

มอเตอร์ไซค์ทรงตัว  
SELF-BALANCING MOTORCYCLE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

ใบนํ้าหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

มอเตอร์ไซค์ทรงตัว

SELF-BALANCING MOTORCYCLE



T144392



กษิตศ มีสันทัด  
เดชาวัต พิณทุกานนท์  
ปฏิภาณ ธนะจินดานนท์

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 144392  
รับเดือนปี 24 ๓๓ ๖๕๕๖

b. 10879224  
i. ....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# SELF-BALANCING MOTORCYCLE



THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN CONTROL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# มอเตอร์ไซค์ทรงตัว

โดย

นายกษิตศ มีสันทัต 55010057

นายเดชาวัต พิณฑุกานนท์ 55010430

นายปฏิภาณ ณะจินดานนท์ 55010693

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.ถาวร เบญจนราสุทธิ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สองเมือง นันทขว้าง

ปีการศึกษา 2558

## บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอทฤษฎีและการออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์ไซค์ทรงตัว เพื่อให้มีเสถียรภาพและสามารถรักษาสมดุลไว้ได้ในสภาวะอยู่นิ่ง การควบคุมมอเตอร์ไซค์ทรงตัวอาศัยหลักการแรงใจโรสโคปิกจากงานหมุน 2 งาน การวัดตำแหน่งเชิงมุมโดยเซนเซอร์สองประเภทคือ เซนเซอร์วัดความเร่ง และเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม ค่าวัดดังกล่าวจะถูกไมโครคอนโทรลเลอร์ประมวลผลโดยอาศัยตัวกรองคาลมาน และคำนวณสัญญาณควบคุมโดยอาศัยตัวบ่อนกลับสเตทในรูปแบบสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชันจ่ายให้กับดิจิทัลเซอร์โวมอเตอร์สองตัวเพื่อปรับมุมเอียงของงานหมุนทั้งสองตัวซึ่งหมุนด้วยความเร็วคงที่และมีทิศทางการหมุนตรงข้ามกัน ก่อนการใช้งานจริงจะจำลองระบบควบคุมด้วยโปรแกรมแมทแลปเพื่อตรวจสอบเสถียรภาพและสมรรถนะของระบบ

การทดลองจริง พบว่าในการออกแบบตัวควบคุมครั้งแรกนั้นมอเตอร์ไซค์ทรงตัวที่ออกแบบไม่สามารถรักษาสมดุลไว้ได้เนื่องจากค่าวัดจากเซนเซอร์มีความผิดพลาดมากเพราะการสั่นจากการทำงานของมอเตอร์ จึงได้ปรับเซนเซอร์ให้ห่างจากมอเตอร์เพื่อลดผลของการสั่น พบว่าค่าวัดจากเซนเซอร์ดีขึ้นแต่ยังมีความผิดพลาดอยู่และมอเตอร์ไซค์ทรงตัวยังรักษาสมดุลไม่ได้ ดังนั้นได้ออกแบบตัวควบคุมใหม่พบว่าจากการจำลองให้ผลตอบสนองดีขึ้นแต่เมื่อทดลองจริงมอเตอร์ไซค์ทรงตัวยังไม่สามารถรักษาสมดุลไว้ได้ โดยจากการสังเกตพบว่าเมื่อมอเตอร์ไซค์เอียงระบบมีแรงผลักแต่ไม่เพียงพอที่จะทำให้มอเตอร์ไซค์กลับสู่สมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# SELF-BALANCING MOTORCYCLE

By

Mr. Kasidit Meesantad 55010057

Mr. Dechawat Pintukanon 55010430

Mr. Patiphan Tanajindanon 55010693

Advisors

Assoc. Prof. Dr. Taworn Benjanarasuth

Asst. Prof. Songmoung Nundrakwang

Academic Year 2015

## ABSTRACT

This thesis presents theory and control system design for a self-balancing motorcycle to achieve stability and to balance itself while not in a moving motion. The concept of the self-balancing motorcycle is based on gyroscopic force from two flywheels. The angular position of the self-balancing motorcycle is measured by two sensors which are accelerometer and gyroscope. Using a microcontroller, the measured values are fine-tuned by Kalman filter and control signals are computed as pulse-width modulation signals to drive two servo motors based on state feedback control. The tilt angles of the two flywheels are adjusted by the servo motors while each flywheel is driving in constant speed and in the opposite direction. The simulations by MATLAB were conducted to verify the stability and performance before actual implementation.

The first experiment showed that the controller could not balance the self-balancing motorcycle because of errors from the sensors due to vibration of motors. Consequently, the sensors were installed further from the motors to reduce effect of the vibration. The measured values were more precise but still erroneous so the self-balancing motorcycle could not be balanced. For the improvement, a new controller was designed and had a better response in the simulation. However, the self-balancing motorcycle still could not balance itself because of insufficient force generated by the flywheels.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ คณะผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่  
ปรึกษารองศาสตราจารย์ ดร.ถาวร เบญจนราสุทธิ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาแนวทางในการแก้ไขปัญหาทั้ง  
ทางทฤษฎีและทางปฏิบัติ รวมถึงให้ความเอาใจใส่ดูแลสอบถามถึงความก้าวหน้าอย่างสม่ำเสมอ ทำให้  
ผู้จัดทำเข้าใจปัญหานั้น ๆ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์สองเมือง นันทขว้าง อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้  
คำแนะนำ ให้คำปรึกษา และออกแบบชิ้นงานให้แก่คณะผู้จัดทำ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการ  
ทำโครงการ ตลอดจนอำนวยความสะดวกให้แก่คณะผู้จัดทำจนสามารถทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ได้  
เสร็จสิ้น

ขอขอบคุณบุคคลที่สำคัญที่สุด คือบิดาและมารดา ที่อบรมสั่งสอนเลี้ยงดู ส่งเสียให้มีโอกาส  
ศึกษาเล่าเรียน และให้กำลังใจในการดำเนินชีวิต ข้าพเจ้าขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

ผู้จัดทำ

นายกษิตศ มีสันทัด

นายเดชาวัต พิณฑุทานนท์

นายปฏิภาณ ธนะจินดานนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 กล่าวนำ	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขั้นตอนการศึกษาและจัดทำโครงการ	1
1.4 รายละเอียดของปริญญานิพนธ์	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 การทำงานของใจโรสโคป	3
2.2 หลักการทรงตัวของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว	4
2.2.1 การทรงตัวของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวเมื่อสมดุล	4
2.2.2 การทรงตัวของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวเมื่อเอียง	5
2.3 สมการการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว	6
2.4 สัญญาณพัลส์วិธมอดูเลชัน	13
2.5 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน	14
2.6 เซอร์โวมอเตอร์	14
2.7 เซนเซอร์และการประยุกต์ใช้งาน	15
2.7.1 เซนเซอร์วัดความเร่ง	15
2.7.2 เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม	15
2.8 ตัวกรองคาลมาน	15
2.9 ตัวควบคุมป้อนกลับสเตท	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 3 การออกแบบ</b>	19
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในมอเตอร์ไซค์ทรงตัว	19
3.1.1 โครงของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว	19
3.1.2 ลูกตุ้มไจโร	20
3.1.3 มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน	20
3.1.4 เซอร์โวมอเตอร์	21
3.1.5 เครื่องมือควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์	22
3.1.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์	22
3.1.7 โมดูลเซนเซอร์รวม	23
3.2 หลักการทำงานของระบบ	24
3.3 การออกแบบตัวควบคุม	24
3.4 แบบจำลองการทรงตัวผ่านโปรแกรมเมทแลป	26
<b>บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง</b>	27
4.1 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้า	27
4.1.1 การทดสอบมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน	27
4.1.2 การทดสอบเซอร์โวมอเตอร์	29
4.2 การปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร็ว	31
4.3 การทดลองวัดค่ามุมพิทช์ด้วยเซนเซอร์วัดความเร็ว	41
4.4 การปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม	43
4.5 การทดลองใช้ตัวกรองคาลมาน	45
4.6 การหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของจานหมุนรอบจุดกำเนิดของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว	47
4.7 การจำลองการเคลื่อนที่ผ่านโปรแกรมเมทแลป	48
4.7.1 การจำลองเมื่อใช้ตัวควบคุม 1	48
4.7.2 การจำลองเมื่อใช้ตัวควบคุม 2	49
4.8 การทดลอง	54
4.8.1 การทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุม 1 ก่อนการปรับเซนเซอร์	54
4.8.2 การทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุม 1 หลังการปรับเซนเซอร์	55
4.8.3 การทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุม 2	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน	59
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน	59
5.2 ปัญหาที่พบและแนวทางการแก้ไข	59
5.3 แนวทางการพัฒนา	60
เอกสารอ้างอิง	61
ภาคผนวก	62
ภาคผนวก ก. แบบโครงสร้างมอเตอร์ไซค์ทรงตัว	63
ภาคผนวก ข. แบบจำลองการทรงตัว	68
ภาคผนวก ค. โปรแกรมการทำงาน	72



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ใจโรสโคป	3
2.2 การหมุนของลูกข้าง	4
2.3 การทรงตัวของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวเมื่อสมดุล	5
2.4 การทรงตัวของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวเมื่อเอียง	5
2.5 แผนภาพมุมมองด้านข้างของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว	6
2.6 การหมุนรอบแกน $y$	8
2.7 การหมุนรอบแกน $z$	8
2.8 มุมมองด้านหน้าของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว	9
2.9 แผนภาพของงานหมุน 1 และงานหมุน 2	10
2.10 ลักษณะของสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชัน	13
2.11 บล็อกการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์	14
3.1 มอเตอร์ไซค์ทรงตัว	19
3.2 โครงมอเตอร์ไซค์ทรงตัว	20
3.3 ลูกตุ้มใจโร	20
3.4 มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน	21
3.5 เซอร์โวมอเตอร์	22
3.6 เครื่องมือควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์	22
3.7 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อูโน	23
3.8 เซนเซอร์ GY-88	23
3.9 การทำงานของระบบทั้งหมด	24
3.10 แบบจำลองระบบควบคุมมอเตอร์ไซค์ทรงตัวด้วยตัวควบคุมป้อนกลับสเตท	26
4.1 ตำแหน่งการติดตั้งมอเตอร์	27
4.2 การทดสอบเซอร์โวมอเตอร์	29
4.3 ตำแหน่งการติดตั้งเซอร์โวมอเตอร์	29
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชันกับมุมที่อ่านได้ของเซอร์โวตัวที่ 1	31
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชันกับมุมที่อ่านได้ของเซอร์โวตัวที่ 2	31
4.6 การวางมอเตอร์ไซค์ทรงตัวในตำแหน่งต่าง ๆ	33
4.7 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T1 แกน $x$	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T1 แกน y	36
4.9 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T1 แกน z	36
4.10 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T2 แกน x	37
4.11 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T2 แกน y	37
4.12 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T2 แกน z	37
4.13 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T3 แกน x	38
4.14 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T3 แกน y	38
4.15 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T3 แกน z	38
4.16 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T4 แกน x	39
4.17 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T4 แกน y	39
4.18 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T4 แกน z	39
4.19 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T5 แกน x	40
4.20 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T5 แกน y	40
4.21 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T5 แกน z	40
4.22 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T6 แกน x	41
4.23 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T6 แกน y	41
4.24 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T6 แกน z	41
4.25 การทดลองวัดค่ามุมพิทช์	42
4.26 มุมพิทช์ที่เซนเซอร์วัดความเร่งอ่านได้	43
4.27 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมแกน x	44
4.28 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมแกน y	44
4.29 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมแกน z	45
4.30 ผลการทดลองวัดค่ามุมพิทช์โดยใช้ตัวกรองคาลมานขณะปิดมอเตอร์	46
4.31 ผลการทดลองวัดค่ามุมพิทช์โดยใช้ตัวกรองคาลมานขณะเปิดมอเตอร์	46
4.32 การหาโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว	47
4.33 การจำลองมอเตอร์ไซค์ทรงตัวเมื่อออกแบบตัวควบคุม 1 และไม่มีแรงภายนอกมากระทำ	50
4.34 การจำลองมอเตอร์ไซค์ทรงตัวเมื่อออกแบบตัวควบคุม 1 และมีแรงภายนอกมากระทำ	51
4.35 การจำลองมอเตอร์ไซค์ทรงตัวเมื่อออกแบบตัวควบคุม 2 และไม่มีแรงภายนอกมากระทำ	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.36 การจำลองมอเตอร์ไซค์ทรงตัวเมื่อออกแบบตัวควบคุม 2 และมีแรงภายนอกมากระทำ	53
4.37 การจับมอเตอร์ไซค์ทรงตัวให้ตั้งตรง	54
4.38 ผลการทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุม 1 ก่อนการปรับเซนเซอร์	55
4.39 การปรับการติดตั้งเซนเซอร์	55
4.40 ผลการทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุม 1 หลังการปรับเซนเซอร์	56
4.41 ผลการทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุม 2	57



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว	7
3.1 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว	25
4.1 ผลการทดลองของมอเตอร์และจานหมุน 1 และ 2	28
4.2 ผลการทดลองจ่ายสัญญาณพัลส์วริธมอดูเลชันและอ่านค่ามุมที่ได้จากเซอร์โวมอเตอร์	30
4.3 ผลการทดลองวัดค่ามุมพิทช์ด้วยเซนเซอร์วัดความเร็ว	42



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 กล่าวนำ

หากจะกล่าวถึงยานพาหนะที่มีความคล่องตัว สามารถขับเคลื่อนที่แคบได้ และใช้พื้นที่จอดน้อย คงต้องนึกถึงมอเตอร์ไซค์ แต่ปัญหาอย่างหนึ่งก็คือ การทรงตัวที่ไม่มั่นคงซึ่งอาจทำให้ล้มข้างและเป็นอันตรายได้ ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะทำให้อุปกรณ์มอเตอร์ไซค์ทรงตัวอยู่ได้โดยไม่ล้มข้าง ซึ่งจะทำให้มอเตอร์ไซค์ขับขี่ง่ายและปลอดภัยมากขึ้น จากการศึกษาของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวพบว่ามีการใช้จานหมุน (Flywheel) เพียง 1 ตัวทำให้อุปกรณ์มอเตอร์ไซค์ทรงตัว แต่มีปัญหาคือ จานหมุนปรับทิศทางการหมุนไม่ได้ในทันที จึงต้องการที่จะออกแบบให้ใช้จานหมุน 2 ตัวตามแนวคิดของรถ C-1 โดยบริษัท Lit motors ที่ใช้ได้จริงในเชิงพาณิชย์ ซึ่งจานหมุนไม่ต้องปรับทิศแต่อาศัยการพลิกซึ่งง่ายกว่าและสามารถทรงตัวได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

หลักการการทำงานของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวประกอบด้วย การวัดค่ามุมเอียงของมอเตอร์ไซค์ที่เปลี่ยนไปด้วยเซนเซอร์ IMU แล้วส่งมาประมวลผลที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมแล้วไปขับเซอร์โวมอเตอร์ให้ปรับมุมของจานหมุนทั้ง 2 ตัวให้เหมาะสม เพื่อให้มอเตอร์ไซค์ทรงตัวอยู่ได้และไม่ล้มเมื่อมีแรงผลักรถจากทางด้านข้าง

### 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและออกแบบระบบการทรงตัวของมอเตอร์ไซค์ให้สามารถทรงตัวได้
2. เพื่อสร้างต้นแบบมอเตอร์ไซค์ทรงตัว
3. เพื่อประยุกต์ใช้ความรู้ทางทฤษฎีในการปฏิบัติจริง

### 1.3 ขั้นตอนการศึกษาและการจัดทำโครงการ

1. วิเคราะห์โครงสร้างและการทำงานของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว
2. หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และทดลองหาพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว
3. ออกแบบมอเตอร์ไซค์ทรงตัว ทั้งส่วนโครงสร้าง ส่วนการวัด และส่วนการประมวลผล
4. ออกแบบการควบคุมป้อนกลับสเตท (State Feedback Control) และจำลองการทรงตัวของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว
5. นำตัวควบคุมที่ได้ออกแบบมาทดลองกับมอเตอร์ไซค์ทรงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 1.4 รายละเอียดของปฏิญญานิพนธ์

เนื้อหาที่จะกล่าวในปฏิญญานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย

บทที่ 1 บทนำ กล่าวนำถึงวัตถุประสงค์ ขั้นตอนการศึกษา การจัดทำโครงการ พร้อมทั้งรายละเอียดของปฏิญญานิพนธ์แต่ละบท

บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่ใช้เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว การใช้งานเซนเซอร์ และการควบคุมป้อนกลับสเตท

บทที่ 3 หลักการออกแบบ จะกล่าวถึงการออกแบบโครงสร้างของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์ไซค์ทรงตัว

บทที่ 4 การทดลอง ผลการทดลองมอเตอร์และผลการทดลองเก็บค่ามุมพิทช์ ที่ได้จากการอ่านค่าจากเซนเซอร์วัดความเร่งและเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม ผลการจำลองการทรงตัวของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวผ่านโปรแกรมแมทแลป และผลการทรงตัวจริง

บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป นำเสนอบทสรุปการดำเนินงาน ปัญหาที่เกิดขึ้น และแนวทางการปรับปรุงพัฒนาโครงการต่อไป

ในส่วนท้ายของปฏิญญานิพนธ์นี้เป็นภาคผนวก ซึ่งแสดงถึงรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย การออกแบบโครงสร้างของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว และโปรแกรมที่ใช้ควบคุมมอเตอร์ไซค์ทรงตัว

## บทที่ 2

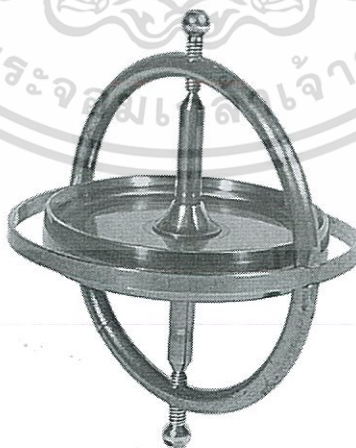
# ทฤษฎีและหลักการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่ใช้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว การใช้งานมอเตอร์ ใช้งานเซนเซอร์ ตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter) และการควบคุมป้อนกลับสเตท

### 2.1 การทำงานของไจโรสโคป

ไจโรสโคป (Gyroscope) เป็นอุปกรณ์ที่อาศัยแรงเฉื่อยของล้อหมุน เพื่อช่วยรักษาระดับทิศทางของแกนหมุน โดยประกอบด้วยล้อหมุนเร็วบรรจุอยู่ในกรอบอีกทีหนึ่ง ทำให้เอียงในทิศทางต่างๆ ได้โดยอิสระ นั่นคือ หมุนในแกนใดๆ ก็ได้ เมื่อไจโรสโคปหมุนจะมีโมเมนตัมเชิงมุม (Angular Momentum) ซึ่งเป็นปริมาณอนุรักษ์ ที่มีทั้งขนาดและทิศทาง ทำให้มันคงรักษาตำแหน่งของมันไว้ได้ แม้กรอบล้อจะเอียง ดังแสดงในรูปที่ 2.1

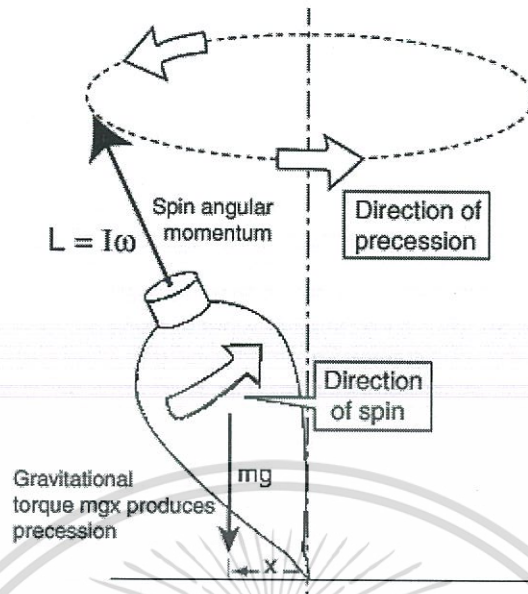
การหมุนของลูกข่างก็เป็นการหมุนแบบไจโรสโคปเช่นเดียวกัน ซึ่งจะมีการหมุน 2 แกนด้วยกัน แกนแรกคือ แกนการหมุนรอบตัวเองของลูกข่าง แกนที่สองคือ ลูกข่างทั้งลูกจะหมุนรอบแกนกลางอีกแกนหนึ่ง การหมุนแบบนี้เรียกว่า การควง (Precession) ซึ่งเกิดจากแรงบิด (Torque) ของน้ำหนักลูกข่างเอง โดยลูกข่างจะไม่ล้ม แต่ถ้าไม่หมุนจะล้ม ซึ่งดูเหมือนท้าทายกับแรงโน้มถ่วงของโลก ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 ไจโรสโคป

(หมายเหตุ ภาพจาก [http://www.lecompendium.com/dossier\\_meca\\_20\\_gyroscope/gyroscope.htm/gyroscope.htm](http://www.lecompendium.com/dossier_meca_20_gyroscope/gyroscope.htm/gyroscope.htm))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 การหมุนของลูกข้าง

(หมายเหตุ ภาพจาก [https://www.4physics.com/phy\\_demo/top/top.html](https://www.4physics.com/phy_demo/top/top.html))

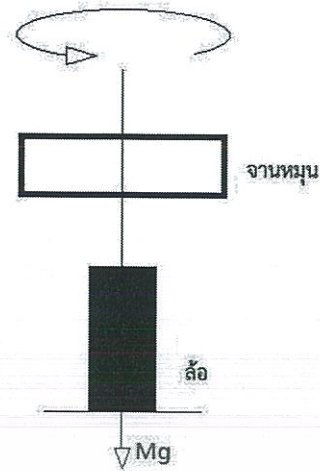
## 2.2 หลักการทรงตัวของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว

การรักษาการทรงตัวของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวไม่ให้ล้มข้าง จะใช้หลักการทำงานของไจโรสโคปและโมเมนตัมเชิงมุมมาช่วยคือ จะใช้มอเตอร์ทรงตัวติดกับตุ้มน้ำหนัก 2 ตัวทำหน้าที่เป็นจานหมุนของไจโรสโคป โดยมอเตอร์ 2 ตัวนี้จะถูกติดอยู่ตามแนวยาวที่กลางตัวของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว และจะหมุนอยู่ตลอดในทิศตรงข้ามกันด้วยความเร็วที่เท่ากัน เพื่อให้แรงบิดหักล้างกันทำให้ทรงตัวอยู่ได้ และจานหมุนจะรักษาทิศทางทรงตัวของตัวเองด้วยโมเมนตัมเชิงมุมคงที่ แต่เมื่อเกิดการเอียง น้ำหนักจะตกห่างจากจุดหมุน เกิดแรงบิดกระทำต่อจานหมุนส่งผลให้โมเมนตัมเชิงมุมไม่คงที่ การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเชิงมุมนี้ไม่ได้เปลี่ยนแปลงที่ปริมาณแต่เปลี่ยนที่ทิศทาง ทำให้เกิดการควงเพื่อรักษาสมดุล

### 2.2.1 การทรงตัวของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวเมื่อสมดุล

จานหมุนทั้งสองตัวจะหมุนด้วยความเร็วที่เท่ากันทิศทางตรงกันข้ามคือ ตัวหนึ่งหมุนทางซ้าย อีกตัวหมุนทางขวาเพื่อให้แรงบิดหักล้างกัน ซึ่งจะทำให้รถมอเตอร์ไซค์ทรงตัวไม่หมุนตามและทรงตัวอยู่ได้ โดยจานหมุนจะอยู่ในลักษณะสมดุลคือไม่เอียงหน้าหรือหลัง มีโมเมนตัมเชิงมุมคงที่เมื่อมองจากทางด้านหน้าจะแสดงดังรูปที่ 2.3

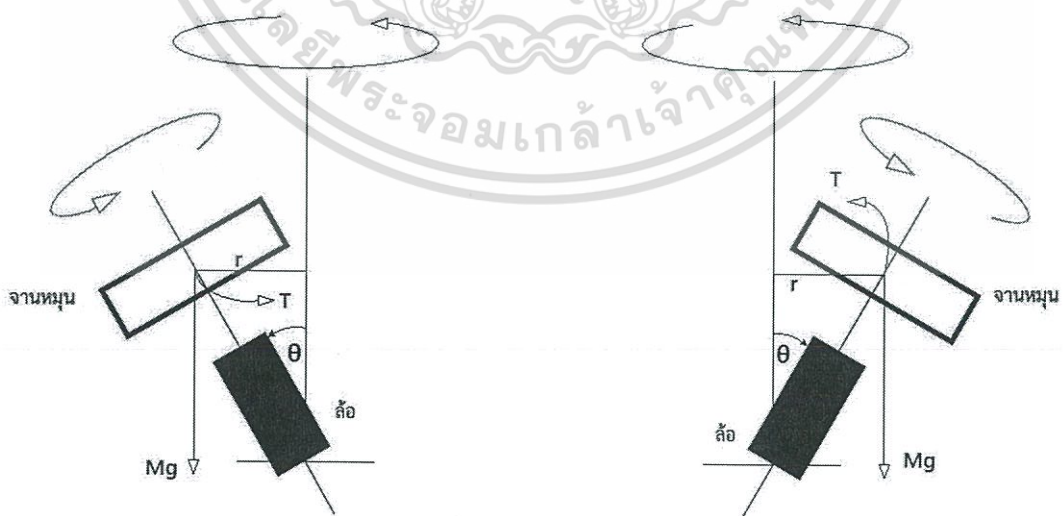
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 การทรงตัวของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวเมื่อสมดุล

### 2.2.2 การทรงตัวของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวเมื่อเอียง

เมื่อมีแรงกระทำมาที่มอเตอร์ไซค์ทรงตัวจากทางด้านข้างซ้ายหรือขวา ทำให้ตัวมอเตอร์ไซค์ทรงตัวเอียงหรือเกิดจากการที่เลี้ยวซ้ายหรือขวาทำให้รถมอเตอร์ไซค์ทรงตัวเอียง จานหมุนทั้งสองตัวจะรักษาสสมดุลของตัวเอง และสร้างแรงในทิศสวนทางกับแรงกระทำ เพื่อทำให้มอเตอร์ไซค์ทรงตัวกลับมาอยู่ในลักษณะตั้งตรงเหมือนเดิม โดยแรงนั้นคือแรงบิดที่เกิดจากน้ำหนักของจานหมุนเมื่อมอเตอร์ไซค์ทรงตัวเอียง แบ่งเป็นการเอียงทางซ้าย และการเอียงทางขวา เมื่อมองจากทางด้านหน้าจะแสดงดังรูปที่ 2.4



(ก) เมื่อมุมเอียงเป็นลบ

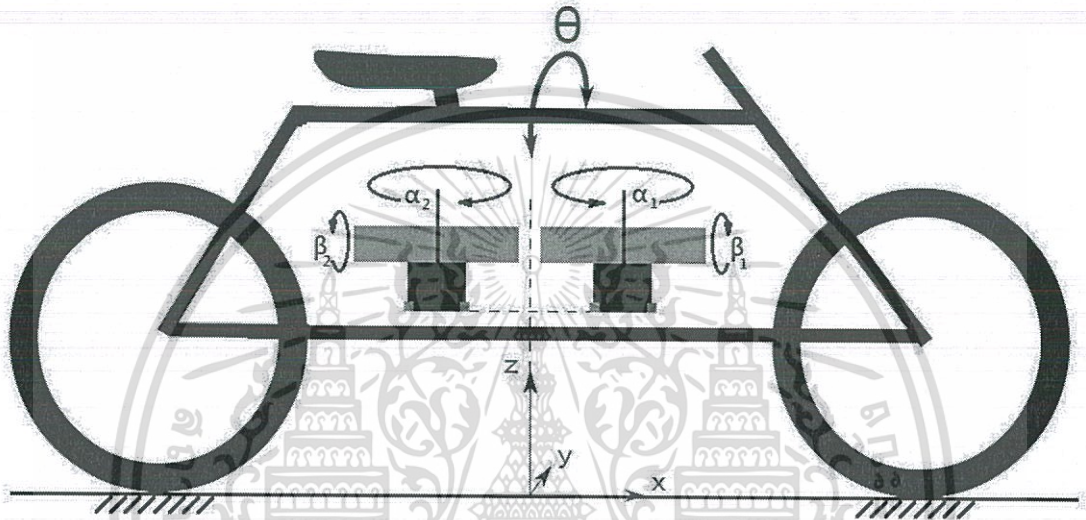
(ข) เมื่อมุมเอียงเป็นบวก

รูปที่ 2.4 การทรงตัวของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวเมื่อเอียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 สมการการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว

ในหัวข้อนี้จะเป็นการหาสมการการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวขณะอยู่นิ่ง โดยหลักการหาจะอ้างอิงถึงเมตริกซ์การหมุน (Rotation Matrix) วิธีการของลากรางจ์ (Lagrange's Method) และสมการออยเลอร์-ลากรางจ์ (Euler-Lagrange Equation)



รูปที่ 2.5 แผนภาพมุมมองด้านข้างของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว

รูปที่ 2.5 แสดงภาพมุมมองด้านข้างของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว ซึ่งมีส่วนประกอบหลักของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวอยู่ 2 ส่วน คือ

- ส่วนโครงสร้างมอเตอร์ไซค์ทรงตัว
- จานหมุน 1 และจานหมุน 2

โดยมีตัวแปร และพารามิเตอร์ที่ใช้ในสมการการเคลื่อนที่แสดงดังตารางที่ 2.1

## ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	หน่วย
น้ำหนักของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว	$m_b$	kg
ความสูงของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวผ่านจุดศูนย์กลางมวล	$h_b$	m
น้ำหนักจานหมุน 1	$m_{f1}$	kg
น้ำหนักจานหมุน 2	$m_{f2}$	kg
ความสูงของจานหมุน 1 ผ่านจุดศูนย์กลางมวล	$h_{f1}$	m
ความสูงของจานหมุน 2 ผ่านจุดศูนย์กลางมวล	$h_{f2}$	m
มุมพลิกของจานหมุน 1	$\beta_1$	rad
มุมพลิกของจานหมุน 2	$\beta_2$	rad
แรงโน้มถ่วง	$g$	$m/s^2$
โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว	$I_{bx}$	$kg.m^2$
โมเมนต์ความเฉื่อยของจานหมุน 1	$I_{f1(x,y,z)}$	$kg.m^2$
โมเมนต์ความเฉื่อยของจานหมุน 2	$I_{f2(x,y,z)}$	$kg.m^2$
มุมเอียงของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว	$\theta$	rad
มุมหมุนของจานหมุน 1	$\alpha_1$	rad
มุมหมุนของจานหมุน 2	$\alpha_2$	rad

การพิจารณาสมการการเคลื่อนที่นั้นจะใช้วิธีการของลากรางจ์ โดยกำหนด  $L$  คือ ตัวดำเนินการทางลากรางจ์ (Lagrange's Operator) ดังสมการที่ (2.1)

$$L = T - U \quad (2.1)$$

ซึ่ง  $T$  คือ พลังงานจลน์ (Kinetic Energy)

