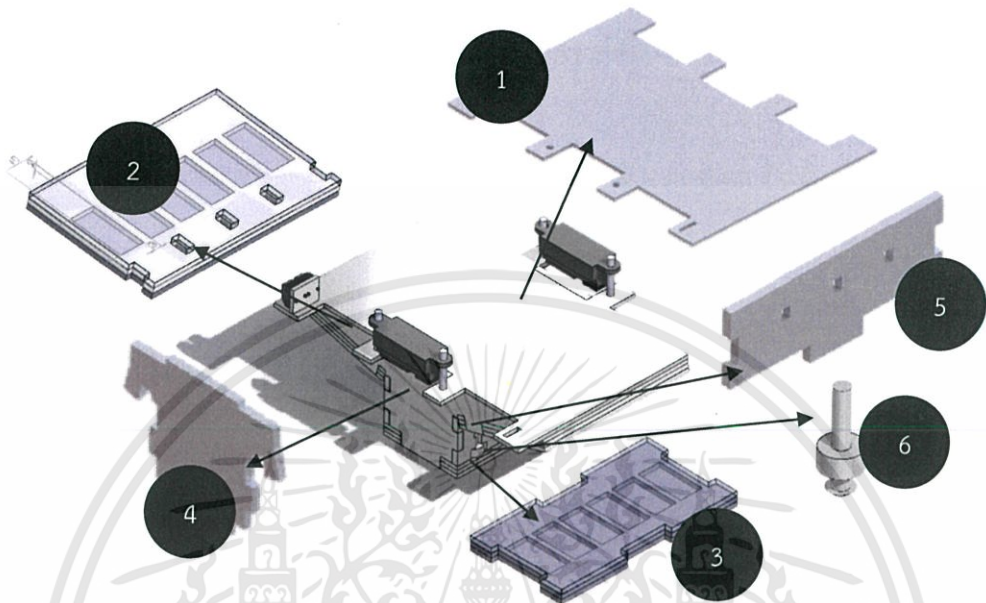


รูปที่ 3.6 โครงสร้างของขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าที่พันรอบแกนเหล็กรูปตัววี

ส่วนโครงสร้างของรถ

โครงสร้างของรถออกแบบโดยให้สัมพันธ์กับส่วนของราง โดยบริเวณด้านข้างของรถทั้งสองด้านได้ติดแผ่นแม่เหล็กไว้ เพื่อให้เกิดความสมดุลที่เกิดจากแรงกระทำระหว่างแม่เหล็กที่ติดอยู่บนตัวรถกับราง และด้านใต้รถได้ติดแผ่นแม่เหล็กถาวรไว้เช่นกัน มีไว้สำหรับการขับเคลื่อนของตัวรถที่เกิดจากแรงกระทำระหว่างแม่เหล็กกับขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่บนราง เนื่องจากไม่ได้ควบคุมความยาวของขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าที่พันรอบแกนเหล็กไว้ ดังนั้นหากมีการนำเอาแม่เหล็กไปใช้

สมดุลด้านข้างของรถจึงได้ติดลูกปืนบริเวณด้านข้างของรถเพื่อช่วยให้รถเคลื่อนที่อยู่ตรงกลางร่องของราง โดยโครงสร้างของรถมีลักษณะ ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 โครงสร้างของรถ

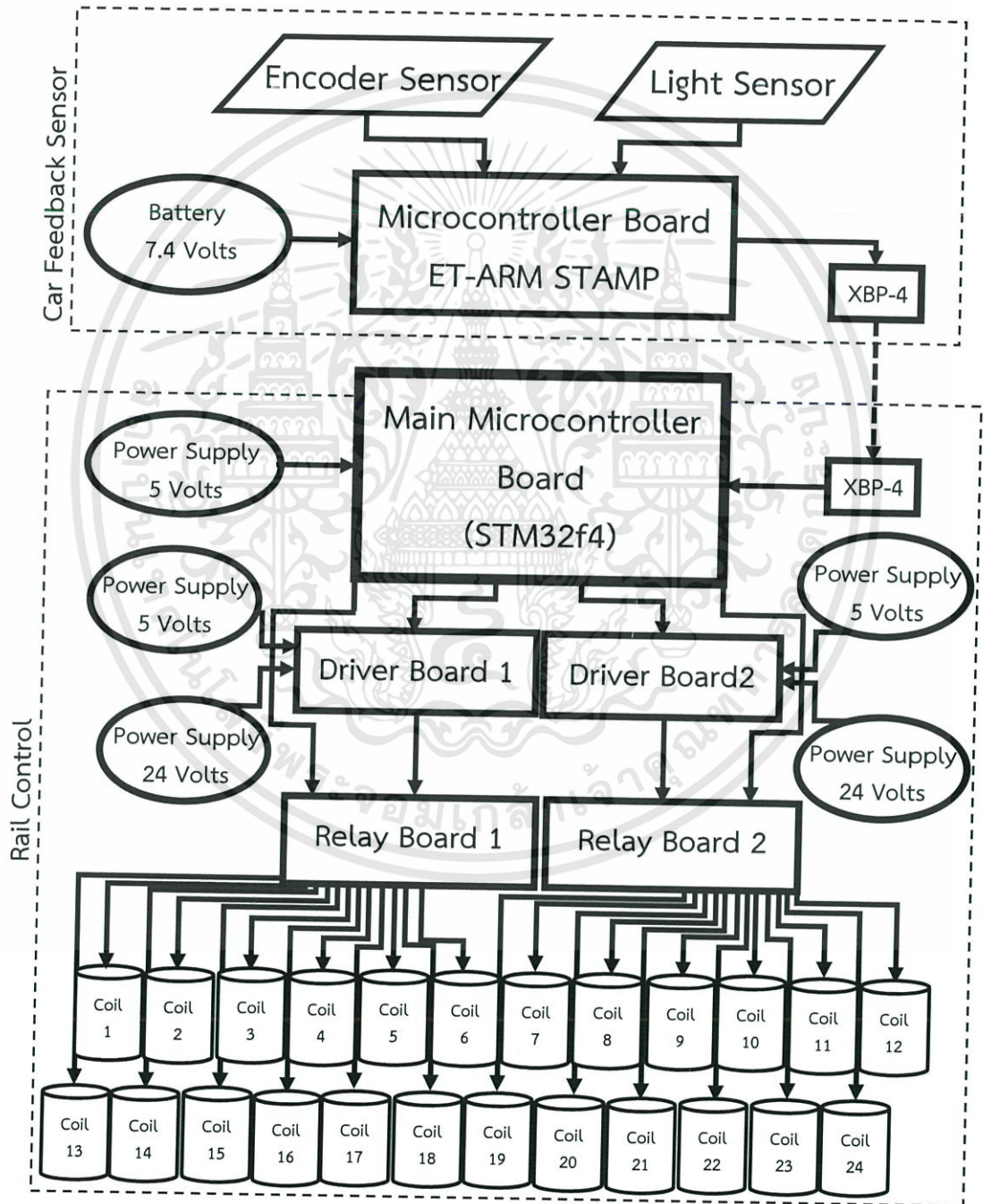
ส่วนประกอบของรถ มีดังนี้

- แผ่นอะคริลิกสำหรับวางบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังรูปที่ 3.7 หมายเลข 1 หนา 2 มิลลิเมตร
- แผ่นอะคริลิกด้านข้างสำหรับใส่ร่องแม่เหล็ก ดังรูปที่ 3.7 หมายเลข 2 หนา 2 มิลลิเมตร เจาะเป็นร่องสำหรับใส่แม่เหล็กถาวรโดยเรียงห่างกันเป็นระยะ 2 มิลลิเมตร จำนวน 2 แผ่น และแผ่นอะคริลิกตัวประกอบด้านข้าง หนา 2 มิลลิเมตร จำนวน 4 แผ่น
- แผ่นอะคริลิกด้านล่างสำหรับใส่ร่องแม่เหล็ก ดังรูปที่ 3.7 หมายเลข 3 หนา 2 มิลลิเมตร เจาะเป็นร่องสำหรับใส่แม่เหล็กถาวรโดยเรียงห่างกันเป็นระยะ 2 มิลลิเมตร และแผ่นอะคริลิกตัวประกอบด้านล่าง หนา 2 มิลลิเมตร จำนวน 2 แผ่น
- แผ่นอะคริลิกตัวประกอบด้านหน้าและด้านหลัง ดังรูปที่ 3.7 หมายเลข 4 หนา 2 มิลลิเมตร
- แผ่นอะคริลิกตัวประกอบด้านข้างสำหรับใส่ลูกปืน ดังรูปที่ 3.7 หมายเลข 5 หนา 2 มิลลิเมตร จำนวน 2 แผ่น
- ลูกปืน รัศมี 3.5 มิลลิเมตร แกนสอดใส่ลูกปืน ขนาด 2 มิลลิเมตร และน็อตตัวเมีย ขนาด 2 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.6 หมายเลข 6 จำนวน 4 ชุด
- แม่เหล็กถาวร เกรด N35 ขนาด 20x10x1.75 มิลลิเมตร จำนวน 18 ชิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบวงจร

ในระบบควบคุมตำแหน่งของรถ ประกอบไปด้วยวงจรต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3.8 ได้แก่ วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรรีเลย์ วงจรขับเคลื่อนแม่เหล็กไฟฟ้า วงจรรับอินพุตจากเอนโคเดอร์ และ เซนเซอร์แสงอินฟราเรด ซึ่งรายละเอียดของวงจรดังกล่าวได้นำเสนอดังนี้

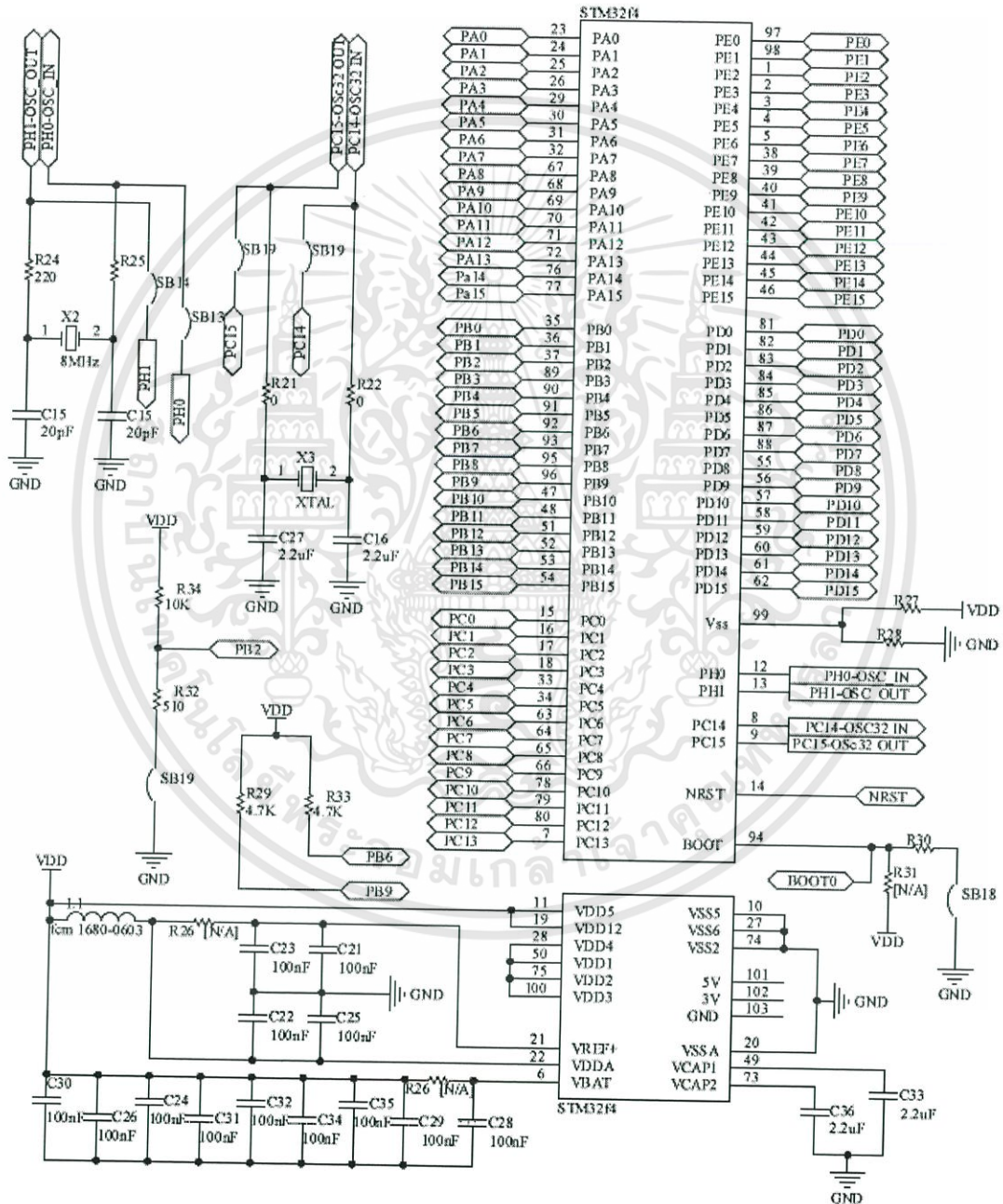


รูปที่ 3.8 แผนภาพการเชื่อมต่อวงจรต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์หลัก

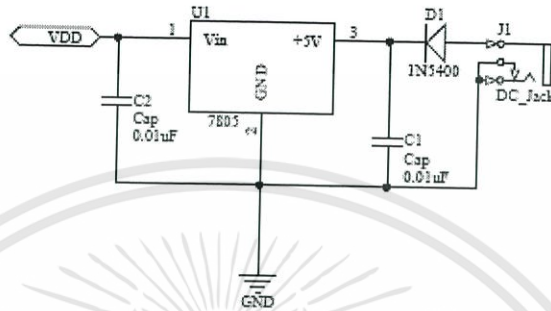
วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์หลักเป็นวงจรที่ออกแบบมาเพื่อรับข้อมูลที่ได้จากวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์บนตัวรถ มาประมวลผลแล้วส่งไปควบคุมการจ่ายกระแสให้ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อควบคุมตำแหน่งของรถ ประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์หลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

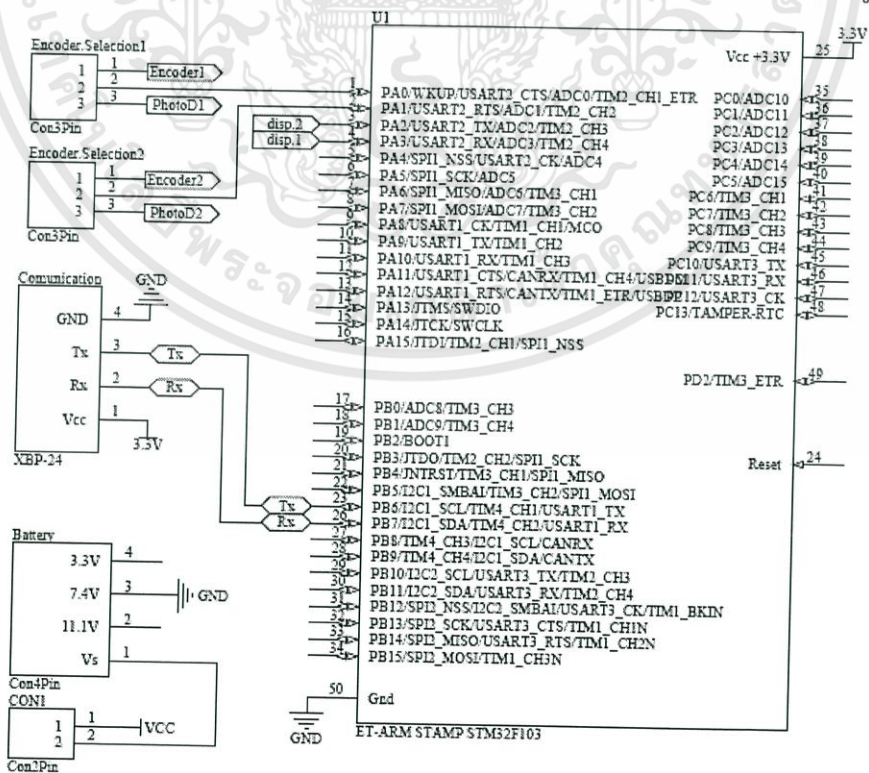
เนื่องจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 ใช้ไฟเลี้ยง 3.3 โวลต์ ดังนั้น จึงต้องมีแหล่งจ่ายแรงดัน 3.3 โวลต์ ที่แปลงแรงดันจาก 5 โวลต์ เป็น 3.3 โวลต์ โดยในโครงการเลือกใช้ไอซีของบริษัท National Semiconductor เบอร์ LM117 ซึ่งเป็นไอซีรักษาระดับแรงดันเอาต์พุต 3.3 โวลต์ มีวงจรดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรแปลงแรงดันจาก 5 โวลต์ เป็น 3.3 โวลต์

3.2.2 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์บนตัวรถ

วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์บนตัวรถเป็นวงจรที่ออกแบบมาเพื่อรับข้อมูลจากเซนเซอร์แล้วส่งผลไปบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์หลักผ่านสัญญาณไร้สายย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์ โดยใช้อุปกรณ์รับสัญญาณแบบไร้สาย X-Bee สำหรับส่งสัญญาณ ประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.11

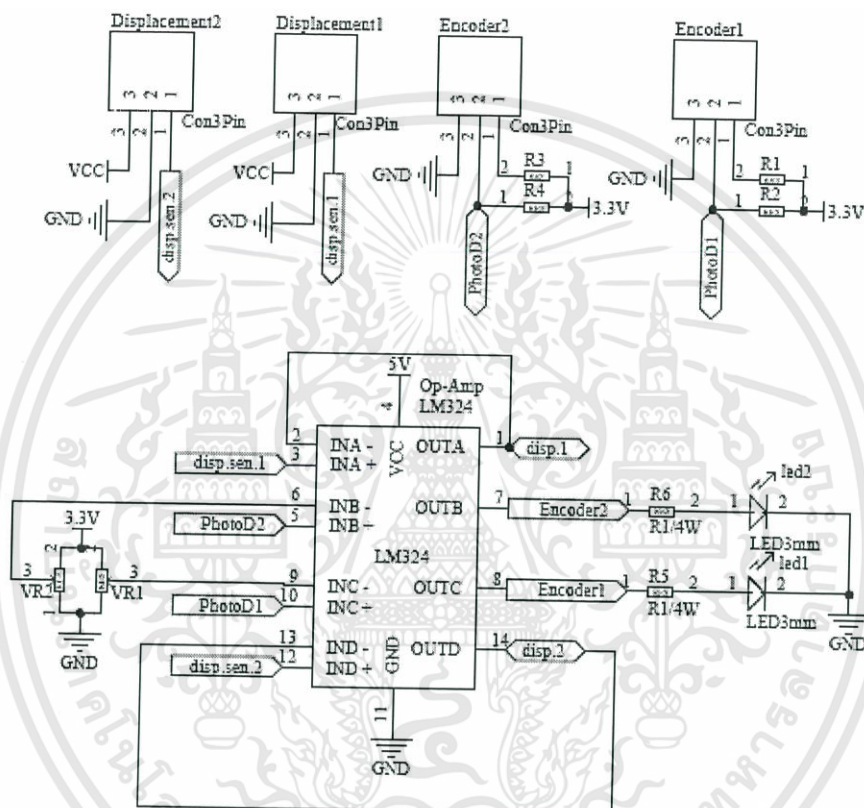


รูปที่ 3.11 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์บนรถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 วงจรรับค่าจากเซนเซอร์แสงอินฟราเรดและเอนโคดเดอร์

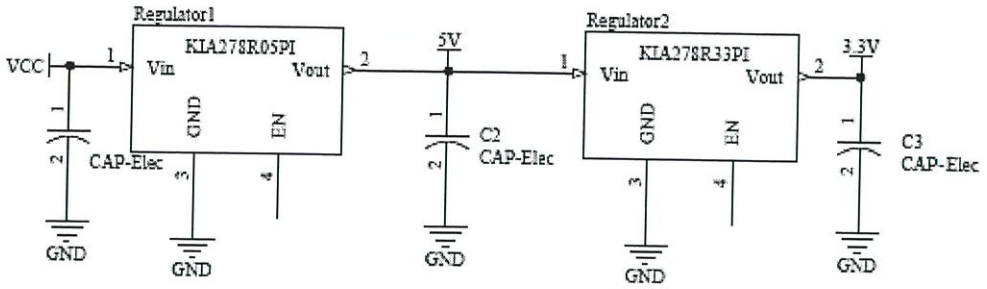
สำหรับเซนเซอร์ที่ใช้ในโครงงานนี้ ใช้เซนเซอร์อยู่ 2 ชนิด คือ เซนเซอร์แสงที่ใช้วัดระยะความสูง และเอนโคดเดอร์ที่ใช้จับตำแหน่งของรถเวลาเคลื่อนที่ ซึ่งได้เลือกใช้เซนเซอร์แสงอินฟราเรดของบริษัทชาร์ป (SHARP) รุ่น GP2Y0A41SK0F และใช้เอนโคดเดอร์ของบริษัท VISHAY รุ่น TCRT5000 มีวงจรใช้งานดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 วงจรรับค่าเซนเซอร์แสงอินฟราเรดและเอนโคดเดอร์

3.2.4 วงจรแปลงแรงดันจากแบตเตอรี่

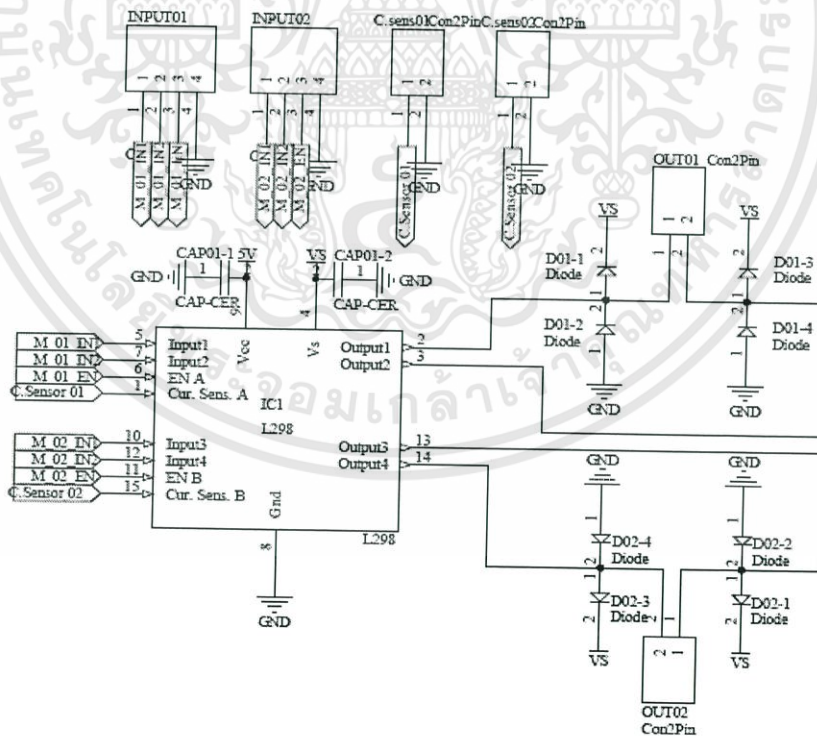
เนื่องจากจากบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์บนรถ และไอซีออปแอมป์ใช้ไฟเลี้ยง 3.3 โวลต์ และ 5 โวลต์ ตามลำดับ ดังนั้นจึงต้องมีวงจรที่แปลงแรงดันจากแบตเตอรี่ 9.4 โวลต์ ที่อยู่บนรถ โดยในโครงงานเลือกใช้ไอซีของบริษัท KEC เบอร์ KIA278R33 และ KIA278R05 ซึ่งเป็นไอซีรักษาระดับแรงดัน ซึ่งมีแรงดันเอาต์พุต 3.3 โวลต์ และ 5 โวลต์ ตามลำดับ ซึ่งมีลักษณะวงจร ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 วงจรแปลงแรงดันจากแบตเตอรี่

3.2.5 วงจรขั้วกระแสให้ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า

ในโครงงานรอร่างไฟฟ้าแม่เหล็กจำเป็นต้องควบคุมการทำงานของขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้กระแสตรง จึงเลือกวงจรขั้วกระแสเป็นไอซีสำเร็จรูป L298 ของบริษัทเอสที (ST) โดยมีวงจร ดังรูปที่ 3.14 ซึ่งสามารถขั้วกระแสให้ขดลวดได้ 2 ขดลวด และจ่ายกระแสได้สูงสุด 2 แอมแปร์ เพียงพอสำหรับการใช้งานในโครงงาน แต่เนื่องจากต้องขั้วกระแสให้ขดลวดทั้งหมด 24 ขดลวด ดังนั้นจึงใช้ วงจรรีเลย์มาช่วยควบคุมการจ่ายกระแสให้ จึงใช้วงจรขั้วกระแสทั้งหมด 6 วงจร

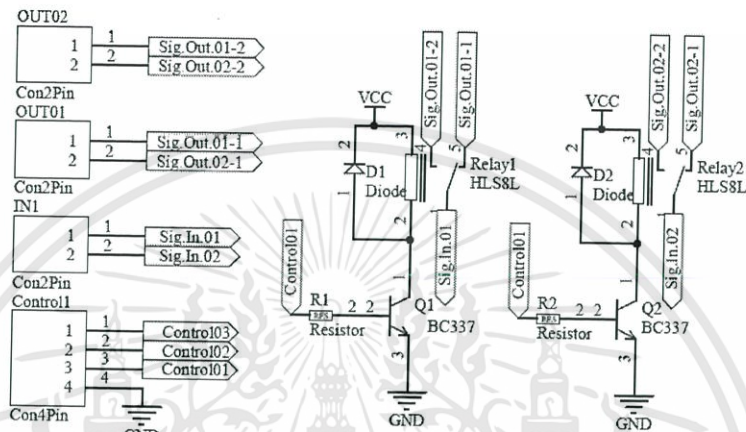


รูปที่ 3.14 วงจรขั้วกระแสให้ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6 วงจรรีเลย์

เนื่องจากโครงการนี้ต้องมีการควบคุมกระแสให้ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นจึงเลือกใช้ วงจรรีเลย์ช่วยในการควบคุมการไหลของกระแส โดยเลือกใช้รีเลย์เบอร์ HRS4H ของบริษัทเอฟเคอี (FKE) ซึ่งในโครงการนี้ใช้ขดลวดทั้งหมดจำนวน 24 ขดลวด ดังนั้นจึงใช้วงจรรีเลย์ทั้งหมด 12 วงจร วงจรละ 2 ตัว ดังรูปที่ 3.15



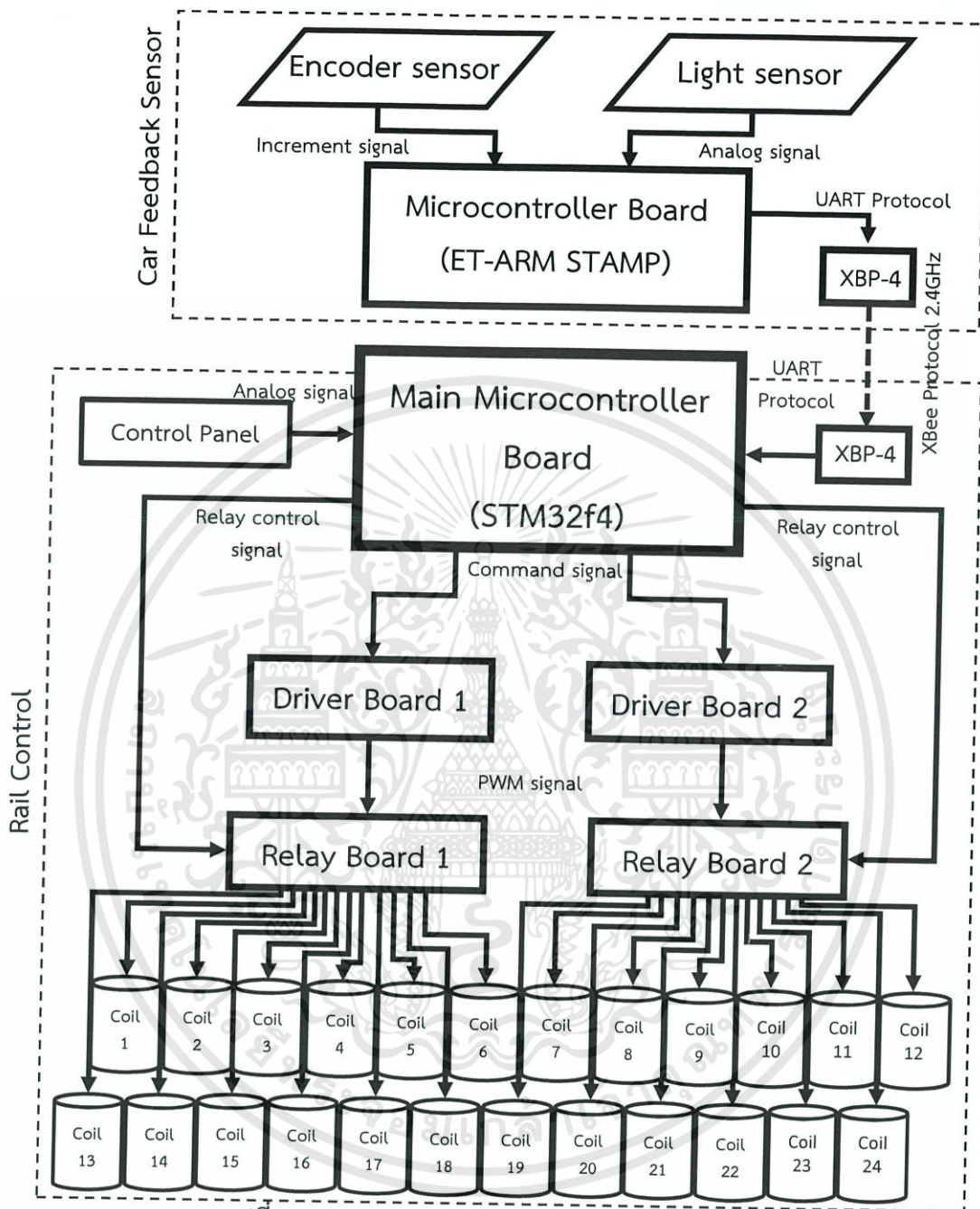
รูปที่ 3.15 วงจรรีเลย์

3.3 การออกแบบโปรแกรม

เนื่องจากโครงการรอร่างไฟฟ้าแม่เหล็ก ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 DISCOVERY และ ET-ARM STAMP STM32F103 เป็นหน่วยประมวลผลหลัก ซึ่งสามารถพัฒนาโปรแกรมด้วย ภาษาซีโดยใช้คอมไพเลอร์ของ GNU ใช้ร่วมโปรแกรม COCOX COIDE ในการออกแบบ โปรแกรม สำหรับการพัฒนาโปรแกรมได้แยกโปรแกรมออกเป็นส่วนต่าง ๆ เพื่อให้ง่ายต่อการพัฒนา โดยมีส่วนต่าง ๆ ดังนี้

- ส่วนการอ่านค่าจากเอนโคเดอร์
- ส่วนการอ่านค่าจากเซนเซอร์แสงอินฟราเรด
- ส่วนการรับส่งข้อมูล
- ส่วนการคำนวณสัญญาณควบคุม
- ส่วนการควบคุมการทำงานขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า

ซึ่งสามารถแสดงการเชื่อมโยงของข้อมูลต่าง ๆ ของระบบได้ ดังรูปที่ 3.16

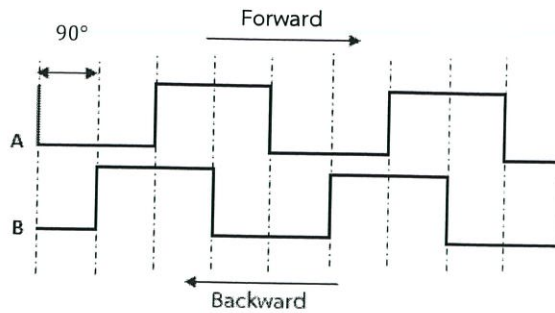


รูปที่ 3.16 แผนภาพการรับส่งข้อมูลของโปรแกรม

3.3.1 ส่วนการอ่านค่าจากเอนโคดเดอร์

เอนโคดเดอร์ที่ใช้โครงการเป็นเอนโคดเดอร์แบบเพิ่มค่า มีเอาต์พุตเป็นสัญญาณพัลส์วริธมอดูเลชันสี่เหลี่ยม 2 เฟสคือ เฟส A และ เฟส B ติดตั้งห่างกัน 4 มิลลิเมตร และให้เฟสต่างกัน 90 องศา โดยเฟส A จะนำเฟส B เมื่อรถเคลื่อนที่ไปข้างหน้า และ เฟส B จะนำเฟส A เมื่อรถเคลื่อนที่ไปข้างหลัง ดังรูปที่ 3.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



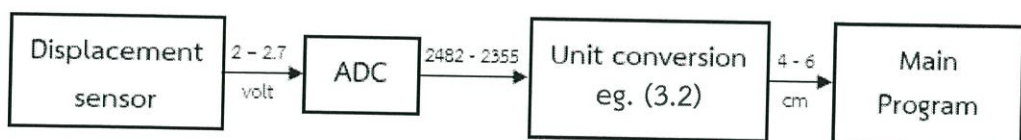
รูปที่ 3.17 สัญญาณเอาต์พุตของเอนโคเดอร์

ในโครงการนี้ใช้หน่วยตรวจจับสัญญาณดิจิทัลของไมโครคอนโทรลเลอร์ในการอ่านค่าของเอนโคเดอร์ โดยต่อเอนโคเดอร์ เฟส A เข้ากับขาของหน่วยตรวจจับสัญญาณดิจิทัล และ เฟส B ต่อกับขาอินพุตดิจิทัลปกติ ด้วยโปรแกรมใช้งานหน่วยตรวจจับสัญญาณดิจิทัลในโหมดอินเตอร์รัพท์ ขอบขาขึ้นของสัญญาณดิจิทัล เมื่อเกิดอินเตอร์รัพท์ขึ้น โปรแกรมจะตรวจสอบอินพุตเฟส B โดยถ้าเท่ากับ 0 แสดงว่า เฟส A นำเฟส B แต่ถ้าอินพุตเฟส B เท่ากับ 1 แสดงว่าเฟส B นำเฟส A และนำค่าพัลส์วิธึมอดุเลขขึ้นเก็บไว้เพื่อนำไปคำนวณระยะทาง

3.3.2 ส่วนการอ่านค่าจากเซนเซอร์แสงอินฟราเรด

การอ่านค่าจากเซนเซอร์แสง สามารถทำได้โดยใช้หน่วยแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลบนไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยรับค่าแรงดันจากเซนเซอร์แสงในช่วง 0 ถึง 3.3 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าอนาล็อก แปลงเป็นค่าดิจิทัล มีค่าอยู่ในช่วงบิตที่ 0 ถึง 4095 จากนั้นจึงนำค่าที่ได้นี้มาคำนวณหาระยะจริงตามสมการ (3.2) ขั้นตอนการอ่านค่าจากเซนเซอร์แสงอินฟราเรด สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.18

$$\text{ระยะจริง} = \frac{10}{\left(\text{ค่าดิจิทัล} \times \frac{3.3}{4096}\right) - 0.42} - 0.42 \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.18 แผนภาพการอ่านค่าจากเซนเซอร์แสงอินฟราเรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับโครงการนี้ได้ใช้เซนเซอร์แสงอินฟราเรดวัดในช่วงระยะ 4 – 6 เซนติเมตร เนื่องจากช่วงระยะนี้เป็นช่วงที่เซนเซอร์แสงอินฟราเรด GP2Y0A41SK0F ที่มีค่าแรงดันสัมพันธ์กับระยะที่ตรวจจับโดยมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น ช่วงระยะดังกล่าวให้ค่าแรงดันอยู่ในช่วง 2 – 2.7 โวลต์ และเปลี่ยนเป็นค่าดิจิทัลอยู่ในช่วงบิตที่ 2482 – 2355 สำหรับนำไปใช้ประมวลผลในโปรแกรม

3.3.3 ส่วนการรับส่งข้อมูลระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์

ในโครงการนี้มีการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์สองตัวในการทำงานจึงมีความจำเป็นที่ต้องออกแบบการรับส่งค่าที่สามารถยืนยันได้ว่าข้อมูลที่ทำการรับส่งนั้นมีความแม่นยำ ซึ่งการรับส่งข้อมูลในโครงการนี้ได้ออกแบบให้มีการเรียงข้อมูลเป็นรูปแบบที่แน่นอนทุกครั้งที่ทำการส่ง ซึ่งมีลำดับการส่งดังรูปที่ 3.19

Header_ LB	Header_ HB	Sensor1_ LB	Sensor1_ HB	Sensor2_ LB	Sensor2_ HB	Encoder_ LB	Encoder_ HB
---------------	---------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

รูปที่ 3.19 ลำดับการเรียงของข้อมูลที่ใช้ในการรับส่งระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์

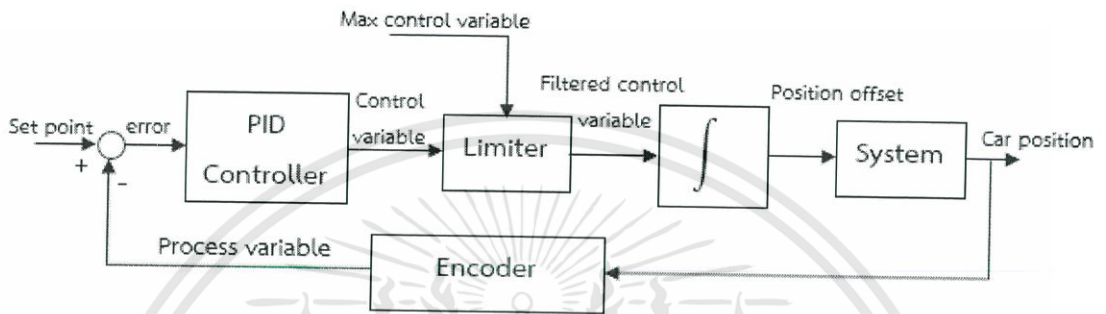
จากรูปที่ 3.19 แต่ละบล็อกการส่งข้อมูลจะบรรจุชุดข้อมูลขนาด 8 บิต เนื่องจากการส่งข้อมูลผ่านพอร์ตอนุกรมสามารถส่งได้เพียงชุดละ 8 บิต แต่ข้อมูลที่ทำการส่งนั้นมีขนาดที่มากกว่าจึงต้องมีการแบ่งข้อมูลออกเป็นส่วน ๆ ยกตัวอย่างเช่น ตัวแปรเซนเซอร์วัดระยะการลอยตัวมีขนาดข้อมูลเท่ากับ 12 บิต จึงต้องทำการแบ่งออกเป็นข้อมูล 8 บิต หรือ 1 ไบต์ จำนวน 2 ชุด คือ ชุดข้อมูลบิตด้านต่ำ (LB) ซึ่งมีค่าในช่วง 0b00000000 ถึง 0b11111111 และชุดข้อมูลบิตด้านสูง (HB) มีค่าในช่วง 0b00000000 ถึง 0b00001111

สำหรับส่วนหัวของชุดข้อมูล (Header) จะเป็นข้อมูลที่หากอุปกรณ์ด้านรับข้อมูลตรวจพบให้ถือเป็นการรับข้อมูล ดังนั้นจึงควรเป็นค่าที่ไม่ซ้ำในชุดข้อมูลที่ส่ง เช่น เซนเซอร์วัดระยะการลอยตัว มีขนาดข้อมูล 12 บิต ซึ่งมีค่าสูงสุดอยู่ที่บิต 4095 (0x0FFF) ค่าส่วนหัวของชุดข้อมูลที่ใช้ควรเป็นค่าตั้งแต่บิต 4096 ขึ้นไป (0x1000 - 0xFFFF)

การรับส่งข้อมูลในโครงการนี้จะมีกระบวนการรับและส่งข้อมูลที่สอดคล้องกัน ซึ่งจะตรวจสอบหาส่วนหัวของชุดข้อมูลทุกครั้ง หากพบก็จะบันทึกข้อมูลถัดไปตามการเรียงของข้อมูลข้างต้น เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนในการอ่านค่าตัวแปรในแต่ละชุด

3.3.4 ส่วนการคำนวณระบบควบคุม

โปรแกรมในส่วนนี้เป็นส่วนของการควบคุมการทำงานของขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนราง เพื่อให้ตำแหน่งการทำงานของขดลวดสอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของรถตามที่ต้องการ จึงได้สร้างระบบการคำนวณค่าตำแหน่งตามระบบควบคุม ดังรูปที่ 3.20

