

รถตรวจทางรถไฟน้ำหนักเบา

The Light Weight Speeder



คงสิน ทินราช

รณกฤต แก้วเกตุ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# The Light Weight Speeder

Khongsin Tinrach

Ronnakrit Kaewket



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABUNG

2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2562

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง รถตรวจทางรถไฟ

The Light Weight Speeder

ผู้จัดทำ

1. นายคงสิน ทินราช รหัสประจำตัว 59010162
2. นายรณกฤต แก้วเกตุ รหัสประจำตัว 59011116

B.BU

อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ดร.บำรุง พ่วงเกิด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รถตรวจทางรถไฟ

นายคงสิน ทินราช 59010162

นายรณกฤต แก้วเกตุ 59011116

ดร.บำรุง พ่วงเกิด อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2562

### บทคัดย่อ

โครงงานฉบับนี้ มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบและสร้างรถตรวจทางรถไฟที่มีน้ำหนักเบาขนาดเล็กสำหรับใช้โดยสารในระยะทางสั้นๆ กว่าที่การรถไฟแห่งประเทศไทย(รฟท.) มีใช้งานอยู่ในปัจจุบัน ได้แนวคิดมาจากสก็ูตเตอร์ไฟฟ้าเพื่อรองรับผู้ใช้งานได้หนึ่งคน โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ขนาด 24 โวลต์ ส่งกำลังด้วยสายโซ่ในการขับเคลื่อนตัวรถ น้ำหนักของรถไม่เกิน 15 กิโลกรัม สามารถบรรทุกน้ำหนักได้สูงสุด 105 กิโลกรัม มีความเร็วสูงสุดไม่เกิน 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง วิเคราะห์ความเค้นที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างของรถตามหลักการไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อนำความเค้นที่ได้มาพิจารณาหาขนาดของโครงสร้างที่เหมาะสมและขนาดของส่วนประกอบต่างๆในตัวรถ เช่น เพลา ถูกคำนวณตามหลักวิศวกรรม

**คำหลัก:** รถตรวจทางรถไฟ สก็ูตเตอร์ไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# The Light Weight Speeder

Khongsin Tinrach 59010162

Ronnakrit Kaewket 59011116

Dr.Bumroong Puangkird Advisor

Year 2019

## Abstract

The aim of this project is to study the design and construction of Rail patrol car which is smaller than the one that State Railway of Thailand (SRT.) currently employed that the idea was derived from electric scooter. It was designed for one person usage and can be used on rail tracks. DC motor 24V is used for power transmission chain. The weight of car is not more than 15 kilograms and it can carry a maximum load of 105 kilograms with the top speed is not less than 20 kilometers per hour. The stress on structure is analyzed according to finite element method. Greatest stress has been taken into consideration to find the appropriate structure size. The dimensions of the components of the car (e.g., axles) are calculated according to engineering principles.

**Keywords:** Light Weight Speeder, electric scooter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างสมบูรณ์ ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก ดร.บำรุง พ่วงเกิด อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และเป็นผู้ตรวจทานต้นฉบับวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้า ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์เป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกๆท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณนายกันต์พงษ์ นิธิอนันต์กรในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกคนที่ให้คำแนะนำต่างๆและคอยให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณเพื่อนร่วมโปรเจกต์ที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้อย่างสมบูรณ์ มีคุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านที่กล่าวมาข้างต้น

นายคงสิน                      ทินราช  
นายรณกฤต                    แก้วเกตุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญรูป.....	VI
สารบัญตาราง .....	X
รายการคำย่อและสัญลักษณ์ .....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	1
1.4 แผนการดำเนินงาน .....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 แนวคิดการออกแบบ .....	3
2.2 แรงดันการเคลื่อนที่ .....	4
2.3 แบตเตอรี่.....	10
2.4 มอเตอร์ไฟฟ้า .....	11
2.5 การคำนวณหาขนาดของมอเตอร์ขับเคลื่อน.....	12
2.6 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์.....	15
2.7 เสถียรภาพของรถ.....	17
2.8 ความแข็งแรงของโครงรถ .....	18
2.9 การออกแบบเพลลา.....	19
2.10 การคำนวณส่วนยึดเหนี่ยว.....	22
2.11 ทฤษฎีความเสียหาย .....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.12	การวิเคราะห์ชิ้นส่วนด้วยหลักการทางไฟไนต์เอลิเมนต์.....	27
2.13	ระบบเบรก (Braking System) .....	27
2.14	ร่างรถไฟ .....	33
บทที่ 3	การออกแบบและการคำนวณ.....	35
3.1	การคำนวณแรงที่กระทำต่อล้อ .....	35
3.2	อุปกรณ์และการติดตั้ง .....	38
3.3	การคำนวณหาขนาดของมอเตอร์.....	40
3.4	การคำนวณขนาดแบตเตอรี่ .....	46
3.5	การคำนวณเบรก .....	51
3.6	การคำนวณหาจุดศูนย์กลาง (C.G.).....	53
3.7	การวิเคราะห์โครงสร้าง.....	56
3.8	การคำนวณขนาดของส่วนต่างๆ .....	59
3.9	การวิเคราะห์ความแข็งแรง von misses stress .....	65
3.10	การจำลองการเคลื่อนที่ของรถ.....	67
บทที่ 4	ผลการศึกษา .....	75
บทที่ 5	สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	84
บรรณานุกรม	.....	86
ภาคผนวก	.....	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2-1 แสดงรถยนต์ตรวจทาง .....	3
2-2 แรงต้านการหมุนของล้อขณะที่ยึดและไม่ยึด[1] .....	5
2-3 แรงต้านจากความลาดชันและแรงเสียดทานจากความลาดชัน .....	9
2-4 Hub motor .....	11
2-5 Chain motor.....	12
2-6 ความกว้างของช่วงpulseและค่าduty cycleของช่วงpulseที่มีความถี่คงที่ .....	16
2-7 motor controller.....	17
2-8 คันเร่งสปีดมอเตอร์ไฟฟ้า.....	17
2-9 ด้านซ้ายกรวยที่มีฐานกว้าง ด้านขวา กรวยที่มีฐานแคบ.....	17
2-10 หน้าตัดของโครงรถ .....	18
2-11 แสดงเพลายู่ภายใต้แรงต่าง ๆ .....	20
2-12 คำศัพท์เกี่ยวกับเกสียว .....	22
2-13 รูปความเค้น 3 มิติ .....	25
2-14 ความเค้นตั้งฉากตามแนวแกนใน 3 มิติ .....	26
2-15 (ก) State of stress ของจุดใดๆ (ข) การทดสอบ Tension-test .....	26
2-16 Disc brake.....	28
2-17 Drum brake.....	29
2-18 Anti-Lock Brake System .....	29
2-19 เบรกกำมปู.....	30
2-20 เบรกเท้าสปีดเตอร์ .....	30
2-21 เบรกมือในสปีดเตอร์ .....	31
2-22 ส่วนประกอบของราง .....	33
2-23 รางขนาด 100, 80, 70 และ 50 ปอนด์ต่อหลา.....	33
2-24 หน้าตัดราง BS 80 A และ 100 A.....	34
3-1 แสดงภาพด้านข้างของรถ.....	35
3-2 แสดงภาพisometricและจุดC.G.ของรถ.....	35
3-3 เบรกแบบไฮดรอลิกดิสก์เบรก .....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3-4 แสดงตำแหน่งการติดตั้งชุดเบรก .....	38
3-5 วิธีการต่อชุดควบคุมความเร็ว .....	39
3-6 ตำแหน่งการติดตั้งชุดควบคุมความเร็ว .....	40
3-7 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างยางกับเหล็ก .....	42
3-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับระยะทาง .....	46
3-9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับระยะเวลา .....	47
3-10 แสดงพิกัดของตัวรถ .....	53
3-11 แสดงพิกัดผู้ขับขี่ .....	54
3-12 แรงแสดงแรงที่กระทำต่อโครงรถ .....	56
3-13 ภาพแสดงโครงรถด้านข้าง แบบ side view .....	58
3-14 ภาพแสดงโครงรถด้านข้างแบบ Isometric .....	58
3-15 แสดงภาพ3Dของเหล็กกล่อง .....	59
3-16 แสดงภาพหน้าตัดของเหล็กกล่อง .....	59
3-17 เพลาล้อหน้า .....	61
3-18 เพลาล้อหลัง .....	62
3-19 bolt ระหว่างตะเกียบหลังกับล้อ .....	63
3-20 แสดงส่วนรองรับ .....	64
3-21 แบบจำลอง3Dของโครงรถ .....	65
3-22 แสดงแรงที่กระทำบนชิ้นงาน .....	65
3-23 แสดงจุดFixบนชิ้นงาน .....	66
3-24 แสดงการ mesh .....	66
3-25 แสดงผลการ Simulation .....	67
3-26 แสดงจุด C.G. ของรถขณะไม่มีผู้ขับขี่ .....	67
3-27 a) โครงรถspeeder b) กล่องใส่แบตเตอรี่ .....	68
3-28 จุดอ้างอิงหลังใช้คำสั่ง Fix .....	69
3-29 แสดง DOF ของวัตถุ[10] .....	69
3-30 การกำหนด moving parts .....	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3-31 แสดง mate ที่ส่วนต่างๆของspeeder .....	70
3-32 แสดงแบบจำลองตัวรถที่มีผู้โดยสาร .....	71
3-33 การกำหนดความเร็วเริ่มต้น.....	71
3-34 การกำหนดความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง .....	72
3-35 แสดงมวลของกล่องตัวแทนผู้ขับขี่ .....	72
3-36 การกำหนดแรงกระทำที่ตัวรถ.....	73
3-37 Motion drivers.....	73
3-38 แสดงการตั้งค่าcontact.....	73
3-39 การกำหนดรายละเอียดภาพ.....	74
3-40 Run โปรแกรมจำลองการเคลื่อนไหว .....	74
4-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน x เทียบกับเวลาของแบบจำลองที่ 1.....	75
4-2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน y เทียบกับเวลาของแบบจำลองที่ 1.....	76
4-3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมรอบแกน x เทียบกับเวลาของแบบจำลองที่ 1 .....	76
4-4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมรอบแกน y เทียบกับเวลาของแบบจำลองที่ 1 .....	77
4-5 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองที่ 1 .....	77
4-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน x กับเวลาของแบบจำลองที่ 2 .....	78
4-7กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน y กับเวลาของแบบจำลองที่ 2.....	79
4-8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมรอบแกน x กับเวลาของแบบจำลองที่ 2.....	79
4-9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมรอบแกน y กับเวลาของแบบจำลองที่ 2.....	80
4-10 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนไหวแบบจำลองที่ 2.....	80
4-11 สกิวเตอร์แบบมีล้อด้านข้างและมีล้อประกอบ.....	81
4-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน x กับเวลาของแบบจำลองที่ 3 .....	81
4-13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน y กับเวลาของแบบจำลองที่ 3 .....	82
4-14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมรอบแกน x กับเวลาของแบบจำลองที่ 3 .....	82
4-15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมรอบแกน y กับเวลาของแบบจำลองที่ 3 .....	83
4-16 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนไหวแบบจำลองที่ 3.....	83