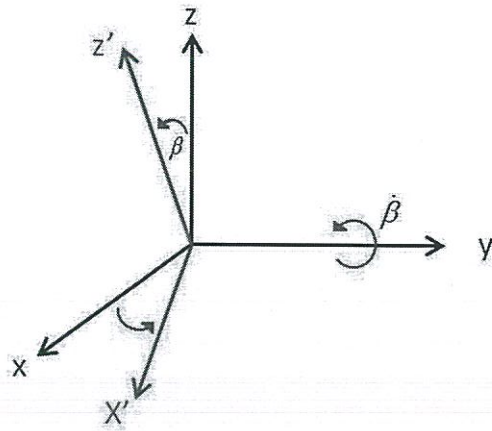
$U$  คือ พลังงานศักย์ (Potential Energy)

พร้อมทั้งใช้เมตริกซ์การหมุนในการแสดงการหมุนของวัตถุรอบแกนมุมต่าง ๆ มีดังต่อไปนี้

1. การหมุนรอบแกน  $y$  เป็นมุม  $\beta$  ดังรูปที่ 2.6 และมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.2)

$$R(\beta, y) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

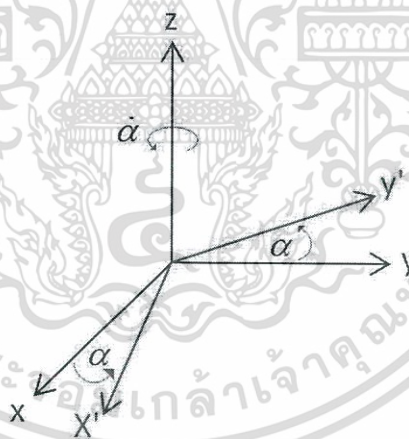
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การหมุนรอบแกน y

2. การหมุนรอบแกน z เป็นมุม  $\alpha$  ดังรูปที่ 2.7 และมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.3)

$$R(\alpha, z) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.7 การหมุนรอบแกน z

จากสมการที่ (2.2) และ (2.3) จะสามารถเขียนเมตริกซ์การหมุนใด ๆ ได้ดังสมการที่ (2.4)

$$R = R(\beta, y)R(\alpha, z) = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & -\sin \alpha \cos \beta & \sin \beta \\ \sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการพิจารณาสมการ จะทำการสมมติปัจจัยเพื่อง่ายต่อการพิจารณา ดังนี้

- ความกว้างของยางเป็นศูนย์
- อยู่ในสภาวะพื้นลื่น

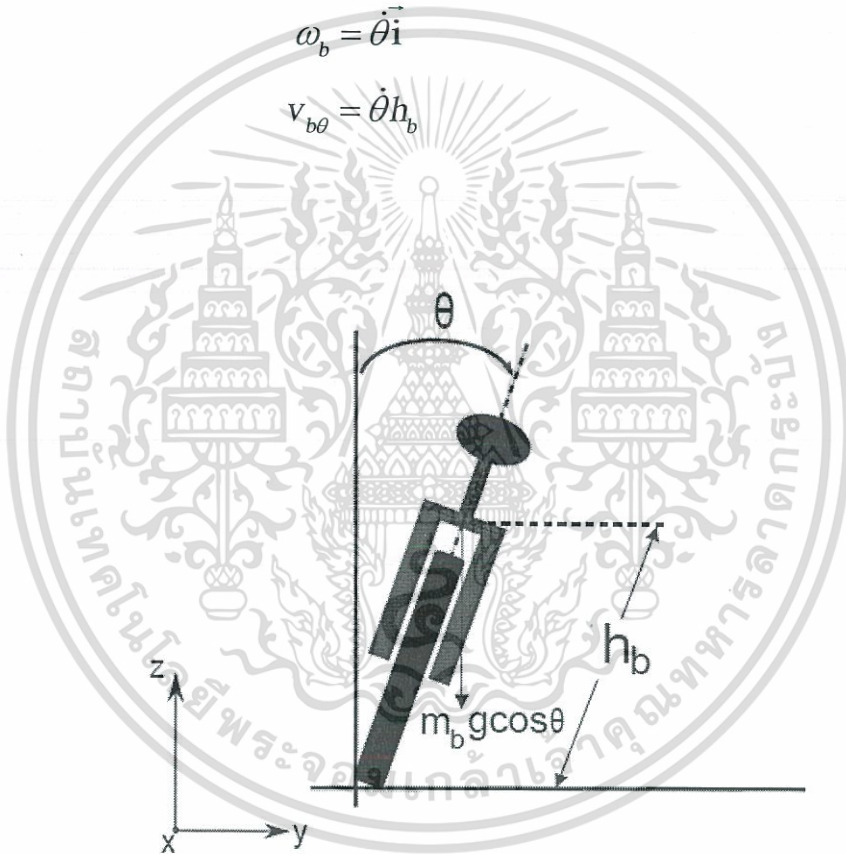
มุมมองด้านหน้าของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวจะแสดงดังรูปที่ 2.8 และสมการพลังงานจลน์ในวัตถุแข็งเกร็งของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวอธิบายได้ดังสมการที่ (2.5)

$$T_b = \frac{1}{2} m_b v_{b\theta}^2 + \frac{1}{2} I \omega_b^2 \quad (2.5)$$

เมื่อ

$$\omega_b = \dot{\theta} \vec{i} \quad (2.6)$$

$$v_{b\theta} = \dot{\theta} h_b \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.8 มุมมองด้านหน้าของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนภาพของจานหมุน 1 และจานหมุน 2 จะแสดงดังรูปที่ 2.9 และสมการพลังงานจลน์ในวัตถุแข็งเกร็งของจานหมุน 1 และจานหมุน 2 อธิบายได้ดังสมการที่ (2.8)

$$T_{f_1} = \frac{1}{2} m_{f_1} v_{f_1\theta}^2 + \frac{1}{2} (I_{f_{1x}} \omega_{f_{1x}}^2 + I_{f_{1y}} \omega_{f_{1y}}^2 + I_{f_{1z}} \omega_{f_{1z}}^2) \quad (2.8)$$

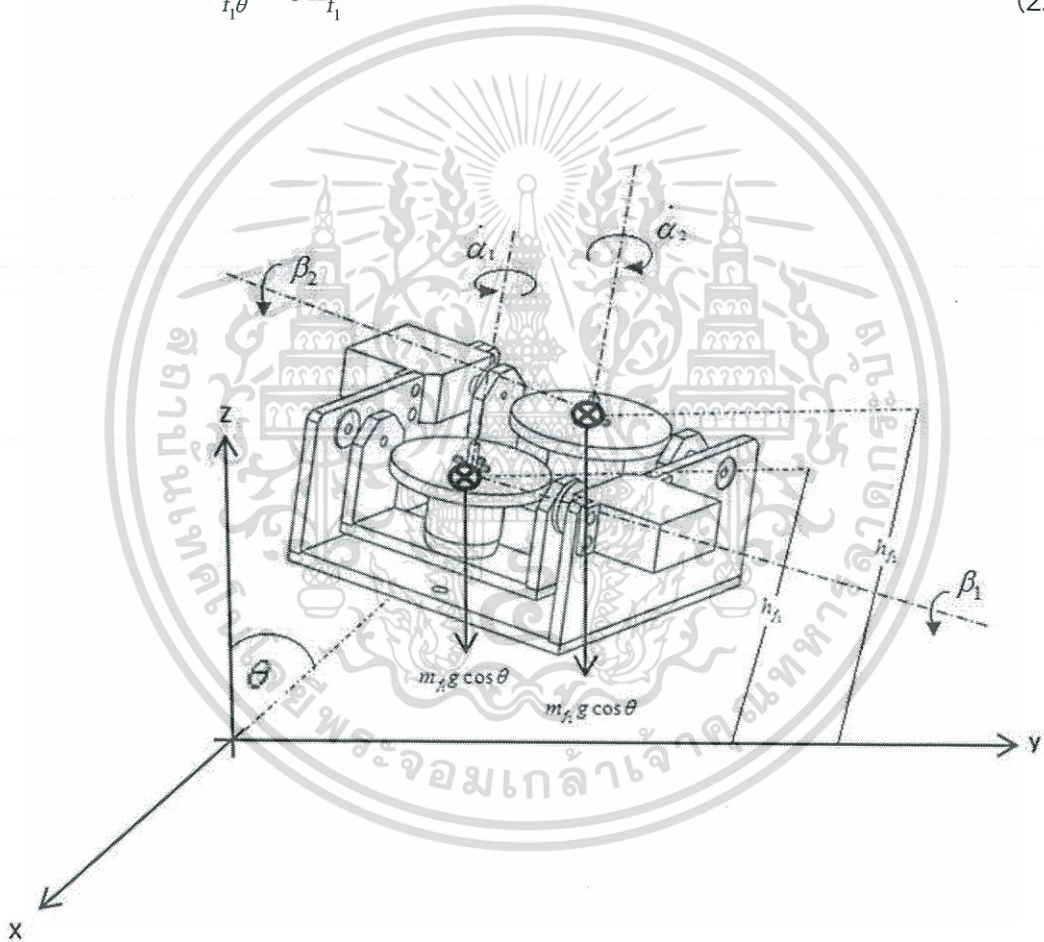
เมื่อ

$$\omega_{f_{1x}} = (\dot{\theta} \cos \alpha_1 \cos \beta_1 + \dot{\beta}_1 \sin \alpha_1) \bar{i} \quad (2.9)$$

$$\omega_{f_{1y}} = (\dot{\theta} \sin \alpha_1 \cos \beta_1 + \dot{\beta}_1 \cos \alpha_1) \bar{j} \quad (2.10)$$

$$\omega_{f_{1z}} = (\dot{\theta} \sin \beta_1 + \dot{\alpha}_1) \bar{k} \quad (2.11)$$

$$v_{f_1\theta} = \dot{\theta} h_{f_1} \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.9 แผนภาพของจานหมุน 1 และจานหมุน 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการพลังงานจลน์ในวัตถุแข็งเกร็งของจานหมุน 2 อธิบายได้ดังสมการที่ (2.13)

$$T_{f_2} = \frac{1}{2} m_{f_2} v_{f_2\theta}^2 + \frac{1}{2} (I_{f_{2x}} \omega_{f_{2x}}^2 + I_{f_{2y}} \omega_{f_{2y}}^2 + I_{f_{2z}} \omega_{f_{2z}}^2) \quad (2.13)$$

เมื่อ  $\omega_{f_{2x}} = (\dot{\theta} \cos \alpha_2 \cos \beta_2 + \dot{\beta}_2 \sin \alpha_2) \vec{i}$  (2.14)

$$\omega_{f_{2y}} = (\dot{\theta} \sin \alpha_2 \cos \beta_2 + \dot{\beta}_2 \cos \alpha_2) \vec{j} \quad (2.15)$$

$$\omega_{f_{2z}} = -(\dot{\theta} \sin \beta_2 + \dot{\alpha}_2) \vec{k} \quad (2.16)$$

$$v_{f_2\theta} = \dot{\theta} h_{f_2} \quad (2.17)$$

วัตถุแข็งเกร็งที่เคลื่อนที่แบบหมุนรอบแกนนิ่งจะมีพลังงานจลน์ ซึ่งพลังงานจลน์ทั้งหมดจะเป็นผลรวมพลังงานจลน์ของแต่ละส่วนย่อยอธิบายได้ดังสมการที่ (2.18)

$$T = T_b + T_{f_1} + T_{f_2}$$

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} (I_b + m_b h_b^2) \dot{\theta}^2 \\ &+ \frac{1}{2} (m_{f_1} h_{f_1}^2 \dot{\theta}^2) + \frac{1}{2} I_{f_{1x}} (\dot{\theta}^2 \cos^2 \alpha_1 \cos^2 \beta_1 + \dot{\theta} \dot{\beta}_1 \sin 2\alpha_1 \cos \beta_1 + \dot{\beta}_1^2 \sin^2 \alpha_1) \\ &+ \frac{1}{2} I_{f_{1y}} (\dot{\theta}^2 \sin^2 \alpha_1 \cos^2 \beta_1 + \dot{\theta} \dot{\beta}_1 \sin 2\alpha_1 \cos \beta_1 + \dot{\beta}_1^2 \cos^2 \alpha_1) \\ &+ \frac{1}{2} I_{f_{1z}} (\dot{\theta}^2 \sin^2 \beta_1 + 2\dot{\theta} \dot{\alpha}_1 \sin \beta_1 + \dot{\alpha}_1^2) \\ &+ \frac{1}{2} (m_{f_2} h_{f_2}^2 \dot{\theta}^2) + \frac{1}{2} I_{f_{2x}} (\dot{\theta}^2 \cos^2 \alpha_2 \cos^2 \beta_2 + \dot{\theta} \dot{\beta}_2 \sin 2\alpha_2 \cos \beta_2 + \dot{\beta}_2^2 \sin^2 \alpha_2) \\ &+ \frac{1}{2} I_{f_{2y}} (\dot{\theta}^2 \sin^2 \alpha_2 \cos^2 \beta_2 + \dot{\theta} \dot{\beta}_2 \sin 2\alpha_2 \cos \beta_2 + \dot{\beta}_2^2 \cos^2 \alpha_2) \\ &+ \frac{1}{2} I_{f_{2z}} (\dot{\theta}^2 \sin^2 \beta_2 - 2\dot{\theta} \dot{\alpha}_2 \sin \beta_2 + \dot{\alpha}_2^2) \end{aligned} \quad (2.18)$$

และพลังงานศักย์ของทั้งระบบจะหาได้จากผลรวมพลังงานศักย์ในวัตถุแข็งเกร็งของแต่ละส่วนย่อยอธิบายได้ดังสมการที่ (2.19)

$$\begin{aligned} U &= U_b + U_{f_1} + U_{f_2} \\ &= m_b h_b g \cos \theta + m_{f_1} h_{f_1} g \cos \theta + m_{f_2} h_{f_2} g \cos \theta \\ &= (m_b h_b + m_{f_1} h_{f_1} + m_{f_2} h_{f_2}) g \cos \theta \end{aligned} \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.18) และ (2.19) จะสามารถอธิบายตัวดำเนินการทางลากรางจ์ได้ตั้งสมการที่ (2.20)

$$\begin{aligned}
 L = & \frac{1}{2}(I_b + m_b h_b^2)\dot{\theta}^2 \\
 & + \frac{1}{2}(m_{f_1} h_{f_1}^2 \dot{\theta}^2) + \frac{1}{2}I_{f_1x} (\dot{\theta}^2 \cos^2 \alpha_1 \cos^2 \beta_1 + \dot{\theta}\dot{\beta}_1 \sin 2\alpha_1 \cos \beta_1 + \dot{\beta}_1^2 \sin^2 \alpha_1) \\
 & + \frac{1}{2}I_{f_1y} (\dot{\theta}^2 \sin^2 \alpha_1 \cos^2 \beta_1 + \dot{\theta}\dot{\beta}_1 \sin 2\alpha_1 \cos \beta_1 + \dot{\beta}_1^2 \cos^2 \alpha_1) \\
 & + \frac{1}{2}I_{f_1z} (\dot{\theta}^2 \sin^2 \beta_1 + 2\dot{\theta}\dot{\alpha}_1 \sin \beta_1 + \dot{\alpha}_1^2) \\
 & + \frac{1}{2}(m_{f_2} h_{f_2}^2 \dot{\theta}^2) + \frac{1}{2}I_{f_2x} (\dot{\theta}^2 \cos^2 \alpha_2 \cos^2 \beta_2 + \dot{\theta}\dot{\beta}_2 \sin 2\alpha_2 \cos \beta_2 + \dot{\beta}_2^2 \sin^2 \alpha_2) \\
 & + \frac{1}{2}I_{f_2y} (\dot{\theta}^2 \sin^2 \alpha_2 \cos^2 \beta_2 + \dot{\theta}\dot{\beta}_2 \sin 2\alpha_2 \cos \beta_2 + \dot{\beta}_2^2 \cos^2 \alpha_2) \\
 & + \frac{1}{2}I_{f_2z} (\dot{\theta}^2 \sin^2 \beta_2 - 2\dot{\theta}\dot{\alpha}_2 \sin \beta_2 + \dot{\alpha}_2^2) \\
 & - (m_b h_b + m_{f_1} h_{f_1} + m_{f_2} h_{f_2})g \cos \theta
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

สำหรับระบบอนุรักษ์พลังงาน สมการการเคลื่อนที่ได้จากสมการออยเลอร์-ลากรางจ์อธิบายได้ตั้งสมการที่ (2.21) ถึง (2.23)

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0 \tag{2.21}$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\beta}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial \beta_1} = 0 \tag{2.22}$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\beta}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial \beta_2} = 0 \tag{2.23}$$

ซึ่งได้สมการความเร่งของมุมที่มอเตอร์ไซค์ทรงตัวพลิก ความเร่งในการพลิกของจานหมุน 1 และ ความเร่งในการพลิกของจานหมุน 2 ดังนี้

$$\ddot{\theta}(t) = \frac{K_1 g \sin \theta + 2\dot{\theta} \sin \beta_1 \cos \beta_1 \dot{\beta}_1 (I_{f_{1x}} \cos^2 \alpha_1 + I_{f_{1y}} \sin^2 \alpha_1 - I_{f_{1z}}) - \frac{1}{2} \sin 2\alpha_1 \cos \beta_1 \dot{\beta}_1 (I_{f_{1x}} + I_{f_{1y}})}{K_2 + I_{f_{1x}} \cos^2 \alpha_1 \cos^2 \beta_1 + I_{f_{1y}} \sin^2 \alpha_1 \cos^2 \beta_1 + I_{f_{1z}} \sin^2 \beta_1 + I_{f_{2x}} \cos^2 \alpha_2 \cos^2 \beta_2 + I_{f_{2y}} \sin^2 \alpha_2 \cos^2 \beta_2 + I_{f_{2z}} \sin^2 \beta_2} \quad (2.24)$$

$$\ddot{\beta}_1(t) = \frac{2\dot{\theta} \sin \beta_2 \cos \beta_2 \dot{\beta}_2 (I_{f_{2x}} \cos^2 \alpha_2 + I_{f_{2y}} \sin^2 \alpha_2 - I_{f_{2z}}) + \frac{1}{2} \dot{\beta}_1^2 \sin 2\alpha_1 \sin \beta_1 (I_{f_{1x}} + I_{f_{1y}})}{K_2 + I_{f_{1x}} \cos^2 \alpha_1 \cos^2 \beta_1 + I_{f_{1y}} \sin^2 \alpha_1 \cos^2 \beta_1 + I_{f_{1z}} \sin^2 \beta_1 + I_{f_{2x}} \cos^2 \alpha_2 \cos^2 \beta_2 + I_{f_{2y}} \sin^2 \alpha_2 \cos^2 \beta_2 + I_{f_{2z}} \sin^2 \beta_2} - \frac{\dot{\alpha}_1 \dot{\beta}_1 \cos \beta_1 + \frac{1}{2} \sin 2\alpha_2 \cos \beta_2 \dot{\beta}_2 (I_{f_{2x}} + I_{f_{2y}}) - \frac{1}{2} \dot{\beta}_2^2 \sin 2\alpha_2 \sin \beta_2 (I_{f_{2x}} + I_{f_{2y}}) + \dot{\alpha}_2 \dot{\beta}_2 \cos \beta_2}{K_2 + I_{f_{1x}} \cos^2 \alpha_1 \cos^2 \beta_1 + I_{f_{1y}} \sin^2 \alpha_1 \cos^2 \beta_1 + I_{f_{1z}} \sin^2 \beta_1 + I_{f_{2x}} \cos^2 \alpha_2 \cos^2 \beta_2 + I_{f_{2y}} \sin^2 \alpha_2 \cos^2 \beta_2 + I_{f_{2z}} \sin^2 \beta_2} \quad (2.25)$$

$$\ddot{\beta}_2(t) = \frac{I_{f_{1z}} \dot{\theta} \cos \beta_1 (\dot{\theta} \sin \beta_1 - \dot{\alpha}_1) - \frac{1}{2} \dot{\theta} \cos \beta_1 \sin 2\alpha_1 (I_{f_{1x}} + I_{f_{1y}}) - \dot{\theta}^2 \cos \beta_1 \sin \beta_1 (I_{f_{1x}} \cos^2 \alpha_1 + I_{f_{1y}} \sin^2 \alpha_1)}{I_{f_{1x}} \sin^2 \alpha_1 + I_{f_{1y}} \cos^2 \alpha_1} - \frac{I_{f_{2z}} \dot{\theta} \cos \beta_2 (\dot{\theta} \sin \beta_2 - \dot{\alpha}_2) - \frac{1}{2} \dot{\theta} \cos \beta_2 \sin 2\alpha_2 (I_{f_{2x}} + I_{f_{2y}}) - \dot{\theta}^2 \cos \beta_2 \sin \beta_2 (I_{f_{2x}} \cos^2 \alpha_2 - I_{f_{2y}} \sin^2 \alpha_2)}{I_{f_{2x}} \sin^2 \alpha_2 + I_{f_{2y}} \cos^2 \alpha_2} \quad (2.26)$$

เมื่อ  $K_1$  และ  $K_2$  เป็นดังสมการที่ (2.27) และ (2.28)

$$K_1 = m_b h_b + m_{f_1} h_{f_1} + m_{f_2} h_{f_2} \quad (2.27)$$

$$K_2 = m_b h_b^2 + m_{f_1} h_{f_1}^2 + m_{f_2} h_{f_2}^2 \quad (2.28)$$

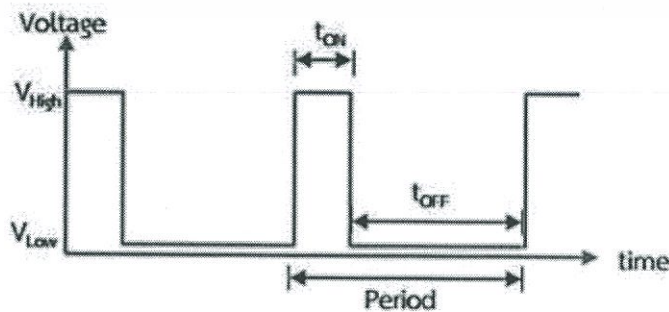
## 2.4 สัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชัน

สัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชัน (Pulse-width Modulation : PWM) คือ สัญญาณแบบคาบที่มีความถี่คงที่ แต่มีการปรับความกว้างพัลส์  $t_{ON}$  ได้ดังรูปที่ 2.10 โดยอัตราส่วนระหว่างความกว้างพัลส์กับคาบของสัญญาณ เรียกว่า ดิวตี้ไซเคิล (Duty Cycle) สามารถหาได้จากสมการที่ (2.29)

$$\text{Duty cycle (\%)} = (t_{ON} \times 100) / \text{Period} \quad (2.29)$$

โดย  $t_{ON}$  คือ ความกว้างของสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชัน

Period คือ คาบของสัญญาณ



รูปที่ 2.10 ลักษณะของสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

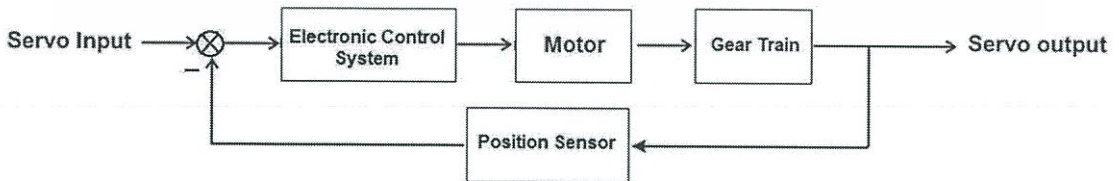
ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เลือกใช้มอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่านเป็นตัวขับเคลื่อน โดยจ่ายอินพุตเป็นสัญญาณพัลส์วิธึมอดูเลชัน

หลักการการทำงานของมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน จะทำงานเหมือนมอเตอร์กระแสสลับ จึงไม่สามารถที่จะจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ได้โดยตรงเหมือนมอเตอร์กระแสตรง จึงจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ควบคุมความเร็วมอเตอร์ชนิดอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics Speed Control : ESC) อุปกรณ์ชนิดนี้จะรับสัญญาณพัลส์วิธึมอดูเลชันจากไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อไปเรียงเฟสของกระแส 3 เฟส เหมือนมอเตอร์กระแสสลับเพื่อขับมอเตอร์

## 2.6 เซอร์โวมอเตอร์

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เลือกใช้เซอร์โวมอเตอร์เป็นตัวพลิกงานหมุน โดยจ่ายอินพุตเป็นสัญญาณพัลส์วิธึมอดูเลชัน

เซอร์โวมอเตอร์คือ มอเตอร์กระแสตรงที่ถูกประกอบรวมกับชุดเกียร์และส่วนควบคุมต่าง ๆ ไว้ในโมดูลเดียวกัน โดยมอเตอร์ชนิดนี้จะมีสายใช้งานเพียง 3 เส้นคือ ไฟเลี้ยง กราวด์ และสายสัญญาณควบคุม โดยสัญญาณที่ใช้ควบคุมเป็นสัญญาณพัลส์วิธึมอดูเลชัน การทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ เมื่อจ่ายสัญญาณพัลส์วิธึมอดูเลชัน ส่วนวงจรควบคุม (Electronic Control System) ภายในเซอร์โวมอเตอร์ จะทำการอ่านและประมวลผลค่าความกว้างของสัญญาณพัลส์ที่ส่งเข้ามาเพื่อแปลค่าเป็นตำแหน่งองศาที่ต้องการให้มอเตอร์หมุนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งนั้น แล้วส่งคำสั่งไปทำการควบคุมให้มอเตอร์หมุนไปยังตำแหน่งที่ต้องการ โดยมีตัวเซนเซอร์ตำแหน่ง (Position Sensor) วัดค่ามุมที่มอเตอร์ เป็นค่าป้อนกลับมาให้วงจรควบคุมเปรียบเทียบกับค่าอินพุตเพื่อควบคุมให้ได้ตำแหน่งที่ต้องการอย่างถูกต้องแม่นยำ โดยบล็อกการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์แสดงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 บล็อกการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 เซนเซอร์และการประยุกต์ใช้งาน

เป้าหมายที่ต้องการควบคุมในปริภูมิพหุคูณนี้คือ มุมเอียง (มุมพิทช์) ของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว จึงจำเป็นที่จะใช้เซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) และเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม (Gyroscope) ในการวัดมุมพิทช์ ดังนั้นจึงใช้โมดูลเซนเซอร์รุ่น GY-88 ที่รวมเซนเซอร์ทั้งสองไว้ด้วยกัน โดยหลักการต่าง ๆ ของเซนเซอร์อธิบายดังต่อไปนี้

### 2.7.1 เซนเซอร์วัดความเร่ง

เซนเซอร์วัดความเร่ง เป็นเซนเซอร์ที่ใช้วัดความเร่งของวัตถุ ซึ่งเกิดจากแรงกระทำต่าง ๆ เช่น แรงโน้มถ่วงของโลก การเคลื่อนย้าย หรือการสั่นของวัตถุ เป็นต้น หลักการทำงานของเซนเซอร์วัดความเร่งจะอธิบายได้คล้ายกับกล่องลูกบาศก์ที่มีทรงกลมอยู่ตรงกลาง เมื่อมีแรงใด ๆ มากระทำต่อลูกบาศก์ จะทำให้ทรงกลมเคลื่อนที่ไปกระทบกับผนัง โดยผนังด้านข้างลูกบาศก์ทำหน้าที่ตรวจจับแรงที่กระทำต่อผนังด้านนั้น มุมโรล  $\phi$  และมุมพิทช์  $\theta$  สามารถหาได้จากสมการที่ (2.30) และ (2.31)

$$\phi = \tan^{-1} \frac{a_y}{a_z} \quad (2.30)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{a_x}{a_z} \quad (2.31)$$

เมื่อ  $a_x, a_y$  และ  $a_z$  คือ ขนาดของความเร่งที่วัดได้ตามแกน  $x, y$  และ  $z$  ตามลำดับ

### 2.7.2 เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม

เซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม เป็นเซนเซอร์ที่ใช้วัดความเร็วเชิงมุมของวัตถุ หลักการทำงานของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม คือ เมื่อวัตถุนั้นเกิดการหมุน จะทำให้เกิดแรงโคริโอลิส กระทำต่อวัตถุนั้นในทิศทางตั้งฉากกับระนาบการเคลื่อนที่และการหมุน ซึ่งเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมมีอุปกรณ์ตรวจจับแรงโคริโอลิสที่เกิดขึ้น จึงสามารถวัดค่าอนุพันธ์ของมุมโรล และมุมพิทช์ได้

## 2.8 ตัวกรองคาลมาน

ตัวกรองคาลมาน เป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ ที่ใช้ค่าจากการสังเกตระบบในช่วงเวลาหนึ่งที่มีอาจมีคาร์บอน (Noise) หรือค่าความไม่แม่นยำอื่น ๆ ในการวัด เพื่อสร้างค่าประมาณที่เหมาะสมกับค่าจริงมากที่สุด โดยที่ตัวกรองคาลมานทำงานแบบเวียนเกิด (Recursive) ดังนั้นค่าที่ต้องการจึงเป็นค่าประมาณในอดีตเพียงค่าเดียวและค่าวัดปัจจุบันเท่านั้น ตัวกรองคาลมานบนระบบที่มีแบบจำลองดังสมการที่ (2.32) และสมการที่ (2.33) คือ

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1} = \mathbf{F}\hat{\mathbf{x}}_k + \mathbf{G}u_k + \mathbf{w}_k \quad (2.32)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_k + \mathbf{v}_k \quad (2.33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	$\hat{x}_k$	คือ ค่าสเตรทที่ประมาณด้วยตัวกรองคาลมานที่เวลา $k$
	$x_k$	คือ ค่าสเตรทจริงที่เวลา $k$ ที่ไม่สามารถวัดได้อย่างแม่นยำ
	$w_k$	คือ ค่าความไม่แน่นอนในระบบที่เวลา $k$ โดย $w_k \sim N(0, Q_k)$
	$z_k$	คือ ค่าวัดของสเตรทที่เวลา $k$
	$u_k$	คือ เวกเตอร์อินพุตที่ทราบค่าที่เวลา $k$
	$v_k$	คือ ค่าความผิดพลาดในการวัดที่เวลา $k$ โดย $v_k \sim N(0, R_k)$
	$F$	คือ เมทริกซ์อธิบายการตอบสนองของสเตรทแต่ละตัวต่อสเตรทอื่น ๆ
	$G$	คือ เมทริกซ์อธิบายการตอบสนองของสเตรทแต่ละตัวต่อสัญญาณควบคุมของระบบ
	$H$	คือ เมทริกซ์อธิบายความสัมพันธ์ของค่าที่วัดได้กับสเตรทของระบบ

หากให้  $x_{k|k}$  เป็นค่าสเตรทที่ประมาณด้วยตัวกรองคาลมานที่เวลา  $k$  โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงเวลา  $k$  และ  $P_{k|k}$  เป็นเมทริกซ์ความแปรปรวนของความผิดพลาด (Error Covariance Matrix) จะสามารถแบ่งการทำงานของตัวกรองคาลมานได้เป็น 2 ขั้นตอนคือ

