ยานพาหนะไฟฟ้าย่อส่วน แบบใช้มอเตอร์ดุมล้อ
เพื่อจำลองทางพลศาสตร์
Scaled in-wheel electric vehicle for dynamic simulation

นายบุรินทร์ หอมหวาน รหัส 57362217

นางสาวปุณญาพร วิวัฒนไพบูลย์ รหัส 57362286

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2560

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงงาน ยานพาหนะไฟฟ้าย่อส่วน แบบใช้มอเตอร์ดุมล้อ เพื่อการจำลองทางพลศาสตร์

ผู้ดำเนินโครงงาน นายบุรินทร์ หอมหวาน รหัส 57362217
นางสาวปุณญาพร วิวัฒนไพบูลย์ รหัส 57362286

ที่ปรึกษาโครงงาน อาจารย์ปองพันธ์ โอทกานนท์

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2560

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

.....ที่ปรึกษาโครงงาน
(อาจารย์ปองพันธ์ โอทกานนท์)

.....กรรมการ
(ผศ.ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชูพงศ์ ช่วยเพ็ญ)

ชื่อหัวข้อโครงงาน ยานพาหนะไฟฟ้าย่อส่วน แบบใช้มอเตอร์ดุมล้อ
เพื่อการจำลองทางพลศาสตร์
ผู้ดำเนินโครงงาน นายบุรินทร์ หอมหวาน รหัส 57362217
นางสาวปุณญาพร วิวัฒนไพบูลย์ รหัส 57362286
ที่ปรึกษาโครงงาน อาจารย์ปองพันธ์ โอทกานนท์
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2560

.....

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาและสร้างยานพาหนะจำลองย่อส่วนโดยใช้ขนาดและมิติเป็นหนึ่งในสี่ส่วนของรถอินวิวทีแมคฟอร์มูล่าต้นแบบ การจำลองอาศัยหลักทฤษฎีของบัคกิงแฮมพายเพื่อสร้างกลุ่มตัวแปรไร้มิติสำหรับนำไปใช้อ้างอิงกับความเสมือนจริงของยานพาหนะต้นแบบและทำการทดสอบสมรรถนะยานพาหนะจำลองย่อด้านสถิตยศาสตร์และพลศาสตร์ การทดสอบด้านสถิตยศาสตร์ประกอบด้วยการทดสอบเปรียบเทียบจุดศูนย์กลางมวลผลการทดสอบพบว่าหลังจากทำการปรับพารามิเตอร์แล้วรถต้นแบบและรถจำลองมีจุดศูนย์กลางมวลที่สมมูลกันและ การทดสอบด้านพลศาสตร์ประกอบด้วยการทดสอบเปรียบเทียบความเร็วและการทดสอบสมรรถนะความเร็วและความเร่งด้วย GPS และเปรียบเทียบอัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนัก ผลการทดสอบพบว่าการทดสอบเปรียบเทียบความเร็วนั้นค่าความเร็ว ที่ได้จากฮอลล์เซ็นเซอร์มีค่ามากกว่าค่าความเร็วจริงที่วัดภายนอกเนื่องจากเกิดการไถลของล้อขณะออกตัว และการสมรรถนะด้วย GPS พบว่ารถจำลองสามารถทำความเร็วและความเร่งได้ดีกว่ารถต้นแบบเนื่องจากรถจำลองมีค่าอัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนักมากกว่ารถต้นแบบถึงสามเท่า ผลการศึกษาจากปริญญานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการย่อขนาดรถต้นแบบและสร้างรถจำลอง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในด้านการวิจัยและพัฒนาสมรรถนะของรถต้นแบบด้านสถิตยศาสตร์และพลศาสตร์ การทดสอบสมรรถนะยานยนต์จากรถจำลองที่สร้างขึ้นแทนรถต้นแบบช่วยลดเวลาและงบประมาณในการวิจัยและพัฒนารถต้นแบบด้านในอนาคต

Project title	Scaled in-wheel electric vehicle for dynamic simulation
	Mr. Burin Homwan ID. 57362217
	Miss Punyaporn Wiwattanapaiboon ID. 57362286
Project advisor	Mr.Pongpan Othaganont
Major	Mechanical Engineering
Department	Engineering
Academic year	2017

.....

Abstract

This project aims to create a 1:4 Scaled in-wheel electric vehicle which is equivalent to the Tmax, in-wheel motor drive formula 1 style kit car. The scaled vehicle parts were built and assembled using 3D printer. Size and dimension was designed base on dimensionless analysis and Buckingham Pi's theorem. The scaled vehicle was performed the tests including position of CG, vehicle speed test and acceleration test. The results show that scalable vehicles are equivalent to prototype car in statics and dynamic aspects. The scaled vehicle have position of CG that are equivalent to the prototype. The power to weight ratio between both cars are not equivalent because the scaled car has a higher motor power compared to the prototype car. In order to use the scaled vehicle for dynamic simulation; the motor power have to be adjusted using PMW motor control.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ระดับปริญญาตรีฉบับนี้สำเร็จลงได้ ด้วยความกรุณาอย่างยิ่งจาก อาจารย์ ปองพันธ์ โอทกานนท์ ผศ.ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้วและผู้ช่วยศาสตราจารย์ชูพงศ์ ช่วยเพ็ญ คณะกรรมการทั้งสองท่านที่ได้ให้ข้อเสนอแนะกับปริญญานิพนธ์ระดับปริญญาตรีฉบับนี้ไว้ด้วย และขอขอบคุณนายธนวัฒน์ สุวนานนท์ และนายสิทธิเดช ประโยชน์ดี นิสิตปริญญาโท ที่ได้ให้คำปรึกษา ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่เป็นอย่างยิ่ง จนกระทั่งปริญญานิพนธ์ระดับปริญญาตรีฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ ผู้ศึกษาค้นคว้าจึงได้ขอขอบคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณนายชัชชัย อินเขียน นักวิจัยของศูนย์ DRIVE ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการทดลองและคอยช่วยเหลืออำนวยความสะดวกแก่อุปกรณ์และสถานที่ จนทำให้การศึกษาครั้งนี้สมบูรณ์

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากการศึกษาค้นคว้าฉบับนี้ ผู้ศึกษาค้นคว้าขออุทิศแด่ผู้ที่มีพระคุณทุก ๆ ท่าน และหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ปริญญานิพนธ์ระดับปริญญาตรีฉบับนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษายานพาหนะไฟฟ้าย่อส่วน แบบใช้มอเตอร์ดุมล้อ เพื่อการจำลองทางพลศาสตร์ และผู้ที่สนใจบ้างไม่มากก็น้อย หากมีข้อกำหนดและข้อผิดพลาดประการใด ผู้ศึกษาค้นคว้าขอน้อมรับ และต้องขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ผู้ดำเนินโครงงาน
นายบุรินทร์ หอมหวาน
นางสาวปุณญาพร วิวัฒนไพบูลย์

เมษายน 2562

สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญานิพนธ์ ..... **ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดบุ๊กมาร์ก**

บทคัดย่อ ..... ข

Abstract ..... ค

กิตติกรรมประกาศ ..... ง

สารบัญ ..... จ

สารบัญตาราง ..... ฌ

สารบัญรูป ..... ญ

บทที่ 1 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน 1

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน 1

1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Outputs) 1

1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcomes) 1

1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงงาน 2

1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงงาน 2

1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงงาน 2

1.8 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงงาน 2

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 2

2.1 หลักการของรถจำลอง 3

2.2 ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3

2.2.1. Experimental evaluation of the scale model method to simulate lunar vehicle dynamics, 2016 [1] 3

2.2.2. Scale-Model Vehicle Analysis for the Design of a Steering Controller, 2003 [2] 4

2.2.3. Modeling and simulation of road vehicle, 2010 [3] 5

2.3 หลักการและทฤษฎีในการย่อขนาดรถต้นแบบ 6

2.3.1. การวิเคราะห์มิติ 6

2.3.2 การวิเคราะห์มิติโดยวิธี บักกิงแฮมพาย (Dimension analysis by Buckingham Pi Theorem) ที่มา: หนังสือกลศาสตร์ของไหล, ธัญดร ออกละวา [5] 7

2.3.3 การหาจุดศูนย์กลางมวล 10

2.4 คำสั่งคอมพิวเตอร์สำหรับใช้ในการควบคุมรถจำลอง 12

2.5 การวัดความเร็วและจับเวลารถสำหรับการทดลอง 13

2.5.1 การวัดความเร็วด้วย Hall effect sensor [6] 13

2.5.2 การวัดความด้วยการตัดแสง (Light Gate) 14

2.5.3 การวัดความเร็วด้วย GPS 15

2.5.4 การวัดความเร่งด้วย *Accelerometer* 15

2.5.5 การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างรถต้นแบบและรถจำลองด้วยทฤษฎี Power to weight ratio 16

2.5.6 ควบคุมกำลังและความเร็วมอเตอร์ด้วยวิธี Pulse Width Modulation 17

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 3 19

3.1 การออกแบบและสร้างรถจำลอง 19

3.1.1. หลักการออกแบบรถจำลอง 19

3.1.2. การกำหนดอัตราส่วนการย่อขนาดของรถจำลอง 19

3.1.3. วิเคราะห์มิติของกลุ่มพาย 22

3.1.4. การออกแบบและสร้างรถจำลอง 26

3.1.5. ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม ระบบขับเคลื่อน และระบบกันสะเทือน 30

3.2 วิธีทำการทดสอบ 35

3.2.1 การทดสอบด้านสถิตยศาสตร์ 35

3.2.2 การทดสอบด้านพลศาสตร์ 39

3.3 สรุปผลการทดลอง 42

บทที่ 4 43

4.1 ผลการทดลองด้านสถิตยศาสตร์ 43

4.1.1 การทดสอบการเปรียบเทียบความสมมูลของจุดศูนย์กลางมวล 43

4.2 ผลการทดลองด้ายพลศาสตร์ 45

4.2.1. การทดสอบเปรียบเทียบการวัดความเร็ว 45

4.2.2. การทดสอบสมรรถนะความเร็วและความเร่งรถจำลองและเปรียบเทียบกับรถต้นแบบ 46

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 5 51

5.1 สรุปผลโครงงาน 51

5.1.1 สรุปผลการทดสอบรถจำลอง 51

5.1.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ 52

เอกสารอ้างอิง 53

ภาคผนวก ก 54

ประวัติผู้ดำเนินโครงงาน 58

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า
ตารางที่ 1 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงงาน 2

ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์และหน่วยของมิติพื้นฐาน 4

ตารางที่ 2.2 ตารางแจกแจงมิติของตัวแปร 6

ตารางที่ 2.3 ค่า PTW ของ Compact car 14

ตารางที่ 2.4 ค่า PTW ของ Perfomance, Luxury car 14

ตารางที่ 2.5 ค่า PTW ของ Sport car 15

ตารางที่ 2.6 ค่า PTW ของ Big bike 15

ตารางที่ 3.1 ค่าข้อมูลจำเพาะระหว่างรถจำลองและรถต้นแบบ 23

ตารางที่ 3.2 ค่ากลุ่มตัวแปรไร้มิติระหว่างรถจำลองและรถต้นแบบ 24

ตารางที่ 4.1 ผลการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ก่อนและหลังปรับ 42

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองจากชุดทดสอบความเร็วจากฮอลล์เซนเซอร์และชุดวัดความเร็วแบบตัดแสง 44

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณค่าที่ได้จากตารางที่ 4.2 44

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบอัตราเร่งของรถจำลอง 46

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบอัตราเร่งของรถต้นแบบ 47

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบสมรรถนะด้วย Power to weight ratio 47

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า
รูปที่ 2.1 Scaled lunar vehicle และ พื้นที่ทำการทดลอง [1] 2
รูปที่ 2.2 การปรับตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของรถจำลอง [2] 3
รูปที่ 2.3 การจำลองสภาพแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อรถด้วย Autodesk 3ds max 2010 [3] 3
รูปที่ 2.4 การหาจุดศูนย์กลางมวล 9
รูปที่ 2.5 การทำงานนับแม่เหล็กของฮอลล์เซนเซอร์ 12
รูปที่ 2.6 การวัดความเร็วด้วยการตัดแสง (Light Gate) 13
รูปที่ 2.7 Light Dependent Resistor (LDR) 13
รูปที่ 2. 8 แสดงตัวอย่างการส่งค่าสัญญาณ (Duty cycle) ตั้งแต่ 0% - 100% 15

รูปที่ 3.1 ทีแมค อินวิว ฟอร์มูล่า 18
รูปที่ 3.2 มิติของรถทีแมค อินวิว ฟอร์มูล่าพร้อมขนาด 19
รูปที่ 3.3 โครงรถจำลองที่ออกแบบจากโปรแกรม fusion360 25
รูปที่ 3.4 ปีกนกและคอม้าที่ออกแบบใหม่ 26
รูปที่ 3.5 ตำแหน่งติดตั้งแบตเตอรี่ 26
รูปที่ 3.6 ชิ้นส่วนสำหรับติดตั้งอุปกรณ์กันสะเทือน 27
รูปที่ 3.7 โครงรถจำลองเมื่อพิมพ์เสร็จ 27
รูปที่ 3.8 เครื่องพิมพ์หลังพิมพ์ชิ้นส่วนรถจำลองเสร็จ 28
รูปที่ 3.9 การประกอบรถจำลอง 28
รูปที่ 3.10 ตัวควบคุมความเร็วของ Hobbywing 29

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า
รูปที่ 3.11 วิธีการต่อสายไฟของตัวควบคุมความเร็ว 29
รูปที่ 3.12 เซอร์โวมอเตอร์ของ Hypertech 30
รูปที่ 3.13 การต่อก้านส่ง (1) และคันชัก (2) ของกลไกบังคับเลี้ยวแบบ Crank rocker 30
รูปที่ 3.14 มอเตอร์ Wheel Hub Motor 31
รูปที่ 3.15 ล้อและยาง 31
รูปที่ 3.16 อลูมิเนียมโช๊ค 32
รูปที่ 3.17 รถจำลองเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมและระบบต่าง ๆ เสร็จ 32
รูปที่ 3.18 ประกอบการคำนวณหาจุด cg ในแกน x ของรถจำลอง 34
รูปที่ 3.19 ประกอบการคำนวณหาจุด cg ในแนวแกน y ของรถจำลอง 34
รูปที่ 3.20 ประกอบการคำนวณหาจุด cg ในแนวแกน x ของรถต้นแบบ 35
รูปที่ 3.21 การชั่งน้ำหนักรถต้นแบบเพื่อหาแรงปฏิกิริยาที่ล้อ 35
รูปที่ 3.22 การชั่งน้ำหนักล้อหาจุด cg ในแนวแกน y 36
รูปที่ 3.23 LDR sensor 37
รูปที่ 3.24 บอร์ด ARDUINO รุ่น UNO 38
รูปที่ 3.25 รูการต่อวงจรของ LDR sensor และ บอร์ด Arduino 39
รูปที่ 3.26 ภาพประกอบการทดลอง 39
รูปที่ 3.27 GPS Lap Timer LT-Q6000 และ สถานที่ทำการทดลอง 40

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ หน้า
รูปที่ 4.1 แสดงสัดส่วนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของรถจำลอง 42
รูปที่ 4.2 ตำแหน่งที่ติดตั้งกล่องวางสายไฟใหม่ทำให้จุด cg ต่ำ ลง (แดง) โดยย้ายจากจุดเดิม (เขียว) และจุดสีน้ำเงินคือตำแหน่งเก่าของจุด cg, สีเหลืองคือตำแหน่งใหม่ของจุด cg 43
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา 46
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลา 46
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งและเวลาจากการหาอนุพันธ์ของความเร็ว 47

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงาน

การสร้างรถยนต์หรือยานพาหนะขับเคลื่อนแบบต่าง ๆ ในปัจจุบันจำเป็นต้องมีการทดสอบเพื่อหาผลกระทบและปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการออกแบบและสร้างยานพาหนะเหล่านั้น ซึ่งการทดสอบกับยานพาหนะจริงนั้น มีต้นทุนที่ใช้ในการทดสอบสูงและมีความเสี่ยงในการเกิดอันตรายในขณะทำการทดสอบ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการสร้างยานพาหนะจำลองที่มีขนาดย่อส่วน เพื่อใช้ลดค่าใช้จ่ายในการทดสอบด้านพลศาสตร์ของยานพาหนะต้นแบบภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

1.2.1. เพื่อทำการศึกษาและสร้างรถจำลองขนาดเล็กจากรถต้นแบบ

1.2.2. ศึกษาสัดส่วนและขนาดของรถจำลองโดยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีบัคกิงแฮมพาย (The Buckingham Pi's Theorem)

1.2.3. เพื่อทดสอบประสิทธิภาพสมรรถนะของรถจำลองในด้านสถิตยศาสตร์ และพลศาสตร์

1.3 เกณฑ์ชี้วัดผลงาน (Outputs)

1.3.1 ได้ขนาดและมิติของรถจำลองโดยการประยุกต์ใช้ทฤษฎีบัคกิงแฮมพาย (The Buckingham Pi's Theorem) กับรถต้นแบบ

1.3.2 ได้รถจำลองที่มีขนาดย่อส่วน เพื่อใช้ในการทดสอบด้านสถิตยศาสตร์และพลศาสตร์

1.3.3 ได้ผลการทดสอบและเปรียบเทียบจุดศูนย์กลางมวลระหว่างรถต้นแบบและรถจำลอง

1.3.4 ได้ผลการทดสอบด้านพลศาสตร์ของรถจำลอง

1.4 เกณฑ์ชี้วัดผลสำเร็จ (Outcomes)

1.4.1. ได้ทราบระเบียบวิธีการเพื่อกำหนดขนาดและมิติเพื่อออกแบบรถจำลองย่อส่วนของรถจำลอง

1.4.2. ได้ทราบค่าความเร็วที่วัดได้ของรถจำลองมีความสมมูลกับความเร็วที่วัดได้จริงจากภายนอก

1.4.3. รู้ระเบียบวิธีการในการออกแบบรถจำลองย่อส่วนและได้ค่าจุดศูนย์กลางมวลมีความสมมูลใกล้เคียงกับยานพาหนะจริง

1.4.4. ได้รถจำลองที่วิเคราะห์อัตราส่วนถูกต้องตามทฤษฎีบัคกิงแฮมพาย (The Buckingham Pi's Theorem)

1.5 ขอบเขตในการดำเนินโครงงาน

1.5.1. ศึกษาการลดขนาดโดยอาศัยการวิเคราะห์กลุ่มตัวแปรไร้มิติเพื่อหาค่ากลุ่มพาย

1.5.2. ศึกษาและประยุกต์ใช้ทฤษฎีบัคกิงแฮมพาย (The Buckingham Pi's Theorem) ในการวิเคราะห์การย่อส่วนรถต้นแบบ

1.5.3. ศึกษาการเขียนคำสั่งโปรแกรม Arduino เพื่อทดสอบความเร็วและความเร่งตามระยะทางและเวลาที่กำหนด

1.5.4. ศึกษาการคำนวณหาจุดศูนย์กลางมวลระหว่างรถต้นแบบและรถจำลอง

1.6 สถานที่ในการดำเนินโครงงาน

ศูนย์วิจัยและพัฒนานวัตกรรมยานยนต์ (Drive) ชั้น 5 IE 506 อาคารภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

1.7 ระยะเวลาในการดำเนินโครงงาน

ตั้งแต่เดือน สิงหาคม พ.ศ. 2560 ถึง กรกฎาคม พ.ศ. 2561

1.8 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงงาน

ตารางที่ 1 ขั้นตอนและแผนการดำเนินโครงงาน

	การดำเนินโครงงาน	เดือนที่											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1.8.1	ศึกษาทฤษฎีของปริญญานิพนธ์ที่เกี่ยวข้อง												
1.8.2	เสนอโครงงานวิจัย												
1.8.3	ออกแบบและสร้างอุปกรณ์												
1.8.4	ทำการทดลอง												
1.8.5	วิเคราะห์ผลการทดลอง												
1.8.6	สรุปและจัดทำปริญญานิพนธ์												