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

รูปที่ 5- 1 แบบ 3D ของรถตรวจทางรถไฟน้ำหนักเบา..... 84



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1-1 การดำเนินงาน.....	2
2-1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของการหมุนของล้อรถยนต์.....	7
2-2 ตารางเปรียบเทียบ hub motor กับ BLDC motor .....	12
2-3 ตารางแสดงคุณสมบัติเหล็กรีดเย็น .....	19
2-4 แสดงขนาดระบุของเพลตามาตรฐาน ISO / R 755 – 1969.....	20
2-5 ตาราง SAE Specifications for Steel Bolts.....	23
2-6 ASTM Specifications for Steel Bolts.....	24
2-7 Metric Mechanical-Property Classes for Steel Bolts, Screws, and Studs .....	24
2-8 แสดงลักษณะของเบรกเชิงกลและไฮดรอลิก .....	28
3-1 แสดง Standard Mate.....	70
3-2 แสดง Advanced Mate.....	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

$A$	พื้นที่หน้าตัดของรถส่วนที่ต้านกับลม ( $m^2$ )
$a$	ความเร่งสูงสุดของรถ ( $m/s^2$ )
$a_1$	ระยะจากแรง $N$ ถึงจุดศูนย์กลางล้อในแนวระดับ ( $m$ )
$a_b$	ความหน่วงจากการเบรกของรถ ( $m/s^2$ )
$B$	ช่วงกว้างของตัวรถ ( $m$ )
$b_1$	ระยะจากผิวถนนถึงจุดศูนย์กลางล้อในแนวตั้ง ( $m$ )
$C_d$	สัมประสิทธิ์แรงต้านทานของอากาศ
$C_m$	ตัวประกอบจากการล้าเนื่องจากการตัด
$C_t$	ตัวประกอบจากการล้าเนื่องจากการบิด
$F$	แรงที่ใช้ในการขับเคลื่อน ( $N$ )
$F_{b_{max}}$	แรงสูงสุดที่ใช้ในการเบรก ( $N$ )
$f$	แรงเสียดทาน ( $N$ )
$g$	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ( $m/s^2$ )
$H$	ความสูงของตัวรถ ( $m$ )
$I$	ค่า moment of inertia ของชิ้นงาน ( $kg \cdot m^2$ )
$i$	กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่แบตเตอรี่ต้องจ่าย ( $A$ )
$K_r$	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานการหมุน
$K_{r1}$	สัมประสิทธิ์แรงต้านการหมุนที่ล้อหน้า
$K_{r2}$	สัมประสิทธิ์แรงต้านการหมุนที่ล้อหลัง
$M$	โมเมนต์ตัด ( $N \cdot m$ )
$m$	มวลของรถ ( $kg$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$N$	แรงปฏิกิริยาระหว่างพื้นกับล้อ ( $N$ )
$N_f$	แรงปฏิกิริยาระหว่างพื้นกับล้อหน้า ( $N$ )
$N_r$	แรงปฏิกิริยาระหว่างพื้นกับล้อหลัง ( $N$ )
$N_s$	แรงปฏิกิริยาระหว่างพื้นกับล้อด้านข้าง ( $N$ )
$n$	ค่าความปลอดภัย
$P$	แรงขับเคลื่อนที่ล้อที่สามารถทำให้ล้อหมุนกลิ้งได้ ( $N$ )
$P_b$	กำลังที่ใช้ในการเบรก ( $W$ )
$P_m$	กำลังที่มอเตอร์ใช้ในการขับเคลื่อน ( $W$ )
$P_w$	กำลังที่ล้อใช้ในการขับเคลื่อน ( $W$ )
$R$	แรงต้านการเคลื่อนที่รวม ( $N$ )
$R_a$	แรงต้านจากอากาศ ( $N$ )
$R_g$	แรงต้านจากน้ำหนักของรถขณะที่ยื่นเนิน ( $N$ )
$R_r$	แรงต้านการหมุนของล้อ ( $N$ )
$r$	รัศมีล้อ ( $m$ )
$S_y$	Yield strength ( $MPa$ )
$s$	ระยะเบรกของรถ ( $m$ )
$T$	โมเมนต์ดัด ( $N$ )
$T_m$	แรงบิดที่มอเตอร์ต้องทำในการขับเคลื่อน ( $N \cdot m$ )
$T_w$	แรงบิดที่ล้อต้องการในการขับเคลื่อน ( $N \cdot m$ )
$V$	ความต่างศักย์ของแบตเตอรี่ ( $V$ )
$u_1$	ความเร็วของรถขณะเริ่มเบรก ( $m/s$ )
$u_2$	ความเร็วของรถเมื่อเสร็จสิ้นการเบรก ( $m/s$ )
$v$	ความเร็วของรถ ( $m/s$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ XII ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$W$	น้ำหนักที่กดลงบนล้อ ( $N$ )
$W_1$	น้ำหนักของรถที่กดลงที่ล้อหน้า ( $N$ )
$W_2$	น้ำหนักของรถที่กดลงที่ล้อหลัง ( $N$ )
$\rho$	ความหนาแน่นของอากาศ ( $kg / m^3$ )
$\theta$	องศาความลาดชันของพื้นถนน
$\mu_s$	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต
$\eta_i$	ประสิทธิภาพในการส่งกำลังจากมอเตอร์ไปยังล้อ (%)
$\sigma_b$	Yield strength ของวัสดุ ( $MPa$ )
$\tau_{max}$	ความเค้นเฉือนสูงสุด ( $MPa$ )



