

การพัฒนาระบบวิเคราะห์เสถียรภาพทางโค้งของรถยนต์อัตโนมัติ
กรณีศึกษา รถยนต์บังคับวิทยุขนาด 1:10

วุฒิพงศ์ สมคุณากรกุล

TNII

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

บัณฑิตศึกษา สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ปีการศึกษา 2566

DEVELOPMENT OF CORNERING INSTABILITY DETECTION SYSTEM
ON AUTONOMOUS VEHICLE,
A CASE STUDY OF 1:10 RADIO CONTROL CAR

Wuthipong Somkunakornkul

TNII

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for The Degree of Master of Engineering Program in Engineering Technology
Graduate Studies

Thai-Nichi Institute of Technology

Academic Year 2023

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาระบบวิเคราะห์เสถียรภาพทางโค้งของรถยนต์

อัตโนมัติ กรณีศึกษา รถยนต์บังคับวิทยุขนาด 1:10

โดย

วุฒิพงศ์ สมคุณากรกุล

สาขาวิชา

เทคโนโลยีวิศวกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ดร.มรรณพ พักขาว

บัณฑิตศึกษา สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.วรากร ศรีเชวงทรัพย์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ดร.ณัฐกิตต์ จิตรเอื้อตระกูล)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรชัย นิเวศน์รังสรรค์)

..... กรรมการ

(ดร.วัชรินทร์ หนูทอง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ดร.มรรณพ พักขาว)

วุฒิพงศ์ สมคุณากรกุล : การพัฒนาระบบวิเคราะห์เสถียรภาพทางโค้งของรถยนต์อัตโนมัติ
กรณีศึกษา รถยนต์บังคับวิทยุขนาด 1:10. อาจารย์ที่ปรึกษา : ดร. มหรรณพ พักขาว, 76
หน้า.

การสูญเสียเสถียรภาพระหว่างการเข้าโค้งนั้นถือเป็นหนึ่งในสาเหตุสำคัญของการเกิดอุบัติเหตุทางถนนของรถยนต์ โดยการเสถียรภาพทางโค้งสามารถจำแนกได้เป็น อาการดื้อโค้ง (Understeer) และอาการไวโค้ง (Oversteer) ในการรักษาเสถียรภาพระหว่างการเข้าโค้งนั้นต้องอาศัยประสบการณ์และสภาพความพร้อมของผู้ขับเป็นหลัก ทว่า การลดอุบัติเหตุบนท้องถนนอย่างยั่งยืนนั้น รถยนต์อัตโนมัติเข้ามามีบทบาทสำคัญในการบรรลุเป้าหมายนี้ โดยหนึ่งในระบบที่มีความสำคัญสำหรับการตัดสินใจเคลื่อนที่ของรถยนต์ คือ ระบบการตรวจการสูญเสียเสถียรภาพระหว่างการเข้าโค้ง ดังนั้น วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบระบบการตรวจจับการสูญเสียเสถียรภาพทางโค้งของรถยนต์ โดยใช้แบบจำลองรถยนต์บังคับวิทยุอัตราส่วน 1:10 ในการศึกษาและได้ทำการติดตั้งเซนเซอร์การวัดความหน่วง (Inertia measurement unit) 6 แกน และประมวลผลบนบอร์ด Raspberry PI 4 ด้วยการใช้แบบจำลองจักรยานบนระนาบ (Bicycle planar model) มาเพื่อวิเคราะห์ลักษณะการสูญเสียเสถียรภาพทางโค้ง ผ่านการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถล (Sideslip coefficient) เพื่อให้ได้ปัจจัยเสถียรภาพของตัวรถ (Stability Factor) สำหรับจำแนกลักษณะการสูญเสียเสถียรภาพทางโค้งภายใต้ความเร็วขณะเข้าโค้งแบบทันที การทดลองวิ่งเข้าโค้งนั้นจะใช้การกำหนดระดับวัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อน (Duty cycle) เป็นตัวกำหนดความเร็วเชิงเส้นของตัวรถ โดยพบว่าระบบสามารถตรวจวัดอาการหน้าดื้อโค้ง (Understeer) ในช่วงที่แบบจำลองรถยนต์เข้าโค้งความเร็วเฉลี่ยประมาณของรถระหว่าง 2 - 8 m/s เมื่อเพิ่มความเร็วเฉลี่ยของรถเกิน 10 m/s ระบบได้ตรวจพบอาการไวโค้ง (Oversteer) ซึ่งจากผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่าระบบวิเคราะห์เสถียรภาพสามารถวิเคราะห์การสูญเสียเสถียรภาพทางโค้งได้ทั้งอาการดื้อโค้ง และ อาการไวโค้ง ได้ถูกต้องผ่านการยืนยันทั้งทางทฤษฎีและลักษณะการเคลื่อนที่ทางกายภาพที่เกิด ขึ้นระหว่างการเปลี่ยนแปลงความเร็วของตัวรถยนต์ได้ทั้งกรณีที่เลี้ยวซ้ายและขวา

บัณฑิตศึกษา

ลายมือชื่อนักศึกษา

สาขาวิชา เทคโนโลยีวิศวกรรม

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2566

WUTHIPONG SOMKUNAKORNKUL: DEVELOPMENT OF AUTONOMOUS CAR CONTROL SYSTEM USING DYNAMIC MODEL . ADVISOR: DR. MAHUNNOP FAKKAO, 73 PP.

Cornering instability, which can be categorized into understeering and oversteering, is a significant cause of road accident for automobiles. Maintaining cornering stability relies heavily on the driver's experience and readiness. However, autonomous vehicles play an important role to sustainably reduce the road accident. Among the subsystem of autonomous vehicle, the cornering stability detection system is crucial for the decision-making of vehicle motion. Therefore, this thesis aims to develop the cornering stability detection system for automobiles using a 1:10 scaled radio-controlled car model. A 6-axis inertial measurement unit (IMU) was installed and processed on a Raspberry Pi 4 board. The bicycle planar model was employed to analyze cornering stability characteristics by calculating the sideslip coefficient to obtain the vehicle stability factor for classifying cornering stability characteristics under instantaneous cornering speed. The vehicle cornering test utilizes the duty cycle of the drive motors to adjust the longitudinal speed of vehicle. The experimental results demonstrate that the system can detect understeering instability within an average vehicle speed range of 2-8 m/s. On the other hand, the system identifies oversteering instability when the average vehicle speed exceeds 10 m/s. According to the results, it is confirmed that the vehicle stability system can accurately analyze both understeer and oversteer cornering instability through theoretical validation and physical motion characteristics observed during vehicle speed changes in both left and right turns.

Graduate School.

Field of Engineering Technology.

Academic Year 2023

Student's Signature.....

Advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ต้องขอกล่าวขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.มรรณพ พักขาว ที่เป็นที่ปรึกษาในการทำวิจัย เป็นผู้ให้ความรู้ ชี้แนะ และให้ความช่วยเหลือตลอดในการทำวิจัยนี้ จนกระทั่งสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ดร.ณัฐกิตติ์ จิตรเอื้อตระกูล ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร. พรชัย นิเวศรังสรรค์ และ ดร.วัชรินทร์ หนูทอง กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่แนะนำแนวทางและช่วยแนะนำตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ฐิติรัตน์ วิวิธเกียรรวงศ์ ที่คอยให้คำปรึกษาในด้านการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ขอขอบคุณนาย ธนโชติ โกลาซ ที่คอยช่วยเหลือขณะทำการทดลอง และช่วยสร้างสนามในการทดลองรถวิ่งเข้าโค้ง ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ นักศึกษาทุกคนที่อยู่ในห้อง C405 ที่คอยให้กำลังใจในการทำวิจัย และ สร้างความสุขในขณะที่ทำงานวิจัยอยู่ในห้อง C405

และที่สำคัญอย่างขาดไม่ได้เลย ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับความเป็นห่วงเป็นใย และ คอยให้กำลังใจมาโดยตลอดนั่นคือครอบครัวโดยมีคุณพ่อ มานพ สมคุณากรกุล คุณแม่ ภัทรวรรณ มุกโชควัฒนา พี่สาว คุณ ปิยาภร สมคุณากรกุล ที่คอยให้กำลังใจ และ สนับสนุนในทุกๆเรื่อง เพื่อรอความสำเร็จของผู้วิจัย ต้องขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

วุฒิพงศ์ สมคุณากรกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ญ

บทที่

1	บทนำ.....	1
	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
	วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	5
	ขอบเขตของการศึกษา.....	6
	ขั้นตอนการศึกษา.....	6
	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
2	เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
	พลศาสตร์ยานยนต์.....	8
	ปัจจัยการเกิดอาการสูญเสียเสถียรภาพของรถยนต์ขณะวิ่งเข้าโค้ง.....	19
	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	21
3	ระเบียบวิธีการวิจัย.....	29
	กล่าวนำ.....	29
	กรอบแนวคิดการวิจัย.....	30
	ขั้นตอนการทดลอง.....	31
	การดำเนินการวิจัยและเก็บข้อมูล.....	31
	การทำการทดลอง.....	36
4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	44
	วิเคราะห์ผลการทำการทดลอง.....	44
	ความเร็ววิกฤต.....	53

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
วิเคราะห์ผลจากภาพถ่ายมูมบน.....	56
5 บทสรุป ข้อเสนอแนะ.....	67
สรุปผลการวิจัย.....	67
ข้อเสนอแนะ.....	67
บรรณานุกรม.....	69
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	73



สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 แผนงานและระยะเวลาในการดำเนินการศึกษาวิจัย.....	7
2.1 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
3.1 พารามิเตอร์ของรถที่ใช้ในการทดลอง.....	39
3.2 มุมล้อของรถที่ใช้ทำการทดลอง.....	39
3.3 เปรียบเทียบค่าคำสั่งที่ส่งไปมอเตอร์เซอร์โวกับรัศมีของระบบบังคับเลี้ยว.....	40
4.1 เปรียบเทียบวัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนกับความเร็วเชิงเส้น.....	45



สารบัญรูป

รูป		หน้า
1.1	สถิติการเกิดอุบัติเหตุผลถนนในประเทศไทยในช่วง พ.ศ. 2563-2564.....	1
1.2	การจำแนกระดับของรถยนต์อัตโนมัติ.....	3
1.3	ระบบควบคุมความเร็วรถแบบแปรผันความเร็วอัตโนมัติ.....	4
1.4	แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษา.....	6
2.1	แกนอ้างอิงที่ยึดติดกับรถยนต์.....	9
2.2	แบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์แบบ 2 มิติ (Bicycle model).....	9
2.3	แบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์แบบ 2 มิติที่พิจารณารูปสมการ.....	11
2.4	ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลตามแนวยาว.....	12
2.5	ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลตามแนวด้านข้าง.....	13
2.6	ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลตามแนวตั้ง.....	14
2.7	มุมเลี้ยวของรถยนต์ 4 ล้อแบบอ็คเคอร์มันน์.....	15
2.8	เรขาคณิตของรีเวิร์สอ็คเคอร์มันน์.....	16
2.9	ทิศทางการเคลื่อนที่ของรถยนต์และล้อที่ส่งผลต่อมุมลื่นไถล.....	17
3.1	แผนผังวิธีการทำทดลอง.....	30
3.2	Tamiya HSV-010 (Body part).....	32
3.3	ตัว Chassis Tamiya HSV-010 และอุปกรณ์ติดรถเดิม.....	32
3.4	Raspberry Pi 4 model B.....	33
3.5	Arduino UNO.....	33
3.6	เซ็นเซอร์วัดความเฉื่อย แบบ 6 แกน ยี่ห้อ DFROBOT รุ่น SEN-0386.....	34
3.7	วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ IBT-2 BTS-7960.....	35
3.8	เซอร์โวมอเตอร์ TowerPro MG996R.....	35
3.9	แบตเตอรี่ขับเคลื่อนแรงดันไฟฟ้าขนาด 7.2V.....	36
3.10	แผ่นไม้กระดานขณะที่จะนำมาติดตั้งบนตัวรถที่ใช้ในการทดลอง.....	37
3.11	การชั่งน้ำหนักในส่วนทางด้านล้อหน้า.....	37
3.12	การชั่งน้ำหนักในส่วนทางด้านล้อหลัง.....	38
3.13	สนามที่ใช้ในการทดลอง.....	42
3.14	การทำงานของระบบวิเคราะห์อาการสูญเสียเสถียรภาพ.....	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูป	หน้า
4.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นของรถบังคับวิทยุ และ Duty Cycle.....44
4.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Yaw rate กับเวลา ที่ความเร็วต่างๆ ของการทดลองเลียวซ้าย..... 46
4.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างYaw Rateกับเวลา ที่ความเร็วต่างๆ ของการทดลองเลียวขวา..... 47
4.4	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งด้านข้างกับเวลา ที่ความเร็วต่างๆ ของการทดลองเลียวซ้าย..... 48
4.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งด้านข้างกับเวลา ที่ความเร็วต่างๆ ของการทดลองเลียวขวา..... 49
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลื่นไถลเฉลี่ยของล้อหน้าและล้อหลังที่ เปลี่ยนไปตามความเร็วรถของการทดลองในรูปแบบเข้าโค้งทางซ้าย..... 50
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลื่นไถลเฉลี่ยของล้อหน้าและล้อหลังที่ เปลี่ยนไปตามความเร็วรถ ของการทดลองในรูปแบบเข้าโค้งทางขวา..... 51
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเสถียรภาพกับความเร็วของรถทดลองใน รูปแบบการทดลองเข้าโค้งทางซ้าย..... 52
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเสถียรภาพกับความเร็วของรถทดลองใน รูปแบบการทดลองเข้าโค้งทางขวา..... 53
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความเร็ววิกฤตกับระดับวัฏจักรทำงานของมอเตอร์ ขับเคลื่อนในการทดลองเข้าโค้งทางซ้าย..... 54
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความเร็ววิกฤตกับระดับวัฏจักรทำงานของมอเตอร์ ขับเคลื่อนในการทดลองเข้าโค้งทางขวา..... 55
4.12	ภาพถ่ายจากมุมสูงขณะการทดลองในขณะที่ตัวรถวิ่งเข้าโค้งทางซ้ายโดยอยู่ในสถานะสมดุล ณ ระดับวัฏจักรการทำงานPWM15%..... 56
4.13	ภาพถ่ายจากมุมสูงขณะการทดลองในขณะที่ตัวรถวิ่งเข้าโค้งทางซ้ายโดยอยู่ในสถานะ หน้าดื้อโค้ง ณ ระดับวัฏจักรการทำงาน PWM 30%..... 56
4.14	ภาพถ่ายจากมุมสูงขณะการทดลองในขณะที่ตัวรถวิ่งเข้าโค้งทางซ้ายโดยอยู่ในสถานะ หน้าดื้อโค้ง ณ ระดับวัฏจักรการทำงาน PWM 40%..... 57

สารบัญรูป (ต่อ)

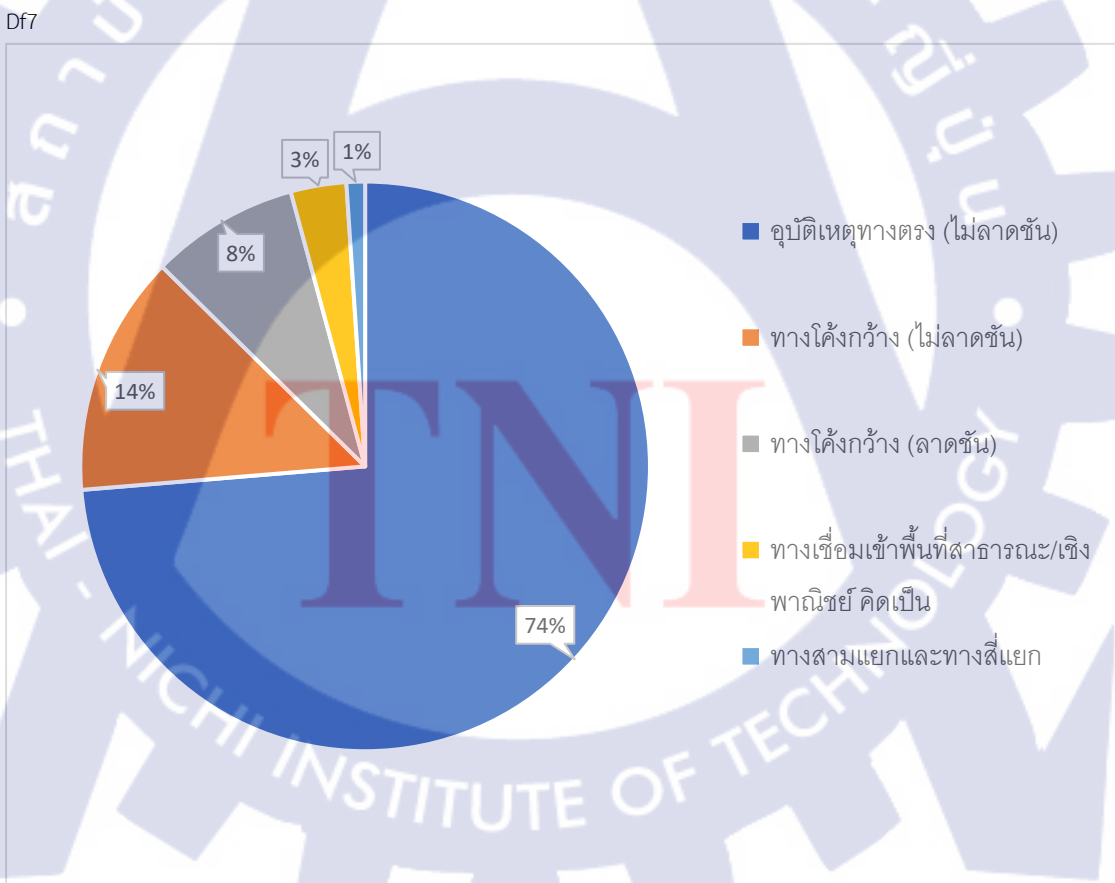
รูป	หน้า
4.15 ภาพถ่ายจากมุมสูงขณะการทดลองในขณะที่ตัวรถวิ่งเข้าโค้งทางซ้ายโดยอยู่ในสภาวะหน้าดื้อโค้ง ณ ระดับวัฏจักรการทำงาน PWM 50%.....	58
4.16 ภาพถ่ายตัวอย่างขณะที่รถมีอาการหน้าดื้อโค้งในการเลี้ยวโค้งทางซ้าย.....	59
4.17 ภาพถ่ายจากมุมสูงขณะการทดลองในขณะที่ตัวรถวิ่งเข้าโค้งทางซ้ายโดยอยู่ในสภาวะท้ายปัด ณ ระดับวัฏจักรการทำงาน PWM 70%.....	60
4.18 ภาพถ่ายจากมุมสูงขณะการทดลองในขณะที่ตัวรถวิ่งเข้าโค้งทางซ้ายโดยอยู่ในสภาวะท้ายปัด ณ ระดับวัฏจักรการทำงาน PWM 80%.....	61
4.19 ภาพถ่ายตัวอย่างขณะที่รถมีอาการไวโค้งในการเข้าโค้งทางขวา.....	62
4.20 ภาพถ่ายจากมุมสูงขณะการทดลองในขณะที่ตัวรถวิ่งเข้าโค้งทางขวาโดยอยู่ในสภาวะสมดุล ณ ระดับวัฏจักรการทำงาน PWM 15%.....	63
4.21 ภาพถ่ายจากมุมสูงขณะการทดลองในขณะที่ตัวรถวิ่งเข้าโค้งทางขวาโดยอยู่ในสภาวะหน้าดื้อโค้ง ณ ระดับวัฏจักรการทำงาน PWM 30%	63
4.22 ภาพถ่ายตัวอย่างขณะที่รถมีอาการหน้าดื้อโค้งในการเลี้ยวโค้งทางขวา.....	64
4.23 ภาพถ่ายจากมุมสูงขณะการทดลองในขณะที่ตัวรถวิ่งเข้าโค้งทางขวาโดยอยู่ในสภาวะไวโค้ง ณ ระดับวัฏจักรการทำงาน PWM 80%.....	65
4.24 ภาพถ่ายตัวอย่างขณะที่รถมีอาการหน้าไวโค้งในการเลี้ยวโค้งทางขวา.....	66

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

รถยนต์อัตโนมัติ (Autonomous vehicles) เป็นเทคโนโลยีที่ช่วยให้ผู้ขับขี่มีความสะดวกสบายเพิ่มขึ้น เพิ่มความปลอดภัยต่อผู้ใช้รถบนถนน และลดการเกิดข้อผิดพลาดในการใช้จราจรจนเกิดเป็นอุบัติเหตุ จากข้อมูลสถิติการเกิดอุบัติเหตุจากรถยนต์ในประเทศไทยโดยกระทรวงคมนาคมในระหว่างปี พ.ศ. 2563 – 2564 พบว่าสามารถจำแนกได้เป็น อุบัติเหตุทางตรง (ไม่ลาดชัน) คิดเป็น 70% ทางโค้งกว้าง (ไม่ลาดชัน) คิดเป็น 13% ทางโค้งกว้าง (ลาดชัน) คิดเป็น 8% ทางเชื่อมเข้าพื้นที่สาธารณะ/เชิงพาณิชย์ คิดเป็น 3% และ ทางสามแยกและทางสี่แยก คิดเป็น 1% แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ในทางเรียบของรถยนต์ทั้งทางตรงและทางอ้อมเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุบนท้องถนน ซึ่งถือเป็นโจทย์ใหญ่ในการพัฒนารถยนต์อัตโนมัติ



รูปที่ 1.1 สถิติการเกิดอุบัติเหตุบนถนนในประเทศไทยในช่วง พ.ศ. 2563-2564 [1]

เมื่อพิจารณาความสามารถของรถยนต์อัตโนมัติ สมาคมวิศวกรรมยานยนต์แห่งสหรัฐอเมริกา (Society of Automotive Engineering SAE) ได้จำแนกระดับความสามารถของรถยนต์อัตโนมัติเป็น 6 ระดับ จากระดับที่ 0 ไปจนถึงระดับที่ 5 ดังแสดงในรูปที่ 1.2 โดยมีรายละเอียดดังนี้

- ระดับที่ 0 คือ มนุษย์เป็นผู้ขับขี่และควบคุมระบบของรถเองทั้งหมด
- ระดับที่ 1 คือ มีระบบควบคุมอัตโนมัติเข้ามาช่วยผู้ขับขี่ได้ส่วนหนึ่งแต่ผู้ขับขี่ยังคงต้องเป็นผู้เฝ้าระวังและตัดสินใจหลักในการขับขี่ทั้งหมด เช่น ระบบควบคุมล้อ ความเร็วอัตโนมัติ ระบบช่วยเสริมแรงเบรก เป็นต้น
- ระดับที่ 2 คือ ระบบอัตโนมัติเข้ามาช่วยผู้ขับขี่ควบคุมรถยนต์แค่บางสถานะที่เหมาะสมเท่านั้นซึ่งต้องตรงกับเงื่อนไขที่ได้ถูกออกแบบไว้ระบบจะสามารถควบคุมรถได้ชั่วขณะหนึ่งแต่เมื่อตัวรถนั้นอยู่ในสถานะแวดล้อมที่ไม่เอื้ออำนวยต่อระบบอัตโนมัติระบบจะตัดการทำงานออกให้ผู้ขับขี่เป็นผู้ควบคุมทั้งหมดแทน เช่น ระบบช่วยดึงรถกลับเข้าช่องทางในกรณีที่ผู้ขับขี่ใช้ระบบควบคุมความเร็วอัตโนมัติหรือกรณีที่ผู้ขับขี่เผลอหลับในขณะขับรถยนต์แล้วรถเกิดออกช่องทาง
- ระดับที่ 3 คือ ระบบอัตโนมัติสามารถเข้ามาขับขี่รถได้แบบอัตโนมัติและยังสามารถตรวจสอบสภาพแวดล้อมได้ด้วย แต่จะอาศัยผู้ขับขี่มาควบคุมแทนเมื่อเกิดสถานะที่จำเป็น เช่น ระบบช่วยจอดแบบอัตโนมัติ ระบบควบคุมความเร็ว และ เบรกจนถึงจุดหยุดนิ่ง
- ระดับที่ 4 คือ ระบบอัตโนมัติสามารถเข้ามาขับขี่แทนมนุษย์ได้ ทว่าความสามารถจะถูกจำกัดภายใต้สภาพแวดล้อมที่รองรับเท่านั้น ตัวรถยังคงต้องสามารถให้ผู้ขับขี่เป็นผู้ขับได้มีพวงมาลัย มีแป้นเหยียบเหมือนรถปกติ เช่น ระบบช่วยขับขี่แบบอัตโนมัติ
- ระดับที่ 5 คือ ระบบอัตโนมัติทำงานเทียบเท่ากับมนุษย์สามารถตัดสินใจได้ทุกสภาพแวดล้อม ตัวรถนั้นไม่จำเป็นต้องมีพวงมาลัยหรือแป้นเบรก มนุษย์จะเป็นเพียงผู้โดยสารเท่านั้น

ในการพัฒนารถยนต์อัตโนมัติให้ได้ถึงระดับที่ 5 จำเป็นต้องอาศัยระบบย่อยที่ทำงานผสมกันประกอบด้วย ระบบการรับรู้ (Perception) ระบบการค้นหาดำเนินปัจจุบันและการสร้างแผนที่ (localization and mapping) ระบบการวางแผนการขับขี่ (Path Planning) ระบบการตัดสินใจ (Decision Making) และระบบการควบคุมการทรงตัวรถยนต์ (Vehicle Control System) ซึ่งทำงานประสานกันเพื่อทำให้รถยนต์สามารถขับเคลื่อนได้ในสถานะแวดล้อมต่าง ๆ



SAE J3016™ LEVELS OF DRIVING AUTOMATION™

Learn more here: [sae.org/standards/content/j3016_202104](https://www.sae.org/standards/content/j3016_202104)

Copyright © 2021 SAE International. The summary table may be freely copied and distributed AS-IS provided that SAE International is acknowledged as the source of the content.

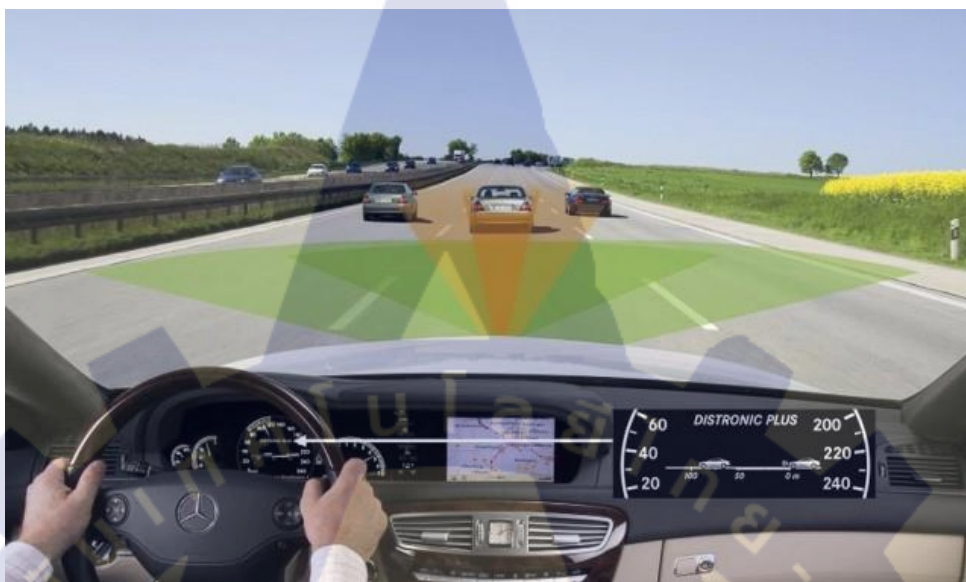
	SAE LEVEL 0™	SAE LEVEL 1™	SAE LEVEL 2™	SAE LEVEL 3™	SAE LEVEL 4™	SAE LEVEL 5™
What does the human in the driver's seat have to do?	You are driving whenever these driver support features are engaged – even if your feet are off the pedals and you are not steering			You are not driving when these automated driving features are engaged – even if you are seated in “the driver’s seat”		
	You must constantly supervise these support features; you must steer, brake or accelerate as needed to maintain safety			When the feature requests, you must drive	These automated driving features will not require you to take over driving	
Copyright © 2021 SAE International.						
	These are driver support features			These are automated driving features		
What do these features do?	These features are limited to providing warnings and momentary assistance	These features provide steering OR brake/acceleration support to the driver	These features provide steering AND brake/acceleration support to the driver	These features can drive the vehicle under limited conditions and will not operate unless all required conditions are met	This feature can drive the vehicle under all conditions	
Example Features	• automatic emergency braking • blind spot warning • lane departure warning	• lane centering OR adaptive cruise control	• lane centering AND adaptive cruise control at the same time	• traffic jam chauffeur	• local driverless taxi • pedals/steering wheel may or may not be installed	• same as level 4, but feature can drive everywhere in all conditions

รูปที่ 1.2 การจำแนกระดับของรถยนต์อัตโนมัติ [2]

ความแตกต่างของรถยนต์อัตโนมัติและมนุษย์ คือ การควบคุมรถยนต์จะสามารถเกิดจากการที่ผู้ขับขี่ได้ประมวลผลข้อมูลที่ได้รับจากประสาทสัมผัสของมนุษย์และสั่งการเคลื่อนที่ของรถยนต์ผ่านพวงมาลัย และ คันเร่ง / เบรก ในทางกลับกัน รถยนต์อัตโนมัติจะแทนที่ประสาทสัมผัสของมนุษย์ด้วยเซ็นเซอร์ประเภทต่าง ๆ เช่น กล้อง Light Detection and Ranging (LiDARs) Radio Detection and Ranging (RADAR) Global Positioning System (GPS) Ultrasonic และ Gyroscope เป็นต้น มาประมวลผลสภาพแวดล้อมโดยรอบตัวรถยนต์ และใช้เป็นข้อมูลสำหรับการสร้างเส้นทางการเดินรถ นอกจากนี้ การเคลื่อนที่ของรถยนต์อัตโนมัติจะไม่สามารถเดินทางได้ราบรื่นหากปราศจากระบบควบคุมเสถียรภาพของตัวรถยนต์ ซึ่งอาศัยหลักพลศาสตร์ยานยนต์ (Vehicle Dynamics) ในควบคุมรถยนต์เพื่อรักษาการทรงตัวระหว่างการเคลื่อนที่ของรถยนต์ทั้งทางตรงและทางโค้ง

การพัฒนาาระบบรถยนต์ขับเคลื่อนอัตโนมัติด้วยการใช้เซ็นเซอร์ตรวจวัดระยะทางมาช่วยกำหนดวิธีควบคุมรถยนต์ นั้นมีพัฒนาการมาจากระบบควบคุมความเร็วอัตโนมัติ (Cruise Control) ที่เข้ามาช่วยผู้ขับขี่ควบคุมความเร็วรถยนต์ในขณะที่เดินทางให้คงที่เพื่อลดอาการเหนื่อยล้าของผู้ขับขี่ที่ต้องใช้ความตั้งใจตลอดเวลา ต่อมาได้มีการเพิ่มความสามารถในการวัดระยะทางระหว่างรถยนต์กับ

วัตถุด้านหน้าได้ เพื่อช่วยให้รถยนต์สามารถแปรผันความเร็วของรถยนต์ให้สัมพันธ์กับรถยนต์คัน
ด้านหน้าทำให้เพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้ขับขี่ ดังแสดงในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 ระบบควบคุมความเร็วรถแบบแปรผันความเร็วอัตโนมัติ [3]

