การปรับปรุงระบบควบคุมมอเตอร์ของอากาศยานสี่ใบพัด

ADJUST MOTOR CONTROL SYSTEM OF QUADROTOR

ทรกช ช่างมณี

ศิรวิชญ์ ตันติประภา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

การปรับปรุงระบบควบคุมมอเตอร์ของอากาศยานสี่ใบพัด

ADJUST MOTOR CONTROL SYSTEM OF QUADROTOR

กรกช จ่างมณี

สิรวิชญ์ ตันติประภา

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้ง กครั้งที่มีการนำไปใช้

ADJUST MOTOR CONTROL SYSTEM OF QUADROTOR

KORAKOD JANGMANEE

SIRAWISH TANTIPRABHA

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

ACADEMIC YEAR 2014

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง	การปรับปรุงระบบควบคุมมอเตอร์ของอากาศยานสี่ใบพัด
	ADJUST MOTOR CONTROL SYSTEM OF QUADROTOR

ผู้จัดทำ	นายกรกช	จ่างมณี	54010016
	นายสิรวิชญ์	ตันติประภา	54011371

.... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นนทวัฒน์ จุลเดชะ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับปรุงระบบควบคุมมอเตอร์ของอากาศยานสี่ใบพัด

โดย

นายกรกช จ่างมณี 54010016

นายสิรวิชญ์ ตันติประภา 54011371

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นนทวัฒน์ จุลเดชะ

ปีการศึกษา 2557

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์นี้ อธิบายถึงการปรับปรุงและแก้ไขระบบควบคุมมอเตอร์ของอากาศยานสี่ใบพัด ให้สามารถทำงานได้อย่างแม่นยำ โดยแบ่งเป็นการแก้ไขระบบควบคุม และแก้ไขปัญหาแสงภายนอกรบกวนการทำงานของเซนเซอร์สำหรับอ่านค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ นอกจากนั้นได้ทำการทดสอบคุณลักษณะต่างๆ ของชุดควบคุมมอเตอร์ โดยได้ทำการทดสอบหาแรงบิดของมอเตอร์ การทดสอบหาแรงยกของมอเตอร์ การทดสอบความแม่นยำในการอ่านค่าความเร็วรอบของเซนเซอร์ และความเร็วในการตอบสนองต่อคำสั่งรอบของมอเตอร์

ขั้นตอนการดำเนินการ เริ่มจากการศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง วิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้น หาแนวทางแก้ไข และทำการทดสอบเพื่อบันทึกผล จากนั้นนำผลที่ได้มาวิเคราะห์และแก้ไขจนกระทั่ง ผลของการทดลองเป็นไปตามที่ทำการออกแบบไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ADJUST MOTOR CONTROL SYSTEM OF QUADROTOR

By

Mr.Korakod Jangmanee 54010016

Mr.Sirawish Tantiprabha 54011371

Advisor

Asst.Prof. Dr.Nontawat Chuladaycha

Academic Year 2014

ABSTRACT

This thesis describes revising and developing motor control system of quad rotor to be precisely functional. Resolving process is divided in two parts , program of system and troubleshooting external light interfering problem. Furthermore, testing and verifying properties of the system, that are Torque, Thrust , accuracy of sensors, and step respond of each motors, to confirm stability of system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นนทวัฒน์ จุลเดชะ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำที่ดีมาโดยตลอดตั้งแต่ต้น กลุ่มผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง

ขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้กำลังใจ สนับสนุนอุปกรณ์ที่ขาดเหลือ กระตุ้นเตือน รวมทั้งคอยถามไถ่ความคืบหน้าของโครงการอยู่อย่างสม่ำเสมอ

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา รวมถึงการสนับสนุนเรื่องของงบประมาณที่ขาดเหลือ ตลอดจนแรงบันดาลใจที่ดีที่สุดที่ทำให้โครงการสำเร็จสมบูรณ์ลงได้ด้วยดี

ผู้จัดทำ
นายกรกช จ่างมณี
นายสิรวิชญ์ ตันติประภา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VIII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์ในการทำปริญญานิพนธ์	1
1.3 ขั้นตอนการศึกษาและจัดทำโครงงาน	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ขอบเขตการศึกษา	2
บทที่ 2 ทฤษฏีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 บทนำ	3
2.2 มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor)	4
2.3 ชุดขับมอเตอร์ (Electronic Speed Controller)	5
2.4 การวัดความเร็วรอบมอเตอร์	6
2.5 การวัดกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์	7
2.6 ตัวควบคุมพีไอ (PI-Controller)	7
2.7 การทำงานของโปรแกรมควบคุมมอเตอร์	10
2.8 การวัดแรงยกของมอเตอร์	12
2.9 การวัดแรงบิดของมอเตอร์	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 ปัญหาที่พบและการแก้ไข 13

3.1 การออกแบบฝาครอบชุดเซนเซอร์ 13

3.2 การออกแบบเครื่องวัดแรงบิดของมอเตอร์ 15

3.3 การแก้ไขโปรแกรมส่วนการแสดงผลข้อมูลของบอร์ดควบคุมกลาง 17

บทที่ 4 ผลการทดลอง 21

4.1 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกกับความเร็วรอบมอเตอร์แบบวงเปิด 21

4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 21

4.1.2 วิธีการทดลอง 21

4.2 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกและความเร็วรอบของมอเตอร์ 22

4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 22

4.2.2 วิธีการทดลอง 22

4.2.3 ผลการทดลอง 23

4.3 การทดลองวัดความเร็วของมอเตอร์โดยใช้บอร์ดควบคุมมอเตอร์ 24

4.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 24

4.3.2 วิธีการทดลอง 25

4.2.3 ผลการทดลอง 25

4.4 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกกับความเร็วรอบมอเตอร์แบบวงปิด 26

4.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 26

4.4.2 วิธีการทดลอง 26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่อนุญาตให้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.5 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกกับความเร็วรอบมอเตอร์แบบวงปิด 27

4.5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 27

4.5.2 วิธีการทดลอง 27

4.5.3 ผลการทดลอง 27

4.6 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงดันไฟฟ้า 29

4.6.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 29

4.6.2 วิธีการทดลอง 29

4.6.3 ผลการทดลอง 30

4.7 การทดลองเพื่อเปรียบเทียบการตอบสนองของมอเตอร์เมื่อใช้การควบคุมแบบวงเปิด และวงปิด 31

4.7.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 31

4.7.2 วิธีการทดลอง 31

4.7.3 ผลการทดลอง 31

4.8 การทดลองเพื่อหาสาเหตุความผิดพลาดในการวัดกระแสไฟฟ้าของเซนเซอร์ 33

4.8.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 34

4.8.2 วิธีการทดลอง 34

4.8.3 ผลการทดลอง 34

4.9 การทดลองเพื่อเปรียบเทียบการตอบสนองของมอเตอร์เมื่อใช้การควบคุมแบบวงเปิด และวงปิด 36

4.9.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.9.2 วิธีการทดลอง	36
4.9.3 ผลการทดลอง	37
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	39
5.1 บทสรุปการดำเนินงาน	39
5.2 ปัญหาที่พบในการดำเนินงาน	39
5.3 แนวทางในการพัฒนาโครงการ	40
เอกสารอ้างอิง	41
ภาคผนวก	42
ภาคผนวก ก ผลการทดสอบมอเตอร์โดยใช้การควบคุมแบบวงเปิด	43
ภาคผนวก ข ผลการทดสอบมอเตอร์โดยใช้การควบคุมแบบวงปิด	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมมอเตอร์	3
2.2 ส่วนประกอบของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน	4
2.3 ตัวขับมอเตอร์	5
2.4 แผงวงจรตัวขับมอเตอร์	5
2.5 ลำดับการทำงานของ MOSFET	6
2.6 เซนเซอร์ชนิด Photomicrosensor	6
2.7 แผนภาพบล๊อกการควบคุมพีไอ	7
2.8 สัญญาณเอาต์พุตต่อเวลา	8
2.9 สัญญาณเอาต์พุตต่อเวลา	9
2.10 โฟล์วชาร์ตการทำงานของโปรแกรมควบคุมมอเตอร์	11
2.11 แบบจำลองเครื่องมือวัดแรงยก	12
2.12 แบบจำลองเครื่องมือวัดแรงบิด	12
3.1 แบบจำลอง 3 มิติของฝาครอบเซนเซอร์	13
3.2 ชิ้นงานจริงฝาครอบเซนเซอร์	14
3.3 ระบบควบคุมมอเตอร์หลังติดฝาครอบ	14
3.4 แบบจำลองเครื่องวัดแรงบิดของมอเตอร์เดิม	15
3.5 ชุดทดลองวัดแรงบิดของมอเตอร์เดิม	15
3.6 จำลอง 3 มิติชุดทดสอบแรงบิดมอเตอร์ (ใหม่)	16
3.7 ชุดทดลองวัดแรงบิดของมอเตอร์ (ใหม่)	16
3.8 โปรแกรม Arduino และ Serial Monitor Module	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9 หน้าจอซีเรียลมอนิเตอร์เมื่อได้รับคำสั่งเลือกมอเตอร์	18
3.10 หน้าจอซีเรียลมอนิเตอร์เมื่อคำสั่งเลือกมอเตอร์ไม่ถูกต้อง	18
3.11 หน้าจอซีเรียลมอนิเตอร์เมื่อทำการส่งคำสั่งความเร็ว	19
3.12 หน้าจอซีเรียลมอนิเตอร์เมื่อทำการส่งคำสั่งหยุดฉุกเฉิน	19
3.13 หน้าจอซีเรียลมอนิเตอร์เมื่อทำการส่งคำสั่งเรียกข้อมูลมอเตอร์	20
4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกและความเร็วรอบของมอเตอร์แบบวงเปิด	23
4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์แบบวงเปิด	23
4.3 บอร์ดควบคุมมอเตอร์ในสภาพพร้อมใช้งาน	24
4.4 กราฟแสดงความสมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงและค่าจากเซนเซอร์	25
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกกับความเร็วรอบของมอเตอร์	28
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของมอเตอร์	28
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงดันไฟฟ้า	30
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าซึ่งวัดด้วยเซนเซอร์กับแรงดันไฟฟ้า	32
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าซึ่งวัดด้วยแอมป์มิเตอร์กับแรงดันไฟฟ้า	32
4.10 แผนภาพบล็อกการทำงานของ AD8210	33
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสซึ่งวัดด้วยแอมป์มิเตอร์	35
4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงดันขาออกของ AD8210	35
4.13 ผลตอบสนองชั่วขณะของมอเตอร์ตัวที่ 2 แบบควบคุมวงเปิด	37
4.14 ผลตอบสนองชั่วขณะของมอเตอร์ตัวที่ 2 แบบควบคุมวงปิด	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ | **หน้า**

4.1 ค่าไทม์คอนสแตนท์ของมอเตอร์เมื่อใช้การควบคุมวงเปิดและวงปิด 38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน

ปัจจุบันการสำรวจเหนือพื้นดินในโรงงานอุตสาหกรรม มีความเสี่ยงสูงต่อผู้ทำการสำรวจ อาจเกิดอุบัติเหตุร้ายแรงถึงขั้นทุพลภาพหรืออาจเสียชีวิต และเสียค่าใช้จ่ายจำนวนมากในการสำรวจ เนื่องจากต้องหยุดการทำงานของเครื่องจักรหรือกระบวนการผลิตในส่วนของบริเวณนั้นเป็นเวลานาน ทำให้เสียโอกาสในการผลิตสินค้า หนึ่งในทางออกการแก้ปัญหาดังกล่าวคือ อากาศยานไร้คนขับ *Unmanned Aerial Vehicle (UAV)* ซึ่ง UAV สามารถควบคุมระยะไกลได้จากภาคพื้นดิน ทำให้ลดความเสี่ยงต่อชีวิตในการสำรวจและลดค่าใช้จ่าย เนื่องจากการปิดการทำงานของระบบการผลิตในบริเวณที่สำรวจ

ในปีการศึกษาที่ผ่านมาได้มีการจัดสร้างอากาศยานไร้คนขับชนิดคอปเตอร์สี่ใบพัดหรือควอทโรเตอร์ (Quad Rotor) เอาไว้แล้ว แต่ผลการใช้งานยังไม่เป็นที่น่าพอใจ ทางกลุ่มจึงได้เลือกที่จะเข้ามาศึกษาและดำเนินการแก้ไข โดยส่วนที่เลือกคือระบบควบคุมมอเตอร์ของอากาศยานสี่ใบพัด

1.2 วัตถุประสงค์ในการทำปริญญานิพนธ์

1. ศึกษา ทดสอบ และระบุปัญหาพร้อมวิธีแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบควบคุมมอเตอร์ของอากาศยานไร้คนขับชนิดคอปเตอร์ 4 ใบพัด (UAV Quad Rotors) ที่ศึกษาไว้เดิม
2. พัฒนาโปรแกรมระบบควบคุมมอเตอร์ของอากาศยาน 4 ใบพัด พร้อมกับออกแบบสร้างอุปกรณ์เสริมที่ช่วยให้อุปกรณ์อ่านสัญญาณและส่งข้อมูลอย่างถูกต้อง เพื่อทำให้ระบบควบคุมทำงานได้เที่ยงตรง ทั้งในห้องทดลองและในสภาวะแวดล้อมเปิด

1.3 ขั้นตอนการศึกษาและจัดทำโครงงาน

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมมอเตอร์ และการทำงานของโปรแกรมควบคุมมอเตอร์ที่มีการออกแบบไว้ก่อนหน้า
2. ศึกษาการทำงานของโปรแกรมควบคุมมอเตอร์
3. ศึกษาปัญหาของระบบควบคุมมอเตอร์เดิมและดำเนินการแก้ไข
4. หาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบ แรงยก แรงบิด และกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับกลุ่มที่จะเข้ามาศึกษาการควบคุมการบินของอากาศยานสี่ใบพัด

เอกสารนี้ ... อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน
2. มีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีการควบคุมวงปิดเบื้องต้น
3. มีความรู้ความเข้าใจในการเขียนไมโครคอนโทรลเลอร์ทั้งในตระกูล Arduino และ PIC
4. มีความรู้ความเข้าใจในการสื่อสารข้อมูลด้วยสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์
5. มีทักษะในการคิดแบบเป็นลำดับขั้นตอน และวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นเพื่อหาสาเหตุได้

1.5 ขอบเขตการศึกษา

มุ่งเน้นการแก้ไขปัญหาของระบบควบคุมมอเตอร์ของอากาศยานสี่ใบพัดที่พบในปีการศึกษาที่ผ่านมาเป็นสำคัญ เพื่อให้ระบบควบคุมมอเตอร์สามารถรับคำสั่งและส่งข้อมูลกลับให้กับบอร์ดควบคุมกลางได้อย่างถูกต้อง รวมถึงตรวจสอบคุณสมบัติของระบบควบคุมมอเตอร์ทั้ง 4 ชุด ว่ามีความใกล้เคียงกันมากน้อยเพียงใด สามารถนำไปใช้ในการควบคุมการบินได้หรือไม่

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

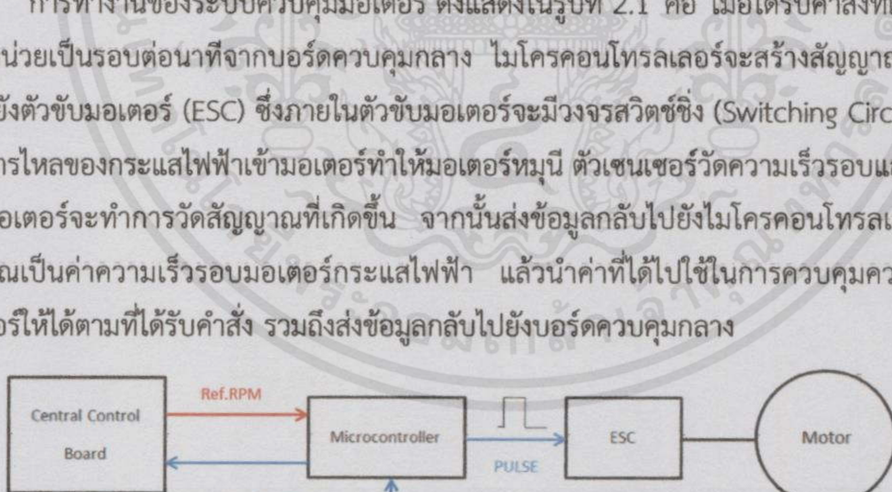
ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

ระบบควบคุมมอเตอร์มีหน้าที่คือ ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้ได้ตามค่าที่ต้องการ อุปกรณ์ในระบบประกอบด้วย มอเตอร์ไร้แปรงถ่าน ตัวขับมอเตอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) เซนเซอร์วัดความเร็วรอบ และเซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า ความสามารถของระบบควบคุมมอเตอร์ ได้แก่

- วัดความเร็วรอบของมอเตอร์
- วัดกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์
- ตรวจสอบสถานะของมอเตอร์
- รับส่งข้อมูลกับบอร์ดควบคุมกลาง

การทำงานของระบบควบคุมมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 คือ เมื่อได้รับคำสั่งที่เป็นค่าความเร็วรอบหน่วยเป็นรอบต่อนาทีจากบอร์ดควบคุมกลาง ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสร้างสัญญาณพัลส์ (Pulse) ส่งไปยังตัวขับมอเตอร์ (ESC) ซึ่งภายในตัวขับมอเตอร์จะมีวงจรสวิตช์ซิ่ง (Switching Circuit) ควบคุมทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าเข้ามอเตอร์ทำให้มอเตอร์หมุนี ตัวเซนเซอร์วัดความเร็วรอบและกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์จะทำการวัดสัญญาณที่เกิดขึ้น จากนั้นส่งข้อมูลกลับไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการคำนวณเป็นค่าความเร็วรอบมอเตอร์กระแสไฟฟ้า แล้วนำค่าที่ได้ไปใช้ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ให้ได้ตามที่ได้รับคำสั่ง รวมถึงส่งข้อมูลกลับไปยังบอร์ดควบคุมกลาง



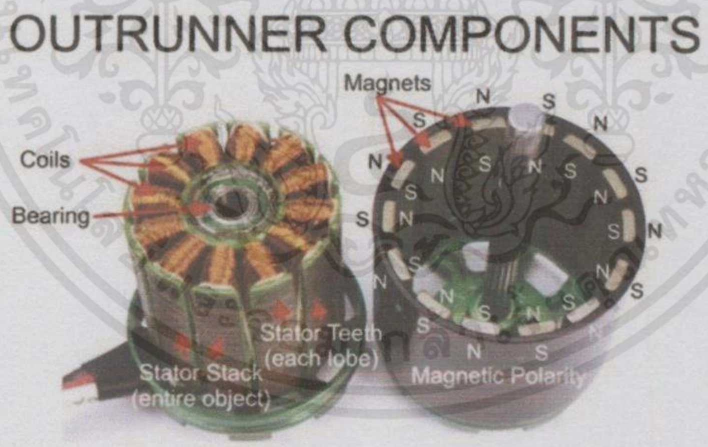
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้าม ... สารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.1 แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมมอเตอร์

2.2 มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน (Brushless DC Motor)

โครงสร้างของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านชนิดหมุนด้านนอก ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ประกอบด้วย สเตเตอร์ (Stator) เป็นขดลวดอาร์เมเจอร์ (Armature Coil) และโรเตอร์ (Rotor) เป็นขั้วแม่เหล็กถาวร ที่ขดลวดอาร์เมเจอร์จะต่อเชื่อมเข้ากับวงจรสวิตช์ซิ่งอิเล็กทรอนิกส์ (Switching Electronics) ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าในขดลวดอาร์เมเจอร์แต่ละเฟส ทำให้โรเตอร์ซึ่งเป็นแม่เหล็กถาวรหมุนตามการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่ขดลวดอาร์เมเจอร์ โดยจะต้องมีลำดับในการสวิตช์ที่เหมาะสม มอเตอร์จึงสามารถหมุนได้ครบรอบ

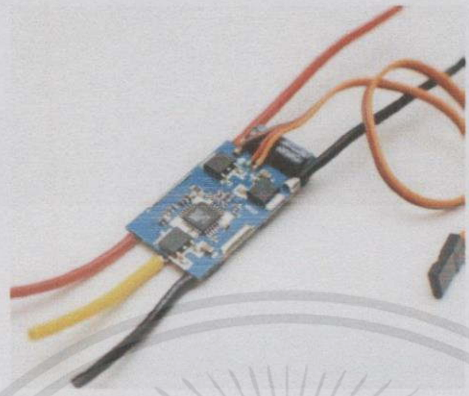
ในการหาลำดับการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่ขดลวดแต่ละเฟสนั้น สามารถทำได้โดยอาศัยหลักการแรงดันต้านกลับจากมอเตอร์ (Back EMF) ที่เกิดขึ้นเมื่อมอเตอร์หมุน โดยสัญญาณแรงดันต้านกลับจากมอเตอร์จะเป็นสัญญาณกระแสสลับ ซึ่งสามารถนำมาหาลำดับในการจ่ายไฟให้ขดลวดแต่ละเฟสได้ แต่เนื่องจากแรงดันต้านกลับจากมอเตอร์จะเกิดขึ้นเมื่อมอเตอร์หมุนเท่านั้น ในตอนที่มอเตอร์ยังหยุดนิ่งจะต้องอาศัยวิธีอื่นในการขับมอเตอร์ให้หมุนเสียก่อน ซึ่งอาจทำได้โดยการสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่ความถี่ต่ำๆ จ่ายให้กับขดลวดก่อน เพื่อให้โรเตอร์หมุนตามช้าๆ จนเกิดสัญญาณแรงดันต้านกลับจากมอเตอร์ที่ชัดเจนเพียงพอในการหาลำดับการจ่ายไฟให้ขดลวด



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบของมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน

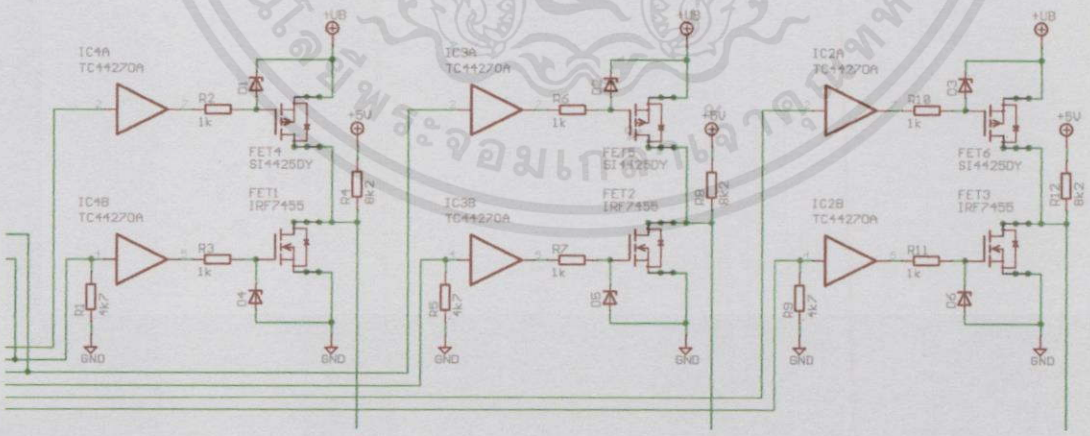
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ตัวขับมอเตอร์ (ESC: Electronic Speed Control)



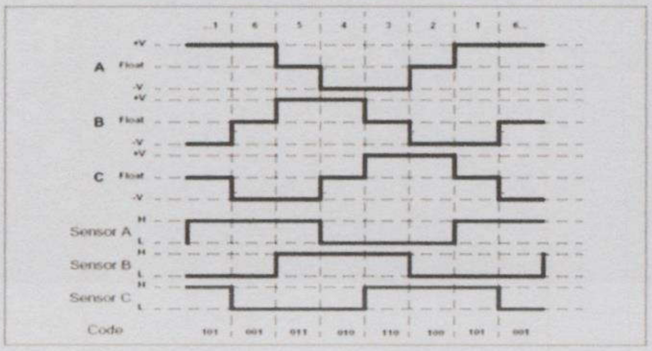
รูปที่ 2.3 ตัวขับมอเตอร์

ตัวขับมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ประกอบด้วย MOSFET 6 ตัว (s1 - s6) และไดโอดต่อขนานกับ MOSFET ทำหน้าที่ป้องกันแรงดันกลับ (Reverse Voltage) ที่เกิดจากความเหนี่ยวนำของขดลวดสเตเตอร์เมื่อมีการสับเปลี่ยนกระแส (Commutation) ในขดลวดตัววัดตาแหน่งของโรเตอร์ H1, H2, H3 จะส่งสัญญาณไปยังตัวถอดรหัสและตัวขับเกต (Sensor Decoder and Gate Drivers) MOSFET จึงทำการตัด-ต่อวงจรตามลำดับโดยมีความถี่เท่ากับความเร็วของโรเตอร์ สนามแม่เหล็กของสเตเตอร์และของโรเตอร์จึงมีความเร็วเท่ากันตลอดเวลาที่ทุกความเร็วของโรเตอร์ ระยะเวลานำกระแสของ MOSFET จะเป็นตัวกำหนดขนาดของแรงบิดของมอเตอร์



รูปที่ 2.4 แผงวงจรตัวขับมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



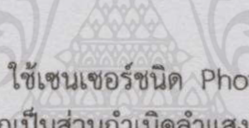
รูปที่ 2.5 ลำดับการทำงานของ MOSFET

การควบคุมชุดขับมอเตอร์ ทำโดยการจ่ายสัญญาณพัลส์โดยสัญญาณพัลส์มีความกว้างอยู่ในช่วง 0.5 – 2 ms ความเร็วของมอเตอร์จะปรับเปลี่ยนไปตามความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่ป้อนให้กับชุดขับมอเตอร์ ถ้าสัญญาณพัลส์มีความกว้าง 2 ms มอเตอร์จะหมุนที่ความเร็วสูงสุด และถ้าสัญญาณพัลส์มีความกว้าง 0.5 ms หรือต่ำกว่ามอเตอร์จะหยุดหมุน

2.4 การวัดความเร็วรอบมอเตอร์

การวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ ใช้เซนเซอร์ชนิด Photomicrosensor (Reflective) ภายในเซนเซอร์ชนิดนี้แบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นส่วนกำเนิดลำแสงอินฟราเรด ส่วนที่สองทำหน้าที่รับแสง ขณะที่ไม่มีแสงตกกระทบเอาต์พุตมีสถานะเป็น Low แต่เมื่อมีแสงตกกระทบเอาต์พุตจะเปลี่ยนสถานะเป็น High ทำการติดกระดาษสะท้อนแสงที่มอเตอร์ในตำแหน่งที่ตรงกับเซนเซอร์ เมื่อมอเตอร์หมุนกระดาษสะท้อนแสงวิ่งผ่านเซนเซอร์ ลำแสงอินฟราเรดจะสะท้อนกับกระดาษกลับไปยังส่วนรับแสงของเซนเซอร์ เมื่อแสงตกกระทบครบ 2 ครั้ง หมายถึงการที่มอเตอร์เคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบ จากนั้นนำค่าผลต่างของเวลาที่แสงกระทบกับกระดาษครั้งที่หนึ่งและครั้งที่สอง (ΔT) มาคำนวณหาความเร็วรอบด้วยสมการที่ (2.1)

$$RPM = \frac{60}{\Delta T} \tag{2.1}$$



รูปที่ 2.6 เซนเซอร์ชนิด Photomicrosensor

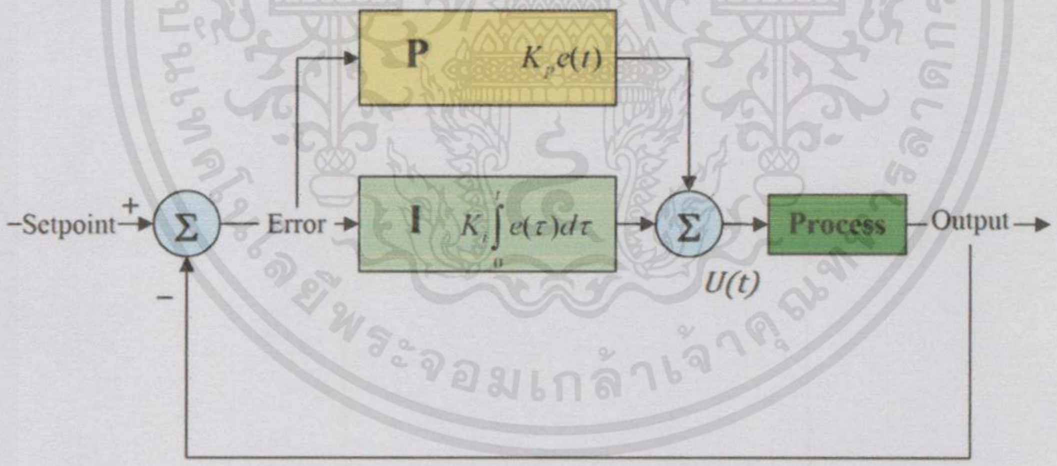
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การวัดกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์