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

สืบเนื่องมาจากการตรวจบำรุงเส้นทางรถไฟของการรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) ในปัจจุบันนั้น รถตรวจทางรถไฟนับได้ว่าเป็นเครื่องมือที่มีบทบาทสำคัญอย่างมากในการบำรุงทาง โดย รฟท. ได้มีการแบ่งประเภทของรถตรวจทางไว้ 2 ประเภท คือ รถตรวจทางขนาดหนัก เช่น รถอัดหิน, รถเกลี่ยหิน, รถล้างหิน เป็นต้น และรถตรวจทางขนาดเบา เช่น รถยนต์ราง, รถแกงคาร์ เป็นต้น โดยระยะทำการที่สั้นที่สุด คือ รถยนต์ราง ซึ่งมีหน้าที่ขนส่งเจ้าหน้าที่ในการตรวจสภาพทางเบื้องต้น โดยมีระยะทางในการตรวจประมาณ 30 กิโลเมตร แต่ยังไม่มียุคตรวจทางที่ใช้ในระยะใกล้ คณะผู้จัดทำจึงมีแนวคิดว่าจะออกแบบรถตรวจทางที่ใช้งานในระยะทางสูงสุด 10 กิโลเมตร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่ออำนวยความสะดวกในการปฏิบัติงานของเจ้าหน้าที่ในโรงซ่อมบำรุงหรือตามไซต์งานที่มีทางรถไฟ

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อออกแบบรถตรวจทางที่มีขนาดเล็กและมีน้ำหนักสำหรับใช้งานในระยะทางที่สั้นกว่าที่มีใช้ในปัจจุบัน
2. ศึกษาการวิเคราะห์แรงภายในวัสดุ เพื่อหาขนาดวัสดุที่เหมาะสมกับภาระโหลดที่ได้รับ

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ตัวรถมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบากว่ารถตรวจทางที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน
2. สำหรับงานในระยะทางสูงสุด 10 กิโลเมตรต่อการชาร์จแบตเตอรี่เต็มหนึ่งครั้ง
3. ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง โดยมีความเร็วเฉลี่ยไม่ต่ำกว่า 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
4. สามารถบรรทุกได้ 1 คน คือ ผู้ขับขี่ โดยน้ำหนักผู้ขับขี่ไม่เกิน 105 กิโลกรัม
5. สามารถวิ่งบนทางรถไฟอย่างปลอดภัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## บทที่ 2

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 แนวคิดการออกแบบ

รถตรวจทางรถไฟที่ รฟท. มีใช้งานในปัจจุบันนั้นแบ่งได้ 2 ประเภท คือ รถตรวจทางขนาดเบาและรถตรวจทางขนาดหนัก สำหรับรถตรวจทางขนาดเบาที่มีขนาดเล็กที่สุดของ รฟท. คือ รถยนต์รางหรือที่เรียกกันว่ารถต๊ก ตามที่แสดงในรูปที่ 2-1 ใช้เครื่องยนต์เบนซินในการขับเคลื่อน น้ำหนักประมาณ 80 กิโลกรัม สามารถเคลื่อนย้ายได้โดยใช้คนไม่ต่ำกว่า 2 คนยก ทำให้ไม่จำเป็นต้องอาศัยทางหลัก มีระยะรับผิวดชอบประมาณ 30 กิโลเมตร ต่อการตรวจหนึ่งครั้ง โดยปกติจะทำการตรวจสัปดาห์ละ 1 ครั้ง ทางผู้จัดทำจึงมีแนวคิดในการออกแบบรถตรวจทางเบาที่มีน้ำหนักเบากว่ารถยนต์รางเพื่อที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ด้วยคน 1 คน เพื่อใช้ในการอำนวยความสะดวกในการเดินทางเป็นระยะทางสั้นๆภายในโรงงาน, ไซต์งานที่มีรางรถไฟผ่าน เช่น ในการก่อสร้างทางรถไฟ หัวหน้าคนงานใช้ในการเดินทางไป-มาเพื่อตรวจสอบความเรียบร้อยในการทำงาน เป็นต้น



รูปที่ 2- 1 แสดงรถยนต์ตรวจทาง

จากที่ได้กล่าวไปในบทนำคณะผู้จัดทำมีแนวคิดที่ควรออกแบบรถตรวจทางให้มี 2 ล้อและสามารถวิ่งบนรางได้ ซึ่งยานพาหนะที่มี 2 ล้อ ก็ได้แก่ รถจักรยาน,รถจักรยานยนต์,สกู๊ตเตอร์ เป็นต้น โดยรถ 2 ล้อ จำพวกนี้โดยปกติจะทรงตัวโดยอาศัยหลักแรงหนีศูนย์กลาง โดยเมื่อผู้ขับขี่รู้สึกว่ารถไม่สมดุล เช่น เมื่อรถเอียงไปทางซ้ายก็จะทำการหมุนแฮนด์ไปทางซ้าย ทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลางผลักให้ตัวรถกลับมามีตำแหน่งสมดุลอีกครั้ง แต่ในกรณีที่ใช้งานบนราง สมดุลของรถที่เกิดจากการหมุนแฮนด์เพื่อให้เกิดแรงหนีศูนย์กลางจะไม่สามารถทำได้ เนื่องจากรถต้องวิ่งไปตามรางทำให้ไม่สามารถเลี้ยวได้ ดังนั้น จึงมีการออกแบบให้มีล้อเสริมด้านข้างแบบถอดประกอบได้โดยได้แรงบันดาลใจมาจากรถพ่วงซาเล้ง เมื่อประกอบล้อเสริมตัวรถจะวิ่งบน 2 รางทำให้เกิดเสถียรภาพในการขับขี่และเพื่อให้รถสามารถวิ่งไปตามทางรถไฟได้โดยที่ไม่ตกรางจึงได้มีการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบให้มีล้อเสริมอีกชุดโดยทำหน้าที่คล้ายบังใบรถไฟเพื่อให้รถสามารถวิ่งไปตามทางได้ สำหรับตัวโครงรถเลือกใช้เป็นตัวรถจักรยาน เนื่องจากสามารถขับเคลื่อนโดยอาศัยการส่งกำลังจากผู้ขับขี่ผ่านตีนถีบได้ อีกทั้งยังสามารถหาได้ง่ายตามท้องตลาด

## 2.2 แรงต้านการเคลื่อนที่

ในการขับเคลื่อนของรถโดยทั่วไปจะอาศัยกำลังที่ส่งมาจากเครื่องยนต์มายังล้อ ทำให้ล้อเกิดการหมุนและอาศัยแรงเสียดทานระหว่างล้อกับพื้นผิวถนนทำให้เกิดการเคลื่อนที่ โดยในขณะที่ยานเคลื่อนที่ก็จะเกิดแรงต้านในทิศตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของตัวรถ ซึ่งแรงต้านจะมีหลักๆ 3 แรงต้าน ดังนี้

1. แรงต้านการหมุนของล้อ (Rolling Resistance)
2. แรงต้านจากอากาศ (Air Resistance)
3. แรงต้านจากแรงโน้มถ่วงของโลก (Gradient Resistance)

และนอกจากนี้ยังมีแรงต้านการเคลื่อนที่เนื่องจากความเร่ง (Inertia Resistance) โดยจะเรียกแรงเหล่านี้รวมๆ ว่า “แรงต้านการเคลื่อนที่” ซึ่งถ้าหากต้องการให้รถเกิดการเคลื่อนที่แรงขับที่ล้อจะต้องมีค่ามากกว่าแรงต้านการเคลื่อนที่รถจึงจะสามารถเคลื่อนที่ได้

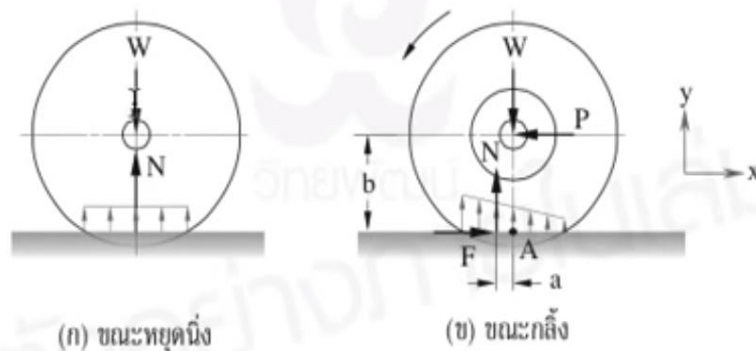
### 2.2.1 แรงต้านการหมุนของล้อ

แรงต้านการหมุนของล้อจะเกิดขึ้นขณะที่ล้อเกิดการหมุน เป็นแรงที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของล้อเนื่องจากเสียดทานที่ล้อกระทำกับพื้นผิวถนน หากแรงนี้เป็นศูนย์ผลของแรงขับจากมอเตอร์จะทำได้เพียงให้ล้อหมุนอยู่กับที่แต่ไม่เกิดการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า

