

การพัฒนาบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ร่วมกับระบบล้อ ระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยวจริง
สำหรับทดสอบการควบคุมรถฟอร์มูล่านักเรียน

นายพงศกร บุญชะตา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

DEVELOPMENT OF TIRE-SUSPENSION-STEERING HARDWARE IN THE LOOP
SIMULATOR FOR STUDENT FORMULA CAR HANDLING TESTING

Mr. Pongsakorn Boonchata

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาระบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ร่วมกับระบบล้อ ระบบ รองรับและระบบบังคับเลี้ยวจริง สำหรับทดสอบการควบคุมรถฟอร์มูล่า ล่านักเรียน
โดย	นายพงศกร บุญชะตา
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.นักสิทธิ์ นุ่มวงษ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สันหพศ จันทรานูวัฒน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.นักสิทธิ์ นุ่มวงษ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สันหพศ จันทรานูวัฒน์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อังคิรี ศรีภคากกร)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.พีระยศ แสนโกชน์)

พงศกร บุญชะตา : การพัฒนาระบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ร่วมกับระบบล้อ ระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยวจริง สำหรับทดสอบการควบคุมรถฟอร์มูล่านักเรียน (DEVELOPMENT OF TIRE-SUSPENSION-STEERING HARDWARE IN THE LOOP SIMULATOR FOR STUDENT FORMULA CAR HANDLING TESTING.) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ดร.นักสิทธิ์ นุ่มวงษ์ , อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ผศ.ดร. สัมผัส จันทรานูวัฒน์, 153 หน้า.

การแข่งขันรถฟอร์มูล่านักเรียนต้องอาศัยความรู้และเทคนิคทางวิศวกรรมเพื่อใช้ในการออกแบบและสร้างรถให้มีสมรรถนะดีที่สุดในการแข่งขัน ซึ่งความสามารถในการเลี้ยวของรถเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่ส่งผลต่อสมรรถนะของรถ โดยความสามารถในการเลี้ยวของรถนั้นขึ้นอยู่กับระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยวเป็นหลัก โดยทั่วไปเมื่อระบบเหล่านี้ได้ก่อนที่จะนำไปใช้ในการแข่งขันจริงต้องผ่านกระบวนการทดสอบเพื่อสอบทานถึงเป้าประสงค์ในการออกแบบ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้นำเสนอวิธีการทดสอบแบบ Hardware-In-the-Loop simulator (HILs) เพื่อใช้ในการทดสอบระบบล้อ ระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยวจริงของรถฟอร์มูล่านักเรียน เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของการเลี้ยวของรถ โดยชุดทดสอบ HILs นี้มีหลักพื้นฐานคือการใช้แบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์แบบสองล้อ จำนวนการเคลื่อนที่ของตัวรถโดยแทนล้อหน้าของรถในแบบจำลองนั้นด้วยล้อทดสอบและระบบช่วงล่างจริงจากรถฟอร์มูล่านักเรียน ซึ่งล้อทดสอบดังกล่าวจะวิ่งอยู่บนล้อจำลองพื้นถนนที่สามารถควบคุมอัตราเร็วและมุมการวางตัวได้ ค่าสถานะของตัวรถในแบบจำลองสองล้อจะใช้ในการควบคุมล้อทดสอบและล้อจำลองพื้นถนนนี้ แรงที่เกิดจากมุมไถลระหว่างล้อทดสอบและล้อจำลองพื้นถนนจะถูกป้อนกลับเข้าสู่แบบจำลองสองล้อ ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของตัวรถในแบบจำลองดังกล่าวเสมือนจริงมากขึ้น โดยชุดทดสอบแบบ HILs นี้ได้รับการพัฒนาและปรับปรุงทั้งทางด้าน โครงสร้างและระบบควบคุมจากเครื่องทดสอบ HILs ที่ใช้ในการทดสอบการควบคุมของยานยนต์ขนาดเล็ก โดยผลการทดสอบที่ได้จากชุดทดสอบ HILs ในการทดสอบทางด้านพลศาสตร์ยานยนต์ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านข้างที่ได้จากล้อทดสอบมีค่า 242.157 นิวตัน/องศา นอกจากนี้ในการทดสอบการวิ่งเป็นวงกลมพบว่าพฤติกรรมของรถเป็นแบบค้ำโค้งเมื่อถูกติดตั้งด้วยช่วงล่างลักษณะนี้ และเพื่อเป็นการสอบเทียบชุดทดสอบแบบ HILs จึงได้มีการทำการทดสอบด้วยรถคันจริงที่มีระบบช่วงล่างที่เหมือนกับชุดทดสอบ HILs ด้วยวิธีการทดสอบการวิ่งเป็นวงกลมพบว่าค่ามุมเลี้ยวที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงอย่างมากกับผลที่ได้จากชุดทดสอบ HILs ในช่วงที่ความเร่งด้านข้างมีค่าไม่เกิน 0.6 g และรถฟอร์มูล่านักเรียนคันจริงมีพฤติกรรมการเข้าโค้งแบบค้ำโค้งเช่นเดียวกับการทดสอบด้วยชุดทดสอบแบบ HILs

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา2555.....

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

#5370649521 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : STUDENT FORMULA/ HARDWARE-IN-THE-LOOP / SUSPENSION / STEERING

PONGSAKORN BOONCHATA : DEVELOPMENT OF TIRE-SUSPENSION-STEERING
 HARDWARE IN THE LOOP SIMULATOR FOR STUDENT FORMULA CAR HANDLING
 TESTING. ADVISOR : NUKSIT NOOMWONGS , Ph.D., CO-ADVISOR : ASST. PROF.
 SANHAPOJ CHANTRANUWATHANA , Ph.D., 153 pp.

Formula SAE event is the competition between students team in each university with their student formula car. The car handling is an important factor that they have to consider to be the fastest car in a race. There are three major parts that affect to car handling, tire steering and suspension. This thesis presents a Tire-Suspension-Steering Hardware-In-the-Loop Simulator (HILs) system for using in a development of a student formula car suspension. The HILs system was modified from a small automobile Tire-Suspension-Steering Hardware-In-the-Loop Simulator developed in Smart Mobility Research center Chulalongkorn University. The system can be used to reduce the development time and cost when comparing to testing a real prototype car on a test track. Firstly, we designed and built the adjustable support for the student formula car suspension on the HILs such that wheel parameters such as camber and toe can be adjusted. In addition, the HILs system is used to simulate and test vehicle dynamics by replacing the front wheel of a bicycle model with a real student formula wheel and suspension. The wheel is running on a rotating drum whose speed and orientation can be controlled to simulate the car speed and the tire side slip angle. Tire lateral force due to slip angle between the wheel and the drum can be measured. Skidpad testing was conducted to compared the real car testing with HILs results to validate that HILs can predict the handling of the student formula car. HILs result for vehicle dynamic testing shows the cornering stiffness of this wheel system which is about 242.157 N/degree. Moreover, the skidpad testing result from HILs shows the student formula car has an understeer behavior when installed with these suspensions. The result of real car skidpad testing also shows that the car behavior is understeer too. And when compared both results from skidpad testing, steering angles had almost a same value when the lateral acceleration is under 0.6 g.

Department ..Mechanical Engineering..
 Field of Study Mechanical Engineering..
 Academic Year 2012.....

Student’s Signature
 Advisor’s Signature
 Co-advisor’s Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อ.ดร. นักสิทธิ์ นุ่มวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผศ.ดร. สันหพศ จันทรานูวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำปรึกษาและข้อเสนอแนะต่างๆที่เป็นประโยชน์อย่างสูง ขอขอบคุณ ศูนย์วิจัย Smart Mobility Research Center (SMRC) ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์รวมถึงทุนในการทำวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณ บริษัท บุญรอดบริวเวอรี่ จำกัด ที่สนับสนุนสถานที่ อุปกรณ์และบุคลากร ในการปรับปรุงชุดโครงสร้างชุดทดสอบ ขอขอบคุณชมรมฟอร์มูล่า ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนรถและทรัพยากรบุคคลในการทดสอบ ขอขอบคุณสนามแข่งรถ Bangkok Drag Avenue ที่ให้ความสนับสนุนด้านสนามทดสอบรถ

สุดท้ายนี้ทางผู้วิจัยขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้จนทำให้สามารถประสบผลสำเร็จทางการศึกษา และกราบขอบพระคุณบิดา-มารดาที่ได้อบรมสั่งสอนและเป็นกำลังใจที่ดีให้ตลอดมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทที่คัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญรูป	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 การพัฒนาชุดทดสอบ Hardware-In-The-Loop ที่ใช้ทดสอบระบบรองรับและระบบบังคับ เลี้ยวสำหรับรถฟอร์มูล่านักเรียน	2
1.3 วัตถุประสงค์.....	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.7 แผนการดำเนินการวิจัย.....	6

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 ที่มาและความสำคัญของการใช้วิธีการทดสอบแบบ Hardware-In-The-Loop.....	7
2.2 การใช้ชุดทดสอบ HILs ในงานทางด้านยานยนต์.....	10
2.2.1 งานวิจัยด้านความปลอดภัย	10
2.2.2 งานวิจัยด้านระบบบังคับเลี้ยว	12
2.2.3 งานวิจัยด้านระบบรองรับ.....	13
2.2.4 งานวิจัยทางด้านระบบล้อและยางรถยนต์	14
2.2.5 งานวิจัยที่มีการใช้ชุดทดสอบ HILs ร่วมกับระบบล้อ ระบบบังคับเลี้ยวและระบบรองรับ	19
2.3 บทสรุปจากการศึกษาวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
บทที่ 3 ทฤษฎีพื้นฐาน	24
3.1 แบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์สองล้อ	24
3.2 แบบจำลองของยาง.....	29
3.3 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการเข้าโค้งของรถยนต์.....	31
บทที่ 4 การพัฒนาและปรับปรุงชุดทดสอบ HILS	36
4.1 ระบบของรถจริงเกี่ยวข้องกับการทดสอบ	36
4.1.1 ระบบล้อ.....	36

4.1.2 ระบบรองรับ	37
4.1.3 ระบบบังคับลิ้ว	38
4.2 ชุดทดสอบ HILs	38
4.3 การออกแบบและพัฒนาชุดทดสอบ HILs	39
4.3.1 โครงสร้างสำหรับการติดตั้งชุดล้อทดสอบและล้อทดสอบ	40
4.3.2 โครงสร้างสำหรับชุดจำลองมวลรถและจับยึดระบบรองรับ	42
4.4 ค่าพารามิเตอร์ของรถฟอร์มูล่านักเรียน	47
4.5 การพัฒนาและปรับปรุงระบบควบคุมชุดทดสอบ HILs.....	48
4.5.1 โปรแกรมควบคุมระบบชุดทดสอบ HILs.....	48
4.5.1.1 FPGA.....	50
4.5.1.2 Power PC	51
4.5.2 ระบบควบคุมตำแหน่งของชุดทดสอบ HILs.....	52
4.5.2.1 การตั้งค่ามอเตอร์ (Tuning)	53
4.5.2.2 การสอบเทียบตำแหน่งจากการหมุนของมอเตอร์(Calibration).....	54
4.5.3 การวัดความเร็วและกำหนดตำแหน่งอ้างอิงของระบบควบคุม	55
4.6 สิ่งที่ได้รับการพัฒนาและปรับปรุง.....	56

บทที่ 5 การทดสอบและผลการทดสอบด้วยเครื่อง HILs.....	58
5.1 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านข้างของระบบล้อ	58
5.1.1 ขั้นตอนการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านข้างของล้อหน้า.....	58
5.1.2 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านข้างของระบบล้อหน้า.....	59
5.1.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านข้างของล้อหลัง.....	60
5.1.4 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านข้างของระบบล้อหลัง	61
5.2 การทดสอบช่วงล่างโดยการวิ่งเป็นวงกลม (Skidpad test).....	63
5.2.1 ข้อกำหนดในการทดสอบการวิ่งเป็นวงกลม	63
5.2.2 การวิเคราะห์พฤติกรรมการเลี้ยวโค้งของรถฟอร์มูล่านักเรียนด้วยเครื่อง HILs.....	64
5.2.3 ผลการทดลองการเลี้ยวโค้งด้วยอัตราเร็วคงที่ (Constant speed method).....	66
5.2.4 ผลการทดลองการเลี้ยวโค้งด้วยรัศมีความโค้งคงที่ (Constant radius method).....	68
บทที่ 6 การทดสอบและผลการทดสอบด้วยรถฟอร์มูล่านักเรียน	70
6.1 อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ	70
6.1.1 ตัววัดความเร่งและความหน่วงแบบ 3 แกน.....	71
6.1.2 เครื่องมือวัดระยะกระจัด	71
6.1.3 กล่อง ECU (Electric Control Unit).....	72
6.2 การติดตั้งอุปกรณ์บนรถจริง	74
6.2.1 ตัววัดความเร่งและความหน่วงแบบ 3 แกน.....	74

6.2.2 เครื่องมือวัดระยะกระจัด	75
6.2.3 กล่อง ECU (Electric Control Unit).....	77
6.3 วิธีการทดสอบ	77
6.4 ผลการทดสอบ.....	80
บทที่ 7 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากเครื่อง HILS กับผลที่ได้จากรถฟอร์มูลานักเรียน	84
บทที่ 8 บทสรุป.....	86
8.1 บทสรุป.....	86
8.2 ข้อเสนอแนะ.....	88
8.3 การเผยแพร่วิทยานิพนธ์	89
รายการอ้างอิง	90
ภาคผนวก.....	94
ภาคผนวก ก. ตัวอย่างแบบชิ้นส่วนเสริมแรงที่ใช้ในการผลิต.....	95
ภาคผนวก ข. รายละเอียดอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในชุดทดสอบHILs	99
ภาคผนวก ค. รายละเอียดอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดสอบรถฟอร์มูลานักเรียน.....	113
ภาคผนวก ง. รายละเอียดการสอบเทียบของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าในรถจริง	120
ภาคผนวก จ. การหาค่าพารามิเตอร์ของรถฟอร์มูลานักเรียน	130
ภาคผนวก ฉ. การใช้งาน โปรแกรมควบคุม HILs	142
ภาคผนวก ช. ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง HILs	148

ภาคผนวก ซ. ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการทดสอบรฟอรั่มูล่านักเรียน.....	151
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	153

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1-1	แผนการดำเนินการและระยะเวลาที่ใช้ในแต่ละขั้นตอนตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย ..6
ตารางที่ 3-1	แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ดั่งใช้ในแบบจำลองสองล้อ28
ตารางที่ 4-1	แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองสองล้อ.....48
ตารางที่ 4-2	รายละเอียดการพัฒนาและปรับปรุงชุดทดสอบ HILs.....57
ตารางที่ ข-1	รายละเอียดทางเทคนิคของอุปกรณ์วัดแรง.....104
ตารางที่ ค-1	คุณสมบัติของตัววัดความเร่งและความหน่วงยี่ห้อ KISTLER รุ่นK-BEAM8393B10115
ตารางที่ ค-2	รายละเอียดทางเทคนิคของเครื่องมือวัดระยะกระจัด ของบริษัทGFRAN รุ่น PZ34-S117
ตารางที่ ง-1	ค่าความต่างศักย์ที่ได้จากการสอบเทียบที่ค่าความเร่งทั้ง 2 แกนที่ -1 , 0 , 1 g.....125
ตารางที่ จ-1	แสดงค่าน้ำหนักที่วัดได้ในแต่ละล้อ132
ตารางที่ จ 3-1	แสดงค่าน้ำหนักที่วัดได้ในแต่ละล้อ137
ตารางที่ จ 3-2	แสดงคาบการแกว่งของรถ138

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2-1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายในแต่ละขั้นตอนของการพัฒนา	9
รูปที่ 2-2 แผนภาพการควบคุมระบบช่วยเบรก ABS ที่ใช้ทดสอบการเบรกของรถบรรทุก	11
รูปที่ 2-3 แผนภาพ V-Diagram	12
รูปที่ 2-4 แสดงการใช้วิธีการทดสอบแบบ HIL ร่วมกับระบบบังคับล้อ	13
รูปที่ 2-5 การทดสอบแบบ HILs a) เฉพาะช่วงล่างของรถเพียงอย่างเดียว b) แบบ Quarter car	14
รูปที่ 2-6 การทดสอบยางบนแผ่นเรียบ	15
รูปที่ 2-7 การทดสอบยางบนพื้นผิวเรียบ	16
รูปที่ 2-8 การทดสอบยางบนพื้นผิวโค้ง	17
รูปที่ 2-9 ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดแรงที่เกิดจากการเลี้ยวของยาง	18
รูปที่ 2-10 แผนภาพการทดสอบการตรวจวัดแรงที่ล้อ	19
รูปที่ 2-11 ชุดอุปกรณ์ทดสอบร่วมกันระหว่างระบบล้อ ระบบรองรับและระบบบังคับล้อด้วยชุดทดสอบ HILs	20
รูปที่ 2-12 การทำงานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	21
รูปที่ 2-13 ลักษณะการควบคุมของชุดทดสอบ HILs	21
รูปที่ 2-14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างและมุมไถลที่อัตราเร็วล้อทดสอบต่างๆ	22
รูปที่ 3-1 แบบจำลองสองล้อ	25
รูปที่ 3-2 แผนภาพการทำงานของชุดทดสอบ HILs	29
รูปที่ 3-3 ตัวอย่างแบบจำลองของยาง	30
รูปที่ 3-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างและมุมไถลที่ภาระโหลดแนวตั้งค่าต่างๆ	31
รูปที่ 3-5 การเข้าโค้งที่ความเร็วสูง (แบบจำลองสองล้อ)	32
รูปที่ 3-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมพวงมาลัยกับความเร่งด้านข้างจากการวิ่งเป็นวงกลม 34	
รูปที่ 3-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค่ามุมเหวของรถต่อมุมพวงมาลัย กับความเร็วรถ	35

รูปที่ 4-1 ล้อและยางของรถฟอร์มูล่านักเรียน	37
รูปที่ 4-2 ระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยวของรถฟอร์มูล่านักเรียน.....	37
รูปที่ 4-3 ชุดอุปกรณ์ทดสอบแบบ HILs สำหรับรถยนต์นั่งขนาดเล็ก	38
รูปที่ 4-4 ระบบประมวลผลและระบบควบคุมหลักของชุดทดสอบ HILs	39
รูปที่ 4-5 อุปกรณ์วัดแรง (F/T Transducer).....	40
รูปที่ 4-6 คอมพิวเตอร์ที่ได้รับการออกแบบใหม่	41
รูปที่ 4-7 แสดงระยะเหลือของล้อแม็กซ์	41
รูปที่ 4-8 ล้อแม็กซ์ที่ทำการปรับระยะเหลือแล้ว.....	41
รูปที่ 4-9 ชุดจำลองมวลรถและจับยึดระบบรองรับเดิม.....	42
รูปที่ 4-10 ชุดจับยึดระบบรองรับการสั่นสะเทือน	43
รูปที่ 4-11 ชุดทดสอบ HILs ที่ได้จากการออกแบบ	43
รูปที่ 4-12 ชุดทดสอบ HILs จริงสำหรับรถฟอร์มูล่านักเรียน	43
รูปที่ 4-13 ชิ้นส่วนเสริมแรงที่ติดตั้งบริเวณระบบบังคับเลี้ยว	44
รูปที่ 4-14 ชิ้นส่วนเสริมแรงที่ติดตั้งบริเวณชุดตัวหน่วงการสั่นสะเทือน.....	45
รูปที่ 4-15 ไฟไนต์เอลิเมนต์คำนวณความแข็งแรงของชิ้นส่วนเสริมแรงแบบที่ 1	46
รูปที่ 4-16 ไฟไนต์เอลิเมนต์คำนวณความแข็งแรงของชิ้นส่วนเสริมแรงแบบที่ 2	46
รูปที่ 4-17 การติดตั้งชิ้นส่วนเสริมแรงบนชุดทดสอบ HILs	47
รูปที่ 4-18 ลักษณะ โปรแกรมควบคุมที่เขียนด้วย NI LabVIEW®.....	49
รูปที่ 4-19 ตัวอย่างของ Block diagram ใน FPGA ที่มีการส่งข้อมูลเป็น I32	50
รูปที่ 4-20 ตัวอย่าง Block diagram ที่ลดความซับซ้อนลงโดยใช้การส่งข้อมูลแบบ I32.....	51
รูปที่ 4-21 การตั้งค่ากรอบของเวลา (Time Loop).....	51
รูปที่ 4-22 ตำแหน่งการติดตั้งมอเตอร์ควบคุมตำแหน่งของชุดทดสอบ HILs.....	52

รูปที่ 4-23 ระบบควบคุมมุมเลี้ยวของล้อทดสอบ ระบบควบคุมมุมการวางตัวของ ล้อจำลองพื้นถนนและระบบควบคุมตำแหน่งของล้อจำลองพื้นถนนตามลำดับ	52
รูปที่ 4-24 ตัวอย่างการแสดงจำนวนพัลส์ของมอเตอร์ควมตำแหน่งของล้อจำลอง พื้นจากโปรแกรม LabVIEW และโปรแกรม CME	53
รูปที่ 4-25 การสอบเทียบระบบควบคุมมุมเลี้ยวของล้อทดสอบโดยใช้อุปกรณ์วัดมุม	54
รูปที่ 4-26 สเกลที่ใช้ในการสอบเทียบระบบควบคุมมุมการวางตัวของล้อจำลองพื้น	55
รูปที่ 4-27 แผงวงจร Hall sensor	56
รูปที่ 4-28 กล่องตัวต้านทานปรับค่าได้แบบดิจิทัล(MCP 41010)	56
รูปที่ 5-1 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านข้างของระบบล้อหน้าด้วยชุดทดสอบ HILs	59
รูปที่ 5-2 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านข้างของระบบล้อหลังด้วยชุดทดสอบ HILs	61
รูปที่ 5-3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของแรงต้านข้างกับมุมไถล ระหว่างล้อหน้าและล้อหลัง	62
รูปที่ 5-4 พฤติกรรมการเลี้ยวโค้งของรถฟอร์มูล่านักเรียนที่ความเร็ว 15 m/s	66
รูปที่ 5-5 พฤติกรรมการเลี้ยวโค้งของรถฟอร์มูล่านักเรียนที่ความเร็ว 20 m/s	66
รูปที่ 5-6 พฤติกรรมการเลี้ยวโค้งของรถฟอร์มูล่านักเรียนที่ความเร็ว 25 m/s	67
รูปที่ 5-7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งต้านข้างและมุมเลี้ยวตามทฤษฎี	67
รูปที่ 5-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวกับความเร่งต้านข้างในการทดลองการเลี้ยวโค้ง ด้วยรัศมีความโค้งคงที่	68
รูปที่ 6-1 แสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าต่างๆบนรถจริง	70
รูปที่ 6-2 ตัววัดความเร่งและความหน่วงแบบ 3 แกน ยี่ห้อ KISTLER รุ่น K-BEAM 8393B10	71
รูปที่ 6-3 เครื่องวัดระยะกระจัดของบริษัท GEFRAN รุ่น PZ34-S	72
รูปที่ 6-4 กล่อง ECU ยี่ห้อ MoTec รุ่น m400	73
รูปที่ 6-5 การแสดงข้อมูลที่วัดได้ของกล่อง MoTec m400 ECU ผ่านคอมพิวเตอร์	73
รูปที่ 6-6 ตัววัดความเร่งและความหน่วงพร้อมภาชนะบรรจุ	74

รูปที่ 6-7 ตัววัดความเร่งและความหน่วงที่ได้รับการติดตั้งบนรถจริง	75
รูปที่ 6-8 การติดตั้งเครื่องมือวัดการกระจัดเข้ากับแร็คพวงมาลัย	76
รูปที่ 6-9 การติดตั้งเครื่องมือวัดการกระจัดของแร็คพวงมาลัยและแผ่นป้องกันที่เสร็จสมบูรณ์	76
รูปที่ 6-10 ตำแหน่งการติดตั้งกล่อง ECU ยี่ห้อ MoTec รุ่น m400	77
รูปที่ 6-11 Diagram ของสนามทดสอบแบบ skidpad แบบรัศมีความโค้งคงที่	78
รูปที่ 6-12 สนามที่ใช้ทำการทดสอบการวิ่งเป็นวงกลม	79
รูปที่ 6-13 การทดสอบการวิ่งเป็นวงกลมด้วยรถฟอร์มูล่านักเรียน	79
รูปที่ 6-14 ข้อมูลการทดสอบที่แสดงผลด้วยโปรแกรม MoTec i2 standard 1.0	80
รูปที่ 6-15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวของล้อกับความเร่งด้านข้าง ในการทดสอบวิ่งเป็นวงกลมครั้งที่ 1	81
รูปที่ 6-16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวของล้อกับความเร่งด้านข้าง ในการทดสอบวิ่งเป็นวงกลมครั้งที่ 2	81
รูปที่ 6-17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวของล้อกับความเร่งด้านข้าง ในการทดสอบวิ่งเป็นวงกลมครั้งที่ 3	82
รูปที่ 6-18 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งด้านข้างกับมุมเลี้ยวล้อ ที่ได้จากการทดสอบด้วยรถจริงและสมการเส้นตรงที่แสดงถึงพฤติกรรมพอดีโค้ง	83
รูปที่ 7-1 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งด้านข้างกับมุมเลี้ยวของล้อ ที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องHILsและรถจริง	84
รูปที่ ก-1 ชิ้นส่วนเสริมแรงที่ติดตั้งบริเวณระบบบังคับเลี้ยว	97
รูปที่ ก-2 ชิ้นส่วนเสริมแรงที่ติดตั้งบริเวณชุดตัวหน่วงการสั่นสะเทือน	98
รูปที่ ข-1 มอเตอร์ขับเคลื่อนล้อทดสอบและล้อจำลองพื้นถนน	99
รูปที่ ข-2 ชุดควบคุมมุมการวางตัวและตำแหน่งล้อจำลองพื้นถนน	101
รูปที่ ข-3 มอเตอร์ควบคุมมุมเลี้ยวของล้อทดสอบ	102
รูปที่ ข-4 เฟืองทดส่งกำลังขับเคลื่อนล้อทดสอบ	102

รูปที่ ข-5 เฟืองทดในระบบควบคุมมุมเลี้ยวล้อทดสอบ	103
รูปที่ ข-6 อุปกรณ์ตรวจวัดแรง	104
รูปที่ ข-7 ชุดลูกปืนเชิงเส้นแนวตั้ง.....	105
รูปที่ ข-8 ชุดลูกปืนเชิงเส้นแนวราบ.....	106
รูปที่ ข-9 ชุดลูกปืน โคนิ่ง.....	107
รูปที่ ข-10 Timing pulley.....	108
รูปที่ ข-11 สายพาน timing	108
รูปที่ ข-12 contactor กระแสตรง	109
รูปที่ ข-13 แบตเตอรี่	110
รูปที่ ข-14 อุปกรณ์ขยายสัญญาณ Accelus	110
รูปที่ ข-15 อุปกรณ์ขยายสัญญาณ MillipaK.....	111
รูปที่ ค-1 ตัววัดความเร่งและความหน่วงยี่ห้อ KISTLER รุ่น K-BEAM 8393B10	114
รูปที่ ค-2 ขนาดและมิติของเครื่องมือวัดระยะกระจัด ของบริษัท GEFRAN รุ่น PZ34-S	116
รูปที่ ค-3 กล่อง ECU ยี่ห้อ MoTec รุ่น m400	119
รูปที่ ง1-1 หน้าจอแสดง Input Pins Setup	121
รูปที่ ง1-2 หน้าจอแสดง Calibration Table.....	122
รูปที่ ง1-3 การสอบเทียบตัววัดความเร่งที่ 0 g.....	122
รูปที่ ง1-4 การสอบเทียบตัววัดความเร่งที่ -1 g	123
รูปที่ ง1-5 การสอบเทียบตัววัดความเร่งที่ 1 g.....	124
รูปที่ ง1-6 ลักษณะการวางตำแหน่งกล่องอุปกรณ์ในการสอบเทียบค่าความเร่งตามแนวยาวที่ -1 ,0 และ 1 g ตามลำดับ	124
รูปที่ ง2-1 เปอร์เซนต์การหมุนของพวงมาลัย (วงกลมสีแดง) บนโปรแกรม Motec ECU Manager	126
รูปที่ ง2-2 เปอร์เซนต์การหมุนพวงมาลัยที่ตำแหน่ง 0% (พวงมาลัยตรง) บนโปรแกรม MoTec ECU Manager	126

รูปที่ ง2-3 มุมล้อบนเครื่องวัดองศาที่เปอร์เซ็นต์การหมุนพวงมาลัย 0%..... 127

รูปที่ ง2-4 เปอร์เซ็นต์การหมุนพวงมาลัยที่ตำแหน่ง 30% บนโปรแกรม MoTec ECU Manager ... 127

รูปที่ ง2-5 มุมล้อที่เปอร์เซ็นต์การหมุนพวงมาลัย 30%..... 128

รูปที่ ง2-6 กราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างเปอร์เซ็นต์การหมุนของพวงมาลัยกับมุมล้อ 128

รูปที่ จ2-1 การคำนวณที่ศูนย์กลางมวลแนวราบสมมุติ..... 133

รูปที่ จ2-2 ตำแหน่งศูนย์กลางมวล..... 136

รูปที่ จ3-1 ภาพจำลองระยะและตัวแปรที่ใช้ในการทดลองหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อย 138

รูปที่ ฉ1-1 โปรแกรมควบคุมที่แสดงบนคอมพิวเตอร์ notebook 143

รูปที่ ฉ1-2 โปรแกรมควบคุมหลักของชุดทดสอบ HILs 145

รูปที่ ฉ-2 โปรแกรมควบคุมบนเครื่อง NI PXI Controller 147

รูปที่ ช-1 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ Tire model บนโปรแกรม Microsoft Excel 149

รูปที่ ช-2 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแบบการวิ่งเป็นวงกลมบนโปรแกรม Microsoft Excel150

รูปที่ ช-1 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบวิ่งเป็นวงกลมด้วยรถจริงบนโปรแกรม MoTec i2 152

รูปที่ ช-2 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบวิ่งเป็นวงกลมด้วยรถจริงบนโปรแกรม Microsoft Excel..... 152

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การแข่งขัน TSAE Auto challenge เป็นการแข่งขันรถฟอร์มูล่านักเรียน (Student Formula) ที่ต้องใช้ความรู้และเทคนิคทางวิศวกรรมเพื่อใช้ในการออกแบบและสร้างรถฟอร์มูล่านักเรียนให้มีประสิทธิภาพและสมรรถนะที่ดีที่สุดในการแข่งขัน โดยระบบที่ต้องได้รับการออกแบบได้แก่ ระบบไอดี-ไอเสีย ระบบส่งกำลัง ระบบรองรับ ระบบบังคับเลี้ยว ระบบเบรก เป็นต้น ซึ่งแต่ละระบบมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของรถแตกต่างกันไป เช่น ระบบไอดี-ไอเสียจะส่งผลต่อแรงม้าและแรงบิดของเครื่องยนต์ ระบบส่งกำลังส่งผลต่อการขับเคลื่อนของรถ ระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยวส่งผลต่อการควบคุมของรถ เป็นต้น

โดยทั่วไปในการแข่งขันทางด้านความเร็วนั้น กำลังของเครื่องยนต์จะส่งผลต่อสมรรถนะของรถเป็นอย่างมากในกรณีที่สนามแข่งมีลักษณะเป็นทางตรงค่อนข้างยาว แต่สำหรับการแข่งขัน TSAE Auto challenge นั้น ด้วยลักษณะรูปแบบของสนามแข่งที่มีความหลากหลายที่ประกอบด้วยส่วนที่เป็นการวิ่งเป็นเส้นตรงและส่วนที่เป็นการเลี้ยวโค้ง โดยส่วนที่มีการวิ่งเป็นเส้นตรงเป็นส่วนน้อยของสนามซึ่งส่วนใหญ่เป็นการเลี้ยวเข้าโค้งที่มีทั้งแบบโค้งความเร็วต่ำและโค้งความเร็วสูง ซึ่งการที่ทำให้รถแข่งสามารถทำเวลาได้เร็วที่สุดนอกจากกำลังของเครื่องยนต์แล้วความสามารถในการเลี้ยวของรถจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่เข้ามามีบทบาทต่อสมรรถนะของรถ โดยความสามารถในการเลี้ยวของรถนั้นขึ้นอยู่กับระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยวเป็นหลัก ดังนั้นระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยวจึงเป็นส่วนสำคัญที่ต้องได้รับการออกแบบและพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงสุดนอกเหนือจากกำลังของเครื่องยนต์

ในการออกแบบและพัฒนาาระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยวจะทำการออกแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์และต้องมีการทดสอบก่อนที่จะทำการสร้างและติดตั้งในรถจริงเพื่อให้ทราบถึงผลลัพธ์ที่แท้จริงของระบบที่ส่งผลต่อการควบคุมของรถ โดยการทดสอบระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยวแบบสร้างและติดตั้งจริงในรถนั้นมีข้อด้อยก็คือ การทดสอบจะทำได้ก็ต่อเมื่อรถจริงทั้งคันได้สร้างเสร็จหรือต้องมีการสร้างรถจำลอง(Prototype car) ขึ้นมาเพื่อติดตั้งระบบที่ใช้ในการทดสอบ ทำให้สิ้นเปลืองทั้งเวลาและค่าใช้จ่ายในการผลิต และการทดสอบซ้ำในสภาพแวดล้อมแบบเดิมยังทำได้ยากอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีการทดสอบโดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถแต่ต้องแลกด้วยการคำนวณสมการการเคลื่อนที่และแบบจำลองที่ซับซ้อนอย่างมาก[6] ดังนั้นแนวทางการทดสอบที่สามารถลดความยุ่งยากในการทดสอบแบบเดิม

นั่นก็คือ การสร้างอุปกรณ์จำลองชิ้นส่วนของระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยวจริงแล้วนำมาทำงานร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทดสอบให้ได้มาซึ่งผลลัพธ์ที่ต้องการ แนวทางดังกล่าวถูกเรียกว่า

Hardware-In-the-Loop simulator (HILs) [2][8][19]

(*หมายเหตุ เพื่อความสะดวกในการใช้คำ ในบทความนี้ได้ใช้ HILs เพื่อแทน Hardware-In-The-Loop simulator)

HILs เป็นแนวทางการทดสอบอุปกรณ์หรือระบบย่อยของอุปกรณ์ที่ทำงานประสานกัน โดยมีหลักการคือการนำระบบย่อยดังกล่าวมาทำงานประสานกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในคอมพิวเตอร์ โดยแบบจำลองในคอมพิวเตอร์จะทำหน้าที่สร้างหรือเติมเต็มส่วนอื่นๆของอุปกรณ์ในระบบใหญ่ให้สมบูรณ์ ซึ่งลักษณะการทำงานแสดงได้ดังรูปที่ 1-1 ข้อดีของการใช้ชุดทดสอบ HILs นี้คือ ผู้ทดสอบไม่จำเป็นต้องสร้างระบบจริงทั้งหมดเพื่อทำการทดสอบลักษณะของระบบย่อยเพียงบางประการและสามารถทำได้ในห้องปฏิบัติการทำให้การควบคุมสิ่งแวดล้อมหรือตัวแปรอื่นๆที่ส่งผลต่อระบบที่ต้องการทดสอบทำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้การทดสอบระบบด้วยชุดทดสอบ HILs ได้รับความนิยอย่างกว้างขวาง ซึ่งการทดสอบระบบยานยนต์ส่วนใหญ่ก็ใช้วิธีทดสอบนี้เช่นกัน[1][3][6][7][10][11][12]

การทดสอบระบบรองรับด้วยชุดทดสอบ HILs ในรถยนต์ทั่วไปตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันนั้น จะมุ่งเน้นไปที่การตรวจวัดแรงที่เกิดขึ้นระหว่างล้อกับพื้นผิวสัมผัส เนื่องจากแรงดังกล่าวถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อการเคลื่อนที่ของตัวรถ โดยสามารถบ่งชี้ถึงความปลอดภัยของรถยนต์คันนั้น[4][5][9][10] เป็นดัชนีชี้วัดความสะดวกสบาย[1][6] หรือบ่งบอกถึงสมรรถนะในการควบคุมของรถ[13][19][ใจ] ซึ่งการทดสอบแบบแยกระบบกัน ทำให้ไม่สามารถทำนายผลได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากจะมีแรงส่งถ่ายระหว่างระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยวเสมอ[4][9] ดังนั้นวิธีการทดสอบแบบ Hardware-In-the-Loop จึงมีความเหมาะสมที่ใช้ในการทดสอบการควบคุมของรถฟอร์มูล่านักเรียน เนื่องจากสามารถบ่งชี้ถึงสมรรถนะในการควบคุมของรถได้ และถือเป็นการพัฒนาระบบของรถฟอร์มูล่านักเรียนในแนวทางใหม่ที่ต่างจากเดิมอีกด้วย

1.2 การพัฒนาชุดทดสอบ Hardware-In-The-Loop ที่ใช้ทดสอบระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยวสำหรับรถฟอร์มูล่านักเรียน

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาชุดทดสอบ HILs ที่มีอยู่เดิม[19]ให้สามารถใช้ทดสอบระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยวของรถฟอร์มูล่านักเรียน โดยแนวคิดหลักก็คือ การออกแบบจุดยึดระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยวบนชุดทดสอบ HILs [24] เดิมให้สามารถใช้งานได้กับระบบ

รองรับและระบบบังคับเลี้ยวของรถฟอร์มูล่านักเรียน จากนั้นจึงทำการตรวจวัดแรงที่ล้อที่เกิดขึ้น ขณะเลี้ยวบนพื้นผิวที่เลียนแบบพื้นผิวถนน โดยอุปกรณ์ที่ใช้ (Hardware) จะใช้ส่วนของโครงสร้างระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยวจริงจากรถฟอร์มูล่านักเรียน ซึ่งสำหรับการตรวจวัดแรงที่ล้อ สำหรับชุดทดสอบนั้น หากอุปกรณ์ทดสอบมีความใกล้เคียงกับระบบจริง ผลที่ได้จากการทดสอบก็ จะมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น อีกทั้งการทดสอบด้วยโครงสร้างระบบขนาดจริงน่าจะให้ผลที่ น่าเชื่อถือกว่าการใช้โครงสร้างขนาดจำลอง สำหรับในส่วนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บน คอมพิวเตอร์ (Software) จะจำลองการเลี้ยวของรถจริงด้วยแบบจำลองสองล้อ (Bicycle Model) เพื่อ สร้างสัญญาณควบคุมการเลี้ยวที่เกิดขึ้นบนอุปกรณ์ทดสอบเพื่อให้ได้มุมไถล (Slip angles) ขณะเกิด การเลี้ยวเป็นไปอย่างถูกต้อง แล้วตรวจวัดแรงที่เกิดขึ้นกับล้อทดสอบที่หมุนอยู่บนลูกกลิ้งที่มีพื้นผิว เลียนแบบผิวถนน โดยแรงที่เกิดขึ้นกับล้อทดสอบที่ได้จากการตรวจวัดอย่างถูกต้องสามารถนำไป วิเคราะห์และนำผลที่ได้ไปพัฒนาระบบรองรับและบังคับเลี้ยวสำหรับรถฟอร์มูล่าให้มี ประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว และเพื่อความถูกต้องและแม่นยำในการวิเคราะห์ ผลจึงต้องมีการทดสอบเปรียบเทียบระหว่างผลลัพธ์ที่ได้จากระบบที่ติดตั้งบนชุดทดสอบ HILs กับ ผลลัพธ์ที่ได้จากรถฟอร์มูล่านักเรียนคันจริง เพื่อให้แน่ใจว่าชุดทดสอบ HILs สามารถทำนาย พฤติกรรมของระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยวจริงที่ส่งผลต่อการควบคุม (Handling) ของรถ ฟอร์มูล่านักเรียน

เนื่องจากการทดสอบด้วยชุดทดสอบ HILs ทำให้สามารถปรับปรุงเปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ ต่างๆในระบบได้ง่ายกว่าการทดสอบกับรถจริง ซึ่งในความเป็นจริงการเปลี่ยนแปลงชิ้นส่วนระบบ รองรับในรถจริงนั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องจากการออกแบบระบบรองรับในรถจริงนั้นจะมีระยะและ ตำแหน่งจุดยึดระบบรองรับที่ตายตัว และนอกจากนี้รถฟอร์มูล่านักเรียนสามารถปรับตั้งค่ามุมล้อได้ เพื่อความเหมาะสมตามแต่ละรายการการแข่งขัน โครงสร้างส่วนติดตั้งจึงควรออกแบบให้สามารถ ปรับตั้งค่ามุมล้อได้เช่นกัน ดังนั้นการออกแบบในเบื้องต้นนี้ต้องออกแบบให้อุปกรณ์ดังกล่าว สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางโครงสร้างส่วนติดตั้งระบบรองรับของรถฟอร์มูล่านักเรียน เพื่อประโยชน์ในการทดสอบระบบรองรับในอนาคต เป็นผลให้สามารถเปรียบเทียบแรงที่เกิดขึ้นที่ ล้อเมื่อใช้ระบบรองรับที่มีลักษณะทางเรขาคณิต (Geometry) ที่ต่างกันได้ ทำให้การพัฒนา ระบบรองรับของรถฟอร์มูล่ามีประสิทธิภาพสูงขึ้น

1.3 วัตถุประสงค์

1. ปรับปรุงและพัฒนาชุดทดสอบ HILs เดิมในส่วนติดตั้งระบบรองรับ ฯ และระบบควบคุมชุดทดสอบ เพื่อให้สามารถใช้ทดสอบการควบคุมของรถฟอร์มูล่านักเรียนได้
2. ทดสอบระบบล้อ ระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยวร่วมกับชุดทดสอบ HILs เพื่อวัดการควบคุมของรถฟอร์มูล่านักเรียน
3. ทดสอบรถฟอร์มูล่านักเรียนจริงแล้วนำผลลัพธ์เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากชุดทดสอบ HILs เพื่อพิสูจน์ว่าชุดทดสอบสามารถทำนายผลลัพธ์เกี่ยวกับการควบคุมที่เกิดขึ้นได้ใกล้เคียงผลจากการทดสอบรถจริง

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาและประยุกต์แบบจำลองสองล้อที่มีเพื่อใช้ในการคำนวณลักษณะการเคลื่อนที่ของรถฟอร์มูล่านักเรียน
2. ออกแบบและสร้างโครงสร้างระบบรองรับ ฯจริง และโครงสร้างส่วนติดตั้งของระบบรองรับ ฯบนชุดทดสอบHILs
- 3.ปรับปรุงระบบสั่งการและควบคุมชุดทดสอบ HILs เดิมให้สามารถใช้ทดสอบระบบรองรับฯ รถฟอร์มูล่านักเรียนได้
4. ศึกษาวิธีการทดสอบเพื่อใช้ในวัดการควบคุมทางยานยนต์เพื่อนำมาใช้ทดสอบเปรียบเทียบการควบคุมระหว่างระบบรองรับที่ติดตั้งบนชุดทดสอบ HILs กับติดตั้งบนรถจริง
5. ทดสอบเพื่อวัดการควบคุมของรถฟอร์มูล่านักเรียนด้วยชุดทดสอบ HILs และด้วยรถจริง เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง

1.5 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาวิธีทดสอบแบบ Hardware-In-The-Loop ที่เกี่ยวข้องกับระบบรองรับยานยนต์จากงานวิจัยที่ผ่านมา
2. ออกแบบ โครงสร้างส่วนติดตั้งของระบบรองรับฯ รวมถึงปรับปรุงและแก้ไขในส่วนของระบบ ขับเคลื่อนชุดทดสอบ HILs เดิมให้สามารถใช้ทดสอบรถฟอร์มูล่านักเรียน
3. สร้าง โครงสร้างระบบรองรับและส่วนติดตั้งระบบรองรับฯ และติดตั้งเข้ากับชุดทดสอบ HILs เดิม

4. ศึกษาและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมถึงระบบควบคุมที่เหมาะสมกับระบบที่ได้ติดตั้งใหม่
5. วัดค่าพารามิเตอร์ที่ต้องใช้ในการคำนวณลักษณะการเคลื่อนที่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากรถ จริง
6. ทดสอบการควบคุมของรถฟอร์มูล่าด้วยการทดสอบแบบ HILs และวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ เพื่อแสดงผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการทำงานของระบบรองรับฯ โดยใช้วิธี Understeer gradient method , Step response
7. ทดสอบกับรถจริงเพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบ เพื่อแสดงให้เห็นว่าชุดอุปกรณ์ทดสอบสามารถใช้ทำนายพฤติกรรมการเข้าโค้งของรถจริงได้

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สร้างแนวทางในการทดสอบระบบรองรับฯ สำหรับรถฟอร์มูล่านักเรียน เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้ไปปรับปรุงและพัฒนาระบบในอนาคต
2. สามารถวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบเพื่อนำไปพิจารณาลักษณะการควบคุมของรถฟอร์มูล่านักเรียนที่มีผลมาจากระบบรองรับฯ และนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการปรับแต่งรถให้เหมาะสมกับสภาพการแข่งขัน

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยฉบับนี้มีจุดประสงค์หลักเพื่อพัฒนาระบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ของรถฟอร์มูล่านักเรียน โดยการนำชิ้นส่วนจริงของระบบรองรับการสั่นสะเทือนและระบบบังคับเลี้ยวของรถฟอร์มูล่านักเรียน มาทำการทดสอบร่วมกับแบบจำลองคณิตศาสตร์ทางคอมพิวเตอร์ด้วยชุดทดสอบ HILs โดยใช้วิธีการพัฒนาและดัดแปลงชุดทดสอบ HILs ที่มีอยู่เดิม ให้สามารถใช้ทดสอบระบบรองรับการสั่นสะเทือนและระบบบังคับเลี้ยวของรถฟอร์มูล่านักเรียนเพื่อใช้ตรวจวัดแรงที่กระทำต่อชุดล้อทดสอบ โดยในบทนี้จะเป็นการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งจะเน้นไปในทางการพัฒนาระบบต่างๆที่เกี่ยวข้องกับระบบรองรับการสั่นสะเทือนและระบบบังคับเลี้ยว ด้วยวิธีการแบบ Hardware-In-The-Loop

2.1 ที่มาและความสำคัญของการใช้วิธีการทดสอบแบบ Hardware-In-The-Loop

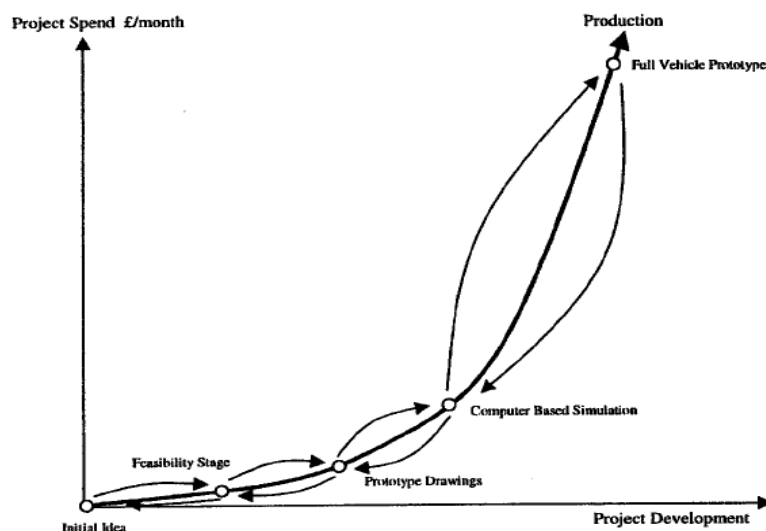
การออกแบบและผลิตชิ้นส่วนทางกลสำหรับงานเชิงวิศวกรรม ชิ้นส่วนเหล่านั้นต้องได้รับการทดสอบเพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือในด้านการใช้งานและตรงกับเป้าประสงค์ของการออกแบบ ซึ่งวิธีการทดสอบแบบใช้ชิ้นงานที่มีลักษณะเหมือนชิ้นงานจริงซึ่งนั่นก็คือ ชิ้นงานต้นแบบ (prototype) เป็นวิธีที่ให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องสูง แต่ในบางกรณีชิ้นส่วนเหล่านี้เป็นส่วนหนึ่งของระบบทำให้มีความจำเป็นต้องสร้างระบบทั้งหมดขึ้นมาเพื่อใช้ทดสอบอุปกรณ์เพียงแค่ชิ้นเดียว ทำให้สิ้นเปลืองทั้งเวลาและงบประมาณ นอกจากนี้การกำหนดสภาพแวดล้อมในกรณีที่ต้องมีการทดสอบซ้ำยังทำได้ยากอีกด้วย ส่วนการทดสอบโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นก็มีความซับซ้อนของระบบสมการและตัวแปรมาก ดังนั้นจึงได้มีการใช้วิธีการทดสอบที่ลดข้อดีของการทดสอบแบบใช้ชิ้นงานต้นแบบกับระบบจริง โดยอาศัยการจำลองสภาพแวดล้อมและระบบต่างๆที่เป็นองค์ประกอบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เข้ากับระบบย่อยที่มีชิ้นส่วนจริงที่ต้องการทดสอบ ซึ่งการทดสอบในลักษณะนี้ คือ การทดสอบแบบ Hardware-In-The-Loop [2][8][19]

วิธีการทดสอบแบบ Hardware-In-The-Loop ได้มีการนำไปใช้ในพัฒนาและทดสอบงานเชิงวิศวกรรมในหลายๆด้าน [8] โดยใช้ชุดทดสอบ HILs เช่นการพัฒนาควบคุมสัญญาณไฟจราจร[15] การพัฒนาระบบควบคุมมอเตอร์กระแสตรงแบบ Fuzzy [16] การพัฒนาระบบบังคับเลี้ยวแบบ Steer-by-wire [13] เป็นต้น และเนื่องจากการใช้ชุดทดสอบ HILs เป็นการทดสอบในลักษณะเวลาจริง (Real-time testing) บนอุปกรณ์ (Hardware) จริงที่นำมาแทนที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์บางส่วน [3] ดังนั้นการพัฒนาระบบต่างๆที่เกี่ยวกับทางด้านยานยนต์ในหลายๆระบบ ล้วนแล้วมีขั้นตอนในการใช้วิธี Hardware-In-The-Loop ในการพัฒนาแทบทั้งสิ้น

การใช้ชุดทดสอบ HILs เป็นการนำชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ที่สนใจ มาทดสอบร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนคอมพิวเตอร์ซึ่งจะจำลองระบบและอุปกรณ์อื่นที่เกี่ยวข้องแทรกการใช้ชิ้นส่วนจริง ทำให้ได้เปรียบการทดลองแบบเดิม

ข้อดีของการใช้การใช้ชุดทดสอบ HILs

1. เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทางคอมพิวเตอร์เพียงอย่างเดียว พบว่าจะต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความถูกต้องสูง จึงจำเป็นต้องใช้ตัวแปรจำนวนมาก ทำให้การเขียน โปรแกรมมีความยากลำบากและใช้เวลาในการคำนวณมาก [7] ดังนั้นถ้าทดแทนด้วยอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนจริงในส่วนนี้ ก็จะทำให้ได้ความถูกต้อง แม่นยำที่สูงขึ้นและลดระยะเวลาในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ลง
2. ในการทดสอบแบบเท่านั้น ในบางกรณีที่เราต้องการทดสอบชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ชิ้นเดียว แต่จะไม่สามารถทำงานได้ถ้าไม่มีทั้งระบบหรืออุปกรณ์อื่นๆมารองรับ ดังเช่น การทดสอบระบบเบรก ABS จำเป็นต้องใช้รถยนต์จริงในการติดตั้งระบบและนำไปทำการทดสอบ ทำให้สิ้นเปลืองทั้งเวลาและค่าใช้จ่าย แต่การใช้ชุดทดสอบ HILs นั้นสามารถแยกระบบที่สนใจมาทำการทดสอบได้ ทำให้การทดสอบสามารถทำได้ง่ายขึ้น สะดวกขึ้น และประหยัดทั้งเวลาและค่าใช้จ่าย [7][8][16][17] ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายและความก้าวหน้าในการพัฒนาสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2-1 ดังนี้



