

ระบบควบคุมมอเตอร์ของควอดโรเตอร์
MOTOR CONTROL SYSTEM OF QUADROTOR



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงปีการศึกษา 2556 ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MOTOR CONTROL SYSTEM OF QUADROTOR



THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHATRONICS ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากนำไปใช้

ACADEMIC YEAR 2013

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบควบคุมมอเตอร์ของควอดโรเตอร์
MOTOR CONTROL SYSTEM OF QUADROTOR

ผู้จัดทำ	นายคเชนทร์	จัตรงค์	53010157
	นายณัช	เนตรสว่าง	53010432
	นายธนา	ชีวิศุภกร	53010673



..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นนทวัฒน์ จุลเดชะ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบควบคุมมอเตอร์ของควอทโรเตอร์

โดย

นายคเชนทร์ จัตุรงค์	53010157
นายณัช เนตรสว่าง	53010432
นายธนา ชีวศุภกร	53010673

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นนทวัฒน์ จุลเดชะ

ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

ในการเคลื่อนที่ของควอทโรเตอร์ไปในทิศทางต่างๆ จำเป็นต้องทำการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ทั้งสี่ให้ได้ ปริญญานิพนธ์นี้จัดทำขึ้นเพื่อสร้างระบบควบคุมความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์ โดยการสร้างบอร์ดควบคุมเบ็ดเสร็จ ซึ่งสามารถทำการควบคุมความเร็วรอบ วัดความเร็วรอบ วัดกระแสของมอเตอร์ ตรวจสอบสถานะของมอเตอร์และใบพัด และส่งข้อมูลไปยังบอร์ดควบคุมกลางได้ นอกจากทำระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์แล้ว ทางผู้จัดทำได้มีส่วนในการออกแบบชุดทดลองเก็บค่าตัวแปรต่างๆ ของมอเตอร์ เพื่อส่งข้อมูลตัวแปรแก่กลุ่มระบบควบคุมของควอทโรเตอร์ ทำการสร้างโมเดล (Model) ของควอทโรเตอร์อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MOTOR CONTROL SYSTEM OF QUADROTOR

By

Mr.Kachen Jaturong 53010157

Mr.Nut Netsawang 53010432

Mr.Thana Cheewasupakorn 53010673

Advisor

Asst.Prof. Dr.Nontawat Chuladaycha

Academic Year 2013

ABSTRACT

When we control quad rotor movement, we must control speed of all quad rotor motor. Therefore, Motor control system becomes important. This thesis has purpose for create motor control system by build motor control complete board that can control speed of motor, Motor speed measurement (RPM Measurement), Motor current measurement, check status of motor and propeller, and communication with central control board. Furthermore, we design tools that measure motor's parameter and send it to control system of quad rotor group who use the parameter to create quad rotor model.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำปริญาานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดี จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นนทวัฒน์ จุลเดชะ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำที่ดีมา โดยตลอดตั้งแต่ต้น กลุ่มผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง

ขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้กำลังใจ สนับสนุนอุปกรณ์ที่ขาดเหลือ กระตุ้นเตือน รวมทั้งคอยถามไถ่ความคืบหน้าของโครงการอยู่อย่างสม่ำเสมอ

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา รวมถึงการสนับสนุนเรื่องของงบประมาณที่ขาดเหลือ ตลอดจนแรงบันดาลใจที่ดีที่สุดที่ทำให้โครงการสำเร็จสมบูรณ์ลงได้ด้วยดี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการทำปริญญานิพนธ์	1
1.3 ขั้นตอนการศึกษาและจัดทำโครงงาน	1
1.3.1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	1
1.3.2 ออกแบบและทดลอง	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ขอบเขตการศึกษา	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 บทนำ	3
2.2 มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor)	5
2.3 ชุดขับมอเตอร์ (Electronic Speed Controller)	7
2.4 การวัดความเร็วรอบมอเตอร์	8
2.5 การวัดกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์	9
2.6 ตัวควบคุมพีไอดี	10
2.7 การตรวจสอบสถานะใบพัดและมอเตอร์	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังเป็นข้อมูลที่เป็นหวงและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบและการสร้าง	15
3.1 การเลือกใช้งานมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	15
3.2 การเลือกใช้งานตัวขับเคลื่อนมอเตอร์	16
3.3 ออกแบบการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์	17
3.4 ออกแบบการวัดกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์	20
3.5 ออกแบบตัวควบคุม	21
3.6 การตรวจสอบสถานะของใบพัดและมอเตอร์	22
3.7 การติดต่อสื่อสารกับบอร์ดควบคุมกลาง	23
3.8 การออกแบบบอร์ดควบคุมมอเตอร์	24
3.8.1 แผนผังวงจรของบอร์ดควบคุมมอเตอร์ (Schematic)	25
3.9 การออกแบบโปรแกรมของระบบควบคุมมอเตอร์	26
3.10 การออกแบบเครื่องวัดแรงยกของมอเตอร์	28
3.11 การออกแบบเครื่องวัดทอร์กของมอเตอร์	29
บทที่ 4 ผลการทดลอง	30
4.1 การทดลองวัดความเร็วของมอเตอร์โดยใช้บอร์ดควบคุมมอเตอร์	30
4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	30
4.1.2 วิธีการทดลอง	30
4.2 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกและความเร็วรอบของมอเตอร์	32
4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	32
4.2.2 วิธีการทดลอง	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง 4.2.2 วิธีการทดลองนี้หา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไป 32

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์	34
4.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	34
4.3.2 วิธีการทดลอง	34
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	36
5.1 บทสรุปการดำเนินงาน	36
5.2 ปัญหาที่พบในการดำเนินงาน	36
5.3 แนวทางในการพัฒนาโครงการ	36
เอกสารอ้างอิง	37
ภาคผนวก	38
ภาคผนวก ก ตารางผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกและความเร็วรอบของมอเตอร์	39
ภาคผนวก ข ตารางผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์	48
ภาคผนวก ค ผังงานของโปรแกรมระบบควบคุมมอเตอร์ (Flowchart)	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 Block Diagram ของระบบควบคุมมอเตอร์	5
2.2 ส่วนประกอบมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	6
2.3 ภายในมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	6
2.4 ชุดขับมอเตอร์	7
2.5 แผนผังวงจรชุดขับมอเตอร์	7
2.6 ลำดับการทำงานของ MOSFET	8
2.7 เซนเซอร์ชนิด Photomicrosensor (Reflective)	9
2.8 เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า	9
2.9 แผนภาพบล็อกของการควบคุมแบบพีไอดี	10
2.10 กราฟ PV ต่อเวลา, K_p กำหนดเป็น 3 ค่า (K_i และ K_d คงที่)	11
2.11 กราฟ PV ต่อเวลา, K_i กำหนดเป็นสามค่า (K_p และ K_d คงที่)	12
2.12 กราฟ PV ต่อเวลา, สำหรับ K_d 3 ค่า (K_p และ K_i คงที่)	13
3.1 มอเตอร์ MT2213-935KV + ใบพัดขนาด 1045	15
3.2 RCTIMER Multicopter ESC 30A SimonK Firmware	16
3.3 เซนเซอร์ EE-SY410	17
3.4 คุณสมบัติของเซนเซอร์ EE-SY410	17
3.5 วงจรของเซนเซอร์ EE-SY410	17
3.6 Input Capture Module	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากผู้ใดละเมิดลิขสิทธิ์ดังกล่าว กรุณาแจ้งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 กราฟ I_{OL} กับอุณหภูมิ	19
3.10 เซนเซอร์ AD8210	20
3.11 Block Diagram ของ AD8210	21
3.12 PI Controller Block Diagram	22
3.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความเร็รรอบของมอเตอร์	23
3.14 Timing Diagram ของ I2C	24
3.15 แผนผังวงจรของบอร์ดควบคุมมอเตอร์	25
3.16 ลายทองแดงของบอร์ดควบคุมมอเตอร์ที่ออกแบบไว้	26
3.17 Flow Chart ของระบบควบคุมมอเตอร์	27
3.18 แบบร่างเครื่องวัดแรงยก	28
3.19 แบบจำลอง 3 มิติของเครื่องวัดแรงยก	28
3.20 แบบร่างเครื่องวัดทอร์ก	29
3.21 แบบจำลอง 3 มิติของเครื่องวัดทอร์ก	29
4.1 บอร์ดควบคุมมอเตอร์ที่ลงอุปกรณ์เรียบร้อยแล้ว	31
4.2 ติดตั้งบอร์ดในตำแหน่งพร้อมใช้งาน	31
4.3 เครื่องวัดแรงยก	33
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงยก (N) และความเร็วมอเตอร์ (rpm)	33
4.5 เครื่องวัดทอร์ก	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิได้อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ผลการทดลองการวัดความเร็วของมอเตอร์ (rpm) ของบอร์ดที่ 1 ถึง 4	31



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันการสำรวจเหนือพื้นดินในโรงงานอุตสาหกรรม มีความเสี่ยงสูงต่อผู้ทำการสำรวจ อาจเกิดอุบัติเหตุร้ายแรงถึงขั้นทุพพลภาพหรืออาจเสียชีวิต และเสียค่าใช้จ่ายจำนวนมากในการสำรวจ เนื่องจากต้องหยุดการทำงานของเครื่องจักรหรือกระบวนการผลิตในส่วนของบริเวณนั้นเป็นเวลานาน ทำให้เสียโอกาสในการผลิตสินค้า หนึ่งในทางออกการแก้ปัญหาดังกล่าวคือ อากาศยานไร้คนขับ Unmanned Aerial Vehicle (UAV) ซึ่ง UAV สามารถควบคุมระยะไกลได้จากภาคพื้นดิน ทำให้ลดความเสี่ยงต่อชีวิตในการสำรวจและลดค่าใช้จ่าย เนื่องจากการปิดการทำงานของระบบการผลิตในบริเวณที่สำรวจ ทางกลุ่มผู้จัดทำได้เลือกสร้าง UAV ชนิดคอปเตอร์สี่ใบพัดหรือคอปเตอร์ (Quad Rotor) ในการควบคุมคอปเตอร์จำเป็นต้องทำการควบคุมความเร็วรอบการหมุนของใบพัดได้ด้วย ดังนั้นผู้จัดทำจึงเลือกทำการศึกษาการควบคุมความเร็วการหมุนใบพัด จากนั้นจะนำความรู้ที่ได้ไปประกอบกับกลุ่มของระบบควบคุมคอปเตอร์ และกลุ่มระบบการวัดและการสื่อสารของคอปเตอร์อีกครั้งหนึ่ง เพื่อให้ได้คอปเตอร์ที่ทำงานได้อย่างสมบูรณ์

1.2 วัตถุประสงค์ในการทำปริญญานิพนธ์

1. เพื่อสร้างระบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านสำหรับคอปเตอร์
2. หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกและความเร็วรอบของมอเตอร์
3. หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขั้นตอนการศึกษาและจัดทำโครงการงาน

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

- ศึกษาหลักการการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน
- ศึกษาการทำงานของชุดขับมอเตอร์
- ศึกษาการวัดความเร็วรอบและกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์
- ศึกษาตัวควบคุมระบบพีไอ (PI Controller)
- ศึกษาวิธีการตรวจสอบสถานะของใบพัดและมอเตอร์

2. ออกแบบและทดลอง

- เลือกใช้มอเตอร์ที่เหมาะสมกับควอเตอร์
- เลือกชุดขับมอเตอร์ให้เหมาะสมกับมอเตอร์
- ออกแบบการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์
- ออกแบบการวัดกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์
- ออกแบบตัวควบคุมพีไอ
- ออกแบบการตรวจสอบใบพัดและมอเตอร์
- เลือกการติดต่อสื่อสารกับบอร์ดควบคุมกลาง
- ออกแบบบอร์ดควบคุมมอเตอร์
- เขียนโปรแกรมสำหรับระบบควบคุมมอเตอร์
- ออกแบบเครื่องวัดแรงยกและเครื่องวัดทอร์กของมอเตอร์
- ทดลองการทำงานของบอร์ดควบคุมมอเตอร์
- ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกและความเร็วรอบของมอเตอร์
- ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน
2. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีคอนโทรลโดยการใช้ควบคุมระบบพีไอ
3. มีความรู้เกี่ยวกับการวัด, ออกแบบการทดลองและสร้างอุปกรณ์การวัด
4. มีความรู้ในการออกแบบวงจรเพื่อใช้เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า และเซนเซอร์วัดความเร็วรอบ
5. มีความรู้ในการออกแบบวงจรควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน
6. มีความรู้ความสามารถในการไปค้นคว้าต่อไปในอนาคต

1.5 ขอบเขตการศึกษา

ศึกษาหลักการทำงานและการออกแบบวงจรควบคุมมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน และออกแบบวงจรเซนเซอร์วัดรอบและวัดกระแส เพื่อที่จะสามารถควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อแรงดันไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงโดยยังรักษาความเร็วรอบเอาไว้ได้ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงยก แรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

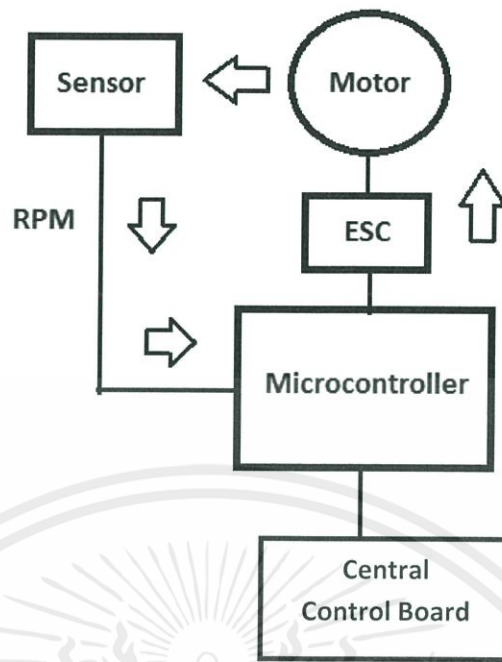
ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ระบบควบคุมมอเตอร์ หน้าที่คือควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ให้ได้ตามค่าที่ต้องการ อุปกรณ์ในระบบควบคุมมอเตอร์ประกอบไปด้วย มอเตอร์ไร้แปรงถ่าน ตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ เซนเซอร์วัดรอบ และเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า ความสามารถของระบบควบคุมมอเตอร์ ได้แก่

- วัดความเร็วรอบของมอเตอร์
- วัดกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์
- ตรวจสอบสถานะใบพัดและมอเตอร์
- รับส่งข้อมูลจากบอร์ดควบคุมกลาง

หลักการทำงานของระบบควบคุมมอเตอร์คือ เมื่อได้รับคำสั่งที่เป็นค่าความเร็วรอบหน่วยเป็นรอบต่อนาทีจากบอร์ดควบคุมกลาง ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสร้างสัญญาณสี่เหลี่ยมส่งไปควบคุมตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ ตัวขับเคลื่อนมอเตอร์จะทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กและหมุนไปรอบ ทำให้มอเตอร์เกิดการหมุนตามสนามแม่เหล็ก จากนั้นตัวเซนเซอร์วัดความเร็วรอบและกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์จะทำการเก็บค่าและส่งกลับไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการคำนวณเป็นค่าความเร็วรอบและกระแสไฟฟ้า และนำค่าที่ได้ไปใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้ได้ตามที่ได้รับคำสั่ง นอกจากนี้ค่าความเร็วรอบและกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ สามารถนำมาตรวจสอบสถานะของใบพัดและมอเตอร์ และแจ้งกลับไปยังบอร์ดควบคุมกลาง



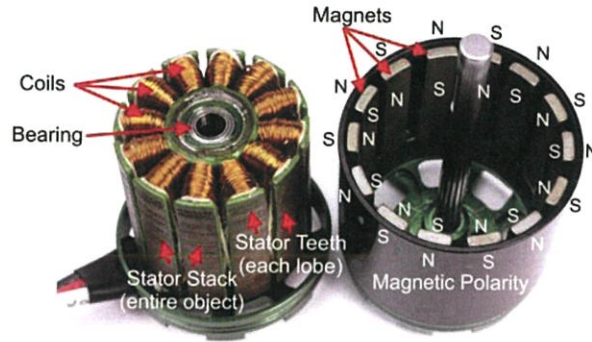
รูปที่ 2.1 Block Diagram ของระบบควบคุมมอเตอร์

2.2 มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor)

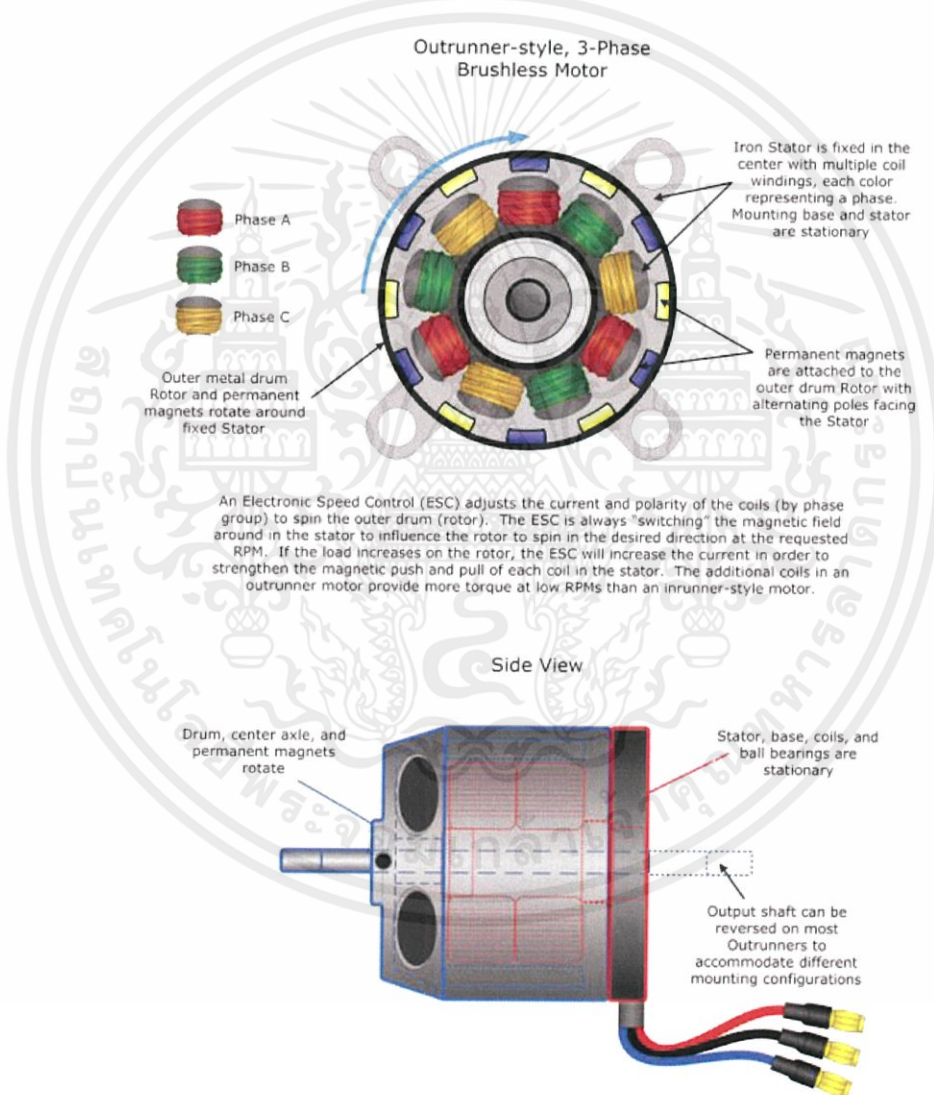
มอเตอร์กระแสตรงไม่มีแปรงถ่าน (Brushless DC Motor) หมายถึงซิงโครนัสมอเตอร์ซึ่งกระแสอาร์มาเจอร์ในสเตเตอร์ถูกควบคุมโดยวงจรโซลิตสแตต ในลักษณะที่ทำให้เกิดแรงบิดสูงสุดที่ความเร็วที่กำหนดในมอเตอร์กระแสตรงมาตรฐาน ใช้แปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์ทำให้แกนแม่เหล็กของฟลักซ์สนามและของฟลักซ์อาร์มาเจอร์ทำมุม 90° องศา ไฟฟ้าในสเปซทำให้ฟลักซ์มีค่าคงที่จึงทำให้เกิดแรงบิดสูงสุดที่ความเร็วกำหนด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OUTRUNNER COMPONENTS



