การปรับปรุงการสื่อสารและระบบควบคุมมอเตอร์ของอากาศยานสี่ใบพัด

ADJUST COMMUNICATION AND MOTOR CONTROL SYSTEM OF QUADROTOR

จักรพันธ์ พรมมาส

ธนภัทร สุรรัตน์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การปรับปรุงการสื่อสารและระบบควบคุมมอเตอร์ของอากาศยานสี่ใบพัด

ADJUST COMMUNICATION AND MOTOR CONTROL SYSTEM OF QUADROTOR

T144439

จักรพันธ์ พรมมาส
ธนภัทร สุรรัตน์

สจหมู
เลขทะเบียน 144439
วัน.เดือน.ปี 24 พย. 2559

.b 12818863
.i

ปริญญานิพนเล่มนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2558

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การปรับปรุงการสื่อสารและระบบควบคุมมอเตอร์ของอากาศยานสี่ใบพัด

ADJUST COMMUNICATION AND MOTOR CONTROL SYSTEM OF QUATROTOR

ผู้จัดทำ นายจักรพันธ์ พรมมาส 55010145

นายธนภัทร สุรรัตน์ 55010506

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นนทวัฒน์ จุลเดชะ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับปรุงการสื่อสารและระบบควบคุมมอเตอร์ของอากาศยานสี่ใบพัด

โดย

นายจักรพันธ์ พรมมาส 55010145
นายธนภัทร สุรรัตน์ 55010506

อาจารย์ที่ปรึกษา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นนทวัฒน์ จุลเดชะ

ปีการศึกษา 2558

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ อธิบายถึงการปรับปรุงและแก้ไขการสื่อสารและระบบควบคุมมอเตอร์ของอากาศยานสี่ใบพัด ให้สามารถทำงานได้อย่างแม่นยำ โดยแบ่งเป็นการแก้ไขปัญหาการสื่อสาร และแก้ไขปัญหาระบบควบคุมที่ถูกรบกวนของมอเตอร์ นอกจากนั้นยังได้ทำการทดสอบหาแรงบิด แรงยกของมอเตอร์ การทดสอบความแม่นยำในการอ่านค่าความเร็วรอบของเซนเซอร์และความเร็วในการตอบสนองต่อคำสั่งรอบมอเตอร์

ขั้นตอนการดำเนินการเริ่มจากศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง วิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นหาแนวทางแก้ไข และทำการทดสอบเพื่อบันทึกผล จากนั้นนำผลที่ได้มาวิเคราะห์และแก้ไขจนกระทั่งผลของการทดลองเป็นไปตามที่ออกแบบไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ADJUST COMMUNICATION AND MOTOR CONTROL SYSTEM OF QUADROTOR

By

Mr.Chakkapan Prommas 55010145

Mr.Thanapat Surarat 55010506

Advisor

Asst.Prof. Dr.Nontawat Chuladaycha

Academic Year 2015

ABSTRACT

This thesis describes revising communication and developing motor control system of quad rotor to be precisely functional. Resolving process divided in two part. program of communication and troubleshooting control system disturbed problem.

Furthermore, testing and verifying properties of system, that are Torque, Thrust, accuracy of sensor, and step respond of each motors, to confirm stability of system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นนทวัฒน์ จุลเดชะ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำที่ดีมาโดยตลอดตั้งแต่ต้น กลุ่มผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง

ขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้กำลังใจ สนับสนุนอุปกรณ์ที่ขาดเหลือ กระตุ้นเตือน รวมทั้งคอยถามไถ่ความคืบหน้าของโครงการอยู่อย่างสม่ำเสมอ

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัว ที่คอยเป็นกำลังใจที่ดีให้ตลอดมา รวมถึงการสนับสนุนเรื่องของงบประมาณที่ขาดเหลือ ตลอดจนแรงบันดาลใจที่ดีที่สุดที่ทำให้โครงการสำเร็จสมบูรณ์ลงได้ด้วยดี

ผู้จัดทำ
นายจักรพันธ์ พรมมาส
นายธนภัทร สุรรัตน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.	1
1.3 ขั้นตอนการศึกษาและจัดทำโครงงาน	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ขอบเขตของการศึกษา	2
บทที่ 2 การปรับปรุงการสื่อสารและระบบควบคุมมอเตอร์ของอากาศยานสี่พัด	3
2.1 บทนำ	3
2.2 การติดต่อกับอุปกรณ์โดย Protocol แบบ I2C	4
2.3 มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน	5
2.4 ชุดขับมอเตอร์	7
2.5 การวัดความเร็วรอบของมอเตอร์	9
2.6 การวัดกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์	9
2.7 ตัวควบคุมแบบพีไอ	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การปรับปรุงและพัฒนา	13
3.1 การติดต่อสื่อสารกับบอร์ดควบคุมกลาง	13
3.2 การออกแบบบอร์ดควบคุมมอเตอร์	14
3.3 การออกแบบโปรแกรมของระบบควบคุมมอเตอร์	16
3.4 การออกแบบเครื่องวัดแรงยกของมอเตอร์	16
3.5 การคำนวณแรงบิดของมอเตอร์	17
3.6 การออกแบบโปรแกรมรับ-ส่งข้อมูล	18
บทที่ 4 ผลการทดลอง	19
4.1 การส่งข้อมูลจากบอร์ดควบคุมกลางกับบอร์ดควบคุมมอเตอร์	19
4.2 การส่งข้อมูลจากบอร์ดทดลองที่ 1 (Arduino) กับบอร์ดทดลองที่ 2 (Arduino)	20
4.3 การส่งข้อมูลจากบอร์ดทดลองที่ 1 (Arduino) กับบอร์ดทดลองที่ 2 (dsPIC)	21
4.4 การทดลองระบบเช็คการสื่อสารระหว่างบอร์ดที่ขาดหาย	23
4.5 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงยกของมอเตอร์	24
4.6 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงบิดของมอเตอร์	26
4.7 ทดลองค่า Time Constant ของระบบควบคุมของมอเตอร์	27
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	29
5.1 บทสรุปการดำเนินงาน	29
5.2 ปัญหาที่พบการดำเนินงาน	29
5.3 แนวทางพัฒนาโครงงาน	30
เอกสารอ้างอิง	31
ภาคผนวก	32
ภาคผนวก ก	33
ภาคผนวก ข	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	Block Diagram ของระบบควบคุมมอเตอร์	4
2.2	การติดต่อกับอุปกรณ์โดยใช้ Protocol แบบ I2C	4
2.3	การรับ-ส่งข้อมูลแบบ I2C BUS MCU	5
2.4	โครงสร้างของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	6
2.5	ส่วนประกอบของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	6
2.6	ตัวขับมอเตอร์	7
2.7	สัญญาณขับมอเตอร์	7
2.8	แผงผังวงจรตัวขับมอเตอร์	8
2.9	ลำดับการทำงานของ MOSFET	8
2.10	เซนเซอร์ชนิด Photomicrosensor (Reflective)	9
2.11	แผนภาพบล็อกควบคุม PI	10
2.12	กราฟสัญญาณเอาต์พุตต่อเวลา Kp กำหนดเป็น 3 ค่า	11
2.13	กราฟสัญญาณเอาต์พุตต่อเวลา K_i กำหนดเป็น 3 ค่า	12
3.1	การรับ-ส่งข้อมูล Timing Diagram แบบ I2C	13
3.2	แผงผังวงจรบอร์ดควบคุมมอเตอร์	14
3.3	แบบบอร์ดควบคุมมอเตอร์	15
3.4	ตำแหน่งอุปกรณ์บนบอร์ดควบคุมมอเตอร์	15
3.5	แบบร่างเครื่องวัดแรงยก	16
3.6	การต่อวัตต์มิเตอร์ 1 เฟส 2 ตัว วัดกำลังไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส	17
3.7	Flow Chart การตรวจสอบข้อผิดพลาดของการสื่อสาร	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ผลการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างบอร์ดควบคุมกลางกับบอร์ดควบคุมมอเตอร์	19
4.2 บอร์ดควบคุมกลาง (Arduino) กับบอร์ดควบคุมมอเตอร์ (dsPIC)	20
4.3 ผลการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างบอร์ดทดลอง (Arduino) กับบอร์ดทดลอง (Arduino)	21
4.4 บอร์ดทดลอง (Arduino) กับบอร์ดทดลอง (Arduino)	21
4.5 ผลการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างบอร์ดทดลอง (Arduino) กับบอร์ดทดลอง (dsPIC)	22
4.6 บอร์ดทดลอง (Arduino) กับบอร์ดทดลอง (dsPIC)	22
4.7 โปรแกรมแสดงการตรวจสอบการขาดการติดต่อ	23
4.8 เครื่องวัดแรงยก	24
4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงยกของมอเตอร์ทั้ง 5 ตัว	25
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงบิดของมอเตอร์	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงยกของมอเตอร์ทั้ง 5 ตัว	25
4.2 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงบิดของมอเตอร์ทั้ง 5 ตัว	26
4.3 ผลการทดลองค่าคงตัวเวลาของมอเตอร์ตัวที่ 1 ที่ความเร็วรอบ 5000 RPM	27
4.4 ผลการทดลองค่าคงตัวเวลาของมอเตอร์ตัวที่ 2 ที่ความเร็วรอบ 5000 RPM	27
4.5 ผลการทดลองค่าคงตัวเวลาของมอเตอร์ตัวที่ 3 ที่ความเร็วรอบ 5000 RPM	27
4.6 ผลการทดลองค่าคงตัวเวลาของมอเตอร์ตัวที่ 4 ที่ความเร็วรอบ 5000 RPM	27
4.7 ผลการทดลองค่าคงตัวเวลาของมอเตอร์ตัวที่ 5 ที่ความเร็วรอบ 5000 RPM	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน

อากาศยานไร้คนขับ Unmanned Aerial Vehicle (UAV) หรือ UAV เป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดความเสี่ยงในการปฏิบัติหน้าที่ในการสำรวจและตรวจสอบในพื้นที่อุตสาหกรรม ลดการสูญเสียของเวลา และลดงบประมาณในส่วนของค่าใช้จ่าย เนื่องจากการปิดการทำงานของระบบการผลิตในบริเวณที่สำรวจและตรวจสอบ เพราะ UAV ถูกสั่งการและควบคุมจากระยะไกล โอกาสที่จะเกิดอุบัติเหตุ และการสูญเสียเวลา รายได้ โดยไม่จำเป็นก็จะลดลงไปได้อย่างมาก ทั้งนี้หนึ่งในทางออกของการแก้ปัญหาดังกล่าวก็คือ อากาศยานไร้คนขับ โดย UAV ที่ใช้ในการปฏิบัติหน้าที่ต้องมีความเสถียรภาพในการทำงานอย่างดีเยี่ยมที่สุดและง่ายต่อการเรียนรู้ที่จะควบคุมอุปกรณ์ให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในระหว่างการทำงาน

ในปีการศึกษาที่ผ่านมาการพัฒนาอากาศยานไร้คนขับชนิดคอปเตอร์สี่ใบพัดหรือควอทโรเตอร์ (Quad Rotor) มีประสิทธิในการทำงานยังไม่เป็นที่น่าพอใจทางกลุ่มจึงได้เลือกที่จะเข้ามาศึกษาและดำเนินการแก้ไข โดยส่วนที่เลือกคือการสื่อสารระหว่างบอร์ดในรูปแบบ I2C และระบบควบคุมมอเตอร์ของอากาศยานไร้คนขับชนิดสี่ใบพัด

1.2 วัตถุประสงค์ในการทำปริญญานิพนธ์

1. ศึกษา ทดสอบระบุปัญหาพร้อมวิธีแก้ไขที่เกิดขึ้นในการสื่อสารระหว่างบอร์ดที่ศึกษาไว้
2. ศึกษา ทดสอบระบุปัญหาพร้อมวิธีแก้ไขที่เกิดขึ้นในระบบควบคุมมอเตอร์ที่ศึกษาไว้
3. พัฒนาและแก้โปรแกรมสื่อสารระหว่างบอร์ดของอากาศยานสี่ใบพัด
4. พัฒนาและแก้โปรแกรมควบคุมมอเตอร์ของอากาศยานสี่ใบพัด
5. ออกแบบอุปกรณ์เสริมที่ช่วยให้อุปกรณ์อ่านสัญญาณและส่งข้อมูลอย่างถูกต้อง
6. ออกแบบอุปกรณ์เสริมที่ช่วยให้ควบคุมมอเตอร์ได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขั้นตอนการศึกษาและจัดทำโครงงาน

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสื่อสารระหว่างบอร์ด การควบคุมมอเตอร์ และการทำหน้าที่ของโปรแกรมที่มีการออกแบบไว้ก่อนหน้า
2. ศึกษาการทำงานของการสื่อสารรูปแบบ
3. ศึกษาการทำงานของโปรแกรมควบคุมมอเตอร์
4. ศึกษาปัญหาของการติดต่อสื่อสารระหว่างบอร์ด ปัญหาระบบการควบคุมมอเตอร์เดิม และทำการดำเนินการแก้ไข
5. ทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ แรงยก แรงบิด และกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ใช้เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับกลุ่มที่จะเข้ามาศึกษาการควบคุมการบินของอากาศยานสี่ใบพัด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน
2. มีความรู้ความเข้าใจในการสื่อสารข้อมูลด้วยสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์
3. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีคอนโทรลโดยการใช้ควบคุมระบบพีไอ
4. มีความรู้เกี่ยวกับการวัด ออกแบบการทดลองและสร้างอุปกรณ์การวัด
5. มีความรู้ความเข้าใจในการเขียนไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล Arduino และ dsPIC
6. มีทักษะในการคิดแบบเป็นลำดับขั้นตอน และการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดเพื่อหาสาเหตุได้

1.5 ขอบเขตการศึกษา

ทำการศึกษาค้นคว้าการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ ของอากาศยานสี่ใบพัด เพื่อที่จะเรียนรู้และมุ่งเน้นที่การแก้ปัญหาการสื่อสารระหว่างการสื่อสารระหว่างบอร์ด แก้ไขปัญหาระบบควบคุมมอเตอร์ของอากาศยานสี่ใบพัดที่พบปัญหาในปีการศึกษาที่ผ่านมาเป็นสำคัญ เพื่อให้ได้การควบคุมการทำงานที่มีเสถียรภาพของมอเตอร์อากาศยานสี่ใบพัด การสื่อสารรับส่งข้อมูลระหว่างบอร์ดทำงานได้ถูกต้องและมีประสิทธิภาพ การตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆ ของมอเตอร์ทั้งห้าตัว รวมถึงพัฒนาโปรแกรมคำสั่งการทำงานในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ เพื่อต่อยอดและนำไปใช้ในกับการบินของอากาศยานสี่ใบพัดต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