รูปที่ 2-1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าใช้จ่ายในแต่ละขั้นตอนของการพัฒนา [16]

จากรูปที่ 2-1 จะเห็นว่า การพัฒนาในช่วงต้น (ตั้งแต่เริ่มออกแบบจนถึงการตรวจสอบด้วยการจำลองในคอมพิวเตอร์) จะมีค่าใช้จ่ายที่น้อยกว่าการทดสอบรถยนต์จริงทั้งกันอย่างชัดเจน ดังนั้นการทดสอบอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนเฉพาะที่สนใจ จะช่วยลดค่าใช้จ่ายและระยะเวลาลงได้

3. สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมหรือค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบได้อย่างแม่นยำ เช่น มุมเลี้ยวในการทดสอบระบบบังคับเลี้ยวหรือภาระโหลดในแนวดิ่ง[4][17] [19] เป็นต้น นอกจากนี้การทดสอบซ้ำด้วยสภาวะแบบเดิมยังสามารถทำได้ง่าย[8]

4. ในการทดสอบบางประเภทที่ต้องมีมนุษย์ไปเกี่ยวข้อง การใช้ชุดทดสอบ HILs จะมีความปลอดภัยมากกว่าการทดสอบด้วยตัวต้นแบบ (prototype) เช่น การทดสอบการควบคุมเครื่องบินของนักบิน โดยการใช้เครื่องจำลองการบิน (flight simulator) [8]

ถึงแม้ว่าการใช้ชุดทดสอบแบบ HILs จะมีข้อได้เปรียบการทดลองแบบเดิมอยู่หลายประการ แต่การทดสอบแบบนี้ก็มีข้อเสียเปรียบด้วยเช่นกัน ซึ่งหากเปรียบเทียบกับ การทดสอบด้วยวิธีการใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพียงอย่างเดียว การใช้ชุดทดสอบแบบ HILs จะมีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าและมีความยุ่งยากในการวางระบบที่ยุ่งยากกว่า

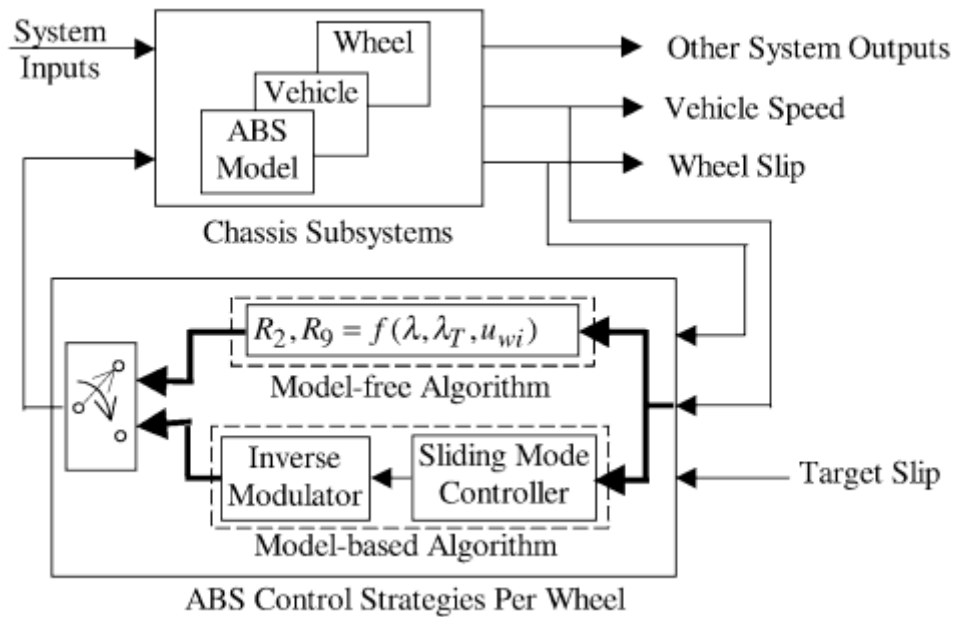
2.2 การใช้ชุดทดสอบ HILs ในงานทางด้านยานยนต์

การใช้ชุดทดสอบ HILs ได้เข้ามามีบทบาทที่สำคัญต่อการพัฒนาทางด้านยานยนต์เป็นอย่างมาก เช่น การพัฒนาทางด้านระบบบังคับเลี้ยว การพัฒนาทางด้านระบบรองรับ การพัฒนาทางด้านความปลอดภัย เป็นต้น ในหัวข้อนี้จึงได้แสดงรายละเอียดของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนา ยานยนต์ในด้านต่างๆด้วยวิธีการใช้ชุดทดสอบ HILs ดังนี้

2.2.1 งานวิจัยด้านความปลอดภัย

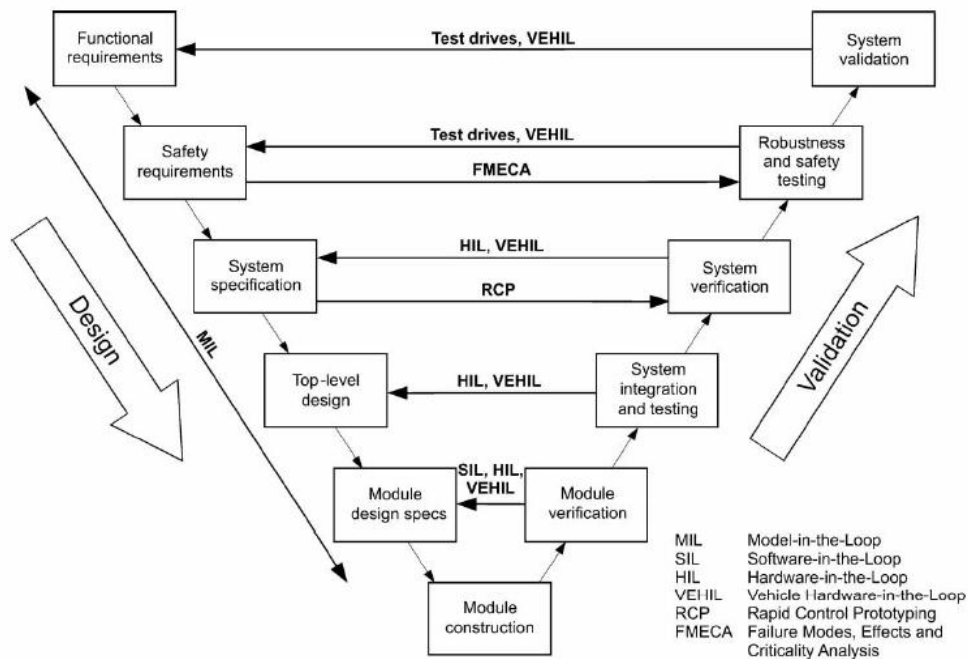
อุบัติเหตุสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายๆปัจจัย เช่น ความสามารถในการขับขี่ของผู้ขับ สภาพอากาศหรือสภาพแวดล้อม ความสมบูรณ์ของรถยนต์ เป็นต้น ซึ่งการลดอัตราการเกิด อุบัติเหตุนั้นสามารถทำได้แต่ความยากง่ายในการแก้ไขปัญหานั้นขึ้นอยู่กับแต่ละปัจจัย โดยความสา มารถในการขับขี่ของผู้ขับนั้นต้องอาศัยการฝึกฝนและประสบการณ์ซึ่งต้องอาศัยเวลา เช่นเดียวกับ ความสมบูรณ์ของรถยนต์ซึ่งต้องอาศัยการดูแลรักษาของเจ้าของ ส่วนสภาพอากาศหรือ สภาพแวดล้อมนั้นเป็นสิ่งที่ไม่สามารถควบคุมได้ จะเห็นได้ว่าปัจจัยทั้งสามที่กล่าวมาสามารถ ควบคุมได้ยาก ดังนั้นทางบริษัทผู้ผลิตรถยนต์จึงได้ติดตั้งระบบรักษาความปลอดภัยเพื่อช่วยลด อัตราการเกิดอุบัติเหตุและลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากอุบัติเหตุ โดยปัจจุบันมีทั้งระบบช่วยเหลือ และช่วยควบคุมยานยนต์ต่างๆ ทั้งระบบแบบ Passive ที่เป็นระบบช่วยเหลือเมื่อเกิดอุบัติเหตุขึ้น เช่น เข็มขัดนิรภัย ถุงลมนิรภัย ฯลฯ และระบบ Active ที่จะช่วยในการหลีกเลี่ยง หรือลดอันตราย ก่อนเกิดอุบัติเหตุ เช่น ระบบป้องกันล้อล็อก (ABS) ระบบช่วยคุมเสถียรภาพของรถ (VSC) ฯลฯ จะ เห็นได้ว่าระบบช่วยเหลือต่างๆแบบ Active มีส่วนช่วยในการลดอัตราการเกิดอุบัติเหตุต่อระยะการ เดินทางอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ระบบ Passive มีส่วนในการช่วยลดความเสียหายหลังเกิดอุบัติเหตุ ดังนั้นแนวทางในการพัฒนายานยนต์ในปัจจุบันจึงเน้นไปที่ระบบ Active เป็นส่วนใหญ่ ดังเช่น ระบบช่วยป้องกันล้อล็อกหรือ ABS (antilock brake system) ซึ่งถือเป็นระบบช่วยเหลือแบบ active ได้มีการพัฒนาเพื่อใช้กับรถเพื่อการพาณิชย์ เช่น รถกระบะ หรือ รถบรรทุก เป็นต้น โดย ได้ มีการทดสอบเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการมีหรือไม่มีระบบช่วยเบรก ABS โดยการ นำมาทดสอบกับรถบรรทุกขนาดกลางและบรรทุกสินค้าที่เป็นลักษณะกล่องที่สามารถเคลื่อนที่ใน แนวระนาบได้ ซึ่งทำให้แรงที่กระทำที่ล้อแต่ละล้อเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา โดยการใช้การทดสอบ

แบบ Hardware-In-The-Loop โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะจำลองระบบการทำงานของ ABS การเคลื่อนตัวของกล่องสินค้า และรถบรรทุก ดังรูปที่ 2-2 ทำงานร่วมกับระบบเบรกจริง ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้พบว่าการมีระบบช่วยเบรก ABS จะใช้เวลาในการเบรคน้อยกว่าการที่ไม่มีระบบช่วยเบรกที่ระยะทางเท่ากันและความเร็วเริ่มต้นในการเบรกเท่ากัน[10]



รูปที่ 2-2 แผนภาพการควบคุมระบบช่วยเบรก ABS ที่ใช้ทดสอบการเบรกของรถบรรทุก[10]

การพัฒนา ระบบ Active ต่างๆ นั้น จะมีขั้นตอนคล้ายกับการออกแบบเชิงวิศวกรรม คือ เริ่มแรกต้องมีแนวคิดว่าจะออกแบบอุปกรณ์มีหน้าที่การทำงานอย่างไรแล้วจึงเข้าสู่กระบวนการออกแบบว่าจะมีลักษณะรูปร่างอย่างไรจัดวางตรงตำแหน่งไหน จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการผลิตชิ้นงานต้นแบบ เมื่อเสถียรกระบวนการสร้างแล้ว จึงเข้าสู่กระบวนการทดสอบเพื่อให้เห็นว่าสามารถบรรลุเป้าประสงค์ของการออกแบบหรือไม่ ซึ่งในกระบวนการนี้จะมีการใช้ชุดทดสอบ HIL อยู่เสมอ นอกเหนือจากใช้ชุดทดสอบ HILs แล้ว อาจมีการนำระบบหรืออุปกรณ์ดังกล่าว ประกอบเข้ากับยานยนต์จริงเพื่อทำการทดสอบการทำงานของระบบอีกด้วย ซึ่งวิธีการดังกล่าว เรียกว่า Vehicle-Hardware-in-the-Loop (VEHIL) [6] จากวิธีการและขั้นตอนการพัฒนาที่กล่าวมาทั้งหมด สามารถสรุปเป็นแผนภาพวี (V-Diagram) ได้ดังรูปที่ 2-3 ดังนี้



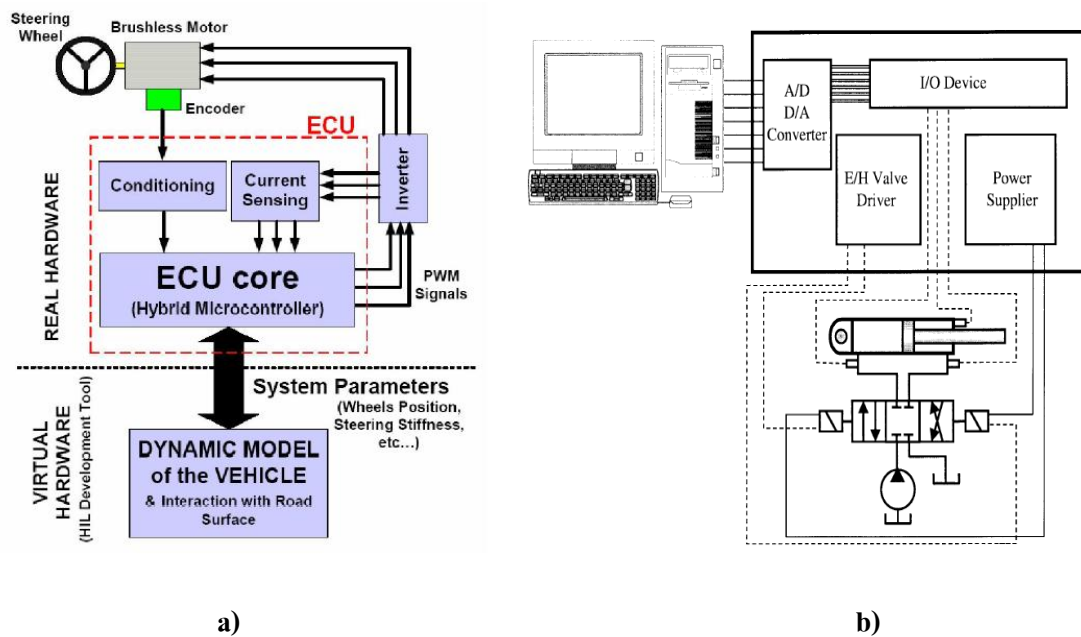
รูปที่ 2-3 แผนภาพ V-Diagram [7]

จากรูปที่ 2-3 จะเห็นว่าการปรับแก้อุปกรณ์แต่ละชิ้นด้วยชุดทดสอบ HILs ก่อนที่จะผ่านการทดสอบสู่ขั้นตอนต่อไปนั้น จะส่งผลให้การทดสอบและพัฒนามีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น เนื่องจากการตรวจสอบหน้าที่การทำงานของอุปกรณ์ชิ้นใดชิ้นหนึ่งนั้นทำได้ง่ายและประหยัดกว่าการปรับแก้ระบบทั้งหมดพร้อมๆกัน

2.2.2 งานวิจัยด้านระบบบังคับเลี้ยว

ระบบบังคับเลี้ยวเป็นระบบที่สำคัญระบบหนึ่งที่ส่งผลต่อการควบคุมรถยนต์ เนื่องจากเป็นระบบที่เป็นการเชื่อมต่อระหว่างผู้ขับขี่กับรถยนต์ โดยต้องสามารถทำให้รถตอบสนองการควบคุมของผู้ขับขี่ได้รวดเร็วและต้องสามารถส่งผ่านความรู้สึกจากพื้นถนนไปถึงผู้ขับเพื่อรับรู้ความรู้สึกต่อการเคลื่อนที่ของรถในขณะนั้น งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบบังคับเลี้ยวนี้มีหลายแนวทาง ทั้งการทดสอบการตอบสนองของพวงมาลัยด้วยระบบการควบคุมแบบทันที (Active steering control) โดยใช้ชุดทดสอบ HILs ซึ่งการตอบสนองของพวงมาลัยต่อผู้ขับจะส่งผลต่อความปลอดภัยของการขับขี่และทำให้ผู้ขับไม่รู้สึกวิตกเมื่อเจอกับสถานการณ์ที่เสี่ยงต่ออุบัติเหตุ เช่น การเลี้ยวเข้าโค้งที่มีพื้นผิวลื่น เป็นต้น [14] หรือการทดสอบระบบบังคับเลี้ยวแบบ steer-by-wire เพื่อการตอบสนอง

ของแรงป้อนกลับ (force feedback) โดยใช้วิธีการใช้ชุดทดสอบ HILs เช่นกัน [13] ดังรูปที่ 2-4 a หรือแม้กระทั่งการทดสอบระบบบังคับเลี้ยวแบบ Electrohydraulic (E/H) สำหรับรถใช้งานในทางทุรกันดาร (Off road vehicle) เช่น รถแทรกเตอร์ เพื่อดูพฤติกรรมทางพลศาสตร์ ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวของถนน[12] ดังรูป 2-4 b



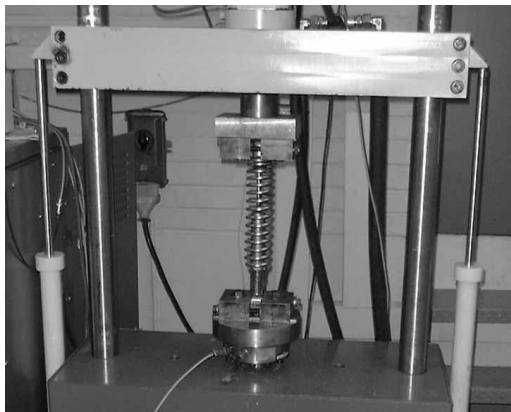
รูปที่ 2-4 แสดงการใช้วิธีการทดสอบแบบ HIL ร่วมกับระบบบังคับเลี้ยว

a). steer-by-wire(SBW)[13] b). Electrohydraulic (E/H)[12]

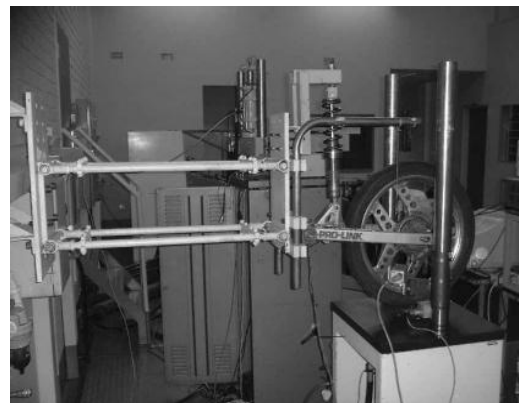
2.2.3 งานวิจัยด้านระบบรองรับ

ความสะดวกสบายในการขับขี่และความสามารถในการเข้าโค้งของรถยนต์นั้นขึ้นอยู่กับระบบรองรับการสั่นสะเทือนของรถยนต์เป็นอย่างมาก โดยทั่วไปเราจะเรียกระบบรองรับนี้ว่า “ช่วงล่าง” ซึ่งระบบนี้สามารถจำแนกได้หลายประเภทตามรูปทรงและลักษณะการทำงาน เช่น ระบบรองรับแบบปีกนกสองชั้น (Double wishbone) ระบบรองรับแบบแมคเฟอร์สันสตรัท (macpherson strut) ระบบรองรับแบบคานแข็ง (Rigid Suspension) เป็นต้น โดยระบบรองรับแต่ละประเภทจะถูกติดตั้งในรถยนต์ตามลักษณะการใช้งานที่แตกต่างกันไป การพัฒนาระบบรองรับจึงมีทั้งการพัฒนาเพื่อความสะดวกสบายและความปลอดภัยในการขับขี่ ซึ่งเหมาะสมกับรถยนต์นั้นส่วน

บุคคลหรือรถยนต์โดยสารทั่วไป หรือการพัฒนาเพื่อเน้นสมรรถนะของระบบรองรับซึ่งเหมาะสมกับรถแข่งหรือรถยนต์ที่มีสมรรถนะสูง การใช้ชุดทดสอบ HILs จึงได้เข้ามามีบทบาทในการพัฒนาระบบรองรับการสั่นสะเทือน โดยได้มีการวิจัยระบบช่วยทำงานของระบบรองรับการสั่นสะเทือน ดังเช่น การพัฒนาระบบ Semi-Active ที่ใช้อุปกรณ์ทดสอบเป็น Continuous variable damper (CVD) [1][3] ร่วมกับระบบควบคุมแบบ skyhook [3] และใช้แบบจำลอง Quarter car เป็นแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์เพื่อดูการตอบสนองของ CVD ซึ่งผลที่ได้พบว่า การใช้ CVD ทำให้ความเร่งที่ตัวรถลดลงอย่างมากและตัวรถเข้าสู่สถานะคงที่ได้เร็วขึ้น [1] เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้มีการทดลองเปรียบเทียบผลที่ได้จากชุดทดสอบ HILs ระหว่างการใช้ช่วงล่างของรถมอเตอร์ไซค์เพียงอย่างเดียว (shock absorber and spring) ร่วมกับแบบจำลอง Quarter car กับการใช้ระบบรองรับทางด้านหลังทั้งหมดของมอเตอร์ไซค์ (shock absorber , spring , wheel and arm) ซึ่งเป็นแบบ quarter car โดยให้ผลการตอบสนองไปในทางเดียวกัน [7] ดังรูปที่ 2-5



a)



b)

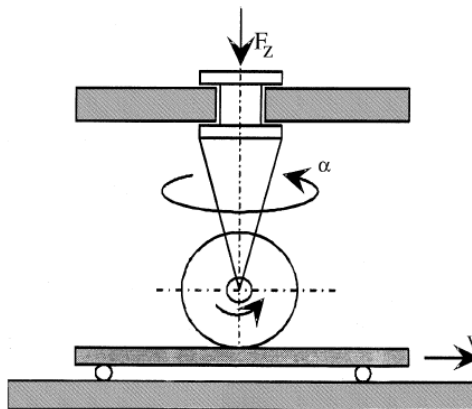
รูปที่ 2-5 การทดสอบแบบ HILs a) เฉพาะช่วงล่างของรถเพียงอย่างเดียว b) แบบ Quarter car [7]

2.2.4 งานวิจัยทางด้านระบบล้อและยางรถยนต์

ล้อและยางรถยนต์เป็นส่วนหนึ่งที่มีส่งผลต่อความปลอดภัยและสมรรถนะของรถยนต์เป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นส่วนที่ต้องทำให้สัมผัสกับพื้นผิวถนนตลอดเวลา จึงเป็นส่วนที่ต้องได้รับการออกแบบและทดสอบจนสามารถเชื่อถือได้ว่าสามารถรองรับการใช้งานได้จริง โดยทั่วไปแล้วล้อและยางรถยนต์จะรับแรงอยู่ตลอดเวลาเมื่อติดตั้งเข้ากับรถยนต์ ไม่ว่าจะเป็นแรง

ในแนวคิ่ง แรงตามขวางหรือแรงตามยาว ดังนั้นการตรวจวัดแรงที่กระทำต่อยางจึงเป็นการทดสอบที่สำคัญเพื่อที่จะได้ทราบถึงลักษณะเฉพาะของยางเส้นนั้นๆ งานวิจัยทางด้านยานยนต์ที่เกี่ยวข้องกับการตรวจวัดแรงที่ล้อและยางในอดีตที่ผ่านมามีอยู่มากมาย ไม่ว่าจะเป็นการตรวจวัดแรงระหว่างล้อและพื้นโดยตรงจากการใช้ชุดทดสอบ HILs [4][5][10] หรือ การใช้แบบจำลองของยางคำนวณแรงเร่งเบรกที่เกิดขึ้น [11] ซึ่งผลจากการทำวิจัยดังกล่าวได้ข้อสรุปว่า สภาพกลศาสตร์ยานยนต์นั้นขึ้นอยู่กับแรงที่ล้อเป็นอย่างมาก และโดยทั่วไปการเริ่มศึกษาเกี่ยวกับการตรวจวัดแรงที่ล้อนั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องศึกษาการสร้างแบบจำลองของล้อและยางก่อน ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยต่างๆ ที่ได้สร้างแบบจำลองของยางและทำการทดสอบจนได้ข้อสรุปมาแล้วว่าแบบจำลองและวิธีทดสอบเหล่านั้นเพียงพอหรือเหมาะสมต่อการใช้งาน โดยการตรวจวัดแรงที่ล้อนั้นต้องอาศัยอุปกรณ์ในการตรวจวัด ซึ่งจากงานวิจัยอื่นในอดีตได้เสนอแนวทางในการตรวจวัดอย่างมากมาย แต่วิธีที่เป็นที่นิยมอย่างกว้างขวางจะมีอยู่ 3 ประเภท [4] ซึ่งจะมีข้อดี-ข้อเสียแตกต่างกันไป ดังนี้

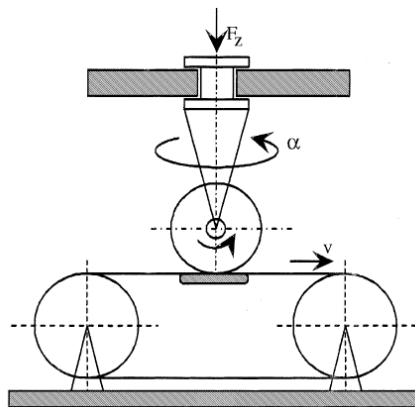
1. การทดสอบยางบนแผ่นเรียบ (Flat bed tire testing machines) การทดสอบด้วยวิธีนี้จะใช้การเลื่อนของแผ่นพื้นผิวซึ่งเปรียบเสมือนถนนดังรูปที่ 2-6 แต่เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านสถานที่จำไม่สามารถทดสอบด้วยความเร็วสูงได้และไม่สามารถทดสอบด้วยสถานะคงตัว (steady-state condition) ได้อีกด้วย



รูปที่ 2-6 การทดสอบยางบนแผ่นเรียบ [4]

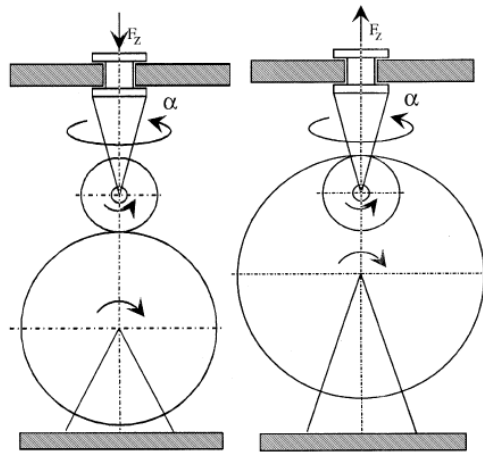
2. การทดสอบยางบนพื้นเรียบ (Flat surface tire testing machines) การทดสอบวิธีนี้มีหลักการคือการใช้พื้นสายพานผิวเรียบเคลื่อนที่สัมผัสกับยางดังรูปที่ 2-7 เนื่องจากแรงกดแนวคิ่งจากยางมีค่า

มากเป็นผลให้จำเป็นต้องใช้สายพานที่มีความแข็งแรงสูง การทดสอบด้วยวิธีนี้ในบางห้องวิจัยสามารถทำความเร็วของสายพานได้ถึง 250 กิโลเมตรต่อชั่วโมง อีกทั้งการเคลือบผิวสายพานและการควบคุมอุณหภูมิสามารถจำลองสภาพถนนจริงได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบด้วยวิธีนี้มีความซับซ้อนและราคาสูง ทำให้การทดสอบด้วยวิธีนี้มีใช้เฉพาะในศูนย์ทดสอบและมหาวิทยาลัยที่มีทุนวิจัยสนับสนุนสูง



รูปที่ 2-7 ลักษณะการทดสอบยางบนพื้นผิวเรียบ [4]

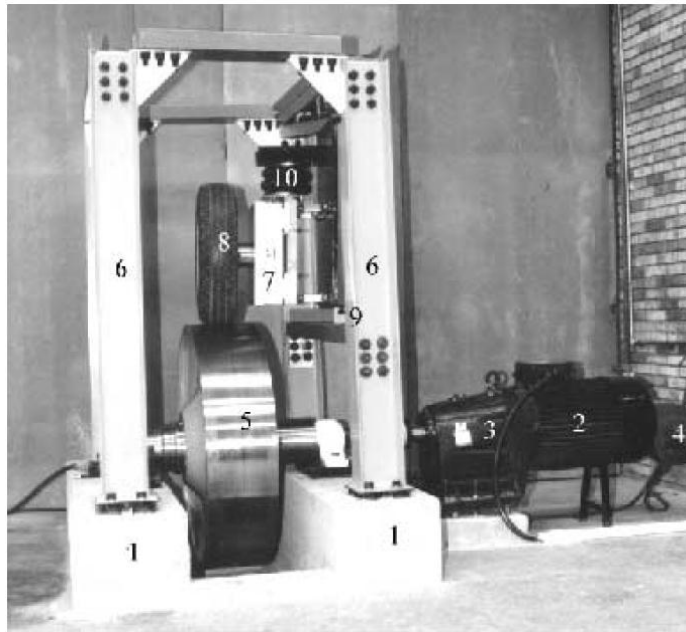
3. การทดสอบยางบนผิวโค้ง (Drum type tire testing machines) การทดสอบด้วยวิธีนี้จะใช้ผิวโค้งของดรัม (Drum) มาแทนที่สายพานแบบเรียบที่มีความซับซ้อนสูง การทดสอบแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ ยางสัมผัสบนผิวนอกของดรัม หรือ ยางสัมผัสที่ผิวด้านใน ดังรูปที่ 2-8 แต่เนื่องจากพื้นผิวสัมผัสเป็นผิวโค้ง ส่งผลให้แรงดันที่หน้าสัมผัส (Contact Patch) ต่างจากการทดสอบบนพื้นผิวเรียบ ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบอาจไม่สามารถทำนายถึงพฤติกรรมของยางบนผิวเรียบได้อย่างถูกต้องนัก อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการทดสอบลักษณะนี้ค่อนข้างเรียบง่ายและราคาไม่สูงนัก วิธีนี้จึงได้รับความนิยมค่อนข้างสูงจากทั้งศูนย์วิจัยและห้องวิจัยในมหาวิทยาลัยต่างๆ



รูปที่ 2-8 ลักษณะการทดสอบยางบนพื้นผิวโค้ง [4]

จากงานวิจัยของ Ergin Tonuk and Y. Samim Unlusoy [4] ทางผู้ทำวิจัยได้เลือกวิธีทดสอบแบบผิวโค้งโดยสร้างแบบจำลองของยางที่เกาะในแนวตั้งหลายๆค่า มุมไถลต่างๆ และที่ความดันยางที่ค่าต่างๆ ถึงแม้ว่าการทดสอบแบบผิวโค้งจะมีข้อเสียอยู่บ้าง แต่ถ้าสามารถสร้างแบบจำลองได้อย่างถูกต้องแล้ว แบบจำลองดังกล่าวจะสามารถใช้ทำนายลักษณะของยางที่สภาพพื้นผิวถนนต่างๆ ได้เช่นกัน

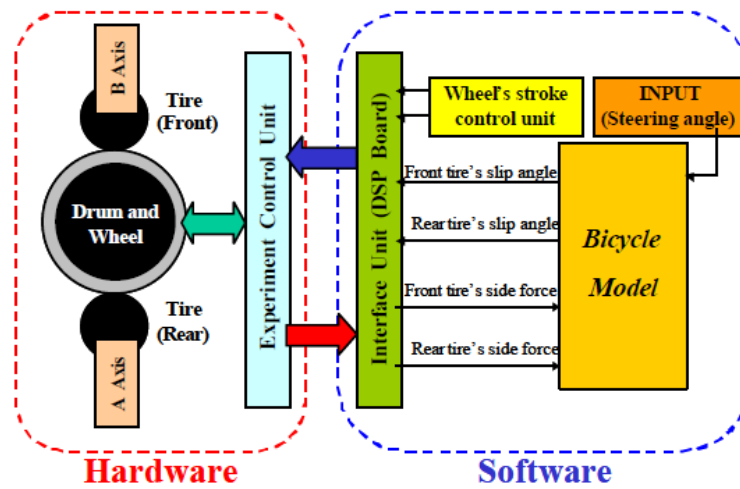
ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ระบบรองรับแบบลมอัด (pneumatic suspension) เพื่อใช้ในการสร้างภาระแนวตั้งให้กับยางดังรูปที่ 2-9 เนื่องจากระบบลมอัดสามารถควบคุมค่าการเปลี่ยนภาระแนวตั้งได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว แต่ข้อดีของการใช้วิธีนี้คือภาระในแนวตั้งที่สร้างขึ้นอาจไม่สามารถเลียนแบบสภาวะธรรมชาติของแรงกดในแนวตั้งที่เกิดขึ้นจากการใช้ชุด Suspension จริงได้อย่างถูกต้อง เนื่องจากไม่มีการเคลื่อนที่ของระบบรองรับ



รูปที่ 2-9 ชุดอุปกรณ์ตรวจวัดแรงที่เกิดจากการเลี้ยวของยาง [4]

โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง คือ ความสัมพันธ์ระหว่างภาระแรงในแนวตั้งกับแรงด้านข้าง (cornering force) ที่กระทำต่อล้อ ที่มุมไถล (slip angle) ค่าต่างๆ ซึ่งก็คือแบบจำลองของยาง (tire model) ซึ่งได้มีการนำแบบจำลองของยางที่ได้จากการทดลองไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองที่ได้จากวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อเป็นการพิสูจน์สมการทางไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถทำนายแรงที่กระทำต่อยางได้เช่นเดียวกับการทดสอบด้วยระบบจริง จะเห็นได้ว่าการทดสอบนี้เป็นแนวทางของการพัฒนาระบบสมการโดยใช้ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองจริงเป็นตัวอ้างอิง ซึ่งระบบสมการจะมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้นถ้าชุดทดสอบ HILs

นอกเหนือจากงานวิจัยข้างต้นซึ่งเป็นการทำการทดสอบลักษณะของยางด้วยล้อเพียงล้อเดียวแล้ว N. Noomwongs, H. Yoshida, M. Nagai, K. Kobayashi, T. Yokoi [18] ได้เสนอแนวทางในการตรวจวัดแรงที่ล้อด้วยวิธี Hardware-In-The-Loop ที่มีอุปกรณ์จริงเป็นล้อทดสอบ 2 ล้อเพื่อใช้ทดสอบร่วมกับแบบจำลอง Bicycle Model ที่คำนึงถึงผลของการถ่ายโอนมวลเนื่องจากความเร่งหรือเบรก (Weigh Transfer) ร่วมด้วย โดยรูปที่ 2-10 แสดงแผนภาพการทดสอบด้วยวิธีการดังกล่าว



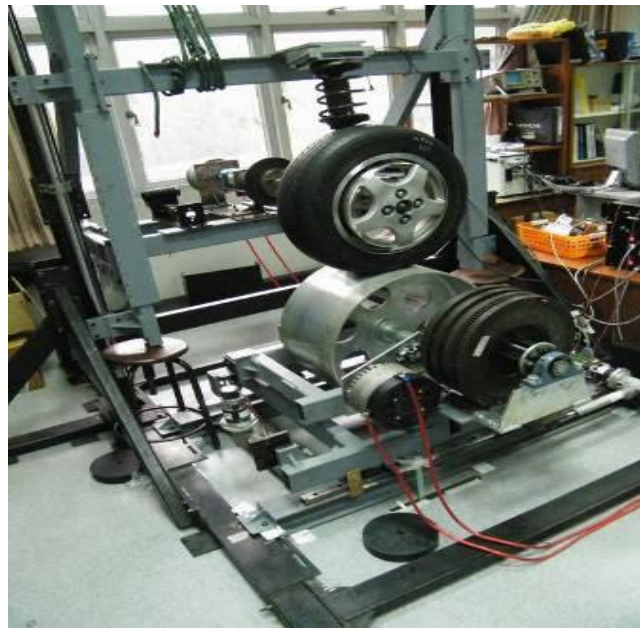
รูปที่ 2-10 แผนภาพการทดสอบการตรวจวัดแรงที่ล้อ [18]

โดยการทดสอบของกลุ่มวิจัยนี้ได้ทำการการวัดแรงที่ล้อเพื่อหาลักษณะเฉพาะของยาง (Tire characteristics) เพื่อหา ค่าตัวแปรที่ได้จากการทดลอง (tire cornering stiffness, C_r) ไปใช้ในการสร้างแบบจำลองทางยานยนต์ซึ่งในที่นี้ได้ใช้แบบจำลองจักรยาน (bicycle model) เพื่อสร้างสัญญาณควบคุมแรงกดในแนวตั้งจากล้อคู่ Drum โดยล้อด้านหนึ่งสามารถบังคับเดี่ยวได้เพื่อจำลองการสร้างมุมเลี้ยวของล้อหน้า ในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถยนต์เพื่อเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ คือ มุมไถลที่ศูนย์กลางของมวลรถ (β), อัตราเร็วเชิงมุมของรถ (r), มุมไถลด้านข้างของล้อหน้า (α_f) และมุมไถลด้านข้างของล้อหลัง (α_r) ที่ได้ระหว่างชุดทดสอบ HILs กับวิธีการใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ทางคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์การควบคุมของรถและความมั่นคงของรถ (Handling & Stability) ซึ่งผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ในหัวข้อนี้ คือ แนวทางใหม่ในการตรวจวัดแรงที่ล้อที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

2.2.5 งานวิจัยที่มีการใช้ชุดทดสอบ HILs ร่วมกับระบบล้อ ระบบบังคับเดี่ยวและระบบรองรับ

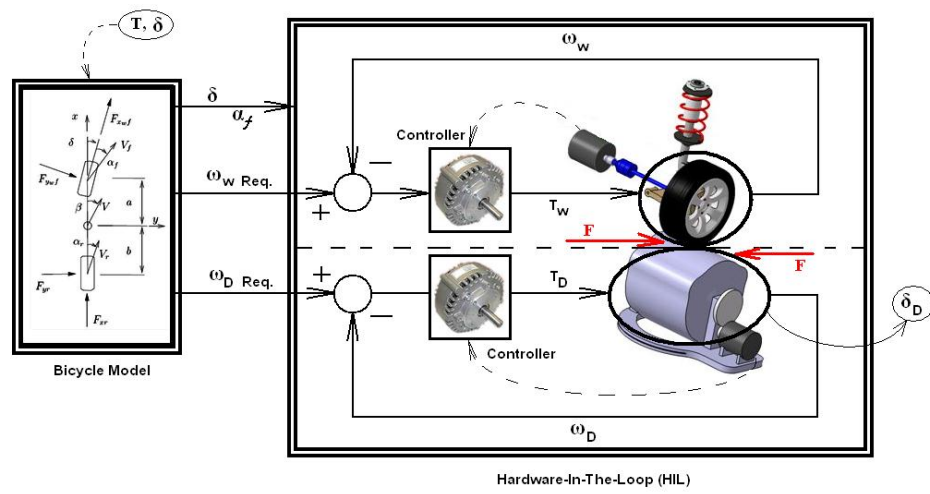
ในหัวข้อที่ผ่านมาจะเป็นงานวิจัยที่ทำแยกระบบกันระหว่างระบบล้อ ระบบบังคับเดี่ยวและระบบรองรับการสั่นสะเทือน ซึ่งในความเป็นจริงแล้วทั้งสามระบบนี้ต้องทำงานร่วมกันเพื่อให้รถยนต์มีความสามารถในการขับขี่และควบคุมที่ดี การตรวจวัดแรงที่ล้อก็เช่นเดียวกันเพื่อให้เกิดสถานะที่เสมือนจริง ควรทดสอบร่วมกันระหว่าง 3 ระบบนี้ โดย Surajed Sookchaiyaporn [19] ได้คำนึงถึงการทดสอบร่วมกันของทั้ง 3 ระบบโดยใช้

วิธีการทดสอบแบบ Hardware-In-The-Loop เพื่อทดสอบแรงที่กระทำที่ล้อ สำหรับชุดทดสอบ HILs ในส่วนที่เป็น Hardware นั้นจะประกอบด้วยระบบกันสะเทือนแบบแมคเฟอร์สัน สตรีท ระบบบังคับเลี้ยวแบบเร็คแอนพีนีเยนและใช้ล้อขนาด 13 นิ้วพร้อมด้วยยางขนาด ดังรูปที่ 2-11 โดยโครงสร้างของชุดทดสอบ HILs ได้ถูกออกแบบมาเพื่อให้สามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบของระบบรองรับได้ในอนาคต

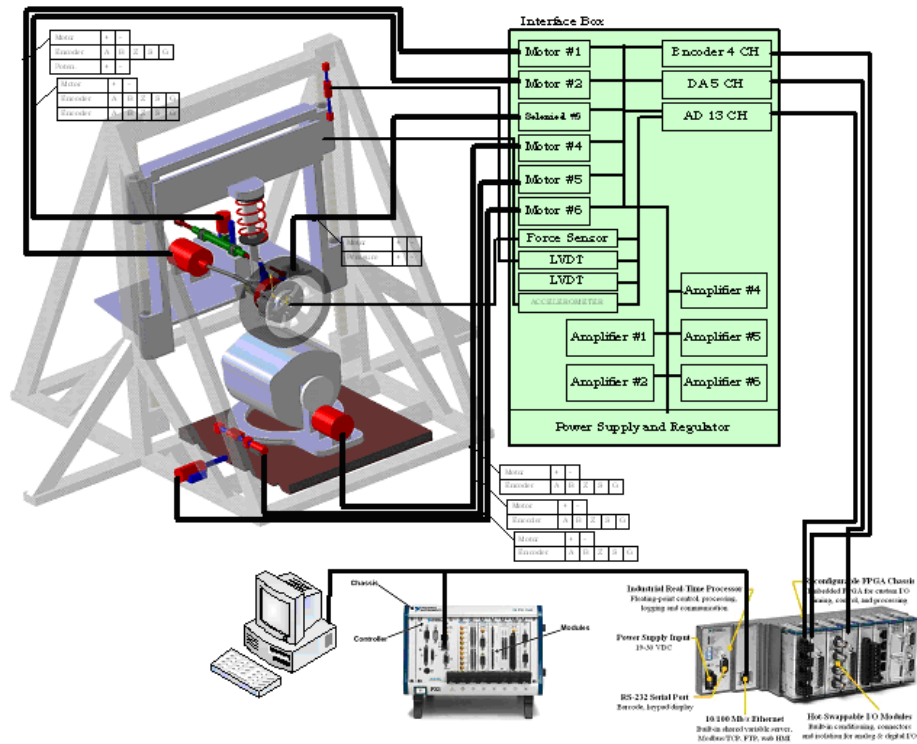


รูปที่ 2-11 ชุดอุปกรณ์ทดสอบร่วมกันระหว่างระบบล้อ ระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยวด้วยชุดทดสอบ HILs[19]

และได้ใช้แบบจำลองยานยนต์แบบจักรยาน (Bicycle model) ในการจำลองการเคลื่อนที่ของรถยนต์ ดังรูปที่ 2-12 โดยแบบจำลองดังกล่าวจะมีตัวแปรต่างๆเข้ามาเกี่ยวข้องได้แก่ ความเร็ว (V), มุมเลี้ยว (δ), มุมไถล (α) และแรงเสียดทานต่างๆ ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้ได้กำหนดให้มุมเลี้ยวและแรงบิดที่ล้อขับเคลื่อนเป็นตัวแปรต้น (Input) ของแบบจำลอง แรงบิดที่ล้อขับทำให้เกิดการไถลขึ้น และแรงเสียดทานที่เกิดจากการไถลนั้นก่อให้เกิดความเร่งของตัวรถนั่นเอง โดยผลที่ได้จากแบบจำลอง (Output) คือมุมไถล อัตราเร็วเชิงเส้น (V) อัตราเร็วเชิงมุมของตัวรถ ($d\beta/dt$) รวมถึงอัตราเร็วเชิงเส้นของล้อขับเทียบพื้น (V_f) ที่มีค่าสมมูลกับอัตราเร็วของล้อจำลองพื้นถนน ที่จำเป็นต้องใช้ในการคำนวณแบบจำลองของชุดทดสอบ HILs ต่อไปโดยแผนภาพการควบคุมของชุดทดสอบ HILs ในการวิจัยนี้แสดงดังรูป 2-13



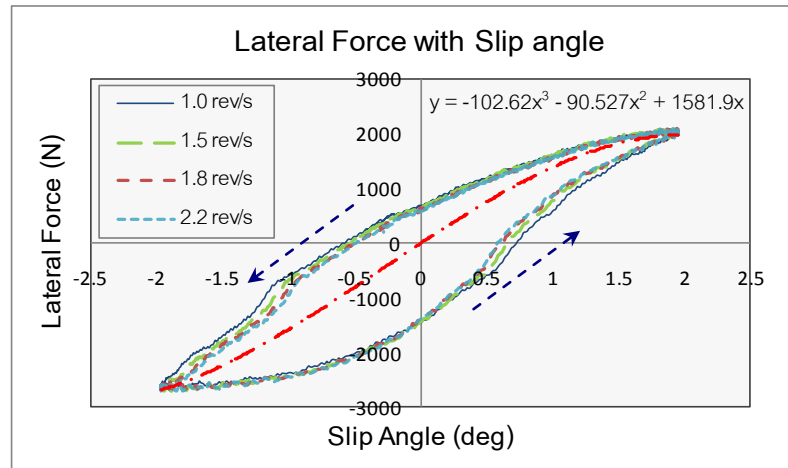
รูปที่ 2-12 การทำงานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์[19]



รูปที่ 2-13 ลักษณะการควบคุมของชุดทดสอบ HILs [19]

การทดสอบในขั้นต้นของงานวิจัยชิ้นนี้ คือ การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ของแรงต้านข้างของระบบคือ (C_{α}) เป็นตัวแปรที่ใช้บอกความสัมพันธ์ของแรงต้านข้างที่ยางสร้างขึ้นกับค่ามุมไถล ซึ่งจากการทดลองพบว่าแรงต้านข้างที่เกิดขึ้นที่อัตราเร็วต่างๆของล้อทดสอบมีรูปแบบและมีค่า

ใกล้เคียงกันอย่างมากจนอาจกล่าวได้ว่าแรงต้านข้างที่สถานะคงตัวนั้นไม่มีความสัมพันธ์กับอัตราเร็วล้อทดสอบดังรูปที่ 2-14



รูปที่ 2-14 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านข้างและมุมไถลที่อัตราเร็วล้อทดสอบต่างๆ[19]

นอกจากนี้ยังมีการทดสอบการวิ่งเป็นวงกลมแบบมีแรงป้อนกลับ (skid-pad with force feedback) จะใช้ในการทำนายผลของระบบช่วงล่างที่มีต่อลักษณะการเลี้ยวโค้งของยานยนต์ ซึ่งใช้แรงต้านข้างที่วัดได้จริงจากระบบล้อของชุดทดสอบ HIL โดยแรงที่ได้นี้จะนำไปใช้ในการคำนวณค่าสถานะต่างๆของรถด้วยแบบจำลองจักรยาน จากนั้นจึงส่งค่าอัตราเร็วล้อ มุมเลี้ยว มุมไถล ไปควบคุมชุดทดสอบ HIL และนำแรงต้านข้างที่เกิดขึ้นกับล้อทดสอบป้อนกลับเข้ามาในระบบการคำนวณด้วยแบบจำลองจักรยานอีกครั้ง การทดสอบนี้จะสามารถบอกได้ว่า รถยนต์ที่มีพารามิเตอร์ชุดหนึ่ง เมื่อนำไปใช้วิ่งจริง จะเกิดอาการคือไถ้ - ใว้ (under/oversteer) หรือไม่ อย่างไรก็ตาม ส่วนการทดสอบสุดท้ายคือการทดสอบการตอบสนองเมื่อมีมุมเลี้ยวแบบขึ้น โดยลักษณะการทดสอบก็จะคล้ายคลึงกับการทดสอบวิ่งเป็นวงกลมแบบมีแรงป้อนกลับ คือ ใช้แรงต้านข้างที่วัดได้จริงจากชุดทดสอบ HIL แล้วป้อนกลับมาใช้ในแบบจำลองจักรยาน เพื่อทำนายลักษณะการเลี้ยวโค้งของยานยนต์ในแบบจำลองต่อสัญญาณการเลี้ยวที่เกิดขึ้นอย่างกะทันหัน

2.3 บทสรุปจากการศึกษาวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาวรรณกรรมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตพบว่าการพัฒนารถยนต์โดยใช้การทดสอบแบบ Hardware-In-The-Loop มีการใช้ทดสอบกับหลายระบบ ซึ่งจุดมุ่งหมายในการทดสอบและพัฒนาที่จะแตกต่างกันไปตามการใช้งานของระบบนั้น โดยการใช้ชุดทดสอบ HILs สามารถใช้วิเคราะห์การควบคุม (Handling) และการตอบสนอง ของยานยนต์ได้ ซึ่งเมื่อพิจารณาการทดสอบเพื่อวิเคราะห์การควบคุมและการตอบสนอง ของรถ จะพบว่าเกี่ยวข้องกับระบบล้อ ระบบรองรับและระบบบังคับบังคับเลี้ยวมากที่สุด ซึ่งการทดสอบทั้งสามระบบนี้พร้อมกันจะทำให้ผลลัพธ์ที่ออกมาที่มีความถูกต้องและแม่นยำมากกว่าการทดสอบแยกแต่ละระบบ และการใช้อุปกรณ์จริงในการทดสอบก็จะช่วยลดความยุ่งยากในการสร้างแบบจำลองที่ต้องใช้การคำนวณ และเพื่อความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ ในงานวิจัยส่วนใหญ่จึงนิยมใช้การทดสอบเปรียบเทียบผลทดสอบที่ได้จากชุดทดสอบ HILs และผลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งในการทดสอบเปรียบเทียบถ้าหากสามารถทดสอบเทียบกับระบบจริงบนอุปกรณ์จริงในสภาวะแวดล้อมเดียวกัน ก็จะสามารถช่วยให้การวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้จากชุดทดสอบ HILs มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

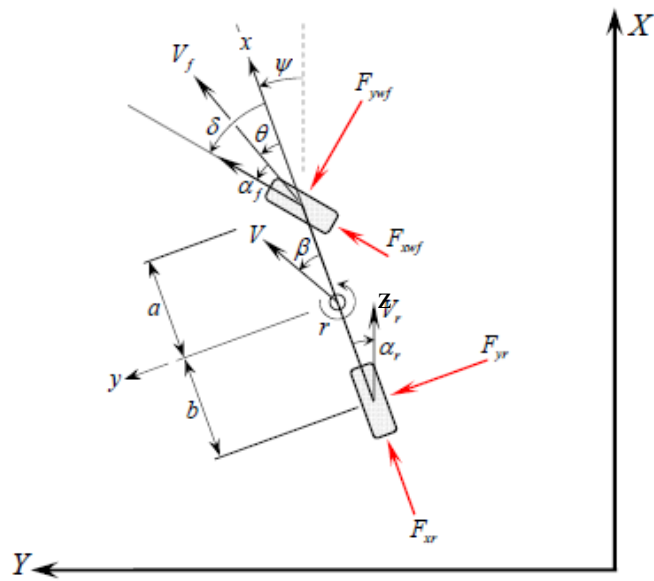
บทที่ 3

ทฤษฎีพื้นฐาน

ในการทดสอบการควบคุมของรถฟอร์มูล่านักเรียนด้วยชุดทดสอบ HILs เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ และทำให้ระบบทำงานได้ถูกต้อง จึงจำเป็นต้องอาศัยทฤษฎีเพื่อใช้อ้างอิงในการคิดหรือคำนวณ นอกจากนี้ในการใช้ชุดทดสอบ HILs นั้นต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจำลองระบบย่อยอื่นๆและสถานะในการทดสอบ ซึ่งต้องอาศัยทฤษฎีในการสร้างแบบจำลองเช่นกัน โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีและแบบจำลองที่เกี่ยวข้อง