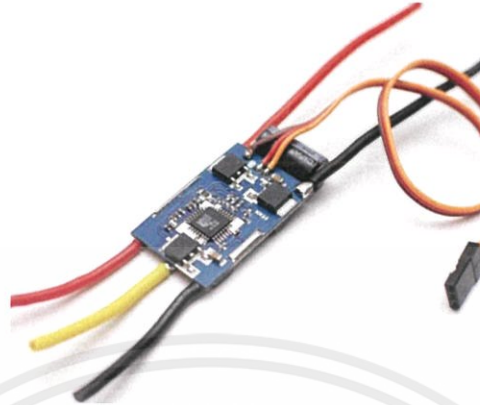
รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน



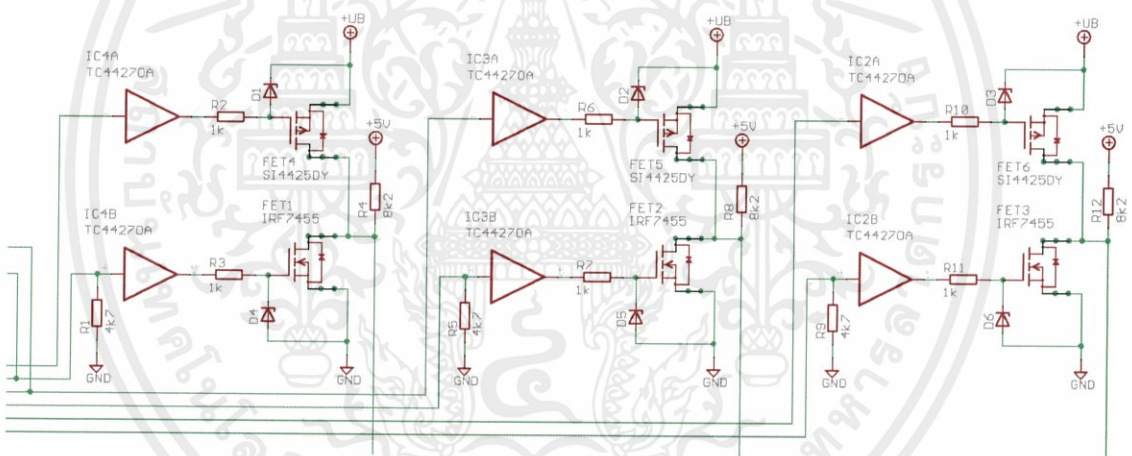
รูปที่ 2.3 ภายในมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ชุดขับมอเตอร์ (Electronic Speed Controller)

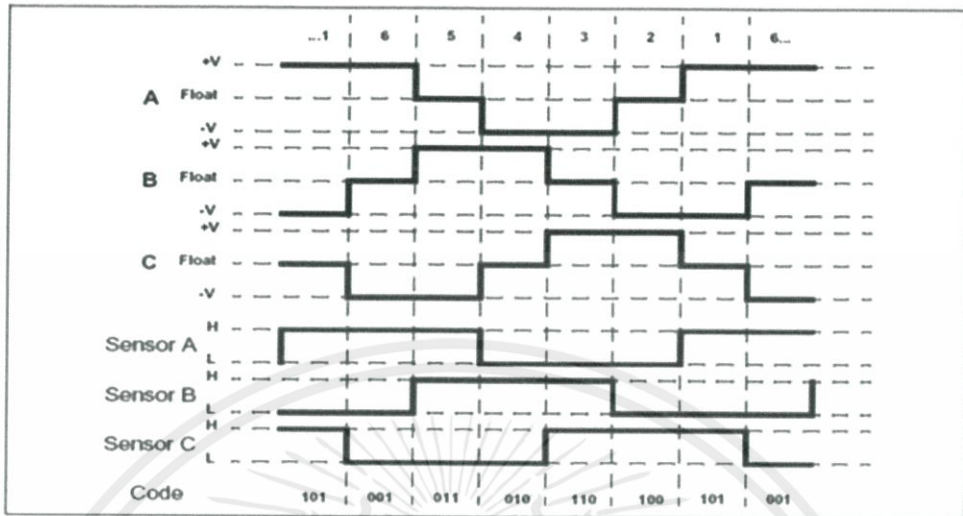


รูปที่ 2.4 ชุดขับมอเตอร์



รูปที่ 2.5 แผนผังวงจรชุดขับมอเตอร์

ตัวขับมอเตอร์ประกอบด้วย MOSFET 6 ตัว (s1 - s6) ไดโอดต่อขนานกับ MOSFET ทำหน้าที่ป้องกันแรงดันกลับ (Reverse Voltage) ที่เกิดจากความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์เมื่อมีการสับเปลี่ยนกระแส (Commutation) ในขดลวดตัววัดตำแหน่งของโรเตอร์ H1, H2, H3 จะส่งสัญญาณไปยังตัวถอดรหัสและตัวขับเกต (Sensor Decoder and Gate Drivers) MOSFET จึงทำการตัด-ต่อวงจรตามลำดับโดยมีความถี่เท่ากับความเร็วของโรเตอร์ ตลอดเวลาสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์และของโรเตอร์จึงมีความเร็วเท่ากันตลอดเวลาที่ทุกความเร็วของโรเตอร์ระยะเวลากระแสของ MOSFET จะเป็นตัวกำหนดขนาดของแรงบิดของมอเตอร์



รูปที่ 2.6 ลำดับการทำงานของ MOSFET

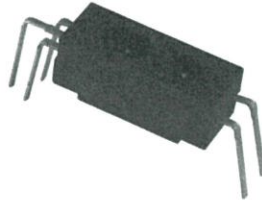
การควบคุมชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ ทำโดยการจ่ายสัญญาณสี่เหลี่ยมโดยสัญญาณสี่เหลี่ยมมีความกว้างอยู่ในช่วง 0.5 – 2ms ความเร็วของมอเตอร์จะปรับเปลี่ยนไปตามความกว้างของสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ป้อนให้กับชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ ถ้าสัญญาณสี่เหลี่ยมมีความกว้าง 2ms มอเตอร์จะหมุนที่ความเร็วสูงสุด และถ้าสัญญาณสี่เหลี่ยมมีความกว้าง 0.5ms มอเตอร์จะหยุดหมุน

2.4 การวัดความเร็วรอบมอเตอร์

การวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ ใช้เซนเซอร์ชนิด Photomicrosensor (Reflective) ภายในเซนเซอร์ชนิดนี้แบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นส่วนกำเนิดลำแสงอินฟราเรด ส่วนที่สองทำหน้าที่รับแสง ขณะที่ไม่มีแสงตกกระทบบเอาต์พุตมีสถานะเป็น Low แต่เมื่อมีแสงตกกระทบบเอาต์พุตจะเปลี่ยนสถานะเป็น High

หลักการวัดความเร็วรอบมอเตอร์ จะทำการติดกระดาษสะท้อนแสงที่มอเตอร์ในตำแหน่งที่ตรงกับเซนเซอร์ เมื่อมอเตอร์หมุนกระดาษสะท้อนแสงวิ่งผ่านเซนเซอร์ ลำแสงอินฟราเรดจะสะท้อนกับกระดาษกลับไปยังส่วนรับแสงของเซนเซอร์ เมื่อแสงตกกระทบบครบ 2 ครั้ง หมายถึงการที่มอเตอร์เคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบ จากนั้นนำค่าผลต่างของเวลาที่แสงกระทบบกับกระดาษครั้งที่หนึ่งและครั้งที่สอง (ΔT) มาคำนวณหาความเร็วรอบด้วยสมการ

$$RPM = \frac{60}{\Delta T} \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.7 เซนเซอร์ชนิด Photomicrosensor (Reflective)

2.5 การวัดกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์

หลักการวัดกระแสไฟฟ้าจากกฎของโอห์ม เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวต้านทานค่าหนึ่งจะเกิดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นตามสมการ $V = IR$ วงจรของเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าจึงประกอบไปด้วยตัวต้านทานวัดกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานต่ำและทนกำลังไฟฟ้าได้สูง เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานวัดกระแสไฟฟ้ามักมีค่าน้อยมาก จึงต้องใช้เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าซึ่งมีหน้าที่ในการขยายแรงดันไฟฟ้าจะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0-5V เพื่อให้ใช้งานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้

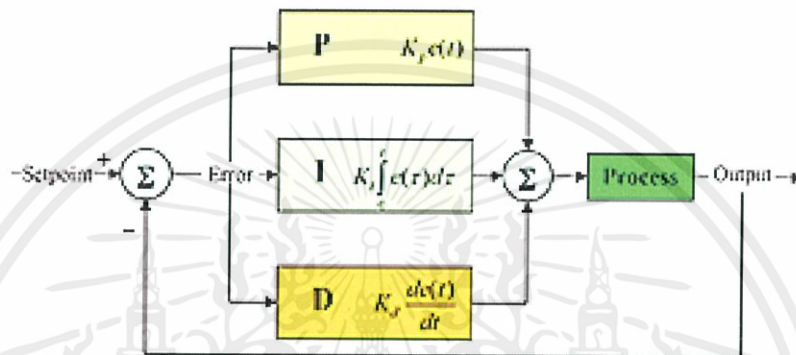


รูปที่ 2.8 เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 ตัวควบคุมพีไอดี

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



รูปที่ 2.9 แผนภาพบล็อกของการควบคุมแบบพีไอดี

วิธีคำนวณของ PID ขึ้นอยู่กับสามตัวแปรคือ ค่าสัดส่วน, ปริพันธ์และอนุพันธ์ ค่าสัดส่วนกำหนดจากผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน, ค่าปริพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของผลรวมความผิดพลาดที่ซึ่งพ่วงผ่านไป, และค่าอนุพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาด น้ำหนักที่เกิดจากการรวมกันของทั้งสามนี้จะใช้ในการปรับกระบวนการ

โดยการปรับค่าคงที่ใน PID ตัวควบคุมสามารถปรับรูปแบบการควบคุมให้เหมาะกับกระบวนการที่ต้องการได้ การตอบสนองของตัวควบคุมจะอยู่ในรูปของการไหวตัวของตัวควบคุมจนถึงค่าความผิดพลาด ค่าโอเวอร์ชูต (Overshoots) และค่าแกว่งของระบบ (Oscillation) วิธี PID ไม่รับประกันได้ว่าจะเป็นระบบควบคุมที่เหมาะสมที่สุดหรือสามารถทำให้กระบวนการมีความเสถียรแน่นอน

การประยุกต์ใช้งานบางครั้งอาจใช้เพียงหนึ่งถึงสองรูปแบบขึ้นอยู่กับกระบวนการเป็นสำคัญ พีไอดีบางครั้งจะถูกเรียกว่าการควบคุมแบบ PI, PD, P หรือ I ขึ้นอยู่กับว่าใช้รูปแบบใดบ้าง

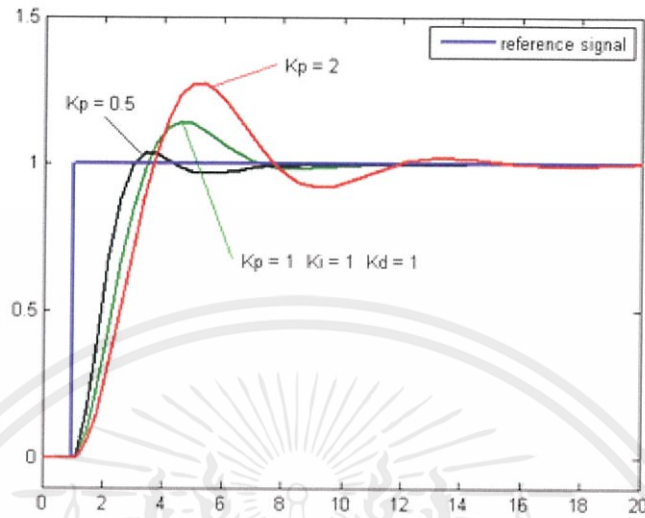
การควบคุมแบบ PID ได้ชื่อตามการรวมกันของเทอมของตัวแปรทั้งสามตามสมการ:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาด้านนี้ มิใช่เพื่อเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำ (2.2)

$$MV(t) = P_{out} + I_{out} + D_{out}$$

เมื่อ P_{out} , I_{out} และ D_{out} เป็นผลของสัญญาณขาออกจากระบบควบคุม PID จากแต่ละเทอมซึ่งนิยามตามรายละเอียดด้านล่าง

สัดส่วน



รูปที่ 2.10 กราฟ PV ต่อเวลา, K_p กำหนดเป็น 3 ค่า (K_i และ K_d คงที่)

เทอมของสัดส่วน (บางครั้งเรียกอัตรายาย) จะเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนของค่าความผิดพลาด การตอบสนองของสัดส่วน สามารถทำได้โดยการคูณค่าความผิดพลาดด้วยค่าคงที่ K_p หรือที่เรียกว่าอัตรายายสัดส่วน

เทอมของสัดส่วนจะเป็นไปตามสมการ :

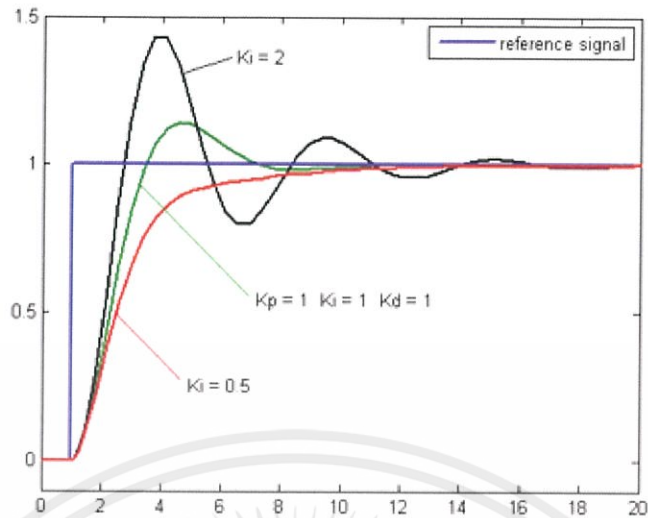
$$P_{out} = K_p e(t) \quad (2.3)$$

เมื่อ

- P_{out} : สัญญาณขาออกของเทอมสัดส่วน
- K_p : อัตรายายสัดส่วน, ตัวแปรปรับค่าได้
- e : ค่าความผิดพลาด = $SP - PV$
- t : เวลา

ผลอัตรายายสัดส่วนที่สูงค่าความผิดพลาดก็จะเปลี่ยนแปลงมากเช่นกัน แต่ถ้าสูงเกินไประบบจะไม่เสถียรได้ ในทางตรงกันข้ามผลอัตรายายสัดส่วนที่ต่ำระบบควบคุมจะมีผลตอบสนองต่อเอกสารนี้ กระบวนการน้อยตามไปด้วย การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริพันธ์



รูปที่ 2.11 กราฟ PV ต่อเวลา, K_i กำหนดเป็นสามค่า (K_p และ K_d คงที่)

ผลจากเทอมปริพันธ์ (บางครั้งเรียก *reset*) เป็นสัดส่วนของขนาดความผิดพลาดและระยะเวลาของความผิดพลาดผลรวมของความผิดพลาดในทุกช่วงเวลา (ปริพันธ์ของความผิดพลาด) จะให้ออฟเซตสะสมที่ควรจะเป็นในก่อนหน้าความผิดพลาดสะสม จะถูกคูณโดยอัตราขยายปริพันธ์ ขนาดของผลของเทอมปริพันธ์จะกำหนดโดยอัตราขยายปริพันธ์, K_i

เทอมปริพันธ์จะเป็นไปตามสมการ :

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (2.4)$$

เมื่อ

I_{out} : สัญญาณขาออกของเทอมปริพันธ์

K_i : อัตราขยายปริพันธ์, ตัวแปรปรับค่าได้

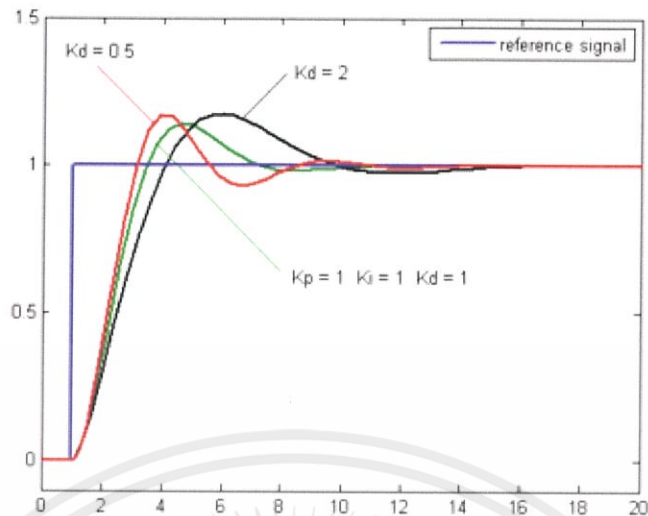
e : ความผิดพลาด = $SP - PV$

t : เวลา

τ : ตัวแปรปริพันธ์หุ่น

เทอมปริพันธ์ (เมื่อรวมกับเทอมสัดส่วน) จะเร่งกระบวนการให้เข้าสู่จุดที่ต้องการและขจัดความผิดพลาดที่เหลืออยู่ที่เกิดจากการใช้เพียงเทอมสัดส่วน แต่อย่างไรก็ตามเทอมปริพันธ์เป็นการตอบสนองต่อความผิดพลาดสะสมในอดีต จึงสามารถทำให้เกิดโอเวอร์ชูตได้ (ข้ามจุดที่ต้องการและเอกสารนี้เกิดการหันเหไปทางทิศทางอื่น) เราใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุพันธ์

รูปที่ 2.12 กราฟ PV ต่อเวลา, สำหรับ K_d 3 ค่า (K_p และ K_i คงที่)

อัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาดจากกระบวนการนั้น คำนวณหาจากความชันของความผิดพลาดทุกๆ เวลา (นั่นคือ เป็นอนุพันธ์อันดับหนึ่งสัมพันธ์กับเวลา) และคูณด้วยอัตราขยายอนุพันธ์ K_d ขนาดของผลของเทอมอนุพันธ์ (บางครั้งเรียกอัตรา) ขึ้นกับอัตราขยายอนุพันธ์ K_d

เทอมอนุพันธ์เป็นไปตามสมการ :

$$D_{out} = K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.5)$$

เมื่อ

- D_{out} : สัญญาณขาออกของเทอมอนุพันธ์
- K_d : อัตราขยายอนุพันธ์, ตัวแปรปรับค่าได้
- e : ความผิดพลาด = $SP - PV$
- t : เวลา

เทอมอนุพันธ์จะชะลออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขาออกของระบบควบคุม และด้วยผลนี้จะช่วยให้ระบบควบคุมเข้าสู่จุดที่ต้องการ ดังนั้นเทอมอนุพันธ์จะใช้ในการลดขนาดของโอเวอร์ชูตที่เกิดจากเทอมปริพันธ์ และทำให้เสถียรภาพของการรวมกันของระบบควบคุมดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอนุพันธ์ของสัญญาณรบกวนที่ถูกขยายในระบบควบคุมจะไวมากต่อการรบกวนในเทอมของความผิดพลาด และสามารถทำให้กระบวนการไม่เสถียรได้ ถ้าสัญญาณรบกวนและอัตราขยายอนุพันธ์มีขนาดใหญ่มากพอ วิศวกรรมการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การตรวจสอบสถานะใบพัดและมอเตอร์

ตัวตรวจสอบสถานะใบพัดและมอเตอร์ทำหน้าที่ตรวจสอบสถานะของใบพัดและมอเตอร์ โดยมีสถานะดังนี้

- มอเตอร์และใบพัดปกติ
- ใบพัดหลุดออกจากมอเตอร์
- มอเตอร์เกิดการลัดวงจร
- มอเตอร์ไม่สามารถควบคุมรอบได้