การวัดกระแสไฟฟ้าทำได้โดยอาศัยกฎของโอห์ม คือ เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวต้านทานค่าหนึ่งจะเกิดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นตามสมการ $V = IR$ ดังนั้นการวัดกระแสของวงจรใดๆ จึงสามารถทำได้โดยนำตัวต้านทานสำหรับวัดกระแส (R_{sense}) ไปต่ออนุกรมกับวงจร แล้ววัดความต่างศักย์ที่ตกคร่อม R_{Sense} วงจรเซนเซอร์ก็จะสามารถทราบกระแสไฟฟ้าในวงจรได้ โดยตัวต้านทานนี้จะต้องมีค่าความต้านทานต่ำและสามารถทนกำลังไฟฟ้าได้สูง ซึ่งแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานนี้มีค่าน้อยมากจึงต้องมีการแปลงสัญญาณขยายให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้อยู่ในช่วง 0-5 V เพื่อให้ใช้งานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้

2.6 ตัวควบคุมพีไอ (PI-Controller)

ระบบควบคุมแบบพีไอดี เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้อย่างกว้างขวาง โดยมีหลักการคือ ตัวควบคุมจะรับสัญญาณอ้างอิง (Setpoint) และทำการเปรียบเทียบกับสัญญาณป้อนกลับที่วัดจากระบบได้เป็นค่าความผิดพลาด (Error) ตัวควบคุมจะพยายามลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นให้เหลือน้อยที่สุด โดยการปรับสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ U(t) ให้เหมาะสม ซึ่งในการควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ของอากาศยานสี่ใบพัดใช้เป็นตัวควบคุมแบบพีไอ (PI-Controller)



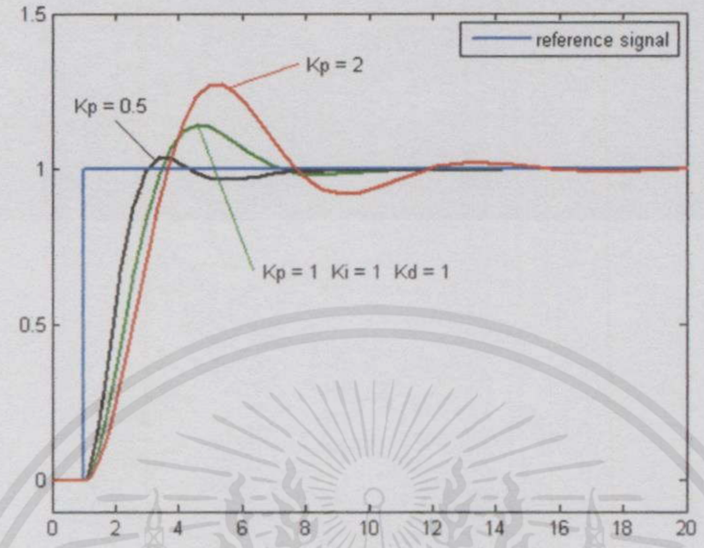
รูปที่ 2.7 แผนภาพบล็อกการควบคุมพีไอ

ตัวแบบควบคุมพีไอ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 มีเทอมที่ใช้ควบคุมทั้งหมด 2 เทอมคือ สัดส่วน (P : Proportional) และปริพันธ์ (I : Integral) ตัวควบคุมพีไอเกิดจากการรวมของตัวกันของเทอมดังกล่าวตามสมการที่ (2.2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$U(t) = P_{out} + I_{out} \tag{2.2}$$

สัดส่วน



รูปที่ 2.8 สัญญาณเอาต์พุตต่อเวลา เมื่อค่า K_p แตกต่างกัน $(K_i = K_d = 1)$

เทอมของสัดส่วนจะเป็นไปตามสมการ (2.3)

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

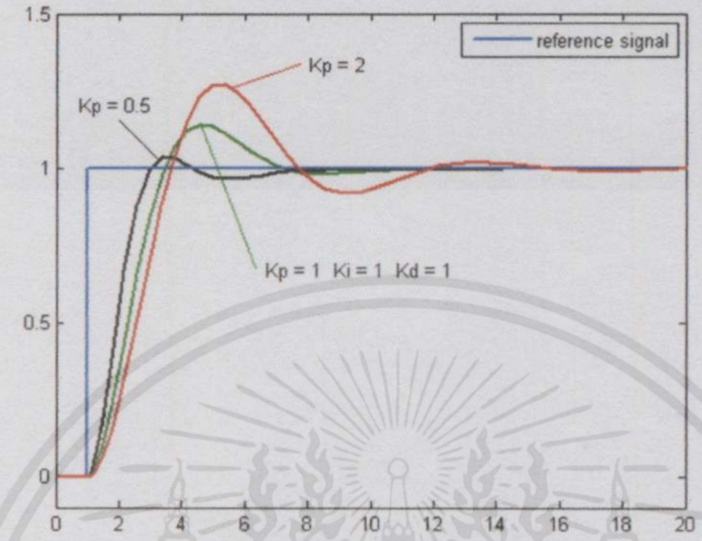
เมื่อ

P_{out} : สัญญาณขาออกของของเทอมสัดส่วน
K_p : อัตราการขยายเทอมสัดส่วน เป็นตัวแปรปรับค่าได้
e : ค่าความผิดพลาด = Setpoint - Output
t : เวลา

เทอมสัดส่วนจะแปรผันตรงกับค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น หากค่าความผิดพลาดมากเทอมสัดส่วนจะมากเช่นกัน ส่งผลให้ระบบเข้าใกล้สัญญาณอ้างอิงเร็วขึ้น แต่หากปรับค่า K_p มากเกินไป ระบบอาจไม่เสถียรได้ และนอกจากนี้หากใช้เพียงเทอมสัดส่วนเพียงอย่างเดียว หากค่าความผิดพลาดเท่ากับศูนย์ (e = 0) จะไม่มีสัญญาณขาเข้า (U(t) = 0) ไปสั่งการระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริพันธ์



รูปที่ 2.9 สัญญาณเอาต์พุตต่อเวลา เมื่อค่า K_i แตกต่างกัน $(K_p = K_d = 1)$

เทอมของสัดส่วนจะเป็นไปตามสมการ (2.4)

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(t)dt \qquad (2.4)$$

เมื่อ

I_{out} : สัญญาณขาออกของของเทอมปริพันธ์
K_i : อัตราการขยายเทอมสัดส่วน เป็นตัวแปรปรับค่าได้
e : ค่าความผิดพลาด = Setpoint - Output
t : เวลา

ผลจากเทอมปริพันธ์ เป็นสัดส่วนของขนาดความผิดพลาดและระยะเวลาของความผิดพลาด ผลรวมของความผิดพลาดในทุกช่วงเวลา (ปริพันธ์ของความผิดพลาด) จะให้ออฟเซตสะสมที่ควรจะเป็นในก่อนหน้าความผิดพลาดสะสม จะถูกคูณโดยอัตราขยายปริพันธ์

เทอมปริพันธ์ (เมื่อรวมกับเทอมสัดส่วน) จะเร่งกระบวนการให้เข้าสู่จุดที่ต้องการและขจัดความผิดพลาดที่เหลืออยู่ที่เกิดจากการใช้เพียงเทอมสัดส่วน แต่อย่างไรก็ตามเทอมปริพันธ์เป็นการตอบสนองต่อความผิดพลาดสะสมในอดีต จึงอาจทำให้ระบบเกิดโอเวอร์ชูต (Overshoot)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การทำงานของโปรแกรมควบคุมมอเตอร์

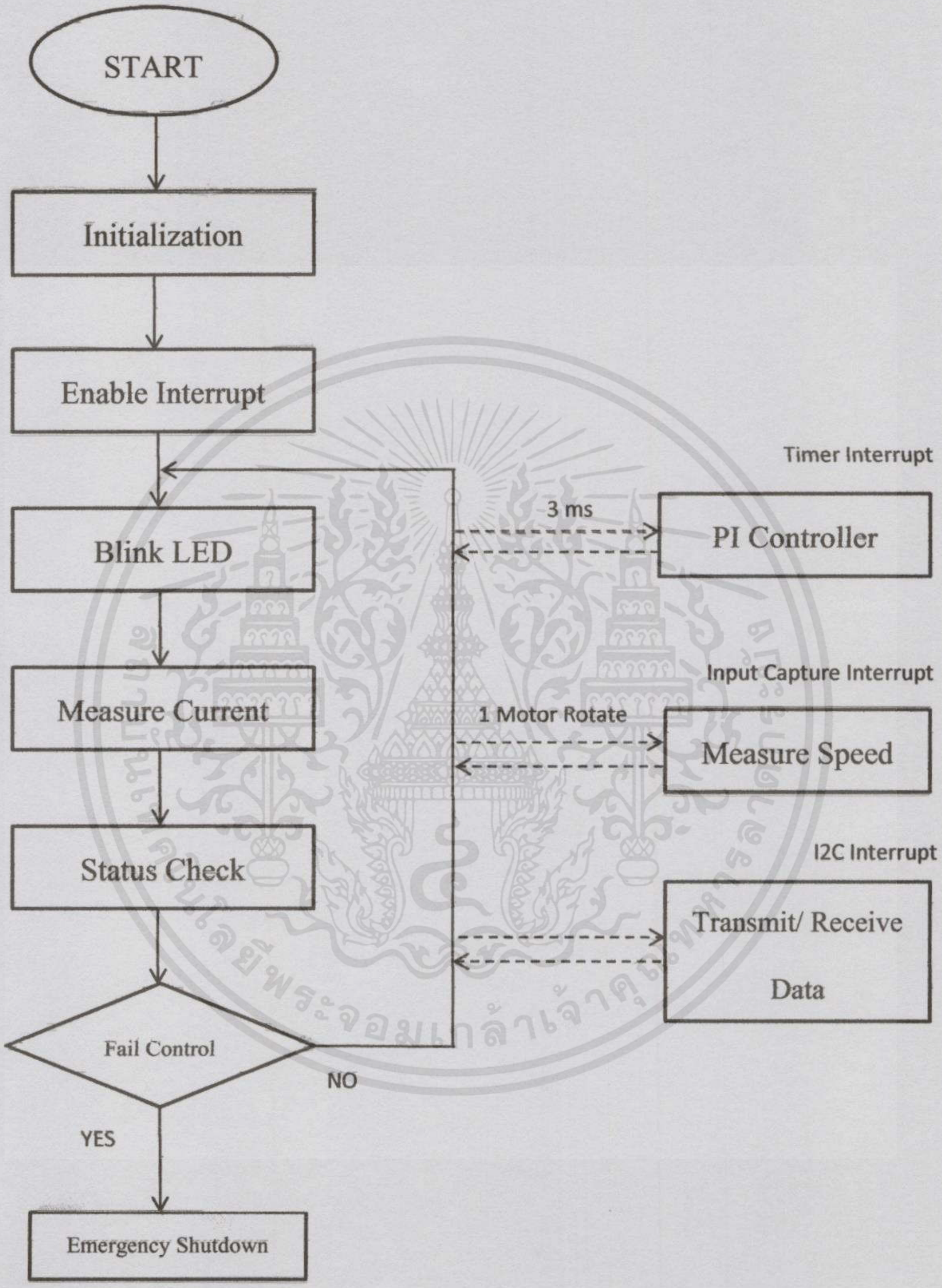
โปรแกรมควบคุมมอเตอร์มีการทำงานคือ เมื่อเริ่มต้นไมโครคอนโทรลเลอร์ จะทำการประกาศตัวแปรต่างๆ ตั้งค่าพอร์ต เปิดใช้งานไทม์เมอร์ (Timer) จากนั้นโปรแกรมจะเข้าสู่เมนลูป (Main Loop) ภายในเมนลูปคำสั่งที่ทำงานคือ กระพริบไฟ LED, วัดกระแสไฟฟ้า และตรวจสอบสถานะของมอเตอร์ นอกจากนี้ในโปรแกรมควบคุมมอเตอร์ยังมีอินเตอร์รัป (Interrupt) อีก 3 ตัวทำงานคู่ขนานกับเมนลูป ได้แก่ ไทม์เมอร์อินเตอร์รัป (Timer Interrupt) ทำงานทุก 3 ms ใช้สำหรับพีไอคอนโทรล (PI Control) อินพุตแคปเจอร์อินเตอร์รัป (Input Capture Interrupt) ทำงานทุกการหมุนของมอเตอร์ 1 รอบ ใช้สำหรับวัดความเร็วรอบของมอเตอร์ และไอสแควร์ซีอินเตอร์รัป (I2C Interrupt) ใช้สำหรับรับส่งข้อมูลกับบอร์ดควบคุมกลาง ทำงานเมื่อมีการเรียกข้อมูลหรือได้รับคำสั่งจากบอร์ดควบคุมกลาง

ในส่วนของการตรวจสอบสถานะของมอเตอร์ ทำได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของมอเตอร์และกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้ ตามสมการที่ (2.5)

$$I = 0.1133e^{0.0007RPM} \tag{2.5}$$

ซึ่งสมการนี้ได้จากการทดลอง ที่ความเร็วรอบใดๆ หากกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้มากกว่าค่าที่ได้จากสมการดังกล่าว แสดงว่ามอเตอร์อาจเกิดการลัดวงจรหรือแรงดันของแบตเตอรี่ตก แต่หากกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้น้อยกว่าค่าที่ได้จากสมการ แสดงว่าใบพัดอาจเกิดความเสียหาย ซึ่งข้อมูลสถานะของมอเตอร์จะถูกเรียกผ่านบอร์ดควบคุมกลาง นอกจากนี้หากความเร็วรอบของมอเตอร์ต่างจากคำสั่งความเร็วอ้างอิง ที่ถูกส่งมาจากบอร์ดควบคุมกลางเกิน 20% เป็นเวลาต่อเนื่องเกิน 600 ms แสดงว่าเกิดความผิดพลาดในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ คำสั่งหยุดฉุกเฉิน (Emergency Shutdown) จะสั่งหยุดการทำงานของมอเตอร์ ซึ่งโฟล์วชาร์ตของโปรแกรมควบคุมมอเตอร์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.10

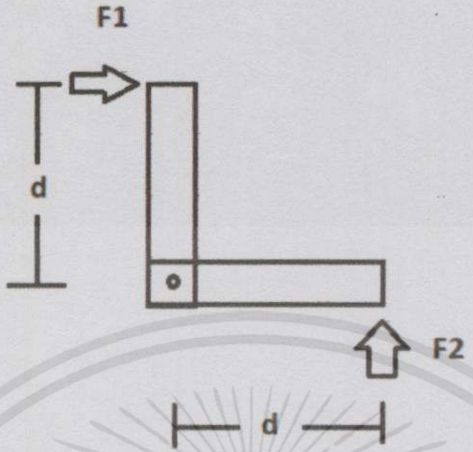
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.10 โฟล์วชาร์ตการทำงานของโปรแกรมควบคุมมอเตอร์

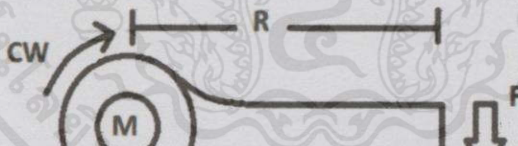
2.8 การวัดแรงยกของมอเตอร์



รูปที่ 2.11 แบบจำลองเครื่องมือวัดแรงยก

การวัดแรงยก (Thrust) ของมอเตอร์ทำได้โดยอาศัยหลักการสมดุลกลคือ เมื่อมีแรง F1 มากระทำกับคานรูปตัว L ดังรูปที่ 2.5 ก็จะเกิดแรงปฏิกิริยา F2 ขึ้น เพื่อรักษาให้ระบบสมดุล ดังนั้นในการวัดแรงยกของมอเตอร์ จะทำการติดตั้งมอเตอร์ที่ตำแหน่ง F1 และติดตั้งตาชั่งที่ตำแหน่ง F2 น้ำหนักที่ตาชั่งอ่านได้ก็คือแรงยกของมอเตอร์นั่นเอง

2.9 การวัดแรงบิดของมอเตอร์



รูปที่ 2.12 แบบจำลองเครื่องมือวัดแรงบิด

การวัดแรงบิด (Torque) ของมอเตอร์ทำได้โดยอาศัยหลักการแรงตามแนวเส้นสัมผัสรอบวงของการหมุน จากรูปที่ 2.6 นำมอเตอร์มาติดบริเวณกึ่งกลางจานกลมรัศมี R ที่สามารถหมุนได้อิสระ และนำตาชั่งมาวัดน้ำหนักที่เกิดขึ้น เมื่อมอเตอร์หมุนจะเกิดแรงบิดขึ้น จานกลมจะหมุนตามทิศทางของแรงบิด (ในที่นี้เป็นทิศตามเข็มนาฬิกา) เมื่อนำตาชั่งมาวัดน้ำหนักที่เกิดขึ้น ก็จะสามารถคำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์ได้โดยสมการ $\tau = R \times F$

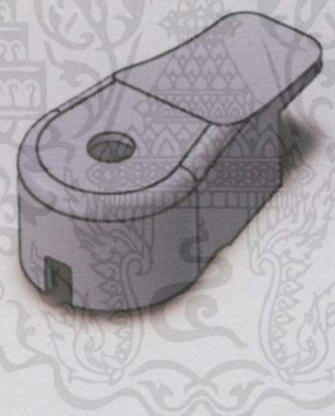
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ปัญหาที่พบและการแก้ไข

3.1 การออกแบบฝาครอบชุดเซนเซอร์

ในการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ ต้องอ้างอิงค่าความเร็วรอบจากเซนเซอร์ เพราะฉะนั้น ความแม่นยำของข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์วัดความเร็วรอบ จึงเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ จากการทดลองนำอากาศยานสี่ใบพัดไปใช้งานในบริเวณที่มีแสงแดดจ้า พบว่าเซนเซอร์วัดความเร็วรอบทำงานผิดปกติ คือ ค่าความเร็วที่อ่านได้ผิดพลาดจากความเป็นจริง เพื่อป้องกันการรบกวนจากแสงภายนอก จึงออกแบบฝาครอบเซนเซอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เพื่อป้องกันแสงภายนอกรบกวน



รูปที่ 3.1 แบบจำลอง 3 มิติของฝาครอบเซนเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำเป็นชิ้นงานจริงโดยการฉีดขึ้นรูป 3 มิติ (3D Print) ได้ชิ้นงานดังรูปที่ 3.2 และเมื่อนำมาครอบชุดเซนเซอร์จะได้ดังรูปที่ 3.3

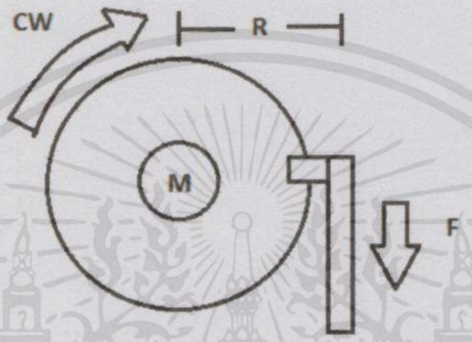
รูปที่ 3.2 ชิ้นงานจริงฝาครอบเซนเซอร์

รูปที่ 3.3 ระบบควบคุมมอเตอร์หลังติดฝาครอบ

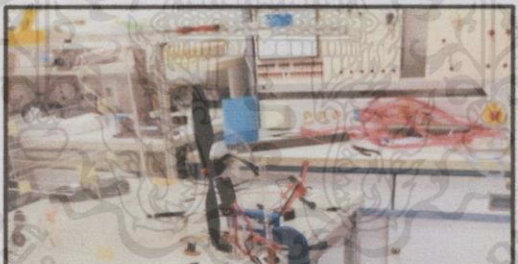
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบเครื่องวัดแรงบิดของมอเตอร์

ในการทดลองหาค่าแรงบิดของมอเตอร์ ได้ทำการออกแบบเครื่องวัดแรงบิดของมอเตอร์ใหม่ เนื่องจากเครื่องวัดแรงบิดมอเตอร์เดิมที่มีอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5 ขณะที่ทำการทดลองแขนที่ใช้วัดแรงกดที่ติดกับตาชั่งนั้นเกิดการสั่น ซึ่งอาจทำให้ผลที่ได้เกิดความคลาดเคลื่อน จึงได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องวัดแรงบิดใหม่ ดังรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7

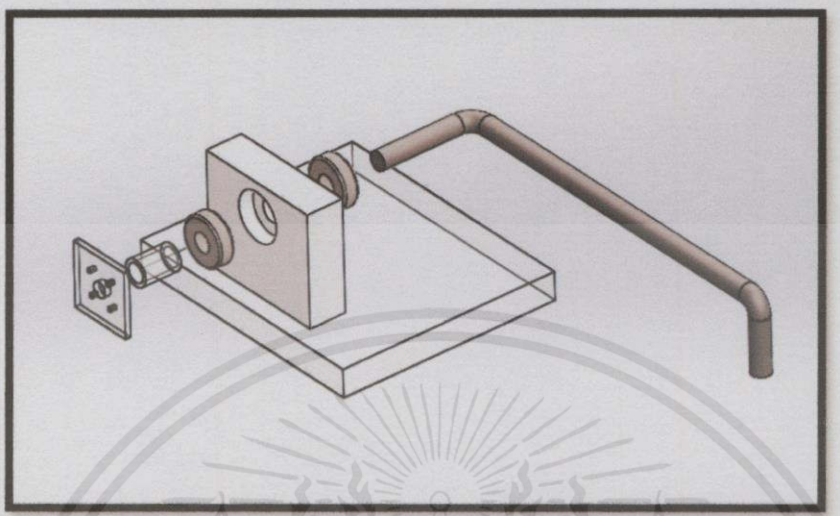


รูปที่ 3.4 แบบจำลองเครื่องวัดแรงบิดของมอเตอร์เดิม



รูปที่ 3.5 ชุดทดลองวัดแรงบิดของมอเตอร์เดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



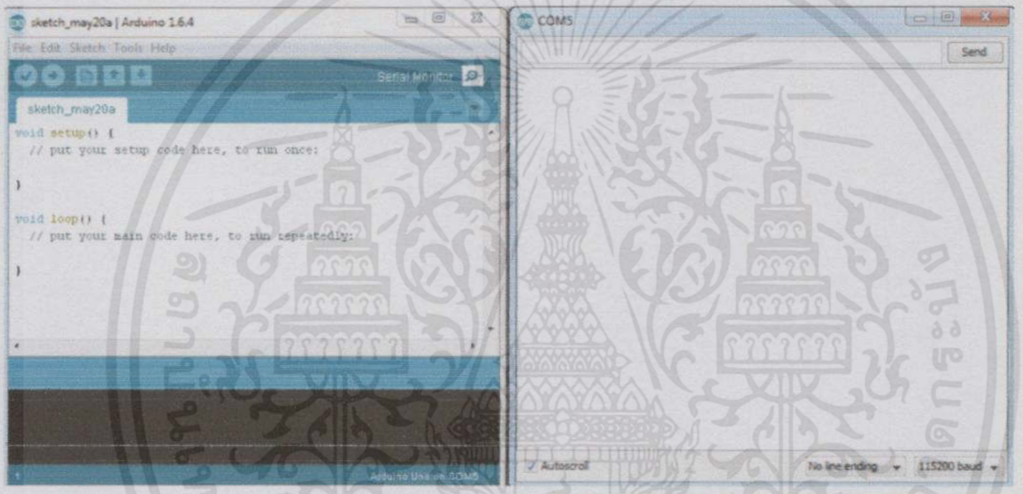
รูปที่ 3.6 จำลอง 3 มิติชุดทดสอบแรงบิดมอเตอร์ (ใหม่)

รูปที่ 3.7 ชุดทดลองวัดแรงบิดของมอเตอร์ (ใหม่)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การแก้ไขโปรแกรมส่วนการแสดงผลข้อมูลของบอร์ดควบคุมกลาง

เนื่องจากสั่งการระบบควบคุมมอเตอร์เดิมนั้น ต้องอาศัยโปรแกรมอินเตอร์เฟส (Interface Program) ที่ถูกเขียนขึ้นมาโดยเฉพาะ ซึ่งไม่พบตัวโปรแกรมหรือซอร์สโค้ด (Source Code) ของโปรแกรมดังกล่าว จึงทำการเขียนตัวอินเตอร์เฟสขึ้นใหม่ และเนื่องจากบอร์ดควบคุมกลางสามารถทำงานกับโปรแกรม Arduino ได้ ดังนั้นการรับคำสั่งความเร็วรอบมอเตอร์และการแสดงผลข้อมูลจากบอร์ดควบคุมมอเตอร์จึงอาศัยโมดูลซีเรียลมอนิเตอร์ (Serial Monitor Module) ดังรูปที่ 3.8 ซึ่งมีมาพร้อมกับโปรแกรม Arduino เป็นหลัก เพื่อให้ง่ายต่อการสั่ง

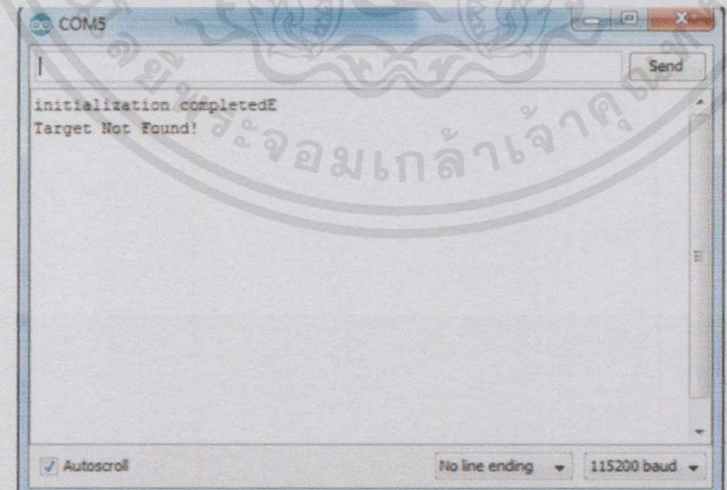


รูปที่ 3.8 โปรแกรม Arduino และ Serial Monitor Module

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของส่วนแสดงผลข้อมูลนั้น ในขั้นตอนแรกผู้ใช้จะต้องทำการเลือกบอร์ดควบคุมมอเตอร์ที่ต้องการสั่งงานซึ่งมีทั้งหมด 4 ตัว คือ 0x11, 0x22, 0x33 และ 0x44 (หมายเลขไอสแควร์ซีแอดเดรส (i2c Address) ของบอร์ดควบคุมมอเตอร์แต่ละตัว) โดย พิมพ์หมายเลขดังกล่าวข้างต้นแล้วตามด้วย "D" จากนั้นกดส่งคำสั่ง (ปุ่ม SEND ในหน้าจอซีเรียลมอนิเตอร์) หากคำสั่งถูกต้องหน้าจอซีเรียลมอนิเตอร์จะแสดงผล "Target Set" ให้ผู้ใช้ทราบ ในรูปที่ 3.9 เป็นตัวอย่างการใช้โดยเลือกบอร์ดควบคุมมอเตอร์ตัวที่ 1 (0x11) แต่ถ้าหากในกรณีคำสั่งไม่ถูกต้อง หน้าจอจะแสดงผล "Target Not Found" ดังรูปที่ 3.10 และผู้ใช้จะต้องพิมพ์คำสั่งใหม่