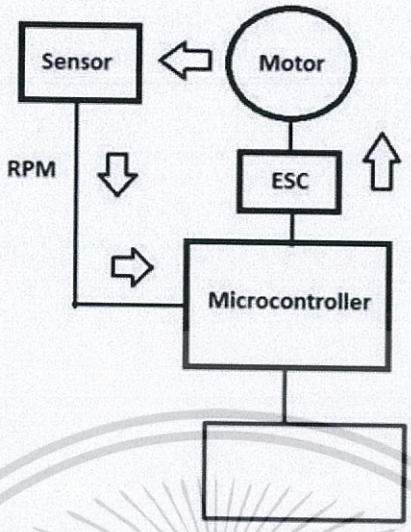
การรับ-ส่งข้อมูลเพื่อการสื่อสารและสั่งการระหว่างบอร์ดควบคุมกลางกับบอร์ดควบคุมมอเตอร์ ใช้ Protocol ในรูปแบบ I2C เพื่อเชื่อมต่อและรับ-ส่งข้อมูลกับหลายอุปกรณ์ในเวลาเดียวกัน

ระบบควบคุมมอเตอร์มีหน้าที่คือ ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้ได้ตามค่าที่ต้องการอุปกรณ์ในระบบควบคุมมอเตอร์ประกอบไปด้วยมอเตอร์ไร้แปรงถ่าน ตัวขับมอเตอร์ (Electronic Speed Controller) ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)เซนเซอร์วัดรอบและเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า ความสามารถของระบบควบคุมมอเตอร์ ได้แก่

- วัดความเร็วรอบของมอเตอร์
- วัดกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์
- ตรวจสอบสถานะใบพัดและมอเตอร์
- รับส่งข้อมูลจากบอร์ดควบคุมกลาง

หลักการทางานของระบบควบคุมมอเตอร์คือ เมื่อมอเตอร์ได้รับคำสั่งที่เป็นค่าความเร็วรอบหน่วยเป็นรอบต่อนาที จากบอร์ดควบคุมกลางไมโครคอนโทรลเลอร์จะสร้างสัญญาณสี่เหลี่ยมส่งไปควบคุมตัวขับมอเตอร์ ตัวขับมอเตอร์จะทำหน้าที่สร้างสนามแม่เหล็กและหมุนไปรอบ ทำให้มอเตอร์เกิดการหมุนตามสนามแม่เหล็ก จากนั้นตัวเซนเซอร์วัดความเร็วรอบและกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์จะทำการเก็บค่า และส่งกลับไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการคำนวณเป็นค่าความเร็วรอบและกระแสไฟฟ้า และนำค่าที่ได้ไปใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้ได้ตามที่ได้รับคำสั่ง นอกจากนี้ค่าความเร็วรอบและกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์สามารถนำมาตรวจสอบสถานะของใบพัดและมอเตอร์ จากนั้นจึงทำการแจ้งกลับไปยังบอร์ดควบคุมกลาง ดังรูปที่ 2.1

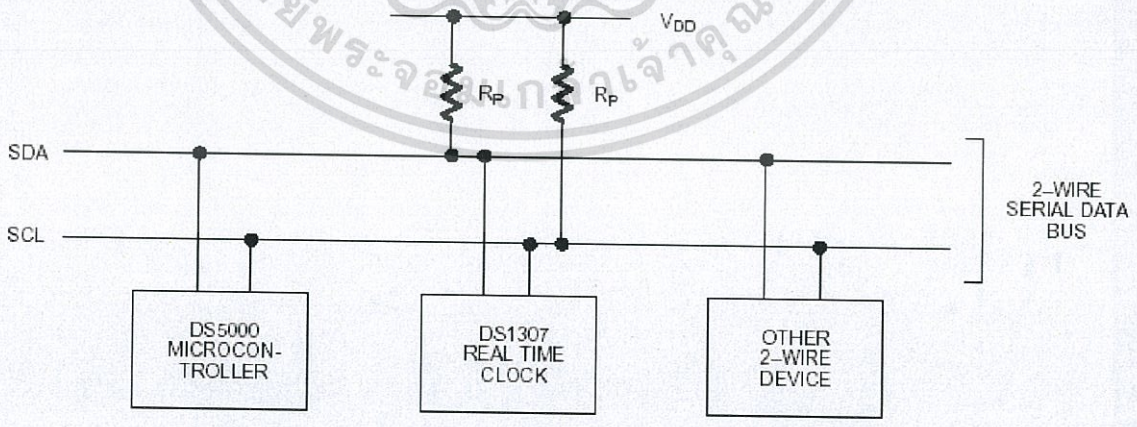
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 Block Diagram ของระบบควบคุมมอเตอร์

2.2 การติดต่อกับอุปกรณ์โดยใช้ Protocol แบบ I2C

การสื่อสารผ่านบัส I2C เป็นการสื่อสารแบบ Synchronous & Serial (หมายถึง การส่งข้อมูลทีละบิต และใช้สัญญาณ Clock ในการกำหนดจังหวะการส่งข้อมูล) I2C คือ ใช้สายสัญญาณเพียง 2 เส้น คือ SCL (สายสัญญาณ Serial Clock), SDA (สายสัญญาณข้อมูล Serial Data) และเป็นสัญญาณแบบ 2 ทิศทาง (Bidirectional) มีวงจรภายในสำหรับ I/O แบบ Open-Drain/Open-Collector (เวลาใช้งานต้องมีตัวต้านทานแบบ Pull-up Resistors ต่ออยู่ด้วย) ดังรูปที่ 2.2

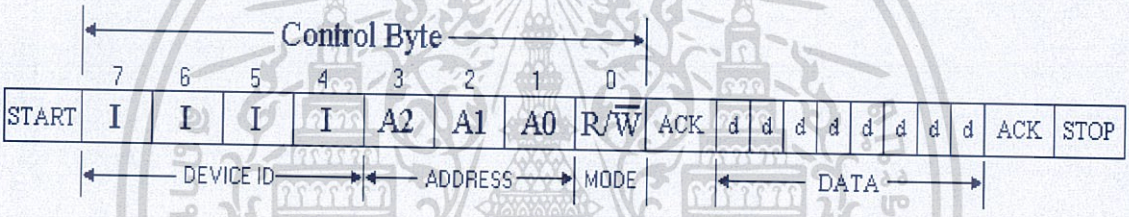


รูปที่ 2.2 การติดต่อกับอุปกรณ์โดยใช้ Protocol แบบ I2C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บัส I2C สามารถพ่วงอุปกรณ์ได้หลายอุปกรณ์ แต่ละอุปกรณ์จะมีหมายเลขที่อยู่ (Device Address) ที่ต้องไม่ซ้ำกัน โดยทั่วไปจะใช้หมายเลขที่อยู่ขนาด 7 บิต (7-bit Device Address) ซึ่งระบุได้ถึง 128 อุปกรณ์ หรือถ้ามีมากกว่านั้น จะเป็น 10 บิต (10-bit Device Address)

การรับ-ส่งข้อมูลแบบ I2C BUS MCU จะเริ่มต้นการส่งข้อมูลด้วยการส่งสถานะเริ่มต้น (START Conditions) เพื่อแสดงการขอใช้บัส แล้วตามด้วยรหัสควบคุม (Control Byte) ประกอบด้วยรหัสประจำตัวอุปกรณ์ Device ID, Device Address และ Mode ในการเขียนหรืออ่านข้อมูลเมื่ออุปกรณ์ รับทราบว่า MCU ต้องการจะติดต่อด้วยก็ต้องส่งสถานะรับรู้ (Acknowledge) หรือแจ้ง MCU รับรู้ว่าข้อมูลที่ได้ส่งมามีความถูกต้อง และเมื่อสิ้นสุดการส่งข้อมูล MCU จะต้องส่งสถานะสิ้นสุด (STOP Conditions) เพื่อบอกกับอุปกรณ์ว่าหยุดหรือสิ้นสุดการใช้บัส ดังรูปที่ 2.3

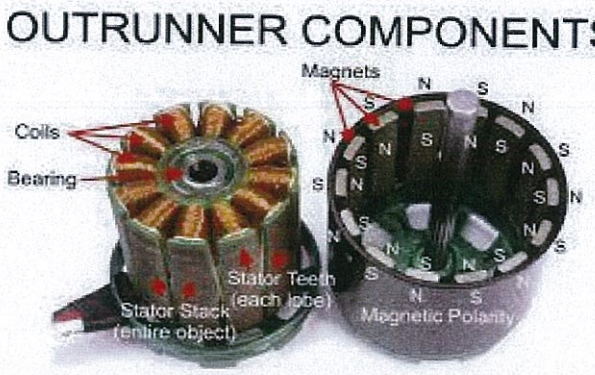


รูปที่ 2.3 การรับ-ส่งข้อมูลแบบ I2C BUS MCU

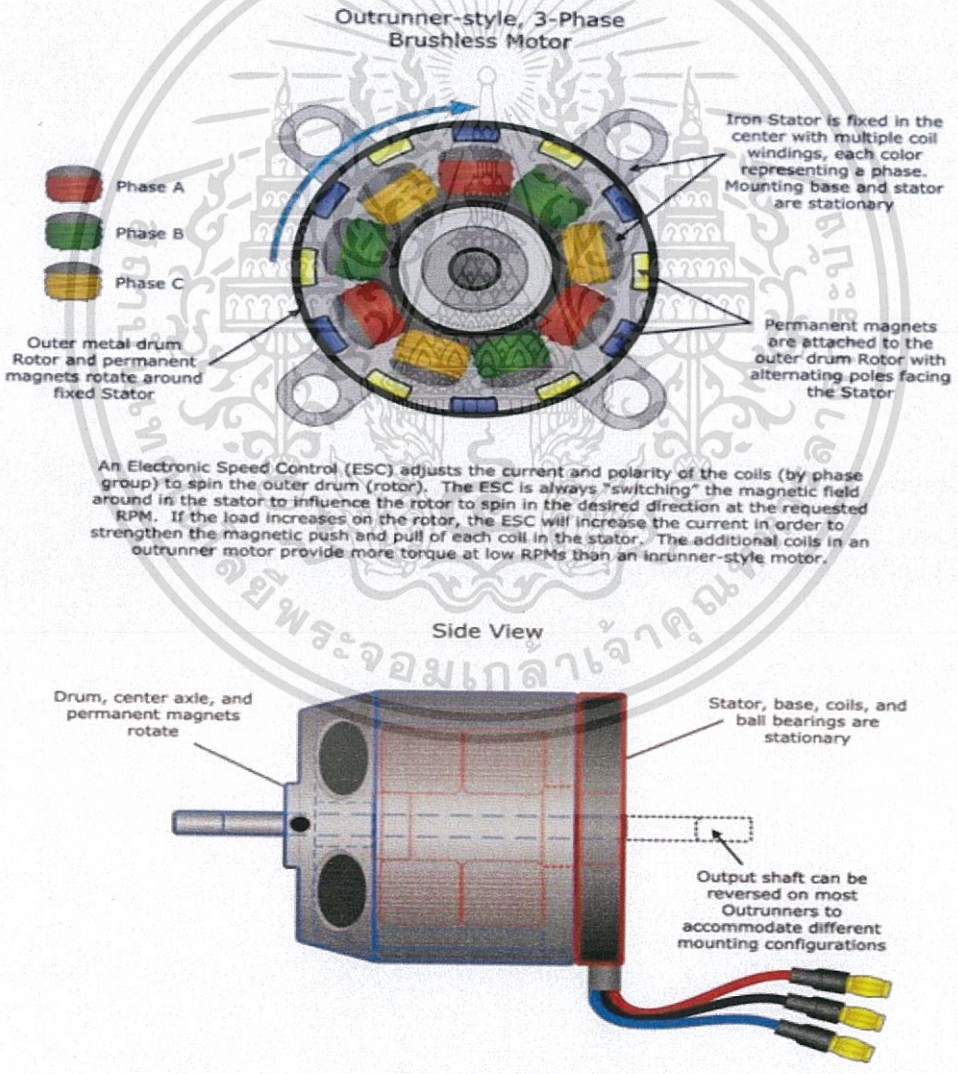
2.3 มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor)

โครงสร้างของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ชนิด 3 เฟส ซึ่งประกอบด้วยที่สเตเตอร์(Stator) มีขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature Coil) จำนวน 3 ชุด โดยได้รับการกระตุ้นจากวงจรขับเคลื่อนอิเล็กทรอนิกส์และมีสัญญาณตรวจจับตำแหน่งอยู่ที่เพลา ซึ่งโครงสร้างของมอเตอร์แบบไร้แปรงถ่านมีลักษณะคล้ายกันกับของมอเตอร์ซิงโครนัส จำนวนขั้วแม่เหล็กของขดลวดอาร์เมเจอร์ ที่สเตเตอร์จะถูกกำหนดตามจำนวนขั้วของแม่เหล็กถาวรของโรเตอร์ คุณลักษณะของแรงบิดและความเร็วรอบที่ได้ เกิดจากการควบคุมขนาดกระแสของขดลวดอาร์เมเจอร์และเวลาในการสวิตช์ของชุดควบคุมอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมอเตอร์ชนิดนี้จะให้ความเร็วรอบที่คงที่ เมื่อเปรียบเทียบกับแรงบิดที่เปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



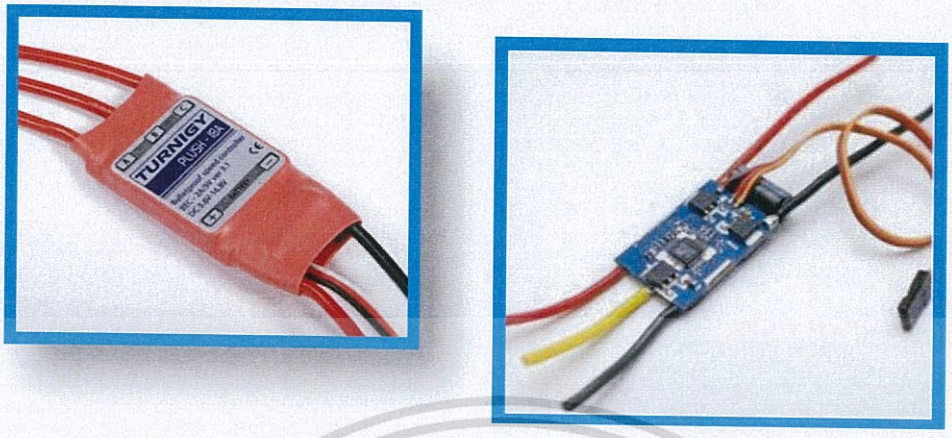
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

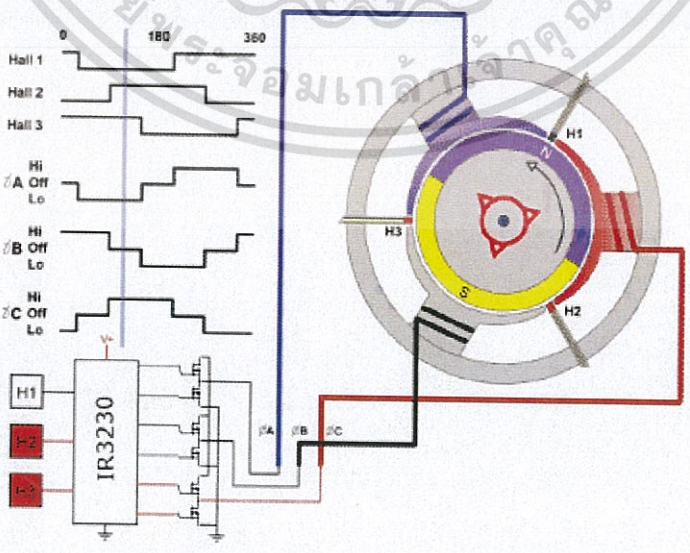
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ชุดขับมอเตอร์ (Electronic Speed Controller : ESC)