สำหรับระบบควบคุมเสถียรภาพการทรงตัวของรถยนต์ เป็นระบบที่เข้ามาช่วยเหลือผู้ขับขี่ เพื่อชะลอความเร็วหรือลดการลื่นไถลของตัวรถยนต์และช่วยควบคุมการทรงตัวของรถยนต์ให้เข้าโค้งให้อยู่ในเสถียรภาพ ระบบจะทำงานเองอัตโนมัติเมื่อรถเกิดอาการเสียการทรงตัว เช่น เกิดการลื่นไถลของยางซึ่งทำให้ผู้ขับขี่ไม่สามารถควบคุมรถไปในทิศทางที่ต้องการได้ รถยนต์จะทำการเบรกล้อที่หมุนฟรีเพื่อลดการลื่นไถล รวมถึงตัดกำลังของเครื่องยนต์ เพื่อชะลอความเร็วของรถ รวมถึงกระจายแรงเบรกไปยังล้อต่าง ๆ เพื่อให้รถกลับมาอยู่สถานะปกติที่ผู้ขับขี่สามารถควบคุมได้

เพื่อให้ระบบควบคุมเสถียรภาพสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ของการขับขี่อัตโนมัติ ระบบตรวจวัดเสถียรภาพหรือระบบวิเคราะห์อาการเสียการทรงตัว ซึ่งเป็นระบบย่อยของระบบควบคุมเสถียรภาพการทรงตัวของรถยนต์ ทำหน้าที่บ่งชี้อาการสูญเสียเสถียรภาพเพื่อให้ระบบควบคุมการทรงตัวนั้นยับยั้งอาการเสียการทรงตัวของรถได้อย่างถูกต้องและตอบสนองได้อย่างทันท่วงที

ในปัจจุบัน การตรวจวัดสถานะของรถยนต์อาศัยข้อมูลจาก เซนเซอร์ไจโรสโคป หรือ เซนเซอร์ตรวจวัดความเฉื่อย (Inertia Measurement Unit) ในการตรวจวัดข้อมูลการเคลื่อนที่ตามแนวแกนและการหมุนรอบระบบพิกัดฉาก (Cartesian Coordinate System) โดยลักษณะการสูญเสียการทรงตัวของรถยนต์ขณะเข้าโค้งจะพบได้ 2 แบบ คือ 1) อาการหน้าดื้อโค้ง (Understeer)

คือ การที่รถเข้าโค้งด้วยความเร็วสูงแล้วล้อเกิดการไถลออกกับพื้นถนนจึง ทำให้รถยนต์ไม่สามารถเลี้ยวโค้งตามที่ผู้ขับขี่หมุนพวงมาลัยได้ส่งผลให้รถหลุดโค้ง และ 2) อาการไวโค้ง (Oversteer) คือ การที่รถยนต์เข้าโค้งมาด้วยความเร็วสูงแล้วเกิดอาการท้ายปัดออกโค้ง ทำให้รถยนต์เข้าเลี้ยวโค้งมากกว่าที่หมุนพวงมาลัย ส่งผลให้ด้านหน้าของรถยนต์วิ่งเข้าหาด้านในโค้ง อาจส่งผลให้เกิดอุบัติเหตุในโค้งได้ มักเกิดกับรถยนต์ที่เป็นชนิดแบบขับเคลื่อนล้อหลัง

ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของรถยนต์ของรถยนต์อัตโนมัตินั้นได้รับการพัฒนาด้วยกัน 2 แนวทาง คือ แนวทางการใช้เทคนิคที่เกี่ยวข้องกับปัญหาคณิตศาสตร์เป็นฐานการในการตัดสินใจ และ แนวทางการประยุกต์ใช้ทฤษฎีทางพลศาสตร์ยานยนต์ ซึ่งต้องอาศัยการประมาณค่าแรงที่กระทำบนยางและล้อผ่าน Pacejka Magic Formula [4-6] เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการประเมินการลื่นไถลของล้อที่เปลี่ยนแปลงไปตามสภาพถนน [7-8] โดยทั้งสองแนวทางจะใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์แบบเรียลไทม์เพื่อระบุลักษณะการเคลื่อนที่ สำหรับประเมินเสถียรภาพของรถยนต์อัตโนมัติ ซึ่งต้องใช้อำนาจการประมวลผลของคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งบนตัวรถสูง

ดังนั้น เพื่อลดภาระการประมวลผลระบบการประเมินเสถียรภาพของรถยนต์อัตโนมัติในอนาคต ในทางทฤษฎีการพิจารณาลักษณะการสูญเสียเสถียรภาพสามารถทำได้โดยพิจารณาความแตกต่างขององศาเลี้ยวรถยนต์ซึ่งใช้ระบบบังคับเลี้ยวแบบแอคเคอร์มันน์ และทิศทางที่รถยนต์มุ่งหน้า (Heading Angle) โดยความแตกต่างของมุมนี้จะเรียกว่า มุมการลื่นไถล (Sideslip Angle) ซึ่งสามารถนำมาต่อยอดอธิบายลักษณะการสูญเสียเสถียรภาพทางโค้งทั้ง 2 ประเภทที่กล่าวไปข้างต้น

ทว่า การทดสอบแนวความคิดในรถยนต์เชิงพาณิชย์นั้นเป็นไปได้ยาก เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการออกแบบและพัฒนาระบบทดสอบมีมูลค่าค่อนข้างสูง ดังนั้น เพื่อศึกษาแนวความคิดการตรวจสอบเสถียรภาพของรถยนต์อัตโนมัติในงานวิจัยนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นบนแบบจำลองรถยนต์ขนาด 1:10 ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าและใช้ระบบบังคับเลี้ยวแบบแอคเคอร์มันน์ ซึ่งสามารถควบคุมทิศทางได้ด้วยมอเตอร์ และเก็บข้อมูลการเคลื่อนที่ตามแนวแกนและการหมุนจากเซ็นเซอร์หน่วยตรวจวัดการเคลื่อนไหว (Inertia Measurement Unit) ที่ติดตั้งเพิ่มเติมไปบริเวณจุดศูนย์กลางของรถยนต์เพื่อ จากแบบจำลองรถยนต์อัตโนมัตินี้ส่งผลให้ สามารถประยุกต์ใช้แบบจำลองจักรยานบนระนาบ (Planar Bicycle Model) ซึ่งเป็นระบบอย่างง่าย ในการศึกษาลักษณะการสูญเสียเสถียรภาพของรถยนต์ขณะเข้าโค้งของรถยนต์ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อพัฒนาระบบตรวจวัดลักษณะการสูญเสียเสถียรภาพขณะเลี้ยวเข้าโค้งของรถยนต์อัตโนมัติโดยการใช้ข้อมูลจากหน่วยตรวจวัดการเคลื่อนไหวที่ติดตั้งบนแบบจำลองรถยนต์บังคับวิทยุขนาด 1:10

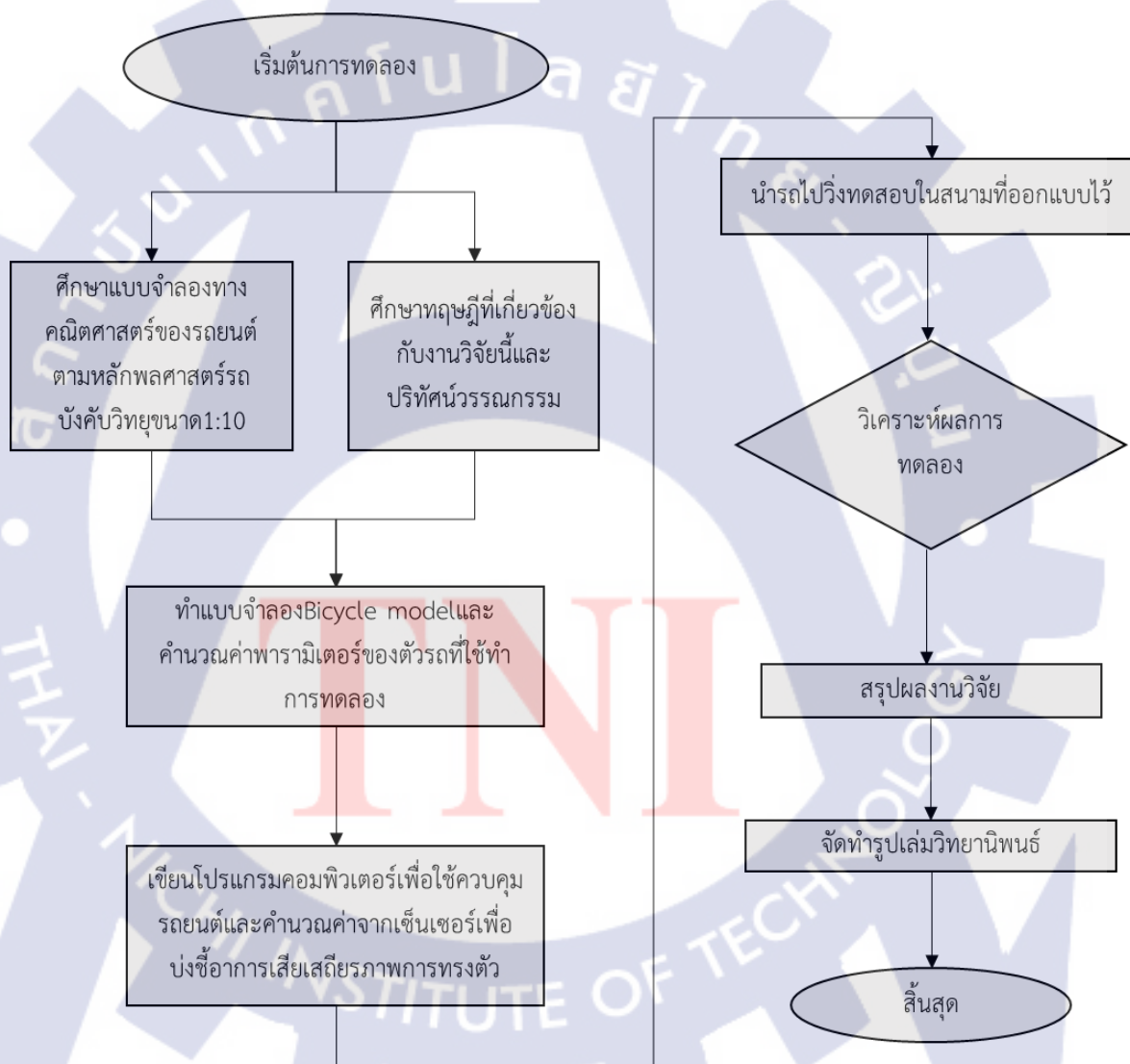
1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ตัวแปรต้นคือ ความเร็วของมอเตอร์ขับเคลื่อนในแต่ละช่วงวัฏจักรการทำงานของมอเตอร์

1.3.2 ตัวแปรตามคือ ค่าที่ได้จากเซ็นเซอร์ตรวจวัดการเคลื่อนไหว 6 แกนมีค่าดังนี้ ความเร็วเชิงมุม และความเร่งเชิงเส้น

1.3.3 ตัวแปรควบคุม คือ สนามทดสอบรถที่เป็นพื้นยางโดยจำลองให้รถยนต์วิ่งรอบวงกลมและตั้งค่าเซอร์โวมอเตอร์บังคับเลี้ยวให้ค่ามุมเลี้ยวเฉลี่ยของล้อหน้าอยู่ที่ 13.5 องศา

1.4 ขั้นตอนการศึกษา



รูปที่ 1.4 แผนผังแสดงขั้นตอนการศึกษา

ตารางที่ 1.1 แผนงานและระยะเวลาในการดำเนินการศึกษาวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย		1/64	2/64	1/65	2/65	1/66	2/66	3/66
1	ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง							
2	สอบป้องกันโครงร่างวิทยานิพนธ์							
3	ออกแบบระเบียบวิธีวิจัย							
4	จัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์							
5	ติดตั้งอุปกรณ์เซ็นเซอร์ใส่ตัวรถ							
6	ออกแบบระบบและเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์							
7	ทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูล							
8	นำเสนอผลงานทางวิชาการ							
9	สอบป้องกันวิทยานิพนธ์							

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ระบบสามารถตรวจวัดลักษณะการสูญเสียเสถียรภาพของรถยนต์ขณะเข้าโค้งได้

1.5.2 สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดใช้เป็นระบบควบคุมการทรงตัวอัตโนมัติในยานยนต์ไร้คนขับได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

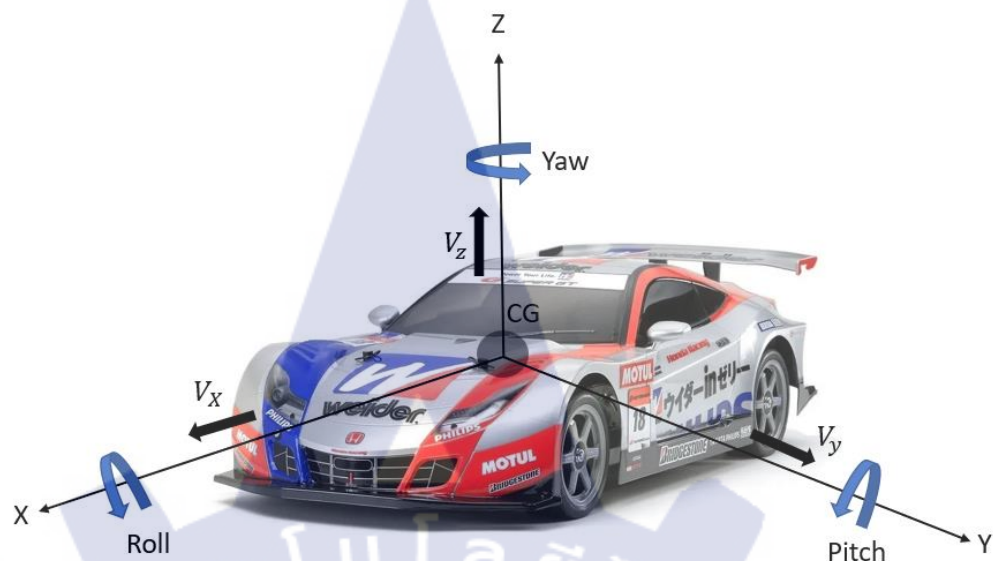
ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวทางการศึกษาเสถียรภาพของรถยนต์ผ่านแนวทางการออกแบบช่วงล่างของรถยนต์ ปัจจัยการสูญเสียเสถียรภาพการทรงตัว และการพัฒนาระบบวิเคราะห์เสถียรภาพทางโค้งของรถยนต์ด้วยทฤษฎีทางพลศาสตร์ยานยนต์ยนต์ รวมทั้งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบวิเคราะห์เสถียรภาพและพัฒนาเป็นระบบควบคุมการทรงตัวของรถยนต์อัตโนมัติ ซึ่งในปัจจุบันไม่ได้มีเพียงแต่การเพิ่มสมรรถนะของรถยนต์ในด้านสมรรถนะการขับขี่ในทางตรงเพียงอย่างเดียว แต่มีการนำเทคโนโลยีช่วยเหลือผู้ขับขี่มาประยุกต์ใช้เพื่อช่วยลดอุบัติเหตุบนท้องถนนและสร้างระเบียบการจราจรให้ดีขึ้น

2.1 พลศาสตร์ยานยนต์

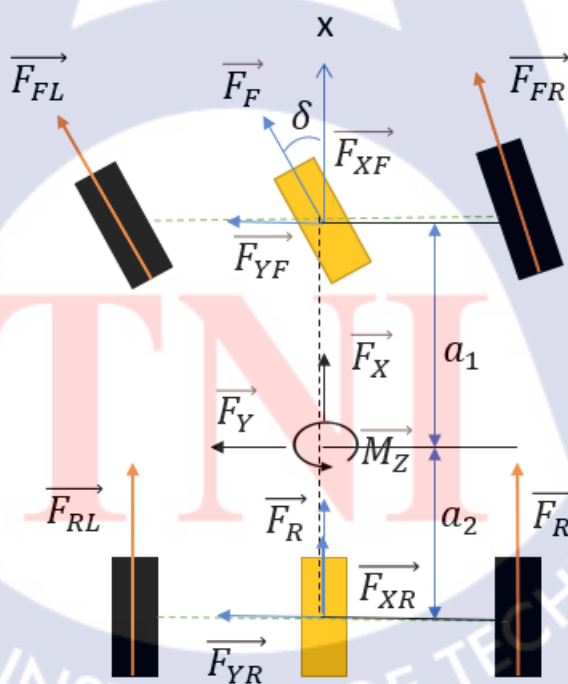
แบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์เป็นเครื่องมือสำคัญในการวิเคราะห์พฤติกรรมของรถยนต์ ซึ่งมียู่ด้วยกัน 2 รูปแบบ ประกอบด้วย แบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์แบบ 2 มิติ (Bicycle Model) และแบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์แบบ 3 มิติ (Four Wheels Model) ทั้ง 2 รูปแบบนี้มีความแตกต่างกันดังนี้

1. แบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์แบบ 2 มิติ เป็นการจำลองการเคลื่อนที่ของรถยนต์แบบอย่างง่ายลดความซับซ้อนลง ซึ่งจะมุ่งเน้นไปที่ตัวแปรหลัก คือการเคลื่อนที่บนระนาบพิกัดฉาก X-Y ประกอบด้วย การเคลื่อนที่ตามแนวการเคลื่อนที่ (x) และการเคลื่อนที่ตามแนวข้าง (Y) และการหมุนของรถในแกน Z (Yaw)

2. แบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์แบบ 3 มิติ เป็นการจำลองการเคลื่อนที่ของรถยนต์ที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้นตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณสมการในพลศาสตร์นั้นมีหลายตัวแปรซับซ้อนกว่าพลศาสตร์ยานยนต์แบบ 2 มิติ ซึ่งในการคำนวณจะต้องมีการพิจารณาจากการเคลื่อนที่ตามแนวแกนการเคลื่อนที่ (X) การเคลื่อนที่ตามแนวข้าง (Y) การเคลื่อนที่ในแนวตั้ง รวมทั้งการหมุนตามแนวแกน ประกอบด้วย การโคลงตัวของรถยนต์ หรือ การหมุนตามแนวแกน X (Roll) การกระดกตัวของรถยนต์ หรือ การหมุนของรถในแกน Y (Pitch) และ การส่ายตัวของรถยนต์ หรือ การหมุนของรถในแกน Z (Yaw) ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แกนอ้างอิงที่ยึดติดกับรถยนต์



รูปที่ 2.2 แบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์แบบ 2 มิติ (Bicycle model)

การวิเคราะห์เสถียรภาพของรถยนต์ขณะเลี้ยวโค้งสามารถพิจารณาได้จากสมการพลศาสตร์ยานยนต์ที่กำหนดขึ้นบนระบบพิกัดฉาก (Cartesian Coordinate System) โดยกำหนดแกน x เป็นแกนตามแนวยาว มีทิศทางมุ่งไปด้านหน้าตัวรถ และแกน y เป็นแกนตามแนวข้าง มีทิศทางตั้งฉากกับแกน x ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เมื่อกำหนดนิยามเสถียรภาพการเลี้ยวโค้งของรถยนต์ โดยการกำหนดให้รถยนต์เป็นวัตถุแข็งเกร็ง (rigid body) ที่เคลื่อนที่บนถนนด้วยแรงตามแนวยาว (*Longitudinal Force : F_x*) แรงตามแนวข้าง (*Lateral Force: F_y*) และหมุนตามโมเมนต์การส่าย (*Yawing Moment : M_z*) สมการการเคลื่อนที่ของรถยนต์จึงเขียนเป็นดังนี้

$$F_x = F_{xF} \cos \delta + F_{xR} - F_{yF} \sin \delta \quad (2.1)$$

$$F_y = F_{yF} \cos \delta - F_{yR} - F_{xF} \sin \delta \quad (2.2)$$

$$M_z = a_1 F_{yF} \cos \delta + a_1 F_{xF} \sin \delta - a_2 F_{yR} \quad (2.3)$$

โดยที่ F_{xF} คือ แรงตามแนวยาวที่กระทำที่ด้านล้อหน้า

F_{xR} คือ แรงตามแนวยาวที่กระทำที่ด้านล้อหลัง

F_{yF} คือ แรงตามแนวด้านข้างกระทำที่ด้านล้อหน้า

F_{yR} คือ แรงตามแนวด้านข้างกระทำที่ด้านล้อหลัง

M_z คือ แรงหมุนตามโมเมนต์การส่าย

a_1 คือ ระยะระหว่างฐานล้อหน้าถึงจุดศูนย์กลางมวล

a_2 คือ ระยะระหว่างฐานล้อหลังถึงจุดศูนย์กลางมวล

δ คือ มุมเลี้ยวของรถยนต์

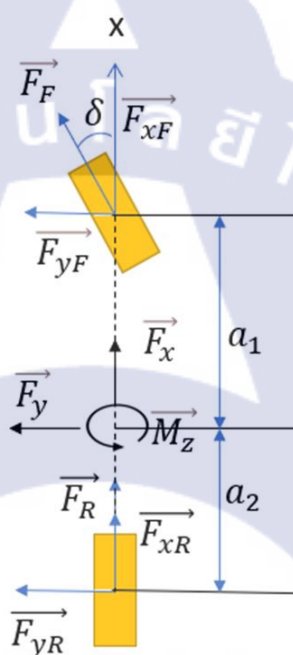
หากไม่พิจารณาการเกิดการหมุนรอบแนวแกน X (Rolling) และ แนวแกน Y (Pitching) และพิจารณาให้ระหว่างการเลี้ยวโค้งไม่เกิดการลื่นไถล (Slip) ประกอบกับมีแรงต้านข้างเกิดขึ้นเฉพาะล้อหน้า รวมทั้งตัวรถไม่ได้เกิดการพลิกคว่ำ ล้อไม่ได้ยกออกจากพื้น และรถไม่ได้มีอาการกระด้าง สมการการเคลื่อนที่ของรถยนต์จะสามารถลดรูปได้เป็นแบบจำลองจากรยาน โดยสามารถพิจารณาแต่แรงต้านข้างที่กระทำต่อล้อด้านหน้าและกระทำต่อล้อด้านหลังเท่านั้น ซึ่งแรงล้อหน้าจะสามารถรวมเวกเตอร์ของแรงล้อหน้าซ้ายและแรงล้อหน้าขวา ($\vec{F}_F = \vec{F}_{FL} + \vec{F}_{FR}$) ในทำนองเดียวกันกับล้อ

หลัง $(\vec{F}_R = \vec{F}_{RL} + \vec{F}_{RR})$ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.3 สมการการเคลื่อนที่ตามแบบจำลองจักรยานจะเป็นดังสมการดังต่อไปนี้

$$F_x = F_F \cos \delta + F_R \quad (2.4)$$

$$F_y = F_F \sin \delta \quad (2.5)$$

$$M_z = a_1 F_F \sin \delta \quad (2.6)$$



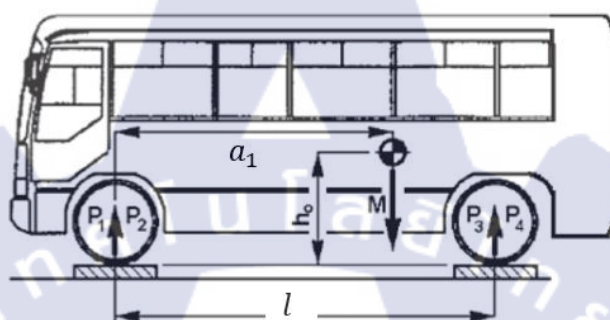
รูปที่ 2.3 แบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์แบบ 2 มิติที่พิจารณาลดรูปสมการ

2.1.1 จุดศูนย์กลางมวลของรถยนต์ (Center Gravity of Vehicle)

ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวล (Center Gravity of Vehicle) ถือเป็นปัจจัยสำคัญของการศึกษาเสถียรภาพการทรงตัวของรถเนื่องจากเป็นจุดที่ส่งผลกระทบเป็นอย่างมากต่อการออกแบบรถยนต์ให้ควบคุมได้อย่างง่าย ซึ่งคือส่งผลต่อการบังคับควบคุมรถยนต์ การเลี้ยวเข้าโค้ง การวิ่งขึ้นลงทางชัน ยังต้องการการเกาะถนนมากจึงจำเป็นต้องมีการออกแบบรถยนต์ให้จุดศูนย์กลางนี้อยู่ในจุดที่ต่ำที่สุดของรถ

2.1.1.1 จุดศูนย์ถ่วงกลางมวลของรถยนต์ตามแนวยาว

ในการพิจารณาหาจุดศูนย์ถ่วงกลางมวลของรถยนต์ตามแนวยาวนั้นจะพิจารณาความยาวของฐานล้อ (Wheel base) ซึ่งตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงกลางมวลของรถยนต์ตามแนวยาวนั้นจะอยู่ในแนวระนาบหากมองจากด้านข้างของรถยนต์นั้นคือตามภายใต้ของระยะของฐานล้อ ซึ่งจะหาได้จากสมการนี้



รูปที่ 2.4 ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงกลางมวลตามแนวยาว

$$a_1 = \frac{(P_3 + P_4)l}{W} \quad (2.7)$$

โดยที่ P_3 คือ มวลน้ำหนักจากล้อหลังด้านซ้าย

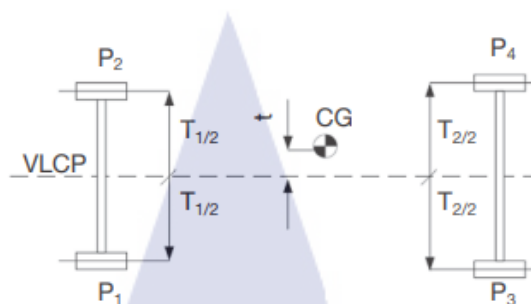
P_4 คือ มวลน้ำหนักจากล้อหลังด้านขวา

W คือ มวลน้ำหนักรวมของรถทั้งคัน

l คือ ระยะฐานล้อของรถวัดได้จากระยะกึ่งกลางของล้อหน้าถึงกึ่งกลางของล้อหลัง

2.1.1.2 จุดศูนย์ถ่วงกลางมวลของรถยนต์ตามแนวด้านข้าง

จุดศูนย์ถ่วงกลางมวลของรถยนต์ตามแนวด้านข้างจะอยู่ระหว่างล้อทางซ้ายและล้อทางขวาถ้าหากมองจากทางด้านรถตัวจุดศูนย์ถ่วงกลางมวลของรถยนต์ตามแนวด้านข้างจะวิ่งข้างตามแนวความกว้างของล้อซ้ายไปถึงล้อขวา ซึ่งจะพิจารณาได้จากจุดกึ่งกลางระหว่างล้อทางด้านซ้ายและล้อทางด้านขวา ซึ่งจะหาได้จากสมการดังนี้



รูปที่ 2.5 ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงกลางมวลตามแนวด้านข้าง

$$t = ((P_1 - P_2) \frac{T_1}{2} + (P_3 - P_4) \frac{T_2}{2}) \left(\frac{1}{W} \right) \quad (2.8)$$

โดยที่ P_1 คือ มวลน้ำหนักจากล้อหน้าด้านซ้าย

P_2 คือ มวลน้ำหนักจากล้อหน้าด้านขวา

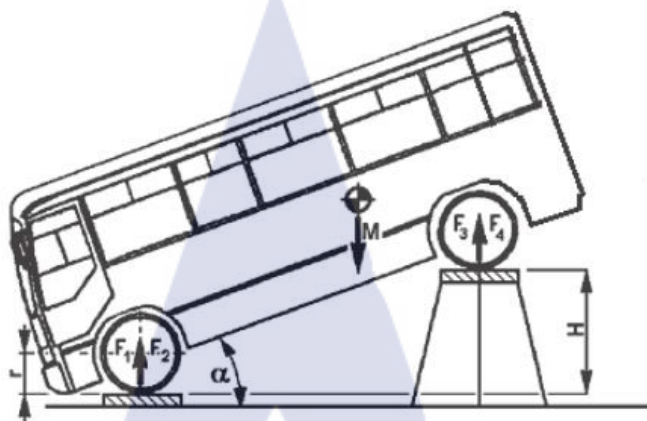
T_1 คือ ระยะกว้างของล้อหน้า

T_2 คือ ระยะกว้างของล้อหลัง

t คือ ระยะจุดศูนย์ถ่วงกลางมวลของรถยนต์ตามแนวด้านข้าง

2.1.1.3 จุดศูนย์ถ่วงกลางมวลของรถยนต์ตามแนวด้านตั้ง

จุดศูนย์ถ่วงกลางมวลของรถยนต์ตามแนวด้านตั้งจะสามารถพิจารณาได้จากระยะที่บ่อสัมผัสลงบนพื้นถนนซึ่งการพิจารณาหาจุดศูนย์ถ่วงกลางมวลของรถยนต์ตามแนวด้านตั้งนี้จะยากกว่าการหาจุดศูนย์ถ่วงกลางมวลของรถยนต์ตามแนวนอนอื่นๆซึ่งจะมาจากการทำการทดสอบเท่านั้นซึ่งมีวิธีทำอยู่ 3 วิธี ดังนี้วิธีแรกคือยกท้ายรถขึ้น ในแนวดิ่งให้สูงแล้วล้อหน้าต้องยังอยู่บนพื้น วิธีที่สองแกว่งรถและวิธีสุดท้ายคือพลิกคว่ำ ซึ่งในกรณีศึกษาจะใช้วิธีแบบแรกคือยกท้ายรถขึ้น ซึ่งจุดศูนย์ถ่วงกลางมวลของรถยนต์ตามแนวด้านตั้งจะหาได้จากสมการต่อไปนี้



รูปที่ 2.6 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลตามแนวตั้ง

$$h = \frac{(W a_1 - R_4 l) \sqrt{l^2 - H^2}}{HW} + r \quad (2.9)$$

โดยที่ a_1 คือ ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางมวลของรถยนต์ตามแนวยาวถึงกึ่งกลางของล้อหน้า