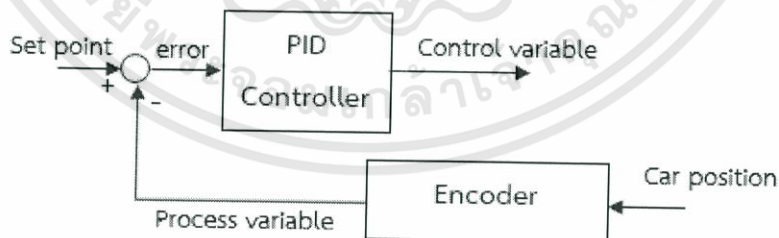


รูปที่ 3.20 แผนภาพระบบควบคุมตำแหน่งรถ

จากรูปที่ 3.20 สามารถอธิบายการทำงานของโปรแกรมออกเป็นส่วน ๆ ได้แก่ ส่วนการสร้างตัวแปรควบคุม ส่วนปรับแต่งตัวควบคุม และส่วนประยุกต์ใช้งานตัวแปรควบคุม

ส่วนการสร้างตัวแปรควบคุม

ส่วนของการสร้างตัวแปรควบคุมของระบบ สามารถอธิบายได้ ดังรูป 3.21



รูป 3.21 แผนภาพการสร้างตัวแปรควบคุม

เพื่อให้การควบคุมตำแหน่งเข้าสู่ค่าเป้าหมายตามที่ต้องการได้อย่างรวดเร็วและสอดคล้องกับอุปกรณ์จริง จึงได้เลือกใช้ตัวควบคุมแบบพีไอทีในการสร้างตัวแปรควบคุมซึ่งมีขั้นตอนการคำนวณ ดังสมการ (3.3) ถึง (3.6) เมื่อ dt คือ ค่าเวลาในการชั่งตัวอย่าง เท่ากับ 20 มิลลิวินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$error = set\ point - process\ variable \quad (3.3)$$

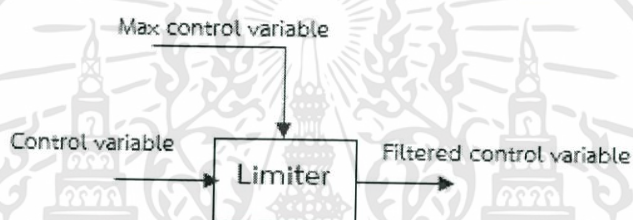
$$integral = integral + (error * dt) \quad (3.4)$$

$$derivative = (error - previous\ error)/dt \quad (3.5)$$

$$control\ variable = (K_p * error) + (K_i * integral) + (K_d * derivative) \quad (3.6)$$

ส่วนปรับแต่งตัวแปรควบคุม

เนื่องจากตัวแปรควบคุมที่ได้ อาจเป็นค่าที่ไม่สามารถนำไปใช้กับระบบได้ อาจเป็นค่าที่สูงเกินไป จึงมีการปรับแต่งให้มีค่าสูงสุดเป็นค่าที่ระบบรับได้ สามารถอธิบายได้ ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 แผนภาพส่วนปรับแต่งตัวแปรควบคุมของระบบ

จากรูป 3.22 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมระบบจริง (Filtered control variable) คือค่าที่ถูกจำกัดโดยค่าตัวแปรควบคุมสูงสุด (Max control variable) ดังนั้นค่าตัวแปรที่ใช้ควบคุมระบบจริงจะมีค่าสูงสุดไม่เกินค่าตัวแปรควบคุมสูงสุดที่ได้กำหนดไว้

ส่วนประยุกต์ใช้งานตัวแปรควบคุม

โครงการนี้ได้ใช้ผลรวมของตัวแปรควบคุมระบบจริงเพื่อใช้เป็นตัวแปรตำแหน่งการทำงานของขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า (Position offset : P_{offset}) เป็นค่าตำแหน่งในการควบคุมการทำงานของขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า ดังสมการ (3.7)

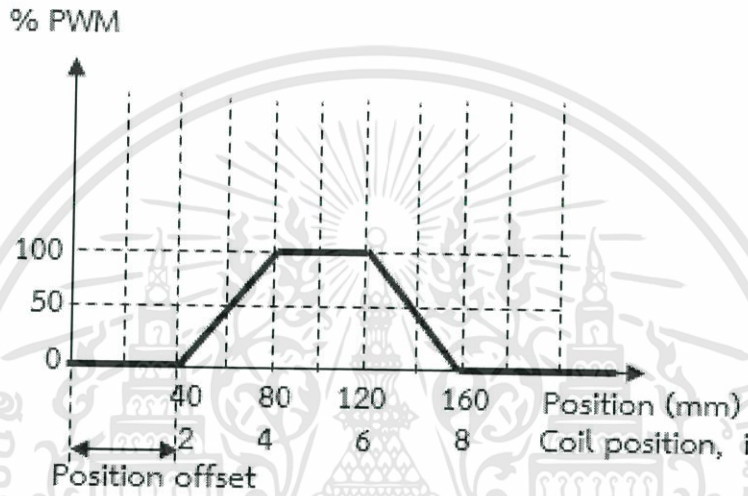
$$P_{offset} = P_{offset} + Filtered\ control\ variable \quad (3.7)$$

จากสมการ (3.7) สามารถนำค่าตัวแปรตำแหน่งการทำงานของขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้ ไปใช้ในการควบคุมสัญญาณพัลส์ริวมอดูเลชันของแต่ละขดลวด ภายใต้สมมติฐานว่ารถเคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งของขดลวดที่ถูกขับ ซึ่งได้อธิบายวิธีการควบคุมในหัวข้อต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 ส่วนการควบคุมการทำงานของขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า

การควบคุมการเคลื่อนที่ของรถที่อยู่บนรางสำหรับโครงการนี้ คือการควบคุมการทำงานของขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า โดยสามารถควบคุมผ่านการขับกระแสให้กับขดลวด ซึ่งได้ใช้หน่วยกำเนิดสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชันในการกำหนดปริมาณกระแสที่ขับให้แต่ละขดลวดให้มีปริมาณตามที่ต้องการ โดยตัวแปรสำหรับควบคุมตำแหน่งคือ P_{offset} ซึ่งลักษณะของสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชันที่ใช้ควบคุมขดลวดแสดงได้ ดังรูปที่ 3.23



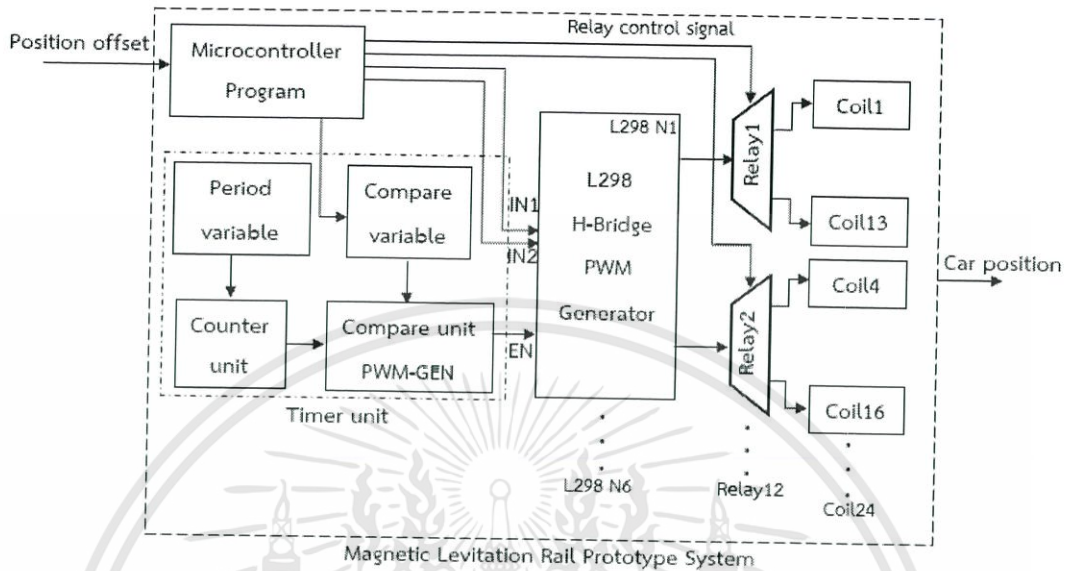
รูปที่ 3.23 สัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชันที่ใช้ในการควบคุมขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.24 สามารถอธิบายการควบคุมสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชันได้ดังสมการ (3.8)

$$\%PWM \text{ of coil}_i = \begin{cases} 0 & ; i \leq \frac{P_{offset}}{20} \\ 2.5(20i - P_{offset}) & ; \frac{P_{offset}}{20} < i < \frac{P_{offset} + 40}{20} \\ 100 & ; \frac{P_{offset} + 40}{20} \leq i \leq \frac{P_{offset} + 80}{20} \\ -2.5(20i - P_{offset}) + 300 & ; \frac{P_{offset} + 80}{20} < i < \frac{P_{offset} + 120}{20} \\ 0 & ; i \geq \frac{P_{offset} + 120}{20} \end{cases} \quad (3.8)$$

เมื่อ i คือ ตำแหน่งของขดลวด มีค่าเท่ากับ $[1, 2, 3, \dots, 24]$

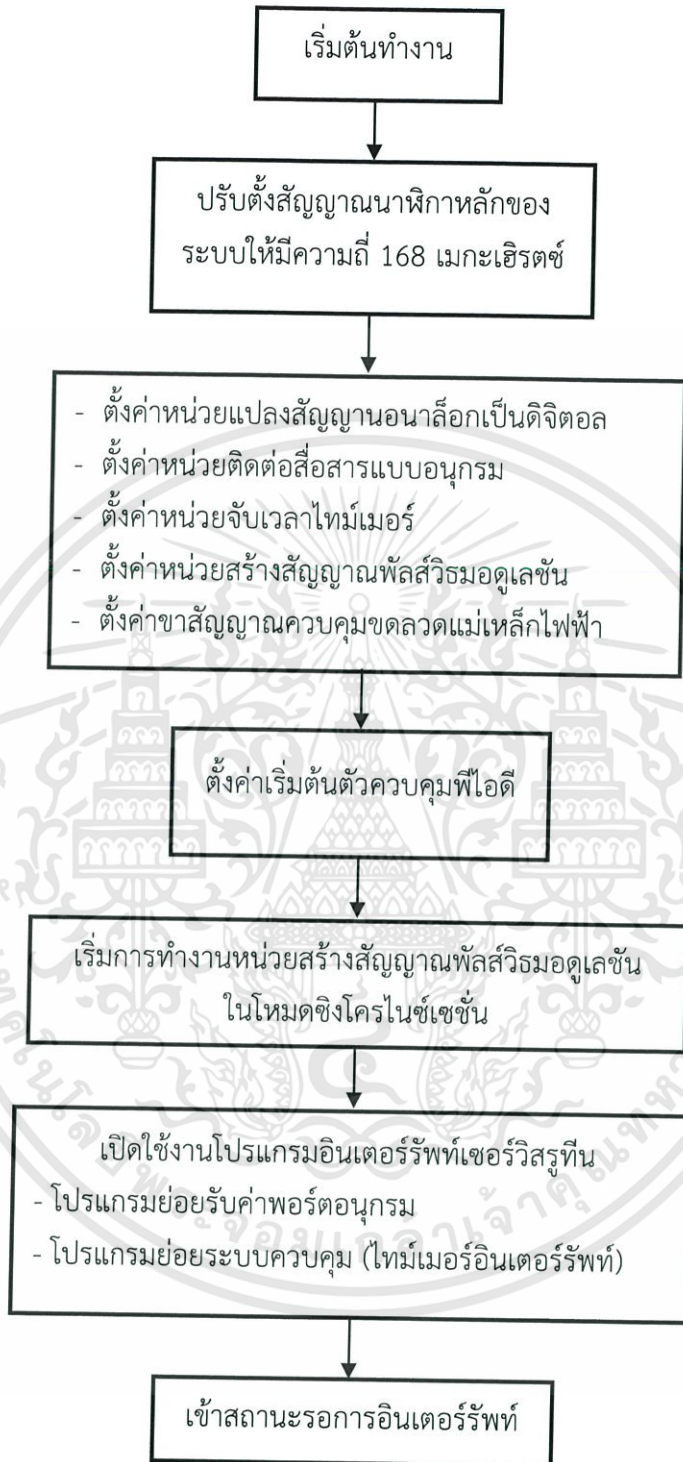
วิธีการทำงานของหน่วยกำเนิดสัญญาณพัลส์วิธึมอดูเลชัน เพื่อใช้ในการควบคุมขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแสดงดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 แผนภาพของส่วนควบคุมการทำงานของขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า

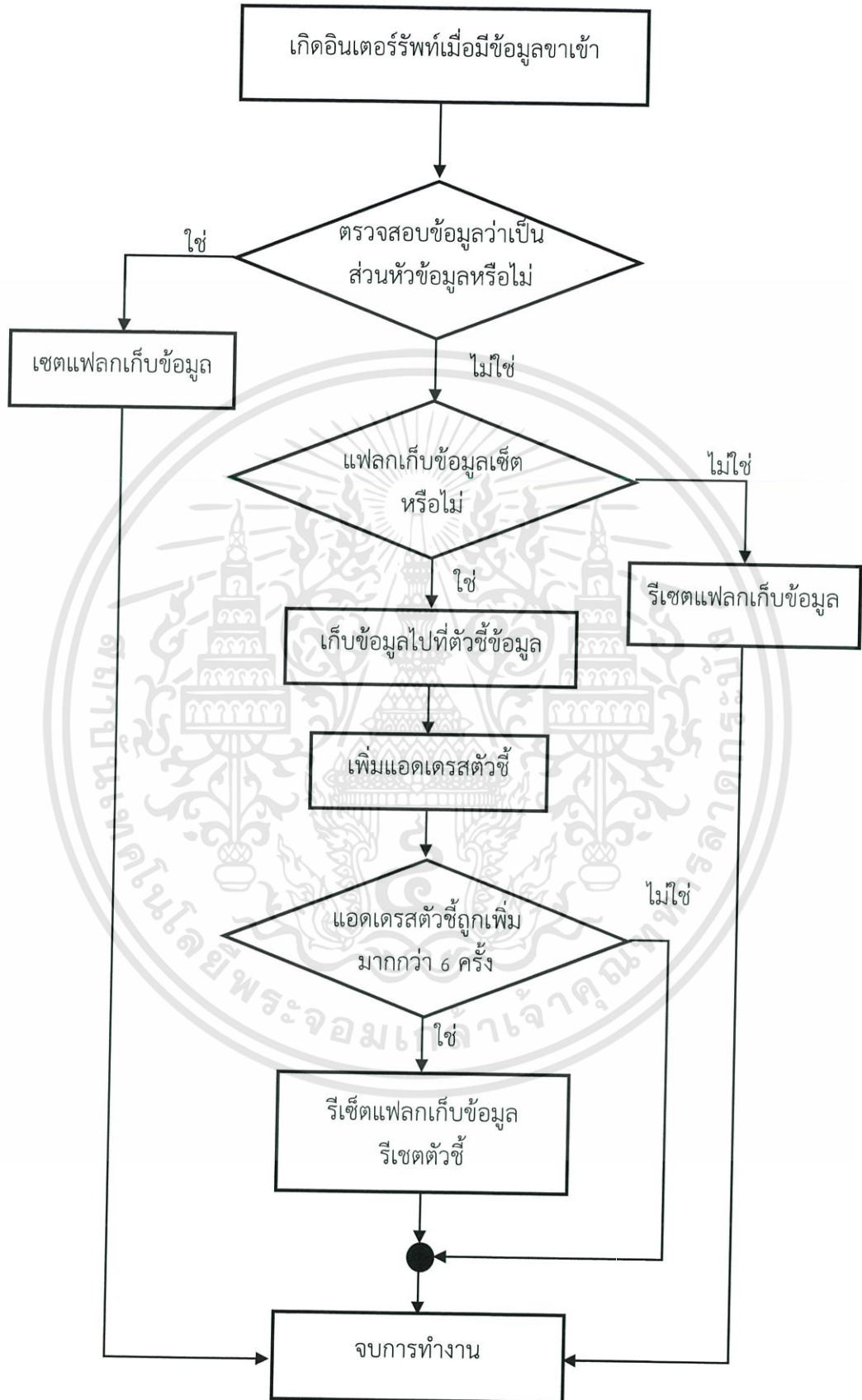
จากรูปที่ 3.24 โปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการประมวลผลค่าตัวแปร P_{offset} แล้วให้ค่าเอาต์พุตเป็นสัญญาณคำสั่ง (Command signal) ประกอบไปด้วยสัญญาณเข้าขา IN1, IN2 ของไอซี L298 ใช้สำหรับการควบคุมทิศทางการไหลของกระแส สัญญาณเข้าขา EN ใช้สำหรับการเพิ่มลดอัตราส่วนระหว่างความกว้างของสัญญาณพัลส์วิธึมอดูเลชัน (Duty cycle) เพื่อควบคุมปริมาณการขับกระแสของไอซี L298 และ สัญญาณเข้ารีเลย์ใช้สำหรับการควบคุมการทำงานของรีเลย์เพื่อควบคุมการจ่ายกระแสให้ขดลวด โดยมีสัญญาณควบคุมรีเลย์ (Relay control signal) จากไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวเลือกรีเลย์ที่จะทำงาน ดังแผนภาพในรูปที่ 3.24

จากโปรแกรมในส่วนต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาในข้างต้น สามารถอธิบายเป็นแผนภาพการทำงานของโปรแกรมได้ ดังรูปที่ 3.25 – 3.28



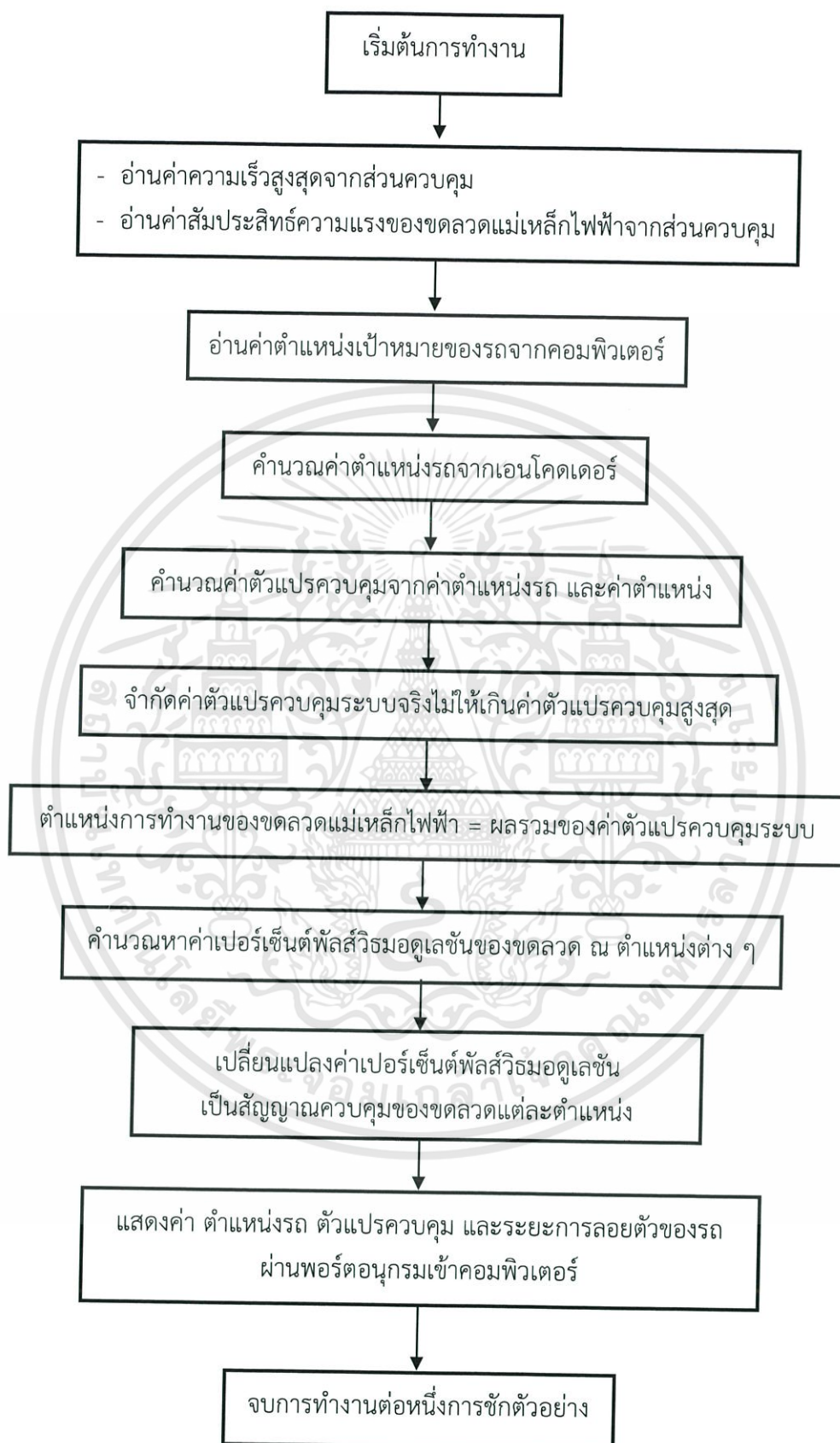
รูปที่ 3.25 แผนภาพการทำงานของโปรแกรมหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



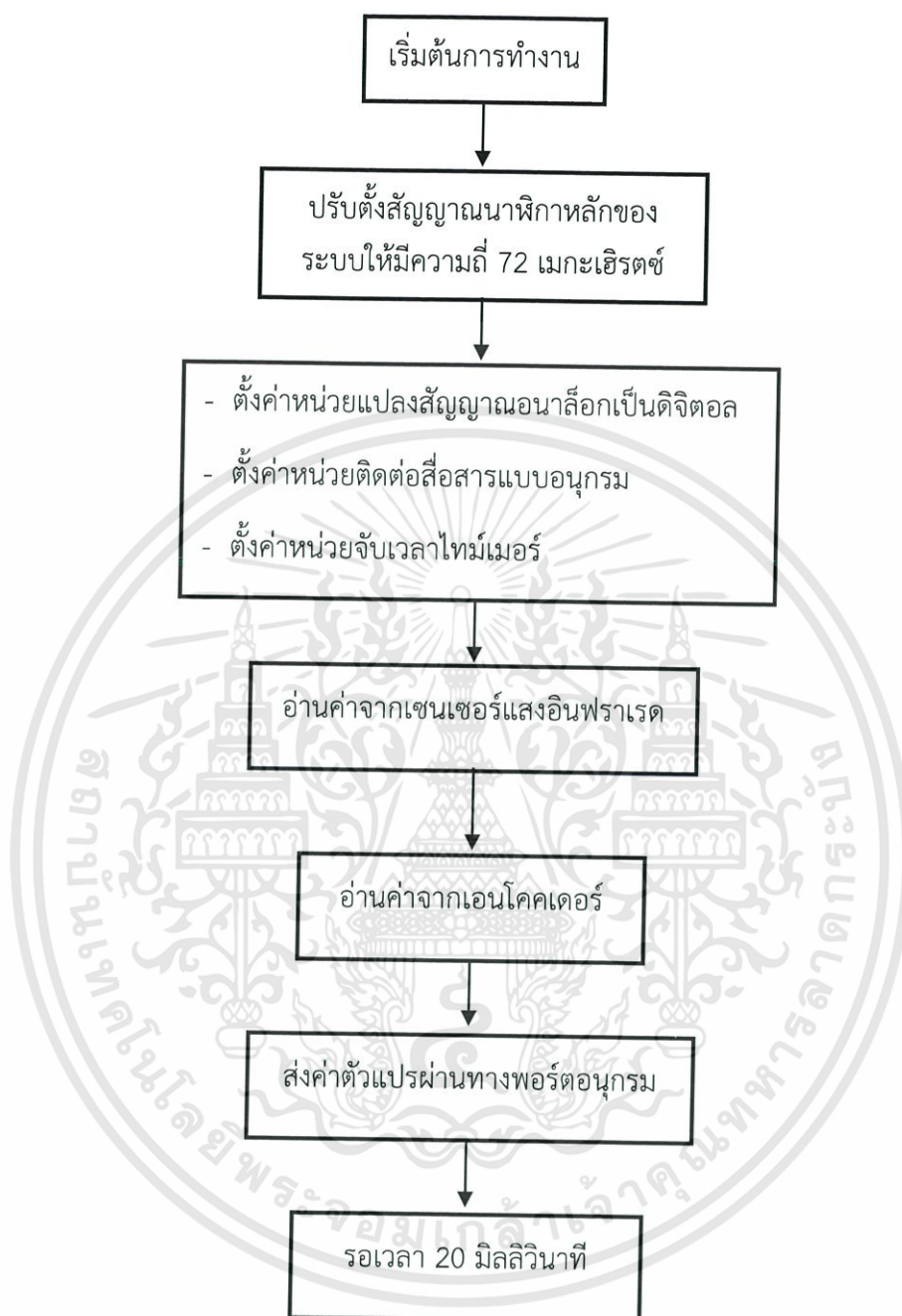
รูปที่ 3.26 แผนภาพการทำงานของโปรแกรมย่อยรับค่าจากพอร์ตอนุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27 แผนภาพการทำงานขอระบบควบคุมตำแหน่งรถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

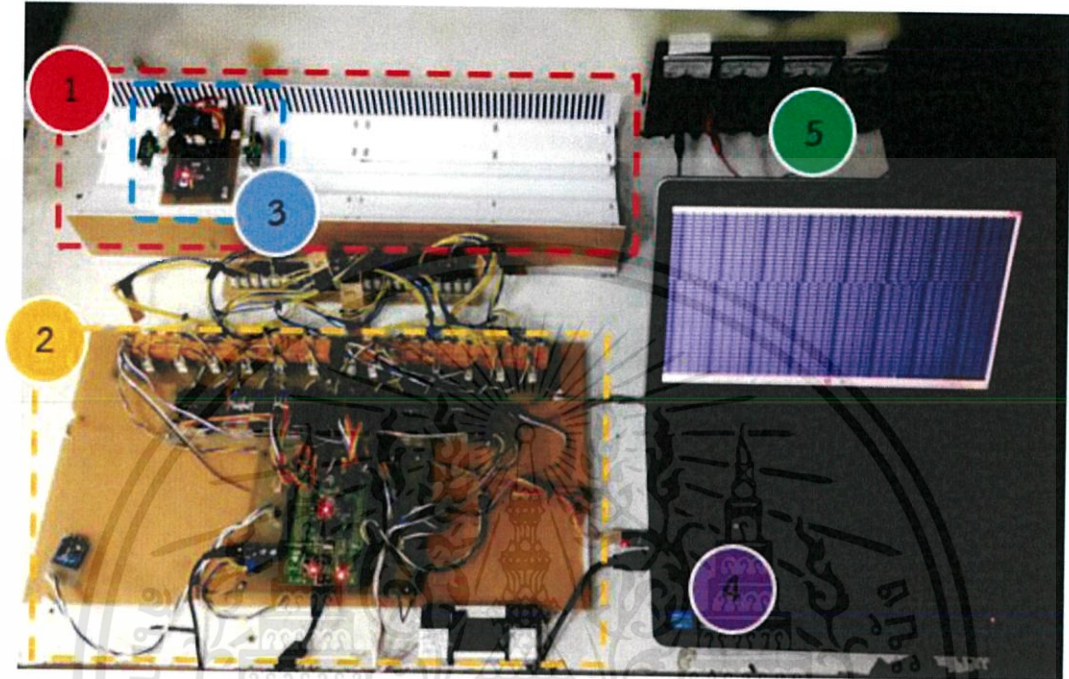


รูปที่ 3.28 แผนภาพการอ่านและส่งค่าตัวแปรของคอลโทรลเลอร์บนรถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ภาพรวมของระบบ

ภาพรวมของระบบแสดงถึงการเชื่อมต่อส่วนต่าง ๆ ของโครงงานที่ได้ออกแบบไว้ พร้อมกับอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้ในโครงงาน สามารถแสดงดังรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 ภาพรวมของระบบบรรดางไฟฟ้าแม่เหล็ก

จากรูปที่ 3.29 สามารถอธิบายส่วนต่าง ๆ ของโครงงานได้ดังนี้

หมายเลข 1 คือ ส่วนโครงสร้างของรถและรางที่ได้ออกแบบ สำหรับรายละเอียดโครงสร้างของรถและราง สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากภาคผนวก ก

หมายเลข 2 คือ ส่วนควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ (Rail control) ประกอบไปด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์หลัก STM32f4 DISCOVERY บอร์ดวงจรขับกระแสให้ขดลวด บอร์ดวงจรรีเลย์ และโมดูลรับสัญญาณแบบไร้สาย สำหรับรายละเอียดของวงจรสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากภาคผนวก ข

หมายเลข 3 คือ ส่วนรับส่งค่าจากเซนเซอร์บนตัวรถ (Car feedback sensor) ประกอบไปด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ET ARM-STAMP STM32f103 วงจรรับค่าจากเซนเซอร์แสงอินฟราเรด วงจรรับค่าจากเอนโคเดอร์ วงจรแปลงแรงดันจากแบตเตอรี่ และโมดูลส่งสัญญาณแบบไร้สาย สำหรับรายละเอียดของวงจรสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากภาคผนวก ข

หมายเลข 4 คือ คอมพิวเตอร์สำหรับโปรแกรมและแสดงผล

หมายเลข 5 คือ แหล่งจ่ายไฟ 24 โวลต์ สำหรับจ่ายกระแสให้กับขดลวด

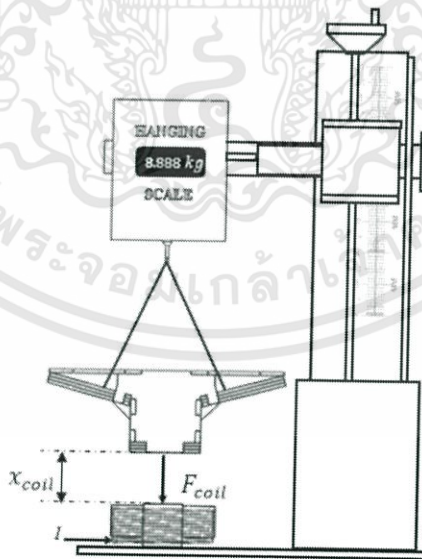
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้ได้นำเสนอการทดลองของโครงการรรางแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งแบ่งออกเป็น การทดลองหาแรงจากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า การทดลองบ่อนค่าฟลักซ์วิธมอดูเลชันเทียบกับกระแสเอาต์พุต การทดลองการลอยตัวของรถ และการทดลองควบคุมตำแหน่งรถ

4.1 การทดลองแรงจากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า

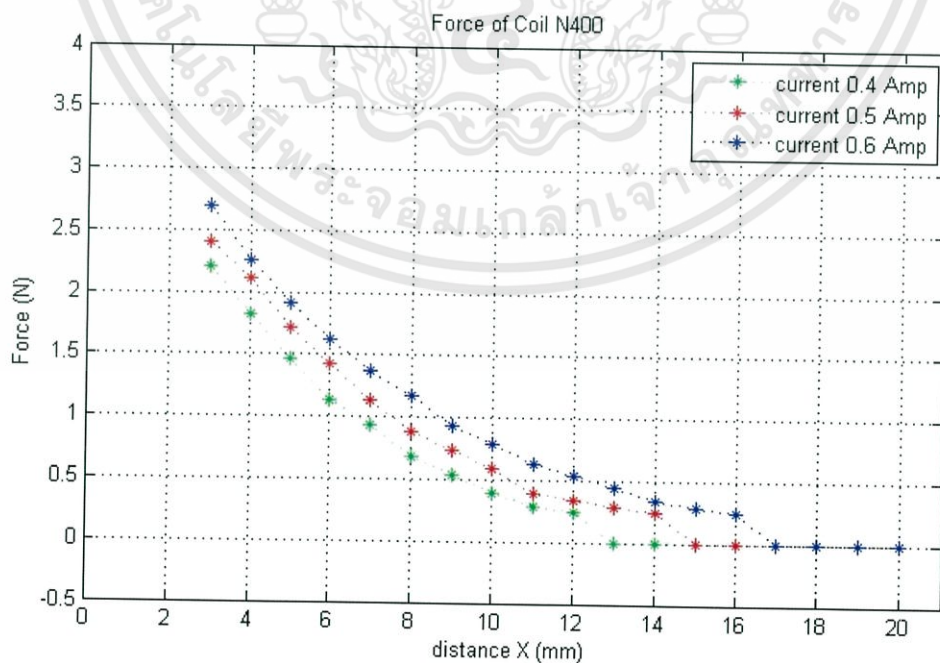
การทดสอบขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นการทดสอบแรงดูดที่เกิดจากขดลวดเพื่อหาจำนวนรอบในการพันขดลวด และกระแสที่สามารถนำไปใช้จริงในโครงการได้ เมื่อกำหนดขนาดของขดลวดให้พอดีกับแกนเหล็ก สามารถทำการทดสอบโดยแขวนรถไว้กับเครื่องชั่งน้ำหนักแบบแขวน โดยมีขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าวางอยู่ใต้รถที่พันรอบแกนเหล็ก ดังรูปที่ 4.1 จ่ายกระแสให้กับขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าแล้วบันทึกค่าน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะห่างระหว่างใต้ท้องรถกับขดลวด ซึ่งมีผลการทดลองดังตารางที่ 4.1 – 4.3



รูปที่ 4.1 การทดลองแรงดูดจากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองแรงดูดจากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้ขดลวดเบอร์ 33 พัน 400 รอบ

ระยะห่างระหว่าง รถกับขดลวด $X(mm)$	กระแส 0.4 แอมแปร์		กระแส 0.5 แอมแปร์		กระแส 0.6 แอมแปร์	
	น้ำหนัก $F(kg)$	แรง $F(N)$	น้ำหนัก $F(kg)$	แรง $F(N)$	น้ำหนัก $F(kg)$	แรง $F(N)$
20	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
19	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
18	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
17	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
16	0.000	0.000	0.000	0.000	0.025	0.245
15	0.000	0.000	0.000	0.000	0.030	0.294
14	0.000	0.000	0.025	0.245	0.035	0.343
13	0.000	0.000	0.030	0.294	0.045	0.441
12	0.025	0.245	0.035	0.343	0.055	0.539
11	0.030	0.294	0.040	0.392	0.065	0.637
10	0.040	0.392	0.060	0.588	0.080	0.784
9	0.055	0.539	0.075	0.735	0.095	0.932
8	0.070	0.687	0.090	0.883	0.120	1.177
7	0.095	0.932	0.115	1.128	0.140	1.373
6	0.115	1.128	0.145	1.422	0.165	1.618
5	0.150	1.472	0.175	1.717	0.195	1.913
4	0.185	1.824	0.215	2.109	0.230	2.256
3	0.225	2.207	0.245	2.403	0.275	2.697

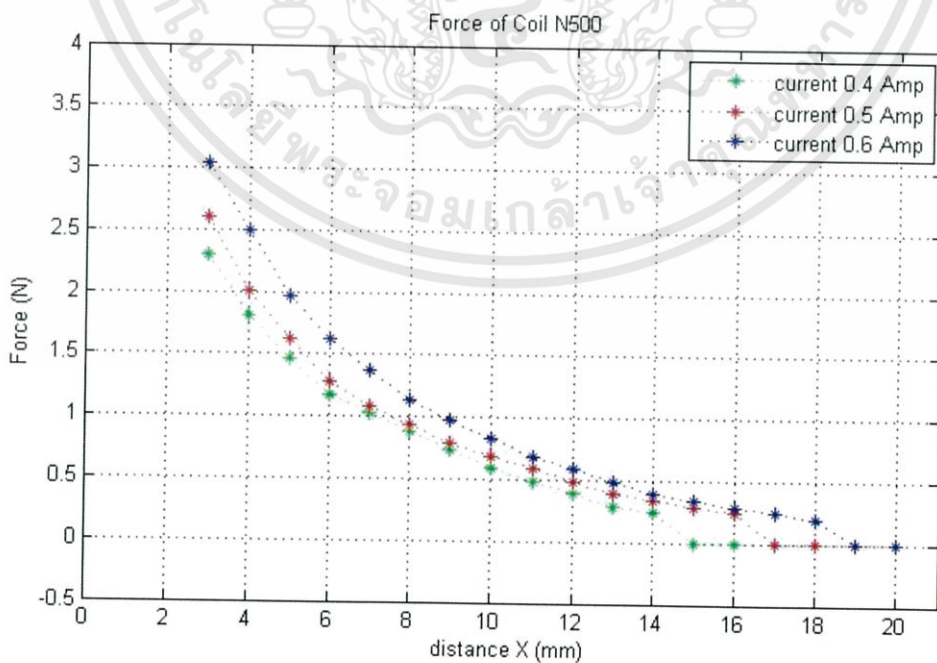


รูปที่ 4.2 ผลของแรงดูดจากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าโดยพันขดลวด 400 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบแรงดูดจากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้ขดลวดเบอร์ 33 พัน 500 รอบ

ระยะห่างระหว่าง รถกับขดลวด $X(mm)$	กระแส 0.4 แอมแปร์		กระแส 0.5 แอมแปร์		กระแส 0.6 แอมแปร์	
	น้ำหนัก $F(kg)$	แรง $F(N)$	น้ำหนัก $F(kg)$	แรง $F(N)$	น้ำหนัก $F(kg)$	แรง $F(N)$
20	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
19	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
18	0.000	0.000	0.000	0.000	0.020	0.196
17	0.000	0.000	0.000	0.000	0.025	0.245
16	0.000	0.000	0.025	0.245	0.030	0.294
15	0.000	0.000	0.030	0.294	0.035	0.343
14	0.025	0.245	0.035	0.343	0.040	0.392
13	0.030	0.294	0.040	0.392	0.050	0.490
12	0.040	0.392	0.050	0.490	0.060	0.588
11	0.050	0.490	0.060	0.588	0.070	0.687
10	0.060	0.588	0.070	0.687	0.085	0.834
9	0.075	0.736	0.080	0.785	0.100	0.981
8	0.090	0.883	0.095	0.932	0.115	1.128
7	0.105	1.030	0.110	1.079	0.140	1.373
6	0.120	1.177	0.130	1.274	0.165	1.618
5	0.150	1.472	0.165	1.618	0.200	1.962
4	0.185	1.814	0.205	2.011	0.255	2.502
3	0.235	2.305	0.265	2.599	0.310	3.041

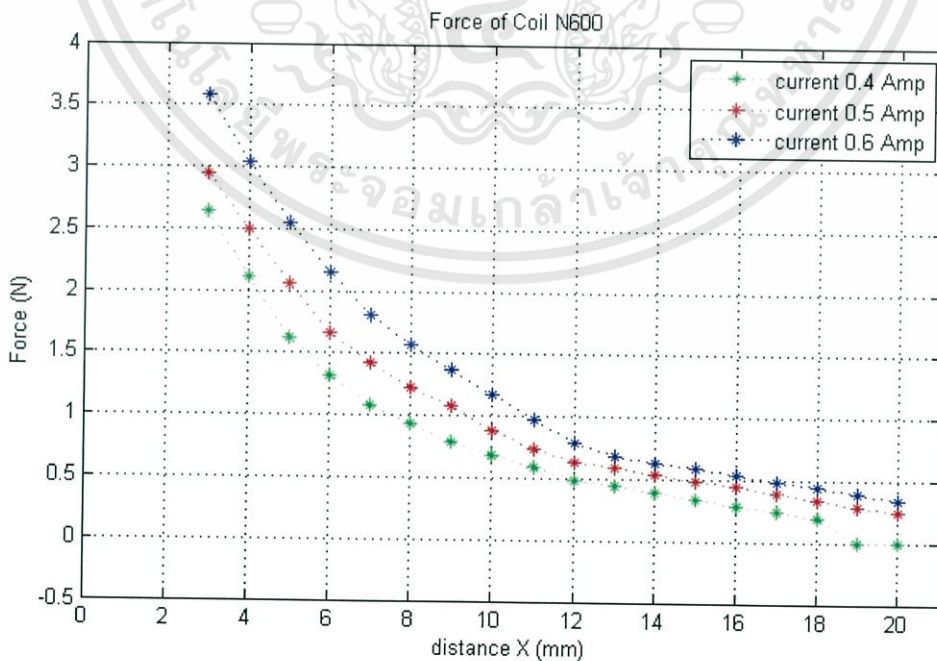


รูปที่ 4.3 ผลของแรงดูดจากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าโดยพันขดลวด 500 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบแรงดูดจากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้ขดลวดเบอร์ 33 พัน 600 รอบ

