

ผลกระทบของการกระจายน้ำหนักของแบตเตอรี่ต่อประสิทธิภาพของรถมินิบัส  
ไฟฟ้า

THE IMPACT OF BATTERIES WEIGHT DISTRIBUTION ON ELECTRIC  
MINIBUS PERFORMANCE

ชาญวุฒิ ไตรนิคม

ทองฉัตร โพธิ์สวัสดิ์

พัชรินทร์ เรืองเนตร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบของการกระจายน้ำหนักของแบตเตอรี่ต่อประสิทธิภาพของรถมินิบัส  
ไฟฟ้า

THE IMPACT OF BATTERIES WEIGHT DISTRIBUTION ON ELECTRIC  
MINIBUS PERFORMANCE

ชาญวุฒิ ไตรนิคม

ทองฉัตร โพธิ์สวัสดิ์

พัชรินทร์ เรืองเนตร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE IMPACT OF BATTERIES WEIGHT DISTRIBUTION ON ELECTRIC  
MINIBUS PERFORMANCE

CHANWUT TRAINIKOM

THONGCHAT POSAWAT

PATCHARINTORN RUEANGNETR

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY

LADKRABANG

2021

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2564

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

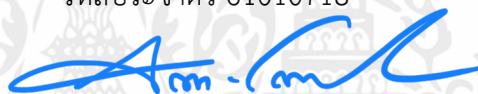
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผลกระทบของการกระจายน้ำหนักของแบตเตอรี่ต่อประสิทธิภาพของรถมินิบัสไฟฟ้า

THE IMPACT OF BATTERIES WEIGHT DISTRIBUTION ON ELECTRIC MINIBUS  
PERFORMANCE

ผู้จัดทำ

1. ชาญวุฒิ ไตรนิคม รหัสประจำตัว 61010235
2. ทองฉัตร โพธิ์สวัสดิ์ รหัสประจำตัว 61010401
3. พัชรินทร์ เรืองเนตร รหัสประจำตัว 61010718



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จินดา เจริญพรพาณิชย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบของการกระจายน้ำหนักของแบตเตอรี่ต่อประสิทธิภาพของรถมินิบัสไฟฟ้า

ชาญวุฒิ ไตรนิคม รหัส 61010235

ทองฉัตร โพธิ์สวัสดิ์ รหัส 61010401

พัชรินทร์ เรืองเนตร รหัส 61010718

ผศ. ดร.จินดา เจริญพรพาณิชย์

ปีการศึกษา 2564

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาถึงเสถียรภาพในการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถโดยสารไฟฟ้าและการวิเคราะห์ทางด้านพลศาสตร์ยานยนต์โดยรูปแบบการจัดวางอุปกรณ์ของรถที่มีผลต่อการกระจายน้ำหนักของรถตามแนวยาว ตามแนวขวาง และตามแนวตั้งของรถโดยสารและทดสอบผลกระทบของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อสมรรถนะทางพลศาสตร์ยานยนต์ขณะเลี้ยวโค้งซึ่งอัตราส่วนการกระจายน้ำหนักของรถแต่ละทิศทางล้วนแล้วแต่มีผลต่อเสถียรภาพของรถโดยสารไฟฟ้า ซึ่งดำเนินการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Altair Hyper Works ขอบเขตของการศึกษา รถต้นแบบรถยนต์โดยสารขนาด 2.5 ตัน จำนวน 15 ที่นั่ง, หาดำแหน่งของการวางแบตเตอรี่ และผลการทดสอบการเลี้ยวที่เหมาะสมของรถยนต์ให้เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 4138, 7401, 3888, 15037-1, 3833, 8855, อัตราส่วนเพลาน้ำหนัก 35:65, 45:55, 50:50, 40:60 และ 60:40 โดยมีเงื่อนไขการทดลอง 2 รูปแบบ จากการศึกษาทราบว่าระดับการเปลี่ยนแปลงมุมล้อขณะเลี้ยวโค้ง มุมลื่นไถลที่จุดศูนย์ถ่วงมวลขณะเลี้ยวโค้ง และอัตราส่วนการหันเหกรณีของหน้าดื้อโค้ง สรุปผลการทดสอบได้ว่าจากระดับการเปลี่ยนแปลงมุมล้อขณะเลี้ยวโค้ง มุมลื่นไถลที่จุดศูนย์ถ่วงมวลขณะเลี้ยวโค้ง และจุดศูนย์ถ่วงมวลอัตราส่วนเพลาน้ำหนัก 35:65 มีค่ามุมลื่นไถลเป็นบวกซึ่งทำให้ตัวรถเกิดการหน้าดื้อโค้งมากที่เหมาะสมกว่าจุดศูนย์ถ่วงมวลอัตราส่วนเพลาน้ำหนัก 45:55 และมีความปลอดภัยต่อยานพาหนะเมื่อมีการจัดวางจุดศูนย์ถ่วงที่ต่างจากเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE IMPACT OF BATTERIES WEIGHT DISTRIBUTION ON ELECTRIC MINIBUS  
PERFORMANCE

Canwut Trainikom 61010235

Thongchat Posawat 61010401

Patcharintorn Rueangnetr 61010718

Asst.Prof.Dr.Chinda Charoenphonphanich

Year 2564

**ABSTRACT**

This research aims to study the stability of motion control of electric buses and analysis of automotive dynamics by means of vehicle device arrangement patterns affecting the longitudinal and transverse weight distribution of the vehicle and vertically of the bus, and tested the effect of parameters on the dynamic performance of the vehicle while cornering, where the weight distribution ratio of the vehicle in each direction all affects the stability of the electric bus. The analysis was performed using the Altair Hyper Works program. Prototype passenger car, size 2.5 tons, 15 seats, find the location of the battery and the proper turning test results of the car are in accordance with ISO 4138, 7401, 3888, 15037-1, 3833, 8855, front axle ratio: rear 35:65, 45:55, 50:50, 40: 60 and 60:40 with two experimental conditions. Understeer gradient, CG slide slip angle and the yaw rate gain the results of the test can be concluded that from Understeer gradient, CG slide slip angle and the yaw rate gain and center of gravity, front axle ratio: rear 35:65 has a positive CG slide slip angle, which gives the car a very stubborn frontal curve that is more suitable than front axle-rear mass ratio and is safe for the vehicle when positioned. Different center of gravity.

**Keywords:** Understeer gradient, Sideslip angle gradient and Yaw rate gain

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี ก็เพราะด้วยความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ เสมอมาอาจารย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จินดา เจริญพรพาณิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาทางวิจัย ซึ่งขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

ขอขอบคุณและขอขอบคุณ ดร.สุธี โอบารุททินันท์ และนายธนกร ตันติพิริยะพงศ์ นักศึกษาปริญญาโท ที่มีส่วนในการให้คำแนะนำแนวคิด ตลอดจน แก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ตลอดจนช่วยเหลือด้านต่าง ๆ ในการทำปริญญานิพนธ์นี้

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุก ๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ชาญวุฒิ ไตรนิคม

ทองฉัตร โพธิ์สวัสดิ์

พัชรินทร์ เรืองเนตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

## หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	2
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ส่วนประกอบของปริญญานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 EV Platform .....	4
2.2 มาตรฐานการวัดคุณภาพรถยนต์.....	4
2.2.1 รถยนต์นั่งส่วนบุคคล พฤติกรรมการขับขี่แบบวงกลมในสภาวะคงที่.....	4
2.2.2 Office machines - Line and Character capacity .....	9
2.2.3 ISO 15037-1 ฉบับที่ 3 มกราคม 2019 ยานพาหนะบนถนน.....	10
2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	10
2.3.1ระบบพิกัดอ้างอิงแบบจำลองการศึกษาพลศาสตร์.....	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2	สัมประสิทธิ์ความเสียหายระหว่างล้อกับพื้นถนน.....	15
2.3.3	พลศาสตร์การเลี้ยวโค้ง.....	17
บทที่ 3 วิธีดำเนินการ.....		23
3.1	ผังการออกแบบ.....	23
3.2	นำโมเดลที่ต้องการทดสอบไปสแกนเป็นไฟล์ surface.....	24
3.3	การประเมินตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วง.....	25
3.3.1	สร้างแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบ.....	25
3.3.2	สร้างแบบเพื่อรับน้ำหนักก่อนส่งไปเพลาลัง.....	26
3.3.3	พิกัดแกนอ้างอิงของแบบจำลองของรถโดยสารไฟฟ้า.....	28
3.4	การประเมินตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงรถโดยสารไฟฟ้า.....	30
3.4.1	การประเมินตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	30
3.4.2	การประเมินตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงด้วยวิธีการทดสอบ.....	30
3.5	การวิเคราะห์แลลจำลองการเลี้ยวโค้งของรถโดยสารไฟฟ้า.....	31
3.5.1	กำหนดค่าพารามิเตอร์.....	31
3.5.2	การแสดงผล.....	31
3.6	การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ยานยนต์.....	33
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....		34
4.1	กล่าวนำ.....	34
4.2	ผลการประเมินตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของรถโดยสารไฟฟ้า.....	34
4.3	ผลการเลี้ยวโค้งของรถโดยสารไฟฟ้า.....	34
4.3.1	ผลกระทบของตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงต่อสมรรถนะทางพลศาสตร์ยานยนต์.....	34
4.3.1.1	ระดับการเปลี่ยนแปลงมุมล้อขณะเลี้ยวโค้ง.....	35
4.3.1.2	มุมลื่นไถลที่จุดศูนย์ถ่วงมวลขณะเลี้ยวโค้ง.....	40
4.3.1.3	อัตราส่วนการหันเห.....	43
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....		47
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	47
5.1.1	ระดับการเปลี่ยนแปลงมุมล้อขณะเลี้ยวโค้ง.....	47
5.1.2	มุมลื่นไถลที่จุดศูนย์ถ่วงมวลขณะเลี้ยวโค้ง.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 อัตราส่วนการเห็นเห.....	47
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	47
บรรณานุกรม.....	49



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบพื้นฐานใน EV Platform.....	9
รูปที่ 2.2 รถโดยสารชั้นเดียว ที่มีที่นั่งไม่เกิน 17 ที่นั่ง รวมทั้งนั่งคนขับด้วย.....	9
รูปที่ 2.3.1 ระบบพิกัดบนรถยนต์ (vehicle coordinate system).....	11
รูปที่ 2.3.2 ตำแหน่งตามแนวยาวของจุดศูนย์ถ่วง.....	11
รูปที่ 2.3.3 ตำแหน่งตามแนวตั้งของจุดศูนย์ถ่วง.....	12
รูปที่ 2.3.4 ตำแหน่งตามแนวขวางของจุดศูนย์ถ่วง.....	12
รูปที่ 2.3.5 แกนอ้างอิงที่ยึดติดไปกับยานยนต์.....	14
รูปที่ 2.3.6 แกนอ้างอิงหลัก (Global coordinate).....	14
รูปที่ 2.3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านข้างกับมุมลื่นไถลด้านข้างของรถ.....	16
รูปที่ 2.3.8 การเลี้ยวจุดศูนย์กลางที่เดียวกัน.....	16
รูปที่ 2.3.9 การเข้าโค้งของรถจักรยาน.....	18
รูปที่ 2.3.10 พฤติกรรมการดื้อโค้งซ้าย และพฤติกรรมการไวโค้งขวา.....	20
รูปที่ 2.3.11 มุมไถลด้านข้างของล้อที่ความเร็วต่ำ.....	21
รูปที่ 2.3.12 มุมไถลด้านข้างของล้อที่ความเร็วสูงยาว.....	21
รูปที่ 3.1 ผังแนวทางการออกแบบ.....	23
รูปที่ 3.2 การทำงาน สแกนจากรถต้นแบบจริงเป็นผิว.....	24
รูปที่ 3.3 โครงสร้างของรถต้นแบบทำให้ได้ออกมาเป็นพื้นผิว.....	25
รูปที่ 3.4 model standard Altair ของล้อหน้าและล้อหลัง.....	25
รูปที่ 3.5 แหนบเพื่อรับน้ำหนักก่อนส่งไปเพลาลัง.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.6 ค่าของ lead Spring eye.....	26
รูปที่ 3.7 Front lead end และ Rear lead end.....	27
รูปที่ 3.8 Shackle center .....	27
รูปที่ 3.9 แหนบที่สมบูรณ์แล้ว.....	27
รูปที่ 3.10 ประกอบรวม แหนบกับเพลาลัง.....	28
รูปที่ 3.11 ภาพเปรียบเทียบระหว่าง ไฟล์ surface กับ model Altair ของล้อหน้า.....	28
รูปที่ 3.12 ภาพเปรียบเทียบระหว่าง ไฟล์ surface กับ model Altair ของล้อหลัง.....	28
รูปที่ 3.13 แสดงค่าพิกัดของ Live axle.....	29
รูปที่ 3.14 แสดงค่าพิกัดของ Solid axle susp with leaf spring (test version) .....	29
รูปที่ 3.15 แสดงค่าพิกัดของ Fmt SLA susp (1 pc. LCA) .....	29
รูปที่ 3.16 แสดงค่าพิกัดของ Rackpin steering.....	30
รูปที่ 3.17 ค่าพารามิเตอร์ของการจำลองสถานการณ์เสมือนจริง.....	32
รูปที่ 3.18 ค่าพารามิเตอร์ของการจำลองสถานการณ์เสมือนจริง.....	32
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมบังคับเลี้ยวที่ล้อขณะเลี้ยวโค้งกับความเร่งด้านข้างตาม มาตรฐาน.....	35
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมบังคับเลี้ยวที่ล้อขณะเลี้ยวโค้งกับความเร่งด้านข้างตามมาตรฐาน ที่มี อัตราส่วนเพลาน้ำ เพลาลัง 35:65 และ 45:55.....	36
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมบังคับเลี้ยวที่ล้อขณะเลี้ยวโค้งกับความเร่งด้านข้างตามมาตรฐาน ณ ตำแหน่ง steady state.....	38
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมบังคับเลี้ยวที่ล้อขณะเลี้ยวโค้งกับความเร่งด้านข้างที่อัตราส่วนเพลาน้ำ: หลัง .....	38

รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมบังคับเลี้ยวที่ล้อยหน้ากับความเร็วที่อัตราส่วนเพลาหน้า:หลัง 35:65 และ 45:55.....	38
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมบังคับเลี้ยวที่ล้อยหน้ากับความเร็วที่อัตราส่วนเพลาหน้า:หลัง 35:65 และ 45:55 ที่ steady state.....	39
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง CG Sideslip Angle กับความเร็วด้านข้างตามมาตรฐาน.....	40
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง CG Sideslip Angle กับความเร็วด้านข้างตามมาตรฐาน ที่ steady state.....	41
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง CG Sideslip Angle กับความเร็วด้านข้าง.....	42
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง CG Sideslip Angle กับความเร็วด้านข้าง.....	43
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง Yaw Rate และ Front Steering Angleตามมาตรฐาน.....	44
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง Yaw Rate และ Front Steering Angleตามมาตรฐาน ที่ steady state.....	44
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง Yaw Rate และ Front Steering Angle ที่สถานการณ์เสมือนจริง.....	45
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง Yaw Rate และ Front Steering Angle ที่สถานการณ์เสมือนจริง steady-state.....	46

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดสอบ .....	5
ตารางที่ 3.1 ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงรถโดยสารไฟฟ้า.....	30
ตารางที่ 3.2 แสดงคุณสมบัติรถยนต์ไฟฟ้า.....	31
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าอัตราส่วนเพลาน้ำ:หลัง Understeer gradient ณ ความเร็วที่เท่ากัน...36-37	
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าอัตราส่วนเพลาน้ำ:หลัง Understeer gradient ณ ความเร็วที่เท่ากัน ตามสถานการณ์จำลองเสมือนจริง.....	39-40
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงค่าอัตราส่วนเพลาน้ำ:หลัง CG sideslip angle ณ ความเร็วที่เท่ากัน.....	41
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่าอัตราส่วนเพลาน้ำ:หลัง CG sideslip angle ณ ความเร็วที่เท่ากันที่ สถานการณ์จำลองเสมือนจริง.....	43
ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงค่าอัตราส่วนเพลาน้ำ:หลัง yaw rate gain ณ ความเร็วที่ เท่ากัน.....	44
ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงค่าอัตราส่วนเพลาน้ำ:หลัง yaw rate gain ณ ความเร็วที่เท่ากัน ที่ สถานการณ์เสมือนจริง.....	46

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเนื่องด้วยเรื่องด้วย EV Platform (Electric Vehicle Connectivity Platform) กำลังเป็นที่นิยม และตอบโจทย์ในหลาย ๆ เรื่อง เช่น เรื่องความคุ้มค่า การรักษาสิ่งแวดล้อม ที่สำคัญภาคธุรกิจมีแนวโน้มในการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้ามากขึ้นเรื่อย ๆ จากการศึกษาของกลุ่มของข้าพเจ้าจึงเลือกต้นแบบเป็น Isuzu D-max 2012 ที่กำลังพัฒนาจากเดิมที่เป็น รถบรรทุก (Truck) ที่ใช้พลังงานเชื้อเพลิง เปลี่ยนไปเป็นรถโดยสารขนาดเล็ก (Mini Bus) ที่ใช้พลังงานไฟฟ้า

ข้อดีของรถพลังงานไฟฟ้าที่เหนือกว่าเครื่องยนต์สันดาปภายในรวมถึงการลดการใช้น้ำมันพิษทางอากาศ เพราะมันไม่ปล่อยไอเสียมาจากท่อไอเสีย ในหลายกรณี การลดแก๊สเรือนกระจกโดยรวมเป็นจำนวนมากและการปล่อยควัน (ขึ้นกับเชื้อเพลิงที่ใช้ผลิตไฟฟ้า) และใช้น้ำมันน้อยลง โดยที่มุ่งเน้นศึกษาถึงเสถียรภาพในการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ โดยสารไฟฟ้า และการวิเคราะห์ทางด้านพลศาสตร์ยานยนต์โดยรูปแบบการจำลองอุปกรณ์ ส่วนควบต่าง ๆ ของรถที่มีผลต่อการกระจายน้ำหนักของรถตามแนวยาว ตามแนวขวาง และตาม แนวตั้งของรถโดยสารซึ่งอัตราส่วนการกระจายน้ำหนักของรถแต่ละทิศทางแล้วแต่มีผลต่อเสถียรภาพของรถโดยสาร รวมทั้งสภาพถนนและการยึดเกาะถนนของล้อยางขณะวิ่งแล้วแต่มี ผลต่อความปลอดภัยผู้โดยสารทั้งสิ้น ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงมีขึ้นเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของการกระจายน้ำหนักของชิ้นส่วนประกอบย่อยภายในรถโดยสารไฟฟ้า สัมประสิทธิ์แรงต้านข้างของล้อและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างพื้นล้อกับพื้นถนน ที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะการเลี้ยวโค้งของรถ โดยสารไฟฟ้า โดยการจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งดำเนินการวิเคราะห์โดยใช้ โปรแกรม Altair Desktop Motion View ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาการควบคุมรถโดยสารไฟฟ้า ให้มีประสิทธิภาพและสร้างเสถียรภาพการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถโดยสารไฟฟ้าให้ดียิ่งขึ้น

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาและรวบรวมข้อมูลในการประเมินตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงรถโดยสารไฟฟ้า ที่มีน้ำหนักไม่เกิน 2.5 ตัน และมีที่นั่งผู้โดยสารรวมคนขับ 15 ที่นั่ง ด้วยวิธีการจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์

2. เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของพารามิเตอร์ทางพลศาสตร์ยานยนต์ของรถโดยสารไฟฟ้า ต่อสมรรถนะการเลี้ยวโค้งโดยการจำลองบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วง (Center of Gravity) เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

gravity), ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านข้างของล้อ (Cornering stiffness), ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างพื้นล้อกับ พื้นถนน (Friction coefficient)

3. หาดำแหน่งของการวางแบตเตอรี่ที่เหมาะสมกับการเคลื่อนที่ของรถยนต์ที่ใช้ทดสอบที่เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 4138, 7401, 3888

### 1.3 ขอบเขตของปริญญาโท

1. ต้นแบบรถยนต์โดยสารขนาด 2.5 ตัน จำนวน 15 คัน

2. หาดำแหน่งของการวางแบตเตอรี่ และผลการทดสอบการเลี้ยวที่เหมาะสมของรถยนต์ให้เป็นไปตามมาตรฐาน ISO 4138, 7401, 3888, 15037-1, 3833, 8855

3. ศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ทางพลศาสตร์ยานยนต์ของรถโดยสารไฟฟ้า ต่อสมรรถนะการเลี้ยวโค้งจาก ตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วง (Center of gravity) โดย คิดทั้งหมด 5 ลักษณะการกระจายการถ่วงน้ำหนัก คือ 35:65, 45:55, 50:50, 40:60 และ 60:40

4. ระยะทางตรงก่อนเข้าโค้ง 100 เมตร รัศมีโค้ง 10 เมตร ที่ความเร็วอยู่ในช่วง 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมงจนถึง 35 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยที่ทำการบันทึกข้อมูลจากการจำลองด้วยโปรแกรมที่ Prediction step size เท่ากับ 0.1 เป็นเวลา 60 วินาที

5. วิเคราะห์สมรรถนะด้านยานยนต์ที่ประกอบด้วย

5.1 ระดับการเปลี่ยนแปลงมุมล้อขณะเลี้ยวโค้ง (Understeer Gradient) จะมีค่าไม่เกิน 3 deg/g

5.2 มุมลื่นไถลด้านข้างของรถ (Sideslip Angle) กรณีการเลี้ยวปกติ มีค่าไม่เกิน 5 degrees และการเลี้ยวโค้งที่จะมีค่าประมาณ 10-12 degrees

5.3 อัตราการเฉย (Yaw Rate) จะมีค่าประมาณ 0.2-0.37 1/s

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถจำลองการเข้าโค้งวัดค่าการโรลเกรเดียนต์ (Roll Gradient) และอาการดีโอโค้ง (Understeer) ของยานพาหนะ ซึ่งเกี่ยวข้องกับการทดสอบเพื่อเพิ่มความปลอดภัยต่อยานพาหนะเมื่อมีการจัดวางจุดศูนย์กลางถ่วงที่ต่างจากเดิม

2. เป็นแนวทางในการพัฒนาผู้ประกอบการรถโดยสารในการออกแบบการจัดวาง อุปกรณ์ในรถโดยสารให้มีประสิทธิภาพสูงสุดก่อนการนำไปผลิตจริง

### 1.5 ส่วนประกอบของปริญญาานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประกอบไปด้วย 5 บทซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

บทที่ 1 บทนำกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของโครงการรวมถึงแนวคิดวัตถุประสงค์และรายละเอียดแบบสรุปของวิทยานิพนธ์เล่มนี้

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกล่าวถึงหลักการทฤษฎีต่าง ๆ เกี่ยวกับการสันเสทือนและการควบคุมรวมถึงปริทัศน์วรรณกรรม

บทที่ 3 กล่าวถึงวิธีการสร้างแบบจำลองและการทดสอบเสถียรภาพการเลี้ยวทางกลศาสตร์ยานยนต์

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการดำเนินงาน อภิปรายและวิเคราะห์การทดสอบเสถียรภาพการเลี้ยวทางกลศาสตร์ยานยนต์

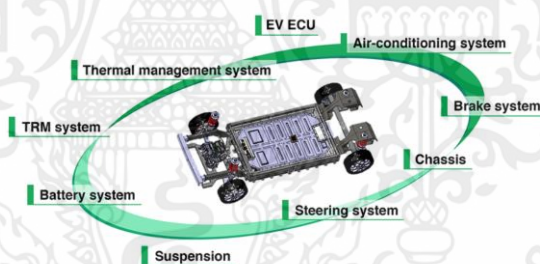
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ

## บทที่ 2

# วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 EV Platform

EV Platform เป็นเฟรมพื้นฐานของยานพาหนะโดยไม่มีหน่วยพลังงาน (เครื่องยนต์หรือมอเตอร์) แอสซีหรือตัวถัง ดังนั้นผู้ผลิตรถยนต์เท่านั้นที่พัฒนาและผลิตแพลตฟอร์มจนถึงขณะนี้ แพลตฟอร์มใด ๆ จะต้องปลอดภัยและเชื่อถือได้และทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบสำคัญที่มีผลต่อกลยุทธ์ของผู้ผลิตรถยนต์ นี่คือเหตุผลที่การสร้างแพลตฟอร์มเกี่ยวข้องกับการใช้ความรู้ระดับสูงและไม่ใช่ง่ายที่จะเข้าสู่ธุรกิจ ในสถานการณ์นั้นผู้ผลิตรถยนต์ที่มีอยู่จะพยายามแยกความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ตามซอฟต์แวร์ที่ใช้โดยไม่ต้องสงสัยแทนที่จะเป็นในการพัฒนาฮาร์ดแวร์ ดังนั้นจึงเป็นเรื่องปกติที่เห็นผู้ผลิตรถยนต์ที่ซื้อแพลตฟอร์มเพื่อแยกความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ตามซอฟต์แวร์ แน่ใจว่าการผลิตแพลตฟอร์มต้องใช้มาตรการที่เป็นไปได้ทั้งหมดเพื่อความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือ ในการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ บริษัท ที่มีอาชีพเริ่มต้นด้วยการพัฒนามอเตอร์สำหรับอุปกรณ์ไอทีและเครื่องใช้ภายในบ้าน



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบพื้นฐานใน EV Platform

(Group, n.d.)

### 2.2 มาตรฐานการวัดคุณภาพรถยนต์ International Organization for Standardization (ISO)

2.2.1 รถยนต์นั่งส่วนบุคคล พฤติกรรมการขับขี่แบบวงกลมในสภาวะคงที่ วิธีทดสอบแบบวงเปิด (ISO 4138)

มาตรฐานนี้ระบุวิธีการทดสอบแบบวงเปิดเพื่อกำหนดพฤติกรรมการขับขี่เป็นวงกลมในสภาวะคงตัวของรถยนต์นั่งส่วนบุคคลตามที่กำหนดไว้ใน ISO 3833 และรถบรรทุกขนาดเล็ก พฤติกรรมดังกล่าวเป็นปัจจัยหนึ่งที่ประกอบด้วยไดนามิกของรถและคุณสมบัติการยึดเกาะถนน การเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขับเคลื่อนแบบ open-loop ที่รวมอยู่ในวิธีการเหล่านี้ไม่ใช่สภาพการขับเคลื่อนที่แท้จริง แต่ก็มีประโยชน์สำหรับการวัดพฤติกรรมของรถซึ่งเป็นผลมาจากอินพุตการควบคุมเฉพาะซึ่งมีหลายประเภท

(1) การเทียบของวิธีการทดสอบ

ลักษณะของสถานะคงที่ที่เสถียรใด ๆ นั้นเป็นอิสระจากวิธีการที่เกิดขึ้น ดังนั้นเพื่อให้ได้ชุดที่ต้องการของสถานะสมดุลคงที่ของความเร็วมุมล้อพวงมาลัย และรัศมีในการเลี้ยว ดังนั้นวิธีการทดสอบรัศมีการเลี้ยวคงที่ (ซึ่งความเร็วจะแตกต่างกันไปและวัดมุมล้อพวงมาลัย) วิธีการทดสอบมุมพวงมาลัยคงที่ (ในความเร็วที่แตกต่างกันและรัศมีจะคำนวณจากตัวแปรของการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ) หรือค่าความเร็วคงที่ วิธีการทดสอบ (ซึ่งรัศมีมีความหลากหลายและมุมล้อพวงมาลัยมีการวัดหรือแตกต่างกันไปและรัศมีที่คำนวณจากตัวแปรของการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ) เงื่อนไขที่มีจะสรุปใน ตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดสอบ

ขั้นตอนการทดสอบ	คงที่ (Constant)		
รัศมีการเลี้ยวคงที่	รัศมี(Radius)	ความเร็วSpeed	มุมเลี้ยวของรถยนต์(Steering-wheel angle)
มุมเลี้ยวของรถยนต์คงที่	มุมเลี้ยวของรถยนต์ (Steering-wheel angle)	ความเร็ว (Speed)	รัศมี(Radius)
ความเร็วคงที่ด้วยรัศมีการเลี้ยวแบบไม่ต่อเนื่อง	ความเร็ว (Speed)	รัศมี(Radius)	มุมเลี้ยวของรถยนต์(Steering-wheel angle)
ความเร็วคงที่ด้วยมุมเลี้ยวของรถยนต์แบบแยก	ความเร็ว (Speed)	มุมเลี้ยวของรถยนต์(Steering-wheel angle)	รัศมี(Radius)

วิธีการทดสอบทั้งสามวิธีจะให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้อง ต้องครอบคลุมการรวมกันของเงื่อนไขที่ ความเร็วและรัศมีคงที่ ยิ่งไปกว่านั้นในหลักการแล้ววิธีการใด ๆ ที่เทียบเท่า

กับกันนี้ สามารถทำได้โดยการพล็อตชุดของผลลัพธ์จากหนึ่งเพื่อสร้างผลลัพธ์จากอีกชุดหนึ่ง

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบที่ดำเนินการด้วยการผสมผสานที่แตกต่างกันของการควบคุมความเร็ว และรัศมีอาจแตกต่างกันเนื่องจากความแตกต่างในกำลังขับเคลื่อนบนถนน, อากาศพลศาสตร์, ค่าความแตกต่างระหว่างมุมเลี้ยวของล้อและทิศทางที่ยางกิ้งตัวไปและมุมเอียงที่มุมพวงมาลัยที่แตกต่างกันไป ฯลฯ นอกจากนี้ยังมีระบบบังคับเลี้ยว ไม่ใช่ระบบเชิงเส้นตรงในยานพาหนะหลายคัน และไม่มีอัตราส่วนพวงมาลัยโดยรวมคงที่ วิธีการในการเร่งความเร็วด้านข้างจะถูกควบคุมโดยการเปลี่ยนความเร็วในที่อื่นจะถูกควบคุมโดยการเปลี่ยนรัศมีการเลี้ยวของรถยนต์ ข้อควรพิจารณาในทางปฏิบัติ เช่น ความร้อนของยางในระหว่างการทดสอบระยะยาวและความล้มเหลวในการรักษาสถานะคงที่จริงก็มีผลต่อผลการทดสอบ

(2) เงื่อนไขการทดสอบ จะต้องเป็นไปตาม ISO 15037-1: 1998 ข้อ 5

(2.1) เงื่อนไขการทดสอบ

○ ทัวไป

ขีดจำกัดและข้อกำหนดสำหรับสภาวะแวดล้อมและสภาวะการทดสอบรถ กำหนดไว้ด้านล่าง ซึ่งต้องคงไว้ซึ่งในระหว่างการทดสอบเฉพาะ การเบี่ยงเบนใด ๆ จะต้องแสดงในรายงานการทดสอบ รวมถึงแผนภาพแต่ละรายการของการนำเสนอผลลัพธ์ สำหรับแต่ละวิธีการทดสอบ สภาวะเฉพาะของการทดสอบและสภาวะที่ไม่อาจรักษาให้คงที่ได้ เช่น ความลึกของดอกยาง จะต้องถูกบันทึกไว้ในรายงานการทดสอบแยก

○ รางทดสอบ

การทดสอบทั้งหมดจะต้องดำเนินการบนพื้นผิวถนนลาดยางที่เรียบ สะอาดแห้ง และสม่ำเสมอ ความลาดเอียงของพื้นผิวทดสอบที่จะใช้ต้องไม่เกิน 2.5 % ในทิศทางใดๆ เมื่อวัดในช่วงระยะห่างใดๆ ระหว่างที่สอดคล้องกับรางรถและ 25 ม. สำหรับการทดสอบแต่ละครั้ง สภาพพื้นผิวถนนและวัสดุปูพื้นจะต้องบันทึกไว้ในรายงานการทดสอบ

○ ความเร็วลม

ความเร็วลมแวดล้อมต้องไม่เกิน 5 เมตร/วินาทีในระหว่างการทดสอบ สำหรับแต่ละวิธีการทดสอบ สภาพภูมิอากาศจะต้องบันทึกไว้ในรายงานการทดสอบ

○ รถทดสอบ

ข้อมูลทั่วไปของรถทดสอบจะต้องนำเสนอในรายงานการทดสอบ สำหรับการเปลี่ยนแปลงข้อกำหนดของรถ เช่น โหลด ข้อมูลทั่วไปจะต้องถูกบันทึกไว้อีกครั้ง

หมายเหตุ เนื่องจากในบางกรณี อุณหภูมิแวดล้อมมีอิทธิพลอย่างมากต่อผลการทดสอบ จึงควรมานำมาพิจารณาเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างยานพาหนะ

ยางรถยนต์สำหรับสภาพทางทั่วไป ยางใหม่จะต้องติดตั้งบนรถทดสอบตามข้อกำหนดของผู้ผลิต หากผู้ผลิตยางไม่ได้ระบุไว้เป็นอย่างอื่น จะต้องวิ่งในระยะทางอย่างน้อย 150 กม. บนรถทดสอบหรือยานพาหนะที่เทียบเท่าโดยไม่ใช้ความรุนแรงมากเกินไป เช่น การเบรก การเร่งความเร็ว การเข้าโค้ง การชนขอบถนน เป็นต้น หลังจากวิ่งใน ต้องบำรุงรักษายางรถยนต์ไว้ที่ตำแหน่งเดียวกันสำหรับการทดสอบยาง ต้องมีความลึกของดอกยางอย่างน้อย 90% ของมูลค่าเดิมตลอดความกว้างทั้งหมดของหน้ายางและรอบเส้นรอบวงทั้งหมดของยาง

ยางจะต้องผลิตก่อนการทดสอบไม่เกินหนึ่งปี วันที่ผลิตจะระบุไว้ในการนำเสนอเงื่อนไขการทดสอบ

ยางจะต้องเติมลมให้มีแรงดันตามที่ผู้ผลิตยางกำหนดสำหรับรูปแบบรถทดสอบ ค่าความคลาดเคลื่อนสำหรับการตั้งค่าแรงดันลมยางเย็นคือ  $\pm 5$  kPa<sup>1</sup> สำหรับแรงดันสูงสุด 250 kPa และ  $\pm 2$  % สำหรับแรงดันที่สูงกว่า 250 kPa

ความดันลมยางและความลึกของดอกยางที่พิจารณาก่อนการอุ่นยางและหลังการวิ่งทดสอบ จะต้องบันทึกไว้ในรายงานการทดสอบ

การทดสอบอาจทำได้ภายใต้สภาวะอื่นๆ นอกเหนือจากสภาพทางทั่วไป รายละเอียดจะระบุไว้ในรายงานการทดสอบ

หมายเหตุ

1. ความกว้างของดอกยางคือความกว้างของส่วนนั้นของดอกยางซึ่งเมื่อลมยางถูกต้องแล้ว จะสัมผัสกับถนนในการขับขี่เป็นเส้นตรงปกติ
2. เนื่องจากความลึกของดอกยางหรือการสึกหรอของดอกยางที่ไม่สม่ำเสมออาจส่งผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญต่อผลการทดสอบ ขอแนะนำให้คำนึงถึงเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างยานพาหนะหรือระหว่างยาง

#### ○ ส่วนประกอบการทำงาน

สำหรับเงื่อนไขการทดสอบมาตรฐาน ส่วนประกอบการทำงานทั้งหมดที่มีแนวโน้มว่าจะส่งผลต่อผลการทดสอบ เช่น สภาวะ การตั้งค่าและอุณหภูมิของใช้คอปสปริง และส่วนประกอบระบบกันสะเทือนอื่น ๆ และรูปทรงของระบบกันสะเทือน ให้เป็นไปตามที่ผู้ผลิตกำหนด การเบี่ยงเบนใด ๆ จากข้อกำหนดของผู้ผลิตจะต้องระบุไว้ในการนำเสนอข้อมูลทั่วไป

#### ○ เงื่อนไขการบรรทุกของรถ

มวลทดสอบต้องอยู่ระหว่างมวลขอบรถทั้งหมด (ISO 1176, รหัส ISO-M06) บวกกับผู้ขับขี่และอุปกรณ์ทดสอบ (มวลรวมไม่ควรเกิน 150 กก.) และมวลรวมสูงสุดที่อนุญาต (ISO 1176, รหัส ISO-M08)

โหลดเพลาสุงสุดที่อนุญาต (ISO 1176, รหัส ISO-M13) ต้องไม่เกินมาตรฐาน ต้องใช้ความระมัดระวังเพื่อสร้างความเป็ยงเบนขั้นต่ำในตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงและในช่วงเวลาของความเฉื่อยเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะการบรรทุกของรถในการใช้งานปกติ (อ้างอิงจาก ISO 2416) ผลลัพธ์ของน้ำหนักล้อที่ได้จะต้องถูกกำหนดและบันทึกไว้ในรายงานการทดสอบ

### (2.2) วิธีการ 1 รัศมีการเลี้ยวคงที่

คำอธิบายวิธีการทดสอบนี้ ต้องขับรถทดสอบด้วยความเร็วหลาย ความเร็วผ่านเส้นทางวงกลมของรัศมีเดิม เส้นทางจะต้องเป็นรัศมีมาตรฐาน แต่อาจใช้รัศมีที่ใหญ่กว่าและเล็กกว่าโดยมีค่าต่ำกว่าที่แนะนำและเป็นค่าต่ำสุด ลักษณะการตอบสนองการควบคุมทิศทางจะถูกกำหนดจากข้อมูลที่ได้รับในขณะที่ขับรถด้วยความเร็วที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่องบนเส้นทาง รัศมีการเลี้ยวคงที่ ขั้นตอนนี้สามารถดำเนินการในพื้นที่ที่ค่อนข้างเล็ก ขั้นตอนนี้สามารถปรับให้เข้ากับสิ่งอำนวยความสะดวกการทดสอบที่มีอยู่โดยเลือกวงกลมหรือเส้นทางของรัศมีที่เหมาะสม บ่อยครั้งที่รัศมีในระนาบถนน จะเพียงพอสำหรับการทดสอบ การทดสอบรัศมีการเลี้ยวคงที่มีอยู่ในสองรูปแบบ ในครั้งแรกยานพาหนะจะถูกขับเคลื่อนบนเส้นทางวงกลมด้วยความเร็วคงที่ไม่ต่อเนื่อง ข้อมูลจะถูกถ่ายเมื่อถึงสถานะคงที่ การทดสอบสามารถเรียกใช้ในเส้นทางที่มีความยาวของรัศมีระดับใด ๆ ที่มีความยาวเพียงพอที่จอยู่ในสถานรัศมีคงที่เป็นเวลาอย่างน้อยระยะเวลาการวัด ในวินาทีที่รถจะยังคงอยู่ในวงกลมที่มีความเร็วเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและเข้าในระหว่างที่ข้อมูลจะถูกนำไปใช้

### (2.3) วิธีที่ 2 ความเร็วคงที่

คำอธิบายวิธีการทดสอบนี้ ต้องใช้การขับชี่ยานพาหนะทดสอบด้วยความเร็วคงที่บนเส้นทางวงกลมของรัศมีที่แตกต่างกันโดยใช้มุมของรัศมีการเลี้ยว ลักษณะการตอบสนองการควบคุมทิศทางจะถูกกำหนดจากข้อมูลที่บันทึกต่อการเร่งความเร็วด้านข้าง วิธีการทดสอบนี้อาจต้องใช้พื้นที่ทดสอบขนาดใหญ่ ขึ้นอยู่กับการรวมกันของความเร็วและการเร่งความเร็วด้านข้าง วิธีการที่ไม่ต่อเนื่องของรัศมีต้องใช้วงกลมที่ทำเครื่องหมายหรือวงกลมที่มีรัศมีที่แตกต่างกันในจำนวนที่เพียงพอเพื่อให้การเร่งความเร็วด้านข้างเพิ่มขึ้นตามความเร็วที่เลือก ควรหยุดการบังคับเลี้ยวเพื่อรักษามุมรัศมีการเลี้ยวที่คงที่ในวิธีการหมุนวง

ล้อแบบไม่ต่อเนื่อง ความเร็วในการทดสอบมาตรฐานคือ หากเลือกความเร็วที่สูงขึ้นหรือต่ำกว่า 20 กม./ชม.