R_4 คือ น้ำหนักรวมของล้อหลังทั้งซ้ายและขวา

H คือ ความสูงขณะที่ยกล้อหลังขึ้น

r รัศมีวงล้อ

h คือ ระยะจุดศูนย์กลางมวลของรถยนต์ตามแนวตั้ง

2.1.1.4 ระบบบังคับเลี้ยว

1) ระบบบังคับเลี้ยวแบบอ็คเคอร์มันน์ (Ackermann) คือรถยนต์ที่มีองศาการเลี้ยวของล้อด้านในโค้งเลี้ยวได้มากกว่าด้านนอกโค้งซึ่งออกแบบมาเพื่อให้สามารถเลี้ยวเข้ากลับรถในที่แคบได้ดีซึ่งระบบบังคับเลี้ยวชนิดนี้มีใช้อยู่ในรถทั่วไป ซึ่งการออกแบบองศาเลี้ยวของล้อหน้าที่มีองศาเลี้ยวไม่เท่ากันเพื่อลดอาการไถลหรือขึ้นของตัวล้อกับพื้นถนนส่งผลให้สามารถควบคุมได้ง่ายเนื่องจากในการเข้าโค้งนั้นล้อด้านนอกโค้งกับด้านในโค้งจะหมุนไม่เท่ากันในระบบบังคับเลี้ยวชนิดนี้จะมีจุดหมุนศูนย์กลาง (Center of rotation) อยู่ที่จุดเดียวกันและอยู่ในระดับเดียวกับของล้อด้านหลังในกรณีที่ล้อด้านหลังไม่สามารถเลี้ยวได้แต่ในส่วนองศาเลี้ยวระหว่างรถกับจุดหมุนนั้นขึ้นอยู่กับรัศมีของล้อที่เลี้ยวและความเร็ว ซึ่งหาได้จากสมการดังนี้

$$\cot \delta_i - \cot \delta_o = \frac{w}{l} \quad (2.10)$$

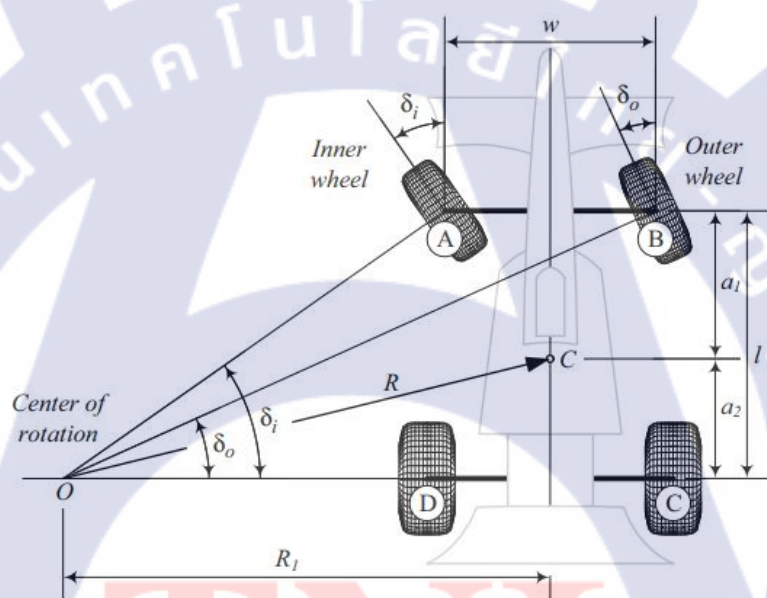
$$\cot \delta = \left(\frac{\cot \delta_i + \cot \delta_o}{2} \right) \quad (2.11)$$

โดยที่ w คือ ความกว้างของฐานล้อหน้า

δ คือ มุมของระบบบังคับเลี้ยวเฉลี่ย

δ_i คือ มุมเลี้ยวของล้อด้านในโค้ง

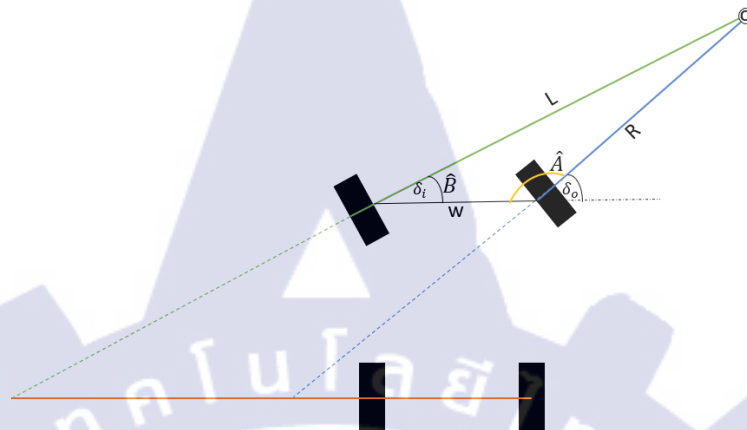
δ_o คือ มุมเลี้ยวของล้อด้านนอกโค้ง



รูปที่ 2.7 มุมเลี้ยวของรถยนต์ 4 ล้อแบบอ็คเคอร์มันน์ [4]

2) ระบบบังคับเลี้ยวแบบรีเวิร์สอ็คเคอร์มันน์ (Reverse Ackermann) คือ รถยนต์ที่มีองศาการเลี้ยวของล้อด้านในโค้งน้อยกว่าด้านนอกโค้ง ในการออกแบบระบบบังคับเลี้ยวนี้ นอกจากระบบอ็คเคอร์มันน์ที่ใช้กันโดยทั่วไปแล้ว ยังมีระบบบังคับเลี้ยวแบบรีเวิร์สอ็คเคอร์มันน์ (Reverse Ackermann) ซึ่งเป็นระบบบังคับเลี้ยวที่เพิ่มความสามารถในการยึดเกาะด้านข้างที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน โดยความแตกต่างของระบบบังคับเลี้ยวแบบรีเวิร์สอ็คเคอร์มันน์ คือ องศาการเลี้ยวของล้อด้านในจะมีค่าน้อยกว่าล้อด้านนอก ส่งผลให้มีจุดหมุนชั่วขณะ (Instantaneous Center of

Rotation) เกิดขึ้นในทิศทางตรงข้ามกับระบบบังคับเลี้ยวแบบอ็คเคอร์มันน์แต่ในการหามุมระบบบังคับเลี้ยวเฉลี่ยนั้นจะใช้สมการเดียวกัน



รูปที่ 2.8 เรขาคณิตของรีเวอร์สอ็คเคอร์มันน์

ซึ่งหาได้จากสมการดังนี้

$$\frac{\sin O}{w} = \frac{\sin \hat{A}}{L} = \frac{\sin \hat{B}}{R} \quad (2.12)$$

$$\hat{A} = 180^\circ - \delta_o \quad (2.13)$$

$$\hat{B} = \delta_i \quad (2.14)$$

โดยที่ มุม $\hat{O}$ คือ มุมจุดหมุนชั่วขณะของ Reverse Ackermann

มุม $\hat{A}$ คือมุมที่เกิดจากแกนนอนที่ต่อจากมุมบังคับเลี้ยวฝั่งล้อด้านนอกโค้ง (δ_o) ที่วิ่งไปหาจุดหมุนชั่วขณะ

มุม $\hat{B}$ คือมุมของระบบบังคับเลี้ยวจากล้อด้านในโค้ง

2.1.2 มุมเลี้ยวของล้อของรถยนต์

ในการวิเคราะห์อาการสูญเสียเสถียรภาพการทรงตัวของรถยนต์ในขณะที่ทำการเข้าโค้งจะเห็นได้ว่าเมื่อรถยนต์นั้นทำการหักเลี้ยวเข้าโค้งจะเกิดมุมที่ล้อของรถยนต์อยู่สามชนิด ได้แก่ มุมของระบบบังคับเลี้ยว (δ) มุมทิศทางที่รถยนต์เคลื่อนที่จริง (β) และมุมสไลด์ (α) จากในรูปที่ 2.8

ซึ่งถ้าหากว่ารถยนต์นั้นเกิดอาการสูญเสียเสถียรภาพการทรงตัวจะเกิดมุมดังกล่าวขึ้นซึ่งในการพิจารณารถยนต์ที่ไม่สามารถเลี้ยวได้ตามมุมมองศาลี้ยวของมุมระบบบังคับเลี้ยวได้รถยนต์ก็จะเกิดอาการลื่นไถลทำให้เกิดมุมลื่นไถลที่ล้อของรถยนต์และตัวรถนั้นไม่สามารถวิ่งไปตามโค้งได้จึงเกิดมุมทิศทางที่รถยนต์เคลื่อนที่จริงหรือทิศทางที่รถยนต์วิ่งไปสามารถหามุมลื่นไถลล้อหน้าและล้อหลังโดยการใช้สมมติฐานของการเลี้ยวโค้งปกติที่รถยนต์มีมุมเลี้ยวเฉพาะล้อหน้าได้จากสมการดังนี้

$$\alpha_f = \beta_f - \delta \quad (2.16)$$

$$\alpha_r = \beta_r \quad (2.17)$$

โดยที่ α_f คือ มุมลื่นไถลของล้อหน้า

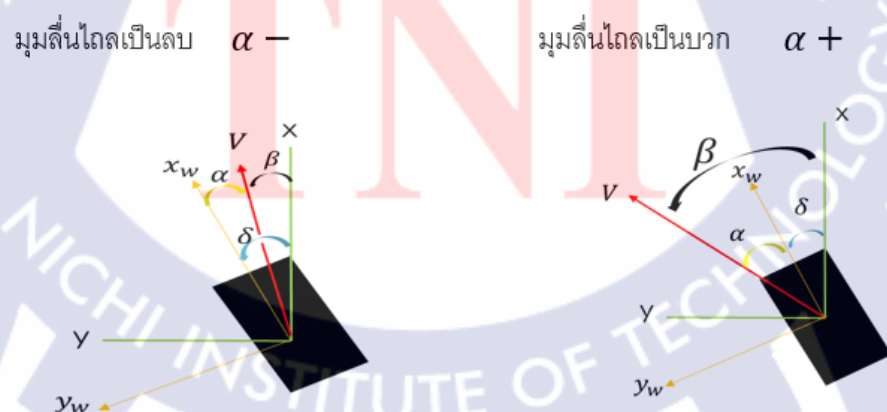
β_f คือ มุมที่เคลื่อนที่จริงที่ล้อหน้า

δ คือ มุมเฉลี่ยของระบบบังคับเลี้ยว

α_r คือ มุมลื่นไถลของล้อหลัง

β_r คือ มุมที่เคลื่อนที่จริงที่ล้อหลัง

ส่งผลให้ทิศทางการเคลื่อนที่ของรถยนต์ขณะเข้าโค้งสามารถจำแนกได้เป็น 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่มุมลื่นไถลติดลบและกรณีที่มุมลื่นไถลเป็นบวก หากองศาการเลี้ยวมีค่ามากกว่าทิศทางของการเคลื่อนที่ของรถยนต์มุมลื่นไถลจะมีค่าติดลบ ในทางกลับกัน มุมเลื้อนไถลเป็นบวกเกิดขึ้นในกรณีที่องศาการเลี้ยวมีค่าน้อยกว่าทิศทางของการเคลื่อนที่ของตัวรถดังที่แสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.9 ทิศทางการเคลื่อนที่ของรถยนต์และล้อที่ส่งผลต่อมุมลื่นไถล (a) กรณีมุมลื่นไถลติดลบและ (b) กรณีมุมลื่นไถลเป็นบวก

ในทิศทางการเคลื่อนที่ของรถจริงหรือ Heading angle (β) ซึ่งจะเกิดขึ้นทั้งจากทิศทางของล้อหน้า β_f และทิศทางของล้อหลัง β_r สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของความเร็วตามแนวยาว (v_x) ความเร็วตามแนวข้าง (v_y) และมุมส่าย (Yaw angle: g_z) ซึ่งจะเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\beta_f = \tan^{-1} \left(\frac{v_y + a_1(g_z)}{v_x} \right) \quad (2.18)$$

$$\beta_r = \tan^{-1} \left(\frac{v_y - a_2(g_z)}{v_x} \right) \quad (2.19)$$

2.1.3 สัมประสิทธิ์การลื่นไถลของล้อ (Sideslip Coefficient: C_{α})

แรงเสียดทานในขณะที่ยานยนต์วิ่งนั้นยางรถยนต์ซึ่งเป็นตัวทำหน้าที่สัมผัสพื้นเพื่อทำให้รถทำให้รถวิ่งได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งยางจะเกิดแรงเสียดทานกับพื้นผิวถนนที่มีทิศทางที่ขนานกันและเกิดแรงต้านทานการลื่นไถลซึ่งสัมประสิทธิ์การลื่นไถลของล้อนั้นคือเกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านข้างที่กระทำตอนรถขณะทำการเลี้ยวเข้าโค้งกับมุมลื่นไถลของล้อ ในขณะที่รถทำการเลี้ยวโค้งจะมีความเร่งด้านข้างมากระทำต่อตัวรถทำให้เกิดแรงกระทำด้านข้างที่ล้อของรถยนต์ส่งผลให้เกิดการลื่นไถลทำให้ล้อนั้นมีมุมลื่นไถล (Slip Angle) เกิดขึ้นในขณะทำการเลี้ยวโค้งตัวรถจึงไม่สามารถเลี้ยวไปตามมุมบังคับเลี้ยวได้รถยนต์จึงเกิดอาการวิ่งเฉหรือปดออกขณะเข้าโค้งได้ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำด้านข้างกับมุมลื่นไถลสามารถอธิบายได้ตามสมการนี้

$$F_{y_f} = -C_{\alpha_f} \alpha_f \quad (2.20)$$

$$F_{y_r} = -C_{\alpha_r} \alpha_r \quad (2.21)$$

โดยที่ F_{y_f} คือ แรงด้านข้างที่เกิดขึ้นที่ล้อหน้า

F_{y_r} คือ แรงด้านข้างที่เกิดขึ้นที่ล้อหลัง

C_{α_f} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถลของล้อหน้า

C_{α_r} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถลของล้อหลัง

α_f คือ มุมลื่นไถลของล้อหน้า

α_r คือ มุมลื่นไถลของล้อหลัง

2.2 ปัจจัยการเกิดอาการสูญเสียเสถียรภาพของรถยนต์ขณะวิ่งเข้าโค้ง

รถยนต์นั้นเมื่อทำการวิ่งเข้าโค้งจะสามารถอธิบายพฤติกรรมของรถยนต์ขณะวิ่งเข้าโค้งได้ 3 รูปแบบ ได้แก่ สภาวะสมดุล (Neutral) สภาวะหน้าดื้อโค้ง (Understeer) และ สภาวะไวโค้งหรือท้ายปัด (Oversteer) ซึ่งในแต่ละรูปแบบจะมีหลายปัจจัยที่ทำให้เกิดขึ้นเช่น ความเร็วที่ใช้ในการวิ่งเข้าโค้ง การออกแบบตัวรถ ช่วงล่างของรถ ชนิดของยาง ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวล รวมไปถึงน้ำหนักของตัว ทั้งหมดที่กล่าวมาเป็นเพียงปัจจัยหนึ่งที่เกิดจากตัวของรถยนต์เองเท่านั้น ซึ่งในการสูญเสียเสถียรภาพของรถยนต์ขณะวิ่งเข้าโค้งยังมีปัจจัยภายนอกที่มากกระทำต่อรถ ไม่ว่าจะเป็น พื้นผิวถนน ความลาดเอียงของถนน รวมไปถึงสภาพอากาศในขณะนั้น(ความเปียกชื้นบนถนน)เช่น หิมะ น้ำ ทราย และอาจมีวัตถุที่เกิดจากสภาพแวดล้อมในบริเวณนั้น อีกทั้งยังมีปัจจัยจากมนุษย์ที่ส่งผลทำให้รถเกิดเสถียรภาพของรถยนต์ขณะวิ่งเข้าโค้งได้ เนื่องจากมนุษย์เป็นผู้ขับที่หากขาดประสบการณ์หรือประมาทอาจจะส่งผลให้รถเสียการควบคุมขณะเข้าโค้งได้ โดยอาการเสถียรภาพในการเลี้ยวโค้งของรถยนต์นั้น ได้แก่ อาการดื้อโค้ง (Understeer) และ อาการไวโค้ง (Oversteer) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของตัวแปรเสถียรภาพ (Stability Factor) เป็นไปดังสมการนี้

$$K = \frac{m}{l^2} \left(\frac{a_2}{C_{\alpha f}} - \frac{a_1}{C_{\alpha r}} \right) \quad (2.22)$$

2.2.1 รูปแบบลักษณะพฤติกรรมของรถยนต์ขณะเลี้ยวโค้ง

2.2.1.1 สภาวะสมดุลอยู่ในเสถียรภาพ (Neutral)

ในสภาวะนี้ตัวรถจะวิ่งเข้าโค้งโดยไม่มีอาการเสียการทรงตัวแต่อย่างใด ตัวรถจะเลี้ยวเข้าตามโค้งโดยไม่เกิดอาการสั่นไถล ผู้ขับซึ่งยังคงสามารถควบคุมรถได้อย่างง่ายเป็นปกติตัวรถนั้นวิ่งไปตามทิศทางตามการสั่งระบบบังคับเลี้ยวหรือตามการหักเลี้ยวพวงมาลัยของผู้ขับขึ้นนั่นเอง(Intended Vehicle Path) เนื่องจากความเร่งในแนวด้านข้างที่ทำให้เกิดแรงที่กระทำด้านข้าง ณ จุดศูนย์กลางมวลของรถยนต์และค่าสัมประสิทธิ์การสั่นไถลระหว่างล้อหน้ากับล้อหลังมีความใกล้เคียงกัน

$$K = 0 \quad (2.23)$$

2.2.1.2 สภาวะหน้าดื้อโค้ง (Understeer)

ในสภาวะนี้ตัวรถจะวิ่งเข้าโค้งและเกิดอาการสั่นไถลมาจากทางลื่นหน้าทำให้ผู้ขับซึ่งไม่สามารถบังคับเลี้ยวให้รถเลี้ยวไปตามโค้งได้ส่งผลให้รถวิ่งตรงแทนที่จะวิ่งเลี้ยวเข้าโค้ง ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการเลี้ยวโค้งเข้ามาในโค้งด้วยความเร็วที่สูงไปส่งผลให้ตัวรถนั้นไม่สามารถเลี้ยวไปตามทิศทางตาม

การสั่งระบบบังคับเลี้ยวหรือตามการหักเลี้ยวพวงมาลัยของผู้ขับขี่ได้ตัวรถนั้นเลี้ยวได้น้อยกว่าทิศทางที่ผู้ขับขี่ต้องการทำให้รถวิ่งออกนอกเส้นทางที่ผู้ขับขี่ต้องการ (Actual Vehicle Path) ซึ่งในสถานการณ์นี้ตัวรถนั้นจะพุ่งตรงออกโค้งไม่สามารถเลี้ยวเข้าไปตามโค้งได้) เนื่องจากความเร่งในแนวด้านข้างที่ทำให้เกิดแรงที่กระทำด้านข้าง ณ จุดศูนย์กลางมวลของรถยนต์และค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถลของล้อหน้ามากกว่าล้อหลังตัวรถเกิดอาการลื่นไถลมาจากล้อหน้า

$$K > 0 \quad (2.24)$$

2.2.1.3 สภาวะไวโค้งหรือท้ายปัด (Oversteer)

ในสภาวะนี้ตัวรถจะวิ่งเข้าโค้งและเกิดอาการลื่นไถลมาจากทางล้อหลังทำให้ตัวรถเกิดอาการวิ่งเข้าหาโค้งมากกว่าปกติเนื่องจากอาการท้ายปัดทำให้ผู้ขับขี่ไม่สามารถควบคุมรถให้วิ่งเข้าตามโค้งได้ ซึ่งส่วนใหญ่มักเกิดจากลื่นไถลจากรถยนต์ที่ขับเคลื่อนล้อหลัง ที่มีแรงบิดสูงทำให้ล้อหมุนฟรีหรือเกิดจากการที่ล้อหลังลื่นไถลตายจากการเหยียบเบรกในโค้งส่งผลให้ตัวรถนั้นไม่สามารถเลี้ยวไปตามทิศทางตามการสั่งระบบบังคับเลี้ยวหรือตามการหักเลี้ยวพวงมาลัยของผู้ขับขี่ได้ตัวรถนั้นเลี้ยวไปเกินกว่าทิศทางที่ผู้ขับขี่ต้องการทำให้รถวิ่งออกนอกเส้นทางที่ผู้ขับขี่ต้องการ (Actual Vehicle Path) ซึ่งในสถานการณ์นี้ตัวรถนั้นจะท้ายปัดออกแล้วหน้ารถหันเข้าหาโค้ง ในการแข่งขันรถดริฟท์ (Drift) ผู้ขับขี่จะนำวิธีการควบคุมอาการเสียการทรงตัวแบบไวโค้งมาใช้เพื่อให้ตัวรถสามารถเข้าโค้งแบบสไลด์ได้โดยที่ล้อหลังนั้นลื่นไถลและใช้การควบคุมล้อหน้าเป็นตัวกำหนดทิศทางของรถโดยผู้ขับขี่จะควบคุมองศาเลี้ยวของพวงมาลัย การใช้เบรกมือ และการควบคุมคันเร่งให้สัมพันธ์กันเพื่อให้เกิดอาการไวโค้งหรือท้ายปัดออกขณะวิ่งเข้าโค้งและเลี้ยวอาการไวตัวรถนั้นจึงสามารถเข้าโค้งด้วยการสไลด์ของรถเนื่องจากความเร่งในแนวด้านข้างที่ทำให้เกิดแรงที่กระทำด้านข้าง ณ จุดศูนย์กลางมวลของรถยนต์และค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถลของล้อหน้ามากกว่าล้อหลัง ตัวรถเกิดอาการลื่นไถลมาจากล้อหน้าที่น้อยกว่าล้อหลังตัวรถเลยเกิดอาการลื่นไถลมาจากล้อหลัง

$$K < 0 \quad (2.25)$$

2.2.2 ความเร็ววิกฤตในการเข้าโค้ง (Cornering Speed)

การคำนวณความเร็วสูงสุดที่ตัวรถนั้นสามารถวิ่งเข้าโค้งก่อนเกิดอาการสูญเสียเสถียรภาพการทรงตัวสามารถคำนวณได้จากการพิจารณาการเคลื่อนที่ของยานยนต์ในทางโค้งซึ่งความเร็ววิกฤตนี้จะบอกได้ว่ารถจะเกิดอาการเสียการทรงตัวที่ความเร็วใดๆ ซึ่งคำนวณได้จากสมการนี้

$$v_c = \begin{cases} \sqrt{-\frac{1}{K}}, & \text{oversteer} \\ \sqrt{\frac{1}{K}}, & \text{understeer} \end{cases} \quad (2.26)$$

โดยที่ V_c คือความเร็ววิกฤตขณะที่ยานยนต์วิ่งเข้าโค้ง

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยของ M. V. Gennip เรื่อง Vehicle Dynamic Modelling and Parameter Identification for an Autonomous Vehicle เขาได้ทำการศึกษาการทำนายรถยนต์ไร้คนขับโดยอาศัยพลศาสตร์ยานยนต์ให้เกิดความแม่นยำในงานวิจัยนี้ได้นำรถยนต์ไฮบริดยี่ห้อ Lincoln MKZ มาติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงที่ล้อ (Wheel force sensor) เพื่อเก็บข้อมูล Longitudinal force, Lateral force, Vertical forces, Moment about the longitudinal axis, Moment about the lateral axis, Moment about the vertical axis, Angular velocity of the wheel อีกทั้งยังติดตั้งอุปกรณ์วัดตำแหน่งของล้อ (Wheel Position Sensor) เพื่อใช้บอกระยะของล้อกับตัวถังรถยนต์รวมถึงมุมล้อของรถยนต์และเซ็นเซอร์วัดระยะจากพื้นด้วยการยิงเลเซอร์ (Laser Ground Sensor) เริ่มการวิ่งทดสอบและเก็บผลข้อมูลจากการวิ่งตามเส้นทางที่กำหนดผลที่ได้พบว่าค่าเมื่อมุม Slip เพิ่มขึ้นแรงตามแนวยาวจะแปรผันเปลี่ยนไปโดยแรงตามแนวยาวจะลดน้อยลงแสดงให้เห็นว่าเมื่อรถเกิดการไถลนั้นความเร็วของตัวรถจะต้องลดลงถึงจะสามารถกลับมาควบคุมได้ [5]

ในงานวิจัย *Electronic Stability Control of Vehicles* ปี 2020 ของ S. Gupta et al. ได้นำรถ Mercedes Benz B Class โดยการทำทดลองผ่านโปรแกรม CarSim เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (friction coefficient) เทียบกับเปอร์เซ็นต์การลื่นไถลของล้อ (Wheel slip) โดยมีตัวแปรเป็นชนิดของพื้นถนนได้แก่พื้นแห้ง พื้นเปียก พื้นมีหิมะและพื้นน้ำแข็งพบว่าพื้นแห้งนั้นค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพื้นแต่ละชนิดตามลำดับอยู่ถึง 0.9 0.7 0.2 0.1 ในช่วงแรกและเปอร์เซ็นต์การลื่นไถลจะสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่พื้นต่ำลงโอกาสที่รถนั้นจะเกิดอาการลื่นไถลร้อยละเปอร์เซ็นต์ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของพื้นแต่ละชนิดตามลำดับจะอยู่ที่ 0.72 0.6 0.15 และ 0.5 รถที่ติดตั้งระบบ ABS มาช่วยจะสามารถเบรกในขณะที่ถนนลื่นแต่ยังคงสามารถควบคุมทิศทางของพวงมาลัยได้ [6]

ในงานวิจัยของนายเอกลักษณ์ พรหมภักดี เรื่องการวิเคราะห์เสถียรภาพการเลี้ยวโค้งของรถ บัสไฟฟ้าประเภทพื้นต่ำด้วยวิธีการจำลองทางพลศาสตร์การเคลื่อนที่แบบมัลติบอดี ในงานวิจัยนี้ได้นำ รถบัสไฟฟ้ามาทำการทดลองโดยการสร้างแบบจำลองการเลี้ยวโค้งของรถไฟฟ้าพื้นต่ำด้วยโปรแกรม MSC ADAM/Car โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ของรถไฟฟ้าพื้นต่ำด้วยค่าจริง มีการชั่งน้ำหนักตัวรถจริง ในการทดสอบมีการจำลองสถานการณ์ด้วยกันแบ่งสัดส่วนการกระจายของน้ำหนักในแนวยาวระหว่าง เพลาน้ำกับเพลาด้านหลังและให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างพื้นถนนกับพื้นล้ออยู่ที่ 0.7 และกำหนดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของล้อหน้าและล้อหลัง ซึ่งพบว่าความเร็วสูงสุดขณะเลี้ยว โค้งที่ทำได้น้อยสุดมีค่ากำหนดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของล้อหน้าอยู่ที่ 5,000 N/deg ล้อหลังอยู่ที่ 3,000 N/deg ซึ่งทำความเร็วสูงสุดได้แค่ 67Km/h แต่ถ้าว่ามีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของล้อ หน้า 3,000 N/deg และล้อหลังอยู่ที่ 5,000 N/deg จะทำความเร็วได้มากกว่า 200 Km/h แต่ใน ความเป็นจริงแล้วมีอาจจะทำได้ซึ่งในความเป็นจริงตัวรถมีการสัดส่วนการกระจายของน้ำหนักในแนว ยาวระหว่างเพลาน้ำกับเพลาด้านหลัง 50:50 ตัวรถจะสามารถเข้าโค้งรัศมีโค้งเท่ากับ 50 เมตรได้ ด้วยความเร็ว 122Km/h และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของล้อหน้า 3,000 N/deg และล้อหลังอยู่ ที่ 5,000 N/deg ถือว่าเป็นค่าที่รถเข้าโค้งได้ดีที่สุดสำหรับรถบัสไฟฟ้าพื้นต่ำ [7]

ในงานวิจัยเรื่อง Kinematics-Based Analytical Solution for Wheel Slip Angle Estimation of a RWD Vehicle with Drift ของ R. Chaichaowarat และ W. Wannasuphoprasit ในการพัฒนาระบบควบคุมเสถียรภาพของรถยนต์นั้นในงานวิจัยนี้ได้วัดมุมการลื่นไถลของล้อหน้าเมื่อ รถทำการวิ่งแบบลื่นไถลหรือใช้การดริฟต์โดยการติดตั้งกล้องเพื่อบันทึกเหตุการณ์ขณะทดลองโดยจะใช้ รถบังคับวิทยุขนาด1:10แบบขับเคลื่อนล้อหลังมาทำการทดลองเลี้ยวโค้งให้เกิดอาการลื่นไถลในการ วัดค่ามุมเลี้ยวของล้อนั้นจะใช้มุมที่รถวิ่งเข้าสู่มุมศูนย์กลาง ความเร็ว (instantaneous center zero velocity) คล้ายกับมุมวิกฤตที่จะเกิดขึ้นในขณะที่ยานยนต์เกิดอาการท้ายปัด (Oversteer) ตัวรถ นั้นมีการติดตั้งเซ็นเซอร์ IMU ระบบคอมพิวเตอร์ที่รับสัญญาณจากเอ็นโคเดอร์ที่รับสัญญาณการ หมุนของล้อเพื่อใช้ในการประมวลผลในการทดลองได้นำรถวิ่งทดสอบจับเปรียบเทียบระหว่าง ค่าประมาณกับค่าที่วัดได้จากมองเห็นและเซ็นเซอร์ซึ่งนำไปทดสอบบนรถแล้วเก็บผลข้อมูลมุมการลื่น ไถลของล้อนำมาเปรียบเทียบกับค่าประมาณเมื่อเทียบกับข้อมูลอ้างอิงสามารถประเมินค่ามุมลื่น ไถลของล้อหน้าได้ไม่อย่างจะลื่นแค่ไหนก็ตาม โดยการประเมินมุมการลื่นไถลนี้จะใช้แค่มุมบังคับ เลี้ยวจากล้อนำเท่านั้นการคำนวณโดยตรงของมุมการลื่นของล้อได้มาจากการวิเคราะห์ด้วย kinematic analysis of a planar four-wheel vehicle ด้วยการทดลองวิ่งรถแบบสี่ล้อ4ตัวจะ บันทึกพฤติกรรมของรถโดยเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงตามการมองเห็น สามารถประมาณมุมการลื่น ไถลของล้อแต่ละล้อได้อย่างดีตัวแปรสถานะของยานพาหนะอื่น ๆ เช่น รัศมีความโค้ง การลื่นไถล ด้านข้างของยานพาหนะและความเร็วได้มาจากการสัมพันธ์จลนศาสตร์ [8]

ในบทความเรื่อง เสถียรภาพการบังคับยานยนต์ และ แนวทางการทดสอบ ของ ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณีและคณะ ซึ่งบทความทางวิชาการนี้ได้เสนอในเรื่องของเสถียรภาพการบังคับเลี้ยวของ รถยนต์ แนวทางการทดสอบซึ่งมุ่งเน้นไปทางพัฒนาประสิทธิภาพของตัวรถยนต์และมีประโยชน์ใน ด้านของการพัฒนาอุตสาหกรรมยานยนต์โดยแนวทางการทดสอบในกรณีของ การทดสอบจริง สามารถแบ่งได้เป็น 4 การทดสอบหลักคือ การทดสอบความเร่งด้านข้าง การทดสอบการโคลง การ ทดสอบ แรงเบรก และการทดสอบจุดศูนย์กลางมวลของรถยนต์ซึ่งการทดสอบเหล่านี้สามารถนำ มา ใช้วิเคราะห์เสถียรภาพของ รถยนต์ในกรณีต่างๆ กันภายใต้การออกแบบรถยนต์และการขับขี่ใน สภาวะต่างๆ ส่วนการทดสอบด้วยการจำลองทาง คณิตศาสตร์และการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปควร ตระหนักถึงความถูกต้องของสมการคณิตศาสตร์และการจำลองเงื่อนไข การทดสอบ เพื่อลดค่าความ คลาดเคลื่อนของผลการทดสอบ ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการควบคุมรถยนต์ให้มีเสถียรภาพได้แก่ ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวล แรงเบรก และการกระจายแรงเบรก รวมไปถึงสภาพของพื้นผิวถนน ซึ่ง เสถียรภาพการบังคับรถยนต์มีการทดสอบจริงส่วนใหญ่ มุ่งเน้นไปที่การทดสอบความเร่งด้านข้างการ โคลงแรงเบรกและตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของรถยนต์โดยการทดสอบจริงนี้มีเงื่อนไขการทดสอบที่ พิจารณาถึงการขับขี่ขณะเข้าโค้งและความเร็วที่ใช้ในการทดสอบ ยกเว้นกรณีการทดสอบตำแหน่งจุด ศูนย์กลางมวลเท่านั้นที่ไม่มีการทดสอบจากการเคลื่อนที่ของรถยนต์ส่วนกรณีการทดสอบด้วยการ จำลองทางคณิตศาสตร์และการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปเริ่มเข้ามามีบทบาทมากขึ้นในปัจจุบันเนื่องจากมี ค่าใช้จ่ายต่ำกว่าการทดสอบจริงและสามารถจำลองสภาวะการขับขี่รูปแบบต่างได้การใช้การทดสอบ ด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์และโปรแกรมสำเร็จรูปนี้ควรเปรียบเทียบกับ การทดสอบจริงเพื่อลด ความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบซึ่งการทดสอบจริงและการจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถใช้ เป็นแนวทางในการนำไปพัฒนา เทคโนโลยีที่สามารถตอบสนองการขับขี้อย่างปลอดภัย [9]