3.1 แบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์สองล้อ

แบบจำลองสองล้อ (Bicycle model) เป็นแบบจำลองที่กำหนดให้รถมีเพียง 2 ล้อ คือล้อหน้าและล้อหลัง เพื่อลดผลของการถ่ายน้ำหนักด้านข้างขณะเลี้ยวและผลจากการโคลงของรถ โดยมีข้อจำกัดว่า ทั้งมุมบิดและค่ามุมไถลด้านข้างล้อ (tire side slip angle) ของล้อซ้ายและขวาจะต้องมีค่าใกล้เคียงกันมาก ซึ่งจะเกิดขึ้นได้เมื่อรัศมีการเลี้ยวใหญ่เทียบกับระยะระหว่างแกนล้อหน้าและหลังของรถ ($a + b$) ระบบแกนอ้างอิงที่ใช้มี 2 ระบบคือ แกนอ้างอิงหลักที่อยู่กับที่เทียบกับโลก (แกน X,Y) เป็นแกนที่ใช้ในการบอกพิกัดสัมบูรณ์ของรถ อีกระบบคือแกนอ้างอิงที่อยู่กับตัวรถ นั่นคือ แกนตามแนวยาวของตัวรถ(x) และแกนตั้งฉากกับตัวรถ(y) โดยระบบแกนนี้จะมีทิศเปลี่ยนไปตลอดเวลาตามการเคลื่อนที่ของรถ โดยแกนอ้างอิงใช้ในการอ้างอิงถึงแรงต่างๆที่กระทำต่อตัวรถเมื่อรถเคลื่อนที่ไป เมื่อพิจารณาแรงที่กระทำต่อรถเมื่อมองจากทางด้านบน จะประกอบด้วยแรงตามแนวการวางตัวของล้อรถ ซึ่งเกิดจากแรงเสียดทานระหว่างพื้นกับยางรถ และเมื่อรถเลี้ยวโค้งจะมีแรงตั้งฉากกับแนวการวางตัวของล้อกระทำกับยางรถ โดยกำหนดให้แรงดังกล่าวกระทำที่จุดกึ่งกลางของยางล้อ ซึ่งจะทำให้ไม่มีผลของโมเมนต์คืนตัว (self aligning moment) เพื่อลดความซับซ้อนของแบบจำลอง รูปที่ 3-1 แสดงแบบจำลองสองล้อที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 3-1 แบบจำลองสองล้อ

ตัวแปรจากรูป 3-6 [20][21]

- a** คือ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางมวลของรถยนต์กับตำแหน่งของล้อหน้า
- b** คือ ระยะห่างระหว่างศูนย์กลางมวลของรถยนต์กับตำแหน่งของล้อหลัง
- δ** คือ มุมเลี้ยวของล้อหน้า
- β** คือ มุมไถลด้านข้างที่ศูนย์กลางมวลของรถยนต์ (Side slip angle)
- α_f** คือ มุมไถลด้านข้างของล้อหน้า (Front tire slip angle)
- α_r** คือ มุมไถลด้านข้างของล้อหลัง (Rear tire slip angle)
- V_f** คือ ทิศความเร็วของล้อหน้า
- V_r** คือ ทิศความเร็วของล้อหลัง
- F_{xwf}** คือ แรงที่กระทำในแนวตามยาวของล้อหน้า (longitudinal force)
- F_{xr}** คือ แรงที่กระทำในแนวตามยาวของล้อหลัง
- F_{ywf}** คือ แรงที่กระทำด้านข้างของล้อหน้า (lateral force)
- F_{yr}** คือ แรงที่กระทำด้านข้างของล้อหลัง
- r** คือ อัตราเร็วเชิงมุมของรถ (yaw rate)

Ψ คือ มุมที่ตัวรถกระทำกับแนวอ้างอิงหลัก (yaw angle)

v คือ อัตราเร็วของศูนย์กลางมวลรถ

สมการการเคลื่อนที่ของยานยนต์เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3-6 มีดังนี้[19][20]

คิดแรงตามแกนแนวตามยาวของรถ : x

$$\begin{aligned} \sum F_x &= ma_x \quad ; \quad a_x = \dot{u} - rv \\ \therefore F_{xwf} \cos \delta - F_{ywf} \sin \delta + F_{xr} &= m(\dot{u} - rv) \end{aligned} \quad (3-1)$$

คิดแรงตามแกนแนวตั้งฉากกับความยาวรถ : y

$$\begin{aligned} \sum F_y &= ma_y \quad ; \quad a_y = \dot{v} + ru \\ \therefore F_{xwf} \sin \delta + F_{ywf} \cos \delta + F_{yr} &= m(\dot{v} + ru) \end{aligned} \quad (3-2)$$

คิดโมเมนต์รอบจุดศูนย์กลางรถ

$$\begin{aligned} \sum M_z &= I_z \dot{r} \quad ; \\ \therefore (F_{xwf} \sin \delta)a + (F_{ywf} \cos \delta)a - F_{yr}b &= I_z \dot{r} \end{aligned} \quad (3-3)$$

จัดรูปสมการที่ (3-1) – (3-3) จะได้

$$\dot{u} = rv + \frac{1}{m} (F_{xwf} \cos \delta - F_{ywf} \sin \delta + F_{xr}) \quad (3-4)$$

$$\dot{v} = -ru + \frac{1}{m} (F_{xwf} \sin \delta + F_{ywf} \cos \delta + F_{yr}) \quad (3-5)$$

$$\dot{r} = \frac{1}{I_z} (a \cdot F_{xwf} \sin \delta + a \cdot F_{ywf} \cos \delta - b \cdot F_{yr}) \quad (3-6)$$

พิจารณามุมที่ล้อหน้า

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{r \cdot a + v}{u}\right) \quad (3-7)$$

และจากรูปจะเห็นว่า $\alpha_f = \delta - \theta$ ดังนั้น

$$\alpha_f = \delta - \tan^{-1}\left(\frac{r \cdot a + v}{u}\right) \quad (3-8)$$

และเมื่อพิจารณาที่ล้อหลัง จะได้มุมไถลของล้อหลังดังนี้

$$\alpha_f = \tan^{-1}\left(\frac{b \cdot r - v}{u}\right) \quad (3-9)$$

แรงที่กระทำที่ล้อสามารถหาได้จากสมการ (3-10) – (3-12)

$$F_{yw_f} = C_{\alpha_f} \cdot \alpha_f \quad (3-10)$$

$$F_{yr} = C_{\alpha_r} \cdot \alpha_r \quad (3-11)$$

$$F_{xw_f} = \mu(\lambda_f) \cdot w_f \quad (3-12)$$

โดย C_{α_f} และ C_{α_r} คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานด้านข้างของล้อหน้าและล้อหลังตามลำดับ

w_f คือ ภาระแนวตั้งของล้อหน้า (N)

$$\lambda_f \text{ คือ อัตราการไถล} \begin{cases} \frac{|V_f| \cos \alpha_f - r_w \cdot \omega_f}{r_w \cdot \omega_f}, \text{Braking} \\ \frac{r_w \cdot \omega_f - |V_f| \cos \alpha_f}{|V_f| \cos \alpha_f}, \text{Accelerating} \end{cases} \quad (3-13)$$

โดยนำสมการที่ (3-4) ถึง (3-13) ไปใช้ในการเขียน โปรแกรมจำลองลักษณะการเคลื่อนที่ของรถ เพื่อใช้ทดสอบการควบคุม (Handling) ซึ่งจากสมการข้างบนจะพบว่าการใช้แบบจำลองใน

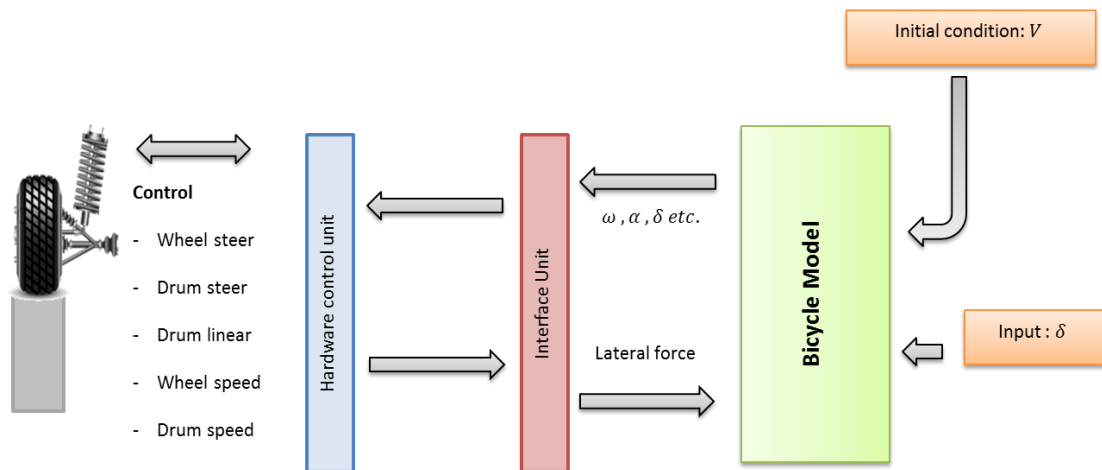
การคำนวณลักษณะการเคลื่อนที่ของรถจะต้องอาศัยค่าพารามิเตอร์หลายค่า ซึ่งมีทั้งค่าที่ต้องวัดจากรถจริงและค่าที่วัดได้จากอุปกรณ์ทดสอบ ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ต้องใช้ในแบบจำลองสองล้อ[19]

พารามิเตอร์	หน่วย
1. มวลของรถครึ่งคัน* (m)	กิโลกรัม (kg)
2. โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนคิง* (I_z)	กิโลกรัม.เมตร ² (kg.m ²)
3. ระยะศูนย์กลางมวลถึงล้อหน้า* (a)	เมตร (m)
4. ระยะศูนย์กลางมวลถึงล้อหลัง* (b)	เมตร (m)
5. Cornering Stiffness ล้อหน้า* (C_{cf})	นิวตัน/เรเดียน (N/rad.)
6. Cornering Stiffness ล้อหลัง* (C_{cr})	นิวตัน/เรเดียน (N/rad.)
7. ความเร็วต้นของรถ	เมตร/วินาที (m/s)
8. ภาระแนวคิงของล้อหน้า	นิวตัน (N)
9. ภาระแนวคิงของล้อหลัง	นิวตัน (N)
10. รัศมีล้อจำลองพื้นถนน (r_D)	เมตร (m)
11. โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนหมุน ของล้อจำลองพื้นถนน	กิโลกรัม.เมตร ² (kg.m ²)
12. รัศมีล้อทดสอบ (r_w)	เมตร (m)
13. โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนหมุน ของล้อทดสอบ	กิโลกรัม.เมตร ² (kg.m ²)
14. อัตราการเปลี่ยนมุมเลี้ยว	องศา/วินาที (deg./s)

*Noomwongs N., Yoshida H., Nagai M., Kobayashi K., Yokoi T. [18]

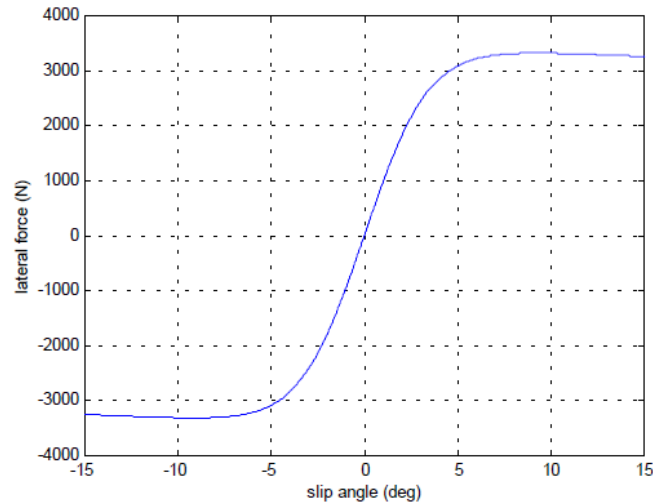
แบบจำลองสองล้อที่ใช้ร่วมกับชุดทดสอบ HILs จะทำหน้าที่ในการคำนวณลักษณะการเคลื่อนที่ของยานยนต์ โดยจะรับค่าพารามิเตอร์จากระบบจริงที่ใช้ในการทดสอบและจากเงื่อนไขเริ่มต้น (initial condition) ที่ทางผู้ทดสอบเป็นคนกำหนด โดยแผนภาพการทำงานของแบบจำลองจักรยานในชุดทดสอบ HILs เป็นดังรูปที่ 3-2



รูปที่ 3-2 แผนภาพการทำงานของชุดทดสอบ HILs

3.2 แบบจำลองของยาง

ยางรถยนต์เป็นส่วนเดียวบนรถยนต์ที่ต้องสัมผัสกับพื้นถนนตลอดเวลาและเป็นชิ้นส่วนสำคัญที่เกี่ยวกับการควบคุมและการยึดเกาะถนนของรถยนต์ ดังนั้นการทดสอบเกี่ยวกับแรงที่กระทำต่อยางจึงเป็นแนวทางการทดสอบที่จำเป็นและสำคัญต่อการทดสอบยางในปัจจุบัน โดยทั่วไปการทดสอบแรงที่กระทำต่อยางผลลัพธ์ที่ผู้วิจัยต้องการจะออกมาในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านข้างที่กระทำต่อล้อกับมุมไถล ซึ่งความสัมพันธ์นี้ก็คือ แบบจำลองของยาง (tire model or tire characteristics) ดังรูป 3-3



รูปที่ 3-3 ตัวอย่างแบบจำลองของยาง

โดยแบบจำลองสามารถหาได้จากการคำนวณสมการทางคณิตศาสตร์และการทดลองโดยตรง โดยในส่วนของ การคำนวณด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งโดยทั่วไปที่ค่ามุมไถลของยางมีค่าน้อย (ในรูปที่ 3-3 ช่วง -4 ถึง 4 องศา) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างกับมุมไถลนั้นมีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้น โดยมีรูปแบบของสมการดังสมการที่ (3.10) – (3.11)

$$F_{ywi} = C_{\alpha i} \cdot \alpha_i \quad (3.14)$$

ค่า $C_{\alpha i}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การเกิดแรงด้านข้าง ซึ่งจากรูป 3-3 ก็คือค่าความชันของกราฟนั่นเอง โดยค่านี้จะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการรับแรงของยาง ในส่วนความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นแบบจำลองที่ได้รับความนิยมในการใช้เพื่อจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ ได้รับการพัฒนาจาก H. Pacejka [22] โดยค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองจะขึ้นกับภาวะโหดในแนวตั้ง F_z โดยแรงด้านข้าง (Lateral force, F_y) สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\phi = (1 - E)(\alpha + S_h) + \frac{E}{B} \tan^{-1}(B(\alpha + S_h)) \quad (3-15)$$

$$F_y = D \sin(C \tan^{-1}(B\phi)) + S_v \quad (3-16)$$

โดย $C = 1.30$

$$E = a_6 F_z^2 + a_7 F_z + a_8$$

$$D = a_1 F_z^2 + a_2 F_z$$

$$\gamma = \text{camber angle}(\circ)$$

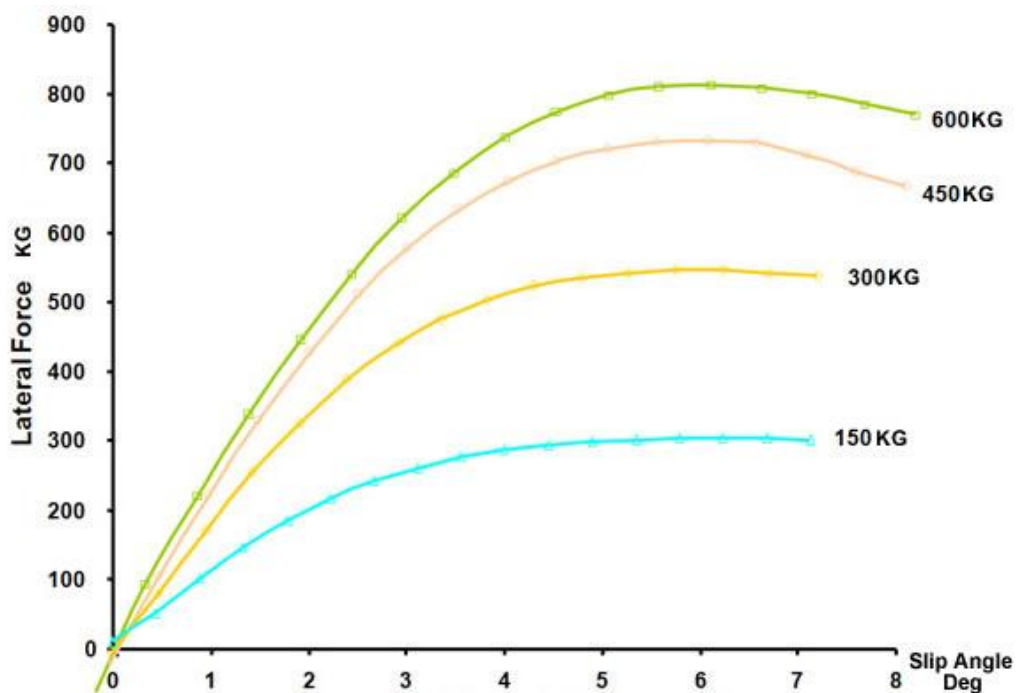
$$BCD = a_3 \sin(a_4 \tan^{-1}(a_5 F_z))$$

$$S_h = a_9 \gamma$$

$$B = \frac{BCD}{CD}$$

$$S_v = (a_{10} F_z^2 + a_{11} F_z) \gamma$$

จะเห็นได้ว่าสมการที่ใช้เพื่อสร้างแบบจำลองมีความซับซ้อนและยุ่งยากต่อการคำนวณมาก แต่ถึงแม้ว่าความสัมพันธ์ในช่วงที่เป็นเชิงเส้นระหว่างแรงด้านข้างกับมุมไถลจะมีรูปแบบที่ง่าย แต่ในการคำนวณจริงนั้น ค่า $C_{\alpha i}$ เป็นค่าที่ไม่สามารถหาค่าได้ง่ายนัก เนื่องจากเป็นค่าที่ผู้ผลิตยางไม่นิยมเปิดเผยและยางแต่ละชนิดย่อมมีค่านี้ไม่เหมือนกัน ทำให้การหาค่าแรงด้านข้างสามารถทำได้ยาก ดังนั้นการหาค่า $C_{\alpha i}$ ด้วยวิธีการทดลองโดยใช้ชนิดยางที่สนใจจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมและให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับคุณสมบัติของยางที่แท้จริงมากที่สุด รูปที่ 3-4 แสดงตัวอย่างค่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างกับมุมไถลที่ภาระโหลดในแนวตั้งค่าต่างๆที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 3-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างและมุมไถลที่ภาระโหลดในแนวตั้งค่าต่างๆ

โดยในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างกับมุมไถล โดยใช้วิธี HIL และนำค่าแรงด้านข้างที่วัดได้ไปใช้ในการคำนวณแบบจำลองสองล้อดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.1 ต่อไป

3.3 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการเข้าโค้งของรถยนต์

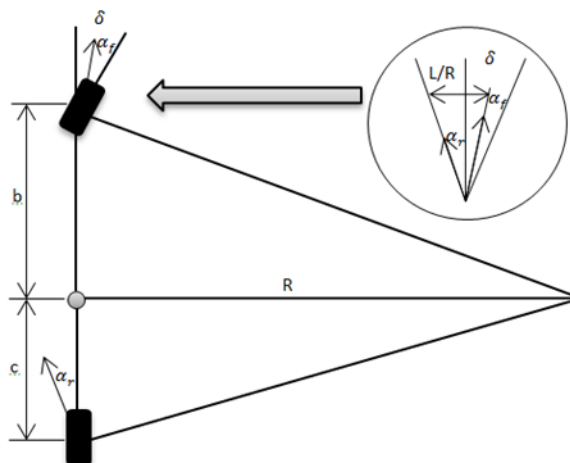
โดยทั่วไปสมรรถนะในการควบคุมของรถยนต์นั้นจะเกี่ยวข้องกับหลายปัจจัยไม่ว่าจะเป็น การเบรก การเร่งความเร็ว การเลี้ยวโค้ง ฯลฯ แต่ปัจจัยที่ส่งผลต่อการควบคุมมากที่สุดคือ ความสามารถในการเลี้ยวโค้ง ซึ่งจะส่งผลต่อสมรรถนะและความปลอดภัยในการขับขี่ของรถยนต์คันนั้นๆ ซึ่งการพฤติกรรมในการเข้าโค้งของรถยนต์นั้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ

1. การเลี้ยวโค้งแบบคือ้โค้ง (understeer)
2. การเลี้ยวโค้งแบบไวโค้ง (oversteer)
3. การเลี้ยวโค้งแบบพอดีโค้ง (neutralsteer)

ซึ่งพฤติกรรมการเข้าโค้งเหล่านี้ของรถยนต์แต่ละคันสามารถหาได้ทั้งจากการทดสอบและจากการคำนวณทางทฤษฎี โดยการค่าที่ใช้บ่งบอกถึงพฤติกรรมของรถที่สามารถคำนวณได้จากทางทฤษฎีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันก็คือ ค่า understeer gradient (K) ซึ่งจากทฤษฎี (Understeer Gradient Theory) กล่าวไว้ว่าโดยทั่วไปการเลี้ยวโค้งของรถนั้นแบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ การเลี้ยวโค้งที่ความเร็วต่ำ (Low speed cornering) และการเข้าโค้งที่ความเร็วสูง (High speed cornering) ในกรณีการเลี้ยวโค้งที่ความเร็วต่ำ อัตราแรงด้านข้างและมุมไถลมีค่าน้อย และที่มุมเลี้ยวของล้อ (δ) มีค่าน้อย จะพบว่าเป็นอัตราส่วนระหว่างความยาวฐานล้อ (wheelbase, L) กับ รัศมีการเลี้ยว (R) ตามสมการที่ (3-17)[23]

$$\delta = \frac{L}{R} \quad (\text{Ackermann steering angle}) \quad (3.17)$$

แต่ที่การเลี้ยวโค้งด้วยความเร็วสูง อัตราแรงด้านข้างมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้เกิดค่ามุมไถลขึ้นและเกิดแรงด้านข้างกระทำต่ออย่างในทิศทางตรงข้ามกับความเร่งด้านข้างดังรูปที่ 3-5



รูปที่ 3-5 การเข้าโค้งที่ความเร็วสูง (แบบจำลองสองล้อ)

และจากรูปที่ 3-5 จะได้ความสัมพันธ์ของมุมเลี้ยวดังนี้[23]

$$\delta = 57.3 \frac{L}{R} + \alpha_f - \alpha_r \quad (\text{in degree}) \quad (3-18)$$

หรือเมื่อจัดรูปสมการมุมเลี้ยวให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์กับค่า K จะได้ตามสมการที่ (3-19)

$$\delta = 57.3 \frac{L}{R} + K a_y \quad (3-21)$$

โดย a_y คือ ค่าความเร่งสู่ศูนย์กลางของรถ $\left(a_y = \frac{v^2}{R}\right)$

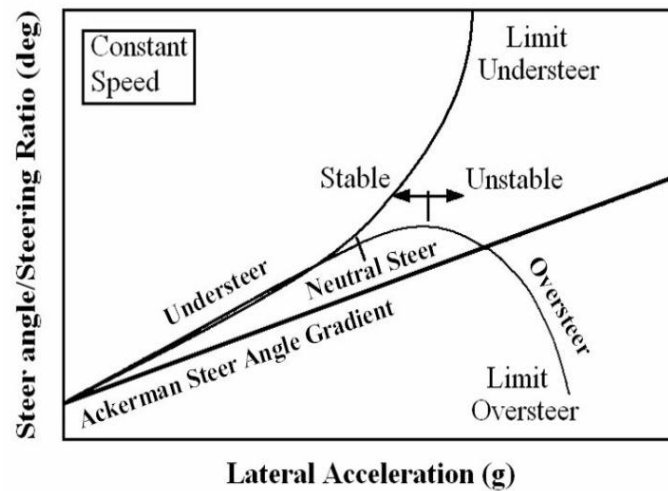
K คือ ค่า understeer gradient $\left(K = \frac{w_f}{gC_{\alpha f}} - \frac{w_r}{gC_{\alpha r}}\right)$

ค่า K หรือ ค่า understeer gradient จะสามารถเป็นได้ 3 ค่า คือ ค่าบวก , ค่าศูนย์ และ ค่าลบ โดยจะแบ่งตามอาการที่เกิดขึ้นของรถขณะเลี้ยว คือ

1. รถที่มีการเลี้ยวแบบดื้อโค้ง (understeer) ; $K > 0$
2. รถที่มีการเลี้ยวแบบพอดีโค้ง (neutral steer) ; $K = 0$
3. รถที่มีการเลี้ยวแบบไวโค้ง (oversteer) ; $K < 0$

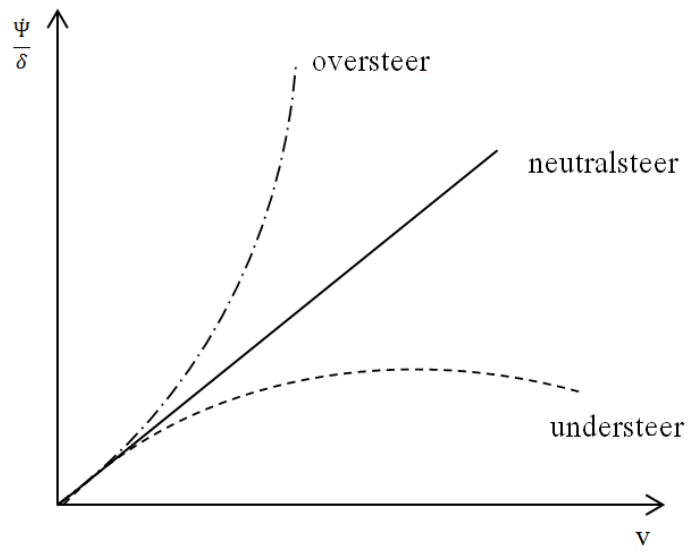
จากการวิเคราะห์พฤติกรรมการเข้าโค้งของรถยนต์ด้วยการคำนวณทางทฤษฎีสามารถพบได้ว่าค่าพารามิเตอร์หลายค่าต้องได้มาจากการทดสอบการเลี้ยวโค้งด้วยรถยนต์ก่อน ซึ่งการทดสอบที่สามารถใช้ในการหาค่า K (understeer gradient) ที่ใช้กันในปัจจุบันคือ การทดสอบแบบการวิ่งเป็นวงกลม (Skidpad testing) แล้วจึงนำค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้เหล่านี้มาใช้ในการคำนวณหาค่า K ตามทฤษฎีที่ได้กล่าวไว้เบื้องต้น

นอกจากการใช้ค่า understeer gradient ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของรถในขณะเข้าโค้งแล้ว การทดสอบด้วยการวิ่งเป็นวงกลมยังสามารถใช้ค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์เหล่านั้นเพื่อใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมในการเข้าโค้งได้อีกด้วย กราฟความแสดงความสัมพันธ์ที่ใช้การวิเคราะห์พฤติกรรมของรถด้วยการวิ่งเป็นวงกลมด้วยความเร็วคงที่คือ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมพวงมาลัยกับความเร่งด้านข้าง ดังรูปที่ 3-6



รูปที่ 3-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมพวงมาลัยกับความเร่งด้านข้างจากการวิ่งเป็นวงกลม[26]

จากรูปที่ 3-6 จะเห็นได้ว่าในกรณีที่รถยนต์นั้นมีพฤติกรรมการเลี้ยวโค้งแบบพอดิโค้งนั้น ความสัมพันธ์ระหว่างมุมพวงมาลัยกับความเร่งด้านข้างจะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ส่วนในกรณีที่รถยนต์มีพฤติกรรมการเลี้ยวโค้งแบบคือ โค้งนั้นมุมพวงมาลัยจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่มากขึ้นเมื่อความเร่งด้านข้างสูงขึ้น นั่นหมายความว่าผู้ขับขี่ต้องหมุนพวงมาลัยมากขึ้นเพื่อให้รถสามารถเลี้ยวโค้งได้มีฉะนั้นจะทำให้รถเลี้ยวโค้งด้วยรัศมีที่มากขึ้น และในกรณีสุดท้ายที่รถมีพฤติกรรมการเลี้ยวโค้งแบบไวโค้งนั้น อัตราการเพิ่มของมุมพวงมาลัยจะลดลงเมื่อความเร่งด้านข้างมีค่ามากขึ้น นั่นคือ ผู้ขับขี่ต้องลดการหมุนของพวงมาลัยเพื่อให้รถสามารถเลี้ยวโค้งได้ หากผู้ขับขี่ยังคงไว้ซึ่งมุมพวงมาลัยเดิมจะทำให้รถเลี้ยวโค้งด้วยรัศมีที่ลดลง นอกจากนี้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของค่ามุมของตัวรถ (Ψ) ต่อมุมพวงมาลัยกับความเร็วของรถ (v) สามารถใช้วิเคราะห์พฤติกรรมกรเข้าโค้งของรถยนต์ได้เช่นกันดังรูปที่ (3-7)[21]



รูปที่ 3-7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค่ามุมเหว (yaw rate) ของรถต่อมุมพวงมาลัยกับความเร็วยาน

บทที่ 4

การพัฒนาและปรับปรุงชุดทดสอบ HILs

เนื่องจากชุดทดสอบ HILs เดิมนั้นได้ใช้สำหรับทดสอบระบบล้อ ระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยวของรถยนต์นั่งขนาดเล็กซึ่งมีลักษณะ โครงสร้างทางกายภาพแตกต่างกับรถฟอร์มูล่านักเรียนอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นจึงต้องทำการออกแบบและปรับปรุงชิ้นส่วน โครงสร้างของชุดทดสอบ HILs เพื่อให้สามารถติดตั้งระบบรองรับของรถฟอร์มูล่านักเรียน นอกจากนี้ในส่วนของระบบควบคุมชุดทดสอบ HILs ก็ต้องได้รับการพัฒนาและปรับปรุงเช่นกันเพื่อให้สามารถควบคุมการทำงานของชุดทดสอบ HILs สำหรับรถฟอร์มูล่านักเรียน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.1 ระบบของรถจริงเกี่ยวข้องกับการทดสอบ

ในการทดสอบเพื่อวัดประสิทธิภาพในการควบคุมของรถฟอร์มูล่านักเรียนด้วยชุดทดสอบ HILs ทางผู้วิจัยได้มีการใช้ชิ้นส่วนจริงของระบบที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ ประกอบไปด้วย ระบบล้อ ระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยว ซึ่งลักษณะและคุณสมบัติโดยทั่วไปของแต่ละระบบมีรายละเอียดดังนี้

4.1.1 ระบบล้อ

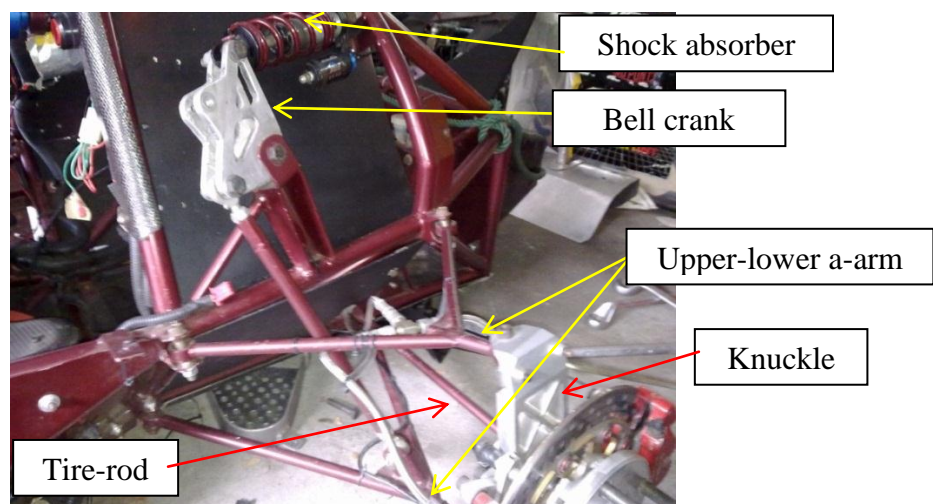
ระบบล้อของรถฟอร์มูล่านักเรียนที่ใช้ในการแข่งขันจะใช้เป็นล้อแม็กขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 นิ้ว และมีหน้ากว้างของล้อ 7.5 นิ้วส่วนยางจะใช้เป็นยางหน้าเรียบ (slick tire) ยี่ห้อ yokohama ขนาด 185/50 VR 13 ดังรูปที่ 4-1



รูปที่ 4-1 ล้อและยางของรถฟอร์มูล่านักเรียน

4.1.2 ระบบรองรับ

ระบบรองรับของรถฟอร์มูล่านักเรียนเป็นชนิดอิสระแบบปีกนกสองชั้น (Double wishbone suspension) ทั้งหน้า-หลัง โดยจะประกอบไปด้วยปีกนกบน-ล่างแบบ A-arm และมีการวางตำแหน่งตัวหน่วงการสะเทือน (shock absorber) ในนอนแยกออกจากปีกนก ซึ่งใช้การกระทุ้ง (push-rod) ในการส่งผ่านแรงจากปีกนกมายังกระเดื่องมุมฉาก (bell crank) เพื่อเปลี่ยนแนวแรงไปยังตัวหน่วงการสะเทือน ซึ่งจะแตกต่างจากรถยนต์นั่งทั่วไป ดังรูปที่ 4-2



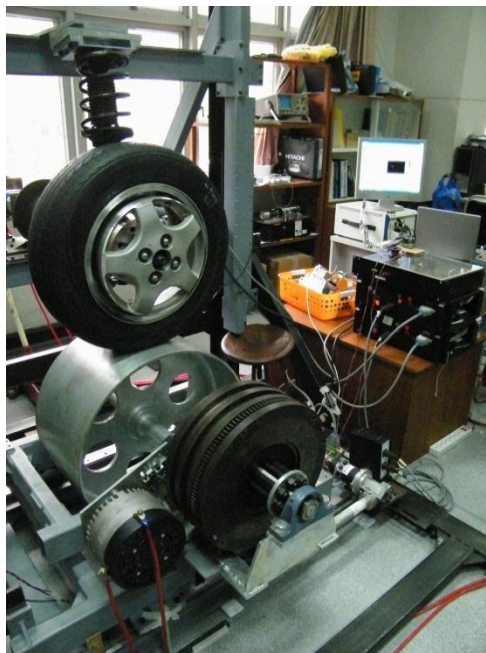
รูปที่ 4-2 ระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยวของรถฟอร์มูล่านักเรียน

4.1.3 ระบบบังคับเลี้ยว

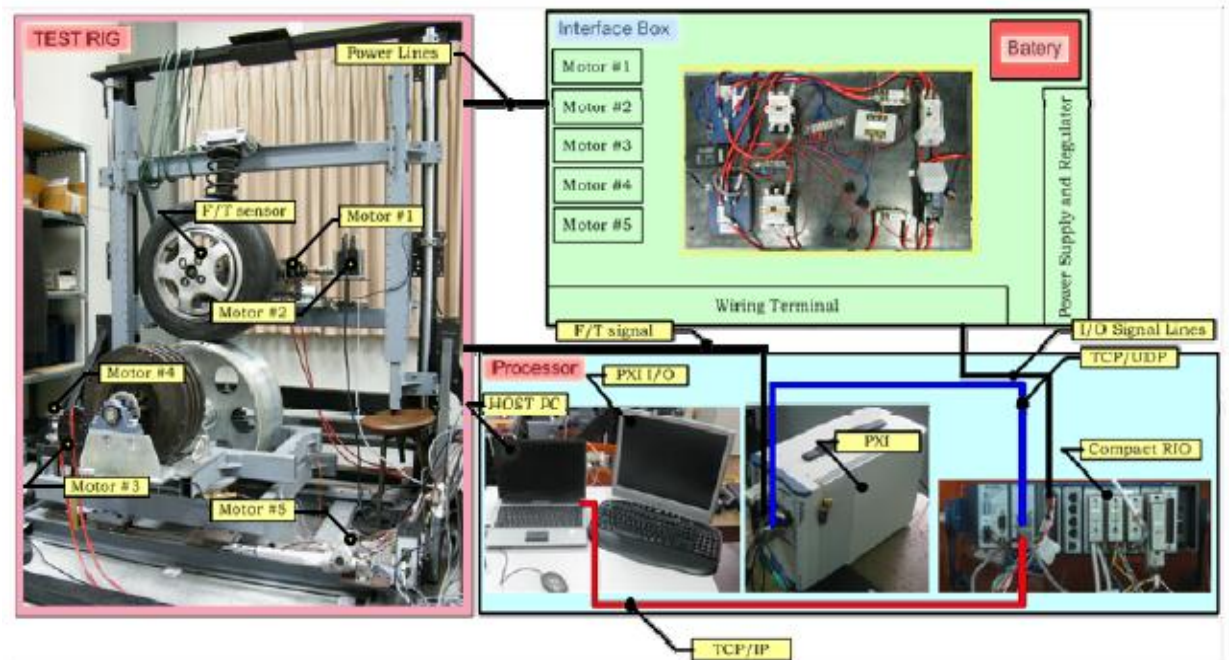
ระบบบังคับเลี้ยวที่ใช้สำหรับรถฟอร์มูล่านักเรียนเป็นแบบแร็ค แอนด์ พินิออน (rack and pinion) ซึ่งใช้การหมุนของเฟืองพินิออนที่ขบกับเฟืองแร็คทำให้ตัวแร็คเคลื่อนที่ซ้าย-ขวาได้ โดยมีก้านคั่นชัก-ส่ง (tire-rod) ดังรูปที่ 4-2 เป็นตัวส่งแรงจากแร็คไปยังค้อม้า (knuckle) ที่ล้อเพื่อทำให้ล้อเลี้ยวตามการหมุนของพวงมาลัย

4.2 ชุดทดสอบ HILs

ชุดทดสอบ HILs ที่ใช้ในการทดสอบระบบล้อ ระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยวสำหรับรถฟอร์มูล่านักเรียนในงานวิจัยนี้ เป็นชุดอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบระบบล้อ ระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยวของยานยนต์ขนาดเล็กซึ่งเป็นของรถยนต์ นิสสัน Sunny B10 โดยระบบรองรับเป็นแบบแม็คเฟอร์สัน สตรัท (Macpherson strut) ระบบบังคับเลี้ยวแบบแร็ค แอนด์ พินิออน (rack and pinion) และใช้กระทะล้อขนาด 13 นิ้ว และรัศมียาง 213 มิลลิเมตร [19] ส่วนล้อจำลองพื้นผิวถนนทางผู้ทำวิจัยได้เลือกใช้แบบพื้นผิวโค้ง (drum type) [4] พร้อมด้วยอุปกรณ์ควบคุมทางคอมพิวเตอร์ซึ่งประกอบไปด้วยหน่วยประมวลผลและส่วนควบคุมหลัก [19] ดังรูปที่ 4-3 ถึง 4-4



รูปที่ 4-3 ชุดอุปกรณ์ทดสอบแบบ HILs สำหรับรถยนต์นั่งขนาดเล็ก [19]



รูปที่ 4-4 ระบบประมวลผลและระบบควบคุมหลักของชุดทดสอบ HILs[19]

4.3 การออกแบบและพัฒนาชุดทดสอบ HILs

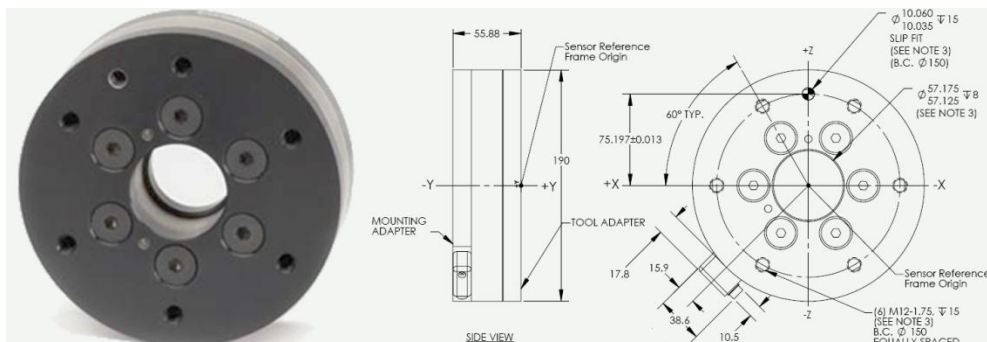
การออกแบบชิ้นส่วน โครงสร้างจุดยึดระบบล้อ ระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยวสำหรับรถฟอร์มูล่านักเรียน ได้มีการวิจัยร่วมกับนิสิตกลุ่มโครงการทางวิศวกรรมเครื่องกล[24] ซึ่งได้มีการออกแบบและทดสอบความแข็งแรงของชิ้นส่วนไว้แล้วด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Catia V5) โดยมีข้อกำหนดในการออกแบบมีดังนี้

1. ตำแหน่งจุดยึดของระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยวบน โครงสร้างชุดทดสอบ HILs ต้องมี ตำแหน่งที่เหมือนกับจุดยึดจริงบนรถฟอร์มูล่านักเรียน
2. ระบบรองรับที่ติดตั้งบนเครื่องทดสอบแบบ HILs ต้องสามารถปรับตั้งค่าต่างๆ ของมุมล้อได้ ตามรถจริง
3. โครงสร้างบนชุดทดสอบ HILs ที่ได้รับการออกแบบและตัดแปลง ต้องสามารถรองรับแรง ที่เกิดจากการเลี้ยวได้ ในทุกแกนโดยอ้างอิงข้อมูลที่ได้จากการแข่งขันของรถฟอร์มูล่านักเรียน

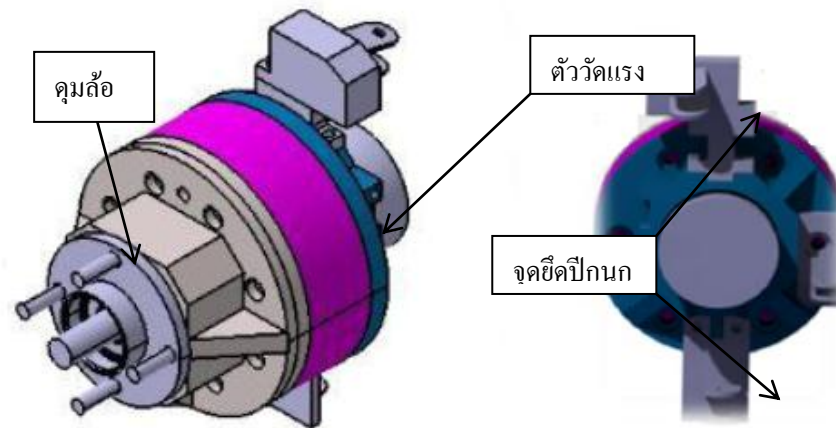
โดยโครงสร้างชุดทดสอบ HIL ที่ต้องได้รับการออกแบบใหม่จะประกอบไปด้วย โครงสร้างสำหรับการติดตั้งชุดทดสอบและล้อทดสอบ , โครงสร้างสำหรับจำลองมวลรถและ ติดตั้งช่วงล่างจากยานยนต์จริง ซึ่ง แสดงได้ดังนี้

4.3.1 โครงสร้างสำหรับการติดตั้งชุดทดสอบและล้อทดสอบ

โครงสร้างสำหรับการติดตั้งล้อทดสอบในที่นี้ คือ คอม่่า (Knuckle) ซึ่งเป็นชิ้นส่วนในการ ยึดชุดล้อขับเคลื่อนกับระบบรองรับให้เข้าด้วยกัน ซึ่งต้องออกแบบและจัดสร้างชิ้นใหม่เพื่อรองรับ การติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงแบบไม่หมุนไปกับล้อ (non-rotating F/T transducer) รุ่น Omega 190 ของ บริษัท ATI Industrial Automation โดยอุปกรณ์ดังกล่าวมีจุดเด่นแตกต่างจากอุปกรณ์ตรวจวัดแรง ทั่วไปคือมีรูกลวงตลอดความหนา ซึ่งรูกลวงดังกล่าวจะใช้สำหรับให้เพลลาขับลอดผ่านเพื่อส่งกำลัง ไปยังล้อทดสอบได้ดังรูปที่ 4-5 (รายละเอียดของอุปกรณ์นี้แสดงไว้ในภาคผนวก ข.)