ระยะห่างระหว่าง รถกับขดลวด $X(cm)$	กระแส 0.4 แอมแปร์		กระแส 0.5 แอมแปร์		กระแส 0.6 แอมแปร์	
	น้ำหนัก $F(kg)$	แรง $F(N)$	น้ำหนัก $F(kg)$	แรง $F(N)$	น้ำหนัก $F(kg)$	แรง $F(N)$
20	0.000	0.000	0.025	0.245	0.035	0.343
19	0.000	0.000	0.030	0.294	0.040	0.392
18	0.020	0.196	0.035	0.343	0.045	0.441
17	0.025	0.245	0.040	0.392	0.050	0.490
16	0.030	0.294	0.045	0.441	0.055	0.539
15	0.035	0.343	0.050	0.490	0.060	0.588
14	0.040	0.392	0.055	0.539	0.065	0.637
13	0.045	0.441	0.060	0.588	0.070	0.687
12	0.050	0.490	0.065	0.637	0.080	0.785
11	0.060	0.588	0.075	0.735	0.100	0.981
10	0.070	0.687	0.090	0.883	0.120	1.177
9	0.080	0.785	0.110	1.079	0.140	1.373
8	0.095	0.932	0.125	1.226	0.160	1.569
7	0.110	1.079	0.145	1.422	0.185	1.815
6	0.135	1.324	0.170	1.667	0.220	2.158
5	0.165	1.618	0.210	2.060	0.260	2.551
4	0.215	2.109	0.255	2.502	0.310	3.041
3	0.270	2.648	0.310	2.953	0.365	3.581



รูปที่ 4.4 ผลของแรงดูดจากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าโดยพันขดลวด 600 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองแรงที่เกิดจากการจ่ายกระแสให้กับขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าพบว่าแรงที่ได้เป็นไปตามทางทฤษฎีคือ แรงแปรผันตรงกับค่ากระแสที่จ่ายให้กับขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า แรงแปรผันตรงกับจำนวนรอบของการพันขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า และแรงแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้ากับแม่เหล็ก

4.2 การทดลองการป้อนค่าพัลส์วิธมอดูเลชันเทียบกับกระแสเอาต์พุต

การทดลองนี้เป็นการทดลองแปรค่าพัลส์วิธมอดูเลชันที่ใช้ขับกระแสให้กับขดลวด เพื่อหาค่าพัลส์วิธมอดูเลชันขั้นต่ำที่ทำให้ขดลวดเริ่มทำงาน และความสัมพันธ์ระหว่างค่าพัลส์วิธมอดูเลชันกับกระแสเอาต์พุต โดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองการป้อนค่าพัลส์วิธมอดูเลชันเทียบกับกระแสเอาต์พุต

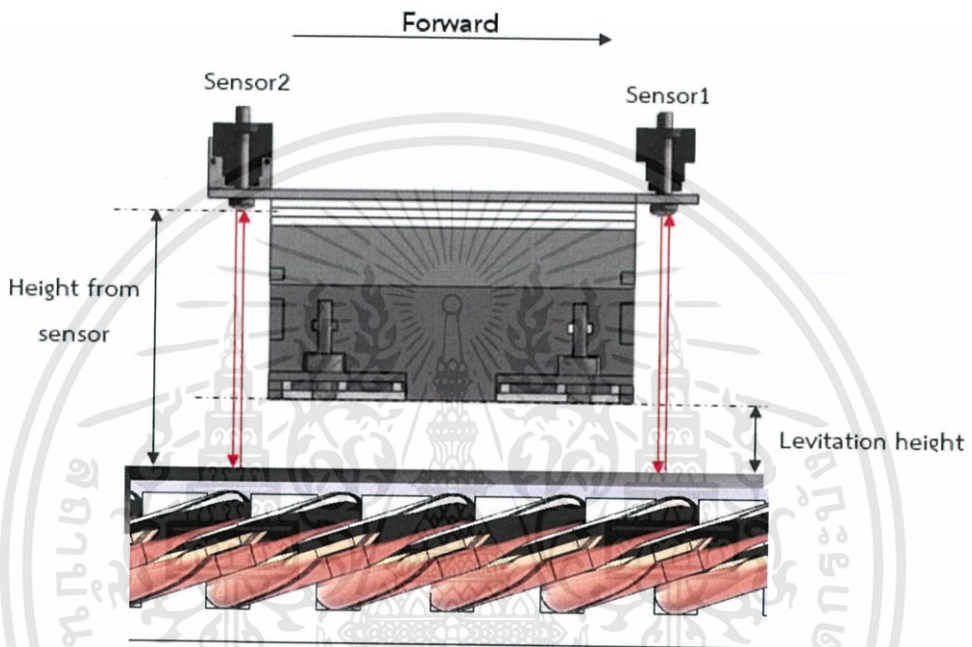
ค่าพัลส์วิธมอดูเลชัน (เปอร์เซ็นต์)	กระแสเอาต์พุต (แอมแปร์)
100	0.601
90	0.525
80	0.332
70	0.219
60	0.088
50	0.019
40	0
30	0
20	0
10	0
0	0

จากผลการทดลองพบว่าหากขับกระแสด้วยค่าพัลส์วิธมอดูเลชันต่ำกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ จะยังไม่มีกระแสไหลผ่านขดลวด ดังนั้นในการขับกระแสให้กับขดลวดจะต้องใช้ค่าพัลส์วิธมอดูเลชันที่มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป เพื่อจะทำให้ขดลวดทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

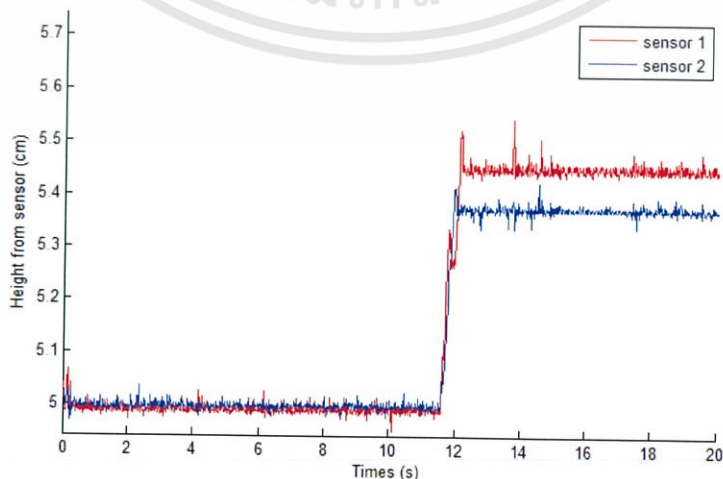
4.3 การทดลองการลอยตัวของรถ

การทดลองการลอยตัวของรถสามารถทดลองได้โดยใช้เซนเซอร์แสงอินฟราเรด 2 ตัว ที่ติดตั้งอยู่บริเวณด้านบนของรถ วัดระยะจากเซนเซอร์ถึงพื้นรางที่แสงอินฟราเรดตกกระทบ โดยเซนเซอร์ตัวที่ 1 ได้ติดตั้งอยู่ด้านหน้าของตัวรถ และเซนเซอร์ตัวที่ 2 ได้ติดตั้งอยู่ด้านหลังของตัวรถ ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การทดลองวัดระยะการลอยตัวของรถบนราง

โดยการทดลองนี้ได้เปรียบเทียบระยะเมื่อรถวางนิ่งอยู่บนพื้นกับระยะเมื่อรถลอยตัวอยู่บนราง ซึ่งเป็นการทดลองเพื่อให้ทราบว่ารถสามารถลอยตัวอยู่บนรางเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่ โดยมีผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.6



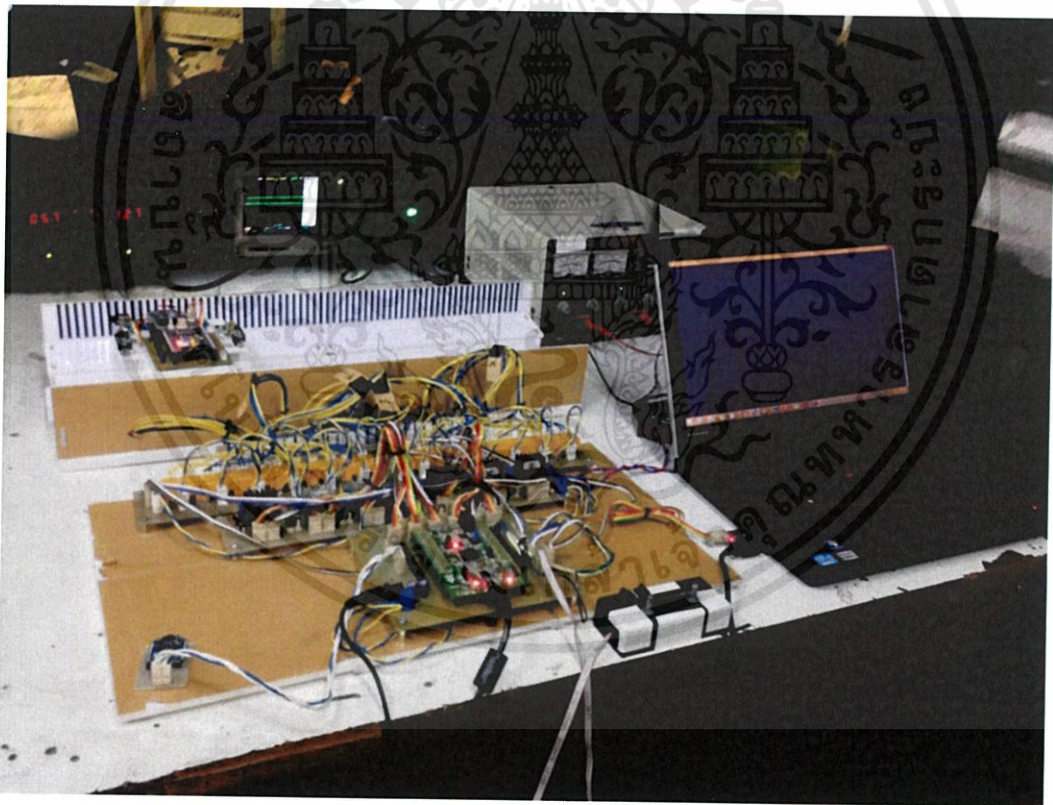
รูปที่ 4.6 ผลการทดลองวัดระยะการลอยตัวของรถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองวัดระยะการลอยตัวของรถ ดังรูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อรถอยู่นิ่งติดกับพื้นราบ คือช่วงเวลาที่ 0 ถึง 11.5 วินาที เซนเซอร์แสงอินฟราเรดวัดระยะได้ประมาณ 5 เซนติเมตร และเมื่อรถลอยตัวค้างที่อยู่บนรางคือช่วงเวลาที่ 12 ถึง 20 วินาที เซนเซอร์แสงตัวที่ 1 วัดระยะได้ประมาณ 5.45 เซนติเมตร และเซนเซอร์แสงตัวที่ 2 วัดระยะได้ประมาณ 5.40 เซนติเมตร จากผลดังกล่าวทำให้ทราบว่ารถสามารถลอยตัวอยู่บนรางที่ระยะประมาณ 0.40 ถึง 0.45 เซนติเมตร โดยทราบได้จากความต่างของระยะ ณ ตอนที่รถอยู่นิ่งติดกับพื้น และตอนที่รถลอยตัวบนราง

4.4 การทดลองควบคุมตำแหน่งรถ

การทดลองควบคุมตำแหน่งรถสามารถทดลองโดยการกำหนดค่าตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการให้รถเคลื่อนที่โดยกำหนดผ่านคอมพิวเตอร์ และเพื่อให้รถสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำได้โดยการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบพีไอดีแล้วสังเกตผลตอบสนองของตำแหน่งรถ สัญญาณควบคุม และระยะการลอยตัวของรถ ซึ่งมีลักษณะการทดลอง ดังรูปที่ 4.7



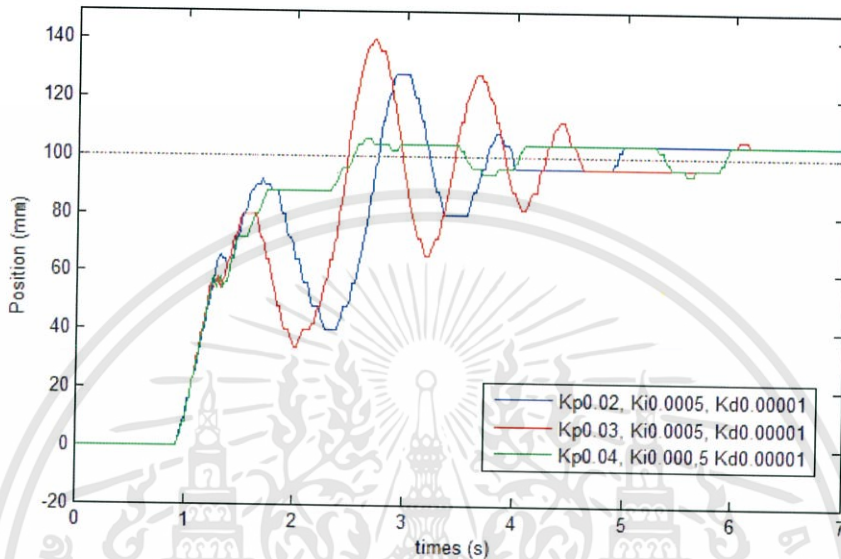
รูปที่ 4.7 การทดลองผลตอบสนองของระบบ

ในการทดลองควบคุมตำแหน่งรถนี้ได้ทดลองการเคลื่อนที่ทั้งหมด 2 ระยะทาง ได้แก่ระยะ 0 – 100 มิลลิเมตร และ 0 – 200 มิลลิเมตร โดยมีผลการทดลองดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

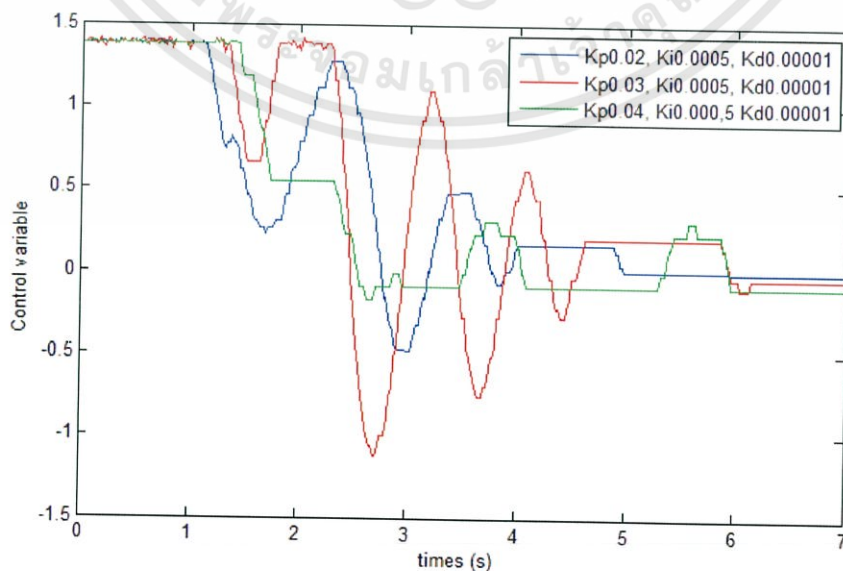
4.3.1 การทดลองควบคุมตำแหน่งรถโดยเคลื่อนที่จากระยะ 0 – 100 มิลลิเมตร

การทดลองนี้ทดลองควบคุมตำแหน่งรถให้เคลื่อนที่จากระยะ 0 ถึง 100 มิลลิเมตร โดยทดลองปรับค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดี โดยแปรค่า K_p และคงค่า K_i และ K_d มีผลตอบสนองตำแหน่งรถ ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ผลตอบสนองตำแหน่งรถจากตำแหน่ง 0 – 100 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.8 เมื่อใช้ค่า $K_p = 0.04$ พบว่าระบบเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวโดยเร็วกว่า และเกิดค่าพุ่งเกินของผลตอบสนองน้อยกว่า เมื่อใช้ค่า $K_p = 0.02$ และ $K_p = 0.03$ โดยรถจะเริ่มเคลื่อนที่เมื่อเวลาผ่านไป 1 วินาที และเริ่มเข้าสู่ตำแหน่งเป้าหมายที่ระยะ 100 มิลลิเมตร เมื่อเวลาผ่านไป 4 วินาที ซึ่งมีสัญญาณควบคุม ดังรูปที่ 4.9

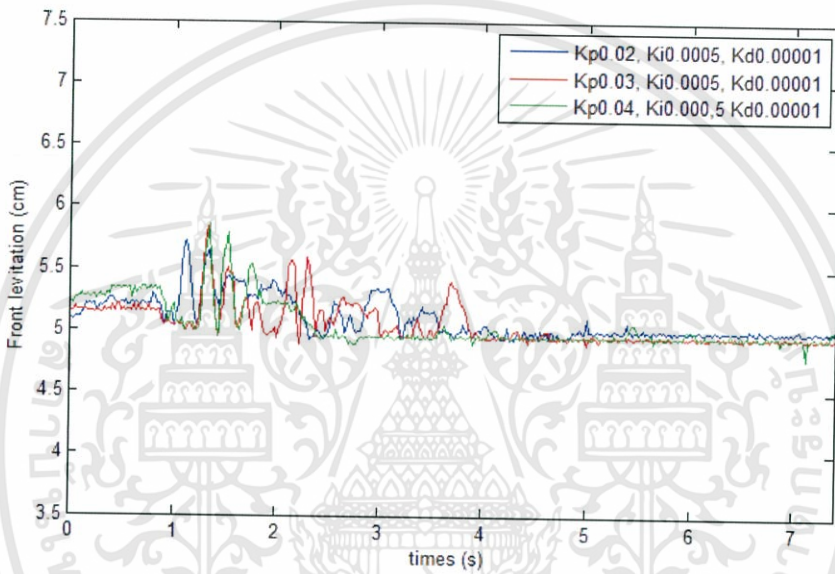


รูปที่ 4.9 สัญญาณควบคุมจากตำแหน่ง 0 – 100 มิลลิเมตร

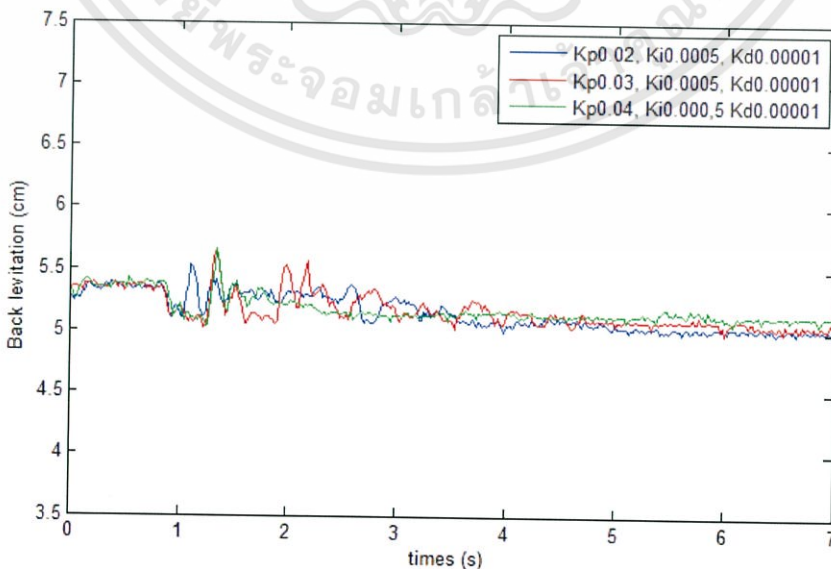
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 พบว่าสัญญาณควบคุมเป็นไปตามผลตอบสนองของตำแหน่งรถ เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ $K_p = 0.04$, $K_i = 0.0005$ และ $K_d = 0.00001$ โดยสัญญาณควบคุมจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไป 1 วินาที และเริ่มมีค่าเข้าใกล้ศูนย์เมื่อเวลาผ่านไป 4 วินาที ซึ่งเป็นไปตามผลตอบสนองตำแหน่งรถ

สำหรับผลตอบสนองการลอยตัวของรถนั้น สามารถแสดง ดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 โดยผลตอบสนองเป็นระยะที่วัดได้จากเซนเซอร์แสงอินฟราเรดซึ่ง ณ ขณะที่ยังลอยอยู่นิ่งติดกับพื้นราบเซนเซอร์วัดระยะได้ 5 เซนติเมตร



รูปที่ 4.10 ผลตอบสนองการลอยด้านหน้าของรถจากตำแหน่ง 0 – 100 มิลลิเมตร



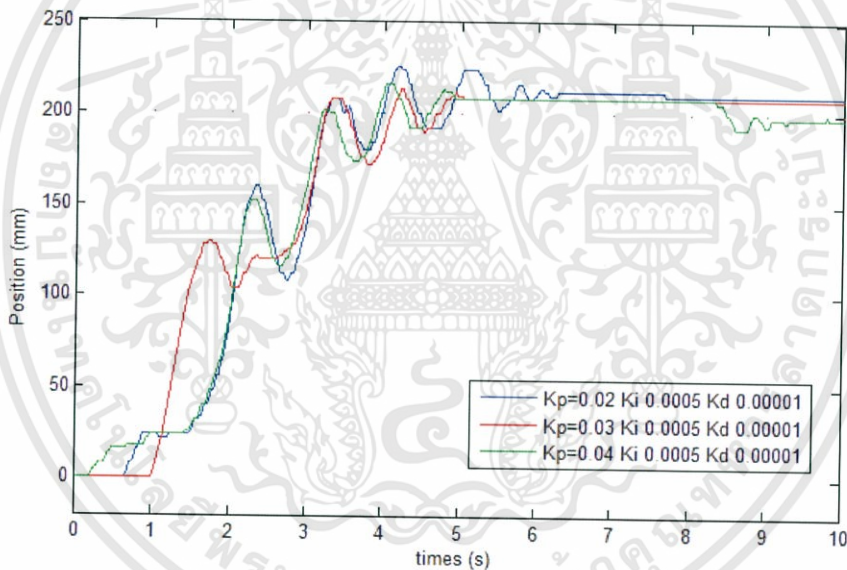
รูปที่ 4.11 ผลตอบสนองการลอยตัวด้านหลังของรถจากตำแหน่ง 0 – 100 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 พบว่า เมื่อรถเคลื่อนที่นั้นรถเกิดการสั่นสะเทือน ซึ่งทราบได้จากผลตอบสนองในช่วงเวลาที่รถเคลื่อนที่ คือตั้งแต่วันที่ 1 ถึงวันที่ 4 ซึ่งมีการแกว่งของผลตอบสนองระยะการลอยตัวทั้งด้านหน้า และด้านหลังของรถ โดยด้านหน้าของรถจะมีการสั่นสะเทือนมากกว่าด้านหลังของรถ เนื่องจากมีระยะการแกว่งของผลตอบสนองที่มากกว่า

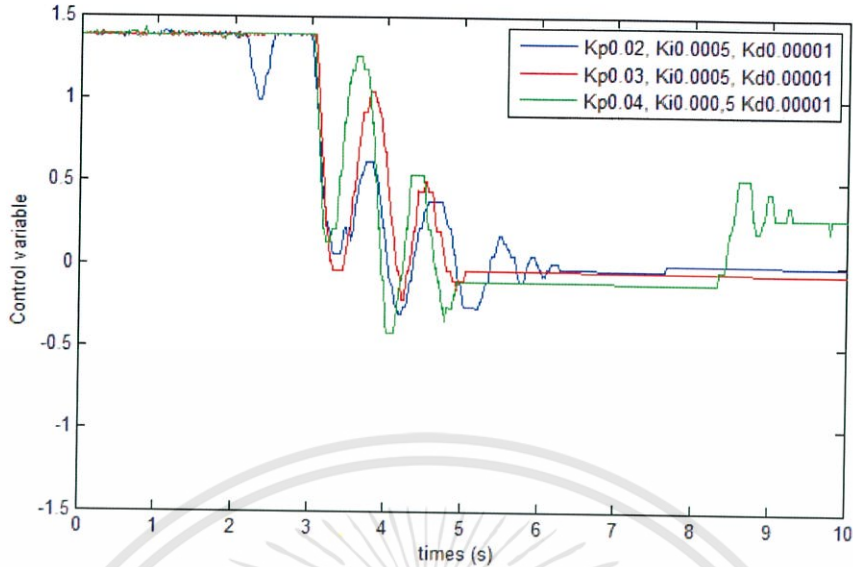
4.3.2 การทดลองควบคุมตำแหน่งรถโดยเคลื่อนที่จากระยะ 0 – 200 มิลลิเมตร

การทดลองที่ทดลองควบคุมตำแหน่งรถให้เคลื่อนที่จากระยะ 0 ถึง 200 มิลลิเมตร โดยทดลองปรับค่าพารามิเตอร์ตัวควบคุมพีไอดี โดยแปรค่า K_p และคงค่า K_i , K_d มีผลตอบสนองตำแหน่งรถ ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ผลตอบสนองตำแหน่งรถจากตำแหน่ง 0 – 200 มิลลิเมตร

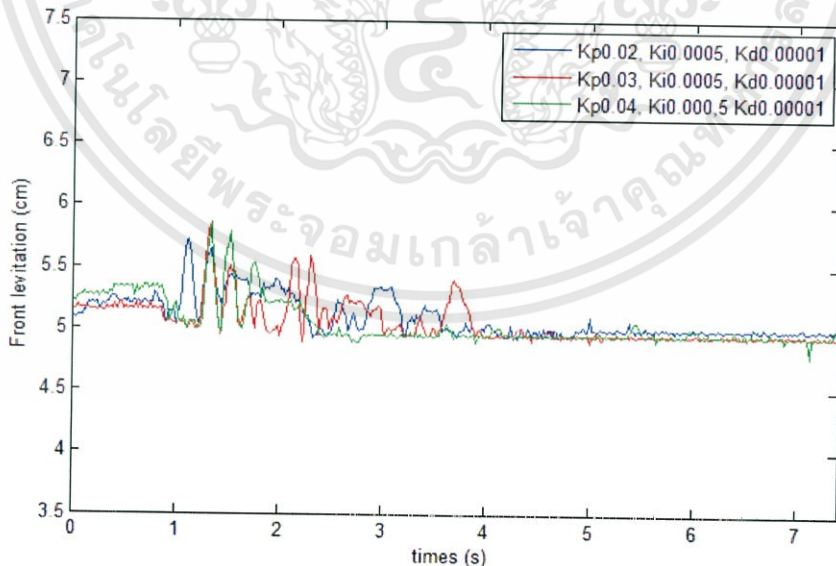
จากรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อใช้ค่า $K_p = 0.03$ ระบบสามารถเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้เร็วกว่า และมีค่านิ่งกว่าในสภาวะอยู่ตัว ดังนั้น ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับควบคุมให้รถเคลื่อนที่จากตำแหน่ง 0 ถึง 200 มิลลิเมตร ควรใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p = 0.03$, $K_i = 0.0005$ และ $K_d = 0.0001$ โดยรถจะเริ่มเคลื่อนที่เมื่อเวลาผ่านไป 1 วินาที และจะเริ่มเข้าสู่ตำแหน่งเป้าหมาย ที่ระยะ 200 มิลลิเมตรเมื่อเวลาผ่านไป 5 วินาที โดยมีสัญญาณควบคุม ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 ผลตอบสนองของสัญญาณควบคุมจากตำแหน่ง 0 – 200 มิลลิเมตร

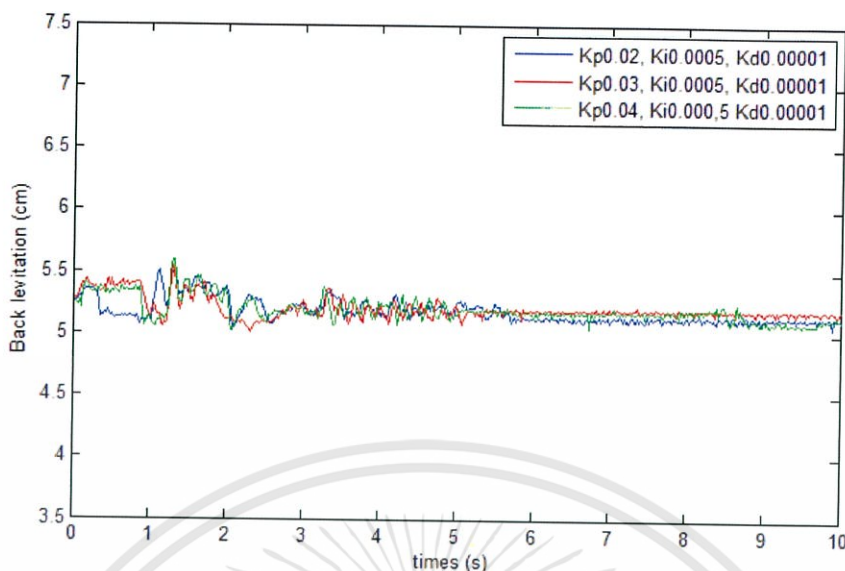
จากรูปที่ 4.13 พบว่าสัญญาณควบคุมเป็นไปตามผลตอบสนองตำแหน่งรถ เมื่อใช้ค่าพารามิเตอร์ $K_p = 0.03$, $K_i = 0.0005$ และ $K_d = 0.0001$ โดยสัญญาณควบคุมจะเริ่มมีค่าเข้าใกล้ศูนย์เมื่อเวลาผ่านไป 5 วินาที ซึ่งเป็นไปตามผลตอบสนองตำแหน่งรถ

สำหรับผลตอบสนองการลอยตัวของรถในการเคลื่อนที่ระยะ 0 ถึง 200 มิลลิเมตรนั้นสามารถแสดงดังรูปที่ 4.14 และ 4.15



รูปที่ 4.14 ผลตอบสนองการลอยตัวด้านหน้าของรถจากตำแหน่ง 0 – 200 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ผลตอบสนองการลอยตัวด้านหลังของรถจากตำแหน่ง 0 – 200 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.14 และ 4.15 สามารถสรุปได้ว่า ณ ขณะที่รถเคลื่อนที่นั้นมีการสั่นสะเทือนของรถซึ่งทราบได้จากผลตอบสนองในช่วงเวลาที่รถเคลื่อนที่ คือตั้งแต่วินาทีที่ 1 ถึงวินาทีที่ 5 ซึ่งมีการแกว่งของผลตอบสนองระยะการลอยตัวทั้งด้านหน้า และด้านหลังของรถ โดยด้านหน้าของรถจะมีการสั่นสะเทือนมากกว่าด้านหลังของรถ เนื่องจากมีระยะการแกว่งของผลตอบสนองที่มากกว่า

4.4 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองทั้งหมดนี้ แสดงให้เห็นว่าต้นแบบบรรดางไฟฟ้าแม่เหล็กที่พัฒนาขึ้นนั้นสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ ตั้งแต่การอ่านค่าจากเซนเซอร์ การควบคุมความแรงของขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า การส่งสัญญาณควบคุมตำแหน่ง และการควบคุมให้รถเคลื่อนที่ตามความต้องการได้ แต่ยังมีปัญหาเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของรถที่ยังไม่นิ่งพอ และเกิดการถอยกลับของรถอยู่บางช่วง ซึ่งเป็นผลมาจากแรงที่เกิดจากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าไม่เท่ากันเนื่องจากการไหลกลับของกระแสที่จ่ายให้กับขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า และระบบควบคุมที่ใช้ควบคุมการทำงานของขดลวดแต่ละตำแหน่งยังสามารถควบคุมได้ไม่ดีพอ

บทที่ 5

สรุปและวิเคราะห์ปัญหา

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษาและการออกแบบระบบการขนส่งโดยใช้ระบบแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งอาศัยหลักการของแรงกระทำที่เกิดจากขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้ากับแม่เหล็กถาวรในการขับเคลื่อนรถ และอาศัยหลักการผลักดันระหว่างแม่เหล็กขั้วเดียวกันในการรักษาสมดุลรถ ต่อมาได้ออกแบบโครงสร้างของรถและรางโดยคำนึงถึงหลักการของแรงที่กระทำกับรถ ซึ่งมีค่าเปลี่ยนแปลงตามระยะห่างของช่องว่างอากาศ และขนาดพื้นผิวที่สนามแม่เหล็กตัดผ่าน จากนั้นได้ออกแบบวงจรที่ใช้สำหรับการรับค่าเซนเซอร์ที่ใช้วัดตำแหน่งของรถ และระดับการลอยตัวของรถ และวงจรขับกระแสให้กับขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า หลังจากนั้นได้ออกแบบโปรแกรมเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไปยังตำแหน่งที่ต้องการ ซึ่งกำหนดค่าอินพุตอ้างอิงของระบบเป็นตำแหน่งของรถที่ต้องการ โดยค่าป้อนกลับเป็นค่าตำแหน่งรถ และใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุม จากการทดลองพบว่าระบบที่ได้ออกแบบสามารถควบคุมให้รถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้ แต่อาจเกิดการหยุดชะงักระหว่างการเคลื่อนที่ของรถในบางครั้ง นอกจากนี้ยังไม่สามารถควบคุมระยะการลอยตัวของรถ เป็นเหตุทำให้รถสั่นและลอยตัวไม่สม่ำเสมอ

5.2 ปัญหาและอุปสรรค

ปัญหาและอุปสรรคที่พบจากการทำโครงการ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. อุณหภูมิของขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้ามีผลต่ออัตราการจ่ายกระแส เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความต้านทานของขดลวดเพิ่มขึ้นตาม เป็นผลทำให้กระแสที่จ่ายให้กับขดลวดลดลง จึงทำให้แรงกระทำระหว่างขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้ากับแม่เหล็กลดลง
2. แรงกระทำระหว่างแม่เหล็กถาวร เมื่อเวลาผ่านไปเป็นเวลานานทำให้แรงกระทำดังกล่าวมีค่าลดลง เป็นผลมาจากค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กถาวรลดลงซึ่งอาจเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแม่เหล็กถาวรกับอากาศ
3. แรงกระทำระหว่างขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าแต่ละขดลวดกับแม่เหล็กที่ติดอยู่ใต้ท้องรถมีค่าไม่เท่ากัน จึงทำให้ขณะรถเคลื่อนที่นั้นมีการสั่นอยู่บ้างในบางตำแหน่ง
4. การควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ อาศัยภายใต้สมมติฐานว่ารถจะเคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งของขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกขับกระแสให้ ดังนั้นจึงมีปัญหาในบางกรณีที่รถหยุดชะงัก หรืออาจไม่สามารถวิ่งตามได้
5. เนื่องจากไม่มีระบบควบคุมระยะการลอยตัวของรถ เป็นผลทำให้ ณ ตอนที่รถเคลื่อนที่บางตำแหน่งและตอนที่รถหยุดนิ่ง รถจะถูกแรงดูดที่เกิดจากขดลวดดูดติดกับพื้นราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เนื่องจากไม่มีระบบควบคุมความสมดุลด้านข้างของตัวรถ เป็นผลทำให้ ณ ตอนที่รถเคลื่อนที่ รถเกิดการเสียดสีกับราง จนต้องแก้ไขปัญหาลักษณะนี้ โดยการติดลูกปืนบริเวณด้านข้างของตัวรถทั้งสองฝั่ง

7. เอนโคคเตอร์มีการผิดพลาดในการตรวจจับตำแหน่ง เนื่องจากระยะห่างระหว่างตัวรับส่งของเอนโคคเตอร์กับสลิตมีระยะที่ไม่คงที่ ซึ่งเกิดจากการสั่นสะเทือนของตัวรถขณะเคลื่อนที่

5.3 แนวทางการพัฒนา

1. ควรออกแบบโครงสร้างให้มีการควบคุมขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าที่วางเรียงตัวกันในรูปแบบเดียวกับมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นอยู่บริเวณด้านข้างของรถทั้งสองด้าน เพื่อที่นอกจากจะควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ จะยังช่วยควบคุมสมดุลของรถได้ด้วย

2. ควรออกแบบโครงสร้างให้ตำแหน่งของวงจรมีผลกระทบจากสนามแม่เหล็กน้อยที่สุด เนื่องจากสนามแม่เหล็กมีผลต่อการรับส่งค่าของสัญญาณแบบไร้สาย หรือควรมีอุปกรณ์ที่ช่วยป้องกันจากสัญญาณรบกวน

3. เพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมการขับเคลื่อนให้กับขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีจำนวนมาก ควรใช้ไฟฟ้าสามเฟสในการขับเคลื่อน

4. ศึกษาการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีอื่น เช่น การออกแบบด้วยระบบควบคุมเซอร์โว ป้อนกลับสเตท และระบบฟิชซี เป็นต้น

5. ควรออกแบบระบบการขับเคลื่อนให้ขดลวดโดยอ้างอิงจากตำแหน่งจริงของรถ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Jean-Paul Yonner, HichamAllag. "Three-Dimensional Analytical Calculation of Permanent Magnet Interactions by "Magnetic Node" Representation." *IEEE Trans. on Magnetics.*, vol. 47, no. 8, Aug. 2011, pp. 2050-2055.
- [2] Milica B. Naumovic. "Modeling of a Didactic Magnetic Levitation System for Control Education." *IEEE Trans. on Automatic Control.*, vol. 2, no. 1, Oct. 2003. pp. 783-786.
- [3] Katsuhiko Ogata. *Modern Control Engineering*, 4th ed., Prentice-Hall, New Jersey, USA, 2002.
- [4] นคร ภัก่อชาติ, ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตร. *ปฏิบัติการไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM Cortex-M3 กับ STM32*. กรุงเทพฯ : อินโนเวตีฟอิเล็กทรอนิกส์. 2553.
- [5] **STM32F4 Datasheet** [online] [cited 2014 Jan 7].
Available from: http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user_manual/DM00039084.pdf
- [6] **ET-STAMP-STM32 Datasheet** [online] [cited 2014 Jan 7].
Available from: <http://www.ett.co.th/product/ARM/manET-STAMP-STM32.pdf>
- [7] **GP2Y0A41SK0F Datasheet** [online] [cited 2014 Jan 7].
Available from: <http://www.farnell.com/datasheets/1685694.pdf>
- [8] **TRCT5000(L) Datasheet** [online] [cited 2014 Jan 7].
Available from: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/vishay/83760.pdf>
- [9] **HRS4 Datasheet** [online] [cited 2014 Jan 7].
Available from: <http://www.hankukrelay.co.kr/img/product/hke/pdf/HRS4.pdf>
- [10] **KIA278R05PI Datasheet** [online] [cited 2014 Jan 7].
Available from: http://www.sce-projects.com/images/pdf_manual/KIA278R05.pdf
- [11] **KIA278R33PI Datasheet** [online] [cited 2014 Jan 7].
Available from: http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheets/105/249771_DS.pdf
- [12] **L298 Datasheet** [online] [cited 2014 Jan 7].
Available from: https://www.sparkfun.com/datasheets/Robotics/L298_H_Bridge.pdf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] **LM324-N Datasheet** [online] [cited 2014 Jan 7].
Available from: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm124-n.pdf>
- [14] **LM1117 Datasheet** [online] [cited 2014 Jan 7].
Available from: <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/nationalsemiconductor/LM1117.pdf>



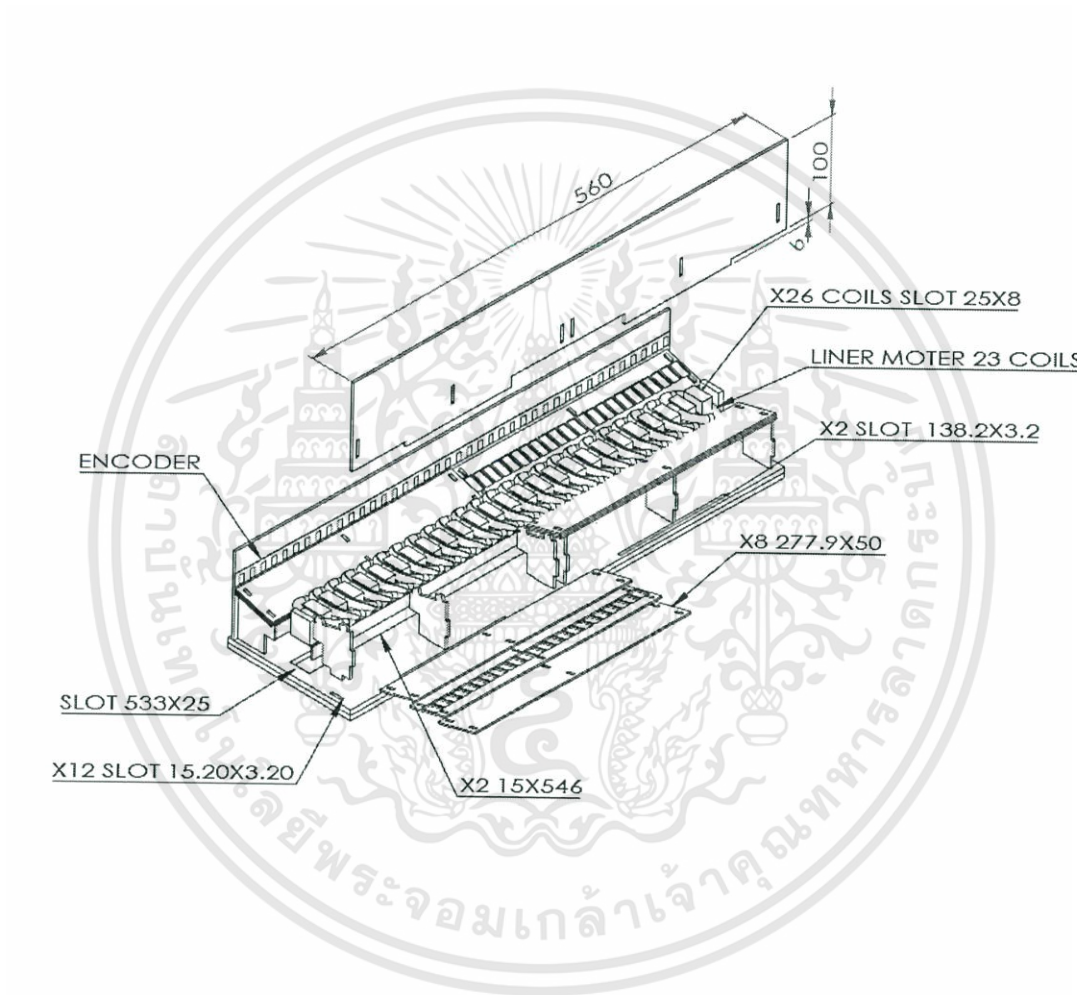
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