ในงานวิจัยของปริญญา วัฒนกุลชัย เรื่องระบบย่อยส่วนพลศาสตร์สมมูลยานยนต์จริง ใน งานวิจัยนี้ได้พูดถึงการพัฒนาต้นแบบรถยนต์จริงมีขั้นตอนที่ซับซ้อนการสร้างรถยนต์จริงเพื่อทดสอบ นั้นจะต้องใช้เวลาจนกระทั่งค่าใช้จ่ายสูง การใช้แบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์มาวิเคราะห์จะช่วยให้ พัฒนาได้เร็วยิ่งขึ้นแต่ทว่าสมการทางคณิตศาสตร์ไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นของตัวรถได้ อย่างสมบูรณ์งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่แนวคิดใหม่คือการพัฒนาต้นแบบยานยนต์จริงย่อยส่วนที่มี พฤติกรรมทางพลศาสตร์สมมูลกับยานยนต์จริงในงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองอย่างง่ายที่เรียกว่า “Linear bicycle model” โดยนำทฤษฎีของบักกิงแฮมมาประยุกต์กับสมการแบบจำลอง Linear bicycle model และใช้ข้อมูลอ้างอิงจากยานพาหนะจริงเช่น ระยะจากล้อหน้าถึงจุด ศูนย์กลางมวล ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานด้านข้างของล้อ โมเมนต์ความเฉื่อย มวลของรถ ซึ่งตัว แปรเหล่านี้มาจากขบวนการทางคณิตศาสตร์ การจัดกลุ่มตัวแปรไว้มิติ กฎของความคล้าย หลัก ทฤษฎีพายของบักกิงแฮม ซึ่งสุดท้ายจะอยู่ในกลุ่มตัวแปรไว้มิติ แล้วนำมาสร้างต้นแบบยานยนต์จริง

ย่อบตามกลุ่มตัวแปรไว้มีดีสามารถควบคุมยานยนต์ด้วยสัญญาณรีโมทไร้สายและสร้างอุปกรณ์เพิ่มเติมเพื่อวัดค่าและปรับความเฉื่อยทำให้สามารถปรับการกระจายมวลของกลุ่มตัวแปรนี้ได้ตรงกับยานยนต์จริงแต่ทว่ากลุ่มตัวแปรในส่วนของยางมีอาจสอดคล้องจึงสร้างอุปกรณ์วัดค่าแรงต้านจากล้อเมื่อถูกขับด้วยความเร็วในวัสดุที่แตกต่างกันและเมื่อเปลี่ยนวัสดุแล้วทำให้จัดกลุ่มสมมูลได้ หลังจากทำการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของตัวรถย่อบส่วนได้แล้วนำค่าตัวแปรที่ได้ไปจำลองระบบทางพลศาสตร์เทียบกับยานพาหนะจริงด้วยโปรแกรม MATLAB [10]

ในงานวิจัยชื่อ Vehicle stability control system for enhancing steerability, lateral stability, and roll stability ของ J. -S. Jo ได้ศึกษาเกี่ยวกับการนำ Yaw Rate มาพัฒนาเป็นระบบควบคุมการเลี้ยวโค้งของรถยนต์โดยออกแบบมาเพื่อลดการเกิดอุบัติเหตุเพื่อเพิ่มความสามารถในการบังคับเลี้ยวของยานพาหนะ ความเสถียรด้านข้าง และความเสถียรในการหมุน Yaw Rate จะทำหน้าที่เข้ามาช่วยคุมแรงเบรกและกระจายแรงเบรกไปยังแต่ละล้อเพื่อให้รถสามารถบังคับทิศทางได้อย่างแม่นยำซึ่งจะแปรผันแรงดันน้ำเบรกไปตามสถานการณ์ที่แตกต่างกัน [11]

ในบทความงานวิจัยของ M. K. Aripin เรื่อง A Review of Active Yaw Control System for Vehicle Handling and Stability Enhancement ได้อธิบายถึงการนำ Yaw stability มีความสำคัญในเรื่องของการควบคุมรถที่เกิดจากแรงด้านข้างที่กระทำต่อรถซึ่งจะออกแบบพัฒนา Yaw stability เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของตัวรถและการควบคุมรถ มีงานวิจัยไม่มากนักที่มุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงประสิทธิภาพอัตราการหันเหของยานพาหนะและการควบคุม sideslip ในการออกแบบระบบจะใช้ Simulation ในการจำลองโมเดลไดนามิกของยานพาหนะ วัตถุประสงค์ในการควบคุมการควบคุมแอสซีแบบแอคทีฟ และกลยุทธ์การควบคุมโดยมุ่งเน้นไปที่การระบุเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพชั่วคราว แต่ละองค์ประกอบจะถูกอภิปรายและเปรียบเทียบในแง่ของทฤษฎีพื้นฐานจุดแข็ง จุดอ่อน และการนำไปประยุกต์ใช้ จากนั้น เราสรุปได้ว่าการควบคุมโหมดการเลี้ยวที่มีพื้นผิวการเลี้ยวแบบไม่เชิงเส้นอิงจากผลป้อนกลับแบบไม่เชิงเส้นเชิงประกอบเป็นกลยุทธ์การควบคุมที่มีศักยภาพในการปรับปรุงประสิทธิภาพชั่วคราวของอัตราการหันเหและการควบคุมการติดตามการเลี้ยว [12]

ตารางที่ 2.1 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ที่	คณะผู้วิจัย (ปี)	หัวข้อวิจัย	วิธีวิจัย	ผลที่ได้รับ
1	2018	Vehicle Dynamic modeling and parameter Identification for an autonomous Vehicle	นำรถยนต์มาติดตั้งอุปกรณ์วัดที่แรงล้อ เพื่อเก็บข้อมูล ข้อมูลแรงต่างๆที่มากกระทำที่ล้อทั้ง 4 ล้อ ในขณะที่ทำการเลี้ยวโค้ง โดยทดสอบในเส้นทางที่กำหนดไว้ ผลที่ได้คือเมื่อรถเกิดอาการลื่นไถลแรงด้านข้างสูงขึ้นแรงตามแนวยาวก็จะสูงขึ้นแต่เมื่อสามารถลดแรงตามแนวยาวได้ก็จะส่งผลให้แรงที่กระทำด้านข้างลดลงและตัวรถก็จะสามารถกลับเข้าสู่สภาวะที่ควบคุมได้	การใช้เซ็นเซอร์ไปติดตั้งที่ล้อของรถนั้นเพื่อทำการวัดแรงที่กระทำต่อล้อ ซึ่งสามารถนำผลที่วัดได้คือ ค่าของแรงต่างๆที่มากกระทำต่อตัวรถมาอธิบายพฤติกรรมของรถและสามารถนำแก้ปัญหาอาการที่ควบคุมรถไม่ได้
2	2020	Electronic Stability Control of vehicle	นำรถยนต์ MB รุ่น B Class มาเชื่อมต่อผ่านโปรแกรมจำลอง CarSim เพื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับเปอร์เซ็นต์การลื่นไถลของล้อ โดยมีตัวแปรเป็นพื้นหลายชนิด เช่น พื้นแห้ง พื้นเปียก พื้นหิมะ และ พื้นน้ำแข็งโดยในพพื้นที่ละชนิดมีค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานแตกต่างกันและเทียบกับรถที่มี ABS และ ไม่มี	ในการจำลองพื้นผิวที่มีความแตกต่างกันเพื่อชี้ให้เห็นว่าตัวรถนั้นมีโอกาสเกิดอาการลื่นไถลมาจากพื้นผิวถนนที่มีความฝืดน้อย ซึ่งจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างยางรถยนต์กับผิวถนนเป็นตัววิเคราะห์
3	2017	เรื่องวิเคราะห์เสถียรภาพการเลี้ยวโค้งของรถบัสไฟฟ้า	ในงานวิจัยนี้ได้นำรถบัสไฟฟ้ามาทำการทดลองโดยการสร้างแบบจำลองการเลี้ยวโค้งของรถไฟฟ้าพันท่ำด้วยโปรแกรม	ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลและการกระจายน้ำหนักของรถมี

ตารางที่ 2.1 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ที่	คณะผู้วิจัย (ปี)	หัวข้อวิจัย	วิธีวิจัย	ผลที่ได้รับ
		ประเภทพื้นต่ำ ด้วยวิธีการจำลอง ทางพลศาสตร์ การเคลื่อนที่ แบบมัลติบอดี	MSC ADAM/Car โดยกำหนด ค่าพารามิเตอร์ของรถไฟฟ้าพื้นต่ำ ด้วยค่าจริงค่าสัมประสิทธิ์ความ เสียดทานระหว่างพื้นถนนกับพื้น ล้ออยู่ที่ 0.7 และกำหนดค่า สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของล้อ หน้าและล้อหลัง	ผลต่อขีดจำกัดในการ เลี้ยวโค้งอย่างมาก ซึ่ง การออกแบบรถนั้นจึง จำเป็นต้องออกแบบ จุดศูนย์ถ่วงให้ต่ำและ มีการกระจายน้ำหนัก ที่เหมาะสมทั้งหน้า และหลัง รวมทั้ง ด้านซ้ายและด้านขวา อีกด้วย
4	2016	Kinematics- Based Analytical Solution for Wheel Slip Angle Estimation of a RWD Vehicle with Drift	ในงานวิจัยนี้ได้วัดมุมการลื่นไถล ของล้อหน้าเมื่อรถทำการวิ่งแบบ ลื่นไถลหรือใช้การดริฟต์โดยการ ติดตั้งกล้องเพื่อบันทึกเหตุการณ์ ขณะทดลองโดยจะใช้รถบังคับ วิทยุขนาด 1:10 แบบขับเคลื่อนล้อ หลังมาทำการทดลองเลี้ยวโค้งให้ เกิดอาการลื่นไถลในการวัดค่ามุม เลี้ยวของล้อหน้านั้นจะใช้มุมที่รถ วิ่งเข้าสู่มุมศูนย์กลาง ความเร็ว (instantaneous center zero velocity) คล้ายกับมุมวิกฤตที่จะ เกิดขึ้นในขณะที่ยานยนต์เกิดอาการ ท้ายปัด (Oversteer) ตัวรถนั้นมีการ ติดตั้งเซ็นเซอร์ IMU ระบบ คอมพิวเตอร์ที่รับสัญญาณจากเอ็น โค้ดเดอร์ โดยการประเมินมุมการ	ในการเกิดอาการไว โค้งหรือ Oversteer นั้น จะมีมุมที่เกิดขึ้น คล้ายมุมวิกฤต ซึ่งตัว รถจะเกิดอาการลื่น ไถล โดยที่เกิดอาการ ลื่นไถลจากล้อหลัง และการเกิดอาการไว โค้งตัวรถจะพบมุมลื่น ไถลซึ่งตัวรถจะเลี้ยว ไปได้มากกว่ามุม บังคับเลี้ยว

ตารางที่ 2.1 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ที่	คณะผู้วิจัย (ปี)	หัวข้อวิจัย	วิธีวิจัย	ผลที่ได้รับ
			ลื่นไถลนี้จะใช้แค่มุมบังคับเลี้ยว จากล้อหน้าเท่านั้นการคำนวณ โดยตรงของมุมการลื่นของล้อ ได้มาจากการวิเคราะห์ด้วย Kinematic analysis of a planar four-wheel vehicle ด้วยการทดลองวิ่งรถแบบสุ่ม	
5	2013	เสถียรภาพ การบังคับ รถยนต์ และ แนวทางการ ทดสอบ	การทดสอบจริงสามารถแบ่งได้ เป็น 4 การทดสอบหลักคือ การ ทดสอบความเร่งด้านข้าง การ ทดสอบการโคลง การทดสอบ แรงเบรก และการทดสอบจุด ศูนย์กลางมวลของรถยนต์ซึ่งการ ทดสอบเหล่านี้สามารถนำ มาใช้ วิเคราะห์เสถียรภาพของ รถยนต์ ในกรณีต่างๆ ปัจจัยสำคัญที่ ส่งผลต่อการควบคุมรถยนต์ให้มี เสถียรภาพได้แก่ ตำแหน่งจุด ศูนย์กลางมวล แรงเบรก และ การกระจายแรงเบรก รวมไปถึง สภาพของพื้นผิวถนน ซึ่ง เสถียรภาพการบังคับรถยนต์มี การทดสอบจริงส่วนใหญ่	วิธีทดสอบซีดจำกัดของ รถยนต์นั้นมีหลากหลายวิธี แต่วิธีที่เลือกนำมาวิเคราะห์ เป็นหลักหลักจะมีความเร่ง ด้านข้าง และ จุดศูนย์ถ่วง กลางมวลเนื่องจากจะ สามารถช่วยบอกพฤติกรรม อาการของรถขณะที่ยังทำ การวิ่งเข้าโค้งได้ซึ่งปัจจัย ลักษณะที่รถเกิดอาการเสีย การทรงตัวนั้นอาจเกิดจาก พื้นผิวถนนที่มีความลื่น
6	2008	ระบบย่อยส่วน พลศาสตร์ สมมุติยาน ยนต์จริง	งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นไปที่แนวคิด ใหม่คือการพัฒนาด้านแบบยาน ยนต์จริงย่อยส่วนที่มีพฤติกรรม	การทำBicycle model มา วิเคราะห์พลศาสตร์ยานต์ นั้นสามารถบอกแรงต่างๆ

ตารางที่ 2.1 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ต่อ)

ที่	คณะผู้วิจัย (ปี)	หัวข้อวิจัย	วิธีวิจัย	ผลที่ได้รับ
			ทางพลศาสตร์สมมูลกับยานยนต์จริงในงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองอย่างง่ายที่เรียกว่า “Linear bicycle model” โดยนำทฤษฎีของบักกิงแฮมพายมาประยุกต์กับสมการแบบจำลอง Linear bicycle model และใช้ข้อมูลอ้างอิงจากยานพาหนะจริง	ที่มากระทำต่อตัวรถได้ในการออกแบบรถโดยอ้างอิงจากการประยุกต์ใช้ทฤษฎีของบักกิงแฮมพายจะสามารถวิเคราะห์ลักษณะและพฤติกรรมของรถจากรถที่ย่อยส่วนจากรถยนต์ขนาดจริงได้
7	2017	Vehicle stability control system for enhancing steerability, lateral stability, and roll stability	ศึกษาเกี่ยวกับการนำYaw Rate มาพัฒนาเป็นระบบควบคุมการเลี้ยวโค้งของรถยนต์โดยออกแบบมาเพื่อลดการเกิดอุบัติเหตุเพื่อเพิ่มความสามารถในการบังคับเลี้ยวของยานพาหนะ	เซ็นเซอร์ Yaw rate สามารถนำมาอธิบายพฤติกรรมการเลี้ยวของรถได้ว่าตัวรถยังวิ่งอยู่ในสภาวะสมดุลหรือไม่ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดใช้ควบคุมรถไม่ให้เสียการทรงตัวได้
8	2014	A Review of Active Yaw Control System for Vehicle Handling and Stability Enhancement	การนำ Yaw stability มีความสำคัญในเรื่องของการควบคุมรถที่เกิดจากแรงต้านข้างที่กระทำต่อรถซึ่งจะออกแบบพัฒนา Yaw stability เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของตัวรถ	ในขณะที่ระวางเข้าโค้งจะจะใช้ค่าYaw rate วัดค่าการหมุนของรถเมื่อเริ่มมีค่าสูงขึ้นแสดงให้เห็นว่าตัวรถจะเกิดอาการเสียการทรงตัว

บทที่ 3

ระเบียบวิธีการวิจัย

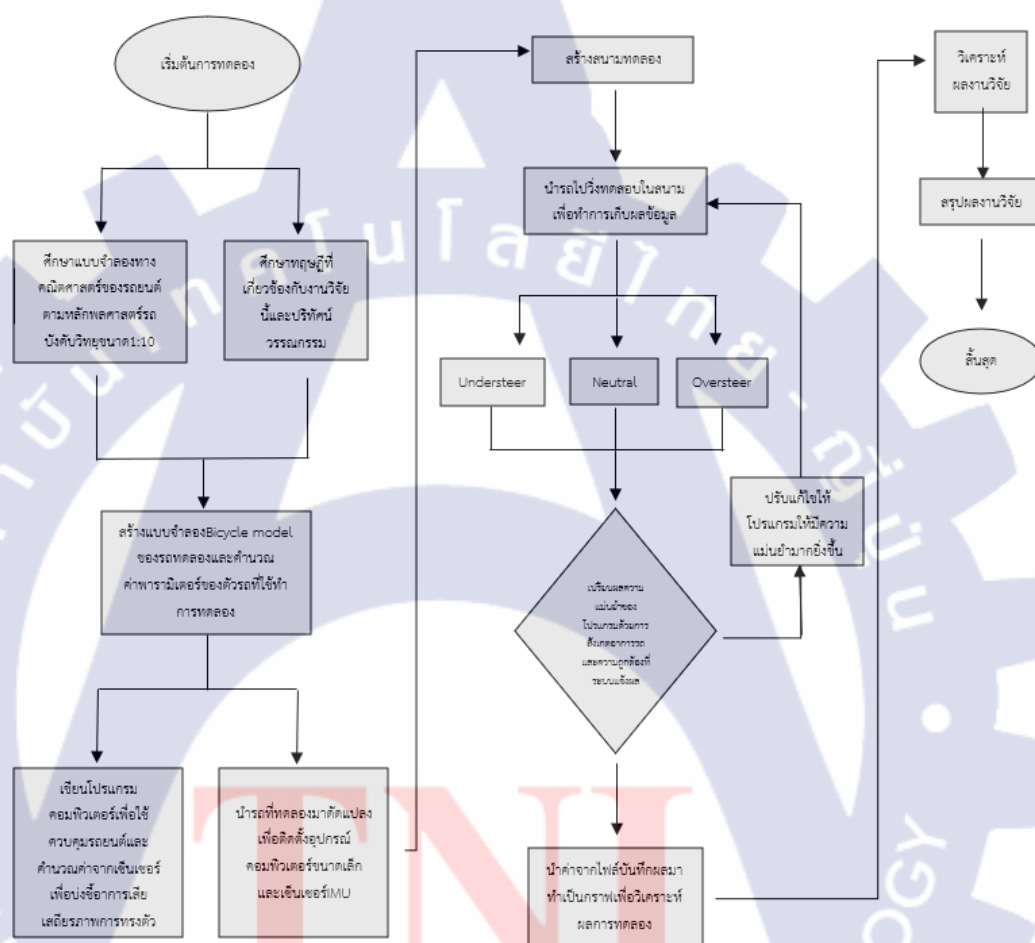
3.1 กล่าวนำ

ในการทำวิจัยการพัฒนาระบบวิเคราะห์เสถียรภาพทางโค้งของรถยนต์อัตโนมัติกรณีศึกษารถยนต์บังคับวิทยุขนาด 1:10 นั้นจะต้องสร้างแบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์แบบ 2 มิติ หรือ Bicycle model และใช้โปรแกรมทางด้านคอมพิวเตอร์ที่ถูกเขียนด้วยภาษาทางคอมพิวเตอร์ Python เข้ามาควบคุมตัวรถในขณะที่วิ่งทำการทดลองเก็บผลตัวโปรแกรมนั้นไม่ได้มีหน้าที่แค่ควบคุมเพียงอย่างเดียวแต่ยังสามารถเป็นตัวรับและส่งผลข้อมูลเพื่อใช้ประมวลผลจากเซ็นเซอร์ตรวจวัดการเคลื่อนไหวแบบ 6 แกนเพื่อแจ้งเสถียรภาพของตัวรถในการทดลองนี้จะกำหนดสนามที่ใช้ในการทดลองให้มีรัศมีความยาวใกล้เคียงกับระยะจุดหมุนศูนย์กลางของตัวรถโดยสร้างเป็นวงกลมเพื่อทำการทดสอบเสถียรภาพของตัวรถในวิถีโค้งโดยให้ตัวรถวิ่งวนรอบวงกลมและกำหนดตัวแปรต้นคือความเร็วของรถตามความเร็วรอบของมอเตอร์ซึ่งผันแปรตามระดับวัฏจักรการทำงาน (Duty Cycle) และมุมของระบบบังคับเลี้ยวเฉลี่ยโดยตัวแปรตามคือค่าผลที่ได้จากเซ็นเซอร์ตรวจวัดการเคลื่อนไหวแบบ 6 แกนเพื่อวัดค่าความเร่งเชิงมุมและความเร่งเชิงเส้นข้อมูลจะถูกส่งไปให้โปรแกรมที่ออกแบบมาเพื่อคำนวณทางคณิตศาสตร์และส่งผลแจ้งพร้อมทั้งบันทึกผลข้อมูลเก็บไว้ในรูปแบบไฟล์ .csv เมื่อผู้ทดลองดึงไฟล์ข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กที่ติดตั้งบนตัวรถทดลองมาวิเคราะห์โดยผลข้อมูลดิบที่ได้จากเซ็นเซอร์ตรวจวัดการเคลื่อนไหว 6 แกนจะมีค่าที่เก็บผลได้ขณะทำการทดลองดังนี้ความเร่งเชิงมุมในแกน X ความเร่งเชิงมุมในแกน Y ความเร่งเชิงมุมในแกน Z ความเร่งเชิงเส้นในแกน X ความเร่งเชิงเส้นในแกน Y ความเร่งเชิงเส้นในแกน Z

ในการวิเคราะห์อาการสูญเสียเสถียรภาพการทรงตัวของรถในงานวิจัยนี้จะทดสอบในพื้นที่แห้งไม่เปียกถนน เป็นพื้นที่กระเบื้องที่ปูพื้นอาคารทั่วไปไม่ใช่พื้นถนนคอนกรีตซึ่งอาจจะส่งผลให้มีความคลาดเคลื่อนได้บ้างด้วยพื้นที่จำกัดซึ่งจะสร้างสถานการณ์ทำให้รถสูญเสียเสถียรภาพได้นั้นจะสามารถทำได้โดยการใช้ความเร็วของรถในการเข้าโค้งเมื่อตัวรถมีความเร็วสูงเกินจุดที่ตัวรถรับได้จะทำให้เกิดอาการเสียการทรงตัวซึ่งในงานวิจัยนี้จะสร้างระบบที่จะมาวิเคราะห์อาการสูญเสียเสถียรภาพของตัวรถซึ่งจะอธิบายขั้นตอนและวิธีการทำรวมถึงอุปกรณ์และวิธีทดสอบไว้ในบทนี้ทั้งนี้ทั้งนั้นที่เลือกรถบังคับวิทยุขนาด 1:10 มาใช้ในการทดลองเนื่องจากมีขนาดเล็กติดตั้งอุปกรณ์ได้อย่างสะดวกสบายและสามารถหาพื้นที่ที่ใช้ในการทดลองได้ง่ายกว่ารถยนต์ขนาดจริงอีกทั้งค่าใช้จ่ายเรื่องงบประมาณในการทดลองใช้น้อยกว่ารถยนต์จริงเป็นอย่างมาก อีกทั้งรถยนต์ขนาดจริงอาจจะส่งผลกระทบของในเรื่องอุบัติเหตุที่มีโอกาสเกิดขึ้นขณะทำการทดลองได้ซึ่งมีความอันตรายเสี่ยงต่อชีวิต

และทรัพย์สินสูงกว่ารถบังคับวิทยุขนาด 1:10 ซึ่งการทำทดลองนั้นผู้ทดลองจะมุ่งในเรื่องความปลอดภัยเป็นหลัก ในการวิจัยนี้จึงเล็งเห็นข้อดีของการที่นำรถบังคับวิทยุขนาด 1:10 มาใช้ในการทดลองจึงเป็นที่มาของการทำทดลองงานวิจัยนี้

3.2 กรอบแนวคิดการวิจัย



รูปที่ 3.1 แผนผังวิธีการทำทดลอง

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 ศึกษาแบบจำลองพลศาสตร์ยานยนต์ของรถบังคับวิทยุขนาด 1:10 ยี่ห้อ TAMIYA รุ่น HSV-010 นำมาวัดพารามิเตอร์และเขียนแบบจำลอง Planar Bicycle Model เพื่อใช้ในการเขียนโปรแกรมสร้างระบบตรวจจับการเสียการทรงตัวของรถขณะวิ่งเข้าโค้ง

3.3.2 นำตัวรถมาแยกอุปกรณ์ควบคุมทางไกลด้วยรีโมทบังคับผ่านระบบสื่อสารวิทยุพร้อมทั้งตัดแปลงชุดสายไฟที่มากับตัวรถนั้นให้สามารถเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กกับอุปกรณ์ของตัวรถยนต์เดิม สร้างฐานรับอุปกรณ์ที่จะต้องติดตั้งเข้าไปเพิ่มเติม

3.3.3 ติดตั้งคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก Raspberry Pi 4 Model B และ Arduino Uno ติดตั้งเซ็นเซอร์วัดความเฉื่อยแบบ 6 แกน (IMU)

3.3.4 เขียนโปรแกรมด้วยภาษาคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมรถและเก็บค่าข้อมูลของรถขณะวิ่งทำการเข้าโค้งพร้อมทั้งเขียนโปรแกรมการคำนวณทางวิศวกรรมให้สามารถบ่งชี้อาการสูญเสียเสถียรภาพการทรงตัวให้คำนวณค่าจากเซ็นเซอร์และรายงานผลขึ้นทางหน้าจอพร้อมทั้งเก็บไฟล์บันทึกผลเป็นไฟล์.csv

3.3.5 ทดสอบรถด้วยการสร้างสนามให้รถวิ่งเป็นวงกลมจำลองการวิ่งเข้าโค้งนำข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์วัดการเคลื่อนไหวมาวิเคราะห์เสถียรภาพของรถยนต์

3.3.6 นำผลข้อมูลที่ได้จากการบันทึกมาวิเคราะห์ผลข้อมูลเพื่อนำไปปรับปรุงแก้ไขระบบจนสมบูรณ์

3.3.7 สรุปผลข้อมูล

3.4 การดำเนินการวิจัยและเก็บข้อมูล

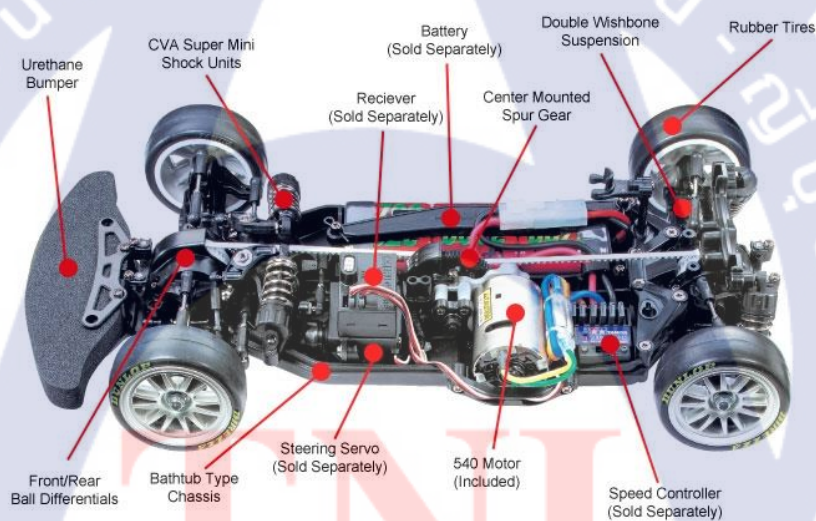
3.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทำทดลอง

3.4.1.1 TAMIYA HSV-010

เป็นแบบจำลองขนาด 1:10 จากรถแข่ง 2010 Super GT 500 ยี่ห้อ HONDA HSV 010 GT ตัวรถเป็นแบบชนิดขับเคลื่อน 4 ล้อ โดยมีมอเตอร์ขับเคลื่อน 1 ตัว ใช้สายพาน 2 เส้นเป็นตัวส่งกำลังจากมอเตอร์ไปที่เฟืองด้านหน้าและเฟืองด้านหลัง ช่วงล่างเป็นแบบชนิดแบบอิสระปีกคู่ (Double Wishbone) คอลล์สปริง มีเซอร์โวมอเตอร์ใช้สำหรับควบคุมการเลี้ยวของล้อหน้าติดตั้งอยู่ทางด้านหน้าฝั่งซ้าย



รูปที่ 3.2 TAMIYA HSV-010 (Body part)



Note: Standard chassis pictured above. For chassis details and special features see specifications tab.