บทที่ 2
หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 หลักการของรถจำลอง

ในการสร้างรถจำลองจากรถต้นแบบเพื่อใช้ทดสอบคุณสมบัติด้านต่าง ๆ ภายใต้ขนาดที่เปลี่ยนไป ต้องอาศัยหลักการย่อขนาดจากการวิเคราะห์มิติด้วยทฤษฎีบักกิงแฮมพายเพื่อให้ได้ขนาดสเกลการย่อที่ถูกต้อง ซึ่งสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบความสมมูลของรถต้นแบบและรถจำลอง และเพื่อศึกษาผลกระทบทางสถิตยศาสตร์ที่เกิดขึ้นกับรถจำลองแทนการทดสอบด้วยรถจริง ในการวิเคราะห์มิติจะใช้ตัวแปรที่เกี่ยวข้องมาผ่านกระบวนการทางคณิตศาสตร์จัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless group) โดยกลุ่มตัวแปรไร้มิตินี้จะใช้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบความสมมูลระหว่างรถจำลองและรถต้นแบบ ซึ่งการสร้างรถจำลองนี้จะช่วยลดค่าใช้จ่ายต้นทุนที่ใช้ในการทดสอบด้วยรถจริง และลดความเสี่ยงที่อาจเกิดอันตรายในการทดสอบด้วยรถจริง ซึ่งในการทดสอบด้วยรถจำลองนั้นมีข้อจำกัดในการทดลองน้อยกว่า เช่น เพื่อให้ได้ผลการทดสอบเดียวกันนั้น รถจำลองสามารถใช้ระยะทางการทดสอบที่สั้นกว่าระยะทางทดสอบด้วยรถจริง เป็นต้น ในปัจจุบันสามารถแบ่งประเภทรถจำลองออกตามการทดสอบได้ 2 ประเภท โดยประเภทแรกคือ นำรถจำลองวิ่งอยู่บนพื้นถนนจำลอง (Treadmill) ที่สร้างขึ้นโดยตัวถนนจำลองจะทำหน้าที่หมุนและเคลื่อนที่จำลองการเคลื่อนที่ของรถบนถนนจริง ซึ่งล้อของรถจำลองจะหมุนตามด้วยความเร็วที่ถนนจำลองหมุน และอีกประเภทคือ ให้รถจำลองวิ่งด้วยตัวเองโดยใช้มอเตอร์ขับเคลื่อน

2.2 ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1. Experimental evaluation of the scale model method to simulate lunar vehicle dynamics, 2016 [1]

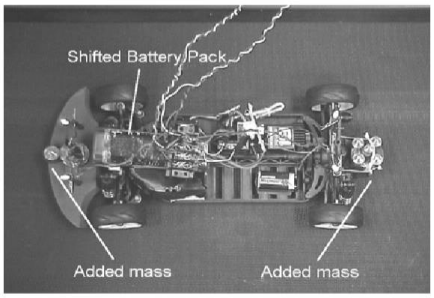
งานวิจัยนี้ศึกษาและออกแบบยานพาหนะสำรวจดวงจันทร์ โดยอาศัยการพัฒนาภายใต้ทฤษฎีการย่อขนาดรถของบักกิงแฮมพาย เพื่อจำลองพลวัตของยานพาหนะที่นำมาเป็นต้นแบบและใช้ทดสอบวิเคราะห์ผลกระทบต่าง ๆ โดยรถจำลองที่สร้างในงานวิจัยนี้มีขนาด 1 : 6 ซึ่งมีรายละเอียดน้อยกว่ารถต้นแบบและใช้วัสดุต่างชนิดกับรถต้นแบบ โดยออกแบบให้ควบคุมแบบไร้สายและในส่วนของการขับเคลื่อนนั้นแต่ละล้อจะมีอุปกรณ์ขับเคลื่อน (Running Gear) ติดตั้งอยู่ในตัวล้อทั้งหมด ในงานวิจัยนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการทดสอบและวิเคราะห์ความแตกต่างของยานพาหนะสำรวจดวงจันทร์แบบแปดล้อและหกล้อ ซึ่งผลการทดสอบรถจำลองชนิดแปดล้อมีความไม่เสถียรมากกว่าชนิดหกล้อ ส่วนที่สองทดสอบและวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างยางแบบอ่อนและแข็ง โดยในการทดสอบจะทำการบังคับให้รถวิ่งผ่านพื้นที่ทดสอบที่มีลักษณะเป็นลูกวิ่งและมีเสายื่นออกมาให้รถวิ่งผ่าน โดยเสานี้จะทำหน้าที่ส่งแรงกระแทกไปยังยางของรถจำลองขณะวิ่งผ่าน จากนั้นสังเกตผลกระทบทางพลวัตและความเร็วของรถจำลองผ่านโปรแกรมที่วิเคราะห์ด้วยการ

ถ่ายรูป Spotlight-8 software โดยยางแบบอ่อนให้ผลการทดสอบที่ดีกว่าเนื่องจากตัวล้อวิ่งเกาะพื้นได้ดีกว่ายางแบบแข็ง และในผลการทดสอบรถจำลองได้ค่าผลการทดสอบทางพลศาสตร์ที่ใกล้เคียงกับรถต้นแบบ แต่ได้ค่ามวลของล้อที่สูงกว่าและไม่สามารถควบคุมระบบกันสะเทือนได้ และมีข้อจำกัดในด้านวัสดุชิ้นส่วนบางชิ้นสร้างขึ้นด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ โดยชิ้นส่วนเหล่านี้มีความแข็งแรงไม่มากพอสำหรับการทดสอบความเร็ว

รูปที่ 2.1 Scaled lunar vehicle และ พื้นที่ทำการทดลอง [1]

2.2.2. Scale-Model Vehicle Analysis for the Design of a Steering Controller, 2003 [2]

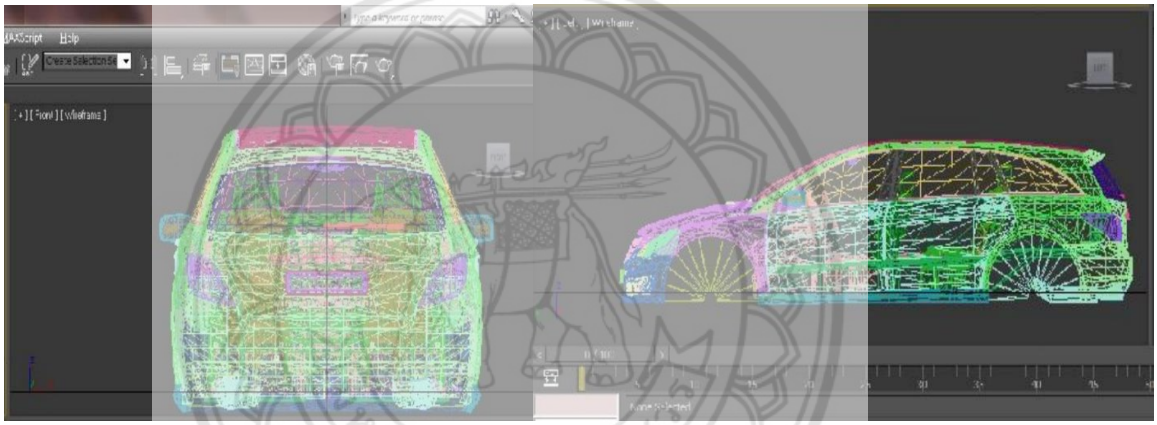
งานวิจัยนี้ศึกษาและออกแบบการเคลื่อนที่ของรถจำลอง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อช่วยควบคุมการเลี้ยวของรถต้นแบบ ในการทดลองจะให้รถจำลองวิ่งบนถนนจำลองที่มีลักษณะเป็นลู่วิ่ง (Treadmill) มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบทางด้านพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นตามแนวแรงด้านข้างของตัวรถและนำข้อมูลไปออกแบบระบบควบคุมการเลี้ยว โดยติดตั้งกล้องเพื่อใช้ตรวจจับตำแหน่งและส่งข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์ควบคุม ซึ่งควบคุมผ่านโปรแกรม MATLAB จากนั้นจะจ่ายสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชั่น (PWM) ไปยังรถจำลองเพื่อใช้ในการควบคุมมอเตอร์บังคับเลี้ยว การปรับความสมดุลของจุดศูนย์กลางมวล จะเริ่มจากจุดศูนย์ถ่วงรถและทำการย้ายมวลไปไว้ทางด้านหน้าตัวรถเพื่อให้มีความคล้ายกับรถต้นแบบที่การกระจายมวลส่วนใหญ่อยู่ทางด้านหน้าตัวรถ และนำค่าตำแหน่งที่ได้ไปเปรียบเทียบกับข้อมูลของรถต้นแบบ ในส่วนด้านความสมมูลของยางรถ จะใช้วิธีให้รถจำลองวิ่งบนลู่วิ่งและวัดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของล้อที่เกิดจากแรงที่กระทำด้านข้างล้อ และทำการทดลองซ้ำกับล้อหลายๆแบบเพื่อหาล้อที่มีความสมมูลกับรถต้นแบบที่สุด



รูปที่ 2.2 การปรับตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของรถจำลอง [2]

2.2.3. Modeling and simulation of road vehicle, 2010 [3]

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาและจำลองระบบถนนของยานพาหนะโดยใช้โปรแกรม Simulink Matlab เป็นตัวจำลองผลกระทบทางสภาพแวดล้อมและการเคลื่อนไหวระหว่างถนนและตัวรถที่เกิดขึ้นโดยจะจำลองออกมาเป็นโมเดลทางคณิตศาสตร์ โดยมีแนวคิดต้องการออกแบบและพัฒนาเพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบระบบควบคุมและองค์ประกอบของฮาร์ดแวร์ และจะแสดงผลการจำลองออกมาในรูปแบบโมเดลสามมิติในสภาพแวดล้อมเสมือนจริงที่จำลองจากโปรแกรมเพื่อให้ได้ภาพจำลองระบบยานพาหนะที่สมบูรณ์ งานวิจัยนี้ใช้โมเดลรถ Mercedes Benz ML270 เป็นต้นแบบในการทดลองโดยใช้โปรแกรม Autodesk 3ds Max 2010 ในการออกแบบโมเดล ในตอนแรกภาพรวมของงานวิจัยนี้คือพัฒนาการจำลองระบบทั่วไปของยานพาหนะ งานวิจัยนี้ได้สร้างพื้นฐานการจำลองโมเดลสำหรับพัฒนาต่อในงานวิจัยในอนาคต



รูปที่ 2.3 การจำลองสภาพแวดล้อมที่มีผลกระทบต่อรถด้วย Autodesk 3ds max 2010 [3]

2.3 หลักการและทฤษฎีในการย่อขนาดรถต้นแบบ

หลักการในการออกแบบและสร้างรถจำลองนั้นได้มาจากการพิจารณาสมการทางคณิตศาสตร์ โดยอาศัยหัวข้อทางคณิตศาสตร์เรื่อง การจัดกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless Group) และหลักทฤษฎีของบัคกิงแฮมพาย (The Buckingham PI's Theorem) ซึ่งกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่ได้ จะนำมาเป็นข้อมูลในการอ้างอิงการออกแบบและสร้างยานพาหนะย่อส่วน เพื่อให้เกิดความสมมูลในการออกแบบและสร้างต่อไป

2.3.1. การวิเคราะห์มิติ

การวิเคราะห์มิติ เป็นเทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ศึกษาเกี่ยวกับมิติ และหน่วย ของตัวแปรต่าง ๆ เพื่อใช้แก้ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของไหลซึ่งทฤษฎีการไหลอื่น ๆ ไม่สามารถอธิบายได้ หรืออธิบายได้ยาก โดยจะ ช่วยให้เข้าใจถึงปรากฏการณ์ของการไหล และทำนายตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในรูปของตัวแปรไร้มิติ และเมื่อนำมาวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลที่ได้ จากการตรวจวัด หรือทำการทดลอง จะสามารถสรุปออกมาเป็นสูตร

หรือสมการทั่วไปได้ นอกจากนี้ยังช่วย ให้เราทราบถึงแนวทางในออกแบบการทดลอง หรือการทดสอบแบบจำลองของตัวต้นแบบทางชลศาสตร์อีกด้วย

ก. มิติ และหน่วย (Dimension and Unit)

มิติ (Dimension) [4] คือ คุณสมบัติทางกายภาพของสสารซึ่งระบุในเชิงของปริมาณ เช่น แรง ความยาว มวล น้ำหนัก อุณหภูมิ เป็นต้น โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังนี้ มิติปฐมภูมิ (Primary Dimensions or Basic Dimensions) คือ มิติของตัวแปรที่ไม่สามารถแยกออกเป็นมิติอื่นได้และไม่ขึ้นอยู่กับมิติใด ๆ สำหรับวิชากลศาสตร์ของไหลจะมีมิติพื้นฐานทั้งหมด 4 ปริมาณ คือ มวล ความยาว เวลา และแรง โดยมิติทางกายภาพมี 2 ระบบใหญ่ ๆ คือ

1.ระบบมวล ความยาว เวลา และอุณหภูมิ ($MLT\theta$)

2.ระบบแรง ความยาว เวลา และอุณหภูมิ ($FLT\theta$) โดยมีหน่วยและสัญลักษณ์ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สัญลักษณ์และหน่วยของมิติพื้นฐาน

ปริมาณ	สัญลักษณ์ที่ใช้	หน่วย SI	หน่วย BG
มวล	M	กิโลกรัม (kg)	สลัก (Slug)
ความยาว	L	เมตร (m)	ฟุต (ft)
เวลา	T	วินาที (s)	วินาที (sec)
อุณหภูมิ	θ	เคลวิน (K)	แรนไคน์ (R)

และอีกมิติ คือ มิติทุติยภูมิ (Secondary Dimensions) เป็นมิติที่เกิดจากเทอมของมิติปฐมภูมิรวมกันอย่างน้อยสองเทอมขึ้นไป โดยจะแสดงค่าของมิติตามที่กำหนดจากทฤษฎี เช่น ความเร็วเกิดจาก ระยะทาง (km) หารด้วย เวลา (hr.) ดังนั้น ความเร็วจึงมีมิติเป็น LT^{-1}

หน่วย (Unit) [4] หมายถึง ลักษณะนามที่ใช้ระบุปริมาณจากมิติ โดยระบบสากลมีการกำหนดระบบหน่วยการวัดหลายระบบ ซึ่งระบบนิยมมากที่สุดในปัจจุบันมี 2 ระบบดังนี้

1. System International Unit หรือที่เรียกว่า “ระบบ SI” ตัวย่อ SI
2. British Gravitational System หรือที่เรียกว่า “ระบบอังกฤษ” ตัวย่อ BG

2.3.2. การวิเคราะห์มิติโดยวิธี บักกิงแฮมพาย (Dimension analysis by Buckingham Pi Theorem) ที่มา: หนังสือกลศาสตร์ของไหล, ธัญดร ออกละวา [5]

จากเรื่องการวิเคราะห์มิติด้วยทฤษฎีบักกิงแฮมพายของอ.ธัญดร ออกละวา (2553) จากหนังสือกลศาสตร์ของไหล ได้แสดงการวิเคราะห์มิติด้วยทฤษฎีบักกิงแฮมพาย คือทฤษฎีที่ใช้วิเคราะห์พจน์ตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless terms) โดยใช้สัญลักษณ์ π ซึ่งคือพจน์ตัวแปรไร้มิติที่ใช้วิเคราะห์ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับปัญหาที่พิจารณา โดยมีขั้นตอนวิเคราะห์ดังนี้

ก. รวมตัวแปรต่าง ๆ เข้าด้วยกันในเทอมไร้มิติ

(จำนวน M ตัว) มีหลักการพิจารณาและจำแนกตัวแปรออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

1. กลุ่มตัวแปรด้านขนาดและรูปร่าง
2. กลุ่มตัวแปรเกี่ยวกับคุณสมบัติของของไหล
3. กลุ่มตัวแปรเกี่ยวกับอิทธิพลภายนอกของการไหล

โดยที่การคัดเลือกตัวแปรนั้น ตัวแปรที่พิจารณาเลือกจะต้องไม่ขึ้นกับตัวแปรใด ๆ

ข. เขียนมิติของตัวแปรในรูปของมิติพื้นฐาน $FLT\theta$ หรือ $MLT\theta$

การเขียนมิติจำเป็นต้องเลือกเขียนอย่างใดอย่างหนึ่ง โดยจะเขียนความสัมพันธ์ของตัวแปรอยู่ในรูปของฟังก์ชั่น จากนั้นนับจำนวนมิติอ้างอิง ซึ่งคือมิติปฐมภูมิที่รวมกันได้เป็นตัวแปรทั้งหมด (จำนวน K ตัว)

ค. เลือกตัวแปรซ้ำ

โดยเลือกจากตัวแปรซ้ำที่มีจำนวนเท่ากันกับจำนวนมิติปฐมภูมิ ซึ่งตัวแปรซ้ำที่เลือกจำเป็นต้องมีมิติพื้นฐานครบทั้งหมดเมื่อนำตัวแปรมารวมกัน

ง. วิเคราะห์หาจำนวนสมการกลุ่มพาย

ทำการวิเคราะห์โดยรวมตัวแปรซ้ำทุกตัวเข้ากับตัวแปรที่เหลืออยู่ทีละตัว จากนั้นปรับเลขชี้กำลังของตัวแปรที่ซ้ำจนสมการของกลุ่มตัวแปร (π) นั้นไม่มีมิติ โดยจำนวนสมการของกลุ่มตัวแปรนั้นจะมีจำนวนเท่ากับ M – K สมการ

จ. หลังได้สมการกลุ่มพายมาแล้ว

จะสามารถผันรูปของสมการค่าพายให้เข้ากับรูปแบบการทดลองได้ โดยการผันรูปของสมการค่าพายนั้น จำเป็นต้องคงสถานะไร้มิติของพจน์ตัวแปรเอาไว้ได้

ฉ. เขียนความสัมพันธ์ระหว่างสมการกลุ่มพายในรูปฟังก์ชั่น

โดยจะหาความสัมพันธ์ของสมการได้จากการเก็บของการทดลอง

ตัวอย่างการเขียนความสัมพันธ์สมการกลุ่มค่าพาย $F(\pi_1, \pi_2, \pi_3, ..., \pi_{M-K}) = 0$

<u>ตัวอย่างการคำนวณ</u>

จาก $F_D = f(\rho, V, D, \mu)$ จงหากลุ่มตัวแปรไร้มิติเมื่อกำหนดตัวแปรดังนี้

F_D : แรงฉุด
ρ : เส้นผ่านศูนย์กลาง
V : ความเร็ว
μ : ความหนืด
D : ความหนาแน่น

<u>วิธีทำ</u>

1. ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ F, ρ, V, D และ μ (n = 5)
2. เลือกใช้มิติปฐมภูมิ M , L , t
3. แจกแจงมิติของตัวแปร

ตารางที่ 2.2 ตารางแจกแจงมิติของตัวแปร

ตัวแปร	มิติ
F	ML/t^2
ρ	M/L^3
V	L/t
D	L
μ	M/Lt

4. จาก n = 5 , m = r =3

m = 3 ดังนั้น จะมีตัวแปรซ้ำ 3 ตัว ให้ ρ, V, D เป็นตัวแปรซ้ำ

กลุ่มตัวแปร n – m = 5 – 3 = 2

ดังนั้น มีกลุ่มตัวแปรอิสระ 2 กลุ่ม คือ π_1 , π_2 , ρ^d, V^b, D^c, F จะได้

$$\pi_1 = \rho^a V^b D^c F$$

$$\pi_2 = \rho^d V^e D^f \mu$$

5. วิเคราะห์มิติของ π_1 โดยจำแนกมิติของแต่ละตัวแปรออกมา แต่จะไม่ยกกำลังตัวแปรที่นำมาจับคู่

$$\pi_1 = \rho^a V^b D^c F$$

$$= \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{t}\right)^b (L)^c \left(\frac{ML}{t^2}\right)$$

แต่ π เป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติ

ดังนั้น $(\frac{M}{L^3})^a(\frac{L}{t})^b(L)^c(\frac{ML}{t^2}) = M^0L^0t^0$

พิจารณามิติของมิติปฐมภูมิแต่ละตัวได้ดังนี้

เลือกคำนวณที่มิติของ M เป็นอันดับแรกโดยจับตัวแปรยกกำลังของมิติ M บวกกันและจับให้เท่ากับ 0 ตามเลขยกกำลังของอีกฝั่งสมการของมิติ M จากนั้นแก้สมการหาค่าตัวแปรยกกำลังออกมา

M: $a + 1 = 0$

$a = -1$

L: $-3a + b + c + 1 = 0$

$b + c = -4$

t: $-b - 2 = 0$

$b = -2$

$c = -2$

หลังจากได้ค่าตัวแปรยกกำลังครบทุกตัวแล้ว จึงนำมาแทนค่าในสมการเพื่อให้ได้ค่าของกลุ่มพายดังต่อไปนี้

แทนค่า a , b , c

$$\pi_1 = \rho^a V^b D^c F$$

$$= \frac{F}{(V^2D^2)}$$

วิเคราะห์มิติของ π_2

$$\pi_2 = \rho^d V^e D^f \mu$$

$$= (\frac{M}{L^3})^d(\frac{L}{t})^e(L)^f(\frac{M}{Lt})$$

$$= M^0L^0t^0$$

พิจารณามิติ m มิติปฐมภูมิแต่ละตัวได้ดังนี้

		M:	d	+1	=	0
				d	=	-1
L:	-3d	+e	+f	-1	=	0
			e	+f	=	-2
				f	=	-1
		t:	-e	-1	=	0
				e	=	-1