โดยการตรวจสอบสถานะของใบพัดและมอเตอร์จะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ กรณีที่วัดกระแสไฟฟ้าเปรียบเทียบกับค่ากระแสไฟฟ้าที่คำนวณจากสมการที่ได้จากการเก็บข้อมูลแล้วพบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่า 50% บ่งบอกถึงสถานะมอเตอร์เกิดการลัดวงจร กรณีที่วัดกระแสไฟฟ้าแล้วได้น้อยกว่ากระแสไฟฟ้าที่คำนวณ 50% บ่งบอกว่าใบพัดได้หลุดออกจากมอเตอร์ และในกรณีมอเตอร์ไม่สามารถควบคุมรอบได้ค่าความเร็วรอบมอเตอร์ที่วัดได้จากเซนเซอร์คลาดเคลื่อนจากค่าที่ต้องการ 20%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและการสร้าง

3.1 การเลือกใช้งานมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

ในการเลือกใช้งานมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านต้องคำนึงถึงแรงยกที่มอเตอร์สามารถสร้างได้ โดยแรงยกของมอเตอร์ที่สั่งต้องมากกว่าน้ำหนักทั้งหมดของควอทโรเตอร์ น้ำหนักทั้งหมดของควอทโรเตอร์อยู่ที่ 1.1 กิโลกรัม (รวมน้ำหนักประมาณของมอเตอร์ 55 กรัม) แสดงว่ามอเตอร์แต่ละตัวต้องสร้างแรงยกได้มากกว่า 0.275 กิโลกรัม

มอเตอร์ที่เลือกใช้คือ Multi Copter Motor MT2213-935KV + ใบพัดขนาด 1045 ซึ่งมีคุณสมบัติสร้างแรงยกได้มากกว่า 0.275 กิโลกรัม



รูปที่ 3.1 มอเตอร์ MT2213-935KV + ใบพัดขนาด 1045

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การเลือกใช้งานตัวขับเคลื่อนมอเตอร์

การเลือกใช้ตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ต้องเลือกให้เหมาะสมกับมอเตอร์ที่ใช้งาน มอเตอร์รุ่น MT2213-935KV + ใบพัดขนาด 1045 ใช้กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 15A ดังนั้นตัวขับเคลื่อนต้องทนกระแสไฟฟ้าได้มากกว่า 15A

ตัวขับเคลื่อนที่เลือกใช้คือ RCTIMER Multicopter ESC 30A SimonK Firmware สามารถทนกระแสไฟฟ้าสูงสุดได้ 30A และสามารถควบคุมด้วยสัญญาณสี่เหลี่ยมความกว้างอยู่ในช่วง 0.5 – 2 ms ที่ความถี่ 333Hz จากไมโครคอนโทรลเลอร์ได้

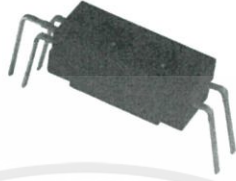


รูปที่ 3.2 RCTIMER Multicopter ESC 30A SimonK Firmware

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ออกแบบการวัดความเร็วรอบของมอเตอร์

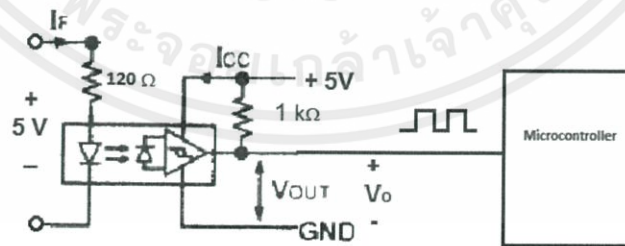
การวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ ทำโดยการใช้เซนเซอร์ EE-SY410 ซึ่งเป็นเซนเซอร์ชนิด Photomicrosensor (Reflective) ใช้หลักการสะท้อนของแสงภายใน เซนเซอร์ชนิดนี้แบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นส่วนกำเนิดลำแสงอินฟราเรด ส่วนที่สองทำหน้าที่รับแสง ขณะที่ไม่มีแสงตกกระทบเอาต์พุตมีสถานะเป็น Low แต่เมื่อมีแสงตกกระทบเอาต์พุตจะเปลี่ยนสถานะเป็น High



รูปที่ 3.3 เซนเซอร์ EE-SY410

	Item	Symbol	Rated value
Emitter	Forward current	I_F	50 mA (see note 1)
	Reverse voltage	V_R	4 V
	Pulse forward current	I_{FP}	1 A (see note 2)
Detector	Power supply voltage	V_{CC}	16 V
	Output voltage	V_{OUT}	28 V
	Output current	I_{OUT}	16 mA
	Permissible output dissipation	P_{OUT}	250 mW (see note 1)
Ambient temperature	Operating	T_{opr}	-40°C to 75°C
	Storage	T_{stg}	-40°C to 85°C
Soldering temperature		T_{sol}	260°C (see note 3)

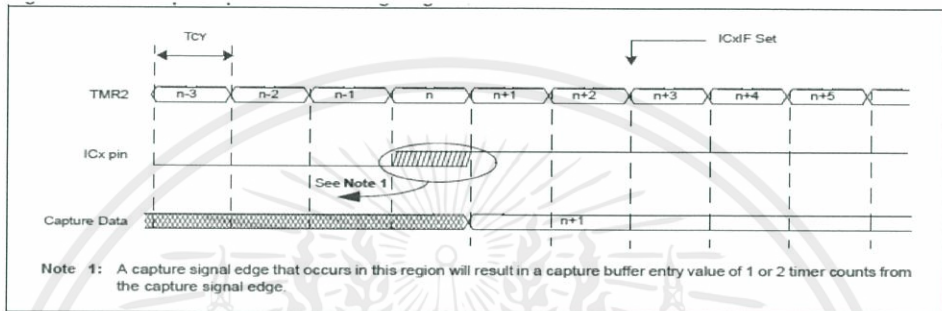
รูปที่ 3.4 คุณสมบัติของเซนเซอร์ EE-SY410



รูปที่ 3.5 วงจรของเซนเซอร์ EE-SY410

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

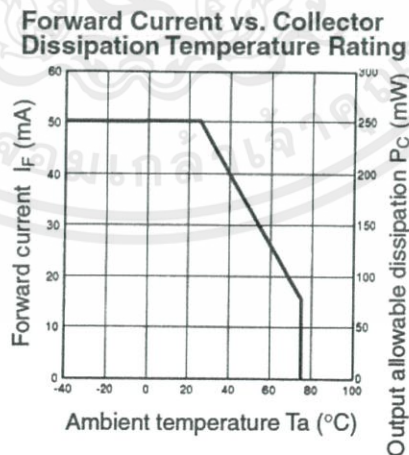
การใช้งานเซนเซอร์วัดรอบ: ทำการติดกระดาษสะท้อนแสงที่มอเตอร์ในตำแหน่งที่ตรงกับเซนเซอร์ เมื่อมอเตอร์หมุนกระดาษสะท้อนแสงวิ่งผ่านเซนเซอร์ ลำแสงอินฟราเรดจะสะท้อนกับกระดาษกลับไปยังส่วนรับแสงของเซนเซอร์ เมื่อแสงตกกระทบครบ 2 ครั้ง โปรแกรมในไมโครคอนโทรลเลอร์ จะทำการคำนวณผลต่างของเวลา (ΔT) ระหว่างครั้งที่หนึ่งและครั้งที่สอง โดยใช้ Input Capture Module ใน dsPIC30F3012 จากนั้นจะแปลงผลต่างของเวลาเป็นความเร็วรอบการหมุนของมอเตอร์



รูปที่ 3.6 Input Capture Module

การออกแบบวงจรเซนเซอร์วัดรอบ

- เลือกค่า I_F พิจารณาจากกราฟ I_F กับอุณหภูมิ

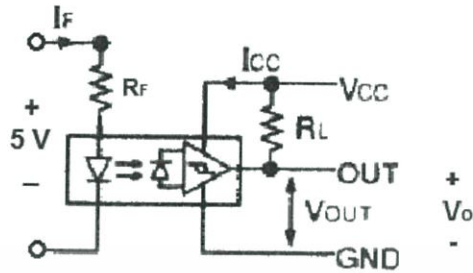


รูปที่ 3.7 กราฟ I_F กับอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือกค่า $I_F = 30 \text{ mA}$ เพราะสามารถทำงานได้ในอุณหภูมิสภาพแวดล้อมที่ 50 องศาเซลเซียส

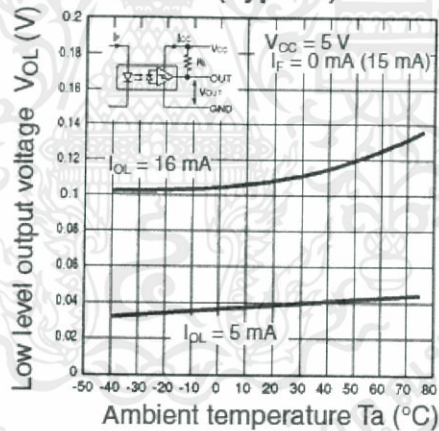
เพื่อให้ได้ $I_F = 30 \text{ mA}$ จึงต้องเลือก $R_F = 120 \Omega$



รูปที่ 3.8 วงจรเซนเซอร์ก่อนเลือกค่า R_F

- กำหนดค่า I_{OL} (Low-level Output Current)
พิจารณาจากกราฟ

Low-level Output Voltage vs. Ambient Temperature Characteristics (Typical)



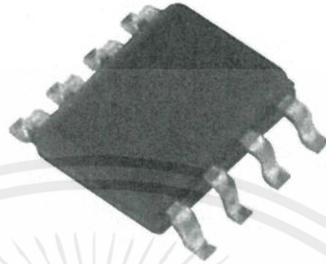
รูปที่ 3.9 กราฟ I_{OL} กับอุณหภูมิ

เลือกใช้ ค่า $I_{OL} = 5 \text{ mA}$ เพราะประหยัดพลังงานและได้ V_{OL} ต่ำ สามารถใช้งานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ออกแบบการวัดกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์

การวัดกระแสไฟฟ้าแต่ละมอเตอร์ทำการวัดโดยใช้เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า AD8210 และใช้ร่วมกับ Analog to Digital Converter Module (ADC Module) ในไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 3.10 เซนเซอร์ AD8210

หลักการทำงานของเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า AD8210 : จากกฎของโอห์ม เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวต้านทานค่าหนึ่งจะเกิดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นตามสมการ $V = IR$ วงจรของเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าจึงประกอบไปด้วยตัวต้านทานวัดกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานต่ำและทนกำลังไฟฟ้าได้สูง ตัวต้านทานวัดกระแสไฟฟ้าจะต่ออนุกรมอยู่ระหว่างสายเพาเวอร์ที่จะเข้าสู่ ESC จากนั้นขา In+ และขา In- ของเซนเซอร์จะต่อคร่อมกับตัวต้านทานวัดกระแสไฟฟ้าเพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทาน เนื่องจากตัวต้านทานวัดกระแสไฟฟ้ามีค่าความต้านทานต่ำ แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อม อยู่ในช่วง $0 - 250\text{mV}$ ตัวเซนเซอร์ AD8210 จึงทำหน้าที่เป็นตัวขยายแรงดันไฟฟ้า โดยค่าอัตราขยาย (Gain) = 20 ซึ่งทำให้แรงดันไฟฟ้าด้านขาเอาต์พุตจะมีค่าอยู่ในช่วง $0 - 5\text{V}$ ทำให้สามารถใช้ ADC ของไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F3012 อ่านค่าและแปลงเป็นค่ากระแสไฟฟ้าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

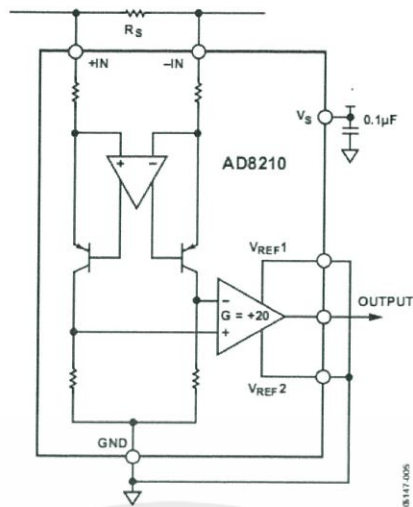


Figure 27. Ground Referenced Output

รูปที่ 3.11 Block Diagram ของ AD8210

การคำนวณค่า R_s : $R_s = \frac{5}{20(I_m)}$ โดย I_m คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ผ่าน R_s จากคุณสมบัติของมอเตอร์กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่มอเตอร์ใช้คือ 15A นำค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดมาคำนวณหา R_s ได้เท่ากับ 0.0167Ω แต่ตัวต้านทานวัดกระแสไฟฟ้าที่ขายทั่วไปไม่มีขนาด 0.0167Ω ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่า $R_s = 0.015\Omega$ ซึ่งสามารถทำการวัดกระแสไฟฟ้าสูงสุดได้ถึง $16.67A$

3.5 ออกแบบตัวควบคุม

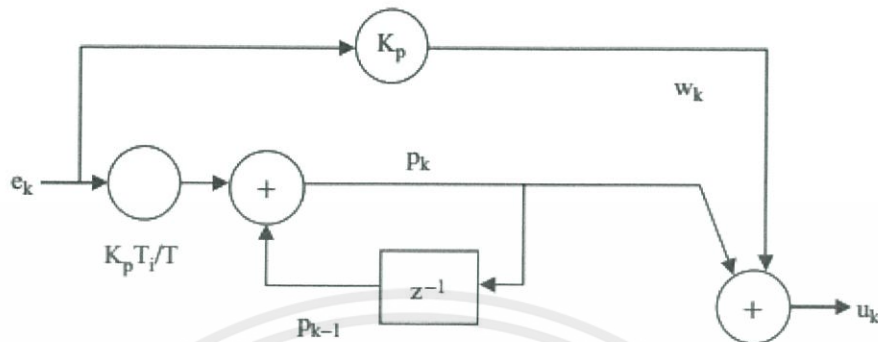
เนื่องจากมอเตอร์เป็นระบบอันดับหนึ่ง ถ้าระบบไม่มีตัวควบคุมเมื่อป้อนอินพุต (ความเร็วรอบที่ต้องการ) เอาต์พุตของระบบหรือความเร็วรอบมอเตอร์จะเกิดค่าความคลาดเคลื่อนที่ภาวะคงตัว (Steady State Error) เนื่องจากในการควบคุมการเคลื่อนที่ของควอเตอร์จำเป็นต้องควบคุมความเร็วรอบให้ได้อย่างแม่นยำ จึงจำเป็นต้องมีตัวควบคุม

ตัวควบคุมที่รู้จักและใช้กันอย่างแพร่หลายคือ ตัวควบคุมพีไอดีโดยพีไอดีเป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณเป็นค่าความผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างของตัวแปร ในกระบวนการและค่าที่ต้องการตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุด ด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ค่าตัวแปรของพีไอดี ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบ

ตัวควบคุมที่เหมาะสมสำหรับระบบนี้คือ พีไอเพราะว่าเดิมระบบมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ภาวะคงตัว ถ้าใช้ตัวควบคุมพีไออย่างเดียวระบบเร็วขึ้นแต่ยังมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ ดังนั้นจึงต้องใช้ตัวควบคุมไอด้วยเพื่อกำจัดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น ตัวควบคุมดีไม่เหมาะกับระบบนี้ เนื่องจาก

ความถี่ของสัญญาณสี่เหลี่ยมที่ป้อนให้ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์มีค่าน้อยเกินไป ทำให้ตัวควบคุมดีไม่ส่งผลต่อระบบ

ตัวควบคุม PI ที่ใช้มี Block Diagram ดังนี้



รูปที่ 3.12 PI Controller Block Diagram

Transfer Function : $G_c(z) = K_p + \frac{K_p T_i}{T_s(1-z^{-1})}$

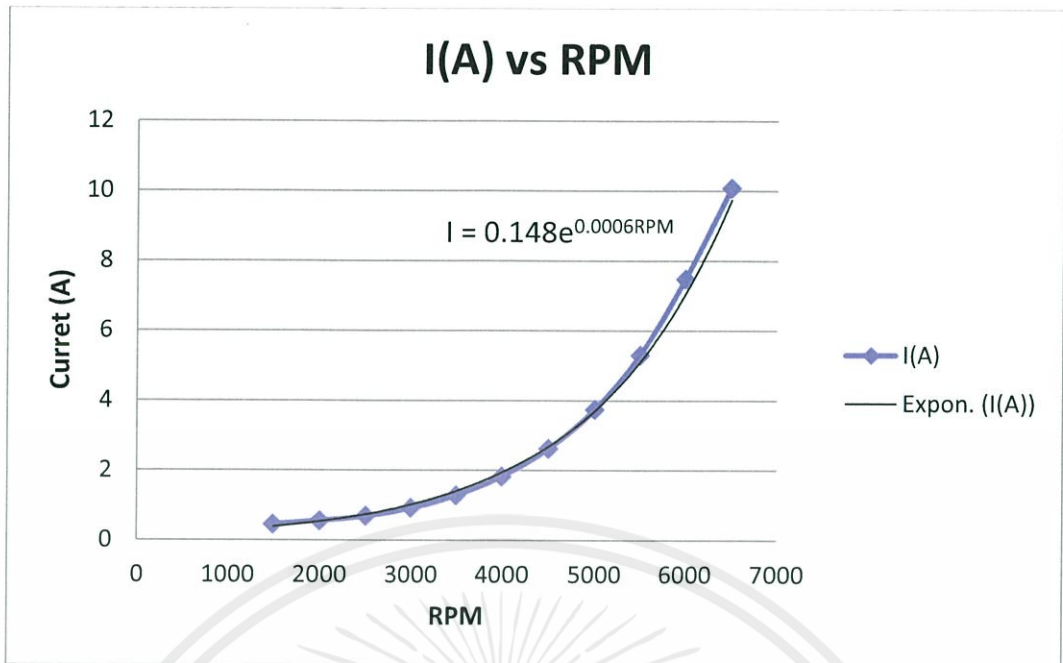
แปลงเป็น Difference Equation : $U[1] = (K_p * E[1]) + ((K_p * T_i / T_s) * E[1]) + U[0] - (K_p * E[0])$

นำ Difference Equation ที่ได้ไปใส่ในไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F3012

3.6 การตรวจสอบสถานะของใบพัดและมอเตอร์

โดยการตรวจสอบสถานะจะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ จากการทดลองวัดทอร์กและวัดแรงยกทำให้เราทราบถึงความสัมพันธ์ดังกล่าวได้เป็นสมการ $I = 0.148e^{0.0006RPM}$ โดยสมการได้จากการทำเลือกเส้นกราฟที่เหมาะสมกับข้อมูล (Curve Fitting)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความเร็วรอบของมอเตอร์

กรณีที่วัดกระแสไฟฟ้าเทียบกับค่ากระแสไฟฟ้าที่คำนวณจากสมการแล้วพบว่ามีความคลาดเคลื่อนมากกว่า 50% บ่งบอกถึงสถานะมอเตอร์เกิดการลัดวงจร กรณีที่วัดกระแสไฟฟ้าแล้วได้น้อยกว่ากระแสไฟฟ้าที่คำนวณ 50% บ่งบอกว่าใบพัดได้หลุดออกจากมอเตอร์ และในกรณีมอเตอร์ไม่สามารถควบคุมรอบได้ค่าความเร็วรอบมอเตอร์ที่วัดได้จากเซนเซอร์คลาดเคลื่อนจากค่าที่สั่ง 20%