รูปที่ 3.9 หน้าจอซีเรียลมอนิเตอร์เมื่อได้รับคำสั่งเลือกมอเตอร์

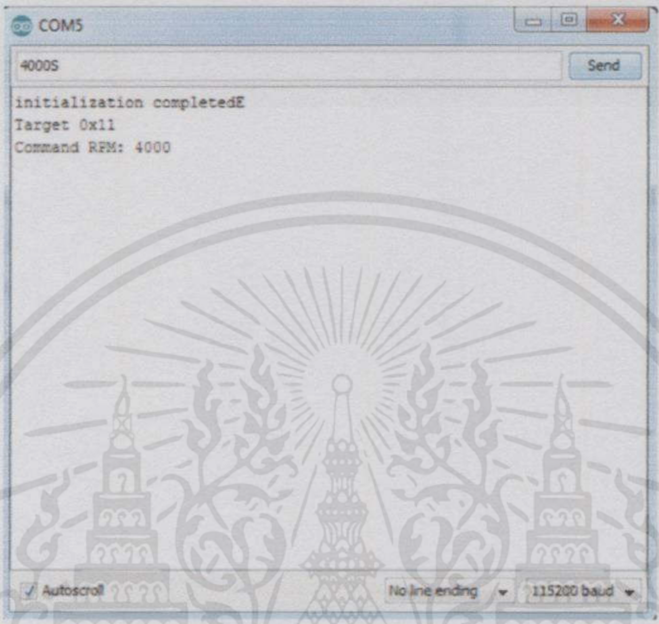


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 3.10 หน้าจอซีเรียลมอนิเตอร์เมื่อคำสั่งเลือกมอเตอร์ไม่ถูกต้อง

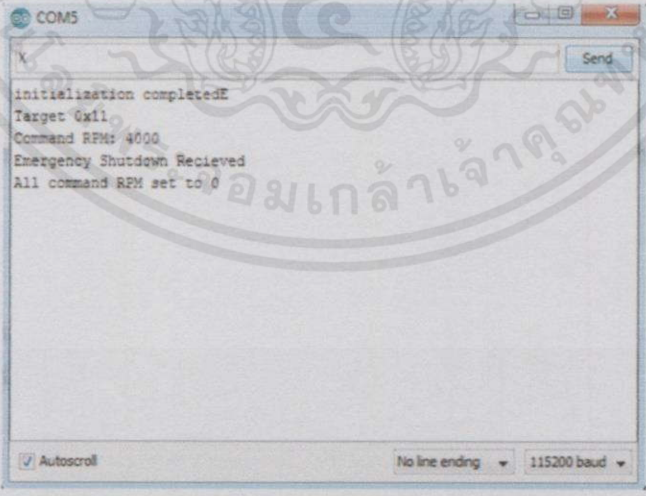
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการสั่งความเร็วรอบของมอเตอร์นั้น ผู้ใช้จะต้องทำการพิมพ์ความเร็วรอบที่ต้องการสั่ง แล้วตามด้วย “S” เช่น 4000S เป็นการสั่งความเร็วมอเตอร์ที่ 4000 รอบต่อนาที หากถูกต้องจะมีข้อความแสดงดังรูปที่ 3.11 และมอเตอร์จะเริ่มหมุน



รูปที่ 3.11 หน้าจอซีเรียลมอนิเตอร์เมื่อทำการส่งคำสั่งความเร็ว

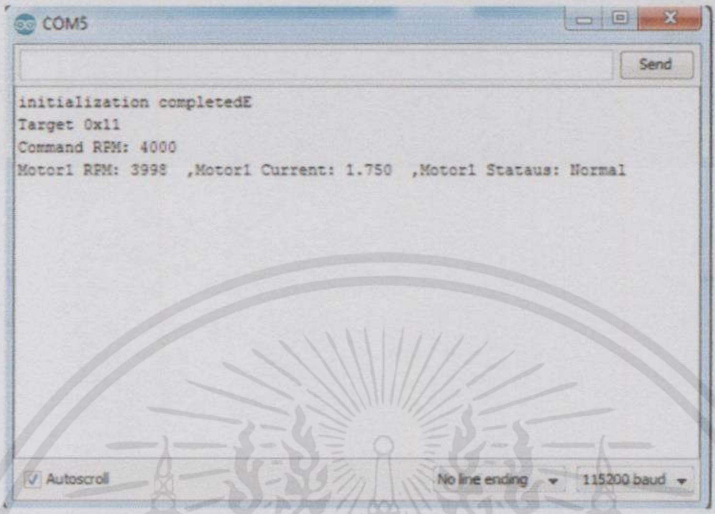
ในการสั่งให้มอเตอร์หยุดฉุกเฉิน (Emergency Stop) ทำได้โดยพิมพ์ “X” โปรแกรมจะทำการส่งคำสั่งหยุดฉุกเฉินไปยังมอเตอร์ทุกตัว ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 หน้าจอซีเรียลมอนิเตอร์เมื่อทำการส่งคำสั่งหยุดฉุกเฉิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการอ่านข้อมูลความเร็วรอบ, กระแสและสถานะของมอเตอร์ ทำได้โดยพิมพ์ “R” จากนั้นโปรแกรมจะทำการแสดงข้อมูลต่างๆ ให้ผู้ใช้ทราบ ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 หน้าจอซีเรียลมอนิเตอร์เมื่อทำการส่งคำสั่งเรียกข้อมูลมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลอง

4.1 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกกับความเร็วรอบมอเตอร์แบบวงเปิด

4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้
2. มอเตอร์ MT2213-935kV พร้อมใบพัดขนาด 1045
3. ตัวขับมอเตอร์
4. ทาโคมิเตอร์ (Tachometer)
5. เครื่องมือวัดแรงยก
6. ตาชั่ง
7. โวลต์มิเตอร์
8. แอมป์มิเตอร์
9. ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)
10. ตัวจ่ายสัญญาณพัลส์

4.1.2 วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งอุปกรณ์เข้ากับเครื่องมือวัดแรงยก

2. จ่ายแรงดันไฟฟ้า 11.1V ให้กับตัวขับมอเตอร์จากนั้นทำการปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์จนมอเตอร์หมุนที่ความเร็ว 2000 RPM โดยอ่านค่าความเร็วรอบด้วยทาโคมิเตอร์

3. เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุน แรงดันไฟฟ้าที่ตัวขับมอเตอร์ได้รับจะต่ำลงเนื่องจากเกิดความสูญเสียเนื่องจากสายไฟ จึงทำการติดตั้งโวลต์มิเตอร์เพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าของตัวขับมอเตอร์ และทำการปรับชดเชยจนเป็น 11.1 V ตามเดิม

4. อ่านค่ากระแสไฟฟ้าจากแอมป์มิเตอร์ อ่านค่าแรงยกจากตาชั่งอ่านค่าความเร็วรอบจากทาโคมิเตอร์และทำการบันทึกผลการทดลอง

5. ปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์จนความเร็วรอบมอเตอร์เพิ่มขึ้น 500 RPM

6. ทำซ้ำ ข้อ 3-5 จนกระทั่งถึงความเร็วรอบ 6000 RPM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบมอเตอร์แบบวงเปิด

4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้
2. มอเตอร์ MT2213-935kV พร้อมใบพัดขนาด 1045
3. ตัวขับมอเตอร์
4. ทาโคมิเตอร์
5. เครื่องมือวัดแรงบิด
6. ตาชั่ง
7. โวลต์มิเตอร์
8. แอมป์มิเตอร์
9. ออสซิลโลสโคป
10. ตัวจ่ายสัญญาณพัลส์

4.2.2 วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งอุปกรณ์เข้ากับเครื่องมือวัดแรงบิดของมอเตอร์

2. จ่ายแรงดันไฟฟ้า 11.1V ให้กับตัวขับมอเตอร์ จากนั้นทำการปรับค่าดิวตี้ไซเคิลของตัวจ่ายพัลส์จนมอเตอร์หมุนที่ความเร็ว 2000 RPM โดยอ่านค่าความเร็วรอบด้วยทาโคมิเตอร์

3. เมื่อมอเตอร์เริ่มหมุน แรงดันไฟฟ้าที่ตัวขับมอเตอร์ได้รับจะต่ำลงเนื่องจากเกิดความสูญเสียจากสายไฟ จึงทำการติดตั้งโวลต์มิเตอร์เพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าของตัวขับมอเตอร์และทำการปรับชดเชยจนเป็น 11.1 V ตามเดิม

4. อ่านค่ากระแสไฟฟ้าจากแอมป์มิเตอร์อ่านค่าแรงบิดจากตาชั่ง อ่านค่าความเร็วรอบจาก Tachometer และทำการบันทึกผลการทดลอง

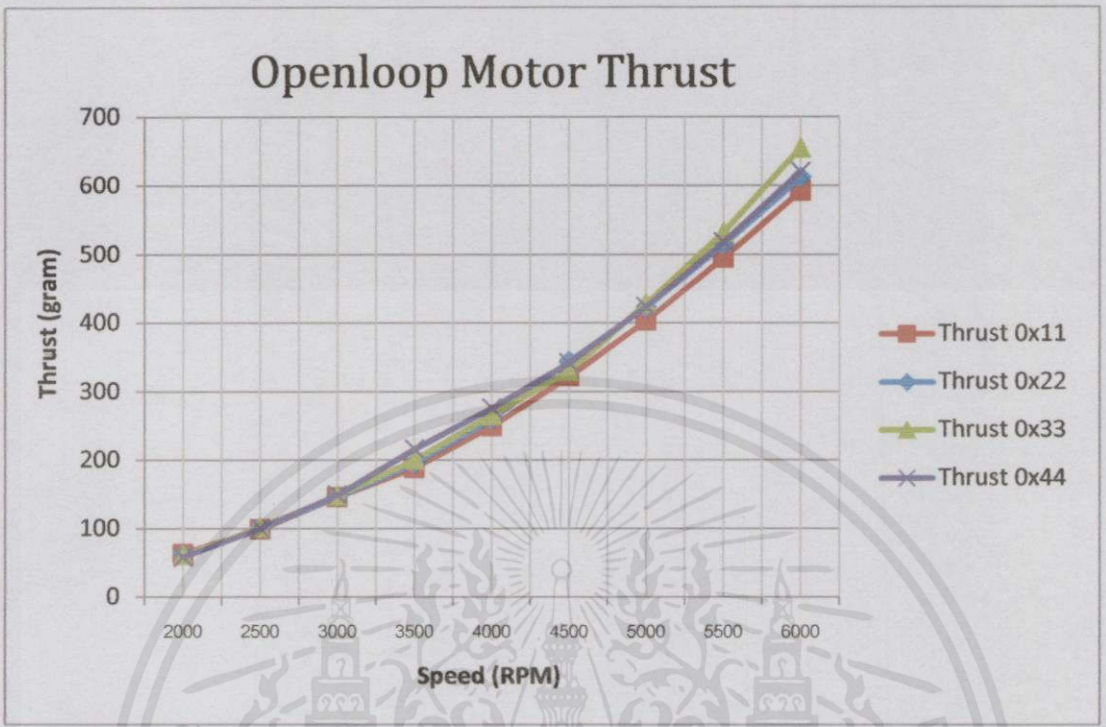
5. ปรับความกว้างของสัญญาณพัลส์จนความเร็วรอบมอเตอร์เพิ่มขึ้น 500 RPM

6. ทำซ้ำ ข้อ 3-5 จนกระทั่งถึงความเร็วรอบ 6000 RPM

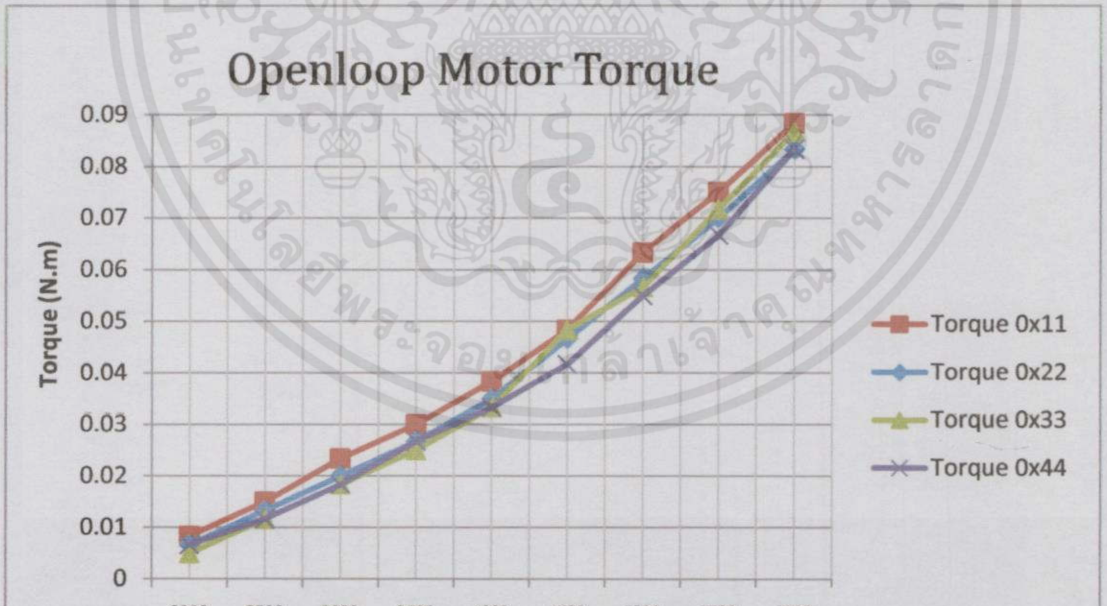
7. ในการวัดแรงบิดต้องแปลงข้อมูลที่ได้ (ในหน่วยกรัม) ให้อยู่ในหน่วยนิวตันเมตร $(N \cdot m)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ผลการทดลอง



รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกและความเร็วรอบของมอเตอร์แบบวงเปิด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ

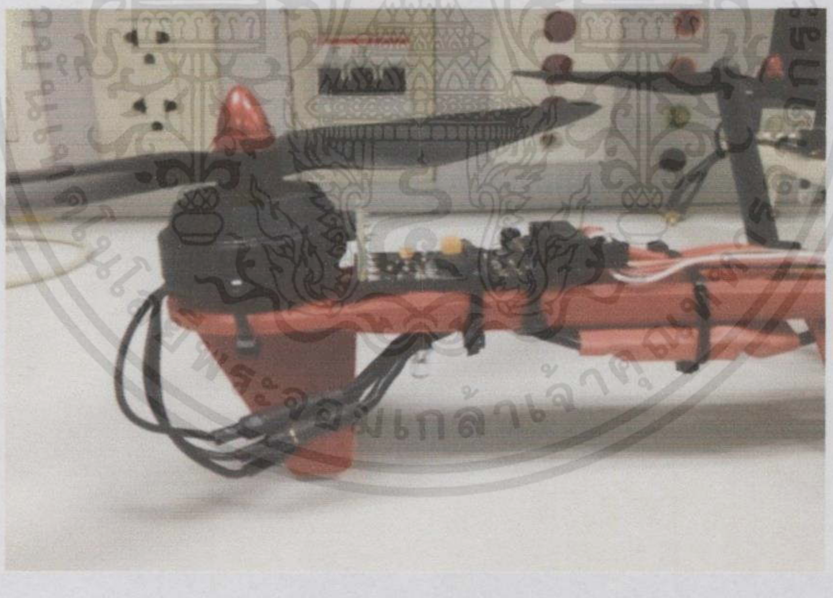
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์แบบวงเปิด

จากกราฟผลการทดลองพบว่า ค่าแรงยกและแรงบิดของมอเตอร์แปรผันตามค่าความเร็วรอบมอเตอร์ และจากการทดสอบมอเตอร์ทั้งสี่ชุดนั้น พบว่าชุดมอเตอร์มีคุณลักษณะในการทำงานที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งตรงกับคุณลักษณะของมอเตอร์ที่ต้องการนำมาใช้งาน

4.3 การทดลองวัดความเร็วรอบมอเตอร์โดยใช้บอร์ดควบคุมมอเตอร์

4.3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้
2. มอเตอร์ MT2213-935kV พร้อมใบพัดขนาด 1045
3. ตัวขับมอเตอร์
4. ทาโคมิเตอร์
5. บอร์ดควบคุมกลางของควอทโรเตอร์
6. บอร์ดควบคุมมอเตอร์
7. โวลต์มิเตอร์
8. คอมพิวเตอร์พร้อมสาย USB



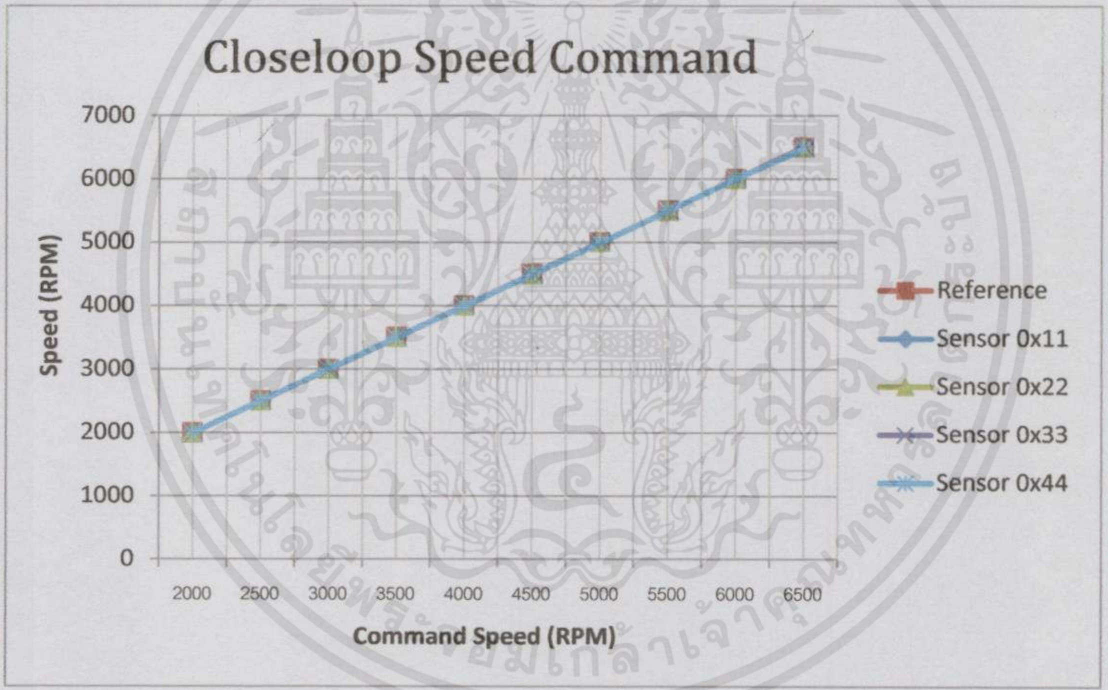
รูปที่ 4.3 บอร์ดควบคุมมอเตอร์ในสภาพพร้อมใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งบอร์ดควบคุมมอเตอร์ ตามรูปที่ 4.3
2. จ่ายไฟ 11.1 V ให้กับตัวขับมอเตอร์จากนั้นทำการสั่งความเร็วรอบผ่านทางคอมพิวเตอร์โดยเริ่มต้นที่ความเร็ว 2000 RPM
3. ทำการอ่านข้อมูลความเร็วรอบจากเซนเซอร์ และทาโคมิเตอร์จากนั้นบันทึกข้อมูลที่อ่านได้
4. เพิ่มคำสั่งความเร็วรอบขึ้น 500 RPM
5. ทำซ้ำข้อ 3-4
6. ทำการทดลองจนถึงความเร็วรอบที่ 6500 RPM

4.3.3 ผลการทดลอง



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบอ้างอิงและค่าจากเซนเซอร์

ผลการทดลองการสั่งความเร็วรอบมอเตอร์ผ่านทางบอร์ดควบคุมกลางของควอทโรเตอร์ พบว่าระบบควบคุมมอเตอร์สามารถใช้งานได้แม่นยำ สามารถอ่านค่าความเร็วรอบและส่งกลับมายังบอร์ดควบคุมกลางเพื่อแสดงผลผ่านทางคอมพิวเตอร์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกกับความเร็วรอบมอเตอร์แบบวงปิด

4.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้
2. มอเตอร์ MT2213-935kV พร้อมใบพัดขนาด 1045
3. ตัวขับมอเตอร์
4. ทาโคมิเตอร์
5. บอร์ดควบคุมกลางของควอทโรเตอร์
6. บอร์ดควบคุมมอเตอร์
7. เครื่องมือวัดแรงยก
8. ตาชั่ง
9. คอมพิวเตอร์ พร้อมสาย USB

4.4.2 วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งอุปกรณ์เข้ากับชุดวัดแรงยก
2. จ่ายไฟ 11.1 V ให้กับตัวขับมอเตอร์จากนั้นทำการสั่งความเร็วรอบผ่านทางคอมพิวเตอร์ โดยเริ่มต้นที่ 2000 RPM
3. อ่านค่ากระแสไฟฟ้าจากเซนเซอร์ อ่านค่าแรงยกจากตาชั่ง และทำการบันทึกค่าที่ได้จากการทดลอง
4. เพิ่มคำสั่งความเร็วรอบขึ้น 500 RPM
5. ทำซ้ำข้อ 3-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบมอเตอร์แบบวงปิด

4.5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้
2. มอเตอร์ MT2213-935kV พร้อมใบพัดขนาด 1045
3. ตัวขับมอเตอร์
4. Tachometer
5. บอร์ดควบคุมกลางของควอทโรเตอร์
6. บอร์ดควบคุมมอเตอร์
7. เครื่องมือวัดแรงบิด
8. ตาชั่ง
9. คอมพิวเตอร์พร้อมสาย USB

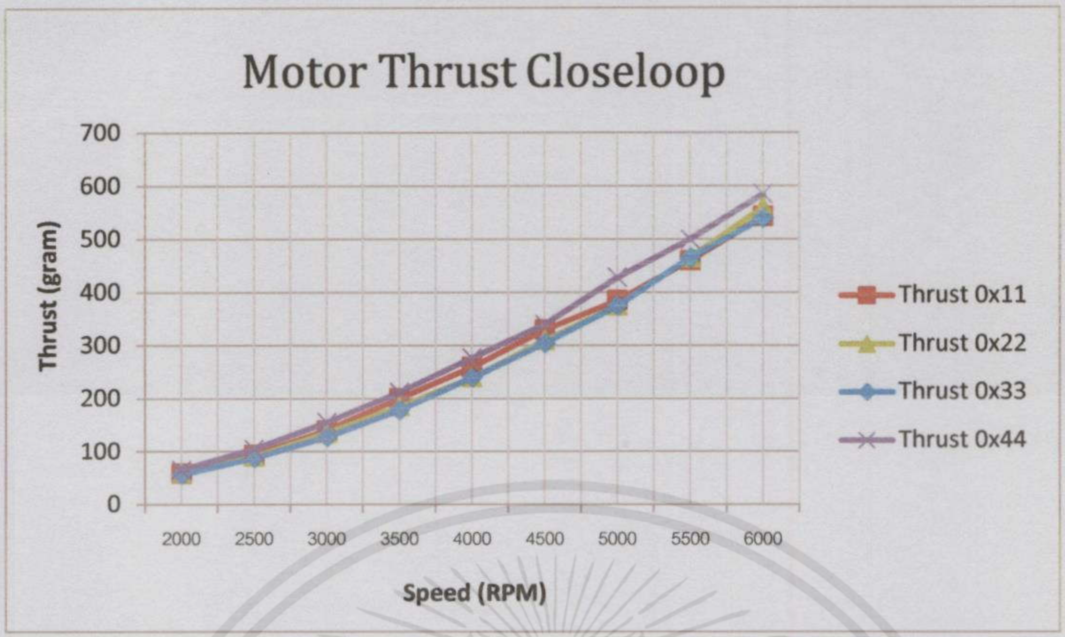
4.5.2 วิธีการทดลอง

1. ติดตั้งอุปกรณ์เข้ากับชุดวัดแรงยก
2. จ่ายไฟ 11.1 V ให้กับตัวขับมอเตอร์ จากนั้นทำการสั่งความเร็วรอบผ่านทางคอมพิวเตอร์โดยเริ่มต้นที่ 2000 RPM
3. อ่านค่ากระแสไฟฟ้าจากเซนเซอร์ และอ่านค่าแรงยกจากตาชั่ง และทำการบันทึกค่าที่ได้จากผลการทดลอง
4. เพิ่มคำสั่งความเร็วรอบขึ้น 500 RPM
5. ทำซ้ำข้อ 3-4

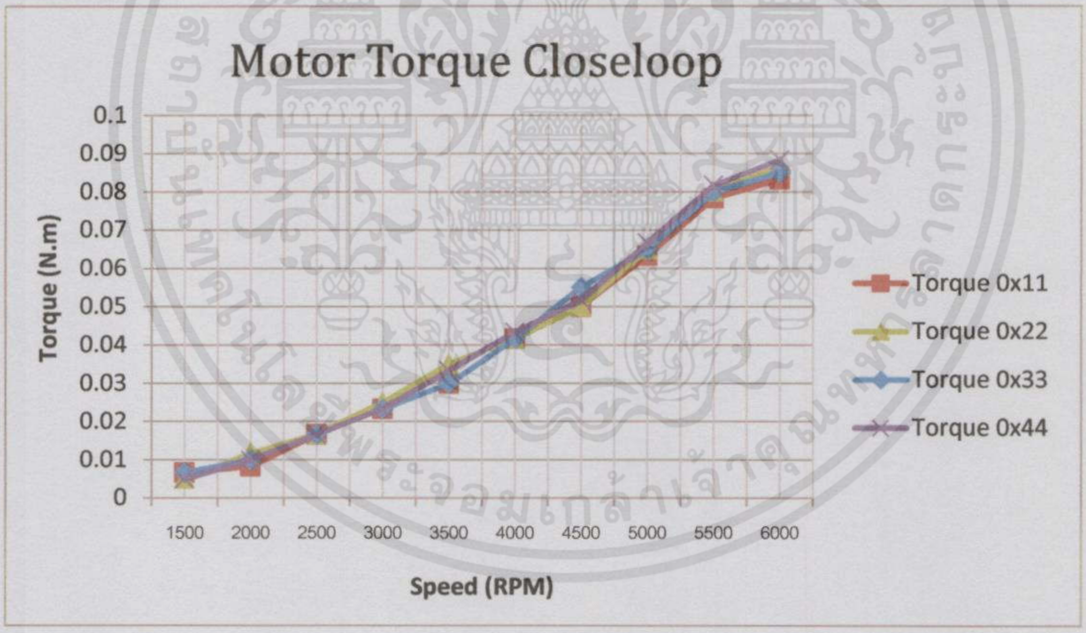
4.5.3 ผลการทดลอง

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกกับความเร็วรอบของมอเตอร์ ในรูปที่ 4.6 และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของมอเตอร์ในรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าทั้งแรงบิดและแรงยกแปรผันตามค่าความเร็วรอบมอเตอร์ ซึ่งแนวโน้มการเพิ่มขึ้นนั้นเป็นแบบเดียวกับการควบคุมแบบวงเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงยกกับความเร็วรอบของมอเตอร์