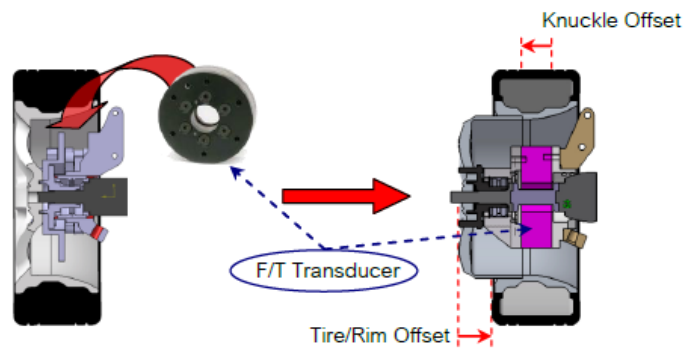


รูปที่ Error! No text of specified style in document.-5 อุปกรณ์วัดแรง (F/T Transducer) โดยรูปแบบที่ได้หลังจากการออกแบบและทำการทดสอบความแข็งแรงด้วยโปรแกรมCATIA V.5[24] แสดงดังรูป 4-6



รูปที่ 4-6 คอฆ่าที่ได้รับการออกแบบใหม่

และได้มีการดัดแปลงล้อทดสอบให้มีระยะเยื้องศูนย์(offset) เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4-8 เท่ากับระยะยึดของคุมล้อเนื่องจากความหนาของอุปกรณ์วัดแรงดังรูปที่ 4-7



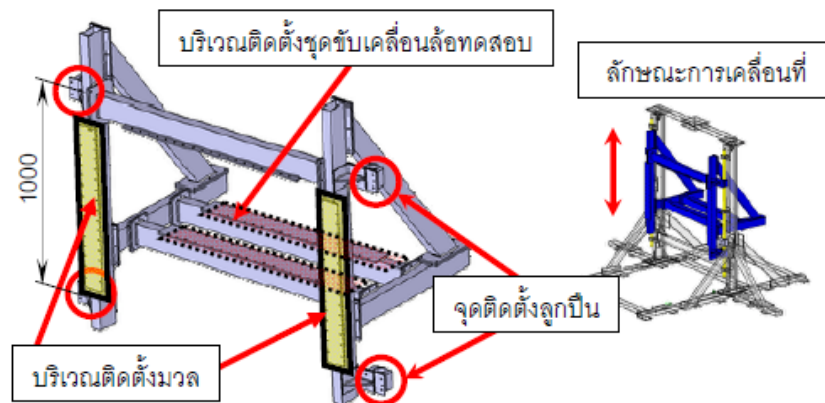
รูปที่ 4-7 แสดงระยะเยื้องศูนย์ของล้อแม็กซ์



รูปที่ 4-8 ล้อแม็กซ์ที่ทำการปรับระยะเยื้องศูนย์แล้ว

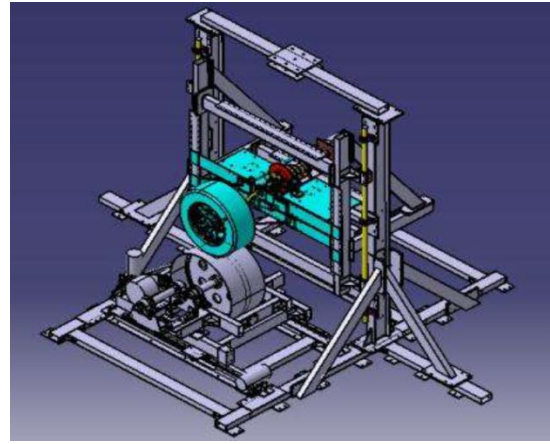
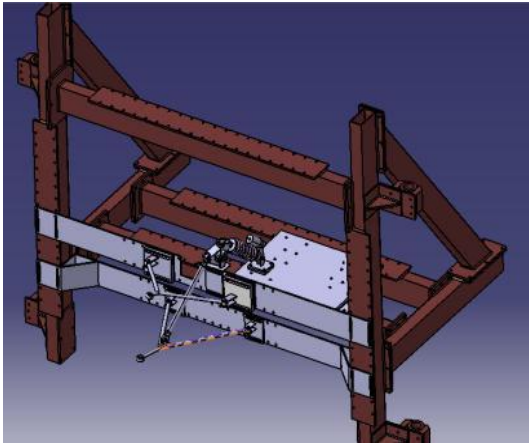
4.3.2 โครงสร้างสำหรับชุดจำลองมวลรถและจับยึดระบบรองรับ

โครงสร้างสำหรับชุดจำลองมวลรถและจับยึดระบบรองรับเดิม ซึ่งใช้ในการติดตั้งระบบรองรับการสั่นสะเทือนรวมไปถึงมวลถ่วงเพื่อปรับภาวะไหลคในแนวตั้งที่กระทำที่ล้อ โดยโครงสร้างดังกล่าวสามารถเคลื่อนที่ขึ้น-ลงแนวตั้งได้อย่างอิสระ ดังรูปที่ 4-9 แต่เนื่องจากโครงสร้างหลักสำหรับชุดจำลองมวลรถเดิมให้ภาวะไหลคในแนวตั้งถึง 200 kg.[19] ซึ่งมากเกินไปสำหรับใช้ในการทดสอบระบบรองรับของรถฟอร์มูล่านักเรียน เนื่องจากน้ำหนักรถทั้งคันมีค่าประมาณ 400 kg. เมื่อรวมคนขับ ภาวะไหลคในแนวตั้งที่กระทำในแต่ละล้อจึงมีค่าประมาณ 100 kg. จึงจำเป็นต้องติดตั้งระบบรอกทคน้ำหนัก เพื่อใช้ปรับภาวะไหลคในแนวตั้ง



รูปที่ 4-9 ชุดจำลองมวลรถและจับยึดระบบรองรับเดิม

ดังนั้นการออกแบบที่สำคัญในส่วนนี้คือ การออกแบบจุดยึดระบบรองรับการสั่นสะเทือนของรถฟอร์มูล่านักเรียนบนชุดโครงสร้างจำลองมวลรถเดิม และการออกแบบระบบรอกที่ใช้ในการปรับภาวะไหลคในแนวตั้ง ซึ่งหลังจากที่ได้ทำการออกแบบและทดสอบความแข็งแรง จึงได้รูปแบบดังรูป 4-10 ถึง 4-11



รูปที่ 4-10 ชุดจับยึดระบบรองรับการสั่นสะเทือน[24] รูปที่ 4-11 ชุดทดสอบ HILs ที่ได้จากการออกแบบ[24]

และเนื่องจากรถฟอร์มูล่านักเรียนมีน้ำหนักเบากว่ารถยนต์ขนาดเล็กที่เคยใช้ในการทดสอบประมาณ 3 เท่าตัว ดังนั้นจึงต้องมีการถ่วงน้ำหนักเพื่อปรับภาระโหลดในแนวตั้งที่เกิดจากน้ำหนักของชุดโครงสร้าง โดยใช้ชุดรอกถ่วงน้ำหนักซึ่งยึดในตำแหน่งบนสุดของโครงสร้าง และใช้การถ่วงน้ำหนักลงในลักษณะที่ยึดติดกับปลายด้านหนึ่งของรอกในการถ่วงน้ำหนักให้เท่ากับน้ำหนักของรถจริง

รูปที่ 4-12 แสดงชุดทดสอบ HILs ที่ได้รับการติดตั้งระบบล้อ ระบบบังคับเลี้ยวและระบบรองรับจริงของรถฟอร์มูล่านักเรียนที่พร้อมใช้สำหรับการทดสอบการควบคุม



รูปที่ 4-12 ชุดทดสอบ HILs จริงสำหรับรถฟอร์มูล่านักเรียน[24]

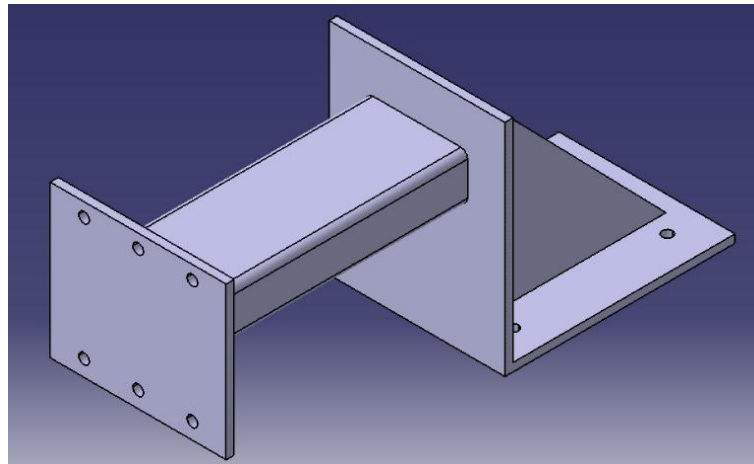
นอกจากนี้ยังได้มีการออกแบบเพื่อเสริมความแข็งแรงของโครงสร้างในส่วนจุดยึดระบบรองรับเพิ่มเติมเนื่องจากการทดสอบเบื้องต้นพบว่าแผ่นโครงสร้างในส่วนจุดยึดมีการโก่งงอในขณะที่เลี้ยวทำให้แรงที่วัดได้มีค่าไม่ตรงตามจริง โดยมีข้อกำหนดดังนี้

1. สามารถยึดชุดจับยึดระบบช่วงล่างให้ไม่เกิดการเคลื่อนที่ได้ขณะมีแรงกระทำ
2. สามารถรับแรงที่มากระทำที่มากจากการบังคับเลี้ยวได้
3. สามารถประกอบเข้ากับชุดโครงสร้างหลักได้ โดยไม่ทำให้ระยะต่างๆเกิดการเปลี่ยนแปลง

จากข้อกำหนดเบื้องต้นประกอบการหลักเกณฑ์ในการพิจารณาความเหมาะสมของการติดตั้งและรับแรง ทางกลุ่มผู้วิจัยจึงได้ออกแบบชิ้นส่วนเสริมแรงทั้งหมด 2 แบบ ด้วยโปรแกรม CATIA V5R19 ดังนี้

- แบบที่ 1

ชิ้นส่วนเสริมแรงที่ติดตั้งบริเวณระบบบังคับเลี้ยว โดยออกแบบตามลักษณะของการติดตั้งเป็นหลัก โดยจะใช้เหล็กท่อสี่เหลี่ยมเป็นชิ้นส่วนรับแรงหลักประกอบด้วยสามเหลี่ยมค้ำยัน ซึ่งจะยึดแผ่นเหล็กในชุดอำยึดและ โครงสร้างหลักด้วยสกรูและน็อต ดังรูปที่ 4-13

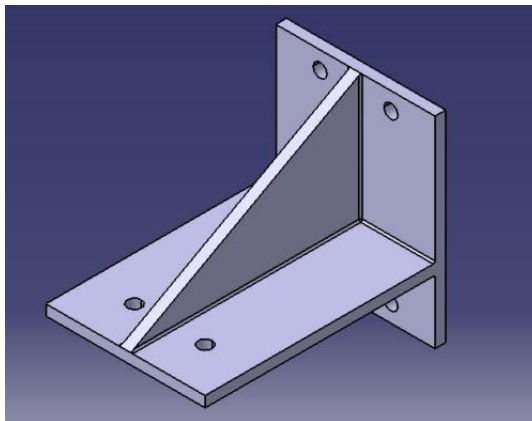


รูปที่ 4-13 ชิ้นส่วนเสริมแรงที่ติดตั้งบริเวณระบบบังคับเลี้ยว

- แบบที่ 2

ชิ้นส่วนเสริมแรงที่ติดตั้งบริเวณชุดตัวหน่วงการสั่นสะเทือน ออกแบบตามลักษณะการติดตั้งเช่นกัน และสามารถทำได้ง่าย โดยจะเป็นเพียงแผ่นเหล็กที่ตั้งฉากกันและจะค้ำยันด้วยสามเหลี่ยมรับแรง เพื่อความแข็งแรงที่มากขึ้นทางกลุ่มผู้วิจัยจะทำชิ้นส่วนรับแรงบริเวณนี้ 2 ชิ้น

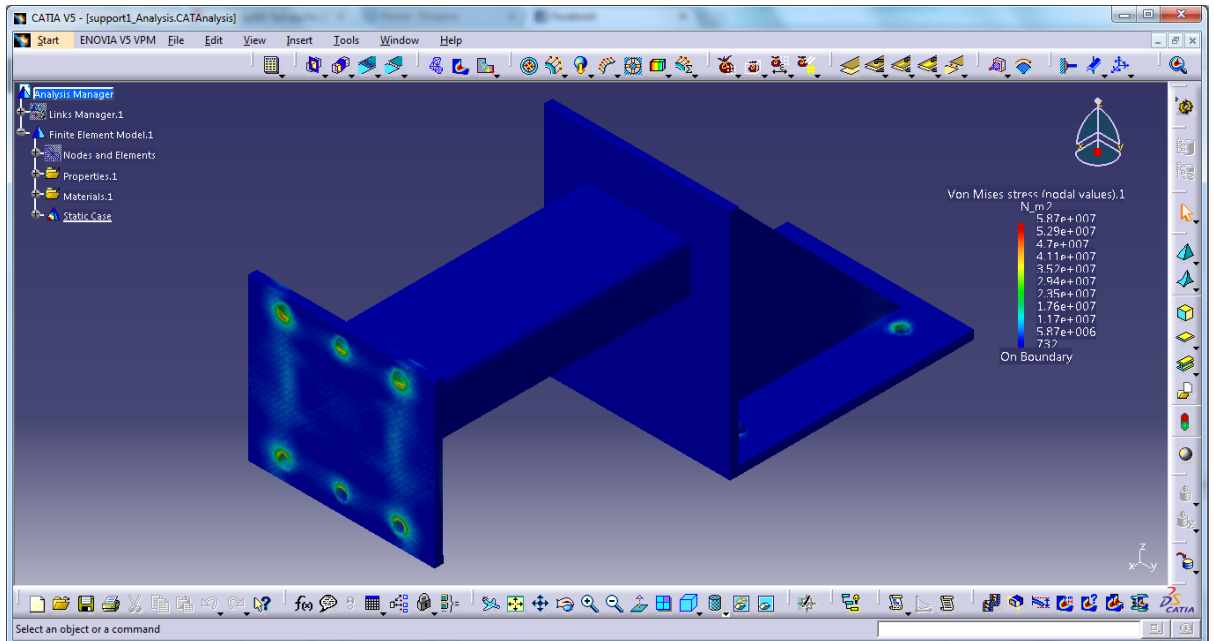
ติดตั้งบริเวณที่ใกล้กัน การยึดชิ้นส่วนเสริมแรงมีลักษณะเช่นเดียวกับแบบที่ 1 โดยใช้สกรูและน็อต ดังรูปที่ 4-14



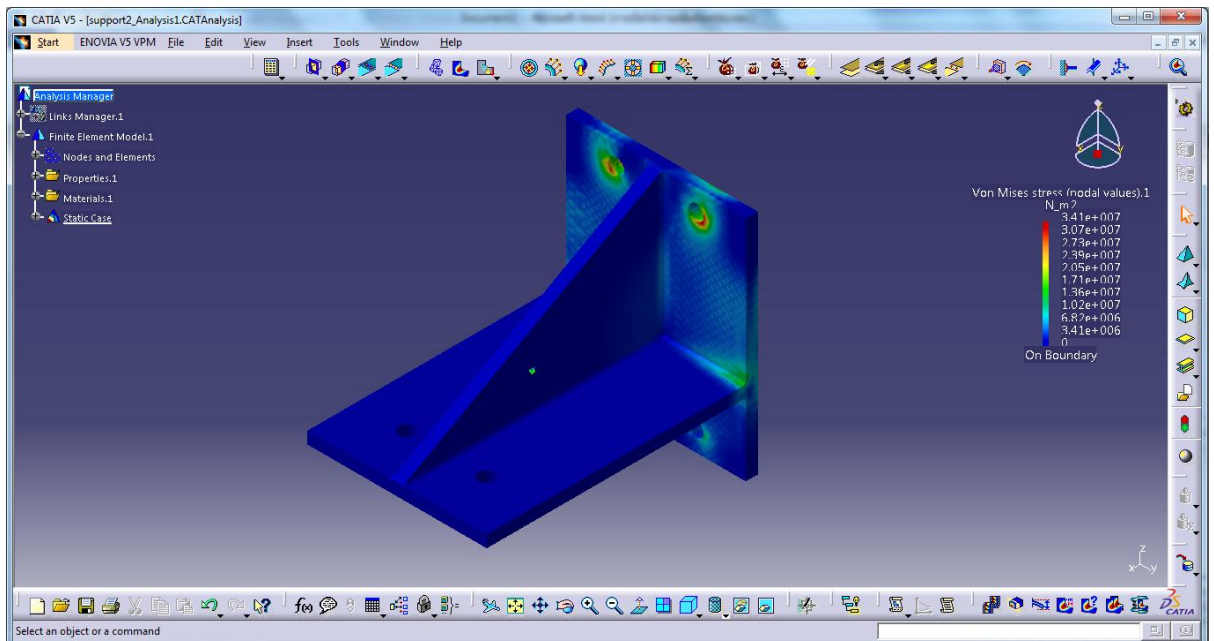
รูปที่ 4-14 ชิ้นส่วนเสริมแรงที่ติดตั้งบริเวณชุดตัวหน่วงการสั่นสะเทือน

หลังจากได้ออกแบบรูปทรงและรูปแบบการติดตั้งแล้ว ต้องมีการคำนวณแรงที่กระทำต่อชิ้นส่วนเสริมนี้เพื่อวิเคราะห์ความแข็งแรง โดยจะใช้ค่าแรงที่เป็นสองเท่าของแรงที่มากที่สุดที่อาจเกิดขึ้นกับชิ้นส่วนเสริมแรง การคำนวณจะใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) ในการคำนวณหาความแข็งแรงของชิ้นส่วนเสริมแรงที่ออกแบบไว้ โดยกำหนดให้แรงในแนวแกน X, Y และ Z ที่ใช้ในการทดสอบความแข็งแรงประมาณ 800 นิวตัน 3000 นิวตันและ 4,000 นิวตันตามลำดับ โดยอ้างอิงจากแรงที่วัดได้จากการทดสอบระบบรองรับของยานยนต์ขนาดเล็กด้วยชุด HILs[19] พบว่าค่าความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าไม่เกินค่าความเค้นครากของวัสดุที่เลือกใช้ ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าชิ้นส่วนเสริมแรงนี้สามารถรับแรงด้านข้างที่อาจเกิดขึ้นได้ โดยจะจับยึดแผ่นเหล็กในชุดจับยึดระบบช่วงล่างกับโครงสร้างหลักให้ไม่เกิดการเคลื่อนที่หรือเปลี่ยนตำแหน่งได้ ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนเสริมแรงทั้งสอง ดังรูปที่ 4-15 ถึง 4-16 สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ชิ้นส่วนเสริมแรงแบบที่ 1 มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้นสูงสุด 5.87×10^7 นิวตัน/เมตร²
 2. ชิ้นส่วนเสริมแรงแบบที่ 2 มีค่าความเค้นที่เกิดขึ้นสูงสุด 3.41×10^7 นิวตัน/เมตร²
- ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นส่วนเสริมแรงทั้งสองมีค่าไม่เกินค่าความเค้นครากของวัสดุ (2×10^8 นิวตัน/เมตร²)



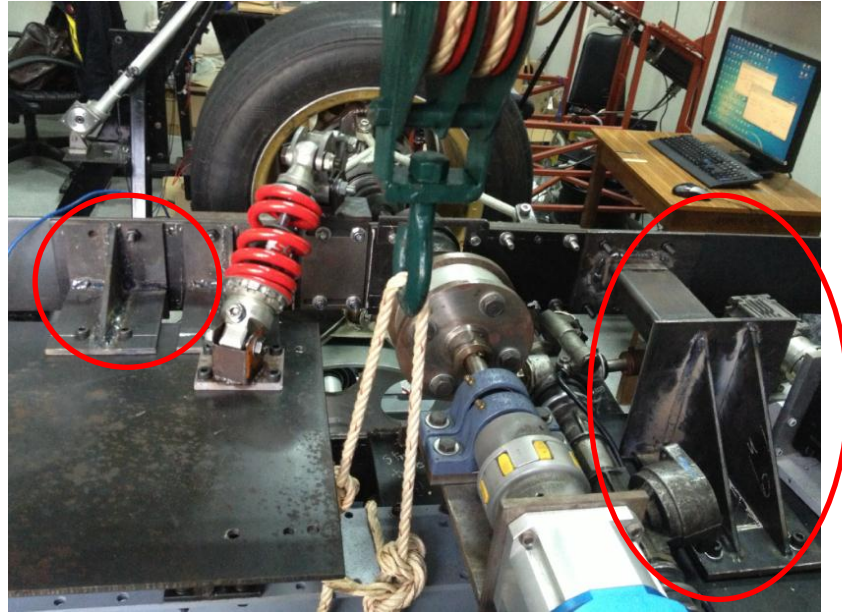
รูปที่ 4-15 ไฟไนต์เอลิเมนต์คำนวณความแข็งแรงของชิ้นส่วนเสริมแรงแบบที่ 1



รูปที่ 4-16 ไฟไนต์เอลิเมนต์คำนวณความแข็งแรงของชิ้นส่วนเสริมแรงแบบที่ 2

หลังจากได้ทำชิ้นส่วนเสริมแรงขึ้นมาแล้วนำไปติดตั้งในชุดทดสอบ HILs ดังรูปที่ 4-17 พร้อมทั้งตรวจสอบผลที่เกิดขึ้น เมื่อสั่งบังคับเคี้ยวและใช้น้ำหนักของรถ Student formula เช่นเดิม

พบว่าแผ่นเหล็กที่เดิมเกิดการโค้งงอไม่แสดงอาการดังกล่าวขึ้นอีก ทำให้ตำแหน่งของระบบช่วงล่างไม่เกิดการเปลี่ยนตำแหน่งขณะที่ทำการทดสอบ ข้อมูลที่วัดได้จึงมีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น



รูปที่ 4-17 การติดตั้งชิ้นส่วนเสริมแรงบนชุดทดสอบ HILs (วงกลมสีแดง)

4.4 ค่าพารามิเตอร์ของรถฟอร์มูล่านักเรียน

จากแบบจำลองสองล้อ (Bicycle model) ที่ใช้ในการคำนวณการเคลื่อนที่ของรถในบทที่ผ่านมา พบว่าค่าพารามิเตอร์ส่วนใหญ่ต้องวัดมาจากรถจริง เช่น มวลรถครึ่งคัน โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนคิง ภาระแนวคิงของล้อหน้า เป็นต้น โดยวิธีการหาค่าและวิธีการคำนวณจะแสดงไว้อย่างละเอียดในส่วนของภาคผนวก จ. ซึ่งค่าพารามิเตอร์ของรถฟอร์มูล่านักเรียนที่ใช้ในแบบจำลองสองล้อสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในแบบจำลองสองล้อ

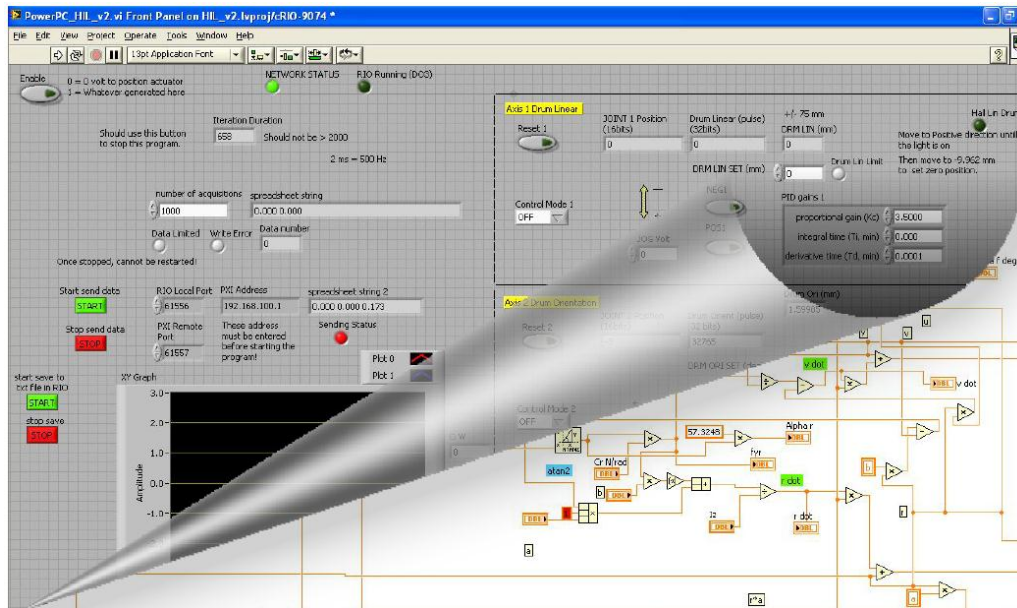
พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าที่วัดได้
1. มวลของรถ(ไม่รวมคนขับ) (m)	กิโลกรัม (kg)	366
2. โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนตั้ง (I_z)	กิโลกรัม.เมตร (kg.m^2)	146.22
3. ระยะศูนย์กลางมวลถึงล้อหน้า (a)	เมตร (m)	0.839
4. ระยะศูนย์กลางมวลถึงล้อหลัง (b)	เมตร (m)	0.821
5. ภาระแนวตั้งของล้อหน้า	กิโลกรัม (kg)	90
6. ภาระแนวตั้งของล้อหลัง	กิโลกรัม (kg)	92
7. รัศมีล้อทดสอบ (r_w)	เมตร (m)	0.270

4.5 การพัฒนาและปรับปรุงระบบควบคุมชุดทดสอบ HILs

ระบบควบคุมชุดทดสอบ HILs ประกอบไปด้วยโครงสร้างทดสอบ (test rig) ที่ทำงานร่วมกับหน่วยประมวลผลและส่วนควบคุม ซึ่งในการควบคุมการทำงานของชุดทดสอบ HILs นี้จะใช้อุปกรณ์ประมวลผล 3 ชุด ได้แก่ NI CompactRIO, NI PXI Controller และคอมพิวเตอร์ notebook โดยโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์ทั้ง 5 แกน จะทำงานอยู่บน NI CompactRIO และมีหน้าจอแสดงผล รวมไปถึงสื่อสารกับผู้ใช้งาน อยู่บนคอมพิวเตอร์ notebook ซึ่งการปรับค่าพารามิเตอร์และเงื่อนไขต่างๆในการทดสอบ สามารถกระทำได้ผ่านหน้าจอแสดงผลนี้ (รายละเอียดการใช้งานโปรแกรมควบคุมชุดทดสอบ HILs แสดงในภาคผนวก จ.)

4.5.1 โปรแกรมควบคุมระบบชุดทดสอบ HILs

โปรแกรมที่ใช้ควบคุมถูกพัฒนาขึ้นด้วยภาษา NI LabVIEW[®] มีลักษณะของโปรแกรมดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 4-18



รูปที่ 4-18 ลักษณะ โปรแกรมควบคุมที่เขียนด้วย NI LabVIEW®[19]

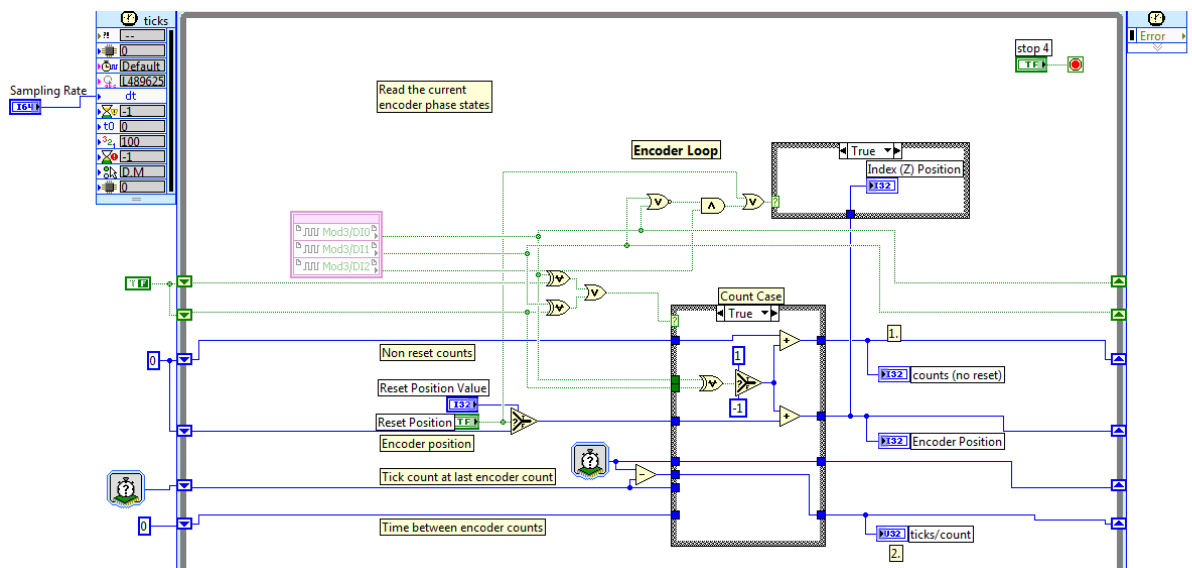
เนื่องจากโปรแกรมที่ได้ถูกเขียนขึ้นเพื่อใช้ในการควบคุมชุดทดสอบ HILs ที่ใช้กับระบบช่วงล่างของรถยนต์นั้นส่วนบุคคลนั้นยังไม่มีคุณสมบัติเท่าที่ควร จำเป็นจะต้องมีการปรับปรุงและพัฒนาในการ โปรแกรมที่ใช้ควบคุมดังกล่าวก่อนที่จะทำการทดสอบ โดยรายละเอียดของการประมวลผลและการควบคุม จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ หน่วยประมวลผลแบบ FPGA และ โปรแกรมควบคุม Power PC ซึ่งทั้งสองส่วนนี้จะทำงานร่วมกัน โดยสื่อสารด้วยการส่งสัญญาณกันภายในอุปกรณ์ประมวลผล จากนั้นจะถ่ายโอนโปรแกรมที่เสร็จสมบูรณ์ไปที่ NI CompactRIO และ NI PXI Controller ผ่านทางสายสื่อสาร TCP/IP สำหรับ NI CompactRIO นั้นจะมีวงจรประมวลผลในลักษณะ sequential logic ติดตั้งอยู่บนหน่วยประมวลผลแบบ FPGA โปรแกรมแบบ sequential logic ดังกล่าวจะใช้ในการรับค่าจากอุปกรณ์ตรวจวัดและส่งคำสั่งไปยังอุปกรณ์ขยายสัญญาณ ในขณะที่การประมวลผลแบบจำลองต่างๆจะกระทำบน Power PC โดยรับค่าจาก NI CompactRIO นอกจากนี้ NI PXI Controller ที่ติดตั้งระบบปฏิบัติการ Microsoft Windows จะใช้ในการรับสัญญาณจากอุปกรณ์วัดแรงและส่งค่าที่วัดได้ไปยัง CompactRIO เพื่อส่งผ่านไปยัง Power PC เพื่อใช้ในการคำนวณการเคลื่อนที่ของรถยนต์ นอกจากนี้ยังใช้เก็บข้อมูลการทดสอบทั้งหมดเพื่อนำมาวิเคราะห์ในลำดับต่อไปอีกด้วย

โดยการพัฒนาและปรับปรุงระบบควบคุมชุดทดสอบ HILs ในครั้งนี้ได้กระทำร่วมกับนิสิตกลุ่มโครงการทางวิศวกรรมเครื่องกล[25] ซึ่งหลังจากศึกษากระบวนการควบคุมชุดทดสอบ HILs ในโปรแกรม NI LabVIEW® พบว่าในส่วนของคุณค่าสั่งในหน่วยประมวลผลของ NI CompactRIO

ยังมีความซับซ้อนอยู่มาก ซึ่งส่งผลให้การประมวลผลและส่งข้อมูลต่างๆ ในระบบยังเกิดความผิดพลาดอยู่ ซึ่งส่วนที่ได้รับการปรับปรุงในครั้งนี้มี 2 ส่วนคือ หน่วยประมวลผล FPGA บน NI CompactRIO และ ส่วนการคำนวณของโปรแกรม LabVIEW® บน Power PC

4.5.1.1 FPGA

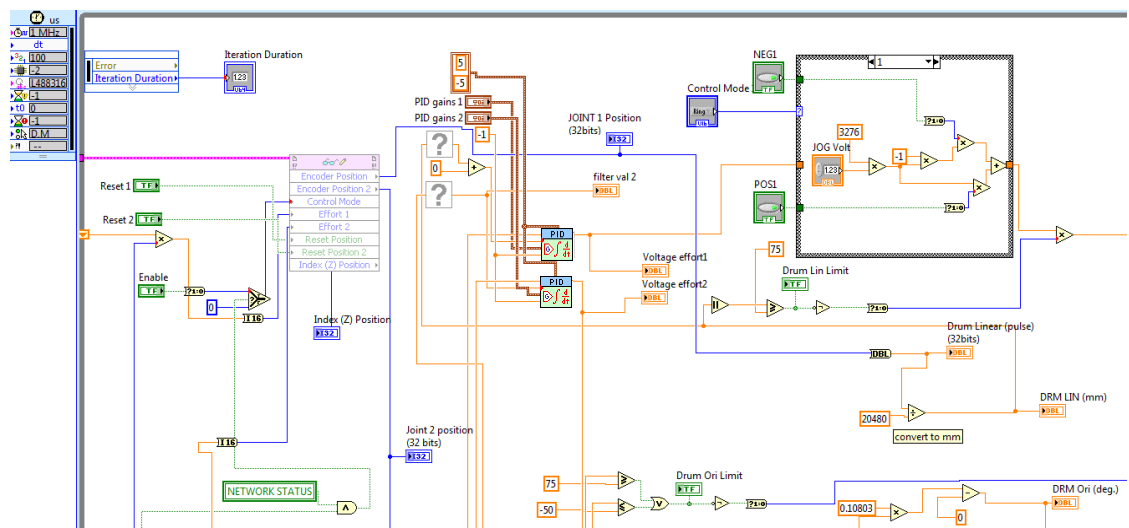
หน่วยประมวลผลแบบ FPGA เป็นโปรแกรมแบบ sequential logic จะใช้ในการรับค่าจากอุปกรณ์ตรวจวัดและส่งคำสั่งไปยังอุปกรณ์ขยายสัญญาณ ซึ่งปัญหาที่พบคือ ค่าจำนวนพัลส์การหมุนของมอเตอร์มีค่าไม่ตรงกับความเป็นจริงเมื่อสอบเทียบด้วยโปรแกรม Copley Motion Explorer 2 (CME 2) ทำให้ไม่สามารถควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ได้ ทางกลุ่มผู้วิจัยจึงได้เขียนโปรแกรมที่ใช้ในการส่งค่าที่อ่านได้จากแอนโคเดอร์ใน NI CompactRIO ไปยัง Power PC ที่ใช้ในการประมวลผลใหม่ โดยจากเดิมใช้การส่งข้อมูลเป็นแบบ I16 (Integer 16 bits) เป็นการส่งข้อมูลแบบ I32 (Integer 32 bits) แสดงดังรูปที่ 4-19 เพื่อให้ช่วงของข้อมูลกว้างขึ้นและลดความซับซ้อนของโปรแกรมลง ซึ่งจะปรับปรุงในแอนโคเดอร์ทั้ง 3 ตัว ได้แก่ ตำแหน่งของล้อจำลองพื้น การวางตัวของล้อจำลองพื้น และมุมเลี้ยวของล้อทดสอบ



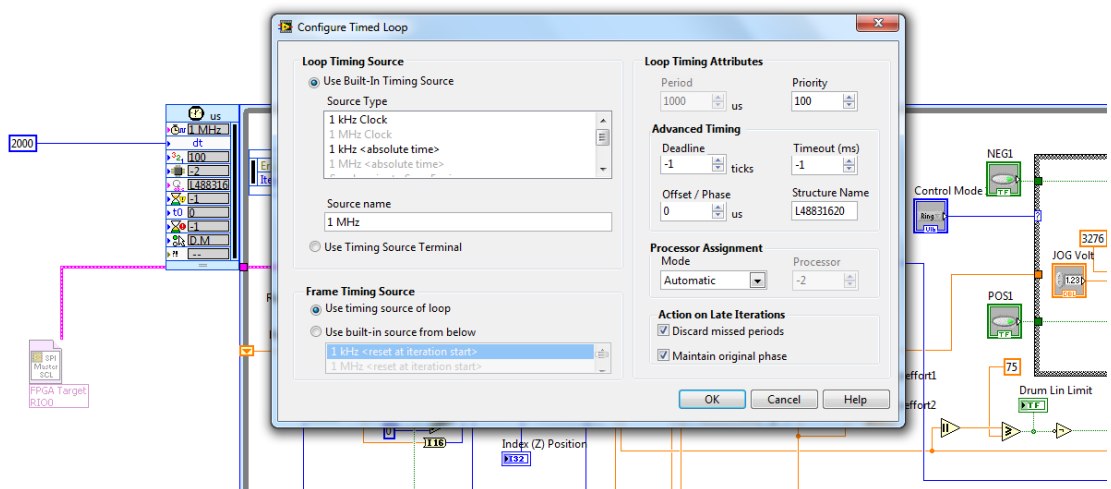
รูปที่ 4-19 ตัวอย่างของ Block diagram ใน FPGA ที่มีการส่งข้อมูลเป็น I32 (Integer 32 bits)

4.5.1.2 Power PC

หลังจากที่ได้ปรับปรุงและพัฒนาหน่วยประมวลผล FPGA แล้วจนสามารถอ่านค่าพัลส์ของ
 เอนโคเดอร์เป็น I32 ได้อย่างถูกต้องแล้ว จากนั้นได้ลองทดสอบการสั่งการ โดยใช้ระบบควบคุม
 แบบ PID แล้วพบว่าไม่สามารถควบคุมมอเตอร์ให้หมุนไปตามที่ต้องการได้ จึงได้เขียน โปรแกรม
 สั่งการควบคุมบน Power PC ใหม่ โดยลดความซับซ้อนของโปรแกรมลง ตั้งค่ากรอบของเวลาใหม่
 ให้มีความเหมาะสมกับการประมวลผล รวมทั้งแยกการประมวลของแต่ละส่วนให้เป็นสัดส่วนมาก
 ขึ้น เพื่อป้องกันความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการประมวลผล แสดงดังรูปที่ 4-20 ถึง 4-21



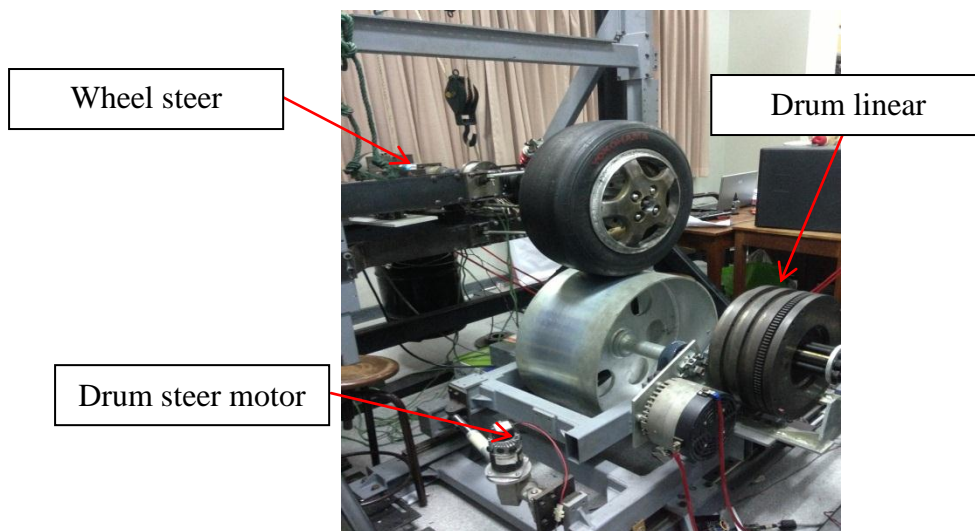
รูปที่ 4-20 ตัวอย่าง Block diagram ที่ลดความซับซ้อนลงโดยใช้การส่งข้อมูลแบบ I32



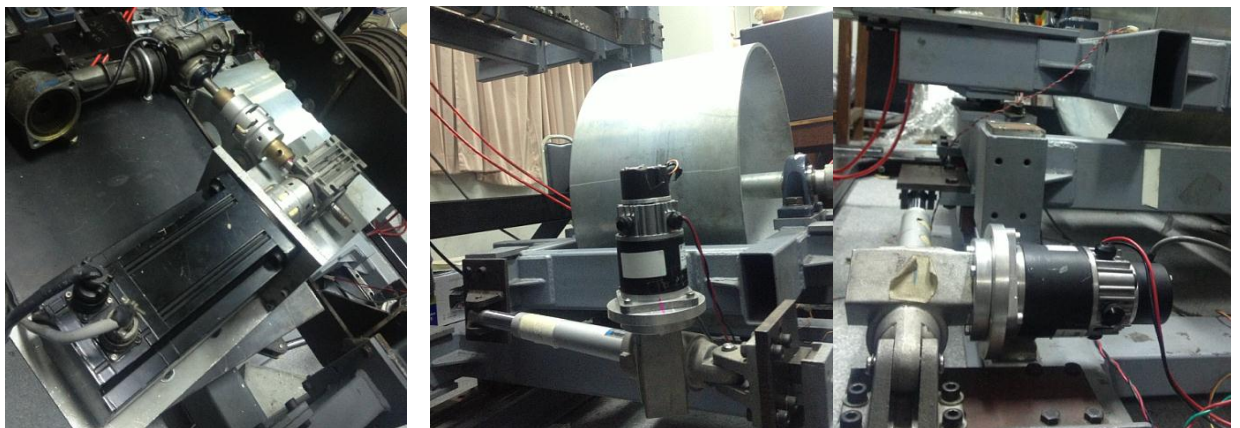
รูปที่ 4-21 การตั้งค่ากรอบของเวลา (Time Loop)

4.5.2 ระบบควบคุมตำแหน่งของชุดทดสอบ HILs

ระบบควบคุมตำแหน่งทั้งหมดของชุดทดสอบ HILs ประกอบด้วยระบบควบคุมย่อย 3 แกนติดตั้งอยู่ในตำแหน่งดังรูปที่ 4-22 ได้แก่ ระบบควบคุมมุมเลี้ยวของล้อทดสอบ ระบบควบคุมมุมการวางตัวของล้อจำลองพื้นถนน และระบบควบคุมตำแหน่งของล้อจำลองพื้นถนน (รายละเอียดของอุปกรณ์อยู่ในภาคผนวก ก.) ดังรูปที่ 4-23



รูปที่ 4-22 ตำแหน่งการติดตั้งมอเตอร์ควบคุมตำแหน่งของชุดทดสอบ HILs

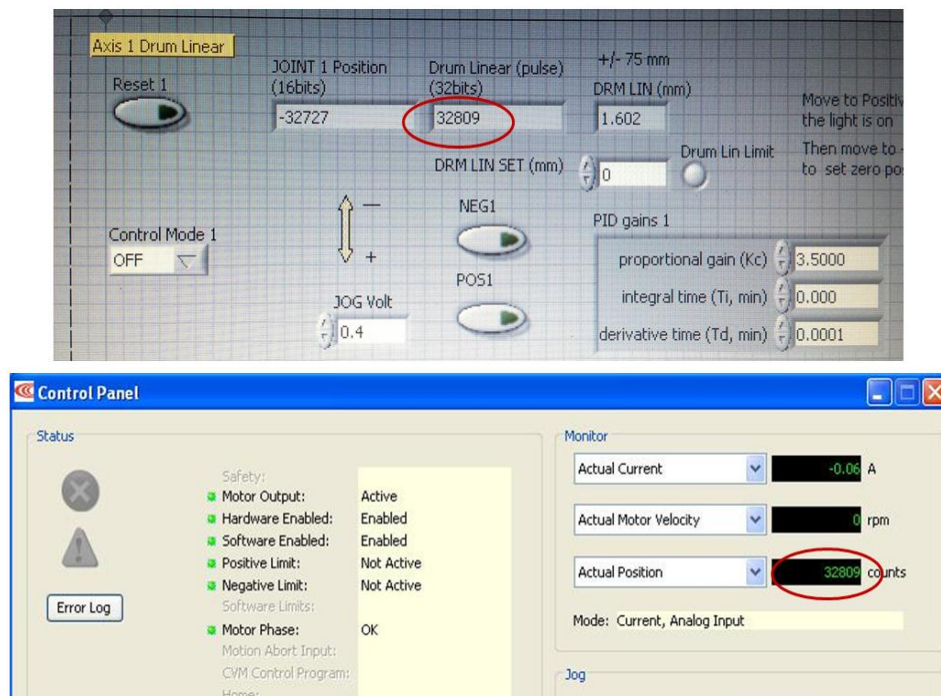


รูปที่ 4-23 ระบบควบคุมมุมเลี้ยวของล้อทดสอบ ระบบควบคุมมุมการวางตัวของล้อจำลองพื้นถนน และระบบควบคุมตำแหน่งของล้อจำลองพื้นถนนตามลำดับ

ก่อนจะเริ่มทำการทดสอบ ทางกลุ่มผู้วิจัยต้องทำการสอบเทียบและตั้งค่าอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบควบคุมตำแหน่งในแต่ละแกนเสียก่อน ซึ่งรายละเอียดมีดังต่อไปนี้

4.5.2.1 การตั้งค่ามอเตอร์ (Tuning)

การตั้งค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์บนอุปกรณ์ประมวลผล Accelus สามารถทำได้ผ่านโปรแกรม CME โดยสิ่งที่ต้องปรับตั้งค่า ได้แก่ ทิศทางการหมุนของมอเตอร์ ต้องกำหนดว่ามอเตอร์หมุนทางด้านใดเป็นบวก หมุนทางด้านใดเป็นลบ เพื่อให้การสั่งการขณะทำการทดสอบเป็นไปอย่างถูกต้อง ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ และจำนวนพัลส์ของแต่ละรอบการหมุนของมอเตอร์ มอเตอร์แต่ละประเภทจะให้ค่าจำนวนพัลส์ของแต่ละรอบการหมุนไม่เท่ากัน โดยผู้ใช้สามารถศึกษาได้จากคู่มือรายละเอียดของอุปกรณ์ และจะต้องปรับตั้งค่าจำนวนพัลส์ให้ตรงกับที่กำหนด เพื่อให้การแปลงค่าตัวเลขจากจำนวนพัลส์การหมุนเป็นระยะทางหรือองศาได้อย่างถูกต้องตามที่ต้องการ การตรวจสอบจำนวนพัลส์สามารถดูได้จากทั้ง โปรแกรม CME และ LabVIEW ซึ่งค่าที่อ่านได้จากทั้งสองโปรแกรมต้องมีค่าเท่ากัน จึงจะสามารถนำไปใช้ในการทดสอบจริงได้ แสดงดังรูปที่ 4-24



รูปที่ 4-24 ตัวอย่างการแสดงผลจำนวนพัลส์ของมอเตอร์ควบตำแหน่งของล้อจำลองพื้นจาก โปรแกรม LabVIEW (ด้านบน) และ โปรแกรม CME (ด้านล่าง)

4.5.2.2 การสอบเทียบตำแหน่งจากการหมุนของมอเตอร์ (Calibration)

การสอบเทียบตำแหน่งที่ได้จากการหมุนของมอเตอร์จำเป็นต้องมีการสอบเทียบใหม่ เนื่องจากชุดทดสอบ HILs เดิมเป็นระบบช่วงล่างของรถยนต์นั่งส่วนบุคคลที่มีขนาดล้อทดสอบต่างกับรถ Student formula การสอบเทียบทำได้โดยสั่งการควบคุมผ่านทางโปรแกรม LabVIEW[®] ที่ได้เขียนขึ้นไว้แล้ว โดยการสั่งเลี้ยวในโปรแกรมตั้งแต่ 0-5 องศา โดยให้ค่ามุมเลี้ยวในโปรแกรมเพิ่มขึ้นทีละ 0.5 องศา จากนั้นทำการวัดมุมเลี้ยวของล้อทดสอบจริงด้วยเครื่องวัดมุมโทดงรูปที่ 4-25 ในแต่ละค่ามุมเลี้ยวที่สั่งโดยโปรแกรม พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวในโปรแกรมกับมุมเลี้ยวจริงเป็นดังสมการที่ (4-1)

$$Rws = 3*(cmws) \quad (4-1)$$

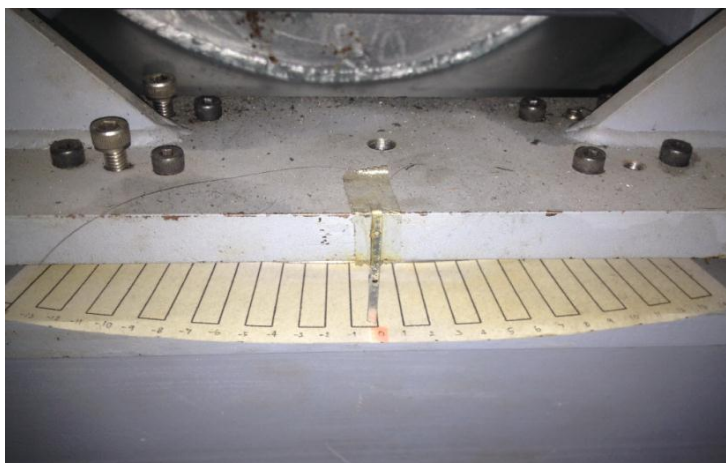
โดย Rws = มุมที่ล้อเลี้ยวจริง , $cmws$ = มุมที่สั่งในโปรแกรม

ในส่วนของการสอบเทียบล้อจำลองพื้นถนนได้ใช้วิธีเช่นเดียวกันกับการสอบเทียบมุมล้อจริง แต่เปลี่ยนอุปกรณ์วัดมุมจากเครื่องวัดมุมโทเป็นแผ่นสเกลโค้งที่ติดตั้งอยู่ที่ฐาน โครงสร้างที่ไม่เคลื่อนที่ ดังรูปที่

4-26 โดยเมื่อล้อจำลองพื้นถนนมีการเลี้ยวเข็มโลหะที่ถูกติดตั้งกับโครงสร้างที่เลี้ยวไปกับล้อจำลองพื้นถนนจะเปลี่ยนตำแหน่งการขึ้นบนสเกล ทำให้ทราบถึงมุมการเลี้ยวของล้อจำลองพื้นถนน โดยจากการสอบเทียบพบว่ามุมเลี้ยวที่แสดงบนโปรแกรมมีค่าตรงกับมุมเลี้ยวของล้อจำลองพื้นถนนที่เกิดขึ้นจริง



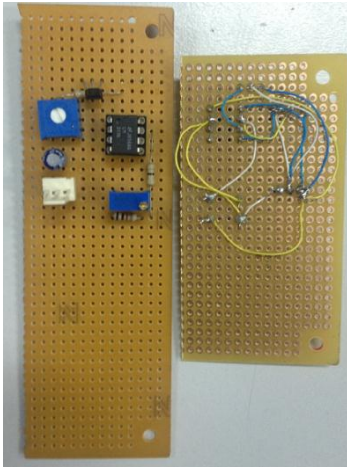
รูปที่ 4-25 การสอบเทียบระบบควบคุมมุมเลี้ยวของล้อทดสอบโดยใช้อุปกรณ์วัดมุมโท



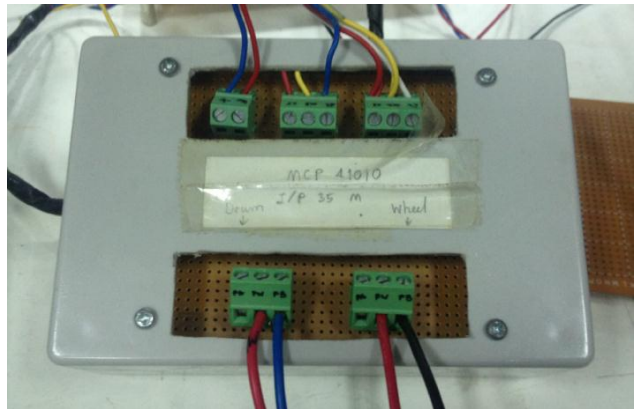
รูปที่ 4-26 สเกลที่ใช้ในการสอบเทียบระบบควบคุมมุมการวางตัวของล้อจำลองพื้นถนน

4.5.3 การวัดความเร็วและกำหนดตำแหน่งอ้างอิงของระบบควบคุม

การวัดความเร็วและกำหนดตำแหน่งอ้างอิงหรือตำแหน่งเริ่มต้นของระบบควบคุมก่อนเริ่มทำการทดสอบสามารถทำได้โดยการใช้แผงวงจร hall sensor ดังรูปที่ 4-27 ร่วมกับแท่งแม่เหล็กและวงจรเปรียบเทียบ (comparator with hysteresis) เพื่อสร้างสัญญาณในรูปของแรงดันไฟฟ้าเมื่อสนามแม่เหล็กที่ผ่าน hall sensor ที่มีความเข้มสูงพอ ในกรณีวัดความเร็วรอบของล้อทดสอบและล้อจำลองพื้น สัญญาณแรงดันไฟฟ้าจะถูกนับด้วยวงจรนับแบบ FPGA บน CompactRIO และหารด้วยเวลาจนได้เป็นความเร็วรอบ ความเร็วที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าความเร็วที่ต้องการด้วยระบบควบคุมแบบ PID และส่งสัญญาณควบคุมตัวต้านทานปรับค่าได้แบบดิจิทัล (MCP 41010) ดังรูปที่ 4-28 โดยการใช้การสื่อสารแบบ SPI ส่วนการกำหนดตำแหน่งอ้างอิง สัญญาณแม่เหล็กจะไปแสดงเป็นไฟสีเขียวที่แผงควบคุมในโปรแกรม LabVIEW แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งนั้นเป็นตำแหน่งที่ติดแท่งแม่เหล็กไว้ ซึ่งทางกลุ่มผู้วิจัยได้ทำแผงวงจร hall sensor ใหม่ เนื่องจากแผงวงจรเดิมไม่สามารถใช้งานได้ รวมทั้งได้ปรับปรุงตัวต้านทานปรับค่าได้ให้สามารถใช้งานได้ตามปกติ



รูปที่ 4-27 แผงวงจร Hall sensor



รูปที่ 4-28 กล่องตัวต้านทานปรับค่าได้แบบดิจิทัล(MCP 41010)

4.6 สิ่งที่ได้รับการพัฒนาและปรับปรุง

ในบทนี้ได้อธิบายถึงการพัฒนาและปรับปรุงชุดทดสอบ HILs ที่ใช้ในการทดสอบระบบช่วงล่างยานยนต์ขนาดเล็กให้สามารถทดสอบระบบช่วงล่างของรถฟอร์มูล่านักเรียน โดยสามารถสรุปรายละเอียดได้ดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 รายละเอียดการพัฒนาและปรับปรุงชุดทดสอบ HILs

ชื่ออุปกรณ์	รายละเอียดการปรับปรุง	ผลที่ได้
คอมน้ำ(knuckle)	เปลี่ยนรูปแบบจุดยึดระบบรองรับ	สามารถติดตั้งระบบรองรับของรถฟอร์มูล่านักเรียนได้
ล้อทดสอบ	เพิ่มระยะเยื้องศูนย์กลางของล้อทดสอบ	สามารถติดตั้งอุปกรณ์วัดแรง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางล้อทดสอบ
ชุดโครงสร้าง HILs	ติดตั้งแผ่นเหล็กเพื่อให้ยึดระบบรองรับแบบ Double wishbone และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับระบบรองรับในส่วนอื่นๆ	สามารถติดตั้งระบบรองรับและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องต่างๆของระบบรองรับของรถฟอร์มูล่านักเรียนได้
ชิ้นส่วนเสริมความแข็งแรงจุดยึดระบบรองรับบน HILs	สร้างและติดตั้งชิ้นส่วนเสริมความแข็งแรงตรงบริเวณระบบบังคับเลี้ยวและชุดตัวหน่วงการสั่นสะเทือนบนชุดทดสอบ HILs	แผ่นจุดยึดระบบรองรับบนชุดทดสอบ HILs ไม่เกิดการโก่งงอเมื่อมีแรงกระทำจากการทดสอบการเลี้ยวโค้ง
หน่วยประมวลผล FPGA	ปรับเปลี่ยนการส่งข้อมูลจาก I16 เป็น I32	การอ่านค่าจำนวนพัลซ์ของมอเตอร์บนโปรแกรมควบคุมอ่านได้ตรงตามค่าจริง
โปรแกรม LabVIEWS®	แยกส่วนระหว่างส่วนการควบคุมและส่วนประมวลผลออกจากกัน พร้อมทั้งตั้งค่ารอบเวลาการประมวลผลใหม่	สามารถควบคุมการทำงานของมอเตอร์แบบ PID ได้
มุมเลี้ยวของล้อทดสอบ	สอบเทียบมุมล้อของล้อทดสอบกับโปรแกรมควบคุมด้วยอุปกรณ์วัดมุมโท	อัตราส่วนระหว่างมุมเลี้ยวของล้อทดสอบในโปรแกรมต่อล้อทดสอบจริงมีค่า 1:3
มุมเลี้ยวของล้อจำลองพื้นถนน	สอบเทียบมุมล้อจำลองพื้นถนนกับโปรแกรมควบคุมด้วยอุปกรณ์วัดมุมแบบสเกล	อัตราส่วนระหว่างมุมเลี้ยวของล้อจำลองพื้นถนนในโปรแกรมต่อล้อจำลองพื้นถนนจริงมีค่า 1:1
Hall sensors	จัดทำแผงวงจร Hall sensors ขึ้นใหม่	กำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของอุปกรณ์จำพวกมอเตอร์ควบคุมตำแหน่งได้แม่นยำขึ้น

บทที่ 5

การทดสอบและผลการทดสอบด้วยเครื่อง HILs

การทดสอบเพื่อวิเคราะห์ลักษณะการขับขี่ในที่นี้ได้แบ่งเป็น 2 ส่วน คือการทดสอบด้วยเครื่อง HILs และ การทดสอบด้วยรถฟอร์มูล่านักเรียนคันจริง แล้วจากนั้นจึงทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบทั้งสองและทำการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อเป็นการสอบเทียบเครื่องมือทดสอบแบบ HILs ซึ่งในบทนี้จะอธิบายถึงการทดสอบระบบล้อ ระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยวด้วยเครื่อง HILs โดยการทดสอบช่วงล่างของรถฟอร์มูล่านักเรียนด้วยเครื่อง HILs เพื่อวิเคราะห์ลักษณะการขับขี่จะแบ่งออกเป็น 2 การทดสอบหลัก ได้แก่ การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงด้านข้าง(Cornering stiffness)ของล้อหน้าและล้อหลัง,และการทดสอบช่วงล่างโดยการวิ่งเป็นวงกลมเพื่อวิเคราะห์ผลของระบบช่วงล่างต่อลักษณะการเลี้ยวโค้ง การทดสอบเหล่านี้จะมีส่วนช่วยให้ผู้ทดสอบสามารถปรับแต่งระบบช่วงล่างได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้รถทั้งคัน ซึ่งรายละเอียดการทดสอบมีดังนี้

5.1 การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงด้านข้างของระบบล้อ

ค่าสัมประสิทธิ์แรงด้านข้าง (C_{α}) คือค่าที่ใช้บอกความสัมพันธ์ระหว่างแรงด้านข้างที่ยางสร้างขึ้น กับมุมไถลที่เกิดขึ้นที่หน้าสัมผัสระหว่างยางและล้อจำลองพื้นถนน เนื่องจากภาระที่กดล้อของล้อหน้าและล้อหลังต่างกัน จึงทำให้ลักษณะการเกิดแรงด้านข้างต่างกัน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงด้านข้างของล้อหน้าและล้อหลังจะไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 แบบ คือการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงด้านข้างของล้อหน้า และการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงด้านข้างของล้อหลัง โดยมีรายละเอียดดังนี้

5.1.1 ขั้นตอนการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงด้านข้างของล้อหน้า

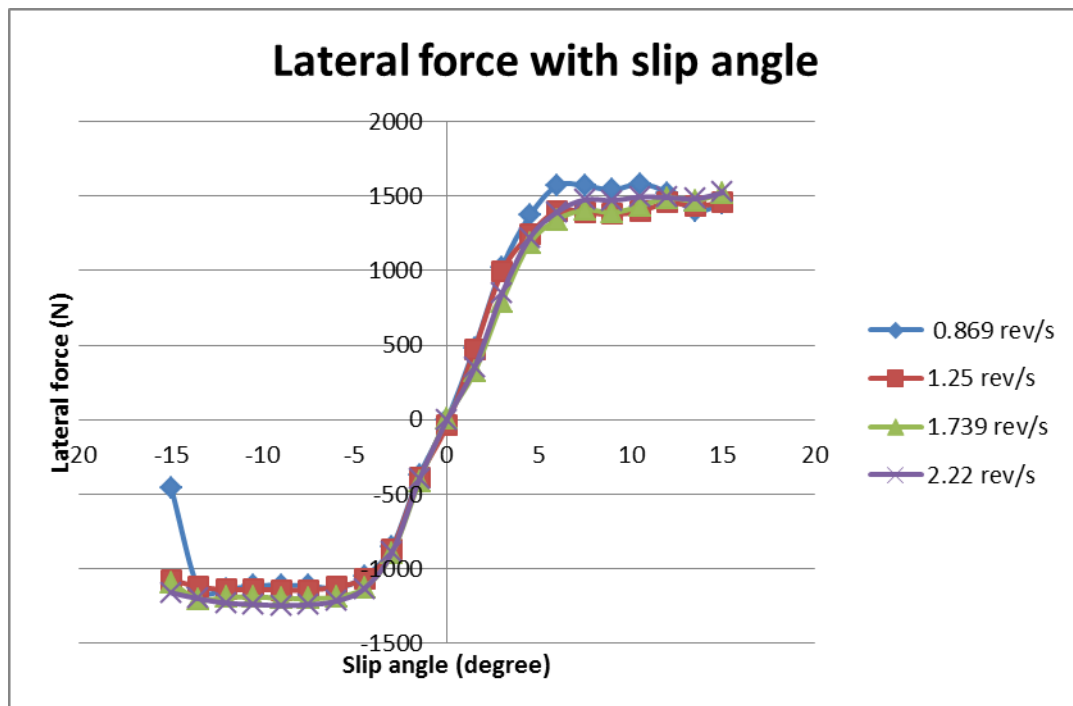
1. ปรับค่าให้แรงกดที่ล้อ (F_z) ของล้อหน้ามีค่าเท่ากับน้ำหนักรถที่วัดค่าได้ เท่ากับ 90 kg
2. ปรับความเร็วมอเตอร์ขับเคลื่อนชุดทดสอบล้อหน้า ให้มีลักษณะการขับขี่เสมือนจริงซึ่งโดยปรับความเร็วของล้อจำลองพื้นให้มีความเร็วในการหมุน 0.869 rev/s, 1.25 rev/s, 1.74

rev/s และ 2.22 rev/s เทียบเท่ากับความเร็ว 1.63 m/s, 2.35 m/s, 3.27 m/s และ 4.17 m/s ตามลำดับ

3. เนื่องจากรถมีลักษณะการขับเคลื่อนแบบล้อหลัง จึงการปรับทิศทางของล้อทดสอบให้สร้างมุมไถล (α) จาก -15 ถึง 15 องศาให้มีค่าต่างกันทีละ 1.5 องศา ในแต่ละค่าความเร็ว แล้วบันทึกค่าแรงกระทำด้านข้าง (F_y)

4. พล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้าง (F_y) และมุมไถล (α) ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 5-1

5.1.2 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงด้านข้างของระบบล้อหน้า



รูปที่ 5-1 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงด้านข้างของระบบล้อหน้าด้วยชุดทดสอบ HILs

จากผลการทดสอบดังรูปที่ 5-1 พบว่าแรงด้านข้างที่เกิดขึ้นที่อัตราเร็วต่างๆของล้อทดสอบ มีรูปแบบและมีค่าใกล้เคียงกันอย่างมาก จนอาจกล่าวได้ว่าแรงด้านข้างที่สถานะคงตัวนั้น ไม่มีความสัมพันธ์กับอัตราเร็วล้อทดสอบ ซึ่งข้อสรุปที่ได้เป็นไปตามทฤษฎีที่กล่าวไว้โดย Gillespies D.T.[26] ในการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงด้านข้างสามารถหาได้จากการคำนวณหาความชันของกราฟ

ในช่วงที่มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นซึ่งอยู่ในช่วง Slip angle -6 ถึง 6 องศา ได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงด้านข้างเท่ากับ 242.157 N/deg. (13,874.6 N/rad.)