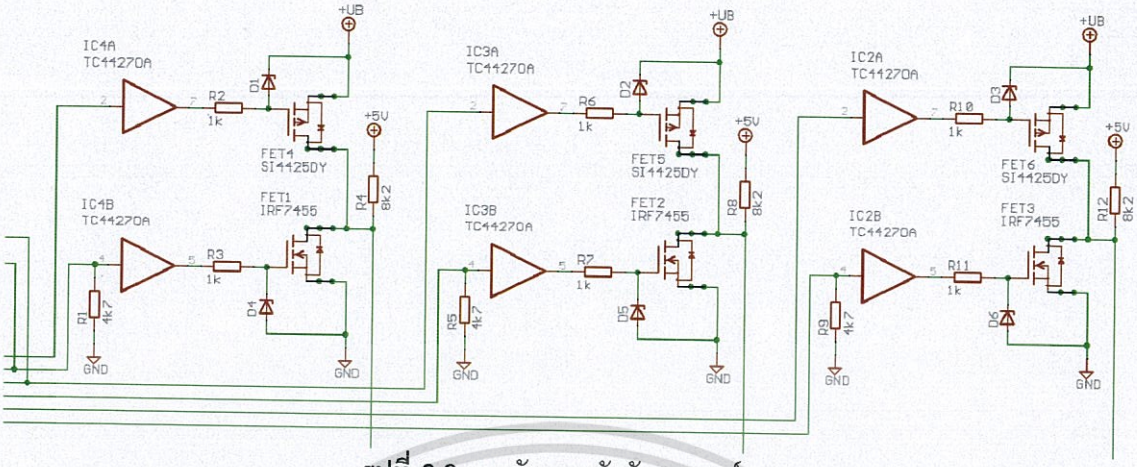
รูปที่ 2.6 ตัวขับมอเตอร์

ESC (Electronic Speed Control) ทำหน้าที่ ควบคุมความเร็วมอเตอร์ประกอบด้วย MOSFET 6 ตัว ไดโอดต่อขนานกับ MOSFET ทำหน้าที่ป้องกันแรงดันกลับ (Reverse Voltage) ที่เกิดจากความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์เมื่อมีการสับเปลี่ยนกระแส (Commutation) ในขดลวดตัววัดตำแหน่งของโรเตอร์ H1, H2, H3 จะส่งสัญญาณไปยังตัวถอดรหัส ดังรูปที่ 2.7 และตัวขับเกต (Sensor Decoder and Gate Drivers) MOSFET จึงทำการตัด-ต่อวงจรตามลำดับ โดยมีความถี่เท่ากับความเร็วของโรเตอร์ตลอดเวลาสนามแม่เหล็กของสเตเตอร์และของโรเตอร์จึงมีความเร็วเท่ากันตลอดเวลาที่ทุกความเร็วของโรเตอร์ระยะเวลานำกระแสของ MOSFET จะเป็นตัวกำหนดขนาดของแรงบิดของมอเตอร์

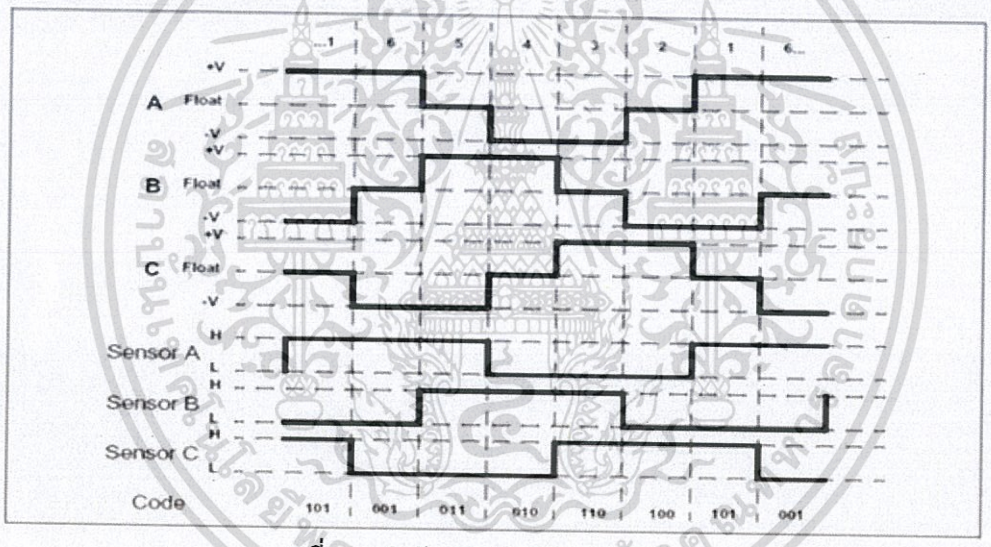


รูปที่ 2.7 สัญญาณขับมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แผงผังวงจรตัวขับมอเตอร์



รูปที่ 2.9 ลำดับการทำงานของ MOSFET

การควบคุมชุดขับมอเตอร์ ทำโดยการจ่ายสัญญาณสี่เหลี่ยมโดยสัญญาณสี่เหลี่ยมมีความกว้างอยู่ในช่วง 0.5-2.0ms ความเร็วของมอเตอร์จะปรับเปลี่ยนไปตามความกว้างของสัญญาณ สี่เหลี่ยมที่ป้อนให้กับชุดขับมอเตอร์ ถ้าสัญญาณสี่เหลี่ยมมีความกว้าง 2ms มอเตอร์จะหมุนที่ความเร็วสูงสุด และถ้าสัญญาณสี่เหลี่ยมมีความกว้าง 0.5ms มอเตอร์จะหยุดหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การวัดความเร็วรอบมอเตอร์

การวัดความเร็วรอบ (rpm) ของมอเตอร์ ใช้เซนเซอร์ชนิด Photomicrosensor (Reflective) ภายในเซนเซอร์ชนิดนี้แบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นส่วนกำเนิดลาแสงอินฟราเรด ส่วนที่สองทำหน้าที่รับแสง ขณะที่ไม่มีแสงตกกระทบเอาต์พุตมีสถานะเป็น Low แต่เมื่อมีแสงตกกระทบเอาต์พุตจะเปลี่ยนสถานะเป็น High หลักการวัดความเร็วรอบมอเตอร์ จะทำการติดกระดาษสะท้อนแสงที่มอเตอร์ในตำแหน่งที่ตรงกับเซนเซอร์ เมื่อมอเตอร์หมุนกระดาษสะท้อนแสงวนผ่านเซนเซอร์ ลำแสงอินฟราเรดจะสะท้อนกับกระดาษกลับไปยังส่วนรับแสงของเซนเซอร์เมื่อแสงตกกระทบครบ 2 ครั้งหมายถึงการที่มอเตอร์เคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบ จากนั้นนำค่าผลต่างของเวลาที่แสงกระทบกับกระดาษครั้งที่หนึ่งและครั้งที่สอง มาทำการคำนวณหาความเร็วรอบด้วยสมการที่ (2.1)

$$RPM = \frac{60}{\Delta t} \qquad (2.1)$$

รูปที่ 2.10 เซนเซอร์ชนิด Photomicrosensor (Reflective)

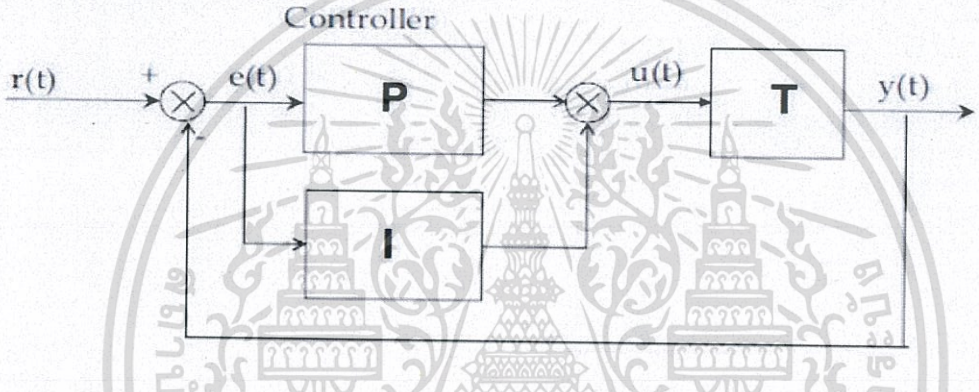
2.6 การวัดกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์

หลักการวัดกระแสไฟฟ้าจากกฎของโอห์ม เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวต้านทานค่าหนึ่งจะเกิดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นตามสมการ V = IR วงจรของเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าจึงประกอบไปด้วยตัวต้านทานกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทานต่ำและสามารถทนต่อกำลังไฟฟ้าได้สูง เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานวัดกระแสไฟฟ้ามีค่าน้อยมาก จึงต้องใช้เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้าซึ่งมีหน้าที่ในการขยายแรงดันไฟฟ้าจะได้ค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0-5 Volt เพื่อให้ใช้งานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ตัวควบคุมพีไอ (PI-Controller)

ระบบควบคุมแบบ PID เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้อย่างกว้างขวาง โดยมีหลักการคือ ตัวควบคุมจะรับสัญญาณอ้างอิง (Setpoint) และทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณป้อนกลับที่วัดจากระบบได้เป็นค่าความผิดพลาด (Error) ที่เกิดขึ้นให้เหลือน้อยที่สุด โดยการปรับสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ U(t) ให้เหมาะสม ซึ่งในการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ที่ใช้เป็นแบบ PI (PI-Controller)



รูปที่ 2.11 แผนภาพบล็อกควบคุม PI

วิธีคำนวณของพีไอ ขึ้นอยู่กับสองตัวแปรคือ ค่าสัดส่วน (P-Proportional) และปริพันธ์ (I-Integral) ค่าสัดส่วน กำหนดจากผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน, ค่าปริพนธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของผลรวมความผิดพลาดที่ซึ่งพึ่งผ่านพ้นไป ประกอบรวมตามสมการที่ (2.2)

$$U(t)=Pout + Iout \tag{2.2}$$

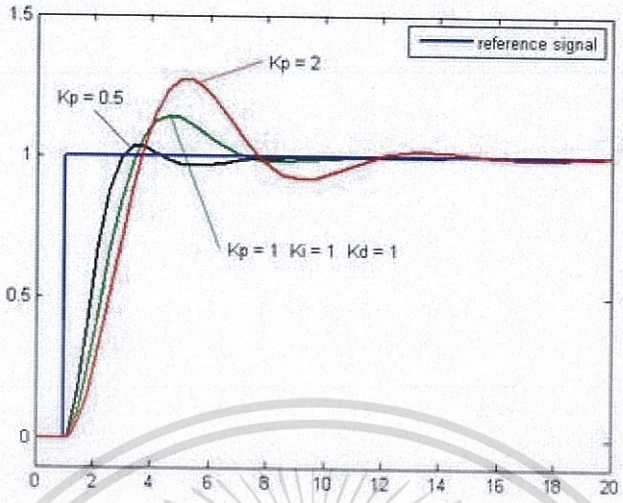
โดย

$Pout$: เทอมสัดส่วน

$Iout$: เทอมปริพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัดส่วน



รูปที่ 2.12 กราฟสัญญาณเอาต์พุตต่อเวลา **Kp** กำหนดเป็น 3 ค่า (**Ki** และ **Kd** =1)

เทอมของสัดส่วนจะเป็นไปตามสมการที่ (2.3)

$$Pout = Kp\, e(t) \tag{2.3}$$

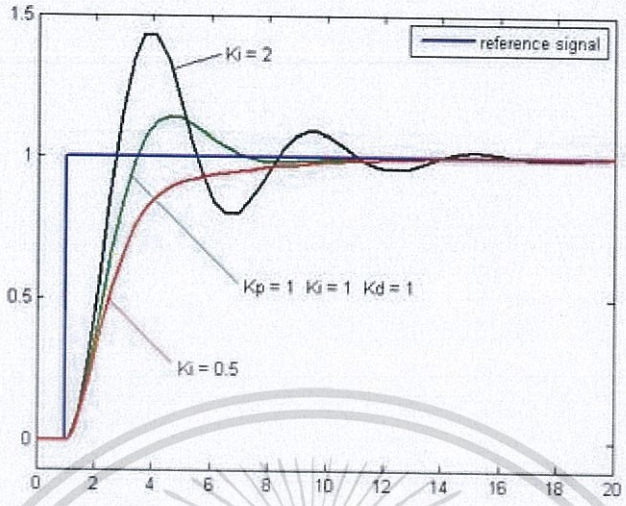
เมื่อ

$Pout$	:	สัญญาณขาออกของเทอมสัดส่วน
Kp	:	อัตราขยายสัดส่วน, ตัวแปรปรับค่าได้
e	:	ค่าความผิดพลาด
t	:	เวลา

เทอมสัดส่วนจะแปรผันตรงกับค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น หากค่าความผิดพลาดมากเทอมสัดส่วนจะมากเช่นกัน ส่งผลให้ระบบเข้าใกล้สัญญาณเร็วขึ้น แต่หากปรับค่า Kp มากเกินไป ระบบอาจไม่เสถียรได้ และนอกจากนี้หากใช้เพียงเทอมสัดส่วนเพียงอย่างเดียว หากค่าความผิดพลาดเท่ากับศูนย์จะไม่มีสัญญาณไปสั่งระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริพันธ์



รูปที่ 2.13 กราฟสัญญาณเอาต์พุตต่อเวลา K_i กำหนดเป็น 3 ค่า (Kp และ Kd =1)

เทอมของปริพันธ์จะเป็นไปตามสมการที่ (2.4)

$$Iout = Ki \int_0^t e(t)dt \tag{2.4}$$

เมื่อ

$Iout$	:	สัญญาณขาออกของเทอมปริพันธ์
Ki	:	อัตราขยายปริพันธ์, ตัวแปรปรับค่าได้
e	:	ค่าความผิดพลาด
t	:	เวลา

ผลจากเทอมปริพันธ์ เป็นสัดส่วนของขนาดความผิดพลาดและระยะเวลาของความผิดพลาดผลรวมของความผิดพลาดในทุกช่วงเวลา (ปริพันธ์ของความผิดพลาด) จะให้ออฟเซตสะสมที่ควรจะเป็นในก่อนหน้าความผิดพลาดสะสม จะถูกคูณโดยอัตราการขยายปริพันธ์