1. การทำนาย (Predict)

$$\hat{x}_{k|k-1} = F\hat{x}_{k-1|k-1} + Gu_{k-1} \quad (2.34)$$

$$P_{k|k-1} = FP_{k-1|k-1}F^T + Q_{k-1} \quad (2.35)$$

2. การปรับปรุง (Update)

$$\tilde{y}_k = z_k - H\hat{x}_{k|k-1} \quad (2.36)$$

$$S_k = HP_{k|k-1}H^T + R_k \quad (2.37)$$

$$K_k = P_{k|k-1}H^T S_k^{-1} \quad (2.38)$$

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k\tilde{y}_k \quad (2.39)$$

$$P_{k|k} = (I - K_kH)P_{k|k-1} \quad (2.40)$$

โดยเมทริกซ์  $Q_k$  และ  $R_k$  เป็นเมทริกซ์ความแปรปรวนของสัญญาณรบกวน (Noise Covariance Matrix) ที่จะต้องประมาณค่าให้ได้ใกล้เคียงกับลักษณะของความไม่แน่นอนในระบบและลักษณะของความผิดพลาดในการวัด เพื่อให้สเตรทที่ประมาณออกมาตอบสนองได้เร็วและผิดพลาดน้อยที่สุด

## 2.9 ตัวควบคุมป้อนกลับสเตท

ตัวควบคุมที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์ไซค์ทรงตัวในปริภูมิพหุคูณนี้ คือตัวควบคุมป้อนกลับสเตท ซึ่งหาค่าเกณฑ์จากการวางโพล (Pole Placement) มีหลักการดังนี้ โดยพิจารณาจากแบบจำลองสมการเชิงเส้นของระบบดังสมการที่ (2.41) และ (2.42)

$$\dot{\underline{x}} = \underline{A}\underline{x} + \underline{B}\underline{u} \tag{2.41}$$

$$y = \underline{C}\underline{x} + \underline{D}\underline{u} \tag{2.42}$$

ซึ่งในกรณีแบบจำลองของรถมอเตอร์ไซค์ทรงตัว เวกเตอร์ตัวแปรสเตทคือ

$$\dot{\underline{x}} = [\theta \ \dot{\theta} \ \beta_1 \ \beta_2]^T \tag{2.43}$$

เวกเตอร์ตัวแปรอินพุตคือ

$$\underline{u} = [\beta_1 \ \beta_2]^T \tag{2.44}$$

และตัวแปรเอาต์พุตคือ

$$y = \theta \tag{2.45}$$

ซึ่งโพลของระบบคือรากของสมการคุณลักษณะดังสมการที่ (2.46)

$$\det |s\mathbf{I} - \underline{A}| = 0 \tag{2.46}$$

ในการป้อนกลับสเตทโดยใช้ค่าสเตททุกตัว (ภายใต้สมมติฐานว่าสามารถวัดค่าสเตทได้ทุกค่าจากตัวตรวจวัด) เวกเตอร์ตัวแปรอินพุต  $\underline{u}$  อธิบายได้ดังสมการที่ (2.47)

$$\underline{u} = -\underline{K}\underline{x} \tag{2.47}$$

เมื่อแทนค่า  $\underline{u}$  ข้างต้นลงในสมการสเตท และสมการเอาต์พุตในสมการที่ (2.41) และ (2.42) ระบบป้อนกลับอธิบายได้ดังสมการที่ (2.48) และ (2.49)

$$\dot{\underline{x}} = (\underline{A} - \underline{BK})\underline{x} \tag{2.48}$$

$$y = (\underline{C} - \underline{DK})\underline{x} \tag{2.49}$$

ดังนั้นโพลของระบบป้อนกลับสามารถหาได้จากสมการคุณลักษณะ ในสมการที่ (2.50)

$$\det |s\mathbf{I} - (\underline{A} - \underline{BK})| = 0 \tag{2.50}$$

และโดยการเทียบสัมประสิทธิ์ของสมการที่ (2.50) กับสมการคุณลักษณะที่ต้องการแล้ว จะสามารถหาค่าของเมทริกซ์  $K$  ที่ใช้ในการควบคุมระบบให้มีโพลตามสมการคุณลักษณะที่ต้องการได้ หากสมการเสถียรตั้งต้นในสมการที่ (2.41) มีคุณสมบัติความสามารถควบคุมได้ (Controllability)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การออกแบบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับมอเตอร์ไซค์ทรงตัว และแบบจำลองการทรงตัวของมอเตอร์ไซค์ด้วยโปรแกรมแมทแลป

#### 3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในมอเตอร์ไซค์ทรงตัว

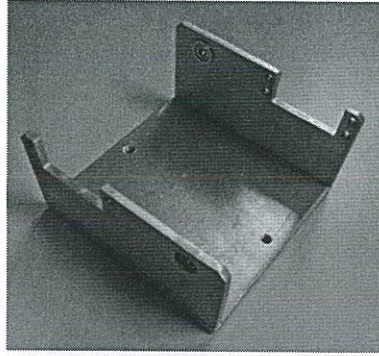
มอเตอร์ไซค์ทรงตัว มีลักษณะดังรูปที่ 3.1 โดยมีอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้



รูปที่ 3.1 มอเตอร์ไซค์ทรงตัว

##### 3.1.1 โครงของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว

โครงของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวทำมาจากอลูมิเนียมตัดประกอบขึ้นเป็นโครงกล่อง มีลักษณะดังรูปที่ 3.2 โดยตัวโครงจะถูกออกแบบให้เชื่อมต่อกับลูกตุ้มไจโร 2 ตัว ตัวโครงมีขนาดความกว้าง 0.121 เมตร ยาว 0.122 เมตร สูง 0.057 เมตร



รูปที่ 3.2 โครงของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว

### 3.1.2 ลูกตุ้มไจโร

ลูกตุ้มไจโรมี 2 ตัว แต่ละตัวประกอบด้วยฐานอลูมิเนียมยึดติดกับมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านและจานหมุน โดยจานหมุนทำมาจากเหล็กชุบแบล็กออกไซด์ มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.06 เมตร หนา 0.005 เมตร หนัก 0.0916 กิโลกรัมและ 0.0934 กิโลกรัม มีลักษณะดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ลูกตุ้มไจโร

### 3.1.3 มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

มอเตอร์ไซค์ทรงตัวติดตั้งมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน รุ่น N2830 จำนวน 2 ตัว มีลักษณะดังรูปที่ 3.4 มีรายละเอียดดังนี้

ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของสเตเตอร์	22	mm
ขนาดความหนาของสเตเตอร์	12	mm
ความเร็วรอบต่อโวลต์	1000	rpm
กำลัง	270	Watt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความต้านทาน	162	m $\Omega$
กระแสในอุดมคติ	0.6	A
น้ำหนัก	62	g
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอก	27.8	mm
ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเพลลา	3	mm



รูปที่ 3.4 มอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

### 3.1.4 เซอร์โวมอเตอร์

มอเตอร์ไซค์ทรงตัวติดตั้งเซอร์โวมอเตอร์ รุ่น SAVOX SC-0254MG จำนวน 2 ตัว มีลักษณะ

ดังรูปที่ 3.5 มีรายละเอียดดังนี้

ขนาด	40.7 x 19.6 x 39.4	mm
น้ำหนัก	49	g
ความเร็ว (6.0 V)	0.14	sec/60deg
ความเร็ว (4.8 V)	0.19	sec/60deg
แรงบิด (6.0 V)	7.2	kg-cm
แรงบิด (4.8 V)	6.2	kg-cm
ขีดจำกัดมุม	180 $\pm$ 10	degree
ขอบเขตสัญญาณ Pulse Width	800 - 2200	$\mu$ sec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 เซอร์โวมอเตอร์

### 3.1.5 เครื่องมือควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์

เครื่องมือควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านแต่ละตัว จำนวน 2 ชิ้น ภายในประกอบด้วยวงจรรักษาระดับแรงดัน สำหรับลดระดับแรงดันของแบตเตอรี่จาก 12 โวลต์ เป็น 5 โวลต์ อุปกรณ์ควบคุมความเร็วสามารถทนกระแสได้สูงสุดถึง 40 แอมแปร์ โดยการป้อนอินพุตเป็นสัญญาณพัลส์วิธึมอดูเลชัน ที่ส่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์ มีลักษณะดังรูปที่ 3.6



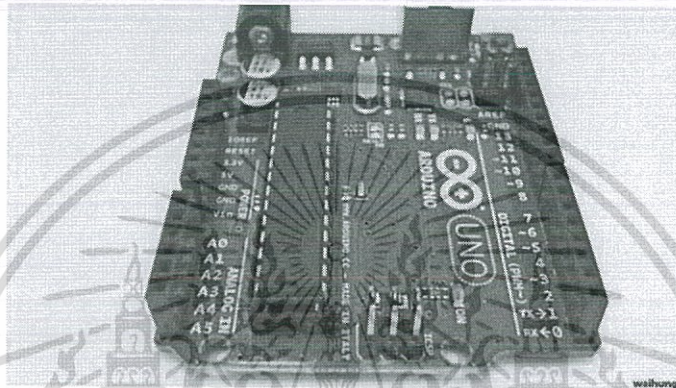
รูปที่ 3.6 เครื่องมือควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์

### 3.1.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์จำเป็นต้องใช้ตัวควบคุมและเป็นหน่วยประมวลผลที่มีความเร็วสูง ซึ่งสามารถติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นได้ นอกจากนั้นตัวควบคุมต้องสามารถสร้างสัญญาณพัลส์วิธึมอดูเลชันที่มีความถี่ที่แตกต่างกันอย่างน้อย 4 ช่องสัญญาณเพื่อส่งสัญญาณพัลส์วิธึมอดูเลชันนั้นไปยังตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อใช้ในการขับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่นำมาใช้คือ Arduino UNO R3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

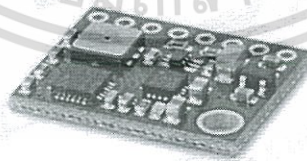
Arduino UNO R3 เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ Open-source บนแพลตฟอร์ม Arduino ถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย ใช้ชิพ ATmega328 ที่มีความถี่ 16 เมกะเฮิร์ต หน่วยความจำแฟลช 32 กิกะไบต์ แรม 2 กิกะไบต์ บอร์ดใช้ไฟเลี้ยง 7 โวลต์ ถึง 12 โวลต์ มีระดับแรงดันไฟฟ้าในการทำงานและขาสัญญาณอยู่ที่ 5 โวลต์ (TTL) มี Digital Input และ Output 14 ขา (มีขา PWM 6 ขา) Analog Input 6 ขา Serial UART 1 ชุด I2C 1 ชุด SPI 1 ชุด เขียนโปรแกรมบนซอฟต์แวร์ Arduino IDE และโปรแกรมผ่านพอร์ต USB โดยมีลักษณะดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อูโน

### 3.1.7 โมดูลเซนเซอร์รวม

เซนเซอร์ที่ใช้คือ GY-88 เป็นโมดูลของเซนเซอร์วัดความเร่ง และเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม เพื่อใช้วัดมุมโรล และมุมพิทช์ มีลักษณะดังรูปที่ 3.8

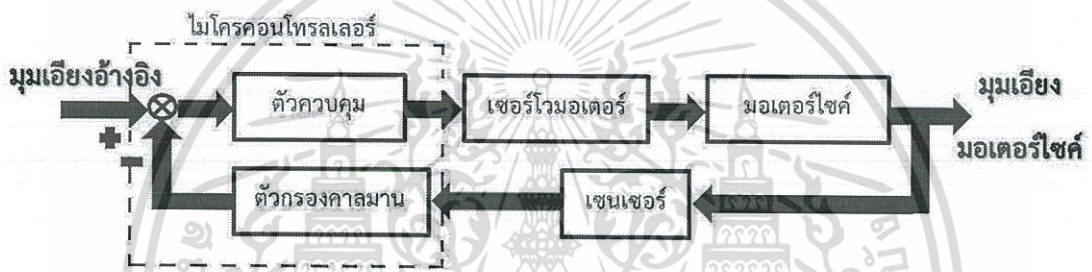


รูปที่ 3.8 เซนเซอร์ GY-88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 หลักการทำงานของระบบ

ในส่วนของหลักการทำงานนั้น ส่วนอินพุตของระบบคือ มุมเอียงอ้างอิง (มุม 0 องศา) เทียบกับมุมเอียงของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวที่วัดได้จากเซนเซอร์ โดยจะส่งค่าให้ตัวคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลไปควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ โดยเซอร์โวมอเตอร์จะพลิกจานหมุนทั้งสองตัวเพื่อให้ได้มุมที่เหมาะสมในการทรงตัวของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว หลังจากนั้นเซนเซอร์จะวัดค่ามุมเอียงของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวและป้อนค่ากลับไปยังส่วนอินพุตวนเป็นลูป เพื่อให้ได้เอาต์พุตของระบบที่ต้องการคือ มอเตอร์ไซค์ทรงตัวอยู่จุดสมดุลหรือเท่ากับมุมเอียงอ้างอิง ซึ่งการทำงานของระบบทั้งหมดจะแสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การทำงานของระบบทั้งหมด

### 3.3 การออกแบบตัวควบคุม

จากการพิจารณาสมการการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวที่ไม่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (2.24), (2.25) และ (2.26) โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ในตารางที่ 3.1 ซึ่งได้จากการวัดและการทดลองดังจะกล่าวต่อไปในบทที่ 4 มาทำการออกแบบ

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว

พารามิเตอร์	ค่า	หน่วย
น้ำหนักของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว ( $m_b$ )	0.95265	kg
ความสูงของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวผ่านจุดศูนย์กลางมวล ( $h_b$ )	0.12	m
น้ำหนักจานหมุน 1 ( $m_{f1}$ )	0.0916	kg
น้ำหนักจานหมุน 2 ( $m_{f2}$ )	0.0934	kg
ความสูงของจานหมุน 1 ผ่านจุดศูนย์กลางมวล ( $h_{f1}$ )	0.149	m
ความสูงของจานหมุน 2 ผ่านจุดศูนย์กลางมวล ( $h_{f2}$ )	0.149	m
แรงโน้มถ่วง ( $g$ )	9.8	$m/s^2$
โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว ( $I_{bx}$ )	0.002685	$kg.m^2$
โมเมนต์ความเฉื่อยของจานหมุน 1 ในแกน x ( $I_{f1x}$ )	0.000024	$kg.m^2$
โมเมนต์ความเฉื่อยของจานหมุน 1 ในแกน y ( $I_{f1y}$ )	0.000024	$kg.m^2$
โมเมนต์ความเฉื่อยของจานหมุน 1 ในแกน z ( $I_{f1z}$ )	0.000047	$kg.m^2$
โมเมนต์ความเฉื่อยของจานหมุน 2 ในแกน x ( $I_{f2x}$ )	0.000024	$kg.m^2$
โมเมนต์ความเฉื่อยของจานหมุน 2 ในแกน y ( $I_{f2y}$ )	0.000024	$kg.m^2$
โมเมนต์ความเฉื่อยของจานหมุน 2 ในแกน z ( $I_{f2z}$ )	0.000047	$kg.m^2$
ความเร็วของจานหมุน 1 ( $\dot{\alpha}_1$ )	733	rad/s
ความเร็วของจานหมุน 2 ( $\dot{\alpha}_2$ )	733	rad/s

จากสมการการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวที่ไม่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (2.24), (2.25) และ (2.26) อาศัยโปรแกรมแมทแลป/ซิมูลิงค์ (Matlab/Simulink) สร้างแบบจำลองที่สอดคล้องดังแสดงใน รูปที่ ข.1 ในภาคผนวก ข. และจัดรูปให้อยู่ดังสมการที่ (2.41) และ (2.42) โดยอาศัยคำสั่ง linmod ในโปรแกรมแมทแลปและออกแบบตัวควบคุมได้จากการวางโพล โดยใช้คำสั่ง place ในโปรแกรมแมทแลป การวางโพลนั้นจะต้องวางในตำแหน่งด้านซ้ายของระนาบเชิงซ้อน ซึ่งเลือกวางโพลที่ (-2 -11 -12 -16) จะได้ตัวควบคุม 1 ตามสมการ (2.47) ซึ่งมีเกน  $\mathbf{K}$  ดังสมการที่ (3.1)

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} -5.2821 & 0.48267 & 4926.7 & 4914.7 \\ -5.2905 & -0.48363 & -4932 & -4920 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

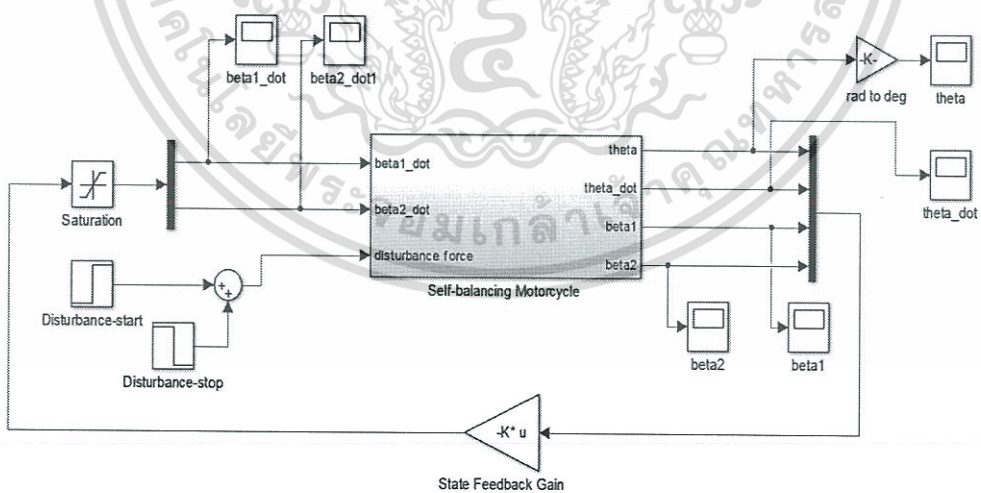
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากนั้นได้ออกแบบตัวควบคุม 2 เพื่อที่จะให้มีการตอบสนองที่เร็วขึ้น โดยเลือกวางโพลให้ห่างขึ้น จากโพลเก่า คือที่  $(-4 \ -11 \ -12 \ -16)$  จะได้ตัวควบคุม 2 ตามสมการที่ (2.47) ซึ่งมีเกน  $K_{new}$  ดังสมการที่ (3.2)

$$K_{new} = \begin{bmatrix} 8.9766 & 0.92966 & 14884 & 14872 \\ -8.9864 & -0.93083 & -14894 & -14882 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

### 3.4 การออกแบบการจำลองการทรงตัวผ่านโปรแกรมแมทแล็บ

จากสมการการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวที่ไม่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (2.24), (2.25) และ (2.26) สามารถสร้างแบบจำลองการทรงตัวผ่านโปรแกรมแมทแล็บได้ พิจารณาจากรูปที่ 3.1 ในภาคผนวก ข. จะทำการป้อนกลับสเตตดังสมการที่ (2.47) จำกัดขอบเขต (Saturation) ความเร็วในการพลิกของจานหมุน 1 และจานหมุน 2 ที่  $\pm 5$  เรเดียนต่อวินาที และใส่แรงกระทำภายนอก (Disturbance Force) ที่สมการความเร่งของมุมเอียงของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวในสมการที่ (2.24) ขนาด 10 นิวตัน ที่เวลา 2.5 วินาที เป็นเวลา 0.1 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แบบจำลองระบบควบคุมมอเตอร์ไซค์ทรงตัวด้วยตัวควบคุมป้อนกลับสเตต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

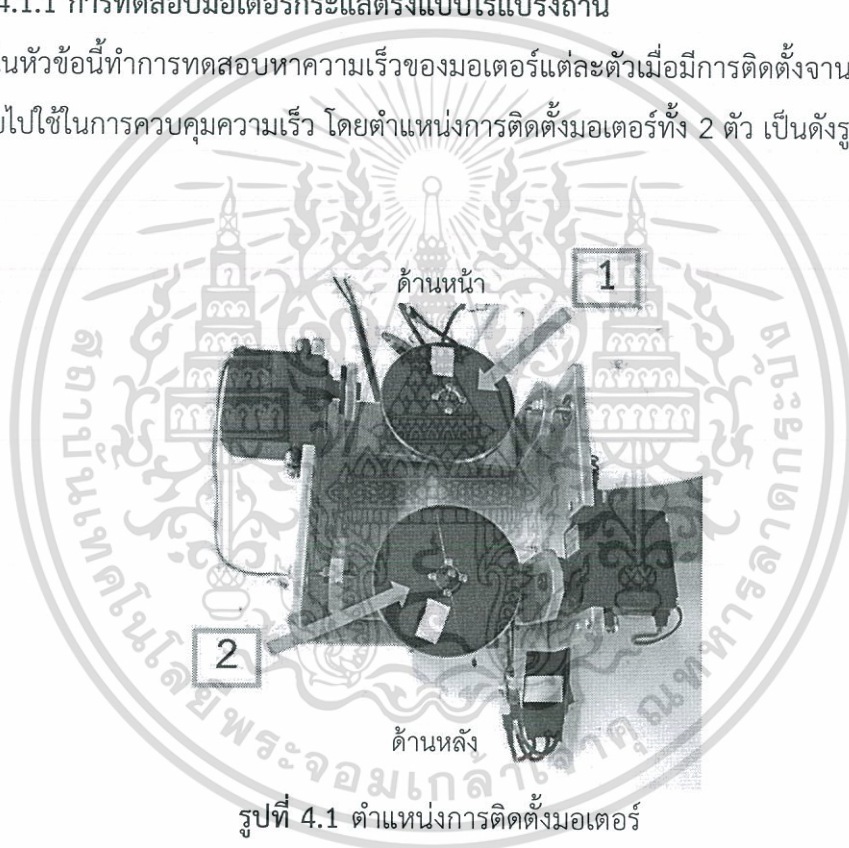
### การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดสอบมอเตอร์และเซอร์โวมอเตอร์ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นต้องใช้ในการออกแบบและการจำลอง ผลการทดลองของเซนเซอร์ ผลการจำลองการทรงตัวของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวด้วยโปรแกรมแมทแลป และการทดลองการทรงตัวจริง

#### 4.1 การทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้า

##### 4.1.1 การทดสอบมอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน

ในหัวข้อนี้ทำการทดสอบหาความเร็วของมอเตอร์แต่ละตัวเมื่อมีการติดตั้งจานหมุน เพื่อนำผลทดสอบไปใช้ในการควบคุมความเร็ว โดยตำแหน่งการติดตั้งมอเตอร์ทั้ง 2 ตัว เป็นดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ตำแหน่งการติดตั้งมอเตอร์

โดย หมายเลข 1 คือ มอเตอร์และจานหมุน 1

หมายเลข 2 คือ มอเตอร์และจานหมุน 2

ทำการทดสอบความเร็วรอบมอเตอร์โดยใช้ไฟจากแหล่งจ่ายที่ 11 โวลต์ เพื่อจ่ายให้กับตัวควบคุมความเร็วทั้ง 2 ตัว พร้อมด้วยเครื่องมือควบคุมความเร็วแบบอิเล็กทรอนิกส์ ในการอ่านค่าความเร็วรอบมอเตอร์จะนำแถบสะท้อนแสงติดไว้ที่ตัวของจานหมุน แล้วนำทาคอมิเตอร์ดิจิตอลแบบแสง (Digital Photo Tachometer) เล็งลำแสงให้ตรงกับแถบสะท้อน เพื่ออ่านค่าความเร็วรอบของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองของมอเตอร์และจานหมุน 1 และ 2

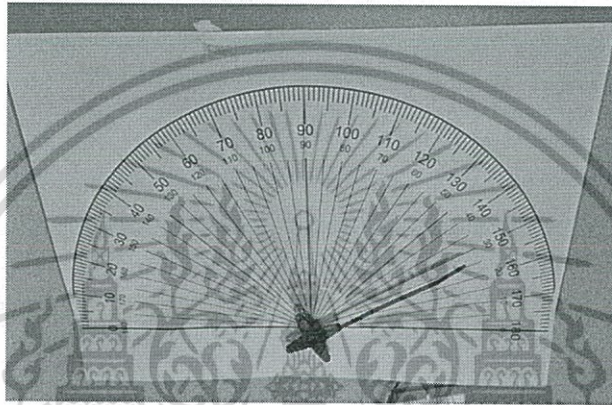
ดิวทีไซเคิล (%)	ระดับสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชัน	มอเตอร์และจานหมุน 1 ความเร็วรอบ (rad/s)	มอเตอร์และจานหมุน 2 ความเร็วรอบ (rad/s)
40	102	457.31	464.01
42	107	537.53	537.32
44	112	616.48	614.91
46	118	708.64	711.68
48	123	757.75	756.60
50	128	803.51	799.32
52	133	823.31	821.63
54	138	843.83	842.58
56	143	860.59	858.70
58	148	876.29	870.53
60	154	885.09	880.69
62	159	904.78	901.74
64	164	911.79	912.74
66	169	917.97	913.26
68	174	919.86	913.58
70	179	915.98	913.99
72	184	915.46	912.53
74	189	915.46	912.53
76	195	914.41	913.26
78	200	912.63	912.74
80	205	913.58	912.95

จากการทดลองพบว่ามอเตอร์กระแสตรงแบบไร้แปรงถ่าน และอุปกรณ์ควบคุมความเร็วแบบอิเล็กทรอนิกส์ จะเริ่มทำงานเมื่อได้รับคำสั่งที่ระดับสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชัน 102 ขึ้นไป โดยช่วงการทำงานของมอเตอร์ทั้งสองตัวใกล้เคียงกัน สังเกตได้จากตารางที่ 4.1 นอกจากนั้นพบว่า เมื่อทดลองเพิ่มค่าระดับสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชัน มอเตอร์ทั้งสองตัวจะทำงานใกล้เคียงกัน จนถึงที่ระดับสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชัน 205 และจากที่ออกแบบความเร็วของจานหมุนไว้ที่ประมาณ 733 เรเดียนต่อวินาที จึงเลือกจ่ายค่าสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชันคงที่ที่ระดับ 118

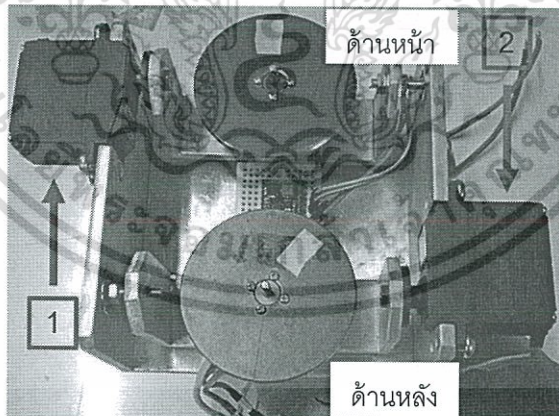
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.2 การทดสอบเซอร์โวมอเตอร์

ในหัวข้อนี้ทำการทดสอบเซอร์โวมอเตอร์ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุม โดยทดลองใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์สร้างสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชัน ซึ่งมีความกว้างของสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชันเป็น 800 ไมโครวินาที (คำสั่งดิวทีไซเคิล 35%) ถึงความกว้างของสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชันเป็น 2300 ไมโครวินาที (คำสั่งดิวทีไซเคิล 100%) ให้กับเซอร์โวมอเตอร์ ทั้งนี้วิธีทดลองทำได้โดยนำที่วัดมุมติดกับเซอร์โวมอเตอร์ดังรูปที่ 4.2 เพื่อเก็บค่ามุมที่เซอร์โวมอเตอร์หมุนไป จะได้ผลดังตารางที่ 4.2 ตำแหน่งการติดตั้งเซอร์โวมอเตอร์ทั้ง 2 ตัว เป็นดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 การทดสอบเซอร์โวมอเตอร์



รูปที่ 4.3 ตำแหน่งการติดตั้งเซอร์โวมอเตอร์

โดย หมายเลข 1 คือ เซอร์โวมอเตอร์ตัวที่ 1

หมายเลข 2 คือ เซอร์โวมอเตอร์ตัวที่ 2

การทดสอบวัดมุมโดยนำที่วัดมุมติดกับเซอร์โวมอเตอร์ โดยช่วงสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชันที่ ทำให้เซอร์โวมอเตอร์รุ่นนี้สามารถทำงานได้ มีค่าอยู่ระหว่าง 800 ถึง 2300 ไมโครวินาที โดยการส่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมสัญญาณพัลส์วีสวมอดูเลชัน เริ่มตั้งแต่ 800 ไมโครวินาที ไปจนถึงสัญญาณพัลส์วีสวมอดูเลชัน 2300 ไมโครวินาที โดยเพิ่มทีละ 100 ไมโครวินาที ไปยังเซอร์โวมอเตอร์ ซึ่งได้ผลดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองจ่ายสัญญาณพัลส์วีสวมอดูเลชันและอ่านค่ามุมที่ได้จากเซอร์โวมอเตอร์

สัญญาณพัลส์จาก ไมโครคอนโทรลเลอร์ (ไมโครวินาที)	สัญญาณพัลส์ที่อ่านได้ จากออสซิลอสโคป (ไมโครวินาที)	มุมเซอร์โวตัวที่ 1 (องศา)	มุมเซอร์โวตัวที่ 2 (องศา)
800	800	1.0	1.0
900	900	11.0	11.0
1000	1000	21.5	22.0
1100	1100	32.0	33.5
1200	1200	43.0	45.0
1300	1300	54.0	55.5
1400	1400	65.0	66.0
1500	1500	76.0	76.5
1600	1600	87.0	88.0
1700	1700	97.5	99.0
1800	1800	110.0	111.0
1900	1900	122.0	123.0
2000	2000	134.0	134.5
2100	2100	144.5	145.5
2200	2200	155.5	156.5
2300	2300	160.0	162.0

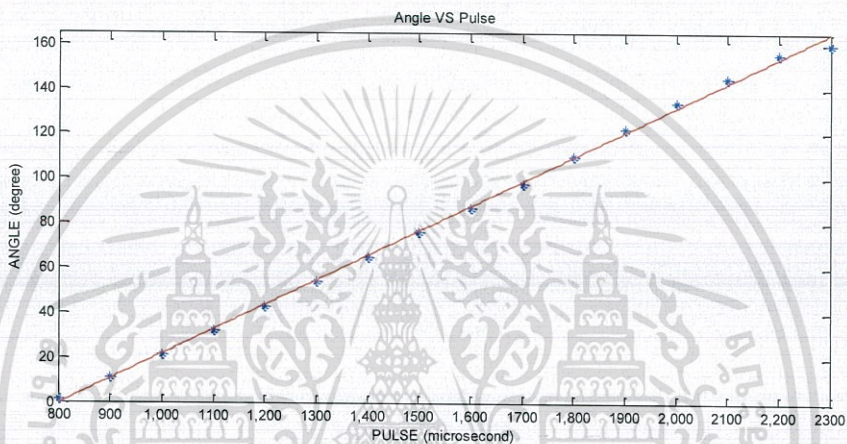
จากการทดลองพบว่า เซอร์โวมอเตอร์สามารถทำงานได้ตั้งแต่สัญญาณพัลส์วีสวมอดูเลชัน 800 ไมโครวินาที จนถึงค่าสัญญาณพัลส์วีสวมอดูเลชัน 2300 ไมโครวินาที โดยค่ามุมของเซอร์โวมอเตอร์ทั้ง 2 ตัว ที่อ่านได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกันสังเกตได้จากตารางที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