## 2.2.2 Office machines - Line and Character capacity of address masters (iso3883)

มาตรฐานสากลนี้คือข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องกับยานพาหนะบนถนนบางประเภทที่กำหนดตามการออกแบบและลักษณะทางเทคนิคบางอย่างข้อกำหนดนี้ไม่ได้พิจารณาว่ารถยนต์บางประเภทได้รับอนุญาตหรือไม่ในประเทศที่กำหนด ได้แก่ Austria Iran Belgium Italy Brazil Japan Czechoslovakia Mexico France Netherlands Germany New Zealand Hungary Poland Romania South Africa, Rep. of Spain Sweden Turkey United Kingdom

บทบัญญัติของมาตรฐานสากลนี้มีผลบังคับใช้กับทุกยานพาหนะที่ออกแบบมาสำหรับการจราจรทางถนน (ยานยนต์, รถลากจูง, จักรยานยนต์) มาตรฐานสากลนี้ไม่ครอบคลุมถึงยานพาหนะ เช่น รถแทรกเตอร์เพื่อการเกษตร สำหรับการขนส่งบุคคลหรือสินค้าทางถนนหรือสำหรับการลากจูง บนถนน ยานพาหนะที่ใช้สำหรับการขนส่งบุคคลหรือสินค้า

### ข้อกำหนดและคำจำกัดความ

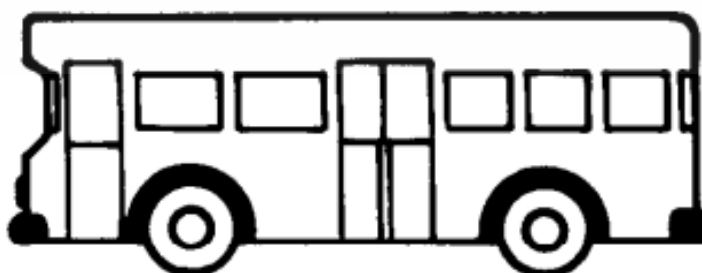
หมายเหตุ ในกรณีที่เกี่ยวข้อง คำที่เกี่ยวข้องตามที่กำหนดไว้ในวรรคที่เหมาะสมของมาตรา 1 ของอนุสัญญาว่าด้วยการจราจรบนถนนของการประชุม UNO ที่จัดขึ้นในกรุงเวียนนาในปี 2511

#### ○ ยานยนต์ (ระยะ p)

1. ยานพาหนะที่ใช้กำลังขับเคลื่อนด้วยกำลังซึ่งมีล้อขึ้นไป) ซึ่งไม่ได้วิ่งบนราง และปกติใช้สำหรับบรรทุกคนและหรือสิ่งของ
2. รถลากที่ใช้ในการขนส่งบุคคลและ/หรือสินค้า
3. บริการพิเศษ

จากข้อมูลด้านบนประกอบไปด้วย

- ก. ยานพาหนะที่เชื่อมต่อกับตัวนำไฟฟ้า เช่น รถเข็น
- ข. รถยนต์สามล้อที่มีน้ำหนักควบคุมรถทั้งหมด เกิน 400 กก.



รูปที่ 2.2 รถโดยสารชั้นเดียว ที่มีที่นั่งไม่เกิน 17 ที่นั่ง รวมทั้งนั่งคนขับด้วย

(Road vehicle - Typer - Terms and definition, 1997)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รถโดยสารประจำทาง ที่ออกแบบและติดตั้งในเมืองและการใช้ในชานเมือง ยานพาหนะประเภทนี้มีที่นั่งและสถานที่สำหรับผู้โดยสารยืน, และช่วยให้ผู้โดยสารสามารถเคลื่อนที่ได้ตามการหยุดบ่อยครั้ง

2.2.3 ISO 15037-1 ฉบับที่ 3 มกราคม 2019 ยานพาหนะบนถนน - วิธีทดสอบพลศาสตร์ของยานพาหนะ

ส่วนที่ 1

○ เงื่อนไขทั่วไปสำหรับรถยนต์

มาตรฐานนี้ระบุเงื่อนไขทั่วไปที่ใช้เมื่อมีการกำหนดคุณสมบัติ ไดนามิก ของยานพาหนะตามวิธีการทดสอบ ISO โดยเฉพาะอย่างยิ่ง จะระบุเงื่อนไขทั่วไปสำหรับตัวแปร

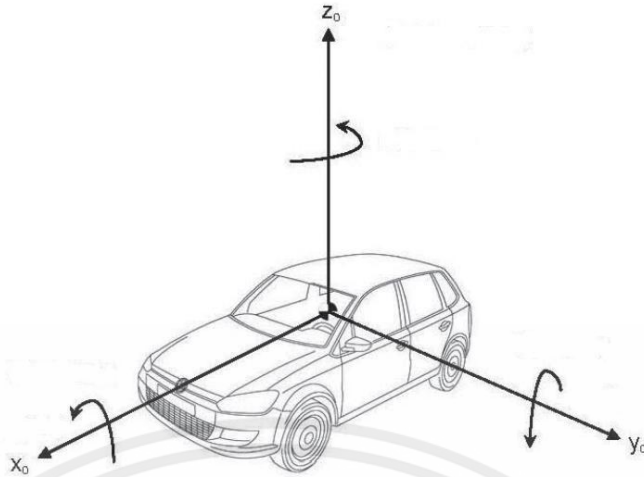
- 1) เครื่องมือวัดและการประมวลผลข้อมูล
- 2) สิ่งแวดล้อม (เส้นทางทดสอบและความเร็วลม)
- 3) การเตรียมรถทดสอบ (การปรับแต่งและการบรรทุก)
- 4) การขับรถเบื้องต้น และรายงานการทดสอบ (ข้อมูลทั่วไปและเงื่อนไขการทดสอบ)

## 2.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

พลศาสตร์ยานยนต์ (vehicle dynamics) เป็นศาสตร์ที่พิจารณาการเคลื่อนที่ของยานยนต์ เน้นศึกษาสาเหตุและปัจจัยที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ โดยคำนึงถึงลักษณะทางกายภาพ และระบบการทำงานของยานยนต์รวมถึงสภาพแวดล้อม การศึกษาในขั้นแรกเน้นให้ความสำคัญกับภาพรวมการเคลื่อนที่ของยานยนต์ โดยรวมระบบย่อยต่าง ๆ ที่มีในยานยนต์ให้เป็นระบบใหญ่หนึ่งระบบ หลังจากนั้นจึงเริ่มพิจารณาความเปลี่ยนแปลงของระบบย่อยต่อไป

พลศาสตร์รถยนต์เป็นแง่มุมที่ผู้ผลิตรถยนต์ โดยเฉพาะวิศวกรผู้ออกแบบให้ความสำคัญมาก เนื่องจาก การเคลื่อนที่ของรถยนต์เป็นตัวชี้วัดที่สำคัญที่แสดงถึงสมรรถนะของรถยนต์ ทั้งยังสื่อถึงความปลอดภัย ความสะดวกสบายของการใช้รถยนต์คันนั้น ๆ ซึ่งผู้ใช้รับรู้ได้ผ่านประสาทสัมผัสและใช้ในการตัดสินใจซื้อรถยนต์

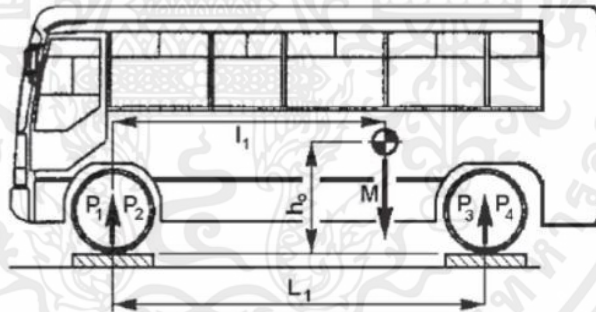
ในส่วนของการวิเคราะห์พลศาสตร์รถยนต์ จะเริ่มจากการระบุระบบพิกัดบนรถ (vehicle coordinate system) (ภาพที่ 1) เพื่อความสะดวกในการคำนวณ โดยนิยามกำหนดจุดเริ่มต้นไว้ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของรถ (Center of Gravity : CG) โดยให้แกน  $x$  ชี้ไปตามความยาวของตัวรถ แกน  $y$  ชี้ไปทางด้านข้างของรถยนต์และแกน  $z$  ชี้ไปทางด้านบน



รูปที่ 2.3.1 ระบบพิกัดบนรถยนต์ (vehicle coordinate system)  
(ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ)

พลศาสตร์รถยนต์สามารถแบ่งศึกษาได้ตามทิศทางการเคลื่อนที่ได้ 3 แบบ ดังนี้

1. พลศาสตร์แนวยาว (Longitudinal Dynamics) พิจารณาเมื่อรถวิ่งในทิศทางตรง (รถเดินทางหน้า หรือถอยหลัง) หรือการเคลื่อนที่ไปตาม แนวแกน x ตัวอย่างการศึกษาในหัวข้อนี้เช่น ความเร็ว สูงสุดที่รถยนต์สามารถวิ่งได้ในแต่ละสภาพแวดล้อม



หาได้จากสมการรูปที่ 2.3.2 ตำแหน่งตามแนวยาวของจุดศูนย์ถ่วง  
(พรหมภักดี, 2560)

$$l_1 = \frac{(P_3 + P_4)L_1}{P_{total}}$$

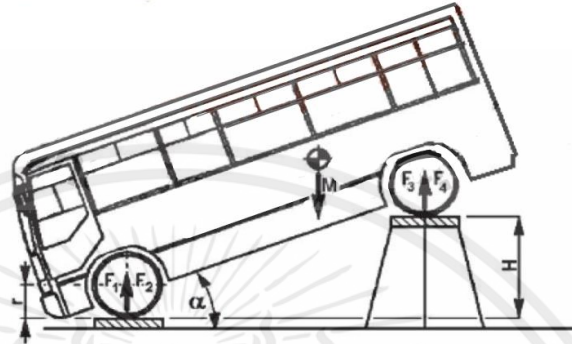
สมการที่ (2.1)

โดยที่	$P_3$	คือน้ำหนักล้อหลังด้านซ้าย
	$P_4$	คือน้ำหนักล้อหลังด้านขวา
	$P_{total}$	คือน้ำหนักรวม
	$L_1$	คือระยะระหว่างล้อหน้ากับล้อหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$l_1$  คือระยะจุดศูนย์ถ่วงจากกึ่งกลางล้อหน้า

- พลศาสตร์แนวตั้ง (Vertical Dynamics) พิจารณาการเคลื่อนที่ขึ้นลงของตัว รถยนต์ หรือการเคลื่อนที่ตามแนวแกน  $z$  โดยทั่วไป จะเกิดขึ้นเมื่อรถยนต์วิ่งผ่านถนนที่มีความขรุขระต่าง ๆ กัน รวมไปถึงการศึกษาการเอียงของตัวรถยนต์ (การหมุน รอบแกน  $x$  และ  $y$ )



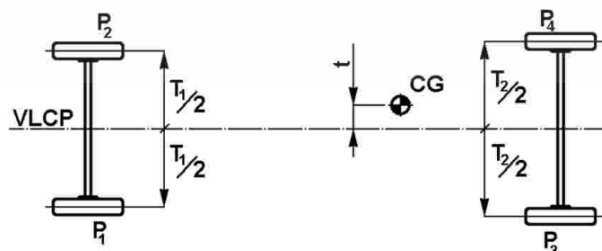
รูปที่ 2.3.3 ตำแหน่งตามแนวตั้งของจุดศูนย์ถ่วง (พรมภักดี, 2560)

$$h = \frac{(Wa - R_4 L_1) \sqrt{L_1^2 - H^2}}{HW} + r$$

สมการที่ (2.2)

- โดยที่
- $W$  คือน้ำหนักทั้งหมดของรถ
  - $a = l_1$  คือระยะจุดศูนย์ถ่วงจากกึ่งกลางล้อหน้า
  - $R_4$  คือน้ำหนักรวมของล้อหลัง
  - $L_1$  คือระยะระหว่างล้อหน้ากับล้อหลัง
  - $H$  คือระยะความสูงขณะยก
  - $r$  คือรัศมีของล้อ

- พลศาสตร์แนวขวาง (Lateral Dynamics) พิจารณาการเคลื่อนที่หมุนรอบแกน  $z$  ที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยว ตัวแปรที่มีผลโดยตรงต่อพลศาสตร์รถยนต์มี จำนวนมากและหลากหลาย



รูปที่ 2.3.4: ตำแหน่งตามแนวขวางของจุดศูนย์ถ่วง (พรมภักดี, 2560)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาได้จากสมการ

$$t = \left( (P_1 - P_2) \frac{T_1}{2} + (P_3 - P_4) \frac{T_2}{2} \right) \left( \frac{1}{P_{total}} \right)$$

สมการที่ (2.3)

โดยที่	$P_1$	คือน้ำหนักล้อหน้าด้านซ้าย
	$P_2$	คือน้ำหนักล้อหน้าด้านขวา
	$P_3$	คือน้ำหนักล้อหลังด้านซ้าย
	$P_4$	คือน้ำหนักล้อหลังด้านขวา
	$P_{total}$	คือน้ำหนักรวม
	$\frac{T_1}{2}$	คือระยะกว้างล้อหน้า
	$\frac{T_2}{2}$	คือระยะกว้างล้อหลัง

ประเภทของพลศาสตร์แนวขวาง (Lateral Dynamics) หากจะจัดหมวดหมู่ ตัวแปรดังกล่าวตามแหล่งที่มา สามารถแบ่งได้เป็น 3 หมวดหลัก คือ

- 1) ลักษณะทางกายภาพ เช่น น้ำหนักรวมของตัวรถ โมเมนต์ความเฉื่อย ตำแหน่งจุดศูนย์กลาง ความกว้างของฐานล้อ ระยะเพลาหน้าถึงเพลาหลัง พื้นที่ผิวของรถที่รับแรงปะทะของลมทั้งทางด้านหน้าและด้านข้าง และชนิดของยางรถยนต์ที่ใช้
- 2) สภาพแวดล้อม เช่น ลักษณะของผิวถนน ที่บ่งบอกถึงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ความลาดชัน ความขรุขระหรือความเรียบของถนนที่มีผลต่อการสั่นสะเทือนของรถ
- 3) ระบบต่าง ๆ ของรถยนต์ที่ส่งผลโดยตรงต่อการเคลื่อนที่ เช่น ระบบขับเคลื่อนของรถยนต์ที่แตกต่างกัน (ขับเคลื่อนด้วยล้อหน้า ล้อหลัง หรือขับเคลื่อนสี่ล้อ) จะส่งผลให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกันไปด้วยหรือระบบกันสะเทือนที่เป็นตัวควบคุมการเคลื่อนที่ขึ้น-ลงของตัวรถ ความหลากหลายของตัวแปรและความซับซ้อนในความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรด้วยตัวเอง ทำให้ต้องมีการสร้างเครื่องมือขึ้นมาเพื่อช่วยในการสร้างความเข้าใจของผลกระทบที่เกิดขึ้นกับภาพรวมของพลศาสตร์ จากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรต่าง ๆ โดยมุ่งหวังให้สามารถคาดการณ์การเคลื่อนที่ของรถยนต์ได้อย่างแม่นยำมากขึ้น
4. การจำลองพลศาสตร์ยานยนต์แบบ 2 มิติ มีการนำไปใช้สำหรับการพัฒนาระบบควบคุมรถอย่างแพร่หลาย เป็นการจำลองโดยที่ให้รถยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ไม่คำนึงถึงการหมุนของรถยนต์รอบแกน X และการหมุนของรถยนต์รอบแกน Y พิจารณาแรงการเคลื่อนที่ที่มีค่าเท่ากัน ทั้งล้อซ้ายและล้อขวา ทำให้สามารถพิจารณาล้อของรถยนต์ที่สถานะต่าง ๆ ได้ การพิจารณาจึงลดเหลือเพียง 2 ล้อจากที่มี 4 ล้อ

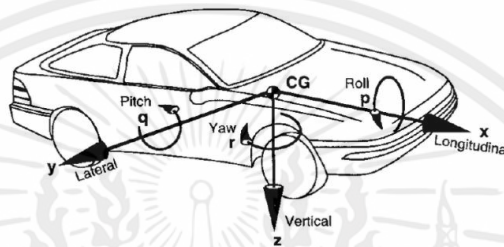
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การคำนวณพลศาสตร์ยานยนต์ 3 มิติ ตัวแปรที่พิจารณาจะมีจำนวนมากขึ้นจากการพิจารณาแบบ 2 มิติ เช่น แรงที่เกิดที่ล้อทั้ง 4 ล้อ ความเร็วและมุมของการเอียงซ้าย ขวา หน้า หลัง โดยจำลองให้รถยนต์วิ่งไปข้างหน้าด้วยความเร็วคงที่ แรงที่เกิดขึ้นที่ล้อของรถยนต์จะมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น มีสัญญาณเข้าเป็นความเร็วของรถยนต์และเป็นมุมเอียงของล้อข้างหน้า

### 2.3.1 ระบบพิกัดแกนอ้างอิงแบบจำลองการศึกษาพลศาสตร์

#### 2.3.1.1 แกนอ้างอิงที่ยึดติดกับรถยนต์ (Body fixed coordinate)

แกนอ้างอิงจะยึดติดกับรถยนต์และเคลื่อนที่ไปด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3.5



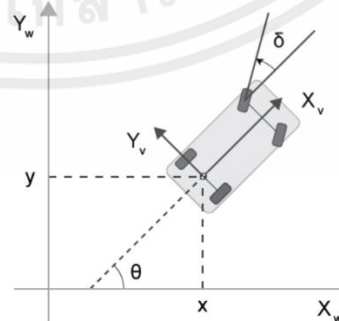
รูปที่ 2.3.5 แกนอ้างอิงที่ยึดติดไปกับยานยนต์

(พรหมภักดี, 2560)

การใช้แกนอ้างอิงรูปแบบนี้จะทำให้คำนวณแรงต่างๆที่เกิดขึ้นกับรถยนต์นั้นง่ายมากขึ้น เช่น การคำนวณแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นกับล้อและพื้นถนน จะคำนวณได้โดยใช้มุมเอียงและความเร็วของล้อในการคำนวณ เป็นต้น

#### 2.3.1.2 แกนอ้างอิงหลัก (Global coordinate)

การคำนวณความเร็วด้านข้าง ความเร็วเชิงมุมรอบแกน Z หรือการคำนวณพฤติกรรมของรถยนต์ ส่วนใหญ่ใช้การคำนวณโดยใช้แกนอ้างอิงที่ยึดติดกับรถยนต์ แต่การพิจารณาเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถยนต์นั้นจะใช้แกนอ้างอิงหลักเพราะเปรียบเทียบให้ผู้สังเกตการณ์คอยสังเกตการเคลื่อนที่ของรถยนต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3.6



รูปที่ 2.3.6 แกนอ้างอิงหลัก Coordinate Systems in Automated Driving

Toolbox - MATLAB & Simulink (mathworks.com)

### 2.3.1.3 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับพลศาสตร์ยานยนต์

แรงต่าง ๆ ที่กระทำต่อรถที่มีผลกระทบต่อเคลื่อนที่ของรถในทางตรงกันข้ามกับแรงที่ทำให้รถเคลื่อนที่ได้แก่

- 1) แรงเสียดทาน เป็นแรงต้านการเร่งของรถยนต์ ซึ่งเกิดจากความขรุขระของผิวถนน หรือแรงต้านทานเนื่องจากการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นขณะที่รถแล่นไปบนทางราบในแนวตรงด้วยอัตราเร่งคงที่ขณะที่ลื่นไปบนผิวทาง ในสภาพพื้นผิวจราจรปกติแรงต้านทานเนื่องจากความชัน เกิดเมื่อรถแล่นขึ้นเนินที่มีความลาดชันจะเกิดแรงต้านระหว่างน้ำหนักของตัวรถและความลาดชันของพื้น
- 2) แรงต้านทานเนื่องจากความโค้งของถนน เมื่อรถแล่นเข้าโค้งจะเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่และเกิดมีแรงหนีศูนย์กลางรวมโอกาสที่จะไถลออกนอกโค้งหรือบางครั้งอาจพลิกคว่ำ ด้วยแรงเหวี่ยงจากศูนย์กลางนี้จะทำให้เกิดโมเมนต์พลิกคว่ำ ซึ่งตรงกันข้ามกับโมเมนต์ทรงตัวรถจะคว่ำ ต่อเมื่อโมเมนต์พลิกคว่ำ มากกว่า โมเมนต์ทรงตัว
- 3) แรงต้านที่ช่วยไม่ให้รถลื่นไถลออกจากผิวทางโค้งคือความฝืดระหว่างล้อกับผิวทางและการสร้างถนนยกระดับช่วยลดปัญหาการไถลออกนอกโค้งและการพลิกคว่ำของรถลงได้แรงที่กระทำต่อรถยนต์จะสมมติให้กระทำจุดศูนย์กลางถ่วงของรถ ยกเว้นแรงเสียดทานที่กระทำที่ล้อและผิวถนน แรงเนื่องจากความเสียดทานนั่นเองทั้งทำให้คนขับสามารถเริ่มต้นหยุดและขับเคลื่อนรถ
- 4) การประเมินจุดศูนย์กลางถ่วงในแนวตั้งโดยใช้หลักการ SSF ในการประเมินตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของรถโดยสารจำเป็นที่จะต้องรู้ระยะความกว้างฐานล้อของรถโดยสารและกำหนดให้ค่า SSF ของรถโดยสารไฟฟ้าพื้นต่ำ มีค่าเท่ากับ 1 ถึง 1.3 ซึ่งหาได้ดังสมการ

$$H_{CG} = \frac{t}{2SSF}$$

สมการที่ (2.4)