เทอมปริพันธ์ เมื่อรวมกับเทอมสัดส่วนแล้วจะเร่งกระบวนการให้เข้าสู่จุดที่ต้องการ และขจัดความผิดพลาดที่เหลืออยู่ที่เกิดจากการใช้เพียงเทอมสัดส่วน แต่อย่างไรก็ตามเทอมปริพันธ์เป็นการตอบสนองต่อความผิดพลาดสะสมในอดีต จึงอาจทำให้ระบบเกิดโอเวอร์ชูต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การปรับปรุงและการพัฒนา

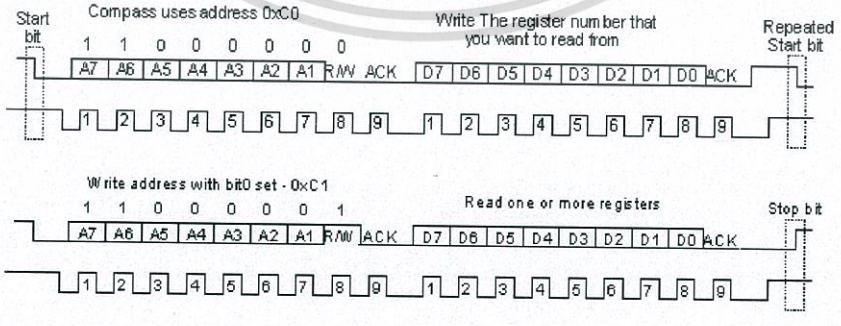
3.1 การติดต่อสื่อสารกับบอร์ดควบคุมกลาง

ในการติดต่อกับบอร์ดควบคุมกลาง (Central Control Board) จะใช้รูปแบบการสื่อแบบ I2C (Inter-IC Communication) หมายถึงการติดต่อสื่อสารระหว่างไอซีโดยบัส I2C ได้รับการพัฒนาโดย ฟิลิปส์ (Philips) ด้วยจุดมุ่งหมายหลักคือ ต้องการให้ไอซีหรือโมดูลสามารถติดต่อ สั่งงาน และควบคุมภายใต้สายสัญญาณเพียง 2 เส้น คือ สายสัญญาณนาฬิกาที่ใช้กำหนดจังหวะการทำงาน การต่อร่วมกันของอุปกรณ์บนบัส I2C ทำได้ง่ายมากเพียงต่อสายข้อมูลและสายสัญญาณนาฬิกาของอุปกรณ์แต่ละตัวขนานหรือพ่วงกันไป ส่วนการกำหนดแอดเดรสหรือตำแหน่งสำหรับติดต่ออุปกรณ์แต่ละตัวจะใช้รหัสข้อมูลและการกำหนดสภาวะโลจิกที่ขาแอดเดรสของอุปกรณ์แต่ละตัว

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

ข้อดีของ I2C

- ใช้จำนวนสายน้อยแต่สามารถต่อกับอุปกรณ์หลายตัวได้
- สามารถป้องกันสัญญาณรบกวนได้
- ความเร็วในการส่งสูงถึง 100 กิโลบิตต่อวินาทีในโหมดปกติและสูงถึง 400 กิโลบิตต่อวินาทีในโหมดความเร็วสูง

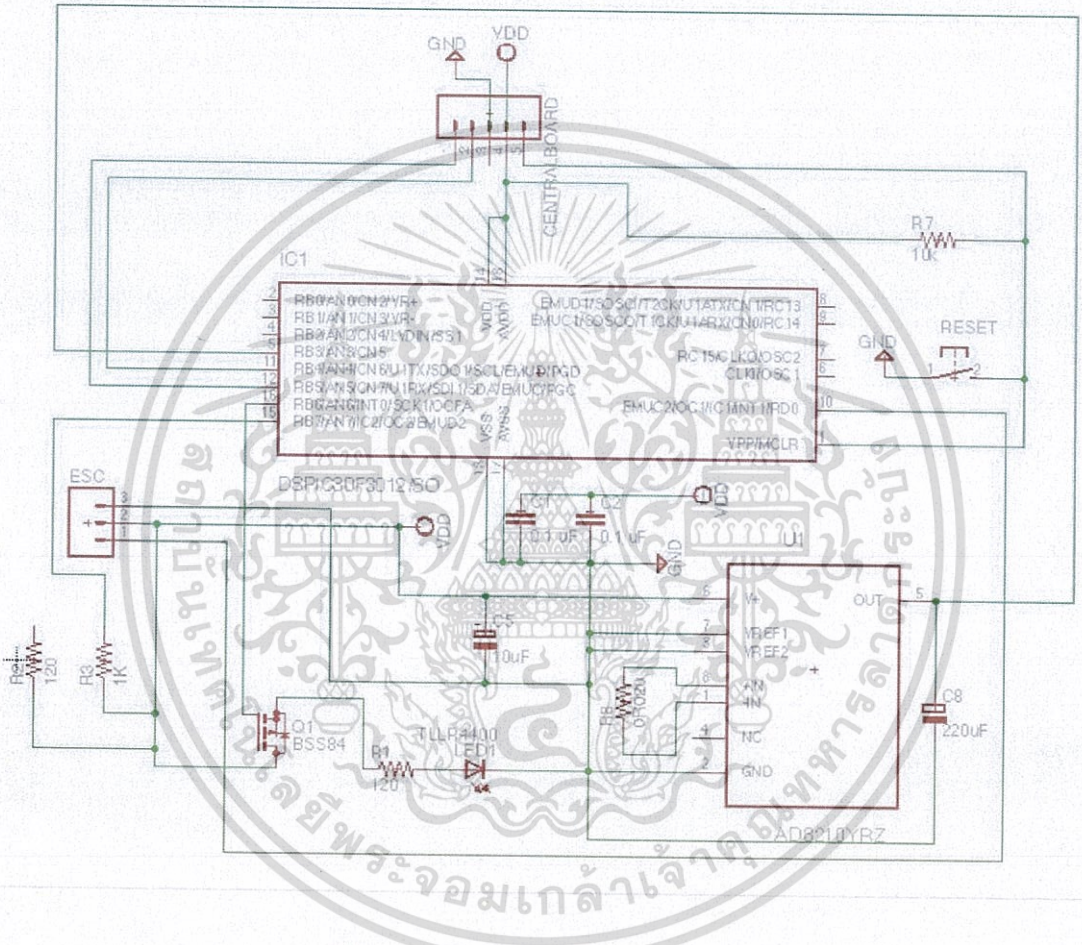


รูปที่ 3.1 การรับ-ส่งข้อมูล Timing Diagram แบบ I2C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

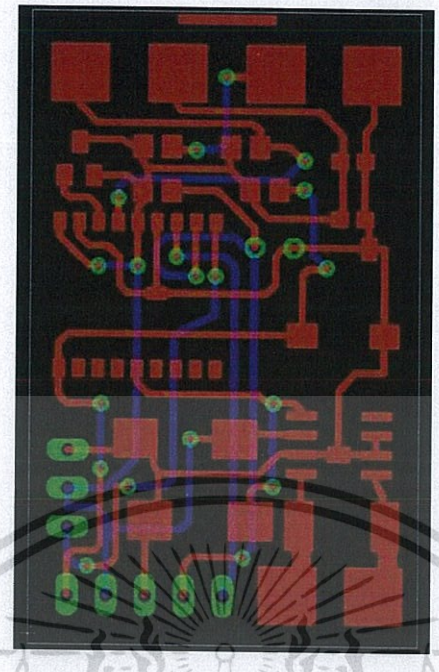
3.2 การออกแบบบอร์ดควบคุมมอเตอร์

ทำการปรับปรุงบอร์ดควบคุมมอเตอร์ให้ได้ตามที่ต้องการคือ บอร์ดมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบาและทำการจัดวางอุปกรณ์ในรูปแบบใหม่เพื่อง่ายต่อการเดินสายไฟภายนอก การเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกและเป็นการแก้ปัญหาโดยใช้โปรแกรม PIC Kid3

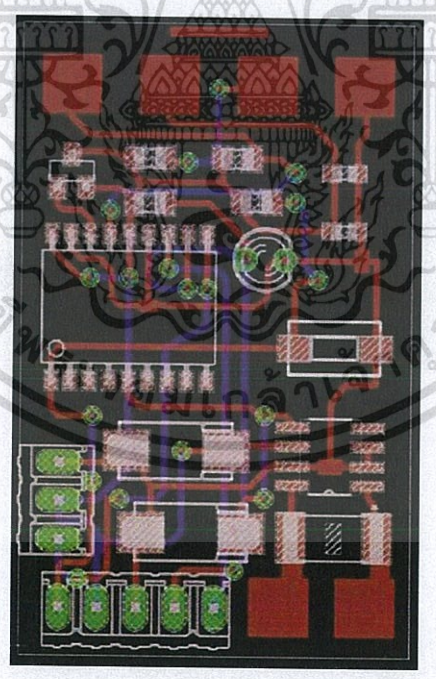


รูปที่ 3.2 แผงผังวงจรบอร์ดควบคุมมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แบบบอร์ดควบคุมมอเตอร์



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งอุปกรณ์บนบอร์ดควบคุมมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

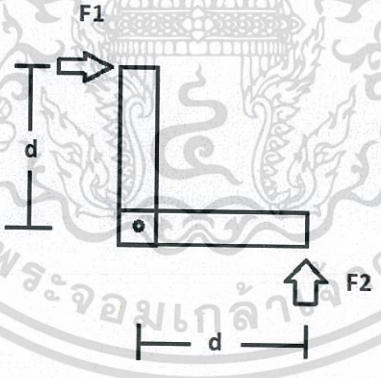
3.3 การออกแบบโปรแกรมของระบบควบคุมมอเตอร์

ในส่วนของโปรแกรมจะอยู่ในไมโครคอนโทรลเลอร์ โปรแกรมของระบบควบคุมมอเตอร์ประกอบไปด้วย

- นับสัญญาณจากเซนเซอร์วัดรอบ เพื่อนำไปทำการคำนวณหาความเร็วรอบ
- สร้างสัญญาณสี่เหลี่ยม เพื่อส่งไปยังชุดขับมอเตอร์
- อ่านค่าจากที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า
- ตรวจสอบสถานการณ์สื่อสารกับบอร์ดควบคุมกลาง
- สอสารกับบอร์ดควบคุมกลาง (I2C)
- ตรวจสอบสถานะของมอเตอร์และใบพัด

3.4 การออกแบบเครื่องวัดแรงยกของมอเตอร์

จากทฤษฎีออกแบบเครื่องวัดแรงยกโดยใช้หลักการสมดุลโมเมนต์ ตามรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.5 แบบร่างเครื่องวัดแรงยก

โดยทำการติดตั้งมอเตอร์ที่ตำแหน่ง F1 เพื่อวัดแรงจากมอเตอร์ตามแนวลูกศร F1 และวางตาชั่งที่ตำแหน่ง F2 เพื่อวัดแรงยกตามแนวลูกศร F2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

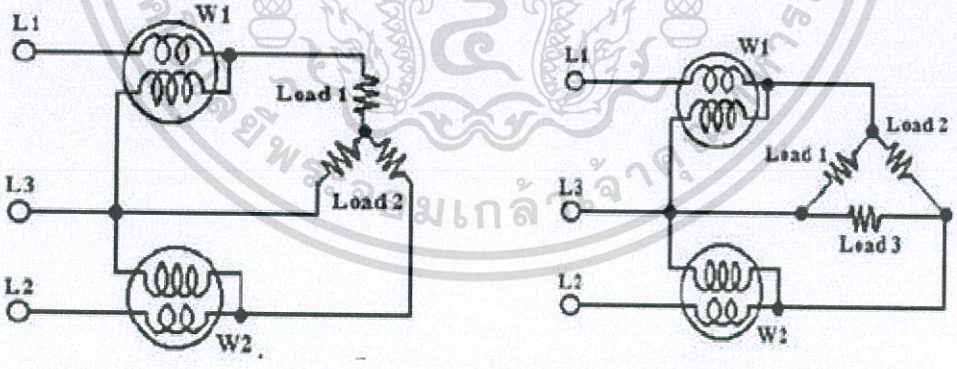
3.5 การคำนวณแรงบิดของมอเตอร์

จากความสัมพันธ์ของค่าคุณสมบัติการทำงานต่างๆ ของมอเตอร์ แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์กันของแรงบิดได้ โดยมากเพลาจะใช้สำหรับส่งกำลัง P (Power) จากต้นกำลัง ถ้าหากมอเตอร์มีโมเมนต์บิด T หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม (Angular Speed) w (Omega) จะได้กำลัง P ของมอเตอร์ดังสมการที่ (3.1)

$$P = T\,\omega \tag{3.1}$$

ความเร็วเชิงมุม w มีหน่วยเป็นเรเดียนต่อหนึ่งหน่วยเวลา (Radians Per Unit Time) สามารถวัดได้จากเครื่องมือวัดความเร็วรอบ และ P กำลังที่ใช้ขับสามารใช้การวัดได้จากเครื่องมือวัดกำลังไฟฟ้าสามเฟส ซึ่งหากไม่คำนึงถึงการสูญเสียสามารถดูแนวโน้มของแรงบิด T ได้ดังสมการที่ (3.2)

$$T = \frac{P}{\omega} \tag{3.2}$$

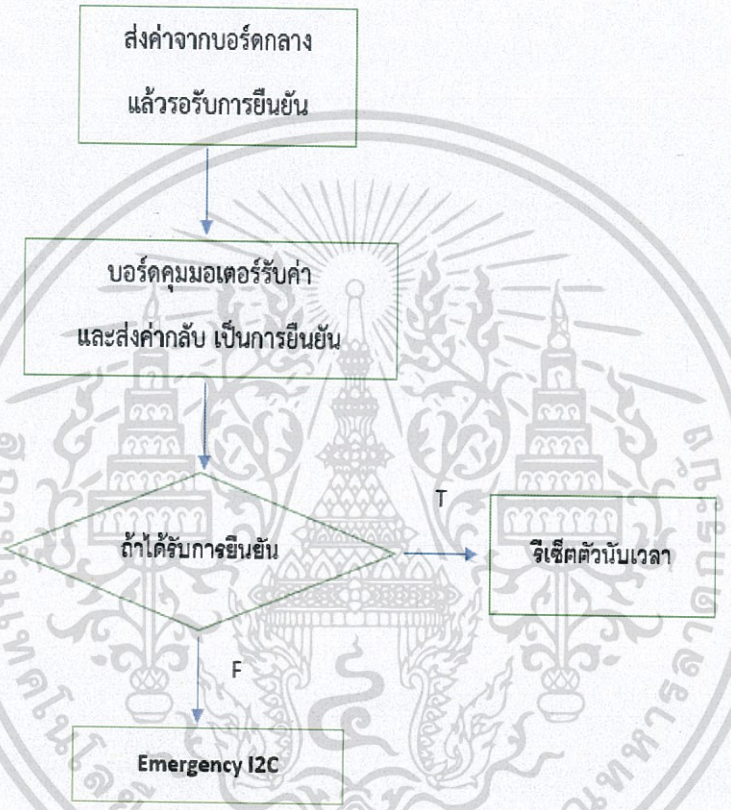


รูปที่ 3.6 การต่อวัตต์มิเตอร์ 1 เฟส 2 ตัว วัดกำลังฟ้าในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ 3 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
144439