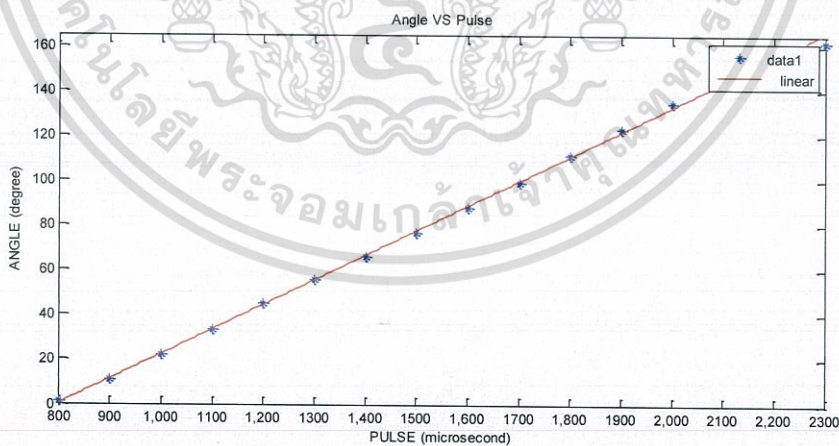
วาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชันกับมุมในหน่วยองศา จากผลการทดลองในตารางที่ 4.2 ได้ผลดังรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 เมื่อจุดจากบาทสอดคล้องกับข้อมูลที่ทดสอบได้ จากนั้นประมาณค่าความสัมพันธ์ด้วยสมการเส้นตรง พบว่าจะได้ความสัมพันธ์เป็นดังสมการที่ (4.1) และสมการที่ (4.2) ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ที่ประมาณได้ดังเส้นตรงในรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5

$$Pulse_1 = 9.1\beta_1 + 803.1 \quad (4.1)$$

$$Pulse_2 = 9.1\beta_2 + 794.4 \quad (4.2)$$



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชันกับมุมที่อ่านได้ของเซอร์โวตัวที่ 1



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณพัลส์วิธมอดูเลชันกับมุมที่อ่านได้ของเซอร์โวตัวที่ 2

## 4.2 การปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร็ว

หลังจากที่ได้ทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็วที่ตัวเครื่อง มีความจำเป็นที่จะต้องทำการปรับเทียบ เนื่องจากการติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็วนั้นทำได้ไม่สมบูรณ์ (ติดตั้งไม่ตรงตำแหน่งที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูัดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการ) และมีค่าออฟเซต (Off-set Error) จึงต้องทำการตั้งค่าศูนย์ (Tare Zero) รวมถึงสภาพภูมิอากาศและสภาพภูมิประเทศในแต่ละท้องถิ่นที่มีความแตกต่างกัน เช่น ความดัน ความชื้น ฯลฯ ซึ่งจะทำให้ความสามารถในการอ่านค่าของเซนเซอร์วัดความเร่งเกิดความผิดพลาดในการอ่าน ในแง่ของสเกลแฟคเตอร์ (Scale Factor)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามาตรฐาน (Normalized)  $A_{x1}$ ,  $A_{y1}$  และ  $A_{z1}$  กับค่าข้อมูลดิบของ  $A_x$ ,  $A_y$  และ  $A_z$  เป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} A_{x1} \\ A_{y1} \\ A_{z1} \end{bmatrix} = [A_m]_{3 \times 3} \begin{bmatrix} \frac{1}{A\_SC_x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{A\_SC_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{A\_SC_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_x - A\_OS_x \\ A_y - A\_OS_y \\ A_z - A\_OS_z \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

เมื่อ  $[A_m]_{3 \times 3}$  คือ เมทริกซ์เยื้องศูนย์ (Misalignment Matrix) คูณแก้การติดตั้งอุปกรณ์เบี่ยง

$A\_OS_i$  คือ ออฟเซตที่ใช้ปรับค่าให้ได้ศูนย์

$A\_SC_i$  คือ สเกลแฟคเตอร์

หมายเหตุ  $i = x, y$  หรือ  $z$

สามารถจัดรูปสมการที่ (4.3) ใหม่ได้ตามสมการที่ (4.4)

$$\begin{bmatrix} A_{x1} \\ A_{y1} \\ A_{z1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ACC_{11} & ACC_{12} & ACC_{13} \\ ACC_{21} & ACC_{22} & ACC_{23} \\ ACC_{31} & ACC_{32} & ACC_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} ACC_{10} \\ ACC_{20} \\ ACC_{30} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

โดยการปรับเทียบจำเป็นต้องหาค่าพารามิเตอร์  $ACC_{ij}$  ทั้ง 12 ตัวในสมการที่ (4.4) เมื่อ  $ACC_{ij}$  คือ ผลคูณของสมการที่ (4.3) ที่สอดคล้อง โดยการเก็บค่าข้อมูลดิบของเซนเซอร์วัดความเร่ง  $A_x$ ,  $A_y$  และ  $A_z$  ณ ตำแหน่งที่รู้ค่า  $A_{x1}$ ,  $A_{y1}$  และ  $A_{z1}$  ที่แน่นอน แล้วแก้สมการหาพารามิเตอร์ทั้ง 12 ตัวนี้ ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square) โดยจัดรูปสมการที่ (4.4) ให้อยู่ในรูปสมการพีชคณิตเชิงเส้น (Linear Algebraic Equation) ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} A_{x1} & A_{y1} & A_{z1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_x & A_y & A_z & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ACC_{11} & ACC_{21} & ACC_{31} \\ ACC_{12} & ACC_{22} & ACC_{32} \\ ACC_{13} & ACC_{23} & ACC_{33} \\ ACC_{10} & ACC_{20} & ACC_{30} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

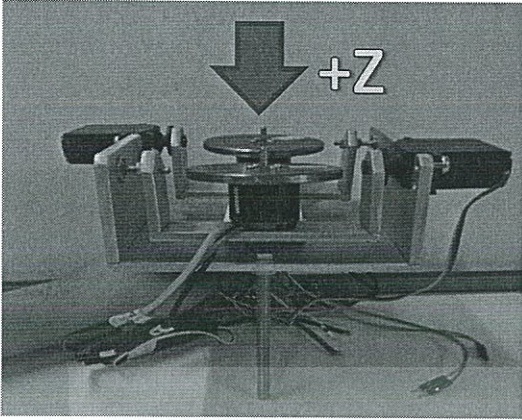
หรืออยู่ในรูป

$$[Y]_{n \times 3} = [W]_{n \times 4} \cdot [X]_{4 \times 3} \quad (4.6)$$

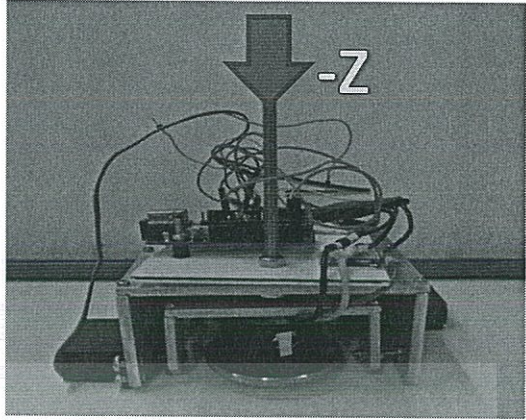
เมื่อ  $n$  คือ จำนวนตำแหน่งที่เก็บค่าข้อมูลดิบ

ตำแหน่งพื้นฐานที่เก็บค่าข้อมูลดิบมีทั้งหมด 6 ตำแหน่ง ซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งที่มีความเร่งเท่ากับแรงโน้มถ่วงโลก ( $\pm 1 g$ ) เฉพาะแต่ละแนวแกนทั้งทางบวกและลบดังนี้ T1 (+z), T2 (-z), T3 (+y), T4 (-y), T5 (+x) และ T6 (-x) ดังรูปที่ 4.6 ถึงรูปที่ 4.11 ตามลำดับ

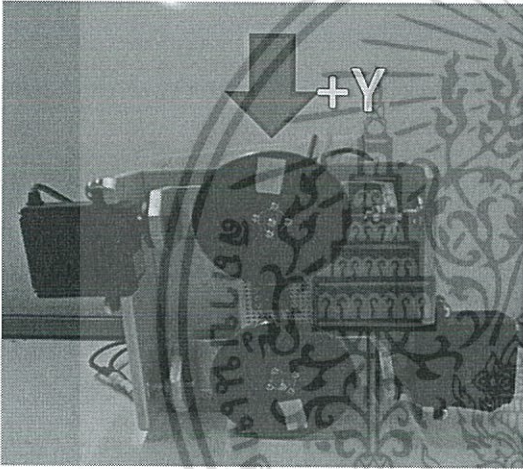
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



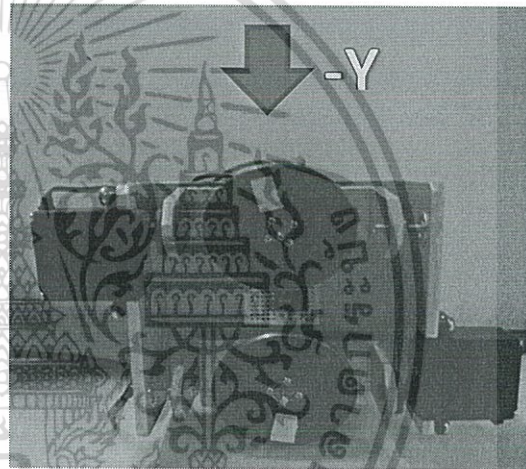
(ก) ตำแหน่ง T1 (+z)



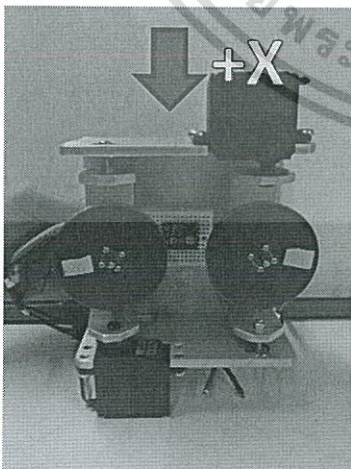
(ข) ตำแหน่ง T2 (-z)



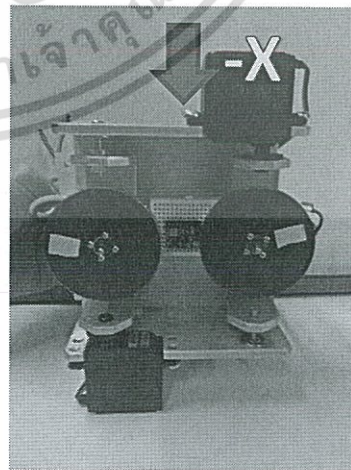
(ค) ตำแหน่ง T3 (+y)



(ง) ตำแหน่ง T4 (-y)



(จ) ตำแหน่ง T5 (+x)



(ฉ) ตำแหน่ง T6 (-x)

#### รูปที่ 4.6 การวางมอเตอร์ไซค์ทรงตัวในตำแหน่งต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าที่ควรจะเป็นในตำแหน่ง T1 ถึง T6 คือ (0,0,1), (0,0,-1), (0,1,0), (0,-1,0), (1,0,0) และ (-1,0,0) ตามลำดับ จึงได้ว่า

$$[Y]_{6 \times 3} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \\ Y_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$[W]_{6 \times 4} = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \\ W_4 \\ W_5 \\ W_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ax_{p1} & Ay_{p1} & Az_{p1} & 1 \\ Ax_{p2} & Ay_{p2} & Az_{p2} & 1 \\ Ax_{p3} & Ay_{p3} & Az_{p3} & 1 \\ Ax_{p4} & Ay_{p4} & Az_{p4} & 1 \\ Ax_{p5} & Ay_{p5} & Az_{p5} & 1 \\ Ax_{p6} & Ay_{p6} & Az_{p6} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

จากการทดลองเก็บค่าข้อมูลจากตำแหน่งพื้นฐานทั้งหมด 6 ตำแหน่ง ตำแหน่งละ 50 ค่า พบว่าแต่ละตำแหน่งมีค่าพิกัดสูงสุดและต่ำสุดที่อ่านได้ดังนี้

ตำแหน่ง T1 (+z)	ค่าพิกัดสูงสุด	(0.015380859, 0.009277344, 1.003173828)
	ค่าพิกัดต่ำสุด	(0.002197266, -0.004882813, 0.984863281)
ตำแหน่ง T2 (-z)	ค่าพิกัดสูงสุด	(0.037597656, 0.037109375, -1.029296875)
	ค่าพิกัดต่ำสุด	(0.025634766, 0.023437500, -1.049804688)
ตำแหน่ง T3 (+y)	ค่าพิกัดสูงสุด	(0.039066250, -0.985107422, -0.004882813)
	ค่าพิกัดต่ำสุด	(0.021728516, -0.996337891, -0.031738281)
ตำแหน่ง T4 (-y)	ค่าพิกัดสูงสุด	(-0.000244141, 1.014160156, 0.078857422)
	ค่าพิกัดต่ำสุด	(-0.011230469, 0.997558594, 0.055419922)
ตำแหน่ง T5 (+x)	ค่าพิกัดสูงสุด	(-0.961425781, 0.009033203, -0.063476563)
	ค่าพิกัดต่ำสุด	(-0.978027344, -0.012207031, -0.086669922)
ตำแหน่ง T6 (-x)	ค่าพิกัดสูงสุด	(1.031250000, 0.054443359, -0.020996094)
	ค่าพิกัดต่ำสุด	(1.013671875, 0.034912109, -0.047363281)

นำมาหาค่าเฉลี่ยได้เมทริกซ์  $[W]_{6 \times 4}$  ในสมการที่ (4.8) ดังนี้

$$[W]_{6 \times 4} = \begin{bmatrix} 0.009936532 & 0.001674805 & 0.9947460940 & 1 \\ 0.031611328 & 0.031899414 & -1.038798828 & 1 \\ 0.031713867 & -0.990532227 & -0.019643555 & 1 \\ -0.006147461 & 1.005400391 & 0.0662646480 & 1 \\ -0.969584961 & -0.002148438 & -0.076098633 & 1 \\ 1.02371582 & 0.04539453 & -0.0352001950 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

การแก้สมการหา  $[X]_{4 \times 3}$  ในสมการที่ (4.6) โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดโดย

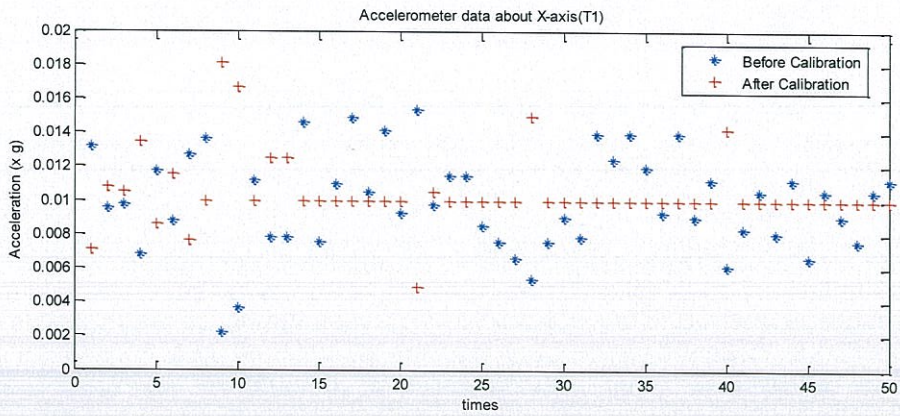
$$\begin{aligned} [Y]_{6 \times 3} &= [W]_{6 \times 4} \cdot [X]_{4 \times 3} \\ [W^T]_{4 \times 6} \cdot [Y]_{6 \times 3} &= [W^T]_{4 \times 6} \cdot [W]_{6 \times 4} \cdot [X]_{4 \times 3} \\ &= [W^T \cdot W]_{4 \times 4} \cdot [X]_{4 \times 3} \\ [W^T \cdot W]_{4 \times 4}^{-1} \cdot [W^T]_{4 \times 6} \cdot [Y]_{6 \times 3} &= [W^T \cdot W]_{4 \times 4}^{-1} \cdot [W^T \cdot W]_{4 \times 4} \cdot [X]_{4 \times 3} \\ [X]_{4 \times 3} &= [W^T \cdot W]_{4 \times 4}^{-1} \cdot [W^T]_{4 \times 6} \cdot [Y]_{6 \times 3} \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$[X]_{4 \times 3} = \begin{bmatrix} -1.002590401 & 0.024292619 & -0.018555732 \\ -0.018435424 & -1.000842556 & -0.042010327 \\ -0.011491075 & -0.01511426 & 0.979641377 \\ 0.020333483 & 0.014536991 & 0.018770068 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

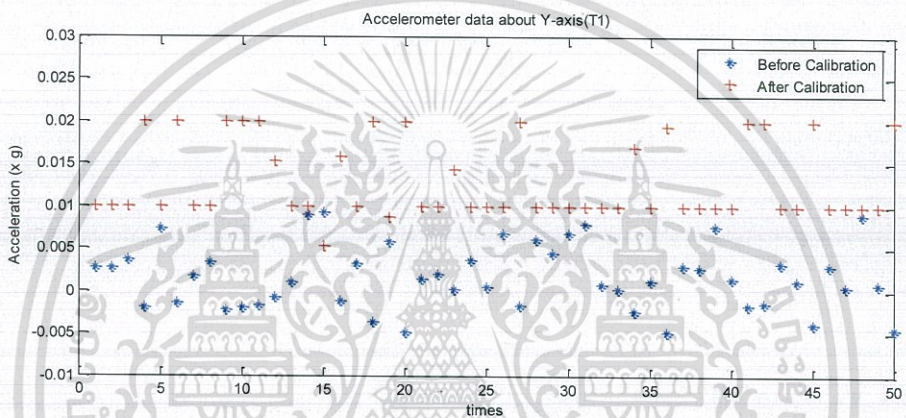
นำ  $[X]_{4 \times 3}$  แทนค่าลงในสมการที่ (4.5) จะเห็นได้ว่าค่าข้อมูลดิบถูกคูณกับ  $[X]_{4 \times 3}$  เป็นการปรับแก้ค่าเนื่องจากปัญหาทั้ง 3 ประการที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ค่าที่ได้จากการคูณมีความถูกต้องมากขึ้น และสามารถนำไปประมวลผลต่อไปได้

ผลการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างก่อนและหลังการปรับเทียบสำหรับแต่ละตำแหน่งตามรูปที่ 4.6 แสดงดังรูปที่ 4.7 ถึงรูปที่ 4.24 โดยแกนตั้ง คือ ค่าข้อมูลที่เซนเซอร์อ่านได้ และแกนนอน คือ จุดข้อมูล (Sample Number) เมื่อสัญลักษณ์ \* คือ ข้อมูลก่อนการปรับเทียบ และสัญลักษณ์ + คือ ข้อมูลหลังการปรับเทียบ

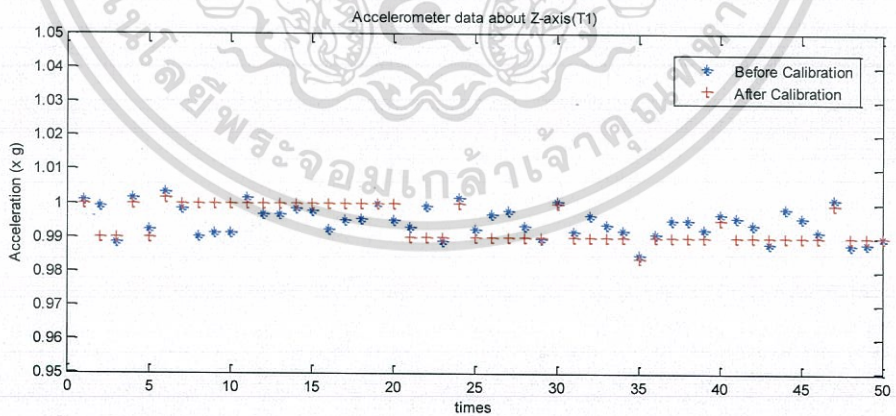
จากรูปที่ 4.7 ถึงรูปที่ 4.9 ผลการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างก่อนและหลังการปรับเทียบในตำแหน่ง T1 เห็นได้ว่าหลังทำการปรับเทียบ ค่าที่เซนเซอร์วัดความเร่งอ่านได้นั้นมีความใกล้เคียงกับค่าที่ควรจะเป็น (0,0,1) มากขึ้น



รูปที่ 4.7 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T1 แกน x



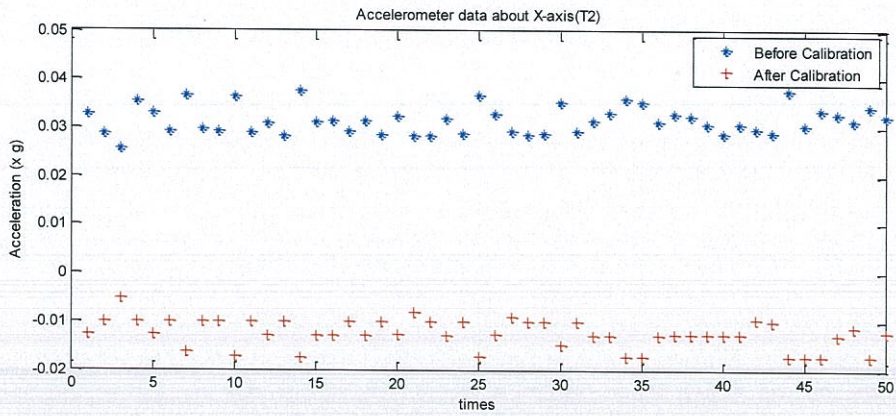
รูปที่ 4.8 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T1 แกน y



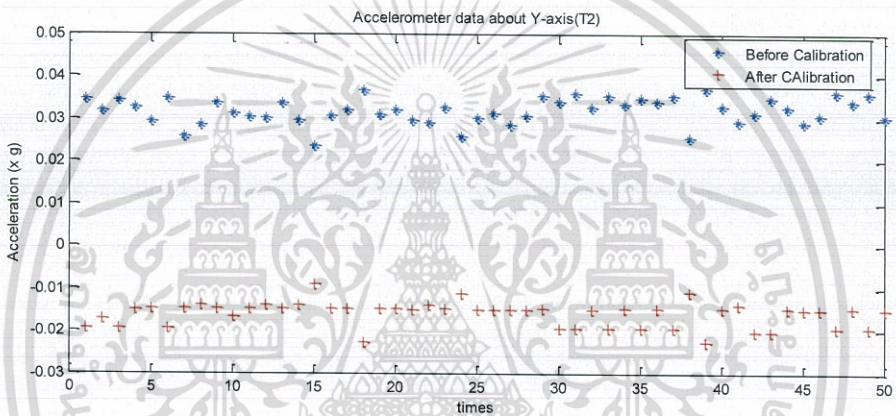
รูปที่ 4.9 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T1 แกน z

จากรูปที่ 4.10 ถึงรูปที่ 4.12 ผลการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างก่อนและหลังการปรับเทียบ ในตำแหน่ง T2 เห็นได้ชัดว่าหลังทำการปรับเทียบ ค่าที่เซนเซอร์วัดความเร่งอ่านได้นั้นมีความใกล้เคียงกับค่าที่ควรจะเป็น (0,0,-1) มากขึ้น

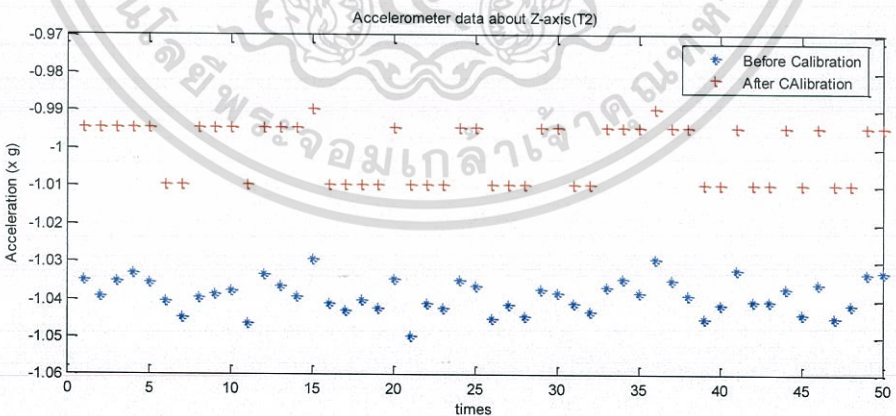
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T2 แกน x



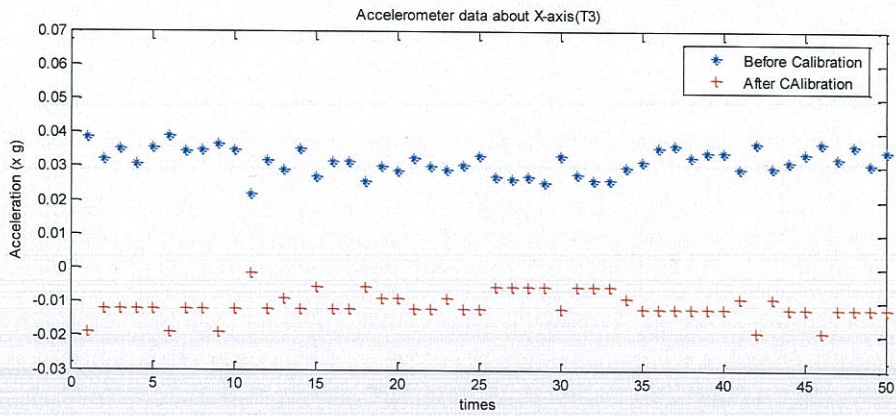
รูปที่ 4.11 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T2 แกน y



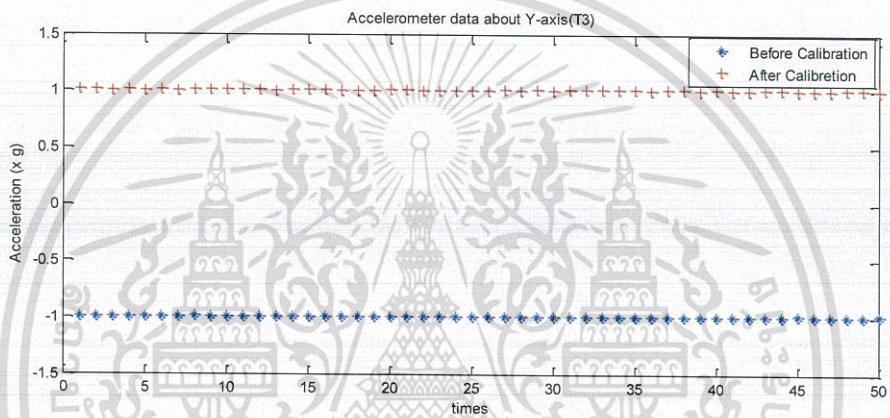
รูปที่ 4.12 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T2 แกน z

จากรูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.15 ผลการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างก่อนและหลังการปรับเทียบ ในตำแหน่ง T3 เห็นได้ว่าหลังทำการปรับเทียบ ค่าที่เซนเซอร์วัดความเร่งอ่านได้นั้นมีความใกล้เคียงกับค่าที่ควรจะเป็น (0,1,0) มากขึ้น

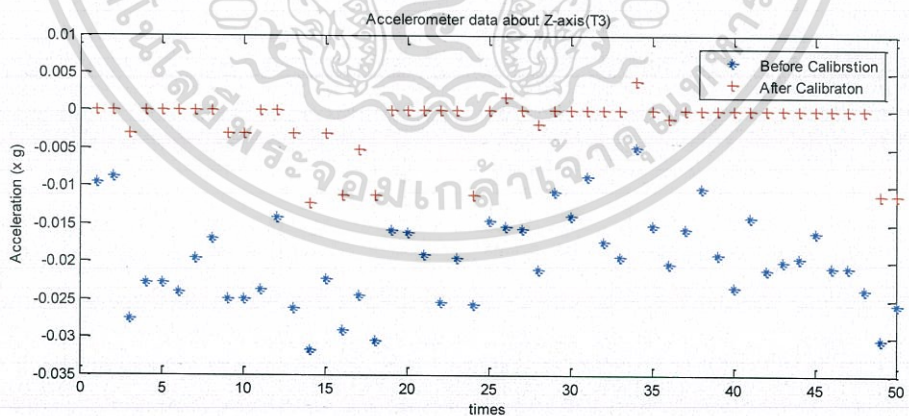
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T3 แกน x



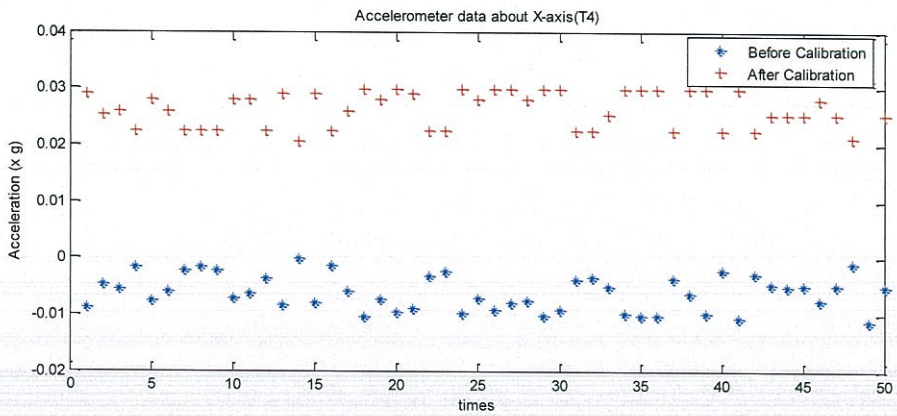
รูปที่ 4.14 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T3 แกน y



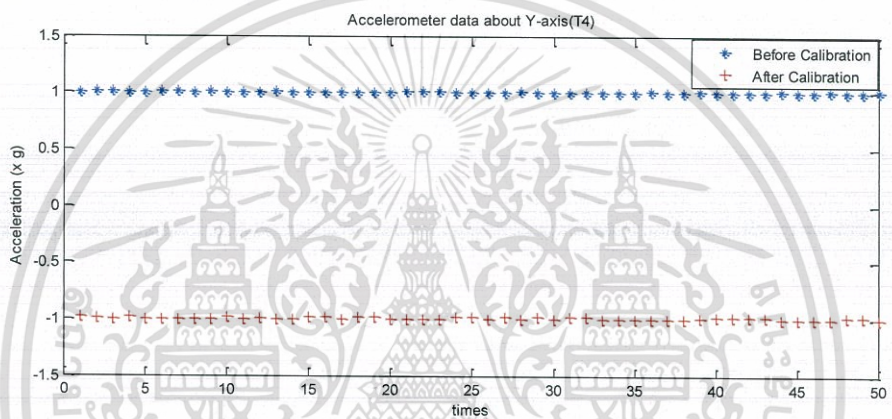
รูปที่ 4.15 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T3 แกน z

จากรูปที่ 4.16 ถึงรูปที่ 4.18 ผลการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างก่อนและหลังการปรับเทียบ ในตำแหน่ง T4 เห็นได้ว่าหลังทำการปรับเทียบ ค่าที่เซนเซอร์วัดความเร่งอ่านได้นั้นมีความใกล้เคียงกับค่าที่ควรจะเป็น (0,-1,0) มากขึ้น