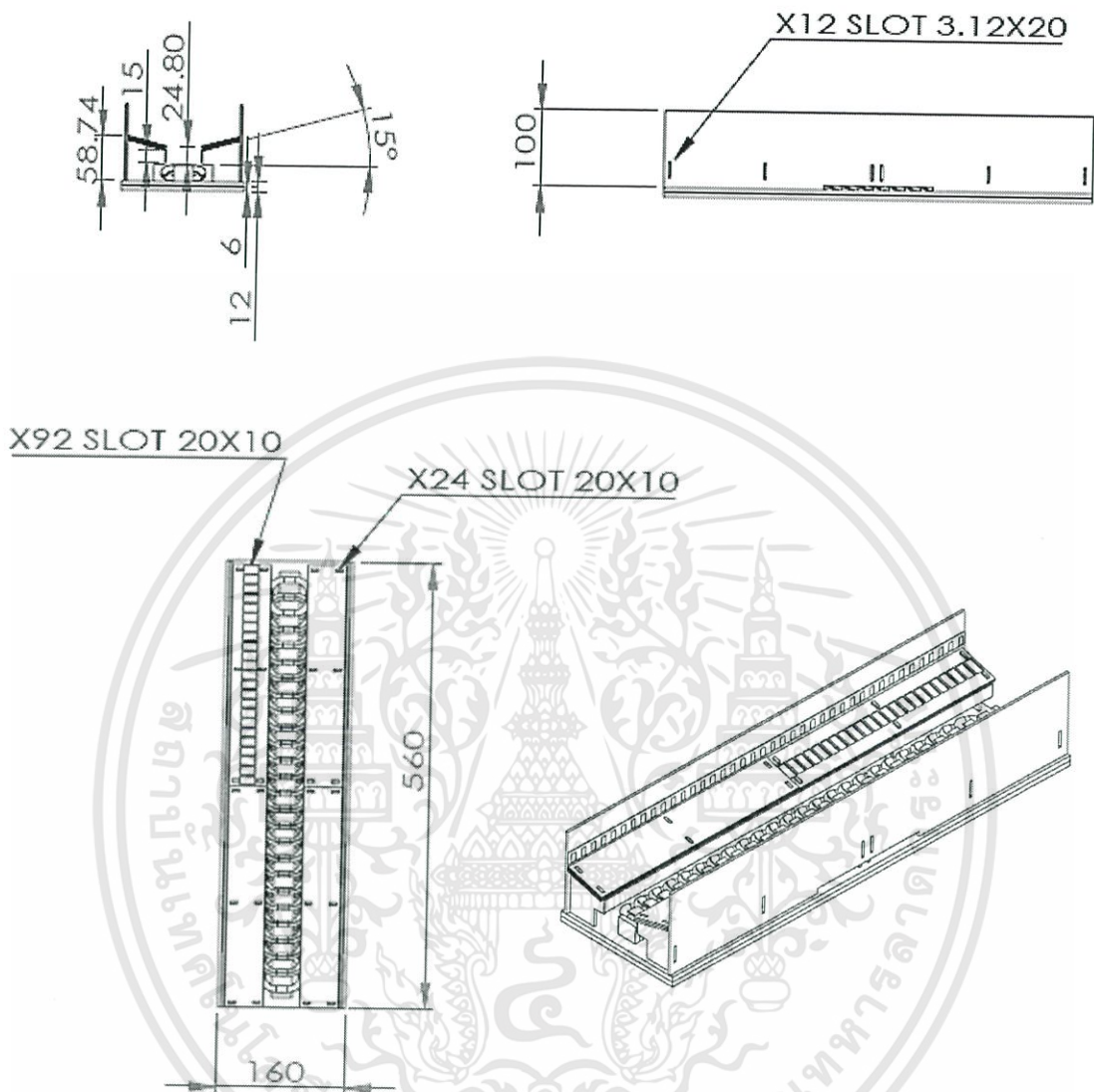
ภาคผนวก ก
แบบโครงสร้าง

ก.1 แบบโครงสร้างของราง



TITLE:		Expoloded views	
MATERIAL:	Acrylic	DWG NO.:	maglev drawing 2
WEIGHT:		SCALE:1:1	A4
		SHEET 1 OF 1	

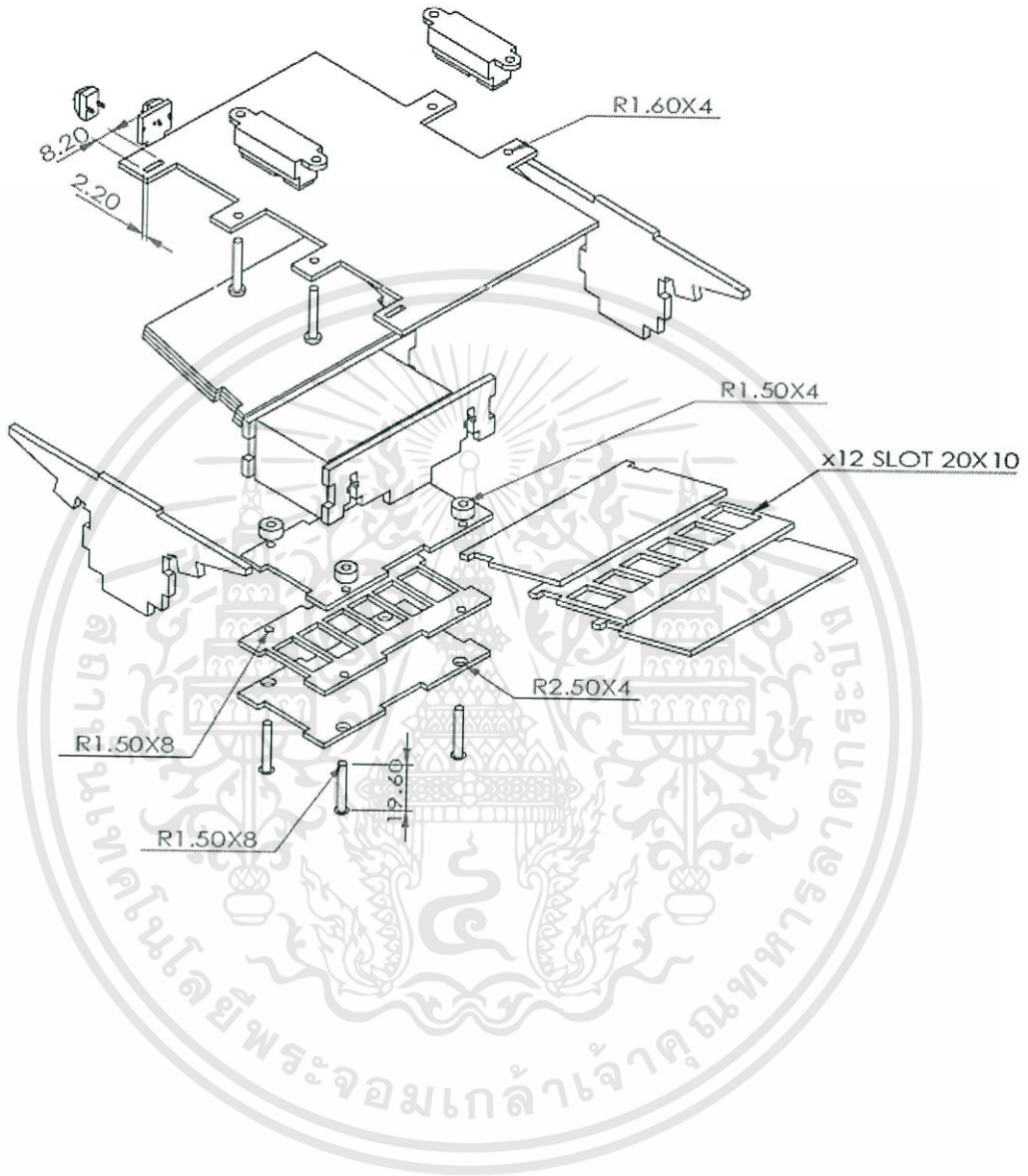
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



TITLE:		Projection Drawing	
MATERIAL:	DWG NO.:	Rails maglev 1	A4
Acrylic			
WEIGHT:	SCALE 1:10	SHEET 1 OF 1	

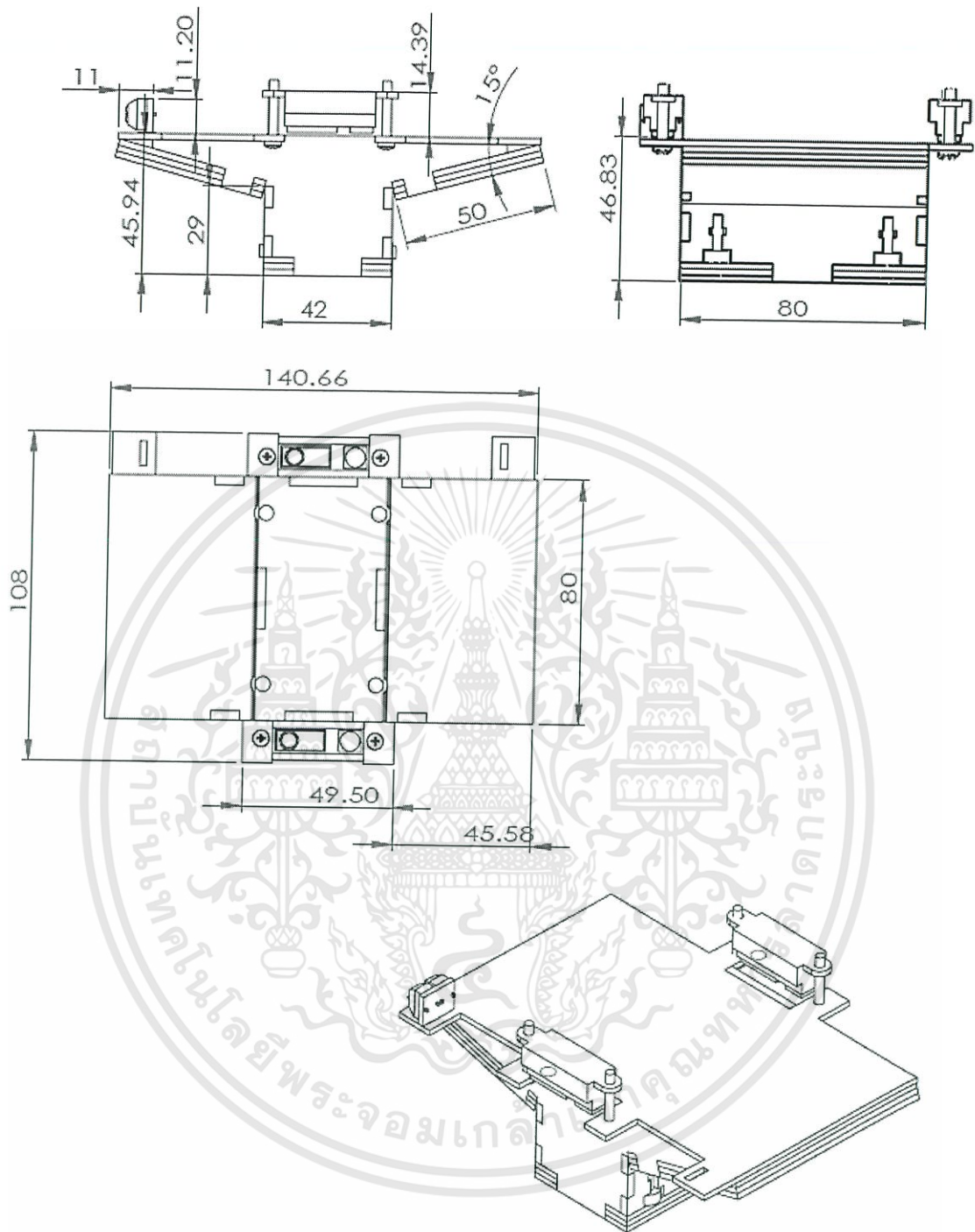
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 แบบโครงสร้างของรถ



TITLE:		Expoloded views	
MATERIAL:	Acrylic	DWG NO.	maglev drawing 2
WEIGHT:		SCALE:1:5	A4
		SHEET 1 OF 1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



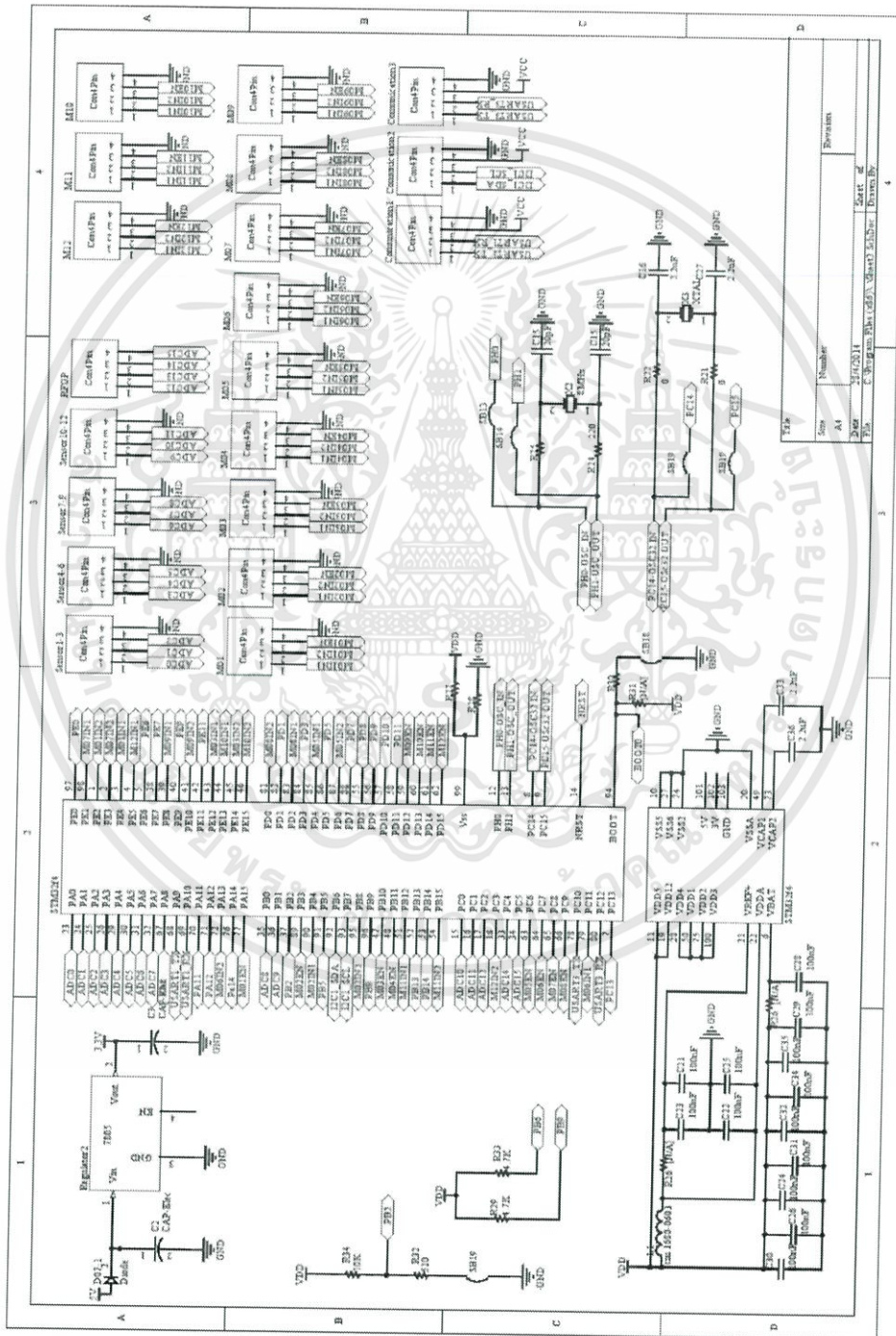
TITLE:			Projection Drawing	
MATERIAL:	Acrylic	DWG NO.:	maglev drawing	A4
WEIGHT:		SCALE:1:1	SHEET 1 OF 1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

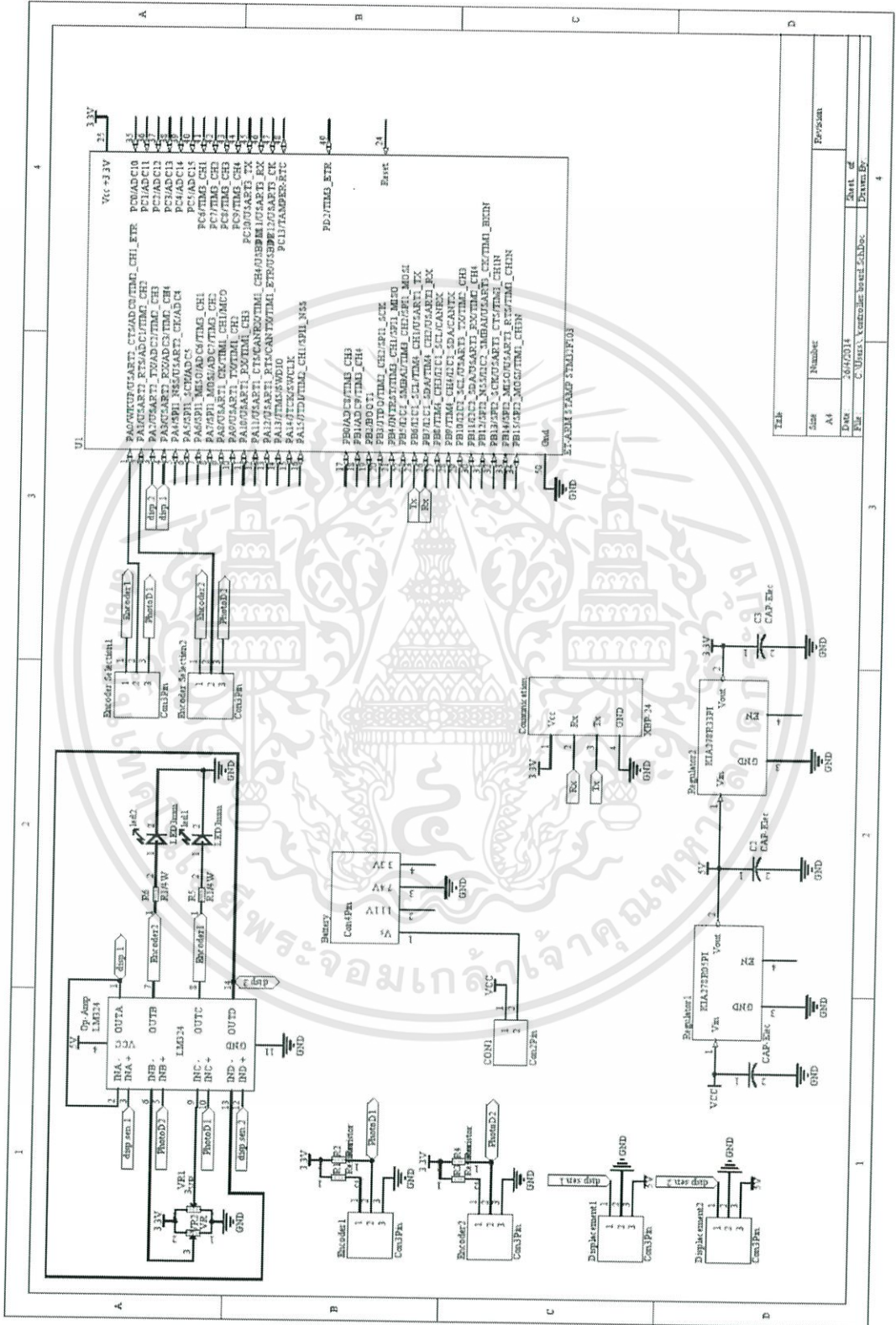
แผนผังอุปกรณ์และการเชื่อมต่อวงจร

ข.1 แผนผังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์หลัก



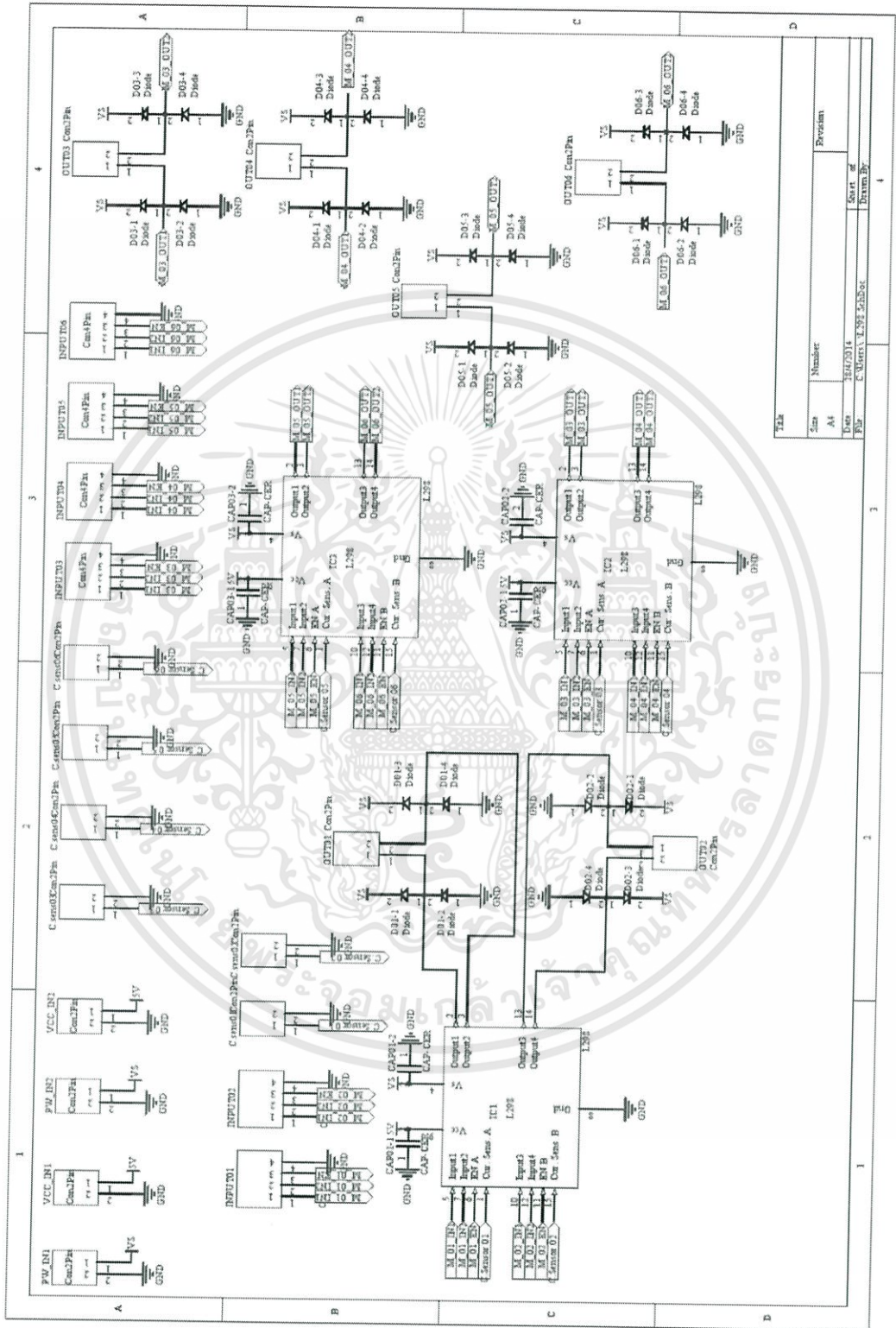
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.2 แผนผังบอร์ดไมโครคอนโทรลบนตัวรถ

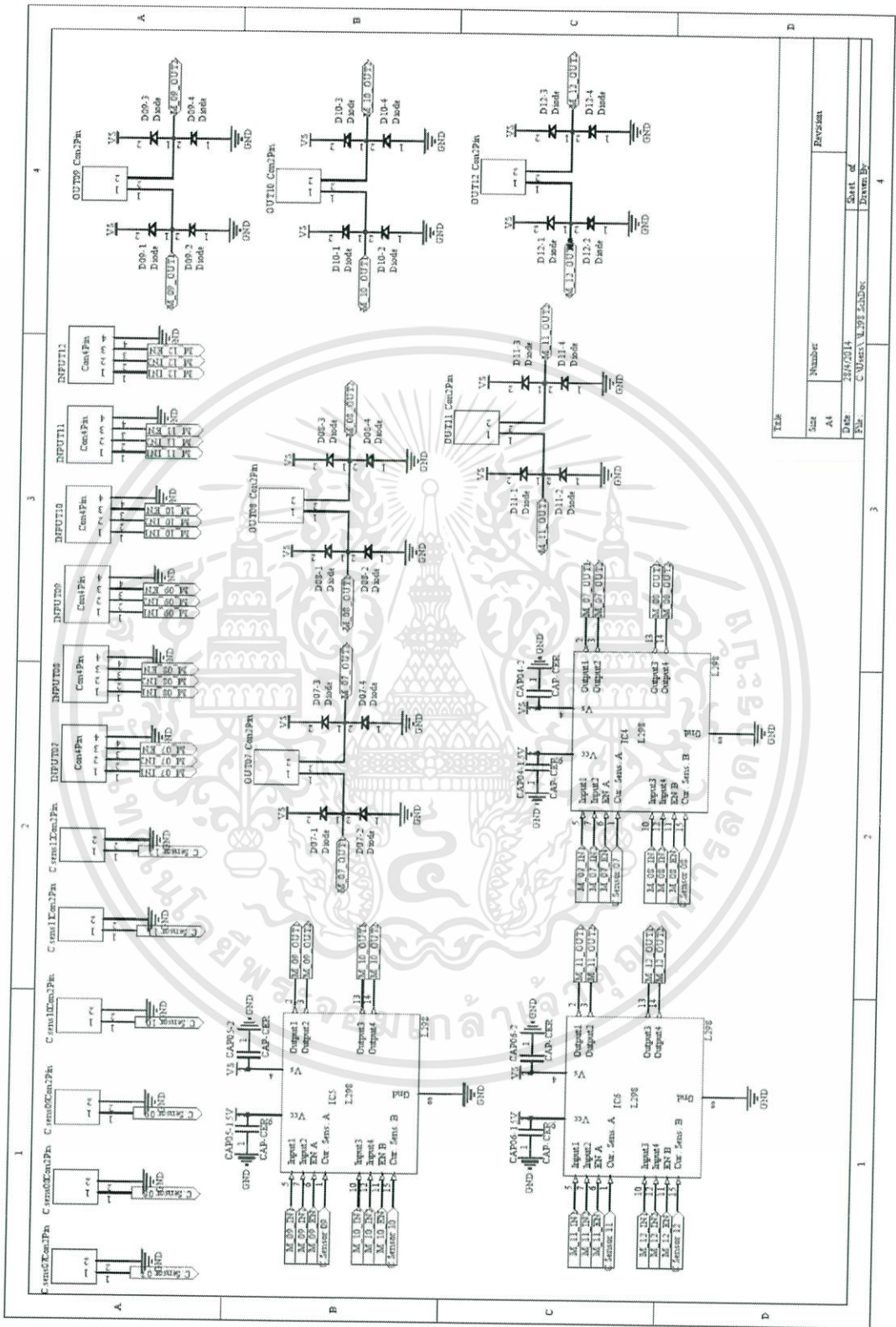


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.3 แผนผังบอร์ดวงจรขั้วกระแสให้ขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า



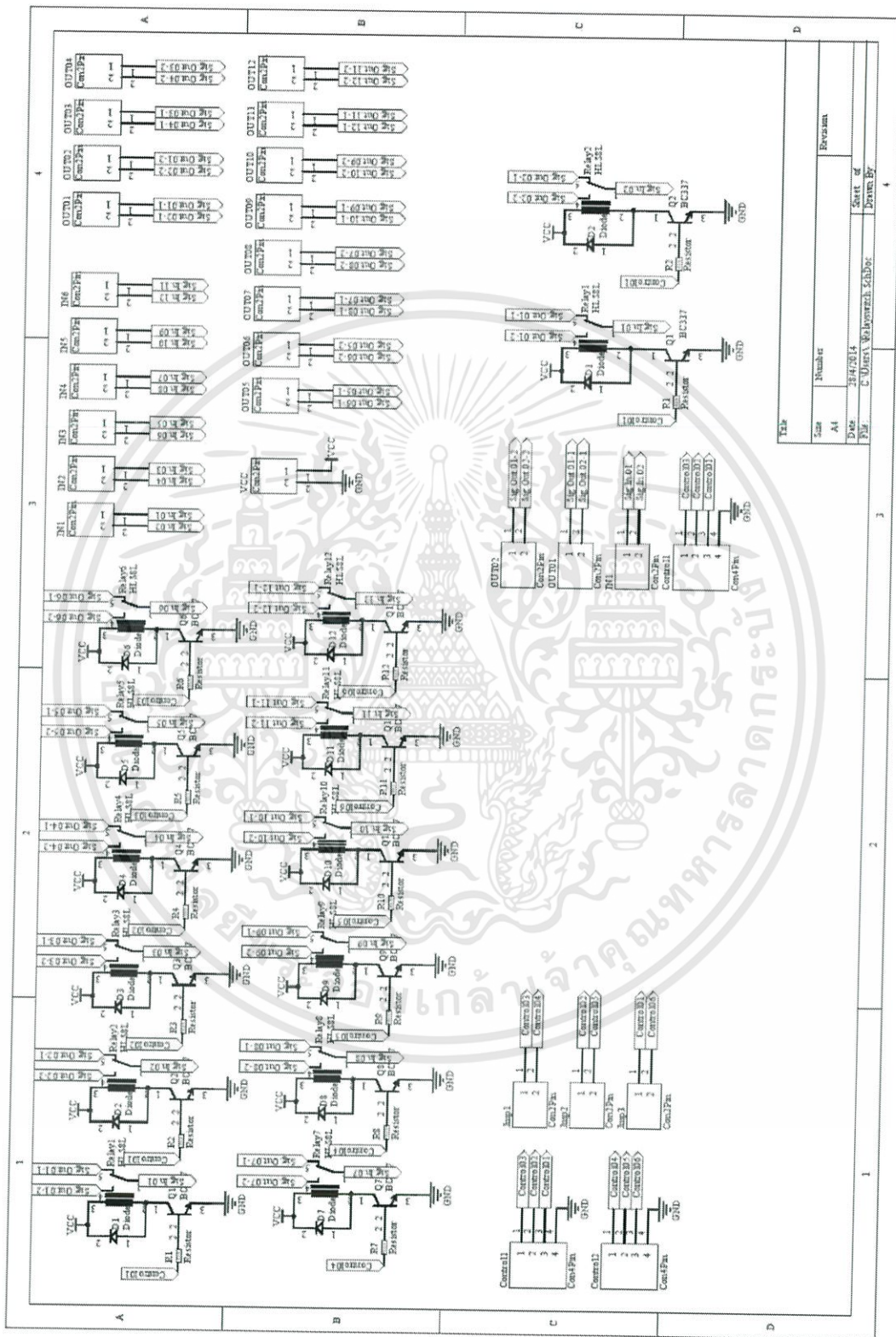
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Title	
Size	Number
A4	Rev.001
Date	Drawn By
24/03/14	
File	Printed
C:\Users\A.0123\Desktop	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข.4 แผนผังบอร์ดวงจรรีเลย์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารคู่มืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ค.1 เอกสารคู่มือการใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32f4

บอร์ด STM32f4 DISCOVERY เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้สำหรับประมวลผล มีรายละเอียดดังนี้



life.augmented

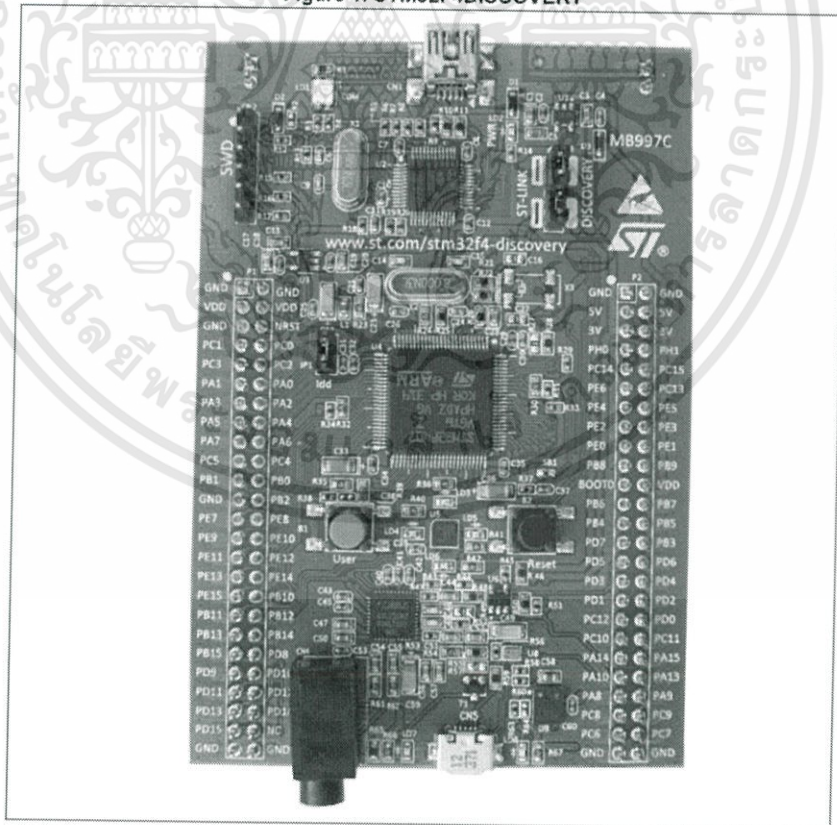
UM1472
User manual

Discovery kit for STM32F407/417 lines

Introduction

The STM32F4DISCOVERY helps you to discover the STM32F407 & STM32F417 lines' high-performance features and to develop your applications. It is based on an STM32F407VGT6 and includes an ST-LINK/V2 embedded debug tool interface, ST MEMS digital accelerometer, ST MEMS digital microphone, audio DAC with integrated class D speaker driver, LEDs, pushbuttons and a USB OTG micro-AB connector.

Figure 1. STM32F4DISCOVERY



1. Picture not contractual

2 Quick start

The STM32F4DISCOVERY is a low-cost and easy-to-use development kit to quickly evaluate and start a development with an STM32F4 high-performance microcontroller.

Before installing and using the product, please accept the Evaluation Product License Agreement from www.st.com/stm32f4-discovery.

For more information on the STM32F4DISCOVERY and for demonstration software, visit www.st.com/stm32f4-discovery.

2.1 Getting started

Follow the sequence below to configure the STM32F4DISCOVERY board and launch the DISCOVER application:

1. Check jumper position on the board, JP1 on, CN3 on (DISCOVERY selected).
2. Connect the STM32F4DISCOVERY board to a PC with a USB cable 'type A to mini-B' through USB connector CN1 to power the board. Red LED LD2 (PWR) then lights up.
3. Four LEDs between B1 and B2 buttons are blinking.
4. Press user button B1 to enable the ST MEMS sensor, move the board and observe the four LEDs blinking according to the motion direction and speed. (If you connect a second USB cable 'type A to micro-B' between PC and CN5 connector then the board is recognized as standard mouse and its motion will also control the PC cursor).
5. To study or modify the DISCOVER project related to this demo, visit www.st.com/stm32f4-discovery and follow the tutorial.
6. Discover the STM32F4 features, download and execute programs proposed in the list of projects.
7. Develop your own application using available examples.

2.2 System requirements

- Windows PC (XP, Vista, 7)
- USB type A to Mini-B USB cable

2.3 Development toolchain supporting the STM32F4DISCOVERY

- Altium, TASKING™ VX-Toolset
- Atollic TrueSTUDIO®
- IAR Embedded Workbench® for ARM (EWARM)
- Keil™, MDK-ARM

2.4 Order code

To order the STM32F4 high-performance discovery board, use the order code STM32F4DISCOVERY.

3 Features

The STM32F4DISCOVERY offers the following features:

- STM32F407VGT6 microcontroller featuring 1 MB of Flash memory, 192 KB of RAM in an LQFP100 package
- On-board ST-LINK/V2 with selection mode switch to use the kit as a standalone ST-LINK/V2 (with SWD connector for programming and debugging)
- Board power supply: through USB bus or from an external 5V supply voltage
- External application power supply: 3V and 5V
- LIS3DSH, ST MEMS motion sensor, 3-axis digital output accelerometer
- MP45DT02, ST MEMS audio sensor, omnidirectional digital microphone
- CS43L22, audio DAC with integrated class D speaker driver
- Eight LEDs:
 - LD1 (red/green) for USB communication
 - LD2 (red) for 3.3V power on
 - Four user LEDs, LD3 (orange), LD4 (green), LD5 (red) and LD6 (blue)
 - 2 USB OTG LEDs LD7 (green) VBus and LD8 (red) over-current
- Two pushbuttons (user and reset)
- USB OTG with micro-AB connector
- Extension header for LQFP100 I/Os for quick connection to prototyping board and easy probing

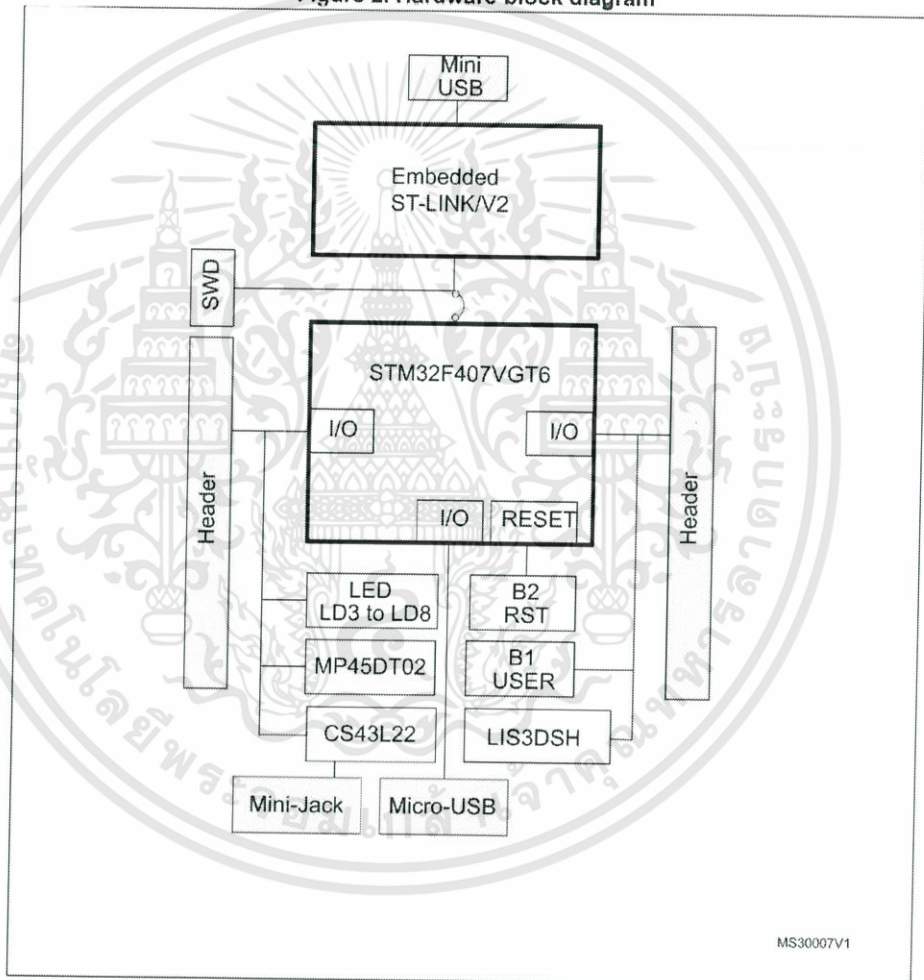
4 Hardware and layout

The STM32F4DISCOVERY is designed around the STM32F407VGT6 microcontroller in a 100-pin LQFP package.