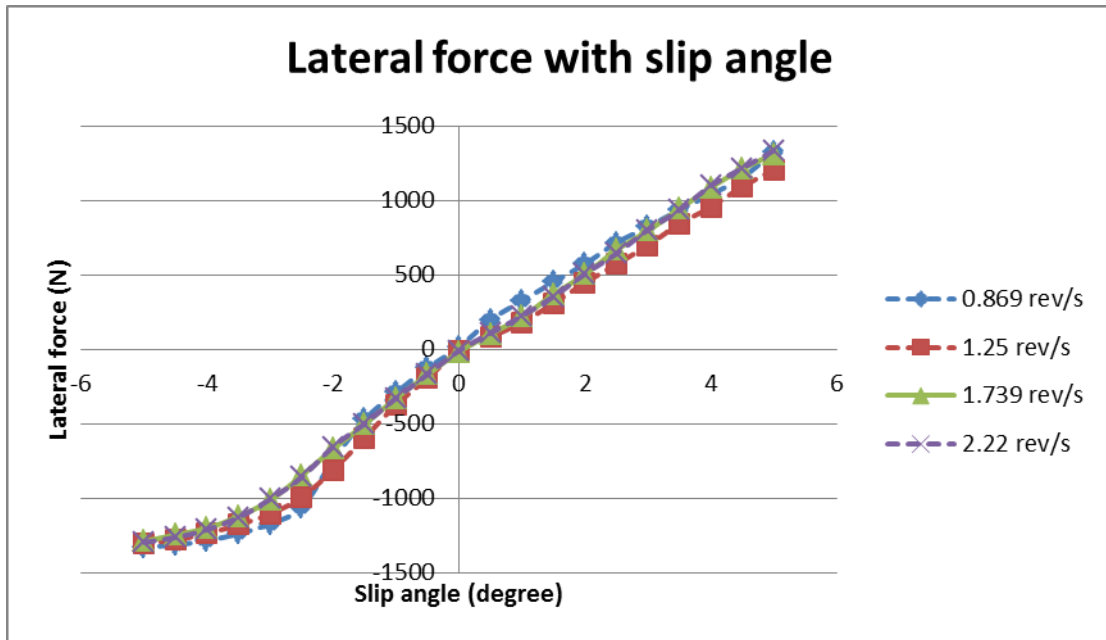
5.1.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์แรงด้านข้างของล้อหลัง

การหาค่าสัมประสิทธิ์แรงด้านข้างของล้อหลังนี้จะเปรียบเทียบกันระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงด้านข้างของล้อหลังที่หามาจากชุดทดสอบ HILs กับการหาจากทฤษฎี

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงด้านข้างของล้อหลังด้วยชุดทดสอบ HILs มีขั้นตอนการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงด้านข้างของล้อหลังดังนี้

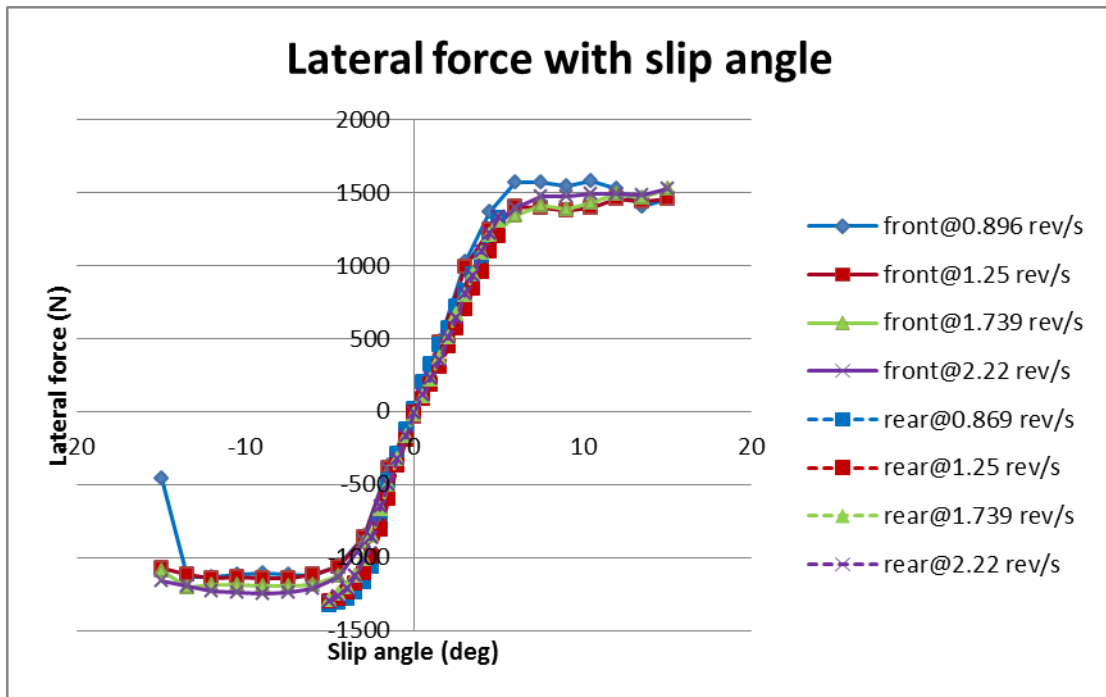
1. ปรับค่าให้แรงกดที่ล้อ (F_z) ของล้อหลังมีค่าเท่ากับน้ำหนักรถที่วัดค่าได้ เท่ากับ 92 kg
2. ปรับความเร็วมอเตอร์ขับเคลื่อนชุดทดสอบ ให้มีลักษณะการขับขี่เสมือนจริง โดยปรับความเร็วของล้อจำลองพื้นให้มีความเร็ว 0.869 rev/s, 1.25 rev/s, 1.739 rev/s และ 2.22 rev/s เทียบเท่ากับความเร็ว 1.63 m/s, 2.35 m/s, 3.27 m/s และ 4.17 m/s ตามลำดับ
3. เนื่องจากกรณีลักษณะการขับเคลื่อนแบบล้อหลัง จึงการปรับทิศทางของล้อจำลองพื้นให้สร้างมุมไถล (α) จาก -5 ถึง 5 องศาให้มีค่าต่างกันทีละ 1.5 องศา ในแต่ละค่าความเร็วแล้วบันทึกค่าแรงกระทำด้านข้าง (F_y)
4. พล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้าง (F_y) และมุมไถล (α) ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 5-2

5.1.4 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงด้านข้างของระบบล้อหลัง



รูปที่ 5-2 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงด้านข้างของระบบล้อหลังด้วยชุดทดสอบ HILs

จากรูปที่ 5-2 พบว่าแรงด้านข้างที่เกิดขึ้นที่อัตราเร็วต่างๆของล้อทดสอบมีรูปแบบและมีค่าใกล้เคียงกันอย่างมากจนอาจกล่าวได้ว่าแรงด้านข้างที่สถานะคงตัวนั้นไม่มีความสัมพันธ์กับอัตราเร็วล้อทดสอบเช่นกัน ดังนั้นในการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงด้านข้างสามารถหาได้จากการคำนวณหาความชันเฉลี่ยของกราฟในช่วงที่มีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นซึ่งอยู่ในช่วง Slip angle -5 ถึง 5 องศา ได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงด้านข้างเท่ากับ 298.39 N/deg. (17,096.5 N/rad.) และรูปที่ 5-3 แสดงกราฟการเปรียบเทียบระหว่างค่าแรงด้านข้างของล้อหน้าและแรงด้านข้างของล้อหลังที่มุมไถลค่าต่างๆ



รูปที่ 5-3 กราฟแสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของแรงด้านข้างกับมุมไถล

ระหว่างล้อหน้าและล้อหลัง

จากรูปที่ 5-3 พบว่ามุมไถลที่เกิดขึ้นจากการทดสอบด้วยล้อหน้ามีค่ามากกว่าค่ามุมไถลที่เกิดขึ้นจากการทดสอบแบบล้อหลังเนื่องจากการทดสอบแบบล้อหลังนั้นจะใช้มอเตอร์หมุนล้อจำลองพื้นถนนในการกำหนดความเร็วล้อส่วนการทดสอบแบบล้อหน้านั้นจะใช้มอเตอร์หมุนล้อทดสอบในการกำหนดความเร็วล้อซึ่งความสามารถในการทำความเร็วของมอเตอร์หมุนล้อทดสอบนั้นมีมากกว่ามอเตอร์หมุนล้อจำลองพื้นถนนจึงสามารถทดสอบค่ามุมไถลได้มากกว่า แต่เมื่อพิจารณาในช่วงที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุมไถลกับแรงด้านข้างในช่วงที่เป็นเชิงเส้น พบว่ามีค่าอยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกันคือประมาณ -5 ถึง 5 องศา

เนื่องจากระบบทดสอบถูกออกแบบมาให้ใช้ทดสอบกับระบบช่วงล่างของล้อหน้า ดังนั้นในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงด้านข้างของล้อหน้านั้นจะมีความถูกต้องมากกว่าผลที่ได้จากการทดสอบแบบล้อหลัง เนื่องจากความแตกต่างของลักษณะทางกายภาพระหว่างระบบรองรับหน้าและหลังถึงแม้ว่าจะมีรูปแบบระบบรองรับที่เหมือนกันคืออิสระปีกนกสองชั้น แต่ในส่วนของจุดยึดและการวางตำแหน่งที่ต่างกันก็ทำให้แรงที่กระทำนั้นแตกต่างกันด้วย ดังนั้นการใช้ค่าที่ได้จากทฤษฎีจะ

มีความน่าเชื่อถือมากกว่า ซึ่งในการคำนวณนั้นจะกำหนดเงื่อนไขในการออกแบบให้รถมีลักษณะการเคลื่อนที่แบบพอดิโอโค้ง จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง $C_{\alpha f}$ และ $C_{\alpha r}$ ดังสมการที่ (5.1)-(5.4)

$$\frac{M_f}{C_{\alpha f}} = \frac{M_r}{C_{\alpha r}} \quad (5.1)$$

โดย M_f คือ อัตราส่วนที่กระจายตัวลงล้อหน้า

$$M_f = M \cdot (b/L) \quad (5.2)$$

โดย M_r คือ อัตราส่วนที่กระจายตัวลงล้อหลัง

$$M_r = M \cdot (a/L) \quad (5.3)$$

จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้ $C_{\alpha r} = \frac{a}{b} C_{\alpha f}$ (5.4)

โดยแทนค่า $a = 0.839$ m และ $b = 0.821$ m และ $C_{\alpha f} = 13,874.6$ N/rad.

จะได้ค่า $C_{\alpha r} = 14,178.8$ N/rad

5.2 การทดสอบช่วงล่างโดยการวิ่งเป็นวงกลม (Skidpad test)

การทดสอบการวิ่งเป็นวงกลมจะใช้ในการทำนายผลของระบบช่วงล่างที่มีต่อลักษณะการเลี้ยวโค้งของรถ Student formula เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของรถ Student formula และการตอบสนองของชุดทดสอบ HILs ซึ่งจะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ลักษณะ คือการวิเคราะห์โดยทฤษฎี (Analytical method) และการวิเคราะห์โดยการทดสอบผ่านชุดทดสอบ HILs (Experimental method)

5.2.1 ข้อกำหนดในการทดสอบการวิ่งเป็นวงกลม

1. สัมประสิทธิ์แรงต้านข้าง C_{α} ข้อล้อทดสอบล้อหน้ามีค่าเท่ากับ 13,874.6 N/rad. และล้อหลังมีค่าเท่ากับ 14178.8 N/rad
2. มวลรถเต็มคัน 366 kg.
3. ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางถึงล้อหน้าล้อหน้าเท่ากับ 0.839 m และระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางถึงล้อหน้าล้อหลังเท่ากับ 0.821 m

4. ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของรถทั้งคันมีค่าเท่ากับ 146.22
5. รัศมีล้อทดสอบเท่ากับ 0.27 m และรัศมีล้อจำลองพื้นเท่ากับ 0.3 m
6. ขนาดลมยางเท่ากับ 25 psi
7. แรงด้านข้างที่เกิดขึ้นไม่ขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของล้อทดสอบและข้อสรุปต่างๆที่ได้จากผลการทดสอบตั้งอยู่ในขอบเขตของอัตราเร็วที่ใช้ในการทดสอบนี้เท่านั้น

ในการทดสอบด้วยชุดทดสอบ HILs จะกำหนดให้อัตราเร็วจริงของล้อทดสอบมีค่าคงที่ที่ 3 m/s ในขณะที่มุมเลี้ยวของล้อทดสอบจะมีการเปลี่ยนค่าตั้งแต่ 1.5 องศาจนถึง 12 องศา โดยมีการป้อนกลับแรงด้านข้างมาใช้ในการคำนวณในแบบจำลองสองล้อ (step response with force feedback)

5.2.2 การวิเคราะห์พฤติกรรมการเลี้ยวโค้งของรถฟอร์มูล่านักเรียนด้วยเครื่อง HILs

พฤติกรรมการเลี้ยวโค้งของรถแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะคือ พอดีโค้ง (Neutral steer), คือ โค้ง (Under steer) และไวโค้ง (Over steer) ซึ่งการเกิดพฤติกรรมเหล่านี้มีผลมาจากการสร้างแรงด้านข้างของรถขณะเข้าโค้ง โดยสามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งด้านข้าง (Lateral acceleration) กับองศาการเลี้ยว (Steering degree) ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งการทดลองที่ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมการเลี้ยวโค้งของรถยนต์ออกเป็น 2 การทดลอง คือ

1. การทดลองการเลี้ยวโค้งด้วยอัตราเร็วคงที่ (Constant speed method)
2. การทดลองการเลี้ยวโค้งด้วยรัศมีความโค้งคงที่ (Constant radius)

โดยในการทดลองการเลี้ยวโค้งด้วยอัตราเร็วคงที่นั้นได้ทำการทดสอบที่อัตราเร็วตามแกนของตัวรถในแบบจำลองจักรยาน 3 ค่าต่างๆกัน โดยอัตราเร็วที่ใช้มีค่าตั้งแต่ 15 เมตร/วินาที, 20 เมตร/วินาที และ 25 เมตร/วินาที เพื่อทำนายลักษณะการเลี้ยวโค้งของยานยนต์ในแบบจำลองต่อสัญญาณการเลี้ยวที่เกิดขึ้นอย่างกะทันหันเปรียบเทียบกับทดสอบโดยใช้ทฤษฎีซึ่งมีการกำหนดค่าเริ่มต้นในแบบจำลองจักรยานเหมือนกับการทดสอบด้วยชุดทดสอบ HILs แต่จะไม่คิดผลของการป้อนกลับแรงด้านข้าง ซึ่งการทดสอบทำได้โดยปรับมุมเลี้ยวของล้อทดสอบ รอจนการเคลื่อนที่ของตัวรถตามแบบจำลองเข้าสู่ภาวะคงตัว จากนั้นจึงนำอัตราเร็วตามแนวรถและอัตราเร็วเชิงมุมในการเคลื่อนที่มาคำนวณค่าความเร่งด้านข้าง

สำหรับการทดลองการเลี้ยวโค้งด้วยรัศมีความโค้งคงที่นั้นทำการทดลองเพื่อนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริงเนื่องจากการทดลองจริงด้วยรัศมีความโค้งคงที่นั้นสามารถทำได้ง่ายและปลอดภัยกว่าสำหรับการทดสอบจริง นอกจากนี้การควบคุมมุมพวงมาลัยของการทดสอบจริงต้องอาศัยความสามารถของนักขับในการควบคุมซึ่งมีความแม่นยำน้อยกว่าการควบคุมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์จึงเป็นอีกหนึ่งสาเหตุที่ทำให้การทดสอบการเลี้ยวโค้งของรถจริงด้วยวิธีอัตราเร็วคงที่จึงไม่เป็นที่นิยม โดยการทดลองด้วยเครื่อง HILs ในการทดลองนี้ต้องอาศัยข้อมูลบางส่วนที่ได้จากรถจริงก่อน คือ ความเร่งด้านข้างสูงสุด เพื่อนำมาหาความเร็วของรถในแบบจำลองจากสมการ

$$a = \frac{v^2}{r} \quad (5.5)$$

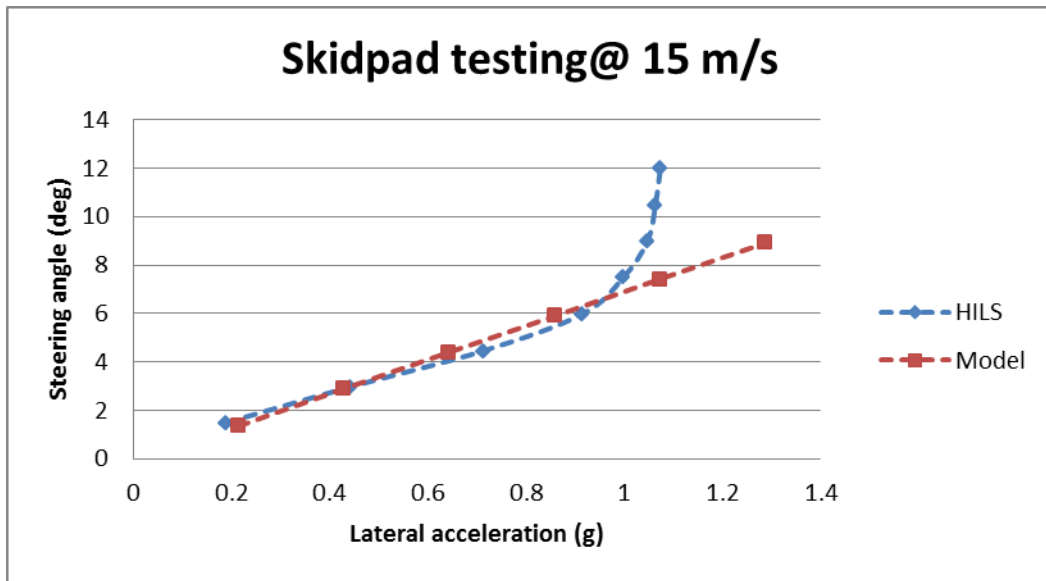
โดย a = ความเร่งด้านข้าง (m/s^2)

v = ความเร็วของรถ (m/s)

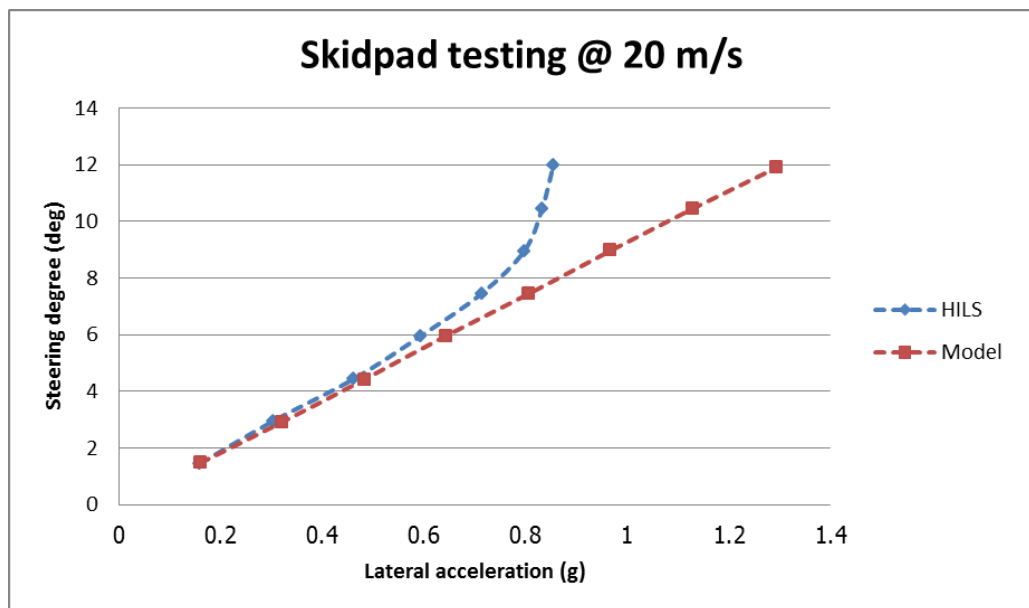
r = รัศมีความโค้งที่ใช้ในการทดสอบจริง (10.625 m.)

โดยเมื่อทราบความเร็วของรถที่ค่าความเร่งด้านข้างค่าต่างๆแล้ว ก็จะทราบค่าของความเร็วเชิงมุม จึงนำข้อมูลที่ได้ไปทดสอบด้วยเครื่อง HILs แบบคิดผลของแรงป้อนกลับเพื่อหาค่ามุมเลี้ยวที่เกิดขึ้นในแต่ละค่าความเร็วเชิงมุม จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งด้านข้างกับมุมพวงมาลัยเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

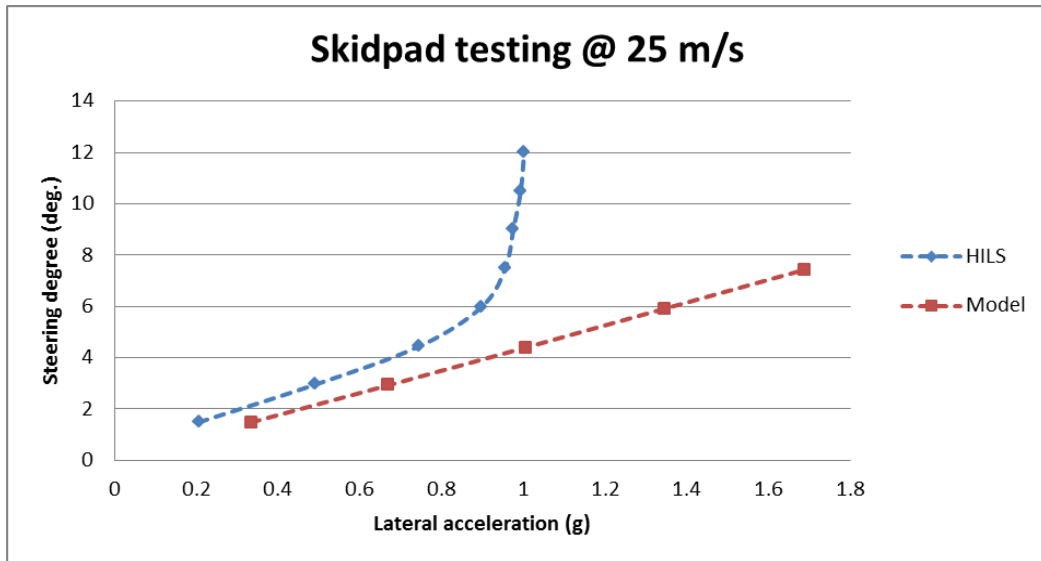
5.2.3 ผลการทดลองการเลี้ยวโค้งด้วยอัตราเร็วคงที่ (Constant speed method)



รูปที่ 5-4 พฤติกรรมการเลี้ยวโค้งของรถฟอร์มูล่านักเรียนที่ความเร็ว 15 m/s

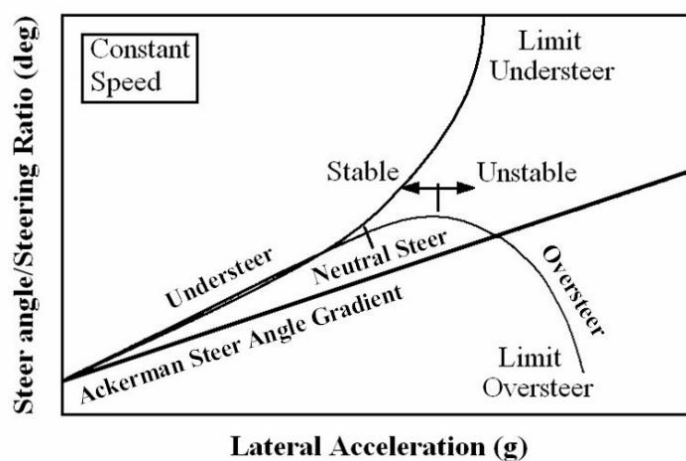


รูปที่ 5-5 พฤติกรรมการเลี้ยวโค้งของรถฟอร์มูล่านักเรียนที่ความเร็ว 20 m/s



รูปที่ 5-6 พฤติกรรมการเลี้ยวโค้งของรถฟอร์มูล่านักเรียนที่ความเร็ว 25 m/s

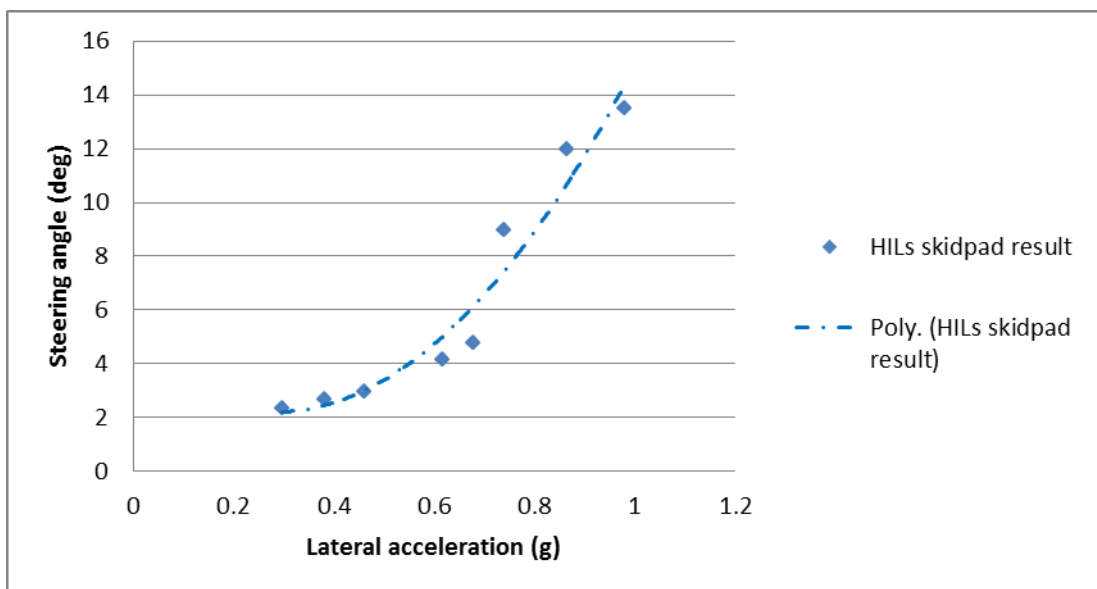
จากรูปที่ 5-4 ถึง 5-6 กราฟเส้น HILs คือกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งด้านข้าง (Lateral acceleration) กับองศาการเลี้ยว (Steering degree) จากการทดสอบด้วยชุดทดสอบ HILs ส่วนกราฟเส้น Model คือกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งด้านข้าง (Lateral acceleration) กับองศาการเลี้ยว (Steering degree) จากการคำนวณด้วยทฤษฎีภายใต้เงื่อนไขที่กล่าวไว้ในข้อกำหนดในหัวข้อ 5.2.1 ซึ่งกำหนดให้เป็นพฤติกรรมแบบพอดิโค้ง



รูปที่ 5-7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งด้านข้างและมุมเลี้ยวตามทฤษฎี

พฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับรถฟอร์มูล่านักเรียนมีลักษณะเป็นแบบด้อยโค้งเมื่อพิจารณาเทียบกับกราฟจากทฤษฎีดังรูปที่ 5-7 และเมื่อพิจารณารูปที่ 5-4 ถึง 5-6 พบว่าเมื่อรถมีความเร็วเพิ่มขึ้นรถจะเกิดอาการคือ โค้งมากขึ้น ทำให้เมื่อเข้าโค้งผู้ขับจะต้องเลี้ยวมากกว่าปกติเพื่อให้รถสามารถเลี้ยวโค้งได้ซึ่งเป็นผลดีต่อผู้ขับในกรณีที่กำลังถึงด้านความปลอดภัยเนื่องจากทิศทางรถหมุนพวงมาลัยเป็นไปในทิศทางเดียวกันตลอดการเลี้ยวโค้ง

5.2.4 ผลการทดลองการเลี้ยวโค้งด้วยรัศมีความโค้งคงที่ (Constant radius method)



รูปที่ 5-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวกับความเร่งด้านข้างในการทดลองการเลี้ยวโค้งด้วยรัศมีความโค้งคงที่

จากรูปที่ 5-8 พบว่าเมื่อความเร่งทางด้านข้างของรถในแบบจำลองสองล้อมีค่าเพิ่มขึ้นอัตราการเพิ่มของมุมเลี้ยวก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย โดยเฉพาะเมื่อความเร่งด้านข้างมีค่ามากกว่า 0.7 g และเมื่อสังเกตจากสมการเส้นแนวโน้มแบบ Polynomial กำลังสอง พบว่าค่าความชันของเส้นแนวโน้มมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร่งด้านข้างสูงขึ้นเช่นกัน นั้นหมายความว่าเมื่อคนขับต้องหมุนพวงมาลัยมากขึ้นเมื่อความเร็วของรถเพิ่มขึ้นเพื่อให้รถสามารถเข้าโค้งอยู่ในรัศมีความโค้งที่มีค่าคงที่ (10.625 m.) ได้ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากทฤษฎีในบทที่ 3.3 จะพบว่าพฤติกรรมของรถในแบบจำลองเป็นแบบด้อยโค้ง ซึ่งมีพฤติกรรมการเลี้ยวโค้งเช่นเดียวกับผลที่ได้จากการทดลองด้วยวิธีการเลี้ยวโค้งด้วยความเร็วคงที่ ในหัวข้อที่ 5.2.3 แต่ในช่วงที่ความเร่งมีค่าไม่เกิน 0.2 g นั้นไม่สามารถทดลองวิธีนี้ด้วยเครื่อง HILs

ได้ เนื่องจากความไม่เสถียรของตัวโปรแกรมควบคุมทำให้การจำลองการเคลื่อนที่ในแบบจำลองไม่สามารถเข้าสู่สถานะคงตัวได้[19] จากการทดสอบทั้งหมดนี้ทำให้ผู้สร้างรถสามารถคาดเดาแนวโน้มพฤติกรรมของรถได้ และนำมาปรับแต่งจุดยึดของระบบช่วงล่างเพื่อให้รถมีพฤติกรรมตามแบบที่ต้องการได้

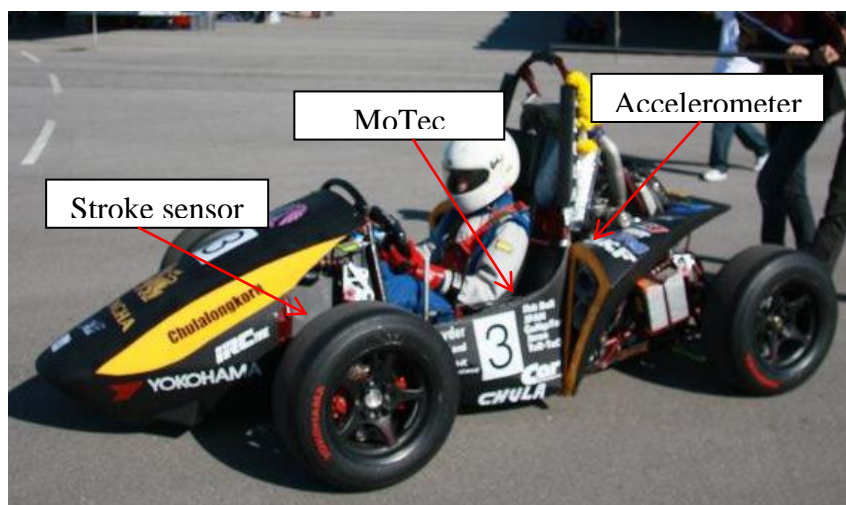
บทที่ 6

การทดสอบและผลการทดสอบด้วยรถฟอร์มูล่านักเรียน

การทดสอบในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบด้วยรถฟอร์มูล่านักเรียนคันจริงที่มีระบบล้อ ระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยว ที่เหมือนกับเครื่องทดสอบ HILs โดยจะทำการทดสอบการควบคุมของรถฟอร์มูล่านักเรียนเพื่อดูพฤติกรรมการเข้าโค้งของรถด้วยวิธีการวิ่งเป็นวงกลม (Skidpad testing) ซึ่งในหัวข้อต่อไปนี้ได้อธิบายอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ วิธีการที่ใช้ทดสอบ รวมถึงผลที่ได้จากการทดสอบ

6.1 อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบ

อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบที่ได้ทำการอธิบายในหัวข้อนี้จะเป็นอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการวัดค่าและเก็บข้อมูลซึ่งในส่วนอุปกรณ์วัดค่าจะประกอบไปด้วยตัววัดความเร่งและความหน่วงแบบ 3 แกน (3-axels accelerometer) และเครื่องมือวัดระยะกระจัด (stroke sensor) ที่ใช้วัดระยะยัดของแบริคพวงมาลัย ส่วนอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลที่วัดได้นั้นคือ กล่อง ECU ยี่ห้อ MOTEC รุ่น M400 รูปที่ 6-1 แสดงตำแหน่งการติดตั้งโดยรวมของอุปกรณ์ทั้ง 3 บนรถจริง



รูปที่ 6-1 แสดงตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าต่างๆบนรถจริง

6.1.1 ตัววัดความเร่งและความหน่วงแบบ 3 แกน

ในการทดสอบนี้ ได้ใช้ตัววัดความหน่วงและตัววัดความเร่งยี่ห้อ KISTLER รุ่น K-BEAM 8393B10 ซึ่งในที่นี้จะใช้วัดแค่ 2 แกน คือ ความเร่งตามแนวขวางของรถ (Lateral acceleration) และความเร่งตามแนวยาวของรถ (Longitudinal acceleration) (รายละเอียดของอุปกรณ์และค่าที่ได้จากการสอบเทียบได้แสดงไว้ในภาคผนวก ค. และ ง. ตามลำดับ) รูปที่ 6-2 แสดงรูปตัววัดความเร่งและความหน่วงแบบ 3 แกนที่ใช้ในการทดสอบนี้



รูปที่ 6-2 ตัววัดความเร่งและความหน่วงแบบ 3 แกน ยี่ห้อ KISTLER รุ่น K-BEAM 8393B10

6.1.2 เครื่องมือวัดระยะกระจัด

เครื่องมือวัดระยะกระจัดที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นของบริษัท GEFRAK รุ่น PZ34-S ซึ่งใช้วัดระยะการเคลื่อนที่ของเรือกวางมาลัยเพื่อใช้ค่านี้ในการสอบเทียบเป็นมุมการหมุนของล้อต่อไป (รายละเอียดของอุปกรณ์และค่าที่ได้จากการสอบเทียบได้แสดงไว้ในภาคผนวก ค. และ ง. ตามลำดับ) รูปที่ 6-3 แสดงรูปเครื่องมือวัดการกระจัดที่ใช้ในการทดสอบนี้



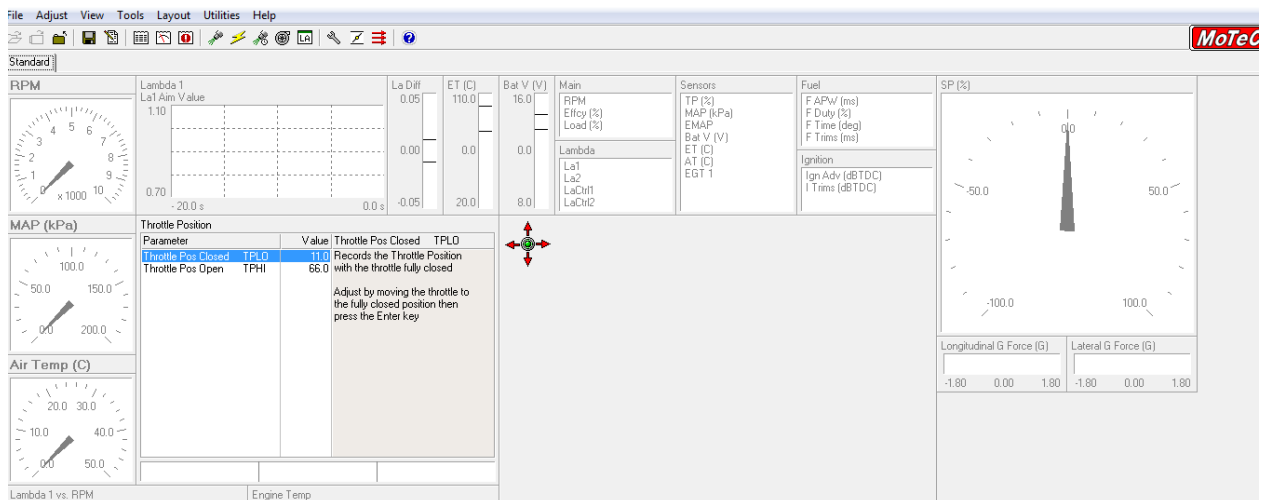
รูปที่ 6-3 เครื่องวัดระยะกระจัดของบริษัท GEFRAN รุ่น PZ34-S

6.1.3 กล้อง ECU (Electric Control Unit)

กล้อง ECU ยี่ห้อ MoTec รุ่น m400 ดังแสดงในรูปที่ 6-4 เป็นอุปกรณ์ที่สามารถป้อนคำสั่งการควบคุมเครื่องยนต์เพื่อการควบคุมการฉีดน้ำมันเชื้อเพลิงในทุกกรณี นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงและองศาการจุดระเบิดเพื่อประสิทธิภาพที่สูงสุดของเครื่องยนต์ หลักการทำงานคืออุปกรณ์ M400 จะรับข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆที่สำคัญและประมวลผลด้วยข้อมูลที่ได้จากทำการทดสอบเทียบ (calibration) และการชดเชย (compensation) ดังนั้นจึงใช้เป็นอุปกรณ์ในการเก็บค่าของค่าที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดค่าทั้ง 2 คือ ความเร่ง, หน่วง และระยะการหมุนของพวงมาลัย โดยค่าความเร่งและความหน่วงจะมีหน่วยเป็น g ส่วนระยะการหมุนของพวงมาลัยนั้นจะแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์การหมุนของพวงมาลัย โดยการแสดงค่าที่วัดได้จะต้องทำการต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อเปิดหน้าจอโปรแกรมที่แสดงข้อมูลดังรูปที่ 6-5



รูป 6-4 กล่อง ECU ยี่ห้อ MoTeC รุ่น m400



รูปที่ 6-5 การแสดงข้อมูลที่วัดได้ของกล่อง MoTeC m400 ECU ผ่านคอมพิวเตอร์

6.2 การติดตั้งอุปกรณ์บนรถจริง

เมื่อทำการศึกษาอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าและบันทึกค่าแล้ว จึงได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์เหล่านี้ลงบนรถจริงโดยตำแหน่งของการติดตั้งของอุปกรณ์แต่ละตัวนั้นต้องอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อให้ค่าที่วัดได้มีความถูกต้องและแม่นยำ โดยวิธีการและตำแหน่งการติดตั้งของอุปกรณ์แต่ละตัวบนรถสามารถแสดงได้ดังนี้

6.2.1 ตัววัดความเร่งและความหน่วงแบบ 3 แกน

การติดตั้งตัววัดความเร่งและความหน่วงบนรถจริงนั้นได้มีการทำภาชนะบรรจุตัวอุปกรณ์ดังรูปที่ 6-6 เพื่อความเป็นระเบียบและเป็นการป้องกันการกระทบกระเทือนจากสิ่งรบกวนภายนอกเนื่องจากอุปกรณ์นี้มีความไวต่อสิ่งรบกวนสูง



รูปที่ 6-6 ตัววัดความเร่งและความหน่วงพร้อมภาชนะบรรจุ

และเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำต้องติดตั้งตรงตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงโน้มถ่วงของรถ (CG.) (การหาตำแหน่งจุดศูนย์กลางแรงโน้มถ่วงของรถได้แสดงไว้ในภาคผนวก จ.2) ซึ่งพบว่าอยู่บริเวณใกล้เคียงกับด้านบนของถังน้ำมัน แต่เนื่องจากบริเวณนี้จะอยู่ใกล้กับท่อไอเสียซึ่งมีความร้อนค่อนข้างสูง จึงมีการหุ้มฉนวนเพิ่มเติมเพื่อเป็นการป้องกันความร้อนจากท่อไอเสียไม่ให้สร้างความเสียหายแก่เซนเซอร์ดังรูปที่ 6-7



รูปที่ 6-7 ตัววัดความเร่งและความหน่วงที่ได้รับการติดตั้งบนรถจริง

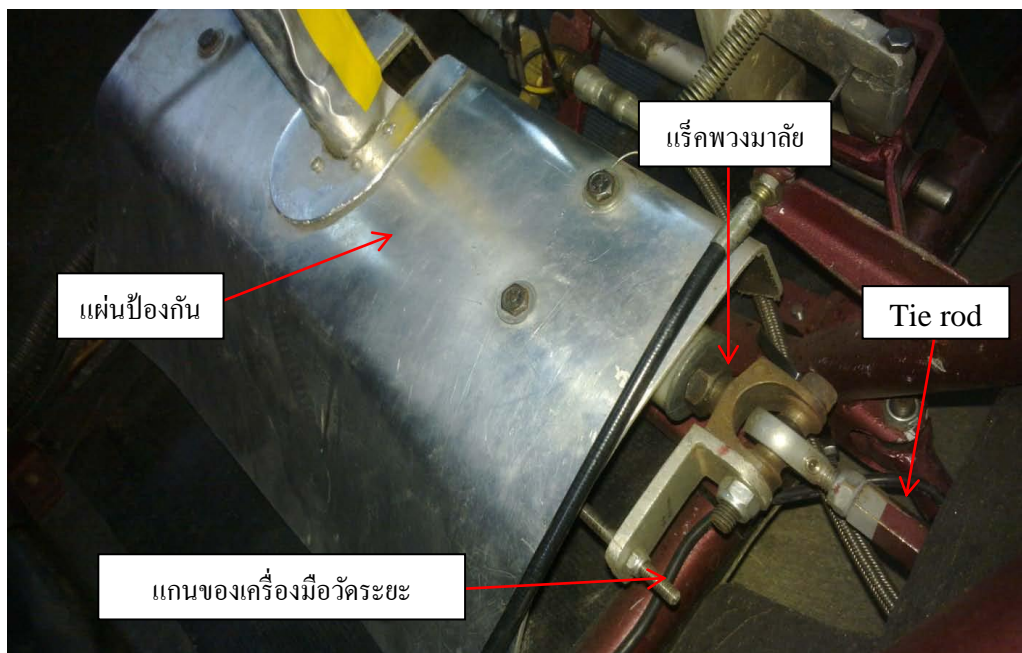
6.2.2 เครื่องมือวัดระยะกระจัด

เครื่องมือวัดระยะกระจัดในที่นี้ใช้วัดระยะเคลื่อนตัวของแร็คพวงมาลัย ดังนั้นตำแหน่งที่ติดตั้งต้องติดขนานกับแร็คพวงมาลัย โดยทั้งนี้ระยะยึดสุดและระยะยุบสุดต้องไม่เกินระยะกำหนดค่าวิกฤติที่เครื่องมือนี้กำหนดมา การติดตั้งทำโดยการยึดตัวเครื่องมือเข้ากับแร็คพวงมาลัยโดยใช้ Bolt M6 x 25 ก่อนขันแน่นให้วัดระดับน้ำเทียบกับตัวแร็คพวงมาลัยก่อนเพื่อให้ได้ระดับเดียวกัน จากนั้นใช้ไม้ฉากวัดระยะห่างจากตัวแร็คกับตัวเครื่องมือวัดระยะกระจัดทั้งสามจุด คือที่ปลายสองข้างและตรงกลางที่เป็นจุดยึด เมื่อได้ระดับทั้งสองแนวแล้วจึงขันแน่นดังรูปที่ 6-8 ขึ้นต่อมาก็คือ ดิ่งของเครื่องมือวัดระยะกระจัดออกมาให้อยู่ตำแหน่งเดียวกับปลายแร็คพวงมาลัยแล้วทำการยึดติดกับปลายแร็คพวงมาลัยหรืออุปกรณ์ที่เคลื่อนที่ไปพร้อมกับตัวแร็คซึ่งในที่นี้ได้ติดตั้งเข้ากับจุดยึดระหว่างปลายแร็คพวงมาลัยกับการคันชัก-ส่ง(tie rod) การติดตั้งในส่วนนี้ต้องวัดระดับน้ำที่ตัวจุดยึดอีกรอบ เพื่อเป็นการตรวจสอบว่าเซนเซอร์และตัว rack & pinion อยู่ในแนวเดียวกันจริงๆ มิฉะนั้นอาจก่อให้เกิดความเสียหายกับตัวเซนเซอร์ได้ขณะใช้งานจริง เมื่อติดตั้งเครื่องมือวัดระยะกระจัดเสร็จสมบูรณ์จนสามารถใช้งานได้ตามเป้าประสงค์แล้ว ต้องมีการติดตั้งตัวป้องกันด้วย เนื่องจากตัวเครื่องมือนี้มีราคาแพงมาก และติดตั้งอยู่บริเวณเท้าของนักขับ หากไม่มีชิ้นส่วนใดมาป้องกัน เท้านักขับอาจมากระแทกและสร้างความเสียหายให้กับเครื่องมือนี้ได้ โดยการตัดแผ่น

อะลูมิเนียมหนา 2 มิลลิเมตร ให้เป็นรูปทรงที่ต้องการจากนั้นจึงทำการตัดโค้งเพื่อให้กลมตัว
เครื่องมือและทำการยึดเข้ากับประกับเรีคพวงมาลัยทั้ง 2 ข้างดังรูปที่ 6-9



รูปที่ 6-8 การติดตั้งเครื่องมือวัดการกระจัดเข้ากับเรีคพวงมาลัย



รูปที่ 6-9 การติดตั้งเครื่องมือวัดการกระจัดของเรีคพวงมาลัยและแผ่นป้องกันที่เสร็จสมบูรณ์

6.2.3 กล่อง ECU (Electric Control Unit)