แทนค่า d , e , f

$$\pi_2 = \rho^d V^e D^f \mu$$

$$= \left(\frac{1}{\rho VD}\right)$$

π_1 และ π_2 มีความสัมพันธ์กันคือ

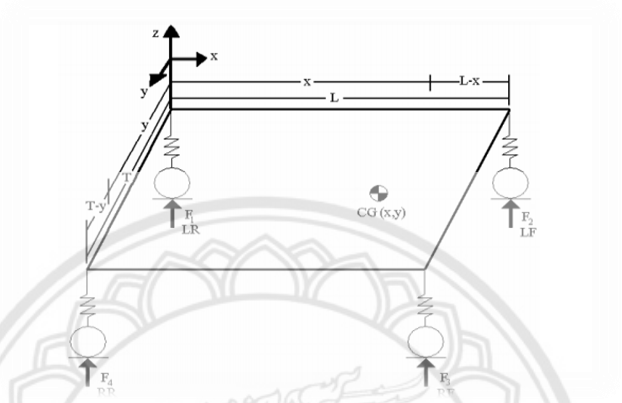
$$\pi_1 = f(\pi_2)$$

$$\left(\frac{F}{\rho V^2 D^2}\right) = f\left(\frac{1}{\rho VD}\right)$$

การคำนวณนี้แสดงให้เห็นการขั้นตอนหาค่ากลุ่มตัวแปรไร้มิติ โดยจะได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นค่าพาย ซึ่งจะนำมาใช้เป็นตัวแปรไร้มิติสำหรับเปรียบเทียบความสมมูลระหว่างรถต้นแบบและรถจำลอง

2.3.3. การหาจุดศูนย์กลางมวล

สำหรับการออกแบบรถจำลองนั้น จะมีบางตำแหน่งที่ออกแบบชิ้นส่วนใหม่ทำให้จุดศูนย์กลางมวลของตัวรถเปลี่ยนและต่างจากตัวรถต้นแบบ การรักษาสมดุลของรถขณะขับเคลื่อนก็ต้องเปลี่ยนไป รวมถึงสมรรถนะในการขับขี่และการเลี้ยวด้วย ดังนั้นการหาจุดศูนย์กลางมวลของรถ (CG) หาได้จากสมการที่ 2.1 – 2.5 ดังนี้



รูปที่ 2.4 การหาจุดศูนย์กลางมวล

$$\sum M_y = (F_2 + F_3)(L - x) - (F_1 + F_4)x = 0 \tag{2.1}$$

$$\sum M_x = (F_1 + F_2)y - (F_1 + F_4)(T - y) = 0 \tag{2.2}$$

จากรูปที่ 2.4 ใช้สมการโมเมนต์ของแรงตามแกน y และ x ตามสมการที่ 2.1 และ 2.2 โดยจับแรงที่อยู่ระนาบแกนเดียวกันเช่น F_1 และ F_2 ในระนาบแกน x มาบวกกันและคูณด้วยระยะห่าง y จากจุด cg ในระนาบแกน y จากนั้นลบด้วยแรง F_3 และ F_4 ที่อยู่ในระนาบแกน x เช่นเดียวกันแต่อยู่ฝั่งตรงข้าม จากนั้นคูณด้วยระยะ T – y จากจุด cg เช่นเดียวกันกับแรงที่คิดก่อนตอนต้น และจับสมการทั้งหมดเท่ากับ 0 จากนั้นแก้สมการเพื่อหาค่าระยะ x และ y ดังนี้
ทำการแก้สมการเพื่อหา x และ y

$$(F_2 + F_3)L - (F_2 + F_3)x - (F_1 + F_4)x = 0 \tag{2.3}$$

$$(F_1 + F_2)y - (F_3 + F_4)T + (F_3 + F_4)y = 0 \tag{2.4}$$

จะได้

$$(F_1 + F_2 + F_3 + F_4)x = (F_2 + F_3)L \tag{2.5}$$

$$(F_1 + F_2 + F_3 + F_4)y = (F_3 + F_4)T \tag{2.6}$$

จากนั้นจะได้สมการเพื่อหา x และ y ดังสมการที่ 2.3 และ 2.4

$$x = \frac{(F_2 + F_3)L}{(F_1 + F_2 + F_3 + F_4)} \tag{2.7}$$

$$y = \frac{(F_3 + F_4)T}{(F_1 + F_2 + F_3 + F_4)} \tag{2.8}$$

และสมการหาจุดศูนย์กลางมวลสำหรับในแนวดิ่งได้ดังนี้

$$\sum My = 0; Fa\left(b\cos\theta\right) - W\cos\theta\left(x\right) - W\sin\theta\left(y_1\right) = 0 \tag{2.9}$$

กำหนดให้

F_a	คือ	น้ำหนักรวมของรถ
W	คือ	น้ำหนักส่วนเพลาหน้า
X	คือ	ระยะเพลาหลังถึงเพลาหน้า
y_1	คือ	ความสูงของจุดCGจากแนวอ้างอิง

โดยสมการ 2.1 – 2.5 ที่กล่าวมานี้เป็นสมการที่ใช้โมเมนต์ของแรงเพื่อหาจุดศูนย์กลางมวล โดยมีความเกี่ยวข้องกันคือตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลจะหาได้จากการหาผลรวมของโมเมนต์ตามสมการที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยเมื่อใช้สมการโมเมนต์ของแรง เข้าไปจะทำให้ได้ตำแหน่งของแรงปฏิกิริยาที่ทำให้แรงลัพธ์เป็นศูนย์ ซึ่งแรงที่ว่านี้จะอยู่ตรงตำแหน่งที่ทำให้ระบบไม่หมุนซึ่งก็คือจุดศูนย์กลางมวลนั้นเอง

2.4 คำสั่งคอมพิวเตอร์สำหรับใช้ในการควบคุมรถจำลอง

การควบคุมรถจำลองเกิดการส่งคำสั่งข้อมูลจากรีโมทควบคุม (Remote controller) โดยจะทำการรับคำสั่งจากการบังคับรีโมทและส่งสัญญาณคลื่นวิทยุไปยังอุปกรณ์ภาครับที่ติดตั้งไว้ตัวรถ เช่น ตัวควบคุมความเร็ว (Speed controller) และมอเตอร์เซอร์โวควบคุมการเลี้ยว โดยมีตัวประมวลผล (Arduino board) ทำหน้าที่แปลงคำสั่งจากโปรแกรมArduinoที่เขียนไว้ไปเป็นสัญญาณพัลส์วิดท์มอดูเลชั่น (PWM) และส่งสัญญาณไปควบคุมการทำงานของตัวควบคุมความเร็ว (Speed controller) เพื่อใช้เพิ่มระดับความเร็วในการขับเคลื่อนหรือเบรก และยังใช้ในส่วนของการควบคุมมอเตอร์เซอร์โว เพื่อใช้ควบคุมวงเลี้ยวของรถจำลอง โดยการควบคุมรถจำลองด้วยรีโมทควบคุมนั้นจะใช้การเขียนคำสั่งคอมพิวเตอร์ลงในบอร์ด Arduino ที่ติดตั้งไว้ในรถจำลองซึ่งจะรับคำสั่งสัญญาณวิทยุจากรีโมทควบคุมที่บังคับ ซึ่งตัวรถจำลองจะรับคำสั่งสัญญาณนั้นผ่านตัว receiver ที่ติดตั้งไว้ในรถจำลอง โดยตัว receiver นี้จะเป็นคู่ของรีโมทควบคุมที่เตรียมไว้ข้อมูลโค้ดต่าง ๆ อยู่ในภาคผนวก

2.5 การวัดความเร็วและจับเวลารถสำหรับการทดลอง

ความเร็ว คือระยะทางการเคลื่อนที่ของวัตถุต่อหน่วยเวลา เป็นปริมาณเวกเตอร์ โดยมีหน่วยทางระบบเอสไอคือ เมตร/วินาที มีสูตรดังนี้

$$V = \frac{S}{t} \tag{2.10}$$

ความเร็วเชิงเส้นของวัตถุที่เวลาใด ๆ เมื่อเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ คือระยะทางตามเส้นรอบวงที่วัตถุเคลื่อนที่ได้เป็น $2\pi R$ และเวลาที่เคลื่อนที่ครบรอบคือ คาบเวลา T ดังนั้นจะได้

$$V = \frac{2\pi r}{t} \tag{2.11}$$

ความเร่ง คือการเปลี่ยนแปลงความเร็วในช่วงระยะเวลาหนึ่ง เป็นปริมาณเวกเตอร์ ซึ่งจะมีค่าเป็นบวก หรือลบก็ได้ และมีหน่วยทางระบบเอสไอคือ เมตร/วินาที^{2} มีสูตรดังนี้

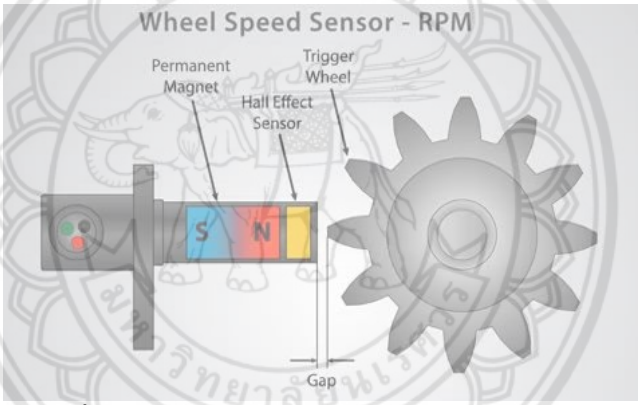
$$a = \frac{V}{t} \tag{2.12}$$

โดย

V คือ ความเร็วเฉลี่ย (เมตร/วินาที)
a คือ ความเร่งเฉลี่ย (เมตร/วินาที^{2})
s คือ ระยะทาง (เมตร)
t คือ เวลา (วินาที)
r คือ รัศมี

2.5.1. การวัดความเร็วด้วย Hall effect sensor [6]

hall-Effect คือ ปรากฏการณ์ที่พาหะประจุไฟฟ้าในตัวนำเกิดการเบนไปจากแนวทางเดิม เนื่องจากนำแผ่นตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าคงที่ผ่านไปวางไว้ในสนามแม่เหล็ก โดยการเบนนี้มีจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าหรือแรงดันฮอลล์ในตัวนำในทิศทางตั้งฉากกับกระแสและสนามแม่เหล็ก โดยในการทดสอบวัดความเร็วของงานวิจัยนี้จะใช้หลักทฤษฎีปรากฏการณ์ฮอลล์มาใช้วัดความเร็ว โดยอาศัยตัวฮอลล์เซ็นเซอร์ (Hall Effect Sensor) ที่ติดอยู่ในตัวควบคุมความเร็ว ซึ่งตัวฮอลล์เซ็นเซอร์นี้จะทำหน้าที่นับจำนวนแม่เหล็กที่อยู่ในมอเตอร์ขณะหมุนโดยอาศัยการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กตามรูปที่ 2.5 โดยก่อนทดสอบจะทำการตรวจดูว่าในหนึ่งรอบการหมุนของมอเตอร์จะต้องนับแม่เหล็กได้กี่ครั้งและจึงนำไปคำนวณเป็นระยะทางที่รถวิ่งได้ ซึ่งจะเขียนคำสั่งจับเวลาควบคู่กันไปด้วย เพื่อให้ทราบว่าในขณะทำการทดสอบในช่วงเวลานั้น ๆ มอเตอร์หมุนไปกี่รอบและจากนั้นนำค่าระยะทางที่ได้จากการคำนวณการหมุนของมอเตอร์มาคำนวณเป็นความเร็วอีกรอบ ข้อเสียคือหากเกิดการไถลของล้อขณะออกตัวจะทำให้ค่าความเร็วที่จับได้คลาดเคลื่อนจากความเร็วจริงที่รถวิ่ง

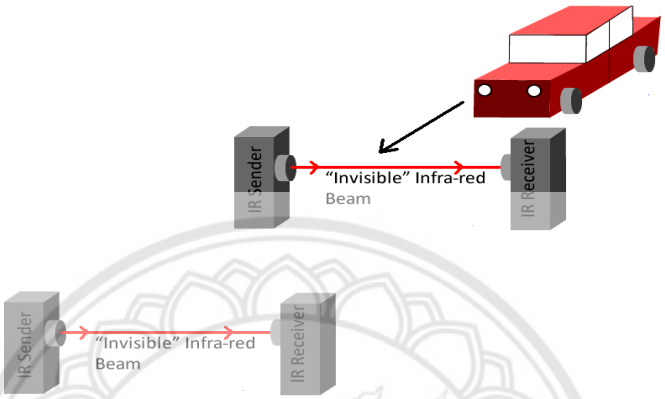


รูปที่ 2.5 การทำงานนับแม่เหล็กของฮอลล์เซนเซอร์

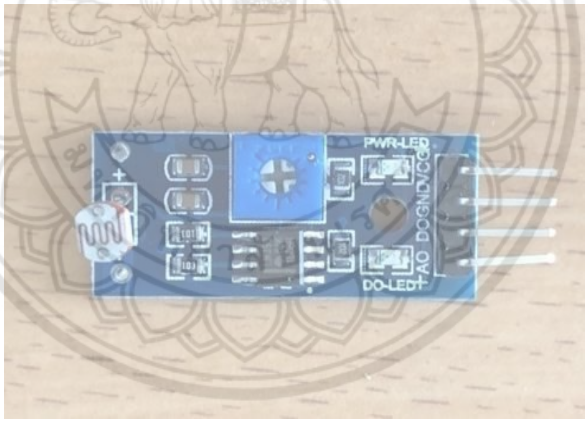
2.5.2. การวัดความด้วยการตัดแสง (Light Gate)

การวัดความเร็วด้วยการตัดแสงนั้นคือการจับเวลาของรถที่วิ่งผ่านชุดจับเวลาตามรูปที่ 2.6 โดยจะเริ่มจับเวลาเมื่อผ่านจุดรับส่งแสงจุดแรก(IR Sender และ IR Receiver) และจะหยุดเมื่อผ่านจุดรับส่งจุดสุดท้าย ซึ่งจะได้ค่าเวลาออกมาสำหรับนำไปคำนวณคู่กับระยะทางระหว่างจุดรับส่งแสงจุดแรกและจุดสุดท้ายด้วยสมการที่ 2.10 โดยตัวรับแสงนั้นจะใช้ตัว Light Dependent Resistor (LDR) หรือเซนเซอร์วัดแสง(สำหรับการทดสอบจับความเร็ว) คือ ตัวต้านทานที่มีความไวต่อแสง ซึ่งสามารถเปลี่ยนสภาพการนำไฟฟ้าได้หากมีแสงมากระทบ โดยค่าความต้านทานที่เปลี่ยนจะขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มของแสงที่มาตกกระทบ การทำงานของ LDR เนื่องจากตัว LDR สร้างจากสารกึ่งตัวนำแล้วนำมาฉาบลงแผ่นเซรามิกที่ใช้เป็นฐานรอง หากมีแสงมาตกกระทบตัวฐานรับแสงจะถ่ายเทพลังงานให้กับสารที่ฉาบไว้ ทำให้เกิดโฮลและอิเล็กตรอนวิ่งอิสระ ซึ่งเมื่อเกิดโฮลและอิเล็กตรอนวิ่งอิสระมากเท่าใด ความต้านทานจะลดลงเท่านั้น กล่าวคือ ยิ่งแสงที่มาตกกระทบมีความเข้มแสงที่มาก ความต้านทานก็จะยิ่งลดลงมากตามไปด้วย จากคุณสมบัติที่ว่านี้ทำให้สามารถนำ LDR มาใช้เป็นเซนเซอร์

สำหรับวัดแสงร่วมกับ Arduino ได้ โดยหลังจากที่แสงมากระทบที่ LDR แล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพความนำไฟฟ้า จากนั้นจะส่งข้อมูลไปยัง Arduino โดยเขียนชุดคำสั่งคอมพิวเตอร์สำหรับทดสอบความเร็วของรถจำลอง ซึ่งจะใช้ฮอลล์เซนเซอร์ในการนับจำนวนรอบที่ล้อหมุนผ่านการนับจำนวนแม่เหล็กและจับเวลาจากนำมาคำนวณเป็นความเร็ว ข้อดีของการทดสอบด้วยวิธีนี้คือสามารถทำได้ในทุกสถานที่ตามที่ต้องการได้



รูปที่ 2.6 การวัดความเร็วด้วยการตัดแสง (Light Gate)



รูปที่ 2.7 Light Dependent Resistor (LDR)

2.5.3. การวัดความเร็วด้วย GPS

การวัดความเร็วด้วย GPS คือการใช้ GPS จับความเคลื่อนไหวของรถผ่านดาวเทียม โดยการติดตั้ง GPS บนรถที่ต้องการจับความเคลื่อนไหว ซึ่งจะได้ค่าข้อมูลความเร็วและความเร่งในแกนต่าง ๆ ที่มีความละเอียดสูงตามความแม่นยำของ GPS ที่ใช้ ในการติดตั้งจำเป็นต้องจัดวางตัว GPS ให้เสารับสัญญาณอยู่ระนาบที่เหมาะสม แต่การใช้งานจับความเคลื่อนไหวของตัว GPS นั้นมีข้อจำกัดในการใช้ คือต้องอยู่ในที่โล่งและต้องไม่มีอะไรบังสัญญาณที่ดาวเทียมจับ เพราะจะทำให้ดาวเทียมไม่สามารถจับสัญญาณจากตัวตัว GPS ได้

2.5.4. การวัดความเร่งด้วย Accelerometer

Accelerometer คือเซนเซอร์ชนิดหนึ่งใช้สำหรับวัดความเร่งของสิ่งของต่าง ๆ ได้รวมถึงใช้วัดความเอียงอีกด้วย ซึ่งโดยทั่วไปเซนเซอร์ชนิดนี้จะติดตั้งอยู่ใน GPS ในรถยนต์ หรือแม้กระทั่งในโทรศัพท์มือถือในปัจจุบันโดยหลักการทำงานของ Accelerometer คือภายในของตัวเซนเซอร์จะประกอบด้วยสปริงและลูกตุ้มซึ่งหากเกิดการเคลื่อนไหวขึ้น ลูกตุ้มจะถูกดันไปอยู่ฝั่งตรงข้ามกับการเคลื่อนที่นั้น ๆ และตัวสปริงจะทำหน้าที่ดึงลูกตุ้มกลับเมื่อหยุดการเคลื่อนที่ การทำงานนี้จะทำให้สามารถวัดค่าความเร่งในแนวแกนต่าง ๆ ได้ โดยหากความเร่งของรถที่ติดตั้ง Accelerometer นั้นเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่นั่นคือความเร่งมีค่าเท่ากับศูนย์ ค่าที่วัดได้จะไม่เปลี่ยนแปลง

2.5.5. การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างรถต้นแบบและรถจำลองด้วยทฤษฎี Power to weight ratio

สำหรับการทดสอบเปรียบเทียบด้านสมรรถนะเครื่องยนต์ระหว่างรถต้นแบบและรถจำลองนั้นจำเป็นใช้ทฤษฎีด้านสมรรถนะเครื่องยนต์เข้ามาเกี่ยวข้อง เพื่อนำมาใช้เป็นตัวเปรียบเทียบเครื่องยนต์ ดังนั้นจึงใช้ทฤษฎีที่ใช้ตัวแปรในการคำนวณไม่ซับซ้อนมากนักคือ อัตราส่วนกำลังต่อหนัก ซึ่งอัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนัก(Power to weight ratio หรือ PTW) คืออัตราส่วนพละกำลังต่อน้ำหนักของรถ โดยจะแสดงให้เห็นว่าแรงม้า1 ตัวที่เครื่องยนต์ของรถสร้างนั้นแบกรับน้ำหนักรถเป็นอัตราส่วนเท่าไหร่ ซึ่งโดยทั่วไปใช้ในการแสดงถึงสมรรถนะอัตราเร่งของรถที่สนใจจากการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีนี้พบว่ารถไฟฟ้าชนิดประหยัดพลังงานมีค่าPTW อยู่ในช่วง 35 – 50 w/kg รถยนต์เชื้อเพลิงบ้านทั่วไปขนาด 1.5 - 2.0 L ค่า PTW อยู่ระหว่าง 50 – 120 w/kgและรถสปอร์ตมีค่า PTW อยู่ในช่วง 120 – 500+ w/kg โดยค่า PTW จะแปรผันตามอัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนักเครื่องยนต์ โดยยิ่งค่า PTW มีค่ามากจะยิ่งมีสมรรถนะในการเร่งความเร็วที่ดีอีกด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้อัตราส่วนนี้เป็นตัวเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบขับเคลื่อนระหว่างรถต้นแบบและรถจำลอง โดยมีสูตรดังนี้

$$\text{Power to weight ratio} = \frac{\text{Power } (\text{kw})}{\text{Weight } (\text{kg})} \tag{2.13}$$

แสดงตัวอย่างค่า PTW ของรถชนิดต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.3 – 2.6

ตารางที่ 2.3 ค่า PTW ของ Compact car

Car model	Power to weight Ratio
Toyota venza i4 2.7 L FWD 2009	80 W/kg
Ford focus 2.0 L auto 2007	87.1 W/kg
Toyota Hilux V6 4 L Pick up 2009	112.5 W/kg

ตารางที่ 2.4 ค่า PTW ของ Perfomance, Luxury car

Car model	Power to weight Ratio
Honda accord sedan V6 2011	124 W/kg
Mazda Rx-8 1.3 L wankel 2003	132 W/kg
BMW series 7 760li 6v V12 2006	145 W/kg