Figure 2 illustrates the connections between the STM32F407VGT6 and its peripherals (ST-LINK/V2, pushbutton, LED, Audio DAC, USB, ST MEMS accelerometer, ST MEMS microphone, and connectors).

Figure 3 and Figure 4 help you to locate these features on the STM32F4DISCOVERY.

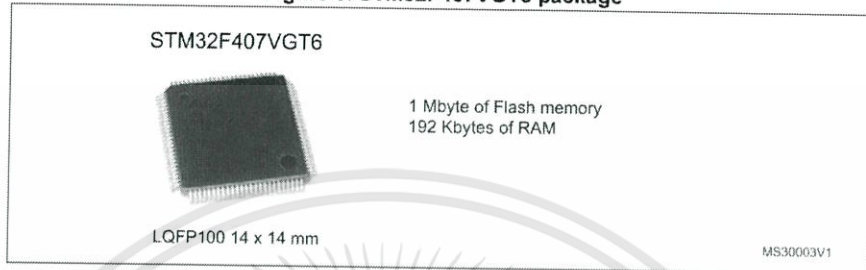
Figure 2. Hardware block diagram



4.1 STM32F407VGT6 microcontroller

This ARM Cortex-M4 32-bit MCU with FPU has 210 DMIPS, up to 1 MB Flash/192+4 KB RAM, USB OTG HS/FS, Ethernet, 17 TIMs, 3 ADCs, 15 comm. interfaces and a camera.

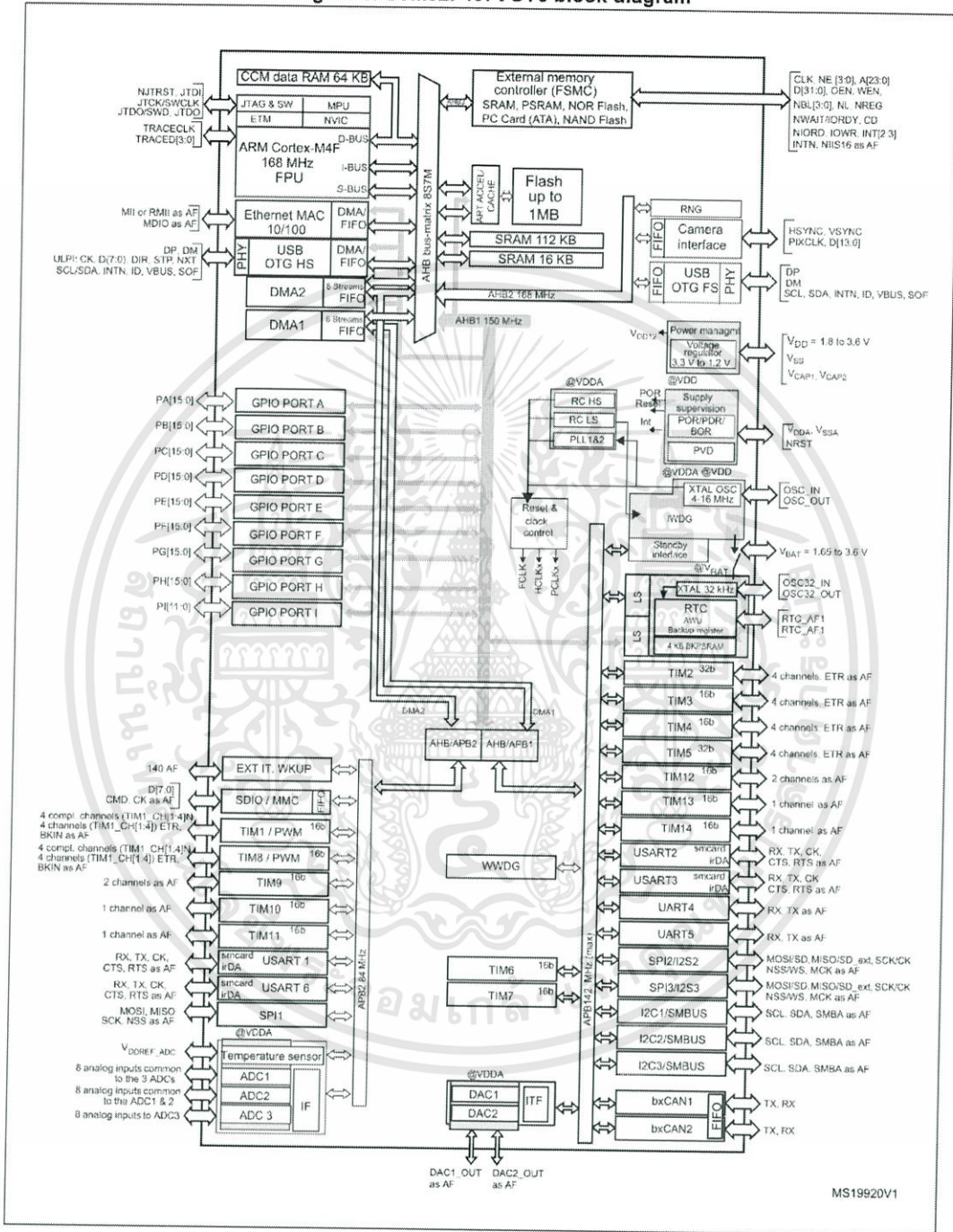
Figure 5. STM32F407VGT6 package



This device provides the following benefits.

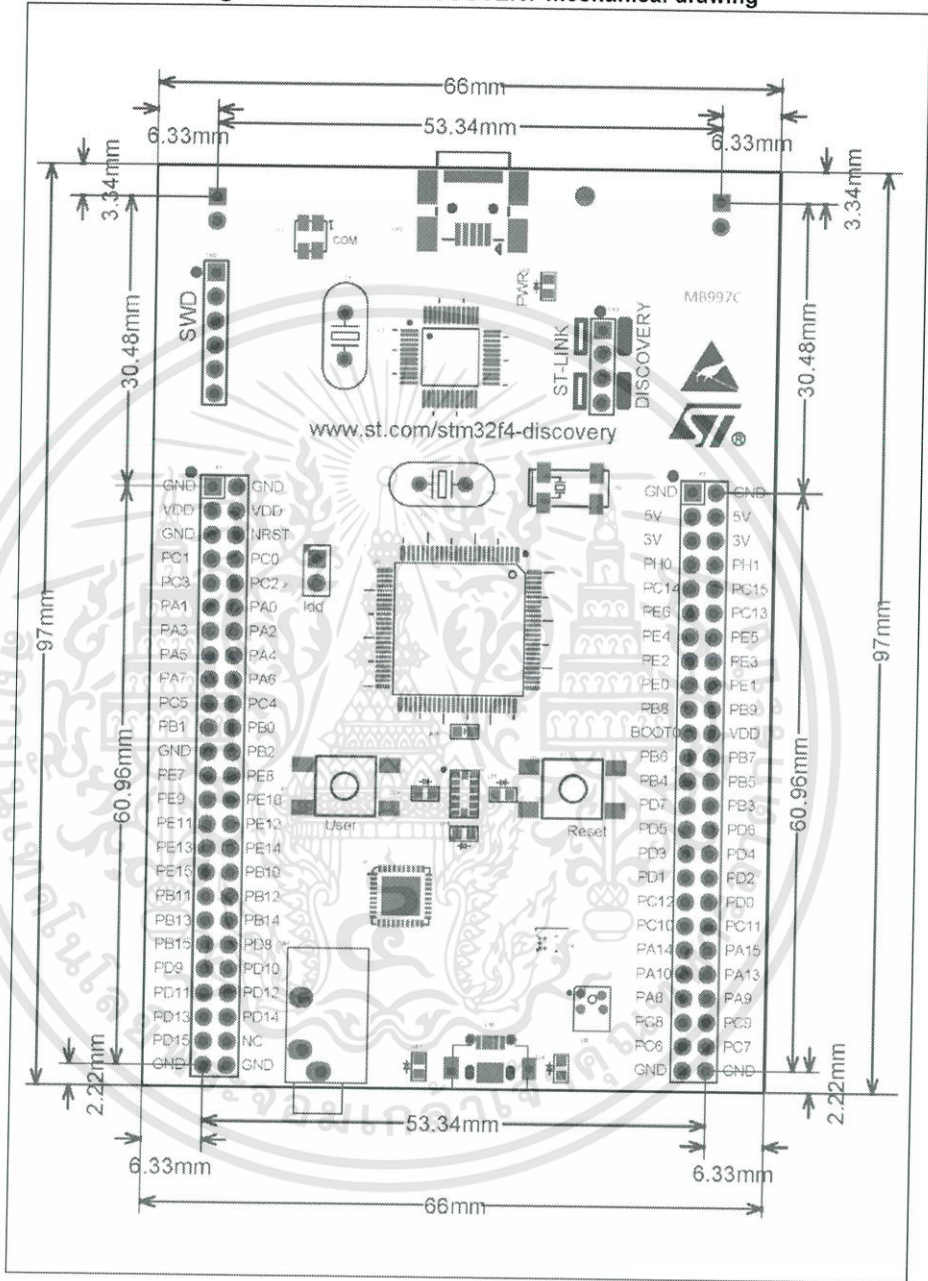
- 168 MHz/210 DMIPS Cortex-M4 with single cycle DSP MAC and floating point unit providing:
 - Boosted execution of control algorithms
 - More features possible for your applications
 - Ease of use
 - Better code efficiency
 - Faster time to market
 - Elimination of scaling and saturation
 - Easier support for meta-language tools
- Designed for high performance and ultra fast data transfers; ART Accelerator, 32-bit, 7-layer AHB bus matrix with 7 masters and 8 slaves including 2 blocks of SRAM, Multi DMA controllers: 2 general purpose, 1 for USB HS, 1 for Ethernet, One SRAM block dedicated to the core, providing performance equivalent to 0-wait execution from Flash Concurrent execution and data transfers and simplified resource allocation
- Outstanding power efficiency; Ultra-low dynamic power, RTC <1 μ A typical in VBAT mode, 3.6 V down to 1.7 V VDD, Voltage regulator with power scaling capability, providing extra flexibility to reduce power consumption for applications requiring both high processing and low power performance when running at low voltage or on a rechargeable battery
- Maximum integration: Up to 1 Mbyte of on-chip Flash memory, 192 Kbytes of SRAM, reset circuit, internal RCs, PLLs, WLCSP package available, providing more features in space constrained applications
- Superior and innovative peripherals providing new possibilities to connect and communicate high speed data and more precision due to high resolution
- Extensive tools and software solutions providing a wide choice within the STM32 ecosystem to develop your applications.

Figure 6. STM32F407VGT6 block diagram



5 Mechanical drawing

Figure 10. STM32F4DISCOVERY mechanical drawing



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

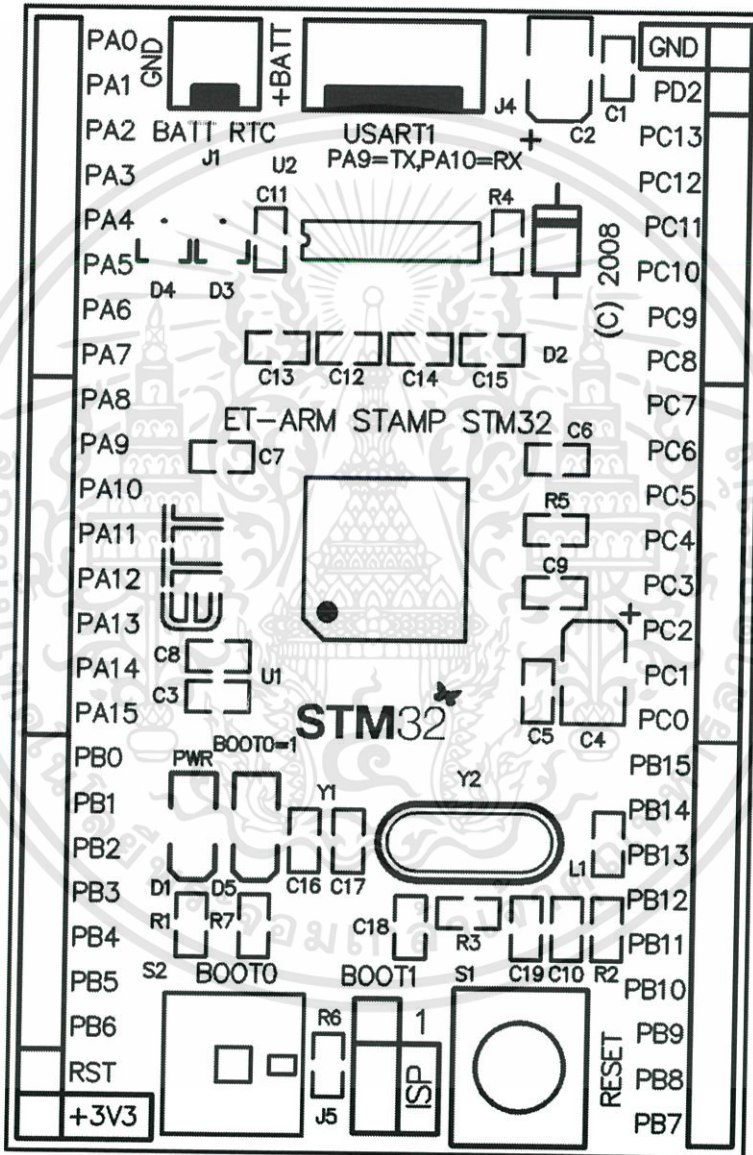
ค.2 เอกสารคู่มือการใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ET-ARM STAMP STM32

บอร์ด ET-ARM STAMP STM32 เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้สำหรับประมวลผล มีรายละเอียดดังนี้

คู่มือการใช้งานบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น ET-ARM STAMP STM32 (Cortex-M3)

ETT

ET-ARM STAMP STM32



รูปแสดง โครงสร้างของบอร์ด ET-ARM STAMP STM32

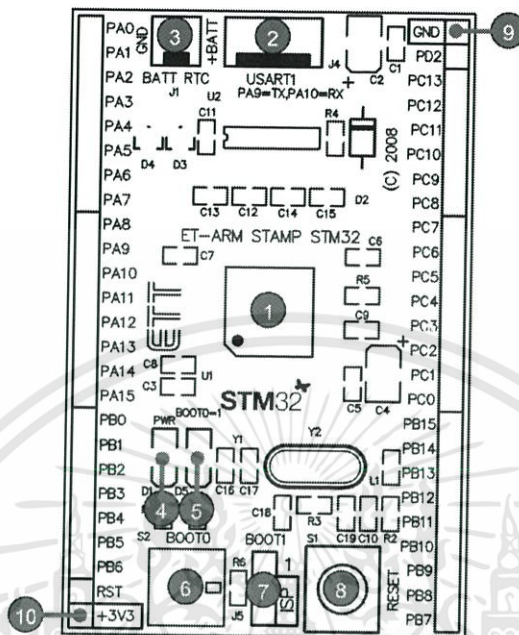
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของบอร์ด รุ่น ET-ARM STAMP STM32

1. ใช้ MCU 32Bit ตระกูล ARM Cortex-M3 ขนาด 64Pin(LQFP) ของ “STmicroelectronics”
2. ใช้ Crystal 8.00 MHz + Phase-Locked Loop (PLL) Run ความถี่ 72 MHz ประมวลผลด้วยความเร็ว 1.25 DMIPS/MHz เทียบเท่ากับความเร็วการประมวลผลเท่ากับ 90MIPS
3. มีวงจรร RTC(Real Time Clock) พร้อม XTAL ค่า 32.768KHz และ Battery Backup
4. รองรับการโปรแกรมแบบ In-System Programming (ISP) และ In-Application Programming (IAP) ผ่านทาง On-Chip Boot-Loader Software ทางพอร์ต USART1 (RS232)
5. มีวงจรรสื่อสาร RS232 โดยใช้ขั้วต่อแบบ 4-PIN มาตรฐาน ETT จำนวน 1 ช่อง
6. มี 48 Bit GPIO พร้อม 5V-Tolerant สำหรับประยุกต์ต่างๆโดยอิสระ
7. ใช้กับแหล่งจ่ายไฟขนาด +3.3V
8. ขั้วต่อใช้งานวางตัวบน Pin Header ระยะห่าง 2.54mm(100mil) ขนาด 50 Pin (ด้านละ 25Pin) ระยะห่าง 1.5 นิ้ว(1500mil/38.1mm)ง่ายต่อการนำไปต่อประยุกต์ใช้งาน และ ขยายวงจร I/O สามารถใช้กับ Project Board และ PCB

Specification Peripheral	ET-ARM STAMP STM32F103/128	ET-ARM STAMP STM32F103/512
MCU	STM32F103RBT6	STM32F103RET6
Flash	128K	512K
RAM	20K	64K
SPI	2	3 (I2S x 2)
I2C	2	2
USART	3	5
USB	1	1
CAN	1	1
SDIO	-	1
ADC 12 Bit	16	16
DAC 12 Bit	-	2

โครงสร้างบอร์ด ET-ARM STAMP STM32



รูปแสดง ตำแหน่งของอุปกรณ์ต่างๆในบอร์ด ET-ARM STAMP STM32

- หมายเลข 1 คือ MCU ประจําบอร์ด
- หมายเลข 2 คือ ขั้วต่อ USART1(RS232) สำหรับใช้งาน และ Download
- หมายเลข 3 คือ ขั้วต่อ Battery Backup-RTC ขนาด +3V
- หมายเลข 4 คือ LED Power
- หมายเลข 5 คือ LED BOOT0 (BOOT0=1)
- หมายเลข 6 คือ สวิตช์ BOOT0 ใช้ร่วมกับ Jumper J1 สำหรับเลือกโหมดการทำงานของบอร์ดแบบ Download จาก USART1 หรือ Run ปกติ โดย ON เพื่อ Download และ OFF เพื่อ Run
- หมายเลข 7 คือ Jumper(BOOT1) ใช้ร่วมกับสวิตช์ BOOT0 สำหรับเลือกโหมดการทำงานของบอร์ดแบบ Download จาก USART1 หรือ Run ปกติ ซึ่งต้องกำหนดไว้ที่ ISP เสมอ
- หมายเลข 8 คือ สวิตช์ RESET สำหรับ RESET การทำงานของ MCU
- หมายเลข 9 คือ จุดต่อ GND
- หมายเลข 10 คือ ไฟเลี้ยงวงจร +3.3V

ค.3 เอกสารคู่มือการใช้งาน L298

ไอซี L298 เป็นไอซีสำหรับขับกระแสให้กับขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า มีรายละเอียดดังนี้



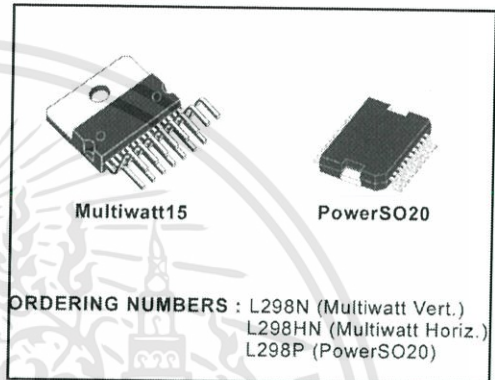
L298

DUAL FULL-BRIDGE DRIVER

- OPERATING SUPPLY VOLTAGE UP TO 46 V
- TOTAL DC CURRENT UP TO 4 A
- LOW SATURATION VOLTAGE
- OVERTEMPERATURE PROTECTION
- LOGICAL "0" INPUT VOLTAGE UP TO 1.5 V (HIGH NOISE IMMUNITY)

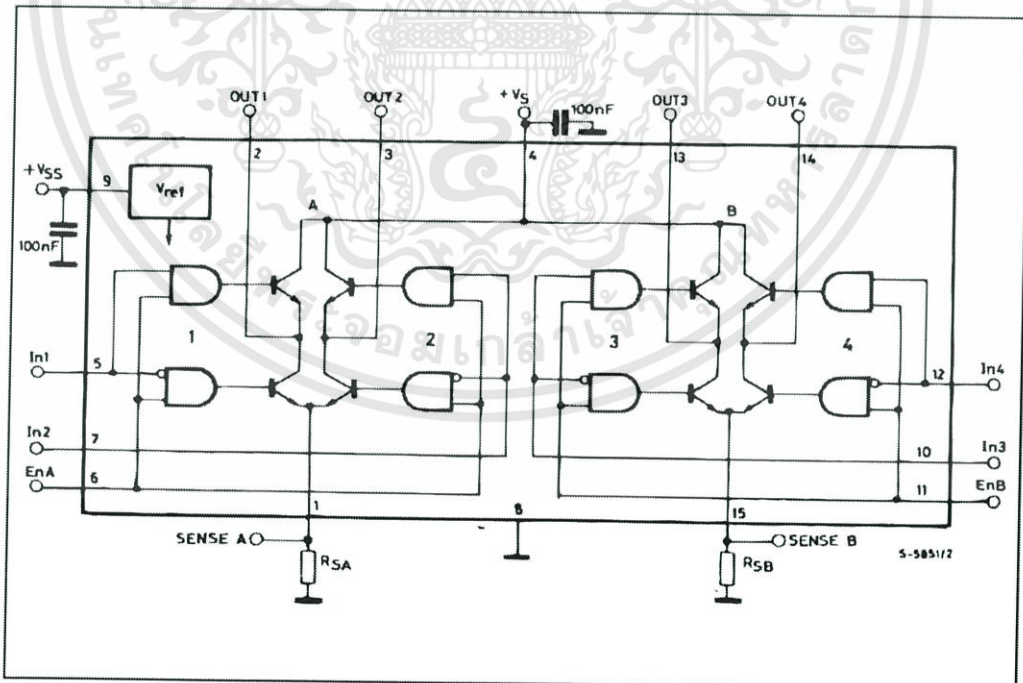
DESCRIPTION

The L298 is an integrated monolithic circuit in a 15-lead Multiwatt and PowerSO20 packages. It is a high voltage, high current dual full-bridge driver designed to accept standard TTL logic levels and drive inductive loads such as relays, solenoids, DC and stepping motors. Two enable inputs are provided to enable or disable the device independently of the input signals. The emitters of the lower transistors of each bridge are connected together and the corresponding external terminal can be used for the con-



nection of an external sensing resistor. An additional supply input is provided so that the logic works at a lower voltage.

BLOCK DIAGRAM

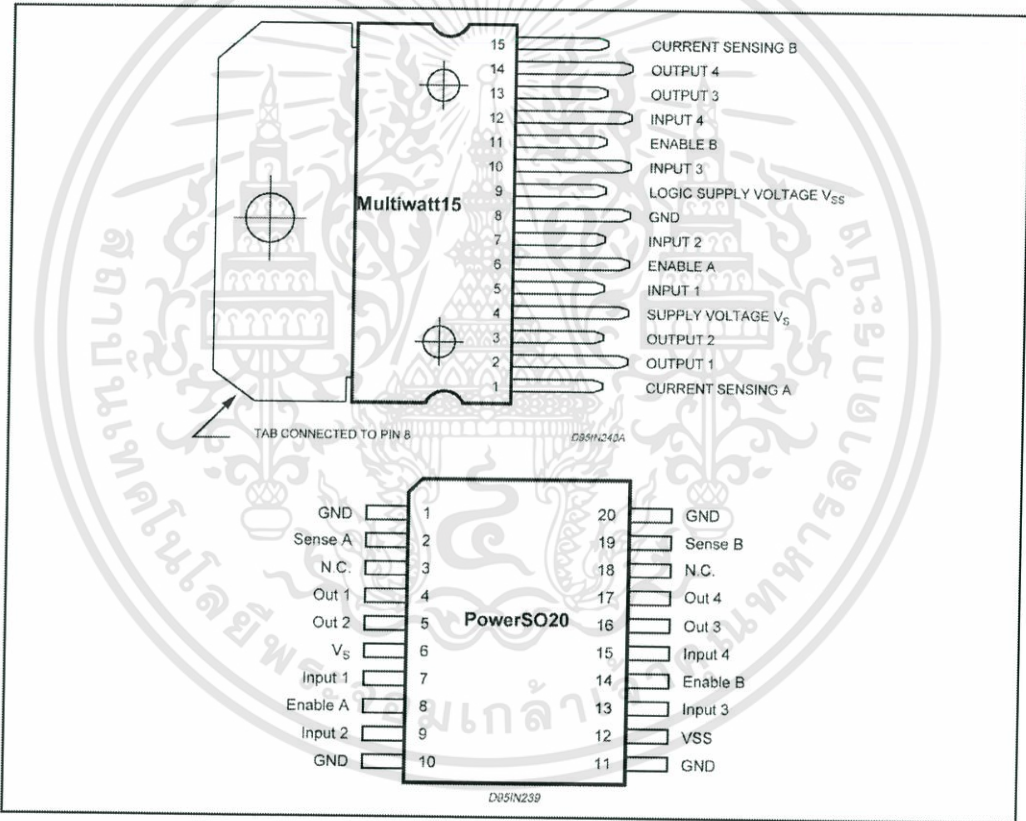


L298

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
V _S	Power Supply	50	V
V _{SS}	Logic Supply Voltage	7	V
V _I , V _{En}	Input and Enable Voltage	-0.3 to 7	V
I _O	Peak Output Current (each Channel) - Non Repetitive (t = 100µs) - Repetitive (80% on -20% off; t _{on} = 10ms) - DC Operation	3 2.5 2	A A A
V _{sens}	Sensing Voltage	-1 to 2.3	V
P _{tct}	Total Power Dissipation (T _{case} = 75°C)	25	W
T _{op}	Junction Operating Temperature	-25 to 130	°C
T _{stg} , T _J	Storage and Junction Temperature	-40 to 150	°C

PIN CONNECTIONS (top view)



THERMAL DATA

Symbol	Parameter		PowerSO20	Multiwatt15	Unit
R _{th j-case}	Thermal Resistance Junction-case	Max.	-	3	°C/W
R _{th j-amb}	Thermal Resistance Junction-ambient	Max.	13 (*)	35	°C/W

(*) Mounted on aluminum substrate



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L298

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
T ₁ (V _i)	Source Current Turn-off Delay	0.5 V _i to 0.9 I _L (2); (4)		1.5		μs
T ₂ (V _i)	Source Current Fall Time	0.9 I _L to 0.1 I _L (2); (4)		0.2		μs
T ₃ (V _i)	Source Current Turn-on Delay	0.5 V _i to 0.1 I _L (2); (4)		2		μs
T ₄ (V _i)	Source Current Rise Time	0.1 I _L to 0.9 I _L (2); (4)		0.7		μs
T ₅ (V _i)	Sink Current Turn-off Delay	0.5 V _i to 0.9 I _L (3); (4)		0.7		μs
T ₆ (V _i)	Sink Current Fall Time	0.9 I _L to 0.1 I _L (3); (4)		0.25		μs
T ₇ (V _i)	Sink Current Turn-on Delay	0.5 V _i to 0.9 I _L (3); (4)		1.6		μs
T ₈ (V _i)	Sink Current Rise Time	0.1 I _L to 0.9 I _L (3); (4)		0.2		μs
f _c (V _i)	Commutation Frequency	I _L = 2A		25	40	KHz
T ₁ (V _{en})	Source Current Turn-off Delay	0.5 V _{en} to 0.9 I _L (2); (4)		3		μs
T ₂ (V _{en})	Source Current Fall Time	0.9 I _L to 0.1 I _L (2); (4)		1		μs
T ₃ (V _{en})	Source Current Turn-on Delay	0.5 V _{en} to 0.1 I _L (2); (4)		0.3		μs
T ₄ (V _{en})	Source Current Rise Time	0.1 I _L to 0.9 I _L (2); (4)		0.4		μs
T ₅ (V _{en})	Sink Current Turn-off Delay	0.5 V _{en} to 0.9 I _L (3); (4)		2.2		μs
T ₆ (V _{en})	Sink Current Fall Time	0.9 I _L to 0.1 I _L (3); (4)		0.35		μs
T ₇ (V _{en})	Sink Current Turn-on Delay	0.5 V _{en} to 0.9 I _L (3); (4)		0.25		μs
T ₈ (V _{en})	Sink Current Rise Time	0.1 I _L to 0.9 I _L (3); (4)		0.1		μs

- 1) Sensing voltage can be -1 V for t ≤ 50 μsec, in steady state V_{en} min ≥ -0.5 V.
- 2) See fig. 2.
- 3) See fig. 4.
- 4) The load must be a pure resistor.

Figure 1 : Typical Saturation Voltage vs. Output Current.

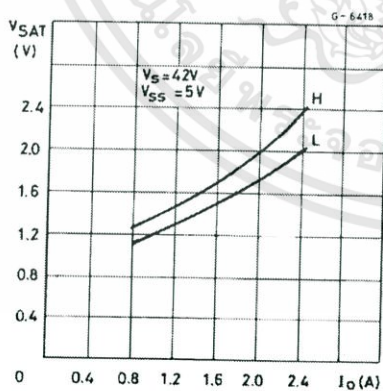
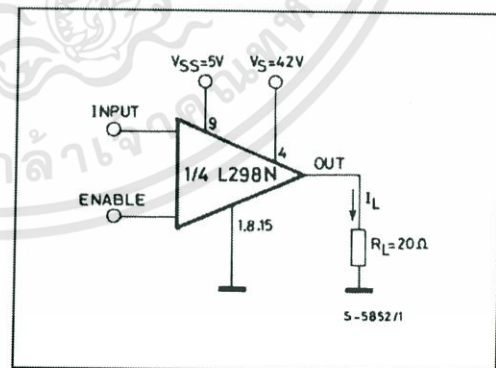


Figure 2 : Switching Times Test Circuits.



Note : For INPUT Switching, set EN = H
For ENABLE Switching, set IN = H

ค.4 เอกสารคู่มือการใช้งาน LM324

ไอซี LM324 เป็นไอซีออปแอมป์ใช้สำหรับต่อวงจร มีรายละเอียดดังนี้



LM124-N, LM224-N, LM2902-N, LM324-N

www.ti.com

SNOSC16B –MAY 2004 –REVISED SEPTEMBER 2004

LM124-N/LM224-N/LM324-N/LM2902-N Low Power Quad Operational Amplifiers

Check for Samples: LM124-N, LM224-N, LM2902-N, LM324-N

FEATURES

- Internally Frequency Compensated for Unity Gain
- Large DC Voltage Gain 100 dB
- Wide Bandwidth (Unity Gain) 1 MHz (Temperature Compensated)
- Wide Power Supply Range:
 - Single Supply 3V to 32V
 - or Dual Supplies $\pm 1.5V$ to $\pm 16V$
- Very Low Supply Current Drain (700 μA)—Essentially Independent of Supply Voltage
- Low Input Biasing Current 45 nA (Temperature Compensated)
- Low Input Offset Voltage 2 mV
 - and Offset Current: 5 nA
- Input Common-Mode Voltage Range Includes Ground
- Differential Input Voltage Range Equal to the Power Supply Voltage
- Large Output Voltage Swing 0V to $V^+ - 1.5V$

UNIQUE CHARACTERISTICS

- In the Linear Mode the Input Common-Mode Voltage Range Includes Ground and the Output Voltage can also Swing to Ground, Even Though Operated from Only a Single Power Supply Voltage
- The Unity Gain Cross Frequency is Temperature Compensated
- The Input Bias Current is also Temperature Compensated

ADVANTAGES

- Eliminates Need for Dual Supplies
- Four Internally Compensated Op Amps in a Single Package
- Allows Directly Sensing Near GND and V_{OUT} also Goes to GND
- Compatible with All Forms of Logic
- Power Drain Suitable for Battery Operation

DESCRIPTION

The LM124-N series consists of four independent, high gain, internally frequency compensated operational amplifiers which were designed specifically to operate from a single power supply over a wide range of voltages. Operation from split power supplies is also possible and the low power supply current drain is independent of the magnitude of the power supply voltage.

Application areas include transducer amplifiers, DC gain blocks and all the conventional op amp circuits which now can be more easily implemented in single power supply systems. For example, the LM124-N series can be directly operated off of the standard +5V power supply voltage which is used in digital systems and will easily provide the required interface electronics without requiring the additional $\pm 15V$ power supplies.



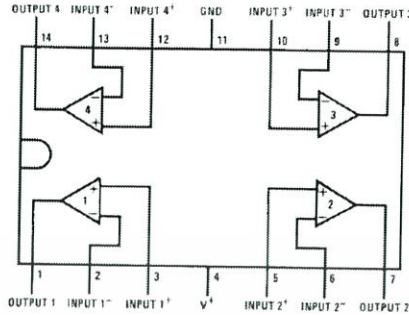
Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet. All trademarks are the property of their respective owners.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of the Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

Copyright © 2004, Texas Instruments Incorporated

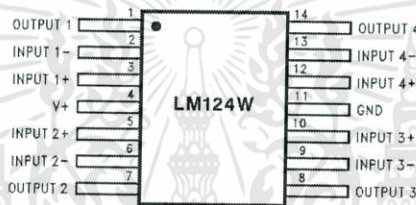
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Connection Diagrams



Note 1: LM124A available per JM38510/11006
 Note 2: LM124-N available per JM38510/11005
 Note 3: See STD Mil DWG 5962R99504 for Radiation Tolerant Device

Figure 1. Dual-In-Line Package - Top View
 See Package Number J0014A D0014A or NFF0014A

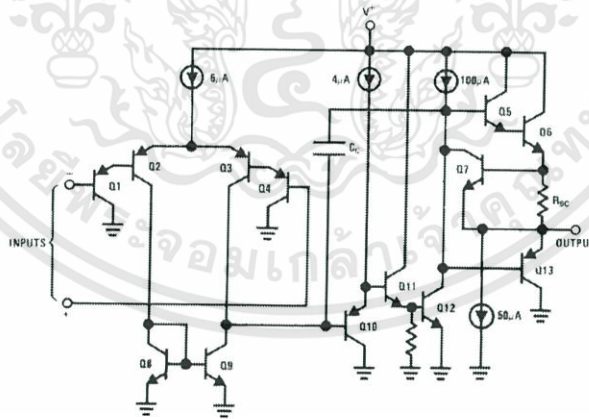


Note 3: See STD Mil DWG 5962R99504 for Radiation Tolerant Device

Figure 2. See Package Number NAD0014B
 See Package Number NAC0014A

Schematic Diagram

(Each Amplifier)





These devices have limited built-in ESD protection. The leads should be shorted together or the device placed in conductive foam during storage or handling to prevent electrostatic damage to the MOS gates.


ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ⁽¹⁾⁽²⁾

		LM124-N/LM224-N/LM324-N LM124A/LM224A/LM324A	LM2902-N
Supply Voltage, V^+		32V	26V
Differential Input Voltage		32V	26V
Input Voltage		-0.3V to +32V	-0.3V to +26V
Input Current ($V_{IN} < -0.3V$) ⁽³⁾		50 mA	50 mA
Power Dissipation ⁽⁴⁾	PDIP	1130 mW	1130 mW
	CDIP	1260 mW	1260 mW
	SOIC Package	800 mW	800 mW
Output Short-Circuit to GND (One Amplifier) ⁽⁵⁾			
$V^+ \leq 15V$ and $T_A = 25^\circ C$		Continuous	Continuous
Operating Temperature Range			-40°C to +85°C
LM324-N/LM324A		0°C to +70°C	
LM224-N/LM224A		-25°C to +85°C	
LM124-N/LM124A		-55°C to +125°C	
Storage Temperature Range		-65°C to +150°C	-65°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering, 10 seconds)		260°C	260°C
Soldering Information	Dual-In-Line Package	Soldering (10 seconds)	260°C
	Small Outline Package	Vapor Phase (60 seconds)	215°C
		Infrared (15 seconds)	220°C
ESD Tolerance ⁽⁶⁾		250V	250V

- (1) Refer to RETS124AX for LM124A military specifications and refer to RETS124X for LM124-N military specifications.
- (2) If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the Texas Instruments Sales Office/
- (3) This input current will only exist when the voltage at any of the input leads is driven negative. It is due to the collector-base junction of the input PNP transistors becoming forward biased and thereby acting as input diode clamps. In addition to this diode action, there is also lateral NPN parasitic transistor action on the IC chip. This transistor action can cause the output voltages of the op amps to go to the V^+ voltage level (or to ground for a large overdrive) for the time duration that an input is driven negative. This is not destructive and normal output states will re-establish when the input voltage, which was negative, again returns to a value greater than -0.3V (at 25°C).
- (4) For operating at high temperatures, the LM324-N/LM324A/LM2902-N must be derated based on a +125°C maximum junction temperature and a thermal resistance of 88°C/W which applies for the device soldered in a printed circuit board, operating in a still air ambient. The LM224-N/LM224A and LM124-N/LM124A can be derated based on a +150°C maximum junction temperature. The dissipation is the total of all four amplifiers—use external resistors, where possible, to allow the amplifier to saturate or to reduce the power which is dissipated in the integrated circuit.
- (5) Short circuits from the output to V^+ can cause excessive heating and eventual destruction. When considering short circuits to ground, the maximum output current is approximately 40 mA independent of the magnitude of V^+ . At values of supply voltage in excess of +15V, continuous short-circuits can exceed the power dissipation ratings and cause eventual destruction. Destructive dissipation can result from simultaneous shorts on all amplifiers.
- (6) Human body model, 1.5 k Ω in series with 100 pF.

ค.5 เอกสารคู่มือการใช้งาน LM1117

ไอซี LM1117 เป็นไอซีรีกขาระดับแรงดัน ซึ่งมีแรงดันเอาต์พุต 3.3 โวลต์ มีรายละเอียดดังนี้


April 2006

LM1117/LM1117I

800mA Low-Dropout Linear Regulator

General Description

The LM1117 is a series of low dropout voltage regulators with a dropout of 1.2V at 800mA of load current. It has the same pin-out as National Semiconductor's industry standard LM317.

The LM1117 is available in an adjustable version, which can set the output voltage from 1.25V to 13.8V with only two external resistors. In addition, it is also available in five fixed voltages, 1.8V, 2.5V, 2.85V, 3.3V, and 5V.

The LM1117 offers current limiting and thermal shutdown. Its circuit includes a zener trimmed bandgap reference to assure output voltage accuracy to within $\pm 1\%$.

The LM1117 series is available in LLP, TO-263, SOT-223, TO-220, and TO-252 D-PAK packages. A minimum of 10 μ F tantalum capacitor is required at the output to improve the transient response and stability.