3.7 การติดต่อสื่อสารกับบอร์ดควบคุมกลาง

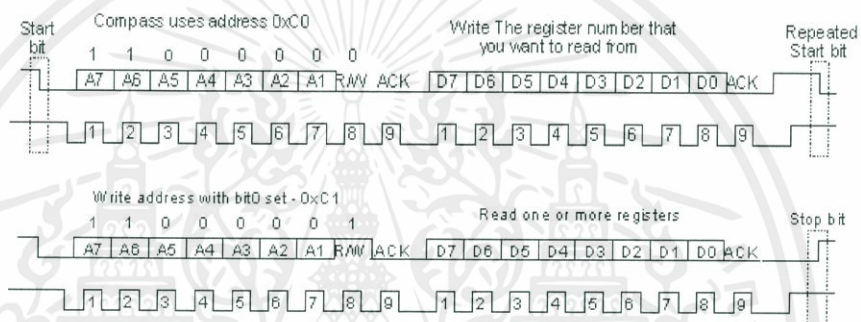
ในการติดต่อกับบอร์ดควบคุมกลาง (Central Control Board) จะใช้รูปแบบการสื่อสารแบบ I2C (Inter-IC Communication) หมายถึง การติดต่อสื่อสารระหว่างไอซี โดยบัส I2C ได้รับการพัฒนาโดย ฟิลิปส์ (Philips) ด้วยจุดมุ่งหมายหลักคือ ต้องการให้ไอซีหรือโมดูลสามารถติดต่อ สั่งงาน และควบคุมภายใต้สายสัญญาณเพียง 2 เส้น เส้นหนึ่งคือ สายสัญญาณนาฬิกาที่ใช้กำหนดจังหวะการทำงาน การต่อร่วมกันของอุปกรณ์บนบัส I2C ทำได้ง่ายมาก เพียงต่อสายข้อมูลและสายสัญญาณนาฬิกาของอุปกรณ์แต่ละตัวขนานหรือพ่วงกันไป ส่วนการกำหนดแอดเดรสหรือตำแหน่งสำหรับติดต่ออุปกรณ์แต่ละตัว จะใช้รหัสข้อมูลและการกำหนดสถานะโลกิจที่ขาแอดเดรสของอุปกรณ์แต่ละตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายข้อมูลบนบัส I2C มีชื่อเรียกอย่างเป็นทางการว่า สายข้อมูลอนุกรม หรือ SDA (Serial Data Line) ส่วนสายสัญญาณนาฬิกาที่มีชื่อเรียกว่า สายสัญญาณนาฬิกาอนุกรม หรือ SCL (Serial Clock Line) ในการอธิบายต่อไปนี้จะเรียกสายสัญญาณทั้งสองว่า SDA และ SCL

ข้อดีของ I2C

- ใช้จำนวนสายน้อยแต่สามารถต่อกับอุปกรณ์หลายตัวได้
- สามารถป้องกันสัญญาณรบกวนได้
- ความเร็วในการส่งสูงถึง 100 กิโลบิตต่อวินาทีในโหมดปรกติ และ สูงถึง 400 กิโลบิตต่อวินาทีในโหมดความเร็วสูง



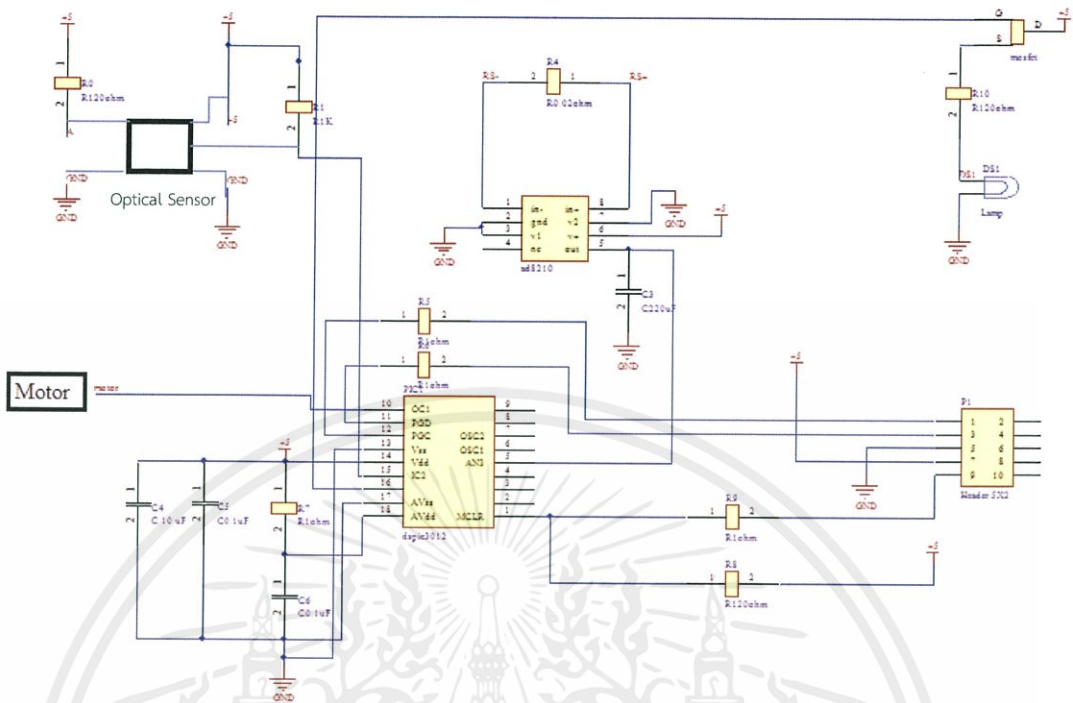
รูปที่ 3.14 Timing Diagram ของ I2C

3.8 การออกแบบบอร์ดควบคุมมอเตอร์

คุณสมบัติของบอร์ดควบคุมมอเตอร์ที่ต้องการคือ บอร์ดมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบาและรวมอุปกรณ์ทุกตัวอยู่บนบอร์ดเดียวกัน ดังนั้นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้จะเป็นแบบยึดบนผิวแผ่นวงจรพิมพ์ (Surface Mount Device) เพื่อให้บอร์ดมีขนาดเล็กและมีน้ำหนักเบา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

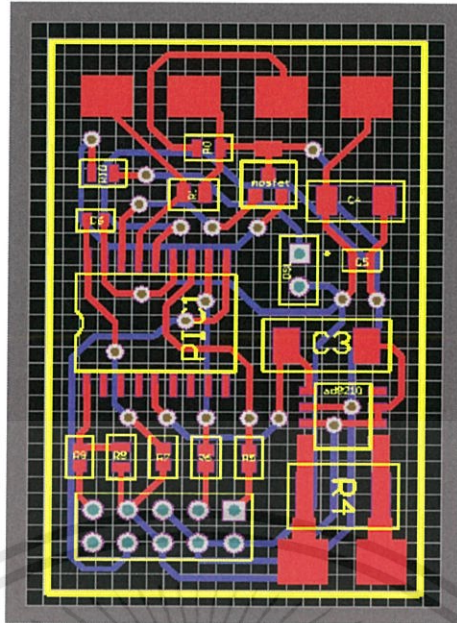
3.8.1 แผนผังวงจรของบอร์ดควบคุมมอเตอร์ (Schematic)



รูปที่ 3.15 แผนผังวงจรของบอร์ดควบคุมมอเตอร์

จากนั้นนำแผงผังวงจรที่ออกแบบไว้มาออกแบบลายทองแดงของแผ่นวงจรพิมพ์ (Print Circuit Board) โดยการออกแบบลายทองแดงต้องไม่เกิดการลัดวงจรและก่อให้เกิดสัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 ลายทองแดงของบอร์ดควบคุมมอเตอร์ที่ออกแบบไว้

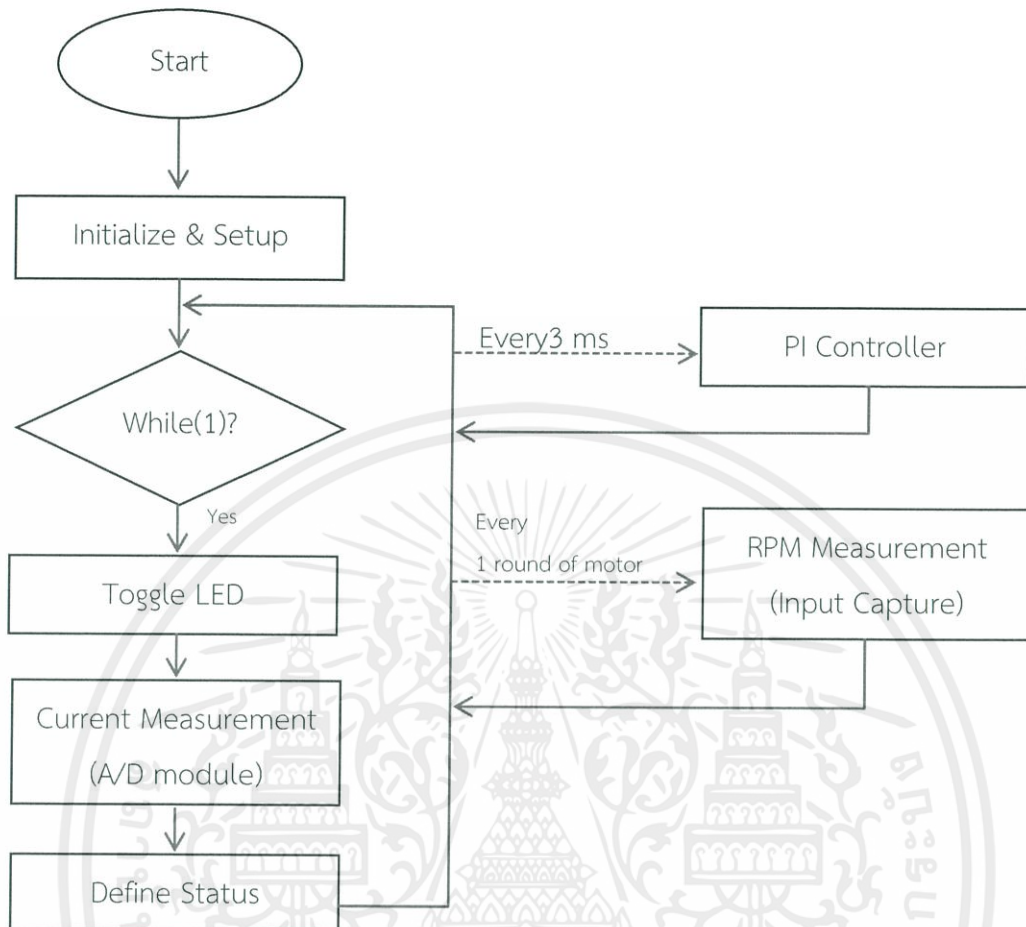
3.9 การออกแบบโปรแกรมของระบบควบคุมมอเตอร์

ในส่วนของโปรแกรมจะอยู่ในไมโครคอนโทรลเลอร์ โปรแกรมของระบบควบคุมมอเตอร์จะประกอบไปด้วย

- นับสัญญาณจากเซนเซอร์วัดรอบ เพื่อนำไปทำการคำนวณหาความเร็วรอบ (Input Capture Module)
- สร้างสัญญาณสี่เหลี่ยม เพื่อส่งไปยังชุดขับมอเตอร์ (Output Compare Module)
- อ่านค่าจากที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า (Analog to Digital Converter)
- สื่อสารกับบอร์ดควบคุมกลาง (I2C)
- ตรวจสอบสถานะของมอเตอร์และใบพัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Flow Chart ของโปรแกรมระบบควบคุมมอเตอร์

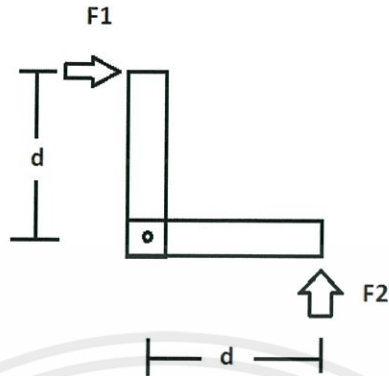


รูปที่ 3.17 Flow Chart ของระบบควบคุมมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10 การออกแบบเครื่องวัดแรงยกของมอเตอร์

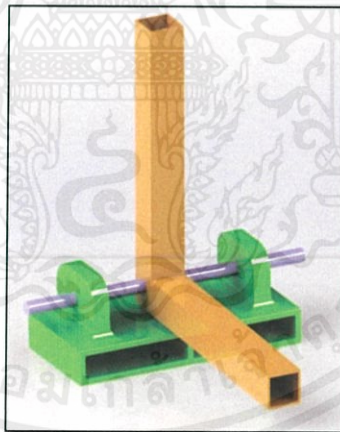
จากทฤษฎีออกแบบเครื่องวัดแรงยกโดยใช้หลักการสมดุลโมเมนต์ ตามรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แบบร่างเครื่องวัดแรงยก

โดยติดตั้งมอเตอร์พร้อมใบพัดไว้ด้าน F_1 ทำให้เกิดแรงยกจากการหมุนไปทิศทางตามลูกศร F_1 จากนั้นวางตาชั่งไว้ใต้แขนเครื่องวัดด้าน F_2 เพื่อวัดแรงยกที่เกิดขึ้น

นำแบบร่างเครื่องวัดแรงยกไปสร้างแบบจำลองในโปรแกรม Solidwork ได้ดังนี้

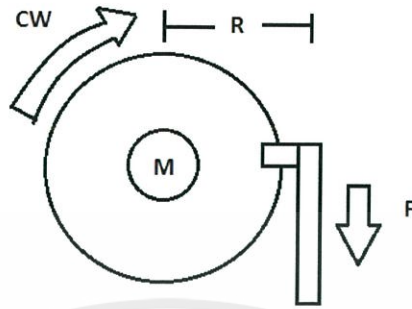


รูปที่ 3.19 แบบจำลอง 3 มิติของเครื่องวัดแรงยก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.11 การออกแบบเครื่องวัดทอร์กของมอเตอร์

จากทฤษฎีออกแบบเครื่องวัดทอร์กจากการหมุน โดยหลักการแรงตามแนวเส้นสัมผัสเส้นรอบวงของการหมุน



รูปที่ 3.20 แบบร่างเครื่องวัดทอร์ก

ติดตั้งมอเตอร์ไว้กึ่งกลางของแผ่นวงกลม โดยแผ่นวงกลมสามารถหมุนได้อิสระ แรงเสียดทานต่ำ เมื่อมอเตอร์หมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา จะเกิดแรงตามแนวเส้นสัมผัสเส้นรอบวงของแผ่นวงกลม นำตาชั่งไปวางใต้แขนที่ติดกับแผ่นวงกลมเพื่อวัดแรงที่เกิดขึ้น จากนั้นนำไปคำนวณในสมการ $\tau = FR$ จะได้ค่าทอร์กที่เกิดจากการหมุน

นำแบบร่างเครื่องวัดทอร์กไปสร้างแบบจำลองในโปรแกรม Solidwork ได้ดังนี้



รูปที่ 3.21 แบบจำลอง 3 มิติของเครื่องวัดทอร์ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 การทดลองวัดความเร็วของมอเตอร์โดยใช้บอร์ดควบคุมมอเตอร์

ในการทดลองวัดความเร็วของมอเตอร์ โดยใช้บอร์ดควบคุมมอเตอร์วัดความเร็วของมอเตอร์ จากนั้นนำเปรียบเทียบกับค่าความเร็วรอบที่วัดได้จากเครื่องวัดความเร็วรอบ (Tachometer)

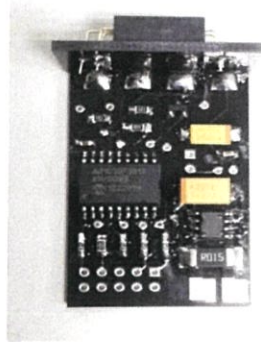
4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. มอเตอร์ MT2213-935kV พร้อมใบพัดขนาด 1045
2. ชุดขับมอเตอร์ RCTIMER ESC 30A SimonK Firmware
3. บอร์ดควบคุมมอเตอร์
4. ชุดควบคุมกลางของควอเตอร์เตอร์
5. เครื่องวัดความเร็วรอบ (Tachometer)

4.1.2 วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งบอร์ดควบคุมตามรูปที่ 4.1
2. ทำการสั่งมอเตอร์หมุนที่ความเร็วรอบ 1500RPM
3. อ่านค่าที่ได้จากเซนเซอร์
4. อ่านค่าที่ได้จากเครื่องวัดความเร็วรอบ
5. บันทึกค่าทั้งสองลงในตาราง
6. เพิ่มคำสั่งหมุนมอเตอร์เพิ่มอีก 500 RPM จากนั้นทำซ้ำ 2 – 5 จนถึงคำสั่งหมุนมอเตอร์ที่ 6000 RPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 บอร์ดควบคุมมอเตอร์ที่ลงอุปกรณ์เรียบร้อยแล้ว



รูปที่ 4.2 ติดตั้งบอร์ดในตำแหน่งพร้อมใช้งาน

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองการวัดความเร็วของมอเตอร์ (rpm) ของบอร์ดที่ 1 ถึง 4

ความเร็ว มอเตอร์ (rpm)	บอร์ดที่ 1		บอร์ดที่ 2		บอร์ดที่ 3		บอร์ดที่ 4	
	Tacho meter	Sensor	Tacho meter	Sensor	Tacho meter	Sensor	Tacho meter	Sensor
1500	1497	1499	1498	1502	1497	1504	1496	1499
2000	1995	1996	1997	2000	1995	2003	1996	1996
2500	2496	2498	2498	2503	2496	2498	2497	2498
3000	3002	3000	3000	3002	3002	2994	3000	3000
3500	3498	3500	3498	3503	3498	3497	3495	3500
4000	3997	3998	3996	3998	3997	3995	3996	3998
5000	4998	4997	4998	4997	4998	5003	4994	4997
5500	5501	5500	5500	5500	5501	5503	5498	5500
6000	5998	5998	5997	5998	5998	6001	5996	5998

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้ในเชิงพาณิชย์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการใช้งานบอร์ดควบคุมมอเตอร์สามารถตรวจสอบสถานะของมอเตอร์ วัดความเร็วรอบ การหมุนของมอเตอร์ วัดกระแสที่มอเตอร์ใช้ และสื่อสารกับบอร์ดควบคุมกลางได้ ซึ่งจากการทดลอง บอร์ดควบคุมมอเตอร์ทำงานได้ดีเป็นไปตามที่ได้ออกแบบไว้

4.2 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกและความเร็วรอบของมอเตอร์

การวัดแรงยกของมอเตอร์นั้นจะต้องออกแบบเครื่องวัดแรงยก โดยเครื่องวัดแรงยกนี้จะอาศัยหลักการของโมเมนต์เพื่อจะได้ทราบถึงแรงยกของมอเตอร์

4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

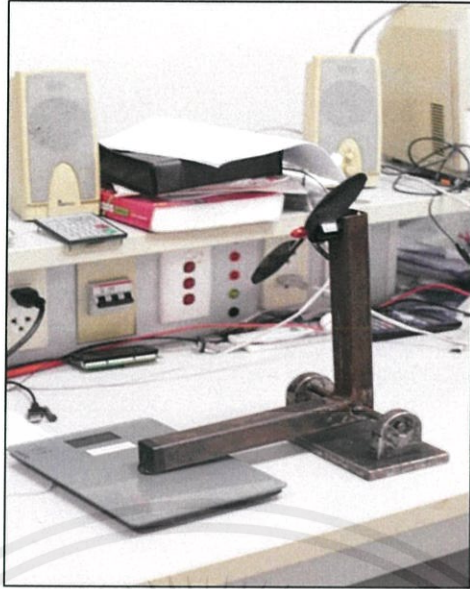
1. มอเตอร์ MT2213-935kV พร้อมใบพัดขนาด 1045
2. ชุดขับมอเตอร์ RCTIMER ESC 30A SimonK Firmware
3. บอร์ดควบคุมมอเตอร์
4. เครื่องวัดแรงยก
5. ชุดควบคุมกลางของควอโทรเตอร์
6. ตาชั่ง

4.2.2 วิธีการทดลอง

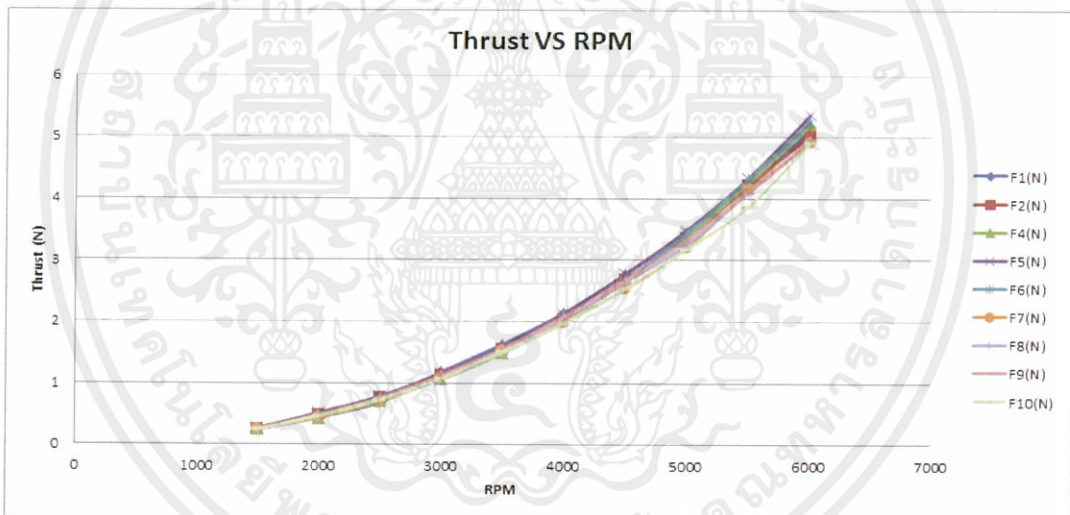
1. ติดตั้งบอร์ดควบคุมมอเตอร์กับเครื่องวัดแรงยก
2. ทำการสั่งมอเตอร์หมุนที่ความเร็วรอบ 1500RPM
3. อ่านค่าจากตาชั่ง
4. บันทึกค่าลงในตาราง
5. เพิ่มคำสั่งหมุนมอเตอร์เพิ่มอีก 500 RPM จากนั้นทำข้อ 2 – 5 จนถึงคำสั่งหมุน