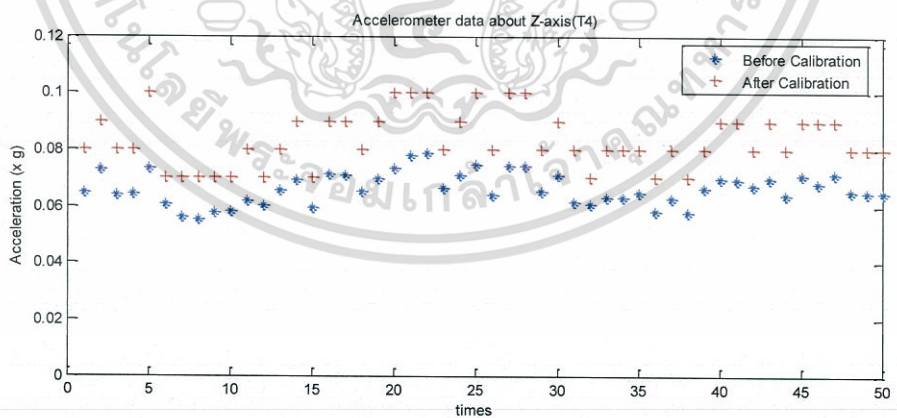
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T4 แกน x



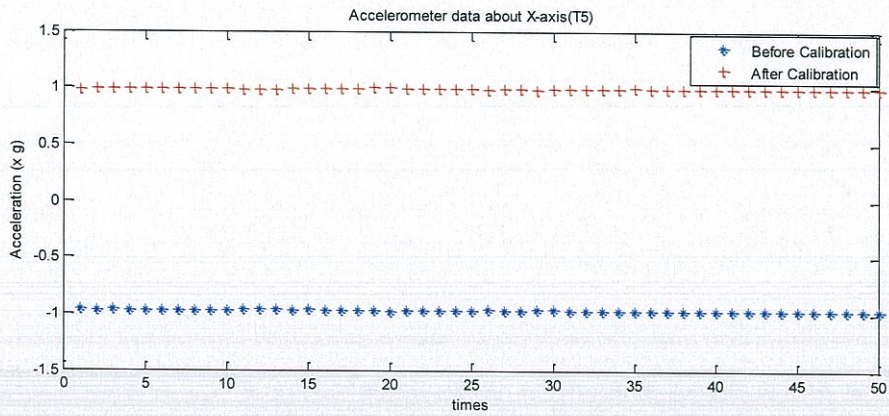
รูปที่ 4.17 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T4 แกน y



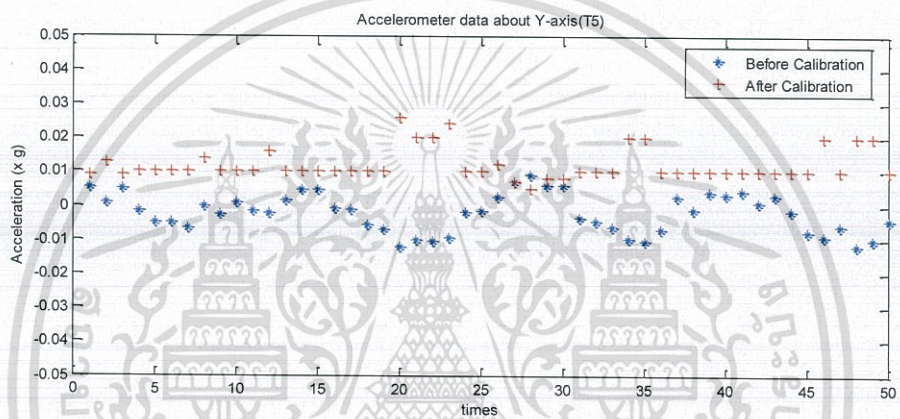
รูปที่ 4.18 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T4 แกน z

จากรูปที่ 4.19 ถึงรูปที่ 4.21 ผลการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างก่อนและหลังการปรับเทียบ ในตำแหน่ง T5 เห็นได้ว่าหลังทำการปรับเทียบ ค่าที่เซนเซอร์วัดความเร่งอ่านได้นั้นมีความใกล้เคียงกับค่าที่ควรจะเป็น (1,0,0) มากขึ้น

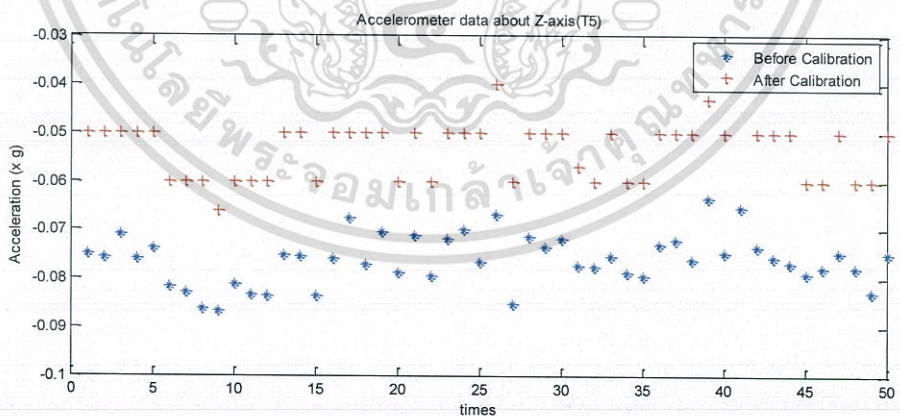
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T5 แกน x



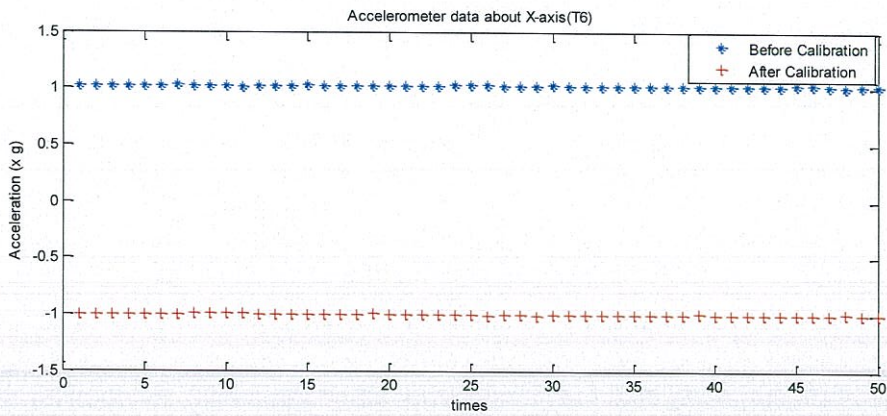
รูปที่ 4.20 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T5 แกน y



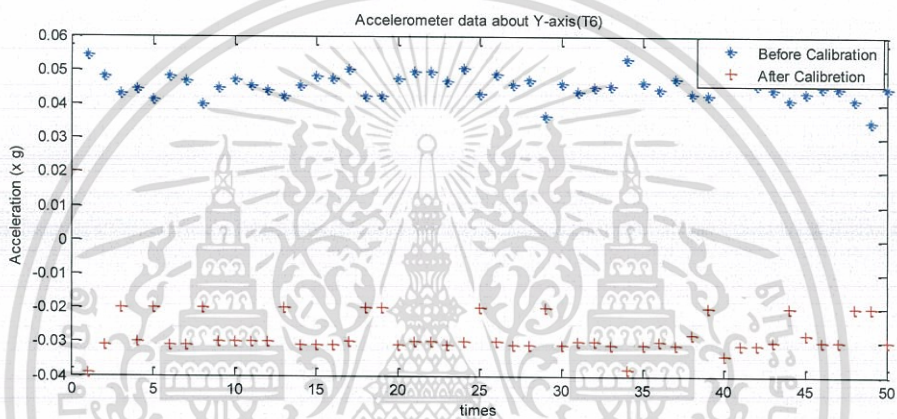
รูปที่ 4.21 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T5 แกน z

จากรูปที่ 4.22 ถึงรูปที่ 4.24 ผลการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างก่อนและหลังการปรับเทียบ ในตำแหน่ง T6 เห็นได้ว่าหลังทำการปรับเทียบ ค่าที่เซนเซอร์วัดความเร่งอ่านได้นั้นมีความใกล้เคียงกับค่าที่ควรจะเป็น  $(-1,0,0)$  มากขึ้น

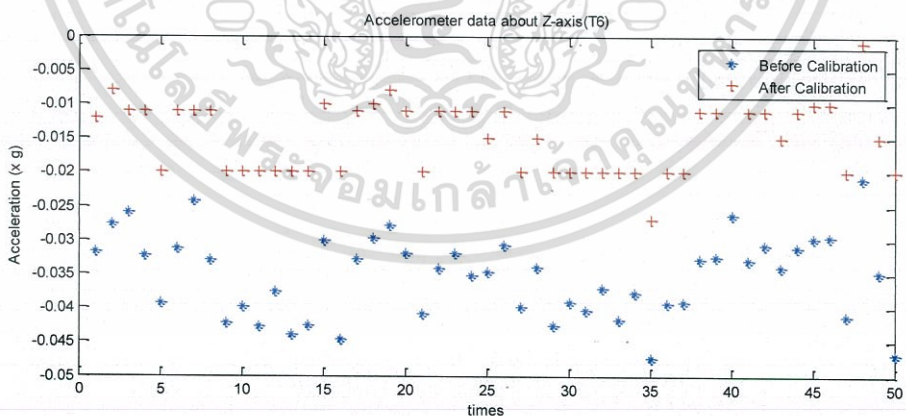
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T6 แกน x



รูปที่ 4.23 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T6 แกน y



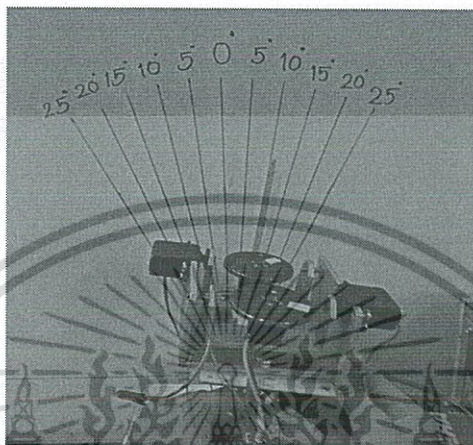
รูปที่ 4.24 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร่งตำแหน่ง T6 แกน z

### 4.3 การทดลองวัดค่ามุมพิทช์ด้วยเซนเซอร์วัดความเร่ง

การทดลองนี้เป็นการทดลองความแม่นยำของการอ่านค่ามุมพิทช์ด้วยเซนเซอร์วัดความเร่ง

จึงทดลองโดยเอียงมอเตอร์ไซค์ไปยังมุมที่กำหนดให้ได้ค่าที่เซนเซอร์ควรอ่านได้ โดยให้มุมในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวตั้งฉากกับพื้นระนาบนั้นเป็นมุม 0 องศา ทั้งนี้ทำการทดสอบถึงเพียงมุม 25 องศา เนื่องจากการทรงตัวของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวไม่ควรจะมีมุมเอียงเกิน 25 องศา เพราะอาจจะทำให้มอเตอร์ไซค์ไม่สามารถรักษาสถิตได้ โดยจะทำการเก็บค่าข้อมูลที่อ่านได้จากเซนเซอร์ในการขยับมุมพิทช์ เพิ่มครั้งละ 5 องศา ตั้งแต่ตำแหน่ง 0 – 25 องศา ครั้งละ 50 ข้อมูล แล้วหาค่าเฉลี่ยเป็นค่าที่เซนเซอร์อ่านได้ในการเปลี่ยนมุมแต่ละครั้ง ลักษณะของการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 การทดลองวัดค่ามุมพิทช์

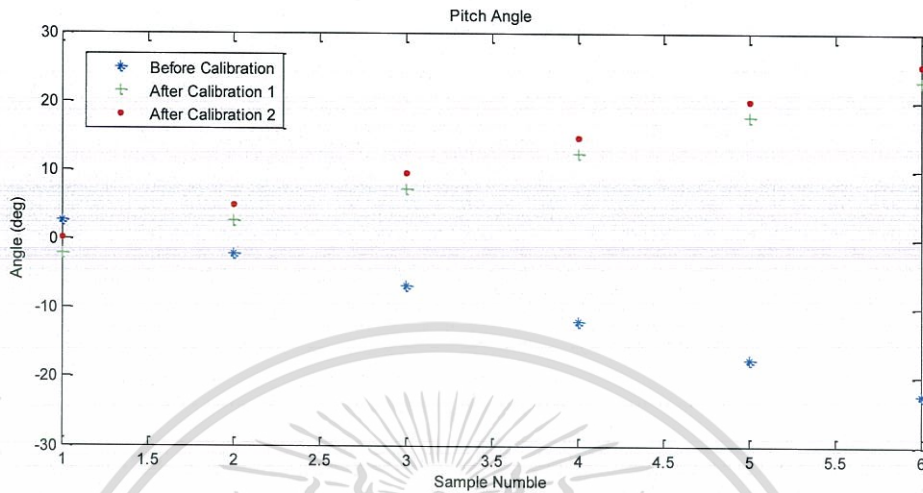
ค่าเฉลี่ยของข้อมูลดิบที่ได้จากการขยับมุมเพิ่มแต่ละครั้งนั้น ก่อนนำไปคำนวณหาค่ามุมพิทช์ ต้องนำข้อมูลดังกล่าวไปหารด้วย 16384 เพื่อให้อยู่ในหน่วยจำนวนเท่าของแรงโน้มถ่วงโลก (g) และนำข้อมูลมาคำนวณหาค่ามุมพิทช์ได้จากสมการที่ (2.31) ซึ่งมีค่าในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองวัดค่ามุมพิทช์ด้วยเซนเซอร์วัดความเร่ง

องศา	มุมพิทช์ (องศา)		
	ก่อนการปรับเทียบ	หลังการปรับเทียบครั้งที่ 1	หลังการปรับเทียบครั้งที่ 2
0	2.656064341	-2.139891229	0.1613137978
5	-2.09365210	2.630835910	4.932040937
10	-6.79496660	7.388452393	9.689657420
15	-11.9503055	12.48012822	14.78133325
20	-17.3760579	17.86678640	20.16799143
25	-22.55135953	22.96645815	25.26766317

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการปรับเทียบค่าของมุมพิทช์ที่ได้อ่านทั้งก่อนและหลังทำการปรับเทียบครั้งที่ 1 แสดงดังรูปที่ 4.26 โดยแกนนอน คือ ชุดข้อมูล และแกนตั้ง คือ ค่ามุมที่เซนเซอร์อ่านได้ในหน่วยองศา เมื่อสัญลักษณ์ \* คือ ข้อมูลก่อนการปรับเทียบ และสัญลักษณ์ + คือ ข้อมูลหลังการปรับเทียบครั้งที่ 1



รูปที่ 4.26 มุมพิทช์ที่เซนเซอร์วัดความเร็วอ่านได้

จากตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.26 เห็นได้ว่าข้อมูลก่อนทำการปรับเทียบ ค่ามุมพิทช์ที่เซนเซอร์อ่านค่าได้นั้นมีความคลาดเคลื่อนจากมุมที่กำหนดไว้ ซึ่งแตกต่างกับข้อมูลหลังทำการปรับเทียบ ซึ่งค่าหลังการปรับเทียบครั้งที่ 1 นั้นพบว่าดีกว่าค่าก่อนการปรับเทียบ อย่างไรก็ตามจึงได้ทำการปรับเทียบครั้งที่ 2 ดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.26 เมื่อสัญลักษณ์ \* คือข้อมูลหลังการปรับเทียบครั้งที่ 2 โดยเพิ่มค่าออฟเซตของมุมอีก 2.301205027 องศา ซึ่งได้จากการคำนวณค่าเฉลี่ยความผิดพลาด ทำให้ได้ความแม่นยำและใกล้เคียงกับมุมจริงมากกว่า ดังนั้นในการใช้งานค่าวัดมุมพิทช์ จะใช้ค่าหลังการปรับเทียบครั้งที่ 2

#### 4.4 การปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม

หลังจากทำการติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมแล้วอาจจะมีค่าออฟเซตเกิดขึ้น จึงจำเป็นต้องปรับเทียบเพื่อตั้งค่าศูนย์เสียก่อน โดยการวางอากาศยานสี่ใบพัดไว้บนพื้นราบในลักษณะเดียวกับการตำแหน่งเก็บค่า  $Z+$  ทฤษฎีของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมควรอ่านค่า ได้เป็นศูนย์ในทุกแกน  $(0,0,0)$  จะได้สามารถอ้างอิงเดียวกับอากาศยานสี่ใบพัดทั้งสามแกน จากนั้นทำการเก็บค่าข้อมูลดิบ คือ  $G_x$   $G_y$  และ  $G_z$  จำนวน 50 ข้อมูลจากนั้นหาค่าเฉลี่ยในแต่ละแกน ดังสมการที่ (4.12)

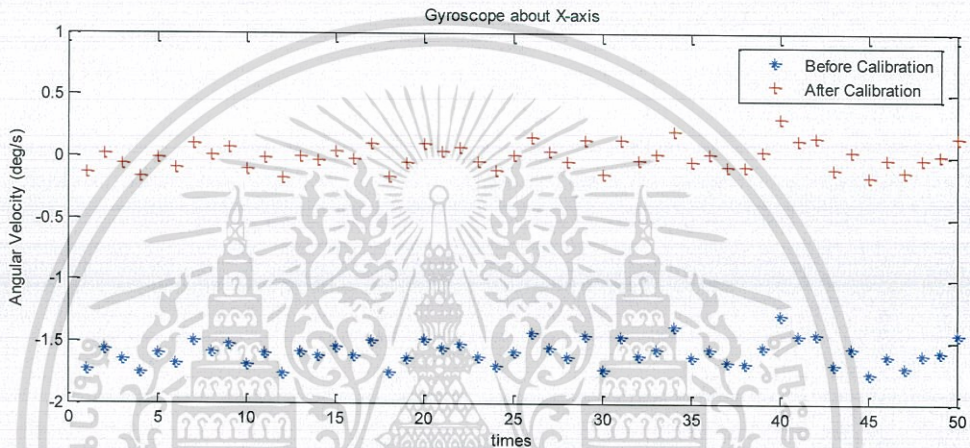
$$\begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix}_{Avg} = \begin{bmatrix} -207.64 \\ -179.88 \\ -125.98 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

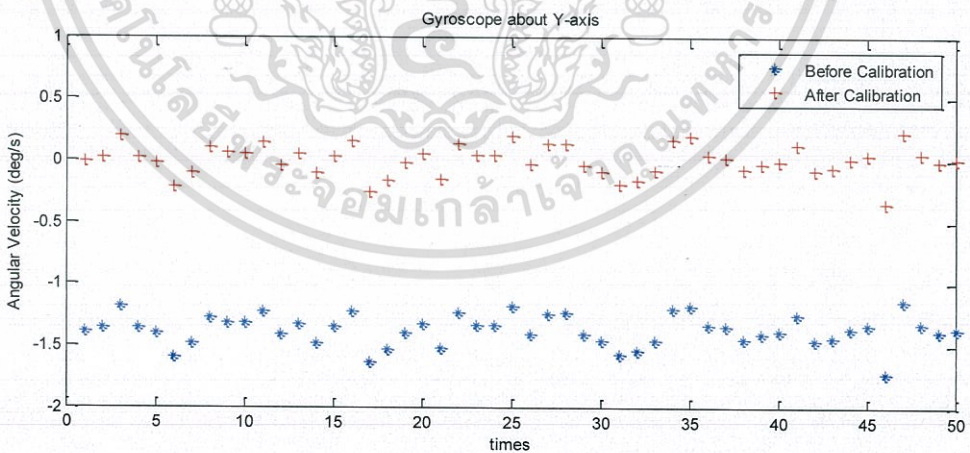
จากนั้นทำการปรับแก้ค่าที่ได้เทียบกับเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม ได้สมการที่ (4.13)

$$\begin{bmatrix} G_{x1} \\ G_{y1} \\ G_{z1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix}_{Avg} = \begin{bmatrix} G_x - (-207.64) \\ G_y - (-179.88) \\ G_z - (-125.98) \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

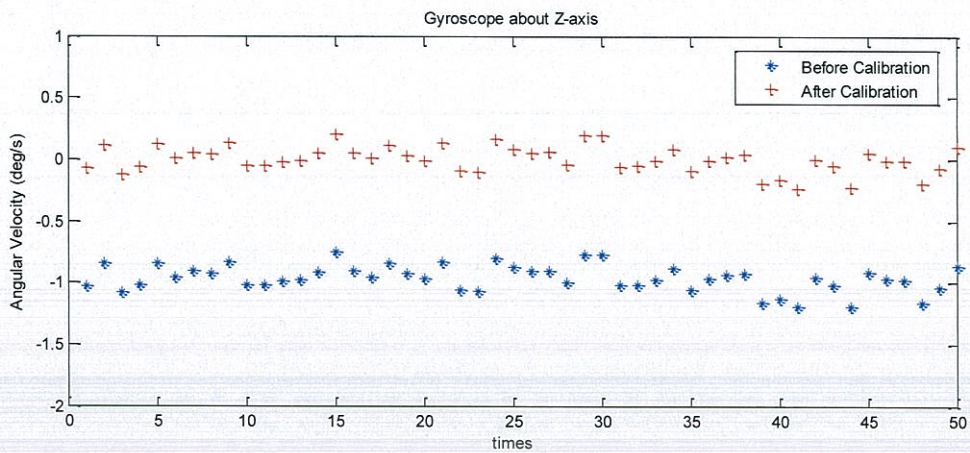
ผลการเทียบข้อมูลของการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมก่อนและหลัง โดยแกนนอน คือ ชุดข้อมูล และแกนตั้ง คือ ค่าความเร็วเชิงมุมที่อ่านได้จากเซนเซอร์ ได้ตามรูปที่ 4.27 ถึงรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.27 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมแกน x



รูปที่ 4.28 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมแกน y



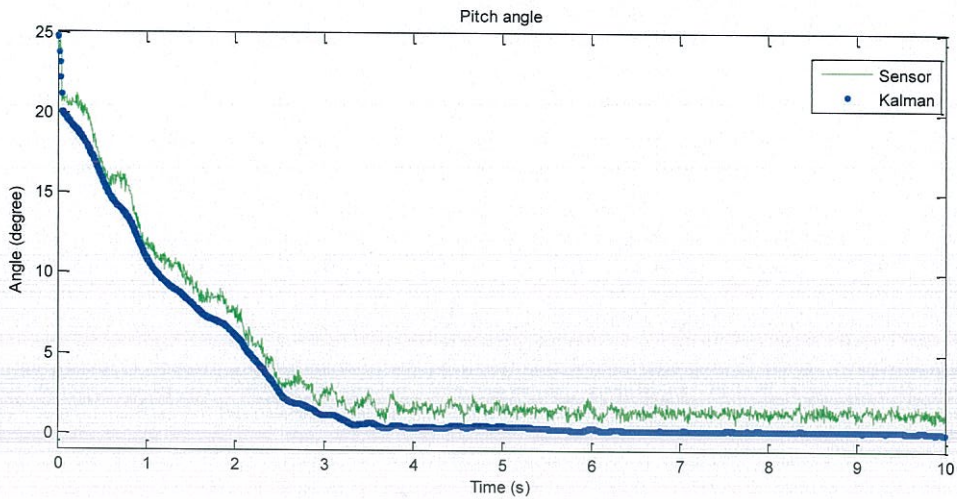
รูปที่ 4.29 ผลก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมแกน z

จะเห็นว่าการปรับเทียบข้อมูลระหว่างก่อนและหลังการปรับเทียบเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม ค่าข้อมูลที่อ่านได้ขณะวางมอเตอร์ไซค์ในตำแหน่ง +Z มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ควรจะเป็น (0,0,0) มากขึ้น

#### 4.5 การทดลองใช้ตัวกรองคาลมาน

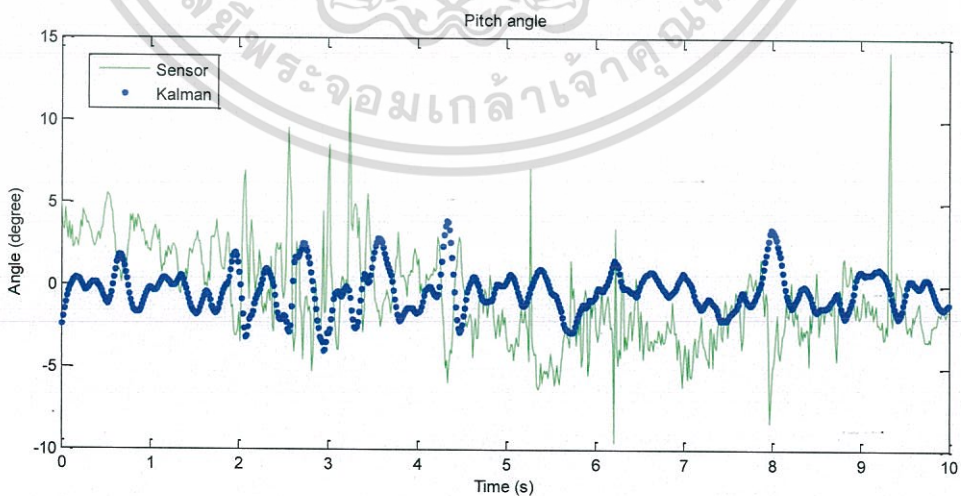
การทดลองใช้ตัวกรองคาลมาน เพื่อนำค่าวัดที่ผ่านตัวกรองคาลมานเปรียบเทียบกับค่าวัดจากเซนเซอร์วัดความเร่งและเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมหลังผ่านการปรับเทียบ โดยวัดค่ามุมพิทช์ ณ ขณะปิดมอเตอร์และเปิดมอเตอร์ ซึ่งการคำนวณตัวกรองคาลมานกับเซนเซอร์หลังการปรับเทียบได้เขียนลงในไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งพารามิเตอร์ต่าง ๆ และโปรแกรม แสดงดังรูปที่ ค.1 และ ค.2 ในภาคผนวก ค.

จากรูปที่ 4.30 ผลการทดลองขณะปิดมอเตอร์ เริ่มจากมุมเอียงเริ่มต้นของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวเท่ากับ 25 องศา แล้วทดลองเอียงมอเตอร์ไซค์ทรงตัวกลับมาที่มุม 0 องศา ในระยะเวลา 10 วินาที โดยแกนนอนเป็นแกนเวลาในหน่วยวินาที และแกนตั้งเป็นค่ามุมในหน่วยองศา เส้นสีเขียวแสดงค่าตัวที่ได้จากเซนเซอร์วัดความเร่งและเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมหลังผ่านการปรับเทียบ และเส้นสีน้ำเงินแสดงค่าที่ได้หลังผ่านตัวกรองคาลมาน หลังจากทำการปรับเทียบค่าจากเซนเซอร์ค่าวัดที่ได้นั้นมีความนิ่งขึ้นก็จริง แต่ค่านั้นยังคลาดเคลื่อนจากศูนย์อยู่และยังมีการแกว่งพอสมควร ต่างจากค่าที่ผ่านตัวกรองคาลมานที่มีการแกว่งน้อยลงและมีความใกล้เคียงค่าจริงที่ค่าศูนย์มากกว่า



รูปที่ 4.30 ผลการทดลองวัดค่ามุมพิทช์โดยใช้ตัวกรองคาลมานขณะปิดมอเตอร์

จากรูปที่ 4.31 ผลการทดลองขณะเปิดมอเตอร์ ในการทดลองได้จับมอเตอร์ไซค์ทรงตัวไว้ที่มุม 0 องศา เป็นเวลา 10 วินาที โดยแกนนอนเป็นแกนเวลาในหน่วยวินาที และแกนตั้งเป็นค่ามุมในหน่วยองศา เส้นสีเขียวแสดงค่าที่ได้จากเซนเซอร์วัดความเร่งและเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมหลังผ่านการปรับเทียบ ส่วนเส้นสีน้ำเงินแสดงค่าที่ได้หลังจากตัวกรองคาลมาน จะสังเกตได้ว่าหลังจากที่ปิดมอเตอร์แล้วค่าที่ได้จากเซนเซอร์วัดความเร่งและเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมหลังการปรับเทียบนั้นมีการแกว่งมาก เนื่องจากเกิดการสั่นในขณะเปิดมอเตอร์ ทำให้เกิดสัญญาณรบกวนมาก แต่หลังจากที่ใช้ตัวกรองคาลมานค่าที่ได้นั้นมีการแกว่งลดลงใกล้เคียงมุมจริงที่มุม 0 องศา จึงมีความเหมาะสมมากขึ้นที่จะนำไปใช้ในการควบคุมต่อไป



รูปที่ 4.31 ผลการทดลองวัดค่ามุมพิทช์โดยใช้ตัวกรองคาลมานขณะเปิดมอเตอร์

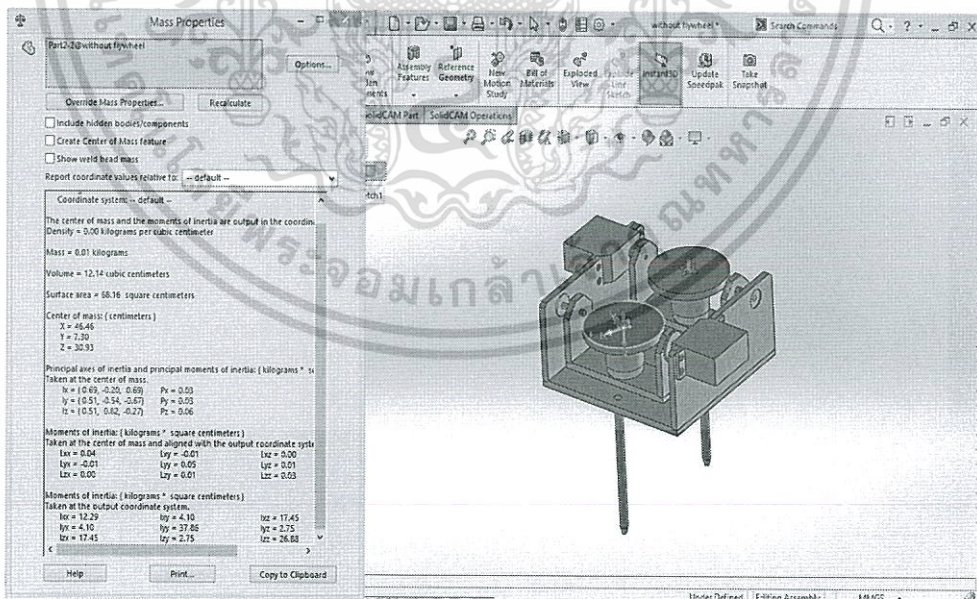
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 การหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของงานหมุนรอบจุดกำเนิดของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว

จากสมการที่ (2.5), (2.8) และ (2.13) มีค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการหามีทั้งหมด 7 ตัวคือ