ตารางที่ 2.5 ค่า PTW ของ Sport car

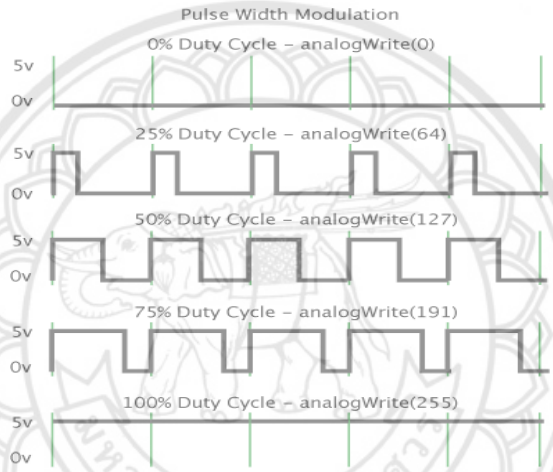
Car model	Power to weight Ratio
Nissan GT-R R35 3.8L V6 2008	228 W/kg
Porsche 911 GT2 2007	271 W/kg
McLaren P1 2013	452 W/kg

ตารางที่ 2.6 ค่า PTW ของ Big bike

Car model	Power to weight Ratio
Honda CBR 1000RR 2009	668 W/kg
BMW S1000RR 2009	693.3 W/kg
Ducati 1199 Panigale R 2012	915 W/kg

2.5.6. ควบคุมกำลังและความเร็วมอเตอร์ด้วยวิธี Pulse Width Modulation

การลดกำลังมอเตอร์ในกรณีที่มอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองมีกำลังมากไปด้วยวิธี PWM โดย PWM (Pulse Width Modulation) คือวิธีการส่งสัญญาณแบบสวิตช์ตามรูปที่ ซึ่งคือการส่งค่าสัญญาณแบบ digital โดยให้ค่า 0 ถึง 1 ซึ่งจะให้สัญญาณในรูปแบบความถี่คงที่ โดยอาศัยการควบคุมระยะเวลาส่งสัญญาณสูงและต่ำที่ต่างกัน โดยค่าสัญญาณเหล่านี้จะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การทำงาน (Duty cycle) ซึ่งจะทำให้ได้ค่าแรงดันเฉลี่ยของสัญญาณสวิตช์ต่างกันขึ้นกับระยะเวลาความห่างในการเปิดสัญญาณสูงต่ำนั้น ๆ ตัวอย่างเช่น มอเตอร์ตัวหนึ่งมีค่าแรงดันเท่ากับ 50V แต่ต้องการให้มอเตอร์ตัวนี้ใช้แรงดันเพียง 25V จึงกำหนดค่า Duty cycle ของมอเตอร์ตัวนี้เท่ากับ 50% จึงจะได้ค่าแรงดันจากมอเตอร์เท่ากับ 25V ตามต้องการ



รูปที่ 2.8 แสดงตัวอย่างการส่งค่าสัญญาณ (Duty cycle) ตั้งแต่ 0% - 100%

จากเนื้อหาทฤษฎีทั้งหมดที่ได้เรียบเรียงในบทนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับหลักการและขั้นตอนการประยุกต์ใช้ทฤษฎีย่อส่วนนบัคกิงแฮมพายสำหรับใช้ในการย่อส่วนและสร้างรถจำลองในบทถัดไป และเนื้อหาเกี่ยวและนำเสนอทฤษฎีสำหรับใช้ทดสอบสมรรถนะของรถจำลองในด้านสถิตยศาสตร์คือ การคำนวณหาจุดศูนย์กลางมวลสำหรับเปรียบเทียบความสมมูลระหว่างรถต้นแบบและรถจำลอง และการทดสอบด้านพลศาสตร์คือการทดสอบสมรรถนะความเร็วและความเร่ง ซึ่งส่วนของการทดลองนี้จะทำในบทที่ 4 ต่อไป

บทที่ 3
วิธีดำเนินโครงงาน

ในส่วนของบทนี้จะนำเสนอขั้นตอนการสร้างรถจำลองจากรถต้นแบบเพื่อใช้ทดสอบคุณสมบัติด้านสถิตยศาสตร์และพลศาสตร์ โดยจะแสดงขั้นตอนและหลักการการย่อขนาดของตัวรถต้นแบบโดยอาศัยหลักการย่อจากทฤษฎีบัคกิงแฮมพายรวมไปถึงการออกแบบตัวรถจำลอง และสุดท้ายจะนำเสนอขั้นตอนวิธีการทดสอบตัวรถจำลอง

3.1 การออกแบบและสร้างรถจำลอง

ในการออกแบบรถจำลองจะออกแบบให้รถจำลองใช้รูปทรงเดียวกันกับรถต้นแบบและจะปรับแต่งชิ้นส่วนบางตำแหน่งให้เข้ากับการติดตั้งอุปกรณ์บนรถจำลอง ในส่วนการหาขนาดเสกลของรถจำลองจะใช้วิธีการวิเคราะห์มิติด้วยทฤษฎีบัคกิงแฮมพายเพื่อให้ได้ขนาดรถจำลองที่ถูกต้องตามทฤษฎี การสร้างรถจำลองในส่วนของโครงรถจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบาและรองรับน้ำหนักอุปกรณ์ต่าง ๆได้ จึงพิจารณาใช้เครื่องพิมพ์สามมิติเนื่องจากง่ายต่อการออกแบบชิ้นส่วนและสามารถเลือกวัสดุที่นำมาพิมพ์ชิ้นงานได้โดยเลือกใช้วัสดุเส้นพลาสติกชนิด ABS จากนั้นติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมต่าง ๆ

3.1.1. หลักการออกแบบรถจำลอง

การออกแบบรถจำลองนี้ เพื่อให้เกิดความสมมูลทางสถิตยศาสตร์กับรถต้นแบบคือ รถอินวิว ทีแมค ฟอร์มูล่า ดังรูปที่ 3.1 แสดงรูปรถต้นแบบ รถอินวิว ทีแมค ฟอร์มูล่ารวมคนขับ โดยมีขนาด ยาว 1.780 เมตร กว้าง 1.180 เมตรดังในรูปที่ 3.2 จำเป็นต้องสร้างรถจำลองให้มีองค์ประกอบที่เหมือนกันในด้านของรูปทรงและอัตราส่วน ดังนั้นจึงเป็นเหตุให้พิจารณาออกแบบโครงสร้างตัวรถจำลองให้มีรูปทรงเดียวกันกับรถต้นแบบโดยใช้โปรแกรมเขียนแบบทางวิศวกรรม ในการออกแบบโครงรถจำลอง และบางส่วนที่มีลักษณะเฉพาะเช่น ที่วางแบตเตอรี่ ปีกนกหรือ ชิ้นส่วนคอม้า จะทำการออกแบบให้สามารถติดตั้งมอเตอร์ขับเคลื่อนที่เตรียมไว้และระบบกันสะเทือนได้

3.1.2. การกำหนดอัตราส่วนการย่อขนาดของรถจำลอง

รถที่ใช้เป็นต้นแบบในโครงงานนี้คือ อินวิว ทีแมค ฟอร์มูล่า โดยรถต้นแบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 3000 วัตต์ จำนวน 2 ตัวติดตั้งในล้อหลังทั้งสองข้าง และใช้แบตเตอรี่ขนาด 12 V จำนวน 6 ลูก น้ำหนักรวมคนขับ 400 กิโลกรัม ในการหาอัตราส่วนการย่อขนาดจำเป็นต้องทราบค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ ของรถจำลองและรถต้นแบบ เพื่อนำมาใช้กับทฤษฎีบัคกิงแฮมพายในการวิเคราะห์สภาพความคล้ายทางสถิตยศาสตร์จากการวัดได้ค่าข้อมูลต่าง ๆ ดังนี้

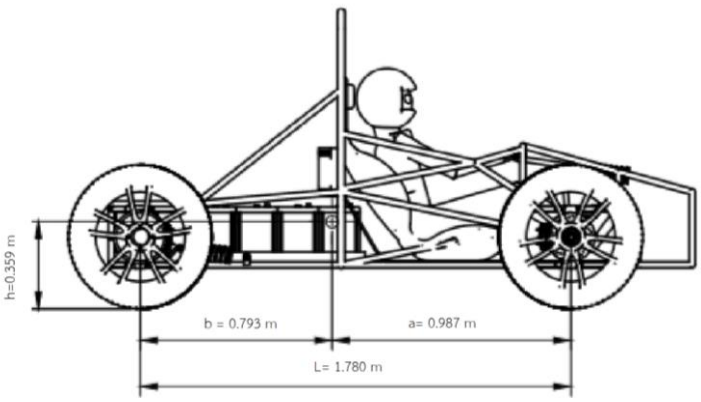
รูปที่ 3.1 ทีแมค อินวิว ฟอร์มูล่า

กำหนดตัวแปรต่าง ๆ ของรถจำลองและรถต้นแบบได้ดังต่อไปนี้

กำหนดให้

m	คือ	มวลของตัวรถ (Kg)
m_w	คือ	มวลของล้อ (Kg)
w	คือ	ความกว้างตัวรถ (m)
L	คือ	ความยาวตัวรถ (m)
h	คือ	ความสูงจุดศูนย์ถ่วง (m)
r	คือ	รัศมีล้อ (mm)
a	คือ	ระยะล้อหน้าถึงจุดcg (m)
b	คือ	ระยะล้อหลังถึงจุดcg (m)

จากนั้นทำการวัดจริงตัวแปรต่าง ๆ ของรถต้นแบบที่กำหนดไว้ และได้ค่าออกมาทั้งหมดดังต่อไปนี้



รถต้นแบบ

m_w	=	166.0kg
m	=	284.0kg
a	=	0.987m
b	=	0.793m
L	=	1.780m
w	=	1.180m
h	=	0.395m
r	=	330mm

รูปที่ 3.2 มิติของรถทีแมค อินวิว ฟอร์มูล่าพร้อมขนาด

จากการวัดจริงได้ค่าข้อมูลดังนี้

เนื่องจากในส่วนของรถจำลองจะใช้ตัวแปรจากล้อรถจำลองเป็นค่าตั้งต้นในการปรับพารามิเตอร์ตัวอื่น ๆ เพราะล้อรถจำลองเป็นชิ้นส่วนที่มีความยุ่งยากในการสร้างจึงเลือกล้อรถจำลองที่มีจำหน่ายในตลาดมาใช้ในการสร้าง โดยเพื่อให้ได้ขนาดเสกลที่ถูกต้องตามทฤษฎีดังนั้นตัวแปรของรถจำลองมีดังนี้

รถจำลอง

m_w = 0.848 kg (ต่อ 1 ล้อ)

r = 80 mm

การประยุกต์ใช้ทฤษฎีบักกิงแฮมพายกับตัวแปรทางสถิตยศาสตร์ของรถจำลองเป็นการนำทฤษฎีบักกิงแฮมพายมาประยุกต์ใช้กับตัวแปรทางพลศาสตร์ของรถจำลองเพื่อหาสมการกลุ่มตัวแปรไร้มิติของตัวแปรด้านพลศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง โดยจะได้กลุ่มค่าพายมาใช้เปรียบเทียบกับรถต้นแบบ เพื่อพิสูจน์ว่ารถทั้งสองคันยังส่งผลค่าข้อมูลและผลข้างเคียงแบบเดิมอยู่โดยมีขั้นตอนดังนี้

จากทฤษฎีบักกิงแฮมพายในบทที่สองจะได้ขั้นตอนการจัดตัวแปรดังนี้

1. กำหนดตัวแปรทางพลศาสตร์ที่เกี่ยวข้องดังนี้

m_w	คือ	มวลของตัวรถ (Kg)
m	คือ	มวลของล้อ (Kg)
a	คือ	ความกว้างของตัวรถ (m)
b	คือ	ความยาวของตัวรถ (m)
L	คือ	ความสูงจุดศูนย์ถ่วง (m)
h	คือ	ระยะระหว่างล้อหน้าถึงจุด cg (m)
w	คือ	ระยะระหว่างล้อหลังถึงจุด cg (m)
U	คือ	ความเร็ว (m/s)

2. เลือกกลุ่มมิติพื้นฐานอิสระ MLT (mass, length, time) โดยในการเลือกกลุ่มมิติพื้นฐานอิสระจะเป็นตามทฤษฎี (หัวข้อ2.3.2) ที่กล่าวไว้ในบทที่ 2
3. เลือก m U L เป็นตัวแปรซ้ำ
4. จำนวนเทอม = n – m = 8 – 3 = 5

โดยในงานปริญญานิพนธ์นี้จะเลือกใช้ค่าข้อมูลพื้นฐานทางกายภาพในการวิเคราะห์สภาพความคล้ายเท่านั้น เช่น m, m_w, a, b, L, H, U ดังนั้นจะคำนวณเฉพาะกลุ่มพายที่มีค่าข้อมูลเหล่านี้

หมายเหตุ การกำหนดอัตราส่วนการย่อจะเลือกใช้ขนาดของล้อรถจำลองเป็นค่าตั้งต้นในการวิเคราะห์สเกลรถจำลองเนื่องจากส่วนของล้อรถไม่สามารถสร้างขึ้นเองได้ จึงสั่งซื้อล้อรถจำลองในขนาดที่เล็กกว่ารถต้นแบบ 4 เท่าจากอินเทอร์เน็ต ดังนั้นจึงพิจารณาให้อัตราส่วนการย่อเท่ากับ 1 : 4 ดังนั้นจะได้

3.1.3. วิเคราะห์มิติของกลุ่มพาย

การวิเคราะห์หากลุ่มภายเนื่องจากจะนำตัวแปรที่ได้ไปเปรียบเทียบยานพาหนะจริงกับย่อส่วนโดยใช้อัตราส่วนการย่อเท่ากับ 1 : 4 เพื่อพิสูจน์ว่าเมื่อขนาดเปลี่ยนไปยังคงส่งผลค่าข้อมูลละค่าข้างเคียงเช่นเดิมอยู่

กำหนดให้ L_{actual} = 1.780 m ➔ 1.780/4 = L_{scale} = 47.46 cm

1. พิจารณามิติปฐมภูมิของตัวแปรยกกำลังแต่ละตัวได้ดังนี้และเลือกตัวแปรซ้ำสามตัวคือ m,U,L

ตัวอย่างสมการ $\pi_1 = m_w m^a U^b L^c$

โดยกำหนดให้ตัวแปรยกกำลัง a, b, c ในที่นี้เป็นตัวแปรยกกำลังสำหรับสมการวิเคราะห์มิติเท่านั้น

2. ทำการเขียนมิติของกลุ่มตัวแปรโดยการจัดให้อยู่ในรูปมิติปฐมภูมิ โดยจะใส่ตัวแปรยกกำลังเฉพาะตัวแปรซ้ำที่เลือกไว้ในตอนต้นเท่านั้น ตัวแปรที่นำมาจับคู่กับตัว แปรซ้ำจะไม่ใส่ตัวแปรยกกำลังดังนั้นจะได้

$$\pi_1 = [m][m]^a \left[\frac{L}{T}\right]^b [L]^c$$

3. จับตัวแปรยกกำลังที่มีมิติเดียวกันมารวมกันแต่ละมิติให้เท่ากับศูนย์เพื่อหาค่าของตัวแปรยกกำลัง a b และ c ดังนี้

$$\pi_1 = m_w M^0 L^0 T^0 \qquad (3.1)$$

สำหรับมิติ	M:	1 + a =0
สำหรับมิติ	L:	b + c =0
สำหรับมิติ	T:	– b =0
ทำให้ได้		a = -1, b = 0, c = 0
ดังนั้นเทอมไร้มิติคือ		$\pi_1 = \frac{m_w}{m}$

จากนั้นจับคู่ตัวแปรที่เหลือเข้ากับตัวแปรซ้ำที่เลือกไว้และคำนวณซ้ำจนครับทุกตัวแปรให้ได้ค่า π ในแต่ละกลุ่มออกมาดังต่อไปนี้

π_2 = $w \cdot m^a U^b L^c$ (3.2)

= $[L][m]^a \left[\frac{L}{T}\right]^b [L]^c$

= $M^0 L^0 T^0$

สำหรับมิติ M: a =0
สำหรับมิติ L: 1+b + c =0
สำหรับมิติ T: -b =0
ทำให้ได้ a = 0, b = 0, c = -1
ดังนั้นเทอมไร้มิติคือ $\pi_2 = \frac{w}{L}$

π_3 = $h \cdot m^a U^b L^c$ (3.3)

= $[L][m]^a \left[\frac{L}{T}\right]^b [L]^c$

= $M^0 L^0 T^0$

สำหรับมิติ M: a =0
สำหรับมิติ L: 1+ b + *c* =0
สำหรับมิติ T: -b =0
ทำให้ได้ a = 0, b = 0, c = -1
ดังนั้นเทอมไร้มิติคือ $\pi_3 = \frac{h}{L}$

π_4 = $a \cdot m^a U^b L^c$ (3.4)

= $[L][m]^a \left[\frac{L}{T}\right]^b [L]^c$

= $M^0 L^0 T^0$

สำหรับมิติ M: a =0
สำหรับมิติ L: 1+ b + *c* =0
สำหรับมิติ T: -b =0
ทำให้ได้ a = 0, b = 0, c = -1
ดังนั้นเทอมไร้มิติคือ $\pi_4 = \frac{a}{L}$

$$\pi_5 = b \cdot m^a U^b L^c \qquad (3.5)$$

$$= [L][m]^a \left[\frac{L}{T}\right]^b [L]^c$$

$$= M^0 L^0 T^0$$

สำหรับมิติ M: a =0
สำหรับมิติ L: 1+ b + c =0
สำหรับมิติ T: -b =0
ทำให้ได้ a = 0, b = 0, c = -1
ดังนั้นเทอมไร้มิติคือ $\pi_5 = \frac{b}{L}$

กลุ่มพายทั้งหมดที่ได้จากแบบจำลองการเคลื่อนที่ของพลศาสตร์มีดังนี้

$$\pi_1 = \frac{m_w}{m} \quad \pi_2 = \frac{w}{L} \quad \pi_3 = \frac{h}{L} \quad \pi_4 = \frac{a}{L} \quad \pi_5 = \frac{b}{L}$$

ทำการคำนวณหาค่าของกลุ่มพายแต่ละกลุ่ม

จาก $\pi_1 = \frac{m_w}{m} \rightarrow$

$$\frac{m_{w_{actual}}}{m_{actual}} = \frac{m_{w_{scale}}}{m_{scale}} \qquad (3.6)$$

$$\frac{116}{284} = \frac{0.848}{m_{scale}}$$

$$\therefore m_{scale} = 2.076 \text{ kg}$$

จาก $\pi_2 = \frac{w}{L} \rightarrow$

$$\frac{w_{actual}}{L_{actual}} = \frac{w_{scale}}{L_{scale}} \qquad (3.7)$$

$$\frac{1.18}{1.78} = \frac{w_{scale}}{0.536}$$

$$\therefore w_{scale} = 0.3556 \text{ m}$$

จาก $\pi_3 = \frac{h}{L} \rightarrow$

$$\frac{h_{actual}}{L_{actual}} = \frac{h_{scale}}{L_{scale}} \quad (3.8)$$

$$\frac{0.359}{1.78} = \frac{h_{scale}}{0.536696}$$

$$\therefore h_{scale} = 0.108 \text{ m}$$

จาก $\pi_4 = \frac{a}{L} \rightarrow$

$$\frac{a_{actual}}{L_{actual}} = \frac{a_{scale}}{L_{scale}} \quad (3.9)$$

$$\frac{0.987}{1.78} = \frac{a_{scale}}{0.536696}$$

$$\therefore a_{scale} = 0.297 \text{ m}$$

จาก $\pi_5 = \frac{b}{L} \rightarrow$

$$\frac{b_{actual}}{L_{actual}} = \frac{b_{scale}}{L_{scale}} \quad (3.10)$$

$$\frac{0.793}{1.74} = \frac{b_{scale}}{0.239}$$

$$\therefore b_{scale} = 0.239 \text{ m}$$

ตารางที่ 3.1 ค่าข้อมูลจำเพาะระหว่างรถจำลองและรถต้นแบบ

ตัวแปร	m_w	m	a	b	L	w	h
Scaled	0.848 kg	2.076 kg	0.297 m	0.239 m	0.536 m	0.355 m	0.108 m
Actual	116 kg	284 kg	0.987 m	0.793 m	1.78 m	1.18 m	0.359 m

ค่าที่ได้จากตารางที่ 3.1 นี้จะนำไปใช้คำนวณหาค่าของกลุ่มพายแต่ละกลุ่ม เพื่อใช้เทียบความสมมูลระหว่างรถต้นแบบและรถจำลองดังตารางที่ 3.2 ดังนี้

ตารางที่ 3.2 ค่ากลุ่มตัวแปรไร้มิติระหว่างรถจำลองและรถต้นแบบ

Pi group	$\pi_1 = \frac{m_w}{m}$	$\pi_2 = \frac{w}{L}$	$\pi_3 = \frac{h}{L}$	$\pi_4 = \frac{a}{L}$	$\pi_5 = \frac{b}{L}$
Scaled	0.408	0.5544	0.4458	0.6634	0.1856
Actual	0.408	0.5545	0.4455	0.6629	0.1853