มอเตอร์ที่ 6000 RPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 เครื่องวัดแรงยก



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงยก (N) และความเร็วของมอเตอร์ (rpm)

จากกราฟเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกและความเร็วรอบมอเตอร์โดยจากชุดทดลอง เรา จะวัดความเร็วรอบมอเตอร์ พร้อมกับแรงยกที่เกิดขึ้นบนตาชั่งเราก็จะได้ความสัมพันธ์มาดังรูปที่ 4.4 และเมื่อเราทำการทำสอบมอเตอร์ทั้ง 10 ตัว ผลที่ได้ก็ออกมาใกล้เคียงกัน แต่ก็มีบางย่านความเร็ว รอบของบางตัวที่ให้แรงยกแตกต่างจากตัวอื่นเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์

การวัดแรงบิดของมอเตอร์นั้นจะต้องออกแบบเครื่องวัดแรงบิด โดยเครื่องวัดแรงบิดนี้จะอาศัยหลักการแรงตามแนวเส้นสัมผัสเส้นรอบวงของการหมุน

4.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. มอเตอร์ MT2213-935kV พร้อมใบพัดขนาด 1045
2. ชุดขับมอเตอร์ RCTIMER ESC 30A SimonK Firmware
3. บอร์ดควบคุมมอเตอร์
4. เครื่องวัดทอร์ก
5. ชุดควบคุมกลางของควอเตอร์มอเตอร์
6. ตาชั่ง

4.3.2 วิธีการทดลอง

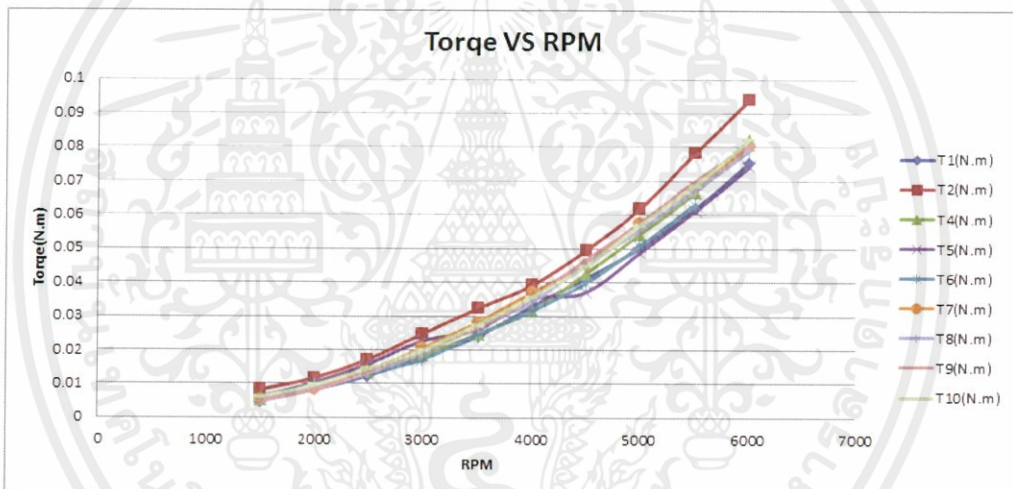
1. ติดตั้งบอร์ดควบคุมมอเตอร์กับเครื่องวัดทอร์ก
2. ทำการสั่งมอเตอร์หมุนที่ความเร็วรอบ 1500RPM
3. อ่านค่าจากตาชั่ง
4. บันทึกค่าลงในตาราง
5. เพิ่มคำสั่งหมุนมอเตอร์เพิ่มอีก 500 RPM จากนั้นทำข้อ 2 – 5 จนถึงคำสั่งหมุน

มอเตอร์ที่ 6000 RPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 เครื่องวัดทอร์ก



รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของมอเตอร์และความเร็วมอเตอร์

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบมอเตอร์และแรงบิด โดยจากชุดทดลองจะเห็นว่าเราจะทำการวัดความเร็วรอบ พร้อมกับวัดแรงบิดที่เกิดขึ้นบนตาชั่งที่เกิดเป็นแรงกด แล้วคำนวณออกมาเป็นแรงบิดที่เกิดขึ้น ณ ขณะนั้นก็จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 4.6 จะเห็นว่ามียมอเตอร์บางตัวนั้นที่ความเร็วรอบเท่ากัน ให้แรงบิดผิดออกไปจากตัวอื่นเล็กน้อยที่เห็นได้ชัดก็คือมอเตอร์ตัวที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุปการดำเนินงาน

การควบคุมมอเตอร์แบบไร้แปรงถ่านโดยการควบคุมแบบป้อนกลับ ทำให้สามารถควบคุมความเร็วรอบได้ตามที่ต้องการและรวดเร็ว ข้อดีอีกอย่างคือสามารถควบคุมความเร็วรอบได้ถึงแม้แรงดันไฟฟ้าจะลดลง และบอร์ดยังมีความสามารถในการตรวจสอบสถานะของมอเตอร์จากค่าความเร็วรอบและค่ากระแสของมอเตอร์อีกด้วย แต่ทั้งนี้การจะให้เซนเซอร์วัดรอบนั้นทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพต้องติดตั้งให้ได้ระยะอย่างเหมาะสมและต้องยึดอย่างแข็งแรงเมื่อเวลาบินจะไม่ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของเซนเซอร์ และเราจะนำข้อมูลจากการวัดรอบนี้ส่งไปให้ส่วนควบคุมกลางไปทำการคำนวณทางคณิตศาสตร์ต่อไป

5.2 ปัญหาที่พบในการดำเนินงาน

1. ในการบัดกรีวงจรนั้นอุปกรณ์บน PCB ที่อยู่บนบอร์ดค่อนข้างมีความไวต่อความร้อนที่ถูกบัดกรีขึ้นงาน เพราะฉะนั้นการบัดกรีบอร์ดควรระมัดระวังเป็นอย่างมาก
2. เรื่องของตำแหน่งของการติดตั้งเซนเซอร์ต้องมีตำแหน่งระยะการติดตั้งที่เหมาะสมและยึดอยู่กับที่อย่างแน่นหนา
3. บอร์ด PCB ต้องทำการซิลเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนเพราะบนบอร์ดมีการส่งข้อมูลของสัญญาณเป็นจำนวนมาก

5.3 แนวทางในการพัฒนาโครงการ

1. ลดขนาด PCB และทำการเดินลายวงจรใหม่ให้สวยงามและถูกหลัก เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวน
2. เพิ่มประสิทธิภาพของการควบคุม ให้มีความรวดเร็วและเสถียรมากขึ้น
3. เพิ่มระบบการป้องกัน กรณีเกิดเหตุฉุกเฉิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] “มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน”. เข้าถึงได้จาก
http://en.wikipedia.org/wiki/Brushless_DC_electric_motor
- [2] “ข้อมูลของเซนเซอร์วัดกระแส AD8210”. เข้าถึงได้จาก
www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8210.pdf
- [3] “ข้อมูลของเซนเซอร์วัดความเร็วรอบ EE-SY410”. เข้าถึงได้จาก
www.omron.com/ecb/products/pdf/en-ee_sy310_410.pdf
- [4] “ข้อมูลชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ SK-30A SimonK”. เข้าถึงได้จาก
<http://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?t=1716982>
- [5] “ข้อมูลไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC30F3012”. เข้าถึงได้จาก
<http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en010342>
- [6] “ตัวควบคุมพีไอดี”. เข้าถึงได้จาก
<http://th.wikipedia.org/wiki/ระบบควบคุมพีไอดี>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

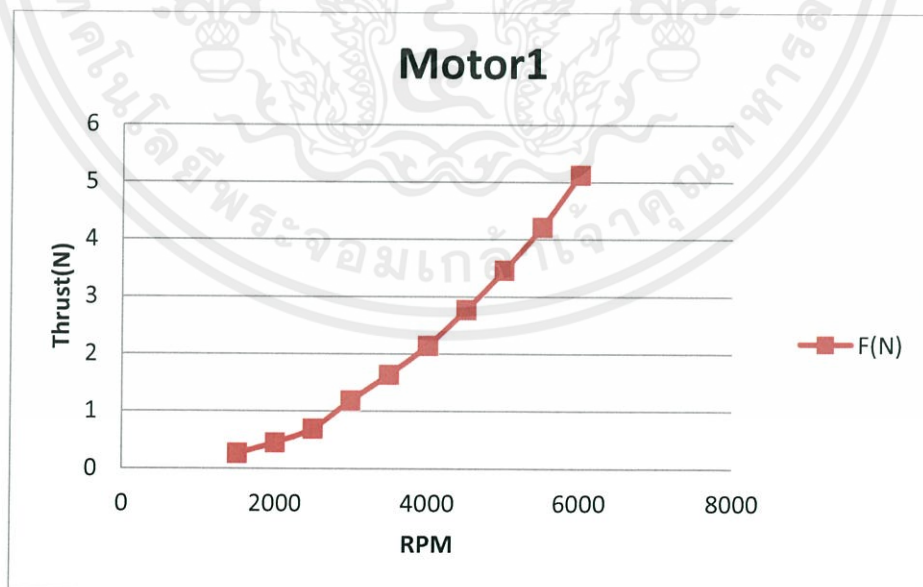
ภาคผนวก ก

ตารางผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกและ ความเร็วรอบของมอเตอร์

มอเตอร์ตัวที่ 1

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองแรงยกของมอเตอร์ตัวที่ 1

RPM	I(A)	F(g)	Vphase	F(N)
1500	0.466	26	1.572	0.25506
2000	0.522	45	2.1	0.44145
2500	0.671	70	2.627	0.6867
3000	0.89	120	3.161	1.1772
3500	1.287	166	3.66	1.62846
4000	1.815	218	4.2	2.13858
4500	2.635	282	4.728	2.76642
5000	3.812	352	5.248	3.45312
5500	5.533	429	5.811	4.20849
6000	7.439	522	6.383	5.12082

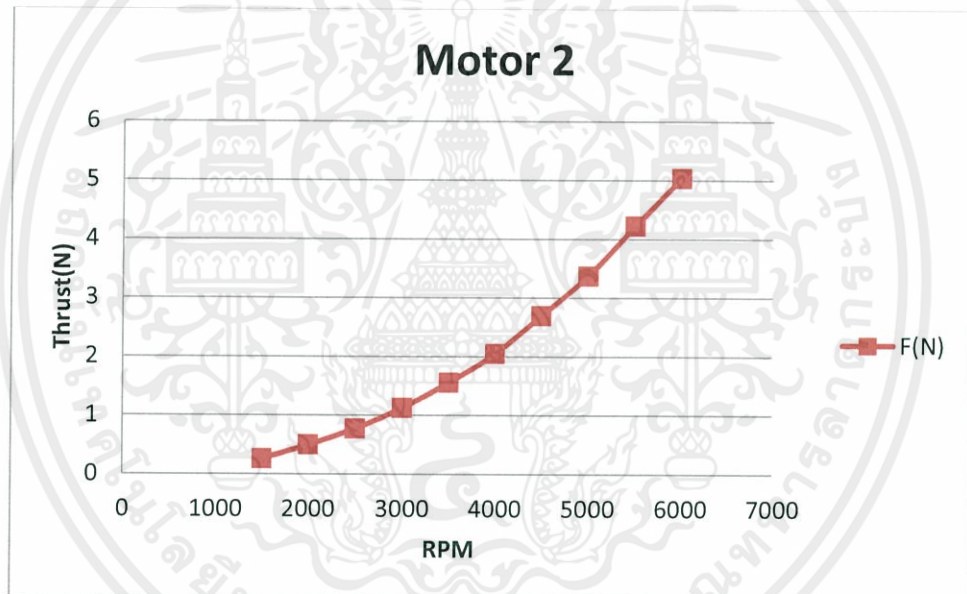


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ ก.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกและความเร็วรอบของมอเตอร์ตัวที่ 1

มอเตอร์ตัวที่ 2

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองแรงยกของมอเตอร์ตัวที่ 2

RPM	I(A)	F(g)	Vphase	F(N)
1500	0.46	26	1.574	0.25506
2000	0.555	50	2.135	0.4905
2500	0.688	78	2.666	0.76518
3000	0.939	114	3.189	1.11834
3500	1.314	158	3.7	1.54998
4000	1.86	208	4.196	2.04048
4500	2.635	274	4.733	2.68794
5000	3.937	343	5.257	3.36483
5500	5.786	430	5.777	4.2183
6000	7.5	513	6.403	5.03253



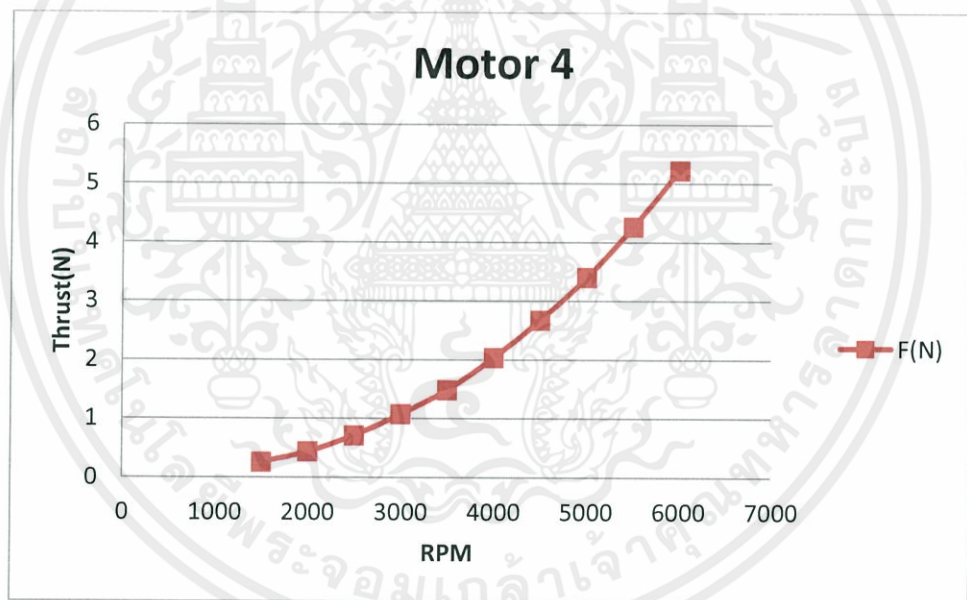
รูปที่ ก.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกและความเร็วรอบของมอเตอร์ตัวที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ .

มอเตอร์ตัวที่ 4

ตารางที่ ก.3 ผลการทดลองแรงยกของมอเตอร์ตัวที่ 4

RPM	I(A)	F(g)	Vphase	F(N)
1500	0.47	26	1.574	0.25506
2000	0.543	44	2.101	0.43164
2500	0.692	72	2.625	0.70632
3000	0.912	109	3.145	1.06929
3500	1.281	151	3.612	1.48131
4000	1.912	207	4.179	2.03067
4500	2.757	272	4.71	2.66832
5000	4.072	346	5.224	3.39426
5500	5.963	434	5.777	4.25754
6000	8.037	532	6.421	5.21892



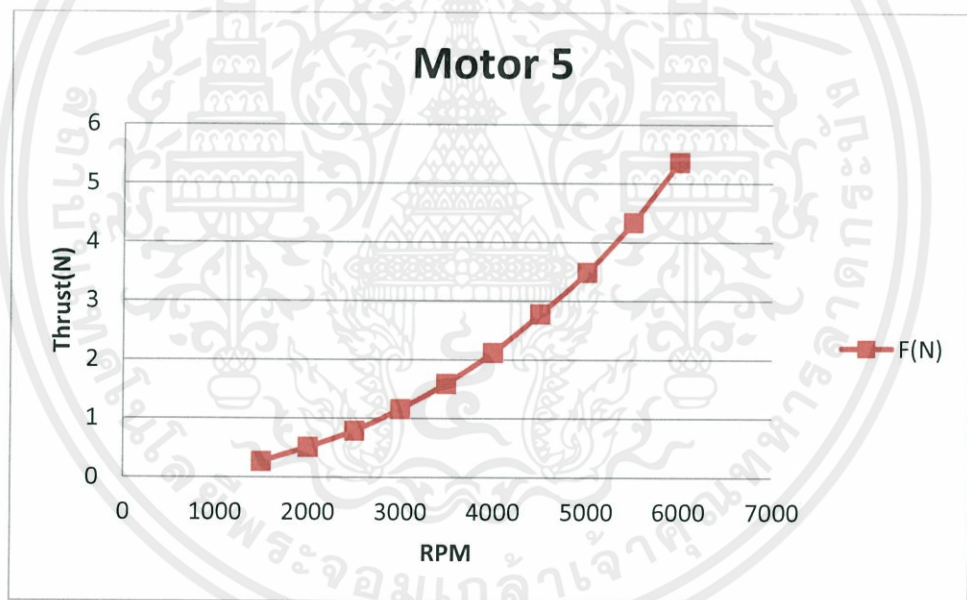
รูปที่ ก.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกและความเร็วรอบของมอเตอร์ตัวที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 5

ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองแรงยกของมอเตอร์ตัวที่ 5

RPM	I(A)	F(g)	Vphase	F(N)
1500	0.485	27	1.65	0.26487
2000	0.576	52	2.2	0.51012
2500	0.726	80	2.729	0.7848
3000	0.968	118	3.275	1.15758
3500	1.354	162	3.754	1.58922
4000	1.817	216	4.28	2.11896
4500	2.733	283	4.821	2.77623
5000	3.989	355	5.32	3.48255
5500	5.645	442	5.88	4.33602
6000	7.555	546	6.475	5.35626



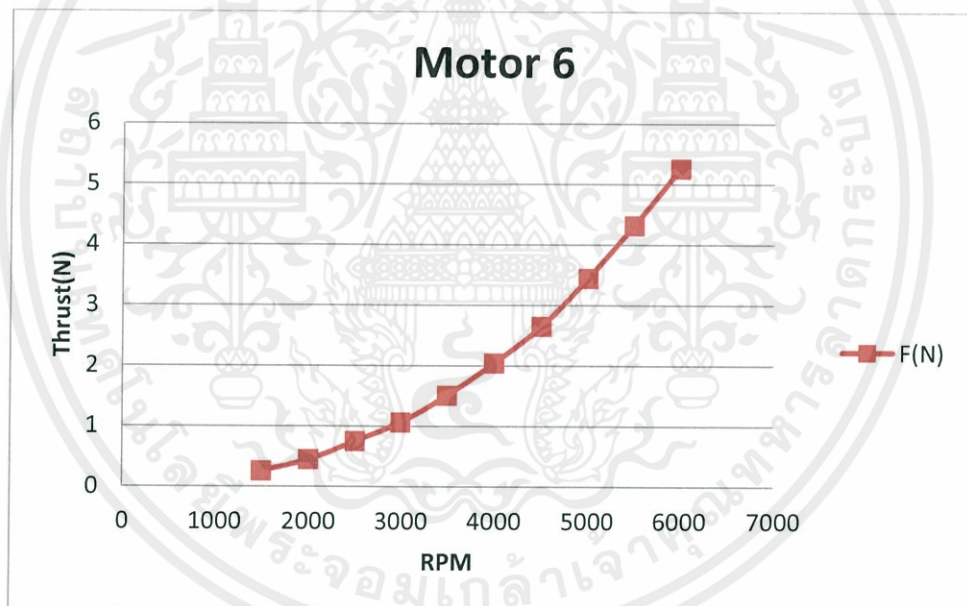
รูปที่ ก.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกและความเร็วรอบของมอเตอร์ตัวที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 6