3.6 การออกแบบโปรแกรมรับ-ส่งข้อมูล

โปรแกรมที่ออกแบบนี้ มีจุดประสงค์เพื่อการสื่อสารระหว่างบอร์ดควบคุมกลาง และบอร์ดควบคุมมอเตอร์ สามารถตรวจสอบสถานะของการสื่อสารระหว่างกันได้ และยังสามารถตรวจสอบการทำงานหรือข้อผิดพลาดของใบพัดจากกระแส และความเร็วรอบที่วัดได้อีกด้วย



รูปที่ 3.7 Flow Chart การตรวจสอบข้อผิดพลาดของการสื่อสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ส่งข้อมูลจากบอร์ดควบคุมกลาง (Arduino) กับบอร์ดควบคุมมอเตอร์ (dsPIC)

4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

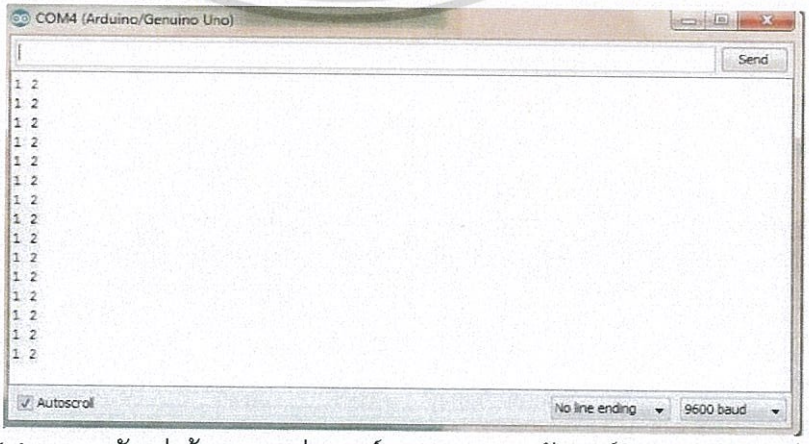
1. บอร์ดควบคุมกลาง (Arduino)
2. บอร์ดควบคุมมอเตอร์ (dsPIC)
3. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
4. คอมพิวเตอร์

4.1.2 วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งและตรวจสอบอุปกรณ์ โดยการเชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟต่างๆ
2. เชื่อมต่อ I2C บอร์ดควบคุมกลาง (Arduino) กับบอร์ดควบคุมมอเตอร์ (dsPIC)
3. ทดสอบโปรแกรมการสื่อสารโดยลำดับการทำงานคือ บอร์ดควบคุมกลางส่งข้อมูลโดยการใช้ I2C เป็นตัวเลข 1 บอร์ดควบคุมกลางรอรับข้อมูล เมื่อบอร์ดควบคุมมอเตอร์ได้รับข้อมูลตรวจสอบว่าเป็นเลข 1 หรือไม่ หากใช่ และมีการเรียกข้อมูลให้ตอบกลับด้วยเลข 2
4. ตรวจสอบผลจาก Serial Mornitor

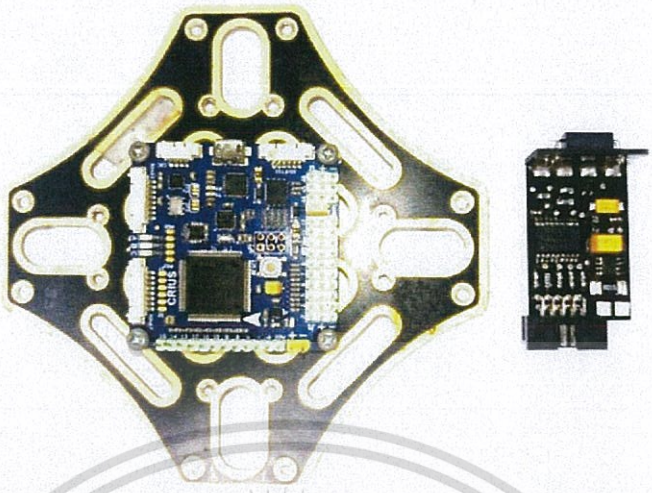
4.1.3 ผลการทดลอง

การสื่อสารระหว่างบอร์ดควบคุมกลาง (Arduino) กับบอร์ดควบคุมมอเตอร์ dsPIC) สามารถสื่อสารกันได้ ยืนยันการการส่งสัญญานโดยรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ผลการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างบอร์ดควบคุมกลางกับบอร์ดควบคุมมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 บอร์ดควบคุมกลาง (Arduino) กับบอร์ดควบคุมมอเตอร์ (dsPIC)

4.2 ส่งข้อมูลจากบอร์ดทดลอง (Arduino) กับบอร์ดทดลอง (Arduino)

4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. บอร์ดทดลองที่ 1 (Arduino)
2. บอร์ดทดลองที่ 2 (Arduino)
3. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
4. คอมพิวเตอร์

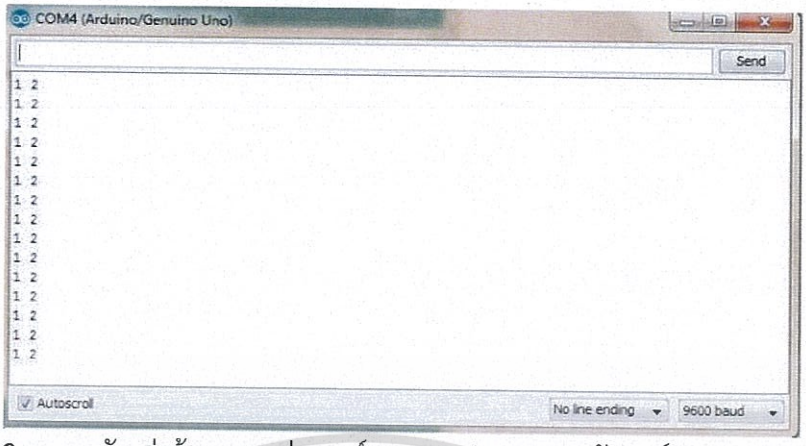
4.2.2 วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งและตรวจสอบอุปกรณ์ โดยการเชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟต่างๆ
2. เชื่อมต่อ I2C บอร์ดทดลองที่ 1 (Arduino) กับบอร์ดทดลองที่ 2 (Arduino)
3. ทดสอบโปรแกรมการสื่อสารโดยลำดับการทำงานคือ บอร์ดทดลองที่ 1 ส่งข้อมูลโดยการใช้ I2C เป็นตัวเลข 1 บอร์ดทดลองที่ 1 รอรับข้อมูล เมื่อบอร์ดทดลองที่ 2 ได้รับข้อมูลตรวจสอบว่าเป็นเลข 1 หรือไม่ หากใช่ และมีการเรียกข้อมูลให้ตอบกลับด้วยเลข 2
4. ตรวจสอบผลจาก Serial Mornitor

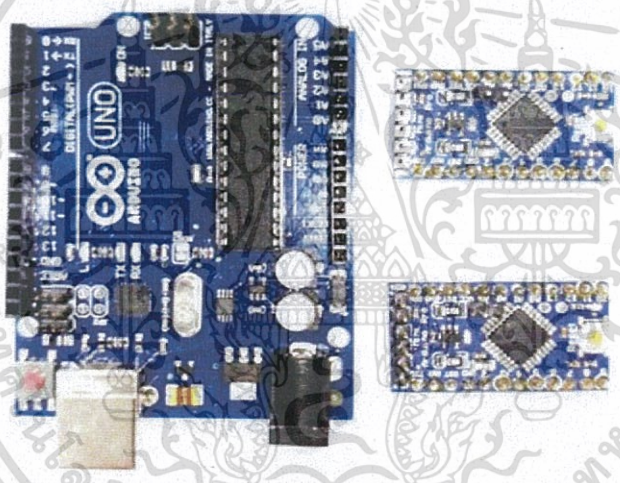
4.2.3 ผลการทดลอง

การสื่อสารระหว่างการสื่อสารระหว่างบอร์ดทดลองที่ 1 (Arduino) กับบอร์ดทดลองที่ 2 (Arduino) สามารถสื่อสารกันได้ ยืนยันการการส่งสัญญานโดยรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ผลการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างบอร์ดทดลอง (Arduino) กับบอร์ดทดลอง (Arduino)



รูปที่ 4.4 บอร์ดทดลอง (Arduino) กับบอร์ดทดลอง (Arduino)

4.3 ส่งข้อมูลจากบอร์ดทดลอง (Arduino) กับบอร์ดทดลอง (dsPIC)

4.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. บอร์ดทดลองที่ 1 (Arduino)
2. บอร์ดทดลองที่ 2 (dsPIC)
3. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
4. คอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

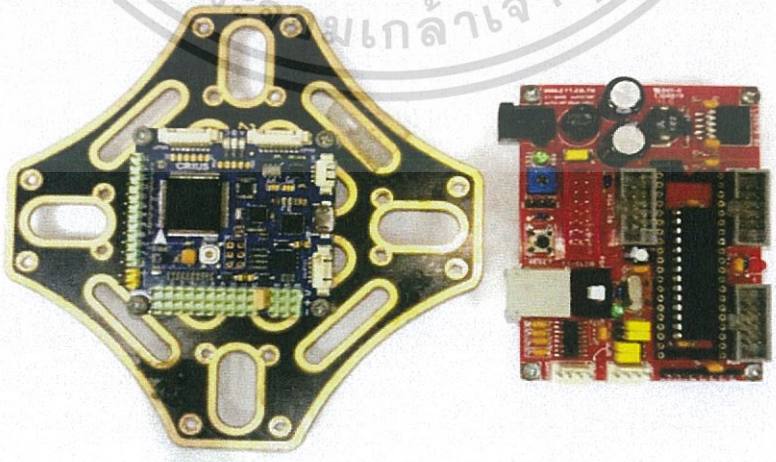
4.3.2 วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งและตรวจสอบอุปกรณ์ โดยการเชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟต่างๆ
2. เชื่อมต่อ I2C บอร์ดทดลองที่ 1 (Arduino) กับบอร์ดทดลองที่ 2 (dsPIC)
3. ทดสอบโปรแกรมการสื่อสารโดยลำดับการทำงานคือ บอร์ดทดลองที่ 1 ส่งข้อมูลโดยการใช้ I2C เป็นตัวเลข 1 บอร์ดทดลองที่ 1 รอรับข้อมูล เมื่อบอร์ดทดลองที่ 2 ได้รับข้อมูลตรวจสอบว่าเป็นเลข 1 หรือไม่ หากใช่ และมีการเรียกข้อมูลให้ตอบกลับด้วยเลข 2
4. ตรวจสอบผลจาก Serial Mornitor

4.33 ผลการทดลอง

การสื่อสารระหว่างการสื่อสารระหว่างบอร์ดทดลองที่ 1 (Arduino) และบอร์ดทดลองที่ 2 (dsPIC) สามารถสื่อสารกันได้ ยืนยันการการส่งสัญญานโดย รูปที่ 4.5

รูปที่ 4.5 ผลการรับ-ส่งข้อมูลระหว่างบอร์ดทดลอง (Arduino) กับบอร์ดทดลอง (dsPIC)



รูปที่ 4.6 บอร์ดทดลอง (Arduino) กับบอร์ดทดลอง (dsPIC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทดลองระบบเช็คการสื่อสารระหว่างบอร์ดที่ขาดหาย

4.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

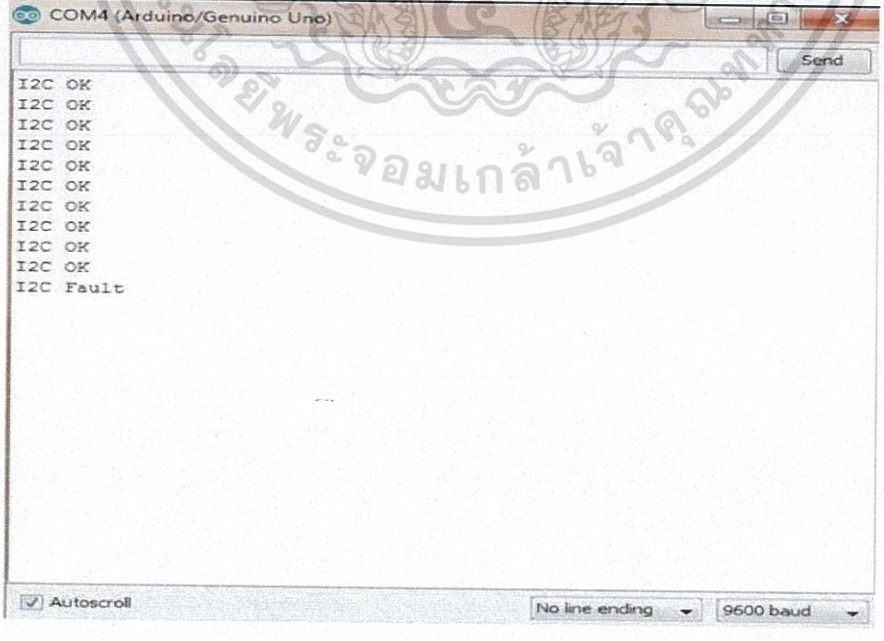
1. บอร์ดควบคุมกลาง (Arduino)
2. บอร์ดควบคุมมอเตอร์ (dsPIC)
3. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
4. คอมพิวเตอร์

4.4.1 วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งและตรวจสอบอุปกรณ์ โดยการเชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟต่างๆ
2. เชื่อมต่อ I2C บอร์ดควบคุมกลาง (Arduino) กับบอร์ดควบคุมมอเตอร์ (dsPIC)
3. ทดสอบโปรแกรมการสื่อสารโดยลำดับการทำงานคือ ให้บอร์ดควบคุมกลางส่งข้อมูลหาบอร์ดควบคุมมอเตอร์ หากมีการตอบกลับจากบอร์ดควบคุมมอเตอร์ให้ทำต่อไป หากไร้การสื่อสารกลับให้แสดงข้อความ ซึ่งบอกถึงความผิดพลาดในการสื่อสารตรวจสอบผลจาก Serial Mornitor
4. ปลดการเชื่อมต่อสาย I2C และสังเกตุผลจาก Serial Mornitor

4.4.3 ผลการทดลอง

ผลการทดลอง ยืนยันระบบตรวจสอบ การขาดการติดต่อโดย รูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 โปรแกรมแสดงการตรวจสอบการขาดการติดต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