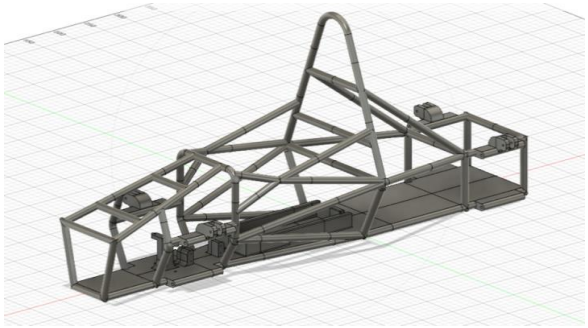
จากการประยุกต์กลุ่มตัวแปรไร้มิติไปใช้กับตัวแปรด้านพลศาสตร์จนได้ค่ากลุ่มพาย ทำให้นำค่ากลุ่มพายเหล่านี้ไปใช้ในการอ้างอิงในการออกแบบและสร้างรถจำลองที่มีความคล้ายกับรถต้นแบบในด้านเรขาคณิต

โดยจะเห็นได้ว่าเมื่อคำนวณค่าสัดส่วนในกลุ่มพายออกมานั้น ค่าที่วัดได้จากรถจริงและค่าที่ได้จากการคำนวณมีความใกล้เคียงกันมาก

3.1.4. การออกแบบและสร้างรถจำลอง

ตัวโครงรถจำลองนี้ต้องการใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบาและแข็งแรงในการสร้างโครงรถจำลองการใช้วัสดุประเภทโลหะจะมีน้ำหนักมากเกินไป จึงพิจารณาใช้เครื่องพิมพ์สามมิติรุ่น Up Mini 2 3D Printer ในการพิมพ์ชิ้นส่วนโครงรถจำลอง และเลือกใช้วัสดุเส้นพลาสติกชนิด abs filament ซึ่งมีคุณสมบัติเหนียวและแข็งแรง ในการพิมพ์รถจำลองจะใช้คำสั่งพิมพ์ให้เนื้อพลาสติกเต็ม 100% ไม่ให้มีช่องว่างภายในชิ้นส่วน ซึ่งจะทำให้ได้ชิ้นส่วนที่มีตันและมีความแข็งแรงที่สุด ในการออกแบบจะใช้โปรแกรมเขียนแบบในการออกแบบโครงรถ โดยจะใช้รูปทรงเดียวกันกับรถต้นแบบซึ่งจะโครงรถจำลองออกมาดังรูปที่ 3.3 ซึ่งจะแสดงมุมมองต่างๆ ของโครงรถจำลอง โดยจะปรับเปลี่ยนชิ้นส่วนบางตำแหน่งให้เหมาะสมกับการติดตั้งอุปกรณ์สำคัญต่าง ๆ โดยจะออกแบบชิ้นส่วนคอม้ากับปีกนกใหม่ตามรูปที่ 3.4 (ก) และ (ข) และเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้งแบตเตอรี่เป็นในส่วนของเบาะนั่งคนขับตามรูปที่ 3.5 เพื่อให้สามารถติดตั้งล้อรถเข้ากับตัวโครงรถได้ และระบบกันสะเทือนจะใช้โช้คสปริงโดยจะออกแบบใหม่ให้มีเดือยยึดสปริงเข้ากับล้อ โดยในขั้นตอนการพิมพ์จะตัดแบ่งพิมพ์ทีละส่วนโดยออกแบบให้ทุกชิ้นส่วนมีข้อต่อสำหรับต่อเข้ากับชิ้นส่วนอื่น และนำมาประกอบเป็นคันเมื่อพิมพ์เสร็จ ในขั้นตอนการประกอบจะต่อชิ้นส่วนและใช้กาวหยอดที่ข้อต่อทุกจุดเพื่อให้แข็งแรงและทิ้งไว้แห้ง จากนั้นติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม

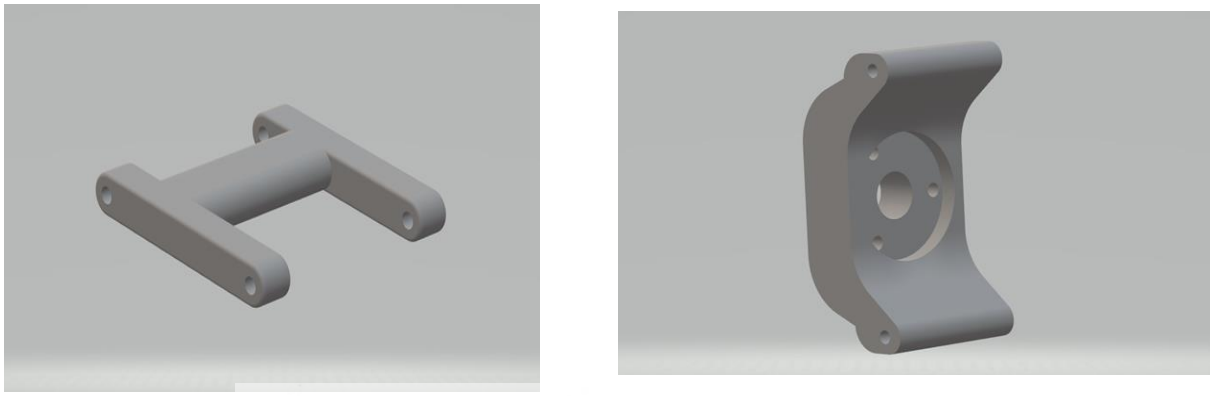
(ก) ด้านข้างโครงรถจำลอง **(ข)** ด้านหน้าโครงรถจำลอง



(ค) มุมมองสามมิติของรถจำลอง

รูปที่ 3.3 โครงรถจำลองที่ออกแบบจากโปรแกรม fusion360

โดยในส่วนของปีกนกและคอม้าจะออกแบบใหม่ให้เหมาะสมกับมอเตอร์และล้อโดยในส่วนของคอม้าจะออกแบบให้มีฐานจับลักษณะเป็นหลุมวงกลมสำหรับยึดมอเตอร์ที่เตรียมไว้ดังรูปที่ 3.4

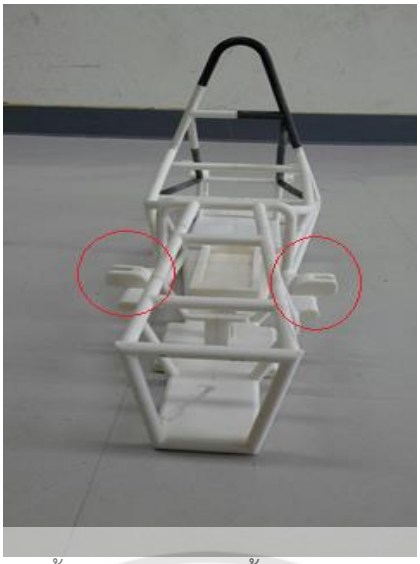


(ก) ปีกนกที่ออกแบบใหม่ **(ข)** คอม้าสำหรับยึดมอเตอร์เข้ากับล้อแบบอินวิว

รูปที่ 3.4 ปีกนกและคอม้าที่ออกแบบใหม่

รูปที่ 3.5 ตำแหน่งติดตั้งแบตเตอรี่

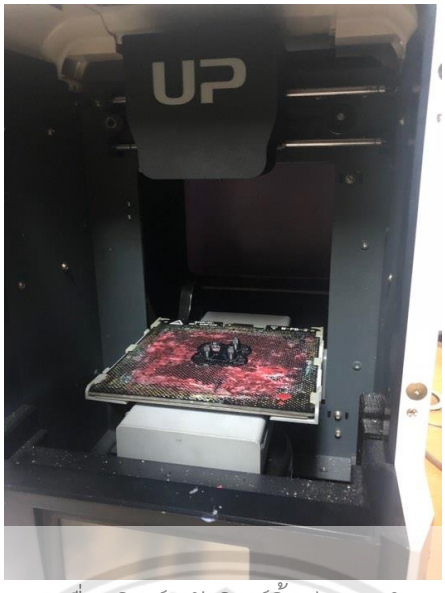
จะเห็นได้ว่าตำแหน่งของคนขับได้เปลี่ยนนำเบาะนั่งและพวงมาลัยคนขับออกและแทนด้วยช่องสำหรับติดตั้งแบตเตอรี่ตามรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.6 ชิ้นส่วนสำหรับติดตั้งอุปกรณ์กันสะเทือน

ในส่วนของระบบช่วงล่างกันสะเทือนจะใช้สปริงเหมือนรถบังคับวิทยุทั่วไป โดยจะออกแบบให้มีเดือยออกมา (ในวงกลม) เพื่อใช้ยึดจับสปริงระหว่างตัวโครงรถและล้อดังรูปที่ 3.6

รูปที่ 3.7 โครงรถจำลองเมื่อพิมพ์เสร็จ



รูปที่ 3.8 เครื่องพิมพ์หลังพิมพ์ชิ้นส่วนรถจำลองเสร็จ

3.1.5. ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม ระบบขับเคลื่อน และระบบกันสะเทือน

ในส่วนของอุปกรณ์ควบคุมความเร็วนั้นจะใช้กล่องควบคุมความเร็ว (Speed controller) ในการบังคับความเร็วของมอเตอร์ โดยจะติดตั้งไว้ในกล่องเก็บอุปกรณ์ควบคุม ซึ่งตัวกล่องนี้จะติดตั้งไว้ด้านหลังช่องวางแบตเตอรี่ ในส่วนของช่วงล่างจะใช้โช้คสปริงเป็นระบบกันสะเทือน โดยตัวสปริงจะถูกยึดด้วยเดือยที่ออกแบบไว้ที่ตำแหน่งโครงรถและปีกนกทั้งล้อหน้าและล้อหลัง และระบบควบคุมการเลี้ยวจะใช้มอเตอร์เซอร์โวควบคุมวงเลี้ยวของรถจำลอง โดยติดตั้งไว้ในช่องวางมอเตอร์เซอร์โวตำแหน่งด้านหน้าของช่องวางแบตเตอรี่ และมอเตอร์ขับเคลื่อนจะติดตั้งที่ล้อหลังแบบอินวิวตามรถต้นแบบ โดยจะต่อสายไฟเลี้ยงจากอุปกรณ์ควบคุมเข้ากล่องเก็บสายไฟที่ติดตั้งไว้ช่วงท้ายของรถดังรูปที่ 3.9

(ก) ติดตั้งมอเตอร์เข้ากับคอม้าและปีกนก

(ข) ตำแหน่งที่ติดตั้งแบตเตอรี่

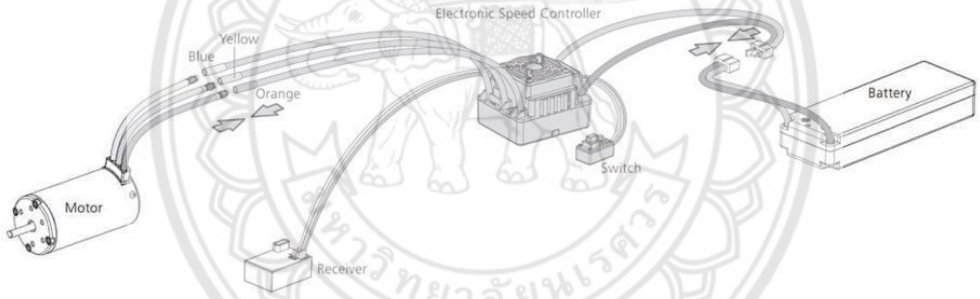
รูปที่ 3.9 การประกอบรถจำลอง

ก. วัสดุอุปกรณ์

1) ชุดควบคุมความเร็วมอเตอร์ Hobbywing รุ่น 8BL150

อุปกรณ์ควบคุมความเร็วนี้จะทำหน้าที่ควบคุมระดับความเร็วของมอเตอร์ รวมไปถึงการเบรก และถอยหลัง โดยตัวควบคุมตัวนี้จะมีฮอลล์เซนเซอร์ติดตั้งมาด้วย เพื่อใช้สำหรับในการทดสอบต่อไป

รูปที่ 3.10 ตัวควบคุมความเร็วของ Hobbywing



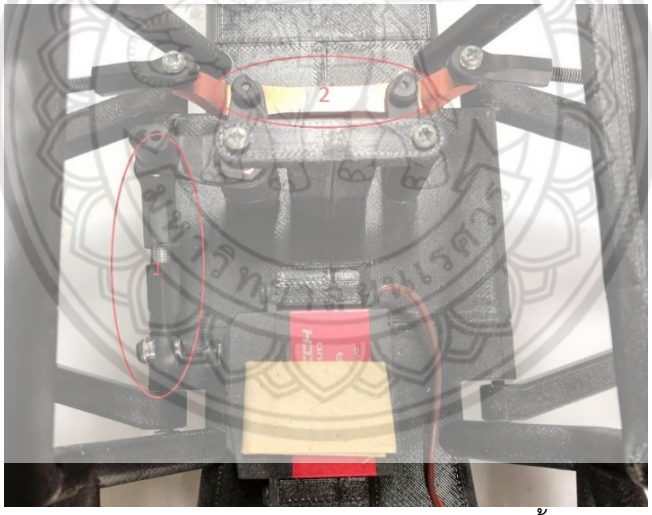
รูปที่ 3.11 วิธีการต่อสายไฟของตัวควบคุมความเร็ว

คุณสมบัติ : ตัวควบคุมความเร็ว รุ่น WP 8BL150 ชนิดไร้แปรงถ่าน, กระแสไฟต่อเนื่อง 150A , แบตเตอรี่ลิโพ 4S, เอาต์พุต 6V/3A (โหมดสวิตช์) โดยเลือกใช้ตัวควบคุมความเร็วรุ่นนี้เพราะสามารถรับคำสั่งโดยตรงจากรีซีพเวอร์ได้ และมีคำสั่งสำหรับรถบังคับโดยเฉพาะเช่น เดินหน้า ถอยหลัง และเบรก เป็นต้น

2) ชุดควบคุมมุมเลี้ยว Hypertech รุ่น 150A

รถจำลองที่สร้างขึ้นนี้ใช้เซอร์โวมอเตอร์ในการบังคับเลี้ยวที่ล้อจำนวนหนึ่งตัว โดยกลไกบังคับเลี้ยวเป็นแบบ Crank rocker โดยจะใช้ก้านส่งที่ต่อไว้กับเฟืองมอเตอร์ต่อเข้ากับคันชักโดยจะต่อกันแบบคนละระนาบเพื่อบังคับทิศทางการเลี้ยว

รูปที่ 3.12 เซอร์โวมอเตอร์ของ Hypertech



รูปที่ 3.13 การต่อก้านส่ง (1) และคันชัก (2) ของกลไกบังคับเลี้ยวแบบ Crank rocker

คุณสมบัติ : เซอร์โวมอเตอร์บังคับเลี้ยวกระแสตรง รุ่น AH1500A แรงดันไฟ 4-6V สามารถหมุน 180องศาภายใน 0.15 วินาที ที่ 4.8 โวลต์ และสามารถให้แรงบิดถึง 16 นิวตันเมตร และมีน้ำหนักเบาเพียง 58 กรัม จึงเป็นเหตุให้เลือกใช้เซอร์โวมอเตอร์ตัวนี้

3).ระบบขับเคลื่อน

รถจำลองนี้ใช้พลังขับเคลื่อนจากมอเตอร์รุ่น DIY Electric Skateboard Hub Motor เป็นมอเตอร์ชนิดไร้แปลงถ่าน ซึ่งแต่เดิมเป็นมอเตอร์ที่ใช้สำหรับสเกตบอร์ดไฟฟ้า โดยนำมาสวมเข้าไปด้านในของล้อของรถจำลองเพื่อใช้ในการขับเคลื่อน

รูปที่ 3.14 มอเตอร์ Wheel Hub Motor

คุณสมบัติ : มอเตอร์สำหรับชนิดดุมล้อ แรงดันไฟ 24V-36V, ความเร็วสูงสุด 2500 rpm เนื่องจากต้องการใช้มอเตอร์ชนิดที่สามารถติดตั้งแบบอินวิว ซึ่งมอเตอร์ตัวนี้เป็นฮับมอเตอร์ใช้สำหรับขับเคลื่อนล้อโดยตรง และมีขนาดที่พอดีสำหรับติดตั้งเข้ากับล้อที่เตรียมไว้

4).ล้อและยาง

ล้อและยางที่ใช้เป็นล้อสำหรับรถบังคับวิทยุขนาดใหญ่ชนิดทางเรียบมีขนาดอัตราส่วน 1 : 4 ยี่ห้อ Louise เนื่องจากล้อรถจำลองเป็นชิ้นส่วนที่มีความยุ่งยากในการสร้าง จึงเลือกใช้ล้อรถบังคับที่มีขายตามท้องตลาด โดยเลือกเสกล 1 : 4 เพราะเป็นขนาดที่มีความพอดีไม่ใหญ่และเล็กเกินไปในการสร้างและทดสอบรถจำลองขนาดย่อส่วน

รูปที่ 3.15 ล้อและยาง

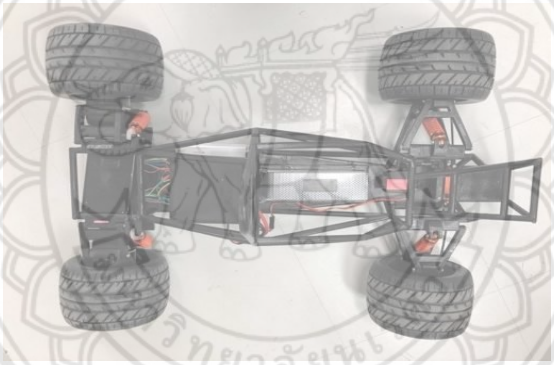
คุณสมบัติ : ล้อรถอัตราส่วน 1:4 มีเส้นผ่าศูนย์กลางขอบ 3.9 นิ้ว, ขนาดหกเหลี่ยม 17 มิลลิเมตร และ ออฟเซ็ต 0.5 นิ้ว

5) ระบบกันสะเทือน

รถจำลองนี้ติดตั้งระบบกันสะเทือนโดยใช้อลูมิเนียมโช้คของ kasemoto เป็นตัวซับแรงสะเทือน

รูปที่ 3.16 อลูมิเนียมโช็ค

คุณสมบัติ : โช้คอัพกันสะเทือนพลาสติกแบบใช้น้ำมัน ปรับระดับความแข็งได้ตามต้องการ



(ก) ด้านบนและด้านข้าง

(ข) มุมมองสามมิติ

รูปที่ 3.17 รถจำลองเมื่อติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมและระบบต่าง ๆ เสร็จ

3.2 วิธีทำการทดสอบ

การทดสอบรถจำลองที่สร้างขึ้นนี้ มีจุดประสงค์เพื่อต้องการทราบคุณสมบัติด้านสถิตยศาสตร์และพลศาสตร์ โดยการทดลองด้านสถิตยศาสตร์จะทำการเปรียบเทียบความสมมูลของจุดศูนย์กลางมวลระหว่างรถต้นแบบและรถจำลอง และด้านพลศาสตร์จะเป็นการทดสอบอัตราเร็วของรถจำลอง ซึ่งจะแบ่งการทดสอบความเร็วออกเป็นสองชนิดคือ

- การทดสอบเปรียบเทียบการวัดความเร็วจริงและความเร็วที่วัดได้จากล้อ และ
- การทดสอบอัตราเร็วจาก GPS

3.2.1 การทดสอบด้านสถิตยศาสตร์

เป็นการทดสอบคุณสมบัติด้านต่าง ๆของรถจำลองในขณะที่รถหยุดนิ่ง

3.2.1.1 ทดสอบเปรียบเทียบจุดศูนย์กลางมวลระหว่างรถจำลองและรถต้นแบบ

เป็นการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบความสมมูลของจุดศูนย์กลางมวลขณะอยู่นิ่งระหว่างรถจำลองและรถต้นแบบ

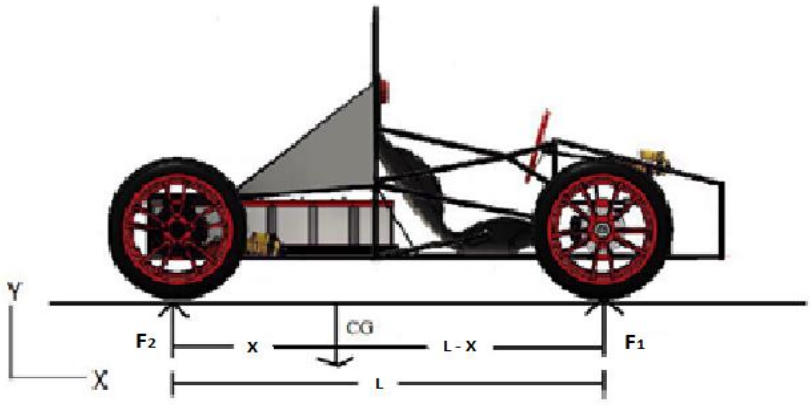
ก. อุปกรณ์

(1) รถจำลองและรถต้นแบบ
(2) แม่แรงยกรถ
(3) ตาชั่งน้ำหนักดิจิตอลสำหรับรถจำลองและรถต้นแบบ
(4) อิฐและกล่องพลาสติกสำหรับใช้เป็นฐานรองล้อรถต้นและรถจำลอง