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงดันไฟฟ้าที่ลดลง

4.6.1 อุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง

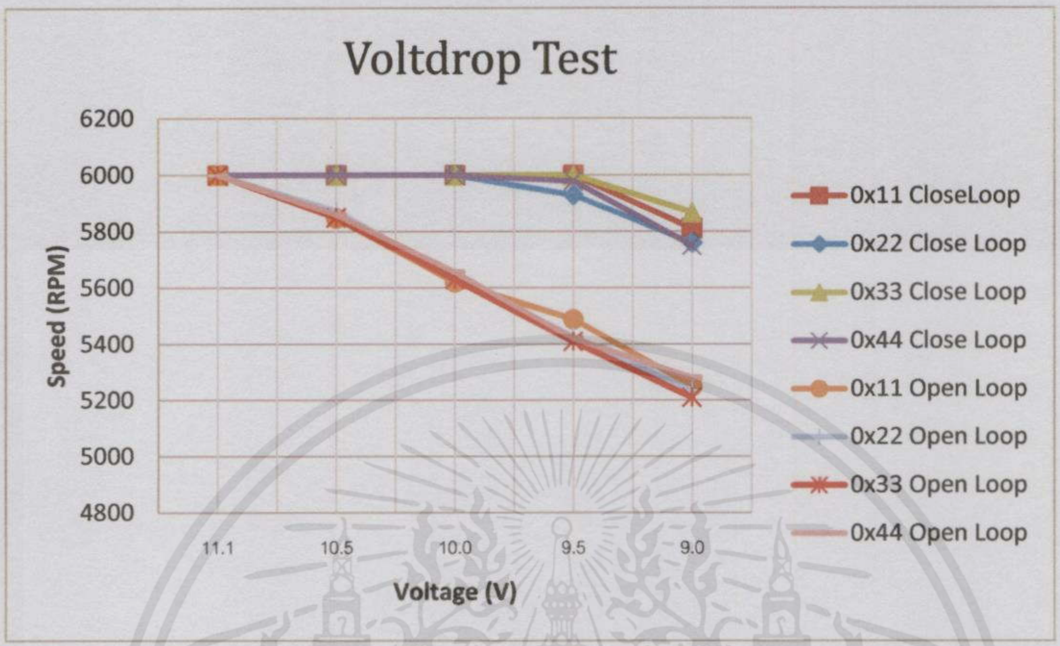
1. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้
2. มอเตอร์ MT2213-935kV พร้อมใบพัดขนาด 1045
3. ตัวขับมอเตอร์
4. Tachometer
5. บอร์ดควบคุมกลางของควอทโรเตอร์
6. บอร์ดควบคุมมอเตอร์
7. โวลต์มิเตอร์
8. ตัวจ่ายสัญญาณพัลส์
9. คอมพิวเตอร์ พร้อมสาย USB

4.6.2 วิธีการทดลอง

1. จ่ายไฟ 11.1 V ให้กับตัวขับมอเตอร์ โดยติดตั้งโวลต์มิเตอร์ไว้ที่ขั้วตัวขับมอเตอร์เพื่ออ่านแรงดันไฟฟ้า จากนั้นทำการสั่งความเร็วรอบผ่านทาง คอมพิวเตอร์ที่ 6000 RPM คงที่
2. ทำการอ่านข้อมูลความเร็วรอบ จากเซนเซอร์และทาโคมิเตอร์ จากนั้นบันทึกข้อมูลความเร็วรอบที่อ่านได้
3. ทำการลดแรงดันไฟฟ้าลง 0.5 V โดยอ่านจากโวลต์มิเตอร์
4. ทำซ้ำข้อ 2-3 จนถึง 7.5 V
5. เปลี่ยนเป็นการทดลองแบบระบบควบคุมวงเปิด โดยปลดบอร์ดควบคุมมอเตอร์ออก แล้วเปลี่ยนเป็นตัวจ่ายพัลส์แทน
6. ทำการปรับพัลส์จนกระทั่งทาโคมิเตอร์อ่านความเร็วรอบได้ 6000 RPM
7. ทำการลดแรงดันไฟฟ้าลง 0.5 V โดยอ่านจากโวลต์มิเตอร์
8. ทำการอ่านข้อมูลความเร็วรอบ จาก Tachometer
9. ทำซ้ำข้อ 7-8 จนถึง 7.5 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6.3 ผลการทดลอง



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงดันไฟฟ้า

จากผลการทดลองพบว่า หากเป็นการควบคุมแบบวงเปิด เมื่อทำการลดแรงดันไฟฟ้าลง ความเร็วรอบของมอเตอร์จะลดลงอย่างเป็นเชิงเส้น แต่หากใช้การควบคุมแบบวงปิดจะสามารถรักษาความเร็วรอบให้คงที่ไว้ได้จนกระทั่งถึงแรงดันไฟฟ้าที่ 9.5 V ดังแสดงในรูปที่ 4.7 แต่หากแรงดันลดต่ำลงกว่านั้น แม้จะใช้การควบคุมวงปิดก็ตามความเร็วรอบของมอเตอร์จะลดลงด้วยอัตราเดียวกันกับการควบคุมแบบวงเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่ลดลง

4.7.1 อุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้
2. มอเตอร์ MT2213-935kV พร้อมใบพัดขนาด 1045
3. ตัวขับมอเตอร์
4. บอร์ดควบคุมกลางของควอทโรเตอร์
5. บอร์ดควบคุมมอเตอร์
6. โวลต์มิเตอร์
7. แอมป์มิเตอร์
8. คอมพิวเตอร์พร้อมสาย USB

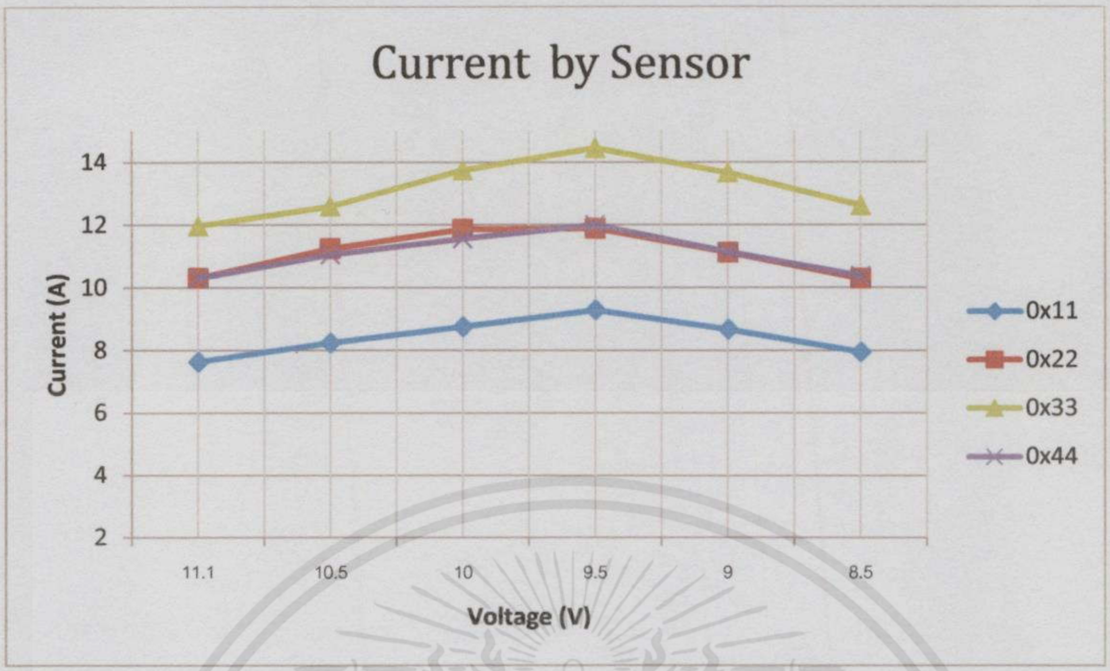
4.7.2 วิธีการทดลอง

1. จ่ายไฟ 11.1 V ให้กับตัวขับมอเตอร์ โดยติดตั้งโวลต์มิเตอร์ไว้ที่ตัวขับมอเตอร์ เพื่ออ่านแรงดันไฟฟ้า จากนั้นทำการสั่งความเร็วรอบผ่านทางคอมพิวเตอร์ที่ 6000 RPM คงที่
2. ทำการอ่านข้อมูลความเร็วรอบด้วยเซนเซอร์ อ่านข้อมูลกระแสไฟฟ้าด้วยเซนเซอร์และแอมป์มิเตอร์ จากนั้นบันทึกข้อมูลที่อ่านได้
3. ทำการลดแรงดันไฟฟ้าลง 0.5 V โดยอ่านจากโวลต์มิเตอร์
4. ทำซ้ำข้อ 2-3 จนถึง 8.5 V

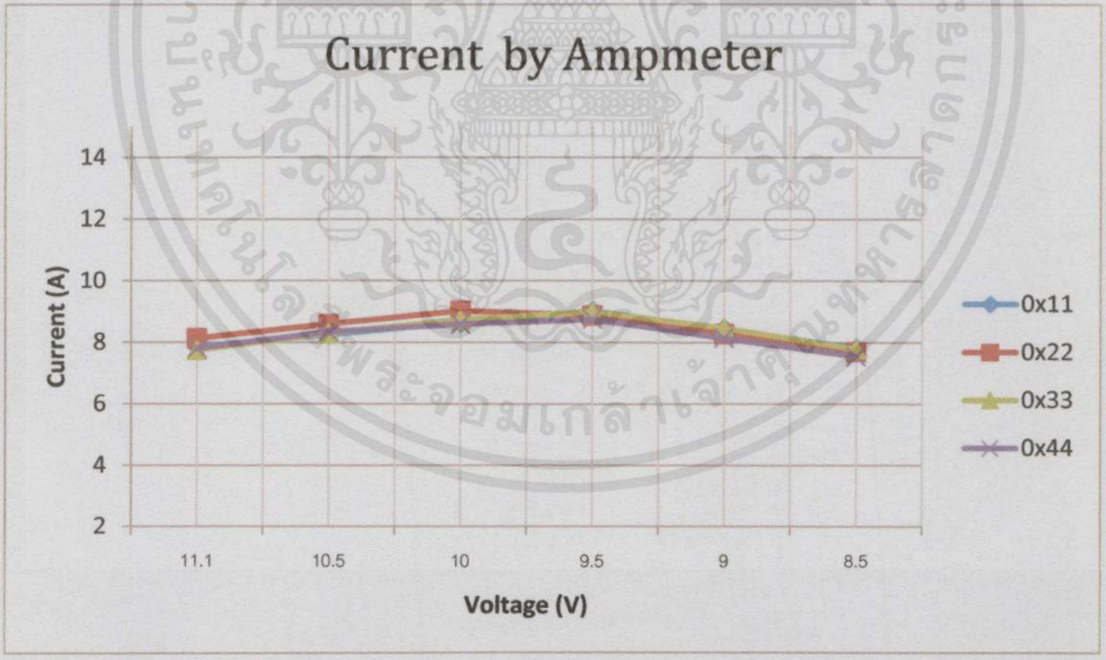
4.7.3 ผลการทดลอง

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 พบว่าในการทดลองทั้ง 4 ครั้งแอมป์มิเตอร์สามารถวัดกระแสที่มอเตอร์ใช้ได้ใกล้เคียงกัน แต่เซนเซอร์ทั้ง 4 ตัวมีเพียงตัวเดียวที่สามารถอ่านค่ากระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้ใกล้เคียงกับการค่าที่ได้จากแอมป์มิเตอร์คือ เซนเซอร์ของบอร์ด 0x11 ซึ่งบอร์ดควบคุมมอเตอร์ทุกตัวใช้ชุดคำสั่งการวัดกระแสเหมือนๆ กัน จึงสันนิษฐานว่าปัญหาที่เกิดขึ้นน่าจะไม่ได้มาจากซอร์ฟแวร์ จึงได้ทำการทดลองเพื่อหาสาเหตุความผิดพลาดของการวัดข้อมูลกระแสไฟฟ้าดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันฟ้าและกระแส จะเห็นได้ว่าเมื่อลดแรงดันไฟฟ้าลงกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้จะเพิ่มขึ้น จนถึงสูงสุดที่ 9.5 V จากนั้นการใช้กระแสจะต่ำลง ซึ่งเป็นค่าแรงดันเดียวกันกับที่ความเร็วรอบของมอเตอร์เริ่มตก จึงสามารถสรุปได้ว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าตกไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งให้ตัวขับมอเตอร์ดึงกระแสเพิ่ม เพื่อสร้างแรงบิดชดเชยให้มอเตอร์สามารถหมุนด้วยความเร็วรอบตามคำสั่งที่ได้รับ เมื่อไม่สามารถดึงกระแสเพิ่มได้อีกความเร็วรอบจึงจะเริ่มตก



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าซึ่งวัดด้วยเซนเซอร์กับแรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าซึ่งวัดด้วยแอมป์มิเตอร์กับแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

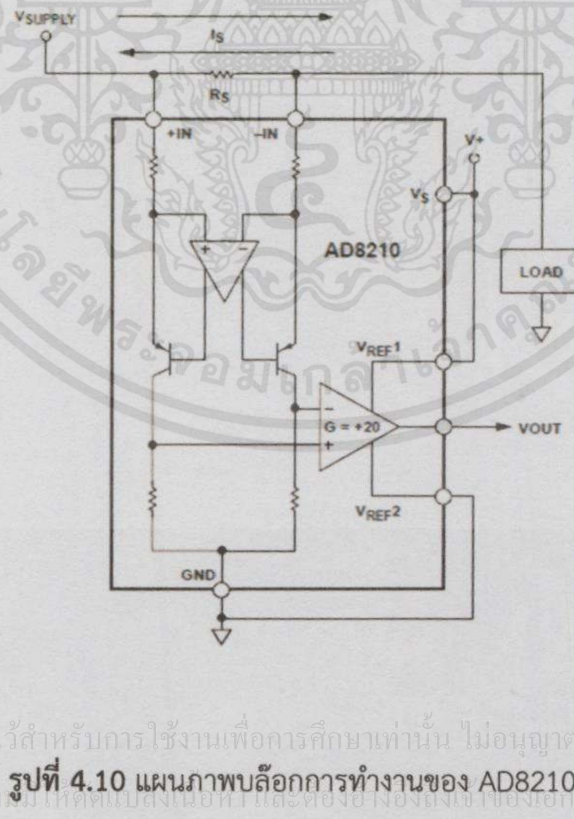
4.8 การทดลองเพื่อหาสาเหตุความผิดพลาดในการวัดกระแสไฟฟ้าของเซนเซอร์

ในการวัดกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้นั้น มีองค์ประกอบที่เกี่ยวข้อง คือ

1. ตัวต้านทานสำหรับวัดกระแส (R_s)
2. เซนเซอร์วัดกระแสไฟฟ้า AD8210
3. ไมโครคอนโทรลเลอร์ของบอร์ดควบคุมมอตอร์

เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วตัวต้านทานและไมโครคอนโทรลเลอร์มักมีความทนทานสูง สามารถทนอุณหภูมิสูงหรือกระแสไฟฟ้าเกินพิกัดได้ชั่วขณะหนึ่งโดยไม่เกิดความเสียหาย ดังนั้นข้อสันนิษฐานเบื้องต้นคือ เซนเซอร์ AD8210 ทำงานผิดพลาด ในรูปที่ 4.10 แสดงรูปแผนภาพบล๊อกการทำงานของ AD8210 ซึ่งการทำงานคือ เมื่อมีกระแสไหลในวงจร (I_s) ตัวเซนเซอร์จะอ่านความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวต้านทานสำหรับวัดกระแสทางขาเข้า ($+IN$, $-IN$) และผ่านวงจรขยายสัญญาณภายใน ก่อนจะออกทางขา V_{out} ซึ่งต่อเข้ากับขาแปลงสัญญาณอนาลอคเป็นดิจิตอล (A/D Converter) ของไมโครคอนโทรลเลอร์

ในการทดลอง ทำการวัดค่าความต่างศักย์ขาออก V_{out} ซึ่งหากเซนเซอร์ทำงานถูกต้อง ที่กระแสไฟฟ้าเท่ากัน ค่า V_{out} ที่วัดได้จะต้องเท่ากัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.10 แผนภาพบล๊อกการทำงานของ AD8210

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8.1 อุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้
2. มอเตอร์ MT2213-935kV พร้อมใบพัดขนาด 1045
3. ตัวขับมอเตอร์
4. บอร์ดควบคุมกลางของควอทโรเตอร์
5. บอร์ดควบคุมมอเตอร์
6. โวลต์มิเตอร์
7. แอมป์มิเตอร์
8. คอมพิวเตอร์พร้อมสาย USB

4.8.2 วิธีการทดลอง

1. จ่ายไฟ 11.1 V ให้กับตัวขับมอเตอร์ โดยติดตั้งโวลต์มิเตอร์ไว้ที่ขาสัญญาณออกของ AD8210 จากนั้นทำการสั่งความเร็วรอบผ่านทางคอมพิวเตอร์ โดยเริ่มต้นที่ 2000 RPM
2. ทำการอ่านข้อมูลความเร็วรอบจากเซนเซอร์ อ่านข้อมูลกระแสจากแอมป์มิเตอร์ และอ่านข้อมูลแรงดันขาออกของ AD8210 ด้วยโวลต์มิเตอร์
3. เพิ่มคำสั่งความเร็วรอบขึ้น 500 RPM
4. ทำซ้ำข้อ 2-3 จนถึงความเร็ว 6000 RPM

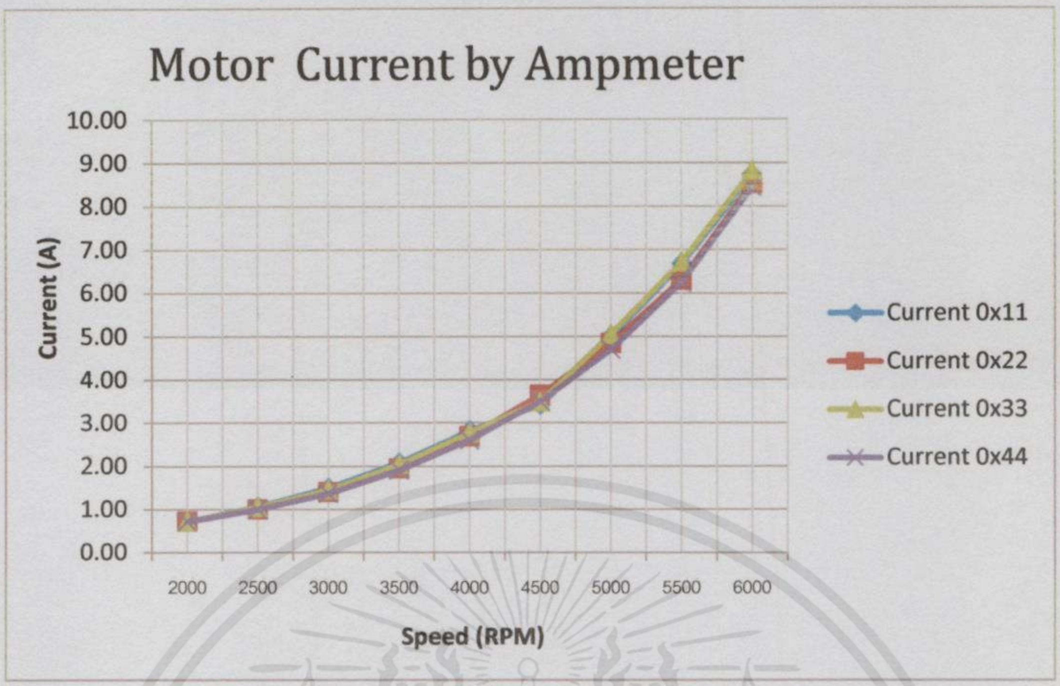
4.8.3 ผลการทดลอง

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.11 พบว่าแอมป์มิเตอร์สามารถวัดกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้ออกมาใกล้เคียงกันมากทั้ง 4 ตัว สัญญาณแรงดันขาออกของเซนเซอร์วัดกระแสจึงน่าจะใกล้เคียงกัน แต่ในรูปที่ 4.12 ซึ่งเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกของเซนเซอร์ผลที่ได้กลับแตกต่างกัน โดยเฉพาะที่ความเร็วรอบสูงๆ (มอเตอร์ใช้กระแสไฟฟ้ามาก)

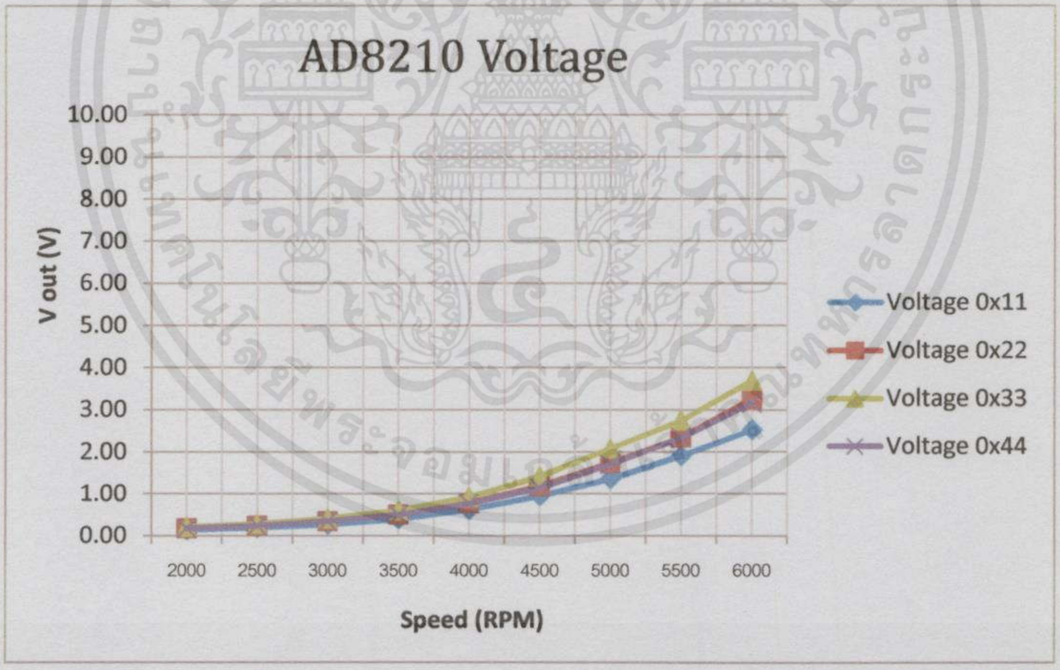
ในการทดลองนี้พบว่าเซนเซอร์ของบอร์ดควบคุมมอเตอร์ 0x33 วัดแรงดันไฟฟ้าได้มากที่สุด เซนเซอร์ของบอร์ดควบคุมมอเตอร์ 0x22 และ 0x44 วัดแรงดันไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกัน เซนเซอร์ของบอร์ดควบคุมมอเตอร์ 0x11 วัดแรงดันไฟฟ้าได้น้อยที่สุด ซึ่งตรงกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.7 (รูปที่ 4.8) คือเซนเซอร์ของบอร์ดควบคุมมอเตอร์ 0x33 วัดกระแสได้มากที่สุด เซนเซอร์ของบอร์ดควบคุมมอเตอร์ 0x22 และ 0x44 วัดกระแสได้ใกล้เคียงกัน เซนเซอร์ของบอร์ดควบคุมมอเตอร์ 0x11 วัดกระแสได้น้อยที่สุด

จากเหตุผลดังกล่าวจึงสามารถสรุปได้ว่าเซนเซอร์ AD8210 ของบอร์ดควบคุมมอเตอร์ 0x22 0x33 และ 0x44 ทำงานผิดพลาด ซึ่งหากจะนำระบบควบคุมมอเตอร์เหล่านี้ไปใช้งาน ควรจะดำเนินการแก้ไขปัญหาเสียก่อน

ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับกระแสซึ่งวัดด้วยแอมป์มิเตอร์



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบกับแรงดันขาออกของ AD8210

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9 การทดลองเพื่อเปรียบเทียบการตอบสนองของมอเตอร์เมื่อใช้การควบคุมแบบวงเปิดและวงปิด

4.9.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงปรับค่าได้
2. มอเตอร์ MT2213-935kV พร้อมใบพัดขนาด 1045
3. ตัวขับมอเตอร์
4. ทาโคมิเตอร์
5. บอร์ดควบคุมกลางของควอทโรเตอร์
6. บอร์ดควบคุมมอเตอร์
7. ออสซิลโลสโคป
8. ตัวจ่ายสัญญาณพัลส์
9. คอมพิวเตอร์ พร้อมสาย USB

4.9.2 วิธีการทดลอง

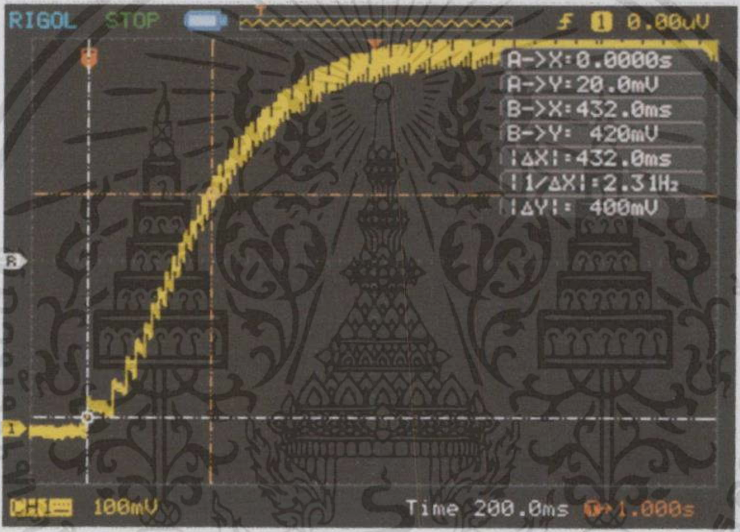
1. เริ่มต้นทดลองโดยใช้การควบคุมแบบวงเปิดจ่ายไฟ 11.1 V ให้กับตัวขับมอเตอร์ จากนั้นทำการจ่ายสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้าง 2 ms (ค่าสูงสุดที่ตัวขับมอเตอร์ตอบสนอง) ให้กับตัวขับมอเตอร์
2. ทำการอ่านความเร็วรอบที่สภาวะเข้าสู่สมดุล (Steady State) จากทาโคมิเตอร์
3. หาค่าไทม์คอนสแตนท์ (Time Constant) ของมอเตอร์โดยดูจากผลตอบสนองชั่วขณะ (Transient Respond) ซึ่งวัดได้ด้วยออสซิลโลสโคป
4. เปลี่ยนเป็นใช้การควบคุมวงปิดโดยเปลี่ยนตัวจ่ายพัลส์เป็นบอร์ดควบคุมมอเตอร์
5. ทำการสั่งความเร็วรอบผ่านบอร์ดควบคุมกลางด้วยความเร็วเดียวกันกับที่อ่านได้จากการทดลองโดยใช้การควบคุมแบบวงเปิด
6. หาค่าไทม์คอนสแตนท์ของมอเตอร์โดยดูจากออสซิลโลสโคป
7. เปรียบเทียบค่าไทม์คอนแสตนท์ที่ได้ ระหว่างการใช้การควบคุมแบบวงเปิดและการใช้การควบคุมแบบวงปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