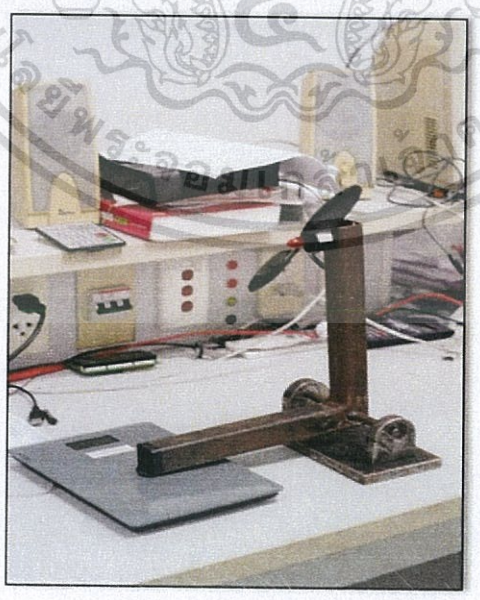
4.5 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงยกของมอเตอร์

4.5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

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

4.5.2 วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งบอร์ดควบคุมมอเตอร์กับเครื่องวัดแรงยก
2. ทำการสั่งมอเตอร์หมุนที่ความเร็วรอบ 1500 RPM
3. อ่านค่าจากตาชั่ง
4. บันทึกค่าลงในตาราง
5. เพิ่มคำสั่งหมุนมอเตอร์เพิ่มอีก 500 RPM จากนั้นทำข้อ 2-5 จนถึงคำสั่งที่ 6500RPM



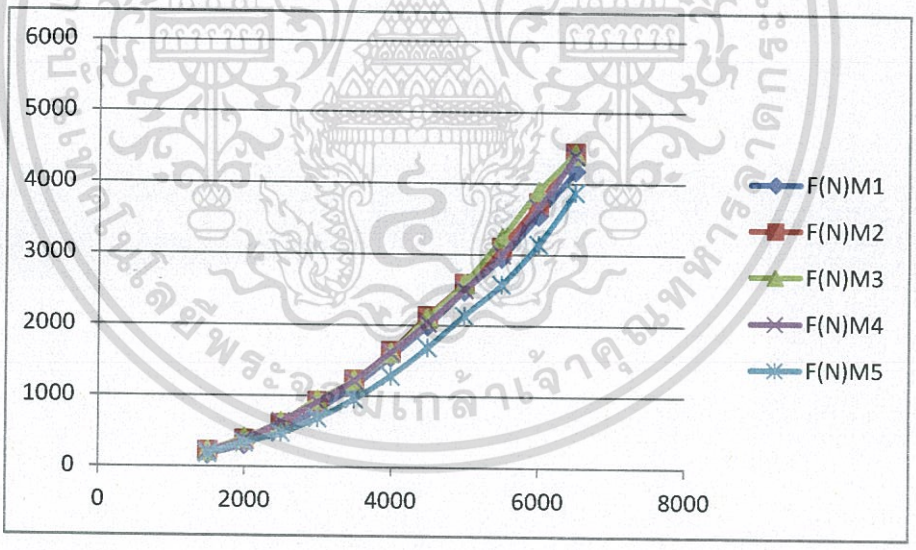
รูปที่ 4.8 เครื่องวัดแรงยก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.3 ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.1 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงยกของมอเตอร์ทั้ง 5 ตัว

Speed	F [N]Motor1	F [N]Motor2	F [N]Motor3	F [N]Motor4	F [N]Motor5
1500	166.6	215.6	215.6	215.6	176.4
2000	303.8	382.2	401.8	372.4	333.2
2500	529.2	607.6	627.2	627.2	470.4
3000	803.6	921.2	940.8	911.4	686
3500	1136.8	1225	1215.2	1215.2	950.6
4000	1548.4	1626.8	1607.2	1617	1283.8
4500	1989.4	2126.6	2097.2	2028.6	1685.6
5000	2489.2	2587.2	2587.2	2508.8	2136.4
5500	2959.6	3106.6	3234	2998.8	2577.4
6000	3547.6	3733.8	3900.4	3655.4	3145.8
6500	4184.6	4439.4	4419.8	4390.4	3871
MAX	4811.8	5105.8	5262.6	4919.6	4674.6



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงยกของมอเตอร์ทั้ง 5 ตัว

- เมื่อแกน X คือค่าความเร็วรอบมีหน่วยเป็น RPM
- เมื่อแกน Y คือขนาดของแรงยกที่วัดได้มีหน่วยเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงบิดของมอเตอร์

4.6.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. มอเตอร์ MT2213-935kV พร้อมใบพัดขนาด 1045
2. ชุดขับมอเตอร์ RCTIMER ESC 30A SimonK Firmware
3. บอร์ดควบคุมมอเตอร์
4. เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า
5. ชุดควบคุมกลางของควอทโรเตอร์
6. คอมพิวเตอร์

4.6.2 วิธีการทดลอง

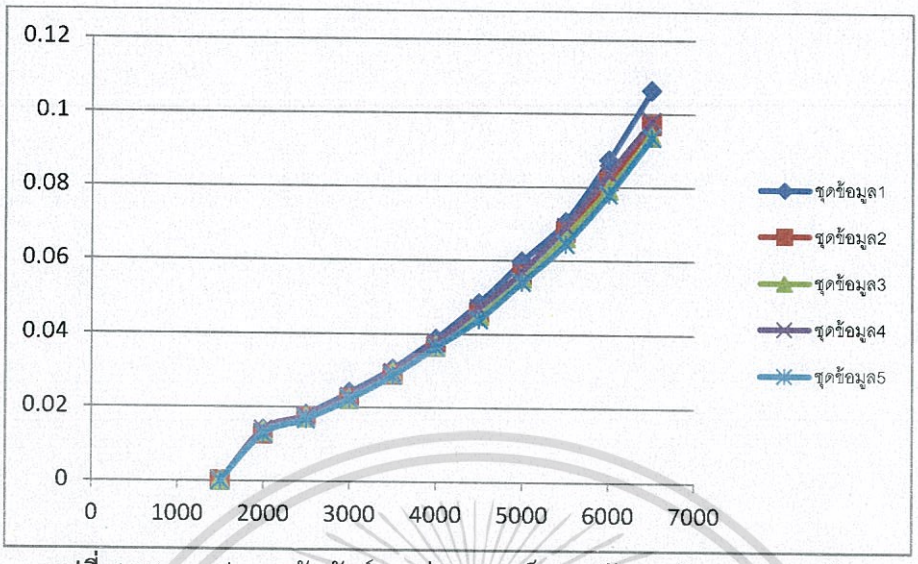
1. ติดตั้งบอร์ดควบคุมมอเตอร์กับเครื่องวัดแรงบิด
2. ทำการสั่งมอเตอร์หมุนที่ความเร็วรอบ 1500 RPM
3. อ่านค่าจากเครื่องวัดกำลังไฟฟ้า
4. บันทึกค่าลงในตาราง
5. เพิ่มคำสั่งหมุนมอเตอร์เพิ่มอีก 500 RPM จากนั้นทำข้อ 2-5 จนถึงคำสั่งที่ 6500RPM

4.6.3 ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.2 ตารางความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงบิดของมอเตอร์ทั้ง 5 ตัว

Speed	Toque [Nm]Motor1	Toque [Nm]Motor2	Toque [Nm]Motor3	Toque [Nm]Motor4	Toque [Nm]Motor5
1500	0.01401	0.01273	0.01337	0.01401	0.01273
2000	0.01814	0.01719	0.01719	0.01767	0.01671
2500	0.02406	0.02254	0.02215	0.02292	0.02215
3000	0.03056	0.02897	0.0296	0.0296	0.02865
3500	0.03874	0.03656	0.03683	0.03765	0.03629
4000	0.04846	0.0456	0.04512	0.04703	0.04393
4500	0.05984	0.05624	0.05539	0.05708	0.05411
5000	0.07067	0.0678	0.06646	0.06933	0.06455
5500	0.08733	0.08178	0.07935	0.08369	0.07796
6000	0.10632	0.09693	0.09374	0.09804	0.09342
6500	0.12429	0.11386	0.11239	0.11665	0.10945

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงบิดของมอเตอร์

- เมื่อแกน X คือค่าความเร็วรอบมีหน่วยเป็น RPM
- เมื่อแกน Y คือขนาดของแรงบิดที่วัดได้มีหน่วยเป็น N.m

4.7 ทดลองค่า Time Constant ของระบบควบคุมของมอเตอร์

4.7.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. บอร์ดควบคุมกลาง (Arduino)
2. บอร์ดควบคุมมอเตอร์ (dsPIC)
3. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง
4. คอมพิวเตอร์
5. ออสซิลโลสโคป
6. ทาโคมิเตอร์
7. มอเตอร์ พร้อมใบพัด
8. ฐานยึดเพื่อทดลอง

4.7.2 วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งอุปกรณ์ โดยการเชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟ 11.1V เข้ากับมอเตอร์และ ESC
2. เชื่อมต่อ I2C บอร์ดควบคุมกลาง (Arduino) กับบอร์ดควบคุมมอเตอร์ (dsPIC)
3. ติดตั้งมอเตอร์เข้ากับฐานยึด และติดตั้งใบพัดเข้ากับมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ทดลองโดยการให้สเต็ปอินพุตไปที่ 5000 RPM
5. บันทึกค่า Time Constant

4.7.3 ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองค่าคงตัวของเวลาของมอเตอร์ตัวที่ 1 ที่ความเร็วรอบ 5000RPM

Speed	F [N]Motor1	Toque [Nm]Motor1	V(v)	Current [A]	Tc [ms]
5000	2489.2	0.07067	11.1	3.1	416

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองค่าคงตัวของเวลาของมอเตอร์ตัวที่ 2 ที่ความเร็วรอบ 5000RPM

Speed	F [N]Motor2	Toque [Nm]Motor2	V(v)	Current [A]	Tc [ms]
5000	2587.2	0.0678	11.1	3.48	400

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองค่าคงตัวของเวลาของมอเตอร์ตัวที่ 3 ที่ความเร็วรอบ 5000RPM

Speed	F [N]Motor3	Toque [Nm]Motor3	V(v)	Current [A]	Tc [ms]
5000	2587.2	0.06646	11.1	3	424

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองค่าคงตัวของเวลาของมอเตอร์ตัวที่ 4 ที่ความเร็วรอบ 5000RPM

Speed	F [N]Motor4	Toque [Nm]Motor4	V(v)	Current [A]	Tc [ms]
5000	2508.8	0.06933	11.1	3.12	304

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองค่าคงตัวของเวลาของมอเตอร์ตัวที่ 5 ที่ความเร็วรอบ 5000RPM

Speed	F [N]Motor5	Toque [Nm]Motor5	V(v)	Current [A]	Tc [ms]
5000	2136.4	0.06455	11.1	2.99	384

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุปการดำเนินงาน

ได้ทำการดำเนินงานปรับปรุงระบบการสื่อสารระหว่างบอร์ด และการพัฒนาระบบควบคุมมอเตอร์ของอากาศยานสี่ใบพัด โดยเน้นการแก้ไขปัญหาจากปีการศึกษาที่ผ่านมาเป็นสำคัญนั่นคือ ปัญหาการสื่อสารระหว่างบอร์ด การชำรุดของอุปกรณ์ทดลองและโปรแกรมควบคุมการทำงานของมอเตอร์

การออกแบบระบบสื่อสาร และคำสั่งในการสื่อสารเพื่อให้สามารถสั่งงาน บอร์ดการควบคุมมอเตอร์แบบไร้แปรงถ่านซึ่งใช้การควบคุมแบบป้อนกลับ ทำให้สามารควบคุมความเร็วรอบได้ตามที่ต้องการ และรวดเร็วสามารถควบคุมความเร็วรอบได้ ถึงแม้ว่าแรงดันไฟฟ้าจะลดลงและรวมไปถึงระบบการตรวจสอบ สถานะต่างๆ ของอุปการณ์ได้ โดยทั้งนี้จะเป็นผลดีต่อความปลอดภัยในการใช้งานอากาศยานไร้คนขับในทางอุตสาหกรรม ซึ่งหลังจากได้ดำเนินการปรับปรุงและแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่ได้กล่าวสามารถแก้ไขได้และทำงานเป็นไปตามปกติ

5.2 ปัญหาที่พบการดำเนินงาน

1. มีปัญหาเกี่ยวกับการเรียนรู้ในด้านโปรแกรม เนื่องด้วยความผิดปกติของอุปกรณ์ และความไม่เข้าใจ ซึ่งทำให้การแก้ไขใช้เวลามากพอสมควร
2. บอร์ดควบคุมมอเตอร์ มักจะมีปัญหาในการโปรแกรมเข้าไป ซึ่งทำให้ต้องทำการศึกษาเพิ่ม และออกแบบบอร์ดควบคุมมอเตอร์ใหม่
3. ระบบการสื่อสารของโปรแกรมเก่า ต้องทำการแก้ไขเนื่องจากมีการปรับเปลี่ยหลายครั้ง
4. ขาดประสบการณ์ในการเขียน Microcontroller ทำให้เสียเวลาในการแก้ไขโปรแกรม
5. ปัญหาทางด้านของอุปกรณ์ เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลุด สายไฟขาด ส่งผลให้การการทำงาน ทำงานไม่ถูกต้อง เกิดค่าความผิดพลาดขึ้นมาเยอะ ไม่สามารถสั่งให้มอเตอร์ทำงานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 แนวทางพัฒนาโครงงาน

1. เพิ่มประสิทธิภาพของการควบคุม ให้มีความรวดเร็วและเสถียรมากขึ้น
2. เพิ่มระบบการป้องกัน กรณีเกิดเหตุฉุกเฉิน
3. แก้ปัญหาการถูกรบกวนขณะส่งสัญญาณของบอร์ดควบคุม
4. พัฒนาโปรแกรมในส่วนอื่นๆ เพื่อความสมบูรณ์แบบในการบินของอากาศยานสี่ใบพัด
5. เมื่อได้โปรแกรมบอร์ดควบคุมมอเตอร์ที่แน่นอนแล้ว ให้ลดขนาด และออกแบบให้ทำการเชื่อมต่อได้ง่าย เพื่อมีประสิทธิภาพในการควบคุมให้เสถียรมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] "**มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน**". เข้าถึงได้จาก
http://wut007.blogspot.com/2012/06/brushless-dc-motor-bldc.html

[2] "**ข้อมูลของเซนเซอร์วัดกระแส AD2810**". เข้าถึงได้จาก
http://www.analog.com/en/products/amplifiers/specialty-amplifiers/current-sense- amplifiers/ad8210.html

[3] "**ข้อมูลของเซนเซอร์วัดความเร็วรอบ EE-SY410**". เข้าถึงได้จาก
www.omron.com/ecb/products/pdf/en-ee_sy310_410.pdf

[4] "**ข้อมูลชุดขับมอเตอร์ 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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