ตารางที่ ก.5 ผลการทดลองแรงยกของมอเตอร์ตัวที่ 6

RPM	I(A)	F(g)	Vphase	F(N)
1500	0.466	26	1.163	0.25506
2000	0.555	45	2.15	0.44145
2500	0.689	76	2.71	0.74556
3000	0.906	108	3.221	1.05948
3500	1.25	153	3.768	1.50093
4000	1.799	208	4.243	2.04048
4500	2.586	270	4.765	2.6487
5000	3.724	351	5.3	3.44331
5500	5.368	440	5.85	4.3164
6000	7.234	536	6.47	5.25816



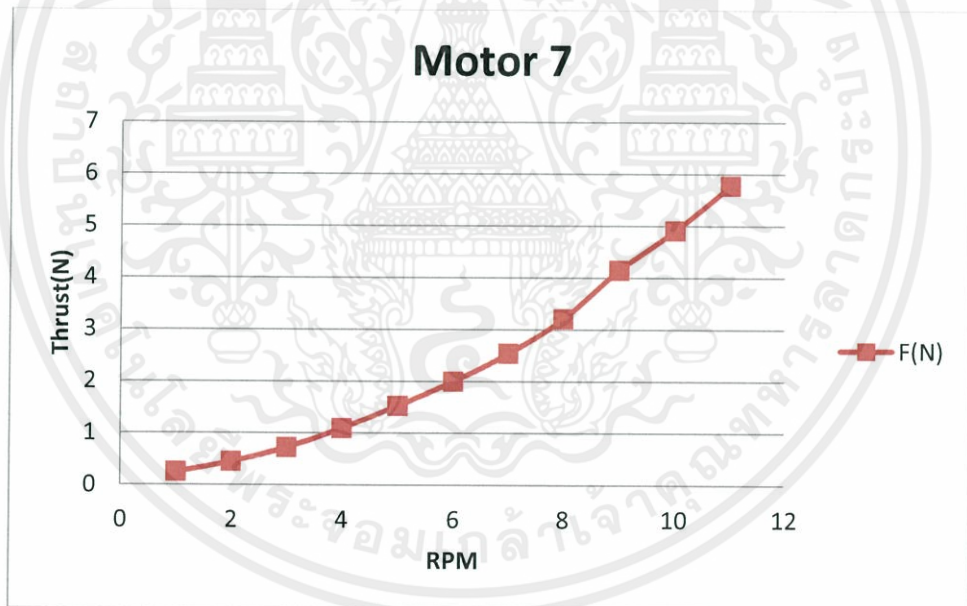
รูปที่ ก.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกและความเร็วรอบของมอเตอร์ตัวที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 7

ตารางที่ ก.6 ผลการทดลองแรงยกของมอเตอร์ตัวที่ 7

RPM	I(A)	F(g)	Vphase	F(N)
1500	0.46	25	1.583	0.24525
2000	0.558	45	2.111	0.44145
2500	0.691	73	2.673	0.71613
3000	0.923	111	3.162	1.08891
3500	1.278	155	3.665	1.52055
4000	1.812	203	4.177	1.99143
4500	2.573	258	4.675	2.53098
5000	3.68	326	5.2	3.19806
5500	5.605	422	5.81	4.13982
6000	7.335	500	6.395	4.905
6500	9.951	588	6.92	5.76828



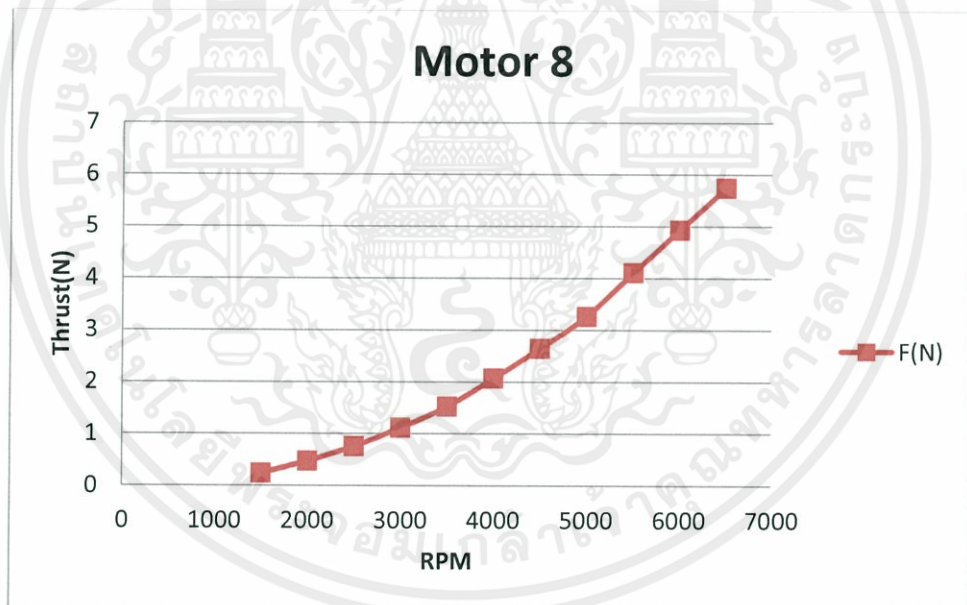
รูปที่ ก.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกและความเร็วรอบของมอเตอร์ตัวที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 8

ตารางที่ ก.7 ผลการทดลองแรงยกของมอเตอร์ตัวที่ 8

RPM	I(A)	F(g)	Vphase	F(N)
1500	0.494	24	1.673	0.23544
2000	0.591	48	2.21	0.47088
2500	0.756	77	2.741	0.75537
3000	1.005	113	3.256	1.10853
3500	1.421	155	3.746	1.52055
4000	2.016	210	4.257	2.0601
4500	2.897	269	4.781	2.63889
5000	4.093	332	5.303	3.25692
5500	5.944	418	5.854	4.10058
6000	7.643	502	6.494	4.92462
6500	10.51	585	7.08	5.73885



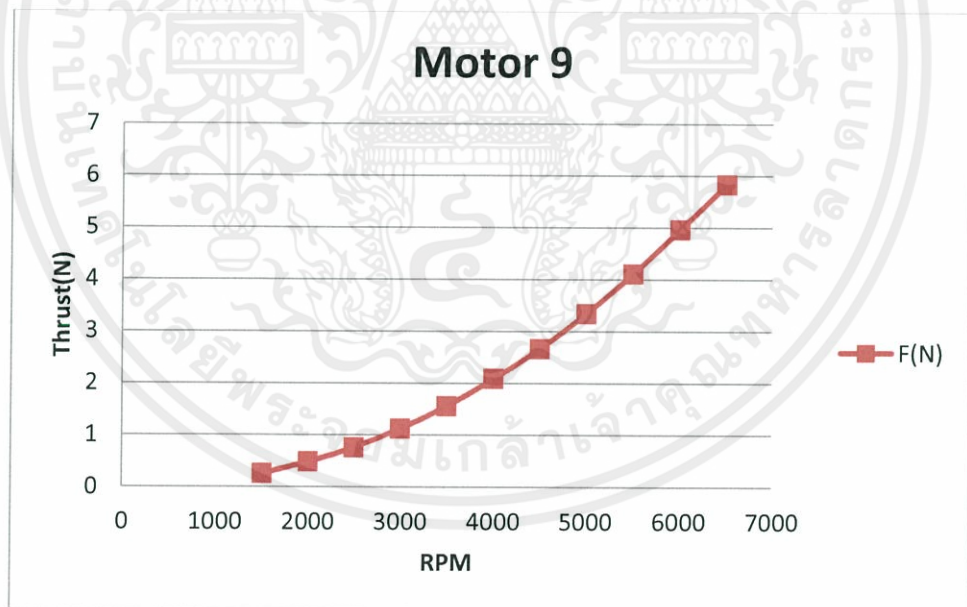
รูปที่ ก.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกและความเร็วรอบของมอเตอร์ตัวที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 9

ตารางที่ ก.8 ผลการทดลองแรงยกของมอเตอร์ตัวที่ 9

RPM	I(A)	F(g)	Vphase	F(N)
1500	0.485	26	1.641	0.25506
2000	0.582	49	2.166	0.48069
2500	0.827	77	2.714	0.75537
3000	0.964	114	3.233	1.11834
3500	1.409	158	3.74	1.54998
4000	1.964	212	4.255	2.07972
4500	2.885	271	4.783	2.65851
5000	4.133	340	5.296	3.3354
5500	5.835	418	5.839	4.10058
6000	7.616	505	6.463	4.95405
6500	10.28	594	7.06	5.82714



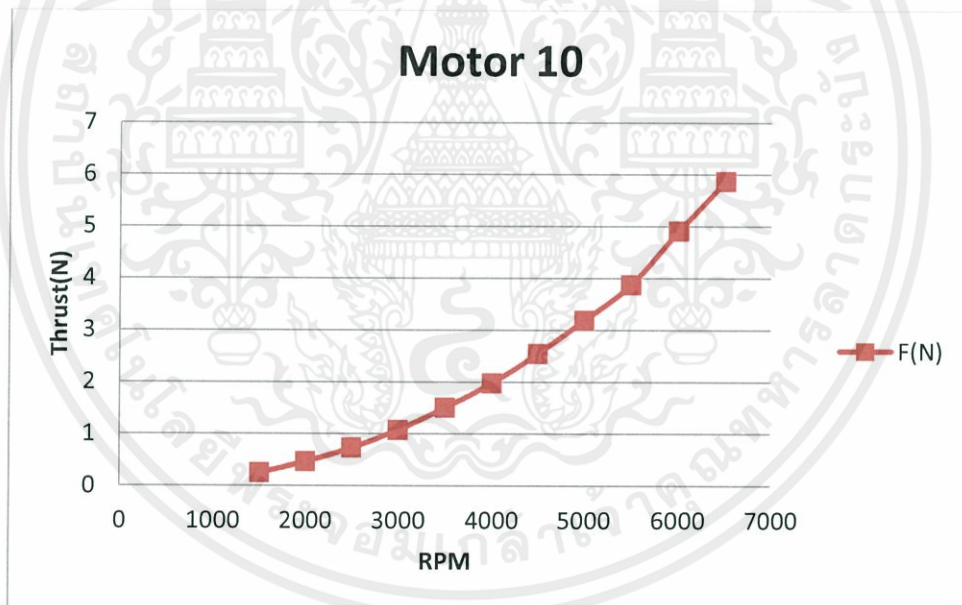
รูปที่ ก.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกและความเร็วรอบของมอเตอร์ตัวที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 10

ตารางที่ ก.9 ผลการทดลองแรงยกของมอเตอร์ตัวที่ 10

RPM	I(A)	F(g)	Vphase	F(N)
1500	0.46	25	1.595	0.24525
2000	0.561	47	2.133	0.46107
2500	0.692	74	2.633	0.72594
3000	0.92	109	3.18	1.06929
3500	1.287	153	3.678	1.50093
4000	1.829	201	4.169	1.97181
4500	2.629	259	4.701	2.54079
5000	3.742	324	5.201	3.17844
5500	5.304	394	5.722	3.86514
6000	7.482	500	6.333	4.905
6500	10.08	598	6.98	5.86638



รูปที่ ก.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกและความเร็วรอบของมอเตอร์ตัวที่ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

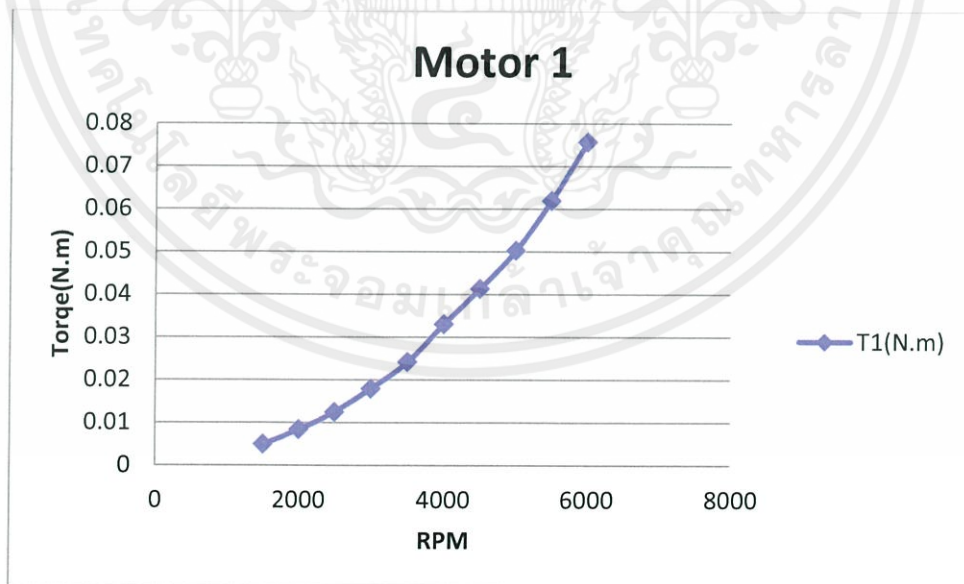
ภาคผนวก ข

ตารางผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและ ความเร็วรอบของมอเตอร์

มอเตอร์ตัวที่ 1

ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 1

RPM	I(A)	Ft(g)	Vphase	T1(N.m)
1500	0.451	7	1.579	0.0048069
2000	0.543	12	2.1	0.0082404
2500	0.688	18	2.628	0.0123606
3000	0.923	26	3.132	0.0178542
3500	1.337	35	3.627	0.0240345
4000	1.949	48	4.14	0.0329616
4500	2.9	60	4.642	0.041202
5000	4.224	73	5.144	0.0501291
5500	5.996	90	5.664	0.061803
6000	7.982	110	6.286	0.075537

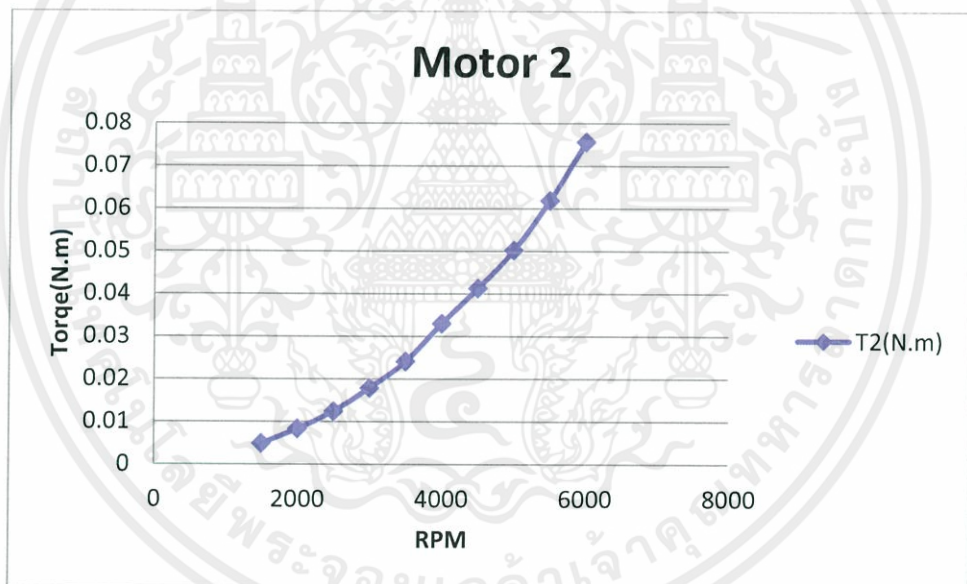


เอกสารนี้เป็นเอกสารรูปที่ ข.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ตัวที่ 1 ด้านการคำนวณ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 2

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 2

RPM	I(A)	Ft(g)	Vphase	T2(N.m)
1500	0.463	12	1.6	0.0082404
2000	0.555	17	2.142	0.0116739
2500	0.707	25	2.674	0.0171675
3000	0.951	36	3.203	0.0247212
3500	1.381	47	3.736	0.0322749
4000	2.043	57	4.22	0.0391419
4500	2.949	72	4.76	0.0494424
5000	4.351	90	5.261	0.061803
5500	6.281	114	5.828	0.0782838
6000	8.439	137	6.444	0.0940779



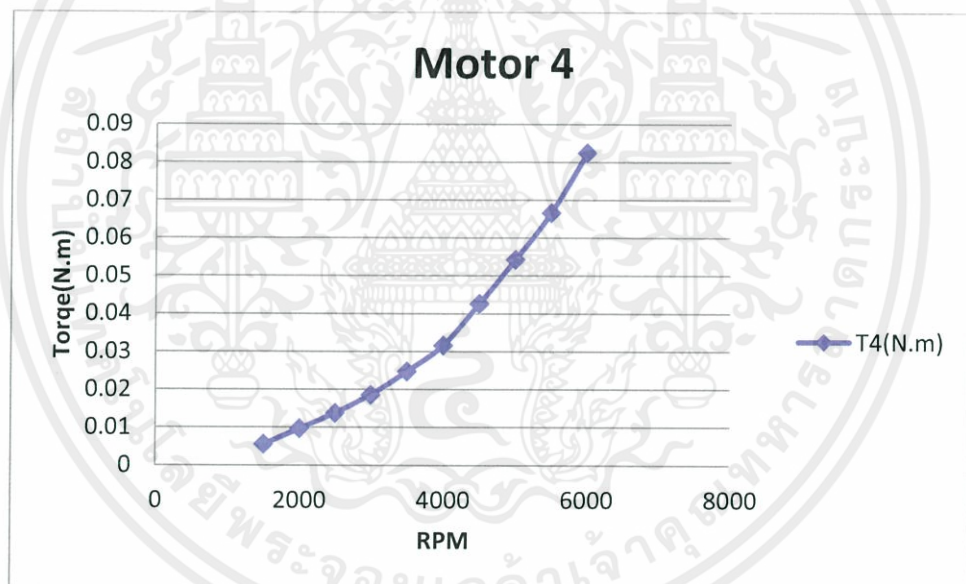
รูปที่ ข.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ตัวที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 4

ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 4

RPM	I(A)	Ft(g)	Vphase	T4(N.m)
1500	0.46	8	1.594	0.0054936
2000	0.564	14	2.14	0.0096138
2500	0.717	20	2.648	0.013734
3000	0.961	27	3.174	0.0185409
3500	1.421	36	3.696	0.0247212
4000	2.104	46	4.182	0.0315882
4500	3.074	62	4.721	0.0425754
5000	4.477	79	5.23	0.0542493
5500	6.311	97	5.818	0.0666099
6000	8.625	120	6.434	0.082404



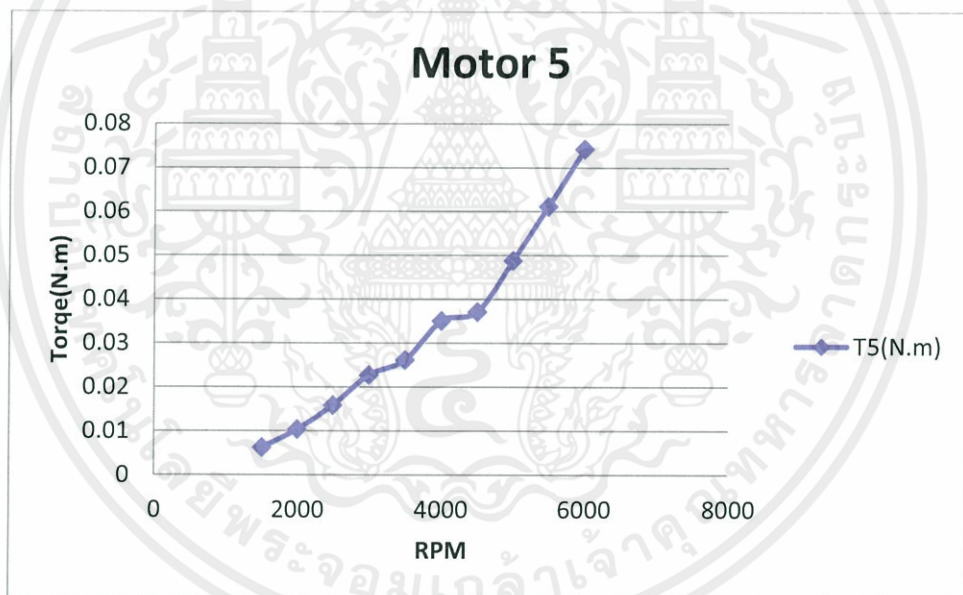
รูปที่ ข.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ตัวที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 5