Features

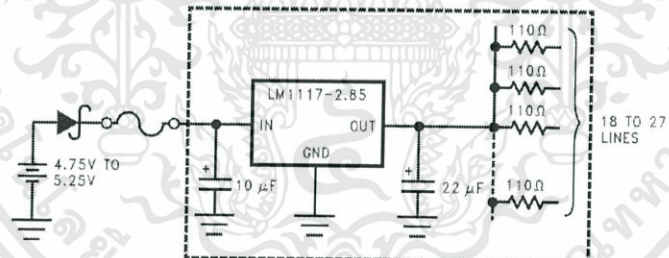
- Available in 1.8V, 2.5V, 2.85V, 3.3V, 5V, and Adjustable Versions
- Space Saving SOT-223 and LLP Packages
- Current Limiting and Thermal Protection
- Output Current: 800mA
- Line Regulation: 0.2% (Max)
- Load Regulation: 0.4% (Max)
- Temperature Range: 0°C to 125°C (LM1117), -40°C to 125°C (LM1117I)

Applications

- 2.85V Model for SCSI-2 Active Termination
- Post Regulator for Switching DC/DC Converter
- High Efficiency Linear Regulators
- Battery Charger
- Battery Powered Instrumentation

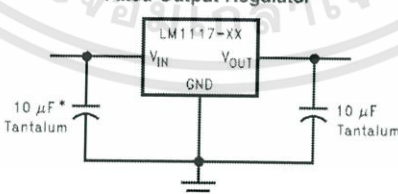
Typical Application

Active Terminator for SCSI-2 Bus



10091905

Fixed Output Regulator

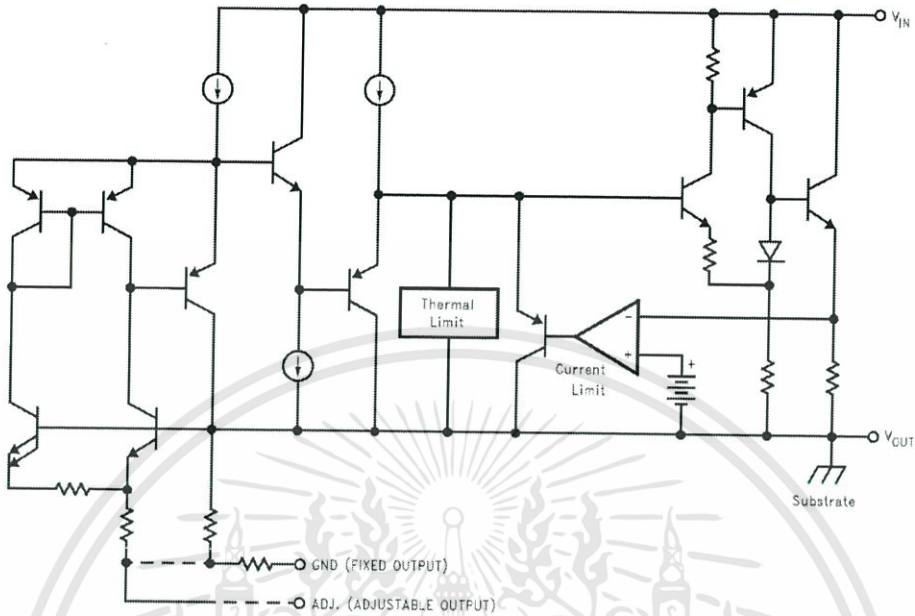


* Required if the regulator is located far from the power supply filter.
10091906

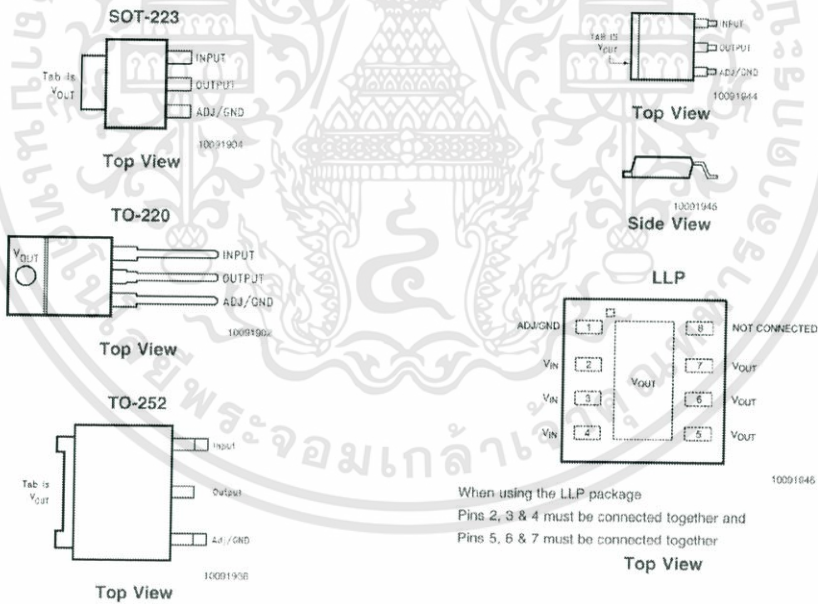
LM1117/LM1117I 800mA Low-Dropout Linear Regulator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Block Diagram



Connection Diagrams

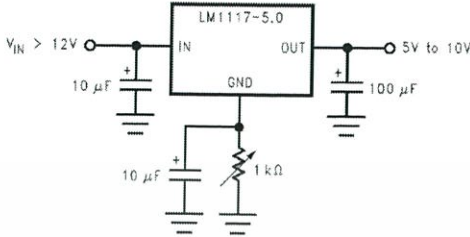


When using the LLP package
 Pins 2, 3 & 4 must be connected together and
 Pins 5, 6 & 7 must be connected together

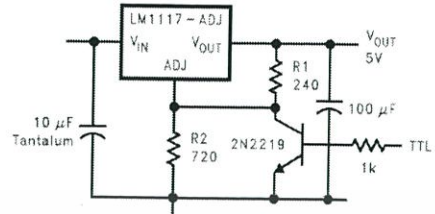
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

LM1117/LM1117I

Typical Application Circuits

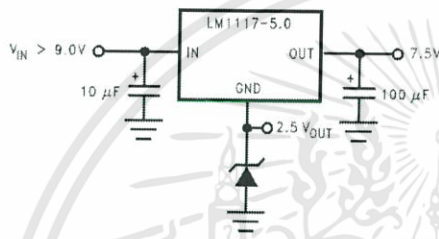


Adjusting Output of Fixed Regulators

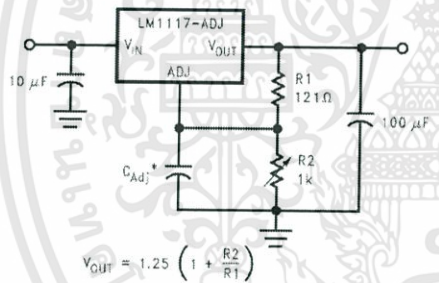


* Min. output ≈ 1.25V

5V Logic Regulator with Electronic Shutdown*



Regulator with Reference



* C_{Adj} is optional, however it will improve ripple rejection.

1.25V to 10V Adjustable Regulator with Improved Ripple Rejection

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.6 เอกสารคู่มือการใช้งาน KIA278R05

ไอซี KIA278R05 เป็นไอซีรักษาระดับแรงดันซึ่งมีแรงดันเอาต์พุต 5 โวลต์ มีรายละเอียดดังนี้

KEC

SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

KIA278R05PI~KIA278R15PI BIPOLAR LINEAR INTEGRATED CIRCUIT

4 TERMINAL 2A OUTPUT LOW DROP VOLTAGE REGULATOR

The KIA278R × × Series are Low Drop Voltage Regulator suitable for various electronic equipments. It provides constant voltage power source with TO-220 4 terminal lead full molded PKG. The Regulator has multi function such as over current protection, overheat protection and ON/OFF control.

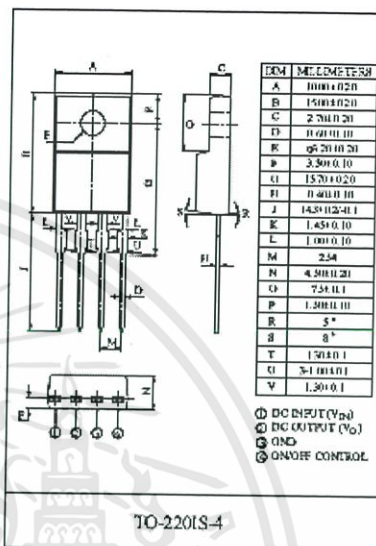
FEATURES

- 2.0A Output Low Drop Voltage Regulator.
- Built in ON/OFF Control Terminal.
- Built in Over Current Protection, Over Heat Protection Function.

LINE UP

ITEM	OUTPUT VOLTAGE (Typ.)	UNIT
KIA278R05PI	5	V
KIA278R06PI	6	
KIA278R08PI	8	
KIA278R09PI	9	
KIA278R10PI	10	
KIA278R12PI	12	
* KIA278R15PI	15	

* Note) * : Under Development.



MAXIMUM RATING (Ta=25°C)

CHARACTERISTIC	SYMBOL	RATING	UNIT	Remark
Input Voltage	V _{IN}	35	V	-
ON/OFF Control Voltage	V _C	35	V	-
Output Current	I _O	2	A	-
Power Dissipation 1	P _{D1}	1.5	W	No heatsink
Power Dissipation 2	P _{D2}	15	W	with heatsink
Junction Temperature	T _J	125	°C	-
Operating Temperature	T _{OP}	-20 ~ 80	°C	-
Storage Temperature	T _{STG}	-30 ~ 125	°C	-
Soldering Temperature (10sec)	T _{sold}	260	°C	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KIA278R05PI-KIA278R15PI

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Ta=25°C)

(Unless otherwise specified, $I_O=1.0A$, Ta=25°C, Note1.)

CHARACTERISTIC	SYMBOL	CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Output Voltage	KIA278R05	-	4.88	5.0	5.12	V
	KIA278R06	-	5.85	6.0	6.15	
	KIA278R08	-	7.80	8.0	8.2	
	KIA278R09	-	8.78	9.0	9.22	
	KIA278R10	-	9.75	10.0	10.25	
	KIA278R12	-	11.70	12.0	12.30	
	KIA278R15	-	14.70	15.0	15.30	
Load Regulation	Reg Load	$I_O=5mA \sim 2A$	-	0.1	2.0	%
Line Regulation	Reg Line	(Note 2)	-	0.5	2.5	%
Temperature Coefficient of Output Voltage	$T_C V_O$	$T_J=0 \sim 125^\circ C$	-	± 0.02	± 0.05	%/°C
Ripple Rejection	R · R	-	45	55	-	dB
Drop Out Voltage	V_D	$I_O=2A$	-	-	0.5	V
Output ON state for control Voltage	$V_{C(ON)}$	-	2.0	-	-	V
Output ON state for control Current	$I_{C(ON)}$	$V_C=2.7V$	-	-	20	μA
Output OFF state for control Voltage	$V_{C(OFF)}$	-	-	-	0.8	V
Output OFF state for control Current	$I_{C(OFF)}$	$V_C=0.4V$	-	-	-0.4	mA
Quiescent Current	I_Q	$I_O=0$	-	-	10	mA

Note1) V_{2N} of KIA278R05~7V

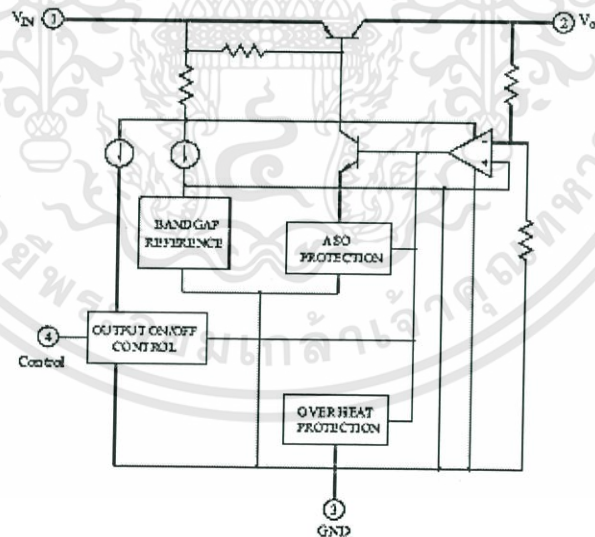
- KIA278R06=8V
- KIA278R08=10V
- KIA278R09=15V
- KIA278R10=16V
- KIA278R12=18V
- KIA278R15=21V

Note2) V_{2N} of KIA278R05~6 ~ 12V

- KIA278R06~7 ~ 15V
- KIA278R08=9 ~ 25V
- KIA278R09=10 ~ 25V
- KIA278R10=11 ~ 26V
- KIA278R12=13 ~ 29V
- KIA278R15=16 ~ 32V

Note3) At $V_{2N}=0.95V_O$

BLOCK DIAGRAM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.7 เอกสารคู่มือการใช้งาน KIA278R33

ไอซี KIA278R33 เป็นไอซีรักษาระดับแรงดัน โดยมีแรงดันเอาต์พุต 3.3 โวลต์ มีรายละเอียดดังนี้

KEC

SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

KIA278R25PI~KIA278R37PI BIPOLAR LINEAR INTEGRATED CIRCUIT

4 TERMINAL 2A OUTPUT LOW DROP
VOLTAGE REGULATOR

The KIA278R × × Series are Low Drop Voltage Regulator suitable for various electronic equipments. It provides constant voltage power source with TO-220 4 terminal lead full molded PKG.

The Regulator has multi function such as over current protection, overheat protection and ON/OFF control.

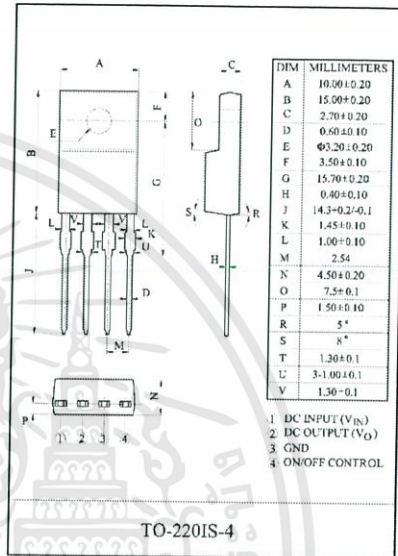
FEATURES

- 2.0A Output Low Drop Voltage Regulator.
- Built in ON/OFF Control Terminal.
- Built in Over Current Protection, Over Heat Protection Function.

LINE UP

ITEM	OUTPUT VOLTAGE (Typ.)	UNIT
KIA278R25PI	2.5	V
* KIA278R30PI	3.0	
KIA278R33PI	3.3	
* KIA278R35PI	3.5	
* KIA278R37PI	3.7	

* Note) * : Under Development.



MAXIMUM RATINGS (Ta=25 °C)

CHARACTERISTIC	SYMBOL	RATING	UNIT	Remark
Input Voltage	V _{IN}	35	V	-
ON/OFF Control Voltage	V _C	35	V	-
Output Current	I _O	2	A	-
Power Dissipation 1	P _{d1}	1.5	W	No heatsink
Power Dissipation 2	P _{d2}	15	W	with heatsink
Junction Temperature	T _j	125	°C	-
Operating Temperature	T _{opr}	-20 ~ 80	°C	-
Storage Temperature	T _{stg}	-30 ~ 125	°C	-
Soldering Temperature (10sec)	T _{sol}	260	°C	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KIA278R25PI~KIA278R37PI

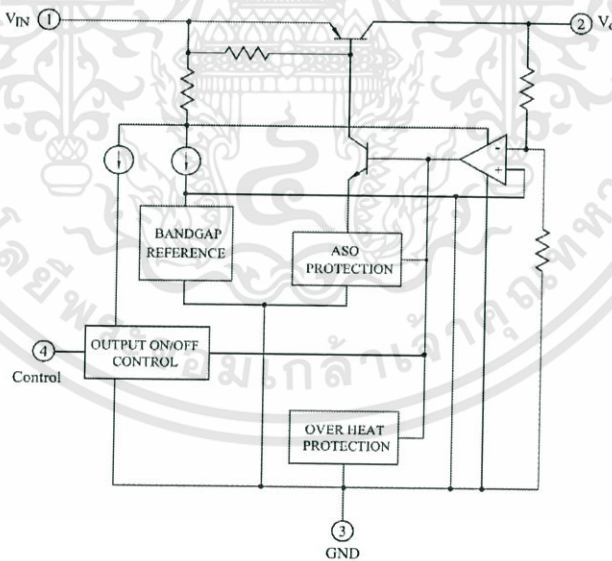
ELECTRICAL CHARACTERISTICS

(Unless otherwise specified, $I_O=1.0A$, $T_a=25^\circ C$, Note1.)

CHARACTERISTIC		SYMBOL	CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Output Voltage	KIA278R25	V_O	-	2.438	2.50	2.562	V
	KIA278R30		-	2.925	3.00	3.075	
	KIA278R33		-	3.220	3.30	3.380	
	KIA278R35		-	3.413	3.50	3.587	
	KIA278R37		-	3.608	3.70	3.792	
Load Regulation		Reg Load	$I_O=5mA \sim 2A$	-	0.1	2.0	%
Line Regulation		Reg Line	(Note 2)	-	0.5	2.5	%
Temperature Coefficient of Output Voltage		$T_C V_O$	$I_J=0 \sim 125^\circ C$	-	± 0.02	± 0.05	%/ $^\circ C$
Ripple Rejection		$R \cdot R$	-	45	55	-	dB
Drop Out Voltage		V_D	$I_O=2A$	-	-	0.5	V
Output ON state for control Voltage		$V_{C(ON)}$	-	2.0	-	-	V
Output ON state for control Current		$I_{C(ON)}$	$V_C=2.7V$	-	-	20	μA
Output OFF state for control Voltage		$V_{C(OFF)}$	-	-	-	0.8	V
Output OFF state for control Current		$I_{C(OFF)}$	$V_C=0.4V$	-	-	-0.4	mA
Quiescent Current		I_Q	$I_O=0$	-	-	10	mA

Note1) V_{IN} of KIA278R25=4.2V Note2) V_{IN} of KIA278R25=3.2 ~ 10V Note3) At $V_{IN}=0.95V_O$
 " KIA278R30=4.7V " KIA278R30=3.7 ~ 10V
 " KIA278R33=5.0V " KIA278R33=4.0 ~ 10V
 " KIA278R35=5.2V " KIA278R35=4.2 ~ 10V
 " KIA278R37=5.4V " KIA278R37=4.4 ~ 10V

BLOCK DIAGRAM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.8 เอกสารคู่มือการใช้งานรีเลย์ HRS4(H)

รีเลย์ HRS(H) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ มีไว้สำหรับสลับการจ่ายกระแสให้กับขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้ามีรายละเอียดดังนี้



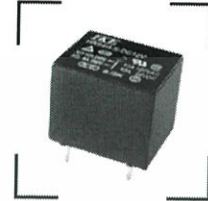
POWER RELAY

Safety Approval

- NO. 1063016 (LR 109368)
- NO. E164730 NO. E322395
- NO. CQC08002027614
- NO. 50116136

Features

- Miniature relay
Dimension: 19.0×15.5×15.8(mm)
- Contact: 1 Form A, 1 Form B, 1 Form C
- TV-5 rating
- UL Class F insulation



ORDERING INFORMATION

HRS4 [H] - [S] - [DC12V] - [A]

Model	Coil Sensitivity	Enclosure	Coil Voltage	Contact Form
	H - High Sensitivity (360mW) Blank - Standard (450mW)	S - Plastic Sealed Type	DC3V, DC5V, DC6V, DC9V, DC12V, DC24V, DC48V	A - 1 Form A B - 1 Form B C - 1 Form C

SPECIFICATION

CONTACT DATA

Contact Form	1 Form A, 1 Form B, 1 Form C	
Contact Material	Ag Alloy	
Contact Rating	A: 15A 125VAC, 10A 250VAC C: NO: 10A 250VAC/24VDC NC: 6A 250VAC/24VDC TV-5 125VAC	
Contact Resistance	Max. 100mΩ (6VDC 1A)	
Load	Max. Switching Voltage	250VAC/30VDC
	Max. Switching Current	15A
	Max. Switching Power	2,500VA, 300W
	Min. Switching Load	5VDC, 100mA
Life	Electrical	100,000 operations
	Mechanical	10,000,000 operations

GENERAL DATA

Insulation Resistance		Min. 1000MΩ 500VDC
Dielectric Strength	Between open contacts	750VAC, 1 min
	Between coil and contacts	1,500VAC, 1min
Operate Time	Max. 10ms	
Release Time	Max. 5ms	
Operating Temperature	-40°C to +85°C	
Humidity	35~95%RH, +40°C	
Shock Resistance	Endurance	1,000m/s ²
	Misoperation	100m/s ²
Vibration Resistance	Endurance	10~55Hz, 1.5mm double amplitude
	Misoperation	10~55Hz, 1.5mm double amplitude
Weight	Approximately 10.0g	

Note: Data shown are of initial value

COIL DATA

Nominal Coil Power	360mW, 450mW
--------------------	--------------

SAFETY APPROVAL

File Number	Contact Form	Power Consumption	Coil Voltage	Contact Rating	Remark
CQC 08002027614 (GB/T 21711.1-2008)	A	0.36W/0.45W	3 - 48VDC	10A 250VAC	Ambient Temperature: 85°C
	B	0.36W/0.45W	3 - 48VDC	6A 250VAC	Ambient Temperature: 85°C
	C	0.36W/0.45W	3 - 48VDC	NO/NC: 10A/6A 250VAC	Ambient Temperature: 85°C

ISO9001, ISO/TS16949, ISO14001 Approved

HKE HRS4-223

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



SAFETY APPROVAL

File Number	Contact Form	Power Consumption	Coil Voltage	Contact Rating	Remark
TUV 50116136	A/B/C	0.36W/0.45W	3 - 48VDC	NO/NC: 10A/6A 250VAC	Ambient Temperature: 105°C
TUV50116136 (EN 60730-1)				NO: 10A(2)A 250VAC NC: 6(1)A 250VAC	Ambient Temperature: 105°C
UL E164730	A	0.36W/0.45W	3 - 48VDC	15A 125VAC	Class F Insulation Ambient Temperature: 65°C
	A/C			10A 120VAC/28VDC	Class F Insulation Ambient Temperature: 105°C
				10A 277VAC	Class F Insulation Ambient Temperature: 85°C
UL E322395	A/C	0.36W/0.45W	3 - 48VDC	TV-5 125VAC	NLDX Category (N.O.Contact side)
CSA 1063016 (LR 109368)				1/2HP 120VAC 1/2HP 240VAC	
	A/C	0.36W/0.45W	3 - 48VDC	10A 120VAC/24VDC	—

Specifications subject to change without notice

COIL DATA

Ambient Temperature: 23°C

Model	Nominal Voltage VDC	Coil Resistance Ω +/-10%	Operate Voltage \leq VDC	Release Voltage \geq VDC	Coil Power mW
HRS4-S-DC3V	3	20	2.1	0.3	450
HRS4-S-DC5V	5	55	3.5	0.5	
HRS4-S-DC6V	6	80	4.2	0.6	
HRS4-S-DC9V	9	180	6.3	0.9	
HRS4-S-DC12V	12	320	8.4	1.2	
HRS4-S-DC24V	24	1280	16.8	2.4	
HRS4-S-DC48V	48	5120	33.6	4.8	
HRS4H-S-DC3V	3	25	2.1	0.3	360
HRS4H-S-DC5V	5	70	3.5	0.5	
HRS4H-S-DC6V	6	100	4.2	0.6	
HRS4H-S-DC9V	9	225	6.3	0.9	
HRS4H-S-DC12V	12	400	8.4	1.2	
HRS4H-S-DC24V	24	1600	16.8	2.4	
HRS4H-S-DC48V	48	6400	33.6	4.8	

ISO9001, ISO/TS16949, ISO14001 Approved

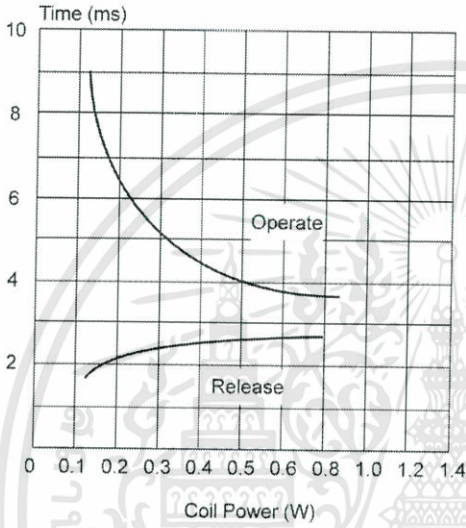
HKE HRS4-224

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

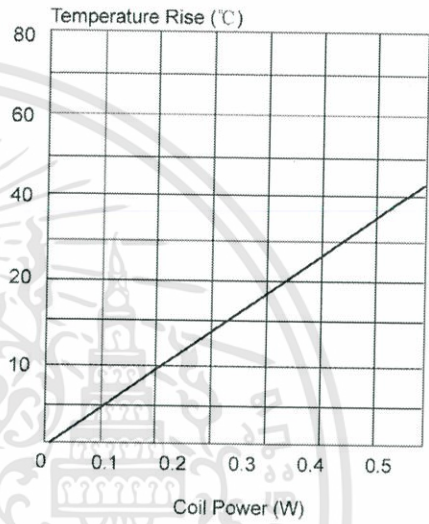


REFERENCE DATA

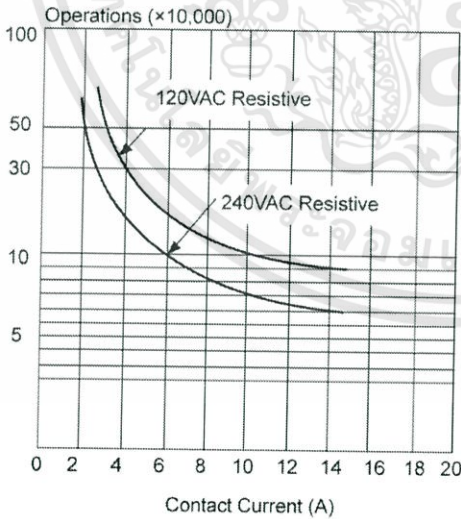
Timing



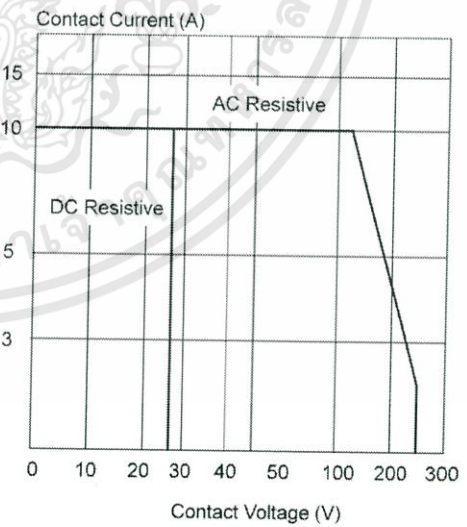
Coil Temperature Rise



Life Curves



Maximum Switching Power



ISO9001, ISO/TS16949, ISO14001 Approved

HKE HRS4-226

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค.9 เอกสารคู่มือการใช้งาน TCRT5000

เอนโคเดอร์ TCRT5000 เป็นอุปกรณ์ที่มีไว้สำหรับตรวจจับตำแหน่ง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้



TCRT5000(L)
Vishay Telefunken

Reflective Optical Sensor with Transistor Output

Description

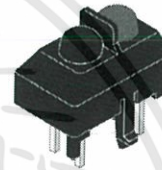
The TCRT5000(L) has a compact construction where the emitting-light source and the detector are arranged in the same direction to sense the presence of an object by using the reflective IR beam from the object. The operating wavelength is 950 nm. The detector consists of a phototransistor.

Applications

- Position sensor for shaft encoder
- Detection of reflective material such as paper, IBM cards, magnetic tapes etc.
- Limit switch for mechanical motions in VCR
- General purpose – wherever the space is limited

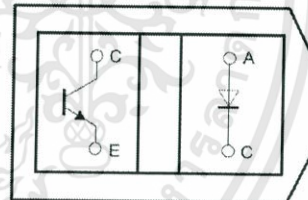
Features

- Snap-in construction for PCB mounting
- Package height: 7 mm
- Plastic polycarbonate housing construction which prevents crosstalk
- L = long leads
- Current Transfer Ratio (CTR) of typical 10%



94-9442

15116



Top view

Order Instruction

Ordering Code	Sensing Distance	Remarks
TCRT5000	12 mm	Leads (3.5 mm)
TCRT5000(L)	12 mm	Long leads (15 mm)

TCRT5000(L)

Vishay Telefunken

**Absolute Maximum Ratings**

Input (Emitter)

Parameter	Test Conditions	Symbol	Value	Unit
Reverse voltage		V_R	5	V
Forward current		I_F	60	mA
Forward surge current	$t_p \leq 10 \mu\text{A}$	I_{FSM}	3	A
Power dissipation	$T_{amb} \leq 25^\circ\text{C}$	P_V	100	mW
Junction temperature		T_j	100	$^\circ\text{C}$

Output (Detector)

Parameter	Test Conditions	Symbol	Value	Unit
Collector emitter voltage		V_{CEO}	70	V
Emitter collector voltage		V_{ECO}	5	V
Collector current		I_C	100	mA
Power dissipation	$T_{amb} \leq 55^\circ\text{C}$	P_V	100	mW
Junction temperature		T_j	100	$^\circ\text{C}$

Sensor

Parameter	Test Conditions	Symbol	Value	Unit
Total power dissipation	$T_{amb} \leq 25^\circ\text{C}$	P_{tot}	200	mW
Operation temperature range		T_{amb}	-25 to +85	$^\circ\text{C}$
Storage temperature range		T_{stg}	-25 to +100	$^\circ\text{C}$
Soldering temperature	2 mm from case, $t \leq 10 \text{ s}$	T_{sd}	260	$^\circ\text{C}$



TCRT5000(L)
Vishay Telefunken

Electrical Characteristics ($T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$)

Input (Emitter)

Parameter	Test Conditions	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Forward voltage	$I_F = 60 \text{ mA}$	V_F		1.25	1.5	V
Junction capacitance	$V_R = 0 \text{ V}, f = 1 \text{ MHz}$	C_j		50		pF

Output (Detector)

Parameter	Test Conditions	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Collector emitter voltage	$I_C = 1 \text{ mA}$	V_{CE0}	70			V
Emitter collector voltage	$I_E = 100 \mu\text{A}$	V_{ECO}	7			V
Collector dark current	$V_{CE} = 20 \text{ V}, I_F = 0, E = 0$	I_{CE0}		10	200	nA

Sensor

Parameter	Test Conditions	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Collector current	$V_{CE} = 5 \text{ V}, I_F = 10 \text{ mA}, D = 12 \text{ mm}$	$I_C^{1,2)}$	0.5	1	2.1	mA
Collector emitter saturation voltage	$I_F = 10 \text{ mA}, I_C = 0.1 \text{ mA}, D = 12 \text{ mm}$	$V_{CEsat}^{1,2)}$			0.4	V

1) See test circuit

2) Test surface: Mirror (Mfr. Spindler a. Hoyer, Part No 340005)

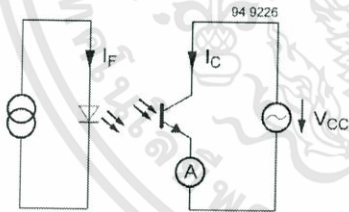


Figure 1. Test circuit

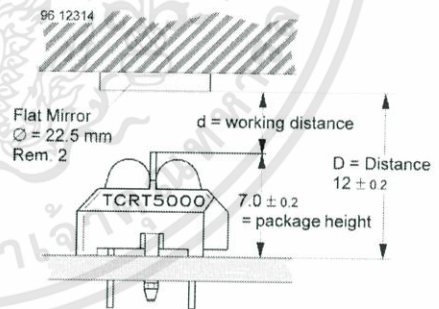
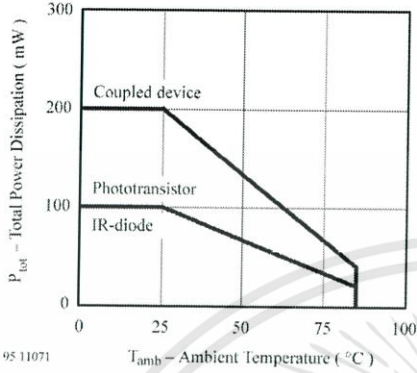


Figure 2. Test circuit

TCRT5000(L)
Vishay Telefunken

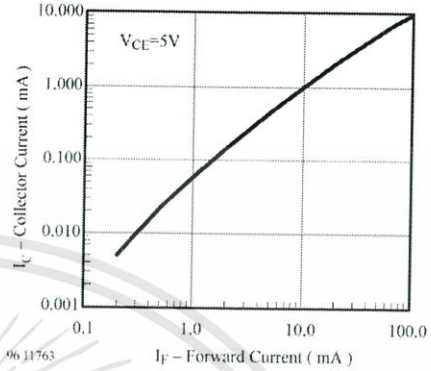


Typical Characteristics ($T_{amb} = 25^{\circ}C$, unless otherwise specified)



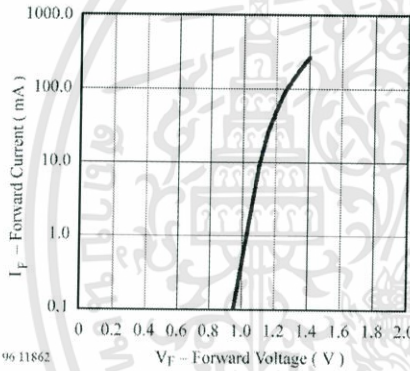
95 11071

Figure 3. Total Power Dissipation vs. Ambient Temperature



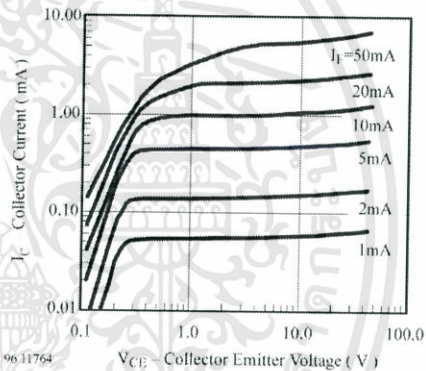
96 11763

Figure 6. Collector Current vs. Forward Current



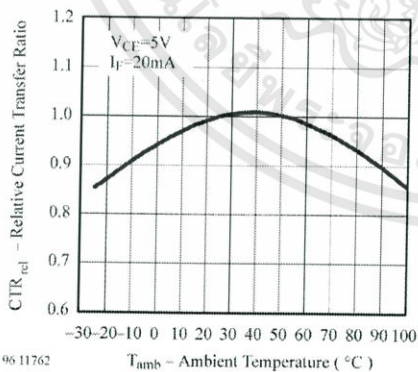
96 11862

Figure 4. Forward Current vs. Forward Voltage



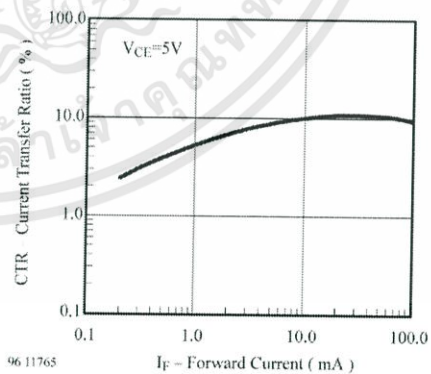
96 11764

Figure 7. Collector Emitter Saturation Voltage vs. Collector Current



96 11762

Figure 5. Rel. Current Transfer Ratio vs. Ambient Temp.



96 11765

Figure 8. Current Transfer Ratio vs. Forward Current

ค.10 เอกสารคู่มือการใช้งาน GP2Y0A41SK0F

เซนเซอร์แสงอินฟราเรด GP2Y0A41SK0F เป็นอุปกรณ์ที่มีไว้สำหรับวัดระยะ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

SHARP

GP2Y0A41SK0F

GP2Y0A41SK0F

Distance Measuring Sensor Unit
Measuring distance : 4 to 30 cm
Analog output type



■Description

GP2Y0A41SK0F is a distance measuring sensor unit, composed of an integrated combination of PSD (position sensitive detector) , IR-LED (infrared emitting diode) and signal processing circuit. The variety of the reflectivity of the object, the environmental temperature and the operating duration are not influenced easily to the distance detection because of adopting the triangulation method. This device outputs the voltage corresponding to the detection distance. So this sensor can also be used as a proximity sensor.

■Agency approvals/Compliance

1. Compliant with RoHS directive (2002/95/EC)

■Applications

1. Cleaning robot
2. Personal robot
3. Sanitary

■Features

1. Distance measuring sensor is united with PSD, infrared LED and signal processing circuit
2. Short measuring cycle (16.5ms)
3. Distance measuring range : 4 to 30 cm
4. Package size (29.5 × 13.0 × 13.5mm)
5. Analog output type

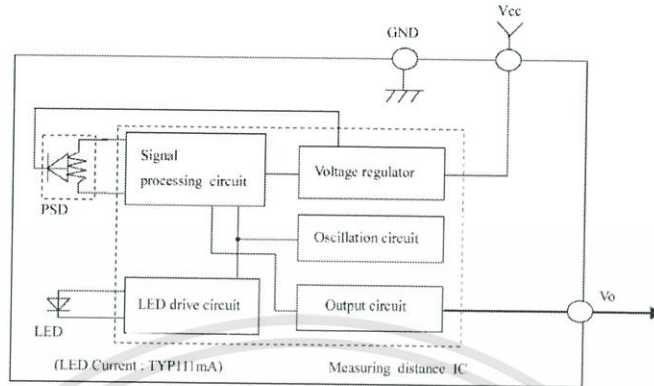
Notice: The content of data sheet is subject to change without prior notice.

In the absence of confirmation by device specification sheets, SHARP takes no responsibility for any defects that may occur in equipment using any SHARP devices shown in catalogs, data books, etc. Contact SHARP in order to obtain the latest device specification sheets before using any SHARP device.