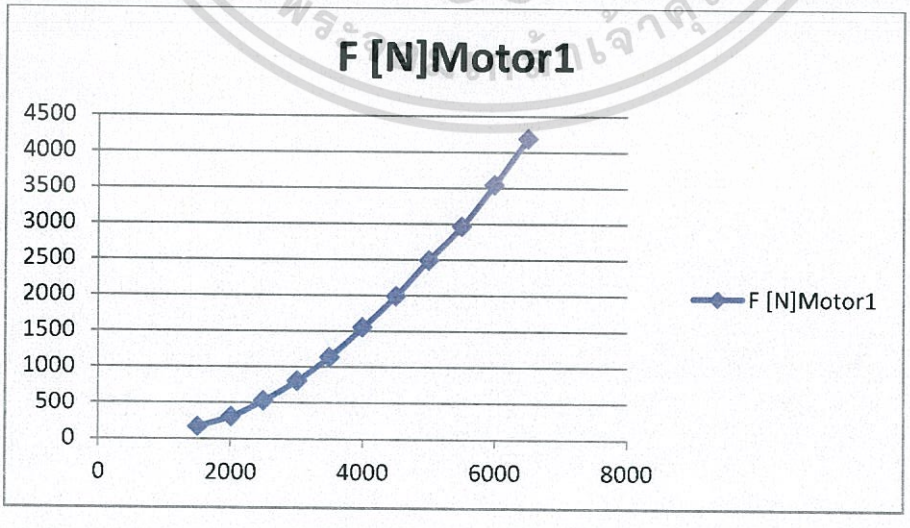
ภาคผนวก ก

ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงยกของมอเตอร์

มอเตอร์ตัวที่ 1

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองของแรงยกมอเตอร์ตัวที่ 1

Motor1				
Speed	F[g]	F [N]Motor1	Current [A]	Tc [ms]
1500	17	166.6	0.1	
2000	31	303.8	0.3	
2500	54	529.2	0.5	
3000	82	803.6	0.87	
3500	116	1136.8	1.2	
4000	158	1548.4	1.75	
4500	203	1989.4	2.4	
5000	254	2489.2	3.1	416
5500	302	2959.6	4	
6000	362	3547.6	5.2	
6500	427	4184.6	6.9	
MAX				



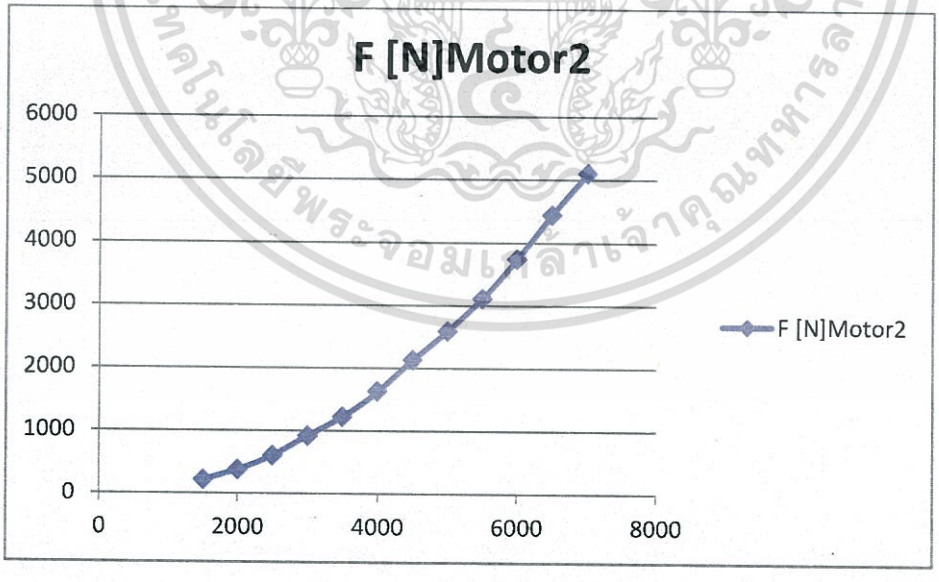
รูปที่ ก.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงยกของมอเตอร์ตัวที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 2

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองของแรงยกมอเตอร์ตัวที่ 2

Motor2				
Speed	F(g)	F [N]Motor2	Current [A]	Tc [ms]
1500	22	215.6	0.21	
2000	39	382.2	0.47	
2500	62	607.6	0.504	
3000	94	921.2	0.98	
3500	125	1225	1.25	
4000	166	1626.8	1.8	
4500	217	2126.6	2.5	
5000	264	2587.2	3.48	400
5500	317	3106.6	4.5	
6000	381	3733.8	5.6	
6500	453	4439.4	7.3	
MAX	521	5105.8	9.1	



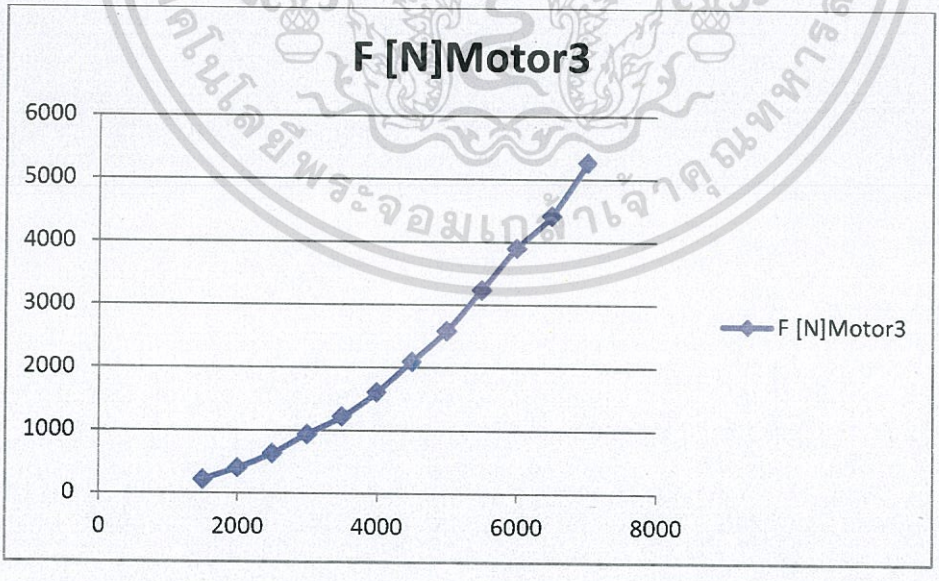
รูปที่ ก.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงยกของมอเตอร์ตัวที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 3

ตารางที่ ก.3 ผลการทดลองของแรงยกมอเตอร์ตัวที่ 3

Motor3				
Speed	F(g)	F [N]Motor3	Current [A]	Tc [ms]
1500	22	215.6	0.12	
2000	41	401.8	0.25	
2500	64	627.2	0.48	
3000	96	940.8	0.75	
3500	124	1215.2	1.19	
4000	164	1607.2	1.69	
4500	214	2097.2	2.23	
5000	264	2587.2	3	424
5500	330	3234	4	
6000	398	3900.4	5.3	
6500	451	4419.8	6.98	
MAX	537	5262.6	8.54	



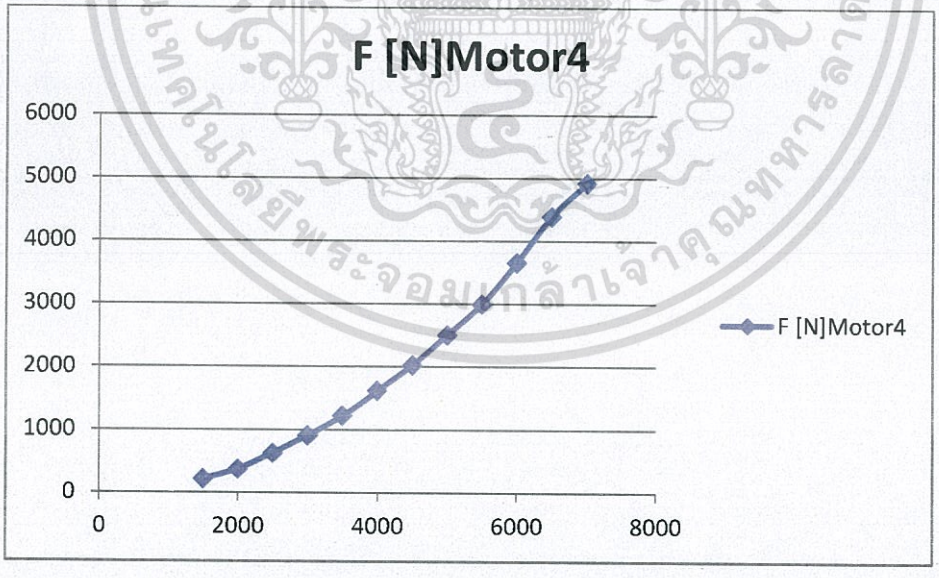
รูปที่ ก.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงยกของมอเตอร์ตัวที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 4

ตารางที่ ก.4 ผลการทดลองของแรงยกมอเตอร์ตัวที่ 4

Speed	F(g)	F [N]Motor4	Current [A]	Tc [ms]
1500	22	215.6	0.26	
2000	38	372.4	0.41	
2500	64	627.2	0.52	
3000	93	911.4	0.85	
3500	124	1215.2	1.2	
4000	165	1617	1.56	
4500	207	2028.6	2.25	
5000	256	2508.8	3.12	304
5500	306	2998.8	4.13	
6000	373	3655.4	5.51	
6500	448	4390.4	7	
MAX	502	4919.6	8.78	



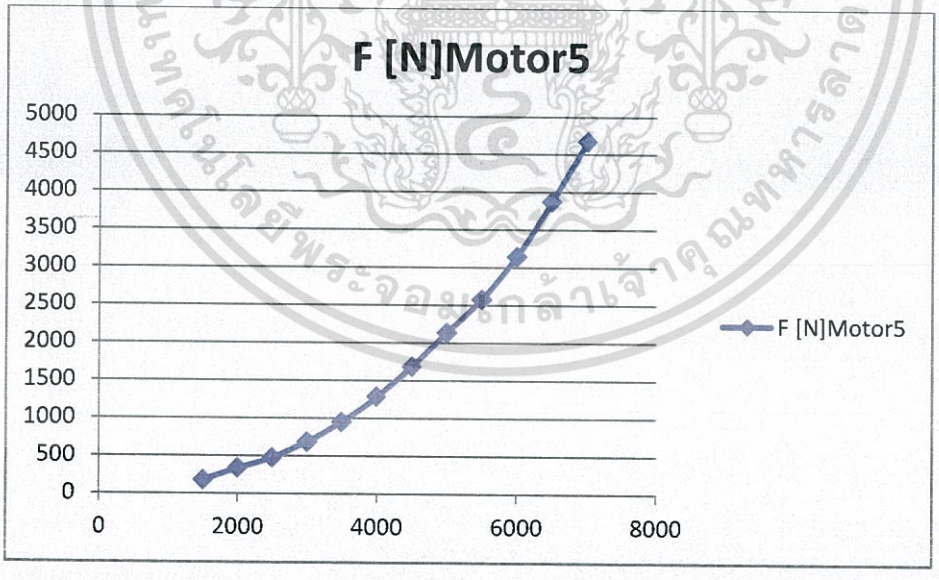
รูปที่ ก.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงยกของมอเตอร์ตัวที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 5

ตารางที่ ก.5 ผลการทดลองของแรงยกมอเตอร์ตัวที่ 5

Speed	F(g)	F [N]Motor5	Current [A]	Tc [ms]
1500	18	176.4	0.4	
2000	34	333.2	0.68	
2500	48	470.4	0.82	
3000	70	686	0.94	
3500	97	950.6	1.28	
4000	131	1283.8	1.74	
4500	172	1685.6	2.29	
5000	218	2136.4	2.99	384
5500	263	2577.4	3.84	
6000	321	3145.8	4.97	
6500	395	3871	5.74	
MAX	477	4674.6	7.3	



รูปที่ ก.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงยกของมอเตอร์ตัวที่ 5

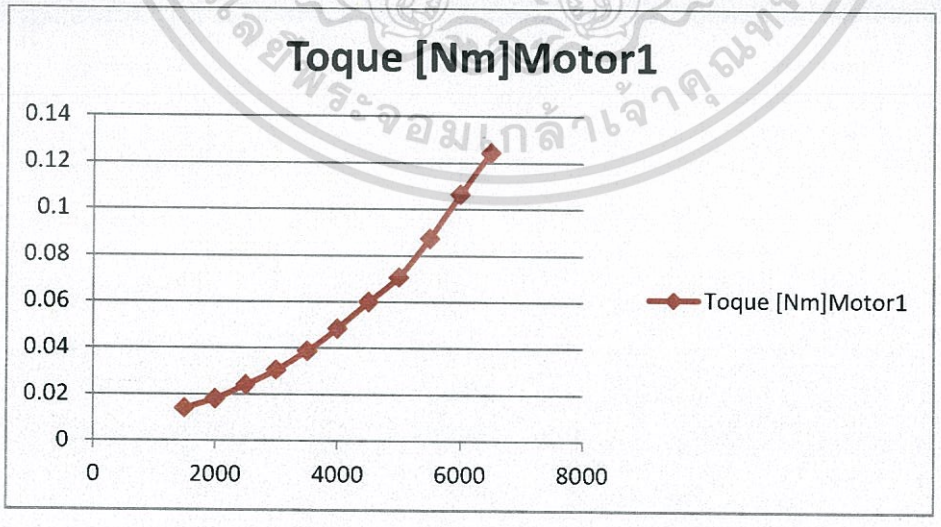
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์

มอเตอร์ตัวที่ 1

ตารางที่ ก.6 ผลการทดลองของแรงบิดมอเตอร์ตัวที่ 1

Motor1				
Speed	Toque [Nm]Motor1	V(v)	Current [A]	Tc [ms]
1500	0.014006	11.1	0.1	
2000	0.018144	11.1	0.3	
2500	0.024064	11.1	0.5	
3000	0.030558	11.1	0.87	
3500	0.038743	11.1	1.2	
4000	0.048463	11.1	1.75	
4500	0.059842	11.1	2.4	
5000	0.070665	11.1	3.1	416
5500	0.087333	11.1	4	
6000	0.106316	11.1	5.2	
6500	0.124288	11.1	6.9	
MAX				



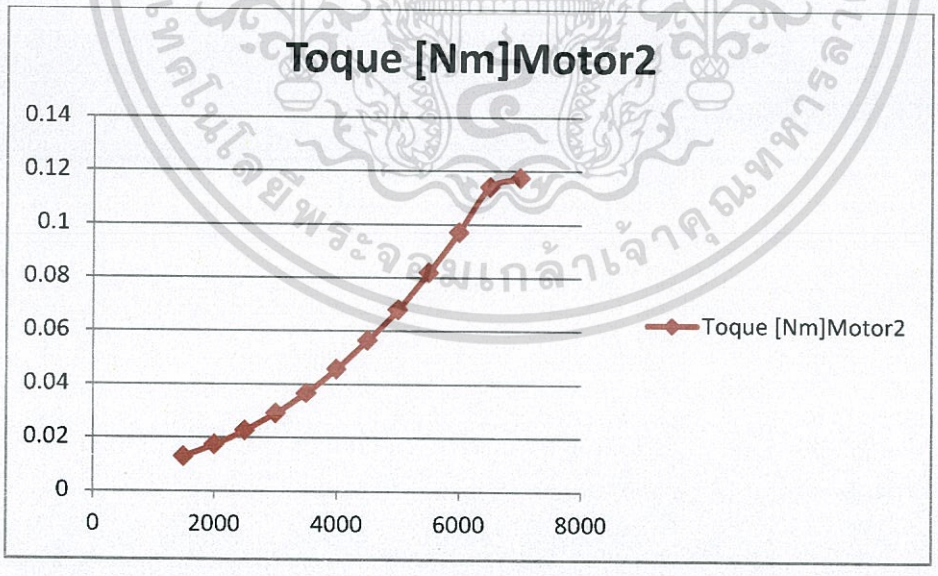
รูปที่ ก.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 2