ตารางที่ ข.4 ผลการทดลองแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 5

RPM	I(A)	Ft(g)	Vphase	T5(N.m)
1500	0.473	9	1.65	0.0061803
2000	0.583	15	2.2	0.0103005
2500	0.744	23	2.718	0.0157941
3000	1.015	33	3.246	0.0226611
3500	1.47	38	3.719	0.0260946
4000	2.141	51	4.222	0.0350217
4500	3.132	54	4.735	0.0370818
5000	4.523	71	5.249	0.0487557
5500	6.341	89	5.83	0.0611163
6000	8.403	108	6.397	0.0741636



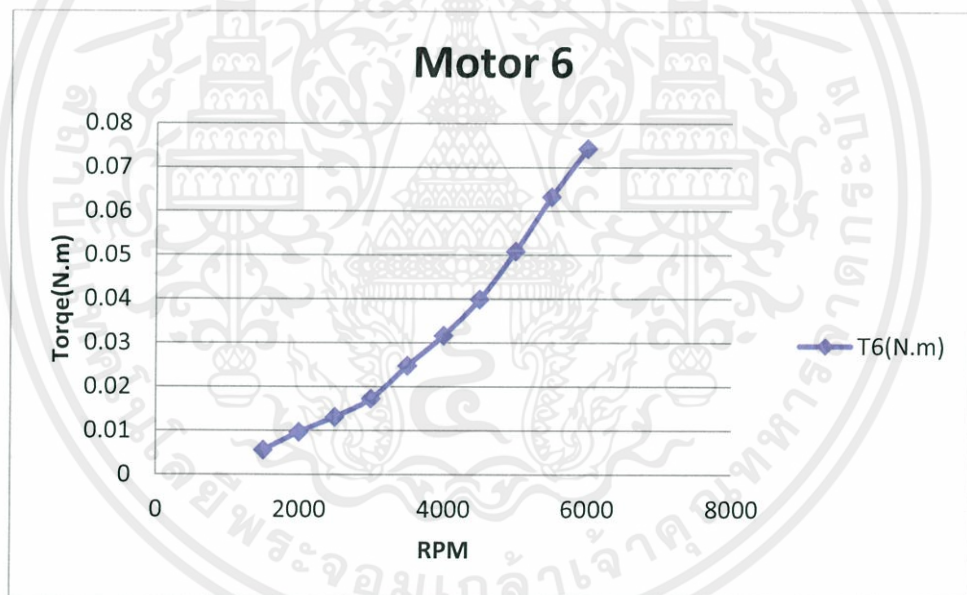
รูปที่ ข.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ตัวที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 6

ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 6

RPM	I(A)	Ft(g)	Vphase	T6(N.m)
1500	0.463	8	1.554	0.0054936
2000	0.531	14	2.095	0.0096138
2500	0.643	19	2.6	0.0130473
3000	0.857	25	3.108	0.0171675
3500	1.198	36	3.642	0.0247212
4000	1.723	46	4.127	0.0315882
4500	2.537	58	4.641	0.0398286
5000	3.742	74	5.146	0.0508158
5500	5.404	92	5.66	0.0631764
6000	8.403	108	6.397	0.0741636



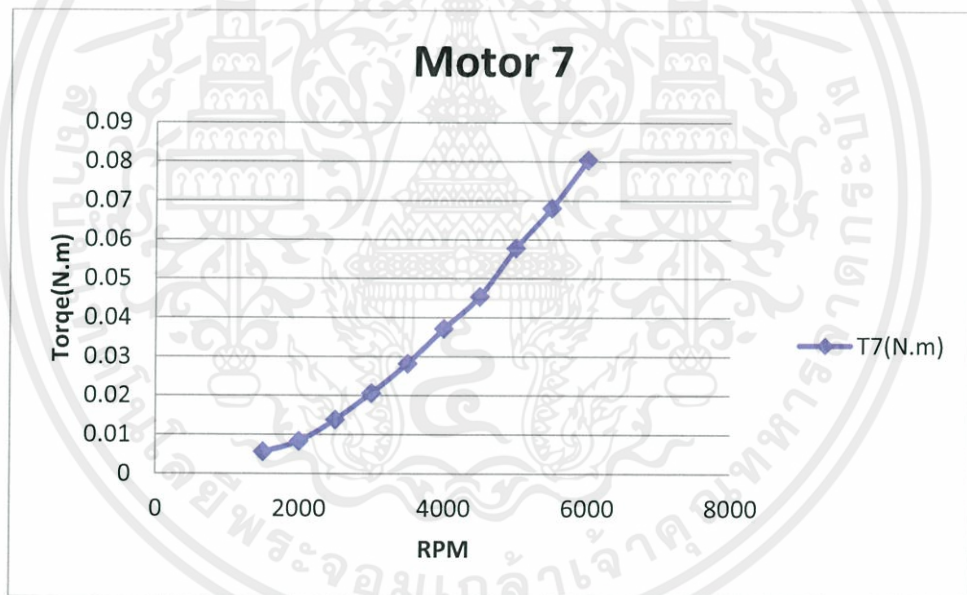
รูปที่ ข.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ตัวที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 7

ตารางที่ ข.6 ผลการทดลองแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 7

RPM	I(A)	Ft(g)	Vphase	T7(N.m)
1500	0.47	8	1.612	0.0054936
2000	0.555	12	2.126	0.0082404
2500	0.714	20	2.692	0.013734
3000	0.918	30	3.21	0.020601
3500	1.301	41	3.743	0.0281547
4000	1.9	54	4.252	0.0370818
4500	2.751	66	4.783	0.0453222
5000	3.957	84	5.284	0.0576828
5500	5.755	99	5.858	0.0679833
6000	7.539	117	6.443	0.0803439



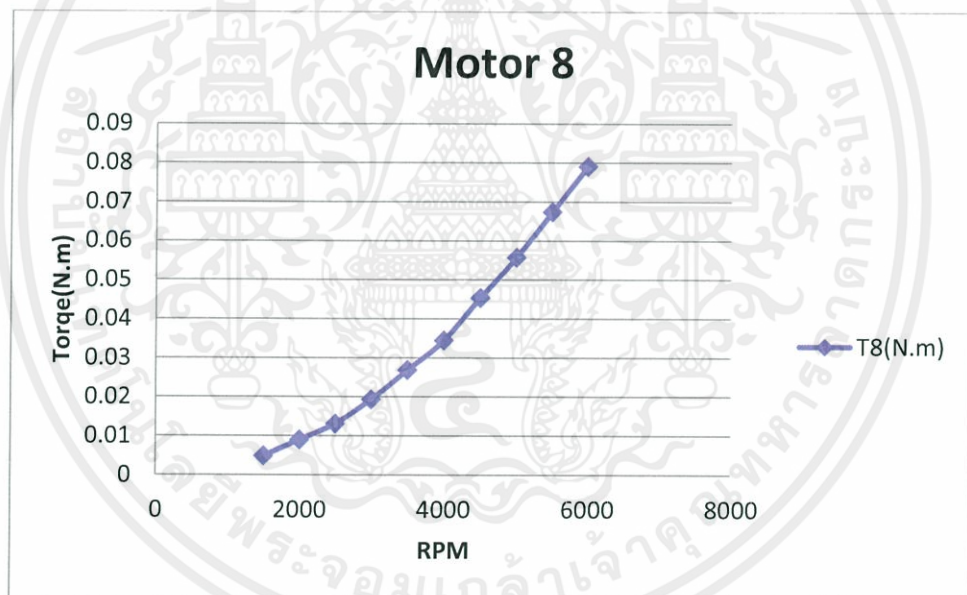
รูปที่ ข.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ตัวที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 8

ตารางที่ ข.7 ผลการทดลองแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 8

RPM	I(A)	Ft(g)	Vphase	T8(N.m)
1500	0.491	7	1.683	0.0048069
2000	0.579	13	2.184	0.0089271
2500	0.729	19	2.722	0.0130473
3000	0.964	28	3.231	0.0192276
3500	1.354	39	3.732	0.0267813
4000	1.9	50	4.226	0.034335
4500	2.744	66	4.748	0.0453222
5000	3.971	81	5.24	0.0556227
5500	5.687	98	5.792	0.0672966
6000	7.403	115	6.38	0.0789705



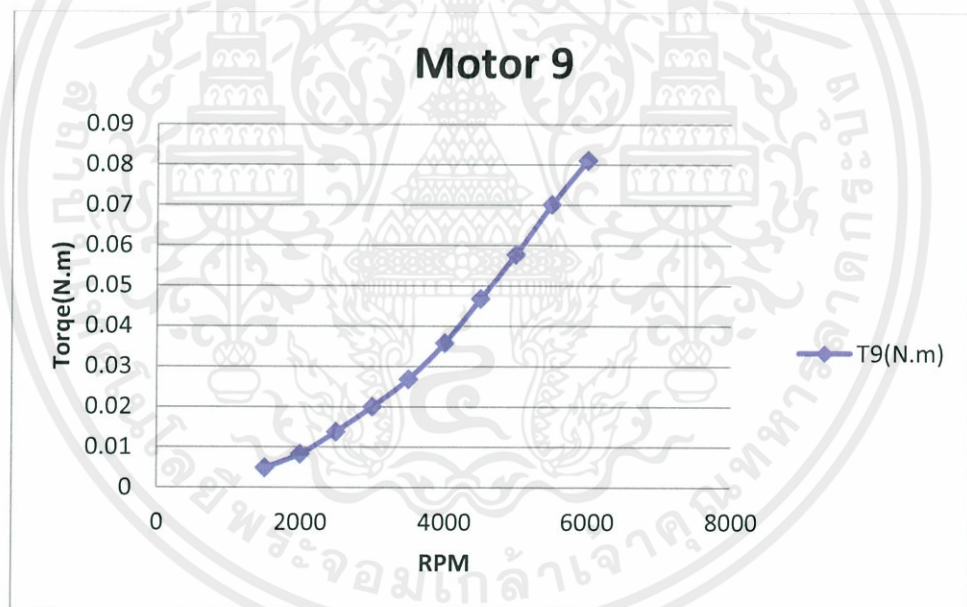
รูปที่ ข.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ตัวที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 9

ตารางที่ ข.8 ผลการทดลองแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 9

RPM	I(A)	Ft(g)	Vphase	T9(N.m)
1500	0.473	7	1.636	0.0048069
2000	0.57	12	2.189	0.0082404
2500	0.714	20	2.695	0.013734
3000	0.951	29	3.254	0.0199143
3500	1.345	39	3.751	0.0267813
4000	1.937	52	4.257	0.0357084
4500	2.769	68	4.773	0.0466956
5000	4.023	84	5.313	0.0576828
5500	5.746	102	5.846	0.0700434
6000	7.729	118	6.442	0.0810306



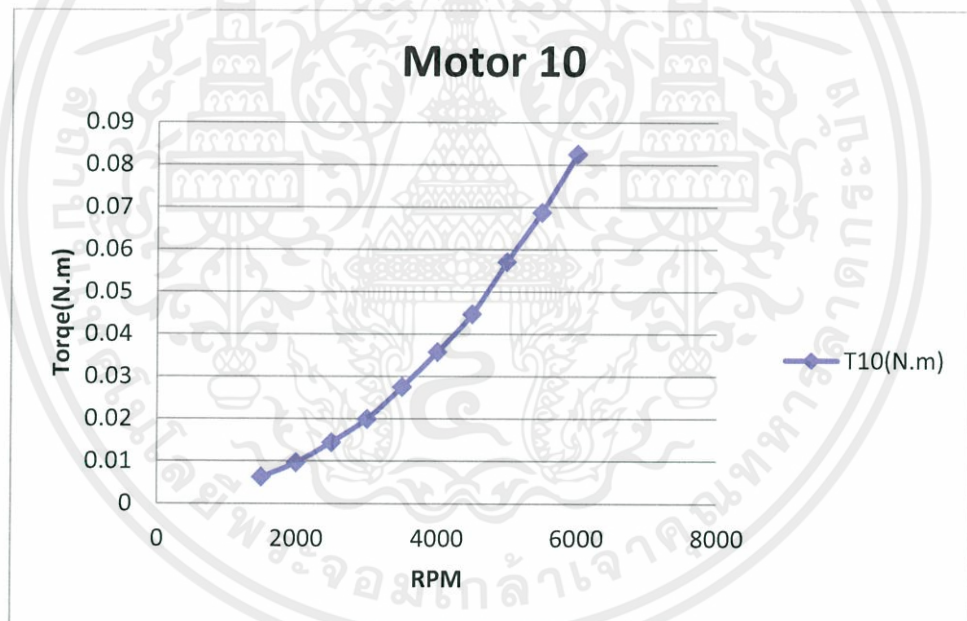
รูปที่ ข.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ตัวที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 10

ตารางที่ ข.9 ผลการทดลองแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 10

RPM	I(A)	Ft(g)	Vphase	T10(N.m)
1500	0.46	9	1.65	0.0061803
2000	0.549	14	2.165	0.0096138
2500	0.68	21	2.725	0.0144207
3000	0.894	29	3.259	0.0199143
3500	1.266	40	3.763	0.027468
4000	1.827	52	4.285	0.0357084
4500	2.659	65	4.82	0.0446355
5000	3.928	83	5.348	0.0569961
5500	5.716	100	5.91	0.06867
6000	7.521	120	6.43	0.082404

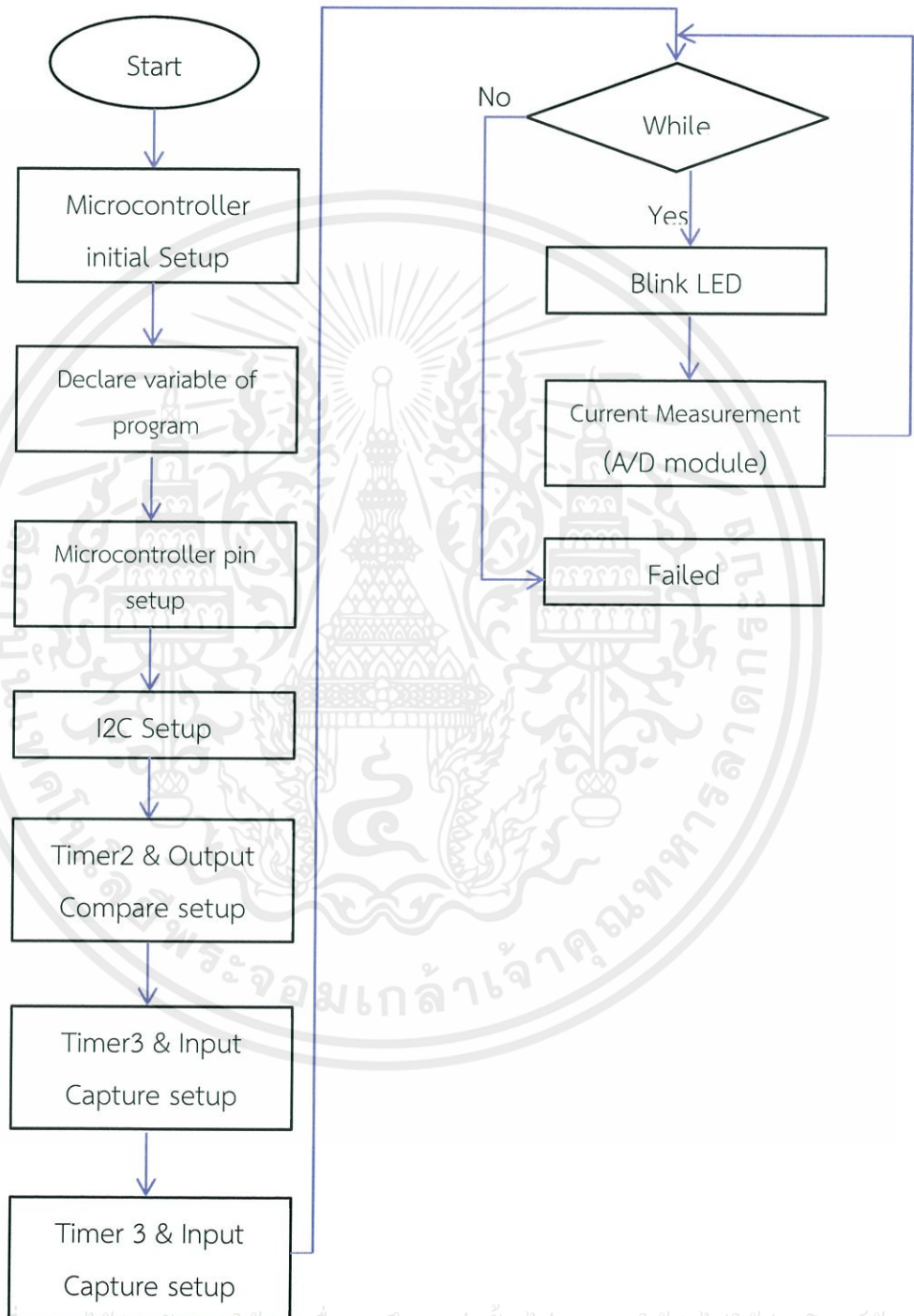


รูปที่ ข.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์ตัวที่ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

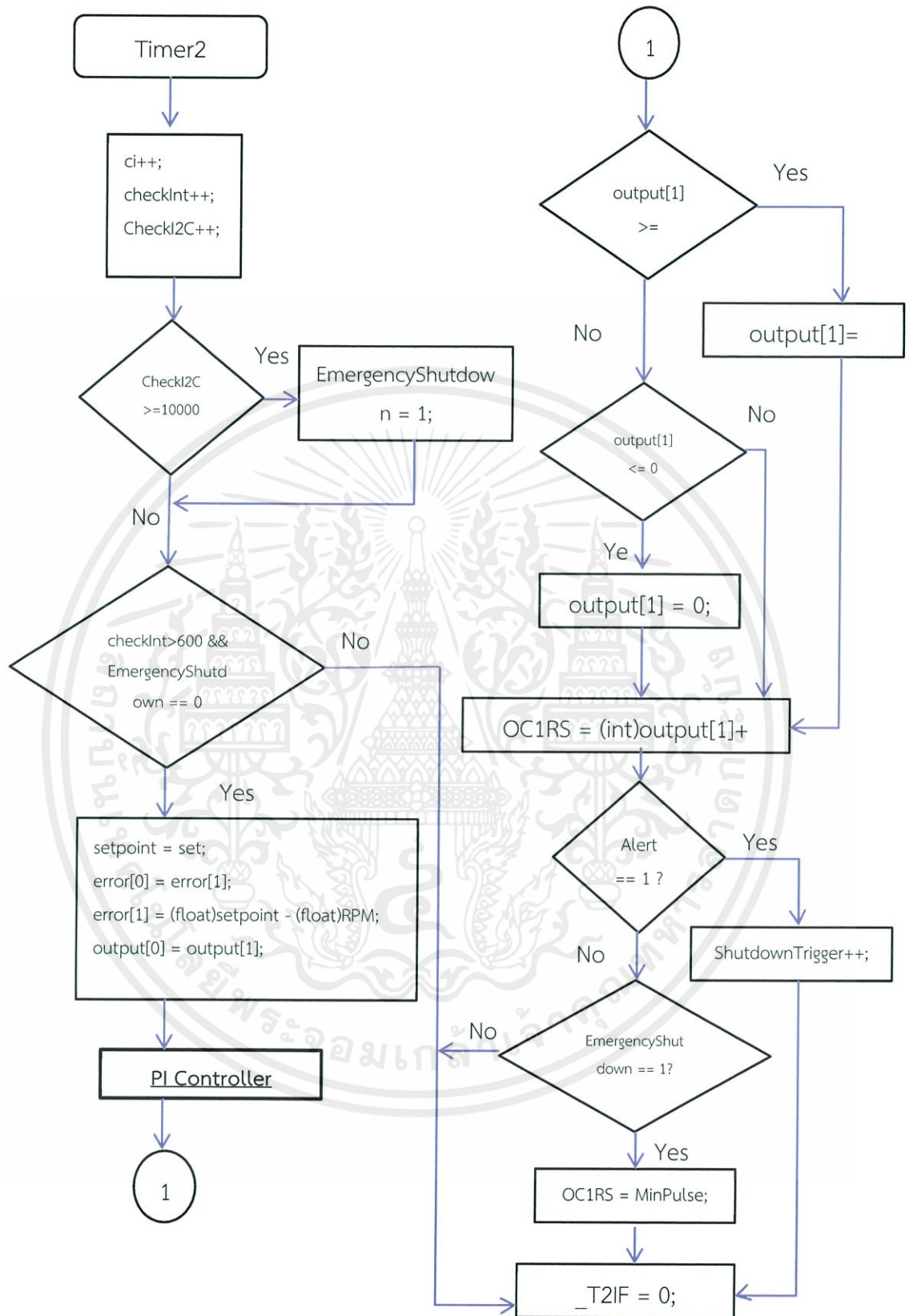
ภาคผนวก ค

ผังงานของโปรแกรมระบบควบคุมมอเตอร์ (Flowchart)