ข. วิธีการทดสอบ

จากทฤษฎีในหัวข้อที่ 2.3 การหาจุดศูนย์กลางมวล ในการทดสอบเปรียบเทียบค่าจุดศูนย์กลางมวลจะหาจุดศูนย์กลางมวลในทิศทางสองแนวแกนคือ x และ y สำหรับแกน z นั้นระนาบรถทั้งสองข้างมีความสมมูลกันจึงกำหนดให้ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลอยู่กลางตัวรถ โดยในการทดสอบจะใช้เครื่องชั่งน้ำหนักวัดแรงที่กระทำต่อพื้นจากล้อทีละข้าง ซึ่งจะมีฐานรองรับล้อข้างที่ไม่ได้ชั่งน้ำหนักด้วย โดยมีแม่แรงให้มีระดับความสูงเดียวกันกับเครื่องชั่ง และนำน้ำหนักของล้อที่ชั่งได้มาคำนวณหาจุดศูนย์กลางมวลด้วยสมการโมเมนต์ของแรง

การคำนวณหาจุดศูนย์กลางมวลในแนวแกน x ของรถจำลอง



รูปที่ 3.18 ประกอบการคำนวณหาจุด cg ในแกน x ของรถจำลอง

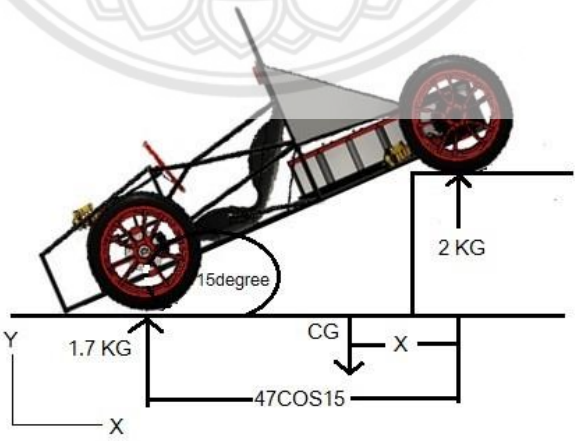
จากสมการที่ 2.1 $\sum M_x = (F_1)(L-x) - (F_2)x$

กำหนดให้

F คือ แรงที่ล้อกระทำกับพื้นและ F_1 คือแรงที่ล้อคู่หน้า และ F_2 คือแรงที่ล้อคู่หลัง

L คือ ระยะห่างระหว่างเพลาล้อหน้าและล้อหลัง

X คือ ระยะระหว่างเพลาล้อหลังถึงจุด CG



รูปที่ 3.19 ประกอบการคำนวณหาจุด cg ในแนวแกน y ของรถจำลอง

สำหรับในแนวดิ่ง

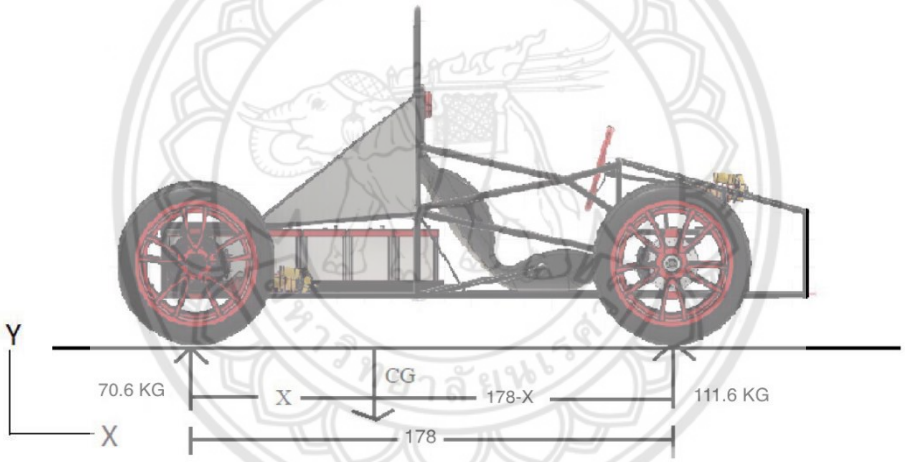
จากสมการที่ 2.5 $\sum My = 0; F_a(b\cos\theta) - W_f\cos\theta(x) - W\sin\theta(y1) = 0$

กำหนดให้

F_a	คือ	แรงที่ล้อคู่หน้ากระทำกับพื้น
W	คือ	น้ำหนักรวมของรถ
W_f	คือ	น้ำหนักส่วนเพลาหน้า
x	คือ	ระยะเพลาหลังถึงเพลาหน้า
y_1	คือ	ความสูงของจุด CG จากแนวอ้างอิง

โดย Y คือความสูงระหว่างจุดศูนย์กลางมวลและเพลาล้อ

คำนวณหาจุดศูนย์กลางมวลในแนวแกน x ของรถต้นแบบสำหรับเปรียบเทียบกับรถจำลอง



รูปที่ 3.20 ประกอบการคำนวณหาจุด cg ในแนวแกน x ของรถต้นแบบ

รูปที่ 3.21 การชั่งน้ำหนักรถต้นแบบเพื่อหาแรงปฏิกิริยาที่ล้อ

ใช้สมการโมเมนต์ของแรง $\sum M_x = (F_1)(L-x) - (F_2)x$

จะได้ $x = \dfrac{(F_1)L}{(F_1 + F_2)}$

ดังนั้น $x = \dfrac{(223.2 \times 178)}{364.4} = 109\text{cm}$

จะเห็นได้ว่าจุดศูนย์กลางมวลห่างจากเพลาล้อหลังเป็นระยะ 109 cm

รูปที่ 3.22 การชั่งน้ำหนักล้อหาจุด cg ในแนวแกน y

จากสมการ

$$\sum My = 0; Fa\left(b\cos\theta\right) - W\cos\theta\left(x\right) - W\sin\theta\left(y_1\right) = 0$$

$$y = \frac{153.4(178\cos 15) - 364.4\cos 15(178 - 109.02)}{364.4\sin 15}$$

y=22 cm

เพราะฉะนั้น จุดCGอยู่ห่างจากเพลาล้อหลังไปทางด้านหน้า 109 cm และอยู่สูงจากเพลาล้อ 22 cm

3.2.2 การทดสอบด้านพลศาสตร์

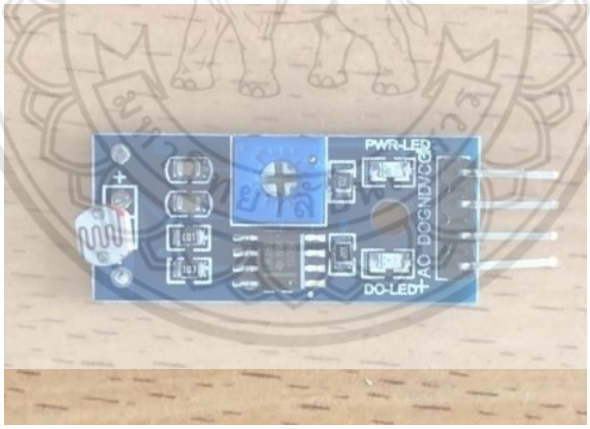
เป็นการทดสอบขณะรถเคลื่อนไหวโดยจะทดสอบเปรียบเทียบค่าความเร็วที่วัดได้ระหว่างการวัดความเร็วจากฮอลล์เซนเซอร์ที่มีอยู่ในตัวควบคุมความเร็ว โดยฮอลล์เซนเซอร์นี้เป็นอุปกรณ์วัดสนามแม่เหล็กโดยอาศัยตัวรับรู้ฮอลล์ ซึ่งทำงานโดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ (Hall effect) ตัวรับรู้ฮอลล์เป็นวงจรรวมที่ทำให้เกิดความต่างศักย์ซึ่งเป็นสัดส่วนตรงกับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ผ่านในแนวดิ่ง เมื่อนำ

ตัวรับรู้ฮอลล์ไปต่อกับโวลต์มิเตอร์ แล้วนำไปวางใกล้บริเวณที่มีสนามแม่เหล็กก็จะทำให้ทราบค่าความเข้มของสนามแม่เหล็ก โดยในการทดลองนี้ จะใช้ฮอลล์เซนเซอร์มานับจำนวนแม่เหล็กในมอเตอร์ที่หมุน โดยเป็นการนับรอบการหมุนของมอเตอร์ด้วยจำนวนแม่เหล็กซึ่งจะเป็นค่าระยะทางที่รถวิ่งและพร้อมจับเวลา จากนั้นนำค่าจำนวนแม่เหล็กที่นับได้มาคำนวณเป็นความเร็วด้วยสมการที่ 2.10 และการทดสอบอีกชุดจะเป็นการวัดความเร็วจากชุดทดสอบความเร็วที่ใช้โมดูลตรวจจับแสงและตัวยิงเลเซอร์ โดนทำการจับเวลาที่รถจำลองวิ่งผ่าน โดยชุดทดสอบความเร็วนี้ทำโดยใช้แผงวงจร Arduino และ โมดูลตรวจจับแสงโดยใช้แสงเลเซอร์ยิงเข้าไปยังเซนเซอร์รับแสงของโมดูล โดยจะมีตัวรับส่งแสงเลเซอร์ด้วยกันทั้งหมดสองชุดตาม ภาพที่ 3.24 และเขียนคำสั่งให้จับเวลาและหยุดเวลาเมื่อรถจำลองวิ่งผ่านตัวรับส่งเลเซอร์ชุดแรกและชุดที่สอง โดยตั้งระยะห่างระหว่างชุดรับส่งแสงเลเซอร์แรกและชุดที่สองเป็นระยะ 1 เมตร จากนั้นนำค่าเวลาที่ได้ไปคำนวณหาความเร็วด้วยสมการที่ 2.10 และเปรียบเทียบกับการทดสอบแรก

3.2.2.1 ทดสอบเปรียบเทียบความเร็วระหว่างชุดจับเวลาด้วยการตัดแสงเลเซอร์และการใช้ฮอลล์เซนเซอร์นับจำนวนแม่เหล็กที่ล้อหมุน

ก. อุปกรณ์

1) โมดูลตรวจจับแสง LDR
2) ตัวยิงแสงเลเซอร์
3) บอร์ดArduino

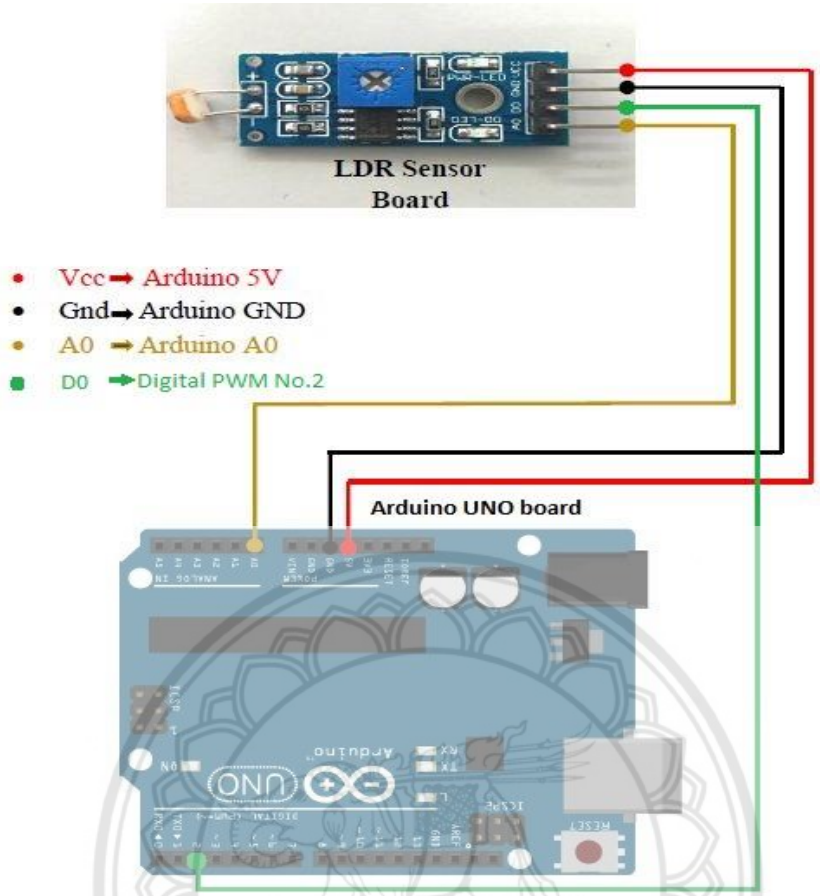


รูปที่ 3.23 LDR sensor

รูปที่ 3.24 บอร์ด ARDUINO รุ่น UNO

ข. วิธีการทดสอบ

ในการทดสอบจะแบ่งออกการวัดความเร็วเป็นสองแบบแล้วนำมาเปรียบเทียบกันภายหลัง โดยส่วนแรกจะใช้การเขียนคำสั่งคอมพิวเตอร์ตามรูปที่ 2.10 เพื่อนับจำนวนแม่เหล็กจากฮอลล์เซนเซอร์ภายในมอเตอร์ที่หมุนและพร้อมจับเวลา โดยในหนึ่งรอบการหมุนของมอเตอร์จะมีแม่เหล็กทั้งหมดอยู่ 10 ตัวซึ่งจะได้เป็นค่าระยะทางจากนั้นนำค่าระยะทางประกอบกับค่าเวลาที่ได้มาคำนวณเป็นความเร็วด้วยสมการที่ 2.10 สำหรับการทดลองส่วนที่สองจะใช้การจับเวลาผ่านโมดูลตรวจจับแสง ตัวโมดูลจับแสงทำงานโดยจับความเข้มข้นแสงที่มาตกกระทบกับตัวรับแสงหรือ แอลดีอาร์ คือ ตัวต้านทานแปรค่าตามแสง และเมื่อมีแสงมากระทบตัวเซ็นเซอร์จะเปลี่ยนค่าความต้านทานตามความเข้มแสง โดยจะทำงานเป็นลักษณะสวิตช์และจากนั้นบอร์ด Arduino จะรับค่าสภาพการนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปของ LDR และส่งข้อมูลเป็นค่าสัญญาณแบบดิจิตอลไปแสดงผลบนคอมพิวเตอร์ โดยเขียนโปรแกรมกำหนดให้ เมื่อมีแสงมากระทบจะกำหนดให้แสดงค่าเท่ากับ 1 และถ้าไม่มีแสงให้แสดงค่าเป็น 0 ซึ่งจะเขียนคำสั่งให้เริ่มจับเวลาเมื่อรถวิ่งผ่านและตัดแสงเลเซอร์หรือคือเมื่อแสดงค่าเท่ากับ 0 ให้เริ่มจับเวลาในตำแหน่งที่ 1 และหยุดเวลาเมื่อรถวิ่งผ่านตำแหน่งที่ 2 หรือคือเมื่อแสดงค่าเท่ากับ 0 อีกครั้งในตำแหน่งที่ 2 โดยกำหนดระยะห่างระหว่างชุดรับส่งชุดแรกและชุดที่สองเป็นระยะ 1 เมตร และทำการทดสอบซ้ำสามครั้งโดยเพิ่มความเร็วให้มากขึ้นในครั้งต่อ ๆไป จากนั้นนำค่าเวลาที่ได้มาคำนวณเป็นความเร็วด้วยสมการที่ 2.10 สำหรับการต่อสายไฟจากตัวโมดูล ขาแรกของตัวโมดูลจะต่อเข้ากับช่อง A0 ของบอร์ด ARDUINO และขาที่สองต่อเข้ากับช่อง DIGITAL (PWM) หมายเลข 2 ขาที่สามต่อเข้ากับช่องจ่ายแรงดันไฟ 5 V และขาสุดท้ายต่อลงช่อง GND



รูปที่ 3.25 รูการต่อวงจรของ LDR sensor และ บอร์ด Arduino

รูปที่ 3.26 ภาพประกอบการทดลอง

3.2.2.2 การทดสอบสมรรถนะอัตราเร่งรถจำลองและเปรียบเทียบกับรถต้นแบบในเชิงทฤษฎี Power to weight ratio

เป็นการทดสอบเพื่อวัดและเปรียบเทียบประสิทธิภาพความเร็วของรถที่ทำได้ในระยะเวลาที่สนใจทดสอบ และทำการเปรียบเทียบสมรรถนะในเชิงทฤษฎีระหว่างรถต้นแบบและรถจำลองด้วย Power to weight ratio

ก. อุปกรณ์

(1) รถจำลอง

(2) GPS Lap Timer LT-Q6000

รูปที่ 3.27 GPS Lap Timer LT-Q6000 และ สถานที่ทำการทดลอง

ข. วิธีการทดสอบ

เลือกสถานที่ทดสอบรถจำลอง จากนั้นกำหนดจุดออกตัวสำหรับจับเวลาโดยให้เป็นทางเรียบไม่มีสิ่งกีดขวางเพื่อให้รถสามารถทำความเร็วได้มากกว่า 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จากนั้นทำการบังคับรถจำลองโดยเพิ่มความเร็วจากจุดหยุดนิ่งไปจนถึง 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พร้อมจับเวลา และจากนั้นทำการทดลองซ้ำอีกสามครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย แล้วนำมาวิเคราะห์ และทำการเปรียบเทียบด้านสมรรถนะในเชิงทฤษฎีด้วย Power to weight ratioระหว่างรถจำลองและรถจริง

คำนวณหา Power to weight ratio ของรถต้นแบบได้ดังนี้

จากสมการที่ (2.13) Power to weight ratio $= \dfrac{\text{Power } (\text{kw})}{\text{Weight } (\text{kg})}$

3.3 สรุปผลการทดลอง

รถจำลองจากรถฟอร์มูล่า อินวิว ทีแมค สร้างจากเครื่องพิมพ์สามมิติ ซึ่งจำลองโครงรถจากรถต้นแบบรถฟอร์มูล่า อินวิว ทีแมค โดยอาศัยทฤษฎีย่อส่วนของบัคกิงแฮมพายในการย่อขนาดเสกล ทำให้ได้ขนาดสัดส่วนรถจำลองที่ถูกต้องตามทฤษฎี โดยเนื่องจากล้อเป็นชิ้นส่วนที่มีความยุ่งยากในการสร้างจึงเลือกใช้ขนาดของล้อที่เตรียมไว้เป็นตัวตั้งต้นกำหนดขนาดสเกลของรถจำลองทำให้ได้อัตราส่วนการย่อที่ 1 : 4 และมีการออกแบบชิ้นส่วนใหม่บางตำแหน่งเพื่อให้เข้ากับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมต่าง ๆ เช่น ออกแบบปีกนกและคอม้าใหม่เพื่อให้สามารถติดตั้งล้อและมอเตอร์ได้ ในส่วนช่องวางแบตเตอรี่ด้านหลังคนขับก็เปลี่ยนใหม่ช่องติดตั้งกล่องเก็บสายไฟและตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์ และจากนั้นทำการทดสอบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. การทดสอบเปรียบเทียบความสมมูลของจุดศูนย์กลางมวลระหว่างรถต้นแบบและรถจำลอง

2. การทดสอบเปรียบเทียบการวัดความเร็วระหว่างการวัดความเร็วจากการเขียนคำสั่งคอมพิวเตอร์ใช้ฮอลล์เซนเซอร์นับแม่เหล็กที่หมุนในมอเตอร์เพื่อนำมาคำนวณเป็นค่าความเร็วและการวัดความเร็วด้วยชุดจับเวลาที่สร้างจากตัวยิงแสงเลเซอร์และโมดูลรับแสง

3. ทดสอบสมรรถนะอัตราเร็วของรถจำลองด้วย GPS โดยในอนาคตจะมีการทดสอบในด้านอื่น ๆ กับรถคันนี้ต่อไป

มหาวิทยาลัยนเรศวร

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองในบทที่ 3 ทำให้ได้ค่าผลการทดลองออกมาเป็นสองแบบตามชนิดการทดลองดังนี้

1. การทดลองด้านสถิตยศาสตร์ โดยการทดลองนี้จะเป็นการทดสอบเปรียบจุดศูนย์กลางมวลระหว่างรถต้นแบบและรถจำลอง โดยจะแสดงการอภิปรายและวิเคราะห์ผลการทดลองในส่วนท้ายของบทต่อไป

2. การทดลองด้านพลศาสตร์ จะเป็นการทดลองในเรื่องของสมรรถนะของรถจำลองเช่น อัตราเร่ง อัตราเร็ว และการทดสอบเปรียบเทียบความเร็วระหว่างการวัดความเร็วด้วยฮอลล์เซนเซอร์และการวัดความเร็วด้วยการตัดแสง

4.1 ผลการทดลองด้านสถิตยศาสตร์

จากการทดลองสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองและทำการสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