$t$  คือระยะความกว้างฐานล้อของรถ

$H_{CG}$  คือระยะความสูงจุดศูนย์กลางถ่วง

### 2.3.2 สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างพื้นล้อกับพื้นถนน

แรงเสียดทาน คือแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัสระหว่างพื้นล้อกับพื้นถนนที่มีทิศทางกันและเมื่อมีการสัมผัสที่ผิวจะเกิดการต้านทานการลื่นไถลของพื้นล้อซึ่งความเสียดทานมีคุณสมบัติเกิดจากน้ำหนักหรือแรงในแนวตั้งฉากที่กระทำกับพื้นสัมผัสและมีคุณสมบัติในส่วนของการเกิดสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและไม่ขึ้นกับความเร็วในการลื่นไถลแรงเสียดทานมี 2 ประเภท ได้แก่แรงเสียดทานสถิต (Static friction) เป็นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นตั้งแต่วัตถุอยู่นิ่งจนกระทั่งวัตถุเริ่มเคลื่อนที่แรงเสียดทานจลน์ (Kinetic friction) เป็นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นขณะวัตถุเคลื่อนที่ด้วย

ความเร็วคงที่ส่วนสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน (Coefficient of friction) เป็นค่าตัวเลขที่แสดงว่าเกิดแรงเสียดทานขึ้นระหว่างผิวสัมผัสระหว่างพื้นลื่นกับพื้นถนนมากน้อยเพียงใด ซึ่งหาได้ดังสมการ

$$\mu = \frac{f}{N}$$

สมการที่ (2.5)

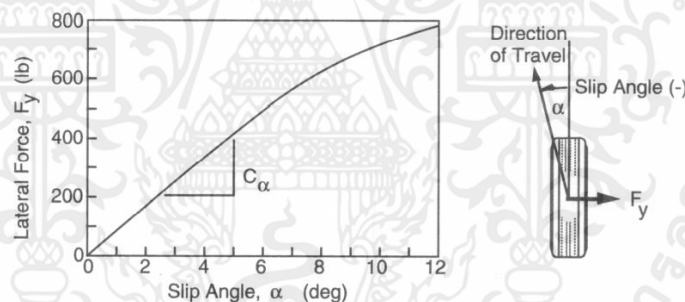
โดยที่  $\mu$  คือสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างพื้นลื่นกับ พื้นถนน

$f$  คือสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน

$N$  คือแรงปฏิกิริยาในแนวตั้งฉาก

### 2.3.2.1 สัมประสิทธิ์แรงต้านข้างของล้อ

สัมประสิทธิ์แรงต้านข้างของล้อคือความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างที่เกิดขึ้นตอนรถเลี้ยวโค้งกับ มุมลื่นไถลของล้อภายใต้เงื่อนไขในการเลี้ยวซึ่งความแรงด้านข้างเกิดจากแรงทางด้านข้างซึ่งจะส่งผลให้เกิดการไถลทางด้านข้างของล้อภายในขณะที่ล้อกำลังกลิ้งหรือเรียกว่ามุมไถลที่ 5 องศาหรือต่ำกว่านั้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ ทางด้านข้างกับมุมไถลจะเป็นแบบเส้นตรง ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังแสดงในรูปที่ 2.3.7



รูปที่ 2.3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านข้างกับมุมลื่นไถลด้านข้างของรถ (Gillespie)

ภายใต้เงื่อนไขในการเลี้ยวซึ่งความแรงด้านข้างเกิดจากแรงทางด้านข้างซึ่งจะส่งผลให้เกิดการไถลทางด้านข้างของล้อภายในขณะที่ล้อกำลังกลิ้งหรือเรียกว่ามุมไถล ที่ 5 องศาหรือต่ำกว่านั้นความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำ ทางด้านข้างกับ มุมไถลจะเป็นแบบเส้นตรง ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$F_y = c_\alpha \alpha$$

สมการที่ (2.6)

โดยที่  $F_y$  คือแรงกระทำทางด้านข้าง

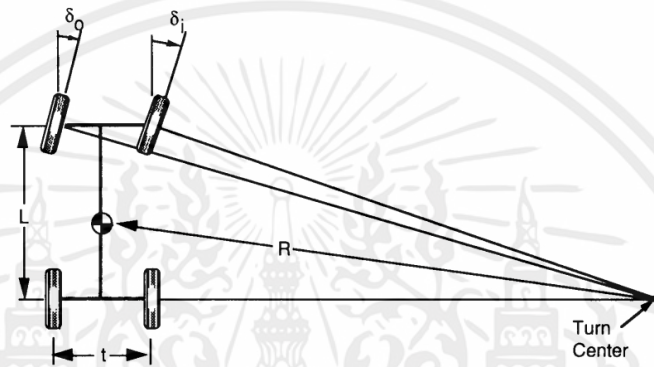
$c_\alpha$  คือค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านข้างของล้อ

$\alpha$  คือมุมไถลของล้อ

2.3.3 พลศาสตร์การเลี้ยวโค้ง

2.3.3.1 รัศมีการเลี้ยว

มุมเลี้ยวล้อด้านหน้าขวาและซ้ายเลี้ยวเป็นมุมที่เท่ากัน คือทั้งสองล้อจะมีรัศมีการเลี้ยวเท่ากัน ทำให้ล้อแต่ละข้างหมุนรอบจุดศูนย์กลางต่างกัน เมื่อเป็นเช่นนี้การเลี้ยวโค้งจะไม่ราบเรียบเนื่องจากการลื่นออกด้านข้างของยางและเพื่อป้องกัน ปัญหานี้เมื่อเลี้ยวโค้งล้อ ด้านในจะมีมุมเลี้ยวมากกว่า ล้อ ด้านนอกเพื่อให้มีจุดศูนย์กลางของรัศมีการเลี้ยวเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3.8



รูปที่ 2.3.8 การเลี้ยวจุดศูนย์กลางที่เดียวกัน

(Gillespie)

สมการคำนวณค่ามุมเลี้ยวที่ความเร็วต่ำ ได้ตั้งสมการที่ (2.7)

$$\delta = \frac{L}{R}$$

สมการที่ (2.7)

สมการคำนวณค่ามุมเลี้ยวที่ความเร็วสูง ได้ตั้งสมการที่ (2.8)

$$\delta = \frac{L}{R} + \alpha_f - \alpha_y$$

สมการที่ (2.8)

โดยที่  $\delta$  คือมุมบิดที่ล้อหน้าของรถ

$L$  คือระยะระหว่างล้อหน้ากับล้อหลัง

$R$  คือรัศมีการโค้ง

$\alpha_f$  คือมุมไถลที่ล้อหน้า

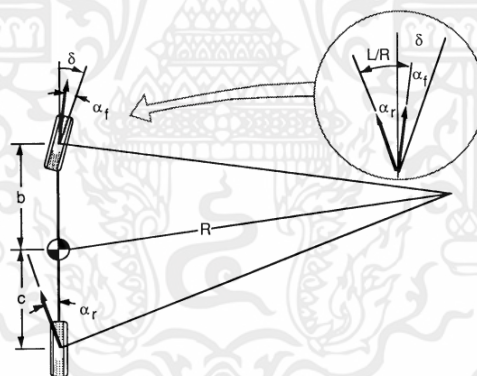
$\alpha_y$  คือมุมไถลที่ล้อหลัง

กลไกการเลี้ยวได้มาจากการประยุกต์ใช้ตามกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน เพื่อให้ง่ายจึงแสดงยวดยานนี้เป็นแบบจำลองของรถจักรยาน หรือแบบจำลอง 2 มิติดังแสดงในรูปที่ 2.37 ที่ความเร็วสูงรัศมีการเลี้ยวจะมากกว่าระยะห่างระหว่างล้อหน้ากับล้อหลังของรถมาก ดังนั้นมีมุมที่เกิดขึ้นจะเป็นมุมที่น้อยมากเพื่อความสะดวกล้อคู่หน้าของรถสามารถแสดงมุมของการบิดพวงมาลัยได้เป็นล้อเดียวเนื่องจากแรงกระทำ ของทั้งสองล้อจะมีขนาดเท่ากันและล้อหลังก็ใช้หลักการเช่นเดียวกันกับล้อหน้า ในขณะที่รถเคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยความเร็วผลแรงที่กระทำทางด้านข้างของล้อจะเท่ากับแรงเหวี่ยงที่เกิดจากความเร่งสู่ศูนย์กลาง (Centripetal acceleration) ขณะที่รถกำลังเคลื่อนที่ ดังสมการที่ (2.9)

$$\Sigma F_y = F_{yf} + F_{yr} = Mv^2 / R$$

สมการที่ (2.9)

โดยที่  $F_{yf}$  คือแรงกระทำทางด้านข้างของเพลาหน้า  
 $F_{yr}$  คือแรงกระทำทางด้านข้างของเพลาหลัง  
 $M$  คือมวลของรถ  
 $v$  คือความเร็วรถ  
 $R$  คือรัศมีโค้ง



รูปที่ 2.3.9 การเข้าโค้งของรถจักรยาน

(Gillespie)

ซึ่งค่า  $Mb / L$  คือมวลของรถเพียงบางส่วนที่ลงเพลาหลังแรงกระทำทางด้านข้างที่กระทำกับเพลาหลังขณะวิ่งจะเป็น  $W_f / g$  คูณอัตราเร่งด้านข้างและเช่นเดียวกันแรงกระทำ ทางด้านข้างที่กระทำ กับ เพลาหน้า  $F_{yf}$  จะเป็น  $W_f / g$  คูณอัตราเร่งด้านข้าง ซึ่งสามารถหามุมโกลที่ล้อหน้าและล้อหลังได้จากแรงกระทำทางด้านข้าง ได้ดังสมการที่ (2.10) และ (2.11)

$$\alpha_f = Wfv^2 / (C_{\alpha_f}gR)$$

สมการที่ (2.10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$\alpha_r = W_r v^2 / (C_{\alpha_r} gR)$$

สมการที่ (2.11)

และเมื่อนำค่า  $\alpha_f$  และ  $\alpha_r$  จากสมการที่ (2.10) และสมการที่ (2.11) มาแทนลงในสมการที่ (2.12) จะได้

$$\delta = 57.3 \left( \frac{L}{R} \right) + \left( \frac{W_f}{C_{\alpha_f}} - \frac{W_r}{C_{\alpha_r}} \right) \left( \frac{v^2}{gR} \right)$$

สมการที่ (2.12)

โดยที่  $\delta$  คือ มุมบิดที่ล้อหน้าของรถ

$L$  คือ ระยะระหว่างล้อหน้ากับล้อหลัง

$v$  คือ ความเร็วรถ

$W_f$  คือ น้ำหนักจากล้อหน้า

$W_r$  คือ น้ำหนักจากล้อหลัง

$C_{\alpha_f}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านข้างของล้อหน้า

$C_{\alpha_r}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านข้างของล้อหลัง

$R$  คือ รัศมีโค้ง

### 2.3.3.2 ระดับการเปลี่ยนแปลงมุมล้อขณะเลี้ยวโค้ง

ระดับการเปลี่ยนแปลงมุมล้อขณะเลี้ยวโค้งหรือที่เรียกว่าค่า  $K$  จะเป็นตัวชี้บ่งถึงพฤติกรรมที่ เกิดขึ้นของรถ ซึ่งจะได้สมการ 2.13

$$k = \frac{n_f}{C_{\alpha_f}} - \frac{w_r}{C_{\alpha_r}}$$

สมการที่ (2.13)

สามารถแบ่งออกเป็น 3 อาการ ดังนี้

1) การเลี้ยวแบบไม่เสียอาการหรือสมดุลการเลี้ยว (Neutral Steer)

$K=0$  หรือ  $\alpha_f = \alpha_r$

เนื่องจากความเร่งแนวต้านข้างที่ทำให้เกิดแรงกระทำด้านข้างที่กระทำที่จุดศูนย์กลาง และเกิดการลื่นไถลของล้อหลังที่ใกล้เคียงกับการลื่นไถลของล้อหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) อาการดื้อโค้ง (Under Steer)

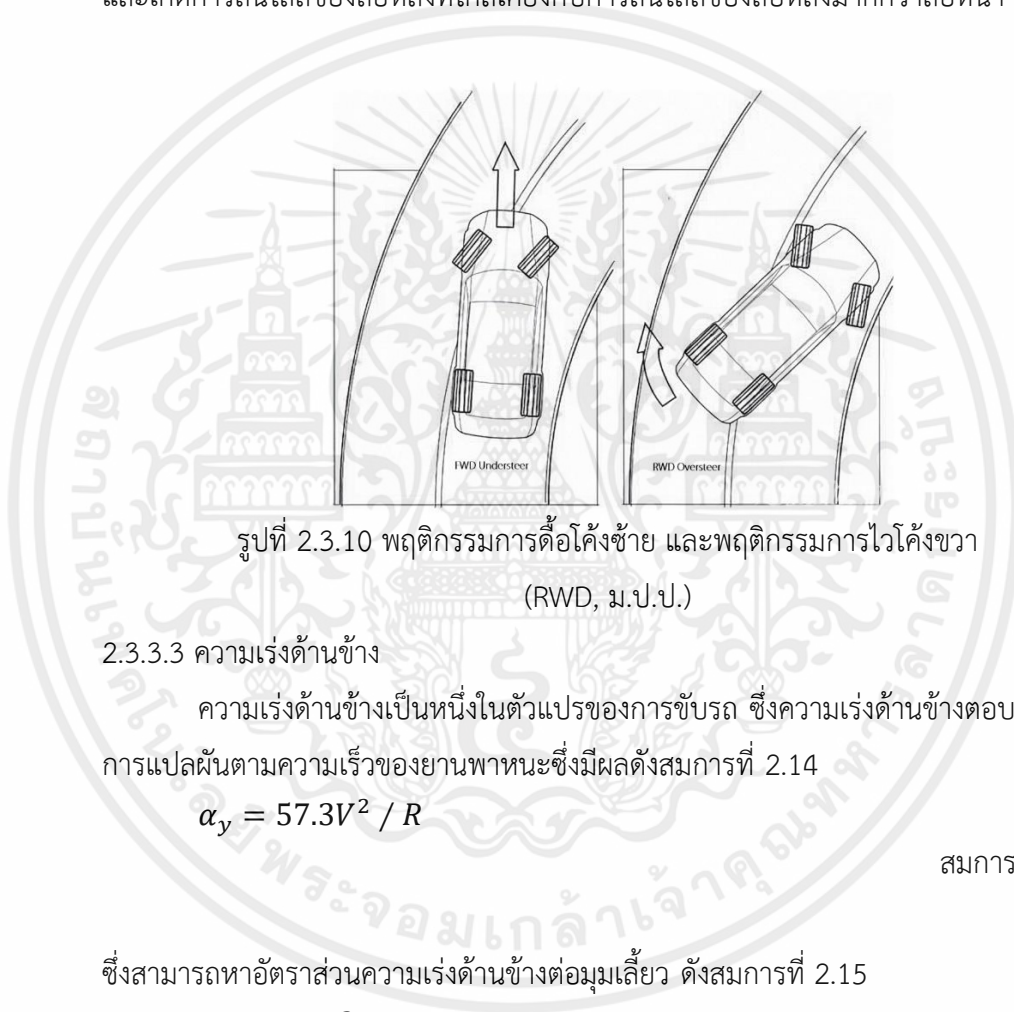
$$K > 0 \text{ หรือ } \alpha_f > \alpha_r$$

เนื่องจากความเร่งแนวด้านข้างที่ทำให้เกิดแรงกระทำด้านข้างที่กระทำที่จุดศูนย์กลางวงและเกิดการลื่นไถลของล้อหลังที่ใกล้เคียงกับการลื่นไถลของหน้าที่มากรกว่าล้อหลัง

## 3) อาการไวโค้ง (Over Steer)

$$K < 0 \text{ หรือ } \alpha_f < \alpha_r$$

เนื่องจากความเร่งแนวด้านข้างที่ทำให้เกิดแรงกระทำด้านข้างที่กระทำที่จุดศูนย์กลางวงและเกิดการลื่นไถลของล้อหลังที่ใกล้เคียงกับการลื่นไถลของล้อหน้ามากกว่าล้อหน้า



รูปที่ 2.3.10 พฤติกรรมการดื้อโค้งซ้าย และพฤติกรรมการไวโค้งขวา (RWD, ม.ป.ป.)

## 2.3.3.3 ความเร่งด้านข้าง

ความเร่งด้านข้างเป็นหนึ่งในตัวแปรของการขับรถ ซึ่งความเร่งด้านข้างตอบสนองต่อการเปลี่ยนตามความเร็วของยานพาหนะซึ่งมีผลดังสมการที่ 2.14

$$\alpha_y = 57.3V^2 / R$$

สมการที่ (2.14)

ซึ่งสามารถหาอัตราส่วนความเร่งด้านข้างต่อมุมเลี้ยว ดังสมการที่ 2.15

$$\frac{\alpha_y}{\delta} = \frac{v^2}{\frac{57.3Lg}{KV^2} \cdot 57.3Lg}$$

สมการที่ (2.15)

## 2.3.3.4 อัตราการเฉ

อัตราการเฉเป็นหนึ่งในตัวแปรของการขับรถ ซึ่งอัตราการเฉตอบสนองต่อการเปลี่ยนตามความเร็วของรถซึ่งมีผลดังสมการที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r = 57.3V / R$$

สมการที่ (2.16)

ซึ่งสามารถหาอัตราส่วนอัตราเฉด ต่อมุมเลี้ยว ดังสมการที่ 2.17

$$\frac{r}{\delta} = \frac{V / L}{1 + \frac{KV^2}{57.3Lg}}$$

สมการที่ (2.17)

### 2.3.3.5 การคำนวณความเร็วสูงสุดขณะเลี้ยวโค้ง

จากการพิจารณาการเคลื่อนที่ของยานยนต์ในทางโค้งที่ทำให้สามารถคำนวณความเร็วสูงสุดที่ไม่ทำให้รถไถลออกนอกโค้ง ดังสมการที่ 2.18

$$v = \sqrt{57.3Lg / K}$$

สมการที่ (2.18)

โดยที่  $v$  คือความเร็วที่ไม่ทำให้รถไถลออกนอกโค้ง

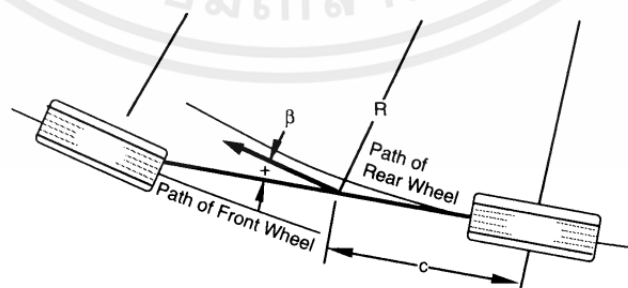
$L$  คือระยะระหว่างล้อหน้ากับล้อหลัง

$g$  คือ Gravity

$K$  คือระดับการเปลี่ยนแปลงมุมล้อขณะเลี้ยวโค้ง

### 2.3.3.6 มุมไถลด้านข้างของล้อ

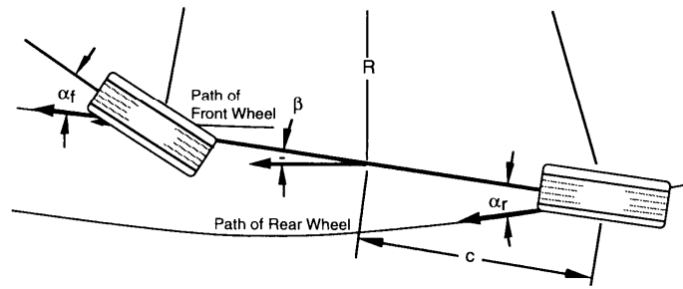
ในขณะที่รถเคลื่อนที่ไปตามโค้งด้วยความเร็วต่ำจะไม่เกิดมุมไถล ซึ่งแตกต่างกับการที่รถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงเนื่องจากจะเกิดมุมลื่นไถลที่ล้อหน้าและเกิดมุมลื่นที่ไถลล้อหลัง ดังแสดงในรูป



รูปที่ 2.3.11 มุมไถลด้านข้างของล้อที่ความเร็วต่ำ

(RWD, ม.ป.ป.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3.12 มุมไถลด้านข้างของล้อที่ความเร็วสูง

(RWD, ม.ป.ป.)