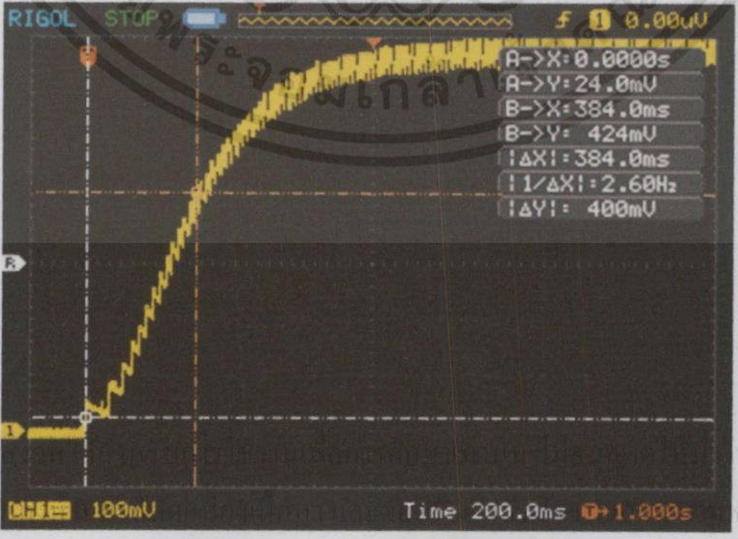
4.9.3 ผลการทดลอง

จากการทดลองกับมอเตอร์ตัวที่ 2 โดยการควบคุมวงเปิด ที่สภาวะเข้าสู่สมดุลสามารถอ่านค่าความเร็วรอบได้ 6470 RPM สามารถหาค่าไทม์คอนสแตนท์ได้โดยหาเวลาที่มอเตอร์หมุนด้วยความเร็ว 63.2% ของความเร็วที่สภาวะเข้าสู่สมดุล นั่นคือ 4070 RPM

เนื่องจากทาโคมิเตอร์ให้เอาท์พุตเป็น 100 mV/1000 RPM ไทม์คอนสแตนท์ คือเวลาที่ออสซิลโลสโคปสามารถอ่านค่าได้ 407 mV แต่สัญญาณจากทาโคมิเตอร์ที่ออสซิลโลสโคปจับได้นั้นมีสัญญาณรบกวนค่อนข้างมากจึงใช้การประมาณค่าใกล้เคียงเป็น 400 mV แทน ซึ่งจากรูปที่ 4.13 จะได้ว่าค่าไทม์คอนแสตนท์ของระบบวงเปิด คือ 432 ms และจากรูปที่ 4.14 จะได้ว่าค่าไทม์คอนแสตนท์ของระบบวงปิด คือ 384 ms ตามลำดับ



รูปที่ 4.13 ผลตอบสนองชั่วขณะของมอเตอร์ตัวที่ 2 แบบควบคุมวงเปิด



รูปที่ 4.14 ผลตอบสนองชั่วขณะของมอเตอร์ตัวที่ 2 แบบควบคุมวงปิด

ซึ่งอาศัยหลักการเดียวกันนี้ ในการหาค่าไทม์คอนสแตนท์ของมอเตอร์อีก 3 ตัวที่เหลือ โดยได้ผลการทดลองดังแสดงตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าไทม์คอนสแตนท์ของมอเตอร์เมื่อใช้การควบคุมวงเปิดและวงปิด

Control	Time Constant (ms)			
	0x11	0x22	0x33	0x44
Open Loop	**400**	**432**	**408**	**408**
Close Loop	**376**	**384**	**368**	**388**

จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ ทำให้การตอบสนองของมอตอร์ดีขึ้น (ค่าไทม์คอนแสตนท์ของการควบคุมแบบวงปิดน้อยกว่าของการควบคุมแบบวงเปิด)

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุปการดำเนินงาน

ได้ทำการปรับปรุงระบบควบคุมมอเตอร์ของอากาศยานสี่ใบพัด โดยเน้นแก้ไขที่พบปัญหาจากปีการศึกษาที่ผ่านมาเป็นสำคัญ นั่นคือ ปัญหาเรื่องการอ่านค่าความเร็วรอบของเซนเซอร์ผิดพลาด ซึ่งจากผลทดสอบหลังดำเนินการปรับปรุงพบว่าระบบควบคุมมอเตอร์ สามารถติดต่อสื่อสารกับบอร์ดควบคุมกลางได้ด้วยดีทั้งในห้องทดลองรวมถึงสภาวะแวดล้อมเปิด

ทางด้านการทดสอบคุณสมบัติของระบบควบคุมมอเตอร์ทั้ง 4 ชุดนั้น พบว่าส่วนใหญ่มีการทำงานและการตอบสนองค่อนข้างใกล้เคียงกัน ยกเว้นเซนเซอร์วัดกระแส ซึ่งมีเพียงเซนเซอร์ของบอร์ดควบคุมมอเตอร์ 0x11 เท่านั้นที่ทำงานได้ถูกต้อง ส่งผลให้โมดูลตรวจสอบสถานะทำงานผิดพลาด หากต้องการนำระบบควบคุมมอเตอร์เหล่านี้ไปใช้ต่อไป จะต้องทำการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นหรือมิเช่นนั้นจะต้องทำการปิดโมดูลตรวจสอบสถานะของบอร์ดควบคุมมอเตอร์

5.2 ปัญหาที่พบการดำเนินงาน

1. ขาดประสบการณ์ในการเขียน Microcontroller ทำให้เสียเวลาในการศึกษาและทำให้การแก้ไขโปรแกรมทำได้ไม่รวดเร็วเท่าที่ควร

2. ปัญหาด้านฮาร์ดแวร์เล็กน้อย เช่น สายไฟขาด แถบสะท้อนแสงเสื่อมสภาพ ทำให้ระบบควบคุมมอเตอร์ไม่ทำงาน ไม่สามารถสั่งการให้มอเตอร์หมุนได้ แต่คิดว่าสาเหตุมาจากโปรแกรมไม่ถูกต้อง ทำให้เสียเวลาในการดำเนินงานเนื่องจากแก้ไขปัญหาผิดจุด

3. ไม่พบเอกสาร Source Code ของโมดูลการสั่งงานมอเตอร์ผ่านทางบอร์ดควบคุมกลางของปีการศึกษาก่อน

4. อุปกรณ์บนบอร์ดควบคุมมอเตอร์มีขนาดเล็กมาก จึงไม่สามารถแก้ไขการบัดกรีเพื่อเปลี่ยนเซนเซอร์ AD8210 ได้โดยง่าย ประกอบกับตรวจพบปัญหาการวัดกระแสผิดพลาดช้า จึงไม่มีเวลาเพียงพอที่จะดำเนินการแก้ไข

เอกส … ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 แนวทางในการพัฒนาโครงการ

1. แก้ไขปัญหาการวัดกระแสที่ผิดพลาดของบอร์ดควบคุมมอเตอร์ 0x22, 0x33 และ 0x44

2. เพิ่มประสิทธิภาพของการควบคุมให้มีความรวดเร็วยิ่งขึ้น เนื่องจากในปัจจุบันมีข้อจำกัดคือ ตัวขับมอเตอร์ที่ใช้ตอบสนองกับสัญญาณพัลส์ที่ความถี่ 333 Hz หากเปลี่ยนตัวขับมอเตอร์เป็นรุ่นที่ตอบสนองกับความถี่สูงขึ้น ก็จะสามารถควบคุมมอเตอร์ได้ดียิ่งขึ้น

3. คำสั่งหยุดฉุกเฉิน (Emergency Stop) ในปัจจุบันคือ สั่งค่า setpoint = 0 เป็นการหยุดมอเตอร์ทันทีทันใด ซึ่งหากคำสั่งนี้ถูกสั่งขณะอากาศยานสี่ใบพัดกำลังบิน อาจเกิดการพลิกคว่ำและเสียหายจากแรงกระแทกได้ หากอากาศยานสี่ใบพัดสามารถบินได้จริงควรจะแก้ไขชุดคำสั่งนี้เป็นการลงจอดอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 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] **"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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

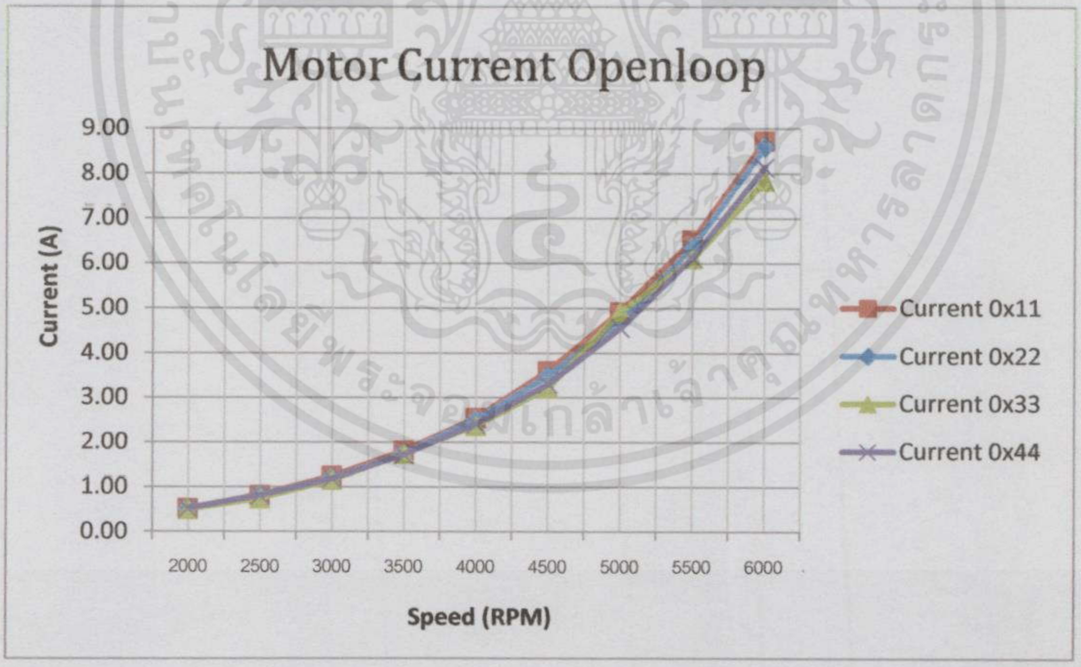
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบมอเตอร์โดยใช้การควบคุมแบบวงเปิด

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสไฟฟ้าแบบวงเปิด

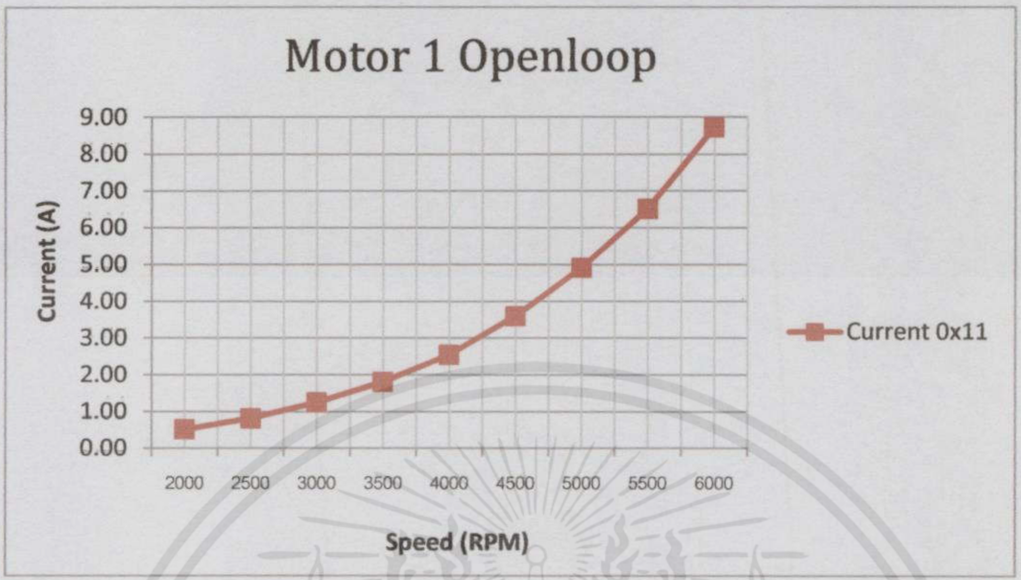
RPM	Current (A)			
	0x11	0x22	0x33	0x44
2000	0.52	0.52	0.50	0.52
2500	0.82	0.81	0.74	0.81
3000	1.25	1.20	1.16	1.19
3500	1.81	1.76	1.75	1.73
4000	2.55	2.51	2.37	2.41
4500	3.60	3.50	3.22	3.31
5000	4.92	4.73	4.92	4.56
5500	6.52	6.37	6.11	6.13
6000	8.73	8.60	7.83	8.14



รูปที่ ก.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ทั้งสี่ตัว

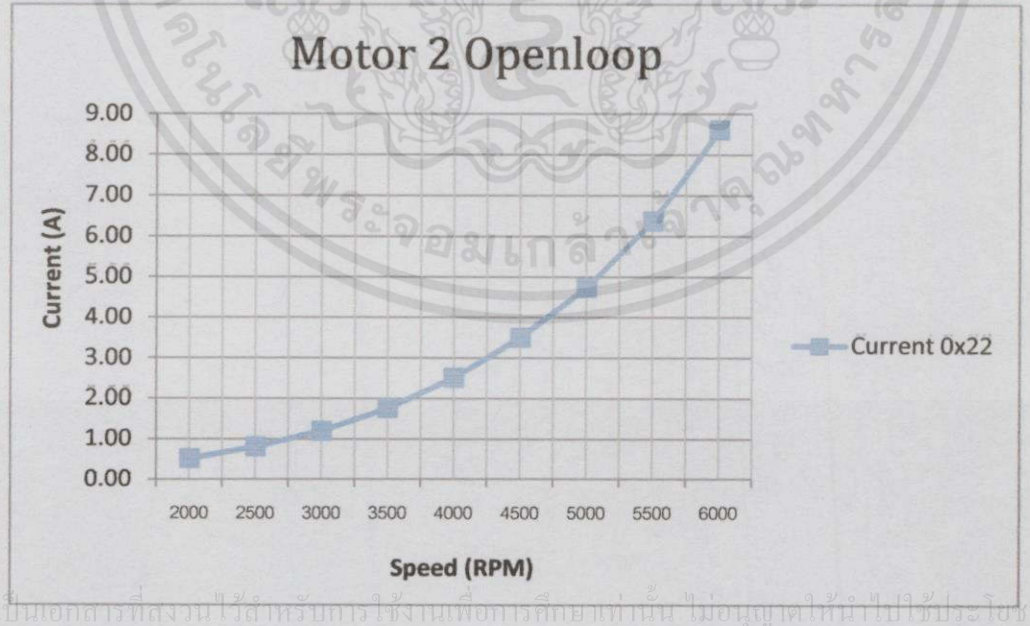
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 1



รูปที่ ก.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ตัวที่ 1

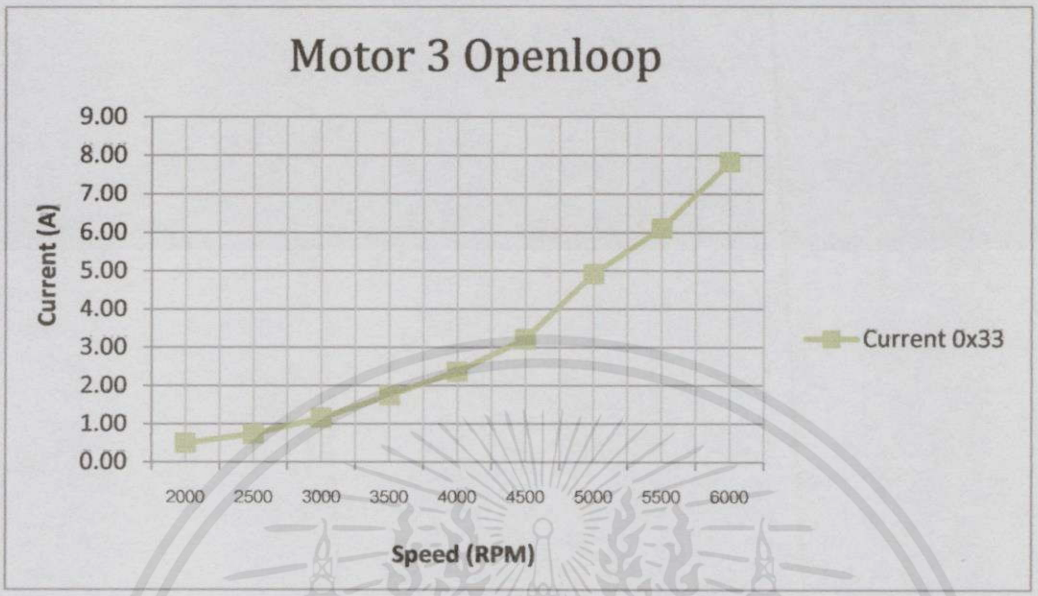
มอเตอร์ตัวที่ 2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

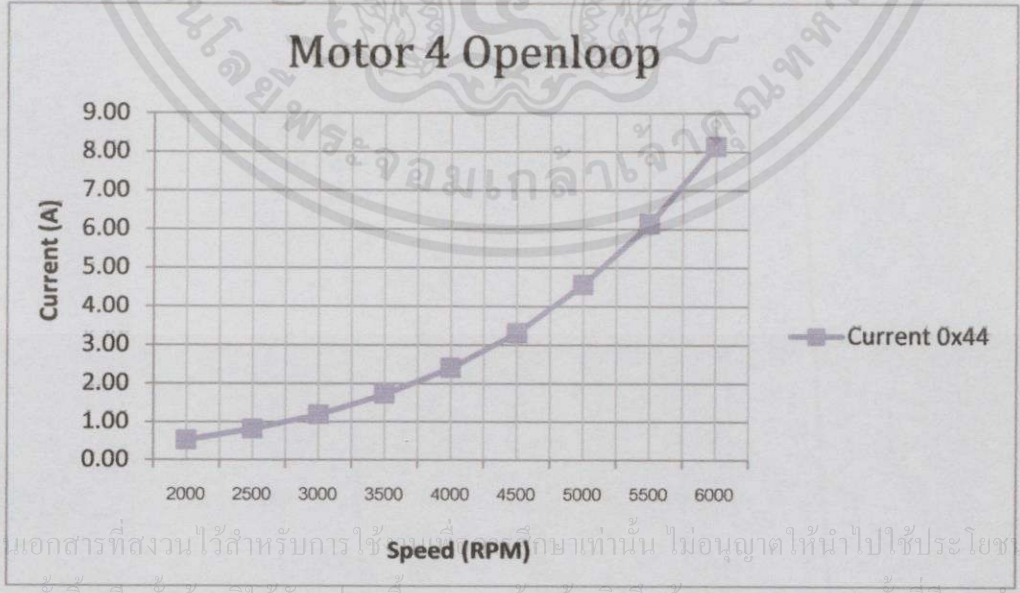
รูปที่ ก.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ตัวที่ 2

มอเตอร์ตัวที่ 3



รูปที่ ก.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ตัวที่ 3

มอเตอร์ตัวที่ 4

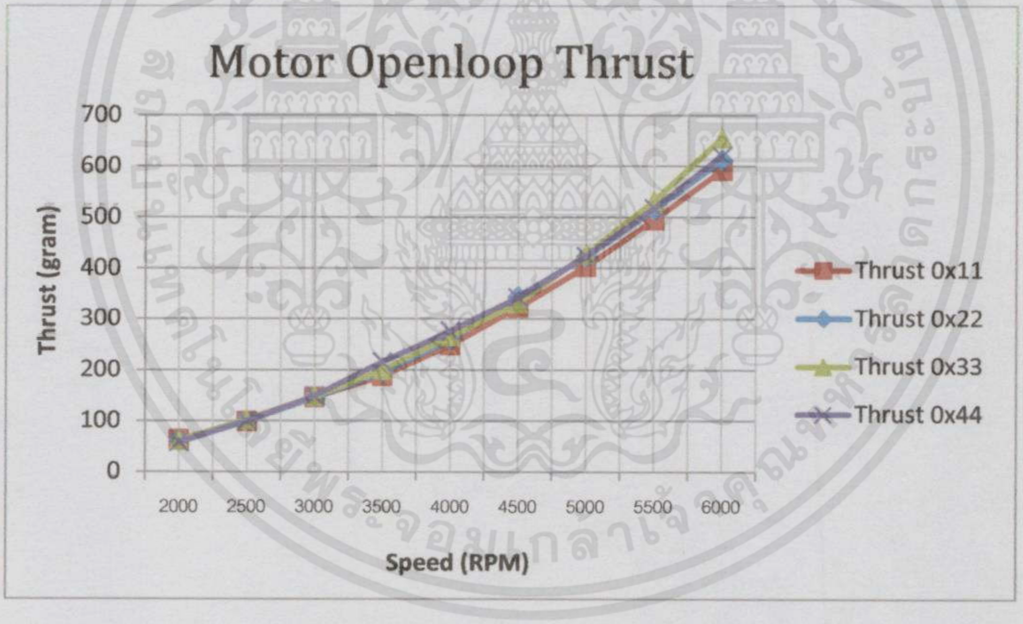


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ตัวที่ 4

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงยกของมอเตอร์แบบวงเปิด

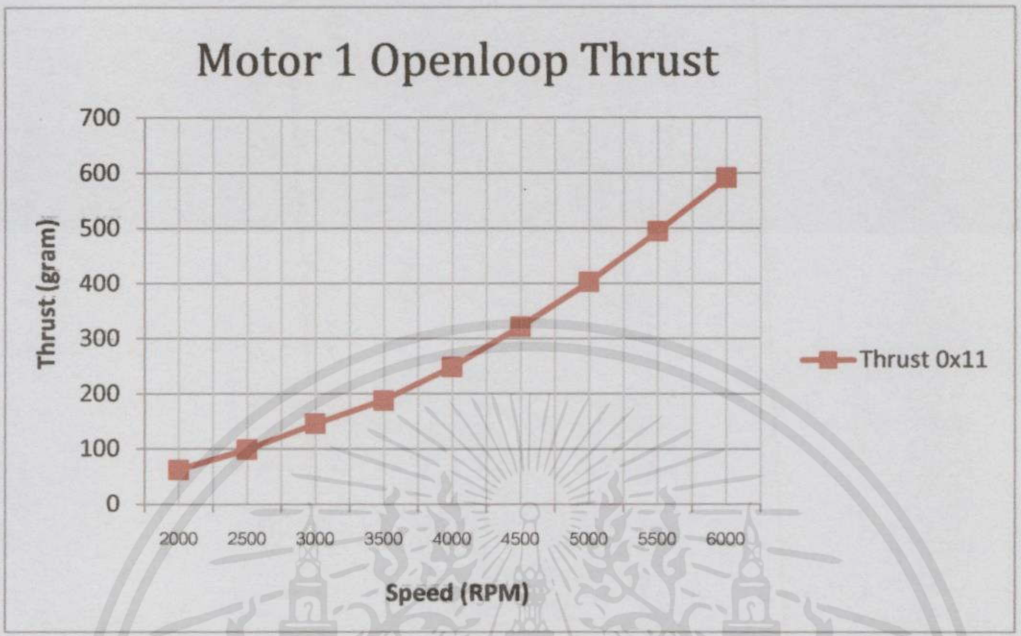
RPM	Thrust (gram)			
	0x11	0x22	0x33	0x44
2000	63	61	61	58
2500	99	100	102	100
3000	146	146	148	149
3500	188	195	200	216
4000	249	260	266	276
4500	322	344	330	342
5000	403	423	428	424
5500	495	515	532	518
6000	592	612	655	620



รูปที่ ก.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงยกของมอเตอร์ทั้งสี่ตัว

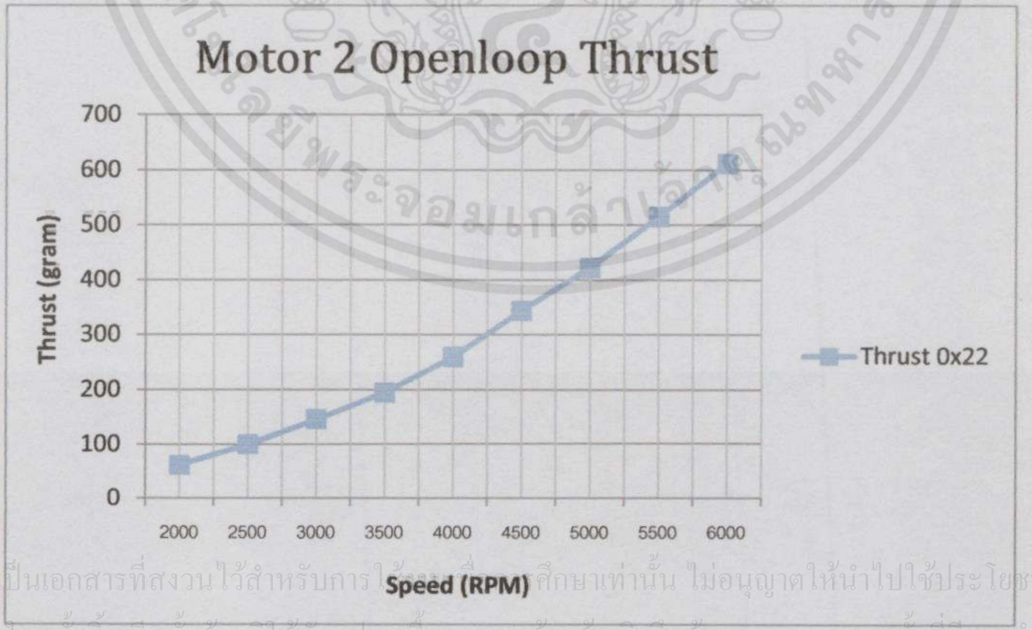
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 1



รูปที่ ก.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงยกของมอเตอร์ตัวที่ 1

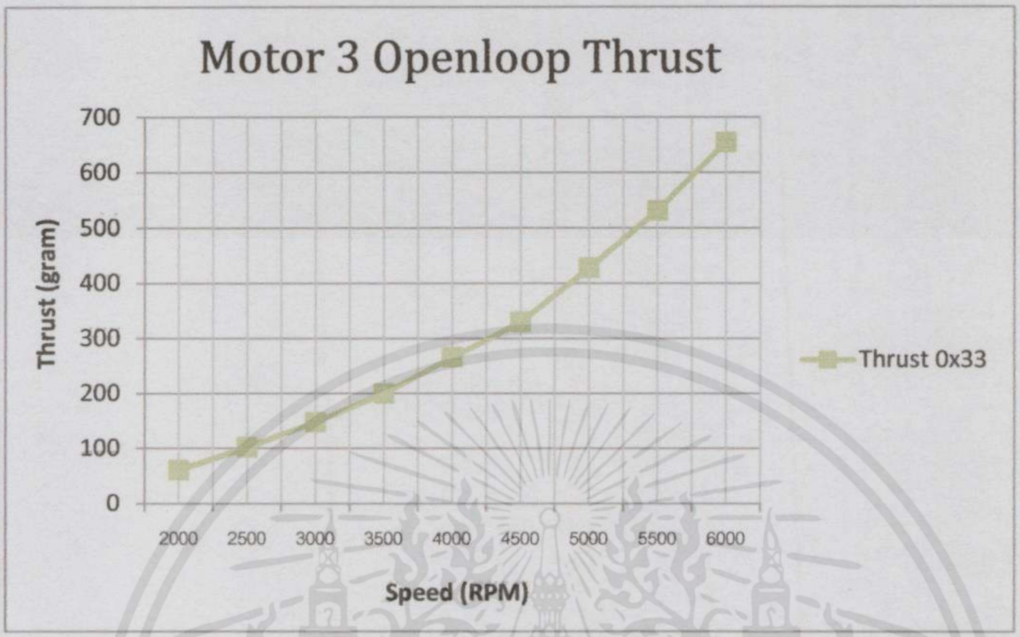
มอเตอร์ตัวที่ 2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