รูปที่ 3.3 ตัว Chassis ของ TAMIYA HSV-010 และอุปกรณ์เพิ่มเติม [13]

3.4.1.2 Raspberry Pi 4 Model B

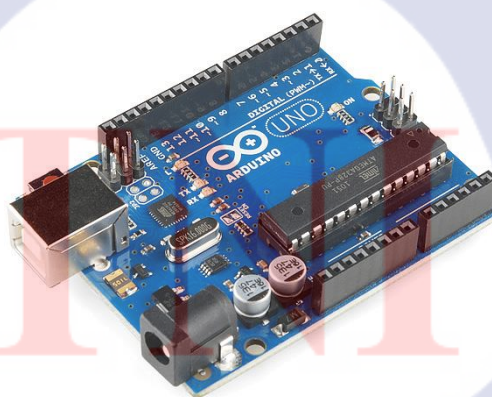
เป็นคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กประมวลผลได้เร็วติดตั้งได้ง่ายจะสามารถใช้ควบคุมรถ TAMIYA ได้ด้วยการเขียนภาษาคอมพิวเตอร์เก็บไฟล์และบันทึกผลจากเซ็นเซอร์ได้รวมถึงใช้ในการคำนวณสมการทางคณิตศาสตร์ที่เขียนไว้ในตัวโปรแกรม



รูปที่ 3.4 Raspberry Pi 4 Model B [14]

3.4.1.3 Arduino UNO

เป็นคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กในการทำทดลองนี้ใช้เป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างเซ็นเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหว (IMU) ไปยัง Raspberry Pi 4 Model B เพื่อส่งข้อมูลมาวิเคราะห์และประมวลผลในขณะที่ยังทำการทดสอบแบบ Real time



รูปที่ 3.5. Arduino UNO [15]

3.4.1.4 เซ็นเซอร์วัดความเฉื่อย แบบ 6 แกน ยี่ห้อ DFROBOT รุ่น SEN-0386

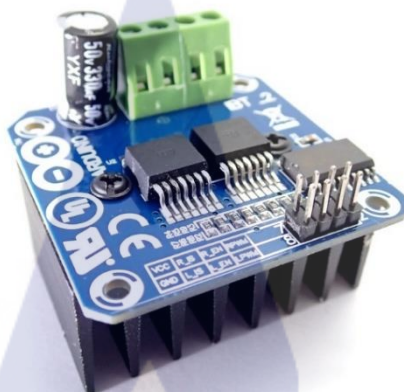
ใช้สำหรับตรวจวัดการเคลื่อนไหวของตัวรถด้วยการวัดความเร่งเชิงเส้นและความเร่งเชิงมุมขณะที่รถทำการวิ่งทดสอบซึ่งเซ็นเซอร์จะอ่านค่าและส่งไปแบบReal time เซ็นเซอร์ประเภทนี้เมื่อนำไปติดตั้งไว้บนจุดศูนย์กลางมวลของรถยนต์ (Centre gravity of vehicle) จะสามารถตรวจวัดความเร่งในทิศทางต่าง ๆ (a_x , a_y , a_z) ในขณะที่รถทำการวิ่งอีกทั้งยังสามารถตรวจวัดความเร็วเชิงมุมในแต่ละแกน (g_x , g_y , g_z) ซึ่งสามารถบอกพฤติกรรมของรถยนต์ขณะเลี้ยวโค้งได้



รูปที่ 3.6. เซ็นเซอร์วัดความเฉื่อย แบบ 6 แกน ยี่ห้อ DFROBOT รุ่น SEN-0386 [16]

3.4.1.5 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์IBT-2 (BTS-7960)

IBT-2 (BTS7960) เป็นโมดูลขนาดกระทัดรัดสำหรับขับ Motor (PWM at 25kHz ร่วมกับ active freewheeling) เหมาะสำหรับควบคุม High Power Motor โดยทำงานที่สูงสุดถึง 24V และมีกำลังขับไฟฟ้าได้ที่กระแสสูงสุดถึง 43A ที่มาพร้อมกับ Protection ต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น Over-Voltage, Under-Voltage, Over-Temperature วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ขนาดเล็กนี้ นำใช้สำหรับควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อนโดยรับคำสั่ง Pulse width modulation (PWM) จาก Raspberry Pi เมื่อได้รับสัญญาณมาจะทำการจ่ายไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ขับเคลื่อนเข้าหามอเตอร์โดยตรง



รูปที่ 3.7 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ BT-2 BTS-7960 [17]

3.4.1.6 เซอร์โวมอเตอร์ TowerPro MG996R

เซอร์โวนิดนี้สามารถหมุนได้ 360 องศาแบบหมุนไปซ้ายและหมุนไปทางขวาใช้สำหรับควบคุมการเลี้ยวของระบบบังคับเลี้ยวซึ่งถูกควบคุมโดยตรงจากคอมพิวเตอร์ Raspberry Pi ผ่านการตั้งค่าในระบบโปรแกรมที่เขียนเอาไว้เพื่อให้สามารถตั้งค่าระบบบังคับเลี้ยวของตัวรถได้ตามที่ผู้วิจัยต้องการ



รูปที่ 3.8 เซอร์โวมอเตอร์ TowerPro MG996R [18]

3.4.1.7 แบตเตอรี่ขับเคลื่อนแรงดันไฟฟ้าขนาด 7.2 V

เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ขับเคลื่อนโดยตรงซึ่งสามารถนำกลับมาชาร์จไฟฟ้ากลับเข้าไปใหม่ได้



รูปที่ 3.9 แบตเตอรี่ขับเคลื่อนแรงดันไฟฟ้าขนาด 7.2 V

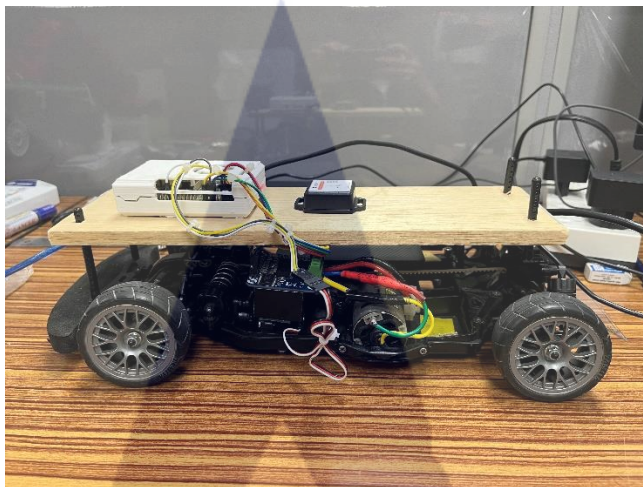
3.4 การทำการทดลอง

3.4.1 ศึกษาตัวรถที่ใช้ในการทดลองและหาค่าตัวค่าพารามิเตอร์ของรถที่ใช้ในการทดลอง

เมื่อนำตัวรถบังคับวิทยุมาศึกษาพบว่าตัวรถนั้นมีระบบบังคับเลี้ยวเป็นแบบ Reverse Ackermann ซึ่งจะส่งผลต่อการเขียนโปรแกรมคำนวณทางวิศวกรรมจึงต้องมีการปรับแก้ไขโปรแกรมให้สอดคล้องกับระบบบังคับเลี้ยวประเภทนี้ ตัวรถมีน้ำหนักเพิ่มจากการติดตั้งอุปกรณ์ต่างที่ใส่เพิ่มเข้าไปจึงต้องมีการชั่งน้ำหนักตัวรถใหม่ การวัดค่าฐานล้อ ความกว้างของแชสซี วัฏระยะมุมเลี้ยวของล้อหน้า แคมเบอร์ แคลสเตอร์ โทอิน โทเอาท์

3.4.1.1 การติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองเข้ากับตัวรถ

เมื่อนำรถตัวบังคับวิทยุขนาด 1:10 มาทำการทดลองนั้นจะทำการแยกระบบควบคุมด้วยรีโมทไร้สายที่ทำงานผ่านคลื่นวิทยุออกทั้งหมดและทำการสร้างแผ่นกระดานที่ใช้สำหรับรองรับการติดตั้งเซ็นเซอร์ (IMU) และบอร์ดคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กไว้ในส่วนด้านบนของตัวรถเพื่อง่ายต่อการติดตั้งและยกเข้าออกเพื่อทำการเซอร์วิสตัวรถรวมทั้งลดผลกระทบต่อการกระแทกในขณะที่รถเกิดการหลุดไคว้และวิ่งไปชนวัตถุที่อยู่โดยรอบได้รวมไปถึงแรงสะเทือนที่เกิดจากมอเตอร์ขับเคลื่อนนั้นส่งกำลังไปให้ล้อทั้ง4ล้อขับเคลื่อนเนื่องจากแผ่นกระดานมีระยะห่างจากตัวมอเตอร์ขับเคลื่อนทำให้สามารถลดค่าแรงสั่นสะเทือนที่จะทำให้เซ็นเซอร์ตรวจจับการเคลื่อนไหว (IMU) ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งเดินสายไฟที่ใช้สำหรับควบคุมตัวรถเพื่อรับคำสั่งให้วิ่งทดสอบและเป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์ที่ติดตั้งเข้าไปเพิ่มเติมและอุปกรณ์ที่ติดมากับรถคันนี้ที่ยังคงต้องใช้งาน



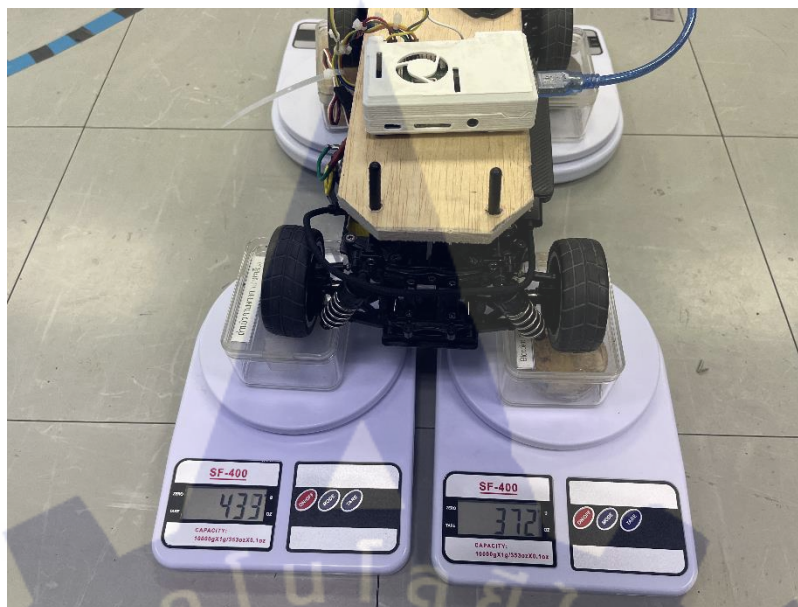
รูปที่ 3.10 แผ่นไม้กระดานขณะที่นำมาติดตั้งบนตัวรถที่ใช้ในการทดลอง

3.4.1.2 การชั่งน้ำหนักตัวรถ [20]

ในการชั่งน้ำหนักตัวรถนี้เราจะนำอุปกรณ์ เซ็นเซอร์ บอร์ดคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กและแบตเตอรี่ทั้งแหล่งจ่ายไฟ 5 V และ 7.2 V ไปติดตั้งไว้ที่ตัวรถให้ครบถ้วนเพื่อที่จะได้ค่าน้ำหนักที่ถูกต้องที่สุดในขณะที่รถยนต์ทำการทดลอง ในการชั่งน้ำหนักตัวรถจะชั่งน้ำหนักแยกกันทั้ง 4 ล้อและแบ่งเป็นน้ำหนักที่ลงเพลาด้านหน้าและน้ำหนักที่ถ่ายลงเพลาด้านหลัง



รูปที่ 3.11 การชั่งน้ำหนักในส่วนของด้านล้อหน้า



รูปที่ 3.12 การชั่งน้ำหนักในส่วนของด้านหลัง

P_1 คือ มวลน้ำหนักจากล้อหน้าด้านซ้ายวัดน้ำหนักได้ 382 g.

P_2 คือ มวลน้ำหนักจากล้อหน้าด้านขวาวัดน้ำหนักได้ 472 g.

P_3 คือ มวลน้ำหนักจากล้อหลังด้านซ้ายวัดน้ำหนักได้ 433 g.

P_4 คือ มวลน้ำหนักจากล้อหลังด้านขวาวัดน้ำหนักได้ 372 g

W คือ มวลน้ำหนักของรถยนต์ทั้งหมด 1659 g. หรือ 1.659 kg.

3.4.2 วิเคราะห์ตัวแปรของรถบังคับวิทยุขนาด 1:10

3.4.2.1 วิเคราะห์หาจุดต่ำสุดย่นกลางมวลของรถบังคับวิทยุขนาด 1:10

เบื้องต้นได้ค่าน้ำหนักตัวรถในแต่ละล้อมาจากการชั่งน้ำหนักตัวรถแล้วในการหาจุดศูนย์ถ่วงกลางมวลของตัวรถนั้นจะเริ่มต้นจากการหาจุดศูนย์ถ่วงตามแนวยาว จุดศูนย์ถ่วงตามแนวด้านข้าง จุดศูนย์ถ่วงตามอนวดิ่งซึ่งจะใช้สมการที่ (2.18) (2.19) และ (2.20) ในการคำนวณ ซึ่งในส่วนของความยาวของฐานล้อมีระบุเอาไว้ที่กล่องของรถ TAMIYA ที่นำมาทดลองซึ่งค่าความยาวของฐานล้ออยู่ที่ 0.257 เมตร

- 1) วิเคราะห์หาจุดต่ำสุดย่นกลางมวลตามแนวยาวใช้สมการที่ (2.7)
- 2) วิเคราะห์หาจุดต่ำสุดย่นกลางมวลตามแนวด้านข้างใช้สมการที่ (2.8)
- 3) วิเคราะห์หาจุดต่ำสุดย่นกลางมวลตามแนวดิ่ง ใช้สมการที่ (2.9)

ค่าในตารางที่ 3.1 ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ของรถบังคับวิทยุขนาด 1:10 ที่ใช้ในการทำทดลองซึ่งน้ำหนักตัวรถนี้ได้ซึ่งรวมกับอุปกรณ์ที่มีการติดตั้งเข้าไปเพิ่มทั้งสิ้นแล้ว

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของรถที่ใช้ในการทำทดลอง

ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง	ค่าตัวแปร	หน่วย
น้ำหนักตัวรถ (mass)	1.659	kg.
ความสูงของตัวรถ (h)	0.124	m.
ความยาวของตัวรถ	0.373	m.
ระยะฐานล้อยาว (l)	0.257	m.
ระยะความกว้างฐานล้อหน้า (w_f)	0.164	m.
ระยะความกว้างฐานล้อหลัง (w_r)	0.168	m.
ระยะจุดศูนย์กลางมวลถึงฐานล้อหน้า (a_1)	0.1247	m.
ระยะจุดศูนย์กลางมวลถึงฐานล้อหลัง (a_2)	0.1323	m.
ระยะจุดศูนย์กลางมวลในแนวด้านข้าง	0.0136	m.
ความสูงถึงพื้นถึงจุดศูนย์กลางมวล (h)	0.059	m.
ความกว้างล้อ	0.024	m.
รัศมีวงล้อ	0.064	m.

3.4.2.2 วัดมุมองศาเลี้ยวของล้อรถ

พิจารณาระบบบังคับเลี้ยวแบบ Reverse Ackermann [21] ของรถคันนี้ คำนวณได้จากการใช้ทฤษฎีตรีโกณมิติ และ สามเหลี่ยมคล้าย โดยนำค่าที่ได้จากการวัดมุมล้อของรถมาคำนวณเพื่อหาจุดหมุนชั่วขณะ (Instantaneous Center of Rotation) ซึ่งจะได้จากสมการที่ (2.12) ถึง (2.15)

ตารางที่ 3.2 มุมล้อของรถที่ใช้ทำการทดลอง

ชนิดของมุมล้อ	ล้อหน้าซ้าย	ล้อหน้าขวา	ล้อหลังซ้าย	ล้อหลังขวา
มุมแคมเบอร์ (Camber) องศา	-2°	-2°	-3°	-3°
มุมแคสเตอร์ (Caster) องศา	5°	5°	0°	0°
มุมโท (Toe) องศา	-1°	-1°	5°	5°

ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบค่าคำสั่งที่ส่งไปมอเตอร์เซอร์โวกับรัศมีของระบบบังคับเลี้ยว

ค่าคำสั่ง (Servo.value)	ล้อซ้าย	ล้อขวา	ค่ามุมเฉลี่ย
-1	เลี้ยวไปทางซ้าย 16°	เลี้ยวไปทางซ้าย 19°	เลี้ยวไปทางซ้าย 17.5°
-0.75	เลี้ยวไปทางซ้าย 12°	เลี้ยวไปทางซ้าย 15°	เลี้ยวไปทางซ้าย 13.5°
-0.5	เลี้ยวไปทางซ้าย 7°	เลี้ยวไปทางซ้าย 10°	เลี้ยวไปทางซ้าย 8.5°
0	ล้อหันตรง	ล้อหันตรง	ล้อหันตรง
0.5	เลี้ยวไปทางขวา 7°	เลี้ยวไปทางขวา 10°	เลี้ยวไปทางขวา 8.5°
0.75	เลี้ยวไปทางขวา 12°	เลี้ยวไปทางขวา 15°	เลี้ยวไปทางขวา 13.5°
1	เลี้ยวไปทางขวา 16°	เลี้ยวไปทางขวา 19°	เลี้ยวไปทางขวา 17.5°

การคำนวณมุมที่รถยนต์เคลื่อนที่ (Heading Angle: β) ของล้อหน้าและล้อหลังจะหาได้จากสมการที่ (2.18) และ (2.19) ตามลำดับและการหามุมลื่นไถลของล้อ (Slip Angle: α) จะใช้การคำนวณด้วยสมการ (2.16) และ (2.17) ผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่เขียนคำสั่งให้สามารถคำนวณมุมล้อที่กล่าวมาในขณะที่รถวิ่งทดลอง

นำข้อมูลที่ได้จากพารามิเตอร์ของรถไปใช้ในการออกแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถลของล้อเพื่อบ่งชี้ลักษณะอาการสูญเสียการทรงตัวของรถ โดยการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้วยภาษา Python และใช้สมการตั้งแต่สมการที่ (2.1) – (2.17) เพื่อคำนวณแรงที่เกิดขึ้นด้านข้างระหว่างที่รถทำการเลี้ยวโค้งและใช้สมการที่ (2.21) และ (2.22) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถลของล้อหน้าและล้อหลัง ในการหาค่าตัวแปรเสถียรภาพ (Stability factor) จะหาได้จากสมการที่ (2.23) เพื่อบ่งชี้ว่าตัวรถเกิดการเสียการทรงตัวหรือไม่ และถ้าหากว่าเกิดอาการเสียการทรงตัวจะเป็นในรูปแบบใด ดังสมการที่ (2.24) – (2.25)

ตัวระบบโปรแกรมที่ออกแบบนี้จะทำการเขียนด้วยภาษาไพธอน (Python) ลงในโปรแกรม Thonny Python IDE ในบอร์ด Raspberry Pi ซึ่งจะสามารถวิเคราะห์และคำนวณค่าตัวแปรเสถียรภาพ (Stability Factor) ของรถขณะทำการวิ่งได้ซึ่งจะแจ้งผลผ่านทางหน้าจอและบันทึกไฟล์เก็บเป็นในรูปแบบ .CSV ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า ตัวแปรเสถียรภาพ จะเปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วและรัศมีโค้งที่ใช้กรณีพื้นถนนเป็นแบบชนิดเดียวกันอีกทั้งยังสามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถลของล้อ (C_α) ทั้งล้อหน้าและล้อหลังได้อีกด้วยการนำค่าความเร่งด้านข้างและความเร่งเชิงมุมที่ได้จากเซ็นเซอร์ตรวจวัดการเคลื่อนไหวแบบ 6 แกน (IMU) มาคำนวณในขณะที่รถทำการวิ่งซึ่ง

สามารถอธิบายพฤติกรรมการวิ่งเข้าโค้งของรถได้ว่ารถเกิดสูญเสียเสถียรภาพตอนใดและเป็นในรูปแบบใด

3.4.2.3 การหาความเร็วของรถยนต์

ความเร็วของรถทดลองในขณะทดสอบสามารถใช้ค่าความเร่งที่เก็บผลมาจากเซ็นเซอร์วัดความเฉื่อย (IMU) โดยใช้สมการที่ (3.1) นี้ในการหาความเร็วเชิงเส้นของรถ

$$\vec{v} = \vec{u} + \vec{a}t \quad (3.1)$$

โดยที่ $\vec{v}$ คือ ความเร็ว หน่วยเป็น m/s

$\vec{u}$ คือ ความเร็วต้น หน่วยเป็น m/s

$\vec{a}$ คือ ความเร่งตามแนวยาว หน่วยเป็น m/s^2

t คือ เวลา หน่วยเป็น วินาที

3.4.4 วิธีทำการทดลอง

การทดลองนี้จะใช้การทดสอบรถบังคับวิทยุขนาด 1:10 วิ่งเข้าโค้งเป็นวงกลมโดยการสร้างสนามให้มีความกว้างใกล้เคียงกับระยะจุดหมุนศูนย์กลางของตัวรถ ในช่วงแรกเริ่มต้นนั้นเราประกอบรถขึ้นมาเสร็จจะต้องทำการวิ่งตั้งศูนย์ล้อให้ได้เที่ยงตรงเสียก่อนแต่ทว่าตัวรถนั้นไม่สามารถวิ่งตรงได้ตลอดอาจจะเกิดจากการสั่นของตัวเซอร์โวมอเตอร์ที่ใช้ควบคุมการเลี้ยวจึงอาจเกิดการวิ่งเอนเล็กน้อยซึ่งทำการปรับแก้ไขให้เอนน้อยที่สุด จากนั้นทดสอบโดยการให้รถวิ่งเข้าสู่สนามที่เราทำอาการออกแบบไว้โดยในการทำทดสอบนั้นเราจะตั้งค่าการเลี้ยวของระบบบังคับเลี้ยวไว้ที่เฉลี่ย 13.5 องศา ซึ่งเป็นค่ากลางในการทดสอบในขณะที่รถวิ่งจะไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงค่านี้ โดยจะแบ่งการทดสอบเป็น 2 รูปแบบ คือ เข้าโค้งทางซ้ายกับเข้าโค้งทางขวา และตัวแปรที่จะเปลี่ยนไปแต่ในละครั้งทดสอบคือคำสั่งความเร็วมอเตอร์ขับเคลื่อน

การทดลองระบบวัดเสถียรภาพการเลี้ยวโค้ง

3.4.4.1 ตัวแปรที่ปรับใช้ในการเริ่มต้นโปรแกรม (ตัวแปรต้น)

1) ตั้งค่าความเร็วมอเตอร์

เริ่มทดสอบโดยการตั้งค่าความเร็วรถ ณ ระดับวัฏจักรทำงาน (PWM) ตั้งแต่ 15% 20% 30% 40% 50% 60% 70% 80%

2) ตั้งค่าการหักเลี้ยวของล้อ ตั้งค่า Servo.value ไว้ที่ -0.75

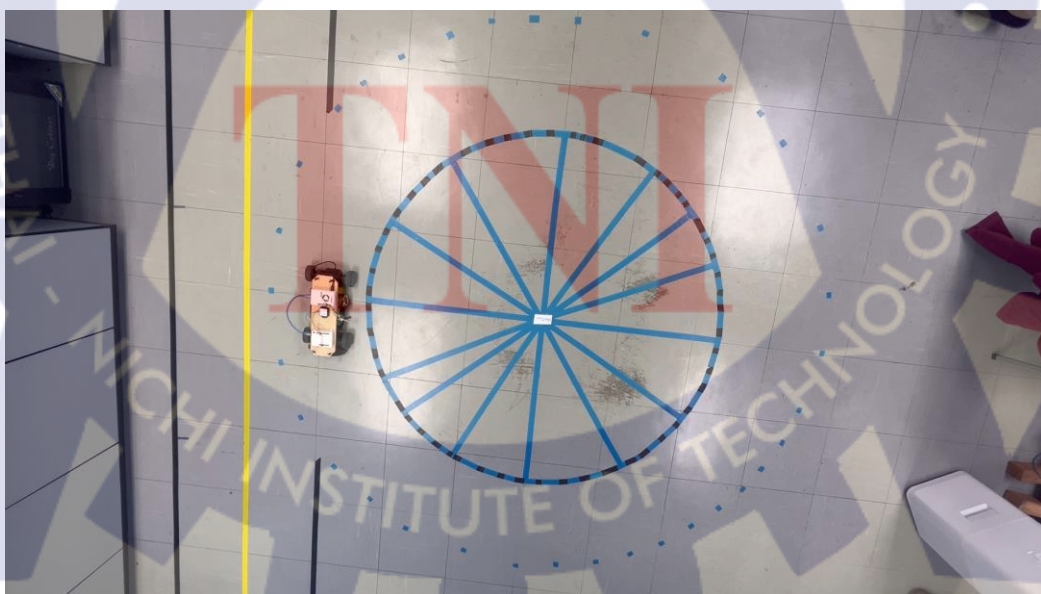
ล้อเลี้ยวทางซ้ายโดยล้อซ้ายมีมุม 12 องศา และ ล้อขวามุมเลี้ยว 15 องศา ตั้งค่าการหักเลี้ยวของล้อ ตั้งค่า Servo.value ไว้ที่ 0.75 ล้อเลี้ยวทางขวาโดยล้อซ้ายมีมุม 15 องศา และ ล้อขวามุม 12 องศา

3.4.4.2 ค่าที่ได้รับจากเซ็นเซอร์ตรวจวัดความเฉื่อย แบบ 6 แกน (IMU) (ตัวแปรตาม)

- 1) ความเร็วเชิงมุม Roll g_X deg/s
- 2) ความเร็วเชิงมุม Pitch g_Y deg/s
- 3) ความเร็วเชิงมุม Yaw g_Z deg/s
- 4) ความเร่งแนวเส้นตรง a_x m/s^2
- 5) ความเร่งด้านข้าง a_y m/s^2
- 6) ความเร่งในแนวดิ่ง a_z m/s^2

3.4.4.3 สนามที่ใช้ในการทดลอง

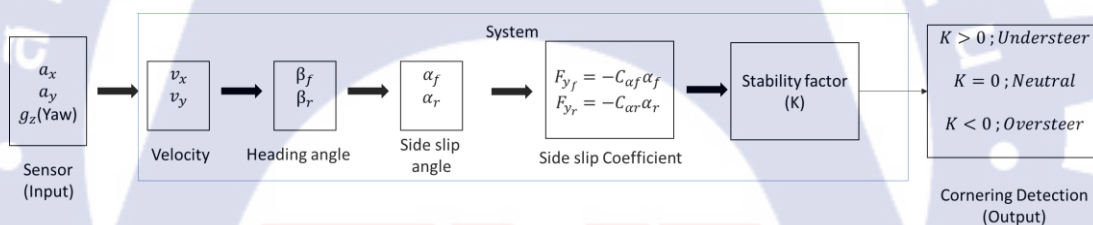
สนามที่ใช้ในการทำทดลองเป็นพื้นยางโดยได้ทำการตีเส้นเป็นวงกลมเพื่อให้รถวิ่งอยู่ในเส้นวงกลมนี้โดยมีเส้นด้านนอกและด้านในและบริเวณตรงกลางเป็นช่องทางเดินรถ โดยในการทำทดลองจะตั้งรถที่จุดเดิมเสมอตามในรูปที่ 3.13 ทำการตีเส้นไว้เพื่อจะได้สังเกตได้ชัดในขณะที่ตัวรถกำลังวิ่งเข้าโค้งเมื่อรถเกิดอาการเสียการทรงตัวจะสังเกตได้อย่างชัดเจนเพราะตัวรถนั้นจะไม่สามารถวิ่งเข้าโค้งตามรัศมีโค้งหรือตามช่องทางเดินรถที่ทำการตีเส้นไว้ได้



รูปที่ 3.13 สนามที่ใช้ในการทดลอง

3.4.4.4 เริ่มทำการทดลอง

โดยโปรแกรมจะประมวลผลค่าความเร่งเชิงเส้นและค่าความเร่งเชิงมุมจากเซ็นเซอร์หน่วยวัดความเฉื่อย (IMU) ซึ่งในขณะทำการทดลองตัวเซ็นเซอร์จะทำงานแบบ Real time และส่งข้อมูลไปให้ตัวโปรแกรมคำนวณ ซึ่งจะนำข้อมูลที่ได้ไปประมวลผลจากค่าพารามิเตอร์ของตัวรถซึ่งตัวโปรแกรมจะออกแบบคำนวณด้วยการพิจารณาจากสมการพลศาสตร์ยานยนต์ที่กำหนดขึ้นบนระนาบพิกัดฉาก (Cartesian Coordinate System) โดยการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมรถให้วิ่งทดลองด้วยแบบจำลองอัตโนมัติเพื่อลดปัญหาความคลาดเคลื่อนจากการที่ใช้นมนุษย์เป็นคนควบคุมเนื่องจากระบบที่ออกแบบนั้นสามารถตั้งค่ามุมเลี้ยวของระบบบังคับเลี้ยวและระดับวัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนซึ่งถ้าหากเป็นมนุษย์เป็นผู้บังคับอาจจะส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้มาก เพราะว่ามันมนุษย์นั้นไม่สามารถถือระดับระดับการบังคับเลี้ยวหรือความเร็วของมอเตอร์ขับเคลื่อนได้อย่างแม่นยำเพราะมนุษย์จะรับรู้ได้แค่ความรู้สึก จากการมองเห็นและการฟังเสียงของมอเตอร์เท่านั้นจึงใช้คอมพิวเตอร์เพื่อทดแทนข้อบกพร่องของมนุษย์ จะสามารถทำการทดลองการเข้าโค้งแบบนี้ได้อย่างแม่นยำสามารถปรับเลือกระดับวัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนได้อย่างที่ต้องการ อีกทั้งสามารถปรับตั้งค่ามุมเลี้ยวของระบบบังคับเลี้ยวได้อย่างแม่นยำตามที่ผู้ทดลองต้องการ



รูปที่ 3.14 การทำงานของระบบวิเคราะห์อาการสูญเสียเสถียรภาพ

ระบบจะเริ่มรับค่าข้อมูลจากเซ็นเซอร์ และส่งมาให้ Raspberry Pi ประมวลผล ซึ่งระบบจะคำนวณหาความเร็วจากค่าความเร่งที่ได้รับมา เมื่อได้ความเร็วแล้วจะคำนวณหาค่ามุมการเคลื่อนที่รถจริง (Heading Angle) ซึ่งมุมนี้มีความสำคัญต่อระบบมากถ้ามุมนี้หาได้มีอย่างถูกต้องจะทำให้ระบบมีความแม่นยำสูงในการหาค่าของมุมสไลด์ไถล (Side Slip Angle) ตามลำดับต่อมาแล้วจึงประมวลผลหาค่าสัมประสิทธิ์การสไลด์ไถลของรถ (Side Slip Coefficient) และ ประมวลผลหาค่าตัวแปรเสถียรภาพ (Stability Factor) เพื่อชี้วัดว่าตัวรถเกิดอาการเสียการทรงตัวหรือไหมและเป็นในรูปแบบอาการคือ โค้ง (Understeer) หรือ อาการไวกิ่ง (Oversteer)

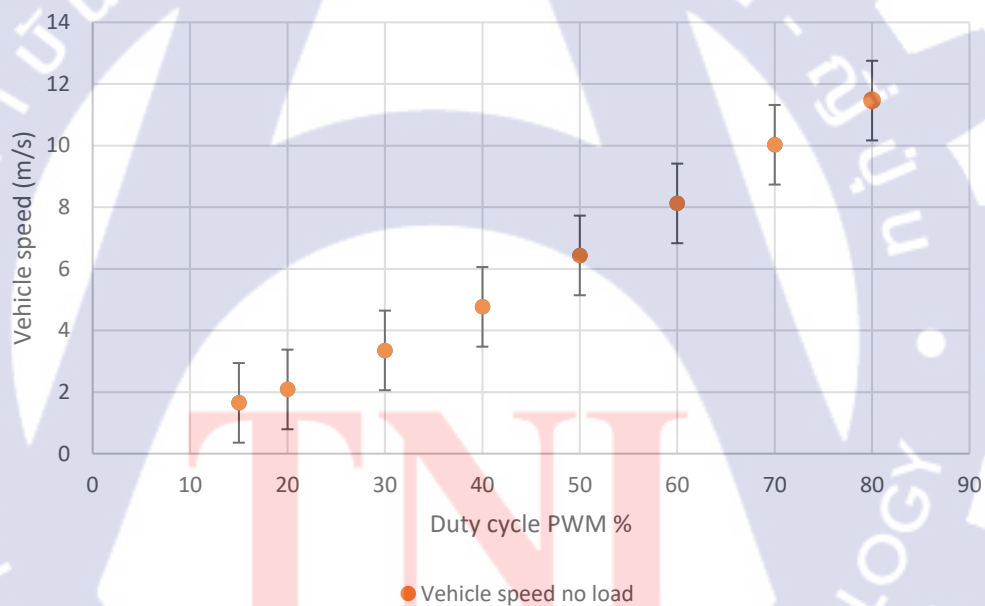
บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ในบทความนี้จะเป็นการออกแบบระบบที่ใช้บังคับการเสียการทรงตัวของรถบังคับวิทยุ ขนาด 1:10 ยี่ห้อ TAMIYA ด้วยภายใต้เงื่อนไขการทดสอบด้วยการเลี้ยวโค้งทั้งเข้าโค้งซ้ายและเข้าโค้งขวาในการออกแบบนั้นได้ศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพสมรรถนะด้าน พลศาสตร์การเลี้ยวโค้งของรถยนต์ ซึ่งมีหลายปัจจัยเข้ามาเกี่ยวข้อง อาทิเช่น น้ำหนัก ชนิดระบบ บังคับเลี้ยว ค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถลของล้อ