#### ปัจจัยที่มีผลต่อแรงต้านจากอากาศ

1. แรงดันลมยางของล้อ หากล้อมีความแข็งหรือมีแรงดันลมยางสูง จะทำให้เกิดการยุบตัวของยางต่ำ ส่งผลให้แรงต้านทานการหมุนต่ำไปด้วย
2. สภาพของถนน ถ้าถนนขรุขระ/มีความฝืดมาก ก็จะมีแรงต้านการหมุนมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2- 2 แรงต้านการหมุนของล้อขณะที่ล้อหมุนและไม่หมุน[1]

กำหนดให้

- $P$  คือ แรงขับเคลื่อนที่ล้อที่สามารถทำให้ล้อหมุนกลิ้งได้ ( $N$ )
- $R_r$  คือ แรงต้านการหมุนของล้อที่เกิดจากการยุบตัวของล้อ ( $N$ )
- $N$  คือ แรงลัพธ์ทั้งหมดของแรงย่อยในแนวตั้งฉากกับถนน ( $N$ )
- $W$  คือ น้ำหนักที่กดลงบนล้อ ( $N$ )
- $a$  คือ ระยะจากแรง  $N$  ถึงจุดศูนย์กลางล้อในแนวระดับ ( $m$ )
- $b$  คือ ระยะจากผิวถนนถึงจุดศูนย์กลางล้อในแนวตั้ง ( $m$ )
- $K_r$  คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานการหมุน

จากรูปที่ 2-2 จะเห็นได้ว่าล้อเกิดการยุบตัวอันเนื่องมาจากแรง  $W$  ที่ล้อได้รับ โดยหน้าสัมผัสระหว่างผิวล้อกับถนนจะมีพื้นที่กว้าง ทำให้แรงอันเนื่องมาจากน้ำหนักของรถกระจาย ณ พื้นที่นี้ โดยหากรถจอดอยู่เฉยๆ พื้นที่ที่ล้อยุบตัวฝั่งซ้าย-ขวาโดยเทียบกับระยะตั้งฉากจากจุดศูนย์กลางล้อจะเท่าๆกันและแรงจากน้ำหนักจะกระจายอย่างสม่ำเสมอ แต่หากล้อเริ่มหมุนพื้นที่ฝั่งที่ล้อจะเคลื่อนที่ไปจะมีการยุบตัวมากขึ้นและพื้นที่อีกฝั่งจะเกิดการคืนตัวของล้อ ทำให้แรงกระจายจะมีค่าไม่เท่ากันโดยฝั่งที่ล้อเคลื่อนที่ไปจะมีค่ามากและค่อยๆลดค่าลงมา

เมื่อล้อกลิ้งด้วยความเร็วคงที่ จากกฎข้อที่ 1 ของนิวตันจะได้

$$\Sigma F_y = 0$$

$$\text{แรงขึ้น} = \text{แรงลง}$$

$$N = W \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Sigma F_x = 0$$

แรงซ้าย=แรงขวา

$$P = R_r \quad (2.2)$$

และเมื่อให้จุด A ตามที่แสดงในรูปที่ 2-2 เป็นจุดหมุน จากสมมูลของโมเมนต์ จะได้

$$\Sigma M_A = 0$$

โมเมนต์ตาม=โมเมนต์ทวน

$$P \times b = N \times a$$

$$P = \frac{N \times a}{b} \quad (2.3)$$

โดย  $\frac{a}{b}$  มีค่าขึ้นอยู่กับขนาดของล้อ, สภาพผิวถนน รวมถึงความเร็วในการหมุนของล้อ กำหนดให้

$$\frac{a}{b} = K_r \quad (2.4)$$

แทนสมการ (2.1), (2.2) และ (2.3) ใน (2.4) จะได้

$$R_r = K_r W \quad (2.5)$$

เมื่อพิจารณาทั้งล้อหน้าและล้อหลัง

โดย  $K_{r1}, K_{r2}$  คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านการหมุนที่ล้อหน้าและล้อหลัง ตามลำดับ

$W_1, W_2$  คือ น้ำหนักของรถที่กดลงที่ล้อหน้าและล้อหลัง ตามลำดับ

$$R_r = K_{r1} W_1 + K_{r2} W_2 \quad (2.6)$$

ในกรณีที่  $K_{r1} = K_{r2}$  และ  $(W_1 + W_2) = W =$  น้ำหนักรถ จะได้

$$R_r = K_r (W_1 + W_2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_r = K_r W \quad (2.7)$$

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานการหมุนสามารถหาได้โดยการใช้สูตรคำนวณ โดยมีสูตรคำนวณคือ

$$K_r = 0.015 + 0.00016v \quad (2.8)$$

เมื่อ  $v$  คือ อัตราเร็วของรถ ( $km/hr$ )

หรือใช้ค่าประมาณจากตาราง ดังที่แสดงในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2- 1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของการหมุนของล้อรถยนต์[2]

ชนิด และ สภาพถนน	$K_r$ (เฉลี่ย)
ถนนลาดยางและถนนคอนกรีต	
สภาพดีเยี่ยม	0.014 - 0.018
สภาพดีพอใช้	0.018 - 0.020
ถนนปูพื้น	0.023 - 0.030
ถนนลูกรัง	0.020-0.025

## 2.2.2 แรงต้านจากอากาศ

ในการเคลื่อนที่ของรถ นอกจากจะเกิดแรงต้านการหมุนที่ล้อรถแล้ว ขณะที่รถเคลื่อนที่ จะต้องเคลื่อนที่ผ่านอากาศ ซึ่งอากาศนับว่าเป็นของไหลจึงมีความหนืดทำให้เกิดแรงต้านขึ้นมา

### ปัจจัยที่มีผลต่อแรงต้านจากอากาศ

1. พื้นที่หน้าตัดของรถที่ปะทะกับอากาศ ยิ่งมีพื้นที่ปะทะมากก็จะยิ่งทำให้เกิดแรงต้านมาก
2. ทิศทางของลม ถ้ามีทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของรถแรงที่เกิดขึ้นจะเป็นแรงที่เสริมการเคลื่อนที่ แต่ถ้ามีทิศ

ตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ก็จะเป็นแรงต้านการเคลื่อนที่

โดยสามารถคำนวณได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_a = \frac{C_d A \rho v^2}{2} \quad (2.9)$$

กำหนดให้

$R_a$  คือ แรงต้านทานจากลม ( $N$ )

$C_d$  คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านทานของอากาศ สำหรับรถนั่งมีค่าประมาณ 0.3-0.45

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของรถส่วนที่ต้านกับลม ( $m^2$ )

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของอากาศ ( $kg / m^3$ )

$v$  คือ ความเร็วของรถ ( $m / s$ )

เนื่องจากสวิตเตอร์ไฟฟ้าไม่ได้มีหน้าตัดรถเป็นรูปสี่เหลี่ยมทำการหาพื้นที่หน้าตัดที่แน่นอนของรถนั้นทำได้ยากจึงประมาณค่า

$$A = 0.75 \times B \times H \quad (2.10)$$

โดย

$B$  คือ ช่วงกว้างของตัวรถ ( $m$ )

$H$  คือ ความสูงของตัวรถ ( $m$ )

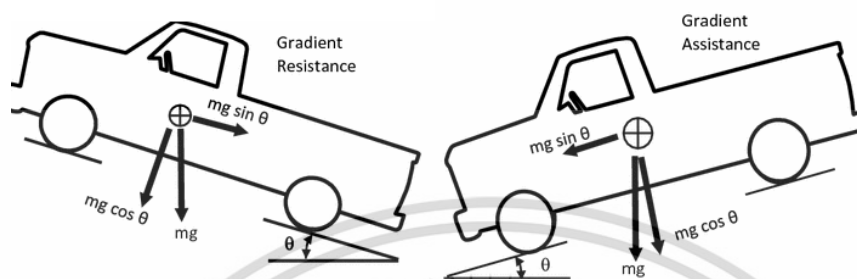
### 2.2.3 แรงต้านจากความลาดชัน

เมื่อรถเคลื่อนที่ขึ้นไปในบริเวณที่มีความลาดชัน จะเกิดแรงจากน้ำหนักของตัวรถในทิศตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของตัวรถ เรียกแรงนี้ว่า “แรงต้านจากความลาดชัน” โดยจะส่งผลให้รถต้องการกำลังขับเคลื่อนมากขึ้น เมื่อเทียบกับการวิ่งบนพื้นราบที่ความเร็วเท่ากัน ในทางกลับกันหากรถเคลื่อนที่ลงจากเนินก็ต้องการแรงขับเคลื่อนที่น้อยกว่า เมื่อเทียบกับการวิ่งบนพื้นราบที่ความเร็วเท่ากัน เนื่องจากแรงจากความลาดชันมีทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของตัวรถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ปัจจัยที่มีผลต่อแรงต้านจากความลาดชัน