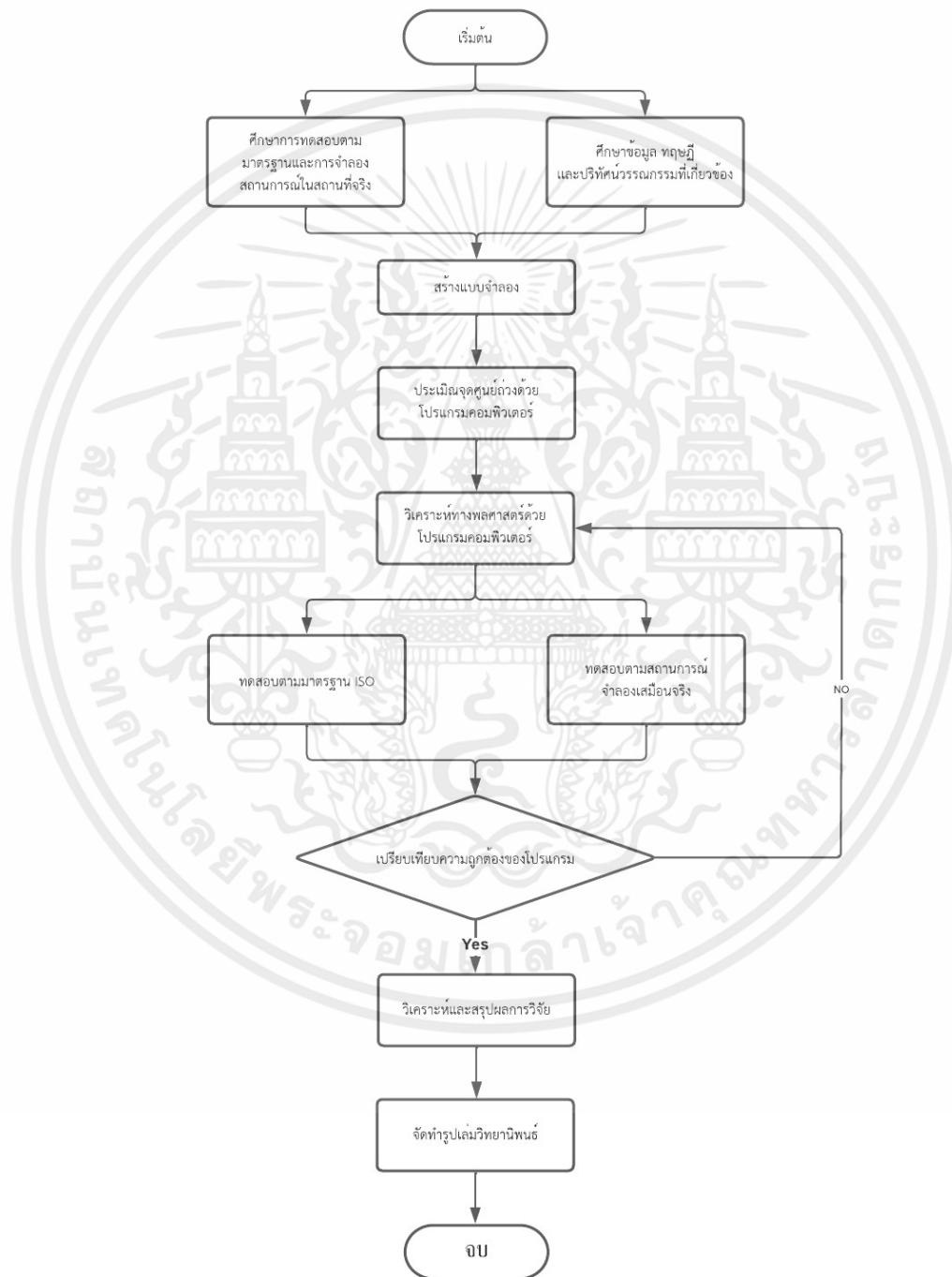


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 ผังการออกแบบ



รูปที่ 3.1 ผังแนวทางการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 นำโมเดลที่ต้องการทดสอบไปสแกนเป็นไฟล์ surface



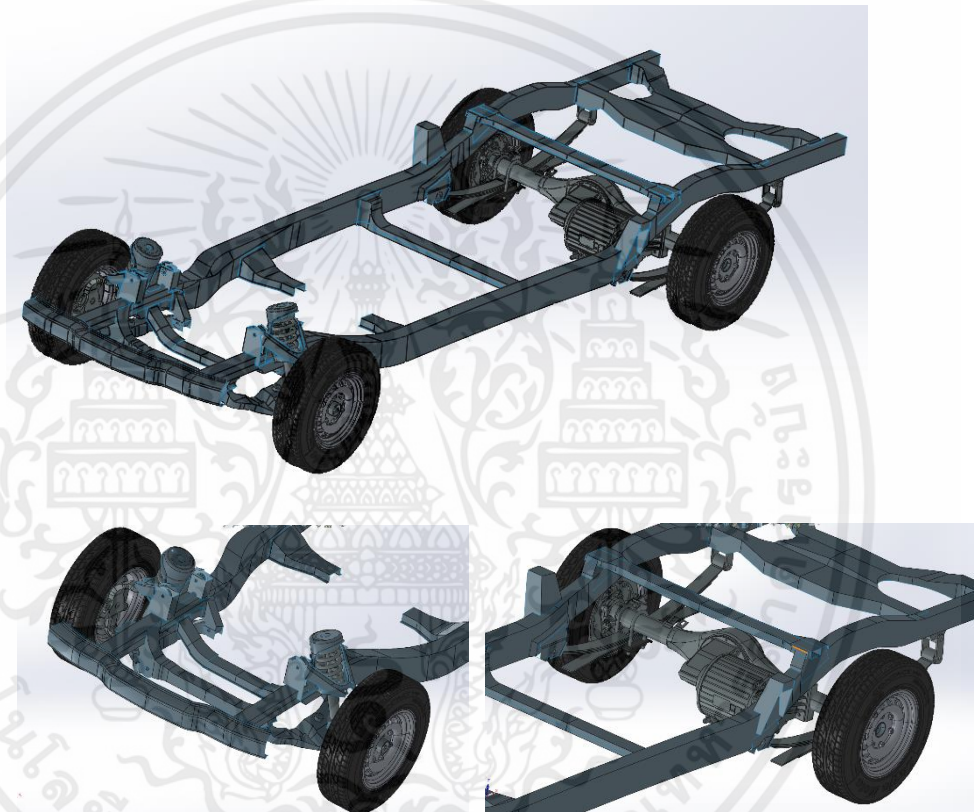
รูปที่ (3.2) การทำงาน สแกนจากรถต้นแบบจริงเป็นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

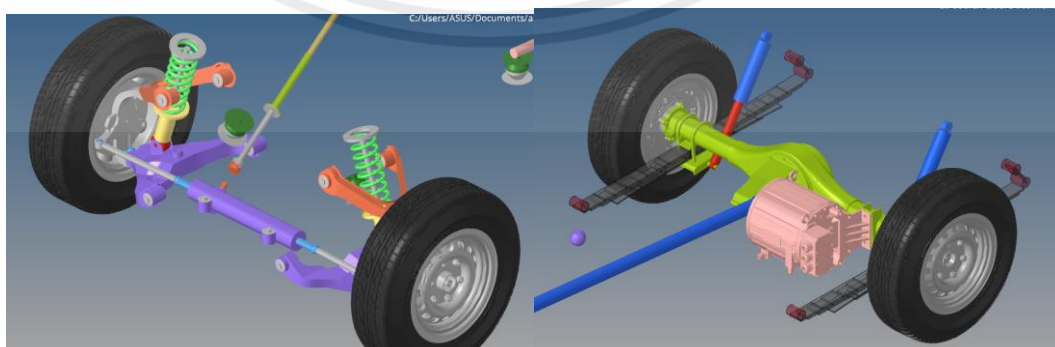
### 3.3 การประเมินตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วง

#### 3.3.1 สร้างแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบ

กำหนดแบบจำลองเรขาคณิตพื้นผิวของรถยนต์ต้นแบบ จากสแกนโครงสร้างของรถต้นแบบทำให้ได้ออกมาเป็นพื้นผิว ดังรูปที่ (3.3) แต่ในการวิเคราะห์พลศาสตร์รถยนต์ต้องวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของรถยนต์ และเก็บค่าจุดพิกัด เพื่อทราบลักษณะทางกายภาพและนำมาปรับใช้กับกับ model standard Altair ดังรูปที่ (3.4)



รูปที่ (3.3) โครงสร้างของรถต้นแบบทำให้ได้ออกมาเป็นพื้นผิว

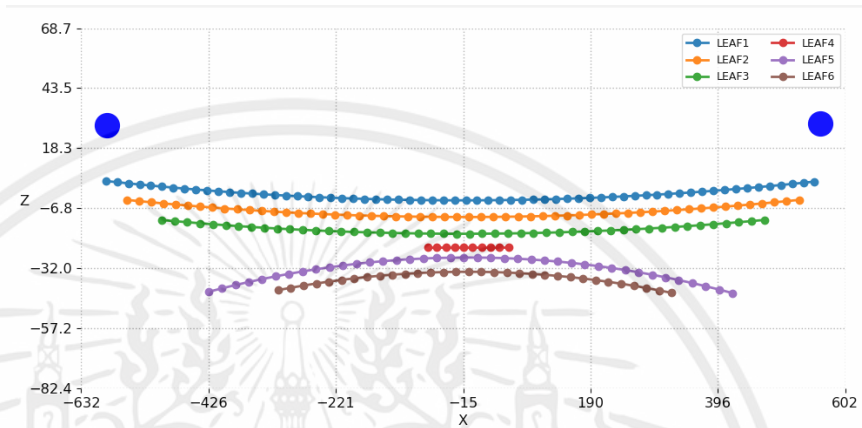


รูปที่ (3.4) model standard Altair ของล้อหน้าและล้อหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 สร้างแหวนเพื่อรับน้ำหนักร่อนส่งไปเพลาล้าง

- กำหนดพิกัดรูปร่างแหวนจำนวน 6 ชั้น โดยที่แหวนชั้นที่ 1 ชนิด Master จำนวน 20 ชั้น แหวนชั้นที่ 2 และ 3 ชนิด Graduate จำนวน 16 และ 14 ตามลำดับ แหวนชั้นที่ 4, 5 และ 6 ชนิด Axillary จำนวน 4, 14 และ 6 ตามลำดับ ดังรูปที่ (3.5)



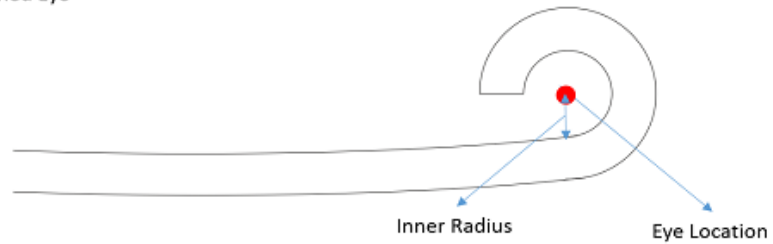
รูปที่ (3.5) แหวนเพื่อรับน้ำหนักร่อนส่งไปเพลาล้าง

- นำจุดแต่ละจุดของแหวนมาเชื่อมติดกัน และนำมากำหนดพิกัด Spring eye แบบ Upturned eye จำนวน 2 ชั้น โดยกำหนดค่าดังรูปที่ (3.6) และแสดงผลดังรูปที่ (3.7)

Leaf End Type: Spring Eye	Type: Upturned
Inner Radius: 20.0	Eye Position: Front
<input type="checkbox"/> Bushing	<input checked="" type="checkbox"/> Spring Eye Location
X: -590.437	Y: 3.5153657081185
Z: 28.024	
Leaf End Type: Spring Eye	Type: Upturned
Inner Radius: 20.0	Eye Position: Rear
<input type="checkbox"/> Bushing	<input checked="" type="checkbox"/> Spring Eye Location
X: 561.52	Y: 3.5153657081185
Z: 28.688	

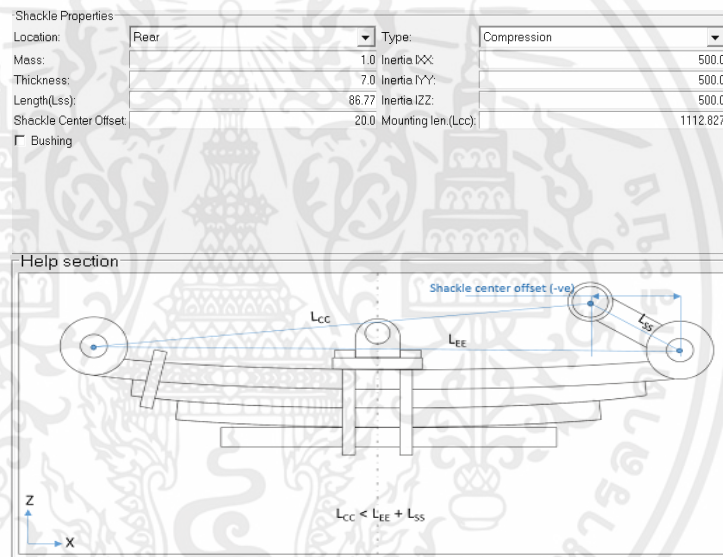
รูปที่ (3.6) ค่าของ lead Spring eye

Upturned Eye

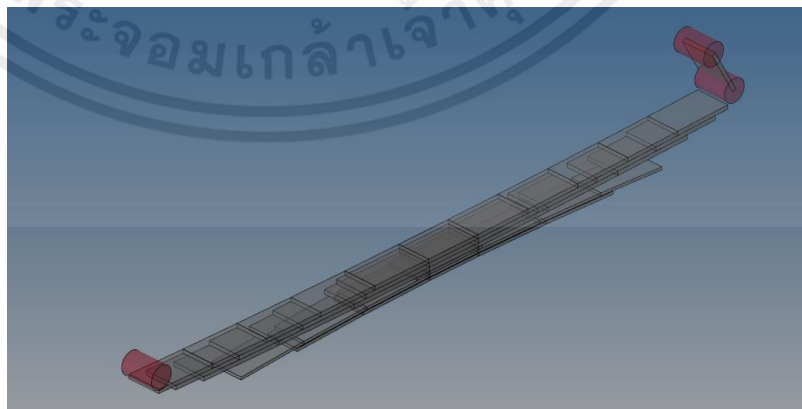


รูปที่ (3.7) Front lead end และ Rear lead end

2. ตั้งค่า Shackle เพื่อให้แหวนเบียดตัวออกขณะรับน้ำหนัก โดยกำหนดค่าดังรูปที่ (3.8) และแสดงผลออกมาดังรูปที่ (3.9) จากนั้นนำเข้า model standard Altair จากนั้นจะเห็นได้เลยว่าแหวนมีความแตกต่างไปจากเดิม แสดงการเปรียบเทียบ ดังรูปที่ (3.10)

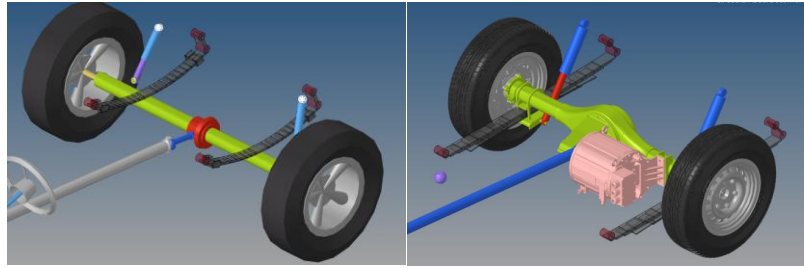


รูปที่ (3.8) Shackle center



รูปที่ (3.9) แหวนที่สมบูรณ์แล้ว

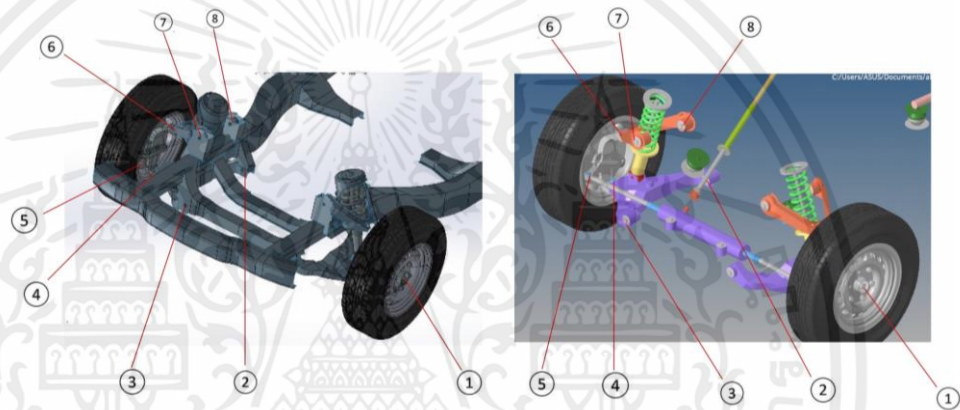
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



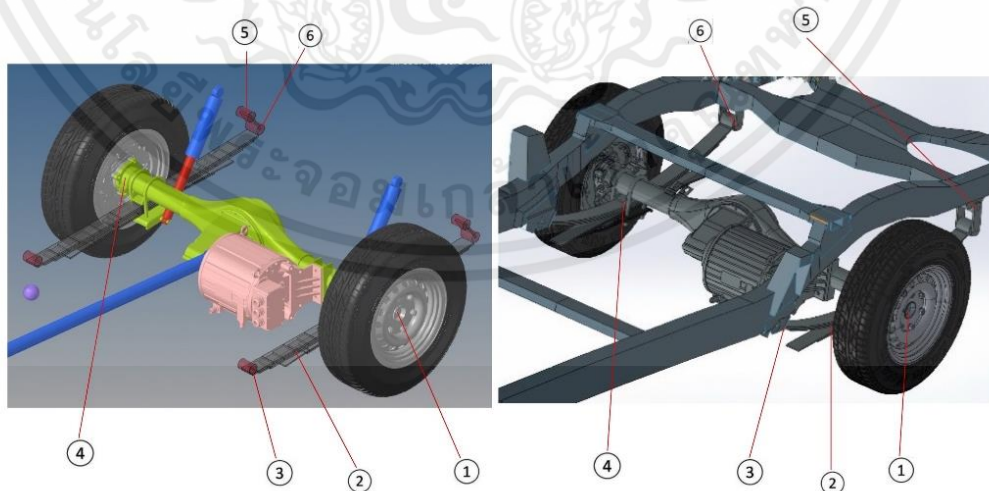
รูปที่ (3.10) ประกอบรวม แหนบกับเพลาลัง

### 3.3.3 นำส่วนประกอบทั้งรวมกัน

ทำการศึกษาและเก็บข้อมูลของชิ้นส่วนย่อยต่าง ๆ นำมาประกอบเป็นโมเดลสำหรับการทดสอบต่อไป



รูปที่ (3.11) ภาพเปรียบเทียบระหว่าง ไฟล์ surface กับ model Altair ของล้อหน้า



รูปที่ (3.12) ภาพเปรียบเทียบระหว่าง ไฟล์ surface กับ model Altair ของล้อหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.4 พิกัดแกนอ้างอิงของแบบจำลองของรถโดยสารไฟฟ้า

เมื่อทำการประกอบชิ้นส่วนของรถไฟฟ้าครบถ้วน จำเป็นต้องกำหนดพิกัดแกนอ้างอิงหลัก

Live axle							
Carrier cg	4039.446	7.000	999.326				
Carrier to Case	4039.446	-49.500	999.326				
Pinion Center	3973.446	0.000	1005.126				
Pinion CG	3898.746	0.000	1011.626				
Driveshaft rear - ujoint	3824.046	0.000	1018.126				
Output Shaft to Carrier	4039.446	-50.000	999.326	<input checked="" type="checkbox"/>	Symmetric	Symmetric	Symmetric
Axle shaft CG	4039.446	-382.800	999.326	<input type="checkbox"/>	4039.446	382.800	999.326