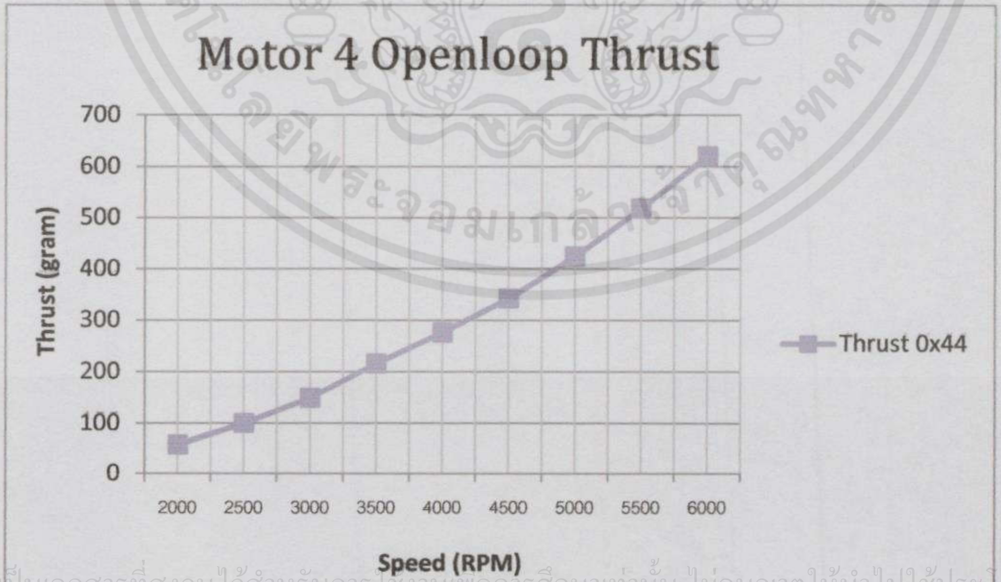
รูปที่ ก.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงยกของมอเตอร์ตัวที่ 2

มอเตอร์ตัวที่ 3



รูปที่ ก.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงยกของมอเตอร์ตัวที่ 3

มอเตอร์ตัวที่ 4

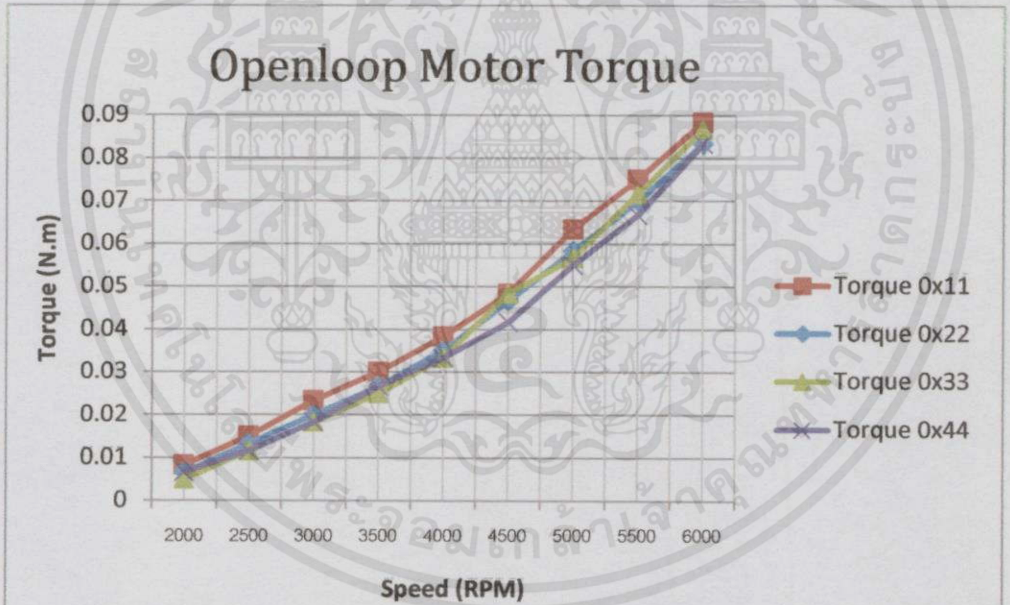


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงยกของมอเตอร์ตัวที่ 4

ตารางที่ ก.3 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์แบบวงเปิด

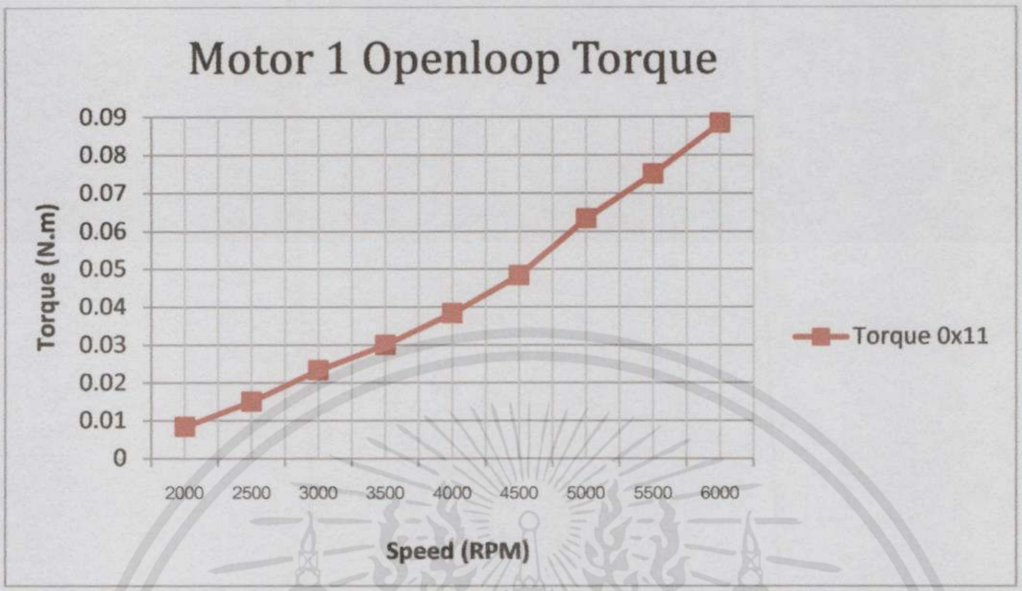
RPM	Torque (N.m)			
	0x11	0x22	0x33	0x44
2000	0.008339	0.006671	0.005003	0.006671
2500	0.015009	0.013342	0.011674	0.011674
3000	0.023348	0.020012	0.018345	0.018345
3500	0.030019	0.026683	0.025016	0.026683
4000	0.038357	0.035022	0.033354	0.033354
4500	0.048363	0.046696	0.048363	0.041693
5000	0.063373	0.05837	0.056702	0.055034
5500	0.075047	0.070043	0.071711	0.066708
6000	0.088388	0.083385	0.08672	0.083385



รูปที่ ก.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ทั้งสี่ตัว

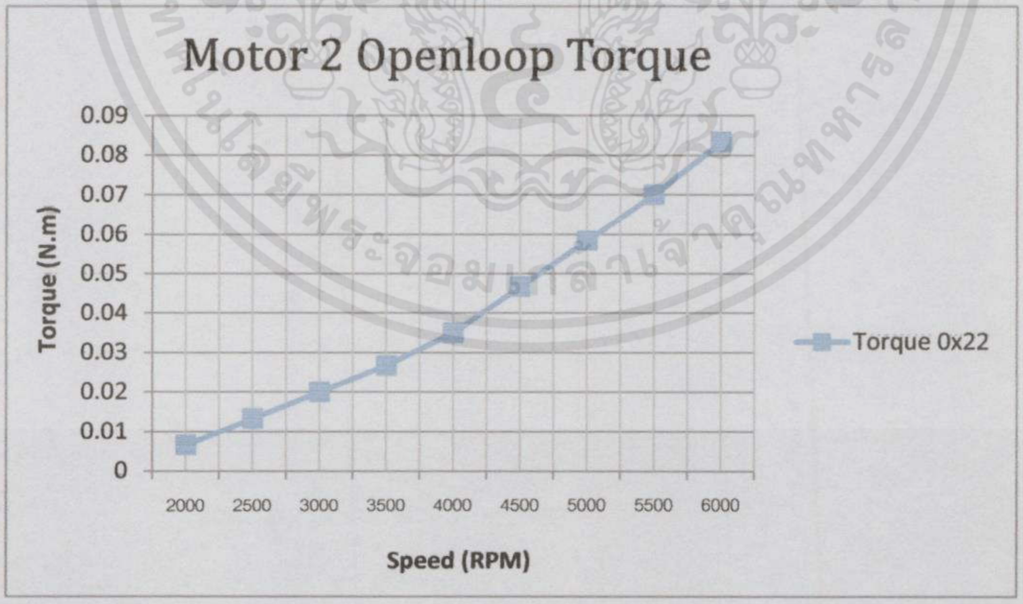
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 1



รูปที่ ก.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 1

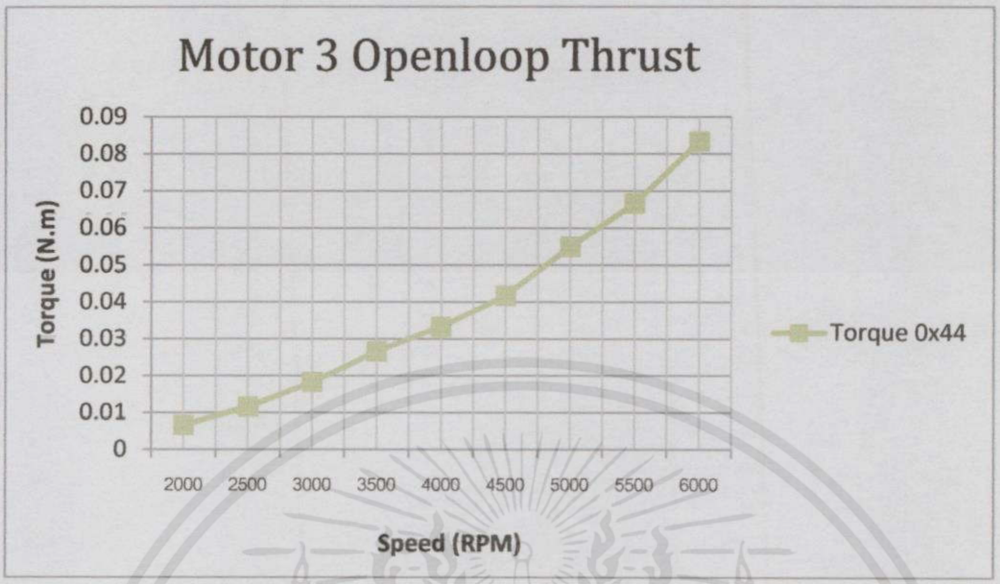
มอเตอร์ตัวที่ 2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

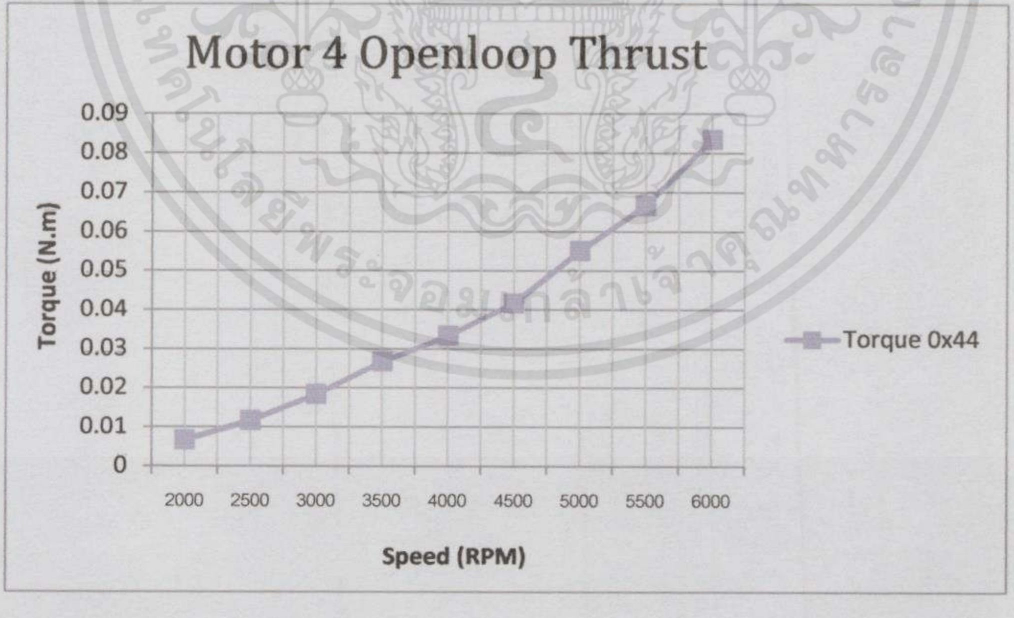
รูปที่ ก.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 2

มอเตอร์ตัวที่ 3



รูปที่ ก.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 3

มอเตอร์ตัวที่ 4



รูปที่ ก.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบมอเตอร์โดยใช้การควบคุมแบบวงปิด

ตารางที่ ข.1 ค่าไทม์คอนสแตนท์ของมอเตอร์ที่ใช้การควบคุมแบบวงเปิดและแบบวงปิด

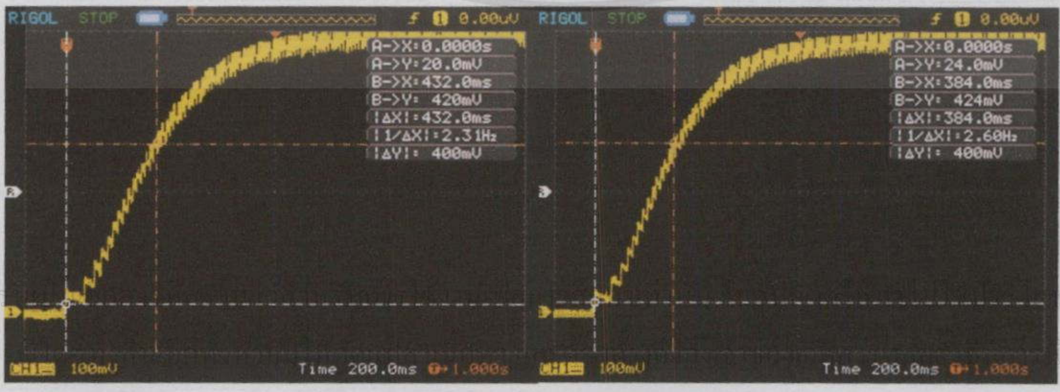
Control	Time Constant (ms)			
	0x11	0x22	0x33	0x44
Open Loop	400	432	408	408
Close Loop	376	384	368	388

ภาพด้านซ้ายเป็นผลตอบสนองชั่วครู่ของการควบคุมแบบวงเปิดด้านขวาเป็นแบบวงปิด

มอเตอร์ตัวที่ 1

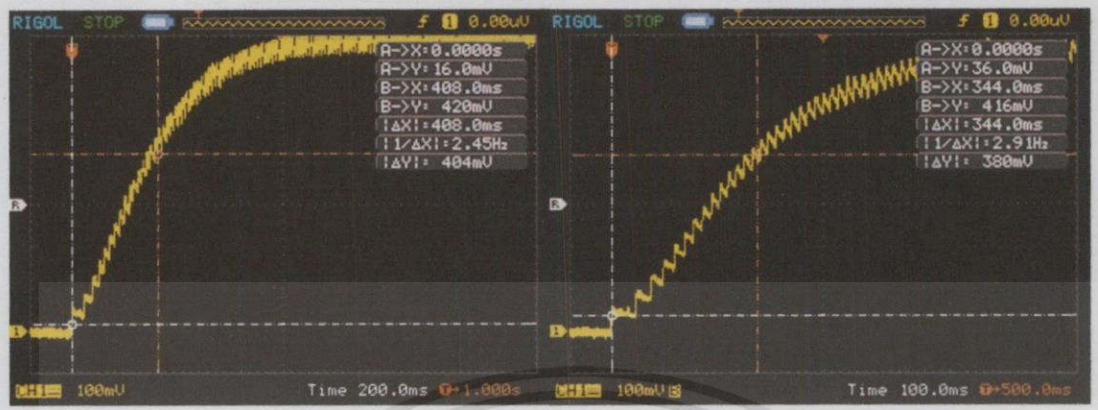
รูปที่ ข.1 กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองของมอเตอร์ตัวที่ 1

มอเตอร์ตัวที่ 2



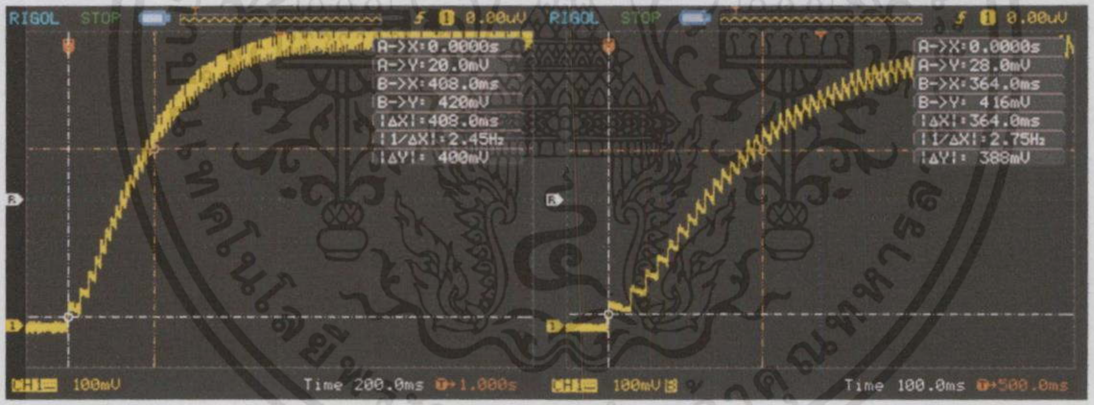
รูปที่ ข.2 กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองของมอเตอร์ตัวที่ 2

มอเตอร์ตัวที่ 3



รูปที่ ข.3 กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองของมอเตอร์ตัวที่ 3

มอเตอร์ตัวที่ 4

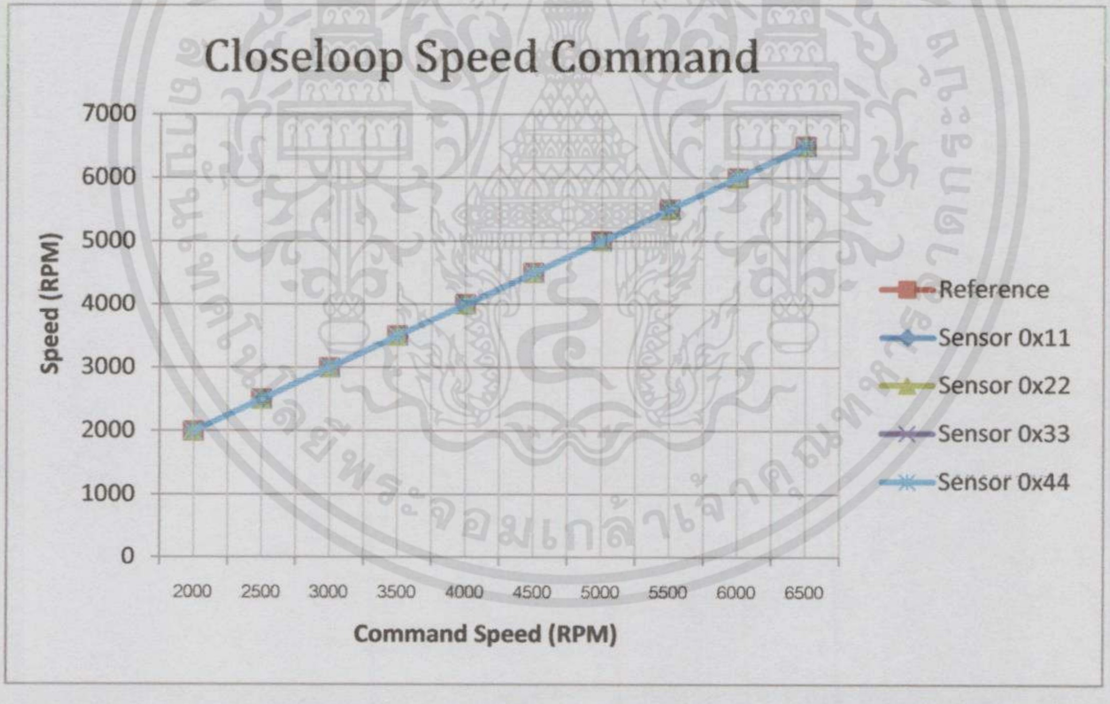


รูปที่ ข.4 กราฟเปรียบเทียบผลตอบสนองของมอเตอร์ตัวที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 ผลการทดลองสั่งความเร็วรอบมอเตอร์ผ่านทางบอร์ดควบคุมกลาง

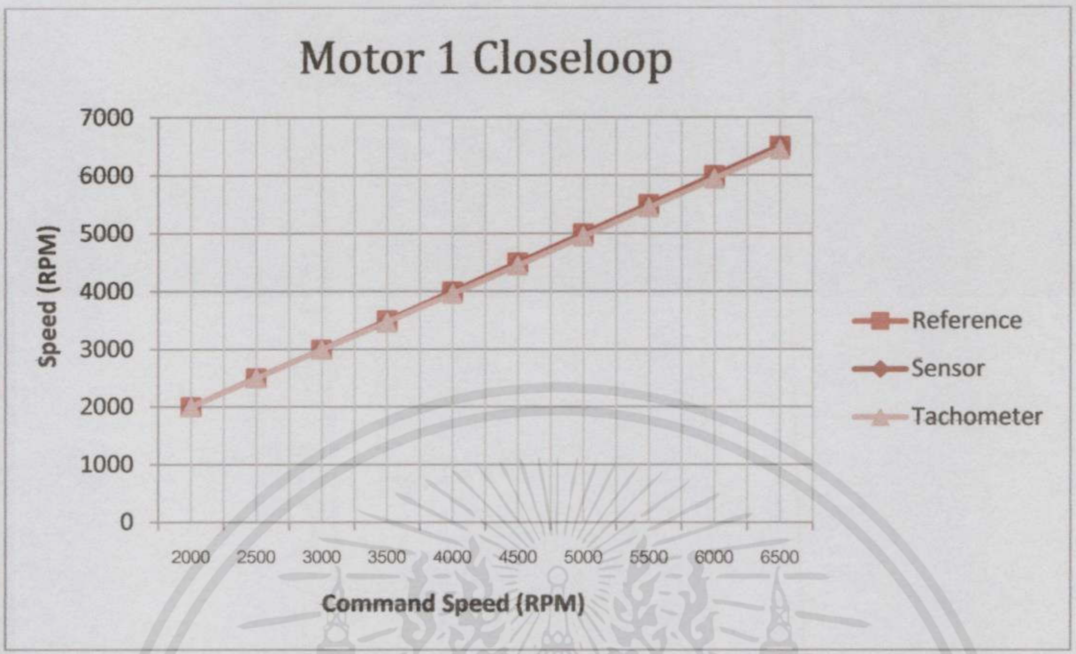
Closeloop Control								
Command(RPM)	0x11		0x22		0x33		0x44	
	Tacho	Sensor	Tacho	Sensor	Tacho	Sensor	Tacho	Sensor
2000	2000	2000	2002	2001	1998	2000	1995	2000
2500	2500	2503	2504	2500	2999	2500	2493	2500
3000	3000	3001	3003	3000	2997	3000	3000	3005
3500	3470	3497	3505	3501	3497	3501	3494	3501
4000	3961	4000	4005	4000	3995	4000	3992	3995
4500	4450	4500	4507	4500	4498	4500	4490	4494
5000	4953	5001	5003	5001	4994	5000	4993	4994
5500	5450	5003	5505	5503	5495	5503	5496	5500
6000	5949	6000	6005	6000	5996	6000	5990	6002
6500	6449	6508	6509	6508	6494	6508	6487	6490



รูปที่ ข.5 กราฟแสดงความความเร็วของมอเตอร์ทั้งสี่ตัว

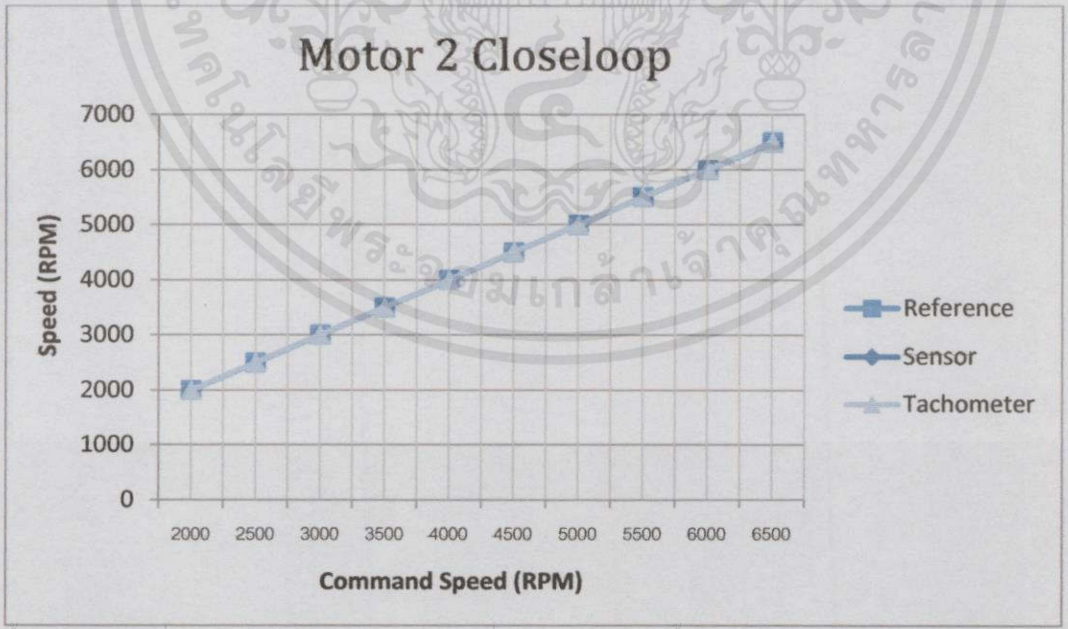
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 1



รูปที่ ข.6 กราฟแสดงความความเร็วของมอเตอร์ตัวที่ 1

มอเตอร์ตัวที่ 2

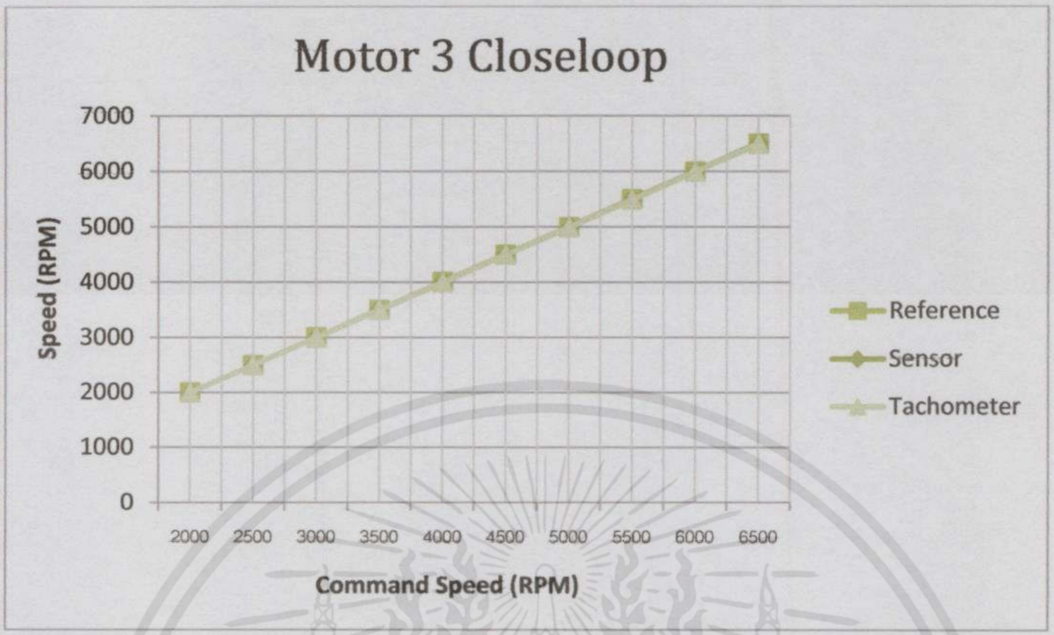


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ ข.7 กราฟแสดงความความเร็วของมอเตอร์ตัวที่ 2