4.1 วิเคราะห์ผลการทำการทดลอง

4.1.1 ค่าความเร็วของรถที่วัดจากรอบหมุนที่ล้อ



รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นของรถบังคับวิทยุ และ Duty Cycle

ในการวัดความเร็วรอบล้อนั้น วัดด้วยการใช้ปืนวัดรอบยิงไปที่ล้อหน้าในขณะที่ตัวล้อทุกล้อ ไม่ได้สัมผัสพื้นถนนเพื่อวัดความเร็วรอบของล้อในแต่ละวัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อน เพื่อให้ทราบถึงความเร็วของรถทดลองที่ในแต่ละวัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อน ซึ่งผู้ทดลองไม่สามารถนำรถทดลองไปวิ่งและเก็บความเร็วมาได้เนื่องจากในการวิ่งออกตัวทางตรงนั้น

เมื่อสั่งให้วัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนที่อยู่ในช่วง 50% ขึ้นไปนั้นตัวรถมีอาการส่ายขณะออกตัวทำให้ตัวรถนั้นวิ่งไม่ตรงจากการที่ล้อหมุนฟรีและด้วยสถานที่ที่ไม่เอื้ออำนวยทำให้ไม่สามารถเก็บค่าความเร็วตัวรถได้อย่างแม่นยำ อีกหนึ่งกรณีที่พบเจอคือได้ทำการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดรอบขนาดเล็กไว้ที่บริเวณล้อแต่เมื่อความเร็วของรถสูงขึ้นที่วัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ 40% ตัวเซ็นเซอร์มีอาการจับรอบการหมุนของล้อได้ทันทำให้ไม่สามารถเก็บผลของความเร็วรอบล้อได้จึงจำเป็นต้องเลือกใช้วิธีที่วัดความเร็วของล้อด้วยการใช้ปืนวัดรอบ และนำมาแปลงเป็นความเร็วเฉลี่ยแทน เพื่อยืนยันได้ว่าตัวรถมีความเร็วสูงเพิ่มขึ้นในแต่ละวัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นเช่นกัน

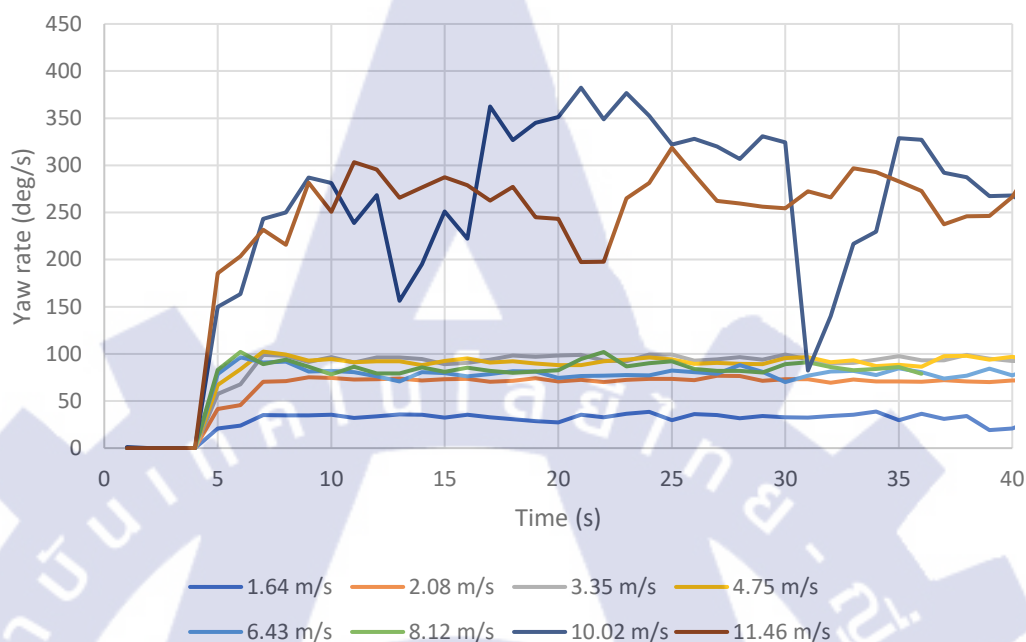
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบวัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนกับความเร็วเชิงเส้น

Duty Cycle (PWM %)	ความเร็วการหมุนของล้อ (RPM)	Velocity (m/s)
15	246	1.648707825
20	311	2.084342006
30	500	3.351032164
40	711	4.765167737
50	960	6.433981755
60	1212	8.122901965
70	1496	10.02628823
80	1710	11.46053

4.1.2 ผลข้อมูลจากเซ็นเซอร์วัดความเฉื่อย (inertia measurement unit) ในการทดลอง เลี้ยวโค้ง

ผลการทดลองจากการเข้าโค้งของรถด้วยการเลี้ยวซ้ายนั้นได้นำค่าความเร็วเชิงมุมในแกน Z (Yaw rate) ที่เก็บข้อมูลมาจากการทดลองรถในแต่ละวัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนซึ่งจะเห็นว่าเมื่อมีความเร็วสูงขึ้นนั้นค่ามุม Yaw rate จะพุ่งสูงขึ้นตามซึ่งเกิดจากการเหวี่ยงหนีศูนย์กลางขณะที่รถทำการเลี้ยวเข้าโค้งทำให้ตัวรถเกิดอาการเอียงตัวซึ่งส่งผลต่อการทำงานของช่วงล่างซึ่งส่งผลให้รถเกิดอาการเสียการทรงตัวได้หรือถ้ามีมากจนเกิดขีดจำกัดรถอาจจะส่งผลให้ตัวรถนั้นพลิกคว่ำได้ แต่ในตัวรถที่นำมาทดลองนี้มีระยะต่ำสุดถึงพื้นที่น้อยจึงลดโอกาสการเกิดพลิกคว่ำได้และในส่วนองความเร่งที่กระทำด้านข้างต่อรถจะบ่งบอกได้ว่าเมื่อรถเข้าโค้งที่ความเร็วสูงมากขึ้นความเร่งด้านข้างที่

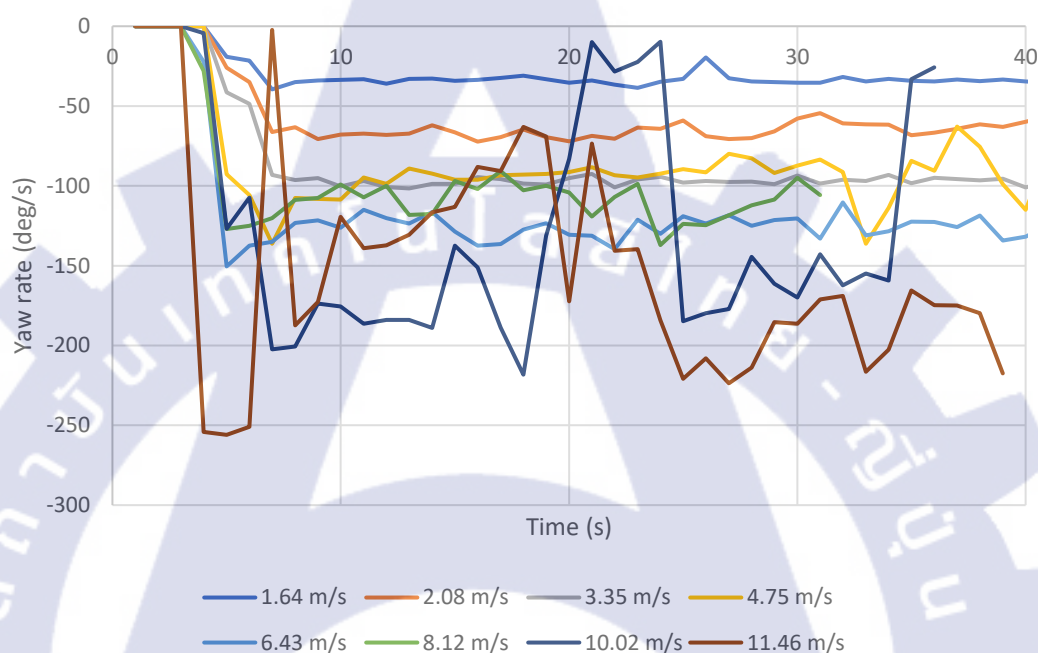
กระทำต่อรถจะทำให้รถเกิดการส่ายหรือลื่นไถลขณะเลี้ยวโค้งได้ซึ่งจะส่งผลให้แรงที่กระทำด้านข้างต่อรถมีค่าสูงขึ้นตัวรถจึงเกิดการเสียการทรงตัวในขณะวิ่งเข้าโค้ง



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Yaw Rate กับเวลา ที่ความเร็วต่างๆของการทดลองเลี้ยวซ้าย

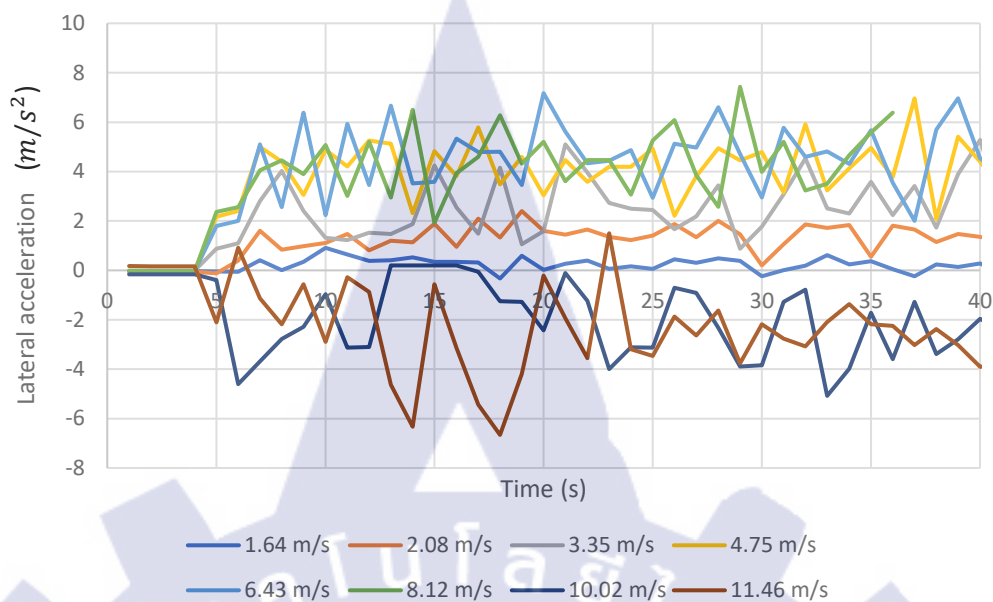
ค่า Yaw rate หรือ ความเร็วเชิงมุมรอบแกน Z นั้นได้มาจากการเก็บผลจากเซ็นเซอร์วัดความเฉื่อย (IMU) ซึ่งผลข้อมูลที่ได้นั้น จะเห็นได้ว่าในช่วงความเร็วต่ำมากๆของ Yaw rate จะต่ำมากมีค่าที่ค่อนข้างนิ่ง แต่เมื่อเพิ่มความเร็วในการทำทดลองเพิ่มขึ้นในช่วงวัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อน (Change Duty Cycle PWM) ตั้งแต่ช่วง 20% ไปจนถึง 60% ทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้นที่อยู่ในช่วงประมาณ 2 m/s ไปจนถึง 8 m/s จะพบว่า ในการทดลองเลี้ยวด้านซ้ายนั้นจากรูปที่ 4.2 กราฟแกนแนวตั้งเป็นค่า Yaw rate หรือ ความเร็วเชิงมุมรอบแกน Z และ แกนนอนคือเวลา จะเห็นได้ว่า ค่า Yaw rate นั้น จะอยู่ในช่วง 60 deg/s ไปจนถึง 100 deg/s ซึ่งแสดงให้เห็นถึงว่าตัวรถนั้นวิ่งอยู่ในสภาวะพฤติกรรมของรถที่ใกล้เคียงกัน และในช่วง ในช่วงวัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อน (Change Duty Cycle PWM) ตั้งแต่ 70% ขึ้นไปนั้นความเร็วสูงสุดของรถได้เพิ่มไปจนถึงประมาณ 10 m/s จะเห็นได้ว่าค่า Yaw rate พุ่งสูงขึ้น ต่างไปจากช่วงความเร็วเดิมมาก ซึ่งพุ่งไปสูงประมาณ 380 deg/s ซึ่งแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของรถที่แตกต่างไปจากช่วงความเร็วก่อนหน้านี้เป็นอย่างมาก ซึ่งแสดงให้เห็นจากรูปที่ 4.2 และต่อมาในการทดลองทางด้านขวานั้นค่า Yaw rate หรือ ความเร็วเชิงมุมรอบแกน Z จะดูได้จากรูปที่ 4.3 ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นค่าที่ตรงกันข้ามกับการทดลองจากทางด้านซ้าย ซึ่ง

ในการทดลองในการเลี้ยวด้านขวาจะเก็บผลข้อมูลมาได้เป็นค่าที่เป็นลบ ซึ่งแตกต่างกับการทดลองเลี้ยวซ้ายจะได้ค่าที่เป็นบวก แต่ในการทดลองด้านขวานั้นก็จะแบ่งพฤติกรรมของรถที่แสดงออกมาได้เหมือนกับการเลี้ยวทางด้านซ้ายเพียงแตกต่างกันแค่ค่าที่เป็นลบ ซึ่งในช่วงความเร็วต่ำมาก ๆ นั้นค่าของ Yaw rate ก็จะมีค่าที่ต่ำมาก ๆ แต่เมื่อเพิ่มความเร็วก็จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นแบ่งเป็น 2 ช่วง เหมือนกับการทดลองด้านเลี้ยวซ้าย



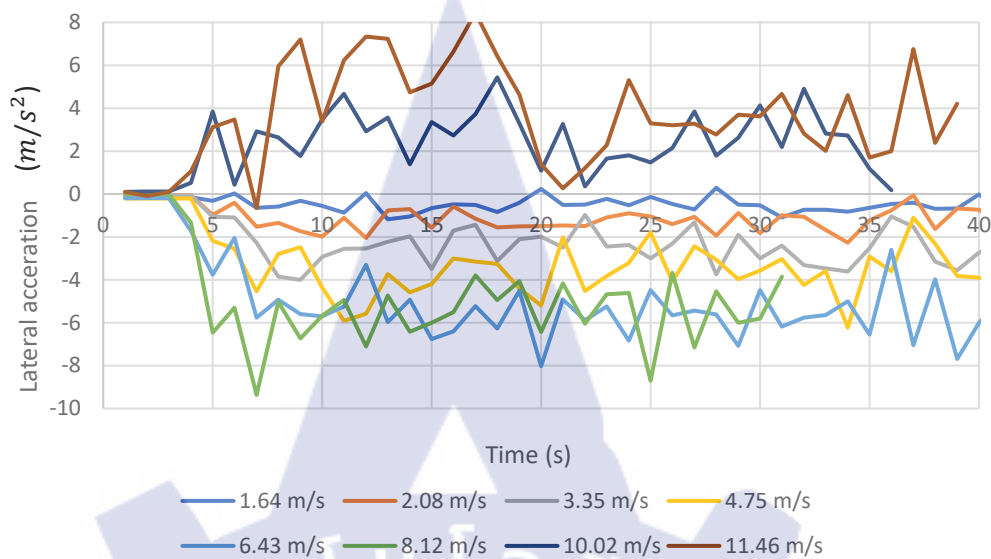
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Yaw Rate กับเวลา ที่ความเร็วต่างๆของการทดลองเลี้ยวขวา

ซึ่งในการทดลองเลี้ยวด้านขวานั้นค่า Yaw rate จะสลับทิศทางเนื่องจากตัวรถนั้นมีทิศทางเลี้ยวที่ตรงข้ามกันทำให้ตัวรถเปลี่ยนทิศทางการหมุนของรอบแกน Z ซึ่งตัวรถนั้นจะเกิดแรงหมุนที่แกน Z ตรงข้ามทิศทางในการเลี้ยวกับทางด้านซ้าย ผลของการเก็บค่าที่ได้นั้นจึงมีค่าที่ตรงข้ามกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลของกราฟที่เลี้ยวด้านขวานั้นมีการสวิงขึ้นลงที่เหวี่ยงมากกว่าผลการทดลองด้านซ้าย เนื่องจากตัวรถนั้นมีน้ำหนักด้านซ้ายและด้านขวาที่แตกต่างกันเนื่องจากอุปกรณ์ที่นำไปติดตั้ง มอเตอร์ขับเคลื่อน และแบตเตอรี่ ซึ่งส่งผลให้ค่าของ Yaw rate ผลของทางด้านเลี้ยวซ้ายมีค่าที่น้อยกว่านั่นเอง



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งด้านข้างกับเวลา ที่ความเร็วต่าง ๆ ของการทดลองเลียวย้าย

จากรูปที่ 4.4 คือ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งด้านข้างกับเวลา ที่ความเร็วต่าง ๆ ของการทดลองเลียวย้าย ซึ่งแกนแนวตั้งจะเป็นค่าความเร่งในแนวด้านข้างที่กระทำต่อรถ (Lateral acceleration) และแกนแนวนอนจะเป็นเวลา ซึ่งในการทดลองเลียวย้ายเข้าโค้งทางด้านซ้ายพบว่าในแต่ละช่วงของความเร็วของรถที่ใช้ในการทดลอง ถูกแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ ค่าที่อยู่ในช่วงที่เป็นบวก และค่าที่อยู่ในช่วงที่เป็นลบซึ่งในการทดลองเลียวย้ายนั้น ในช่วง กลุ่มแรก ค่าที่ได้เป็นบวกจะอยู่ในช่วงความเร็วตั้งแต่ 2 m/s ไปจนถึง 8 m/s ซึ่งจะเห็นได้จากในกราฟ ซึ่งเมื่อมีการเพิ่มความเร็วมากขึ้นจะทำให้เกิดแรงที่กระทำด้านข้างต่อตัวรถสูงขึ้น จนไปถึง ช่วงที่เป็นความเร็วประมาณ 10 m/s ขึ้นไปจะพบว่าความเร่งที่กระทำด้านข้างนั้นมีค่าเปลี่ยนไปเป็นลบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในแต่ละในช่วงวัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนนั้นมีพฤติกรรมของรถที่สามารถแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือค่าที่เป็นบวกและค่าที่เป็นลบนั่นเอง



รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งด้านข้างกับเวลา ที่ความเร็วต่างๆของการทดลองเลี้ยวขวา

ในทางกลับกันในการทดลองเลี้ยวเข้าโค้งทางด้านขวาค่าความเร่งในแนวด้านข้างที่กระทำต่อรถ (Lateral acceleration) นั้นมีค่าตรงกันข้ามกับการทดลองเลี้ยวเข้าโค้งทางซ้ายเหมือนกับค่า Yaw rate ซึ่งในค่าของความเร่งที่กระทำด้านข้างของการทดลองเลี้ยวทางด้านขวานั้นจะดูได้จากรูปที่ 4.5 ซึ่งจะเห็นได้ว่าในช่วงความเร็วของรถทดลองไม่เกิน 8 m/s ค่าความเร่งที่ได้จะเป็นค่าลบ และ ตั้งแต่ในช่วงความเร็วประมาณ 10 m/s ขึ้นไปค่าได้ที่จะสลับเป็นบวก ซึ่ง ก็จะบ่งบอกได้ถึงแรงที่กระทำด้านข้างของตัวรถมีทิศทางที่ตรงข้ามกัน ส่งผลให้ตัวรถมีพฤติกรรมที่แตกต่างกันกับช่วงที่ความเร็วต่ำกว่า 8 m/s

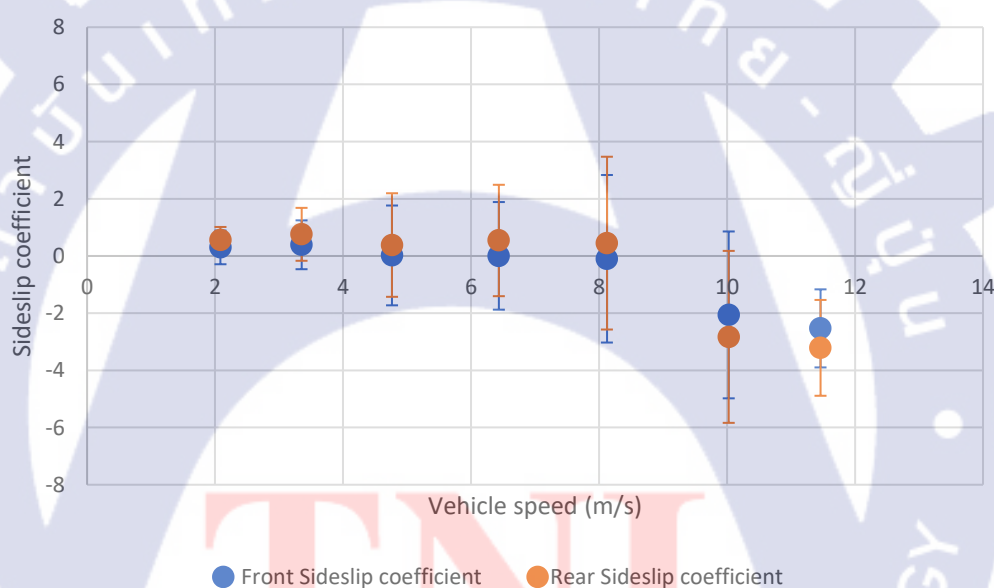
4.1.3 ผลค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถลของรถทดลองในขณะเข้าโค้ง

ในการระบุรูปแบบลักษณะการสูญเสียเสถียรภาพทางโค้งของรถยนต์นั้น สามารถยืนยันได้ด้วยการใช้ประมวลผลข้อมูลจากเซ็นเซอร์ IMU แบบทันที (Real time) บน คอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก Raspberry PI 4 model B ที่ติดตั้งอยู่บนรถทดลองที่เขียนโปรแกรมให้สามารถคำนวณสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถลของล้อเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วของมอเตอร์ และสามารถจำแนกเสถียรภาพการทรงตัวรถได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

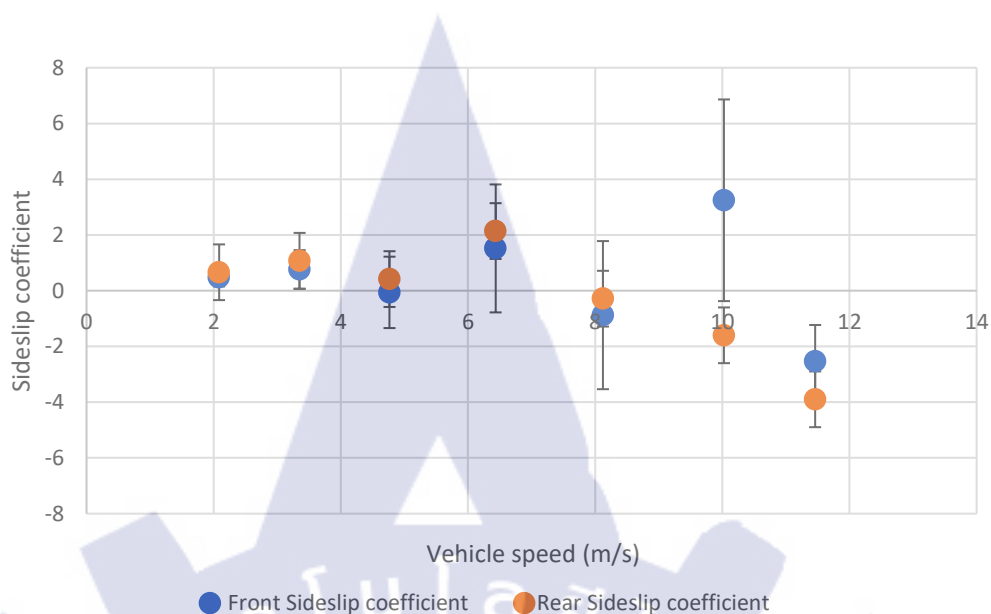
1. ในช่วงความเร็วของรถประมาณ 2 m/s ไปจนถึง 8 m/s จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถลของล้อหน้ามีค่าน้อยกว่าล้อหลังในขณะที่รถเกิดการลื่นไถล เป็นในรูปแบบอาการหน้าดื้อไค้

2. ในช่วงความเร็วของรถประมาณ 10 m/s ขึ้นไปพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถลของล้อหน้ามีค่ามากกว่าล้อหลังในขณะที่รถเกิดการลื่นไถลเป็นในรูปแบบอาการไวไค้

สัมประสิทธิ์การลื่นไถลที่มีค่าเป็นลบ แสดงถึงแรงต้านข้างที่เกิดขึ้นในทิศทางตรงข้ามกับการเลี้ยวไค้ซ้ายทำให้การเลี้ยวไค้ของรถเป็นไปได้ยากขึ้น จึงเกิดเป็นอาการเข้าไค้แบบดื้อไค้ในทางกลับกัน สัมประสิทธิ์การลื่นไถลที่มีค่าเป็นบวก แสดงถึงแรงต้านข้างที่เกิดขึ้นมีทิศทางเดียวกันกับการเลี้ยวไค้ ซึ่งส่งผลให้เกิดการเข้าไค้มากกว่าองศาการเลี้ยวและเกิดเป็นอาการเข้าไค้แบบไวไค้



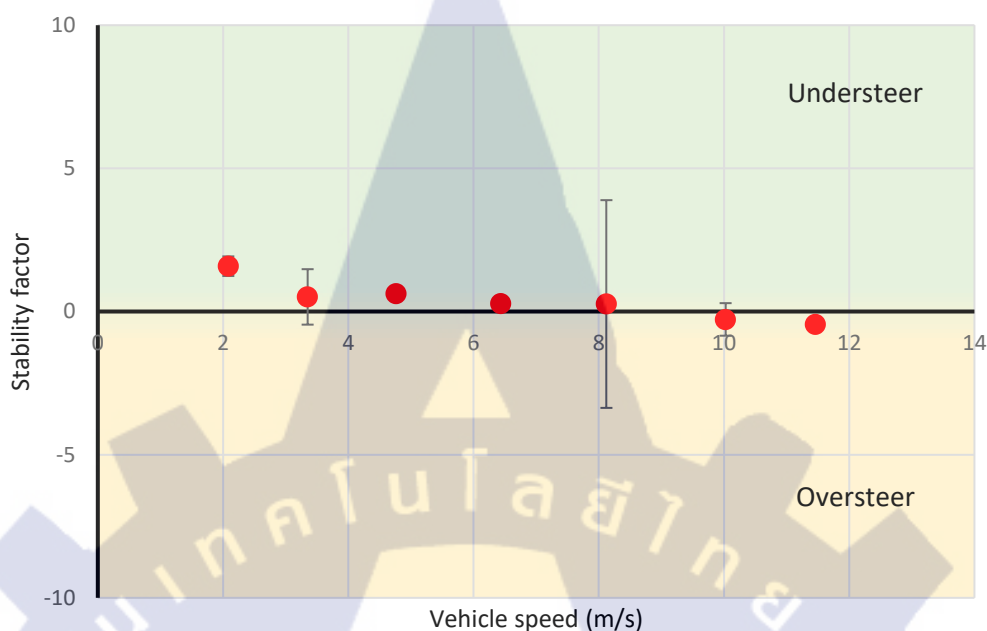
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลื่นไถลเฉลี่ยของล้อหน้าและล้อหลัง ที่เปลี่ยนไปตามความเร็วรถ ของการทดลองในรูปแบบเข้าไค้ทางซ้าย



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การลื่นไถลเฉลี่ยของล้อหน้าและล้อหลัง ที่เปลี่ยนไปตามความเร็วรถ ของการทดลองในรูปแบบเข้าโค้งทางขวา

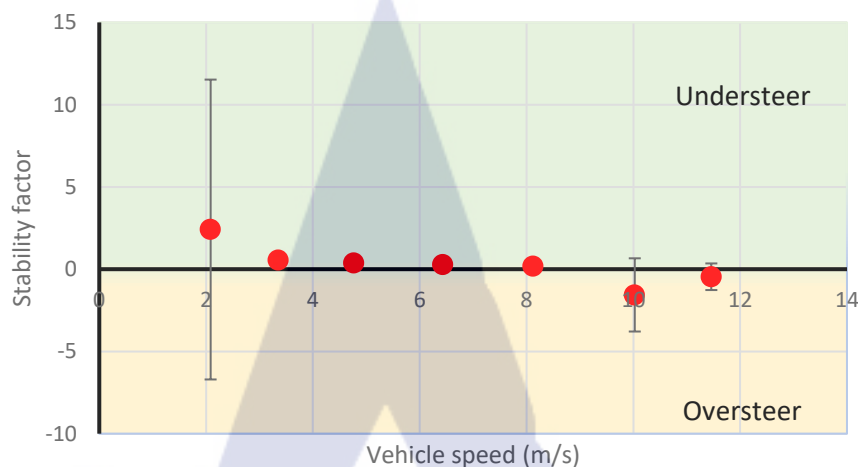
ค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถลหรือ Sideslip coefficient ที่เกิดขึ้นทั้งล้อหน้าและล้อนั้นเป็นผลคำนวณมาจากการใช้สมการพลศาสตร์ทางยานยนต์ที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 ซึ่งสามารถนำมาอธิบายพฤติกรรมของอาการเสียการทรงตัวของรถที่เกิดขึ้นได้อย่างถูกต้องจากรูปจะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถลของล้อดังที่แสดงในรูปที่ 4.6 ,4.7 แกนแนวตั้งนั้นจะแสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถลของล้อหน้าและล้อหลัง (Sideslip coefficient) และแกนแนวนอนจะเป็นค่าความเร็วเฉลี่ยของรถทดลอง (Vehicle speed) จะเห็นได้ว่าในช่วงที่มีระดับวัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนที่มีค่าต่ำนั้นค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถลของล้อหน้าและล้อหลังจะมีค่าที่ใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นว่าตัวรถนั้นจะสามารถวิ่งเข้าโค้งอยู่ในเสถียรภาพตัวรถจะเข้าโค้งได้โดยไม่เกิดอาการหลุดโค้งแต่เมื่อเพิ่มความเร็วของตัวรถให้สูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถลของล้อหน้ากับล้อหลังจะเริ่มมีค่าที่แตกต่างกันซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้รถเกิดอาการลื่นไถลเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างพื้นถนนกับล้อหน้าและล้อหลังมีค่าที่ไม่เท่ากันซึ่งโดยค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถลเฉลี่ยของล้อหลังจะมีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถลเฉลี่ยของล้อหน้าเมื่อรถเกิดอาการหน้าดื้อโค้งหรือ (Understeer) และถ้าหากว่าค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถลเฉลี่ยของล้อหลังมีค่าน้อยกว่าล้อหน้ารถจะเกิดอาการไวโค้งหรือ (Oversteer) นั้นเอง

4.1.4 ผลตัวแปรเสถียรภาพ (Stability factor) ของรถบังคับวิทยุขนาด 1:10



รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเสถียรภาพกับความเร็วของรถทดลอง ในรูปแบบการทดลอง เข้าโค้งทางซ้าย