ตำแหน่งในการติดตั้งกล่อง MoTec m400 ECU นั้น ไม่ได้มีความซับซ้อนเหมือนดังอุปกรณ์ 2 ตัวข้างต้น เนื่องจากเป็นเพียงอุปกรณ์ในการเก็บข้อมูลสำหรับการทดสอบนี้ ดังนั้นตำแหน่งในการติดตั้งจึงเลือกติดตั้งในห้องคนขับบริเวณหลังเบาะคนขับ เนื่องจากห่างจากความร้อนของเครื่องยนต์ และสามารถทำการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ด้วยสาย USB ได้ง่ายจากบริเวณนี้ดังรูปที่ 6-10

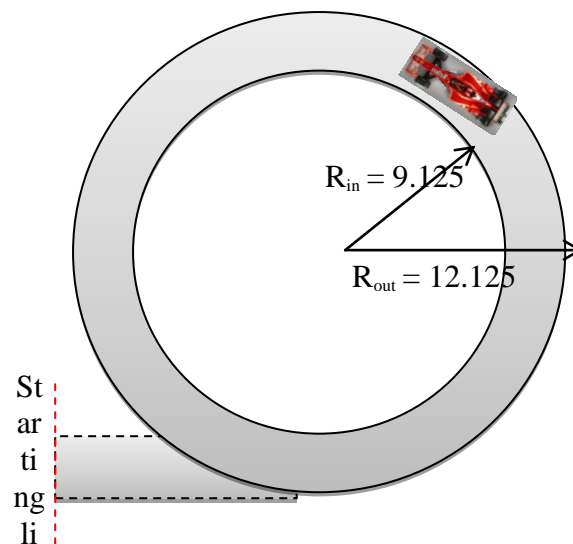


รูปที่ 6-10 ตำแหน่งการติดตั้งกล่อง ECU ยี่ห้อ MoTec รุ่น m400

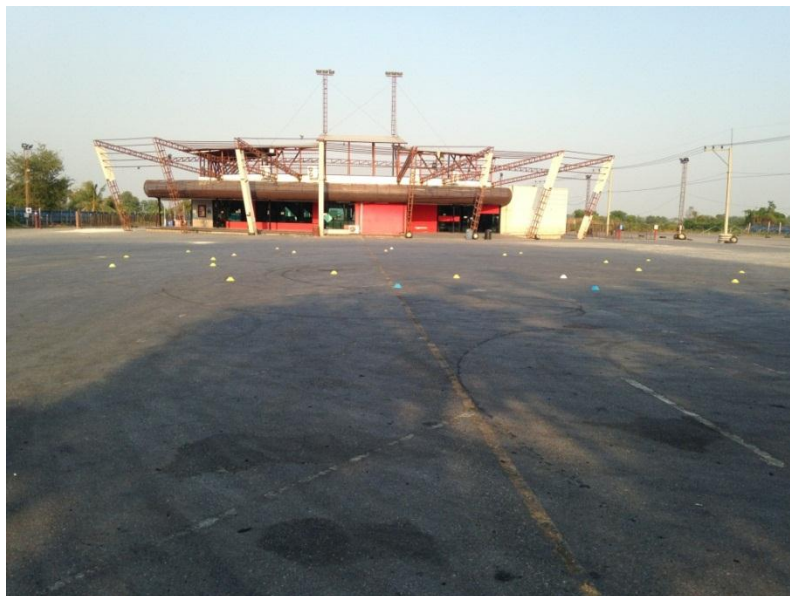
6.3 วิธีการทดสอบ

การทดสอบการควบคุมของรถฟอร์มูล่านักเรียนในที่นี้ ได้ใช้การทดสอบแบบการวิ่งเป็นวงกลม โดยใช้วิธีการขับแบบรัศมีคงที่ตามเหตุผลที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 5.2.3 โดยสถานที่ที่ใช้ในการทดสอบในครั้งนี้คือ บริเวณลานจอดรถของสนาม Bangkok Drag Avenue ซึ่งมีพื้นผิวที่ทำจากยางมะตอย โดยได้ทำการตั้งกรวยเป็นวงกลมขนาดรัศมีวงใน 9.125 ม. และรัศมีวงนอก 12.125 ม. ($R = 10.625$ ม.) ซึ่งเป็นขนาดของสนามที่ใช้ในการแข่งขันจริงสำหรับรถฟอร์มูล่านักเรียนดังรูปที่ 6-11 โดยรูปที่ 6-12 แสดงรูปของสนามทดสอบจริง ในการทดสอบค่าลมยางที่ใช้นั้นมีค่า 25 psi ซึ่งเท่ากับตอนที่ทดลองด้วยเครื่อง HILs มีวิธีการทดลองดังนี้

1. ตั้งกรวยให้ได้รัศมีวงนอก 12.125 ม. และรัศมีวงใน 9.125 ม. และใช้ชอล์กขีดที่ฐานกรวยเพื่อเป็นการกำหนดตำแหน่ง
2. คนขับขับรถเข้าไปจอดในตำแหน่งปากทางเข้าวงกลมโดยจอดให้รถหยุดนิ่ง
3. เร่งความเร็วอย่างช้าๆ ด้วยความเร่งคงที่จากจุดหยุดนิ่ง ขับเป็นวงกลมระหว่างกรวยด้านในและกรวยด้านนอกดังรูปที่ 6-13 จนกระทั่งถึงความเร็วที่รถไม่สามารถเลี้ยวได้ภายในวงกลมจึงหยุดการทดสอบ



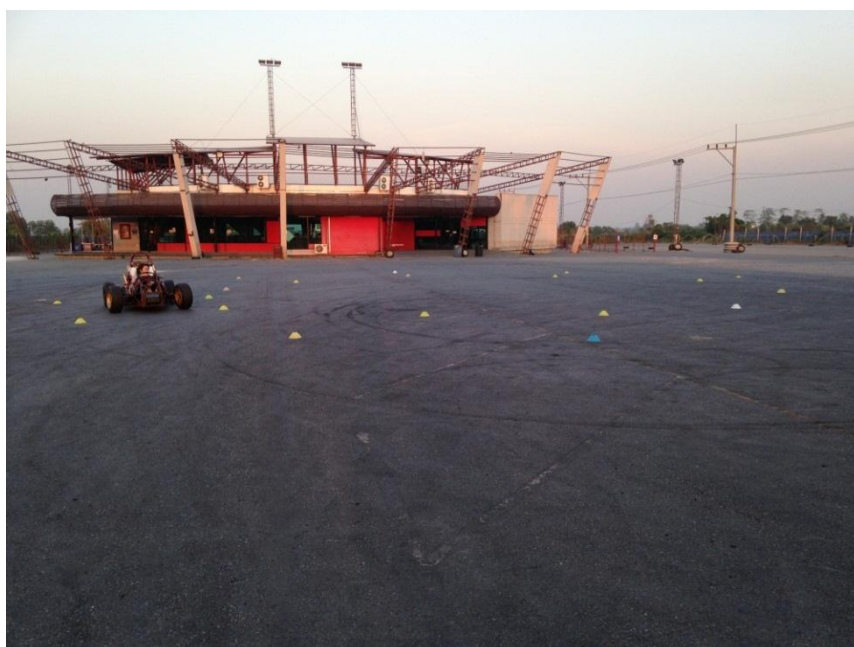
รูปที่ 6-11 Diagram ของสนามทดสอบแบบ skidpad แบบรัศมีความโค้งคงที่



รูปที่ 6-12 สนามที่ใช้ทำการทดสอบจริงสำหรับการวิ่งเป็นวงกลม

4. เริ่มทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 จนสามารถเก็บข้อมูลได้ครบ 3 ครั้ง เป็นอันเสร็จสิ้น

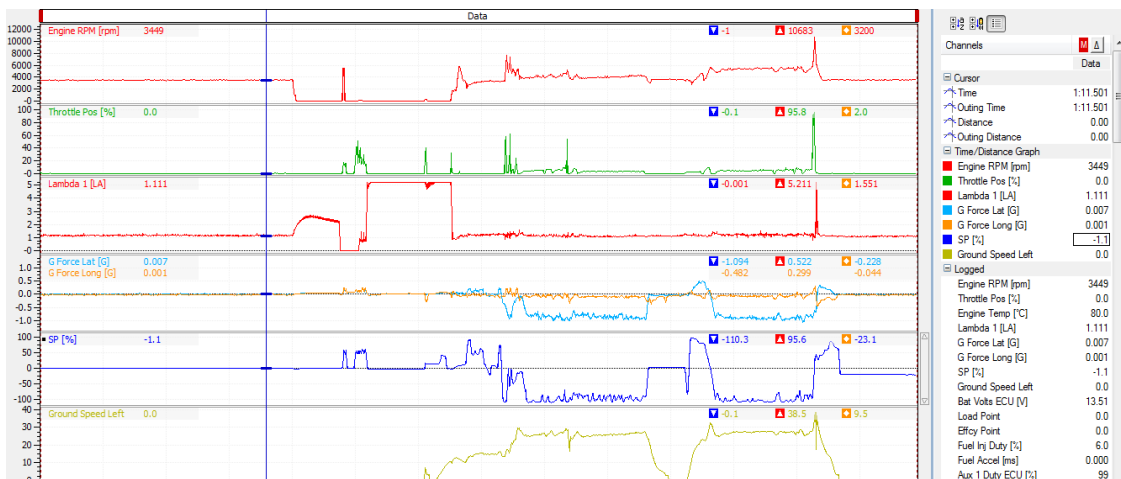
5. เก็บข้อมูลการทดสอบจากกล่อง MOTEC M400 ECU ด้วยคอมพิวเตอร์



รูปที่ 6-13 การทดสอบการวิ่งเป็นวงกลมด้วยรถฟอร์มูล่านักเรียน

6.4 ผลการทดสอบ

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแบบการวิ่งเป็นวงกลมด้วยรถจริงนั้น จะถูกเก็บเป็นไฟล์ข้อมูลในกล่อง MOTEC และจะสามารถแสดงค่าเป็นกราฟได้ด้วยโปรแกรม MoTec i2 standard 1.0 บนคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะมีลักษณะข้อมูลดังรูปที่ 6-14 ซึ่งสามารถแสดงค่าเหล่านี้ให้อยู่ในรูปของค่าตัวเลขบนโปรแกรม Microsoft Excel ได้ (ค่าที่ได้จากการทดสอบแต่ละชุดทั้งจากโปรแกรม MoTec i2 และ Microsoft Excel จะถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ข.)



รูปที่ 6-14 ข้อมูลการทดสอบที่แสดงผลด้วยโปรแกรม MoTec i2 standard 1.0

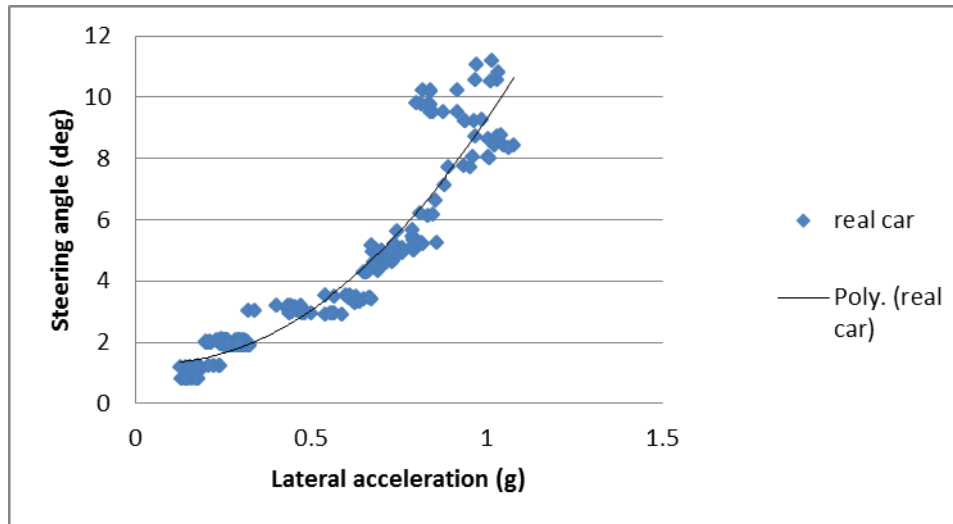
จากรูป 6-14 ข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์การควบคุมของรถในการทดสอบนี้คือ ความเร่งด้านข้างของตัวรถ(G force lat เส้นสีฟ้า) และเปอร์เซ็นต์การหมุนของพวงมาลัย (SP% เส้นสีน้ำเงิน) ซึ่งจะนำไปใช้เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งตามแนวขวางของรถกับมุมเลี้ยวที่ล้อ ดังนั้นจึงต้องมีการหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การหมุนของพวงมาลัยและมุมเลี้ยวที่ล้อซึ่งสามารถหามาได้ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นดังนี้(วิธีการหาค่าความสัมพันธ์แสดงไว้ในภาคผนวก ง.2)

$$wh = 0.1776 (SP\%) + 0.0763 \quad (6-1)$$

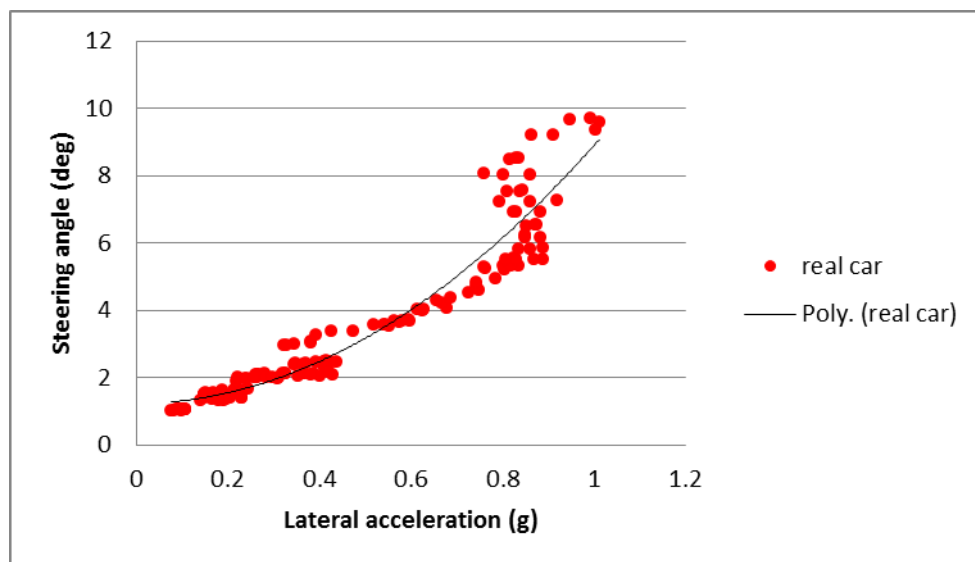
โดย wh คือ มุมเลี้ยวที่ล้อ

SP% คือ เปอร์เซ็นต์การหมุนของพวงมาลัย

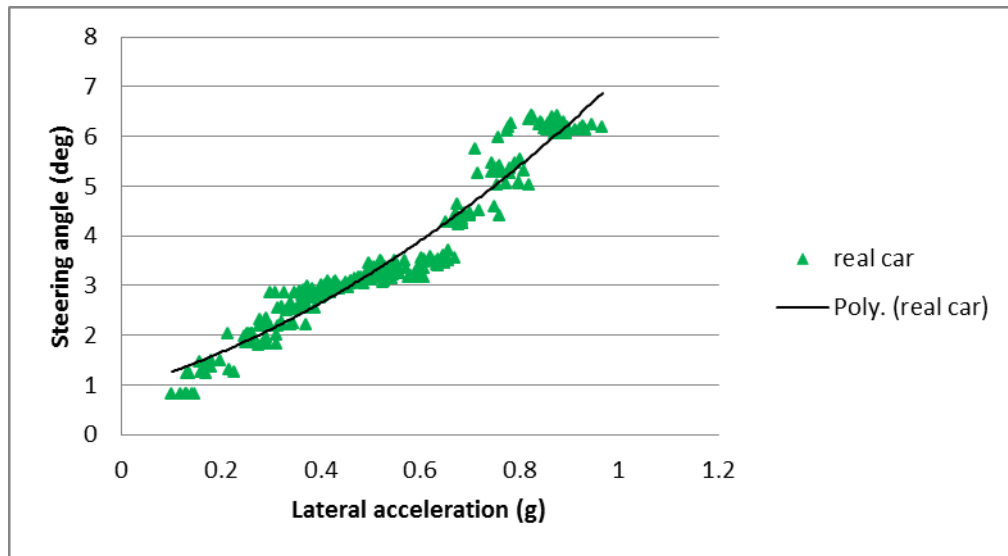
ซึ่งค่าความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวของล้อกับความเร่งด้านข้างในแต่ละครั้งการทดสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6-15 ถึง 6-17



รูปที่ 6-15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวของล้อกับความเร่งด้านข้างในการทดสอบวิ่งเป็นวงกลมครั้งที่ 1

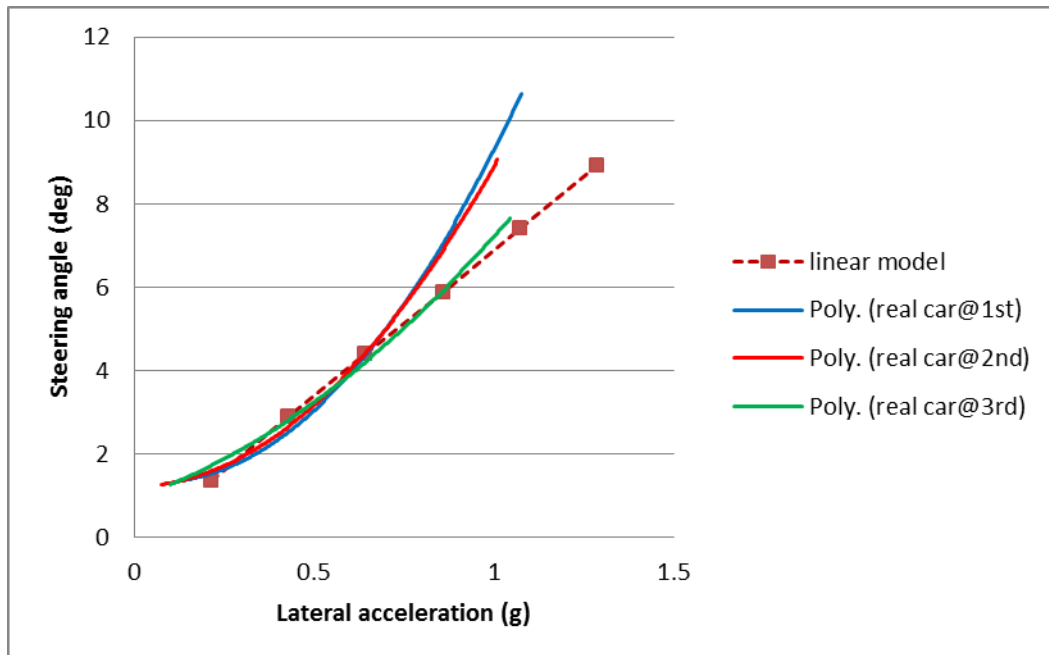


รูปที่ 6-16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวของล้อกับความเร่งด้านข้างในการทดสอบวิ่งเป็นวงกลมครั้งที่ 2



รูปที่ 6-17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวของล้อกับความเร่งด้านข้างในการทดสอบวิ่งเป็นวงกลมครั้งที่ 3

จากกราฟแสดงผลการทดลองทั้ง 3 ได้มีการสร้างเส้นสมการแนวโน้มที่ลากผ่านจุดที่แสดงผลการทดลองแบบ Polynomial กำลัง 2 เนื่องจากสามารถนำลักษณะของเส้นแนวโน้มนี้ไปเปรียบเทียบกับกับกราฟที่ได้จากทางทฤษฎีได้อย่างเหมาะสม และจากการทดลองพบว่าอัตราการเพิ่มของมุมล้อมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร่งด้านข้างมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยเมื่อพิจารณาจากสมการเส้นแนวโน้มแบบ Polynomial กำลัง 2 พบว่า อัตราการเพิ่มของความชันของเส้นสมการมีค่าเพิ่มขึ้น นั่นหมายความว่าเมื่อรถเลี้ยวโค้งด้วยความเร่งด้านข้างที่มากขึ้นหรือมีการเพิ่มความเร็วขณะเข้าโค้ง ผู้ขับต้องหมุนพวงมาลัยเพิ่มขึ้นเพื่อให้รถอยู่บนเส้นทาง ซึ่งนั่นเป็นพฤติกรรมรถเข้าโค้งแบบดื้อโค้ง



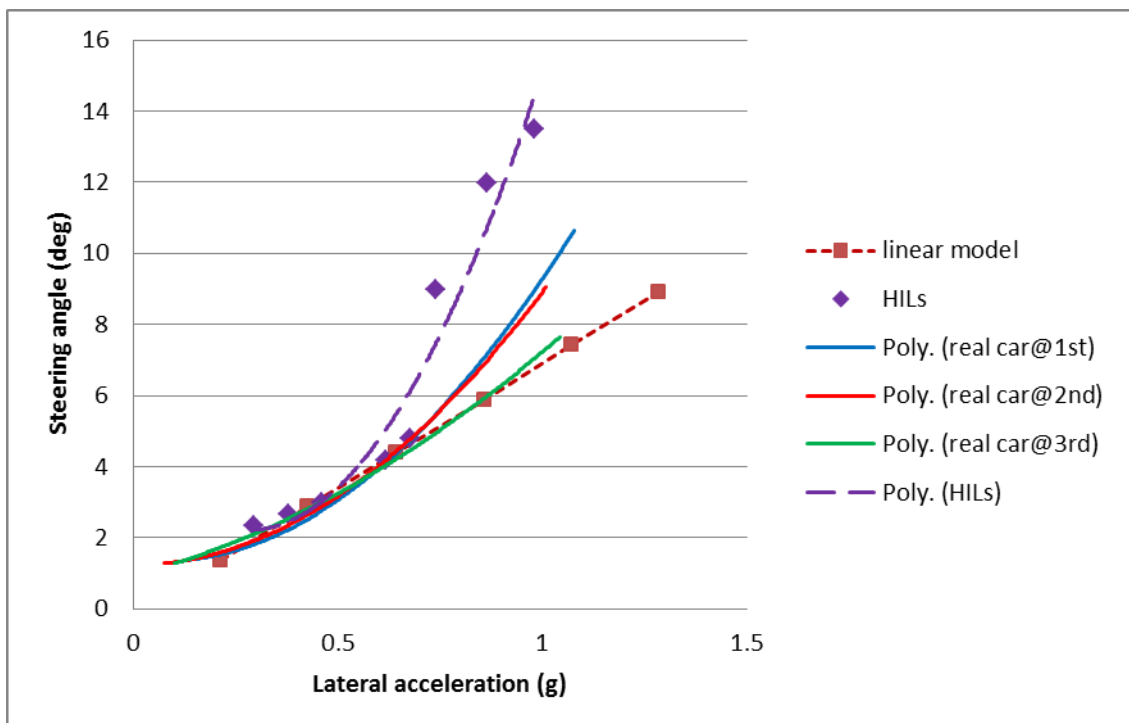
รูปที่ 6-18 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งด้านข้างกับมุมเลี้ยวล้อที่ได้จากการทดสอบด้วยรถจริงและสมการเส้นตรงที่แสดงถึงพฤติกรรมพอดี้โค้ง

และเมื่อนำสมการเชิงเส้นแนวโน้มนิยมแบบ Polynomial กำลัง 2 ของการทดลองทั้ง 3 ครั้งมาพล็อตเปรียบเทียบกับสมการเส้นตรงที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง HILs ที่แสดงพฤติกรรมของการเข้าโค้งแบบพอดี้โค้ง ดังรูปที่ 6-18 พบว่าในการทดลองครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 นั้น พฤติกรรมของรถขณะเข้าโค้งเป็นแบบค้ำโค้งก่อนข้างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากทางทฤษฎี (รูปที่ 5-7) ส่วนกราฟที่ได้จากการทดลองครั้งที่ 3 นั้นค่อนข้างจะมีค่าตรงกับสมการเส้นตรงนั้นแสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมการเข้าโค้งของรถในการทดสอบครั้งที่ 3 นั้นเป็นแบบพอดี้โค้ง ซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิของยางที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากยางที่ใช้ทดสอบนั้นเป็นแบบยางหน้าเรียบ(Slick tire) ซึ่งจะยึดเกาะได้ดีที่อุณหภูมิที่เหมาะสมซึ่งในที่นี้จะมีค่าสูงกว่ายางที่ใช้ในรถทั่วไป ถึงแม้ว่าก่อนทำการทดสอบในครั้งแรกได้มีการเพิ่มอุณหภูมิของยางด้วยการเร่งและเลี้ยวแต่อาจไม่เพียงพอ และเมื่อทำการทดสอบแบบต่อเนื่องจึงทำให้อุณหภูมิของยางเพิ่มขึ้น ทำให้ความสามารถในการยึดเกาะถนนของยางเพิ่มขึ้นและรถสามารถเลี้ยวเข้าโค้งได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ 2 ครั้งแรก

บทที่ 7

การเปรียบเทียบผลที่ได้จากเครื่อง HILS กับผลที่ได้จากรถฟอร์มูล่านักเรียน

เมื่อได้ผลการทดสอบแบบการวิ่งเป็นวงกลมจากทั้งของเครื่อง HILs และจากการทดสอบด้วยรถจริงด้วยวิธีการเลี้ยวโค้งแบบรัศมีคงที่แล้ว จึงนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกันพร้อมด้วยผลที่ได้จากการสร้างสมการแบบพหุคูณกำลัง เพื่อเป็นการสอบเทียบเครื่องมือวัดแบบ HILs ซึ่งผลการเปรียบเทียบแสดงได้ดังรูปที่ 7-1 โดยค่าที่ได้จากการทดสอบรถจริงจะเป็นในรูปของเส้นแนวโน้มแบบสมการเชิงเส้น Polynomial กำลัง 2 ส่วนค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง HILs และสมการเส้นตรงนั้นเป็นค่าที่ได้จากการทดสอบจริงโดยค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง HILs นั้นได้มีการสร้างสมการเชิงเส้นแนวโน้มแบบ Polynomial กำลัง 2 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบพฤติกรรมของการเลี้ยวโค้งไว้ด้วยเช่นกัน



รูปที่ 7-1 กราฟเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งด้านข้างกับมุมเลี้ยวของล้อที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง HILs และรถจริง

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกราฟที่ได้จากการทดสอบจริงกับกราฟสมการเส้นตรงที่แสดงถึงพฤติกรรมการเข้าโค้งแบบพอดีโค้งพบว่าจริงมีพฤติกรรมการเข้าโค้งแบบดีโค้งเมื่อเปรียบเทียบกราฟทั้งสองกับกราฟที่ได้จากทางทฤษฎี (รูปที่ 5-13) และเมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างกราฟเส้นแนวโน้มที่ได้จากการทดสอบจริงกับกราฟเส้นแนวโน้มที่ได้จากการทดสอบเครื่อง HILs พบว่ากราฟที่ได้จากการทดสอบจริงทั้ง 3 ครั้ง มีค่าใกล้เคียงกับกราฟที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง HILs เป็นอย่างมากในช่วงความเร่งไม่เกิน 0.6 g แต่หลังจากนั้นจะมีค่าต่างกันโดยเนื่องมาจากหลายปัจจัยซึ่งได้ทำการวิเคราะห์ในหัวข้อถัดไป แต่จากกราฟที่ได้จากการทดสอบจริงและการทดสอบด้วยเครื่อง HILs ทำให้ทราบว่าระบบล้อ ระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยวที่ได้ทดสอบในครั้งนี้ทำให้พฤติกรรมของรถขณะเข้าโค้งเป็นแบบดีโค้ง และการทดสอบด้วยเครื่อง HILs สามารถทำนายได้ใกล้เคียงอย่างมากในช่วงความเร่งไม่เกิน 0.6 g ซึ่งทำให้เราสามารถปรับแต่งระบบช่วงล่างได้ตามความเหมาะสมก่อนที่จะทำการประกอบเข้ากับรถจริง

บทที่ 8

บทสรุป

8.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการพัฒนาและปรับปรุงเครื่องทดสอบแบบ Hardware-In-The-Loop simulator (HILs) ที่ใช้สำหรับทดสอบระบบล้อ ระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยวของยานยนต์ขนาดเล็ก (Nissan Sunny B10) ให้สามารถใช้ได้กับระบบล้อ ระบบรองรับและระบบบังคับเลี้ยวของรถฟอร์มูล่านักเรียนเพื่อใช้ทดสอบการควบคุมด้วยวิธีการตรวจวัดแรงที่เกิดกระทำต่อล้อ โดยหลักการพื้นฐานของชุดทดสอบ HILs คือ การใช้อุปกรณ์จริงทดสอบร่วมกับแบบจำลองคณิตศาสตร์ ซึ่งในที่นี้ก็คือระบบล้อ ระบบรองรับและระบบและระบบบังคับเลี้ยวของรถฟอร์มูล่านักเรียน โดยให้วิ่งอยู่บนล้อจำลองพื้นถนนซึ่งสามารถควบคุมอัตราเร็วเชิงมุมและตำแหน่งการวางตัวได้ ในขณะที่มุมเลี้ยวของล้อทดสอบนั้นสามารถปรับเลี้ยวให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่ต้องการ และเมื่อสั่งล้อทดสอบเลี้ยวจะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างระนาบการหมุนของล้อทดสอบและล้อจำลองพื้นถนน ซึ่งความแตกต่างนี้คือ มุมไถล ซึ่งทำให้เกิดแรงต้านข้างกระทำต่อล้อทดสอบ ซึ่งแรงนี้จะมีค่าต่างกันขึ้นอยู่กับมุมไถลและคุณสมบัติของยาง โดยแรงที่เกิดขึ้นจะถูกวัดค่าด้วยอุปกรณ์วัดแรงแบบไม่หมุนตามที่ติดตั้งอยู่บริเวณกึ่งกลางของล้อทดสอบและจะถูกส่งไปคำนวณในแบบจำลองสองล้อที่ถูกสร้างด้วยโปรแกรม NI LabVIEW[®] เพื่อคำนวณลักษณะการเคลื่อนที่ของรถ จากนั้นจะส่งผลการคำนวณกลับไปควบคุมการวางตัวของล้อจำลองพื้นถนนเพื่อสร้างมุมไถลที่ต้องการ ซึ่งจะส่งผลให้การเคลื่อนรถนั้นเป็นไปอย่างถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยการควบคุมการทำงานของชุดทดสอบ HILs นี้ ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ประมวลผล 3 ชุด คือ คอมพิวเตอร์ notebook ที่ใช้ในการสื่อสารกับผู้ใช้งาน, NI PXI Controller ใช้สำหรับการตรวจวัดแรงรวมถึงเก็บข้อมูลการทดสอบ และ NI CompactRIO ซึ่งใช้ในการประมวลคำสั่งเพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์ต่างๆในชุดทดสอบ HILs ซึ่งโปรแกรมทั้งหมดที่ใช้ในการควบคุมจะพัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม NI LabVIEW[®]

การพัฒนาและปรับปรุงเครื่องทดสอบ HILs ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเกี่ยวข้องทั้งในส่วนโครงสร้างของเครื่องทดสอบและระบบควบคุมชุดทดสอบ HILs โดยในส่วนของโครงสร้างชุดทดสอบนั้น ได้มีการปรับปรุงในส่วนของจุดยึดระบบรองรับเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพจากแบบแม่เหล็กเฟอร์รัสที่ใช้ในยานยนต์ขนาดเล็กมาเป็นแบบปีกนกสองชั้นที่ใช้ในรถแข่งฟอร์มูล่านักเรียนและต้องทำการติดตั้งอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับระบบรองรับให้ได้ตำแหน่งเดียวกันกับที่ได้รับการติดตั้งบนรถคันจริง อันประกอบไปด้วย ก้านกระทู้ กระเดื่องมุมฉากและตัวหน่วงการสั่นสะเทือน นอกจากนี้ในส่วนของล้อทดสอบนั้นต้องมีการดัดแปลงระยะเหลื่อมของล้อเพื่อให้สามารถติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงตรงตำแหน่งกึ่งกลางล้อได้ ในส่วนของระบบควบคุมชุดทดสอบ HILs นั้นได้มีการปรับปรุงโปรแกรมการอ่านค่าพัลส์ของเอนโคเดอร์จาก I16 เป็น I32 เนื่องจากโปรแกรมเดิมไม่สามารถอ่านค่าได้ถูกต้องนัก และได้มีการปรับปรุงในส่วนของโปรแกรมควบคุมที่ถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรม NI LabVIEW[®] โดยลดความซับซ้อนของโปรแกรมลง ตั้งค่ากรอบของเวลาใหม่ให้มีความเหมาะสมกับการประมวลผล รวมทั้งแยกการประมวลผลของแต่ละส่วนให้เป็นสัดส่วนมากขึ้น เพื่อป้องกันความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการประมวลผล

การทดสอบด้วยเครื่อง HILs ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 การทดลองใหญ่ นั่นก็คือ การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านข้างของยาง และการทดสอบลักษณะการเลี้ยวโค้งเพื่อศึกษาพฤติกรรมของรถ (Skidpad testing) โดยการทดสอบแรกนั้นได้ทำการทดสอบที่อัตราเร็วเชิงมุมค่าต่างๆ (0.8 rev/s , 1.25 rev/s, 1.8rev/s และ 2.2 rev/s) ส่วนในการทดสอบหลังนั้นได้มีการใช้แบบจำลองสองล้อที่ใช้พารามิเตอร์จริงของรถซึ่งต้องทำการวัดให้เรียบร้อยก่อนทำการทดลอง โดยทำให้แบบจำลองสองล้อมีผลทำให้พฤติกรรมของรถเป็นแบบพอดี้โค้ง โดยสามารถแบ่งการทดลองในหัวข้อนี้ออกเป็นอีก 2 การทดลองคือ การทดลองเลี้ยวโค้งด้วยอัตราเร็วคงที่และการทดลองเลี้ยวโค้งด้วยรัศมีคงที่ โดยการทดลองการเลี้ยวโค้งด้วยอัตราเร็วคงที่ทำการทดสอบที่ความเร็วรถในแบบจำลองต่างกัน 3 ค่า (15 m/s, 20 m/s และ 25 m/s) ส่วนการทดลองการเลี้ยวโค้งด้วยรัศมีคงที่นั้นใช้วิธีการหาค่ามุมเลี้ยวที่มีความสัมพันธ์กันกับความเร่งที่เกิดขึ้นบนรถจริง ซึ่งจากการทดลองทั้ง 2 การทดลองพบว่า

1. ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านข้างของล้อทดสอบมีค่า 242.157 นิวตัน/องศา (13,874.6 นิวตัน/เรเดียน) โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านข้างกับมุมไถลเป็นเชิงเส้นในช่วงมุมไถล -5 ถึง 5 องศาและอัตราเร็วเชิงมุมของล้อทดสอบที่เปลี่ยนไปไม่ส่งผลกระทบต่อแรงต้านข้างที่มุมไถลค่าต่างๆ

2. การทดสอบการเลี้ยวโค้งเพื่อดูพฤติกรรมของรถพบว่าระบบล้อ ระบบบังคับเลี้ยวและระบบรองรับ ของรถฟอร์มูล่านักเรียนด้วยเครื่องทดสอบ HILs จะมีพฤติกรรมคือ โค้งมากกว่าผลที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองสองล้อเพียงอย่างเดียว และจะมีพฤติกรรมที่คือ โค้งมากขึ้นเมื่อความเร่งด้านข้างมีค่าเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ยังได้มีการทดสอบรถฟอร์มูล่านักเรียนคันจริงด้วยการวิ่งเป็นวงกลมด้วยรัศมี 10.625 ม. ซึ่งเป็นรัศมีเดียวกับสนามที่ใช้ในการแข่งขันเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเข้าโค้งของรถและนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง HILs ด้วยวิธีเบรครัศมีคงที่ ซึ่งพบว่าพฤติกรรมของรถเป็นแบบคือ โค้งและจะมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อความเร่งด้านข้างเพิ่มขึ้น และในช่วงความเร่งด้านข้างมีค่าไม่เกิน 0.6 g ความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งด้านข้างและมุมเลี้ยวที่ได้จากการทดสอบทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นอุปกรณ์การทดสอบแบบ HILs สามารถทำนายพฤติกรรมของรถจริงได้ในช่วงที่ความเร่งด้านข้างยังไม่สูงมากนัก ทำให้สามารถปรับแต่งระบบช่วงล่างให้มีความเหมาะสมก่อนที่ถูกลำไปติดตั้งเข้ากับรถคันจริงทำให้ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายในกระบวนการออกแบบได้ในอนาคต

8.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้การทำนายพฤติกรรมการเข้าโค้งของรถเป็นไปได้ถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของล้อจำลองพื้นถนนควรมีค่าใกล้เคียงกับพื้นผิวที่ได้ทำการทดสอบกับรถคันจริง อีกทั้งในส่วนของแหล่งจ่ายไฟให้มอเตอร์ควบคุมอัตราเร็วเชิงมุมของล้อทดสอบที่ให้พลังงานได้ในระยะเวลาไม่นานนัก ทำให้ต้องเสียเวลาในการประจุไฟใหม่อยู่บ่อยครั้ง และสำหรับผู้ที่จะทำวิจัยในอนาคตควรศึกษาผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านข้างที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่ามุมล้อต่างๆ เพิ่มเติมเช่น มุมแคสเตอร์ , มุมโท , มุมแคมเบอร์ เป็นต้น

8.3 การเผยแพร่ผลงานการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้รับการตีพิมพ์ในหนังสือรวบรวมบทความการประชุมระดับนานาชาติ 1

บทความ

ชื่อบทความ : DEVELOPMENT OF TIRE-SUSPENSION-STEERING HARDWARE IN
THE LOOP SIMULATOR FOR STUDENT FORMULA CAR HANDLING
TESTING.

ชื่อการประชุม : The 17th Asia Pacific Automotive Engineering Conference

วันที่ 1-4 เมษายน พุทธศักราช 2556 กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย

รายการอ้างอิง

- [1] Sung-Ho Hwang, Seung-Jin Heo, Hong-Seok Kim, Kyo-Il Lee. Vehicle Dynamic Analysis and Evaluation of Continuously Controlled Semi-Active Suspensions Using Hardware-in-the-loop Simulation. *Vehicle System Dynamics*, Vol. 27, No. 5-6, : 423-434, June 1997.
- [2] Wojciech Grega, Krakow, Al.Mickiewiczza. HIL simulation and its application in control education. *Frontiers in Education Conference*, Vol. 2, Issue,: 12B6/7 - 12B612, 1999.
- [3] Hyun-Chul Sohn , Keum-Shik Hong, and J.Karl Hedrick. Semi-Active Control of the Macpherson Suspension System : HIL Simulations. Control Applications, 2000. *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference*: 982-987.
- [4] Ergin Tonuk and Y. Samim Unlusoy. Prediction of automobile tire cornering force characteristics by finite element modeling and analysis. *Computers & Structures*, Volume 79, Issue 13,: 1219-1232, May 2001.
- [5] Michael Short , Michael J. Pont , Qiang Huang., Simulation of Vehicle Longitudinal Dynamics, Embedded Systems Laboratory University pf Leicester. *Technical Report ESL 04-01*, ESL04-01A – 11Octorber 2004.
- [6] Felix Pfister, Clemeus Reitze, Alexander Schmidt. Hardware in the loop - The technologie of development and test of vehicle control system. *IPG Automotive Engineering Software + Consulting Pmbh*, Karlsruhe (2002).

- [7] Olaf Gietelink, Jeroen Ploeg, Bart De Schutter and Michel Verhaegen. VEHIL: Test facility for fault management testing of advanced driver assistance systems. *Proceedings of the 10th ITS World Congress*, Paper 2693, Madrid, Spain, November 2003.
- [8] W. E. Misselhorn, N. J. Theron, and P. S. Els. Investigation of hardware-in-the-loop for use in suspension development. *Vehicle System Dynamics*, 44 (1): 65-81, January 2006.
- [9] Hosam K. Fathy, Zoran S. Filipi, Jonathan Hagena and Jeffrey L. Stein. Review of Hardware-in-the-Loop Simulation and Its Prospects in the Automotive Area. *Proc. of SPIE* Vol. 6228, 2006
- [10] นักสิทธิ์ นุ่มวงษ์ และ ศุภวุฒิ จันทรานุกวัฒน์ Improvement of Driving Simulator Prototype. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21, 17-19 ตุลาคม 2550.
- [11] Val Mills, Bernard Samuel, John Wagner. Modeling and Analysis of Automotive Antilock Brake Systems Subject to Vehicle Payload Shifting. *Vehicle System Dynamics*, 37:4, 428-310.
- [12] Q. Zhang, J. F. Reid, D. Wu. Hardware-In-The-Loop Simulator of an off-road vehicle Electrohydraulic steering system. *ASAE Paper No. 98-3115* : 1223-1230, September 2001.

- [13] A. Bertacchini, L. Tamagnini and P. Pavan. Force Feedback in Steer-by-Wire Systems : Architecture and Experimental Results. *IEEE ISIE* , July 2006.
- [14] Kunsoo Huh , Chanwon Seo, Joonyoung Kim and Daegun Hong , Active Steering Control Based on The Estimated Tire Forces. *Proceedings of the American Control Conference* San Diego, California, June 1999.
- [15] Darcy Bullock , Brian Johnson , Richard B. Wells , Michael Kyte and Zhen Li. Hardware-in-the-loop simulation. *Transportation Research Part C* 12 :73- 89 , October 2002.
- [16] P. Stewart, D. A. Stone and P. J. Fleming. Design of robust fuzzy-logic control systems by multi -objective evolutionary methods with hardware in the loop. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Volume 17(2004): 275-284.
- [17] P.T. Faithfull,R.J. Ball, R.P. Jones. An investigation into the use of hardware-in-the-loop simulation with a scaled Physical prototype as aid to design. *Journal of Engineering Design*, 12:3, 231-243.
- [18] N. Noomwongs, H. Yoshida, M. Nagai, K. Kobayashi, T. Yokoi. Study on Handling by Using Tire Hardware-In-the-Loop Simulator. *Japanese Society of Automotive Engineers, JASE Review*, Vol. 24 No. 4,; 457-464, October 2003.
- [19] Surajed Sookchaiyaporn, *Tire-Suspension-Steering Hardware-In-The-Loop for Vehicle Dynamics Simulation*. Master's Thesis, Department of Mechanical Engineering, Chulalongkorn University, 2009.

- [20] ศุภวุฒิ จันทร์พานิชย์. เอกสารประกอบการสอนวิชา Automotive Control, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [21] ฉัตรชัย หงษ์อุเทน. *กลศาสตร์ยานยนต์ 2*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2552.
- [22] Pacejka, H., 2002, *Tyre and Vehicle Dynamics* (Butterworth-Heinemann).
- [23] Neha Ravi Dixit. *Evaluation of Vehicle Understeer Gradient Definitions*. Master's Thesis, , Department of Mechanical Engineering, The Ohio State University, 2009.
- [24] ภาณุวัฒน์ พีร์นิธิเจริญกุล , วิศิษฐ์ วีระนนทาเวทย์ , วีระพงษ์ กอเจริญรัตน์ และ ศรัณย์ ห่อเกียรติ (2553). *การพัฒนาระบบล้อ ระบบช่วงล่างและระบบบังคับเลี้ยวของชุดทดสอบ Hardware in the Loop Simulator เพื่อใช้วิเคราะห์รถ student formula*, โครงการทางวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 28-51.
- [25] จูติมา วิรัตน์พันธ์ , ทินกฤต พรรณสุมาลี และ ธนกร อารยะรากุล (2554). *การพัฒนาชุดทดสอบ Hardware in the loop simulator เพื่อใช้วิเคราะห์ระบบล้อ, ระบบช่วงล่าง และระบบบังคับเลี้ยวในรถ Student formula*, โครงการทางวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 37-50.
- [26] Gillespie T. D., *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, SAE, Warrendale, PA, 1992

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

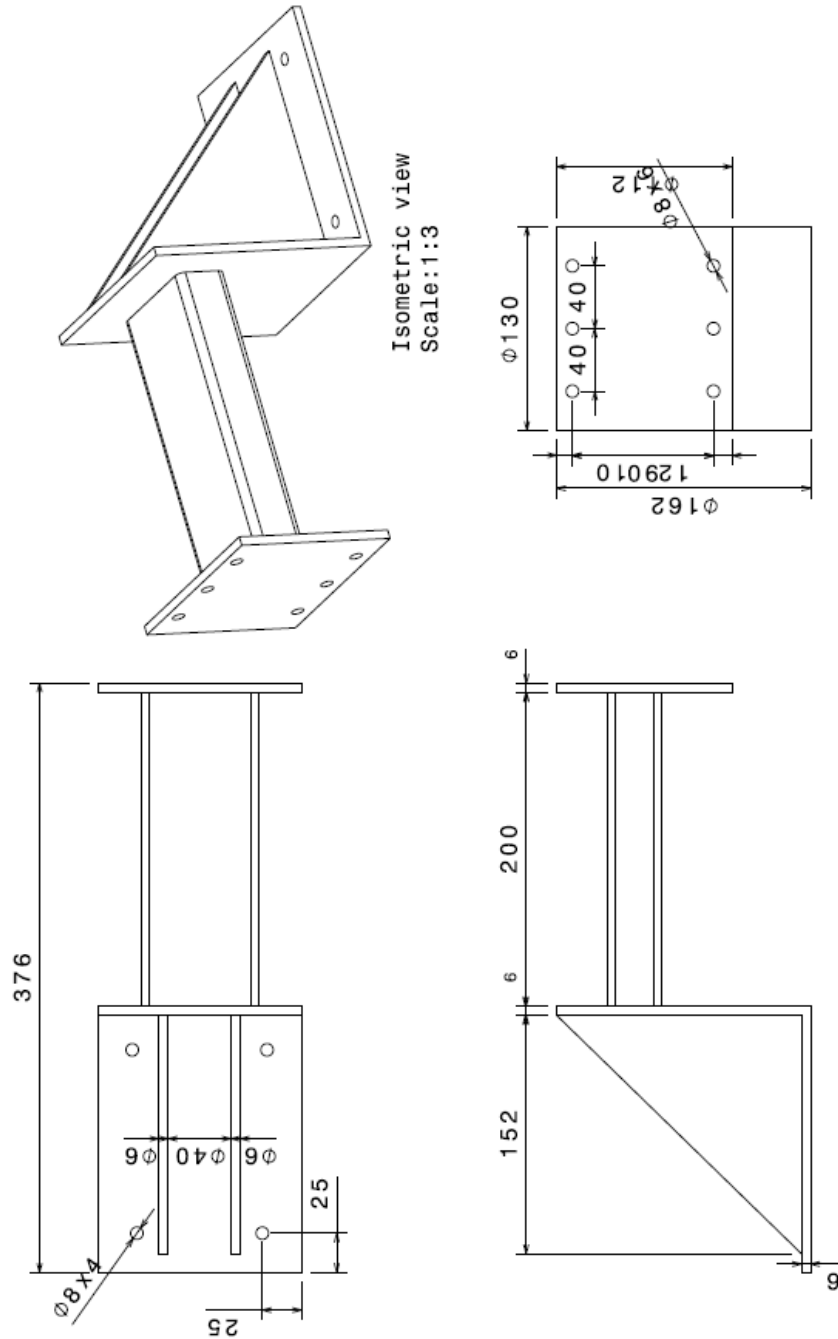
ตัวอย่างแบบขึ้นถ่วงเสริมแรงที่ใช้ในการผลิต

ภาคผนวก ก.

ตัวอย่างแบบชิ้นส่วนเสริมแรงที่ใช้ในการผลิต

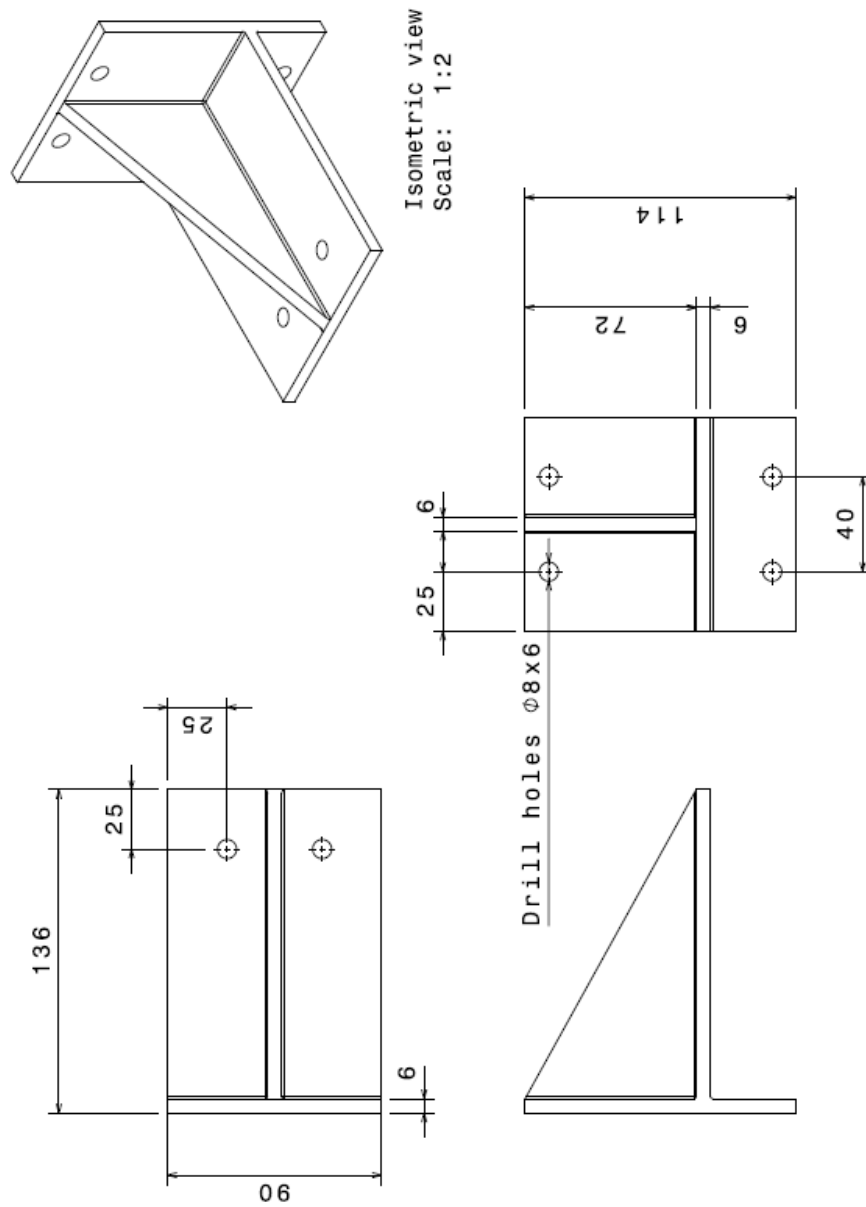
ตัวอย่างแบบชิ้นส่วนเสริมแรงที่แสดงในส่วนนี้แบ่งเป็น 2 แบบ ได้แก่ ชิ้นส่วนเสริมแรงที่ติดตั้งบริเวณระบบบังคับเลี้ยว และชิ้นส่วนเสริมแรงที่ติดตั้งบริเวณชุดตัวหน่วงการสั่นสะเทือน โดยทางผู้วิจัยได้ร่วมมือทำกับกลุ่มนิสิตซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ก.1 แบบชิ้นส่วนเสริมแรงที่ติดตั้งบริเวณระบบบังคับลิ้น



รูปที่ ก-1 ชิ้นส่วนเสริมแรงที่ติดตั้งบริเวณระบบบังคับลิ้น

ก.2 แบบชิ้นส่วนเสริมแรงที่ติดตั้งบริเวณชุดตัวหน่วยการสันสะเทือน



รูปที่ ก-2 ชิ้นส่วนเสริมแรงที่ติดตั้งบริเวณชุดตัวหน่วยการสันสะเทือน

ภาคผนวก ข.

รายละเอียดอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในชุดทดสอบHILs

ภาคผนวก ข.

รายละเอียดอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในชุดทดสอบHILs

ข.1 มอเตอร์ขับเคลื่อนล้อทดสอบและล้อจำลองพื้นถนน



รูปที่ ข-1 มอเตอร์ขับเคลื่อนล้อทดสอบและล้อจำลองพื้นถนน

มอเตอร์ขับเคลื่อนล้อทดสอบและล้อจำลองพื้นถนนดังรูปที่ ข-1 ของบริษัท Mars Electric LLC รุ่น ME0708 เป็นมอเตอร์กระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน กำลังงานสูงสุด 15 กิโลวัตต์ (1 นาที) ให้กำลังงานต่อเนื่อง 4.8 กิโลวัตต์ ใช้กับแรงดันไฟฟ้าได้ตั้งแต่ 12 โวลต์ ถึง 48 โวลต์ ทนกระแสสูงสุด 300 แอมแปร์ (1 นาที) กระแสต่อเนื่อง 100 แอมแปร์ อัตราเร็วรอบสูงสุด 3,360 รอบต่อนาทีที่แรงดันไฟ 48 โวลต์ มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20.32 เซนติเมตร ความหนา 13.97 เซนติเมตร (ไม่รวมเฟลา) ขนาดเฟลาที่ 7/8 x 1-5/8 นิ้ว ใช้สลัก 3/16 นิ้ว และน้ำหนักโดยรวม 13.61 กิโลกรัม

ผู้จัดจำหน่าย : บริษัท เซอร์โว วิชั่น จำกัด 900/230 สุขุมวิท 103 ถนนสุขุมวิท เขตบางนา กรุงเทพฯ ๙ 10260 โทรศัพท์ 0-2743-2441-2 โทรสาร 0-2749-5833

ข.2 ชุดมอเตอร์ลูกปืนหมุนควบคุมมุมการวางตัว และตำแหน่งของล้อจำลองพื้นถนน



รูปที่ ข-2 ชุดควบคุมมุมการวางตัวและตำแหน่งล้อจำลองพื้นถนน

ชุดมอเตอร์และเฟืองหนอนแบบลูกปืนหมุนวนดังรูปที่ ข-2 นี้ใช้ในการควบคุมมุมการวางตัวและตำแหน่งเชิงเส้นของล้อจำลองพื้นถนน โดยอุปกรณ์ดังกล่าวจะประกอบไปด้วยมอเตอร์กระแสตรง และชุดลูกปืนหมุนวนที่มีรายละเอียดดังนี้

มอเตอร์กระแสตรงที่ใช้เป็นของบริษัท Yaskawa Electric Corporation รุ่น UGRMEM-04 MA ที่ใช้เอนโคเดอร์ของบริษัท Hontko รุ่น HTR-HB 500-2048 PPR เป็นอุปกรณ์ระบุตำแหน่ง โดยมอเตอร์ดังกล่าวให้แรงบิดสูงสุด 3.53 นิวตันเมตร แรงบิดต่อเนื่อง 0.706 นิวตันเมตร ทนกระแสสูงสุด 30.1 แอมแปร์ และอัตราเร็วสูงสุด 4,000 รอบต่อนาที

ชุดเฟืองหนอนแบบลูกปืนหมุนวน เป็นของบริษัท Servomech รุ่น BSA20 RN1 C200 ROE มีระยะการเคลื่อนที่ 186 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางเพลลา 25 มิลลิเมตร ทนแรงพลศาสตร์สูงสุด 4,000 นิวตัน แรงสถิตแบบดึง 4,000 นิวตันและแบบดัน 6,000 นิวตัน ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวมีอัตราทดจากมอเตอร์เข้าสู่เพลลา 12.5:1 โดยเพลลาจะมีระยะเคลื่อนที่เชิงเส้น 0.4 มิลลิเมตรต่อการหมุน 1 รอบ

ผู้จัดจำหน่าย : บริษัท เซอร์โว วิชั่น จำกัด 900/230 สุขุมวิท 103 ถนนสุขุมวิท เขตบางนา กรุงเทพฯ ๑10260 โทรศัพท์ 0-2743-2441-2 โทรสาร 0-2749-5833

ข.3 มอเตอร์ควบคุมมุมเดียวของล้อทดสอบ



รูปที่ ข-3 มอเตอร์ควบคุมมุมเดียวของล้อทดสอบ

มอเตอร์ควบคุมมุมเดียวล้อทดสอบในรูปที่ ข-3 เป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปรงถ่านของบริษัท Glentek รุ่น GMB 4525-55 ที่ให้กำลังงานต่อเนื่อง 1.6 กิโลวัตต์ มีอัตราเร็วสูงสุด 4,200 รอบต่อนาที แรงบิดสูงสุด 18.63 นิวตันเมตร แรงบิดต่อเนื่อง 6.21 นิวตันเมตร ทนกระแสสูงสุดที่ 26.7 แอมแปร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพล่า 19 มิลลิเมตร และมีน้ำหนัก 8.9 กิโลกรัม

ผู้จัดจำหน่าย :บริษัท เซอร์โว วิชั่น จำกัด 900/230 สุขุมวิท 103 ถนนสุขุมวิท เขตบางนา กรุงเทพฯ ๑10260 โทรศัพท์ 0-2743-2441-2 โทรสาร 0-2749-5833

ข.4 เฟืองทดในระบบส่งกำลังขับเคลื่อนล้อทดสอบ



รูปที่ ข-4 เฟืองทดส่งกำลังขับเคลื่อนล้อทดสอบ

เฟืองทดแบบ planetary ดังรูปที่ ข-4 ใช้ในการส่งกำลังจากมอเตอร์เข้าสู่ล้อทดสอบ โดยเฟืองทวดังกล่าวเป็นของบริษัท HPB Motion Control รุ่น DS090 มีอัตราทดรอบด้านรับกำลังต่อด้านส่ง

กำลังที่ 5:1 ทนแรงบิดสูงสุดที่ 528 นิวตันเมตร แรงบิดต่อเนื่องที่ 176 นิวตันเมตร รับแรงในแนวรัศมีได้ 6,200 นิวตันและแรงแนวแกนได้ 5,200 นิวตัน เพลาฝั่งส่งกำลังรวมถึงเพลาฝั่งรับกำลังมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตรและ 18 มิลลิเมตรตามลำดับ

ผู้จัดจำหน่าย : บริษัท เซอร์โว วิชั่น จำกัด 900/230 สุขุมวิท 103 ถนนสุขุมวิท เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260 โทรศัพท์ 0-2743-2441-2 โทรสาร 0-2749-5833

ข.5 เฟืองทดในระบบควบคุมมุมเลี้ยวล้อทดสอบ



รูปที่ ข-5 เฟืองทดในระบบควบคุมมุมเลี้ยวล้อทดสอบ

เฟืองทดแบบ worm gear ในรูปที่ ข-5 ใช้ในการส่งแรงบิดจากมอเตอร์เข้าสู่อุปกรณ์ rack and pinion เพื่อควบคุมมุมเลี้ยวของล้อทดสอบ โดยเฟืองทวดังกล่าวเป็นของบริษัท Motion Technology PTY รุ่น NRV-030 มีอัตราทดรอบจากมอเตอร์ต่อเพลาของ rack and pinion เป็น 10:1

ผู้จัดจำหน่าย : ไม่สามารถระบุได้

ข.6 อุปกรณ์ตรวจวัดแรง



รูปที่ ข-6 อุปกรณ์ตรวจวัดแรง

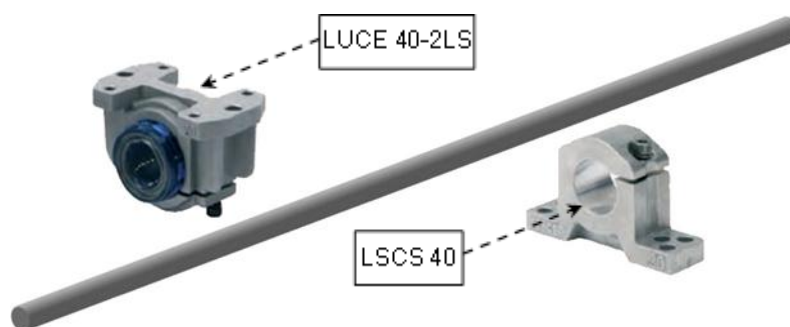
อุปกรณ์ตรวจวัดแรงแบบ strain gauge ดังรูปที่ ข-6 คืออุปกรณ์รุ่น Omega 190 SI-7200-1400 ของ บริษัท ATI Industrial Automation ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 190 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 57.175 มิลลิเมตรความหนา 55.88 มิลลิเมตร และมีรายละเอียดทางด้านเทคนิคดังตารางที่ ข-2 ดังนี้

ตารางที่ ข-2 รายละเอียดทางเทคนิคของอุปกรณ์วัดแรง

Axis	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	T_x (N.m)	T_y (N.m)	T_z (N.m)
Rated (Full-Scale)	7,200	7,200	18,000	1,400	1,400	1,400
Resolution	1 ½	1 ½	3	5/24	5/24	5/36
Single-Axis Overload	± 36,000	± 36,000	± 110,000	± 6,800	± 6,800	± 7,800
Uncertainty (95% Cfd.)	4.25%	4.25%	2.25%	3.25%	3.25%	3.25%

ผู้จัดจำหน่าย : บริษัท เซอร์โว วิชั่น จำกัด 900/230 สุขุมวิท 103 ถนนสุขุมวิท เขตบางนา กรุงเทพฯ ฯ
10260 โทรศัพท์ 0-2743-2441-2 โทรสาร 0-2749-5833

ข.7 ชุดลูกปืนเชิงเส้นแนวตั้ง

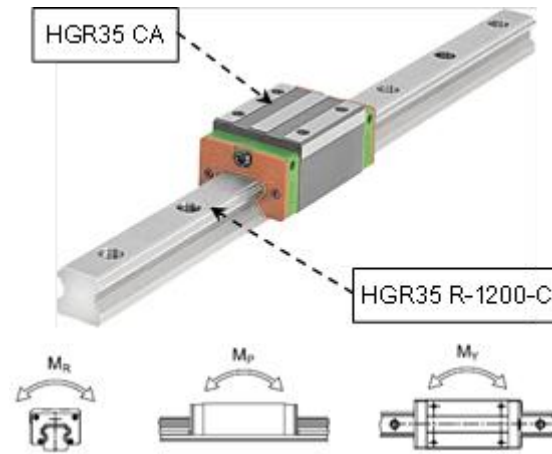


รูปที่ ข-7 ชุดลูกปืนเชิงเส้นแนวตั้ง

ชุดลูกปืนเชิงเส้นดังรูปที่ ข-7 ใช้รองรับการเคลื่อนที่ในแนวตั้งของชุดจำลองมวลรถและจับยึดช่วงล่างรวมไปถึงล้อทดสอบ โดยชุดลูกปืนดังกล่าวเป็นของบริษัท SKF ที่ประกอบไปด้วยเสาเหล็กเหนียวกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร ยาว 1,800 มิลลิเมตรจำนวน 2 ต้น (รุ่น SRV.LJM 40-1800 ESSC2), แท่นยึดเสาเหล็กรุ่น LSCS 40 จำนวน 6 ตัว (ต้นละ 3 ตัว) และลูกปืนเชิงเส้นรุ่น LUCE 40-2LS จำนวน 4 ตัว (เสาละ 2 ตัว) ซึ่งชุดลูกปืนเชิงเส้นดังกล่าวสามารถทนรับแรงในแนวรัศมีได้สูงสุดตัวละ 7,800 นิวตัน

ผู้จัดจำหน่าย : บริษัท เอส เค เอฟ (ประเทศไทย) จำกัด 70/72 ถนนพระราม 3 ซ่องนนทรี เขตยานนาวา กรุงเทพฯ ฯ 10120 โทรศัพท์ 0-2296-9300 โทรสาร 0-2294-6222-3

ข.8 ชุดลูกปืนเชิงเส้นแนวราบ

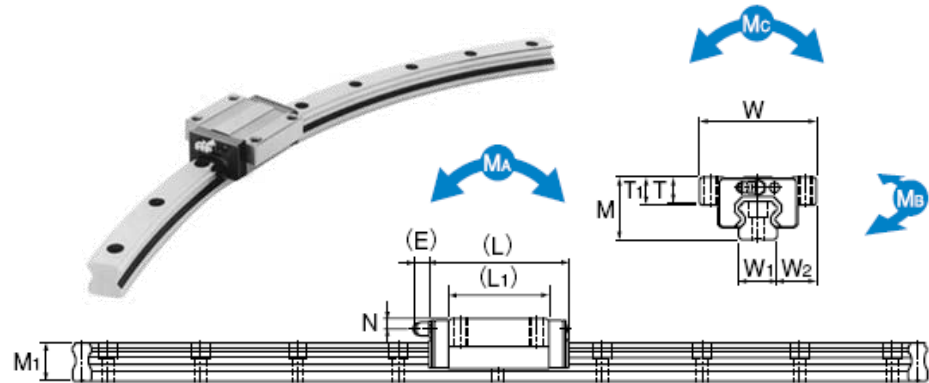


รูปที่ ข-8 ชุดลูกปืนเชิงเส้นแนวราบ

ชุดลูกปืนเชิงเส้นดังรูปที่ ข-8 ใช้รองรับการเคลื่อนที่ในแนวราบของระบบควบคุมตำแหน่งล้อจำลองพื้นถนน ชุดลูกปืนดังกล่าวเป็นของบริษัท HIWIN ที่ประกอบไปด้วยรางเหล็กเหนียวความยาว 1,200 มิลลิเมตรมวล/ความยาว 6.3 กิโลกรัม/เมตร จำนวน 2 ราง (รุ่น HGR35 R-1200-C) และตัวลูกปืนรุ่น HGR35 CA จำนวน 4 ตัว (รางละ 2 ตัว) โดยตัวลูกปืนดังกล่าวสามารถทนรับแรงสูงสุดได้ที่ 69.16 กิโลนิวตัน รับโมเมนต์ (MR) 1.16 กิโลนิวตันเมตร รับโมเมนต์ (MP) และ (MY) ได้เท่ากันที่ 0.81 กิโลนิวตันเมตร

ผู้จัดจำหน่าย : บริษัท เซอร์โว วิชั่น จำกัด 900/230 สุขุมวิท 103 ถนนสุขุมวิท เขตบางนา กรุงเทพฯ ๑10260 โทรศัพท์ 0-2743-2441-2 โทรสาร 0-2749-5833

ข.9 ชุดลูกปืนโค้ง



รูปที่ ข-9 ชุดลูกปืนโค้ง

ชุดลูกปืนโค้งดังรูปที่ ข-9 ใช้รองรับการเคลื่อนที่เชิงมุมในแนวระดับของล้อจำลองพื้นถนน ชุดลูกปืนดังกล่าวเป็นของบริษัท THK รุ่น HCR 15A 60/400R ที่ประกอบด้วยรางเหล็กเหนียวโค้งรัศมี 400 มิลลิเมตร (วัดที่แนวกึ่งกลางราง) กววมุม 60 องศา จำนวน 2 ราง ที่มาพร้อมกับลูกปืนจำนวน 4 ตัว (รางละ 2 ตัว) โดยลูกปืนแต่ละตัวทนรับแรงสูงสุดในทุกแนวได้ 13.5 กิโลนิวตัน รับโมเมนต์ตามแกนต่างๆ (MA, MB) ได้เท่ากับที่ 0.0805 กิโลนิวตันเมตร และรับโมเมนต์ MC ได้ 0.0844 กิโลนิวตันเมตร

ผู้จัดจำหน่าย : บริษัท เซอร์โว วิชั่น จำกัด 900/230 สุขุมวิท 103 ถนนสุขุมวิท เขตบางนา กรุงเทพฯ ๑
10260 โทรศัพท์ 0-2743-2441-2 โทรสาร 0-2749-5833

ข.10 Timing pulley



รูปที่ ข-10 Timing pulley

Timing pulley แบบใช้กับสายพานรุ่น 5M หน้ากว้าง 15 มิลลิเมตร ดังรูปที่ ข-10 นี้ใช้ในระบบส่งกำลังและควบคุมอัตราเร็วรอบของล้อจำลองพื้นถนน โดย pulley อลูมิเนียมที่เชื่อมต่อจากเพลลาของล้อจำลองพื้นถนนจะมีจำนวนฟันที่ 72 ฟัน ในขณะที่ pulley เหล็กขนาดเล็กอีก 2 ตัวจะเชื่อมต่ออยู่กับเพลลาของมอเตอร์และเพลลาของมวลเฉื่อย ซึ่ง pulley ทั้งสองจะมีจำนวนฟันเท่ากันที่ 24 ฟัน ส่งผลให้อัตราทดรอบจากมอเตอร์เข้าสู่มวลเฉื่อยและล้อจำลองพื้นถนนมีค่าเป็น 3:3:1

ผู้จัดจำหน่าย : บริษัท วิ.เอส.อินคัสเทค (ประเทศไทย) จำกัด 202 /138 หมู่ 1 ต. บางเพ็ญ อ. บางป่อ สมุทรปราการ 10560 โทรศัพท์ 0-2710-1399 โทรสาร 0-2758-2804

ข.11 สายพาน timing



รูปที่ ข-11 สายพาน timing

สายพาน timing ดังรูปที่ 1 จะใช้ร่วมกับ timing pulley เพื่อส่งกำลังจากมอเตอร์เข้าสู่มวลเนื้อเยื่อและ
ล้อจำลองพื้นถนน โดยสายพานที่ใช้คือรุ่น 9255M จากบริษัท GATES POWERGRIP HTD ความ
ยาวเส้นรอบวง 925 มิลลิเมตร กว้าง 15 มิลลิเมตร

ผู้จัดจำหน่าย : บริษัท ไทยเลียวบราเคอร์ส จำกัด 629/1 ถนนมหาไชย แขวงสำราญราษฎร์ เขตพระ
นครกรุงเทพฯ 10200 โทรศัพท์ 0-2621-0112-4 โทรสาร 0-2225-1746

ข.12 Contactor กระแสตรง



รูปที่ ข-12 contactor กระแสตรง

Contactor กระแสตรง (DC contactor) ของบริษัท Fuji Electric รุ่น SC-N5 [93] ดังรูปที่ 2 นี้จะใช้ใน
ระบบควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อนล้อทดสอบและล้อจำลองพื้นถนน โดย contactor ดังกล่าวทำหน้าที่เป็น
สวิตช์ที่ใช้ควบคุมการจ่ายกระแสไฟเข้าสู่ amplifier และกระแสไฟสูงสุดที่รับได้คือ 150 แอมแปร์
ที่แรงดันไฟฟ้า 48 โวลต์

ผู้จัดจำหน่าย : บริษัท ไทยธนกันต์ ดิสทริบิวชั่น แอนด์ คอนโทรล จำกัด 529/531 ถนน
วรจักร แขวงป้อมปราบศัตรูพ่าย เขตป้อมปราบศัตรูพ่าย กรุงเทพฯ 10100 โทรศัพท์ 0-2222-6049,
0-2222-6800, 0-2222-6053-4 โทรสาร 0-2222-6801

ข.13 แบตเตอรี่



รูปที่ ข-13 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ดังรูปที่ ข-13 เป็นของบริษัท SHIMASTU BATTERY รุ่น NP18-12 มีแรงดันตกคร่อม 12 โวลต์ ความจุ 18 แอมป์ชั่วโมง แบตเตอรี่ดังกล่าวจะใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้มอเตอร์ขับเคลื่อน ทดสอบและล้อจำลองพื้นถนน โดยนำแบตเตอรี่มาต่ออนุกรม 2 ลูก เพื่อให้แรงดันไฟฟ้ารวมเป็น 24 โวลต์ แล้วนำชุดอนุกรมมาต่อขนานกัน 3 ชุดเพื่อให้จ่ายพลังงานได้นานขึ้น

ผู้จัดจำหน่าย : บริษัท ไอ อินเตอร์เทรด จำกัด 599/304 ถ.รัชดาภิเษก แขวงจตุจักร เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900 โทรศัพท์ 02-192 1833 (อัตโนมัติ), 02-192 1670

ข.14 อุปกรณ์ขยายสัญญาณ Accelus



รูปที่ ข-14 อุปกรณ์ขยายสัญญาณ Accelus

อุปกรณ์ขยายสัญญาณ (amplifier) ในรูปที่ ข-4 จะใช้ควบคุมมอเตอร์ในชุดทดสอบทั้ง 3 แกน (amplifier 1 ตัวควบคุมมอเตอร์ได้ 1 ตัว) ได้แก่ มอเตอร์ควบคุมมุมเฉลี่ยของล้อทดสอบ มอเตอร์

ควบคุมมุมการวางตัวและมอเตอร์คุมตำแหน่งเชิงเส้นของล้อจำลองพื้นถนน โดยอุปกรณ์ขยายสัญญาณดังกล่าวเป็นของบริษัท Copley Controls รุ่น ASP-090-36 ที่สามารถใช้ควบคุมมอเตอร์ได้ทั้งแบบมีแรงต้าน และแบบไร้แรงต้าน ซึ่งระบบการควบคุมสามารถเลือกใช้ได้ระหว่าง analog control และ digital control นอกจากนี้ยังเชื่อมต่อกับมอเตอร์ได้ทั้งแบบ phase U, V, W แบบ hall U, V, W รวมไปถึงแบบ encoder A, /A, B, /B, (X/X) ได้อีกด้วย

Amplifier รุ่น ASP-090-36 นี้ควบคุมการจ่ายกระแสได้สูงสุด 36 แอมแปร์ (1 วินาที) และจ่ายกระแสต่อเนื่องที่ 12 แอมแปร์ กำลังงานสูงสุด 2.95 กิโลวัตต์ และกำลังงานต่อเนื่อง 1 กิโลวัตต์

ผู้จัดจำหน่าย : บริษัท เซอร์โว วิชั่น จำกัด 900/230 สุขุมวิท 103 ถนนสุขุมวิท เขตบางนา กรุงเทพฯ ๑10260 โทรศัพท์ 0-2743-2441-2 โทรสาร 0-2749-5833

ข.15 อุปกรณ์ขยายสัญญาณ MillipaK



รูปที่ ข-15 อุปกรณ์ขยายสัญญาณ MillipaK

อุปกรณ์ขยายสัญญาณ (amplifier) ในรูปที่ 5 จะใช้ควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อนล้อทดสอบและล้อจำลองพื้นถนน (amplifier 1 ตัวควบคุมมอเตอร์ได้ 1 ตัว) โดย amplifier ดังกล่าวเป็นของบริษัท SEVCON รุ่น MillipaK ที่ออกแบบมาเพื่อการควบคุมมอเตอร์กระแสตรงกำลังสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งมอเตอร์ที่เป็นต้นกำลังของรถไฟฟ้าต่างๆ ซึ่งแรงดันไฟในช่วงการทำงานของ MillipaK อยู่ที่ 24 ถึง 48 โวลต์

ทนกระแสสูงสุด 330 แอมแปร์ และอ่านค่าความต้านทานเป็น input เพื่อใช้ในการจ่ายแรงดันไฟฟ้า ไปขับเคลื่อนมอเตอร์

ผู้จัดจำหน่าย : บริษัท เซอร์โว วิชั่น จำกัด 900/230 สุขุมวิท 103 ถนนสุขุมวิท เขตบางนา กรุงเทพฯ ๙ 10260 โทรศัพท์ 0-2743-2441-2 โทรสาร 0-2749-583

ข.16 อุปกรณ์อื่นๆ

อุปกรณ์รวมถึงวัสดุอื่นๆที่มีหลากหลายขนาดและยากต่อการกล่าวถึงรายละเอียดในภาคผนวกนี้ เช่น ลูกปืนเพลานขนาดต่างๆ,coupling, ล้อตุนกำลังที่ใช้เป็นมวลเฉื่อยรวมไปถึง bolt และ nut ที่ใช้ในชุดทดสอบ HIL ผู้วิจัยได้จัดซื้อจากผู้จัดจำหน่ายต่อไปนี้

ข.16.1 ร้านตัดแปลงล้อรถ

ร้าน สวนมะลิการช่าง 337/6-8 ถนนราษฎร์บูรณะ แขวงบางปะกอก เขตราษฎร์บูรณะ กรุงเทพฯ โทรศัพท์ 0-2427-7479, 0-2427-7703, 0-2427-1708

ข.16.2 ร้านสกรูและข้อต่อ

บริษัท เอส.สลักภัณฑ์ จำกัด 1628,1630 ถนนพระราม6 (บรรทัดทอง) แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ โทรศัพท์ 0-2214-4594, 0-2216-6818

ภาคผนวก ค.

รายละเอียดอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดสอบรถฟอร์มูล่านักเรียน

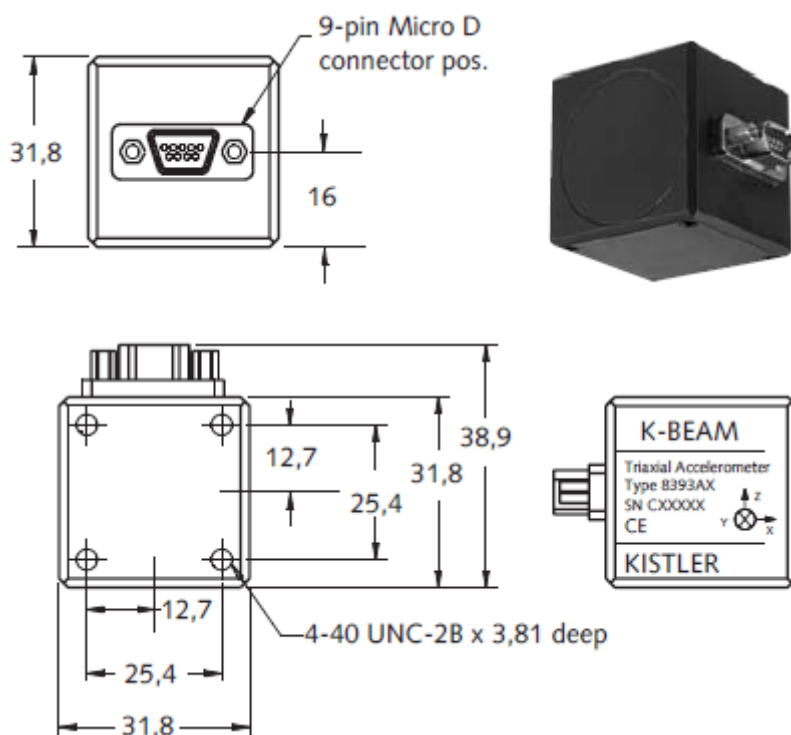
ภาคผนวก ค.

รายละเอียดอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทดสอบรถฟอร์มูล่านักเรียน

ค1. ตัววัดความเร่งและความหน่วงแบบ 3 แกน

ตัววัดความหน่วงและตัววัดความเร่งที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นของยี่ห้อ KISTLER รุ่น K-BEAM 8393B10 ซึ่งสามารถวัดค่าความเร่งและความหน่วงได้ 3 แกน (x, y, z) โดยมีลักษณะของอุปกรณ์มีดังรูป ค-1 และมีรายละเอียดของอุปกรณ์ดังตารางที่ ค-1

ผู้จัดจำหน่าย : ไม่สามารถระบุได้



รูปที่ ค-1 ตัววัดความเร่งและความหน่วงยี่ห้อ KISTLER รุ่น K-BEAM 8393B10

ตารางที่ ค-1 คุณสมบัติของตัววัดความเร่งและความหน่วงยี่ห้อ KISTLER รุ่น K-BEAM 8393B10

Technical Data			
Type	Units	8393B2	8393B10
Acceleration Range	g	± 2	± 10
Sensitivity ±5%	mV/g	1000	200
Zero g Output ±30mV	V	0	0
Resolution (Threshold) typ.	µg	540	2830
Noise typ. (0 ... 100Hz)	µgrms	380	2000
Noise Density typ. (0 ... 100Hz)	µgrms/√Hz	38	200
Resonant Frequency nom.	kHz	1,4	2,7
Phase Shift max.	⊗ 0 Hz	degree	0
	⊗ 10 Hz	degree	2
	⊗ 100 Hz	degree	20
Frequency Response ±5%	Hz	0 ... 250	0 ... 180
Amplitude Non-linearity	%FSO	± 0,8	± 0,8
Transverse Sensitivity typ. (max. 3%)	%	1	1
Sensitive Axis Misalignment typ. (max. ≤30)	mrاد	≤10	≤10
Environmental:			
Random Vibration 20 ... 2000Hz	g _{rms}	20	20
Shock half sine, 700 µs	g _{pk}	6000	6000
Temperature Coefficient of Sensitivity typ. (max. 0,032)	%/°C	0,02	0,02
Temperature Coefficient of Bias Shift typ. (max.)	mg/°C	0,2 (1)	1 (5)
Temperature Range Operating	°C	-40 ... 85	-40 ... 85
Temperature Range Storage	°C	-55 ... 120	-55 ... 120
Output:			
Impedance max.	Ω	350	350
Capacitive Load max.	µF	0,5	0,5
Operating Load Resistance min.	kΩ	30	30
Supply:			
Voltage	VDC	3,8 ... 32	3,8 ... 32
Current nom.	mA	4	4
Construction:			
Sensing Element	type	capacitive	capacitive
Housing	material	Al. Hard Anodized	Al. Hard Anodized
Sealing-Housing Connector	type	epoxy	epoxy
Connector	type	9-pin micro D	9-pin micro D
Ground Isolation min.	Ω	>10 ¹⁰	>10 ¹⁰
Weight	grams	60	60

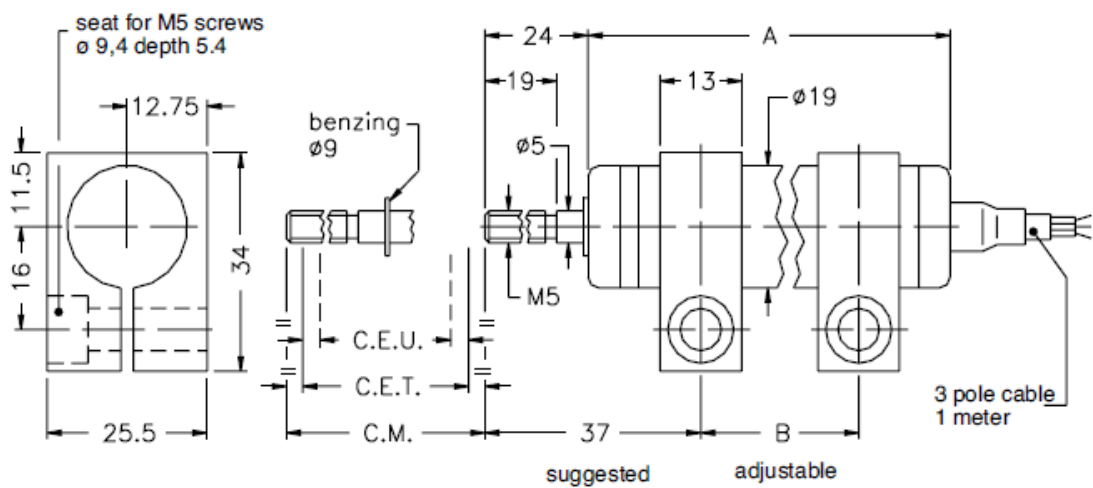
1 g = 9,80665 m/s², 1 inch = 25,4 mm, 1 gram = 0,03527 oz, 1 lbf-in = 0,1129 Nm

ค.2 เครื่องมือวัดระยะกระจัด

เครื่องมือวัดระยะกระจัดที่ใช้ในการทดสอบนี้เป็นของบริษัท GEFRAN รุ่น PZ34-S ซึ่งมีระยะขีด 200 มม. โดยมีรูปร่างและขนาดดังรูปที่ ค-2 และมีรายละเอียดทางเทคนิคดังตารางที่ ค-2

ผู้จัดทำหน่วย : ไม่สามารถระบุได้

PZ34-S



รูปที่ ค-2 ขนาดและมิติของเครื่องมือวัดระยะกระจัด ของบริษัท GEFRAN รุ่น PZ34-S

ตารางที่ ค-2 รายละเอียดทางเทคนิคของเครื่องมือวัดระยะกระจัด ของบริษัท GEFRAN รุ่น PZ34-S

Useful electrical stroke (C.E.U.)	25/50/75/100/125/150/175/200/ 250/300
Resolution	infinite
Protection	IP60
Independent linearity (within C.E.U.)	see table
Displacement speed	≤ 10 m/s
Displacement force	≤ 0.5 N
Life	$>25 \times 10^6$ strokes, or 100×10^6 operations, whichever is less (within C.E.U.)
Vibrations	5...2000Hz, $A_{max} = 0,75$ mm $a_{max} = 20$ g
Shock	50 g, 11ms.
Tolerance on resistance	$\pm 20\%$
Recommended cursor current	$< 0,1$ μ A
Maximum cursor current	10mA
Max. applicable voltage	see table
Electrical isolation	>100 M Ω at 500V \approx , 1bar, 2s
Dielectric strength	< 100 μ A at 500V \approx , 50Hz, 2s, 1bar
Dissipation at 40°C (0W at 120°C)	see table
Actual Temperature Coefficient of the output voltage	$< 1,5$ ppm/ $^{\circ}$ C
Working temperature	-30...+100°C
Storage temperature	-50...+120°C
Case material	Anodised aluminium Nylon 66 G 25
Control rod material	Stainless steel AISI 303
Fixing	Brackets, selfaligning ball-joints or flange

ค.3 กล่อง ECU (Electric Control Unit)

กล่อง ECU ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลจากอุปกรณ์การวัดจากรถจริงในการทดสอบนี้เป็นของยี่ห้อ MoTec รุ่น m400 ดังรูปที่ ค-3 และมีรายละเอียดทางเทคนิคดังนี้

Outputs

- x Injector outputs—high or low ohm
- 4 x Ignition outputs
- 8 x Auxiliary outputs—for functions such as camshaft control, drive by wire throttle, boost control, nitrous injection, idle speed stepper motor and many more

Inputs

- x Analogue voltage inputs—fully configurable including custom calibrations
- 6 x Analogue temperature inputs—fully configurable including custom calibrations
- 1 x Wideband Lambda input—for Lambda measurement and control
- 4 x Digital/speed inputs—for wheel speeds and function activation

Communications

- x CAN
- 1 x RS232

Physical

- Case size 147 x 105 x 40 mm
- Weight 500 gram
- 1 x 34 pin and 1 x 26 pin waterproof connector with gold plated contacts



รูปที่ ค-3 กล่อง ECU ยี่ห้อ MoTeC รุ่น m400

ภาคผนวก ง.

รายละเอียดการสอบเทียบของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าในรถจริง

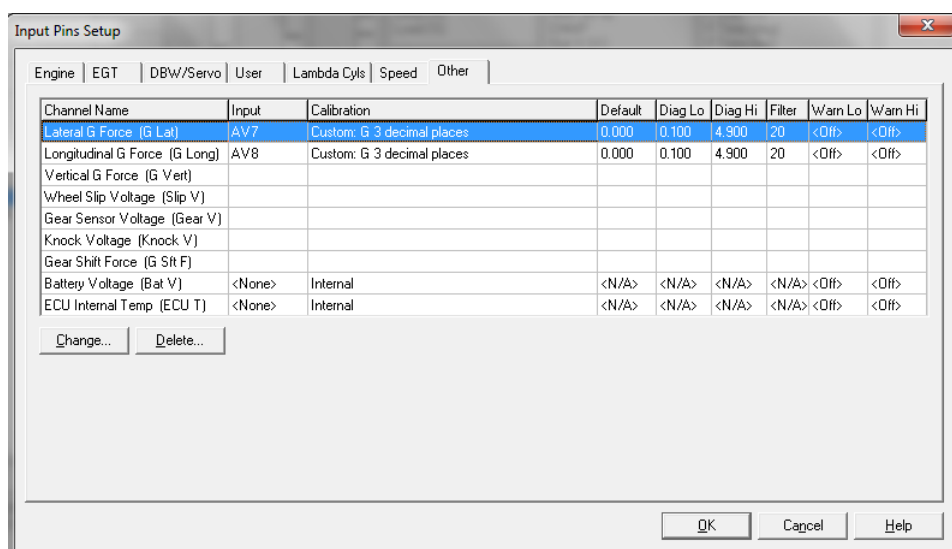
ภาคผนวก ง.

รายละเอียดการสอบเทียบของอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าในรถจริง

ง.1 ตัววัดความเร่งและความหน่วงแบบ 3 แกน

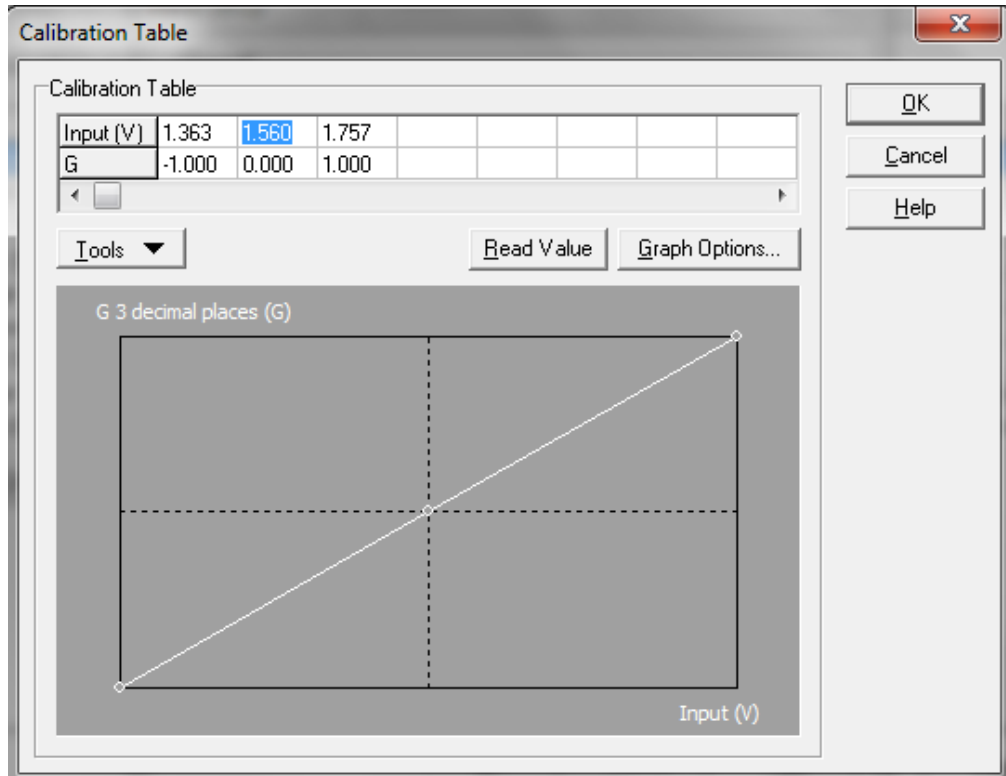
ตัววัดค่าความเร่งและความหน่วงแบบ 3 แกนยี่ห้อ KISTLER รุ่น K-BEAM 8393B10 ก่อนการใช้งานต้องทำการสอบเทียบเครื่องมือก่อนโดยใช้โปรแกรม MoTec ECU Manager เนื่องจากตัววัดค่าความเร่งนั้นจะส่งค่าความต่างศักย์ (V) ที่แตกต่างกันตามความเร่งที่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงต้องทำการกำหนดค่าความต่างศักย์ที่ค่าความเร่งค่าใดค่าหนึ่งก่อน ซึ่งในที่นี้เลือกที่ค่าความเร่ง 1,0 และ -1 g เพื่อนำมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์และค่าความเร่งภายในโปรแกรมโดยมีขั้นตอนในการสอบเทียบดังนี้

- 1.เปิดโปรแกรม MoTec ECU Manager พร้อมกับเลือกไฟล์ที่ได้รับการบันทึกไว้
- 2.ไปที่ Adjust > Sensor setup > Input setup > Other ซึ่งหน้าจอจะแสดงชื่ออุปกรณ์การวัดซึ่งในที่นี้ใช้วัดความเร่งเพียงสองแกนคือ ความเร่งทางด้านข้าง (Lateral G Force) และความเร่งตามตามแนวยาว (Longitudinal G Force) ให้กดเลือกจนขึ้นแท็บสีฟ้าและเลือก change โดยในที่นี้จะแสดงวิธีการสอบเทียบความเร่งทางด้านข้างดังรูปที่ ง 1-1



รูปที่ ง 1-1 หน้าจอแสดง Input Pins Setup

3. จากนั้นโปรแกรมจะโชว์หน้าจอ Input Setup ให้เลือก Table จะแสดงหน้าจอ Calibration Table ดังรูปที่ ง 1-2



รูปที่ ง 1-2 หน้าจอแสดง Calibration Table

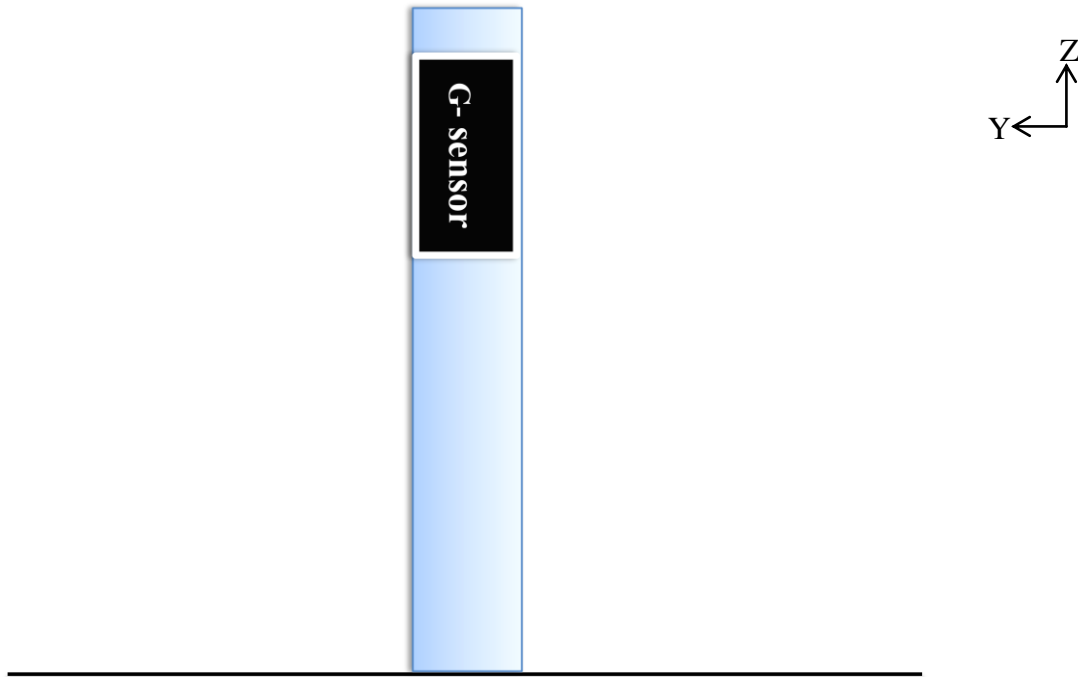
4. กดเลือกค่า Input (V) ที่ตรงกับค่า $G = 0.000$ จากนั้นหาพื้นราบพร้อมทั้งวางกล่องใส่อุปกรณ์การวัดให้ขนานกับพื้นดังรูปที่ ง 1-3



รูปที่ ง 1-3 การสอบเทียบตัววัดความเร่งที่ 0 g

จากนั้นกด Read Value จะได้ค่าความต่างศักย์ที่ความเร่ง 0 g

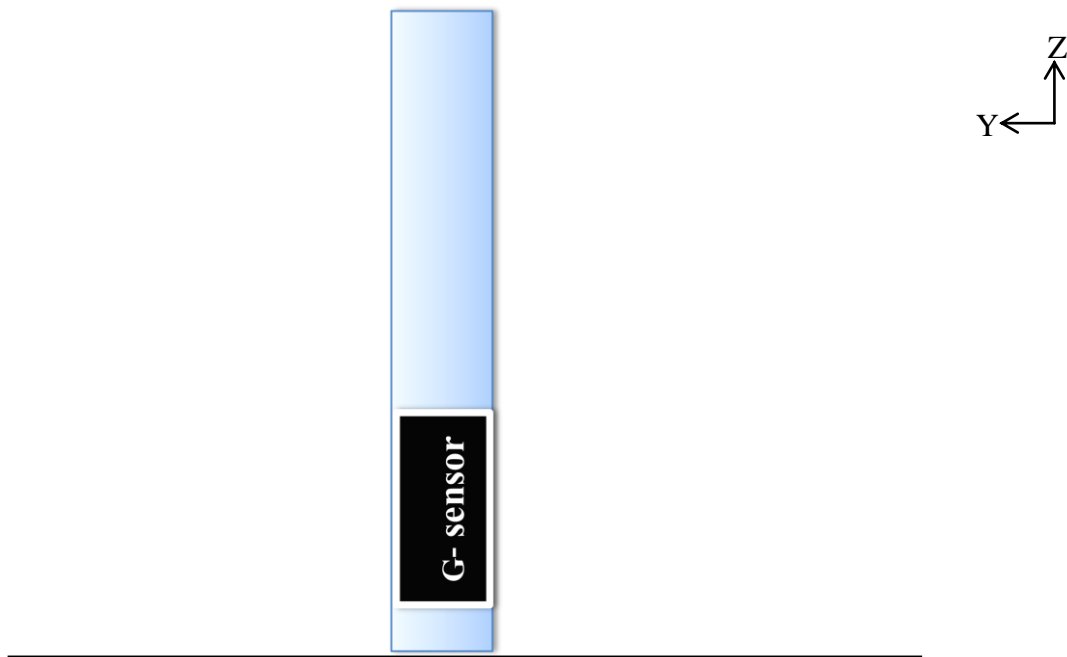
5. กดเลือกค่า Input (V) ที่ตรงกับค่า $G = -1.000$ จากนั้นตะแคงกล่องใส่อุปกรณ์การวัดไปทางขวา 90 องศา บนพื้นราบดังรูปที่ ง 1-4



รูปที่ ง 1-4 การสอบเทียบตัววัดความเร่งที่ -1 g

จากนั้นกด Read Value จะได้ค่าความต่างศักย์ที่ความเร่ง -1 g

5. กดเลือกค่า Input (V) ที่ตรงกับค่า $G = 1.000$ จากนั้นตะแคงกล่องใส่อุปกรณ์การวัดไปทางซ้าย 90 องศา บนพื้นราบดังรูปที่ ง 1-5

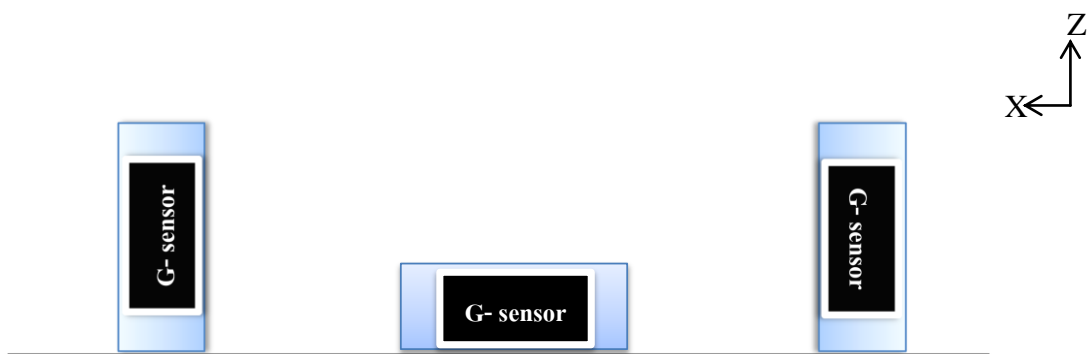


รูปที่ ง 1-5 การสอบเทียบตัววัดความเร่งที่ 1 g

จากนั้นกด Read Value จะได้ค่าความต่างศักย์ที่ความเร่ง 1 g

6.กดเลือก OK เพื่อเป็นการเสร็จสิ้นการสอบเทียบความเร่งทางด้านข้าง

ส่วนการสอบเทียบค่าความเร่งตามแนวขานั้นทำวิธีเช่นเดียวกันกับความเร่งด้านข้างตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2-6 โดยจะแตกต่างกันตรงที่วิธีการวางตำแหน่งกล่องอุปกรณ์ตามรูปที่ ง 1-6



รูปที่ ง 1-6 ลักษณะการวางตำแหน่งกล่องอุปกรณ์ในการสอบเทียบค่าความเร่งตามแนวขาคือ

-1 ,0 และ 1 g ตามลำดับ

โดยตารางที่ ง-1 แสดงค่าความต่างศักย์ที่ได้จากการสอบเทียบทั้ง 2 แกน

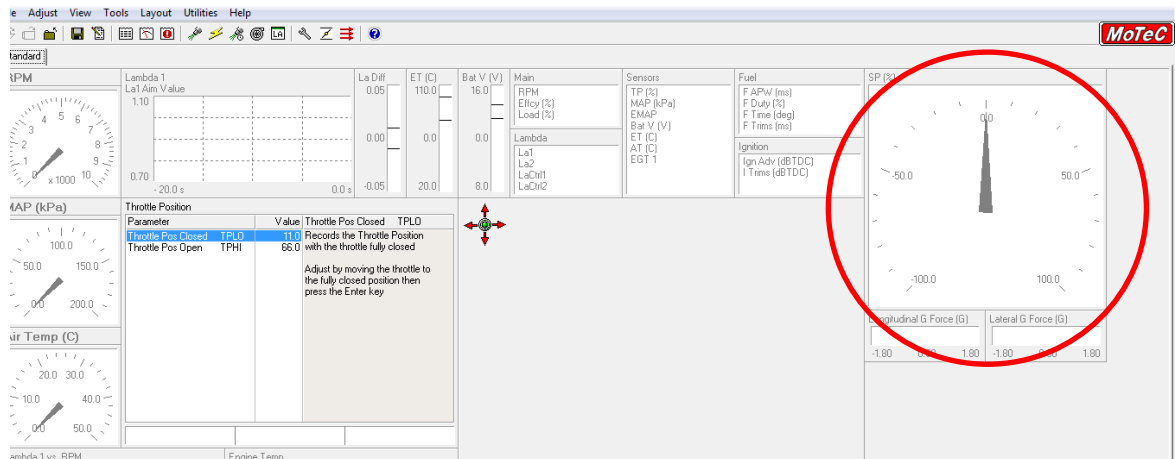
ตารางที่ ง-1 ค่าความต่างศักย์ที่ได้จากการสอบเทียบที่ค่าความเร่งทั้ง 2 แกนที่ -1 , 0 , 1 g

AV7	Longitudinal G	Voltage	1.389	1.585	1.781
		G	1	0	-1
AV8	Lateral G	Voltage	1.406	1.603	1.800
		G	-1	0	1

ง.2 เครื่องมือวัดการกระจัด

เครื่องมือวัดระยะการกระจัดของบริษัท GEFTRAN รุ่น PZ34-S ในที่นี้ใช้เพื่อวัดระยะการยืด-หดของเร็กพวงมาลัยซึ่งจะแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์การหมุนของพวงมาลัย (SP%) บนโปรแกรม MoTec ECU Manager แต่เนื่องจากข้อมูลที่เราต้องการคือ องศาของมุมล้อ ดังนั้นจึงต้องทำการสอบเทียบจากเปอร์เซ็นต์การหมุนพวงมาลัยให้เป็นองศาของมุมล้อก่อนที่จะทำการทดลอง โดยใช้โปรแกรม MoTec ECU Manager เป็นตัวอ่านค่าและอุปกรณ์ในการวัดองศาการหมุนของล้อในการวัดค่า ซึ่งมีวิธีในการสอบเทียบดังนี้