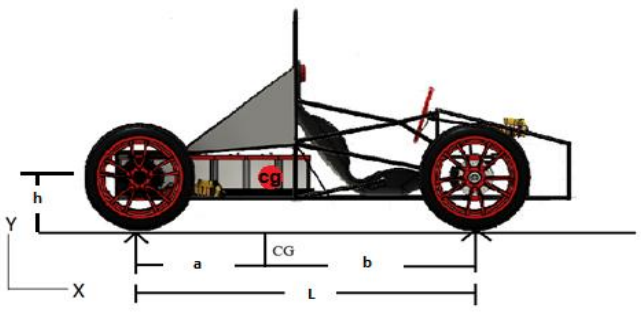
4.1.1 การทดสอบการเปรียบเทียบความสมมูลของจุดศูนย์กลางมวล

จากหัวข้อการทดลองที่ 3.2.1.1 การทดสอบเปรียบเทียบความสมมูลของจุด CG ได้ทำการคำนวณและจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์ต่าง ๆ โดยในตอนต้นค่าจุด CG วัดจริงหลังจากคำนวณมีตำแหน่งไม่ตรงตามทฤษฎีที่คำนวณไว้ จึงทำการปรับพารามิเตอร์รถจำลองใหม่ คือการเปลี่ยนตำแหน่งกล่องเก็บสายไฟจากตำแหน่งเดิมที่วางซ้อนบนแบตเตอรี่มาไว้ด้านหลังช่องเก็บแบตเตอรี่แทน จากนั้นคำนวณหาจุด CG ของรถจำลองใหม่และบันทึกค่า จะได้ค่าตำแหน่ง CG ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ก่อนและหลังปรับ

ตัวแปร	ก่อนปรับ	หลังปรับ	ค่าจุดศูนย์ถ่วง1/4เท่าของรถจริง	ความคลาดเคลื่อน (%)
a	25 cm	25.47 cm	26.24 cm	4.72 %
h	14.89 cm	4.34 cm	4.67 cm	7.07 %

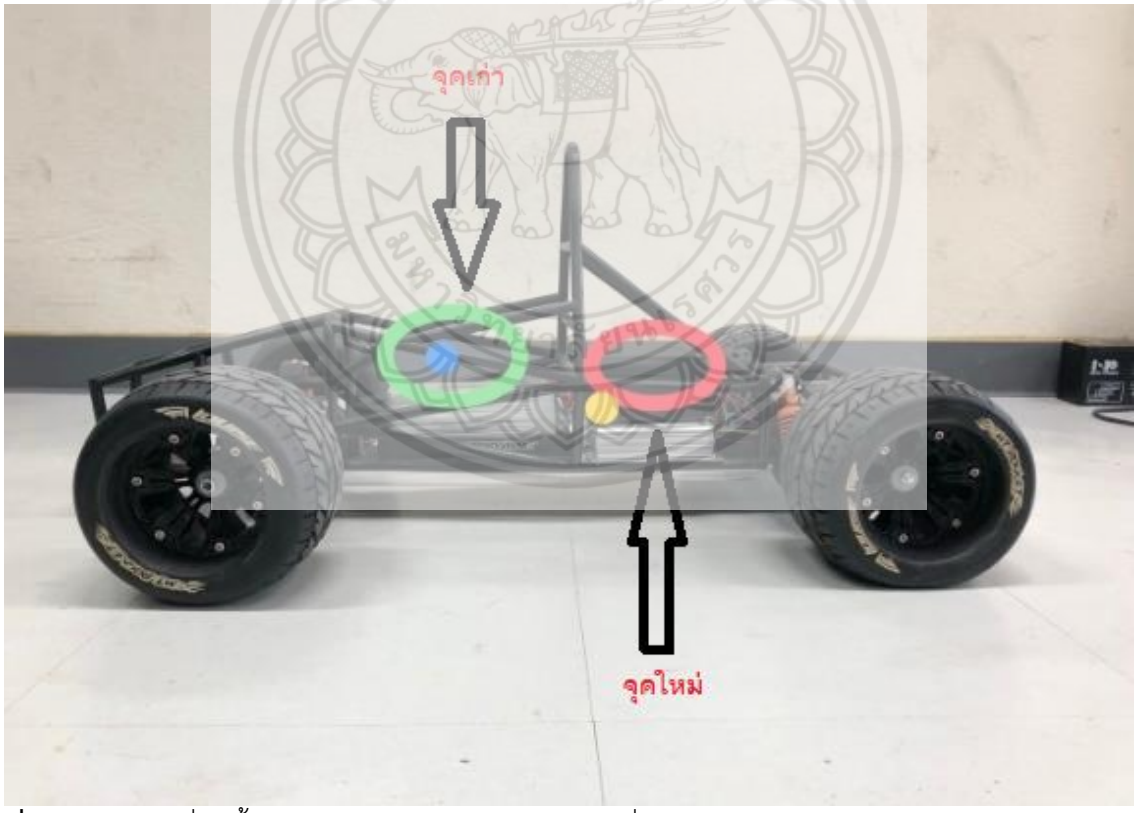
จากการคำนวณจุด CG อยู่ห่างจากเพลาล้อหลังไปทางด้านหน้า 25.47 cm และอยู่สูงจากพื้น 4.34 cm



รูปที่ 4.1 แสดงสัดส่วนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของรถจำลอง

ก. วิเคราะห์ผลการทดสอบเปรียบเทียบความสมมูลของจุดศูนย์กลางมวล

ในตอนต้นผลการคำนวณหาจุดศูนย์กลางมวลของรถจำลองมีความสมมูลกับรถต้นแบบ และมีความต้องการที่จะติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆบนรถจำลอง ให้รถจำลองมีตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลที่ตรงตามตำแหน่งที่คำนวณได้จากทฤษฎี แต่หลังจากติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ เสร็จนั้นได้ทำการคำนวณเปรียบเทียบระหว่างค่าจุด CG ที่วัดจริงและค่าที่ได้จากการคำนวณตอนต้นนั้นค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อน เนื่องจากจุด CG จริงของรถจำลองมีความสูงกว่าจุดที่คำนวณได้ตามทฤษฎี จึงทำการเปลี่ยนตำแหน่งกล่องเก็บสายไฟที่ติดตั้งวางซ้อนบนแบตเตอรี่ซึ่งเป็นเหตุให้จุด CG อยู่สูงเกินไป และเพื่อให้ได้ตำแหน่งจุด CG ที่ถูกต้อง โดยตำแหน่งระยะต่าง ๆ ของจุด CG ได้ดังนี้ อยู่ห่างจากเพลาล้อหลังไปทางด้านหน้าเป็นระยะ 25.47 cm และอยู่สูงจากพื้น 4.34 cm และค่าตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของรถต้นแบบที่คำนวณได้คือ อยู่ห่างจากเพลาล้อหลังไปทางด้านหน้า 109 cm และอยู่สูงจากพื้น 22 cm ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบความสมมูลกันแล้ว จากอัตราส่วนการย่อที่กำหนดไว้คือ 1 : 4 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของรถจำลองที่ถูกต้องตามอัตราส่วนที่ใช้ย่อคือ อยู่ห่างจากเพลาล้อหลังไปทางด้านหน้าเป็นระยะ 26.24 cm และอยู่สูงจากเพลา 4.67 cm ซึ่งจากตำแหน่งที่วัดได้จริงเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 4.72% และ 7.07% ตามลำดับ ซึ่งถือว่าจุด CG ของรถต้นแบบและรถจำลองมีความสมมูลกันและมีความคลาดเคลื่อนน้อย



รูปที่ 4.2 ตำแหน่งที่ติดตั้งกล่องวางสายไฟใหม่ทำให้จุด cg ต่ำ ลง (แดง) โดยย้ายจากจุดเดิม (เขียว) และจุดสีน้ำเงินคือตำแหน่งเก่าของจุด cg, สีเหลืองคือตำแหน่งใหม่ของจุด cg

4.2 ผลการทดลองด้ายพลศาสตร์

4.2.1. การทดสอบเปรียบเทียบการวัดความเร็ว

จากการทดสอบความเร็วในส่วนของการวัดความเร็วล้อด้วยฮอลล์เซนเซอร์นั้นจะนำจำนวนครั้งที่แม่เหล็กตัดกับเซนเซอร์มาคำนวณเป็นความเร็วจริงที่ล้อหมุน และอีกการทดสอบคือการทดสอบความเร็วด้วยชุดจับความเร็วด้วยการตัดแสงเลเซอร์ทำให้ได้ค่าเวลาและระยะทางที่รถวิ่งที่กำหนดไว้ก่อนทดลองซึ่งจะนำมาคำนวณเป็นความเร็วด้วยสมการ 2.10 โดยจะทำการทดสอบซ้ำสามครั้งและเพิ่มความเร็วขึ้นในแต่ละครั้ง โดยเพิ่มองศาการดันคันบังคับอนาล็อค 3 ระดับโดยใช้นิ้วดันคันบังคับเพิ่มทีละ 15 องศา 3 ครั้ง จนสุดระยะการโยก แสดงค่าข้อมูลดิบก่อนแปลงค่าที่ได้จากการทดลองดังตารางที่ 4.2 และทำการนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาคำนวณได้เป็นค่าความเร็วดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองจากชุดทดสอบความเร็วจากฮอลล์เซนเซอร์และชุดวัดความเร็วแบบตัดแสง

วิธีการทดสอบความเร็ว	การทดสอบครั้งที่ 1	การทดสอบครั้งที่ 2	การทดสอบครั้งที่ 3
จำนวนครั้งที่ฮอลล์เซ็นเซอร์จับแม่เหล็กได้	23 ครั้ง	26 ครั้ง	27 ครั้ง
ค่าเวลาที่จับได้ด้วยการตัดแสง	0.533 msec	0.384 msec	0.687 msec

จากค่าจำนวนแม่เหล็กและค่าเวลาที่จับได้ดังตารางที่ 4.2 จะนำมาใช้คำนวณเป็นความเร็วเพื่อเปรียบเทียบความเร็วที่ได้จากสองวิธีนี้ โดยในส่วนของค่าจำนวนแม่เหล็กที่ได้นั้นจะนำมาคำนวณเป็นความเร็วสูตรความเร็วเชิงเส้น $V = \frac{2\pi r}{T}$ โดยค่าความจะได้จากการแปลงจำนวนรอบการหมุนของล้อรถตามจำนวนแม่เหล็กที่นับได้ ซึ่ง 1 รอบการหมุนของมอเตอร์นั้นตัวฮอลล์เซ็นเซอร์จะจับแม่เหล็กได้ทั้งหมด 8 ครั้ง คือทุก ๆ การหมุนครบ 1 รอบของล้อรถนั้นจะต้องนับแม่เหล็กได้ 8 ครั้ง ซึ่งหมายความว่าถ้านับแม่เหล็กได้ 24 ตัวนั้นคือล้อหมุนไป 3 รอบก็จะสามารถคิดเป็นความเร็วเชิงเส้นได้ ในส่วนของค่าเวลานั้นใช้สูตร $V = \frac{S}{t}$ คิดหาค่าความเร็ว โดยกำหนดระยะห่างของชุดจับแสงจากจุดเริ่มต้นถึงจุดสุดท้ายเท่ากับ 1 เมตร และจากค่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองดังตารางที่ 4.2 นำมาคำนวณเป็นค่าความเร็วได้ในตารางที่ 4.3 ดังนี้

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณค่าที่ได้จากตารางที่ 4.2

การทดสอบครั้งที่	ชุดจับความเร็วแบบตัดแสง	การวัดความเร็วด้วยฮอลล์เซ็นเซอร์
1	5.24 km/hr.	6.02 km/hr.
2	8.29 km/hr.	10.70 km/hr.
3	9.39 km/hr.	12.68 km/hr.

ค่าผลการทดสอบจากการวัดความเร็วด้วยสองวิธีนี้ ในการทดสอบนั้นจะทำการทดสอบและเก็บค่าพร้อมกันแบบเวลาจริงไม่แยกทำเพื่อให้ได้ค่าข้อมูลสำหรับเปรียบเทียบในคาบเวลาเดียวกัน โดยใช้การเขียนคำสั่งคอมพิวเตอร์สำหรับเก็บค่าข้อมูลของวิธีทดสอบทั้งสองวิธีพร้อมกันขณะทำการทดลอง โดยจะใช้การเก็บข้อมูลผ่านสายไฟเก็บข้อมูลที่ต่อจากบอร์ด Arduino ที่ติดตั้งในรถจำลองโดยตรง แต่จะมีความลำบากในการทดสอบเนื่องจากต้องวิ่งตามรถจำลองขณะทดสอบเพราะสายเก็บข้อมูลที่ต่อจากตัวควบคุมความเร็วมีระยะสั้น

ก. วิเคราะห์ผลการทดสอบเปรียบเทียบการวัดความเร็ว

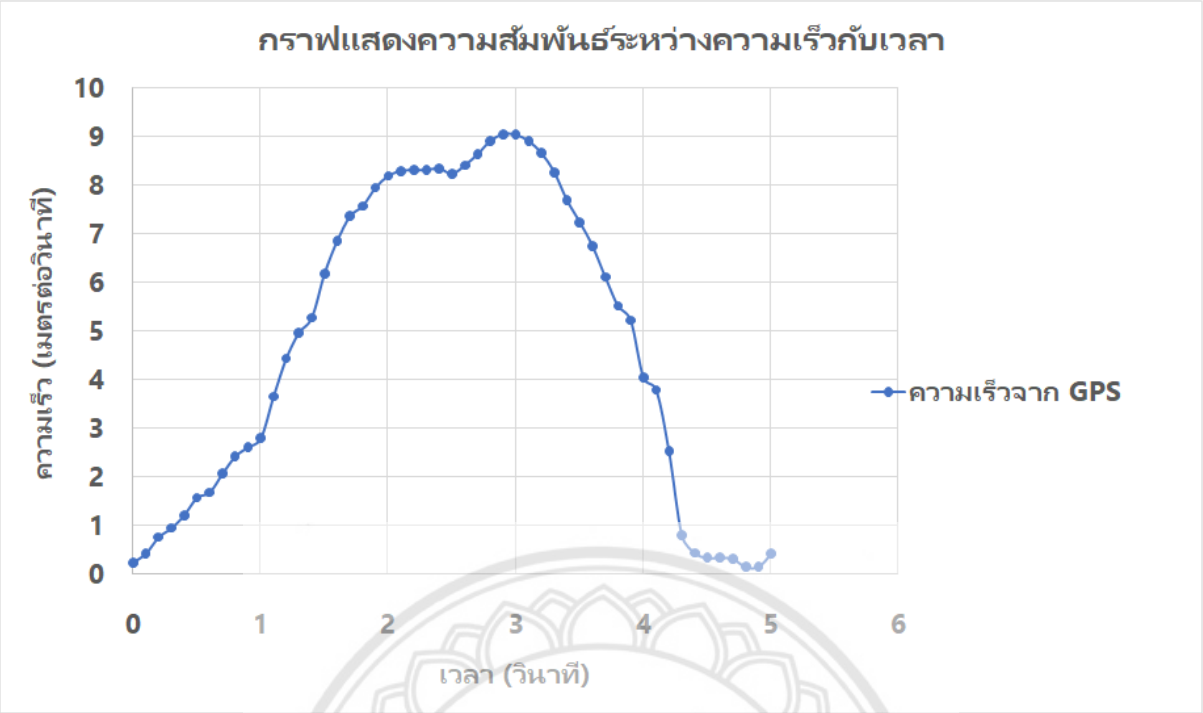
ในการทดสอบจะทำการทดสอบความเร็ว 3 ระดับ และได้ผลการทดสอบจำนวนแม่เหล็กที่ฮอลล์เซนเซอร์นับได้ และเวลาที่รถวิ่งผ่านชุดวัดความเร็วด้วยการตัดแสงดังตารางที่ 4.3 จากนั้นคำนวณค่าเวลาที่จับได้จากการทดลองเป็นความเร็วได้ดังนี้ 5.24, 8.29, 9.39 Km/hr. และผลการคำนวณแปลงจำนวนแม่เหล็กที่ฮอลล์เซนเซอร์นับได้เป็นความเร็วได้ดังนี้ 6.02, 10.78, 12.68 Km/h จะเห็นได้ว่าการทดสอบค่าความเร็วที่ได้จากฮอลล์เซนเซอร์มีค่ามากกว่า เนื่องจากในการทดลองนั้นการออกตัวของรถจำลองในจุดเริ่มต้นจะมีการไถลเกิดขึ้นขณะออกตัวเนื่องจากผิวหน้ายางชนิดที่ใช้ทดสอบไม่มีดอกยาง และพื้นผิวถนนที่ทดสอบมีความลื่นซึ่งทำให้การนับจำนวนแม่เหล็กจากฮอลล์เซนเซอร์ที่อ่านได้มีค่ามากกว่าระยะทางที่วิ่งจริง จึงทำให้เมื่อนำค่ามาคำนวณเป็นความเร็วจะได้ค่าความเร็วที่มากกว่าผลทดสอบความเร็วจากชุดจับเวลาด้วยเลเซอร์

4.2.2. การทดสอบสมรรถนะความเร็วและความเร่งรถจำลองและเปรียบเทียบกับรถต้นแบบ

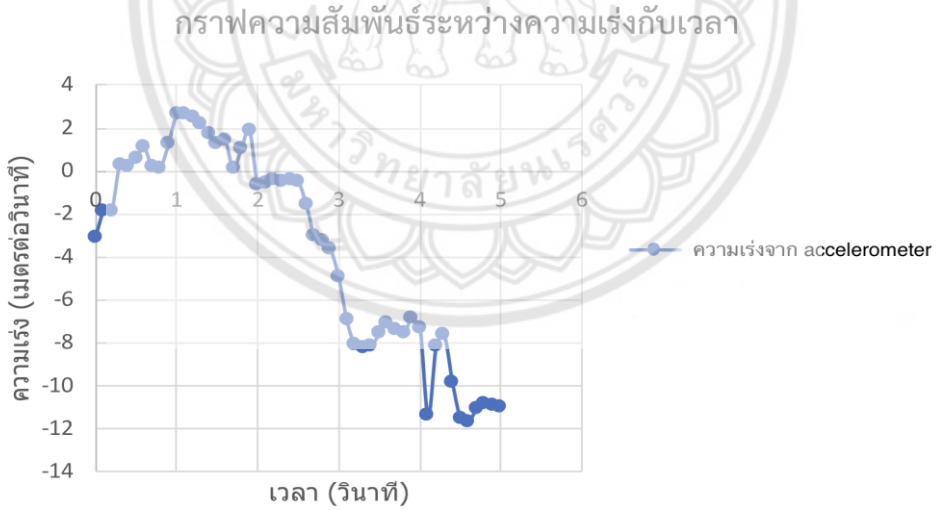
การทดสอบสมรรถนะความเร็วและความเร่งของรถจำลองในการทดสอบนั้นจะเพิ่มความเร็วจาก 0 ถึง 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยทำการทดสอบทั้งหมดสามครั้ง และเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากรถต้นแบบด้วยการทดสอบเดียวกัน โดยจับความเร็วด้วย GPS

ก. วิเคราะห์การทดสอบความเร็วรถจำลอง

จากการทดสอบความเร็วโดยใช้ GPS จับเวลาและความเร็ว โดยค่าที่ได้จากตัว GPS จะเป็นค่าความเร็วและเวลา โดยความละเอียดการจับเวลาของ GPS ตัวนี้คือใน 1/10 วินาที จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่ารถจำลองสามารถทำความเร็ว 0 - 9 m/s (0 – 2.5×10^{-6} km/hr.) ใช้เวลาเพียง 3 วินาทีเท่านั้น



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลา

จากรูปที่ 4.4 จะได้ค่าข้อมูลความเร่งของรถจำลองขณะทดสอบและจัดรูปออกมาเป็นค่าข้อมูลได้ดังตารางที่ 4.4 และแสดงค่าผลการทดสอบเดียวกันของรถต้นแบบในตารางที่ 4.5 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบอัตราเร่งของรถจำลอง

ครั้งที่	เวลา (s)	ระยะทาง (m)	ความเร่ง (m/s^2)
1	2.503	11.105	3.374
2	2.761	11.480	3.090
3	2.659	11.560	3.138
เฉลี่ย	2.641	11.381	3.200

เนื่องจากผลการทดสอบอัตราเร่งของรถจำลองที่ได้จาก accelerometer มีความคลาดเคลื่อนและไม่สัมพันธ์กับความเร็วที่ทดสอบ จึงนำค่าความเร็วที่ได้จากการทดลองนำมาหาอนุพันธ์ (differentiation) เพื่อให้ได้ค่าอัตราเร่งที่มีความสอดคล้องกับความเร็วมากขึ้น โดยแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งและเวลาที่ได้จากการหาอนุพันธ์ของค่าความเร็วดังรูปที่ 4.5

รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งและเวลาจากการหาอนุพันธ์ของความเร็ว

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบอัตราเร่งของรถต้นแบบ

ครั้งที่	เวลา (s)	ระยะทาง (m)	ความเร่ง (m/s^2)
1	8.201	83.111	2.032
2	8.088	81.823	2.060
3	8.232	81.158	2.025
เฉลี่ย	8.174	82.031	2.039

ข. วิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดสอบความเร่งรถจำลองและรถต้นแบบ