รูปที่ (3.13) แสดงค่าพิกัดของ Live axle

Solid axle susp with leaf spr (test version)			
Spring attachment - front	3350.000	-350.000	1025.000
Spring attachment - rear	4050.000	-350.000	1025.000
Shackle attachment	4020.000	-350.000	1105.000
Wheel center	4039.446	-715.600	999.326
Axle align	4039.446	-615.600	999.326
Wheel CG	4039.446	-715.600	999.326
Kingpin Orient	4039.446	-715.600	1009.326
Axle CG	4039.446	0.000	999.326
Leaf ref. marker loc.	4042.845	-555.400	951.704
Shock upr bush	3875.000	-450.000	1275.000
Shock lwr bush	3775.000	-500.000	1025.000
maker_orient	4041.364	-555.400	971.649
Enigne_CG	3825.912	-210.887	999.349
engine_fix_p1	3825.912	-34.000	999.349
engine_fix_p2	3982.457	-385.500	944.329
engine_fix_p3	3982.457	-385.500	1054.329
Damper_lwr_pt	4043.368	-459.445	893.080
Damper_lwr_orient_pt	4043.360	-443.385	893.069
Damper_lwr_CG	4117.195	-460.145	1008.856
Damper_upper_pt	4317.141	-462.043	1322.410
Damper_upper_orient_pt	4317.181	-444.268	1322.472
Damper_upper_CG	4243.621	-461.345	1207.116

รูปที่(3.14) แสดงค่าพิกัดของ Solid axle susp with leaf spring (test version)

Fmt SLA susp (1 pc. LCA)			
Wheel CG	1000.000	-730.143	1000.000
Wheel center	1000.000	-730.143	1000.000
Spindle align	1000.000	-630.143	1000.000
Knuckle CG	1000.000	-660.143	1000.000
Lwr ball jt	994.653	-645.020	902.576
Upr ball jt	1002.961	-585.000	1155.000
Otr tierod ball jt	874.003	-664.557	972.536
LCA CG	1007.686	-523.228	941.109
LCA frnt bush	754.704	-299.218	976.853
LCA rear bush	1205.141	-292.229	982.008
UCA CG	1002.961	-585.000	1155.000
UCA frnt bush	884.878	-367.227	1257.725
UCA rear bush	1140.062	-369.090	1228.564
Spring upr	999.190	-394.491	1384.164
Spring lwr	1004.296	-471.843	1141.232
Shock upr bush	1043.040	-458.530	1195.890
Shock lwr bush	1043.040	-458.530	915.890
Spr lwr bodyCG	1005.991	-497.536	1061.171
Spr knuckle joint	1007.686	-523.228	981.109
Spr knuckle joint orient	1025.166	-524.291	981.698

รูปที่ (3.15) แสดงค่าพิกัดของ Fmt SLA susp (1 pc. LCA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rackpin steering			
Inrtierod ball jt	874.003	-310.000	980.000
Tierod CG	874.003	-487.279	976.268
Rack CG	874.003	0.000	980.000
Center of Pinion	884.003	155.000	965.000
Upper Input Shaft	1009.003	185.000	1030.000
Upper Pinion	946.503	170.000	997.500
Pinion CG	915.253	162.500	981.250
Rack housing CG	874.003	0.000	980.000
Rack housing end	874.003	-235.000	980.000
Rack housing mount	829.003	-145.000	980.000
Rack housing axial	829.003	-145.000	1080.000
Rack housing radial	929.003	-145.000	980.000

รูปที่ (3.16) แสดงค่าพิกัดของ Rackpin steering

### 3.4 การประเมินตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงรถโดยสารไฟฟ้า

#### 3.4.1 การประเมินตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การประเมินตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของรถโดยสารไฟฟ้า นั้นในงานวิจัยนี้ได้ใช้การประเมินตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงรถโดยสารไฟฟ้า ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Altair Hyper Works

##### 3.4.1.1 ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของรถโดยสารไฟฟ้า

ในการประเมินจุดศูนย์ถ่วงของรถโดยสารไฟฟ้า โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วย สามารถทราบตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงได้จากหน้าตาคุณสมบัติ น้ำหนัก ซึ่งสามารถดูค่าผลลัพธ์ของตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงตามแนวยาว ตามแนวขวาง และตามแนวตั้ง โดยแบ่งเป็น 3 ชนิดการทดสอบ ดังตารางที่ (3.1)

ตารางที่ (3.1) ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงรถโดยสารไฟฟ้า

อัตราส่วนเพลาล้อหน้า:หลัง	Total mass (kg)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
35:65	1937.7	1965	-21.1	1138.95
40:60	1937.7	2150	-21.1	1138.95
45:55	1937.7	2335	-21.1	1138.95
50:50	1937.7	2520	-21.1	1138.95
60:40	1937.7	2890	-21.1	1138.95

#### 3.4.2 การประเมินตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงด้วยวิธีการทดสอบ

ในการประเมินตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงรถโดยสารไฟฟ้าด้วยการทดสอบ ในการทดสอบจะทำการวัดน้ำหนักที่เพลาล้อหน้าและเพลาล้อหลังของแต่ละล้อ และทำการคำนวณเพื่อประเมิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของรถโดยสารไฟฟ้า ในการประเมินตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงด้วยวิธีคำนวณ จำเป็นที่จะต้องทราบคุณสมบัติของรถโดยสารไฟฟ้า เช่น ระยะฐานล้อและความกว้างช่วงล้อซึ่งวิธีนี้จะทำให้ได้ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงในแนวยาวและแนวขวางของตัวรถ แต่ความสูงของตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วง ซึ่งจะทำให้ได้ค่าความสูงตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของรถโดยสารไฟฟ้า

ตารางที่ (3.2) แสดงคุณสมบัติรถยนต์ไฟฟ้า

แบบ	รายละเอียด
น้ำหนักรวมสูงสุดที่รับได้ (GVW)	2500 กิโลกรัม
น้ำหนักรวม (Total Weight)	1937.7 กิโลกรัม
ระยะฐานล้อ (Wheel base)	3039.446 มิลลิเมตร (3.039 เมตร)
ฐานความกว้าง (Track width)	1460.28 มิลลิเมตร (1.46 เมตร)
น้ำหนักที่ลงแต่ละล้อ	480 กิโลกรัม
ล้อยาง	205/60 R15

### 3.5 การวิเคราะห์แลลงการเลี้ยวโค้งของรถโดยสารไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์แบบจำลองการเลี้ยวโค้งของรถโดยสารไฟฟ้าพื้นต่ำในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Altair Hyper Works ในการวิเคราะห์แบบจำลองของรถโดยสารไฟฟ้า ซึ่งในการวิเคราะห์การเลี้ยวโค้งของรถโดยสารไฟฟ้า ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วย ประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอนหลักดังนี้ แบบจำลองในการวิเคราะห์ กำหนดค่าพารามิเตอร์ กำหนดเงื่อนไขขอบเขตการวิเคราะห์และการแสดงผล

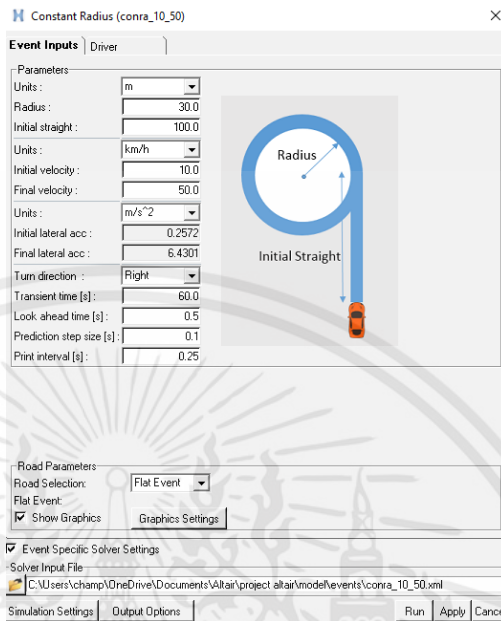
#### 3.5.1 กำหนดค่าพารามิเตอร์

ในขั้นตอนนี้เป็นการกำหนดค่าพารามิเตอร์เพื่อให้แบบจำลองเป็นไปตามคุณสมบัติของรถโดยสารไฟฟ้าแสดงคุณสมบัติของรถโดยสารไฟฟ้า ซึ่งรายการที่จำเป็นต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ใหม่ มีดังนี้ การปรับระยะฐานล้อตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงน้ำหนักของรถโดยสารไฟฟ้า เรขาคณิตและลักษณะทางกายภาพของรถโดยสารไฟฟ้า

#### 3.5.2 กำหนดเงื่อนไขขอบเขตการวิเคราะห์

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการวิเคราะห์ในแบบจำลองรถโดยสารไฟฟ้า ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเลี้ยวโค้งแบบรัศมีคงที่ของรถโดยสารไฟฟ้า ที่ระยะทางตรงก่อนเข้าโค้ง 500 เมตร รัศมีโค้ง 30 เมตร ที่ความเร็วอยู่ในช่วง 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมงจนถึง 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยที่ทำการบันทึกข้อมูลจากการจำลองด้วยโปรแกรมที่ Prediction step size เท่ากับ 0.1 เป็นเวลา 60 วินาที

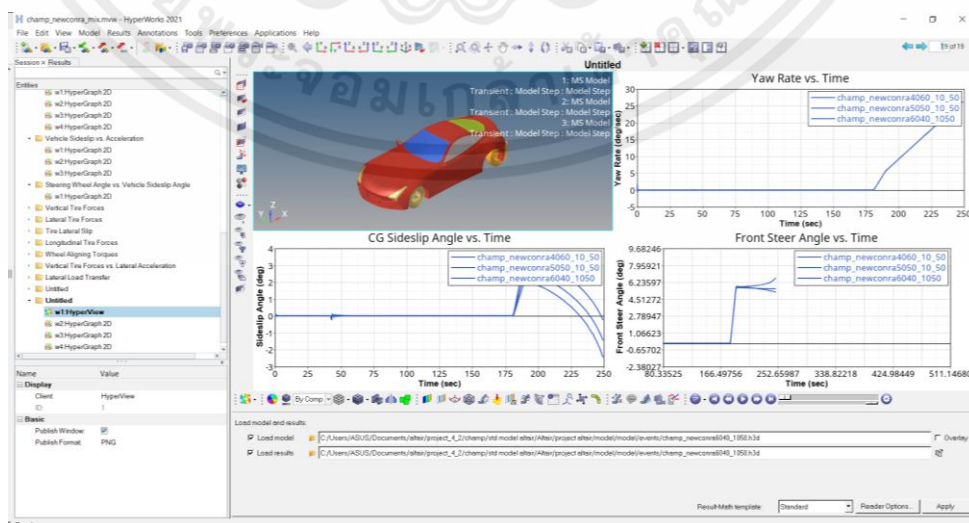
และที่ระยะทางตรงก่อนเข้าโค้ง 100 เมตร รัศมีโค้ง 10 เมตร ที่ความเร็วอยู่ในช่วง 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมงจนถึง 35 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยที่ทำการบันทึกข้อมูลจากการจำลองด้วยโปรแกรมที่ Prediction step size เท่ากับ 0.1 เป็นเวลา 60 วินาที ดังรูปที่ (3.17)



รูปที่ (3.17) ค่าพารามิเตอร์ของการจำลองสถานการณ์เสมือนจริง

### 3.5.3 การแสดงผล

จากการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตการวิเคราะห์จะเป็นขั้นตอนการประมวลผลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งขั้นตอนนี้จะเป็นการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์และเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการประมวลผลจะทำให้ได้ค่าผลลัพธ์จากการจำลองการเลี้ยวโค้งของรถโดยสารไฟฟ้าพื้นต่ำ ในส่วนนี้สามารถบันทึกผลลัพธ์ตามที่ขอบเขตเงื่อนไขของงานวิจัยที่ศึกษา ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค่าผลลัพธ์ดังนี้ Understeer gradient ,Yaw rate gain ,CG sideslip angle ดังแสดงในรูปที่ (3.18)



รูปที่ (3.18) ค่าพารามิเตอร์ของการจำลองสถานการณ์เสมือนจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมช่วยวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ยานยนต์

#### 3.6.1 โปรแกรมวัดค่าจากการทดสอบ

- 1) เชื่อมต่ออุปกรณ์วัดค่าพารามิเตอร์ทางพลศาสตร์ยานยนต์กับโปรแกรม Altair Hyper Works บนคอมพิวเตอร์ วัดค่าพารามิเตอร์ทางพลศาสตร์ยานยนต์
- 2) กำหนดข้อมูลพารามิเตอร์ที่ต้องการจะบันทึกจากการทดสอบการเลี้ยวโค้งของรถโดยสารไฟฟ้า ด้วยโปรแกรม Altair Hyper Works



## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

#### 4.1 กล่าวนำ

ในบทนี้เป็นการนำเสนอผลการวิจัยการจำลองทางด้านพลศาสตร์การเลี้ยวโค้งของรถโดยสารไฟฟ้าภายใต้สภาวะการเลี้ยวโค้งด้วยเงื่อนไขที่มีความโค้งคงที่ด้วยโปรแกรม Altair Hyper Works ซึ่งผลการศึกษสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

1. ส่วนแรกเป็นผลการศึกษาประเมินหาตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของรถโดยสารไฟฟ้าด้วยวิธีการวิเคราะห์บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบเพื่อประเมินหาตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วง
2. ผลการศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อสมรรถนะทางพลศาสตร์ยานยนต์ขณะเลี้ยวโค้ง โดยมีการจำลองสถานการณ์ ทั้งหมด 2 รูปแบบ พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลตอบสนองความไวต่อค่าระดับการเปลี่ยนแปลงมุมล้อขณะเลี้ยวโค้ง
3. การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมจำลองทางด้านพลศาสตร์ยานยนต์

#### 4.2 ผลการประเมินตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของรถโดยสารไฟฟ้า

ค่าผลลัพธ์การประเมินตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงรถโดยสารไฟฟ้า จากวิธีวิเคราะห์ ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งจะเป็นค่าเทียบตำแหน่งแกนอ้างอิงหลักของยานยนต์และจะได้ค่าตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงรถโดยสารไฟฟ้า ดังตารางที่ (3.1)

#### 4.3 ผลการเลี้ยวโค้งของรถโดยสารไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์การจำลองการเลี้ยวโค้งของรถโดยสารไฟฟ้า มีความจำเป็นที่ต้องทราบถึงมุมเลี้ยวของล้อหน้าตามรัศมีเลี้ยวโค้งที่ความเร็วต่ำ ที่ไม่ทำให้เกิดการลื่นไถลของล้อเพื่อสามารถนำไปประเมินพฤติกรรมที่ได้ซึ่งการเลี้ยวของรถด้วยความเร็วต่ำ จะขึ้นอยู่กับมุมบิดที่ล้อหน้าของรถ ระยะห่างระหว่างล้อหน้ากับล้อหลังและรัศมีโค้ง ซึ่งสามารถคำนวณมุมเลี้ยวของรถโดยสารไฟฟ้าที่ความเร็วต่ำ ได้ดังทฤษฎีการคำนวณรัศมีการเลี้ยวโค้งซึ่งจะทำให้การเลี้ยวโค้งแบบสภาวะ ดังสมการที่ (4.1)

$$\delta = 57.3 \frac{L}{R} \gg (57.3) \frac{6.5m}{50m} \gg 7.45 \text{ degree}$$

สมการที่ (4.1)

ในขณะที่รถเคลื่อนที่ตามโค้งด้วยความเร็วต่ำรัศมี 30 เมตร มุมเลี้ยวล้อหน้ามีค่าเท่ากับ 5.80 องศา ทำให้ไม่เกิดการลื่นไถล ถ้ามีความเร็วสูงเพิ่มขึ้น จะแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

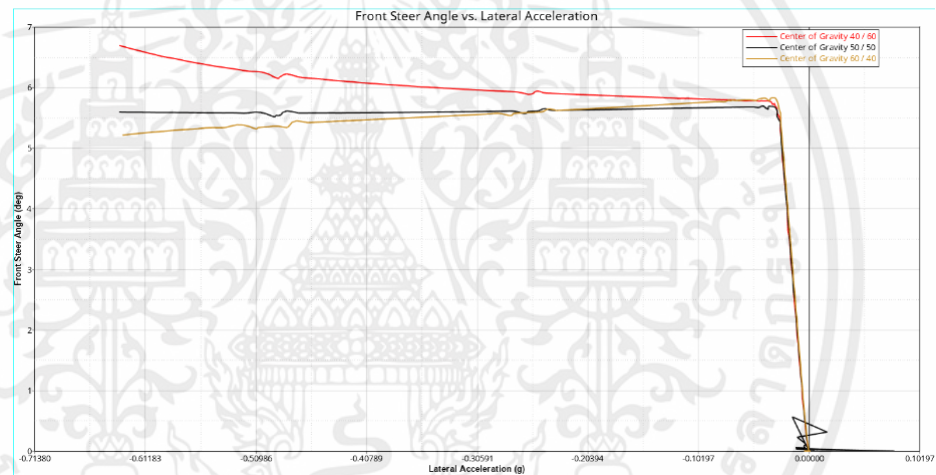
##### 4.3.1 ผลกระทบของตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงต่อสมรรถนะทางพลศาสตร์ยานยนต์

จุดศูนย์ถ่วงเป็นตัวแปรที่มีความสำคัญต่อพฤติกรรมขณะเลี้ยวโค้ง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงขึ้นอยู่กับการจัดวางตำแหน่งของอุปกรณ์ในรถ วิธีการทดสอบได้สัดส่วนการกระจายน้ำหนักในแนวยาว ดังตารางที่ (3.1) เพื่อทำให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ทางพลศาสตร์การเลี้ยวโค้ง

#### 4.3.1.1 ระดับการเปลี่ยนแปลงมุมล้อยขณะเลี้ยวโค้ง

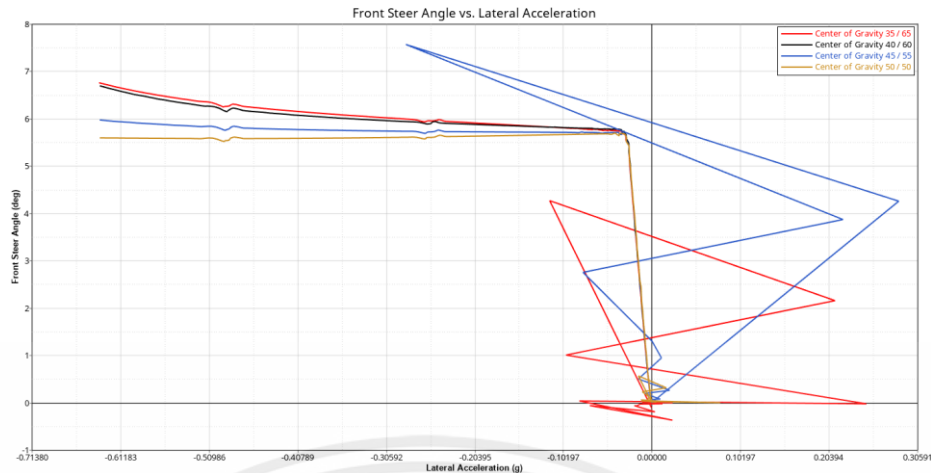
##### 1. วิเคราะห์ตามมาตรฐาน

จากการศึกษาวิเคราะห์โดยจำลองเลี้ยวโค้งรัศมีคงที่ แสดงให้เห็นว่ามุมเลี้ยวที่ล้อยหน้ามีค่าลดลงขณะที่ความเร่งมีความเพิ่มขึ้น เมื่อระดับการเปลี่ยนแปลงมุมล้อยขณะเลี้ยวโค้งเป็นค่าบวก มุมบังคับเลี้ยวทั้งหมดจะเพิ่มขึ้นความความเร่ง แสดงดังรูปที่ 4.1 กล่าวคือความเร็วเพิ่มขึ้นสำหรับการทดสอบรัศมีคงที่ จะเป็น Understeering และเมื่อระดับการเปลี่ยนแปลงมุมล้อยขณะเลี้ยวโค้งเป็นค่าลบ จะเป็น Oversteering