1.  $I_{f1X}$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของงานหมุน 1 ขณะหมุนรอบแกน  $X$  ( $N \cdot m \cdot s^2$ )
2.  $I_{f1Y}$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของงานหมุน 1 ขณะหมุนรอบแกน  $Y$  ( $N \cdot m \cdot s^2$ )
3.  $I_{f1Z}$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของงานหมุน 1 ขณะหมุนรอบแกน  $Z$  ( $N \cdot m \cdot s^2$ )
4.  $I_{f2X}$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของงานหมุน 2 ขณะหมุนรอบแกน  $X$  ( $N \cdot m \cdot s^2$ )
5.  $I_{f2Y}$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของงานหมุน 2 ขณะหมุนรอบแกน  $Y$  ( $N \cdot m \cdot s^2$ )
6.  $I_{f2Z}$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของงานหมุน 2 ขณะหมุนรอบแกน  $Z$  ( $N \cdot m \cdot s^2$ )
7.  $I_b$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนหมุน ( $N \cdot m \cdot s^2$ )

ในการหาโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวนั้นสามารถทำได้หลายวิธี โดยวิธีที่สะดวกและง่ายวิธีหนึ่งคือ การหาโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวด้วยโปรแกรมโซลิดเวิร์ค (SolidWorks) ประมาณรูปทรงของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวให้ใกล้เคียงของจริงมากที่สุด และใช้คำสั่งเครื่องมือวัด (Mass Properties) จะได้โมเมนต์ความเฉื่อยตามสมการที่ (4.14) ถึงสมการที่ (4.20) ดังรูปที่ 4.32 โดยจะนำค่าโมเมนต์ความเฉื่อยไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมต่อไป



รูปที่ 4.32 การหาโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_{f1X} = 0.000024 \quad (\text{kg}\cdot\text{m}^2) \quad (4.14)$$

$$I_{f1Y} = 0.000024 \quad (\text{kg}\cdot\text{m}^2) \quad (4.15)$$

$$I_{f1Z} = 0.000047 \quad (\text{kg}\cdot\text{m}^2) \quad (4.16)$$

$$I_{f2X} = 0.000024 \quad (\text{kg}\cdot\text{m}^2) \quad (4.17)$$

$$I_{f2Y} = 0.000024 \quad (\text{kg}\cdot\text{m}^2) \quad (4.18)$$

$$I_{f2Z} = 0.000047 \quad (\text{kg}\cdot\text{m}^2) \quad (4.19)$$

$$I_b = 0.002685 \quad (\text{kg}\cdot\text{m}^2) \quad (4.20)$$

#### 4.7 การจำลองการเคลื่อนที่ผ่านโปรแกรมแมทแล็บ

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป้าหมายที่ต้องการควบคุม คือ มุมเอียงของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว ซึ่งได้ออกแบบตัวควบคุมป้อนกลับสเตทไว้ เพื่อตรวจสอบความสามารถของตัวควบคุมก่อนนำไปใช้งานจริง โดยอาศัยการจำลองผ่านโปรแกรมแมทแล็บด้วยแบบจำลองในหัวข้อ 3.4 โดยแบ่งออกเป็น 2 การจำลองดังนี้

##### 4.7.1 การจำลองเมื่อใช้ตัวควบคุม 1

ทำการจำลองมุมเอียงเริ่มต้นของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวเป็น 20 องศา โดยใช้ค่า  $K$  ตามสมการที่ (3.1) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ การจำลองเมื่อไม่มีแรงภายนอกกระทำและมีแรงภายนอกกระทำ โดยผลการจำลองจะเป็นดังรูปที่ 4.33 และ 4.34 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.33 พบว่า ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลาประมาณ 2 วินาที ความเร็วในการเอียงสูงสุดของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวอยู่ที่ -2.2 เรเดียนต่อวินาที มุมสูงสุดที่งานหมุน 1 พลิกอยู่ที่ -3.2 องศา ความเร็วในการพลิกสูงสุดของงานหมุน 1 อยู่ที่ -1.8 เรเดียนต่อวินาที มุมสูงสุดที่งานหมุน 2 พลิกอยู่ที่ 3.2 องศา และความเร็วในการพลิกสูงสุดของงานหมุน 2 อยู่ที่ 1.8 เรเดียนต่อวินาที

จากรูปที่ 4.34 พบว่า จะเริ่มพิจารณาจากเวลาตั้งแต่ 2.5 วินาที พบว่าระบบจะเริ่มกลับมามีสภาวะคงตัวเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 2 วินาที ความเร็วในการเอียงสูงสุดของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวอยู่ที่ 4 เรเดียนต่อวินาที มุมสูงสุดที่งานหมุน 1 พลิกอยู่ที่ -3.5 องศา ความเร็วในการพลิกสูงสุดของงานหมุน 1 อยู่ที่ -1.8 เรเดียนต่อวินาที มุมสูงสุดที่งานหมุน 2 พลิกอยู่ที่ 3.5 องศา และความเร็วในการพลิกสูงสุดของงานหมุน 2 อยู่ที่ 1.8 เรเดียนต่อวินาที

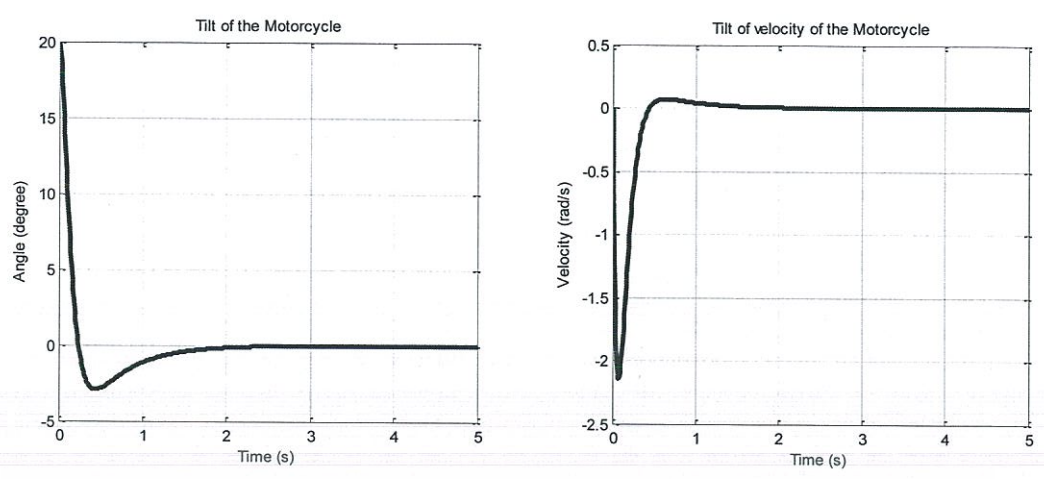
#### 4.7.2 การจำลองเมื่อใช้ตัวควบคุม 2

เพื่อที่จะให้ระบบมีเสถียรภาพที่ดีขึ้น จึงได้ทำการจำลองเพิ่มเติมโดยใช้ค่า  $K_{new}$  ตามสมการที่ (3.2) และกำหนดมุมเอียงเริ่มต้นของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวเป็น 20 องศา โดยแบ่งการจำลองออกเป็น 2 กรณีคือ การจำลองเมื่อไม่มีแรงภายนอกมากระทำและมีแรงภายนอกมากระทำ ผลการจำลองจะเป็นดังรูปที่ 4.35 และ 4.36 ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.35 พบว่า ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวที่เวลาประมาณ 1.5 วินาที ความเร็วในการเอียงสูงสุดของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวอยู่ที่ -2.5 เรเดียนต่อวินาที มุมสูงสุดที่งานหมุน 1 พลิกอยู่ที่ -5.5 องศา ความเร็วในการพลิกสูงสุดของงานหมุน 1 อยู่ที่ -3.2 เรเดียนต่อวินาที มุมสูงสุดที่งานหมุน 2 พลิกอยู่ที่ 5.5 องศา และความเร็วในการพลิกสูงสุดของงานหมุน 2 อยู่ที่ 3.2 เรเดียนต่อวินาที

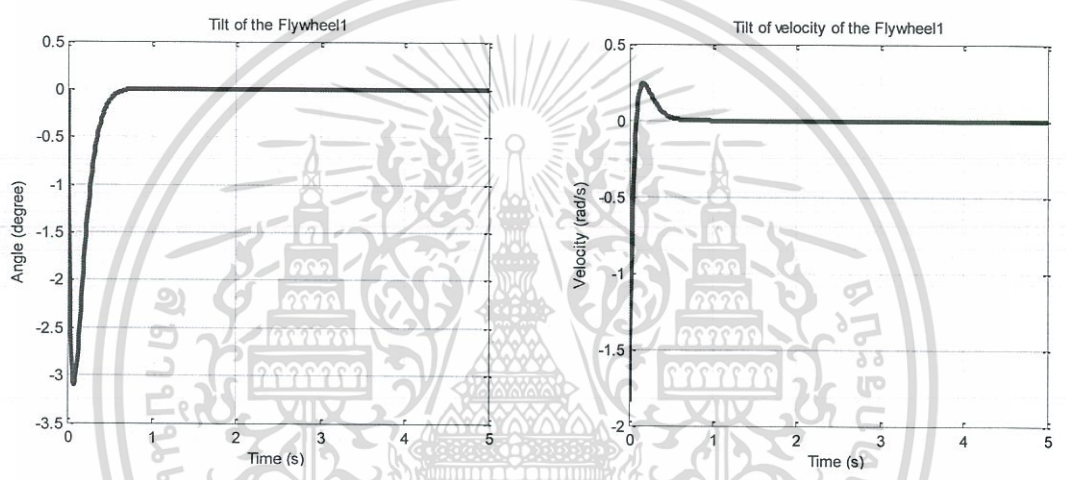
จากรูปที่ 4.36 พบว่า จะเริ่มพิจารณาจากเวลาตั้งแต่ 2.5 วินาที พบว่าระบบจะเริ่มกลับมามีสภาวะคงตัวเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 1.5 วินาที ความเร็วในการเอียงสูงสุดของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวอยู่ที่ 3.8 เรเดียนต่อวินาที มุมสูงสุดที่งานหมุน 1 พลิกอยู่ที่ -7 องศา ความเร็วในการพลิกสูงสุดของงานหมุน 1 อยู่ที่ -3.6 เรเดียนต่อวินาที มุมสูงสุดที่งานหมุน 2 พลิกอยู่ที่ 7 องศา และความเร็วในการพลิกสูงสุดของงานหมุน 2 อยู่ที่ 3.6 เรเดียนต่อวินาที

จากผลการจำลองพบว่าระบบมีเสถียรภาพ มอเตอร์ไซค์ทรงตัวสามารถเอียงจากมุมเริ่มต้นกลับมาที่มุมอ้างอิง (0 องศา) ได้ เมื่อใช้ตัวควบคุม 2 ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวได้เร็วกว่าตัวควบคุม 1 และสามารถนำไปใช้งานจริงได้



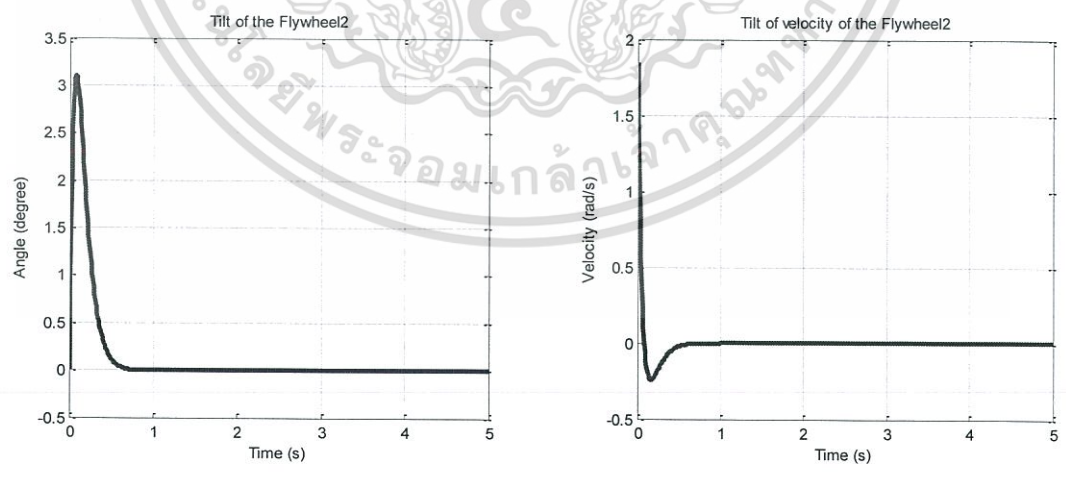
(ก) มุมเอียง( $\theta$ )

(ข) ความเร็วของมุมเอียง( $\dot{\theta}$ )



(ค) มุมพลิก( $\beta_1$ )

(ง) ความเร็วของมุมพลิก( $\dot{\beta}_1$ )

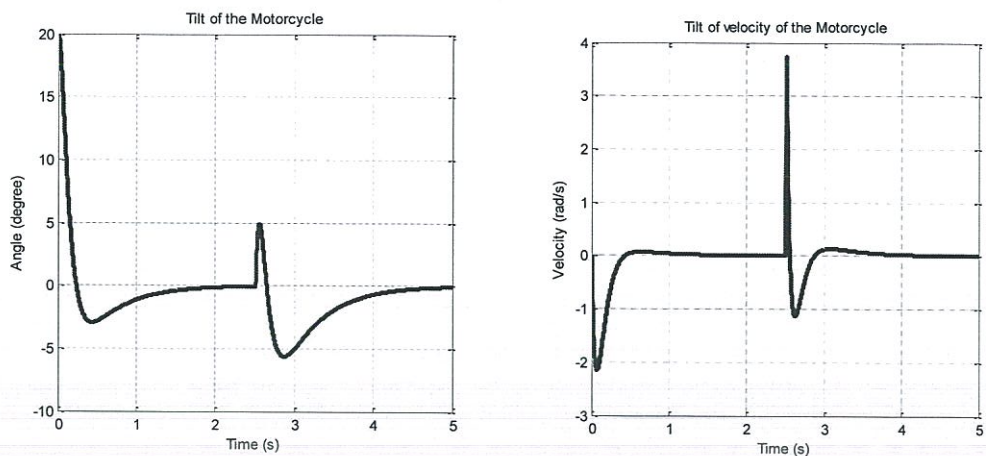
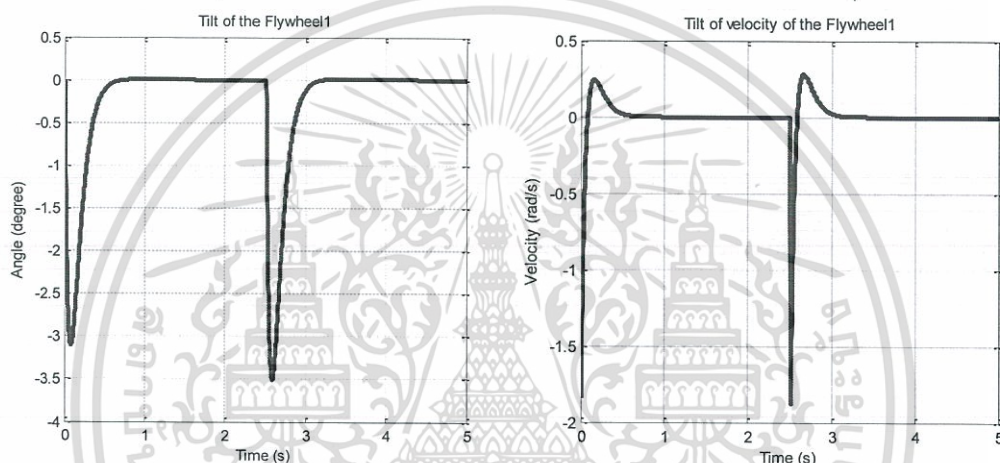
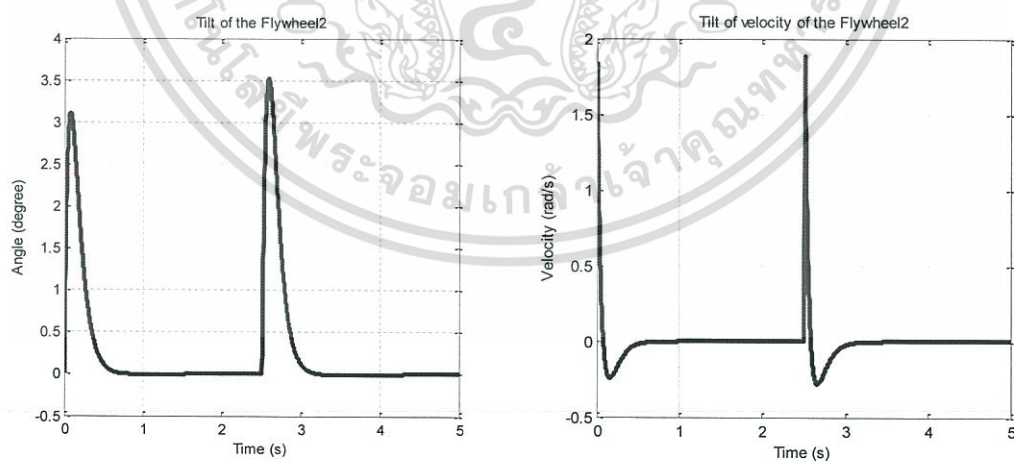


(จ) มุมพลิก( $\beta_2$ )

(ฉ) ความเร็วของมุมพลิก( $\dot{\beta}_2$ )

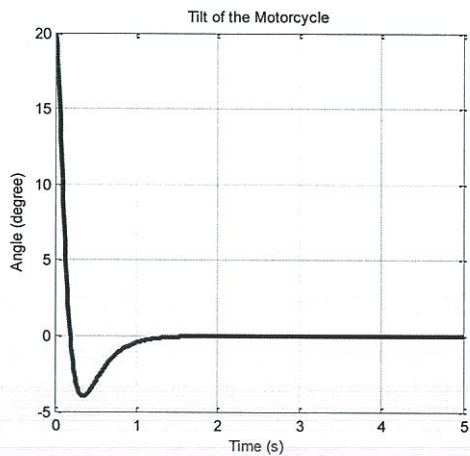
รูปที่ 4.33 การจำลองมอเตอร์ไซค์ทรงตัวเมื่อออกแบบตัวควบคุม 1 และไม่มีแรงภายนอกมากระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

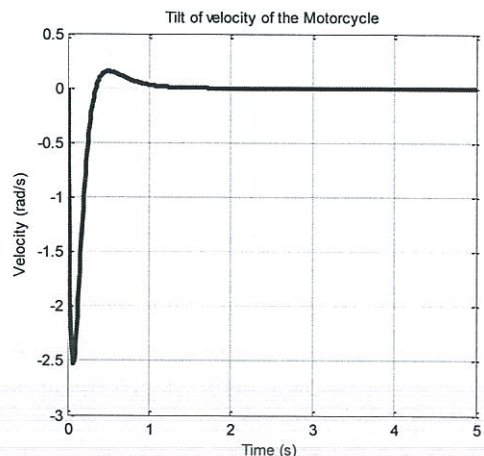
(ก) มุมเอียง( $\theta$ )(ข) ความเร็วของมุมเอียง( $\dot{\theta}$ )(ค) มุมพลิก( $\beta_1$ )(ง) ความเร็วของมุมพลิก( $\dot{\beta}_1$ )(จ) มุมพลิก( $\beta_2$ )(ฉ) ความเร็วของมุมพลิก( $\dot{\beta}_2$ )

รูปที่ 4.34 การจำลองมอเตอร์ไซค์ทรงตัวเมื่อออกแบบตัวควบคุม 1 และมีแรงภายนอกมากระทำ

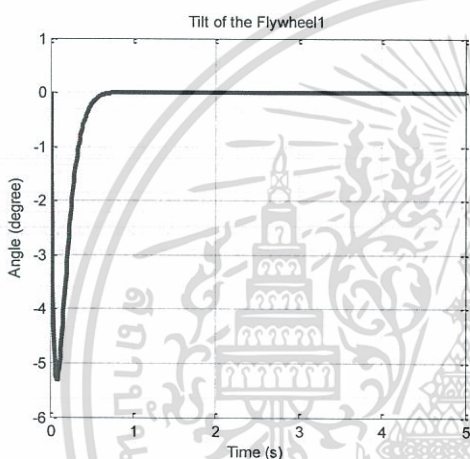
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



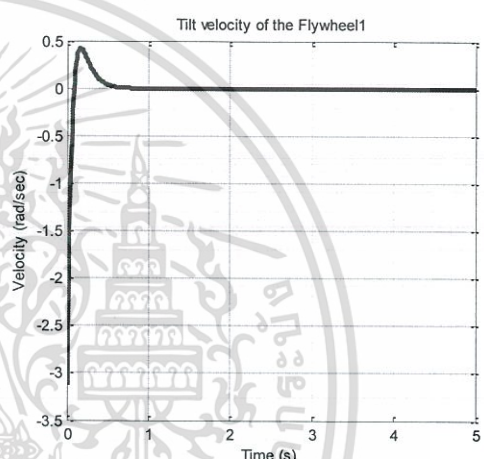
(ก) มุมเอียง( $\theta$ )



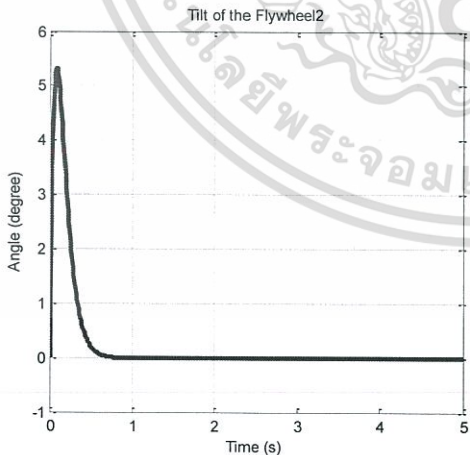
(ข) ความเร็วของมุมเอียง( $\dot{\theta}$ )



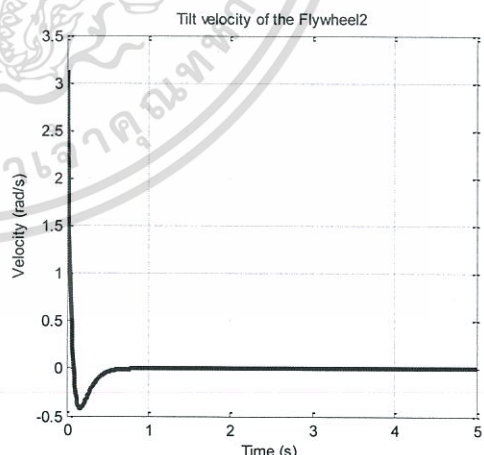
(ค) มุมพลิก( $\beta_1$ )



(ง) ความเร็วของมุมพลิก( $\dot{\beta}_1$ )



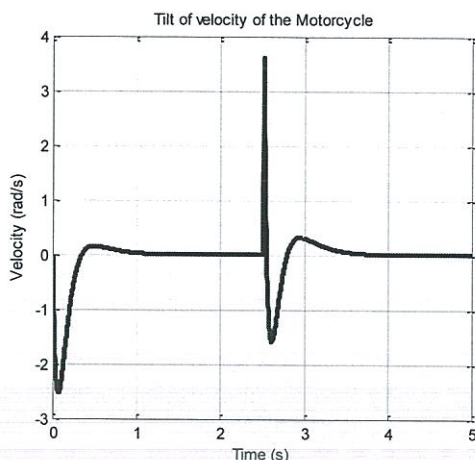
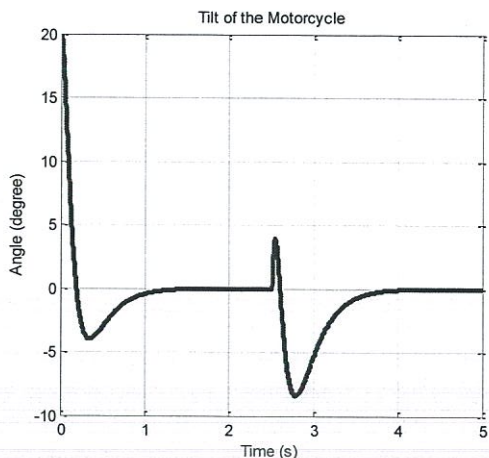
(จ) มุมพลิก( $\beta_2$ )



(ฉ) ความเร็วของมุมพลิก( $\dot{\beta}_2$ )

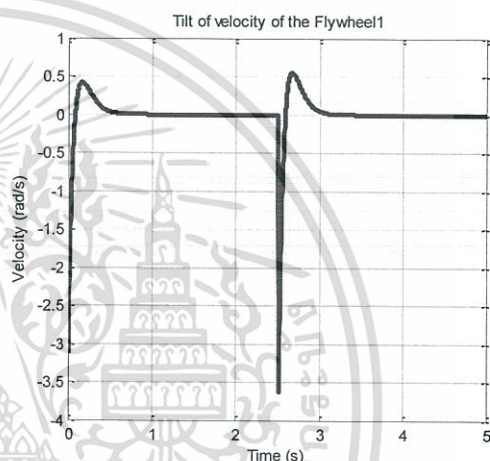
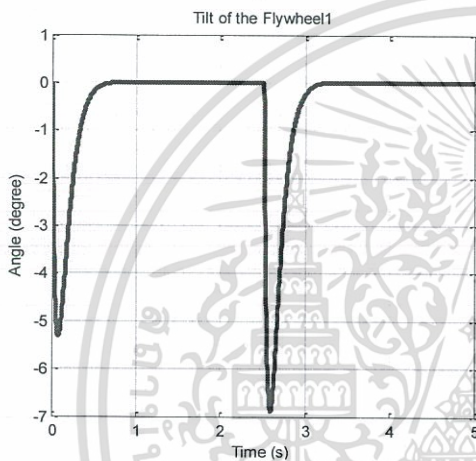
รูปที่ 4.35 การจำลองมอเตอร์ไซค์ทรงตัวเมื่อออกแบบตัวควบคุม 2 และไม่มีแรงภายนอกมากระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



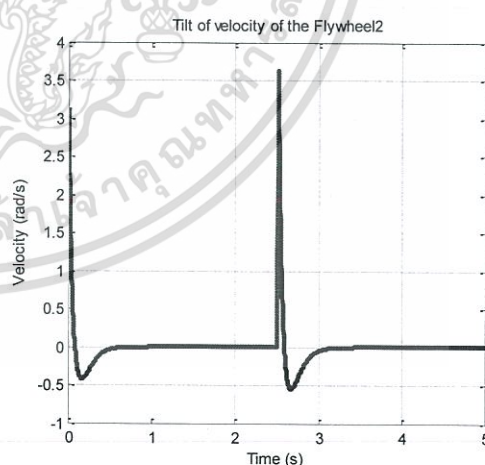
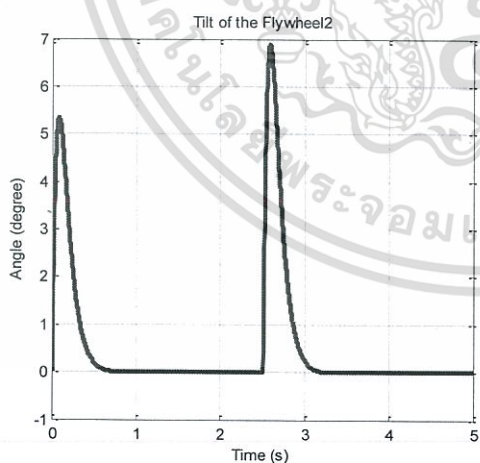
(ก) มุมเอียง( $\theta$ )

(ข) ความเร็วของมุมเอียง( $\dot{\theta}$ )



(ค) มุมพลิก( $\beta_1$ )

(ง) ความเร็วของมุมพลิก( $\dot{\beta}_1$ )



(จ) มุมพลิก( $\beta_2$ )

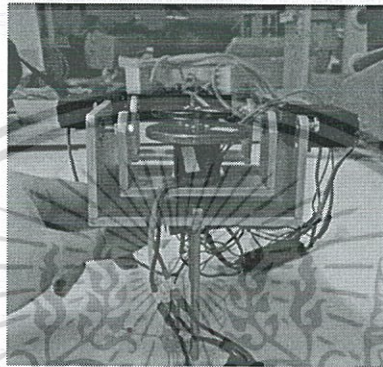
(ฉ) ความเร็วของมุมพลิก( $\dot{\beta}_2$ )

รูปที่ 4.36 การจำลองมอเตอร์ไซค์ทรงตัวเมื่อออกแบบตัวควบคุม 2 และมีแรงภายนอกมากระทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.8 การทดลอง

จากการจำลองการทรงตัวผ่านโปรแกรมแมทแลป พบว่าตัวควบคุมป้อนกลับสเตทที่ได้ ออกแบบมีเสถียรภาพและสมรรถนะที่ดี ดังนั้นจึงนำตัวควบคุมที่ออกแบบมาใช้ในการทดลองจริง โดยในการทดลอง กำหนดขอบเขตของการหมุนของเซอร์โวมอเตอร์เป็น -60 องศา ถึง 80 องศา เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดจากการชนกันของแท่นที่ติดตั้งจานหมุน และก่อนการทดลองจะทำการ จับมอเตอร์ไซค์ทรงตัวให้ตั้งตรงจนกว่ามอเตอร์จะหมุนได้ความเร็วคงที่ ดังรูปที่ 4.37

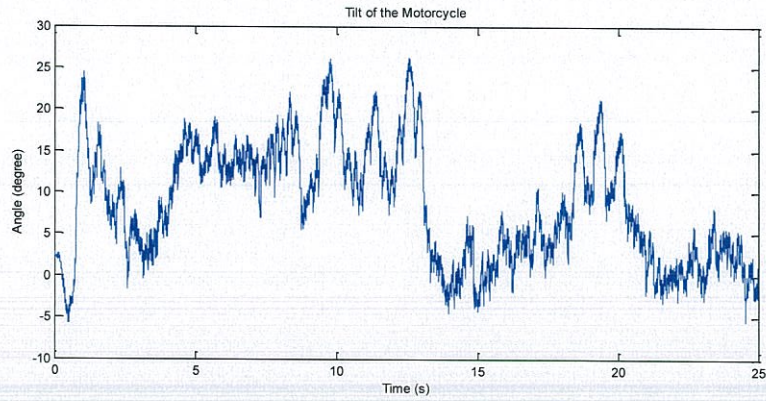


รูปที่ 4.37 การจับมอเตอร์ไซค์ทรงตัวให้ตั้งตรง

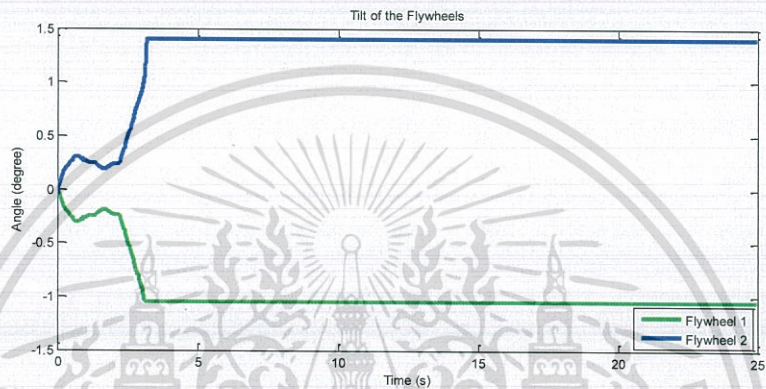
### 4.8.1 การทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุม 1 ก่อนการปรับเซนเซอร์