การทดสอบอัตราเร่งนี้เนื่องจากการเร่งความเร็วของรถจำลองในระยะเวลาสั้นๆ มีความยากในการควบคุมให้รถจำลองวิ่งอยู่ในแนวเส้นตรง เนื่องจากระยะทางที่ไกลสังเกตได้ยากและรถจำลองมีขนาดที่เล็กและมีการเลี้ยวของล้อที่ไว จึงทำให้ค่าที่ออกมาต่าง ๆ ในแต่ละครั้งที่ทดสอบได้ออกมาไม่เท่ากัน และเนื่องจากมอเตอร์มีสองตัว จึงคิดแรงม้ารวมจากมอเตอร์ทั้งสองตัว และเมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราเร่งระหว่างรถต้นและรถจำลองแล้วจะเห็นได้ว่าในการทำความเร็วที่เท่ากันนั้น รถจำลองจะสามารถทำความเร่งได้ดีกว่าและใช้เวลาน้อยกว่ารถต้นแบบ

การเปรียบเทียบอัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนัก Power to weight ratio

$$\text{Power to weight ratio} = \frac{6\text{kw}}{400\text{kg}}$$

Power to weight ratio $=0.015\text{kw/kg}$

$\therefore$ Power to weight ratio ของรถต้นแบบ = 15 *w/kg*

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบสมรรถนะด้วย Power to weight ratio

Model	Power to weight ratio
รถต้นแบบ	15 w/kg
รถจำลอง	52.8 w/kg

ค. วิเคราะห์การเปรียบเทียบกำลังต่อน้ำหนัก Power to weight ratio

จากอัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนักของรถต้นแบบที่คำนวณไว้ในบทที่สามได้ค่าออกมาเท่ากับ 15 w/kg จากนั้นได้ทำการคำนวณในส่วนของรถจำลองได้ค่าออกมาเท่ากับ 52.8 w/kg ดังตารางที่ 4.6 และเนื่องจากผลต่างของค่า Power to weight ratio ที่รถจำลองมีค่ามากกว่ารถต้นแบบนี้ เป็นผลให้รถต้นแบบมีอัตราเร่งที่น้อยกว่ารถจำลองดังหัวที่ 4.1.3 หากจะนำไปใช้ทดสอบควรมีการปรับลดกำลังมอเตอร์ลงด้วยวิธี PWM

บทที่ 5
สรุปผลโครงงานและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลโครงงาน

โครงงานนี้ได้ทำการสร้างรถจำลองขนาดย่อส่วนจากรถต้นแบบทีแมค ฟอร์มูล่าไฟฟ้า โดยใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์มิติของบักกิงแฮมพายในการย่อขนาด ซึ่งสร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นรถจำลองในการทดสอบสมรรถนะด้านความเร็ว และเพื่อศึกษาเปรียบเทียบผลกระทบทางพลศาสตร์และสถิตยศาสตร์ระหว่างรถจำลองและรถต้นแบบ โดยในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการสร้างรถจำลองให้มีความสมมูลกับรถต้นแบบ โดยตัวรถจำลองนั้นสร้างจากวัสดุพลาสติกชนิด ABS สั่งพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ ซึ่งออกแบบให้มีรูปร่างเหมือนกับรถต้นแบบภายใต้การย่อส่วนที่ถูกต้องตามทฤษฎีเพื่อให้ได้ความสมมูลที่สุด และใช้ระบบขับเคลื่อนโดยมอเตอร์ชนิดสวมล้อที่ล้อหลังแบบเดียวกันกับรถต้นแบบ ซึ่งรถจำลองที่สร้างขึ้นนี้มีอัตราส่วนการย่อ 1 : 4 จากรถต้นแบบ มีรูปทรงเดียวกันโดยปรับแก้บางตำแหน่งให้เข้ากับการติดตั้งระบบกันสะเทือนและระบบขับเคลื่อน

5.1.1 สรุปผลการทดสอบรถจำลอง

1) หลังจากประกอบและติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมต่าง ๆ บนรถจำลองเสร็จ ได้ทำการปรับตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของรถจำลองใหม่โดยการย้ายตำแหน่งกล่องเก็บสายไฟและบอร์ดควบคุมจากเดิมวางซ้อนทับบนแบตเตอรี่ทำให้จุดศูนย์กลางมวลที่ได้อยู่สูงเกินค่าที่ได้จากการคำนวณไปอยู่ตรงช่องว่างด้านหลังแบตเตอรี่ทำให้จุดศูนย์กลางมวลมีความสมมูลมากขึ้น โดยได้ค่าตำแหน่งดังนี้ คือ อยู่ห่างจากล้อหลังไปทางด้านหน้า 25.47 cm และอยู่สูงจากพื้น 4.34 cm ซึ่งคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งที่ถูกต้องเพียง 6%

2) จากหัวข้อ 4.1.2 การทดสอบเปรียบเทียบการวัดความเร็วนั้น ความเร็วที่ใช้ในการทดสอบจะเปรียบเทียบระหว่างความเร็วจริงที่จับได้ภายนอก และความเร็วที่วัดได้จากฮอลล์เซ็นเซอร์ ซึ่งความเร็วที่ได้จับได้ภายนอกมีความเร็วในการทดสอบ 3 ระดับดังนี้คือ 5.24, 8.29, 9.39 กิโลเมตร/ชั่วโมง และความเร็วจากฮอลล์เซ็นเซอร์ได้ดังนี้ 6.02, 10.78, 12.68 กิโลเมตร/ชั่วโมง เนื่องจากความเร็วที่วัดได้จากฮอลล์เซ็นเซอร์นั้นเกิดจากการวัดจำนวนรอบการหมุนของล้อ และในตอนออกตัวตัวล้อรถจำลองเกิดการไถลขึ้นทำให้ได้ความเร็วที่มากกว่าความเร็วที่วัดได้จากที่จับได้ภายนอก

3) การทดสอบความเร็วรถจำลอง ในการทดสอบรถจำลองสามารถทำความเร็ว 0 – 9 เมตร/วินาที โดยใช้เวลาเพียง 3 วินาที จากค่าที่จับได้จากตัว GPS ซึ่งมีความถี่ 1/10 วินาที

4) การทดสอบความเร่งรถจำลอง ในการทดสอบรถจำลองสามารถทำความเร่งสูงสุดจากการทดสอบสามครั้งเท่ากับ 9.08 เมตร/วินาที2 (ที่ความเร็ว 0 ถึง 30 กิโลเมตร/ชั่วโมง) ซึ่งค่าความเร่งที่ได้จาก accelerometer อาจมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากไม่ได้ติดตั้งให้อยู่ในแนวระดับที่เสมอกับพื้นถนน จึงคำนวณความเร่งจากค่าความเร็วที่ได้จากตัว GPS โดยนำค่าความเร็วที่ได้มาหาอนุพันธ์ของฟังก์ชัน เพื่อให้ได้ค่าความเร่งที่มีความสอดคล้องกับความเร็วที่ได้จาก GPS มากขึ้น

5) ผลการเปรียบเทียบอัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนักระหว่างรถต้นแบบและรถจำลองได้เท่ากับ 15 w/kg และ 52.8 w/kg ตามลำดับ ในความต่างที่มากของอัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนักระหว่างรถต้นแบบและจำลองนี้ เป็นผลให้ เมื่อเปรียบเทียบค่าความเร่งระหว่างรถต้นแบบและรถจำลองแล้ว จะเห็นได้ว่าที่รถจำลองสามารถทำความเร่งได้ดีกว่ารถต้นแบบเป็นเพราะมีอัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนักที่มากกว่ารถต้นแบบ เนื่องจากตัวมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนรถจำลองมีกำลังสูงและรวมกับโครงรถจำลองที่มีน้ำหนักเบา ทำให้เมื่อเทียบกับรถต้นแบบแล้วจะมีค่าอัตราส่วนกำลังต่อน้ำหนักที่มากกว่ารถต้นแบบพอสมควร

5.1.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1) เนื้อพลาสติกชนิด ABS ที่นำมาพิมพ์โครงรถด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติมีความแข็งและเหนียวไม่พอสำหรับรองรับแรงกระแทกที่เกิดขึ้นในการทดลอง ทำให้เกิดความเสียหายและต้องพิมพ์ชิ้นส่วนของรถจำลองใหม่ จึงแนะนำให้ใช้เนื้อพลาสติกชนิด PC (polycarbonate) โดยพลาสติกชนิดนี้จะมีความแข็งเหนียวกว่าชนิด ABS ซึ่งเป็นเนื้อพลาสติกสำหรับชิ้นงานที่ต้องการให้รองรับแรงกระแทกเป็นพิเศษ และเนื้อพลาสติกชนิดนี้สามารถทนต่อความร้อนได้สูงถึง 110 องศาเซลเซียส

2) ในการทดสอบเปรียบเทียบความเร็ว จำเป็นต้องใช้ค่าตัวแปรที่แม่นยำและถูกต้องในการคำนวณหาความเร็ว ทำให้ไม่สามารถใช้การเก็บข้อมูลแบบไร้สายได้ ดังนั้นจึงแนะนำให้จัดการระบบเก็บข้อมูลระหว่างการทดลองให้เป็นชนิดไร้สายทั้งหมด หรืออาจจะใช้ Data logger สำหรับเก็บข้อมูลตามเวลาทดสอบจริงภายในรถจำลองแล้วนำค่าออกมาวิเคราะห์ภายหลัง

3) การทดสอบเปรียบเทียบอัตราส่วนน้ำหนักต่อกำลังระหว่างรถต้นแบบและรถจริงได้ผลออกมาไม่สมมูลกัน จึงแนะนำให้ปรับรอบความเร็วมอเตอร์ให้ใกล้เคียงรถต้นแบบโดยใช้วิธี PWM ก่อนจะนำมาทดสอบจะทำให้สามารถคำนวรค่าอัตราส่วนน้ำหนักต่อกำลังระหว่างรถจำลองและรถต้นแบบได้ใกล้เคียงกันมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] Kyle Johnson, Vivake Asnani, Jeff Polack, Mark Plant. (2016). Experimental Evaluation of the Scale Model Method to Simulate Lunar Vehicle Dynamics. สืบค้นเมื่อ 19 มีนาคม 2561, จาก https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20170000950

[2] Midshipman Philip C. Hoblet. (2 พฤษภาคม 2003). SCALE-MODEL VEHICLE ANALYSIS FOR THE DESIGN OF A STEERING CONTROLLER. สืบค้นเมื่อ 19 มีนาคม 2561, จาก https://ieeexplore.ieee.org/document/1194558

[3] A. Shala, E. Hajrizi, R. Likaj. (27 ตุลาคม 2010). Modelling and Simulation of road Vehicle. สืบค้นเมื่อ 15 กันยายน 2561, จาก https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016349655

[4] ธนวัฒน์ สุวนานนท์, สัณฐิติ ตาลเพรช, สิทธิเดช ประโยชน์ดี. (2559). สามล้อไฟฟ้านำเที่ยว. วิทยานิพนธ์. วศ.บ., มหาวิทยาลัยนเรศวร, พิษณุโลก

[5] ธัญดร ออกวะลา, (2553). กลศาสตร์ของไหล. เอกสารประกอบการสอน. วศ.บ., มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, ชลบุรี.

[6] ศิลาภพ กระจายคุ้ม, ณัทภวี นวลเพา, ภูริศ เวียงทอง, Hall Effect Sensors. สืบค้นเมื่อ 10 ตุลาคม 2561, จาก https://mcu56.learninginventions.org/?page_id=258

[7] ปริญญานิพนธ์เรื่องการพัฒนาออกแบบระบบช่วงล่างรถยนต์ อินวิว ทีแมค ฟอร์มูล่า (Design and Development of Suspension Parts for In-Wheel TMAC Formula) จัดทำโดย นายศุภวิทย์ อิศรนาเวศ นายสุทธิพันธ์ ชาตรูประชีวิน และนายสุริยา เขตประทุม

ภาคผนวก ก
คำสั่งควบคุมรถจำลอง

File Edit Sketch Tools Help

num §

```
double chanel[3];
int PWM;     // ประกาศตัวแปรสำหรับสั่งให้มอเตอร์หมุน
int Back;    // ประกาศตัวแปรสำหรับคำสั่งถอยหลัง
void setup() {
  Serial.begin(9600);
    pinMode(8,INPUT); // กำหนด mode ของ pin8 เป็นรับค่า input
   pinMode(9,INPUT);  // กำหนด mode ของ pin9 เป็นรับค่า input
   pinMode(10,INPUT);  // กำหนด mode ของ pin10 เป็นรับค่า input
   pinMode(2,OUTPUT);   // กำหนด mode ของ pin2 เป็นรับค่า output
   pinMode(3,OUTPUT);   // กำหนด mode ของ pin3 เป็นรับค่า output
   pinMode(5,OUTPUT);   // กำหนด mode ของ pin5 เป็นรับค่า output

}

void loop() {
 chanel[0] = pulseIn(10,HIGH,250000);  //อ่านค่าจาก reciver และเก็บค่าไปยังแชนแนล 0
 chanel[1] = pulseIn(8,HIGH,250000);   //อ่านค่าจาก reciver และเก็บค่าไปยังแชนแนล 1
 chanel[2] = pulseIn(9,HIGH,250000);   //อ่านค่าจาก reciver และเก็บค่าไปยังแชนแนล 22
     chanel[0] = constrain(chanel[0], 1000, 1950); //คำสั่งกักค่า
     PWM= map(chanel[0],1000,1950,0,255); //คำสั่งเทียบบัญญัติไตรยางค์สำหรับสั่งให้มอเตอร์หมุน
     Back= map(chanel[2],989,1978,0,1); //คำสั่งเทียบบัญญัติไตรยางค์สำหรับสั่งให้มอเตอร์ถอยหลัง


  if( chanel[1]>1800){
      digitalWrite(5 , LOW);
      digitalWrite(2 , Back);       // คำสั่งเงื่อนไขการเบรค
      analogWrite(3, 0);
  }
  else{
      digitalWrite(5 , HIGH);
      analogWrite(3, PWM);
  }

  Serial.print(chanel[0]);
  Serial.print(" - ");
```

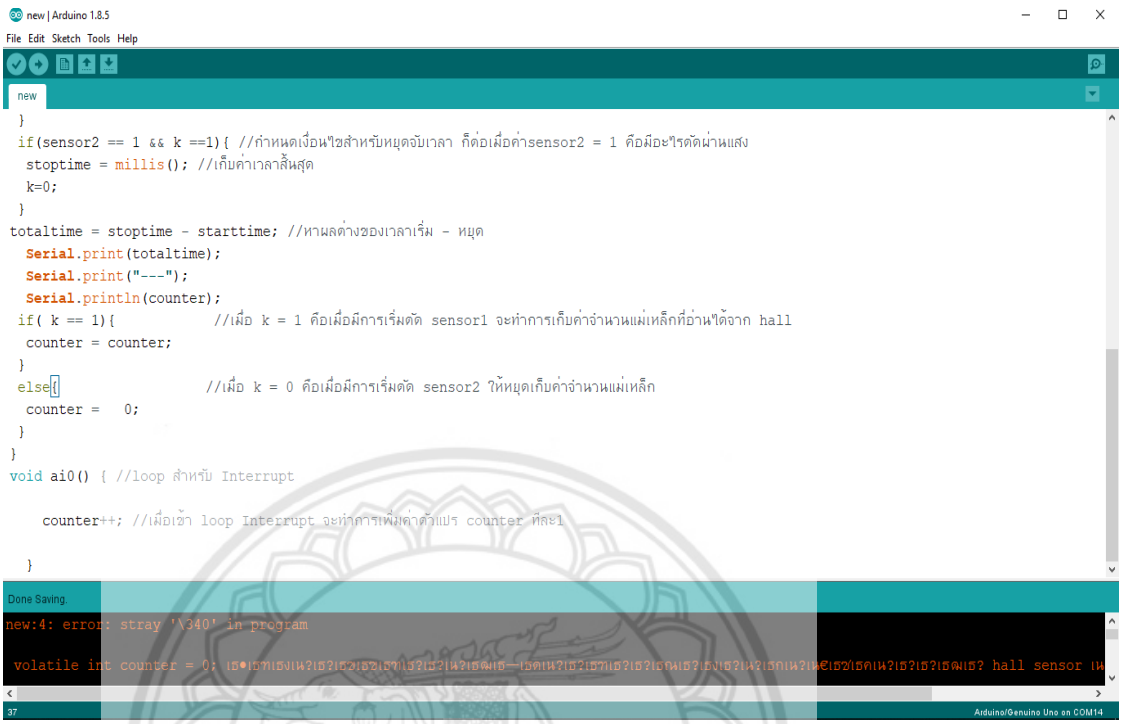
คำสั่งควบคุมมอเตอร์ของรถจำลอง

new | Arduino 1.8.5
File Edit Sketch Tools Help
new
int sensor1,sensor2; //ประกาศตัวแปรสำหรับรับค่าที่อ่านจาก sensor ตัดแสงสองตัว
int starttime,stoptime,totaltime; //ตัวแปรสำหรับเก็บค่าเวลา
int k;
volatile int counter = 0; //ตัวแปรรับค่าที่นับจำนวนแม่เหล็กจาก hall sensor ในมอเตอร์
void setup() {
pinMode(4,INPUT); //กำหนดmode ของpin ที่ 4 เป็นรับค่า input
pinMode(5,INPUT); //กำหนดmode ของpin ที่ 5 เป็นรับค่า input
pinMode(3, INPUT_PULLUP); //กำหนดmode ของpin ที่ 3 เป็นรับค่า inputpullup
attachInterrupt(1, ai0, RISING); //กำหนดmode pin Interrupt (mode RISING คือ เมื่อมีการเปลี่ยนค่าจาก 0 ไป 1 จะเริ่มเข้าloop ai0)
starttime = 0; //กำหนดค่าเริ่มต้นตัวแปร
stoptime = 0; //กำหนดค่าเริ่มต้นตัวแปร
totaltime = 0; //กำหนดค่าเริ่มต้นตัวแปร
k = 0;
Serial.begin(9600);
}
void loop() {
sensor1 = digitalRead(4); //อ่านค่าdigital ที่ pin 4
sensor2 = digitalRead(5); //อ่านค่าdigital ที่ pin 4
if(sensor1 == 1 && k == 0){ //กำหนดเงื่อนไขสำหรับเริ่มจับเวลา ก็ต่อเมื่อค่าsensor1 = 1 คือมีอะไรตัดผ่านแสง
starttime = millis(); //เก็บค่าเวลาเริ่มต้น
Done Saving.
new:4: error: stray '\340' in program
volatile int counter = 0; เธ•เธฑเธงเนเธ?เธฃเธฃเธฑเธšเธ„เนˆเธฒเธ—เธตเนˆเธ™เธฑเธšเธˆเธณเธ™เธงเธ™เนเธกเนˆเน€เธซเธฅเนเธ?เธˆเธฒเธ? hall sensor เนƒ
37
Arduino/Genuino Uno on COM14

(ก)

new | Arduino 1.8.5
File Edit Sketch Tools Help
new
int sensor1,sensor2; //ประกาศตัวแปรสำหรับรับค่าที่อ่านจาก sensor ตัดแสงสองตัว
int starttime,stoptime,totaltime; //ตัวแปรสำหรับเก็บค่าเวลา
int k;
volatile int counter = 0; //ตัวแปรรับค่าที่นับจำนวนแม่เหล็กจาก hall sensor ในมอเตอร์
void setup() {
pinMode(4,INPUT); //กำหนดmode ของpin ที่ 4 เป็นรับค่า input
pinMode(5,INPUT); //กำหนดmode ของpin ที่ 5 เป็นรับค่า input
pinMode(3, INPUT_PULLUP); //กำหนดmode ของpin ที่ 3 เป็นรับค่า inputpullup
attachInterrupt(1, ai0, RISING); //กำหนดmode pin Interrupt (mode RISING คือ เมื่อมีการเปลี่ยนค่าจาก 0 ไป 1 จะเริ่มเข้าloop ai0)
starttime = 0; //กำหนดค่าเริ่มต้นตัวแปร
stoptime = 0; //กำหนดค่าเริ่มต้นตัวแปร
totaltime = 0; //กำหนดค่าเริ่มต้นตัวแปร
k = 0;
Serial.begin(9600);
}
void loop() {
sensor1 = digitalRead(4); //อ่านค่าdigital ที่ pin 4
sensor2 = digitalRead(5); //อ่านค่าdigital ที่ pin 4
if(sensor1 == 1 && k == 0){ //กำหนดเงื่อนไขสำหรับเริ่มจับเวลา ก็ต่อเมื่อค่าsensor1 = 1 คือมีอะไรตัดผ่านแสง
starttime = millis(); //เก็บค่าเวลาเริ่มต้น
Done Saving.
new:4: error: stray '\340' in program
volatile int counter = 0; เธ•เธฑเธงเนเธ?เธฃเธฃเธฑเธšเธ„เนˆเธฒเธ—เธตเนˆเธ™เธฑเธšเธˆเธณเธ™เธงเธ™เนเธกเนˆเน€เธซเธฅเนเธ?เธˆเธฒเธ? hall sensor เน
37
Arduino/Genuino Uno on COM14

(ข)



(ค)

คำสั่งจับเวลาและนับจำนวนครั้งแม่เหล็ก