1. น้ำหนักรวมของรถ
2. ระดับความลาดชัน



รูปที่ 2- 3 แรงต้านจากความลาดชันและแรงเสริมจากความลาดชัน

โดยจากรูปที่ 2-3 แรงต้านความลาดชันคำนวณได้จาก

$$R_g = mg \sin(\theta) \quad (2.11)$$

โดยกำหนดให้

- $R_g$  คือ แรงต้านจากความลาดชัน ( $N$ )
- $m$  คือ มวลของรถ ( $kg$ )
- $g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ( $9.81m/s^2$ )
- $\theta$  คือ องศาความลาดชันของพื้นถนน

### 2.2.4 แรงเสียดทาน

การที่รถจะเคลื่อนที่โดยการคลิ้งไปข้างหน้าหรือถอยหลังได้นั้น จะต้องอาศัยแรงเสียดทาน โดยแรงเสียดทานจะเป็นแรงที่เกิดขึ้นเมื่อวัตถุพยายามหรือเกิดการเคลื่อนที่ ในกรณีของล้อรถจะเกิดแรงเสียดทานที่ผิวล้อส่วนที่สัมผัสกับพื้น ซึ่งจะเกิดขึ้นในขณะที่ล้อรถเริ่มหมุนในกรณีนี้แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นเรียกว่า แรงเสียดทานสถิต โดยผลของแรงเสียดทานสถิตนี้ก็จะทำให้ล้อเกิดการคลิ้งขึ้น ถ้าหากไม่มีแรงเสียดทานก็จะทำให้ล้อไม่สามารถคลิ้งได้และจะหมุนอยู่กับที่แทนและในกรณีที่แรงที่ทำให้เกิดการหมุนหรืออาจเรียกว่าแรงลากจูงมีค่า

ไม่ต่ำกว่าครั้นใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากกว่าแรงเสียดทานก็จะทำให้ล้อหมุนอยู่กับที่เช่นกันหรือที่เรียกกันว่าอาการล้อฟรีในรถยนต์หรืออาการล้อคินในรถไฟ

### ปัจจัยที่มีผลต่อแรงเสียดทาน

1. สภาพพื้นผิววัตถุและพื้น
2. ชนิดของวัสดุ

โดยแรงเสียดทานสถิตสามารถคำนวณได้จาก

$$f = \mu_s N \quad (2.12)$$

โดยกำหนดให้

$f$  คือ แรงเสียดทาน ( $N$ )

$\mu_s$  คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต

$N$  คือ แรงปฏิกิริยาระหว่างพื้นกับล้อ ( $N$ )

### 2.3 แบตเตอรี่

เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วย เซลล์ไฟฟ้าเคมี หนึ่งเซลล์หรือมากกว่า ที่มีการเชื่อมต่อภายนอกเพื่อให้กำลังงานกับอุปกรณ์ไฟฟ้า แบตเตอรี่มี ขั้วบวก (อังกฤษ: anode) และ ขั้วลบ (อังกฤษ: cathode) เมื่อแบตเตอรี่เชื่อมต่อกับวงจรภายนอก สารอิเล็กโทรไลต์ มีความสามารถที่จะเคลื่อนที่โดยทำตัวเป็นไอออน ยอมให้ปฏิกิริยาทางเคมีทำงานแล้วเสร็จในขั้วไฟฟ้าที่อยู่ห่างกัน เป็นการส่งมอบพลังงานให้กับวงจรภายนอก

โดยแบตเตอรี่ที่เหมาะสมสำหรับใช้งานในรถไฟฟ้ามกที่สุด คือ แบตเตอรี่ลิเทียม แต่เนื่องจากแบตเตอรี่ประเภทนี้มีราคาที่สูง จึงเลือกแบตเตอรี่แบบ deep cycle แทน โดยแบตเตอรี่แบบ deep cycle เป็นแบตเตอรี่ที่มีการเพิ่มขนาดของแผ่นตะกั่วให้มีความหนาเพิ่มขึ้น และลดพื้นที่ผิวสัมผัสตะกั่วกับสารละลายลง จึงทำให้การชาร์จและคายการประจุใช้เวลานานกว่าแบตเตอรี่แบบตะกั่วกรดทั่วไปและมีอายุที่ยืนยาวกว่า แบตเตอรี่แบบตะกั่วกรดทั่วไป เหมาะสำหรับการจ่ายกระแสแบบต่อเนื่อง แต่ไม่สูงมาก เช่น การจ่ายไฟเพื่อขับมอเตอร์ไฟฟ้า

แม้ว่าประสิทธิภาพของแบตเตอรี่แบบ deep cycle จะดีกว่าแบตเตอรี่แบบลิเทียม แต่ก็มีราคาสูงกว่ามาก ประกอบกับงบประมาณในการทำโปรเจกต์นี้มีจำกัด จึงเลือกแบตเตอรี่แบบ deep cycle

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1 ขนาดแบตเตอรี่

กำหนดให้

$V$  คือ ความต่างศักย์ของแบตเตอรี่ (Voltage, V)

$I$  คือ กระแสไฟฟ้าสูงสุดที่แบตเตอรี่ต้องจ่าย (Amp, A)

ขนาดแบตเตอรี่ที่ใช้คำนวณได้จาก

$$P = VI \quad (2.13)$$

และจากสมการที่ (2.12) จะได้

$$I = \frac{P_m}{V} \quad (2.14)$$

## 2.4 มอเตอร์ไฟฟ้า

โดยปกติแล้วสเก็เตอร์จะมีการขับเคลื่อน 2 แบบใหญ่ๆ คือ การขับเคลื่อนด้วยแรงของมนุษย์โดยการใช้เท้าไถลพื้นเพื่อให้เกิดแรงส่งจนรถเคลื่อนที่ กับใช้มอเตอร์ไฟฟ้าส่งกำลังขับไปยังล้อเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ โดยประเภทของมอเตอร์ที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ 1. มอเตอร์แบบดุมล้อ (hub motor) 2. มอเตอร์แบบแกนหมุน (Brushless DC motor, BLDC motor) ซึ่งลักษณะการส่งกำลังและวิธีการติดตั้งก็มีความแตกต่างกัน ดังที่แสดงให้เห็นในรูปที่ 2-4 มอเตอร์แบบดุมล้อจะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าที่ตัวมอเตอร์อยู่ภายในล้อ (motor in wheel) ซึ่งล้อนั้นๆจะเป็นล้อส่งกำลัง โดยสามารถติดตั้งไว้ที่ล้อหน้าหรือล้อหลังก็ได้ อีกทั้งเนื่องจากมอเตอร์แบบดุมล้อนั้นไม่มีระบบเกียร์ ทำให้ง่ายต่อการติดตั้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้รูปที่ 2- 4 Hub motor ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนสเก็เตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ระบบส่งกำลังโดยมอเตอร์แบบแกนหมุนนั้น จะมีวิธีการติดตั้งที่ซับซ้อนกว่าของแบบคัมล้อ เนื่องจากต้องมีการติดตั้งระบบส่งกำลังเพราะว่าตัวมอเตอร์แบบแกนหมุนไม่สามารถส่งกำลังไปที่ล้อโดยตรงเหมือนแบบคัมล้อได้ จึงต้องอาศัยตัวถ่ายทอดกำลัง เช่น สายพานหรือโซ่ เป็นต้น ตามที่แสดงอยู่ในรูปที่ 2-5 เพื่อที่มอเตอร์จะสามารถส่งกำลังผ่านโซ่ไปยังล้อได้ โดยมอเตอร์ประเภทนี้นิยมติดเข้ากับล้อหลัง



รูปที่ 2- 5 Chain motor

โดยสามารถเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียระหว่างมอเตอร์แบบคัมล้อกับมอเตอร์แบบแกนหมุนได้ตามตารางที่ 2-2 ตารางที่ 2-2 ตารางเปรียบเทียบ hub motor กับ BLDC motor