การทดลองนี้ใช้ตัวควบคุม 1 ซึ่งมีค่า  $K$  ดังสมการที่ (3.1) จากรูปที่ 4.38 (ก) เมื่อจับมอเตอร์ไซค์ทรงตัวในช่วงต้นประมาณ 5 วินาที ให้ตั้งตรงที่มุมประมาณ 0 องศา พบว่าเซนเซอร์วัดค่าไม่ได้ 0 องศาเพราะมีการสั่นจากการเปิดมอเตอร์ เมื่อเข้าสู่วินาทีที่ 6 ทดลองปล่อยให้มอเตอร์ไซค์เอียงไปทางมุมลบแต่เซนเซอร์วัดค่าได้เป็นบวก ทำให้ตัวควบคุมไม่สามารถสั่งงานได้ถูกต้องจึงไม่มีแรงผลึกเพื่อให้รถกลับมาตั้งได้ จนเข้าสู่วินาทีที่ 16 ได้ทดลองเอียงมอเตอร์ไซค์ทรงตัวไปทางมุมบวก เซนเซอร์วัดค่าได้เป็นบวก แต่มีบางช่วงที่วัดค่าได้เป็นลบซึ่งไม่ตรงกับความเป็นจริง ตลอดการทดลอง จานหมุนทั้ง 2 ตัว มีการพลิกในทิศทางตรงข้ามกันดังรูปที่ 4.38 (ข) โดยจานหมุนตัวที่ 1 ในช่วงแรก จานหมุนมีมุมพลิกอยู่ที่ประมาณ -0.3 องศา หลังจากนั้นจานหมุนพลิกด้วยมุมคงที่อยู่ที่ประมาณ -1 องศา ตลอดการทดลอง และจานหมุนตัวที่ 2 ในช่วงแรกจานหมุนมีมุมพลิกอยู่ที่ประมาณ 0.3 องศา หลังจากนั้นพลิกด้วยมุมคงที่อยู่ที่ประมาณ 1.04 องศา

จากผลทดลองที่ได้มอเตอร์ไซค์ทรงตัวไม่สามารถรักษาสมดุลได้ด้วยตัวเอง เนื่องจากค่าวัดที่ได้จากเซนเซอร์มีความผิดพลาดไปมาก โดยในการทดลองครั้งต่อไปจะทำการแก้ไขที่ติดตั้งของเซนเซอร์เพื่อลดการสั่นจากการเปิดมอเตอร์



(ก) มุมเอียงของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว

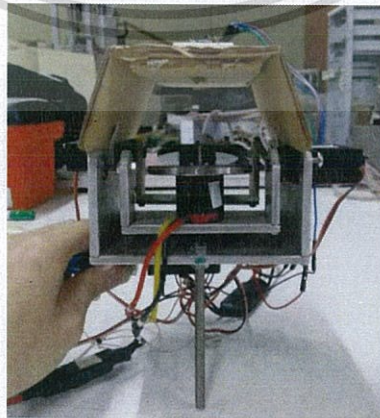


(ข) มุมเอียงของจานหมุน

รูปที่ 4.38 ผลการทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุม 1 ก่อนการปรับเซนเซอร์

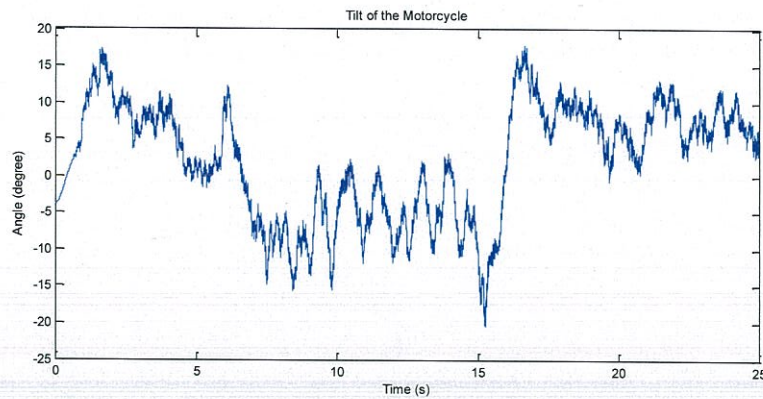
#### 4.8.2 การทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุม 1 หลังการปรับเซนเซอร์

จากการทดลองในหัวข้อ 4.8.1 เซนเซอร์วัดค่าได้ผิดจากความเป็นจริง จึงปรับตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์ โดยติดโครงกระดาษที่มีความสูง 5.3 เซนติเมตรเหนือมอเตอร์ไซค์ทรงตัว ดังรูปที่ 4.39 และผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.40

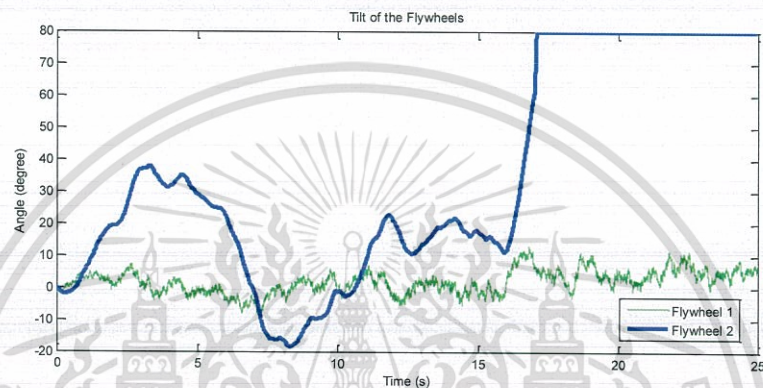


รูปที่ 4.39 การปรับการติดตั้งเซนเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) มุมเอียงของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว



(ข) มุมเอียงของจานหมุน

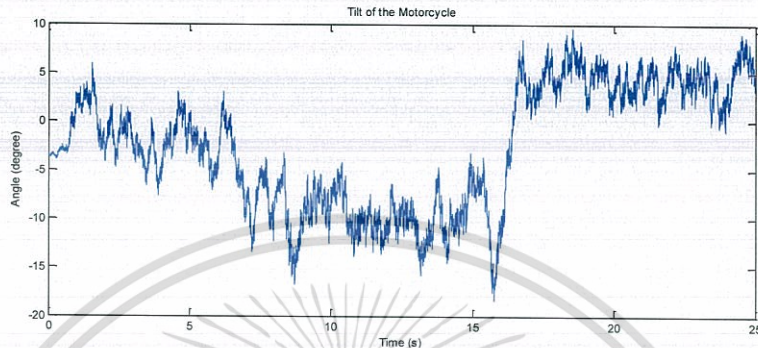
รูปที่ 4.40 ผลการทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุม 1 หลังการปรับเซนเซอร์

จากรูปที่ 4.40 (ก) เมื่อจับมอเตอร์ไซค์ทรงตัวในช่วงต้นประมาณ 2 วินาที ให้ตั้งตรงที่มุมประมาณ 0 องศา ค่าที่เซนเซอร์วัดได้มีค่าใกล้ 0 องศา แต่หลังจากนั้นวัดค่าได้ไม่ตรงกับค่าจริง เมื่อเข้าสู่วินาทีที่ 6 ทดลองเอียงมอเตอร์ไซค์ทรงตัวไปทางมุมลบพบว่าเซนเซอร์วัดค่าได้ดีขึ้น และมีบางช่วงที่เซนเซอร์วัดค่าได้เป็นบวก จนเข้าสู่วินาทีที่ 15 ทดลองเอียงมอเตอร์ไซค์ทรงตัวไปทางมุมบวกพบว่าเซนเซอร์วัดค่าได้เป็นบวกทั้งหมด ตลอดการทดลองจานหมุนตัวที่ 1 มีการพลิกอยู่รอบมุม 0 องศา ต่างจากจานหมุนตัวที่ 2 ในช่วงแรกพลิกไปที่มุม 40 องศา จากนั้นพลิกไปที่มุม -20 องศา จนเข้าสู่วินาทีที่ 16 จานหมุนตัวที่ 2 พลิกครั้งที่มุม 80 องศา ซึ่งเป็นมุมเอียงสูงสุดที่กำหนดไว้ ดังรูปที่ 4.40 (ข)

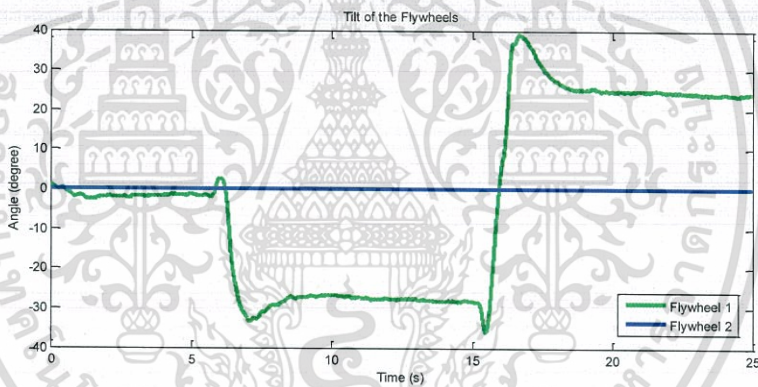
จากการทดลองมอเตอร์ไซค์ทรงตัวยังไม่สามารถรักษาสมดุลได้ด้วยตัวเอง แต่ค่าวัดจากเซนเซอร์มีความน่าเชื่อถือขึ้น ในการทดลองครั้งต่อไปจะทำการออกแบบจำลองใหม่เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่ดีขึ้น

### 4.8.3 การทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุม 2

จากผลการทดลองในหัวข้อ 4.8.1 และ 4.8.2 มอเตอร์ไซค์ทรงตัวยังไม่สามารถรักษามุมได้ ในหัวข้อนี้จึงได้ออกแบบตัวควบคุม 2 ซึ่งมีค่า  $K_{new}$  ดังสมการที่ (3.2) ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.41



(ก) มุมเอียงของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว



(ข) มุมเอียงของจานหมุน

รูปที่ 4.41 ผลการทดลองเมื่อใช้ตัวควบคุม 2

จากรูปที่ 4.41 (ก) เมื่อจับมอเตอร์ไซค์ทรงตัวในช่วงต้นประมาณ 5 วินาที ให้ตั้งตรงที่มุมประมาณ 0 องศา เซนเซอร์วัดค่ามุมได้อยู่ในช่วง  $\pm 5$  องศา สอดคล้องกับผลการทดลองตัวกรองคาลมานเมื่อมีการเปิดมอเตอร์ เมื่อเข้าสู่วินาทีที่ 7 ทดลองเอียงมอเตอร์ไซค์ทรงตัวไปทางมุมลบเซนเซอร์วัดค่าได้ประมาณ -10 องศา จนเข้าสู่วินาทีที่ 16 ทดลองเอียงมอเตอร์ไซค์ทรงตัวไปทางมุมบวกเซนเซอร์วัดค่าได้ประมาณ 5 องศา ตลอดการทดลองจานหมุนตัวที่ 2 ไม่เกิดการพลิกเลย ในขณะที่จานหมุนตัวที่ 1 ในช่วงที่ยังจับมอเตอร์ไซค์ทรงตัวไว้ที่มุมประมาณ 0 องศา จานหมุนยังไม่พลิกไปมากนัก และเมื่อทดลองเอียงมอเตอร์ไซค์ทรงตัวไปทางมุมลบจานหมุนตัวที่ 1 จะพลิกไปที่มุม -30 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเมื่อทดลองอียงมอเตอร์ไซค์ทรงตัวไปที่มุมบวกจนวนหมุนตัวที่ 1 จะพลิกไปที่มุม 40 องศา และมาพลิกคงที่ที่มุม 25 องศา ดังรูปที่ 4.41 (ข)

จากการทดลองมอเตอร์ไซค์ทรงตัวยังไม่สามารถรักษาสมดุลได้ด้วยตัวเอง เนื่องจากยังไม่มีแรงผลักดันเพียงพอให้มอเตอร์ไซค์กลับสู่จุดสมดุล แต่ค่าเซนเซอร์ที่วัดได้มีความแม่นยำขึ้น และจนวนหมุนมีการพลิกตอบสนองต่อมุมเอียงของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวได้ดีขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการดำเนินงาน

### 5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

1. ผลการจำลองการทรงตัวของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวผ่านโปรแกรมแมทแลป โดยออกแบบตัวควบคุมป้องกันสเทททั้งหมด 2 ตัว พบว่าตัวควบคุมป้องกันสเทททั้ง 2 ตัว สามารถควบคุมให้มอเตอร์ไซค์ทรงตัวมีเสถียรภาพได้ และตัวแปรที่ควบคุมได้แก่ มุมเอียงของมอเตอร์ไซค์ โดยเข้าสู่สถานะคงตัวด้วยเวลาประมาณ 2 วินาทีและ 1.5 วินาที ตามลำดับ

2. การใช้งานเซนเซอร์และตัวกรองคาลมาน พบว่าเซนเซอร์และตัวกรองคาลมานที่ใช้ก่อนการทรงตัวจริงสามารถใช้งานได้ แต่ในขณะที่ทรงตัวพบว่าค่าที่อ่านได้จากเซนเซอร์มีความคลาดเคลื่อนไปมาก ซึ่งสังเกตได้จากมอเตอร์ไซค์ขณะทรงตัวนั้นไม่ได้มีมุมเอียงตามที่อ่านค่าได้

3. การทดลองจริง พบว่ามอเตอร์ไซค์ไม่สามารถทรงตัวได้ เกิดจากการที่เซนเซอร์ไม่สามารถวัดค่าได้ตรงตามความเป็นจริง และไม่มีแรงผลักเพียงพอที่จะทำให้มอเตอร์ไซค์กลับมาตั้งตรงได้

### 5.2 ปัญหาที่พบและแนวทางการแก้ไข

1. ปัญหาของอุปกรณ์มอเตอร์ไซค์กระแสดตรงแบบไร้แปรงถ่านทำงานไม่เท่ากันทั้ง 2 ตัว ทำให้ช่วงในการทำงานต่างกัน จึงทำให้การใช้งานไม่ตรงตามที่ต้องการ ทำการแก้ไขโดยหาช่วงที่ใช้งานได้ในการทดลองและออกแบบ

2. ในส่วนของเซนเซอร์และตัวกรองคาลมาน ก่อนการทดลองจริงมีการอ่านค่าที่เบี่ยงเบนจากค่าจริงที่วัดได้ มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง  $\pm 2$  องศา แต่เมื่อนำไปทดลองจริง ค่าที่วัดได้มีค่าผิดพลาดจากค่าจริงไปมาก เนื่องจากในการทดลองจริงเกิดการสั่นของมอเตอร์อย่างมาก ทำให้ค่าที่ต้องการเกิดความผิดพลาดในการใช้งาน วิธีแก้ไขคือ ใช้ตัวกรองคาลมานเพื่อลดความผิดพลาดของเซนเซอร์ และปรับแต่งตัวกรองคาลมานให้เหมาะสมต่อการใช้งาน

3. ปัญหาของตัวควบคุม การควบคุมมอเตอร์ไซค์ทรงตัวต้องใช้มุมที่พลิกของจานหมุน 1 และจานหมุน 2 ในการขับสัญญาณพัลส์ริชมอดูเลชัน แต่ค่าที่ได้จากสมการสเททเป็นความเร็วที่พลิกของจานหมุน 1 และจานหมุน 2 จึงต้องเขียนโปรแกรมอินทิเกรตความเร็วที่พลิกให้เป็นมุมที่พลิก อีกทั้งต้องใช้มุมพลิกที่เปลี่ยนแปลงมาหาค่ามุมที่ใช้ขับสัญญาณพัลส์ริชมอดูเลชัน

4. ปัญหาด้านการออกแบบ การใช้ค่าพารามิเตอร์อาจมีความคลาดเคลื่อนจากค่าจริง ทำให้ส่งผลต่อการจำลองการทรงตัวของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว แนวทางการแก้ปัญหาคือ หาค่าพารามิเตอร์ให้ใกล้เคียงกับแบบจำลองจริงมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ปัญหาการทดลอง เซนเซอร์ไม่สามารถวัดค่าได้แม่นยำ เนื่องจากเกิดปัญหาจากการสั้น เมื่อมีการเปิดมอเตอร์ วิธีแก้ปัญหาคือ ปรับปรุงที่ติดตั้งเซนเซอร์เพื่อลดผลการสั้นจากมอเตอร์และทำให้เซนเซอร์วัดค่าได้แม่นยำขึ้น

6. ปัญหาการทรงตัวของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว พบว่าชุดจานหมุนไม่มีไม่มีแรงผลักเพียงพอ เพื่อให้มอเตอร์ไซค์ทรงตัวกลับมาสู่จุดสมดุล แนวทางการแก้ไขคือ ออกแบบชุดจานหมุนให้ใหญ่ขึ้น

### 5.3 แนวทางการพัฒนา

1. ในส่วนของเซนเซอร์และตัวกรองคาลมาน การอ่านค่ามุมให้ใกล้เคียงค่าจริงมากที่สุด ควรใช้เอนโค้ดเดอร์ในการวัดค่ามุม ซึ่งจะได้ค่ามุมที่ใกล้เคียงกว่าค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์และค่าที่ผ่านตัวกรองคาลมาน และควรปรับตัวกรองคาลมานให้เหมาะสมยิ่งขึ้นเพื่อให้ค่าสัญญาณที่ได้ เมื่อผ่านตัวกรองคาลมานมีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดเพื่อสามารถให้ค่าที่สอดคล้องกับค่าจริงมากที่สุด
2. ในการจำลอง ควรหาแบบจำลองและค่าพารามิเตอร์ให้ใกล้เคียงกับระบบจริงมากที่สุด เพื่อลดความผิดพลาดที่ได้จากการจำลอง
3. ในการออกแบบโมเดลมอเตอร์ไซค์ทรงตัว ควรออกแบบชุดจานหมุนให้ใหญ่ขึ้น ซึ่งจะได้แรงเหวี่ยงเพิ่มขึ้นทำให้มอเตอร์ไซค์ทรงตัวสามารถรักษาสมดุลไว้ได้
4. ทดลองใช้ตัวควบคุมอื่น ซึ่งมีความคงทน (Robust) ต่อสัญญาณรบกวน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Katsuhiko Ogata. *Modern Control Engineering*. Fifth Edition. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. 2010.
- [2] Harun Yetkin, “*Stabilization of Autonomous Bicycle*” Master of Science in the Graduate School of the Ohio State University. 2013.
- [3] Narong Aphiratsakun and Kittiphan Techakittiroj, “*Single loop and Double loop Balancing Control of AU Self-Balancing Bicycle (AUSB),*” IEEE International Conference on Robotic and Biomimetics. Guangzhou, China, pp.2062-2066, December 2012.

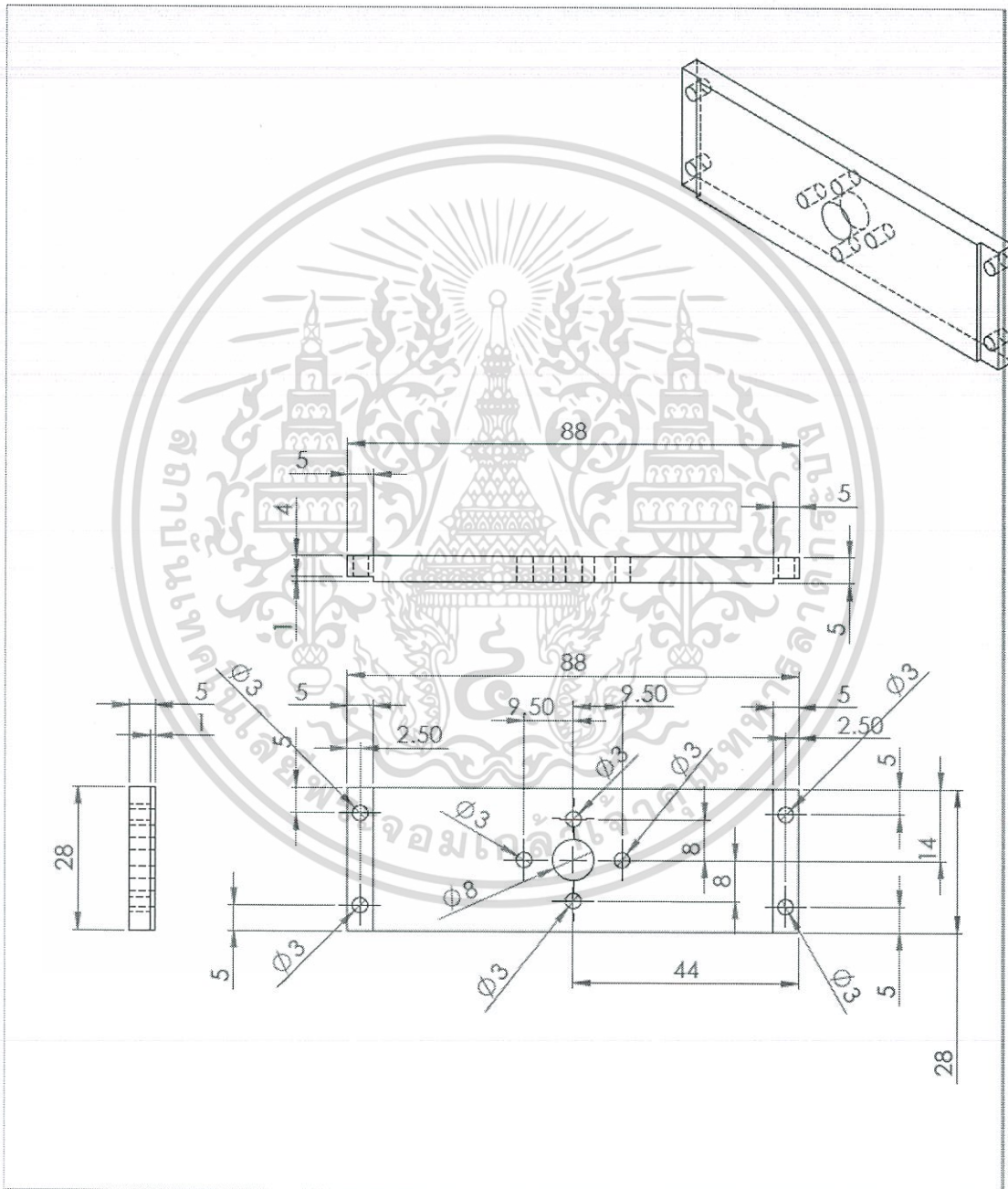


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



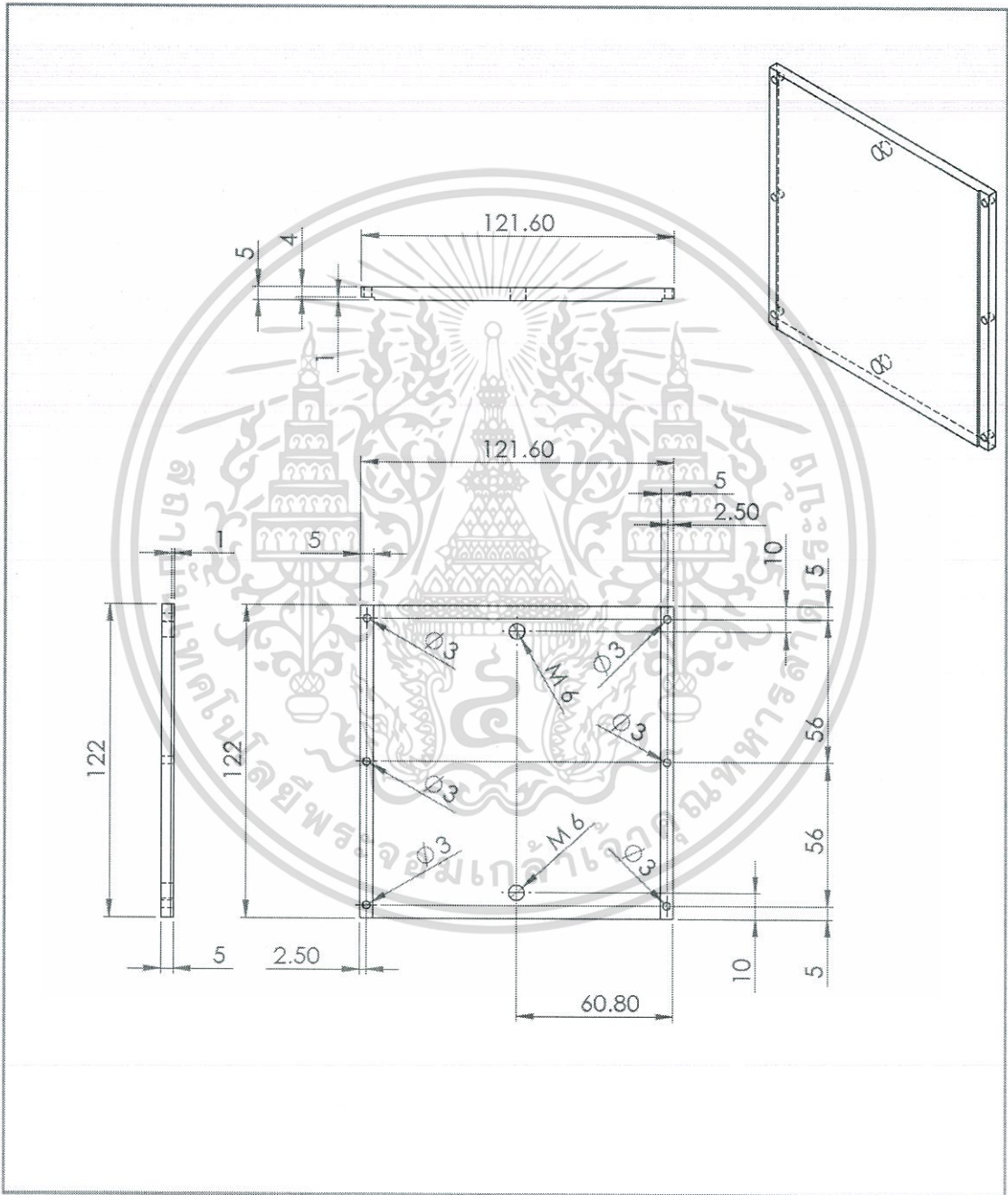
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก  
แบบโครงสร้างมอเตอร์ไซค์ทรงตัว



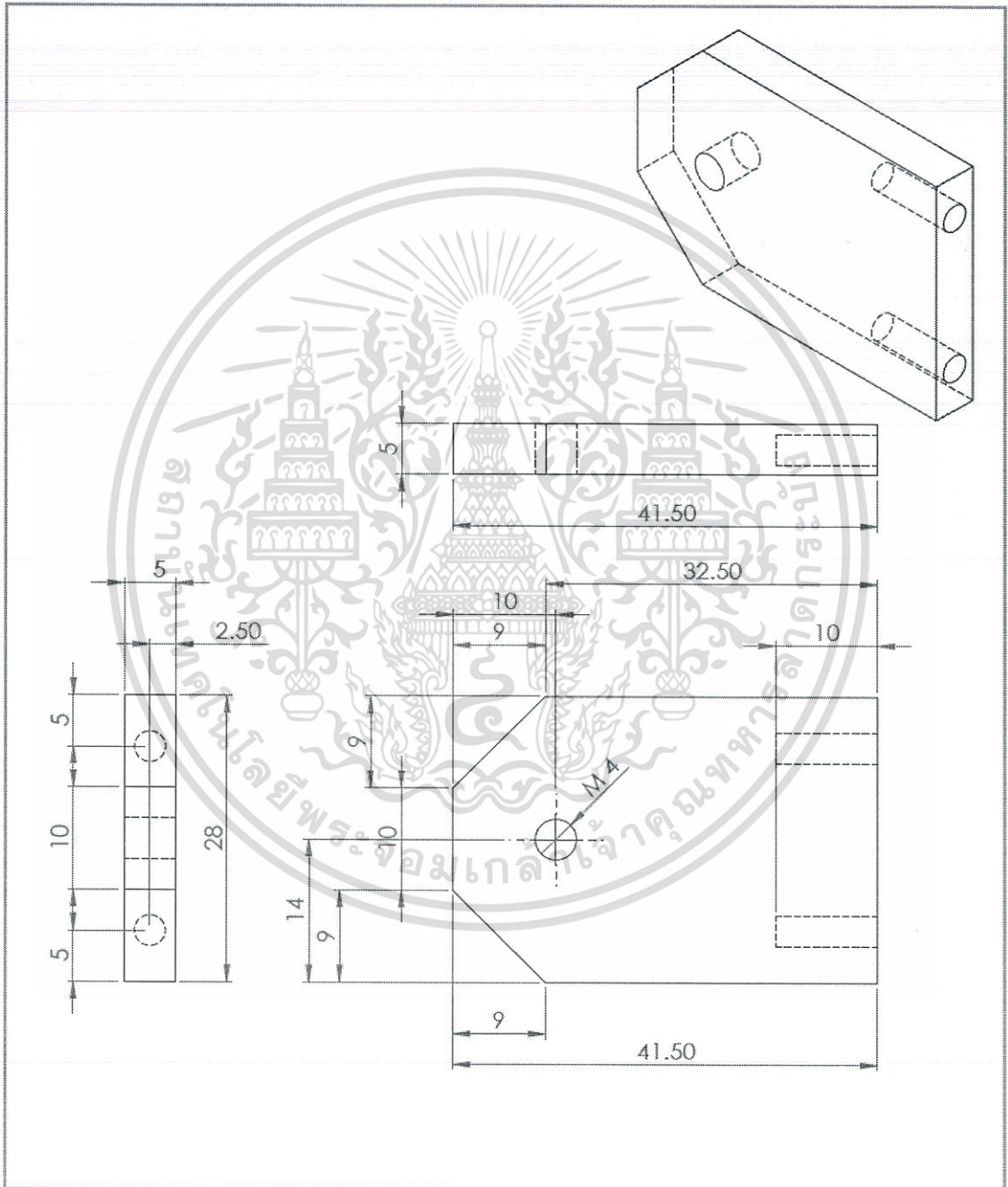
รูปที่ ก.1 ชิ้นส่วนยึดฐานของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