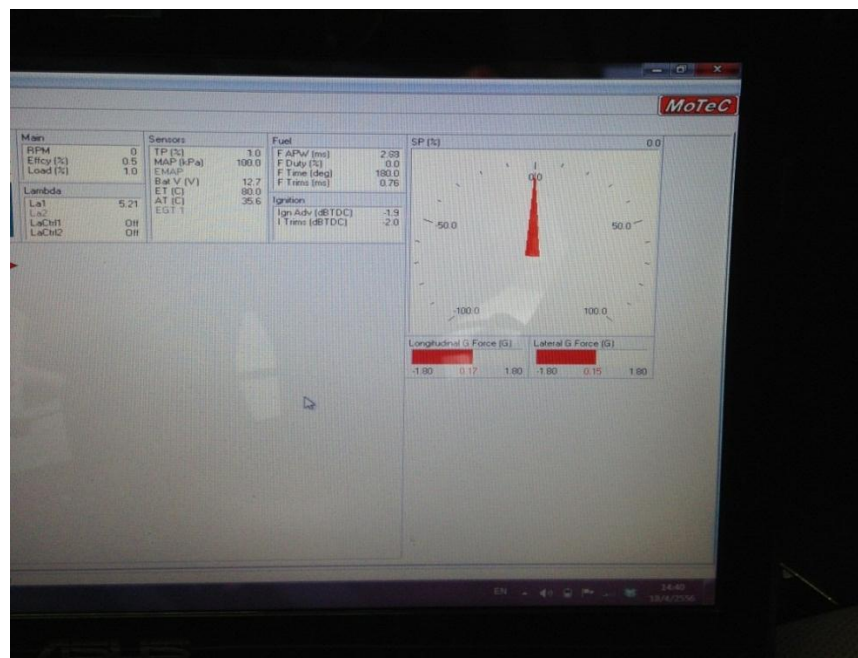
1. เปิดโปรแกรม MoTec ECU Manager พร้อมกับเลือกไฟล์ที่ได้รับการบันทึกไว้ จะพบกับหน้าจอที่แสดงค่าเปอร์เซ็นต์การหมุนของพวงมาลัยทางขวามือดังรูปที่ ง 2-1



รูปที่ 2-1 เปอร์เซ็นต์การหมุนของพวงมาลัย (วงกลมสีแดง) บน โปรแกรม Motec ECU Manager

2. วางอุปกรณ์วัดองศาหมุนล้อให้ขนานกับล้อรถพร้อมเซ็นรถให้ล้อหน้าขวาขึ้นไปอยู่บนอุปกรณ์วัดมุม

3. หมุนพวงมาลัยให้เปอร์เซ็นต์การหมุนของพวงมาลัยไปอยู่ที่ตำแหน่ง 0 % ดังรูปที่ 2-2 พร้อมทั้งอ่านค่ามุมล้อที่เครื่องวัดมุมล้อดังรูปที่ 2-3 และจดบันทึกค่า

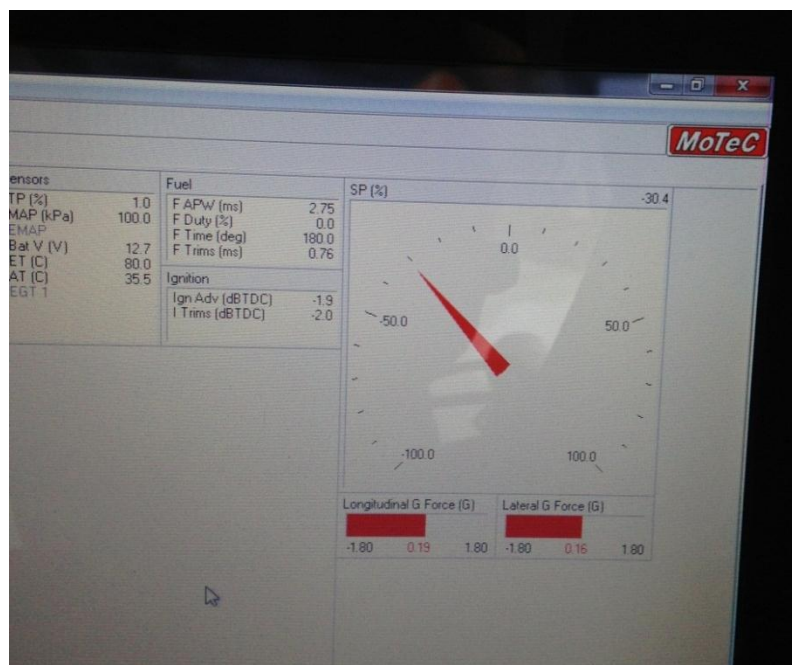


รูปที่ 2-2 เปอร์เซ็นต์การหมุนพวงมาลัยที่ตำแหน่ง 0% (พวงมาลัยตรง) บน โปรแกรม Motec ECU Manager

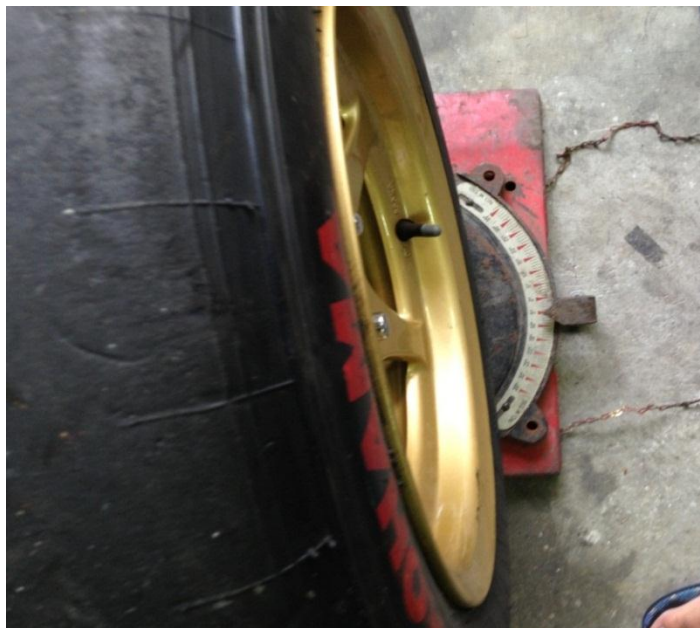


รูปที่ ง 2-3 มุมล้อนบนเครื่องวัดองศาที่เปอร์เซ็นต์การหมุนพวงมาลัย 0%

4. ทำการหมุนพวงมาลัยไปทางซ้ายโดยให้เปอร์เซ็นต์การหมุนพวงมาลัยเพิ่มทีละ 5 % จากนั้นอ่านค่าที่วัดได้บนเครื่องวัดองศาตามล้อนดังรูปที่ ง 2-4 ถึง ง 2-5 ตามลำดับ พร้อมทั้งบันทึกค่า จนกระทั่งสุดระยะการหมุนของพวงมาลัยจึงหยุด

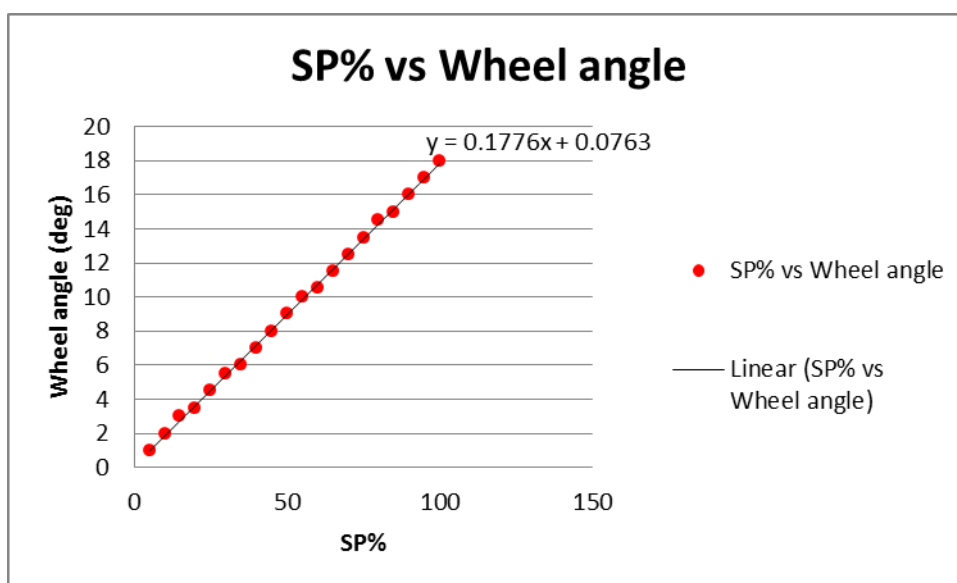


รูปที่ ง 2-4 เปอร์เซ็นต์การหมุนพวงมาลัยที่ตำแหน่ง 30% บนโปรแกรม MoTeC ECU Manager



รูปที่ ง 2-5 มุมล้อที่เปอร์เซ็นต์การหมุนพวงมาลัย 30%

5. นำค่าความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การหมุนของพวงมาลัยกับมุมล้อไปพล็อตหาความสัมพันธ์เชิงเส้นด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ดังรูปที่ ง 2-6



รูปที่ ง 2-6 กราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างเปอร์เซ็นต์การหมุนของพวงมาลัยกับมุมล้อ

ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรง $y = 0.1776x + 0.0763$

โดย y คือ มุมเลี้ยวที่ล้อ

x คือ เปอร์เซนต์การหมุนของพวงมาลัย

ภาคผนวก จ.

การหาค่าพารามิเตอร์ของรถฟอร์มูล่านักเรียน

ภาคผนวก จ.

การหาค่าพารามิเตอร์ของรถฟอร์มูล่านักเรียน

จ.1 การหาค่าน้ำหนักของรถฟอร์มูล่านักเรียน

การหาค่าน้ำหนักของรถฟอร์มูล่านักเรียนใช้วิธีการวัดด้วยตาชั่ง โดยทำการวัดน้ำหนักที่กดลงที่แต่ละล้อ ซึ่งต้องทำการวัดบนพื้นราบและล้อทั้งสองล้อต้องอยู่บนระนาบเดียวกัน โดยมีอุปกรณ์ที่ใช้ดังนี้

อุปกรณ์ที่ใช้

- 1) ตาชั่งน้ำหนัก 4 ตัว ซึ่งแต่ละตัววัดน้ำหนักได้สูงสุด 120 kg.
- 2) เครื่องมือวัดระดับน้ำ
- 3) แม่แรงยกน้ำหนักรถ
- 4) รถแข่งฟอร์มูล่านักเรียน
- 5) แผ่นไม้ที่ขนาดเล็กที่มีความหนา 2 mm.

วิธีการทดลอง

- 1) หาสถานที่ที่มีพื้นราบพอสมควร แล้วนำเครื่องมือวัดระดับมาเพื่อวัดระดับของรถโดยตำแหน่งการวัดระดับ คือ แนวกว้างของหน้ารถ แนวกว้างของหลังรถและตามแนวยาวของรถ
- 2) เริ่มวัดจากทางหน้ารถ ถ้าระดับที่วัดได้ยังไม่เท่ากันให้นำแผ่นไม้ที่เตรียมไว้มารองค้ำที่ต่ำกว่าปรับระดับจนได้ระดับที่เท่ากันระหว่างล้อหน้าซ้าย-ขวา ทำเช่นเดียวกันกับล้อหลัง และตามแนวยาวของรถ จนรถมีระดับที่เท่ากันทั้งคัน
- 3) ใช้แม่แรงยกรถให้ลอยแล้วนำตาชั่งมาวางไว้ที่ตำแหน่งล้อทั้ง 4

4) อ่านค่าที่ได้แล้วทำการจดบันทึก

โดยค่าที่อ่านได้แสดงได้ดังตารางที่ จ-1

ตารางที่ จ-1 แสดงค่าน้ำหนักที่วัดได้ในแต่ละล้อ

ล้อ	น้ำหนัก (Kg)
หน้าซ้าย(N_{fl})	90
หน้าขวา(N_{fr})	91
หลังซ้าย(N_{rl})	92
หลังขวา(N_{rr})	93

ดังนั้นน้ำหนักรวมของรถจึงหาได้จากสมการที่ (จ-1)

$$+\uparrow \sum F=0, \quad N_{fl} + N_{fr} + N_{rl} + N_{rr} - W_{tot} = 0 \quad (\text{จ-1})$$

โดย W_{tot} คือ น้ำหนักรวมของรถทั้งคัน

$$\therefore W_{tot} = 90+91+92+93 = 366 \text{ Kg}$$

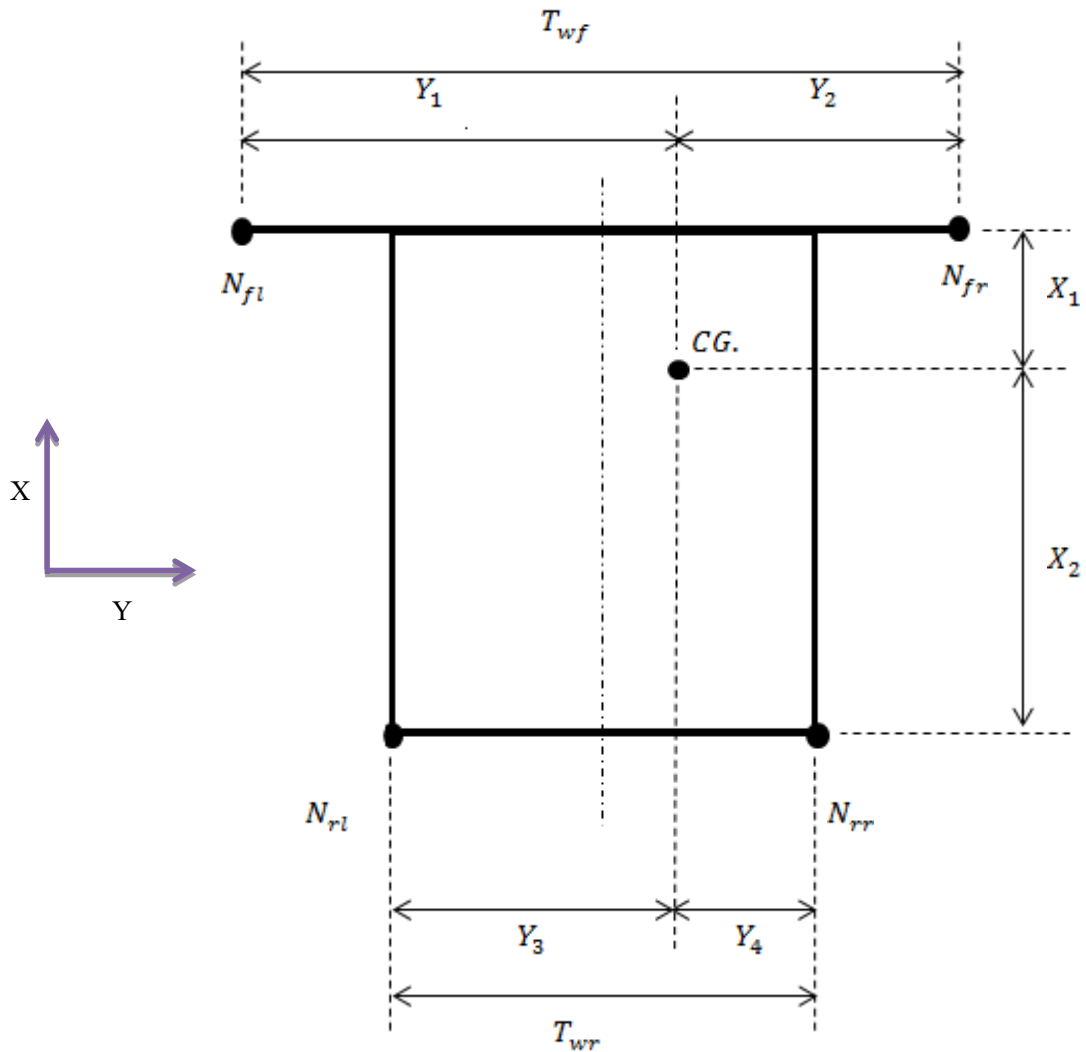
จ.2 การหาค่าตำแหน่งของจุด CG. ในระนาบ X-Y

ตำแหน่งจุด CG. บนตัวรถคือ จุดที่เหมือนตำแหน่งที่รวมของน้ำหนักรถทั้งคัน ซึ่งการหาจุด CG. ของรถพอร์มูล่านักเรียนเพื่อนำไปใช้ในการคำนวณหาระยะจากศูนย์กลางมวลถึงล้อหน้า และระยะจากศูนย์กลางมวลถึงล้อหลัง รวมถึงการใช้ตำแหน่งจุด CG เพื่อใช้หาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของตัวรถต่อไป

การหาค่า CG. ในแนวระนาบ (X-Y) ใช้ค่าจากตารางที่ จ-1 ในการคำนวณ ซึ่งแสดงได้ดังนี้

ทำการสมมติตำแหน่งของจุด CG. บนระนาบ X-Y ของรถ โดยพิจารณาจากน้ำหนักที่พบว่า น้ำหนักของรถถ่ายเทไปทางด้านขวามากกว่า จึงสมมติจุด CG. ไว้ทางด้านขวามือของกึ่งกลางรถ ดังรูปที่ จ 2-1

การคำนวณหาศูนย์กลางมวลในแนวราบ (X-Y Plane)



รูปที่ จ 2-1 การคำนวณที่ศูนย์กลางมวลแนวราบสมมุติ

โดย T_{wf} คือ Front track width

T_{wr} คือ Rear track width

จากตารางที่ จ.-1

$$N_{fl} = 90 \text{ kg}, N_{fr} = 91 \text{ kg}, N_{rl} = 92 \text{ kg}, N_{rr} = 93 \text{ kg}$$

$$T_{wf} = Y_1 + Y_2 = 1280 \text{ mm}$$

$$T_{wr} = Y_3 + Y_4 = 1240 \text{ mm}$$

$$Y_3 = \frac{T_{wr}}{2} + Y_1 - \frac{T_{wf}}{2} = Y_1 - 2 \quad (\text{จ } 2-1)$$

$$Y_4 = \frac{T_{wr}}{2} - \frac{T_{wf}}{2} + Y_2 = Y_2 - 2 \quad (\text{จ } 2-2)$$

$$\sum M_{CG} = 0$$

X-axis

$$N_{fl}Y_1 - N_{fr}Y_2 + N_{rl}Y_3 - N_{rr}Y_4 = 0$$

$$90(2 + Y_3) - 91(2 + Y_4) + 92(Y_3) - 93(Y_4) = 0$$

$$180 + 83Y_3 - 182 - 91Y_4 + 92Y_3 - 93Y_4 = 0 \quad (\text{จ } 2-3)$$

Y-axis

$$N_{fl}X_1 + N_{fr}X_1 - N_{rl}X_2 - N_{rr}X_2 = 0$$

$$90X_1 + 91X_1 - 92X_2 - 93X_2 = 0$$

$$181X_1 - 185X_2 = 0 \quad (\text{จ } 2-4)$$

จาก

$$Y_3 + Y_4 = 1240 \text{ mm} \quad (\text{จ } 2-5)$$

$$X_1 + X_2 = 1660 \text{ mm} \quad (\text{จ 2-6})$$

แทนค่าสมการที่ (จ 2-5) ในสมการที่ (จ 2-3)

$$\text{จะได้} \quad 175Y_3 - 184(1240 - Y_3) = 2$$

$$Y_3 = 635.6 \text{ mm}$$

$$\text{แทนค่า } Y_3 \text{ ในสมการที่ (จ 2-5) \quad \text{จะได้} \quad Y_4 = 604.4 \text{ mm}$$

$$\text{แทนค่า } Y_3 \text{ ในสมการที่ (จ 2-1) \quad \text{จะได้} \quad Y_1 = 655.6 \text{ mm}$$

$$\text{แทนค่า } Y_4 \text{ ในสมการที่ (จ 2-2) \quad \text{จะได้} \quad Y_2 = 624.4 \text{ mm}$$

แทนค่าสมการที่ (จ 2-6) ในสมการที่ (จ 2-4)

$$\text{จะได้} \quad 181(1660 - X_2) - 185X_2 = 0$$

$$X_2 = 820.9 \text{ mm}$$

$$\text{แทนค่า } X_2 \text{ ในสมการที่ (จ 2-6) \quad \text{จะได้} \quad X_1 = 839.1 \text{ mm}$$

สรุป 1. ระยะตามแนวยาวของรถ

$$\text{ระยะศูนย์กลางมวลถึงล้อหน้า } (X_1) \text{ เท่ากับ} \quad 839 \text{ mm.}$$

$$\text{ระยะศูนย์กลางมวลถึงล้อหลัง } (X_2) \text{ เท่ากับ} \quad 821 \text{ mm.}$$

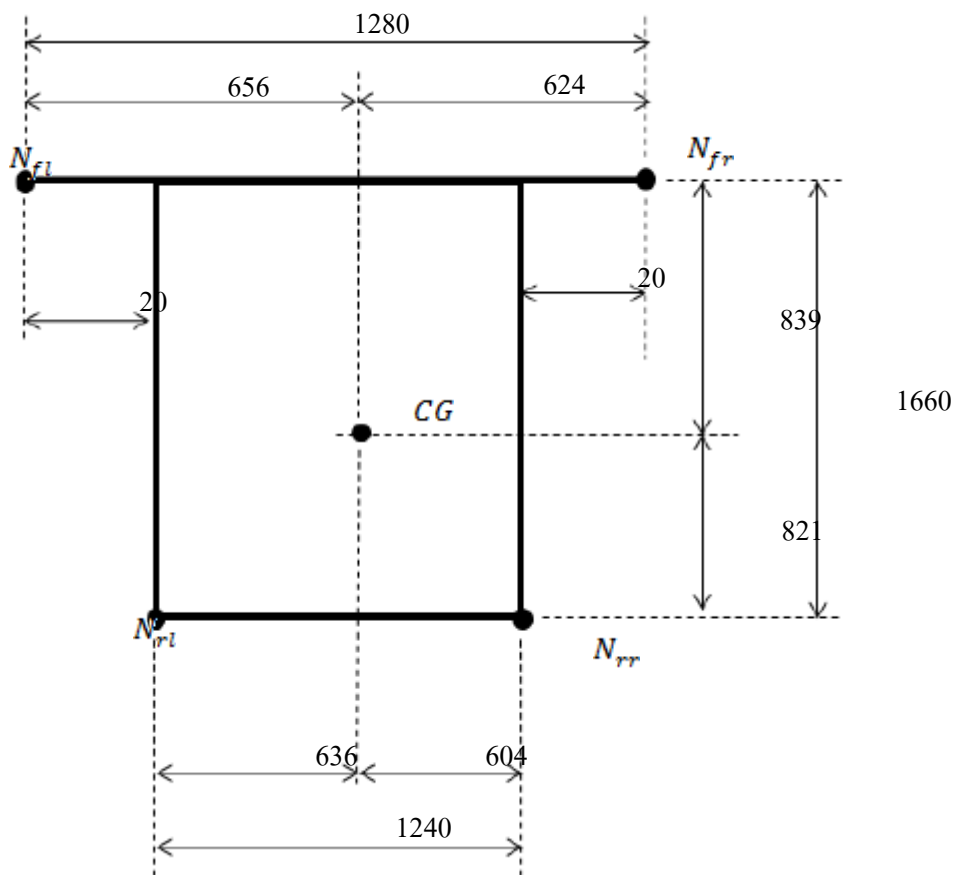
2. ระยะตามแนวขวางของรถ

$$\text{ระยะศูนย์กลางมวลถึงล้อหน้าซ้าย } (Y_1) \text{ เท่ากับ} \quad 656 \text{ mm.}$$

$$\text{ระยะศูนย์กลางมวลถึงล้อหน้าขวา } (Y_2) \text{ เท่ากับ} \quad 624 \text{ mm.}$$

$$\text{ระยะศูนย์กลางมวลถึงล้อหลังซ้าย } (Y_3) \text{ เท่ากับ} \quad 636 \text{ mm.}$$

$$\text{ระยะศูนย์กลางมวลถึงล้อหลังขวา } (Y_4) \text{ เท่ากับ} \quad 604 \text{ mm.}$$



รูปที่ จ 2-2 ตำแหน่งศูนย์กลางมวล

จ.3 การหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนแนวตั้ง (I_{zz})

อุปกรณ์ที่ใช้

- 1).ชุดรอกยกน้ำหนักที่ตึกภาควิชาวิศวกรรม เครื่องกล
- 2).รถยนต์ Student Formula
- 3).เชือกยกรถยนต์
- 4).แท่งเหล็กบอกตำแหน่ง
- 5).ตาชั่งสปริง

วิธีการทดลอง

- 1). นำเชือกมัดรถฟอร์มูล่า โดยให้ตำแหน่งที่ใช้เกี่ยวเชือกอยู่ตรงตำแหน่ง CG. ที่แนวระนาบ
- 2). วัดระยะจากจุด CG. ถึงหน้ารถเพื่อใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิง
- 3). เกี่ยวตะขอจากชุดรอกยกน้ำหนักที่ตำแหน่งเกี่ยวเชือกบนรถ
- 4). ยกรถขึ้นให้ล้อลอยขึ้นจากพื้น
- 5). ใช้ตาชั่งสปริงคึงส่วนหัวรถโดยให้ได้แรงคึง 1 N แล้วปล่อยให้รถเกิดการหมุน
- 6). วัดมุมระหว่างตำแหน่งอ้างอิงตอนเริ่มต้นจากข้อที่ 2 กับตำแหน่งที่ตำแหน่งอ้างอิงหมุนไปได้มากที่สุดโดยใช้ CG. เป็นจุดหมุน แล้วบันทึกผล
- 7). วัดคาบการแกว่งของรถโดยใช้การจับเวลาเมื่อรถแกว่งครบ 1 รอบ (เริ่มจับเวลาตอนที่เริ่มปล่อยและหยุดจับเวลาเมื่อตำแหน่งนั้นกลับมาที่เดิม)
- 8). ทำการทดลองซ้ำข้อ 5 โดยเปลี่ยนแรงเป็น 2 N

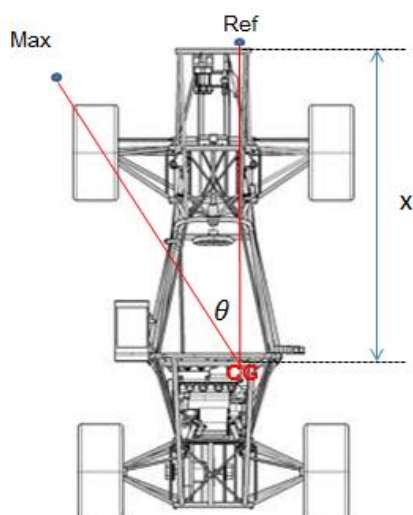
ผลการทดลอง

ตารางที่ จ 3-1 แสดงค่ามุมมากที่สุดที่วัดได้เทียบกับตำแหน่งอ้างอิง

แรง(N)	θ (degree)
1	8
2	20

ตารางที่ จ 3-2 คาบการแกว่งของรถ

ทดลองครั้งที่ 1	T (sec)
1	34
2	35
3	35



รูปที่ จ 3-1 ภาพจำลองระยะและตัวแปรที่ใช้ในการทดลองหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อย

การทดลองหาค่า ความแข็งดิ่งการหมุน (rotational stiffness, k)

$$\sum M = k\theta$$

$$F \cdot x = k\theta$$

(จ 3-1)

การทดลองครั้งที่ 1

$F = 1 \text{ N}, x = 73.5 \text{ cm.}, \theta = 8^\circ$ แทนค่าลงในสมการที่ (จ 3-1)

$$F \cdot x = k_1 \theta$$

$$1(0.735) = k_1 \left(\frac{8}{360} \times 2\pi \right)$$

$$k_1 = 5.264$$

การทดลองครั้งที่ 2

$F = 2 \text{ N}, x = 73.5 \text{ cm.}, \theta = 20^\circ$ แทนค่าลงในสมการที่ (จ 3-1)

$$F \cdot x = k_2 \theta$$

$$2(0.735) = k_2 \left(\frac{20}{360} \times 2\pi \right)$$

$$k_2 = 4.211$$

สามารถหาค่าความแข็งตึงการหมุนเฉลี่ย ได้ดังนี้

$$k_{average} = \frac{(k_1 + k_2)}{2}$$

$$k_{average} = 4.7375$$

การทดลองหาค่าคาบ (Period, T)

โดยผูก student formula car ที่ตำแหน่ง CG แล้วแกว่งเป็นมุม 5° จากแนวอ้างอิงของรถ แล้วบันทึกคาบจากการแกว่ง

โดยผลจากตารางที่ จ.3-2 สามารถหาค่าคาบเฉลี่ยได้ว่า $T_{average} = 34.67 \text{ s}$

การคำนวณหาโมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนแนวตั้ง

$$\Sigma M = I\alpha$$

สำหรับการเคลื่อนที่แบบหมุนของวัตถุที่ผูกติดแน่นกับปลายลวดสปริง โดยมีการเคลื่อนที่เป็นมุม θ จะได้ว่า

$$-k\theta = I\ddot{\theta}$$

$$I\ddot{\theta} + k\theta = 0 \quad (\text{จ 3-2})$$

การเคลื่อนที่แบบซิมเปิลฮาร์โมนิก จะสามารถเขียนผลเฉลยได้ว่า

$$\theta(t) = A\sin(\omega t + \varphi) \quad (\text{จ 3-3})$$

$$\ddot{\theta}(t) = -\omega^2 A\sin(\omega t + \varphi) \quad (\text{จ 3-4})$$

แทนค่าสมการที่ (จ 3-3)-(จ 3-4) ในสมการที่ (จ 3-2) จะได้

$$I(-\omega^2 A\sin(\omega t + \varphi)) + kA\sin(\omega t + \varphi) = 0$$

$$-I(\omega^2) + k = 0$$

$$I = \frac{k}{\omega^2} \quad (\text{จ 3-5})$$

จากความสัมพันธ์ $\omega = \frac{2\pi}{T}$ (จ 3-6)

แทนค่า $T_{average} = 34.67 \text{ s}$ ในสมการที่ (จ 3-6) จะได้

$$\omega = \frac{2\pi}{34.67}$$

$$\omega = 0.18$$

แทนค่า $k_{average} = 4.7375$ ในสมการที่ (จ 3-5) จะได้

$$I = \frac{4.7375}{0.18^2}$$

$$I = 146.22 \text{ kg/m}^2$$

ดังนั้น โมเมนต์ความเฉื่อยรอบแกนแนวตั้งเท่ากับ 146.22 kg/m^2

ภาคผนวก ฉ.

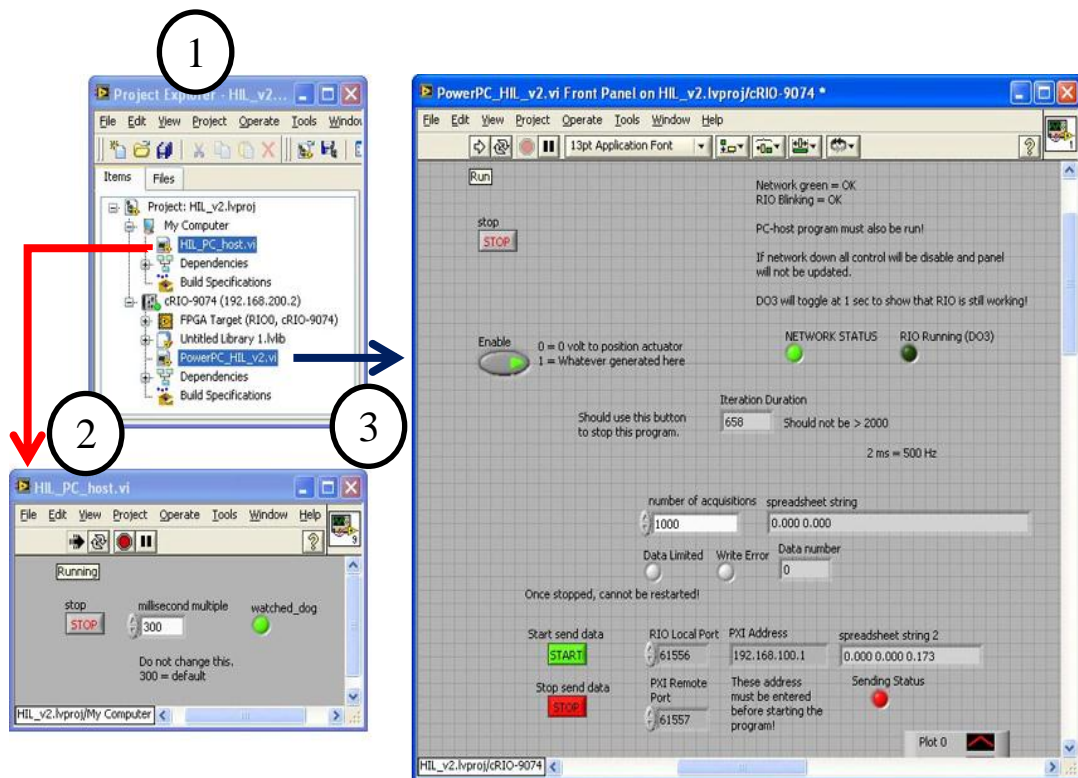
การใช้งานโปรแกรมควบคุม HILs

ภาคผนวก ฉ.

การใช้งานโปรแกรมควบคุม HILs

การใช้งานเครื่องทดสอบ HILs ในการทดสอบต่างๆ จะเริ่มจากการเตรียมอุปกรณ์ทางด้าน hardware ให้พร้อมโดยยังไม่เปิด enable switch ของ amplifier ทั้งหมด จากนั้นให้ทำการ run โปรแกรมในส่วนของ software ซึ่งขั้นตอนต่างๆ ในการเริ่มต้นการทำงาน โปรแกรมควบคุม เหล่านั้นแสดงในภาคผนวกส่วนนี้

ฉ.1 การควบคุมโปรแกรมบน NI CompactRIO ผ่านทาง notebook



รูปที่ ฉ 1-1 โปรแกรมควบคุมที่แสดงบนคอมพิวเตอร์ notebook

ขั้นตอนการเปิดโปรแกรมควบคุมในรูปแบบที่ ๑ 1-1 มีดังนี้

1. เปิด File : HIL_V2.lvproj บนเครื่องคอมพิวเตอร์ notebook
2. เปิด File : HIL_PC_host.vi เพื่อ run โปรแกรม watched_dog (โปรแกรมที่ใช้ตรวจสอบสถานะการสื่อสารระหว่างเครื่อง Notebook Computer และ NI CompactRIO)
3. เปิด File : PowerPC_HIL_v2.vi เพื่อ run โปรแกรมควบคุมหลักของชุดทดสอบ HIL นี้บนเครื่อง NI CompactRIO
4. เปิด Hardware enable switch ที่ควบคุม amplifier ทั้งหมด
5. ทำการทดสอบตามเงื่อนไขที่ต้องการ โดยผู้ทำการทดลองสามารถปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์รวมไปถึงเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบได้ ซึ่งรายละเอียดของโปรแกรมควบคุมนี้แสดงดังรูปที่ ๑ 1-2

The screenshot shows a software interface for a PowerPC HIL (Hardware-in-the-Loop) system. The interface is divided into several functional areas:

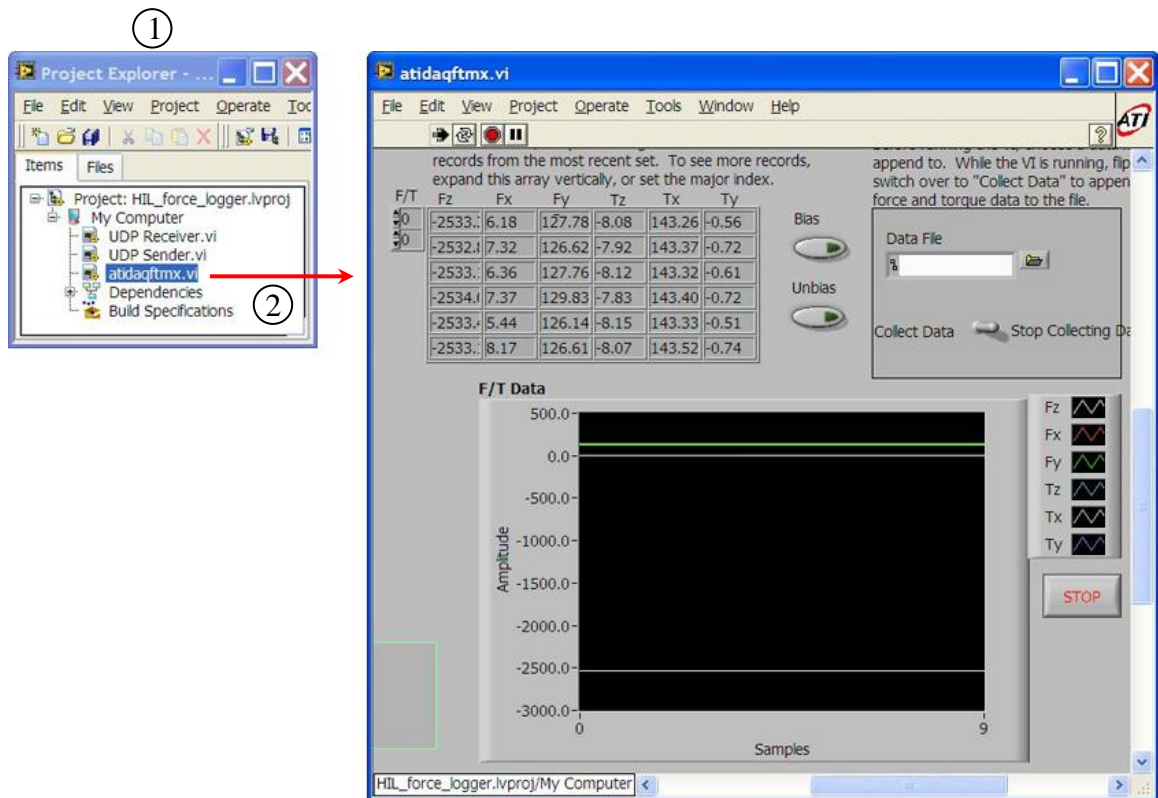
- Top Left:** Contains an 'Enable' button (1) and a 'NETWORK STATUS' indicator (2) showing 'RIO running (DOS)'. Below these are fields for 'Iteration Duration' (1152) and '2 ms = 500 Hz'.
- Middle Left:** Features a 'Start send data' button (3) and a 'Stop send data' button (4). Below is a 'start save to txt file in RIO' section with 'START' and 'STOP' buttons (5).
- Center:** An 'XY Graph' (6) showing 'Amplitude' vs 'Time' with a data plot.
- Right Side (Control Panels):**
 - Axis 1 Drum Linear:** Includes 'Reset 1', 'JOINT 1 Position', 'Drum Linear (pulse)', 'Drum LIN (mm)', 'Drum LIN SET (mm)', 'Drum Ori Limit', 'Hall Lin Drum', 'Control Mode 1', 'JOG Volt', 'NEG1', 'POS1', 'PID gains 1' (8.3), and 'JOG Volt 1'.
 - Axis 2 Drum Orientation:** Includes 'Reset 2', 'JOINT 2 Position', 'Drum Orient (pulse)', 'Drum Ori (mm)', 'Drum Ori (deg)', 'Drum ORI SET (deg)', 'Hall Ori Drum', 'Control Mode 2', 'JOG Volt 2', 'NEG 2', 'POS 2', 'PID gains 2' (8.1), and 'JOG Volt 3'.
 - Axis 3 Wheel Steer:** Includes 'Reset 3', 'JOINT 3 Position', 'Steering (pulse)', 'Steering (deg)', 'Hall Steer', 'Wheel Steer set (deg)', 'Wheel Steer Limit', 'Control Mode 3', 'NEG 3', 'POS 3', 'PID gains 3' (8.1), and 'JOG Volt 3'.
 - Axis 4 Wheel Speed:** Includes 'Wheel Period (32bits)', 'Wheel Speed (rev/sec)', 'Wheel Speed input (rev/sec)', 'Control Mode 4', 'JOG 4 Resistant (0-255)', 'Joc 4', 'PID gains 4', 'RESET PID 4', 'Edge Counts 4', and 'Release it before run PID'.
 - Axis 5 Drum Speed:** Includes 'Reset 5', 'Drum Period (32bits)', 'Drum Speed (rev/sec)', 'Control Mode 5' (8.2), 'JOG 5 Resistant (0-255)', 'Joc 5', 'PID gains 5', 'RESET PID 5', 'Edge Counts 5', and 'Release it before run PID'.
- Bottom Left:** A 'Bicycle Model Loop' section (7) with various parameters like 'Rear Force (N)', 'Mass of half car (kg)', 'CF N/rad', 'Cr N/rad', 'U initial m/s', 'U model km/h', 'b', 'a', 'Iz kg.sqm', 'Rw', 'Rdrum', 'Car Dimension m', and 'Steer Lane Change' (8).

รูปที่ จ 1-2 โปรแกรมควบคุมหลักของชุดทดสอบ HILs

ในรูปที่ ๑ 1-2 แสดงส่วนต่างๆของโปรแกรมควบคุมหลักดังนี้

1. ปุ่ม enable หลักของโปรแกรม หากไม่กดปุ่มนี้จะไม่มีการส่งค่าไปควบคุมมอเตอร์ต่างๆในชุดทดสอบ HIL
2. สถานะการเชื่อมต่อและการทำงานของ NI CompactRIO
3. ส่วนควบคุมการส่งค่าไปยังเครื่อง NI PXI Controller
4. ส่วนควบคุมการบันทึกค่าลงในเครื่อง NI CompactRIO
5. กราฟแสดงผลตัวแปรที่ต้องการศึกษา
6. ส่วนของการปรับพารามิเตอร์รถในแบบจำลองจักรยาน รวมไปถึงปุ่มที่ใช้ควบคุมการป้อนกลับแรงต้านข้างเข้าสู่แบบจำลองจักรยานนี้
7. ส่วนควบคุมเงื่อนไขการเลียของล้อทดสอบในการเปลี่ยนเลน
8. ส่วนของการควบคุมมอเตอร์ต้นกำลังต่างๆ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้
 - 8.1 ส่วนการควบคุมแบบ PID ที่สามารถปรับค่าเกณฑ์ใช้ในการควบคุมได้
 - 8.2 รูปแบบที่ใช้ในการควบคุม (control mode) จะประกอบด้วย 3 รูปแบบได้แก่ OFF คือไม่มีการควบคุมใดๆ, JOG คือการควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้าหรือความต้านทานโดยไม่มี การป้อนกลับระยะการเคลื่อนที่ และ PID คือการควบคุมด้วยตำแหน่งหรืออัตราเร็วของการเคลื่อนที่
 - 8.3 สัญญาณแสดงตำแหน่งจาก hall sensor ใช้ในการตั้งศูนย์ของระบบควบคุมตำแหน่ง

จ.2 การควบคุมโปรแกรมบนเครื่อง NI PXI Controller



รูปที่ จ-2 โปรแกรมควบคุมบนเครื่อง NI PXI Controller

ขั้นตอนการเปิดโปรแกรมควบคุมในรูปที่ จ-2 มีดังนี้

1. เปิด File : HIL_force_logger.lvproj
2. เปิด File : atidaqftmx.vi แล้วตั้ง run เพื่อตรวจวัดค่าแรงในแกนต่างๆที่กระทำต่อล้อทดสอบ
3. ข้อมูลการทดลองทั้งหมดจะถูกบันทึกไว้ที่ D:\HIL PXI DATA\HIL_PXI.txt

ภาคผนวก ช.

ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง HILs

ภาคผนวก ข.

ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่อง HILs

ข.1 การทดสอบค่า Tire model

steer angle	real steer	Fz	Fx	Fy
0.869 rev/s				
-5	-15	-853.7817581	60.58472695	-459.209
-4.5	-13.5	-874.5206388	107.7092012	-1131.78
-4	-12	-893.8947771	116.6067896	-1135.55
-3.5	-10.5	-881.7310075	114.6704514	-1114.36
-3	-9	-889.505911	104.4890404	-1108.85
-2.5	-7.5	-873.3532239	90.34199022	-1113.66
-2	-6	-874.0500102	88.78825868	-1129.51
-1.5	-4.5	-866.7444537	67.60528035	-1051.83
-1	-3	-881.0139421	57.19666374	-855.733
-0.5	-1.5	-900.3822082	46.93943636	-373.489
0	0	-966.3739863	40.28028528	1.301932
0.5	1.5	-966.3554354	37.7582401	482.8192
1	3	-961.5561218	35.00527212	1022.394
1.5	4.5	-975.2431774	42.61764512	1370.436
2	6	-1003.915761	54.37651383	1570.706
2.5	7.5	-1010.741161	65.81675896	1570.775
3	9	-1001.015341	66.11587424	1542.295
3.5	10.5	-1012.726102	61.85868782	1583.901
4	12	-998.370576	106.9312397	1523.659
4.5	13.5	-951.8201611	81.47576256	1400.03
5	15	-960.1675581	102.8901298	1452.824

รูปที่ ข-1 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ Tire model บน โปรแกรม Microsoft Excel

ช.2 การทดสอบแบบการวิ่งเป็นวงกลม

HIL					
Umodel m/s	U HIL rev/s	Steering deg	Lateral velocity	Angular velocity rad/s	Lateral Acc. m/s ²
15	2	1.47	no use	0.138147368	2.072210526
15	2	2.946	no use	0.3155	4.7325
15	2	4.431	no use	0.470906863	7.063602941
15	2	5.952	no use	0.541421456	8.121321839
15	2	7.464	no use	0.58342268	8.751340206
15	2	8.967	no use	0.596388158	8.945822368
15	2	10.473	no use	0.605247525	9.078712871
15	2	11.976	no use	0.610128889	9.151933333

Model U and Steering is the same to HIL		
Steering Model deg	Angular Velocity rad/s	Lateral Acc. m/s ²
1.419	0.079	1.185
2.931	0.158	2.37
4.434	0.237	3.555
5.934	0.316	4.74
7.428	0.394	5.91
8.928	0.473	7.095
10.434	0.552	8.28
11.934	0.632	9.48

รูปที่ ช-2 ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแบบการวิ่งเป็นวงกลมบน โปรแกรม Microsoft Excel

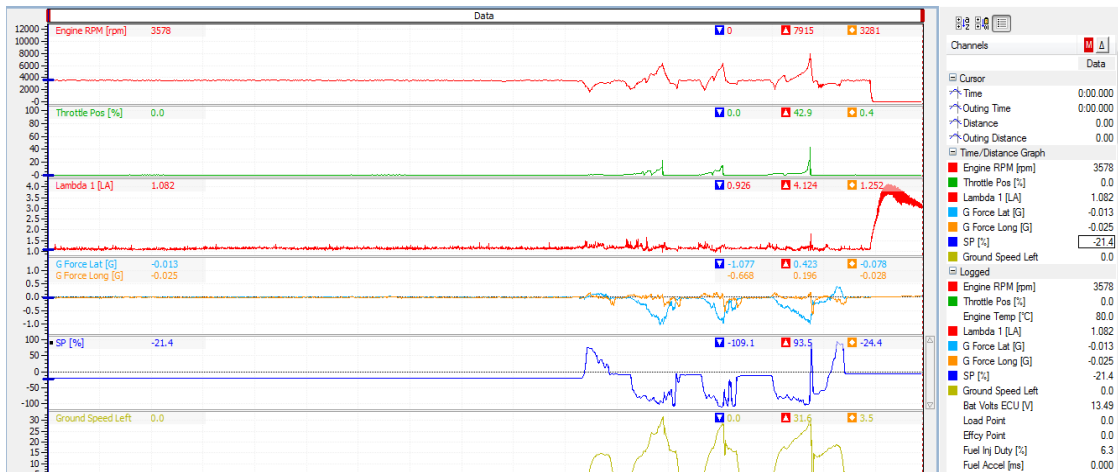
ภาคผนวก ซ.

ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการทดสอบรถฟอร์มูล่านักเรียน

ภาคผนวก ข.

ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากการทดสอบรถฟอร์มูล่านักเรียน

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแบบการวิ่งเป็นวงกลม



รูปที่ ข-1 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบวิ่งเป็นวงกลมด้วยรถจริงบนโปรแกรม MoTec i2 Standard 1.0

ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบรถจริงที่แสดงบน โปรแกรม MoTec i2 Standard 1.0 ดังรูปที่

ข-1 นั้นสามารถแปลงไฟล์ข้อมูลให้สามารถแสดงบน Microsoft Excel ได้ดังรูปที่ ข-2

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T		
1	Format	MoTec CSV File		Workbook																	
2	Venue			Worksheet																	
3	Vehicle			Vehicle Desc																	
4	Driver			Engine ID																	
5	Device	M800																			
6	Comment	skidpad cs1		Session																	
7	Log Date	9/4/2556		Origin Tim	0 s																
8	Log Time	17:10:13		Start Time	0 s																
9	Sample Rr	20 Hz		End Time	131 s																
10	Duration	131 s		Start Distance																	
11	Range	entire outing		End Distance																	
12																					
13																					
14	Engine RP	Throttle P	Engine Te	Lambda 1	G Force La	G Force Lc	SP	Ground S	Bat Volts	Load Poin	Effcy Poin	Fuel Inj	Di	Fuel Accel	Aux 1 Dut	M800 Err	C M800 Err	C M800 Err	C M800 Err	C M800 Err	C M800 Err
15	rpm	%	C	LA	G	G	%	V	V		%	ms	%		%						
16																					
17																					
18	201	6.3	80	5.211	0.061	0.08	18.7	0	8.57	6.3	6.3	0.5	0	99	8	0	208	0	0	0	0
19	201	7.1	80	5.211	0.049	0.07	17.9	0	8.62	6.3	6.3	0.5	0	99	8	0	208	0	0	0	0
20	201	7.8	80	5.211	0.06	0.081	17.3	0	8.66	7.8	7.8	0.5	0	99	8	0	208	0	0	0	0
21	211	9.2	80	5.211	0.049	0.062	18.9	0	8.66	7.8	7.8	0.6	0	99	8	0	208	0	0	0	0
22	220	10.5	80	5.211	0.062	0.075	18.3	0	8.67	10.5	10.5	0.6	0	99	8	0	208	0	0	0	0
23	218	11.6	80	5.211	0.05	0.066	18.1	0	8.64	10.5	10.5	0.7	0	99	8	0	208	0	0	0	0
24	215	12.7	80	5.211	0.058	0.07	19.3	0	8.61	12.7	12.7	0.7	0	99	8	0	208	0	0	0	0
25	212	14	80	5.211	0.048	0.063	18.2	0	8.62	12.7	12.7	0.7	0	99	8	0	208	0	0	0	0

รูปที่ ข-2 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบวิ่งเป็นวงกลมด้วยรถจริงบน โปรแกรม Microsoft Excel

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพงศกร บุญชะตา เป็นบุตรเพียงคนเดียวของนายธีระและนางกัลยารัตน์ บุญชะตา เกิดเมื่อวันที่ 12 พฤศจิกายน พุทธศักราช 2530 ที่โรงพยาบาลรามาริบดี จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2552 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2553 โดยระหว่างที่ได้ทำการศึกษา นั้นได้เข้าร่วมชมรม formula student แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในการสร้างและทำการแข่งขันรถ formula student ในรายการ TSAE Auto challenge ตั้งแต่ปี 2008-2012 และได้เป็นทีมตัวแทนประเทศไทยในการเข้าร่วมทำการแข่งขัน JSAE Auto challenge 2010 ณ ประเทศญี่ปุ่น โดยในปี 2013 ได้เข้าร่วมงานสัมมนาวิศวกรรมยานยนต์แห่งเอเชียแปซิฟิกครั้งที่ 17 ที่ประเทศไทย ในหัวข้อเรื่อง DEVELOPMENT OF TIRE-SUSPENSION-STEERING HARDWARE IN THE LOOP SIMULATOR FOR STUDENT FORMULA CAR HANDLING TESTING.