ข้อเปรียบเทียบ	มอเตอร์คัมล้อ	มอเตอร์แกนหมุน
ราคา	แพงกว่า	ถูกกว่า
การติดตั้ง	ง่ายกว่า	มีความซับซ้อนกว่า
ลักษณะการใช้งาน	เหมาะกับทางราบเรียบหรือลาดชันเล็กน้อย	ใช้งานได้ดีทั้งทางราบเรียบไปจนถึงทางสูงชัน

## 2.5 การคำนวณหาขนาดของมอเตอร์ขับเคลื่อน

ในการเลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นส่วนส่งกำลังในการขับเคลื่อนตัวรถนั้น สิ่งที่จะต้องคำนึงถึง คือ

1. แรงบิดของมอเตอร์ จะต้องมีความเพียงพอที่จะเอาชนะภาระโหลดเพื่อทำให้ล้อหมุนได้
2. ความเร็วรอบของมอเตอร์ มีความเร็วรอบเพียงพอที่จะทำให้รถวิ่งตามความเร็วที่ออกแบบได้
3. กำลังของมอเตอร์ จะต้องมีความเพียงพอที่จะให้ทั้งแรงบิดและความเร็วรอบตามที่เราต้องการ

เพื่อมอเตอร์มีประสิทธิภาพในการใช้งานสูงสุดควรเลือกใช้มอเตอร์ที่มีขนาดเหมาะสมกับภาระโหลดที่มอเตอร์จะต้องขับเคลื่อน การเลือกมอเตอร์ขนาดใหญ่เกินไปจะทำให้สิ้นเปลืองโดยใช้เหตุและจะได้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ต่ำหรือการใช้มอเตอร์ที่มีขนาดเล็กกว่าภาระโหลดจนเกินไป จะทำให้เกิด Overloaded Motor ทำให้เกิดความร้อนสูงที่มอเตอร์ เนื่องจากมีการไหลของกระแสไฟฟ้าเข้าไปที่ขดลวดของมอเตอร์มากเกินไป ซึ่งอาจทำให้มอเตอร์เสียหายได้

ในการคำนวณขนาดของมอเตอร์ที่เหมาะสมกับภาระโหลดนั้น จะพิจารณาจากแรงขับที่ล้อต้องการจากมอเตอร์ในการทำให้รถเกิดการเคลื่อนที่ โดยแรงขับที่จะทำให้รถเคลื่อนที่จากจุดหยุดนิ่งได้นั้นจะต้องมีค่ามากกว่าแรงต้านการเคลื่อนที่ หรือหากต้องการให้รถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่แรงขับที่ล้อจะต้องมีค่าเท่ากับแรงต้านการเคลื่อนที่

กำหนดให้

$P_m$  คือ กำลังที่มอเตอร์ใช้ในการขับเคลื่อน ( $W$ )

$P_w$  คือ กำลังที่ล้อใช้ในการขับเคลื่อน ( $W$ )

$F$  คือ แรงที่ใช้ในการขับเคลื่อน ( $N$ )

$v$  คือ ความเร็วสูงสุดของรถ ( $m/s$ )

$a$  คือ ความเร่งสูงสุดของรถ ( $m/s^2$ )

$\eta_t$  คือ ประสิทธิภาพในการส่งกำลังจากมอเตอร์ไปยังล้อ (%)

$R_r$  คือ แรงต้านการหมุนของล้อ ( $N$ )

$R_a$  คือ แรงต้านจากอากาศ ( $N$ )

$R_g$  คือ แรงต้านจากน้ำหนักของรถขณะที่ยืนเนิน ( $N$ )

$R$  คือ แรงต้านการเคลื่อนที่รวม ( $N$ )

$T_w$  คือ แรงบิดที่ล้อต้องการในการขับเคลื่อน ( $N \cdot m$ )

$T_m$  คือ แรงบิดที่มอเตอร์ต้องทำในการขับเคลื่อน ( $N \cdot m$ )

$r$  คือ รัศมีล้อ ( $m$ )

หากรถวิ่งขึ้นเนิน จะได้แรงต้านรวมเป็น

$$R = R_r + R_a + R_g \quad (2.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ในกรณีที่รถวิ่งบนพื้นราบ แรงต้านรวมจะเป็น

$$R = R_r + R_a \quad (2.16)$$

ในกรณีที่รถมีความเร่ง จากกฎของนิวตัน  $\sum F = ma$  จะได้

$$\begin{aligned} F - R &= ma \\ F &= ma + R \end{aligned} \quad (2.17)$$

### 2.5.1 การคำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์

แรงบิดที่ล้อต้องการในการขับเคลื่อน จะเป็น

$$T_w = F \times r \quad (2.18)$$

และเนื่องจากการทดกำลัง แรงบิดที่มอเตอร์จะต้องทำ จะเป็น

$$T_m = \frac{100 \times T_w}{i \times \eta_t} \quad (2.19)$$

### 2.5.2 การคำนวณหาความเร็วรอบมอเตอร์

ความเร็วรอบมอเตอร์หาได้จาก

$$v = \frac{2\pi r \times N}{i}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N = \frac{v \times i}{2\pi r} \quad (2.20)$$

### 2.5.3 การหาค่ากำลังของมอเตอร์

จากนั้นจะสามารถหาค่ากำลังขับที่ล้อได้จากสมการ

$$P_w = F \times v \quad (2.21)$$

แต่เนื่องจากในการส่งกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้าไปยังล้อนั้นย่อมมีการสูญเสียกำลังเกิดขึ้น โดยจะสามารถส่งกำลังไปยังล้อได้มาก-น้อยเท่าใดนั้นขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของระบบส่งกำลังที่มอเตอร์ใช้ในการขับเคลื่อน

$$P_m = \frac{100 \times P_w}{\eta_r} \quad (2.22)$$

## 2.6 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์

มอเตอร์ทั่วไปเมื่อได้รับกระแสก็จะให้งานออกมา ในรูปของแรงบิดและความเร็วในการหมุน แต่แรงบิดและความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ที่ออกมาขึ้นอยู่กับปริมาณกระแสที่มอเตอร์ได้รับจากแหล่งจ่าย ยิ่งมอเตอร์ได้รับกระแสมากก็จะยิ่งหมุนเร็ว แต่ถ้าหากได้รับกระแสน้อยก็จะหมุนช้า ซึ่งโดยปกติแล้วแหล่งจ่ายจะจ่ายกระแสออกมาค่าใดค่าหนึ่งแบบคงที่ ทำให้มอเตอร์หมุนด้วยความเร็วคงที่ แต่ในงานบางอย่างอาจต้องการใช้งานมอเตอร์ที่หลายๆความเร็ว จึงต้องมีการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ขึ้น โดยมีหลากหลายวิธี แต่วิธีที่สะดวกและใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ วิธี PWM (Pulse Width Modulation, PWM)

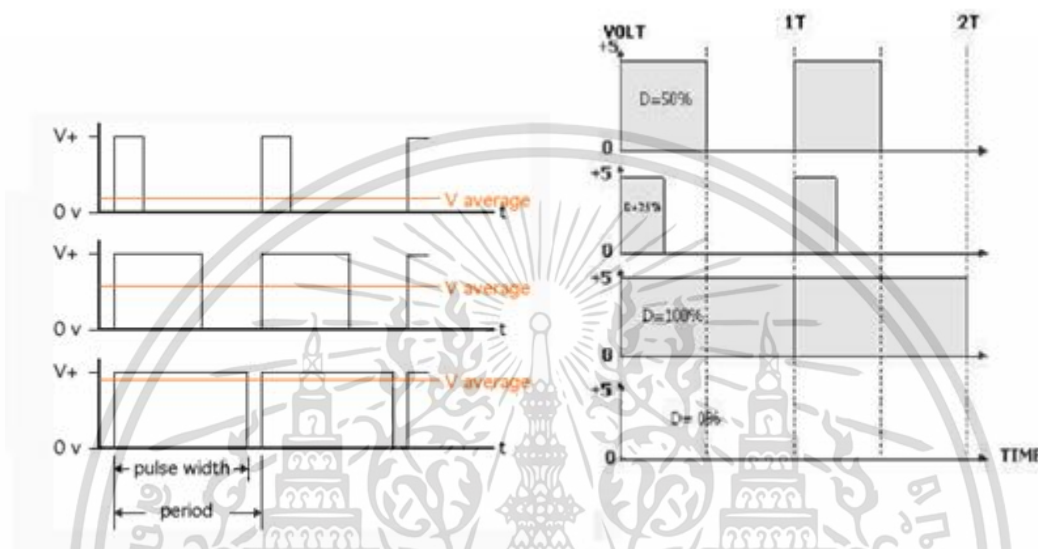
### 2.6.1 การควบคุมความเร็วมอเตอร์ด้วยวิธี PWM