จากในรูปที่ 4.8 โดยที่แกนแนวดิ่งเป็นค่าของตัวแปรเสถียรภาพ (Stability factor) และ แกนนอนเป็นค่าความเร็วของรถ ซึ่งจะแสดงผลของค่าตัวแปรเสถียรภาพของรถคันที่ทดลองที่ได้จากการทำการทดลองวัดเสถียรภาพของตัวรถในการเข้าโค้งทางซ้ายในแต่ละช่วงของความเร็วซึ่งในช่วงความเร็วที่ไม่สูงมากนักในช่วงความเร็วเฉลี่ยประมาณ 2 m/s ไปจนถึงประมาณ 8 m/s ตัวรถได้พบอาการหน้าดื้อโค้ง (Understeer) ตามในภาพถ่ายจากมุมบนที่ได้เก็บบันทึกผลไว้ซึ่งค่าตัวแปรเสถียรภาพที่ได้จากการคำนวณจากระบบคอมพิวเตอร์ที่ออกแบบไว้ซึ่งค่าจะอยู่ช่วงที่เป็นบวก (ในช่วงพื้นที่สีเขียวของในกราฟ) ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ 2.24 ที่แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่าของตัวแปรเสถียรภาพมากกว่า 0 นั้นตัวรถจะเกิดอาการสูญเสียเสถียรภาพการทรงตัวแบบหน้าดื้อโค้ง แต่ในช่วงระดับความเร็วที่สูงขึ้นเกิน 10 m/s จากในกราฟจะเห็นได้ว่าค่าตัวแปรของเสถียรภาพที่วัดได้นั้นจะอยู่ในช่วงที่เป็นลบ (ในช่วงพื้นที่สีเหลืองของในกราฟ) ซึ่งตามในสมการที่ 2.25 นั้นที่แสดงให้เห็นว่าถ้าค่าตัวแปรเสถียรภาพมีค่าน้อยกว่า 0 ตัวรถจะเกิดอาการไวโค้ง (Oversteer) ซึ่งสอดคล้องกับรูปถ่ายมุมบนที่ได้บันทึกขณะทำการทดลองซึ่งผลเป็นไปตามทฤษฎีทางพลศาสตร์ยานยนต์



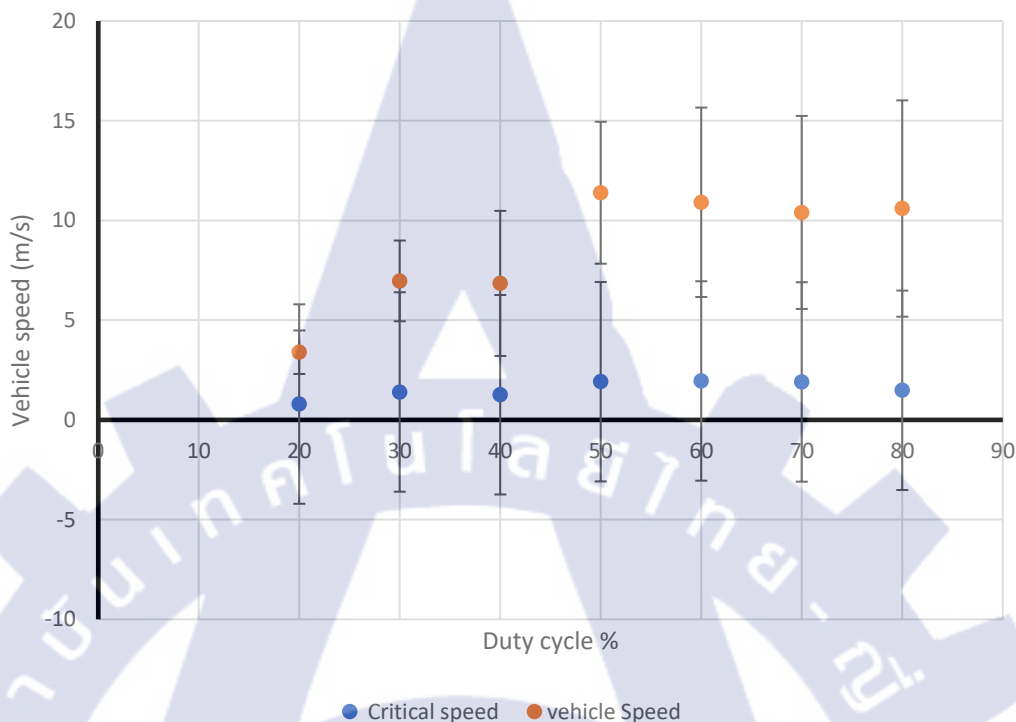
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเสถียรภาพกับระดับวิถีการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนในรูปแบบการทดลองเข้าโค้งทางขวา

ซึ่งค่าตัวแปรเสถียรภาพมีความคล้ายคลึงกันกับการเลี้ยวทางซ้าย จากในรูปที่ 4.9 แกนแนวตั้งคือ ค่าตัวแปรเสถียรภาพ และ แกนแนวนอนคือ ความเร็วเฉลี่ยของรถ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าตัวแปรเสถียรภาพที่ได้จากการทดลองการเลี้ยวทางด้านขวา พบว่าตัวรถมีอาการลื่นไถลเสียการทรงตัวแบบอาการหน้าดื้อไค้ในช่วงความเร็วที่ไม่สูงมากนักในช่วงความเร็วเฉลี่ยประมาณ 2 m/s ไปจนถึงประมาณ 8 m/s ซึ่งค่าตัวแปรเสถียรภาพนั้นจะมากกว่า 0 และพบอาการไคว้ไค้ที่ความเร็วรถค่อนข้างสูงที่ 10 m/s ขึ้นไป เหมือนกับการทดลองการเลี้ยวทางด้านซ้าย ซึ่งค่าตัวแปรเสถียรภาพนั้นจะน้อยกว่า 0

4.2 ความเร็ววิกฤต (Critical Speed: V_c)

ระบบสามารถวิเคราะห์หาความเร็ววิกฤตในการเข้าโค้งของรถได้จากสมการที่ (2.26) ซึ่งสามารถนำมาเขียนใส่โปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ในคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กที่ติดตั้งอยู่บนตัวรถ โดยผลข้อมูลที่ได้จากการคำนวณจากโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก Raspberry Pi ซึ่งสามารถระบุความเร็วสูงสุดที่รถทำการวิ่งเข้าโค้งได้ก่อนที่จะเกิดอาการเสียการทรงตัว ซึ่งจะสามารถบ่งชี้ว่าตัวรถจะใช้ความเร็วในการเข้าโค้งเท่าไรถึงจะไม่เกิดอาการเสียการทรงตัว ซึ่งในแต่ละช่วงของความเร็วที่ใช้ในการเข้าโค้งนั้นค่าของความเร็ววิกฤตก็จะแปรผันเปลี่ยนแปลงไป โดยขึ้นอยู่กับค่า K หรือค่าตัวแปรเสถียรภาพนั้นว่า มีค่าที่ไม่เท่ากับศูนย์ ซึ่งเมื่อมีค่าดังกล่าวหมายถึงตัวรถนั้นจะเกิดการเสียการทรงตัว

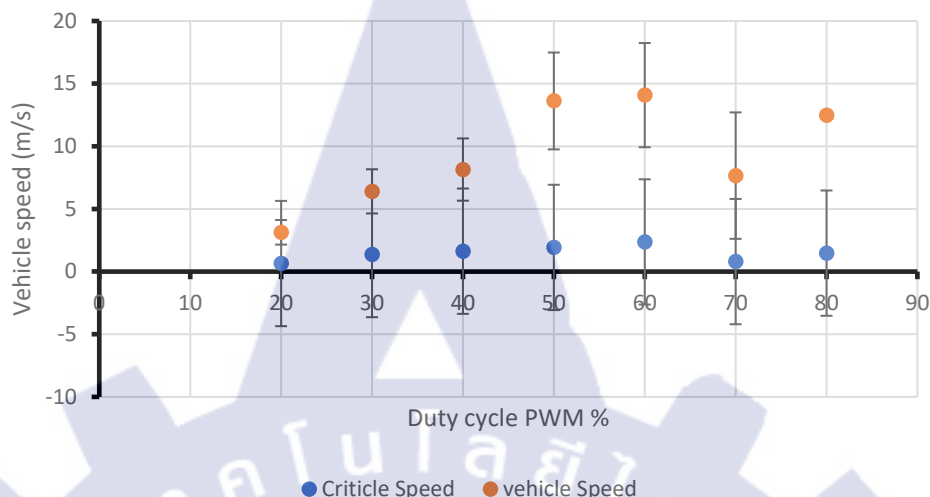
4.2.1 ความเร็ววิกฤตในการเข้าโค้งทางซ้าย



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความเร็ววิกฤตกับระดับวัฏจักรทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนในการทดลองเข้าโค้งทางซ้าย

จากรูปที่ 4.10 จากกราฟในแกนแนวดิ่งจะเป็นความเร็วของรถและในแกนแนวนอนจะเป็นระดับวัฏจักรทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนแสดงให้เห็นผลความเร็ววิกฤตที่ตัวรถขณะวิ่งเข้าโค้งก่อนที่จะสูญเสียเสถียรภาพการทรงตัว โดยวงกลมสีฟ้าคือค่าความเร็ววิกฤตที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ใส่ไว้ในคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กและวงกลมสีส้มคือค่าความเร็วเฉลี่ยของรถทดลองที่วัดจากเซ็นเซอร์วัดความเฉื่อย (IMU) ซึ่งจะเห็นได้ว่าตัวรถทดลองที่มีค่าสั่งวิ่งด้วยวัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนตั้งแต่ 20% ขึ้นไปนั้นตัวรถเกิดอาการเสียการทรงตัวทั้งหมดจริงเนื่องจากค่าความเร็ววิกฤตจากในรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าค่าของความเร็วเฉลี่ยนั้นอยู่สูงกว่าค่าของความเร็ววิกฤตค่าความเร็ววิกฤตนั้นจึงเป็นอีกหนึ่งค่าที่สามารถนำมาระบุได้ว่าตัวรถนั้นเกิดอาการเสียการทรงตัวจริงในแต่ละวัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ได้ใช้ในการทดลองนี้ ซึ่งพบว่าตัวรถนั้นมีพฤติกรรมที่เสียการทรงตัวทั้งหมด ซึ่งมีทั้งเกิดในรูปแบบหน้าค้ำ (Understeer) และรูปแบบไวโค้ง (Oversteer)

4.2.2 ความเร็ววิกฤตในการเข้าโค้งทางขวา



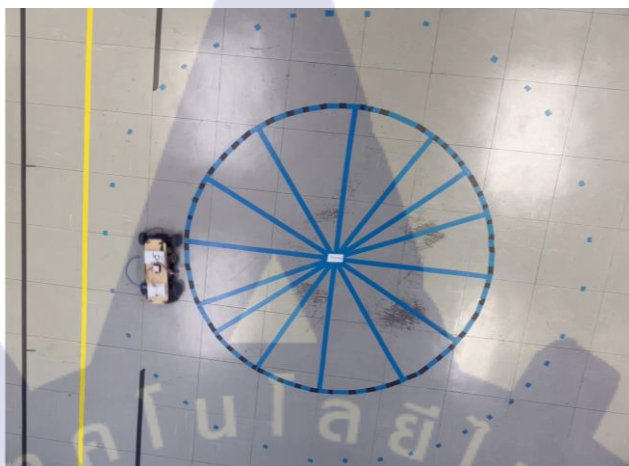
รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความเร็ววิกฤตกับระดับวัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนในการทดลองเข้าโค้งทางขวา

ค่าความเร็ววิกฤตของการทดลองในรูปแบบที่ 2 การเข้าโค้งทางด้านขวานั้นจะมาจากการที่ระบบคอมพิวเตอร์จะคำนวณให้ตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งและค่าของความเร็ววิกฤตที่ได้จะดูได้จากรูปที่ 4.11 ซึ่งเป็นกราฟแสดงผลตั้งโดยแกนแนวนอนจะเป็นความเร็วของรถยนต์ และ แกนนอนจะเป็นระดับวัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อน ซึ่งจะเห็นว่าในแต่ละระดับวัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนนั้นความเร็วที่เสียการทรงตัวจะพบว่ามีค่าความเร็ววิกฤตที่ไม่เท่ากัน ซึ่งในการหาความเร็ววิกฤตในการทดลองรูปแบบที่ 2 การเลี้ยวทางด้านขวานั้นไม่ได้แตกต่างกันกับการทดลองในรูปแบบที่ 1 ซึ่งใช้ทฤษฎีเดียวกัน ซึ่งระบบสามารถบอกได้ว่าตัวรถนั้นเสียการทรงตัวจริงจากค่าความเร็วเฉลี่ยนั้นสูงกว่าค่าความเร็ววิกฤต และสามารถบอกความเร็ววิกฤตของรถในขณะที่ทำการเข้าโค้งได้

ซึ่งความเร็ววิกฤตจะสามารถระบุได้ว่าตัวรถทดลองนั้นจะเกิดอาการสูญเสียเสถียรภาพ ที่ความเร็วใด ซึ่งในการทดลองจะเห็นได้ว่าในแต่ละวัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนในแต่ละช่วงความเร็วนั้นจะมีจุดที่เกิดความเร็ววิกฤตที่แตกต่างกันซึ่งมีปัจจัย ในเรื่องของแรงบิดของมอเตอร์ขับเคลื่อนเข้ามาส่งผลให้รถสามารถสูญเสียการทรงตัวได้เนื่องจากล้อเกิดอาการหมุนฟรีหรือเกิดสไลด์ ทำให้รถนั้นเสียการทรงตัวได้ อีกทั้งยังมีปัจจัยจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง แรงที่มากกระทำด้านข้างของตัวรถทำให้รถเกิดอาการเสียการทรงตัว

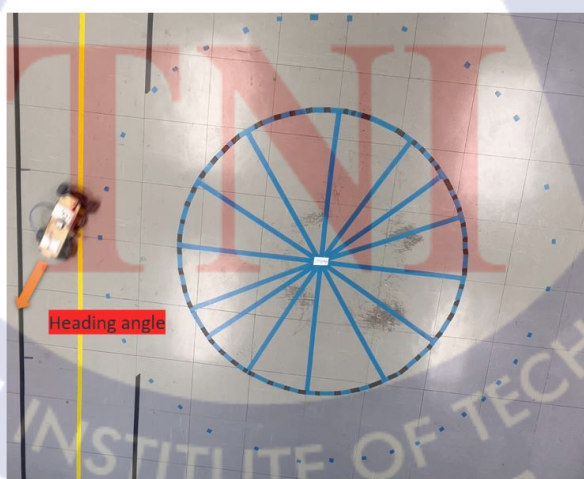
4.3 วิเคราะห์ผลจากภาพถ่ายจากมุมบน

4.3.1 ผลพฤติกรรมของรถบังคับวิทยุขนาด 1:10 ในการเข้าโค้งทางซ้าย



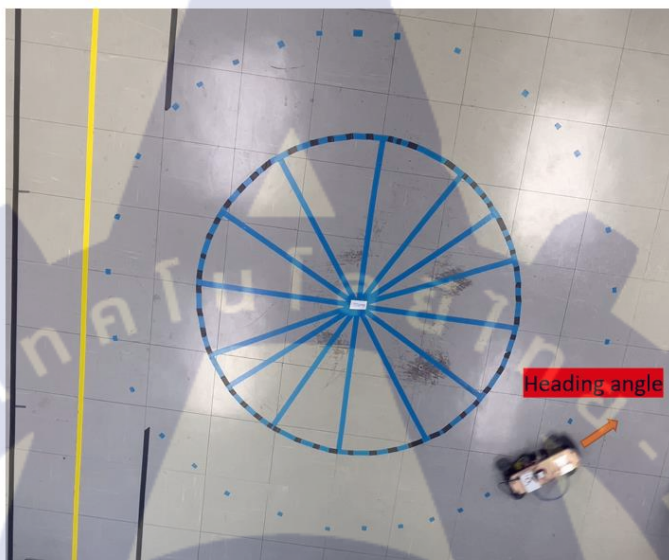
รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายจากมุมสูงขณะการทดลองในขณะที่ตัวรถวิ่งเข้าโค้งทางซ้ายโดยอยู่ในสภาวะสมดุล ระดับวัฏจักรการทำงาน PWM 15%

จากรูปที่ 4.12 จะแสดงให้เห็นว่าตัวรถยังคงวิ่งอยู่ในสนามที่ได้ออกแบบไว้ซึ่งตัวรถไม่มีอาการไถลออกหรือท้ายปัดตัวรถจะวิ่งเข้าโค้งรอบวงกลมนี้และอยู่ในระหว่างช่องทางเดินรถจนกว่าจะสั่งให้รถหยุดวิ่งความเร็วเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 1.6 m/s



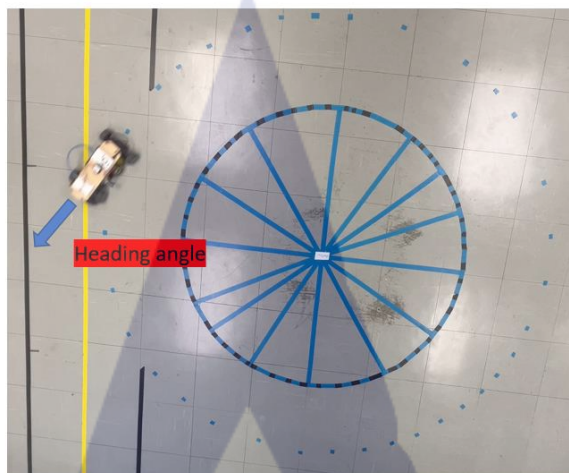
รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายจากมุมสูงขณะการทดลองในขณะที่ตัวรถวิ่งเข้าโค้งทางซ้ายโดยอยู่ในสภาวะหน้าตื้อโค้ง ณ ระดับวัฏจักรการทำงาน PWM 30%

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าตัวรถนั้นพบอาการหน้าดื้อโค้งหรือ Understeer นั้นเองซึ่งตัวรถจะวิ่งบานโค้งออกจนรถนั้นวิ่งหลุดออกไปนอกเส้นวงกลมวงนอกของสนามตัวรถจะวิ่งบานโค้งออกอย่างต่อเนื่องโดยสังเกตได้ว่าจะใช้วงเลี้ยวในการเข้าโค้งเพิ่มมากยิ่งขึ้นและความเร็วเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 3.3 m/s



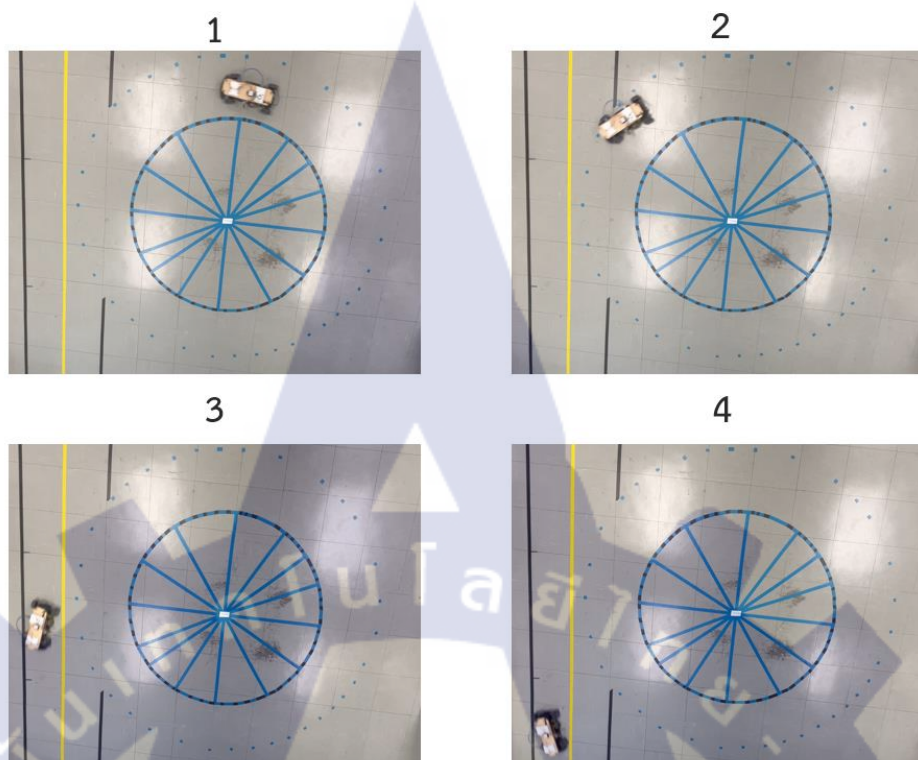
รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายจากมุมสูงขณะการทดลองในขณะที่ตัวรถวิ่งเข้าโค้งทางซ้ายโดยอยู่ในสภาวะหน้าดื้อโค้ง ณ ระดับวัฏจักรการทำงาน PWM 40%

จากรูปที่ 4.14 จะเห็นว่าตัวรถนั้นพบอาการหน้าดื้อโค้งหรือ Understeer นั้นเองแต่ตัวรถนั้นจะวิ่งบานออกโค้งเพิ่มมากขึ้นจากเดิมที่จะเริ่มค่อยๆวิ่งบานออกโค้งที่ละน้อยจนเริ่มออกจากช่องทางเดินรถแต่เมื่อเพิ่มความเร็วของรถนั้นทำให้ตัวพบอาการหน้าดื้อโค้งวิ่งออกนอกช่องทางเดินรถมากยิ่งขึ้นและความเร็วเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 4.7 m/s



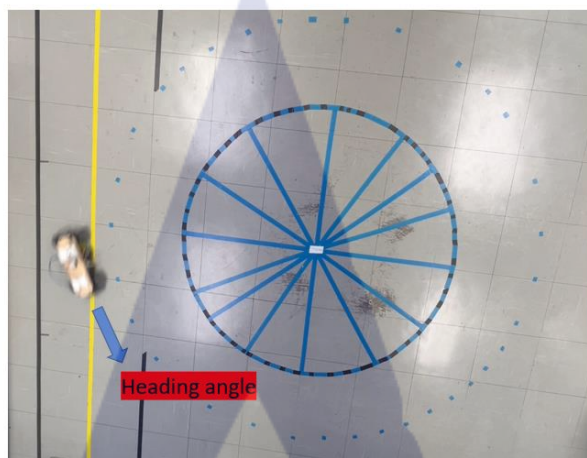
รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายจากมุมสูงขณะการทดลองในขณะที่ตัวรถวิ่งเข้าโค้งทางซ้ายโดยอยู่ในสภาวะหน้าดื้อโค้ง ณ ระดับวัฏจักรการทำงาน PWM 50%

จากรูปที่ 4.15 สังเกตได้ว่าตัวรถนั้นวิ่งออกโค้งด้วยอาการเสียการทรงตัวแบบหน้าดื้อโค้ง โดยสังเกตได้จากวงเลี้ยวในการเข้าโค้งเพิ่มสูงมากขึ้นจนรถวิ่งออกไปนอกช่องทางเดินรถได้ไวกว่าระดับวัฏจักรการทำงานที่ต่ำกว่าซึ่งจะอธิบายได้ว่าเมื่อตัวรถมีความเร็วสูงมากยิ่งขึ้นจะส่งผลให้รถเกิดอาการเสียการตัวได้มากยิ่งขึ้นโดยความเร็วสูงสุดที่รถพบอาการหน้าดื้อโค้งอยู่ที่ประมาณ 8 m/s ความเร็วเชิงมุมหรือค่า Yaw rate จะพุ่งสูงขึ้นตามรวมทั้งค่าความเร่งในแนวด้านข้างจะมีค่าเป็นบวก และในการเกิดอาการ Understeer หรือหน้าดื้อโค้งนั้นจะเห็นได้ว่ามุมการเคลื่อนที่ของรถจริง (Heading Angle) จะชี้พุ่งออกไปด้านนอกโค้งซึ่งเป็นไปตามทิศทางการเคลื่อนที่ของรถที่พบเจอ อาการสูญเสียเสถียรภาพทางโค้งแบบหน้าดื้อโค้งตัวรถจะไถลออกไปทางด้านหน้าหรือที่คนทั่วไปเรียกว่าเลี้ยวไม่เข้านั่นเองซึ่งมักเกิดจากการลื่นไถลมาจากทางลื่นหน้าซึ่งส่งผลให้มุมบังคับเลี้ยวของรถกับมุมเคลื่อนที่ของรถจริงนั้นมีค่ามุมที่แตกต่างกันเกิดขึ้นซึ่งตัวรถก็จะไถลออกโค้งในขณะที่รถทดลองเกิดการไถลออกนั้นจะเกิดมุมลื่นไถล (Slip Angle: α) ขึ้นซึ่งในทางทฤษฎีนั้นเมื่อมุมเกิดมุมลื่นไถลในขณะที่รถทำการเลี้ยวโค้งจะทำให้รถไม่สามารถเคลื่อนที่ไปตามมุมบังคับเลี้ยวของรถยนต์ได้จึงส่งผลให้รถวิ่งหลุดโค้งหรือวิ่งออกนอกเส้นช่องทางเดินรถในสนามนั่นเองซึ่งในกรณีนี้คือรถเกิดอาการหน้าดื้อโค้ง



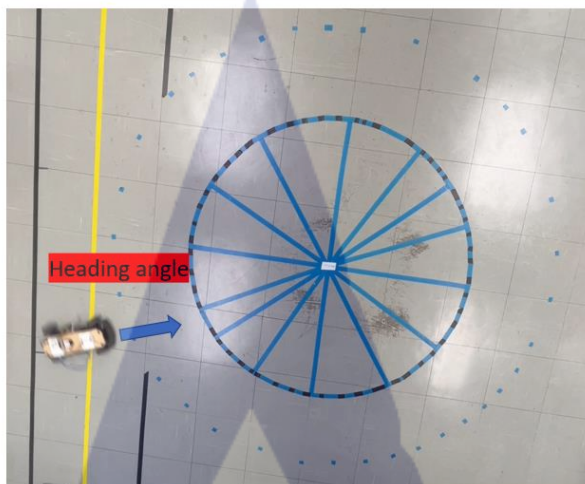
รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายตัวอย่างขณะที่รถมีอาการหน้าดื้อโค้งในการเลี้ยวโค้งทางซ้าย

จากรูปที่ 4.16 จะเห็นว่ารูปหมายเลข 1 นั้นตัวรถยังวิ่งอยู่ในช่องทางเดินรถต่อมาตัวรถเริ่มมีการใช้วงเลี้ยวในการเข้าโค้งที่เพิ่มมากยิ่งขึ้นทั้งที่ถูกล้อระบบบังคับเลี้ยวด้วยการตั้งค่าในโปรแกรมด้วยคำสั่ง Servo Value ให้มีมุมเลี้ยวเฉลี่ยอยู่ที่ 13.5 องศาไปทางด้านซ้ายซึ่งในการทดลองพบว่าขณะที่รถเริ่มเกิดอาการเสียการทรงตัวนั้นรถจะเริ่มวิ่งเหยียบเส้นวงนอกจากทางด้านหน้าวิ่งหลุดออกไปก่อนแสดงให้เห็นถึงอาการหลุดโค้งดังในภาพหมายเลข 2 และต่อมาจะเห็นตัวรถวิ่งหลุดโค้งออกไปทั้งคันซึ่งพบว่าตัวรถนั้นไม่ได้วิ่งอยู่ในช่องทางเดินรถที่สร้างเอาไว้แล้วดังในภาพหมายเลข 3 และตัวรถนั้นไม่สามารถวิ่งกลับเข้ามาวิ่งตามช่องทางเดินรถได้อีกซึ่งพบตัวรถจะมีอาการวิ่งบานออกโค้งสูงขึ้นยิ่งหมุนรอบวงกลมมากเท่าไรตัวรถจะวิ่งรอบวงกลมด้วยรัศมีที่เพิ่มมากยิ่งขึ้นซึ่งเกิดจากการไถลออกนั่นเองซึ่งทำให้อาจเกิดอาการเสียการควบคุมตัวแบบหน้าดื้อโค้งออกทำให้รถยิ่งวิ่งรอบสนามวงกลมนี้น่าขึ้นจะส่งผลให้รถยิ่งวิ่งออกนอกโค้งมากขึ้นตามขึ้นไปทั้งนี้การวิ่งออกนอกโค้งมากหรือน้อยยังคงขึ้นอยู่กับระดับวัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนที่สามารถตั้งค่าได้จากโปรแกรม เพราะถ้ามีความเร็วที่สูงขึ้นก็จะทำให้รถสามารถเกิดอาการสูญเสียเสถียรภาพได้



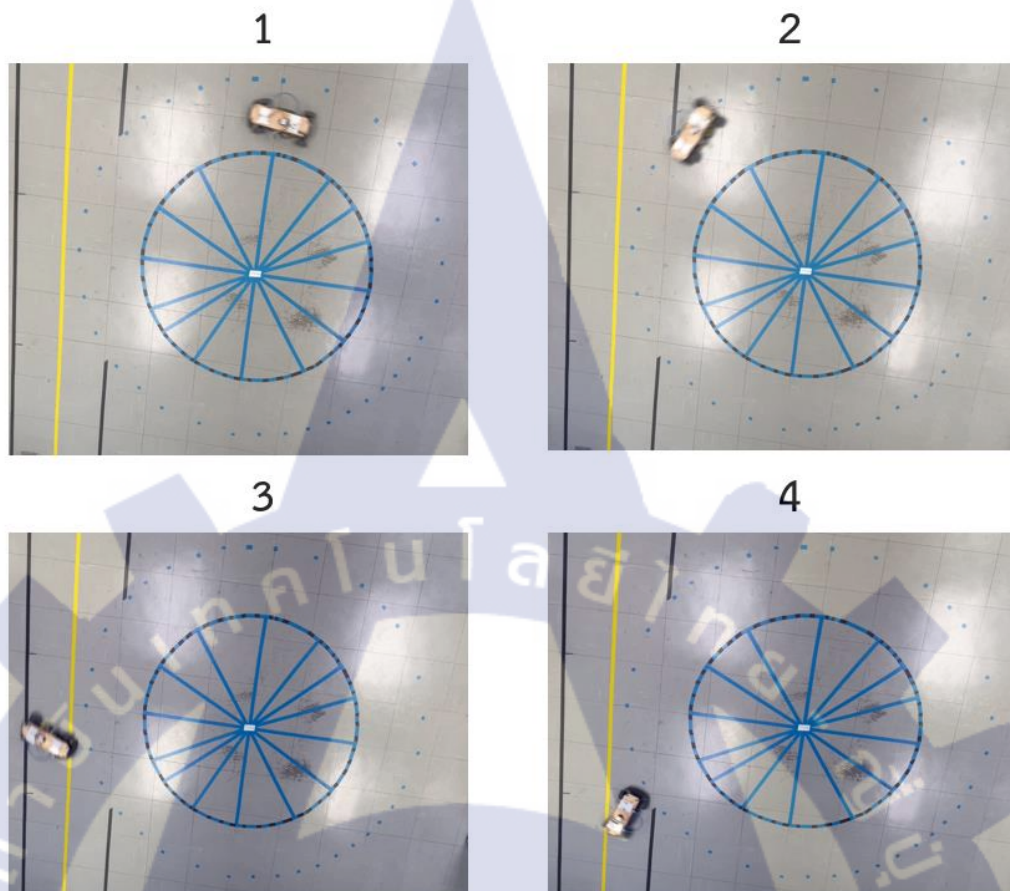
รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายจากมุมสูงขณะการทดลองในขณะที่ตัวรถวิ่งเข้าโค้งทางซ้ายโดยอยู่ในสภาวะท้าย
ปัด ณ ระดับวัฏจักรการทำงาน PWM 70%