ตารางที่ ก.7 ผลการทดลองของแรงบิดมอเตอร์ตัวที่ 2

Motor2				
Speed	Toque [Nm]Motor2	V(v)	Current [A]	Tc [ms]
1500	0.012732	11.1	0.21	
2000	0.017189	11.1	0.47	
2500	0.022536	11.1	0.504	
3000	0.028966	11.1	0.98	
3500	0.03656	11.1	1.25	
4000	0.045598	11.1	1.8	
4500	0.056235	11.1	2.5	
5000	0.0678	11.1	3.48	400
5500	0.081777	11.1	4.5	
6000	0.096925	11.1	5.6	
6500	0.113857	11.1	7.3	
MAX	0.117196	11.1	9.1	



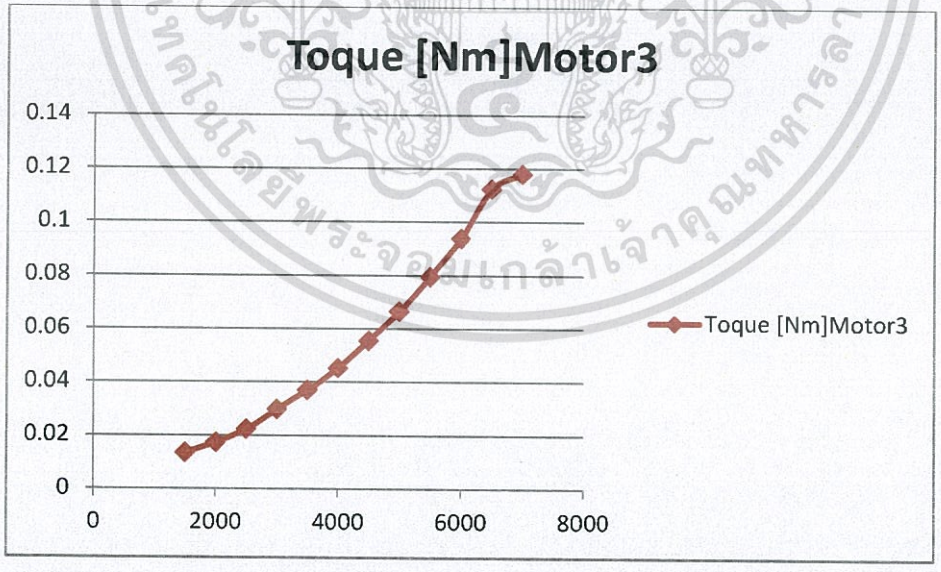
รูปที่ ก.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 3

ตารางที่ ก.8 ผลการทดลองของแรงบิดมอเตอร์ตัวที่ 3

Motor3				
Speed	Toque [Nm]	V(v)	Current [A]	Tc [ms]
1500	0.013369	11.1	0.12	
2000	0.017189	11.1	0.25	
2500	0.022154	11.1	0.48	
3000	0.029603	11.1	0.75	
3500	0.036833	11.1	1.19	
4000	0.04512	11.1	1.69	
4500	0.055386	11.1	2.23	
5000	0.066463	11.1	3	424
5500	0.079346	11.1	4	
6000	0.093742	11.1	5.3	
6500	0.112388	11.1	6.98	
MAX	0.117822	11.1	8.54	



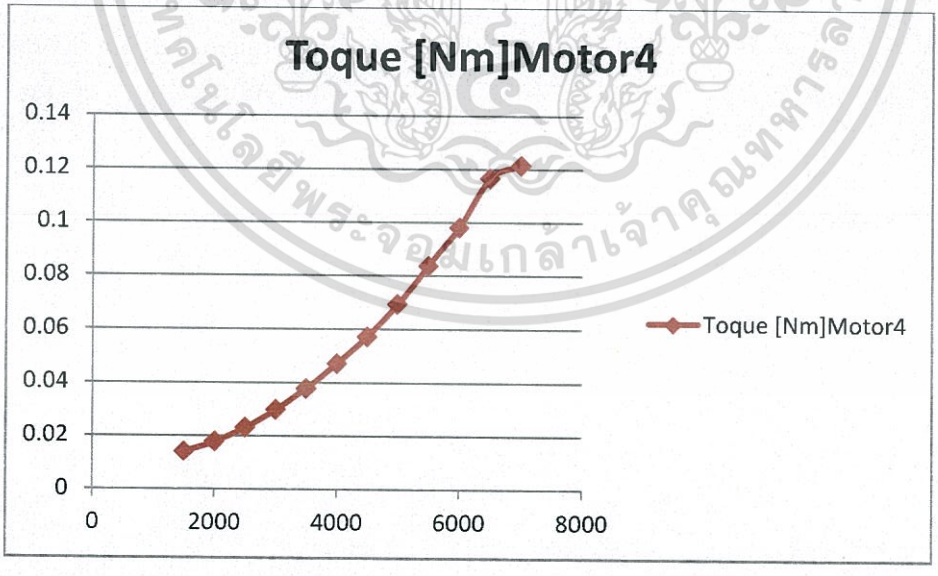
รูปที่ ก.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 4

ตารางที่ ก.9 ผลการทดลองของแรงบิดมอเตอร์ตัวที่ 4

Motor4				
Speed	Toque [Nm]Motor4	V(v)	Current [A]	Tc [ms]
1500	0.014006	11.1	0.26	
2000	0.017666	11.1	0.41	
2500	0.022918	11.1	0.52	
3000	0.029603	11.1	0.85	
3500	0.037652	11.1	1.2	
4000	0.04703	11.1	1.56	
4500	0.057084	11.1	2.25	
5000	0.069328	11.1	3.12	304
5500	0.083687	11.1	4.13	
6000	0.09804	11.1	5.51	
6500	0.116648	11.1	7	
MAX	0.121392	11.1	8.78	



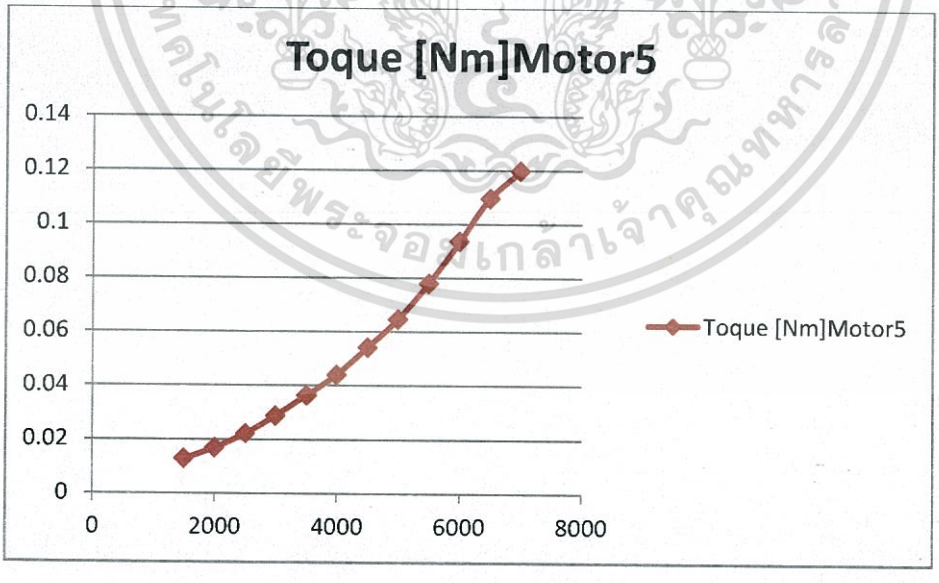
รูปที่ ก.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 5

ตารางที่ ก.10 ผลการทดลองของแรงบิดมอเตอร์ตัวที่ 5

Motor5				
Speed	Toque [Nm]Motor5	V(v)	Current [A]	Tc [ms]
1500	0.012732	11.1	0.4	
2000	0.016711	11.1	0.68	
2500	0.022154	11.1	0.82	
3000	0.028648	11.1	0.94	
3500	0.036287	11.1	1.28	
4000	0.043927	11.1	1.74	
4500	0.054113	11.1	2.29	
5000	0.064553	11.1	2.99	384
5500	0.077957	11.1	3.84	
6000	0.093424	11.1	4.97	
6500	0.10945	11.1	5.74	
MAX	0.11958	11.1	7.3	



รูปที่ ก.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองหาค่าคงตัวเวลา

มอเตอร์ตัวที่ 1

ตารางที่ ข.1 ผลการทดลองค่าคงตัวของเวลาของมอเตอร์ตัวที่ 1 ที่ความเร็วรอบ 5000 RPM

Speed	F [N]Motor1	Toque [Nm]Motor1	V(v)	Current [A]	Tc [ms]
5000	2489.2	0.07067	11.1	3.1	416

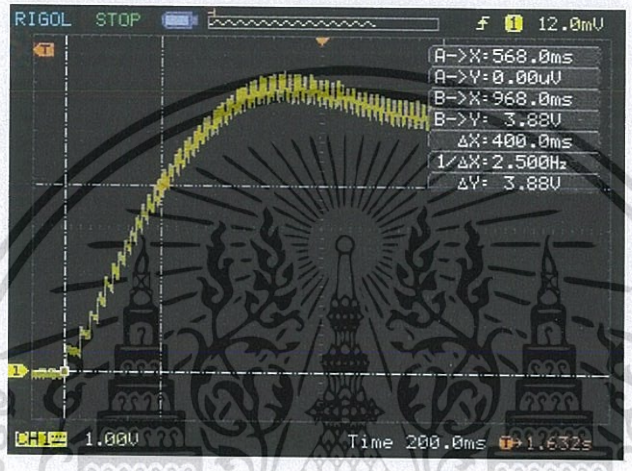
รูปที่ ข.1 กราฟผลตอบสนองของค่าคงตัวเวลาของมอเตอร์ตัวที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 2

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองค่าคงตัวของเวลาของมอเตอร์ตัวที่ 2 ที่ความเร็วรอบ 5000 RPM

Speed	F [N]Motor2	Toque [Nm]Motor2	V(v)	Current [A]	Tc [ms]
5000	2587.2	0.0678	11.1	3.48	400



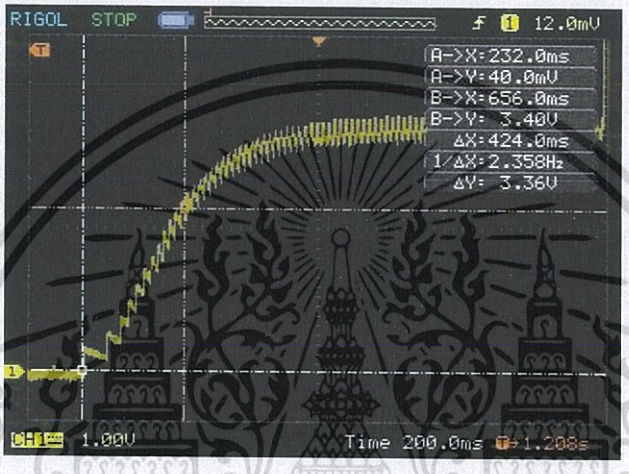
รูปที่ ข.2 กราฟผลตอบสนองของค่าคงตัวเวลาของมอเตอร์ตัวที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 3

ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองค่าคงตัวของเวลาของมอเตอร์ตัวที่ 3 ที่ความเร็วรอบ 5000 RPM

Speed	F [N]Motor3	Toque [Nm]Motor3	V(v)	Current [A]	Tc [ms]
5000	2587.2	0.06646	11.1	3	424



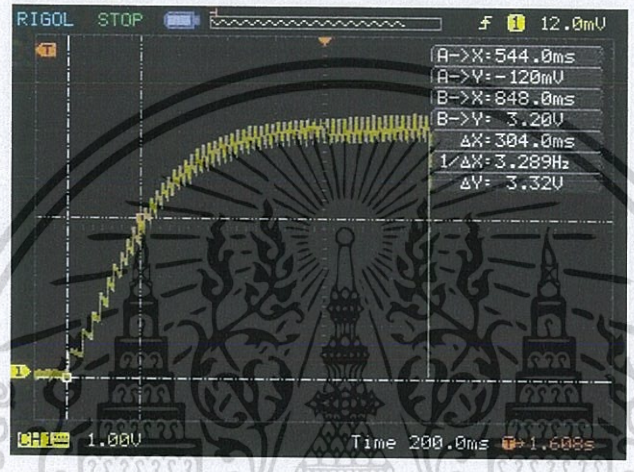
รูปที่ ข.3 กราฟผลตอบสนองของค่าคงตัวเวลาของมอเตอร์ตัวที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 4

ตารางที่ ข.4 ผลการทดลองค่าคงตัวของเวลาของมอเตอร์ตัวที่ 4 ที่ความเร็วรอบ 5000 RPM

Speed	F [N]Motor4	Toque [Nm]Motor4	V(v)	Current [A]	Tc [ms]
5000	2508.8	0.06933	11.1	3.12	304



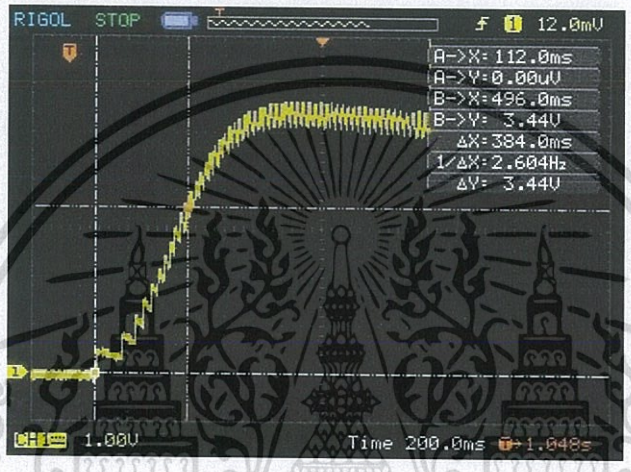
รูปที่ ข.4 กราฟผลตอบสนองของค่าคงตัวเวลาของมอเตอร์ตัวที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 5

ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองค่าคงตัวของเวลาของมอเตอร์ตัวที่ 5 ที่ความเร็วรอบ 5000 RPM

Speed	F [N]Motor5	Toque [Nm]Motor5	V(v)	Current [A]	Tc [ms]
5000	2136.4	0.06455	11.1	2.99	384



รูปที่ ข.5 กราฟผลตอบสนองของค่าคงตัวเวลาของมอเตอร์ตัวที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้