มอเตอร์จะมีความเร็วมาก-น้อยขึ้นอยู่กับปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ได้รับจากแหล่งจ่าย ดังนั้นการควบคุมความเร็วของมอเตอร์จะต้องควบคุมพลังงานที่จ่ายให้กับมอเตอร์ ซึ่งโดยปกติแล้วทำได้โดยการลดความแรงดันไฟจากแหล่งจ่ายที่ส่งไปให้กับมอเตอร์ แต่การลดแรงดันไฟโดยตรงนั้นจะต้องใช้วงจรที่มีความซับซ้อน โดยทั่วไปจึงใช้เทคนิคที่เรียกว่า PWM(Pulse Width Modulation) ในการปรับแรงดันไฟ ซึ่งวิธีนี้จะไม่ได้ลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันไฟจากแหล่งจ่ายโดยตรง แต่จะใช้หลักการเปิด-ปิด มอเตอร์ด้วยความเร็วสูง จนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟเฉลี่ยแทนที่จะเปลี่ยนแปลงแรงดันโดยตรง ทำให้ใช้วงจรที่ไม่ยุ่งยากมากนัก

สำหรับวิธี PWM นี้หากแสดงการทำงานออกมาในรูปแบบของกราฟ จะมีลักษณะเป็นกราฟลูกคลื่นสี่เหลี่ยม โดยมีคาบสัญญาณสั้นๆ โดยหลักการสำคัญ คือ การปรับเปลี่ยนสัดส่วนความกว้างของช่วงที่มีการจ่ายไฟในแต่ละคาบการทำงาน



รูปที่ 2- 6 ความกว้างของช่วงpulseและค่า duty cycle ของช่วงpulseที่มีความถี่คงที่

โดยจากรูปที่ 2-6 จะเห็นได้ว่าใน 1 คาบของลูกคลื่นจะประกอบไปด้วยช่วงที่กราฟไม่มีความสูง คือช่วงที่ไม่มีการจ่ายพลังงาน (ปิดมอเตอร์) กับช่วงที่กราฟมีความสูง คือช่วงที่มีการจ่ายพลังงาน (เปิดมอเตอร์) ซึ่งความกว้างของช่วงนี้เรียกว่า pulse width หรือหากคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เทียบกับระยะเวลาใน 1 คาบ จะเรียกว่า duty cycle ซึ่งจากกราฟก็จะเห็นได้ว่าแรงดันไฟเฉลี่ยขึ้นอยู่กับค่า duty cycle หมายความว่าหาก duty cycle เท่า 100 % มอเตอร์จะทำงานเต็มที่ หาก duty cycle เท่ากับ 50 % มอเตอร์ก็จะทำงานได้ 50 %

## 2.6.2 อุปกรณ์ควบคุมความเร็วของมอเตอร์

1. motor controller เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ ตามหลักการของ PWM โดยการรับสัญญาณคำสั่งจากตัวคันเร่ง แล้วควบคุมกระแสที่แบตเตอรี่จ่ายให้กับมอเตอร์ให้สัมพันธ์กับสัญญาณที่ได้รับจากคันเร่ง



รูปที่ 2- 7 motor controller

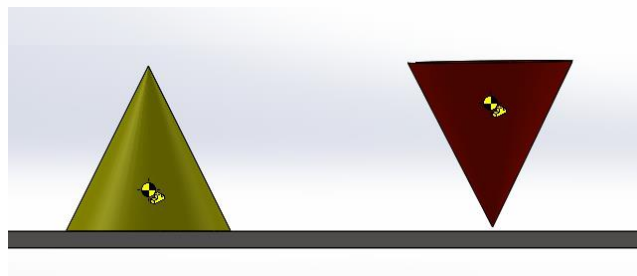
2. คั่นเร่ง เป็นอุปกรณ์ควบคุมความเร็วโดยรับคำสั่งจากผู้งานแล้วสัญญาณไฟฟ้าไปให้ motor controller เพื่อควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าของแบตเตอรี่ให้กับมอเตอร์ต่อไป



รูปที่ 2- 8 คั่นเร่งสกุต์เตอร์ไฟฟ้า

## 2.7 เสถียรภาพของรถ

วัตถุที่มีเสถียรภาพ(Stability)นั้นจะล้มยาก โดยปัจจัยที่จะทำให้วัตถุมีเสถียรภาพนั้นมีหลายอย่าง เช่น การที่วัตถุมีจุดศูนย์ถ่วงต่ำ(Center of gravity, CG) หรือวัตถุที่มีฐานกว้าง เนื่องจากการที่วัตถุล้มนั้นเกิดจากการที่จุดศูนย์ถ่วงเคลื่อนที่เลยฐานของวัตถุ ดังนั้นการที่วัตถุมีจุดศูนย์ถ่วงต่ำและฐานที่กว้าง จะทำให้จุดศูนย์ถ่วงออกนอกฐานได้ยากกว่าวัตถุที่มีฐานแคบและจุดศูนย์ถ่วงสูง



รูปที่ 2- 9 ด้านซ้ายกรวยที่มีฐานกว้าง ด้านขวา กรวยที่มีฐานแคบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังที่แสดงในภาพที่ 2-9 กรวยสีเหลืองด้านซ้ายจะมีเสถียรภาพมากกว่า กรวยสีแดงด้านขวา เนื่องจากมีพื้นที่ฐานมากกว่าและมีจุดศูนย์ถ่วงที่ต่ำ

### 2.7.1 การคำนวณหาจุดศูนย์ถ่วงของรูปทรงประกอบ

การคำนวณหาจุดศูนย์ถ่วงของรูปทรงประกอบ การคำนวณหาจุดศูนย์ถ่วงของรูปทรงประกอบ สามารถคำนวณได้โดยอาศัยทฤษฎีของโมเมนต์ โดยหากวัตถุ A ประกอบกับชิ้นส่วน B, C, D ที่มีจุดศูนย์ถ่วงที่พิกัด  $(x_A, y_A, z_A)$ ,  $(x_B, y_B, z_B)$ ,  $(x_C, y_C, z_C)$  และ  $(x_D, y_D, z_D)$  จะสามารถคำนวณหาจุดศูนย์ถ่วงของวัตถุ A ได้จาก

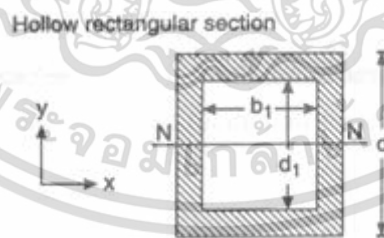
$$\bar{x}_A = \frac{M_B x_B + M_C x_C + M_D x_D}{M_B + M_C + M_D} \quad (2.23)$$

$$\bar{y}_A = \frac{M_B y_B + M_C y_C + M_D y_D}{M_B + M_C + M_D} \quad (2.24)$$

$$\bar{z}_A = \frac{M_B z_B + M_C z_C + M_D z_D}{M_B + M_C + M_D} \quad (2.25)$$

## 2.8 ความแข็งแรงของโครงสร้าง

เนื่องจากเหล็กรีดเย็นมีความแข็งแรงสูงเหมาะแก่การรับแรงและหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาด จึงเลือกใช้เหล็กกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัส (Carbon Steel Square Pipes) ที่มีหน้าตัดตามที่แสดงในรูปที่ 2-10 เป็นวัสดุในการสร้างโครงสร้าง โดยคุณสมบัติของเหล็กขึ้นรูปเย็น (Cold formed structural steel) แสดงตามตารางที่ 2-3



รูปที่ 2-10 หน้าตัดของโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่2- 3 ตารางแสดงคุณสมบัติเหล็กเกรดเย็น

รายการที่	สมบัติทางกล	เกณฑ์ที่กำหนด		
		ชั้นคุณภาพ		
		STKR290	STKR400	STKR490
1	ความต้านแรงดึง (เมกะพาสคาล) ไม่น้อยกว่า	290	400	490
2	ความเค้นคราก (เมกะพาสคาล) ไม่น้อยกว่า	-	245	325