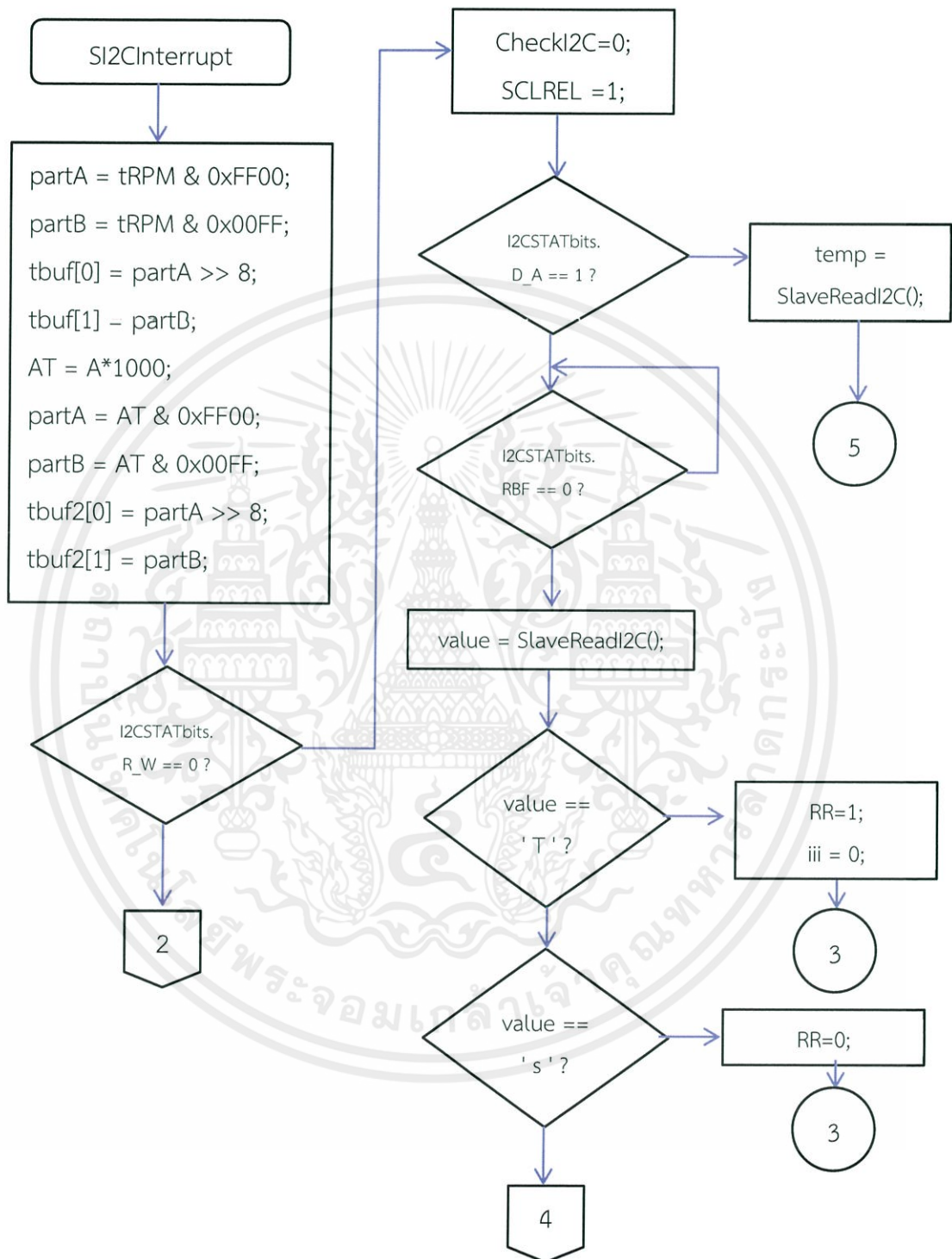
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่เอกสารฉบับนี้ไปยังบุคคลอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสำนักพิมพ์เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ค.1 แผนผังฟังก์ชันโปรแกรมหลัก

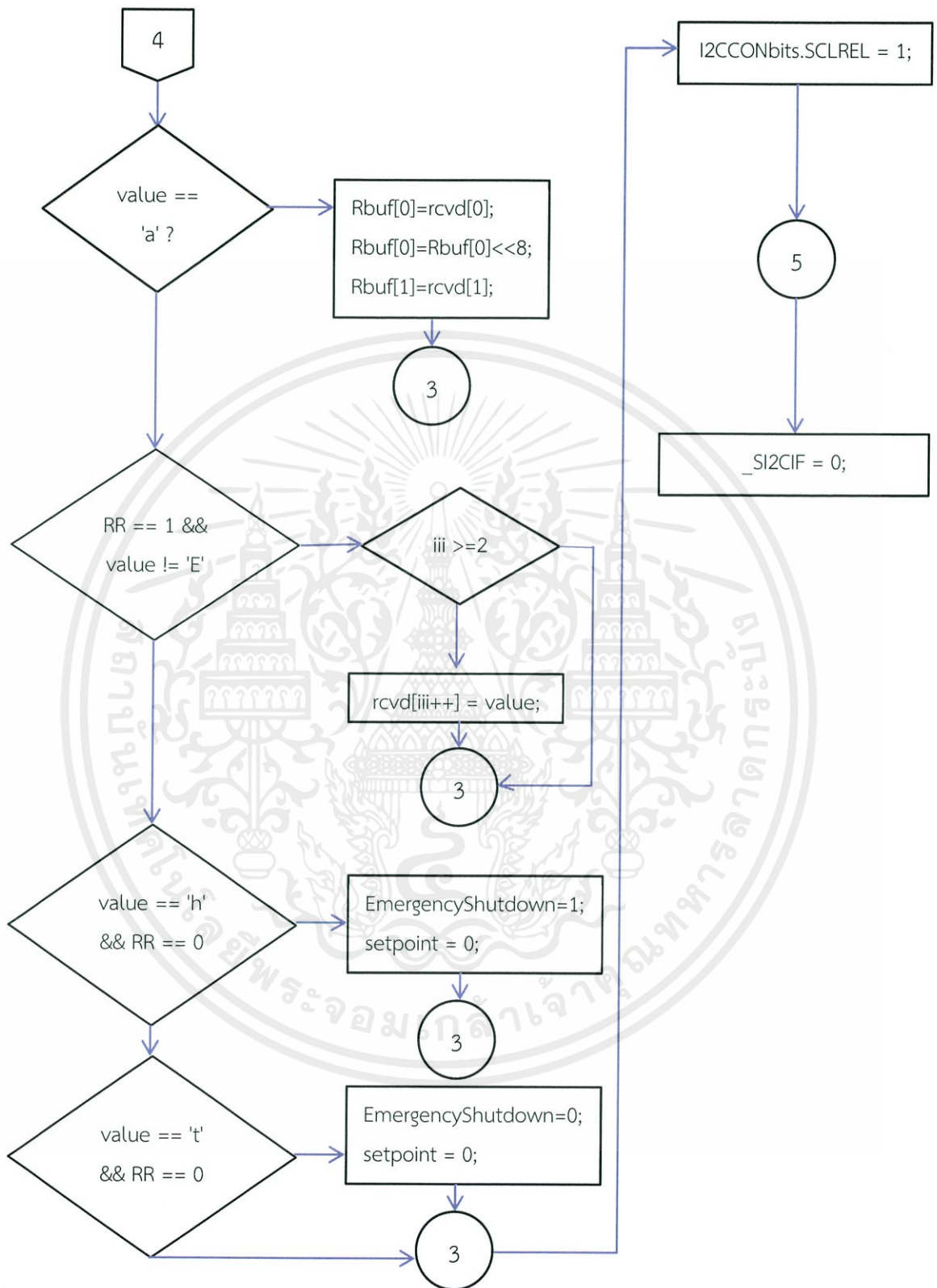


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ค.2 แผนผังฟังก์ชัน Timer2 Interrupt

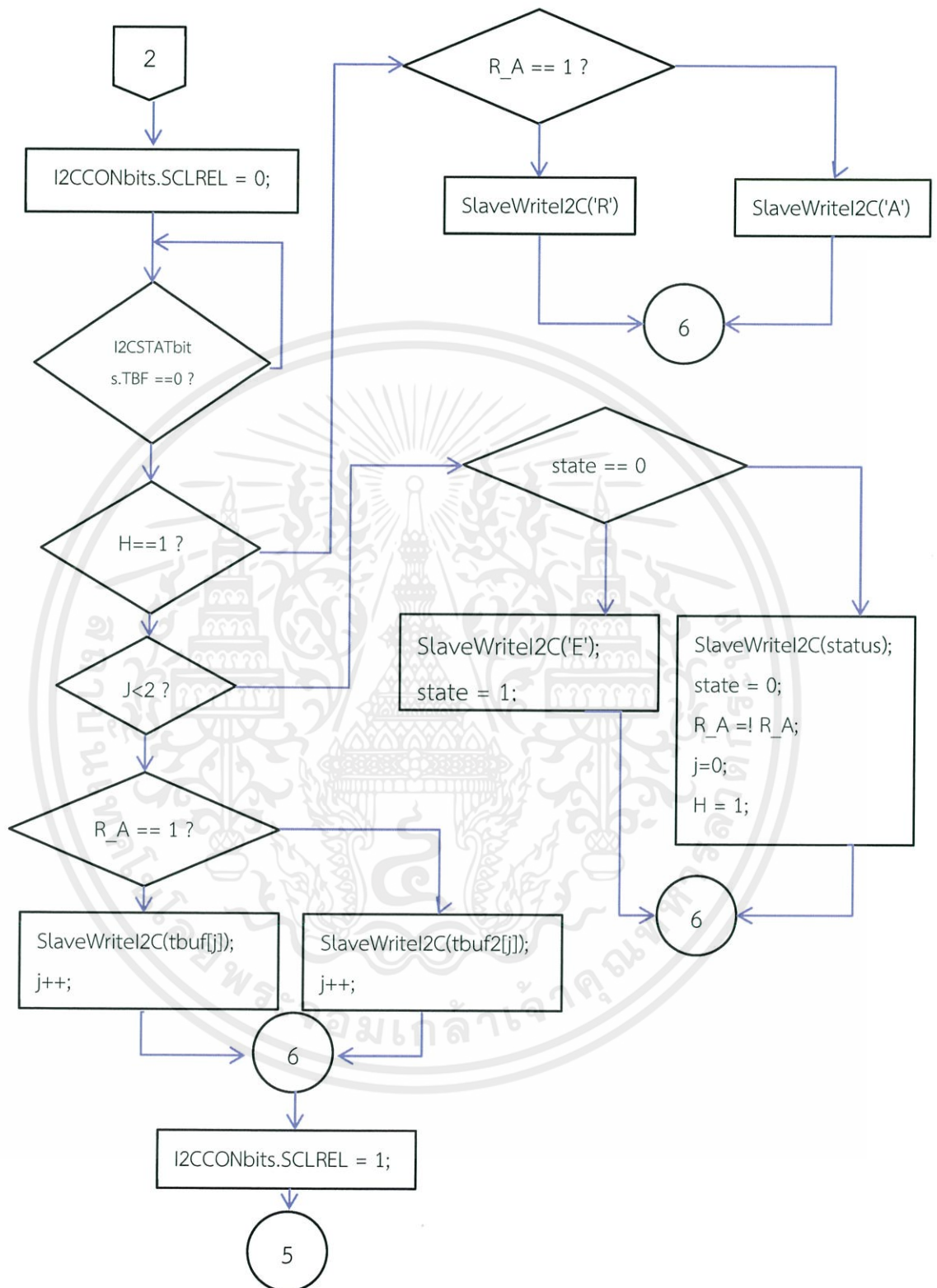


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ ค.3 แผนผังฟังก์ชัน SI2CInterrupt ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



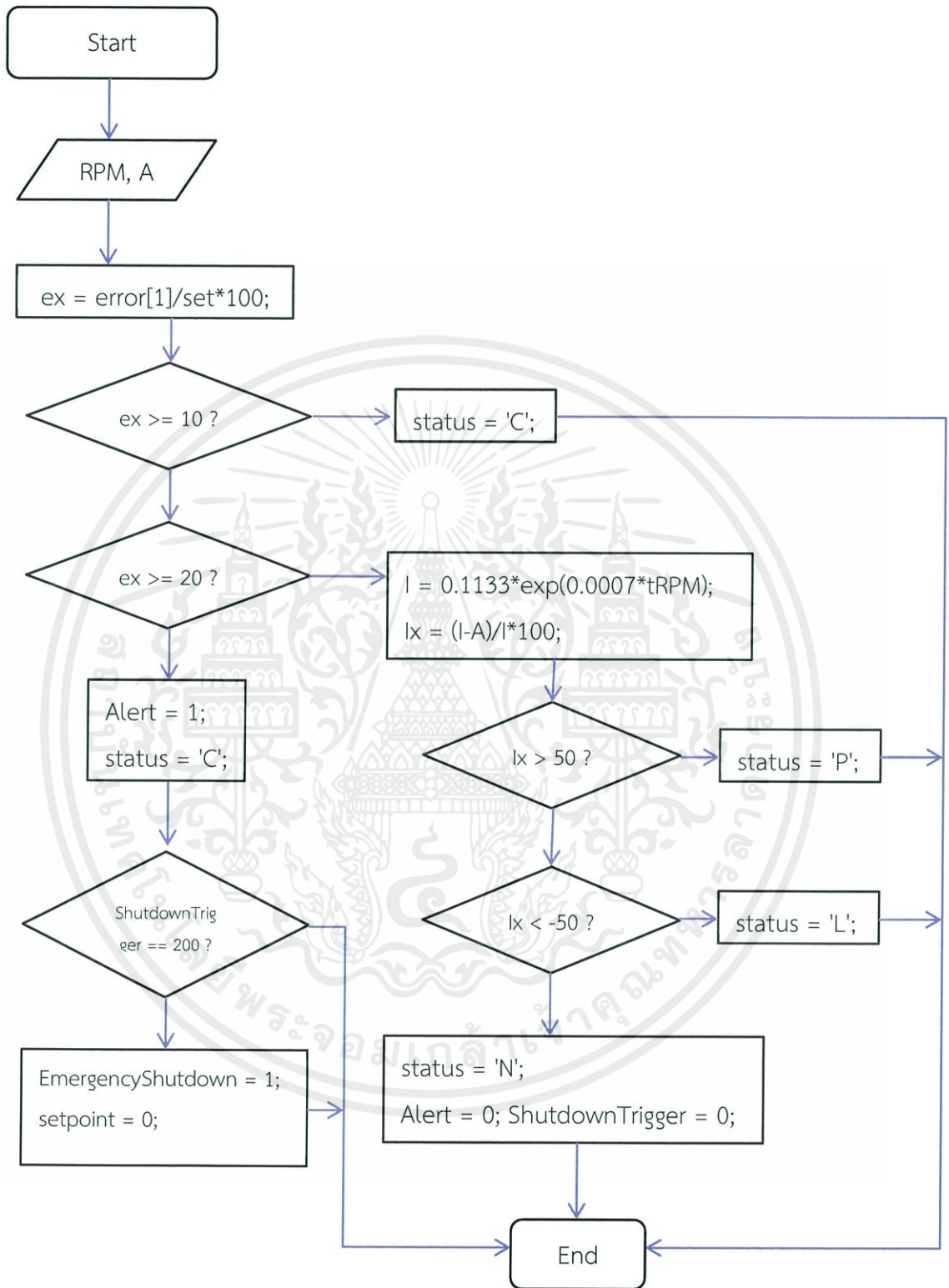
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ค.3 แผนผังฟังก์ชัน SI2CInterrupt (ต่อ)



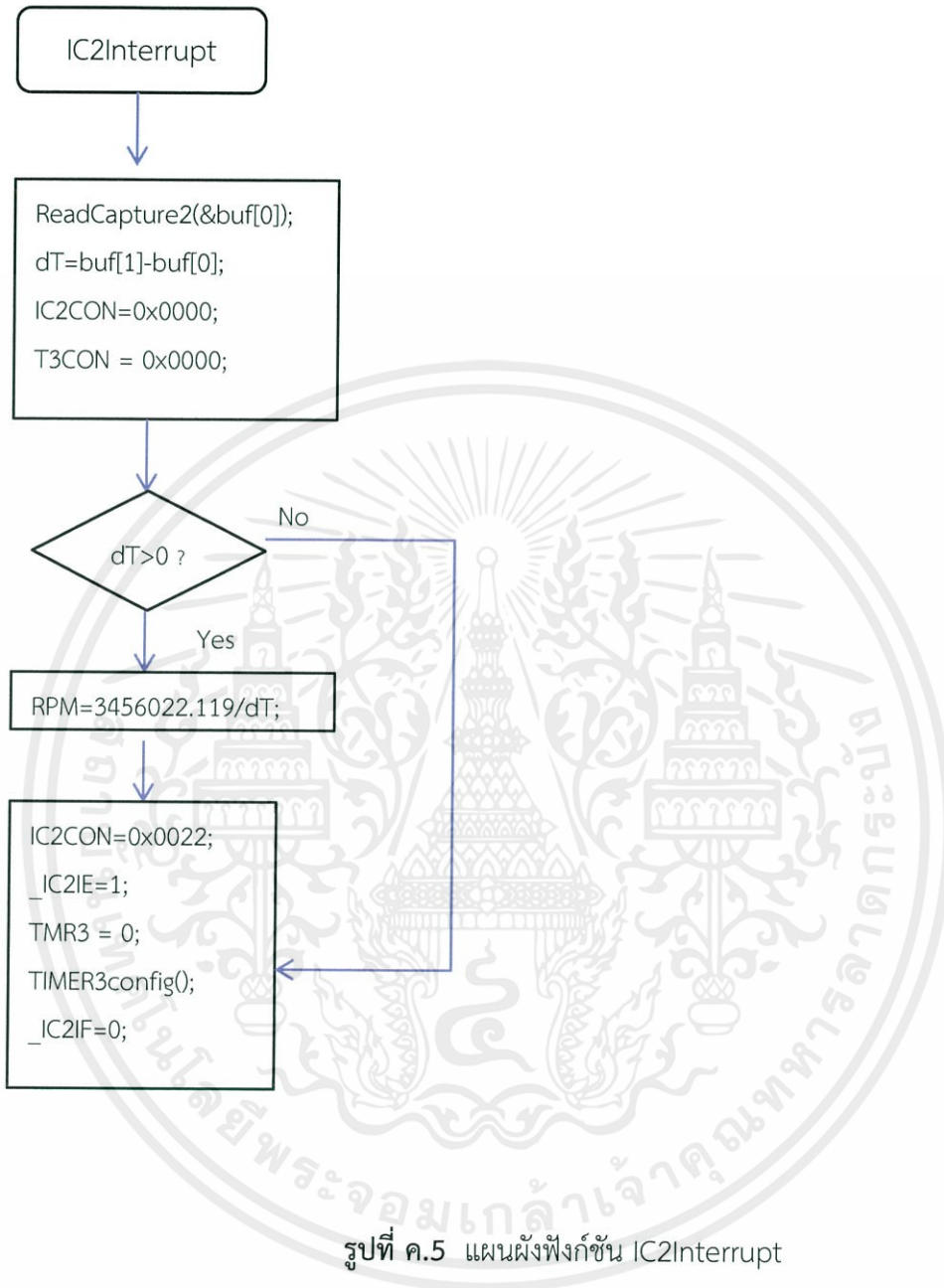
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ค.3 แผนผังฟังก์ชัน SI2CInterrupt (ต่อ)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ค.4 แผนผังฟังก์ชัน DefineStatus



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้