ในการทดลองที่1เข้าโค้งทางด้านซ้ายนั้นจะได้ค่าของผลการทดลองได้ที่เป็นข้อมูลที่ส่งตรงจากเซ็นเซอร์วัดความเฉื่อย (IMU) ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความเร่งในแนวด้านข้างนั้นจะค่าที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดจนอยู่กลุ่มคือการที่เซ็นเซอร์ตรวจวัดได้ที่มีความเร่งเป็นบวกและค่าของความเร็วเชิงมุมหรือค่า Yaw rate จะอยู่ในช่วงประมาณ 100 deg/s นั้นพบว่ารถที่ใช้ทำการทดลองเกิดอาการเสียการทรงตัวแบบหน้าดื้อโค้งที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น ซึ่งต่อไปจะเป็นค่าผลการทดลองที่มีค่าความเร่งเป็นลบและค่าความเร็วเชิงมุมหรือ Yaw rate ที่สูงขึ้นไปได้ถึง 200 deg/s จนถึง 400 deg/s ซึ่งจากในรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มระดับวัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนขึ้นเป็น 70% ความเร็วเฉลี่ยของรถเพิ่มขึ้นเป็น 10 m/s ตัวรถนั้นจะเปลี่ยนพฤติกรรมจากอาการหน้าดื้อโค้ง (Understeer) กลายเป็นอาการไวโค้ง (Oversteer) จะสังเกตได้จากการหมุนของตัวรถเนื่องจากเกิดการปัดของท้ายรถทำให้มุมเคลื่อนที่ของรถจริงเปลี่ยนแปลงตามไปจากเดิมที่จะชี้พุ่งออกไปทางนอกโค้งกลับเริ่มชี้เข้าไปในโค้งซึ่งแสดงให้เห็นว่าเป็นอาการ Oversteer หรือ พฤติกรรมของอาการไวโค้งแบบชัดเจน



รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายจากมุมสูงขณะการทดลองในขณะที่ตัวรถวิ่งเข้าโค้งทางซ้ายโดยอยู่ในสภาวะท้ายปัด ณ ระดับวัฏจักรการทำงาน PWM 80%

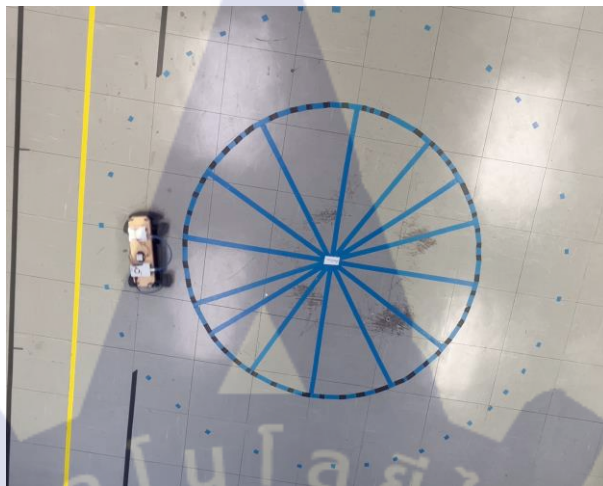
จากรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ชัดเจนว่าตัวรถนั้นเกิดอาการท้ายปัดอย่างรุนแรงจากแรงบิดที่มอเตอร์ขับเคลื่อนส่งไปยังล้อมีกำลังที่สูงทำให้เซ็นเซอร์วัดความเฉื่อยหรือIMUตรวจจับวัดค่าความเร่งด้านข้างได้สูงสุดอยู่ที่ประมาณ -6 m/s^2 และจากการสังเกตด้วยตัวผู้ทดลองเองตัวรถนั้นเกิดอาการปัดหมุนรอบตัวเองซึ่งแสดงให้เห็นชัดเจนว่าพฤติกรรมนี้คืออาการเสียการทรงตัวแบบไวโค้งหรือ Oversteer นั้นเองและมุมการเคลื่อนที่ของรถจริง (Heading angle : β) ได้บ่งบอกลักษณะการเคลื่อนที่ของรถเมื่อรถเกิดอาการท้ายปัดทำให้หน้ารถชี้เข้าหาในโค้งนั่นเองและในระดับวัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ 80% ยังค่ามีความเร็วเชิงมุมหรือค่า Yaw rate ที่ต่ำลงกว่าระดับวัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ 70% อาจจะเนื่องมาจากการหมุนรอบตัวของรถที่เกิดอาการท้ายปัดออกในลักษณะคล้ายลูกข่างซึ่งแตกต่างกับอาการที่ท้ายปัดออกกว้างช่องด้านรถซึ่งในกรณีอย่างหลังอาจจะทำให้ตัวรถเกิดการเอียงหรือการขึ้นบนถนนมากกว่าที่ล้อหมุนฟรีและรถหมุนปัดรอบตัวเองซึ่งรถเกิดอาการเหวี่ยงตัวน้อยกว่าแบบที่รถปัดกว้างซึ่งจะสามารถนำมาอธิบายต่อยอดได้ว่าในกรณีที่รถเสียการทรงตัวจนรถเกิดการพลิกคว่ำนั้นส่วนใหญ่มักเกิดกับรถที่มีอาการขึ้นบนถนนเมื่อมีค่า Yaw rate ที่สูงขึ้นอาจจะทำให้รถเกิดการพลิกคว่ำได้ซึ่งจะแตกต่างกับอาการล้อฟรีปัดออกแล้วรถหมุนรอบตัวเองซึ่งในกรณีนี้มีการทำเทคนิคนี้ไปใช้ในการแข่งขันรถดริฟท์ ซึ่งในกรณีของรถที่นำมาทดลองนี้จะเกิดอาการเสียการทรงตัวแบบไวโค้งหรือ Oversteer นี้ในการตั้งค่าระดับวัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนให้สูงถึง 70% ขึ้นไป



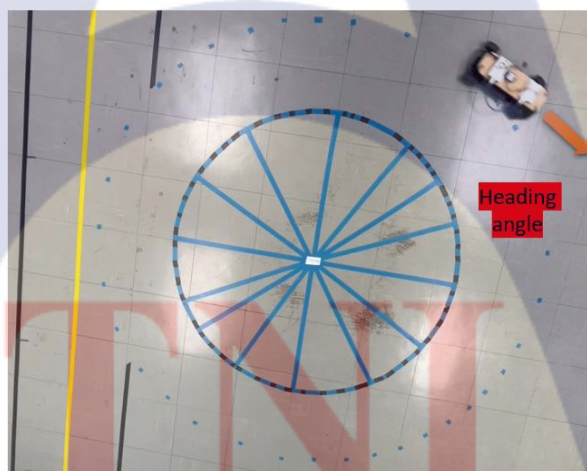
รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายตัวอย่างขณะที่รถมีอาการไวโค้งในการเข้าโค้งทางซ้าย

ซึ่งในกรณีของรถที่นำมาทดลองนี้จะเกิดการเสียการทรงตัวแบบไวโค้งหรือ Oversteer นี้ในการตั้งค่าระดับวัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนให้สูงถึง 70% ขึ้นไปพบว่าตัวรถนั้นเสียการทรงตัวแบบไวโค้งจากในรูปที่ 4.19 ภาพหมายเลข 1 ตัวรถยังวิ่งอยู่ในเสถียรภาพซึ่งตัวรถยังสามารถเข้าโค้งอยู่ในช่องทางเดินรถได้ในภาพหมายเลข 2 พบว่าตัวรถมีอาการเสียการทรงตัวแบบไวโค้งหรือท้ายปัดนั่นเองซึ่งเห็นได้ว่าท้ายรถนั้นจะเริ่มไถลออกและพาให้เส้นไถลออกไปนอกโค้งดังที่ภาพหมายเลข 3 ตัวรถวิ่งปัดออกนอกโค้งหรือที่เรียกว่า Slide ซึ่งคือพฤติกรรมของรถที่เกิดอาการเสียการทรงตัวแบบไวโค้งตัวรถนั้นเส้นไถลมากจากทางล้อหลังส่งผลให้ตัวรถไม่สามารถวิ่งไปตามมุมที่ระบบบังคับเลี้ยว (Steering angle) ได้ ส่งผลให้รถท้ายปัดออกและเกิดมุมลื่นไถลขึ้น

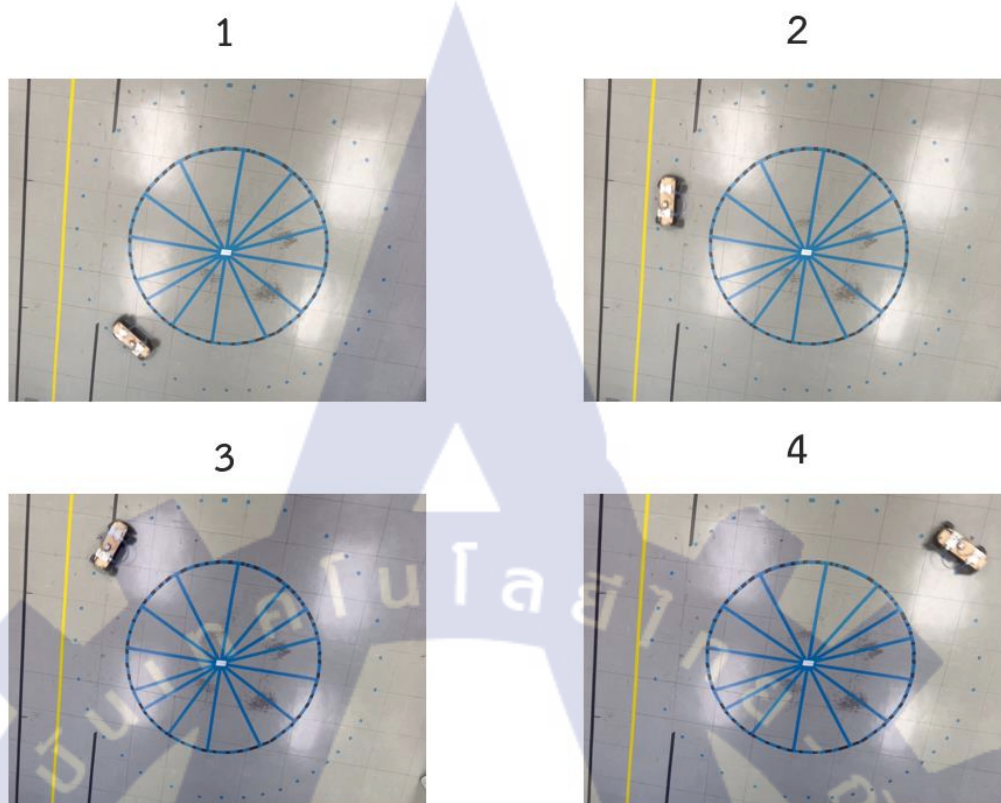
4.3.2 ผลพฤติกรรมของรถบังคับวิทยุขนาด 1:10 ในการเข้าโค้งทางขวา



รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายจากมุมสูงขณะการทดลองในกรณีที่ตัวรถวิ่งเข้าโค้งทางขวาโดยอยู่ในสถานะสมดุล ณ ระดับวัฏจักรการทำงาน PWM 15%

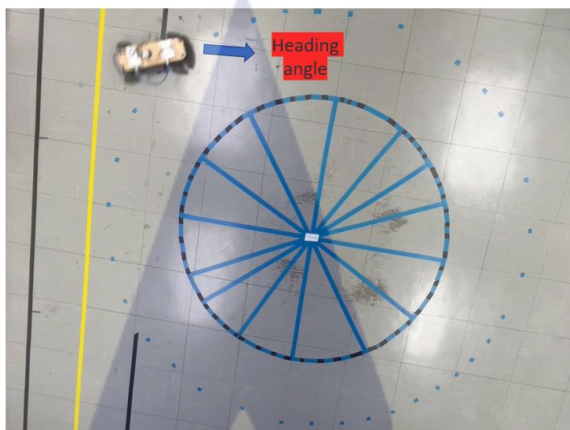


รูปที่ 4.21 ภาพถ่ายจากมุมสูงขณะการทดลองในกรณีที่ตัวรถวิ่งเข้าโค้งทางขวาโดยอยู่ในสถานะสมดุล ณ ระดับวัฏจักรการทำงาน PWM 30%



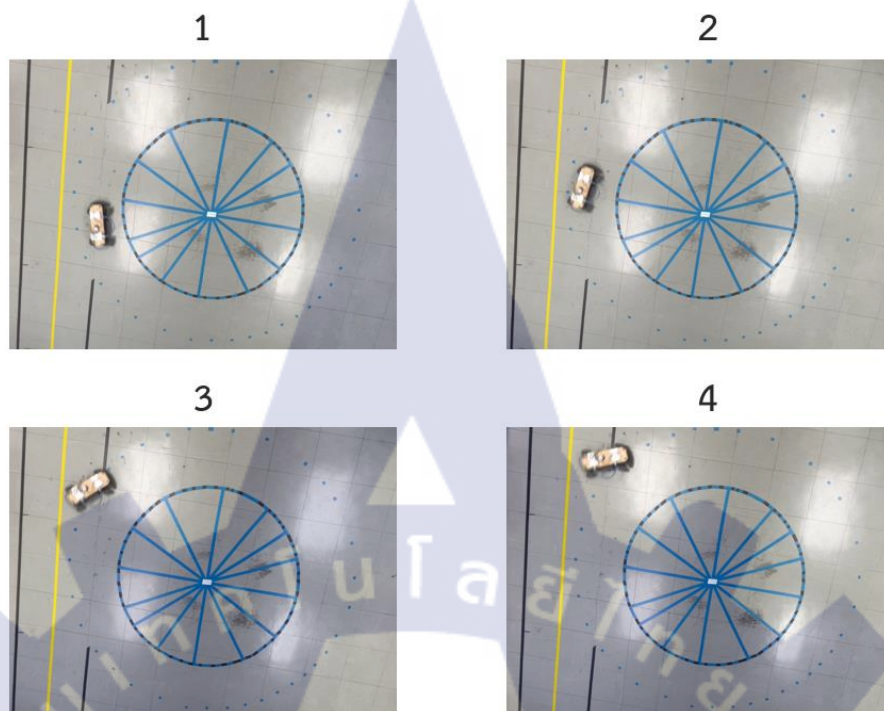
รูปที่ 4.22 ภาพถ่ายตัวอย่างขณะที่รถมีอาการหน้าดื้อโค้งในการเลี้ยวโค้งทางขวา

ซึ่งพฤติกรรมของรถที่นำมาทดลองนั้นการทดลองเลี้ยวทางขวานั้นตัวรถก็แสดงอาการพฤติกรรมที่มีความคล้ายกับการทดลองทางด้านซ้ายซึ่งตัวรถจะพบการเสียการทรงตัวแบบหน้าดื้อโค้ง (Understeer) เหมือนกันค่า Yaw rate ที่เก็บผลได้จากเซ็นเซอร์วัดความเฉื่อยมีค่าที่ตรงกันข้ามกันจากในรูปที่ 4.12 นั้นจะเห็นได้ว่ามุมที่รถเคลื่อนที่จริง (Heading angle) พุ่งออกไปด้านนอกโค้งซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวนั้นเสียการทรงตัวแบบหน้าดื้อโค้งและตัวรถทดลองนั้นได้วิ่งออกไปนอกช่องทางเดินรถในอาการหน้าดื้อโค้งนี้จะเริ่มพบได้ที่วัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนอยู่ในช่วง 20% ไปจนถึงช่วง 60 % โดยค่า Yaw rate ที่วัดได้นั้นจะอยู่ในช่วง 60 deg/s และสูงสุดอยู่ไม่เกิน 150 deg/s ความเร็วเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 2 m/s ถึง 8 m/s โดยประมาณตามที่ในรูปที่ 4.2 และ รูปที่ 4.4 ได้แสดงเอาไว้เป็นกราฟเทียบกับเวลา ซึ่งตัวรถนั้นจะเริ่มเสียการทรงตัวเป็นแบบหน้าดื้อโค้งในช่วงที่มีความเร็วใกล้เคียงกับการทดลองในรูปแบบเข้าโค้งทางซ้ายซึ่งการสังเกตพฤติกรรมการเลี้ยวโค้งจะดูได้จากรูปที่ 4.21 ซึ่งลำดับการขณะเกิดการเสียการทรงตัวจะดูได้ในภาพที่ 4.22 ได้ตามลำดับตัวเลข 1 ไปจนถึง 4



รูปที่ 4.23 ภาพถ่ายจากมุมสูงขณะการทดลองในกรณีที่ตัวรถวิ่งเข้าโค้งทางขวาโดยอยู่ในสถานะ สมดุล ณ ระดับวัฏจักรการทำงาน PWM 80%

ตัวรถจะเริ่มพบอาการเสียการทรงตัวแบบไวโค้ง (Oversteer) ที่ระดับวัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนอยู่ที่ประมาณ 70% ขึ้นไปซึ่งตัวรถจะเปลี่ยนจากพฤติกรรมเสียการทรงตัวแบบหน้าดื้อโค้งไปในช่วงความเร็วก่อนหน้าแต่พอเมื่อความเร็วสูงขึ้นจะพบอาการไวโค้งได้ทันทีซึ่งมีความใกล้เคียงกับการทดลองในด้านเลี้ยวซ้ายซึ่งก็จะพบอาการไวโค้งที่ระดับวัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนที่เท่ากันซึ่งค่า Yaw rate ของอาการไวโค้งนั้นจะอยู่ในช่วงประมาณ 180 deg/s จนถึง 260 deg/s ความเร็วเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเป็น 10 m/s และ ค่าความเร่งที่กระทำด้านข้างนั้นจะพบว่าเป็นลบเมื่อรถเกิดอาการไวโค้ง โดยในรูปที่ 4.23 นั้นจะเห็นได้ว่าตัวรถนั้นมีอาการท้ายปัดหรืออาการไวโค้งจะสังเกตได้จากมุมเคลื่อนที่จริงของรถ (Heading Angle) นั้นชี้ไปในทิศทางวิ่งเข้าหาในโค้งซึ่งเป็นพฤติกรรมของรถที่มีอาการไวโค้งและท้ายรถจะกวาดออก (ปัดขว้าง) จากช่องทางเดินรถขณะที่รถเลี้ยวโค้งและวิ่งหลุดโค้งออกไป ซึ่งรูปพฤติกรรมอาการไวโค้งจะเป็นดังที่แสดงในรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายตัวอย่างขณะที่รถมีอาการหน้าไวโค้งโค้งในการเลี้ยวโค้งทางขวา

ในรูปที่ 4.24 จะเห็นได้เลยว่าตัวรถนั้นเมื่อเกิดอาการท้ายปัดหรือไวโค้งตัวรถจะวิ่งปิดขว้างช่องทางเดินรถและมุมการเคลื่อนที่จริงของรถ (Heading Angle) จะชี้เข้าไปทางด้านในโค้ง ซึ่งลำดับการขณะเกิดการเสียการทรงตัวจะดูได้ตามลำดับตัวเลข 1 ไปจนถึง 4

ในการทดลองนี้จากผลข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์และการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อตรวจวัดนั้นสามารถบ่งชี้อาการเสียการทรงตัวของตัวรถได้ ซึ่งจากการนำค่า Yaw rate ,ความเร่งในแนวด้านข้าง ค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถลของรถนั้น มาเปรียบเทียบกับ กล้องบันทึกภาพจากมุมบน ซึ่งจะเห็นได้ว่าในแต่ละช่วงของความเร็วของรถนั้นหรือในแต่ละระดับวัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนนั้นจะแสดงพฤติกรรมอาการหน้าดื้อโค้งในช่วงระดับวัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อนอยู่ในช่วงที่ 20% ถึง 60% โดยความเร็วเฉลี่ยอยู่ที่ 2 m/s ถึง 8 m/s ซึ่งภาพที่บันทึกจากมุมบนนั้นได้แสดงอาการหน้าดื้อโค้งอย่างชัดเจนซึ่งตรงกับระบบวิเคราะห์ที่ออกแบบไว้แจ้งผลด้วยค่าตัวแปรเสถียรภาพที่มีค่ามากกว่า 0 และในช่วงระดับวัฏจักรการทำงานของมอเตอร์ขับเคลื่อน 70% ขึ้นไป โดยความเร็วเฉลี่ยอยู่ที่ 10 m/s นั้นพบว่าตัวรถมีอาการเสียการทรงตัวแบบไวโค้งจริงจากภาพบันทึกจากมุมบนสามารถระบุได้ชัดเจนว่าเกิดอาการท้ายปัดซึ่งในตัวระบบได้แจ้งผลค่าตัวแปรเสถียรภาพเป็นลบ จึงบอกได้ว่าระบบที่ออกแบบมาสามารถนำมาใช้ชี้วัดพฤติกรรมเสียการทรงตัวของรถในทางโค้งได้

บทที่ 5

บทสรุป ข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการดำเนินงานวิจัยเรื่องการพัฒนาแบบวิเคราะห์เสถียรภาพทางโค้งของรถยนต์อัตโนมัติ กรณีศึกษา รถยนต์บังคับวิทยุขนาด 1:10 ซึ่งผลการวิจัยนี้สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ในการทดลองนี้ตัวระบบที่ออกแบบสามารถเก็บผลข้อมูลค่าความเร็วเชิงมุมและค่าความเร่งในแนวด้านข้าง มาประมวลผลผ่านระบบคอมพิวเตอร์ที่ออกแบบไว้ สามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์การลื่นไถลของตัวรถขณะวิ่งทำการเลี้ยวโค้งได้ซึ่งสามารถบ่งชี้ว่าตัวรถนั้นเกิดอาการลื่นไถล และระบบยังสามารถหาวิเคราะห์หาค่าตัวแปรเสถียรภาพการทรงตัวของรถซึ่งสามารถระบบพฤติกรรมรูปอาการเสียการทรงตัวของรถในขณะทำการเลี้ยวเข้าโค้ง

5.1.2 ตัวระบบที่ทำการสร้างขึ้นมายังสามารถวิเคราะห์หาค่าความเร็ววิกฤติในขณะที่ยังทำการเลี้ยวโค้งได้ ซึ่งความวิกฤตินี้จะบอกถึงจุดความเร็วสูงสุดที่ยังเข้าโค้งโดยไม่เกิดอาการสูญเสียเสถียรภาพ แต่เมื่อตัวรถวิ่งเข้าโค้งด้วยความเร็วที่สูงกว่าความเร็ววิกฤติตัวรถนั้นจะวิ่งหลุดโค้งหรือเกิดอาการสูญเสียเสถียรภาพนั่นเอง

5.1.3 ในการเกิดอาการสูญเสียเสถียรภาพการทรงตัวของรถนั้นมีหลายปัจจัยที่ทำให้รถเกิดอาการดังกล่าวขณะเลี้ยวโค้งได้ อาทิเช่น แรงบิดจากมอเตอร์ขับเคลื่อน แรงเสียดทานระหว่างยางกับพื้นถนน แรงต้านการเลี้ยวโค้ง แรงที่กระทำด้านข้างต่อตัวรถ ซึ่งแรงต่างๆที่กล่าวมานั้นส่งผลให้รถสามารถสูญเสียเสถียรภาพขณะเลี้ยวโค้งได้ ซึ่งระบบที่ผู้ทดลองได้ออกแบบและนำมาติดตั้งในการทดลองนั้นสามารถนำมาวิเคราะห์อาการพฤติกรรมเสียการทรงตัวของรถได้ด้วยการนำเอา ค่าความเร่งและค่าความเร็วเชิงมุม ที่วัดได้จากเซ็นเซอร์วัดความเฉื่อยที่ติดตั้งอยู่ในตัวรถมาวิเคราะห์และพัฒนาจนเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับชี้วัดการเกิดอาการสูญเสียเสถียรภาพทางโค้งได้ และสามารถระบุได้ว่าเป็นในรูปแบบอาการดื้อโค้ง (Understeer) และ อาการไวโค้ง (Oversteer) ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดไปใช้ในระบบป้องกันก่อนเกิดอุบัติเหตุของรถอัตโนมัติได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในกรณีที่ไม่สามารถทดลองในตัวรถยนต์จริงได้เนื่องจากจะต้องมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก รวมไปถึงการหาสนามทดสอบมีความเป็นไปได้ยากที่จะสร้างสนามให้ปลอดภัยต่อผู้ทดลองและทรัพย์สินซึ่งอาจจะส่งผลให้เกิดความอันตรายสูง ดังนั้นการเลือกที่จะนำรถทดลองขนาด 1:10 มาใช้ในการทดลองนี้ช่วยลดค่าใช้จ่ายและยังไม่ส่งผลให้เกิดความอันตรายอีกด้วย

5.2.2 ในการออกแบบพัฒนาระบบวิเคราะห์เสถียรภาพทางโค้งนี้ยังสามารถนำไปติดตั้งในรถขนาด 1:10 คันอื่นและแก้ไขค่าพารามิเตอร์ให้ตรงกับรถที่นำมาทดลองแล้วสามารถนำไปใช้งานได้เลย

5.2.3 ในการออกแบบรถให้มีสมรรถนะสูงนั้นควรจะต้องออกแบบให้มีจุดศูนย์กลางมวลที่ต่ำ รวมไปถึงการกระจายน้ำหนักให้เหมาะสม เนื่องจากจุดศูนย์กลางมวลของรถและน้ำหนักนั้นมีผลต่อการเกิดอาการเสียการทรงตัวของรถขณะเลี้ยวโค้งได้อย่างมาก





บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- [1] ศรีสิทธิ์ วงศ์วรจรรย์, “เปิดสถิติ อุบัติเหตุบนถนน ประเทศไทยเกิดเหตุอะไรบ่อยสุด,” [Online]. Available: <https://www.bangkokbiznews.com/social/984601> [Accessed: January 28,2022].
- [2] J. Shea Choksey and C. Wardlaw, *Levels of Autonomous Driving, Explained*, [Online]. Available: <https://www.jdpower.com/cars/shopping-guides/levels-of-autonomous-driving-explained> [Accessed: January 28,2022].
- [3] Usha Rama, *Cruise Control System*, [Online]. Available: <https://usharama.edu.in/blogDetail/adaptive-cruise-control-what-is-it-how-is-it-installation-and-everything-you-d-want-to-know> [Accessed: Jan 29,2022].
- [4] H. Fang et al., “Robust anti-sliding control of autonomous vehicles in presence of lateral disturbances,” *Control Eng Pract*, vol. 19, no. 5, pp. 468–478, May 2011, doi: 10.1016/j.conengprac.2011.01.008.
- [5] M. V. Gennip, “*Vehicle Dynamic Modelling and parameter Identification for an Autonomous Vehicle*,” M.S. thesis, (Systems Design Engineering), University of Waterloo, Waterloo, Canada, 2018.
- [6] S. Gupta et al., “Electronic stability control of vehicles,” *ITM Web of Conferences*, vol 32, Ramrao Adik Institute of Technology, India, July 29, 2020, pp.1-7, doi: 10.1051/itmconf/20203201009.
- [7] เอกลักษณ์ พรหมภักดี, “การวิเคราะห์เสถียรภาพการเลี้ยวโค้งของรถขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าประเภทพั่นต่ำด้วยวิธีการจำลองทางพลศาสตร์การเคลื่อนที่แบบมัลติบอดี้,” วิทยานิพนธ์ วศ.บ.(การผลิต), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 2560.
- [8] R. Chaichaowarat and W. Wannasuphopsit, “Kinematics-based analytical solution for wheel slip angle estimation of a RWD vehicle with drift,” *Engineering Journal*, vol. 20, no. 2, pp. 89–107, May 2016, doi: 10.4186/ej.2016.20.2.89.
- [9] ทรงวุฒิ มงคลเลิศมณี และ คณะ, เสถียรภาพการบังคับยานยนต์ และ แนวทางการทดสอบ, *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*,ปีที่36, ฉบับที่3, หน้า 381-393, กรกฎาคม – กันยายน 2556.

- [10] ปริญญา วัฒนกุลชัย, “เรื่องระบบย่อยส่วนพลศาสตร์สมมูลยานยนต์จริง,” *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่22*, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต, 15-17 ตุลาคม 2551, หน้า 269.
- [11] J.-S. Jo et al., “Vehicle stability control system for enhancing steerability, lateral stability, and roll stability,” *International Journal of Automotive Technology*, vol. 9, no. 5, pp.571-576, October 2008.
- [12] M.K. Airpin et al, “A review of active yaw control system for vehicle handling and stability enhancement,” *International Journal of Vehicular Technology*, vol. 2014, no. 437515, pp. 15, June 2014.
- [13] Tamiya usa, “*Tamiya HSV-010*,” [Online]. Available: <https://www.tamiyausa.com/shop/110-4wd-belt-drive-road-ta/rc-weider-hsv-010/> [Accessed: March 30,2024].
- [14] Raspberry pi, “*Raspberry Pi 4 model B*,” [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/> [Accessed: March 30 2024].
- [15] Ai-corporation, “*ทำความรู้จัก บอร์ด ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARDUINO UNO R3 คืออะไรใช้งานอะไรได้บ้าง*,” [Online]. Available: <https://www.ai-corporation.net/2021/11/arduino-uno-r3/> [Accessed: March 30,2024].
- [16] Element 14, “*DFROBOT SEN-0386*,” [Online]. Available: <https://th.element14.com/dfrobot/sen0386/serial-6-axis-accelerometer/dp/3769881/> [Accessed: March 30,2024].
- [17] Arduino Tronics, “*Motor Drive Module (BTS7960) - 43A with H-Bridge*,” [Online]. Available: <https://www.arduitronics.com/product/983/motor-drive-module-bts7960-43a-with-h-bridge> [Accessed: March 30,2024].
- [18] Robolabor Motor Gear and Wheel “*Servo Towerpro MG996R 360DEG*,” [Online]. Available: <https://robolabor.ee/en/motors-gears-and-wheels/925-servo-pro-mg9mg996r-360deg.html> [Accessed: March 31,2024].
- [19] R. N. Jazar, *Vehicle Dynamics Theory and Applications*, 3rd ed., Springer International Publishing AG, 2017.
- [20] V. Mistry and V. Awatade, “Design and optimization of anti-ackermann steering”, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 8, no. 5, pp.2615-2619, May 2021.

- [21] M. Perciński and M. Marcinkiewicz, "Architecture of the system of 1:10 scale autonomous car - Requirements-based design and implementation," in *2018 International Interdisciplinary PhD Workshop*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, Świnouście, Poland, June 21, 2018, pp. 263–268. doi: 10.1109/IIPHDW.2018.8388370.



ประวัติย่อผู้วิจัย



ชื่อ - นามสกุล	นาย วุฒิพงศ์ สมคุณากรกุล
วัน - เดือน - ปี เกิด	3 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2540
ที่อยู่ปัจจุบัน	124 ซ.ลาซาล 42 ถ.ลาซาล เขตบางนา กรุงเทพมหานคร 10260
E-mail	wuthipong62@gmail.com
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ.2566	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
พ.ศ.2562	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมยานยนต์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น
ประวัติการทำงาน	
พ.ศ. 2564 - ปัจจุบัน	รับเหมาก่อสร้างบ้าน และ งานรีโนเวทบ้าน (ธุรกิจส่วนตัว)