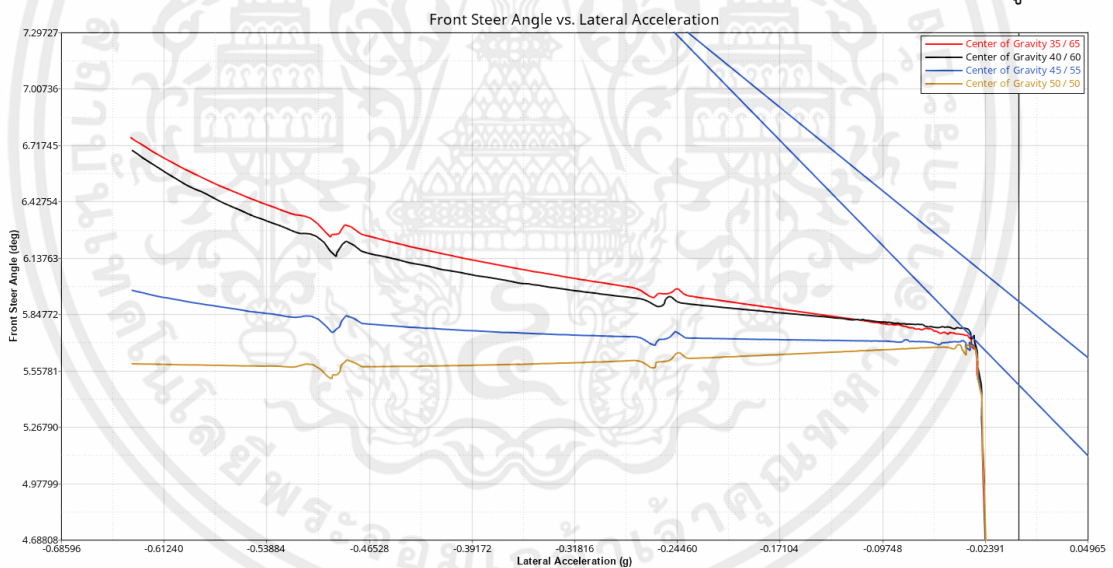
รูปที่ (4.1) ความสัมพันธ์ระหว่างมุมบังคับเลี้ยวที่ล้อยหน้ากับค่าความเร่งด้านข้างตามมาตรฐาน

จากรูปที่ (4.1) อัตราส่วนเพลาหน้า:หลัง 40:60 มีค่าเป็นบวก Understeering จึงศึกษาเพิ่มเติมเพื่อประกอบการวิเคราะห์ โดยอัตราส่วนเพลาหน้า:หลัง 35:65 และ 45:55 ดังรูปที่ (4.2)



รูปที่ (4.2) ความสัมพันธ์ระหว่างมุมบังคับเลี้ยวที่ล้นขณะเลี้ยวโค้งกับความเร่งด้านข้างตามมาตรฐานที่มี อัตราส่วนเพลาหน้า เพลาหลัง 35:65 และ 45:55

ในการวิเคราะห์ ค่าระดับการเปลี่ยนแปลงมุมล้นขณะเลี้ยวโค้ง จำเป็นจะต้องวิเคราะห์ค่าที่ steady-state เนื่องจากจะมีการเปลี่ยนแปลงมุมเลี้ยวที่ล้น และความความเร่งด้านข้างเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ในลักษณะที่สามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ (4.3) ความสัมพันธ์ระหว่างมุมบังคับเลี้ยวที่ล้นขณะเลี้ยวโค้งกับความเร่งด้านข้างตามมาตรฐาน ณ ตำแหน่ง steady state

จากรูปที่ (4.3) เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าระดับการเปลี่ยนแปลงมุมล้นขณะเลี้ยวโค้งของจุดศูนย์ถ่วงมวลแต่ละตัวจะเป็นตามสมการ

$$\delta = 57.3 \frac{L}{R} \gg (57.3) \frac{6.5m}{50m} \gg 7.45 \text{ degree}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ (4.1) ตารางแสดงค่าอัตราส่วนเพลาหน้า:หลัง Understeer gradient ณ ความเร็วที่เท่ากัน

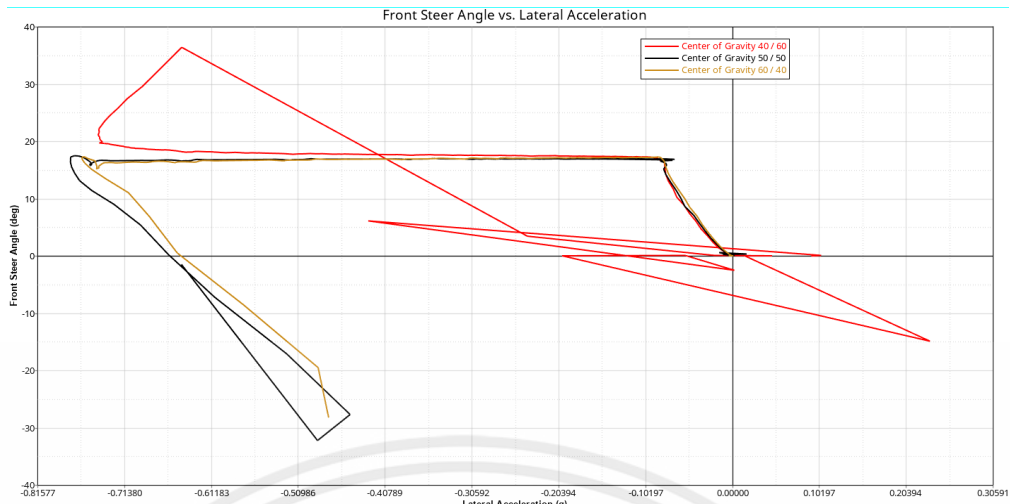
อัตราส่วนเพลาหน้า:หลัง	Speed km/hr.	Understeer gradient	CG	Speed km/hr.	Understeer gradient
35:65	10-15	0.59	45-55	10-15	0.01
	15-20	0.72		15-20	0.02
	20-25	0.89		20-25	0.09
	25-30	1.11		25-30	0.19
	30-35	1.34		30-35	0.31
	35-40	1.63		35-40	0.43
	40-45	1.96		40-45	0.59
	45-50	2.29		45-50	0.74
40:60	10-15	0.11	50-55	10-15	-0.35
	15-20	0.27		15-20	-0.33
	20-25	0.49		20-25	-0.29
	25-30	0.77		25-30	-0.25
	30-35	1.11		30-35	-0.19
	35-40	1.49		35-40	-0.13
	40-45	1.93		40-45	-0.06
	45-50	2.38		45-50	-0.01

จากรูปที่ (4.3) และตารางที่ (4.1) แสดงความสัมพันธ์ของค่า Understeer gradient ที่ตำแหน่งอัตราส่วนเพลาหน้า:หลัง 35:65, 40:60 และ 45:55 ณ ช่วงความเร็ว 10-50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีค่า Understeer gradient ไม่เกิน 3 deg/g แต่ในสภาวะจริงของการเลี้ยวความเร็วไม่เกิน 10-30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง สรุปว่าตำแหน่งอัตราส่วนเพลาหน้า:หลังที่เหมาะสมในการออกแบบตำแหน่งวางแบตเตอรี่คือ  $35:65 > 40:60 > 45:55$

## 2. วิเคราะห์ตามสถานการณ์จำลองเสมือนจริง

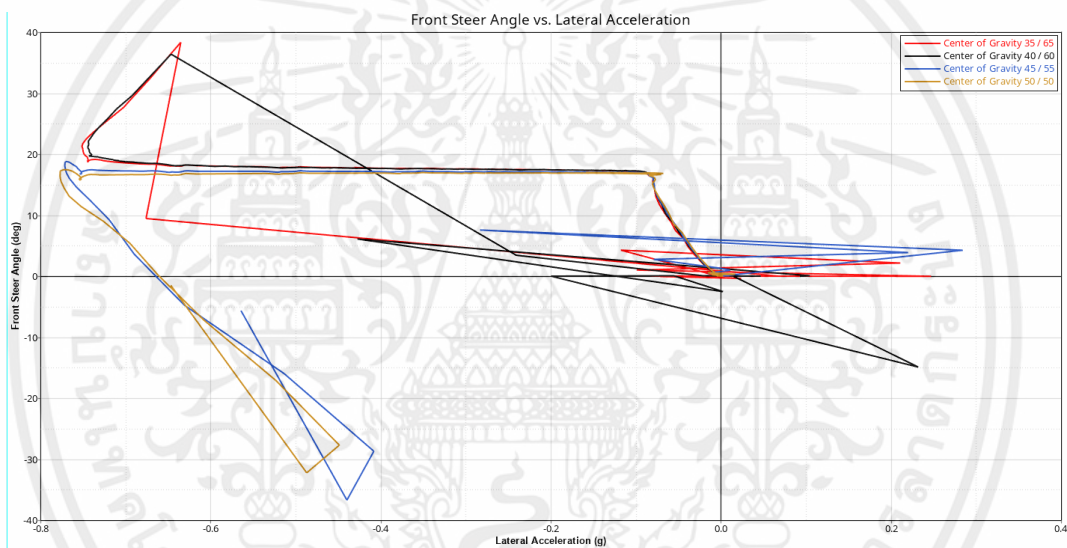
เมื่อวิเคราะห์โดยจำลองเลี้ยวโค้งรัศมีคงที่ตามสถานการณ์จำลองเสมือนจริง มีแนวโน้มที่คล้ายกับสถานการณ์จำลองตามมาตรฐาน คือ ระดับการเปลี่ยนแปลงมุมล้อขณะเลี้ยวโค้งในช่วงที่เป็นค่าบวกนั้นอยู่ที่อัตราส่วนเพลาหน้า:หลัง 40:60 ดังรูปที่ (4.4)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ (4.4) ความสัมพันธ์ระหว่างมุมบังคับเลี้ยวที่ล้นขณะเลี้ยวโค้งกับความเร่งด้านข้างที่อัตราส่วน

เพลาน้ำ:หลัง

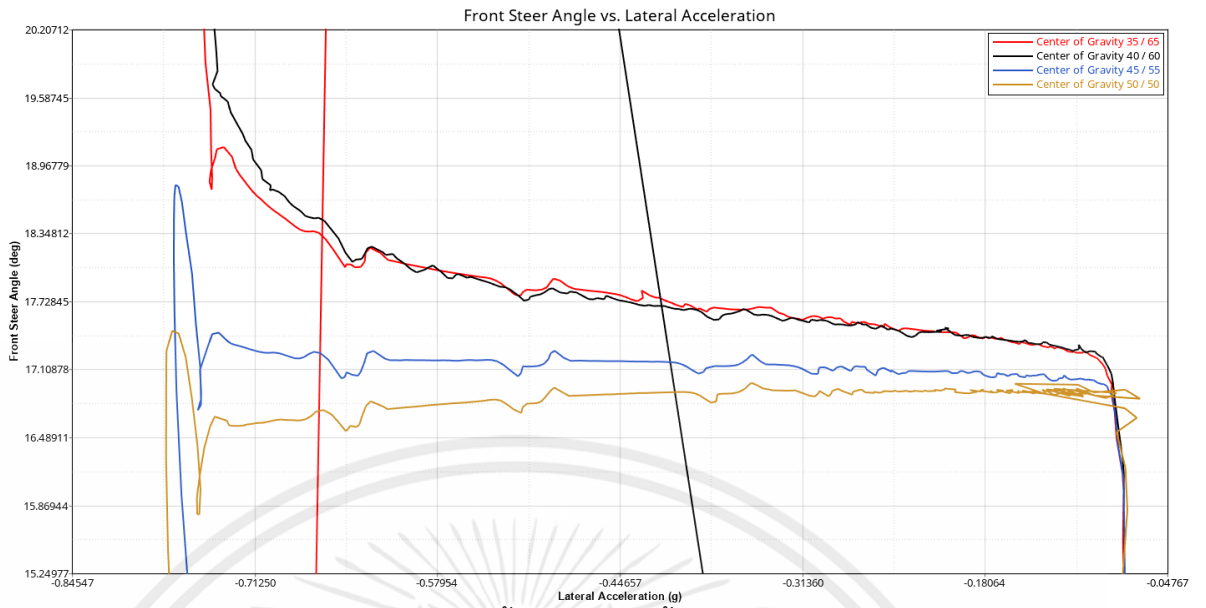


รูปที่ (4.5) ความสัมพันธ์ระหว่างมุมบังคับเลี้ยวที่ล้นขณะเลี้ยวโค้งกับความเร่งด้านข้างที่อัตราส่วน

เพลาน้ำ:หลัง 35:65 และ 45:55

ค่าระดับการเปลี่ยนแปลงมุมล้นขณะเลี้ยวโค้งที่ตำแหน่ง Steady state

ในการวิเคราะห์ ค่าระดับการเปลี่ยนแปลงมุมล้นขณะเลี้ยวโค้ง จำเป็นจะต้องวิเคราะห์ค่าที่ Steady state เนื่องจากจะมีการเปลี่ยนแปลงมุมเลี้ยวที่ล้น และความเร่งด้านข้างเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น ในลักษณะที่สามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ (4.6) ความสัมพันธ์ระหว่างมุมบังคับเลี้ยวที่ล้อขณะเลี้ยวโค้งกับความเร่งด้านข้างที่อัตราส่วน  
 เฟลาหน้า:หลัง 35:65 และ 45:55 ที่ steady state  
 จากรูปที่ (4.6) เมื่อทำการวิเคราะห์ค่า

ระดับการเปลี่ยนแปลงมุมล้อขณะเลี้ยวโค้งของจุดศูนย์ถ่วงมวลแต่ละตัวจะเป็นตาม  
 สมการที่

$$\frac{\partial \delta}{\partial a_y} = \frac{\partial}{\partial a_y} \left( 57.3 \frac{L}{R} \right) + K \frac{\partial a_y}{\partial a_y}$$

สมการที่ (4.2)

$$K = \frac{\partial \delta}{\partial a_y}$$

สมการที่ (4.3)

ความชันของเส้นโค้งมุมเลี้ยวคือการไล่ระดับอันเดอร์สตีร์ เป็นบวก ความชัน (ขึ้นไป  
 ทางขวา) หมายถึง อันเดอร์สตีร์ ความชันเป็นศูนย์ คือ การควบคุมทิศทางที่เป็นกลาง

ตารางที่ (4.2) ตารางแสดงค่าอัตราส่วนเพลาน้ำ:หลัง Understeer gradient ณ ความเร็วที่เท่ากัน ตามสถานการณ์จำลองเสมือนจริง

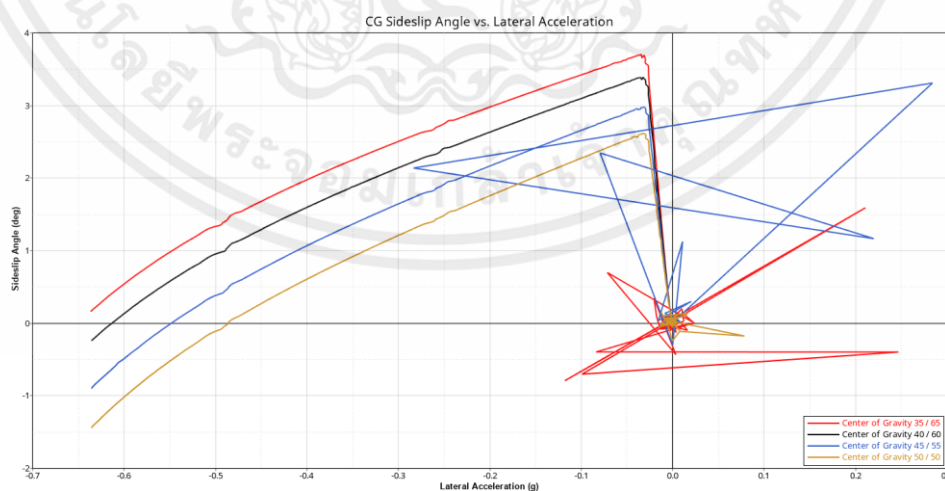
อัตราส่วนเพลาน้ำ: หลัง	Speed km/hr.	Understeer gradient	อัตราส่วนเพลาน้ำ: หน้า:หลัง	Speed km/hr.	Understeer gradient
35:65	10-15	1.26	45:55	10-15	0.73
	15-20	1.57		15-20	0.54
	20-25	1.98		20-25	0.29
	25-30	2.4		25-30	0.01
40:60	10-15	0.51	50:50	10-15	0.45
	15-20	1.21		15-20	0.04
	20-25	2.13		20-25	-0.46
	25-30	3.25		25-30	-1.08

จากวิเคราะห์ข้อมูลตามตารางที่ (4.2) ทำให้ทราบว่าตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงอัตราส่วนน้ำหนักรถที่เพลาน้ำ:หน้าเป็นไปตามการทดสอบตามมาตรฐาน สรุปว่าตำแหน่งอัตราส่วนเพลาน้ำ:หลังที่เหมาะสมกับการออกแบบตำแหน่งแบตเตอรี่คือ  $35:65 > 40:60 > 45:55$  เช่นเดียวกัน

#### 4.3.1.2 มุมลื่นไถลที่จุดศูนย์ถ่วงมวลขณะเลี้ยวโค้ง (Sideslip angle gradient)

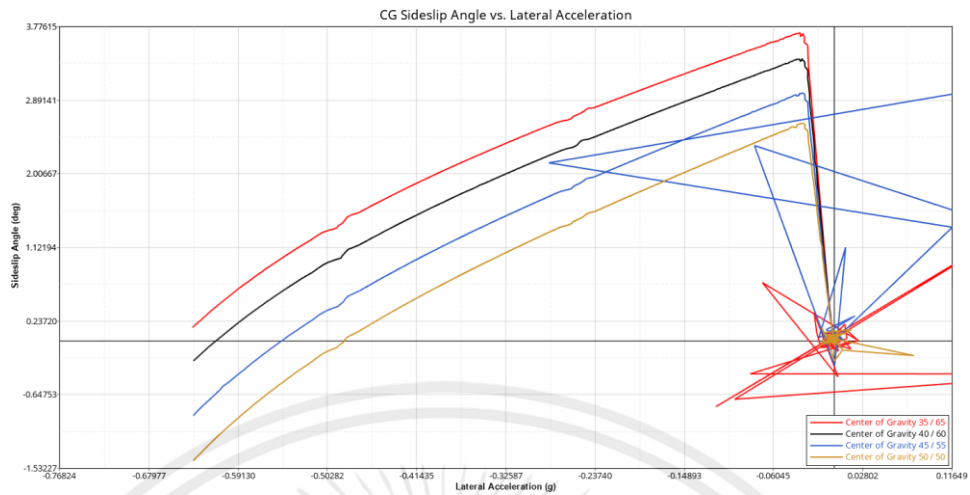
##### 1. วิเคราะห์ตามมาตรฐาน

จากการทดสอบตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของรถโดยสารไฟฟ้า โดยการเลี้ยวโค้งรัศมีคงที่ พบว่ามุมลื่นไถลที่จุดศูนย์ถ่วงมวลขณะเลี้ยวโค้งของรถมีค่าลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มมากขึ้น ที่ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของรถจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วของรถที่เพิ่มขึ้น จากผลการจำลองสามารถทราบได้ว่ามุมลื่นไถลด้านข้างของรถมากที่สุด



รูปที่ (4.7) ความสัมพันธ์ระหว่าง CG Sideslip Angle กับความเร่งด้านข้างตามมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ (4.8) ความสัมพันธ์ระหว่าง CG Sideslip Angle กับความเร่งด้านข้างตามมาตรฐาน ที่ steady state

จากรูปที่ (4.8) เมื่อทำการวิเคราะห์มุมลื่นไถลที่จุดศูนย์ถ่วงมวลขณะเลี้ยวโค้งของจุดศูนย์ถ่วงมวลแต่ละตัว เราจะทำการสร้างตารางเพื่อวิเคราะห์จุดที่เหมาะสมที่ในการเลือกวางตำแหน่งแบตเตอรี่จากการดูค่า CG sideslip angle

ตารางที่ (4.3) ตารางแสดงค่าอัตราส่วนเพลหน้า:หลัง CG sideslip angle ณ ความเร็วที่เท่ากัน

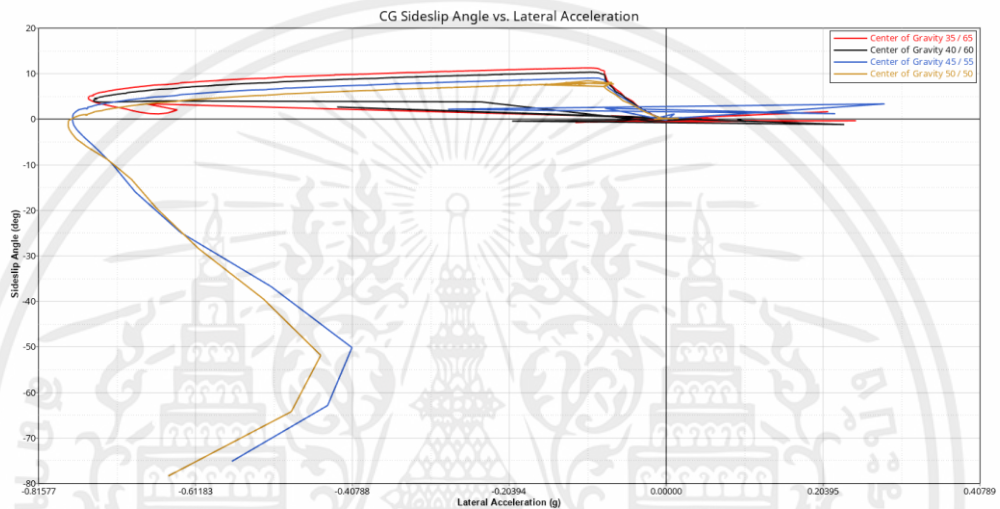
อัตราส่วนเพลหน้า:หลัง	Speed km/hr.	CG side slip angle	CG	Speed km/hr.	CG side slip angle
35:65	10-15	3.68	45-55	10-15	2.95
	15-20	3.56		15-20	2.82
	20-25	3.40		20-25	2.63
	25-30	3.15		25-30	2.36
	30-35	2.82		30-35	1.99
	35-40	2.39		35-40	1.52
	40-45	1.80		40-45	0.88
	45-50	1.07		45-50	0.08
40:60	10-15	3.37	50-50	10-15	2.58
	15-20	3.25		15-20	2.45
	20-25	3.07		20-25	2.25
	25-30	2.81		25-30	1.96
	30-35	2.47		30-35	1.58
	35-40	2.02		35-40	1.07
	40-45	1.42		40-45	0.41
	45-50	0.67		45-50	-0.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