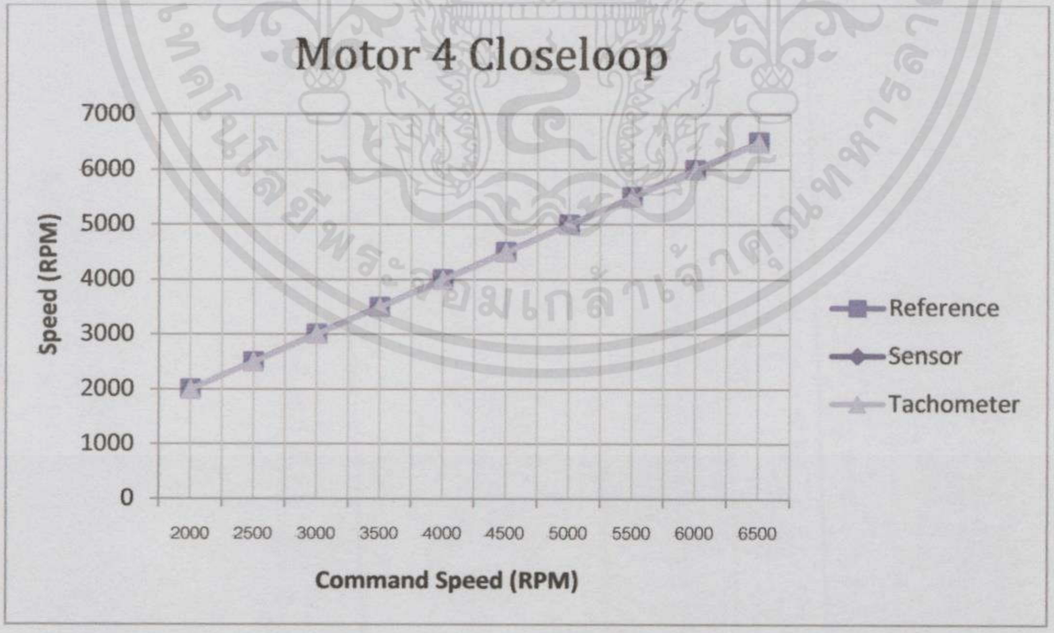
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 3



รูปที่ ข.8 กราฟแสดงความความเร็วของมอเตอร์ตัวที่ 3

มอเตอร์ตัวที่ 4



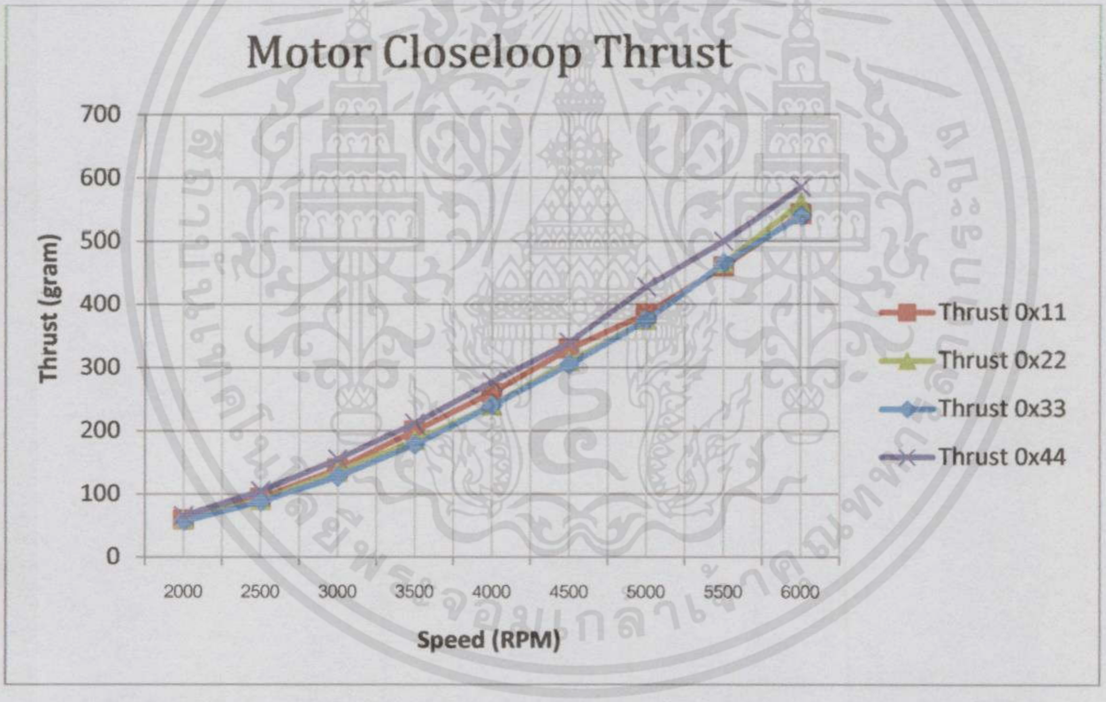
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ ข.9 กราฟแสดงความความเร็วของมอเตอร์ตัวที่ 4

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงยกของมอเตอร์

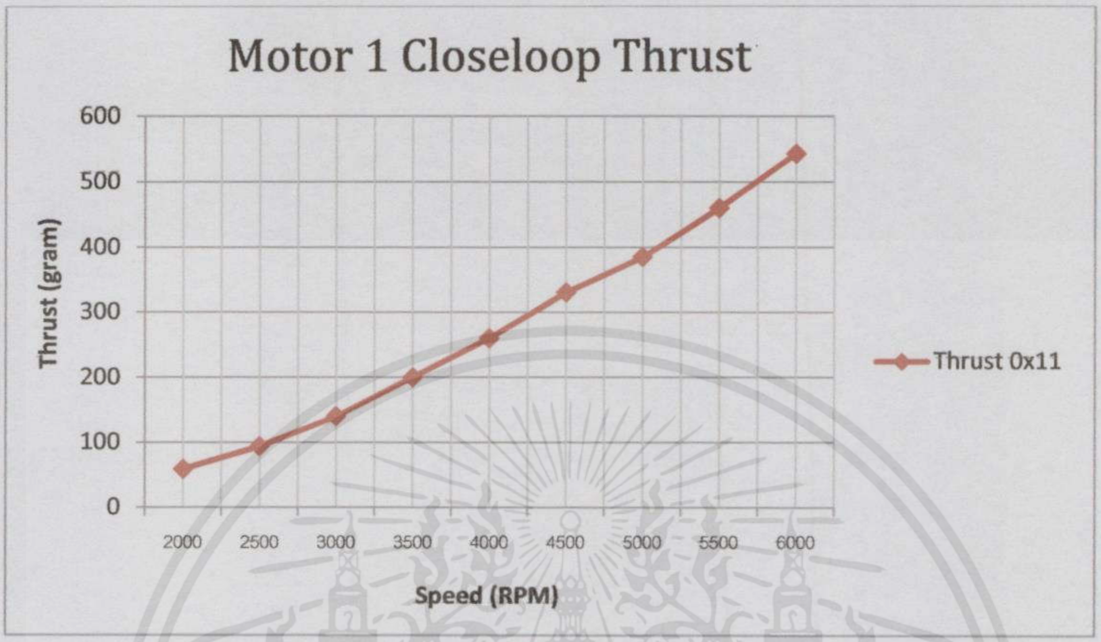
RPM	Thrust (gram)			
	0x11	0x22	0x33	0x44
2000	59	60	57	65
2500	94	90	88	105
3000	140	135	128	155
3500	200	185	178	212
4000	260	240	240	277
4500	330	310	305	340
5000	385	375	375	428
5500	460	465	465	500
6000	543	560	540	585



รูปที่ ข.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงยกของมอเตอร์ทั้งสี่ตัว

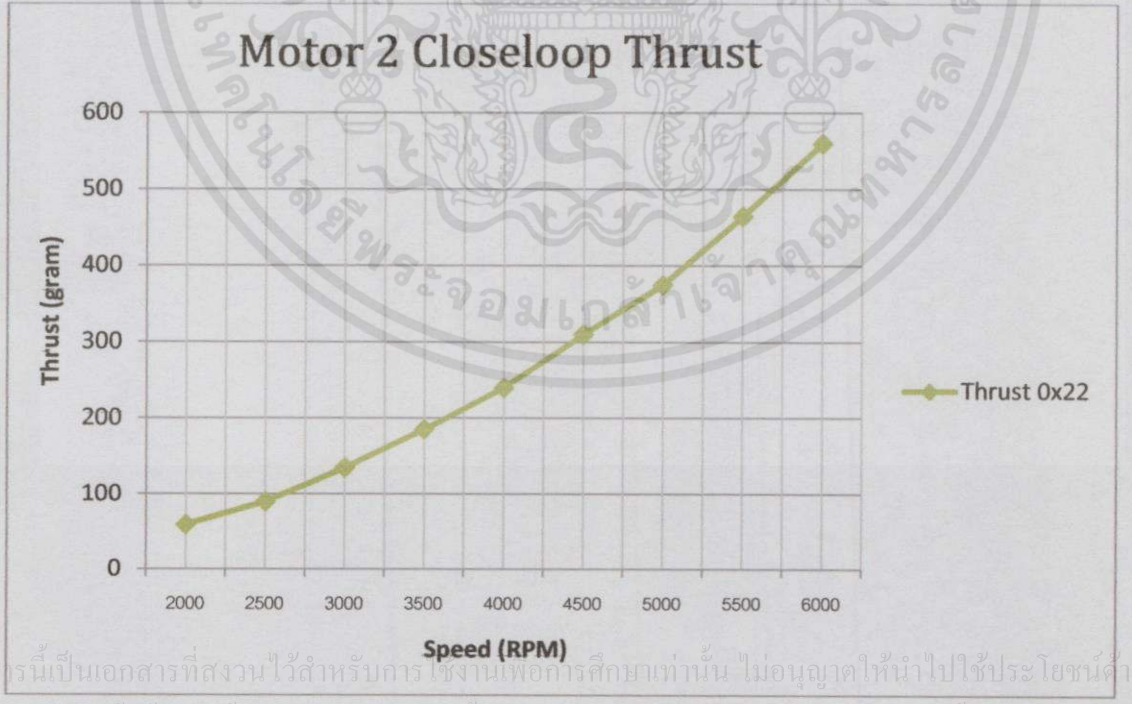
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 1



รูปที่ ข.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงยกของมอเตอร์ตัวที่ 1

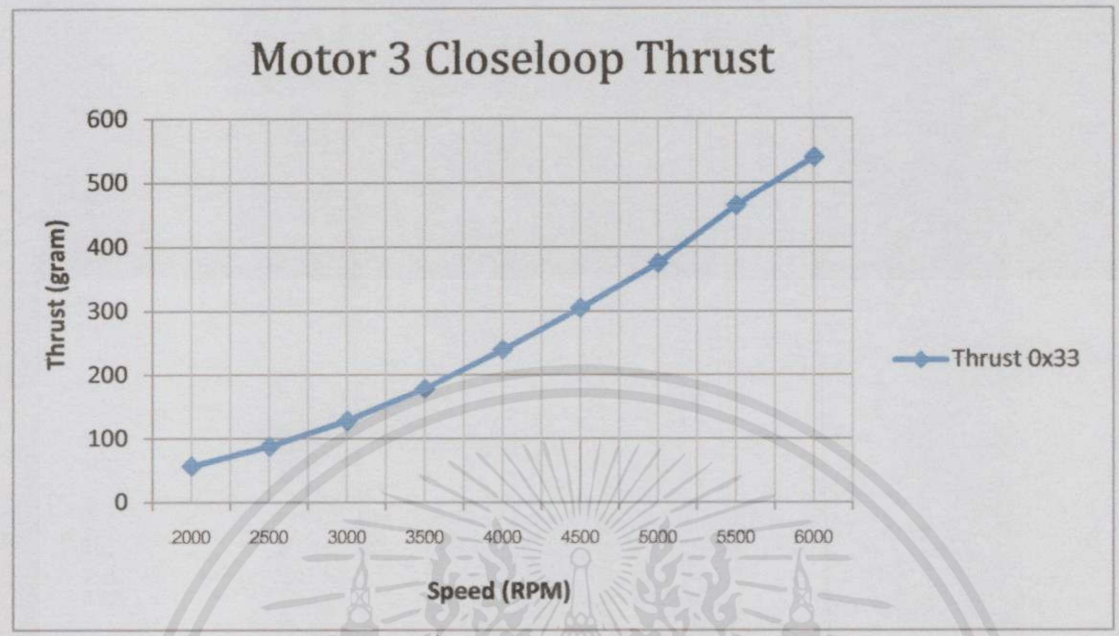
มอเตอร์ตัวที่ 2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

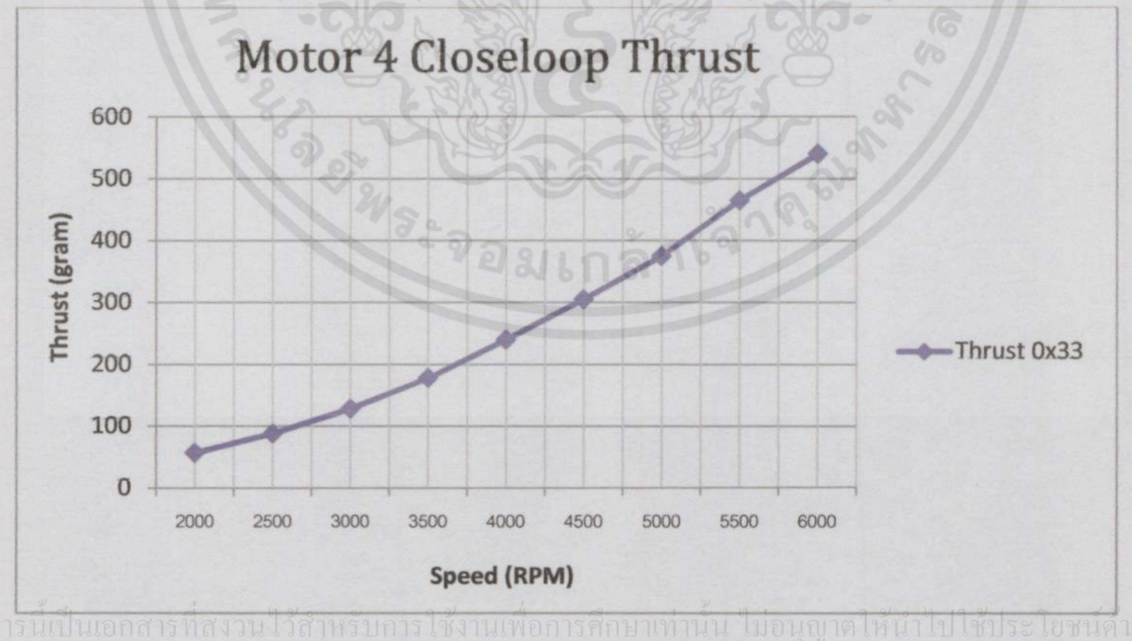
รูปที่ ข.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงยกของมอเตอร์ตัวที่ 2

มอเตอร์ตัวที่ 3



รูปที่ ข.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงยกของมอเตอร์ตัวที่ 3

มอเตอร์ตัวที่ 4



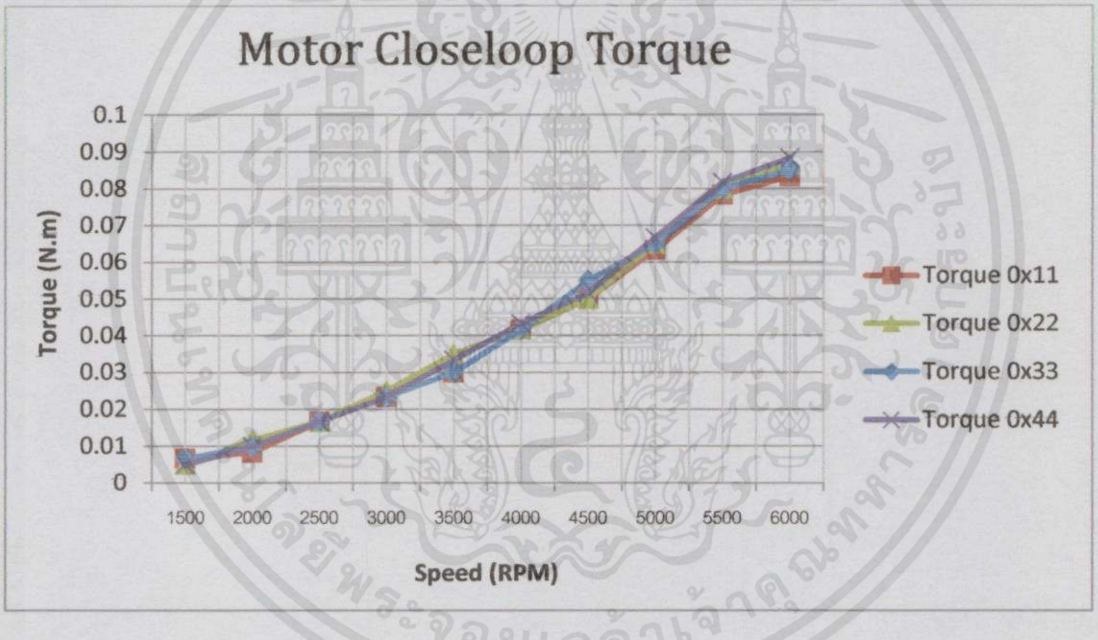
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ ข.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงยกของมอเตอร์ตัวที่ 4

ไม่ว่ากรณีใดๆ ... นำไปใช้

ตารางที่ ข.4 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์

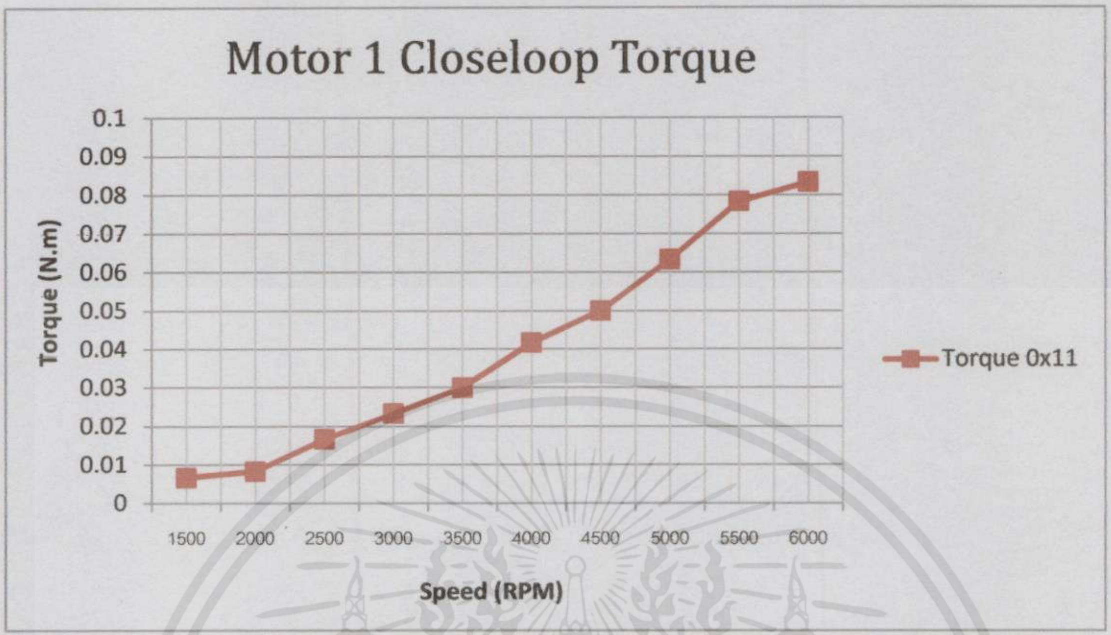
RPM	Torque (N.m)			
	0x11	0x22	0x33	0x44
1500	0.006671	0.005003	0.006671	0.005003
2000	0.008339	0.011674	0.010006	0.010006
2500	0.016677	0.016677	0.016677	0.016677
3000	0.023348	0.025016	0.023348	0.023348
3500	0.030019	0.035022	0.030019	0.033354
4000	0.041693	0.041693	0.041693	0.04336
4500	0.050031	0.050031	0.055034	0.051699
5000	0.063373	0.06504	0.06504	0.066708
5500	0.078382	0.08005	0.08005	0.081717
6000	0.083385	0.08672	0.085053	0.088388



รูปที่ ข.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ทั้งสี่ตัว

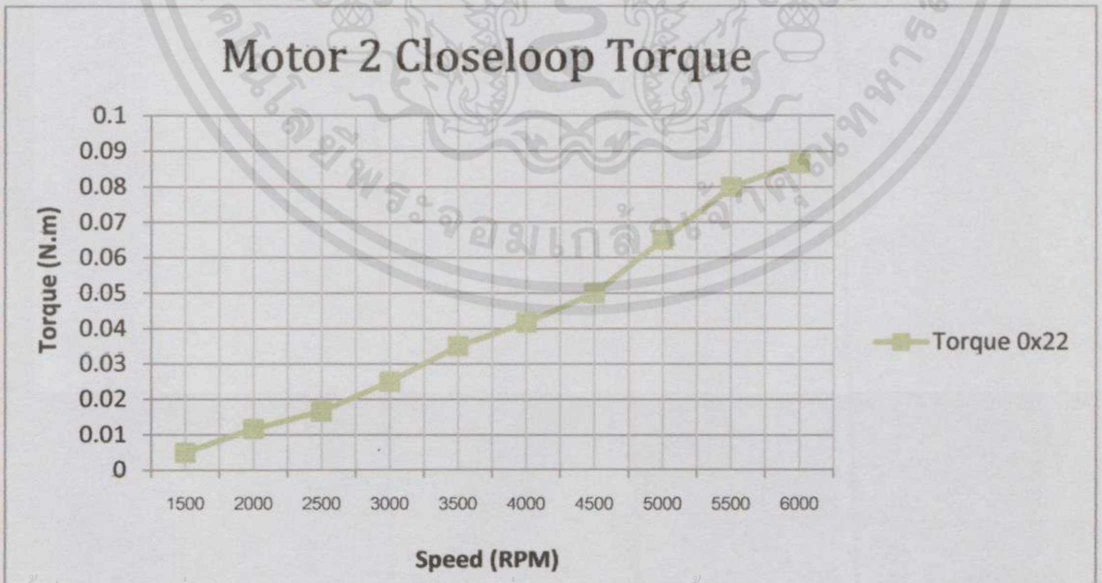
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 1



รูปที่ ข.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 1

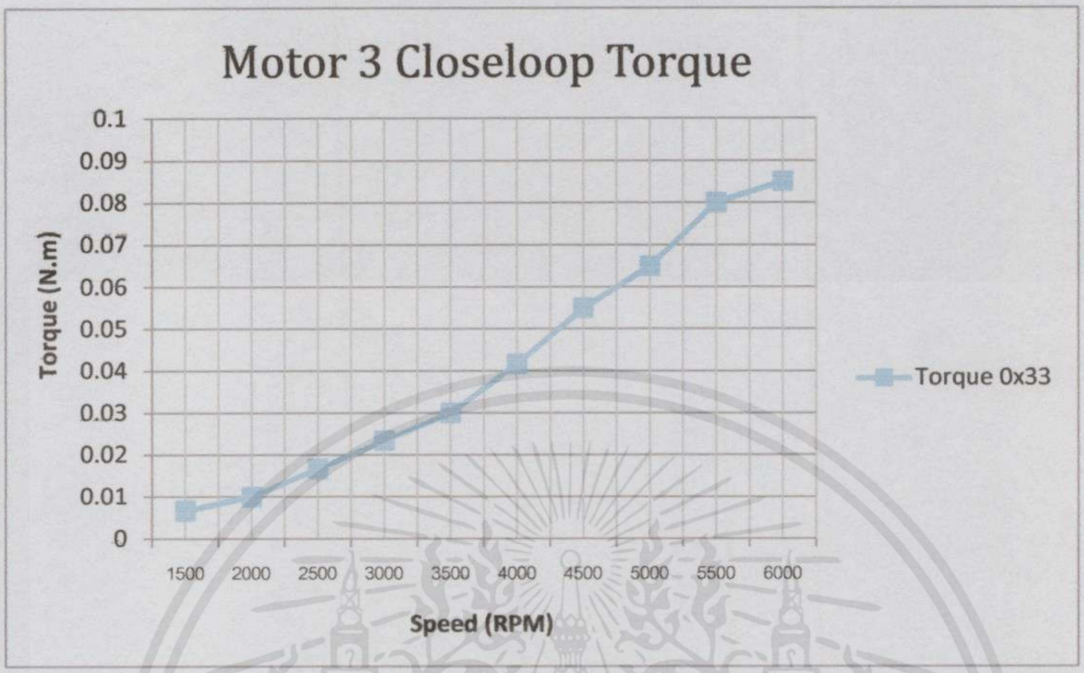
มอเตอร์ตัวที่ 2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

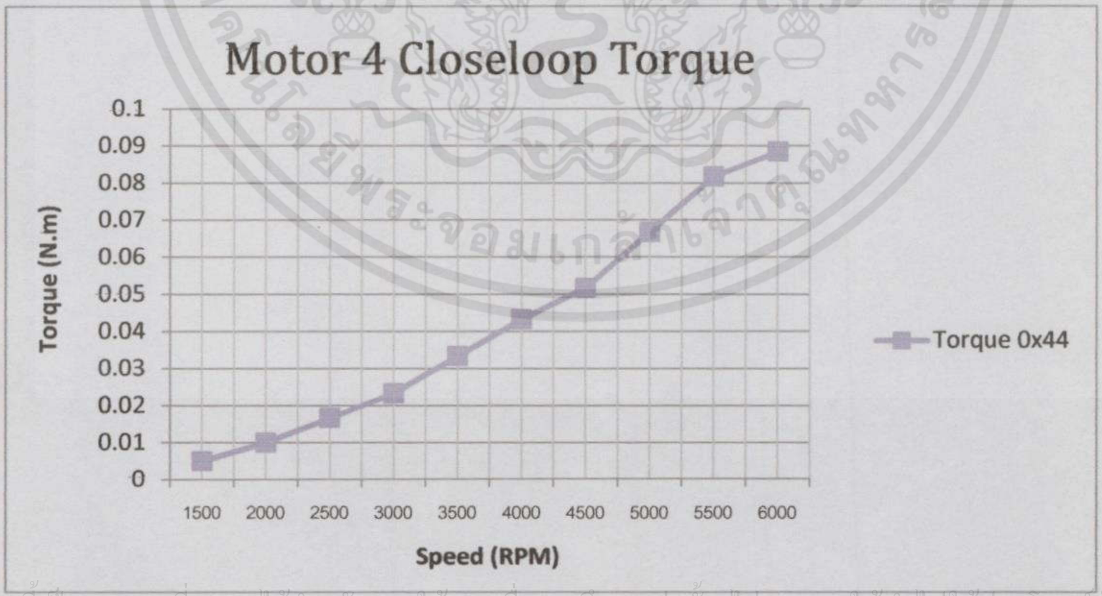
รูปที่ ข.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 2