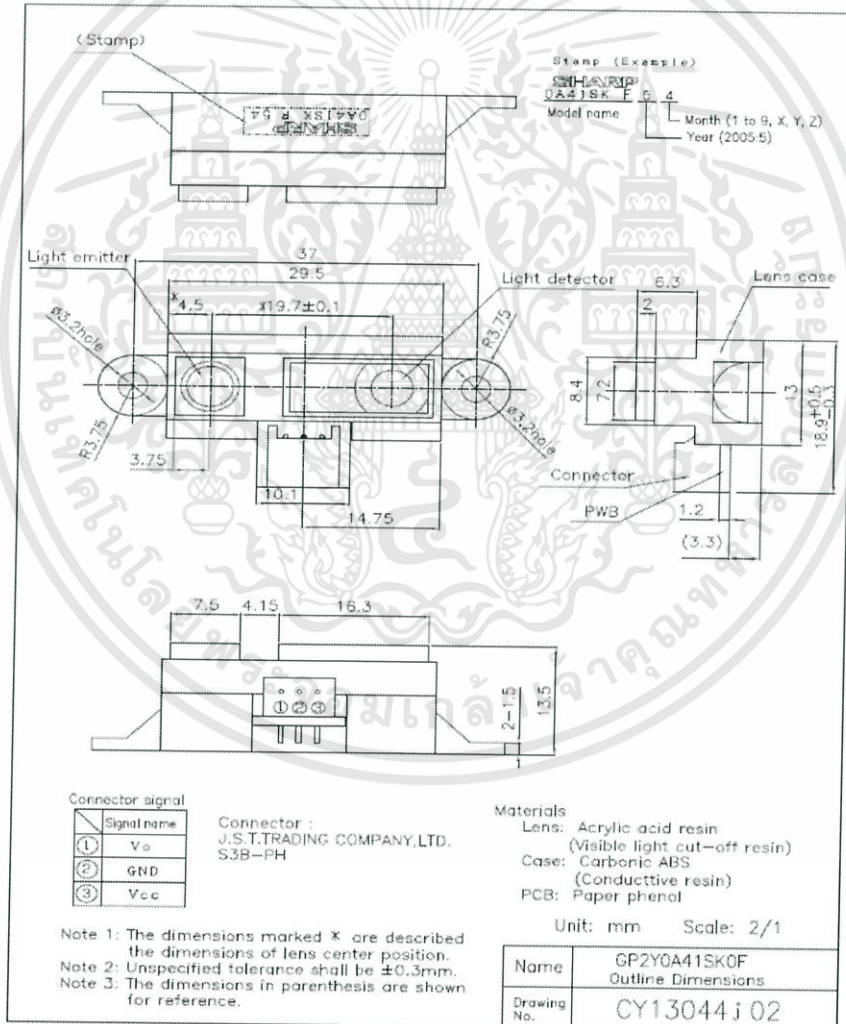
Sheet No.: OP13008EN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

■Schematic



■Outline



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

■Absolute maximum ratings

(Ta=25°C, Vcc=5V)

Parameter	Symbol	Ratings	Unit	Remark
Supply voltage	Vcc	-0.3 to +7	V	-
Output terminal voltage	Vo	-0.3 to Vcc+0.3	V	-
Operating temperature	Topr	-10 to +60	°C	-
Storage temperature	Tstg	-40 to +70	°C	-

■Operating supply voltage

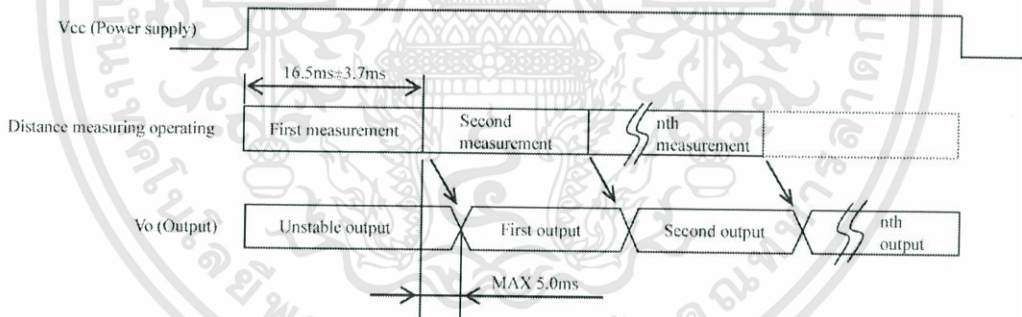
Symbol	Rating	Unit	Remark
Vcc	4.5 to 5.5	V	-

■Electro-optical Characteristics

Parameter	Symbol	Conditions	MIN.	TYP.	MAX.	Unit
Measuring distance range	ΔL	(Note 1)	4	-	30	Cm
Output terminal voltage	Vo	L=30cm (Note 1)	0.25	0.4	0.55	V
Output voltage difference	ΔVo	Output change at L change (30cm → 4cm) (Note 1)	1.95	2.25	2.55	V
Average supply current	Icc	L=30cm (Note 1)	-	12	22	mA

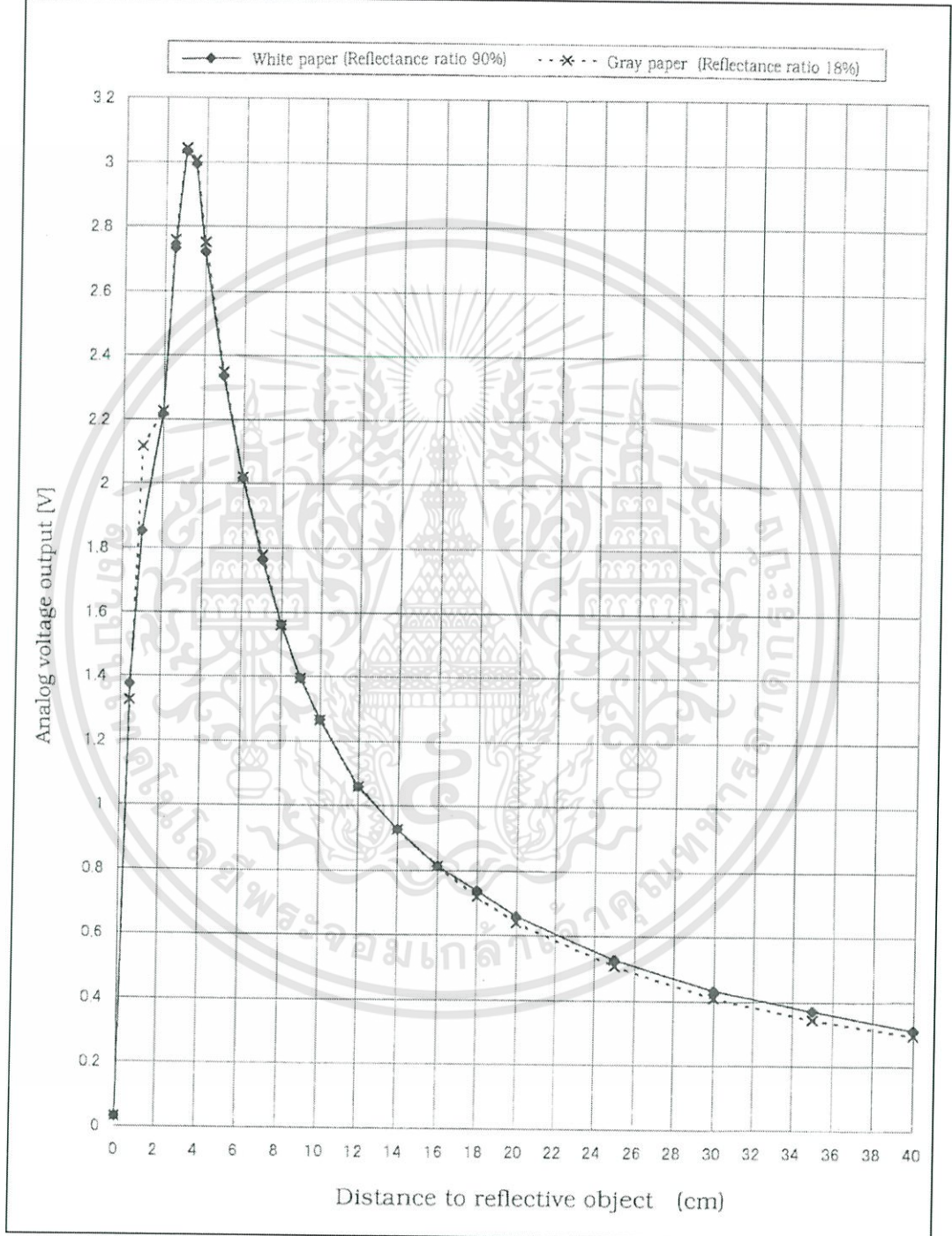
※L : Distance to reflective object
 (Note 1) Using reflective object : White paper
 (Made by Kodak Co., Ltd. gray cards R-27 · white face, reflective ratio : 90%)

■Timing Chart



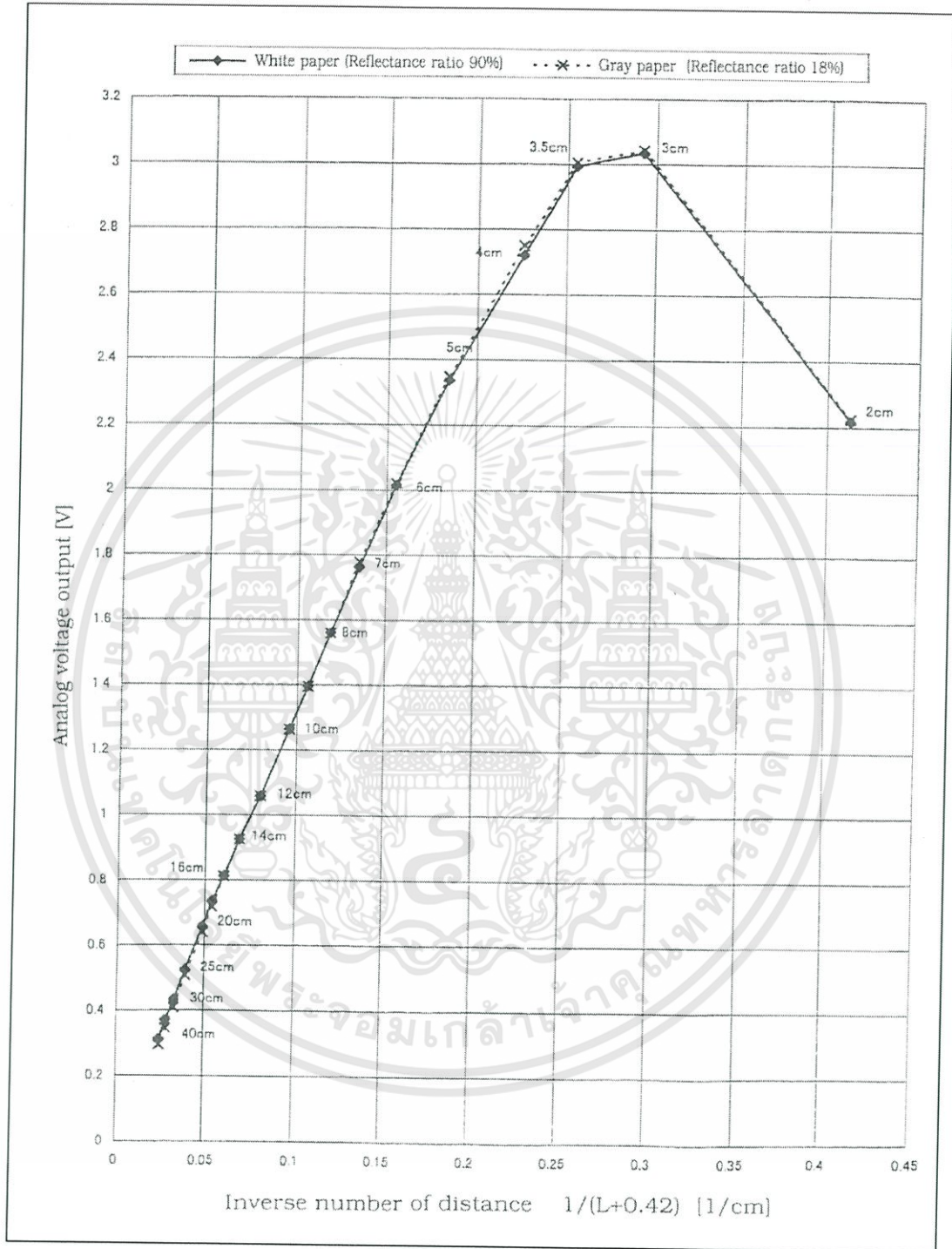
Supplements

Example of output distance characteristics



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

•Example of output distance characteristics with the inverse of distance



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

โปรแกรมควบคุมตำแหน่งรรางไฟฟ้าแม่เหล็ก

โปรแกรมในโครงงานต้นแบบรรางไฟฟ้าแม่เหล็ก เขียนด้วยภาษาซี โดยใช้คอมไพเลอร์ของ GNU ใช้ร่วมโปรแกรม COCOX COIDE โดยได้แยกไฟล์ออกเป็นส่วนต่าง ๆ ดังนี้

ง.1 โปรแกรมหลักของระบบควบคุมรรางไฟฟ้าแม่เหล็ก (main.c)

```
/*
 * File : main.c
 * Create by Danai J. Ponchalee
 * Use in MAGNETIC LEVITATION RAIL PROTOTYPE
 * Control Engineering KMITL
 * date : April 2014
 */
////////////////////////////////////////////////// ST microelectronic Low-Level peripheral library include////////////////////////////////////
#include "stm32f4xx.h"
#include "stm32f4xx_exti.h"
#include "stm32f4xx_tim.h"
#include "stm32f4xx_syscfg.h"
#include "misc.h"
#include "stm32f4xx_usart.h"
#include "stm32f4xx_gpio.h"
#include "stm32f4xx_rcc.h"
#include <stdio.h>
//////////////////////////////////////////////////User Define library include //////////////////////////////////////
#include "Coil_Control_Handler.h"
#include "TIMER.h"
#include "USART.h"
#include "ADC_Handler.h"
#include "Data_Handler.h"
#include "PID_Control_Handle.h"
////////////////////////////////////////////////// global variable declaration //////////////////////////////////////
//control panel handle variable
volatile uint16_t Panel_data[3] ;
//coil control variable
static volatile float fac = 0, position = 1, speed=1 , coil_position = 0;
static volatile int dir ;
volatile int i=1 ;
volatile char move_auto ;
//data transfer handle variable
char *data_store_pointer ;
unsigned int *data_store_pointer_index1,*data_store_pointer_index2,*data_store_pointer_index3 ;
volatile unsigned char data_store_count ;
volatile unsigned char data_StoringFLAG1,data_StoringFLAG2 ;
//sensor Handle variable
volatile uint16_t Feedback_data1,Feedback_data2,Feedback_data3;
unsigned int encoder_offset=256;
volatile float disp1,disp2;
// PID handler variable
PID_variable_Typedef positioning1;
////////////////////////////////////////////////// Main program //////////////////////////////////////
//////////////////////////////////////////////////Initialization and background Idle state //////////////////////////////////////
int main(void)
{
    ////////////////////////////////////////////////// Initial and set-up system clock////////////////////////////////////
    SystemInit();
    ////////////////////////////////////////////////// Initial Data store Pointer //////////////////////////////////////
    data_store_pointer = Data_Get_Storage_address(1);
    data_store_pointer_index1 = Data_Get_Storage_address(1);
    data_store_pointer_index2 = Data_Get_Storage_address(2);
    data_store_pointer_index3 = Data_Get_Storage_address(3);
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

//////////////////////////////////PID Controller Initialize //////////////////////////////////
positioning1.derivative=0;
positioning1.integral=0;
positioning1.Kp=0.02;
positioning1.Ki=0.0005;
positioning1.Kd=0.00001;
positioning1.setpoint=0;
positioning1.dt=0.02;
positioning1.setpoint=0;
//////////////////////////////////Serial Communication Initialize //////////////////////////////////
USART3_Initial();
USART1_Initial();
//////////////////////////////////Analog to Digital Converter Initialize //////////////////////////////////
ADC_GPIO_Init();
ADC1_Solf_Init();
//////////////////////////////////Coil Control GPIO Initialize //////////////////////////////////
Control_PIN_Initial();
//////////////////////////////////Timer Time-base and PWM Initialize //////////////////////////////////
TimerSynch_Init();
TimerPWM_Init();
TimerSynch_Start();
////////////////////////////////// Set Initial start position //////////////////////////////////
position = 0;
move_auto=DISABLE;
////////////////////////////////// Initialize and Start Interrupt routine //////////////////////////////////
Timer5INT_Config();
USART3_INT_Config();
USART1_INT_Config();
Timer5Interrupt_ms(20);
////////////////////////////////// Turn system into Idle-State //////////////////////////////////

while(1)
{
    /*////////////////////////////////// Wait for interrupt event //////////////////////////////////*/
}
////////////////////////////////// Control Loop (Timer5 Interrupt Service Routine) //////////////////////////////////
void TIM5_IRQHandler(void)
{
    if (TIM_GetITStatus(TIM5, TIM_IT_Update) != RESET)
    {
        TIM_ClearITPendingBit(TIM5, TIM_IT_Update);
        // Clear Overflow-Underflow Interrupt Flag for next event
        ////////////////////////////////////Control Panel Sampling //////////////////////////////////
        Panel_data[0]=(ADC_Solf_Convert(10)+ADC_Solf_Convert(10)+ADC_Solf_Convert(10)
            +ADC_Solf_Convert(10)+ADC_Solf_Convert(10))/5;
        Panel_data[1]=(ADC_Solf_Convert(11)+ADC_Solf_Convert(11)+ADC_Solf_Convert(11)
            +ADC_Solf_Convert(11)+ADC_Solf_Convert(11))/5;
        Panel_data[2]=(ADC_Solf_Convert(12)+ADC_Solf_Convert(12)+ADC_Solf_Convert(12)+ADC_Solf_Convert(12)
            +ADC_Solf_Convert(12)+ADC_Solf_Convert(12))/5;
        //////////////////////////////////// Acquire Data form Buffer //////////////////////////////////
        Feedback_data1=*Data_Get_Storage_address(1);
        Feedback_data2=*Data_Get_Storage_address(2);
        Feedback_data3=*Data_Get_Storage_address(3);
        ////////////////////////////////////Calculate Distance form raw-digital Data////////////////////////////////////
        disp1=Data_LightDisplacement_12bitCal(Feedback_data1);
        disp2=Data_LightDisplacement_12bitCal(Feedback_data2);
        ////////////////////////////////////Calculate Panel control form raw-digital Data////////////////////////////////////
        position = 0+(((float)Panel_data[0]/4095)*525) ;
        speed = ((float)Panel_data[2]/4095)*5 ;
        fac = ((float)Panel_data[1]/1365)-1.5 ;
        ////////////////////////////////////Calculate PID Controller////////////////////////////////////
        positioning1.measure_feedback=Data_Get_EncoderPositon();
        if (move_auto)
            positioning1.setpoint = position;
            PID_Controller_cal(&positioning1);
            PID_Output_Limiter(&positioning1,speed,-speed);
            ////////////////////////////////////Change Coil Position //////////////////////////////////
            coil_position = coil_position+positioning1.output ;
            coil_dlinear(coil_position,fac,0);
            //////////////////////////////////// Print Data to Computer Console //////////////////////////////////

        printf("%d,%d,%d,%d, ",Data_Get_EncoderPositon(),(int)(positioning1.output*1000),Feedba
            ck_data1,Feedback_data2);
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

//////////////////////////////////// Computer Input Program //////////////////////////////////////
void USART3_IRQHandler(void)
{
    if(USART_GetITStatus(USART3,USART_IT_RXNE) == SET)
    {
        USART_ClearITPendingBit(USART3, USART_IT_RXNE);

        if(USART_ReceiveData(USART3) == 'a' )
        {
            position-=speed;
            printf("\n\r>>power %d position %d",dir,(int16_t)position);
        }
        if(USART_ReceiveData(USART3) == 'd' )
        {
            position+=speed;
            printf("\n\r>>power %d position %d",dir,(int16_t)position);
        }
        if(USART_ReceiveData(USART3) == 'w' )
        {
            dir++;
            fac=(float)dir/100 ;
            printf("\n\r>>power %d position %d",dir,(int16_t)position);
        }
        if(USART_ReceiveData(USART3) == 's' )
        {
            dir--;
            fac=(float)dir/100;
            printf("\n\r>>power %d position %d",dir,(int16_t)position);
        }
        if(USART_ReceiveData(USART3) == 'r' )
        {
            speed++;
            printf("\n\r>>speed up to %d",(int16_t)speed);
        }
        if(USART_ReceiveData(USART3) == 'f' )
        {
            speed--;
            printf("\n\r>>speed up to %d",(int16_t)speed);
        }
        if(USART_ReceiveData(USART3) == 'x' )
        {
            printf("\nToggle Move Panel setpoint Input\n");
            move_auto = !move_auto ;
        }
        if(USART_ReceiveData(USART3) == 't' )
        {
            printf("\nsetpoint 100 \n");
            move_auto = DISABLE;
            positioning1.setpoint=100;
        }
        if(USART_ReceiveData(USART3) == 'y' )
        {
            printf("\nsetpoint 200 \n");
            move_auto = DISABLE;
            positioning1.setpoint=200;
        }
        if(USART_ReceiveData(USART3) == 'u' )
        {
            printf("\nsetpoint 300 \n");
            move_auto = DISABLE;
            positioning1.setpoint=300;
        }
        if(USART_ReceiveData(USART3) == 'i' )
        {
            printf("\nsetpoint 400 \n");
            move_auto = DISABLE;
            positioning1.setpoint=400;
        }
        if(USART_ReceiveData(USART3) == 'T' )
        {
            printf("\nsetpoint 150 \n");
            move_auto = DISABLE;
        }
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        positioning1.setpoint=150;
    }
    if(USART_ReceiveData(USART3) == 'Y' )
    {
        printf("\nsetpoint 250 \n");
        move_auto = DISABLE;
        positioning1.setpoint=250;
    }
    if(USART_ReceiveData(USART3) == 'U' )
    {
        printf("\nsetpoint 350 \n");
        move_auto = DISABLE;
        positioning1.setpoint=350;
    }
    if(USART_ReceiveData(USART3) == 'I' )
    {
        printf("\nsetpoint 450 \n");
        move_auto = DISABLE;
        positioning1.setpoint=450;
    }
    if(USART_ReceiveData(USART3) == 'v' )
    {
        printf("\nsetpoint 50 \n");
        move_auto = DISABLE;
        positioning1.setpoint=50;
    }
}
}
//Data Handle (USART1 Interrupt Service Routine)
void USART1_IRQHandler(void)
{
    if(USART_GetITStatus(USART1,USART_IT_RXNE) == SET)
    {
        USART_ClearITPendingBit(USART1, USART_IT_RXNE);
        unsigned char buffer = USART_ReceiveData(USART1) ;
        if((buffer==0xFF) & !data_StoringFLAG1)
            //header 1st byte check flag-set
            data_StoringFLAG1=ENABLE;
        else if ((buffer==0xFF) & !data_StoringFLAG2 & data_StoringFLAG1)
            //Heade 2nd byte check flag-set
            data_StoringFLAG2=ENABLE;
        else if(data_StoringFLAG2)
            //Start Store Data to Buffer
            {
                *(data_store_pointer+data_store_count)=buffer;
                data_store_count++ ;
                if(data_store_count>5)
                {
                    // Re-Initial Flag and Pointer
                    data_StoringFLAG1=DISABLE;
                    data_StoringFLAG2=DISABLE;
                    data_store_count=0;
                }
            }
        else {
            // Reset Flag and Pointer if Header fail
            data_store_count=0;
            data_StoringFLAG1=DISABLE;
            data_StoringFLAG2=DISABLE;
        }
    }
}
}
}

```

จ.2 ส่วนหัวโปรแกรมย่อยสำหรับใช้งานโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อก

(ADC_Handler.h)

```

#ifdef __cplusplus
extern "C" {
#endif
#ifndef __ADC_Handler_H_
#define __ADC_Handler_H_

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#include "stm32f4xx_usart.h"
extern void ADC_GPIO_Init(void);
extern void ADC1_SoIf_Init(void);
extern unsigned int ADC_SoIf_Convert(unsigned char ch);
#ifdef __cplusplus
}
#endif
#endif

```

ง.3 โปรแกรมย่อยสำหรับใช้งานโมดูลแปลงสัญญาณอนาล็อก (ADC_Handler.c)

```

#include "stm32f4xx.h"
#include "stm32f4xx_rcc.h"
#include "stm32f4xx_gpio.h"
#include "stm32f4xx_adc.h"
#include "stm32f4xx_dma.h"
#include "stm32f4xx_usart.h"
#include <stdio.h>

#include "ADC_Handler.h"
////////////////////////////////////ADC read data Handle////////////////////////////////////
unsigned int ADC_SoIf_Convert(unsigned char ch)
{
    if (ch == 10)
    {
        ADC_RegularChannelConfig(ADC1, ADC_Channel_9, 1, ADC_SampleTime_28Cycles);
    }
    if (ch == 11)
    {
        ADC_RegularChannelConfig(ADC1, ADC_Channel_10, 1, ADC_SampleTime_28Cycles);
    }
    if (ch == 12)
    {
        ADC_RegularChannelConfig(ADC1, ADC_Channel_11, 1, ADC_SampleTime_28Cycles);
    }
    ADC_SoftwareStartConv(ADC1);
    while(ADC_GetFlagStatus(ADC1, ADC_FLAG_EOC) == RESET);
    return(ADC_GetConversionValue(ADC1));
}
////////////////////////////////////initialize ADC input PIN////////////////////////////////////
void ADC_GPIO_Init(void)
{
    GPIO_InitTypeDef      GPIO_InitStructure;
    /* Configure ADC2 Channel 10 11 12 pin as analog input *****/
    RCC_AHB1PeriphClockCmd(RCC_AHB1Periph_GPIOC | RCC_AHB1Periph_GPIOB, ENABLE);
    GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_1;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AN;
    GPIO_InitStructure.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_NOPULL ;
    GPIO_Init(GPIOB, &GPIO_InitStructure);

    GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_1 | GPIO_Pin_0;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AN;
    GPIO_InitStructure.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_NOPULL ;
    GPIO_Init(GPIOC, &GPIO_InitStructure);
}
////////////////////////////////////initialize ADC for Software conversion //////////////////////////////////////
{
    RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_ADC1, ENABLE);
    ADC_Cmd(ADC1, ENABLE);
    ADC_CommonInitTypeDef ADC_CommonInitStructure;
    ADC_InitTypeDef      ADC_InitStructure;

    ADC_CommonInitStructure.ADC_Mode = ADC_Mode_Independent;
    ADC_CommonInitStructure.ADC_Prescaler = ADC_Prescaler_Div2;
    ADC_CommonInitStructure.ADC_DMAAccessMode = ADC_DMAAccessMode_Disabled;
    ADC_CommonInitStructure.ADC_TwoSamplingDelay = ADC_TwoSamplingDelay_5Cycles;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ADC_CommonInit(&ADC_CommonInitStructure);

ADC_InitStructure.ADC_Resolution = ADC_Resolution_12b;
ADC_InitStructure.ADC_ScanConvMode = DISABLE;
ADC_InitStructure.ADC_ContinuousConvMode = DISABLE;
ADC_InitStructure.ADC_ExternalTrigConvEdge = ADC_ExternalTrigConvEdge_None;
ADC_InitStructure.ADC_ExternalTrigConv = ADC_ExternalTrigConv_T1_CC1;
ADC_InitStructure.ADC_DataAlign = ADC_DataAlign_Right;
ADC_InitStructure.ADC_NbrOfConversion = 1;
ADC_Init(ADC1, &ADC_InitStructure);

ADC_EOConEachRegularChannelCmd(ADC1, ENABLE);

ADC_Cmd(ADC1, ENABLE);
//The ADC is powered on by setting the ADON bit in the ADC_CR2 register.
//When the ADON bit is set for the first time, it wakes up the ADC from the Power-down mode.
}

```

ง.4 ส่วนหัวโปรแกรมย่อยควบคุมการขับเคลื่อนให้ขดลวด (Coil_Control_Handle.h)

```

#ifndef __COIL_CONTROL_HANDLE_H_
#define __COIL_CONTROL_HANDLE_H_
#ifdef __cplusplus
extern "C" {
#endif
#include "stm32f4xx.h"
/** Handle Definition
Use in 4E MagLev 24Coil-Linear Motor
**/
// Definition For Control output form interface
/*
CHx EN-TIMER->CCR
* CHx IN1-PORTx
* CHx IN1-PORTx->PIN
* CHx IN2-PORTx
* CHx IN2-PORTx->PIN
*/
#define Control_CH01_TIMER TIM3
#define Control_CH01_CCR CCR2
#define Control_CH01_IN1PORT GPIOC
#define Control_CH01_IN1PIN 11
#define Control_CH01_IN2PORT GPIOA
#define Control_CH01_IN2PIN 13
#define Control_CH01_RelayPORT GPIOB
#define Control_CH01_RelayPIN 0
#define Control_CH02_TIMER TIM3
#define Control_CH02_CCR CCR4
#define Control_CH02_IN1PORT GPIOD
#define Control_CH02_IN1PIN 2
#define Control_CH02_IN2PORT GPIOD
#define Control_CH02_IN2PIN 0
#define Control_CH02_RelayPORT GPIOA
#define Control_CH02_RelayPIN 7

#define Control_CH03_TIMER TIM3
#define Control_CH03_CCR CCR1
#define Control_CH03_IN1PORT GPIOD
#define Control_CH03_IN1PIN 4
#define Control_CH03_IN2PORT GPIOD
#define Control_CH03_IN2PIN 6
#define Control_CH03_RelayPORT GPIOA
#define Control_CH03_RelayPIN 6

#define Control_CH04_TIMER TIM3
#define Control_CH04_CCR CCR3
#define Control_CH04_IN1PORT GPIOE
#define Control_CH04_IN1PIN 1
#define Control_CH04_IN2PORT GPIOE

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#define Control_CH04_IN2PIN 3
#define Control_CH04_RelayPORT GPIOC
#define Control_CH04_RelayPIN 3

#define Control_CH05_TIMER TIM2
#define Control_CH05_CCR CCR2
#define Control_CH05_IN1PORT GPIOB
#define Control_CH05_IN1PIN 4
#define Control_CH05_IN2PORT GPIOB
#define Control_CH05_IN2PIN 8
#define Control_CH05_RelayPORT GPIOC
#define Control_CH05_RelayPIN 4

#define Control_CH06_TIMER TIM2
#define Control_CH06_CCR CCR1
#define Control_CH06_IN1PORT GPIOE
#define Control_CH06_IN1PIN 4
#define Control_CH06_IN2PORT GPIOE
#define Control_CH06_IN2PIN 2
#define Control_CH06_RelayPORT GPIOC
#define Control_CH06_RelayPIN 5

#define Control_CH07_TIMER TIM2
#define Control_CH07_CCR CCR3
#define Control_CH07_IN1PORT GPIOE
#define Control_CH07_IN1PIN 12
#define Control_CH07_IN2PORT GPIOE
#define Control_CH07_IN2PIN 14
#define Control_CH07_RelayPORT GPIOA
#define Control_CH07_RelayPIN 2

#define Control_CH08_TIMER TIM4
#define Control_CH08_CCR CCR1
#define Control_CH08_IN1PORT GPIOE
#define Control_CH08_IN1PIN 8
#define Control_CH08_IN2PORT GPIOE
#define Control_CH08_IN2PIN 10
#define Control_CH08_RelayPORT GPIOA
#define Control_CH08_RelayPIN 1

#define Control_CH09_TIMER TIM4
#define Control_CH09_CCR CCR3
#define Control_CH09_IN1PORT GPIOB
#define Control_CH09_IN1PIN 12
#define Control_CH09_IN2PORT GPIOB
#define Control_CH09_IN2PIN 15
#define Control_CH09_RelayPORT GPIOA
#define Control_CH09_RelayPIN 0

#define Control_CH10_TIMER TIM4
#define Control_CH10_CCR CCR4
#define Control_CH10_IN1PORT GPIOE
#define Control_CH10_IN1PIN 5
#define Control_CH10_IN2PORT GPIOC
#define Control_CH10_IN2PIN 13
#define Control_CH10_RelayPORT GPIOA
#define Control_CH10_RelayPIN 3

#define Control_CH11_TIMER TIM2
#define Control_CH11_CCR CCR4
#define Control_CH11_IN1PORT GPIOB
#define Control_CH11_IN1PIN 13
#define Control_CH11_IN2PORT GPIOB
#define Control_CH11_IN2PIN 14
#define Control_CH11_RelayPORT GPIOA
#define Control_CH11_RelayPIN 4

#define Control_CH12_TIMER TIM4
#define Control_CH12_CCR CCR2
#define Control_CH12_IN1PORT GPIOE
#define Control_CH12_IN1PIN 13
#define Control_CH12_IN2PORT GPIOE
#define Control_CH12_IN2PIN 15
#define Control_CH12_RelayPORT GPIOA

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#define          Control_CH12_RelayPIN          5

// Definition For Coil-control handle Most reroute to Control Interface
/* Coil_x      Relay          PORTx
 * Coil_x      Relay          PORTx->PIN
 * Coil_x      EN             TIMER
 * Coil_x      EN             TIMER->CCR
 * Coil_x      IN1           PORTx
 * Coil_x      IN1           PORTx->PIN
 * Coil_x      IN2           PORTx
 * Coil_x      IN2           PORTx->PIN
 */

#define          Coil_01_RelayPORT             Control_CH01_RelayPORT
#define          Coil_01_RelayPIN             Control_CH01_RelayPIN
#define          Coil_01_TIMER                Control_CH01_TIMER
#define          Coil_01_CCR                  Control_CH01_CCR
#define          Coil_01_IN1PORT              Control_CH01_IN1PORT
#define          Coil_01_IN1PIN               Control_CH01_IN1PIN
#define          Coil_01_IN2PORT              Control_CH01_IN2PORT
#define          Coil_01_IN2PIN               Control_CH01_IN2PIN

#define          Coil_02_RelayPORT             Control_CH03_RelayPORT
#define          Coil_02_RelayPIN             Control_CH03_RelayPIN
#define          Coil_02_TIMER                Control_CH03_TIMER
#define          Coil_02_CCR                  Control_CH03_CCR
#define          Coil_02_IN1PORT              Control_CH03_IN1PORT
#define          Coil_02_IN1PIN               Control_CH03_IN1PIN
#define          Coil_02_IN2PORT              Control_CH03_IN2PORT
#define          Coil_02_IN2PIN               Control_CH03_IN2PIN

#define          Coil_03_RelayPORT             Control_CH05_RelayPORT
#define          Coil_03_RelayPIN             Control_CH05_RelayPIN
#define          Coil_03_TIMER                Control_CH05_TIMER
#define          Coil_03_CCR                  Control_CH05_CCR
#define          Coil_03_IN1PORT              Control_CH05_IN1PORT
#define          Coil_03_IN1PIN               Control_CH05_IN1PIN
#define          Coil_03_IN2PORT              Control_CH05_IN2PORT
#define          Coil_03_IN2PIN               Control_CH05_IN2PIN

#define          Coil_04_RelayPORT             Control_CH02_RelayPORT
#define          Coil_04_RelayPIN             Control_CH02_RelayPIN
#define          Coil_04_TIMER                Control_CH02_TIMER
#define          Coil_04_CCR                  Control_CH02_CCR
#define          Coil_04_IN1PORT              Control_CH02_IN1PORT
#define          Coil_04_IN1PIN               Control_CH02_IN1PIN
#define          Coil_04_IN2PORT              Control_CH02_IN2PORT
#define          Coil_04_IN2PIN               Control_CH02_IN2PIN

#define          Coil_05_RelayPORT             Control_CH04_RelayPORT
#define          Coil_05_RelayPIN             Control_CH04_RelayPIN
#define          Coil_05_TIMER                Control_CH04_TIMER
#define          Coil_05_CCR                  Control_CH04_CCR
#define          Coil_05_IN1PORT              Control_CH04_IN1PORT
#define          Coil_05_IN1PIN               Control_CH04_IN1PIN
#define          Coil_05_IN2PORT              Control_CH04_IN2PORT
#define          Coil_05_IN2PIN               Control_CH04_IN2PIN

#define          Coil_06_RelayPORT             Control_CH06_RelayPORT
#define          Coil_06_RelayPIN             Control_CH06_RelayPIN
#define          Coil_06_TIMER                Control_CH06_TIMER
#define          Coil_06_CCR                  Control_CH06_CCR
#define          Coil_06_IN1PORT              Control_CH06_IN1PORT
#define          Coil_06_IN1PIN               Control_CH06_IN1PIN
#define          Coil_06_IN2PORT              Control_CH06_IN2PORT
#define          Coil_06_IN2PIN               Control_CH06_IN2PIN

#define          Coil_07_RelayPORT             Control_CH07_RelayPORT
#define          Coil_07_RelayPIN             Control_CH07_RelayPIN
#define          Coil_07_TIMER                Control_CH07_TIMER
#define          Coil_07_CCR                  Control_CH07_CCR
#define          Coil_07_IN1PORT              Control_CH07_IN1PORT
#define          Coil_07_IN1PIN               Control_CH07_IN1PIN
#define          Coil_07_IN2PORT              Control_CH07_IN2PORT
#define          Coil_07_IN2PIN               Control_CH07_IN2PIN

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#define      Coil_08_RelayPORT      Control_CH09_RelayPORT
#define      Coil_08_RelayPIN      Control_CH09_RelayPIN
#define      Coil_08_TIMER          Control_CH09_TIMER
#define      Coil_08_CCR            Control_CH09_CCR
#define      Coil_08_IN1PORT        Control_CH09_IN1PORT
#define      Coil_08_IN1PIN         Control_CH09_IN1PIN
#define      Coil_08_IN2PORT        Control_CH09_IN2PORT
#define      Coil_08_IN2PIN         Control_CH09_IN2PIN

#define      Coil_09_RelayPORT      Control_CH11_RelayPORT
#define      Coil_09_RelayPIN      Control_CH11_RelayPIN
#define      Coil_09_TIMER          Control_CH11_TIMER
#define      Coil_09_CCR            Control_CH11_CCR
#define      Coil_09_IN1PORT        Control_CH11_IN1PORT
#define      Coil_09_IN1PIN         Control_CH11_IN1PIN
#define      Coil_09_IN2PORT        Control_CH11_IN2PORT
#define      Coil_09_IN2PIN         Control_CH11_IN2PIN

#define      Coil_10_RelayPORT      Control_CH08_RelayPORT
#define      Coil_10_RelayPIN      Control_CH08_RelayPIN
#define      Coil_10_TIMER          Control_CH08_TIMER
#define      Coil_10_CCR            Control_CH08_CCR
#define      Coil_10_IN1PORT        Control_CH08_IN1PORT
#define      Coil_10_IN1PIN         Control_CH08_IN1PIN
#define      Coil_10_IN2PORT        Control_CH08_IN2PORT
#define      Coil_10_IN2PIN         Control_CH08_IN2PIN

#define      Coil_11_RelayPORT      Control_CH10_RelayPORT
#define      Coil_11_RelayPIN      Control_CH10_RelayPIN
#define      Coil_11_TIMER          Control_CH10_TIMER
#define      Coil_11_CCR            Control_CH10_CCR
#define      Coil_11_IN1PORT        Control_CH10_IN1PORT
#define      Coil_11_IN1PIN         Control_CH10_IN1PIN
#define      Coil_11_IN2PORT        Control_CH10_IN2PORT
#define      Coil_11_IN2PIN         Control_CH10_IN2PIN

#define      Coil_12_RelayPORT      Control_CH12_RelayPORT
#define      Coil_12_RelayPIN      Control_CH12_RelayPIN
#define      Coil_12_TIMER          Control_CH12_TIMER
#define      Coil_12_CCR            Control_CH12_CCR
#define      Coil_12_IN1PORT        Control_CH12_IN1PORT
#define      Coil_12_IN1PIN         Control_CH12_IN1PIN
#define      Coil_12_IN2PORT        Control_CH12_IN2PORT
#define      Coil_12_IN2PIN         Control_CH12_IN2PIN

#define      Coil_13_RelayPORT      Control_CH01_RelayPORT
#define      Coil_13_RelayPIN      Control_CH01_RelayPIN
#define      Coil_13_TIMER          Control_CH01_TIMER
#define      Coil_13_CCR            Control_CH01_CCR
#define      Coil_13_IN1PORT        Control_CH01_IN1PORT
#define      Coil_13_IN1PIN         Control_CH01_IN1PIN
#define      Coil_13_IN2PORT        Control_CH01_IN2PORT
#define      Coil_13_IN2PIN         Control_CH01_IN2PIN

#define      Coil_14_RelayPORT      Control_CH03_RelayPORT
#define      Coil_14_RelayPIN      Control_CH03_RelayPIN
#define      Coil_14_TIMER          Control_CH03_TIMER
#define      Coil_14_CCR            Control_CH03_CCR
#define      Coil_14_IN1PORT        Control_CH03_IN1PORT
#define      Coil_14_IN1PIN         Control_CH03_IN1PIN
#define      Coil_14_IN2PORT        Control_CH03_IN2PORT
#define      Coil_14_IN2PIN         Control_CH03_IN2PIN

#define      Coil_15_RelayPORT      Control_CH05_RelayPORT
#define      Coil_15_RelayPIN      Control_CH05_RelayPIN
#define      Coil_15_TIMER          Control_CH05_TIMER
#define      Coil_15_CCR            Control_CH05_CCR
#define      Coil_15_IN1PORT        Control_CH05_IN1PORT
#define      Coil_15_IN1PIN         Control_CH05_IN1PIN
#define      Coil_15_IN2PORT        Control_CH05_IN2PORT
#define      Coil_15_IN2PIN         Control_CH05_IN2PIN

#define      Coil_16_RelayPORT      Control_CH02_RelayPORT

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามแก้ไขตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#define      Coil_16_RelayPIN          Control_CH02_RelayPIN
#define      Coil_16_TIMER            Control_CH02_TIMER
#define      Coil_16_CCR              Control_CH02_CCR
#define      Coil_16_IN1PORT         Control_CH02_IN1PORT
#define      Coil_16_IN1PIN          Control_CH02_IN1PIN
#define      Coil_16_IN2PORT         Control_CH02_IN2PORT
#define      Coil_16_IN2PIN          Control_CH02_IN2PIN

#define      Coil_17_RelayPORT        Control_CH04_RelayPORT
#define      Coil_17_RelayPIN        Control_CH04_RelayPIN
#define      Coil_17_TIMER            Control_CH04_TIMER
#define      Coil_17_CCR              Control_CH04_CCR
#define      Coil_17_IN1PORT         Control_CH04_IN1PORT
#define      Coil_17_IN1PIN          Control_CH04_IN1PIN
#define      Coil_17_IN2PORT         Control_CH04_IN2PORT
#define      Coil_17_IN2PIN          Control_CH04_IN2PIN

#define      Coil_18_RelayPORT        Control_CH06_RelayPORT
#define      Coil_18_RelayPIN        Control_CH06_RelayPIN
#define      Coil_18_TIMER            Control_CH06_TIMER
#define      Coil_18_CCR              Control_CH06_CCR
#define      Coil_18_IN1PORT         Control_CH06_IN1PORT
#define      Coil_18_IN1PIN          Control_CH06_IN1PIN
#define      Coil_18_IN2PORT         Control_CH06_IN2PORT
#define      Coil_18_IN2PIN          Control_CH06_IN2PIN

#define      Coil_19_RelayPORT        Control_CH07_RelayPORT
#define      Coil_19_RelayPIN        Control_CH07_RelayPIN
#define      Coil_19_TIMER            Control_CH07_TIMER
#define      Coil_19_CCR              Control_CH07_CCR
#define      Coil_19_IN1PORT         Control_CH07_IN1PORT
#define      Coil_19_IN1PIN          Control_CH07_IN1PIN
#define      Coil_19_IN2PORT         Control_CH07_IN2PORT
#define      Coil_19_IN2PIN          Control_CH07_IN2PIN

#define      Coil_20_RelayPORT        Control_CH09_RelayPORT
#define      Coil_20_RelayPIN        Control_CH09_RelayPIN
#define      Coil_20_TIMER            Control_CH09_TIMER
#define      Coil_20_CCR              Control_CH09_CCR
#define      Coil_20_IN1PORT         Control_CH09_IN1PORT
#define      Coil_20_IN1PIN          Control_CH09_IN1PIN
#define      Coil_20_IN2PORT         Control_CH09_IN2PORT
#define      Coil_20_IN2PIN          Control_CH09_IN2PIN

#define      Coil_21_RelayPORT        Control_CH11_RelayPORT
#define      Coil_21_RelayPIN        Control_CH11_RelayPIN
#define      Coil_21_TIMER            Control_CH11_TIMER
#define      Coil_21_CCR              Control_CH11_CCR
#define      Coil_21_IN1PORT         Control_CH11_IN1PORT
#define      Coil_21_IN1PIN          Control_CH11_IN1PIN
#define      Coil_21_IN2PORT         Control_CH11_IN2PORT
#define      Coil_21_IN2PIN          Control_CH11_IN2PIN

#define      Coil_22_RelayPORT        Control_CH08_RelayPORT
#define      Coil_22_RelayPIN        Control_CH08_RelayPIN
#define      Coil_22_TIMER            Control_CH08_TIMER
#define      Coil_22_CCR              Control_CH08_CCR
#define      Coil_22_IN1PORT         Control_CH08_IN1PORT
#define      Coil_22_IN1PIN          Control_CH08_IN1PIN
#define      Coil_22_IN2PORT         Control_CH08_IN2PORT
#define      Coil_22_IN2PIN          Control_CH08_IN2PIN

#define      Coil_23_RelayPORT        Control_CH10_RelayPORT
#define      Coil_23_RelayPIN        Control_CH10_RelayPIN
#define      Coil_23_TIMER            Control_CH10_TIMER
#define      Coil_23_CCR              Control_CH10_CCR
#define      Coil_23_IN1PORT         Control_CH10_IN1PORT
#define      Coil_23_IN1PIN          Control_CH10_IN1PIN
#define      Coil_23_IN2PORT         Control_CH10_IN2PORT
#define      Coil_23_IN2PIN          Control_CH10_IN2PIN

#define      Coil_24_RelayPORT        Control_CH12_RelayPORT
#define      Coil_24_RelayPIN        Control_CH12_RelayPIN
#define      Coil_24_TIMER            Control_CH12_TIMER

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#define      Coil_24_CCR                Control_CH12_CCR
#define      Coil_24_IN1PORT           Control_CH12_IN1PORT
#define      Coil_24_IN1PIN            Control_CH12_IN1PIN
#define      Coil_24_IN2PORT           Control_CH12_IN2PORT
#define      Coil_24_IN2PIN            Control_CH12_IN2PIN

/*
 * Extern Function Prototype
 */
extern void Control_PIN_Initial(void);
extern void Coil_01(float fdir);
extern void Coil_02(float fdir);
extern void Coil_03(float fdir);
extern void Coil_04(float fdir);
extern void Coil_05(float fdir);
extern void Coil_06(float fdir);
extern void Coil_07(float fdir);
extern void Coil_08(float fdir);
extern void Coil_09(float fdir);
extern void Coil_10(float fdir);
extern void Coil_11(float fdir);
extern void Coil_12(float fdir);
extern void Coil_13(float fdir);
extern void Coil_14(float fdir);
extern void Coil_15(float fdir);
extern void Coil_16(float fdir);
extern void Coil_17(float fdir);
extern void Coil_18(float fdir);
extern void Coil_19(float fdir);
extern void Coil_20(float fdir);
extern void Coil_21(float fdir);
extern void Coil_22(float fdir);
extern void Coil_23(float fdir);
extern void Coil_24(float fdir);
extern void coil_i(unsigned char cn,float fdir );
//coil calculate system
extern void coil_dlinear(float position,float factor,float offset);
extern float trapezoid1(float position);
#ifdef __cplusplus
}
#endif
#endif