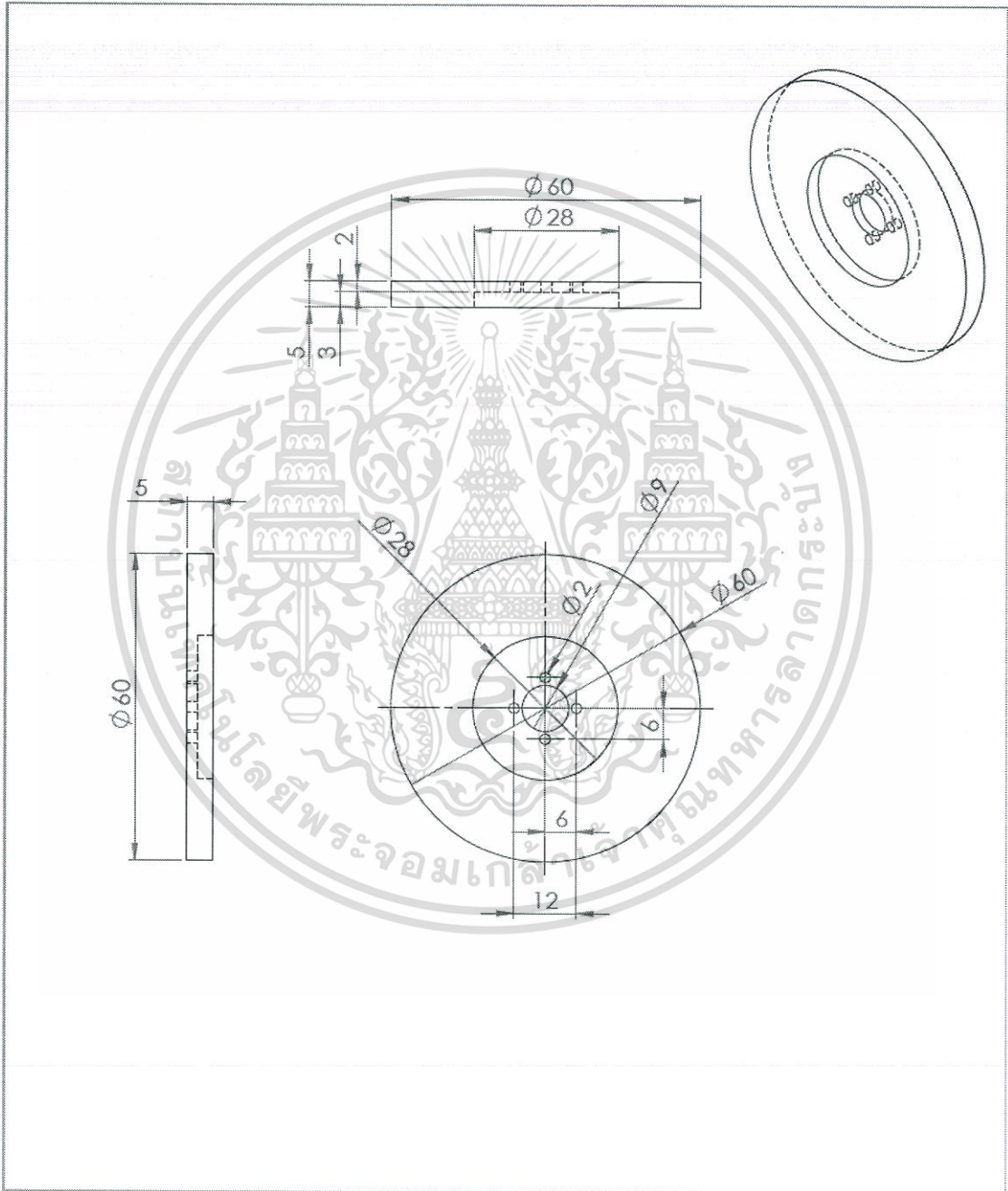
รูปที่ ก.2 ชั้นส่วนฐานของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



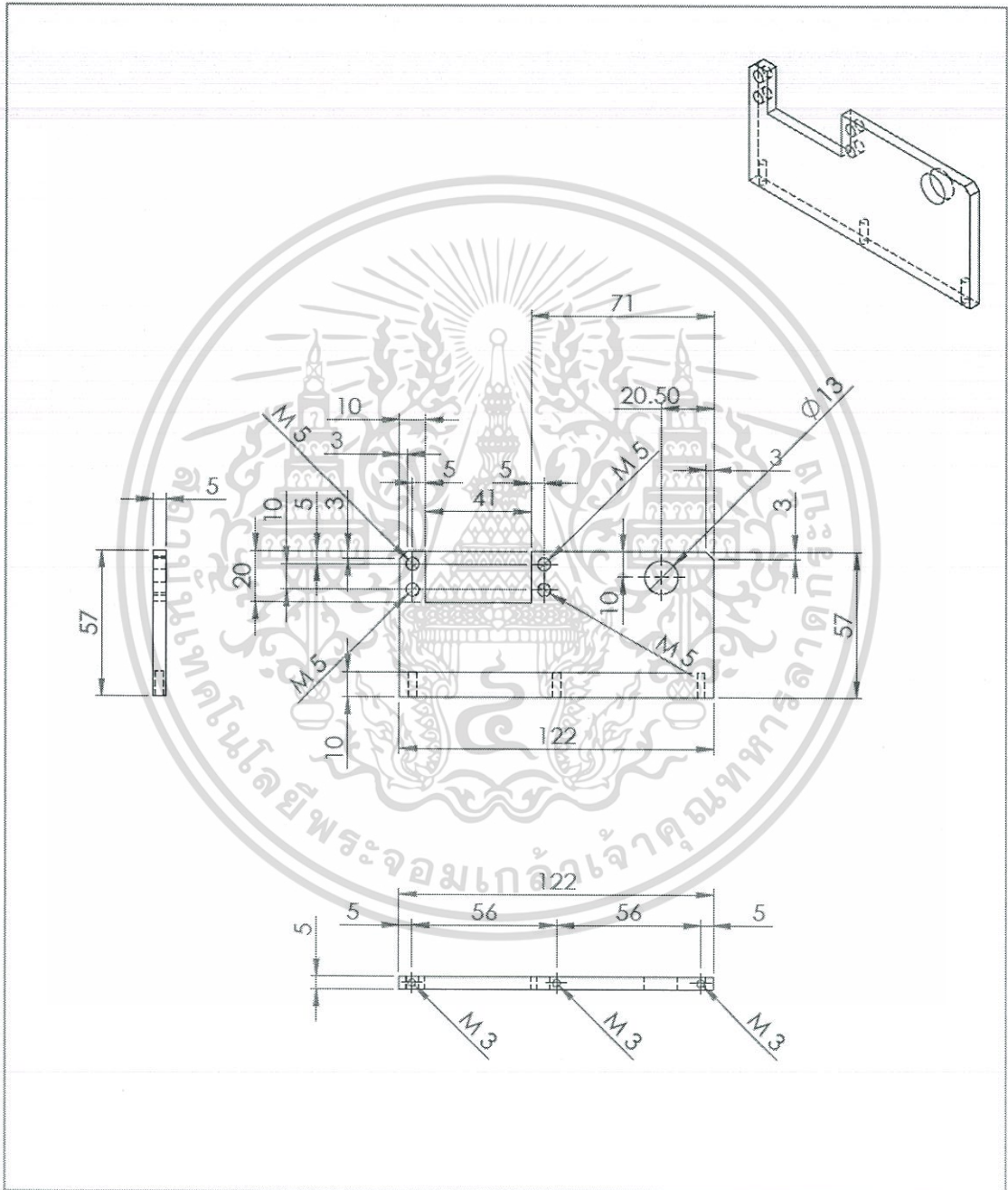
รูปที่ ก.3 ชิ้นส่วนยึดกับเซอร์โวมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.4 งานหมุน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

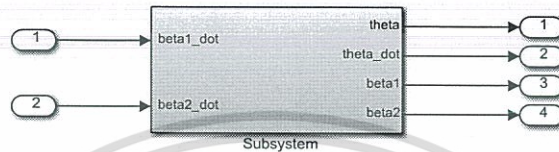


รูปที่ ก.5 ชิ้นส่วนด้านข้างของมอเตอร์ไซค์ตรงตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

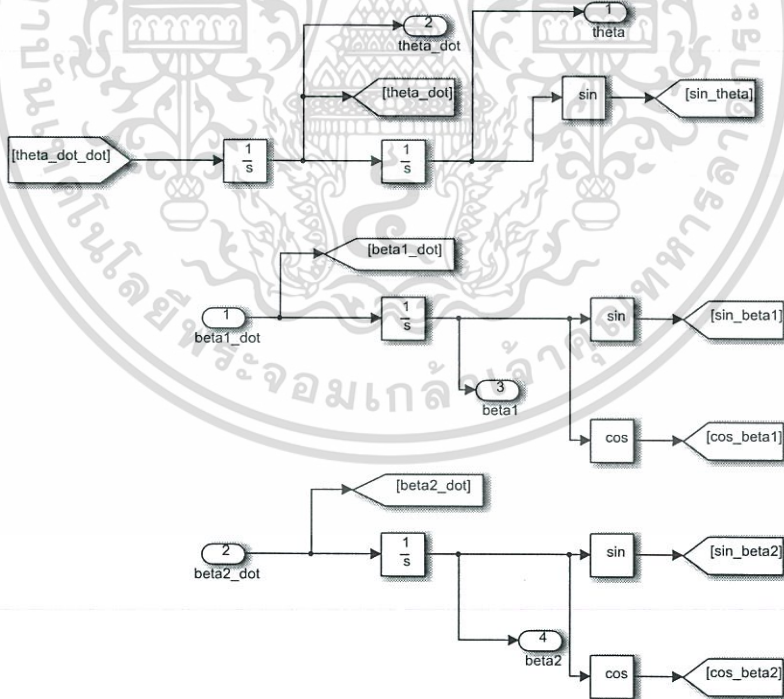
## ภาคผนวก ข. แบบจำลองการทรงตัว

จากสมการการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวที่ไม่เป็นเชิงเส้นในสมการที่ (2.24), (2.25) และ (2.26) อาศัยเมทแพลบ/ซิมูลิคส์ สร้างแบบจำลองที่สอดคล้องได้ดังรูปที่ ข.1



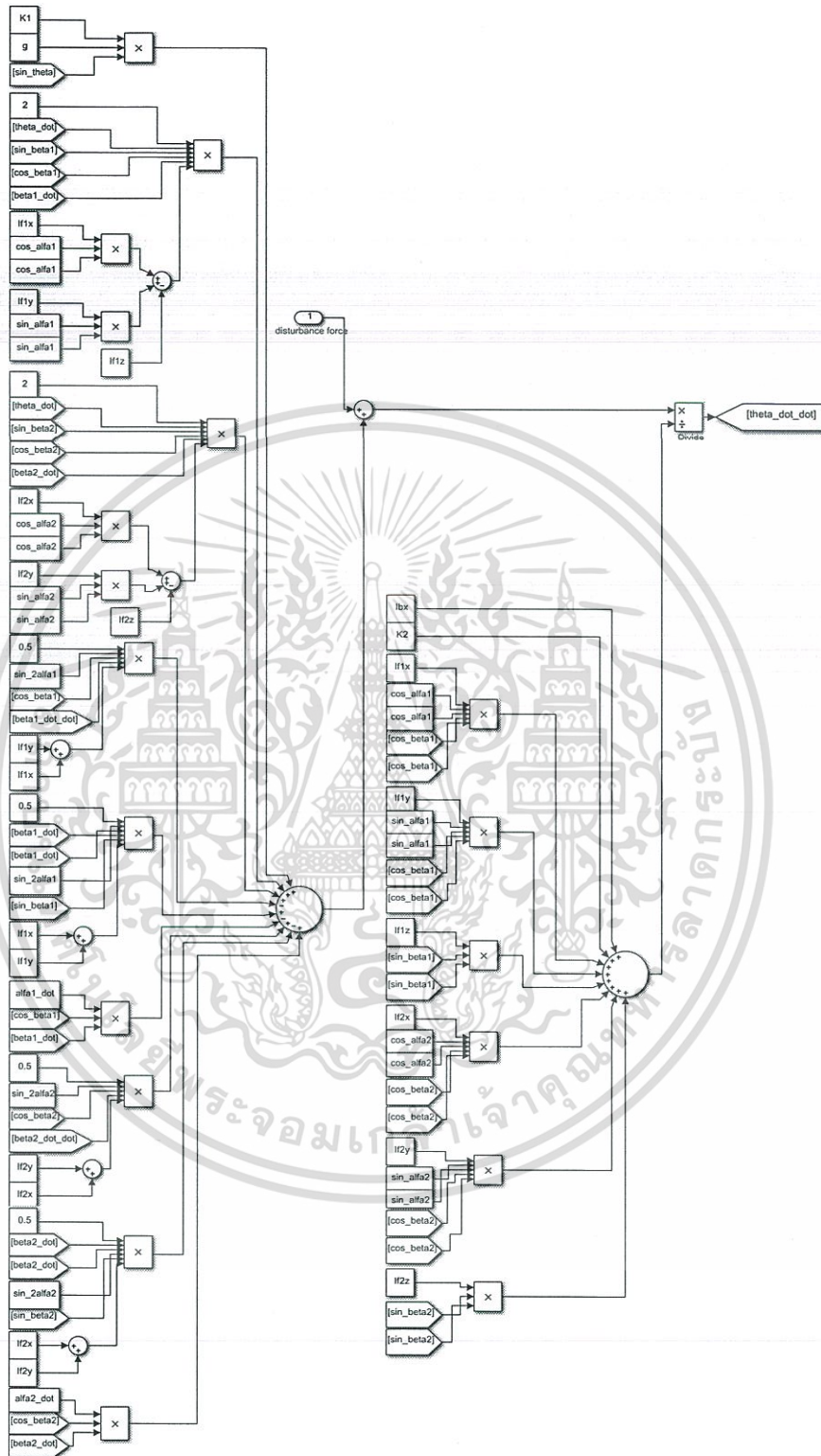
รูปที่ ข.1 แบบจำลองมอเตอร์ไซค์ทรงตัว

ระบบในรูปที่ ข.1 มีโครงสร้างภายในประกอบด้วยส่วนต่างๆดังนี้



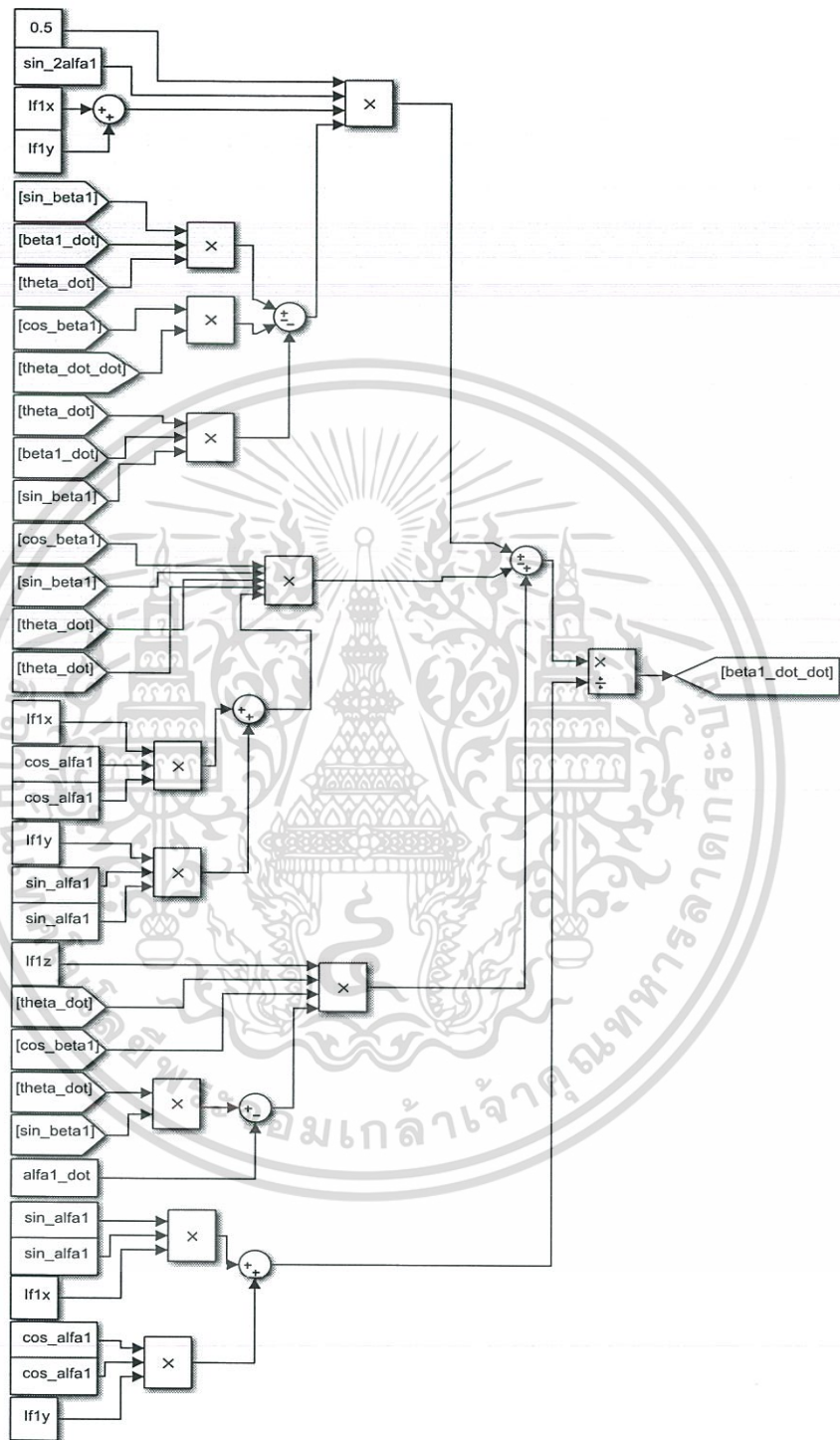
รูปที่ ข.2 โครงสร้างภายในแบบจำลองของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวส่วนคำนวณหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



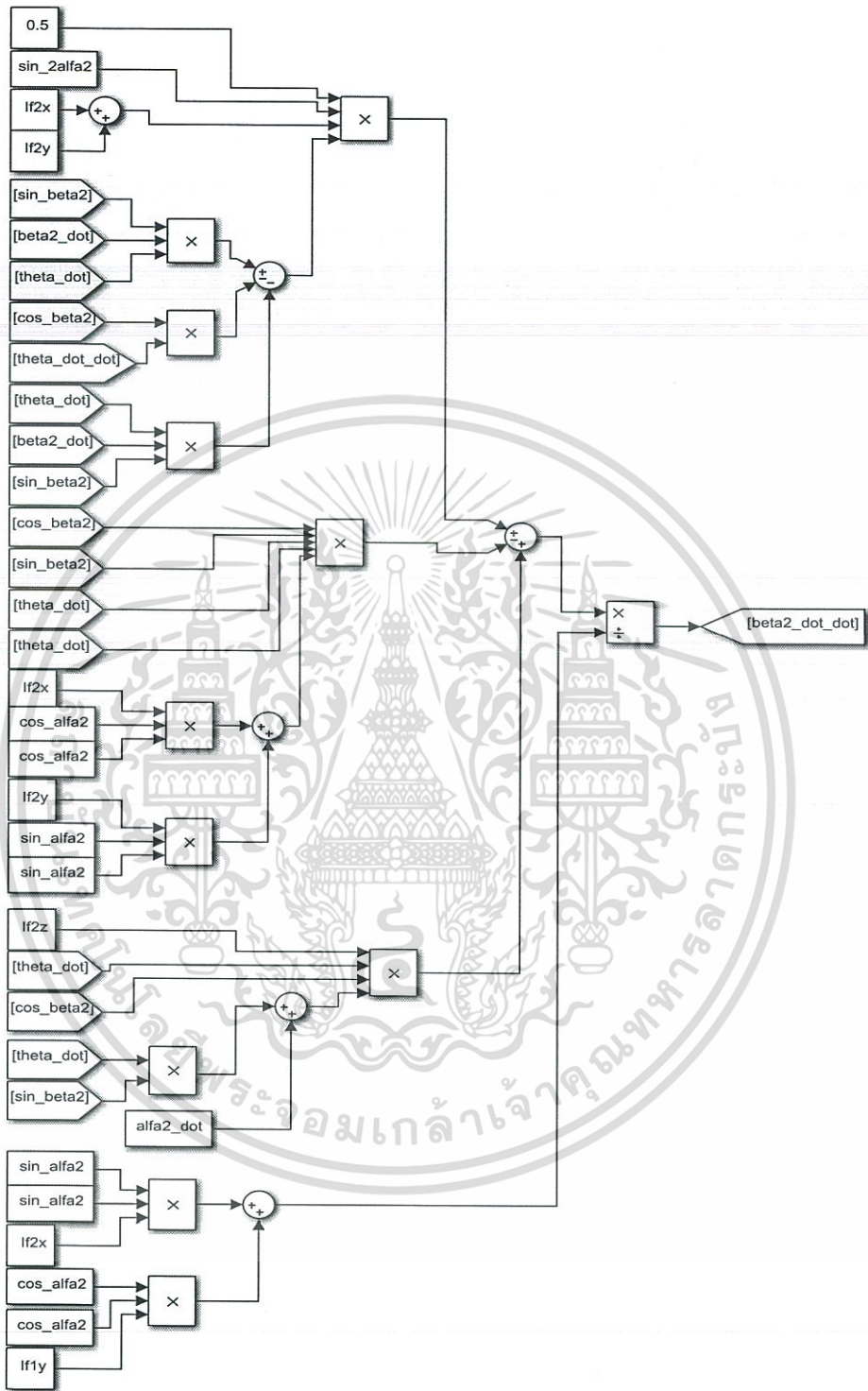
รูปที่ ข.3 โครงสร้างภายในแบบจำลองของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวส่วนสมการความเร่ง  
ของมุมเอียงของมอเตอร์ไซค์ทรงตัว ( $\theta$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.4 โครงสร้างภายในแบบจำลองของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวส่วนความเร่งในการพลิกของ  
งานหมุน 1 ( $\beta$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

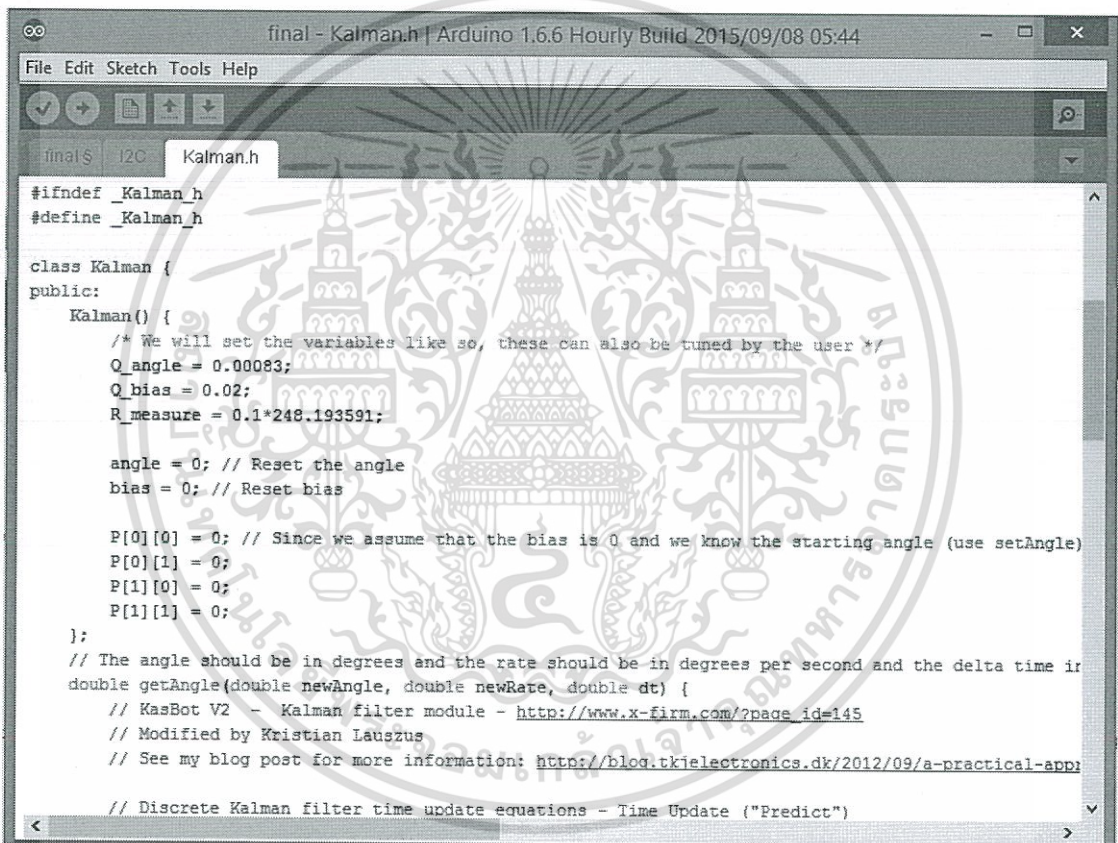


รูปที่ ข.5 โครงสร้างภายในแบบจำลองของมอเตอร์ไซค์ทรงตัวส่วนความเร่งในการพลิกของ  
 งานหมุน 2 ( $\beta_2$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค.

### โปรแกรมการทำงาน



```

final - Kalman.h | Arduino 1.6.6 Hourly Build 2015/09/08 05:44
File Edit Sketch Tools Help
final$ I2C Kalman.h
#ifndef _Kalman_h
#define _Kalman_h

class Kalman {
public:
    Kalman() {
        /* We will set the variables like so, these can also be tuned by the user */
        Q_angle = 0.00083;
        Q_bias = 0.02;
        R_measure = 0.1*248.193591;

        angle = 0; // Reset the angle
        bias = 0; // Reset bias

        P[0][0] = 0; // Since we assume that the bias is 0 and we know the starting angle (use setAngle)
        P[0][1] = 0;
        P[1][0] = 0;
        P[1][1] = 0;
    };
    // The angle should be in degrees and the rate should be in degrees per second and the delta time in
    double getAngle(double newAngle, double newRate, double dt) {
        // KasBot V2 - Kalman filter module - http://www.x-firm.com/?page\_id=145
        // Modified by Kristian Lauszus
        // See my blog post for more information: http://blog.tkjelectronics.dk/2012/09/a-practical-app
        // Discrete Kalman filter time update equations - Time Update ("Predict")
    }
};

```

รูปที่ ค.1 ค่าพารามิเตอร์ตัวกรองคาลมาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

final - Kalman.h | Arduino 1.6.6 Hourly Build 2015/09/08 05:44
File Edit Sketch Tools Help
final $ I2C Kalman.h
/* Step 1 */
rate = newRate - bias;
angle += dt * rate;

// Update estimation error covariance - Project the error covariance ahead
/* Step 2 */
P[0][0] += dt * (dt * P[1][1] - P[0][1] - P[1][0] + Q * angle);
P[0][1] -= dt * P[1][1];
P[1][0] -= dt * P[1][1];
P[1][1] += Q * bias * dt;

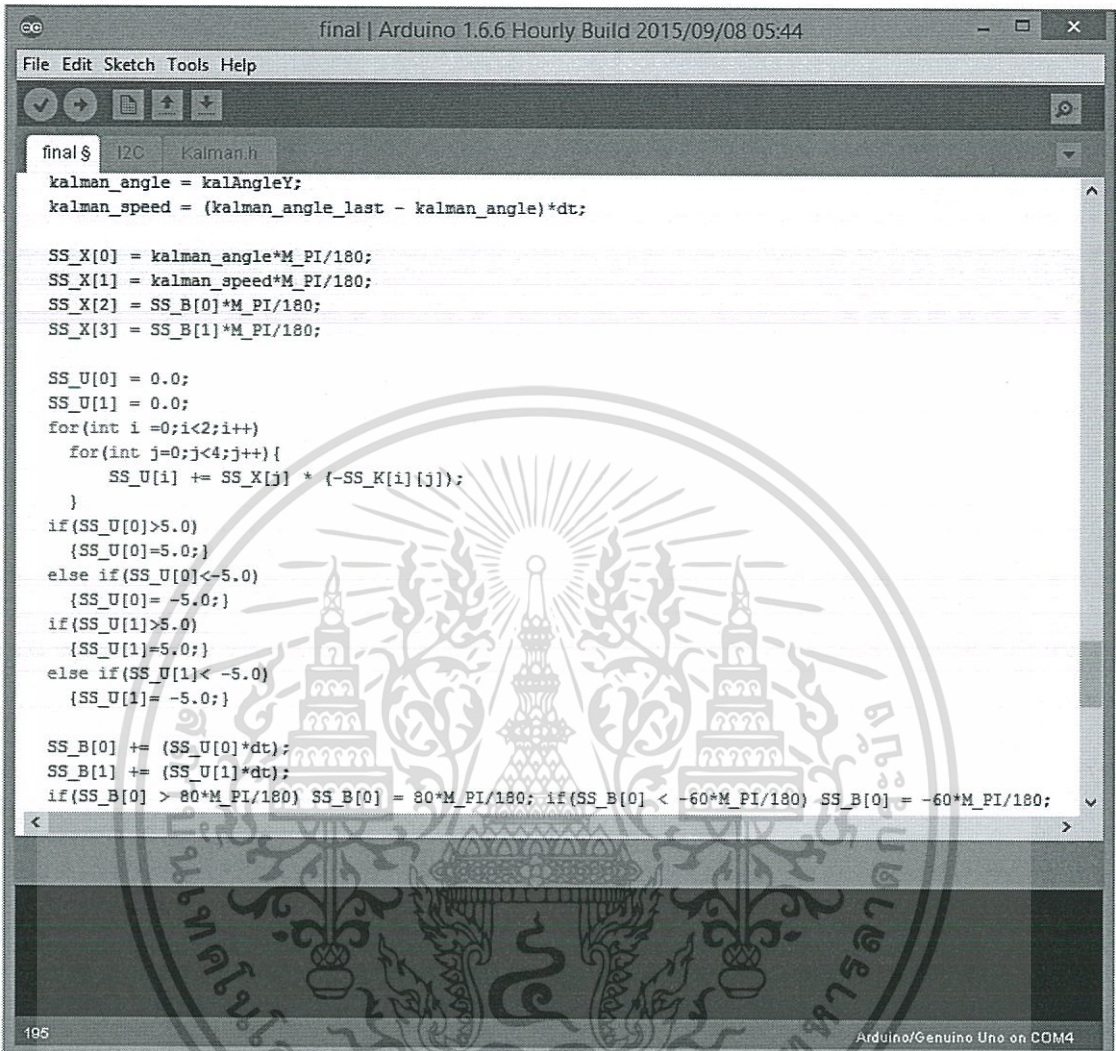
// Discrete Kalman filter measurement update equations - Measurement Update ("Correct")
// Calculate Kalman gain - Compute the Kalman gain
/* Step 4 */
S = P[0][0] + R * measure;
/* Step 5 */
K[0] = P[0][0] / S;
K[1] = P[1][0] / S;

// Calculate angle and bias - Update estimate with measurement zk (newAngle)
/* Step 3 */
y = newAngle - angle;
/* Step 6 */
angle += K[0] * y;
bias += K[1] * y;

```

รูปที่ ค.2 การคำนวณตัวกรองคาสมาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



```

final | Arduino 1.6.6 Hourly Build 2015/09/08 05:44
File Edit Sketch Tools Help
final $ I2C Kalman.h
kalman_angle = kalAngleY;
kalman_speed = (kalman_angle_last - kalman_angle)*dt;

SS_X[0] = kalman_angle*M_PI/180;
SS_X[1] = kalman_speed*M_PI/180;
SS_X[2] = SS_B[0]*M_PI/180;
SS_X[3] = SS_B[1]*M_PI/180;

SS_U[0] = 0.0;
SS_U[1] = 0.0;
for(int i =0;i<2;i++)
  for(int j=0;j<4;j++){
    SS_U[i] += SS_X[j] * {-SS_K[i][j]};
  }
if(SS_U[0]>5.0)
  {SS_U[0]=5.0;}
else if(SS_U[0]<=-5.0)
  {SS_U[0]= -5.0;}
if(SS_U[1]>5.0)
  {SS_U[1]=5.0;}
else if(SS_U[1]< -5.0)
  {SS_U[1]= -5.0;}

SS_B[0] += (SS_U[0]*dt);
SS_B[1] += (SS_U[1]*dt);
if(SS_B[0] > 80*M_PI/180) SS_B[0] = 80*M_PI/180; if(SS_B[0] < -60*M_PI/180) SS_B[0] = -60*M_PI/180;

```

195 Arduino/Genuino Uno on COM4

### รูปที่ ค.3 การคำนวณตัวป้อนกลับสเตท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้