มอเตอร์ตัวที่ 3



รูปที่ ข.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 3

มอเตอร์ตัวที่ 4

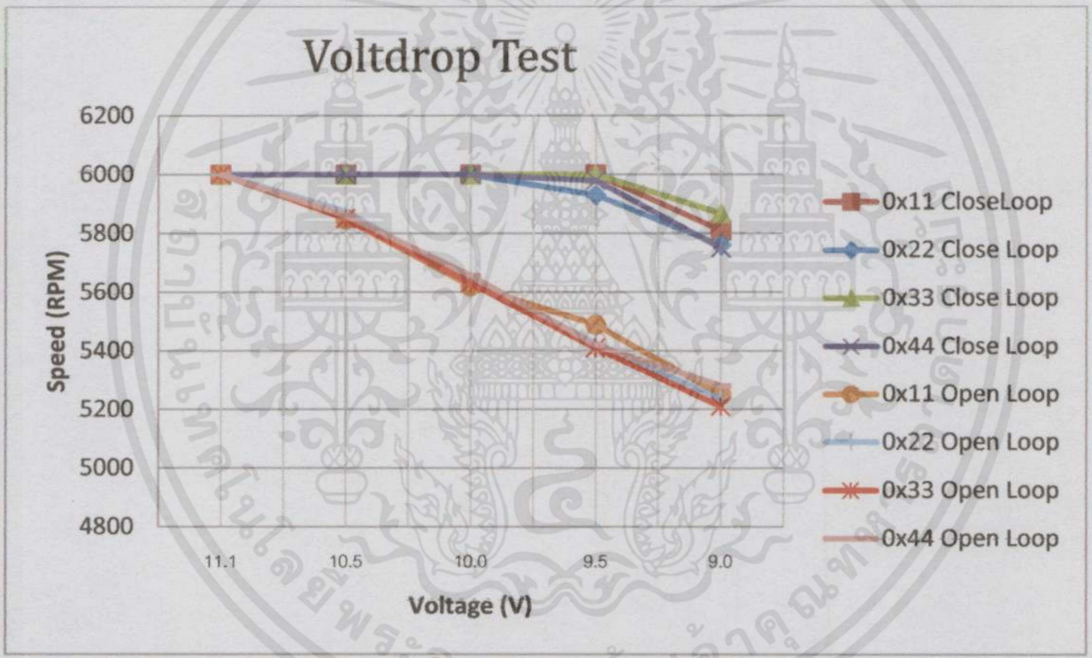


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ข.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงบิดของมอเตอร์ตัวที่ 4

ตารางที่ ข.5 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ลดลงและความเร็วรอบมอเตอร์

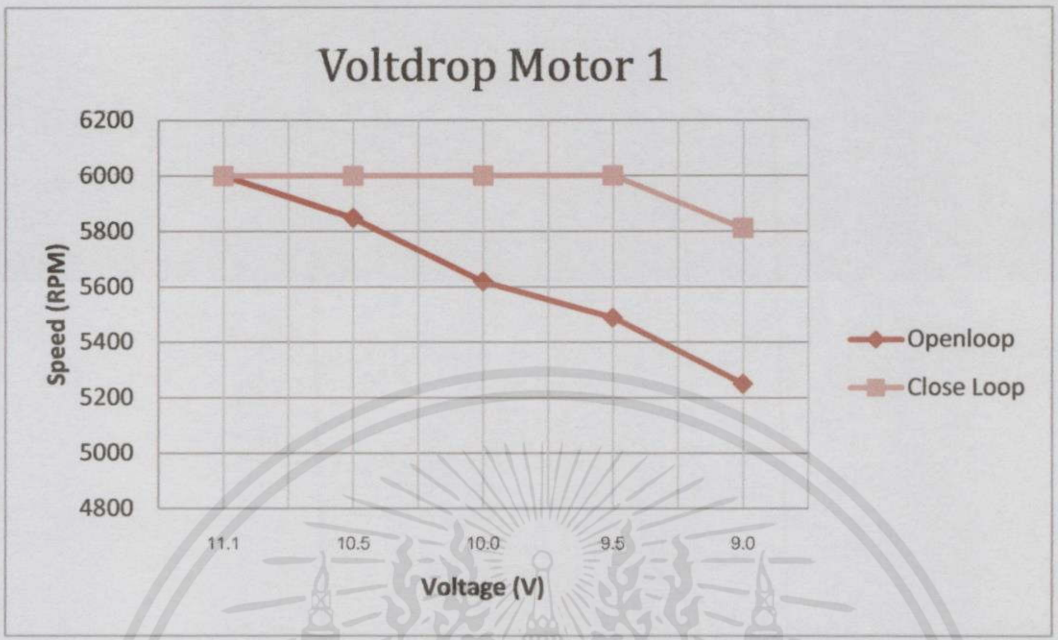
Volt Drop Test (RPM)								
Voltage	0x11		0x22		0x33		0x44	
	Openloop	Closeloop	Openloop	Closeloop	Openloop	Closeloop	Openloop	Closeloop
11.1	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000	6000
10.5	5848	6000	5872	6000	5850	6000	5860	6000
10.0	5620	6000	5640	6000	5630	6000	5656	6000
9.5	5489	6000	5426	5929	5410	6000	5420	5979
9.0	5250	5811	5235	5760	5210	5867	5280	5750



รูปที่ ข.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงดันไฟฟ้า

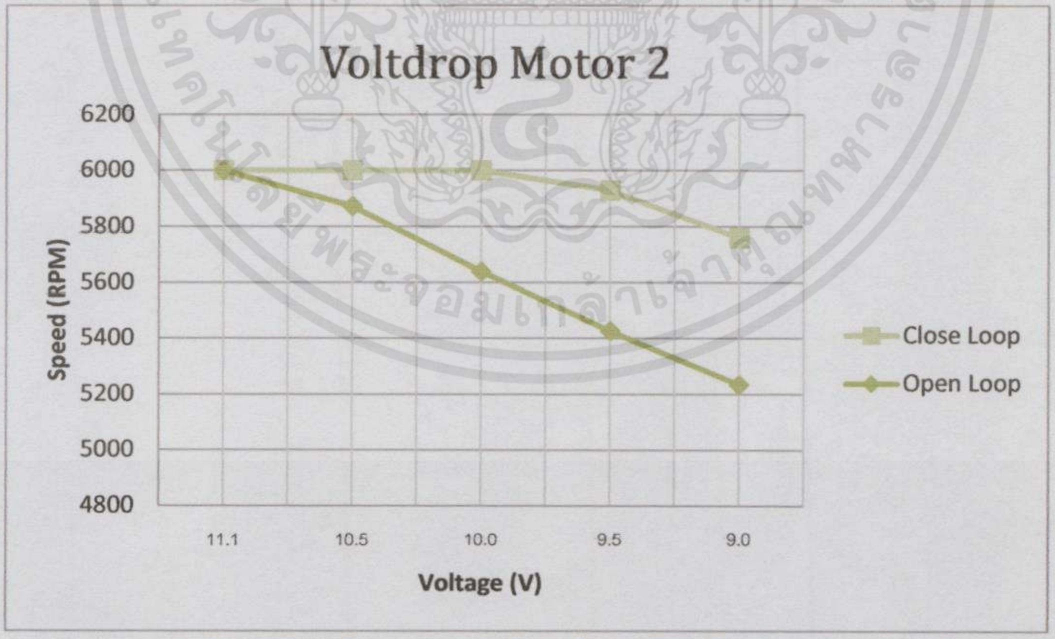
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 1



รูปที่ ข.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ตัวที่ 1

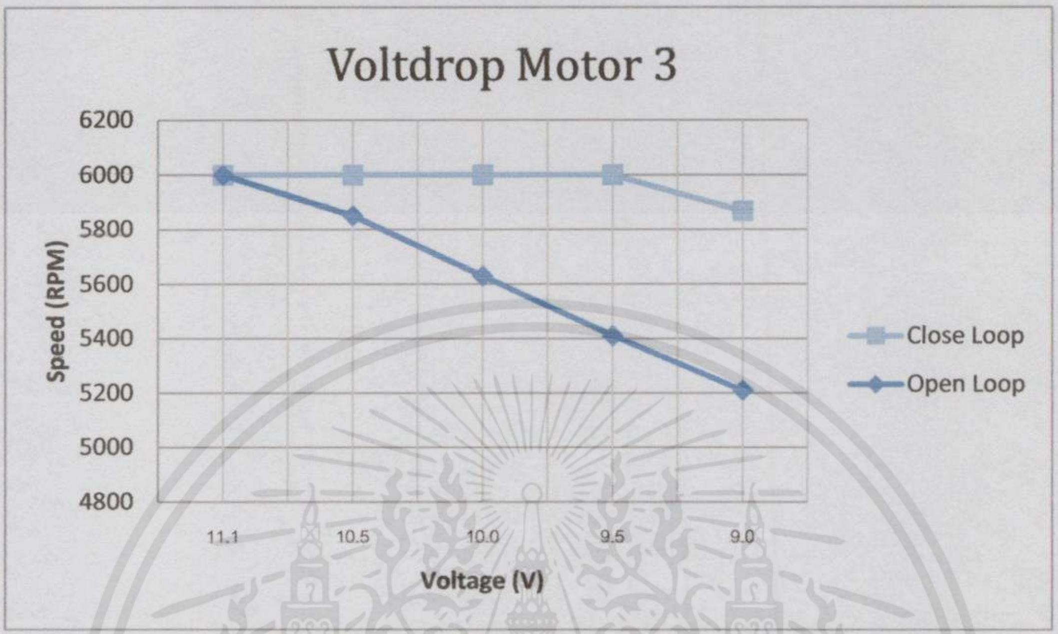
มอเตอร์ตัวที่ 2



รูปที่ ข.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ตัวที่ 2

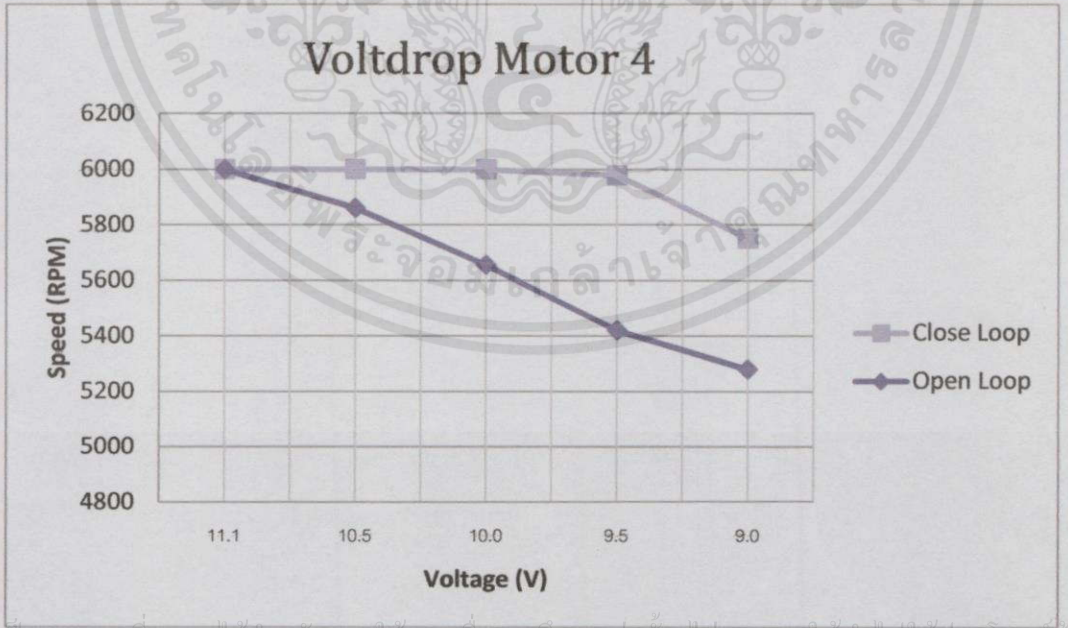
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 3



รูปที่ ข.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ตัวที่ 3

มอเตอร์ตัวที่ 4

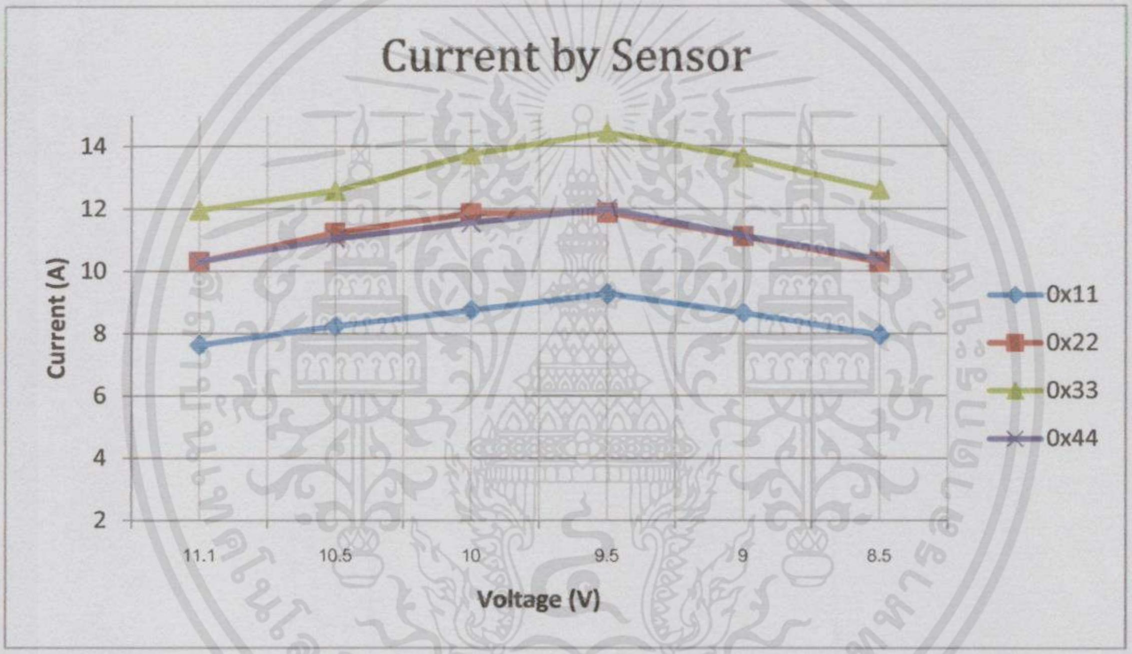


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ ข.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบและแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ตัวที่ 4

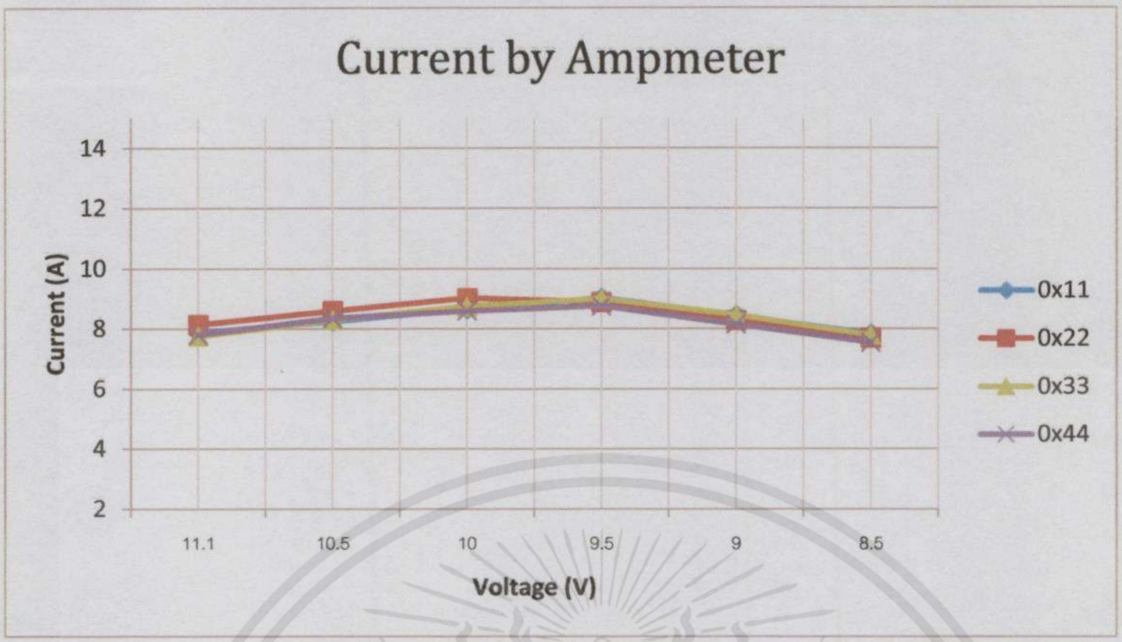
ตารางที่ ข.6 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ลดลงและกระแสไฟฟ้า

Closeloop Volt Drop (Current)								
Voltage	0x11		0x22		0x33		0x44	
	Sensor	Ampmeter	Sensor	Ampmeter	Sensor	Ampmeter	Sensor	Ampmeter
11.1	7.640	7.87	10.312	8.14	11.971	7.76	10.312	7.81
10.5	8.245	8.26	11.247	8.60	12.595	8.30	11.064	8.35
10.0	8.758	8.66	11.865	9.03	13.748	8.75	11.564	8.60
9.5	9.287	9.03	11.890	8.89	14.444	9.01	12.004	8.76
9.0	8.669	8.45	11.130	8.28	13.663	8.47	11.146	8.15
8.5	7.957	7.82	10.292	7.70	12.618	7.79	10.381	7.55



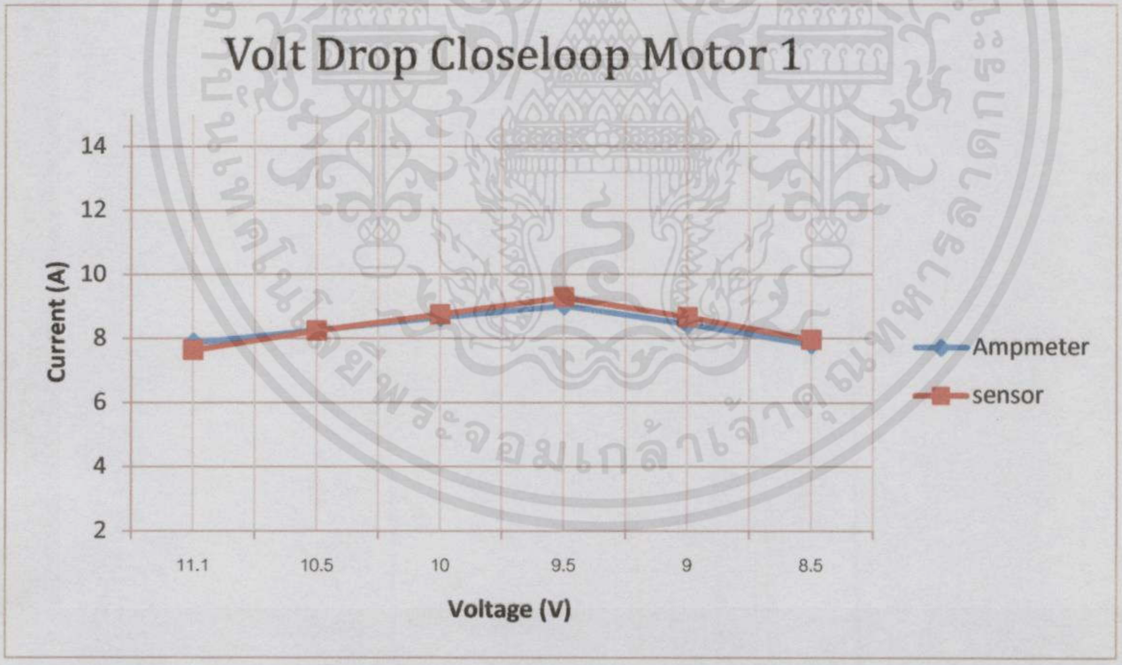
รูปที่ ข.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้า (2)

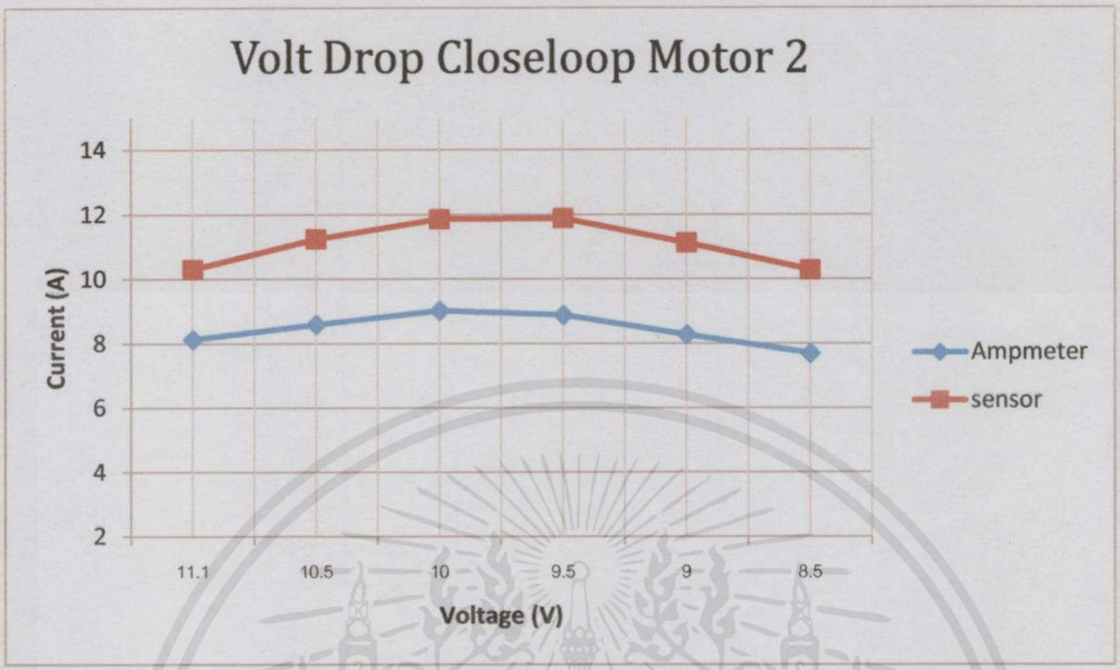
มอเตอร์ตัวที่ 1



รูปที่ ข.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ตัวที่ 1

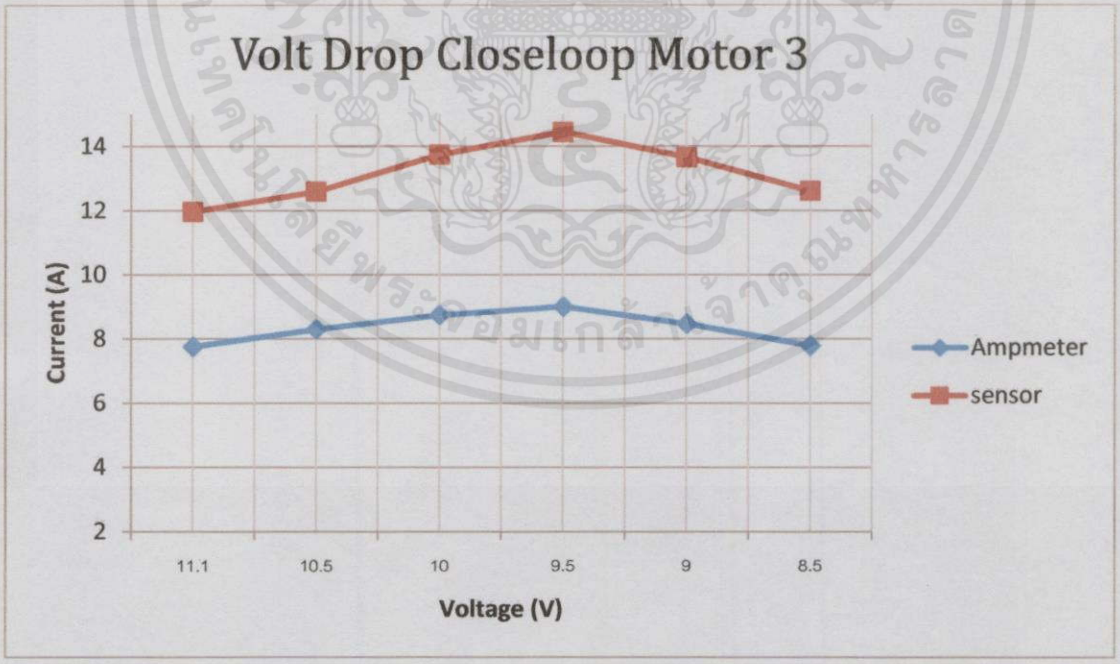
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 2



รูปที่ ข.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ตัวที่ 2

มอเตอร์ตัวที่ 3

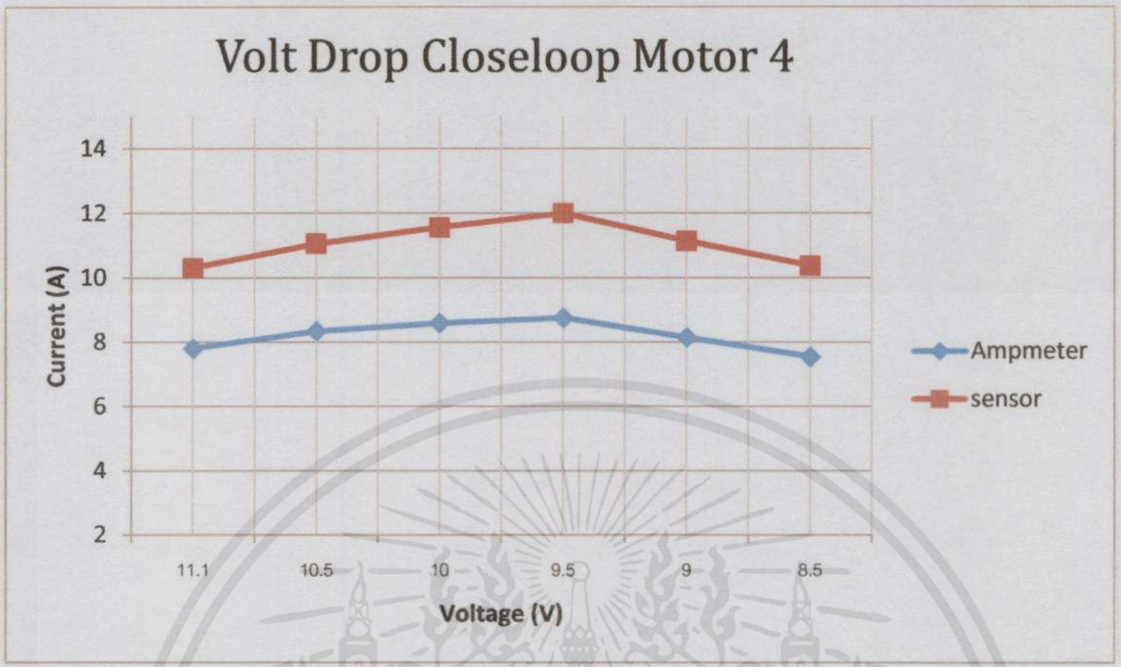


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ ข.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ตัวที่ 3

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มอเตอร์ตัวที่ 4



รูปที่ ข.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ตัวที่ 4

ตารางที่ ข.7 ผลการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าขาออกจาก AD8210 และกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ใช้

Test AD8210								
	0x11		0x22		0x33		0x44	
RPM	Voltage	Ampmeter	Voltage	Ampmeter	Voltage	Ampmeter	Voltage	Ampmeter
0	0.04	0.28	0.06	0.28	0.07	0.28	0.06	0.28
2000	0.14	0.72	0.18	0.72	0.21	0.72	0.18	0.72
2500	0.19	1.06	0.24	1.00	0.28	1.05	0.24	1.00
3000	0.27	1.50	0.35	1.40	0.41	1.46	0.35	1.37
3500	0.40	2.08	0.51	1.95	0.60	2.05	0.50	1.91
4000	0.62	2.82	0.78	2.69	0.92	2.78	0.77	2.61
4500	0.95	3.42	1.18	3.65	1.41	3.49	1.14	3.50
5000	1.36	5.00	1.73	4.85	2.08	5.05	1.70	4.70
5500	1.91	6.68	2.35	6.30	2.75	6.72	2.34	6.25
6000	2.53	8.74	3.26	8.53	3.69	8.82	3.17	8.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้