```

ง.5 โปรแกรมย่อยควบคุมการขับกระแสให้ขดลวด (Coil_Control_Handle.c)

```

#include "Coil_Control_Handler.h"
#include "stm32f4xx.h"

#include "stm32f4xx_gpio.h"
#include "stm32f4xx_rcc.h"

void Control_PIN_Initial(void)
{
    RCC->AHB1ENR |= (
        (1UL << 0) | //GPIOA
        (1UL << 1) | //GPIOB
        (1UL << 2) | //GPIOC
        (1UL << 3) | //GIOD
        (1UL << 4) ); //GPIOE /* Enable ALL GPIO clock */

    //Control_CH01 Initialization
    Control_CH01_IN1PORT ->MODER &= ~((3UL << (2*Control_CH01_IN1PIN)));
    // MODE to Output
    Control_CH01_IN2PORT ->MODER &= ~((3UL << (2*Control_CH01_IN2PIN)));
    Control_CH01_RelayPORT ->MODER &= ~((3UL << (2*Control_CH01_RelayPIN)));
    Control_CH01_IN1PORT ->MODER |= ((1UL << (2*Control_CH01_IN1PIN)));
    Control_CH01_IN2PORT ->MODER |= ((1UL << (2*Control_CH01_IN2PIN)));
    Control_CH01_RelayPORT ->MODER |= ((1UL << (2*Control_CH01_RelayPIN)));

    Control_CH01_IN1PORT ->OTYPER &= ~((1UL << Control_CH01_IN1PIN));
    /*output Push-Pull */

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Control_CH01_IN2PORT ->OTYPER &= ~((1UL << Control_CH01_IN2PIN) );
Control_CH01_RelayPORT ->OTYPER &= ~((1UL << Control_CH01_RelayPIN) );

Control_CH01_IN1PORT ->OSPEEDR &= ~((3UL << 2*Control_CH01_IN1PIN) );
/* 25MHz Medium Speed */
Control_CH01_IN2PORT ->OSPEEDR &= ~((3UL << 2*Control_CH01_IN2PIN) );
Control_CH01_RelayPORT ->OSPEEDR &= ~((3UL << 2*Control_CH01_RelayPIN) );
Control_CH01_IN1PORT ->OSPEEDR |= ((1UL << 2*Control_CH01_IN1PIN) );
Control_CH01_IN2PORT ->OSPEEDR |= ((1UL << 2*Control_CH01_IN2PIN) );
Control_CH01_RelayPORT ->OSPEEDR |= ((1UL << 2*Control_CH01_RelayPIN) );

Control_CH01_IN1PORT ->PUPDR &= ~((3UL << 2*Control_CH01_IN1PIN));
/* PIN is Pull up */
Control_CH01_IN2PORT ->PUPDR &= ~((3UL << 2*Control_CH01_IN2PIN) );
Control_CH01_RelayPORT ->PUPDR &= ~((3UL << 2*Control_CH01_RelayPIN) );
Control_CH01_IN1PORT ->PUPDR |= ((1UL << 2*Control_CH01_IN1PIN) );
Control_CH01_IN2PORT ->PUPDR |= ((1UL << 2*Control_CH01_IN2PIN) );
Control_CH01_RelayPORT ->PUPDR |= ((1UL << 2*Control_CH01_RelayPIN) );

//Control_CH02 Initialization
.
.
.
//Control_CH12 Initialization
Control_CH12_IN1PORT ->MODER &= ~((3UL << (2*Control_CH12_IN1PIN)) );
/* MODE to Output */
Control_CH12_IN2PORT ->MODER &= ~((3UL << (2*Control_CH12_IN2PIN)) );
Control_CH12_RelayPORT ->MODER &= ~((3UL << (2*Control_CH12_RelayPIN)) );
Control_CH12_IN1PORT ->MODER |= ((1UL << (2*Control_CH12_IN1PIN)) );
Control_CH12_IN2PORT ->MODER |= ((1UL << (2*Control_CH12_IN2PIN)) );
Control_CH12_RelayPORT ->MODER |= ((1UL << (2*Control_CH12_RelayPIN)) );

Control_CH12_IN1PORT ->OTYPER &= ~((1UL << Control_CH12_IN1PIN) );
/*output Push-Pull*/
Control_CH12_IN2PORT ->OTYPER &= ~((1UL << Control_CH12_IN2PIN) );
Control_CH12_RelayPORT ->OTYPER &= ~((1UL << Control_CH12_RelayPIN) );

Control_CH12_IN1PORT ->OSPEEDR &= ~((3UL << 2*Control_CH12_IN1PIN) );
/*25MHz Medium Speed*/
Control_CH12_IN2PORT ->OSPEEDR &= ~((3UL << 2*Control_CH12_IN2PIN) );
Control_CH12_RelayPORT ->OSPEEDR &= ~((3UL << 2*Control_CH12_RelayPIN) );
Control_CH12_IN1PORT ->OSPEEDR |= ((1UL << 2*Control_CH12_IN1PIN) );
Control_CH12_IN2PORT ->OSPEEDR |= ((1UL << 2*Control_CH12_IN2PIN) );
Control_CH12_RelayPORT ->OSPEEDR |= ((1UL << 2*Control_CH12_RelayPIN) );

Control_CH12_IN1PORT ->PUPDR &= ~((3UL << 2*Control_CH12_IN1PIN) );
/*PIN is Pull up*/
Control_CH12_IN2PORT ->PUPDR &= ~((3UL << 2*Control_CH12_IN2PIN) );
Control_CH12_RelayPORT ->PUPDR &= ~((3UL << 2*Control_CH12_RelayPIN) );
Control_CH12_IN1PORT ->PUPDR |= ( (1UL << 2*Control_CH12_IN1PIN) );
Control_CH12_IN2PORT ->PUPDR |= ( (1UL << 2*Control_CH12_IN2PIN) );
Control_CH12_RelayPORT ->PUPDR |= ( (1UL << 2*Control_CH12_RelayPIN) );

}

//fdir coil1
void Coil_01(float fdir)
{
float PWM_duty ;
///##@open-close Relay switcher
Coil_01_RelayPORT->ODR &= ~( 1UL << Coil_01_RelayPIN ) ;

///##@open-close IN1 IN2 as pole direction
if (fdir<0)
{
Coil_01_IN1PORT ->ODR &= ~( 1UL << Coil_01_IN1PIN ) ;
Coil_01_IN2PORT ->ODR |= ( 1UL << Coil_01_IN2PIN ) ;
PWM_duty = -(fdir);
}
else if(fdir>0)
{
Coil_01_IN1PORT ->ODR |= ( 1UL << Coil_01_IN1PIN ) ;
Coil_01_IN2PORT ->ODR &= ~( 1UL << Coil_01_IN2PIN ) ;
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        PWM_duty = (fdir) ;
    }
    else
    {
        Coil_01_IN1PORT ->ODR &= ~( 1UL << Coil_01_IN1PIN ) ;
        Coil_01_IN2PORT ->ODR &= ~( 1UL << Coil_01_IN2PIN ) ;
        PWM_duty = 100 ;
    }

    ///#@change PWM ratio
    Coil_01_TIMER -> Coil_01_CCR = (PWM_duty*((Coil_01_TIMER->ARR)/100) ) ;
}

//fdir coil2
.
.
.
//fdir coil24
void Coil_24(float fdir)
{
    float PWM_duty ;
    ///#@open-close Relay switcher
    Coil_24_RelayPORT->ODR |= ( 1UL << Coil_24_RelayPIN ) ;

    ///#@open-close IN1 IN2 as pole direction
    if (fdir<0)
    {
        Coil_24_IN1PORT ->ODR &= ~( 1UL << Coil_24_IN1PIN ) ;
        Coil_24_IN2PORT ->ODR |= ( 1UL << Coil_24_IN2PIN ) ;
        PWM_duty = -(fdir);
    }
    else if(fdir>0)
    {
        Coil_24_IN1PORT ->ODR |= ( 1UL << Coil_24_IN1PIN ) ;
        Coil_24_IN2PORT ->ODR &= ~( 1UL << Coil_24_IN2PIN ) ;
        PWM_duty = (fdir) ;
    }
    else
    {
        Coil_24_IN1PORT ->ODR &= ~( 1UL << Coil_24_IN1PIN ) ;
        Coil_24_IN2PORT ->ODR &= ~( 1UL << Coil_24_IN2PIN ) ;
        PWM_duty = 100 ;
    }

    ///#@change PWM ratio
    Coil_24_TIMER -> Coil_24_CCR = (PWM_duty*((Coil_24_TIMER->ARR)/100) ) ;
}

void coil_i(unsigned char cn,float fdir )
{
    fdir=fdir/2;
    if(fdir<0)
        fdir=fdir-50;
    else if (fdir>0)
        fdir=fdir+50;
    else
        fdir=0;
    switch (cn)
    {
    case 1 : Coil_01(fdir);
            break;
    case 2 : Coil_02(fdir);
            break;
    case 3 : Coil_03(fdir);
            break;
    case 4 : Coil_04(fdir);
            break;
    case 5 : Coil_05(fdir);
            break;
    case 6 : Coil_06(fdir);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        break;
    case 7 : Coil_07(fdir);
        break;
    case 8 : Coil_08(fdir);
        break;
    case 9 : Coil_09(fdir);
        break;
    case 10 : Coil_10(fdir);
        break;
    case 11 : Coil_11(fdir);
        break;
    case 12 : Coil_12(fdir);
        break;
    case 13 : Coil_13(fdir);
        break;
    case 14 : Coil_14(fdir);
        break;
    case 15 : Coil_15(fdir);
        break;
    case 16 : Coil_16(fdir);
        break;
    case 17 : Coil_17(fdir);
        break;
    case 18 : Coil_18(fdir);
        break;
    case 19 : Coil_19(fdir);
        break;
    case 20 : Coil_20(fdir);
        break;
    case 21 : Coil_21(fdir);
        break;
    case 22 : Coil_22(fdir);
        break;
    case 23 : Coil_23(fdir);
        break;
    case 24 : Coil_24(fdir);
        break;
    case 'L' :
        Coil_01(fdir) ;
        Coil_02(fdir) ;
        Coil_03(fdir) ;
        Coil_04(fdir) ;
        Coil_05(fdir) ;
        Coil_06(fdir) ;
        Coil_07(fdir) ;
        Coil_08(fdir) ;
        Coil_09(fdir) ;
        Coil_10(fdir) ;
        Coil_11(fdir) ;
        Coil_12(fdir) ;
        break;
    case 'H' :
        Coil_13(fdir) ;
        Coil_14(fdir) ;
        Coil_15(fdir) ;
        Coil_16(fdir) ;
        Coil_17(fdir) ;
        Coil_18(fdir) ;
        Coil_19(fdir) ;
        Coil_20(fdir) ;
        Coil_21(fdir) ;
        Coil_22(fdir) ;
        Coil_23(fdir) ;
        Coil_24(fdir) ;
        break;
    default :
        break;
}
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จ.6 โปรแกรมย่อยคำนวณการควบคุมขดลวด (Coil_System.c)

```

#include "Coil_Control_Handler.h"
#define coil_interval 20.5
/*
 * Trapezoid calculate handle function
 * Insert Parameter 1 Domain 0 - 100 X-axis position floating point
 * return Range 0 - 100 integer trapezoid form 0-50-100-100-50-0
 */
float trapezoid1(float position)
{
    /*Trapezoid form 0-50-100-100-50-0
    * position per 0 to 100
    */
    //below zero adjust to power 0%
    if(position <= 0 )
    {
        return(0);
    }
    //position 0 to 40 a power by straight line EQ
    if (position > 0 && position <= 2*coil_interval)
    {
        return( (position*((float)100/(2*coil_interval))) );
    }
    // Constant power 100 form position 40 to 80
    if ((position > 2*coil_interval) && (position <= 4*coil_interval))
    {
        return(100);
    }
    // Decay power by straight line EQ to zero in 80 to 120
    if ((position > 4*coil_interval) && (position <= 6*coil_interval))
    {
        return( ((-1*((float)100/(2*coil_interval)))*(position)) + 300 );
    }
    //Higher than 100 power adjust to 0
    if (position > 6*coil_interval )
    {
        return(0);
    }
}
return(0);
}
/////////////////////////////////Convert all parameter to real Physical value function/////////////////////////////////
void coil_dlinear(float posit,float factor,float offset)
{
    #define post_offset 35
    #define post_max545
    int ch ;
    char ch_begin,ch_end;
    float power;
    ch_begin = ((posit-(coil_interval))/coil_interval)-3;
    ch_end = ch_begin+6;
    for (ch = (ch_begin-3); ch < (ch_end+3); ch++)
    {
        power = factor*(trapezoid1(posit-(coil_interval*(ch-1))));
        if( (ch>0) & (ch<25) )
            coil_i(ch,power+offset);
    }
}
}

```

จ.7 ส่วนหัวโปรแกรมย่อยส่วนจัดการการเข้าถึงข้อมูล (Data_Handler.h)

```

#ifdef __cplusplus
extern "C"
{
    #endif

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

#ifndef __DATA_HANDLER_H_
#define __DATA_HANDLER_H_

extern unsigned int Data_Get_Index(unsigned char index);
extern void Data_Store_Index(unsigned char index,unsigned int data);
extern void Data_Store_CharArray(unsigned char* data_address,unsigned range);
extern unsigned int * Data_Get_Storage_address(unsigned char index);

extern float Data_LightDisplacement_12bitCal(unsigned int measure_data);
extern float Data_Get_LightDisplacement1(void);
extern float Data_Get_LightDisplacement2(void);

extern int Data_EncoderPositionCal(unsigned int data, unsigned int off_set);
extern int Data_Get_EncoderPositon(void);

#ifdef __cplusplus
}
#endif
#endif

```

ง.8 โปรแกรมย่อยส่วนจัดการการเข้าถึงข้อมูล (Data_Handler.c)

```

#include "Data_Handler.h"
static unsigned char data_storage[6];
static unsigned int *data1_pointer=&data_storage[0],
                    *data2_pointer=&data_storage[2],
                    *data3_pointer=&data_storage[4];
////////////////////////////////////Get Data Store Address////////////////////////////////////
unsigned int Data_Get_Index(unsigned char index)
{
    switch (index)
    {
        case 1:
            return(*data1_pointer);
            break;
        case 2:
            return(*data2_pointer);
            break;
        case 3:
            return(*data3_pointer);
            break;
        default:
            return(0);
            break;
    }
}
////////////////////////////////////Store Data to Buffer by using Inde////////////////////////////////////
void Data_Store_Index(unsigned char index,unsigned int data)
{
    switch (index)
    {
        case 1:
            *data1_pointer=data;
            break;
        case 2:
            *data2_pointer=data;
            break;
        case 3:
            *data3_pointer=data;
            break;
        default:
            break;
    }
}
////////////////////////////////////Store Data to Buffer byusing Array////////////////////////////////////
void Data_Store_CharArray(unsigned char *data_address,unsigned range)
{

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    unsigned char icount ;
    for(icount=0;icount<range;icount++)
        data_storage[icount]= *(data_address+icount);
}
////////////////////////////////////ADC read data Handle////////////////////////////////////
unsigned int * Data_Get_Storage_address(unsigned char index)
{
    switch (index) {
        case 1:
            return(data1_pointer);
            break;
        case 2:
            return(data2_pointer);
            break;
        case 3:
            return(data3_pointer);
            break;
        default:
            return(0);
            break;
    }
}
////////////////////////////////////Light Displacement Sensor Calculation function////////////////////////////////////
float Data_LightDisplacement_12bitCal(unsigned int measure_data)
{
    float actual_measure_data, inverse_number_distance, real_distance;

    actual_measure_data = (float)(3.3/4096)*measure_data ;
    inverse_number_distance = (actual_measure_data-0.42)/10 ;
    real_distance = (1/inverse_number_distance)-0.42 ;
    return(real_distance);
}
////////////////////////////////////Get High form Front sensor////////////////////////////////////
float Data_Get_LightDisplacement1(void)
{
    return(Data_LightDisplacement_12bitCal(*data1_pointer));
}
////////////////////////////////////Get High form Rear sensor////////////////////////////////////
float Data_Get_LightDisplacement2(void)
{
    return(Data_LightDisplacement_12bitCal(*data2_pointer));
}
////////////////////////////////////Calculate Position Form Encoder////////////////////////////////////
int Data_EncoderPositionCal(unsigned int data, unsigned int off_set)
{
    int data_offset;
    data_offset=data-off_set;
    data_offset=data_offset*2;
    return(data_offset);
}
////////////////////////////////////Get Encoder Position////////////////////////////////////
int Data_Get_EncoderPositon(void)
{
    return(Data_EncoderPositionCal(*data3_pointer,256));
}

```

จ.9 ส่วนหัวสำหรับใช้งานโปรแกรมย่อยตัวควบคุมพีไอดี (PID_Control_Handle.h)

```

#ifdef __cplusplus
    extern "C" {
#endif
#ifndef __PID_CONTROL_HANDLE_H_
#define __PID_CONTROL_HANDLE_H_
    typedef struct {
        double previous_error;
        double integral;
        double derivative;
        double setpoint;
        double measure_feedback;
        double output;
        double Kp;
        double Ki;
        double Kd;
    }

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    double dt;
    }PID_variable_Typedef;
extern void PID_Controller_cal(PID_variable_Typedef *PID);
extern void PID_Integral_Limiter(PID_variable_Typedef *PID,double max,double min);
extern void PID_Derivative_Limiter(PID_variable_Typedef *PID,double max,double min);
extern void PID_Output_Limiter(PID_variable_Typedef *PID,double max,double min);
#ifdef __cplusplus
}
#endif
#endif

```

ง.10 โปรแกรมย่อยตัวควบคุมพีไอดี (PID_Control_Handle.c)

```

#include "PID_Control_Handle.h"
////////////////////////////////////PID Calculator////////////////////////////////////
void PID_Controller_cal(PID_variable_Typedef *PID)
{
    double error;
    error = (PID->setpoint) - (PID->measure_feedback);
    PID->integral = (PID->integral) + (error*PID->dt);
    PID->derivative = (error - (PID->previous_error))/PID->dt;
    PID->output = ((PID->Kp)*error) + ((PID->Ki)*(PID->integral)) + ((PID->Kd)*(PID->
    >derivative));
    PID->previous_error = error;
}
void PID_Integral_Limiter(PID_variable_Typedef *PID,double max,double min)
{
    if (PID->integral>max)
        PID->integral=max;
    else if (PID->integral<min)
        PID->integral=min;
}
void PID_Derivative_Limiter(PID_variable_Typedef *PID,double max,double min)
{
    if (PID->derivative>max)
        PID->derivative=max;
    else if (PID->derivative<min)
        PID->derivative=min;
}
void PID_Output_Limiter(PID_variable_Typedef *PID,double max,double min)
{
    if (PID->output>max)
        PID->output=max;
    else if (PID->output<min)
        PID->output=min;
}
}

```

ง.11 ส่วนหัวโปรแกรมย่อยสำหรับใช้งานโมดูลจับเวลา (TIMER.h)

```

#ifdef __cplusplus
extern "C" {
#endif

#ifndef __TIMER_H_
#define __TIMER_H_

#include "stm32f4xx_tim.h"

extern void Timer5Interrupt_ms(uint32_t ts_ms);
extern void Timer5INT_Config(void);
extern void TimerPWM_Init(void);
extern void TimerSynch_Start (void);
extern void TimerSynch_Init(void);

#ifdef __cplusplus
}
#endif

#endif

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง.12 โปรแกรมย่อยสำหรับใช้งานโมดูลจับเวลา (TIMER.c)

```

#include "stm32f4xx.h"
#include "stm32f4xx_gpio.h"
#include "stm32f4xx_tim.h"
#include "stm32f4xx_rcc.h"
#include "misc.h"
#include "TIMER.h"
// Definition of system clock
#define APB1CLOCK 42000000
#define APB2CLOCK 84000000
// Initialization variable declaration
TIM_TimeBaseInitTypeDef TIM_TimebaseInitial ;
TIM_TimeBaseInitTypeDef TIM_TimebasePeriod ;
TIM_OCInitTypeDef TIM_OCStruct ;
//////////Control Loop and Sampler period Definition//////////
void Timer5Interrupt_ms(uint32_t ts_ms)
{
    TIM_Cmd(TIM5, DISABLE);
    RCC_APB1PeriphClockCmd(RCC_APB1Periph_TIM5, ENABLE);
    uint16_t prescaler = 42000 ;
    uint32_t arr = 0 ;
    /* larr = prescaler/42MHz
    * x*arr = ts s then x/ts = (84MHz/prescaler)*
    arr = ((APB1CLOCK/1000)/prescaler)*ts_ms*2 ;
    TIM_TimebaseInitial.TIM_CounterMode=TIM_CounterMode_Up;
    TIM_TimebaseInitial.TIM_ClockDivision=TIM_CKD_DIV1;
    TIM_TimebaseInitial.TIM_Prescaler= prescaler-1 ;
    TIM_TimebaseInitial.TIM_Period=arr-1 ;
    TIM_TimeBaseInit(TIM5,&TIM_TimebaseInitial);
    TIM_ClearITPendingBit(TIM5, TIM_IT_Update);
    TIM_ITConfig(TIM5, TIM_IT_Update, ENABLE);
    TIM_ARRPreloadConfig(TIM5,ENABLE);
    TIM_Cmd(TIM5, ENABLE);
}
//////////define Vector interrupt to Interrupt service routine brace program//////////
void Timer5INT_Config(void)
{
    NVIC_InitTypeDef NVIC_InitStructure;
    /* TIM3 clock enable */
    RCC_APB1PeriphClockCmd(RCC_APB1Periph_TIM5, ENABLE);
    /* Enable the TIM5 global Interrupt */
    NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannel = TIM5_IRQn; //TIM5_IRQn
    NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelPreemptionPriority = 0;
    NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelSubPriority = 1;
    NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelCmd = ENABLE;
    NVIC_Init(&NVIC_InitStructure);
}
//////////initialize coil control Timer time base//////////
void TimerSynch_Init(void)
{
    RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_TIM1, ENABLE);
    RCC_APB1PeriphClockCmd(RCC_APB1Periph_TIM2, ENABLE);
    RCC_APB1PeriphClockCmd(RCC_APB1Periph_TIM3, ENABLE);
    RCC_APB1PeriphClockCmd(RCC_APB1Periph_TIM4, ENABLE);
    // TIMER base time setup
    //master
    TIM_TimebaseInitial.TIM_CounterMode=TIM_CounterMode_Up;
    TIM_TimebaseInitial.TIM_ClockDivision=0;
    // Freq = 84000k/(TIM1ARR*TIMsyncARR) then TIMsyncARR = 84000k/(Freq*TIM1ARR)
    TIM_TimebaseInitial.TIM_Period=(3)-1;
    TIM_TimeBaseInit(TIM1,&TIM_TimebaseInitial);
    //slave and PWM period
    TIM_TimebaseInitial.TIM_CounterMode=TIM_CounterMode_Up;
    TIM_TimebaseInitial.TIM_ClockDivision=0;
    TIM_TimebaseInitial.TIM_Period=(280000)-1;
    //(1120)-1; // PWM Frequency = 25000 (L298 Typical)
    TIM_TimeBaseInit(TIM2,&TIM_TimebaseInitial);
    TIM_TimeBaseInit(TIM3,&TIM_TimebaseInitial);
    TIM_TimeBaseInit(TIM4,&TIM_TimebaseInitial);
    //Synchronization set-up
    TIM_SelectOutputTrigger(TIM1, TIM_TRGOSource_Update);
    TIM_SelectInputTrigger(TIM2, TIM_TS_ITR0);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

TIM_SelectInputTrigger(TIM3,TIM_TS_ITR0);
TIM_SelectInputTrigger(TIM4,TIM_TS_ITR0);
// set-up the propose of syn-timer
TIM_SelectSlaveMode(TIM2,TIM_SlaveMode_External1);
TIM_SelectSlaveMode(TIM3,TIM_SlaveMode_External1);
TIM_SelectSlaveMode(TIM4,TIM_SlaveMode_External1);
TIM_SelectMasterSlaveMode(TIM1,TIM_MasterSlaveMode_Enable);
}
//Start Coil Control Timer Group//
void TimerSynch_Start (void)
{
    TIM_ARRPreloadConfig(TIM1,ENABLE);
    TIM_ARRPreloadConfig(TIM2,ENABLE);
    TIM_ARRPreloadConfig(TIM3,ENABLE);
    TIM_ARRPreloadConfig(TIM3,ENABLE);
    TIM_Cmd(TIM4, ENABLE);
    TIM_Cmd(TIM3, ENABLE);
    TIM_Cmd(TIM2, ENABLE);
    TIM_Cmd(TIM1, ENABLE);
}
//initialize Coil Control Timer PWM//
void TimerPWM_Init(void)
{
    //Timer 2 3 4 PWM channel 1
    TIM_OCStruct.TIM_OCMode=TIM_OCMode_PWM1;
    TIM_OCStruct.TIM_OutputState=TIM_OutputState_Enable;
    TIM_OCStruct.TIM_Pulse=0;
    TIM_OCStruct.TIM_OCPolarity=TIM_OCPolarity_High;
    TIM_OC1Init(TIM2,&TIM_OCStruct);
    TIM_OC1Init(TIM3,&TIM_OCStruct);
    TIM_OC1Init(TIM4,&TIM_OCStruct);
    TIM_OC1PreloadConfig(TIM2,TIM_OCPreload_Enable);
    TIM_OC1PreloadConfig(TIM3,TIM_OCPreload_Enable);
    TIM_OC1PreloadConfig(TIM4,TIM_OCPreload_Enable);
    //Timer 2 3 4 PWM channel 2
    TIM_OCStruct.TIM_OutputState = TIM_OutputState_Enable;
    TIM_OCStruct.TIM_Pulse = 0 ;
    TIM_OC2Init(TIM2, &TIM_OCStruct);
    TIM_OC2Init(TIM3, &TIM_OCStruct);
    TIM_OC2Init(TIM4, &TIM_OCStruct);
    TIM_OC2PreloadConfig(TIM2, TIM_OCPreload_Enable);
    TIM_OC2PreloadConfig(TIM3, TIM_OCPreload_Enable);
    TIM_OC2PreloadConfig(TIM4, TIM_OCPreload_Enable);
    //Timer 2 3 4 PWM channel 3
    TIM_OCStruct.TIM_OutputState=TIM_OutputState_Enable;
    TIM_OCStruct.TIM_Pulse=0 ;
    TIM_OC3Init(TIM2,&TIM_OCStruct);
    TIM_OC3Init(TIM3,&TIM_OCStruct);
    TIM_OC3Init(TIM4,&TIM_OCStruct);
    TIM_OC3PreloadConfig(TIM2,TIM_OCPreload_Enable);
    TIM_OC3PreloadConfig(TIM3,TIM_OCPreload_Enable);
    TIM_OC3PreloadConfig(TIM4,TIM_OCPreload_Enable);
    //Timer 2 3 4 PWM channel 4
    TIM_OCStruct.TIM_OutputState=TIM_OutputState_Enable;
    TIM_OCStruct.TIM_Pulse=0;
    TIM_OC4Init(TIM2,&TIM_OCStruct);
    TIM_OC4Init(TIM3,&TIM_OCStruct);
    TIM_OC4Init(TIM4,&TIM_OCStruct);
    TIM_OC4PreloadConfig(TIM2,TIM_OCPreload_Enable);
    TIM_OC4PreloadConfig(TIM3,TIM_OCPreload_Enable);
    TIM_OC4PreloadConfig(TIM4,TIM_OCPreload_Enable);
    // TIMER2 OC GPIO INITI
    GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStructure;
    RCC_AHB1PeriphClockCmd(RCC_AHB1Periph_GPIOA,ENABLE);
    RCC_AHB1PeriphClockCmd(RCC_AHB1Periph_GPIOB,ENABLE);
    /* GPIOC Configuration: TIM2 CH1 (PA15), TIM2 CH2 (PB3), TIM2 CH3 (PB10) and TIM2 CH4
(PB11) */
    GPIO_InitStructure.GPIO_Pin=GPIO_Pin_15;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Mode=GPIO_Mode_AF;
    GPIO_InitStructure.GPIO_OType=GPIO_OType_PP;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Speed=GPIO_Speed_50MHz;
    GPIO_InitStructure.GPIO_PuPd=GPIO_PuPd_UP;
    GPIO_Init(GPIOA,&GPIO_InitStructure);
    //GPIO B

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

GPIO_InitStructure.GPIO_Pin=GPIO_Pin_3 | GPIO_Pin_11 | GPIO_Pin_10 ;
GPIO_InitStructure.GPIO_Mode=GPIO_Mode_AF;
GPIO_InitStructure.GPIO_OType=GPIO_OType_PP;
GPIO_InitStructure.GPIO_Speed=GPIO_Speed_50MHz;
GPIO_InitStructure.GPIO_PuPd=GPIO_PuPd_UP;
GPIO_Init(GPIOB,&GPIO_InitStructure);
//Alternate Function Configuration
GPIO_PinAFConfig(GPIOA,GPIO_PinSource15,GPIO_AF_TIM2);
GPIO_PinAFConfig(GPIOB,GPIO_PinSource3,GPIO_AF_TIM2);
GPIO_PinAFConfig(GPIOB,GPIO_PinSource11,GPIO_AF_TIM2);
GPIO_PinAFConfig(GPIOB,GPIO_PinSource10,GPIO_AF_TIM2);
// TIMER3 OC GPIO INITI
RCC_AHB1PeriphClockCmd(RCC_AHB1Periph_GPIOC,ENABLE);
/* GPIOC Configuration: TIM3 CH1 (PC6), TIM3 CH2 (PC7), TIM3 CH3 (PC8) and TIM3 CH4
(PC9) */
GPIO_InitStructure.GPIO_Pin=GPIO_Pin_6 | GPIO_Pin_7 | GPIO_Pin_8 | GPIO_Pin_9;
GPIO_InitStructure.GPIO_Mode=GPIO_Mode_AF;
GPIO_InitStructure.GPIO_OType=GPIO_OType_PP;
GPIO_InitStructure.GPIO_Speed=GPIO_Speed_50MHz;
GPIO_InitStructure.GPIO_PuPd=GPIO_PuPd_UP;
GPIO_Init(GPIOC,&GPIO_InitStructure);
//Alternate Function Configuration
GPIO_PinAFConfig(GPIOC,GPIO_PinSource6,GPIO_AF_TIM3);
GPIO_PinAFConfig(GPIOC,GPIO_PinSource7,GPIO_AF_TIM3);
GPIO_PinAFConfig(GPIOC,GPIO_PinSource8,GPIO_AF_TIM3);
GPIO_PinAFConfig(GPIOC,GPIO_PinSource9,GPIO_AF_TIM3);
//TIMER4 OC GPIO INITI
RCC_AHB1PeriphClockCmd(RCC_AHB1Periph_GPIOD,ENABLE);
/* GPIOC Configuration: TIM4 CH1 (PD12), TIM4 CH2 (PD13), TIM4 CH3 (PD14) and
TIM4 CH4 (PD15) */
GPIO_InitStructure.GPIO_Pin=GPIO_Pin_12 | GPIO_Pin_13 | GPIO_Pin_14 |
GPIO_Pin_15;
GPIO_InitStructure.GPIO_Mode=GPIO_Mode_AF;
GPIO_InitStructure.GPIO_OType=GPIO_OType_PP;
GPIO_InitStructure.GPIO_Speed=GPIO_Speed_50MHz;
GPIO_InitStructure.GPIO_PuPd=GPIO_PuPd_UP;
GPIO_Init(GPIOD,&GPIO_InitStructure);
//Alternate Function Configuration
GPIO_PinAFConfig(GPIOD,GPIO_PinSource12,GPIO_AF_TIM4);
GPIO_PinAFConfig(GPIOD,GPIO_PinSource13,GPIO_AF_TIM4);
GPIO_PinAFConfig(GPIOD,GPIO_PinSource14,GPIO_AF_TIM4);
GPIO_PinAFConfig(GPIOD,GPIO_PinSource15,GPIO_AF_TIM4);
}

```

ง.13 ส่วนหัวโปรแกรมย่อยสำหรับใช้งานโมดูลรับส่งข้อมูลผ่านพอร์ตอนุกรม (USART.h)

```

#ifndef __cplusplus
extern "C" {
#endif

#ifndef __USART_H_
#define __USART_H_

#include "stm32f4xx_usart.h"

extern void USART1_Initial(void);
extern void USART1_INT_Config(void);

extern void USART3_Initial(void);
extern void USART3_INT_Config(void);

#endif
}
#endif

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง.14 โปรแกรมย่อยสำหรับใช้งานโมดูลรับส่งข้อมูลผ่านพอร์ตอนุกรม (USART.c)

```

#include "stm32f4xx.h"
#include "misc.h"
#include "stm32f4xx_usart.h"
#include "stm32f4xx_gpio.h"
#include "stm32f4xx_rcc.h"
#include <stdio.h>

#include "USART.h"
////////////////////Initialize Serial Port Module 1////////////////////
void USART1_Init(void)
{
    /* USARTx configured as follow:
     - BaudRate = 115200 baud
     - Word Length = 8 Bits
     - One Stop Bit
     - No parity
     - Hardware flow control disabled (RTS and CTS signals)
     - Receive and transmit enabled
    */
    GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStructure;
    USART_InitTypeDef USART_InitStructure;

    /* Enable GPIO clock */
    RCC_AHB1PeriphClockCmd(RCC_AHB1Periph_GPIOB, ENABLE);

    /* Enable UART clock */
    RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_USART1, ENABLE);

    /* Connect Pxx to USARTx_Tx*/
    GPIO_PinAFConfig(GPIOB, GPIO_PinSource6, GPIO_AF_USART1);

    /* Connect Pxx to USARTx_Rx*/
    GPIO_PinAFConfig(GPIOB, GPIO_PinSource7, GPIO_AF_USART1);

    /* Configure USART Tx as alternate function */
    GPIO_InitStructure.GPIO_OType = GPIO_OType_PP;
    GPIO_InitStructure.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_UP;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AF;

    GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_6;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Speed = GPIO_Speed_50MHz;
    GPIO_Init(GPIOB, &GPIO_InitStructure);

    /* Configure USART Rx as alternate function */
    GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AF;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_7;
    GPIO_Init(GPIOB, &GPIO_InitStructure);

    USART_InitStructure.USART_BaudRate = 115200;
    USART_InitStructure.USART_WordLength = USART_WordLength_8b;
    USART_InitStructure.USART_StopBits = USART_StopBits_1;
    USART_InitStructure.USART_Parity = USART_Parity_No;
    USART_InitStructure.USART_HardwareFlowControl = USART_HardwareFlowControl_None;
    USART_InitStructure.USART_Mode = USART_Mode_Rx | USART_Mode_Tx;

    /* USART configuration */
    USART_Init(USART1, &USART_InitStructure);

    /* Enable USART */
    USART_Cmd(USART1, ENABLE);
    USART_ITConfig(USART1, USART_IT_RXNE, ENABLE);

    printf("\n\r USART%d STM32F4Discovery Ready!!!!\n\r",1);
}
////////////////////Enable Serial Port Module 1 Interrupt Service Routine////////////////////
void USART1_INT_Config(void)
{
    NVIC_InitTypeDef NVIC_Usart_InitStructure;

    NVIC_Usart_InitStructure.NVIC_IRQChannel = USART1_IRQn;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

NVIC_Usart_InitStructure.NVIC_IRQChannelPreemptionPriority = 0;
NVIC_Usart_InitStructure.NVIC_IRQChannelSubPriority = 0;
NVIC_Usart_InitStructure.NVIC_IRQChannelCmd = ENABLE;
NVIC_Init(&NVIC_Usart_InitStructure);
}
//////////Initialize Serial Port Module 3//////////
void USART3_Initial(void)
{
    /* USARTx configured as follow:
        - BaudRate = 115200 baud
        - Word Length = 8 Bits
        - One Stop Bit
        - No parity
        - Hardware flow control disabled (RTS and CTS signals)
        - Receive and transmit enabled
    */
    /*
    GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStructure;
    USART_InitTypeDef USART_InitStructure;

    /* Enable GPIO clock */
    RCC_AHB1PeriphClockCmd(RCC_AHB1Periph_GPIOD, ENABLE);

    /* Enable UART clock */
    RCC_APB1PeriphClockCmd(RCC_APB1Periph_USART3, ENABLE);

    /* Connect Pxx to USARTx Tx*/
    GPIO_PinAFConfig(GPIOD, GPIO_PinSource8, GPIO_AF_USART3);

    /* Connect Pxx to USARTx Rx*/
    GPIO_PinAFConfig(GPIOD, GPIO_PinSource9, GPIO_AF_USART3);

    /* Configure USART Tx as alternate function */
    GPIO_InitStructure.GPIO_OType = GPIO_OType_PP;
    GPIO_InitStructure.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_UP;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AF;

    GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_8;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Speed = GPIO_Speed_50MHz;
    GPIO_Init(GPIOD, &GPIO_InitStructure);

    /* Configure USART Rx as alternate function */
    GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AF;
    GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_9;
    GPIO_Init(GPIOD, &GPIO_InitStructure);

    USART_InitStructure.USART_BaudRate = 115200;
    USART_InitStructure.USART_WordLength = USART_WordLength_8b;
    USART_InitStructure.USART_StopBits = USART_StopBits_1;
    USART_InitStructure.USART_Parity = USART_Parity_No;
    USART_InitStructure.USART_HardwareFlowControl = USART_HardwareFlowControl_None;
    USART_InitStructure.USART_Mode = USART_Mode_Rx | USART_Mode_Tx;

    /* USART configuration */
    USART_Init(USART3, &USART_InitStructure);

    /* Enable USART */
    USART_Cmd(USART3, ENABLE);
    USART_ITConfig(USART3, USART_IT_RXNE, ENABLE);

    printf("\n\r USART%d STM32F4Discovery Ready!!!!\n\r",3);
}
//////////Enable Serial Port Module 3 Interrupt Service Routine//////////
void USART3_INT_Config(void)
{
    NVIC_InitTypeDef NVIC_Usart_InitStructure;

    NVIC_Usart_InitStructure.NVIC_IRQChannel = USART3_IRQn;
    NVIC_Usart_InitStructure.NVIC_IRQChannelPreemptionPriority = 1;
    NVIC_Usart_InitStructure.NVIC_IRQChannelSubPriority = 1;
    NVIC_Usart_InitStructure.NVIC_IRQChannelCmd = ENABLE;
    NVIC_Init(&NVIC_Usart_InitStructure);
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้