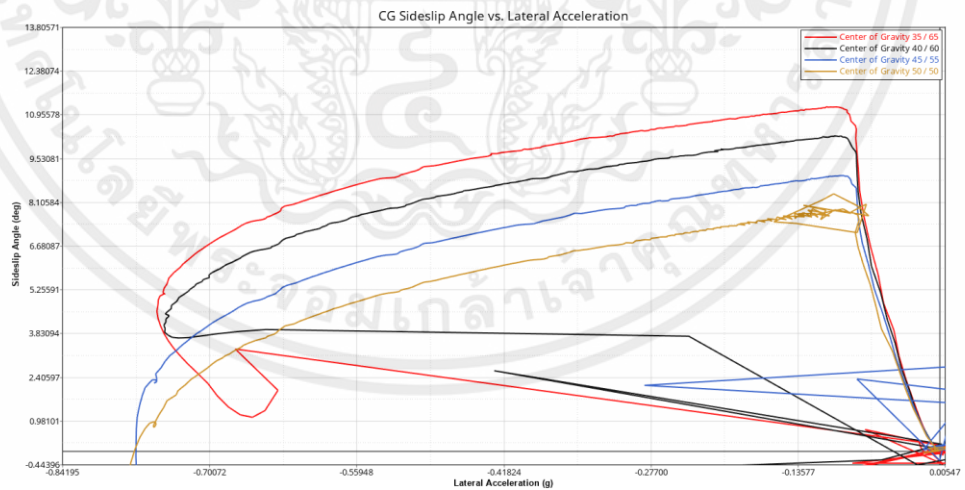
จากรูปที่ (4.8) และตารางที่ (4.3) ณ ความเร็วเดียวกัน ตำแหน่งอัตราส่วนเพลาน้ำ:หลัง 35:65, 40:60, 45:55 และ 50:50 ค่า CG side slip angle มีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ แสดงถึงการเกิด Oversteer

1. วิเคราะห์ตามสถานการณ์จำลองเสมือนจริง

จากการจำลองสถานการณ์การเปรียบเทียบตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของรถโดยสารไฟฟ้า โดยจำลองการเลี้ยวโค้งรัศมีคงที่พบว่ามุมลื่นไถลที่จุดศูนย์กลางถ่วงมวลขณะเลี้ยวโค้งของรถมีค่าลดลงเมื่อความเร็วเพิ่มมากขึ้น ที่ตำแหน่งจุดศูนย์กลางถ่วงของรถจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วของรถที่เพิ่มขึ้น จากผลการจำลองสามารถทราบได้ว่ามุมลื่นไถลด้านข้างของรถมากที่สุด



รูปที่ (4.9) ความสัมพันธ์ระหว่าง CG Sideslip Angle กับความเร่งด้านข้าง



รูปที่ (4.10) ความสัมพันธ์ระหว่าง CG Sideslip Angle กับความเร่งด้านข้าง

ตารางที่ (4.4) ตารางแสดงค่าอัตราส่วนเพลาหน้า:หลัง CG sideslip angle ณ ความเร็วที่เท่ากันที่สถานการณ์จำลองเสมือนจริง

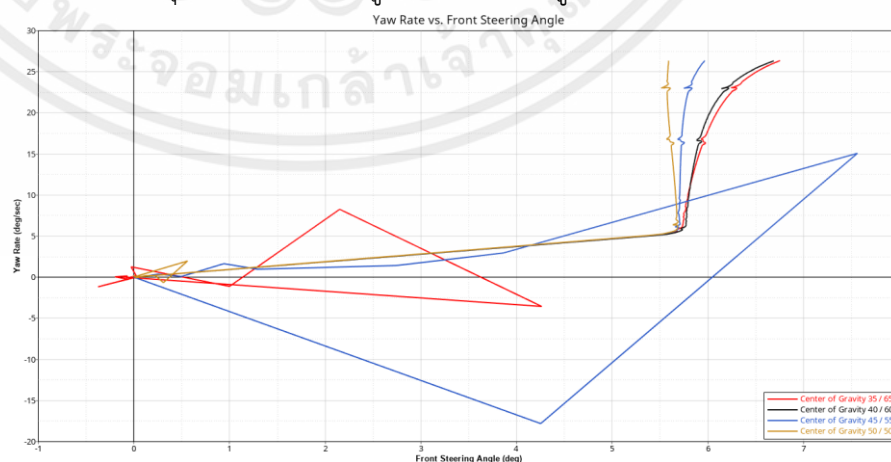
อัตราส่วนเพลาหน้า:หลัง	Speed km/hr.	CG side slip angle	อัตราส่วนเพลาหน้า:หลัง	Speed km/hr.	CG side slip angle
35:65	10-15	10.76	45:55	10-15	8.17
	15-20	10.74		15-20	7.64
	20-25	10.31		20-25	6.51
	25-30	9.06		25-30	4.37
40:60	10-15	10.17	50:50	10-15	7.75
	15-20	9.93		15-20	7.44
	20-25	9.30		20-25	6.71
	25-30	7.98	25-30	5.24	

จากการวิเคราะห์ตารางที่ (4.4) ทำให้ทราบว่า ณ ความเร็วเดียวกัน ตำแหน่งอัตราส่วนเพลาหน้า:หลัง 35:65, 40:60, 45:55 และ 50:50 ค่า CG side slip angle มีแนวโน้มลดลงเรื่อย ๆ แสดงถึงการเกิด Oversteer สอดคล้องกับการทดสอบตามมาตรฐาน

#### 4.3.1.3 อัตราส่วนการหันเห (Yaw rate gain)

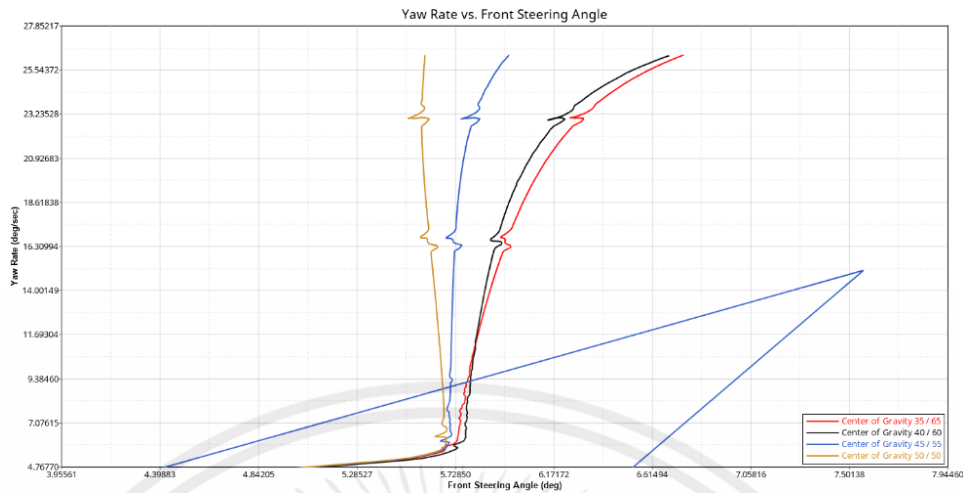
##### 1. วิเคราะห์ตามมาตรฐาน

กรณี Oversteering โค้งความเร็วที่เพิ่มขึ้นของความเร็วการหันเหจะกลายเป็นอนันต์เมื่อความเร็วถึงความเร็ววิกฤตตามสมการ และในกรณีของ Understeering ความเร็วของการเลี้ยวจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วจนถึงความเร็วที่กำหนด หลังจากนั้นจะเริ่มลดลง ดังนั้นความเร็วมีความสำคัญกับความเร็วที่รถตอบสนองได้ดีที่สุดในการหันเห ดังรูปที่ (4.11) และรูปที่ (4.12)



รูปที่ (4.11) ความสัมพันธ์ระหว่าง Yaw Rate และ Front Steering Angle ตามมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ (4.12) ความสัมพันธ์ระหว่าง Yaw Rate และ Front Steering Angleตาม  
มาตรฐาน ที่ steady state

ตารางที่ (4.5) ตารางแสดงค่าอัตราส่วนเพลาหน้า:หลัง yaw rate gain ณ ความเร็วที่เท่ากัน

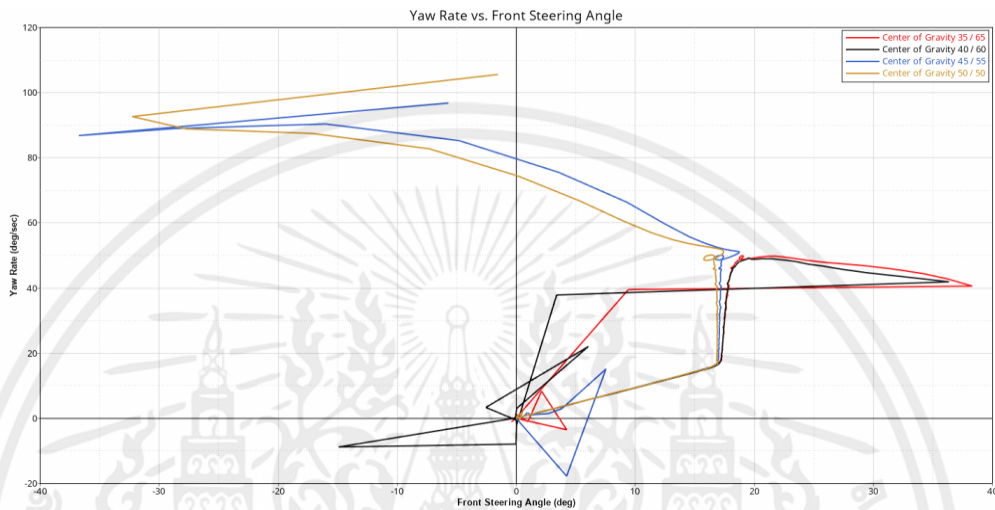
อัตราส่วนเพลาหน้า: หลัง	Speed km/hr.	yaw rate gain	อัตราส่วนเพลาหน้า: หลัง	Speed km/hr.	yaw rate gain
35:65	10-15	0.84	45:55	10-15	2.08
	15-20	0.68		15-20	1.40
	20-25	0.64		20-25	0.81
	25-30	0.61		25-30	0.08
	30-35	0.55		30-35	-0.90
	35-40	0.47		35-40	-2.46
	40-45	0.32		40-45	-5.22
	45-50	0.06		45-50	-10.10
40:60	10-15	0.99	50:50	10-15	-2.71
	15-20	0.79		15-20	-8.02
	20-25	0.75		20-25	-9.19
	25-30	0.70		25-30	-10.62
	30-35	0.63		30-35	-12.58
	35-40	0.52		35-40	-15.67
	40-45	0.32		40-45	-21.13
	45-50	-0.03		45-50	-30.78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

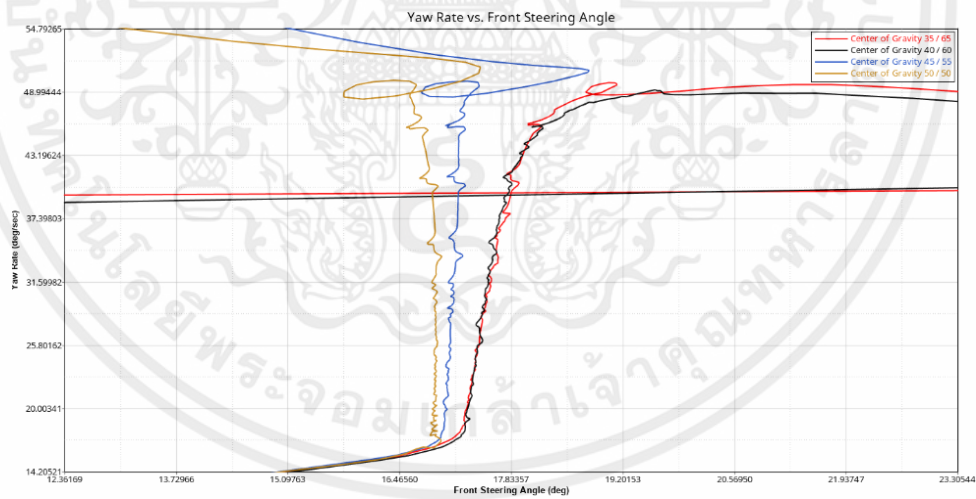
จากการวิเคราะห์ตามตารางที่ (4.5) ค่า yaw rate gain ต้องมีค่าไม่เกิน 0.2-0.37 1/s ดังนั้น อัตราส่วนเพลาหน้า:หลัง 35:65 ความเร็วของการเลี้ยวจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วจนถึงความเร็วที่กำหนด หลังจากนั้นจะเริ่มลดลง และยังมีอัตราการกันเหวี่ยง จะทำให้เกิดการทำงานนอกระบบเชิงเส้น

วิเคราะห์ตามสถานการณ์จำลองเสมือนจริง

การประเมินอัตราส่วนหันเหกับมุมล้อขณะเลี้ยวโค้ง ความเร็วของการเลี้ยวจะเพิ่มขึ้นตามความเร็วจนถึงความเร็วที่กำหนด หลังจากนั้นจะเริ่มลดลง แสดงถึง Understeering



รูปที่ (4.13) ความสัมพันธ์ระหว่าง Yaw Rate และ Front Steering Angle ที่สถานการณ์เสมือนจริง



รูปที่ (4.14) ความสัมพันธ์ระหว่าง Yaw Rate และ Front Steering Angle ที่สถานการณ์เสมือนจริง steady-state

ตารางที่ (4.6) ตารางแสดงค่าอัตราส่วนเพลาหน้า:หลัง yaw rate gain ณ ความเร็วที่เท่ากัน ที่สถานการณ์เสมือนจริง

อัตราส่วนเพลาหน้า: หลัง	Speed km/hr.	yaw rate gain 1/s	อัตราส่วนเพลาหน้า: หลัง	Speed km/hr.	yaw rate gain
35:65	10-15	0.604	45:55	10-15	2.22
	15-20	0.48		15-20	0.79
	20-25	0.43		20-25	0.22
	25-30	0.26		25-30	-1.9
40:60	10-15	0.75	50:50	10-15	-1.27
	15-20	0.55		15-20	-2.03
	20-25	0.46		20-25	-1.81
	25-30	0.16		25-30	-0.9

จากการวิเคราะห์ตามตารางที่ 4.6 ค่า yaw rate gain ต้องมีค่าไม่เกิน 0.2-0.37 1/s ดังนั้นอัตราส่วนเพลาหน้า:หลัง 35:65 สอดคล้องกับการทดสอบตามมาตรฐาน

## บทที่ 5

# สรุปและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

#### 1. ระดับการเปลี่ยนแปลงมุมล้อขณะเลี้ยวโค้ง

สำหรับการทดสอบการเลี้ยวโค้งรัศมีคงที่เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น จากการทดสอบตามมาตรฐานและทดสอบสถานการณ์เสมือนจริง อัตราส่วนเพลาหน้า:หลัง 35:65, 40:60 และ 45:55 จะมีลักษณะการเลี้ยวเป็น Understeering แต่ในความเป็นจริงสามารถใช้จุดศูนย์ถ่วงมวลได้เพียงจุดเดียวเท่านั้น เราจึงเลือกที่อัตราส่วนเพลาหน้า:หลัง (35:65) เพราะมีค่า Understeer Gradient ไม่เกิน 3 แต่ใกล้เคียงมากที่สุดในทุกจุดศูนย์ถ่วง

#### 2. มุมลื่นไถลที่จุดศูนย์ถ่วงมวลขณะเลี้ยวโค้ง (Sideslip angle gradient)

สำหรับการทดสอบการเลี้ยวโค้งรัศมีคงที่เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น เมื่อทดสอบตามมาตรฐานและทดสอบตามสถานการณ์จริงและนำค่าที่ได้จากกราฟมาวิเคราะห์แล้วพบว่า มุมลื่นไถลที่จุดศูนย์ถ่วงมวลอัตราส่วนเพลาหน้า:หลัง 35:65 มีค่ามุมลื่นไถลเป็นบวกซึ่งทำให้ตัวรถเกิดการ Understeer มากที่สุดในทุกจุดศูนย์ถ่วงที่ทำการทดสอบและเป็นสิ่งที่เราต้องการให้เกิดขึ้นกับรถยนต์ที่เราทดสอบ

#### 3. อัตราส่วนการหันเห (Yaw rate gain)

จากการทดสอบการเลี้ยวโค้งรัศมีคงที่ความเร็วเพิ่มขึ้น ทำการทดสอบตามมาตรฐานและทดสอบตามสถานการณ์จริง นำค่าที่ได้จากกราฟมาวิเคราะห์แล้วพบว่าอัตราส่วนการหันเหที่จุดศูนย์ถ่วงมวลอัตราส่วนเพลาหน้า:หลัง (35:65) มีค่าอัตราส่วนการหันเหที่ใกล้เคียงกับค่าที่เราต้องการมากที่สุดคือ 0.2-0.37 1/s ซึ่งบ่งบอกถึงอัตราการหมุนรอบแกนแนวตั้งของรถ

สรุปผลการทดสอบได้ว่าจากระดับการเปลี่ยนแปลงมุมล้อขณะเลี้ยวโค้ง มุมลื่นไถลที่จุดศูนย์ถ่วงมวลขณะเลี้ยวโค้ง และจุดศูนย์ถ่วงมวลอัตราส่วนเพลาหน้า:หลัง 35:65 มีค่ามุมลื่นไถลเป็นบวกซึ่งทำให้ตัวรถเกิดการหน้าดื้อโค้งมากที่สุดที่เหมาะสมกว่าจุดศูนย์ถ่วงมวลอัตราส่วนเพลาหน้า:หลังและมีความปลอดภัยต่อยานพาหนะเมื่อมีการจัดวางจุดศูนย์ถ่วงที่ต่างจากเดิม

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การจำลองทางด้านพลศาสตร์ยานยนต์สามารถแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของรถโดยสารไฟฟ้าได้จริง ตามทฤษฎีและมาตรฐาน จึงควรมีการพิจารณาขยายผลหรือศึกษาโดยสารรุ่นอื่น
2. การจำลองทางด้านพลศาสตร์ยานยนต์แสดงให้เห็นพฤติกรรมของรถโดยสารไฟฟ้าควรมีการศึกษาควบคู่ไปกับการทดสอบจริงเมื่อเข้าใจพฤติกรรมอย่างแท้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การจำลองทางด้านพลศาสตร์ยานยนต์สามารถใช้วัดผลเพิ่มเติมจากการทดสอบได้ เพื่อประกอบกรออกแบบการวางตำแหน่งแบตเตอรี่อื่น ๆ ได้เช่นกัน

## บรรณานุกรม

- [1] เอกลักษณ์ พรหมภักดี การวิเคราะห์เสถียรภาพการเลี้ยวโค้งของรถบัสไฟฟ้าประเภทพื้นต่ำ ด้วยวิธีการจำลองทางพลศาสตร์การเคลื่อนที่แบบมัลติบอดี (2529).
- [2] Thomas D. Gillespie **Fundamentals of Vehicle Dynamics** (2017).
- [3] International Standard **Passenger cars Steady-state circular driving behaviour Open-loop test methods** (2017).
- [4] Hsing-Hui Huang and Ming-Jiang Tsai **Vehicle Cornering Performance Evaluation and Enhancement Based on CAE and Experimental Analyses** (2019).
- [5] Hongyu Zheng, Shenao and Xiaoxiang **Design of a variable steering ratio for steer-by-wire vehicle with a joystick** (2017).
- [6] John C. Dixon **Tyres, suspension, and Handling** (1966).
- [7] John R Hartley **Automobile Steering & Suspension** (1977).
- [8] William F. Milliken Douglas L. Milliken **Race Car Vehicle Dynamics** (1995).