และสามารถคำนวณหาค่าความเค้นที่เกิดจากผลของโมเมนต์ดัดที่เกิดในโครงรถ ได้จาก

$$\sigma_b = \frac{Mc}{I} \quad (2.26)$$

$$I = \frac{1}{12} (bd^3 - b_1d_1^3) \quad (2.27)$$

โดย  $\sigma_b$  คือ ค่า yield strength ของวัสดุ

$I$  คือ ค่า moment of inertia ของชิ้นงาน

## 2.9 การออกแบบเพลลา

เพลลาเป็นชิ้นส่วนที่มีใช้อยู่ในเครื่องจักรเกือบทุกชนิด ทำหน้าที่ในการส่งถ่ายกำลังหรือทำให้เกิดการหมุนระหว่างชิ้นส่วนต่างๆของเครื่อง ขณะใช้งานเพลลาจะอยู่ภายใต้ภาระการกระทำชนิดต่างๆ เช่น แรงกด แรงดึง โมเมนต์ดัด และโมเมนต์บิดซึ่งอาจมีทั้งแรงสถิตและแรงแบบวัฏจักร ทำให้เกิดการล้าได้เพลลาอาจมีชื่อเรียกแตกต่างกันตามลักษณะการใช้งาน

การคำนวณขนาดเพลลาที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน ในบางครั้งการหาขนาดเพลลาเพื่อให้เพลลาทนต่อแรงที่มากกระทำเพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอเนื่องจากเพลลามีการใช้งานที่แตกต่างกัน เช่น เพลาลูกเบี้ยว(cam shaft) ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน ต้องการให้มีตำแหน่งที่เที่ยงตรง ดังนั้นมุมบิดที่เกิดขึ้นในขณะที่ใช้งานจะต้องมีค่าไม่มากกว่าที่กำหนดไว้ เป็นต้น นั่นคือเพลลาจะต้องมีความแข็งแรงที่เพียงพอในการรับแรงบิดที่เกิดขึ้น ถ้ารับแรงบิดไม่เพียงพอจะทำให้เกิดความเสียหายขึ้นได้

โดยทั่วไปไม่มีมาตรฐานสำหรับมุมบิดของเพลลา แต่ในทางปฏิบัติมักจะใช้มุมบิดของเพลลาในเครื่องจักรกลทั่วไปไม่เกิน 0.3 ต่อความยาวของเพลลา 1 เมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแข็งแรงที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ ความแข็งแรงด้านระยะโก่ง เพราะจะใช้ระยะโก่งของเพลลาที่อยู่ภายใต้แรงภายนอก เป็นตัวสำคัญในการกำหนดระยะเบียด (clearance) ระหว่างล้อสายพาน, เฟืองโครงของเครื่องจักร ตลอดจนการเลือกชนิดของแบริ่งสำหรับรองรับเพลลาอย่างเหมาะสม ถ้าเพลลาที่มีระยะโก่งมากเกินไป จะทำให้ชิ้นส่วนต่างๆ ที่ต่อกับเพลลาเกิดความเสียหายได้

### 2.9.1 หลักพิจารณาในการออกแบบเพลลา

การคำนวณหาขนาดเพลลาที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน ดังนั้นมุมบิดของเพลลาที่เกิดขึ้นในขณะที่ใช้งานจะต้องมีค่าไม่มากกว่าที่กำหนด นั่นคือ เพลลาจะต้องมีความแข็งแรงอยู่ภายในพิสัยที่ต้องการ ถ้ามุมบิดมากไปยิ่งอาจก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนที่ผลให้เฟืองและแบริ่งที่รองรับเพลลาเกิดความเสียหายได้

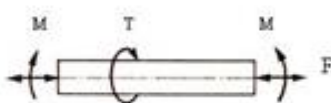
ตารางที่ 2- 4 แสดงขนาดระบุของเพลลาตามมาตรฐาน ISO / R 755 – 1969

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง เป็นมิลลิเมตร				
6	25	70	130	240
7	30	75	140	260
8	35	80	150	280
9	40	85	160	300
10	45	90	170	320
12	50	95	180	340
14	55	100	190	360
18	60	110	200	380
20	65	120	220	-

### 2.9.2 การออกแบบเพลลาตามโค้ดของ ASME

ก่อนปี พ.ศ. 2497 ได้มีการยอมรับวิธีการคำนวณหาขนาดของเพลลาซึ่งกำลังซึ่งกำหนดเป็นโค้ด (Code) โดยสมาคมวิศวกรเครื่องกลแห่งสหรัฐอเมริกา (ASME) วิธีการออกแบบเพลลาตามโค้ดของ ASME ยังความสะดวกและง่ายต่อการใช้งาน

วิธีการดังกล่าวนี้ใช้ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดและไม่พิจารณาถึงความล้าหรือความเค้นหนาแน่นที่เกิดขึ้นบนเพลลา ซึ่งเป็นการออกแบบโดยวิธีสถิตศาสตร์ (Static Design Method) ในการหาสมการสำหรับออกแบบเพลลาให้พิจารณาเพลลาในรูปที่ 2-8



รูปที่ 2- 11 แสดงเพลลาอยู่ภายใต้แรงต่าง ๆ  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเค้นดึงหรือความเค้นกด  $\sigma_a = \frac{4\alpha F}{\pi(d^2 - d_i^2)}$  (2.28)

ความเค้นดัด  $\sigma_b = \frac{32C_m M d}{\pi(d^4 - d_i^4)}$  (2.29)

ความเค้นเฉือน  $\tau_{xy} = \frac{16C_t T d}{\pi(d^4 - d_i^4)}$  (2.30)

ความเค้นกดหรือความเค้นดึงรวมคือ  $\sigma = \sigma_a + \sigma_b$  (2.31)

ในการออกแบบขนาดของเพลลาสำหรับงานปกติทั่วไป จะพิจารณาเฉพาะกำลังงานภาระ และ คำนวณความเค้นที่เกิดขึ้นกับเพลลา เพื่อให้ได้ค่าความปลอดภัยเพียงพอ จึงพิจารณาถึงความแกร่ง และ ความเร็ววิกฤติ เพลลาส่วนมากจะอยู่ภายใต้ความเค้นที่วัฏจักร

ในการคำนวณเพลลาจะใช้สูตรในการคำนวณคือ

$$\tau_{\max} = S_y / 2n = 16 / \pi D^3 [(C_m \cdot M)^2 + (C_t \cdot T)^2]^{1/2} \quad (2.32)$$

กำหนดให้

$\tau_{\max}$	คือ	ความเค้นเฉือนสูงสุด (MPa)
$S_y$	คือ	Yield strength (MPa)
$n$	คือ	ค่าความปลอดภัย
$C_m$	คือ	ตัวประกอบจากการล้าเนื่องจากการดัด
$C_t$	คือ	ตัวประกอบจากการล้าเนื่องจากการบิด
$M$	คือ	โมเมนต์ดัด
$T$	คือ	โมเมนต์ดัด (N)

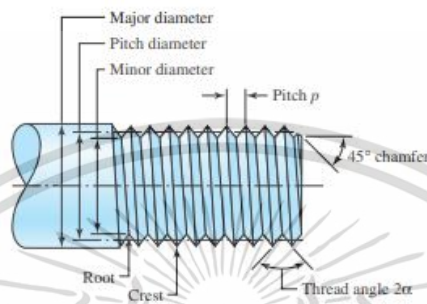
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.10 การคำนวณส่วนยึดเหนี่ยว

เกลียว(Thread) หมายถึง สันหรือร่องที่เกิดขึ้นบนผิวงานวนไปรอบๆจะซ้ายหรือขวาก็ได้ด้วย ระยะทางสม่ำเสมอ

### 2.10.1 มาตรฐานและคำจำกัดความของเกลียว

คำอธิบายของสกรูเกลียวซึ่งแสดงในรูปที่ 2-10 อธิบายไว้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2- 12 คำศัพท์เกี่ยวกับเกลียว

Pitch คือ ระยะห่างระหว่างเกลียวที่อยู่ติดกันในรูปแบบขนานกับแกนเกลียว

Major diameter คือ เส้นผ่าศูนย์กลางที่ใหญ่ที่สุดของสกรูเกลียว

Minor diameter คือ เส้นผ่าศูนย์กลางที่เล็กที่สุดของสกรูเกลียว

Pitch diameter คือ เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางทางทฤษฎีระหว่างขนาดใหญ่และขนาดเล็ก

Thread angle คือ มุมรวมยอดเกลียว

Crest คือ ยอดฟันเกลียว

Root คือ โคนเกลียว

มาตรฐานเกลียวแบ่งได้ 2 มาตรฐาน คือ เกลียวเมตริก(Metric thread) และเกลียวยูนิไฟล์(Unified thread)

#### มาตรฐานเกลียวยูนิไฟล์

การระบุเกลียวยูนิไฟล์ทำได้โดย

1. Nominal major diameter
2. จำนวนเกลียวต่อความยาว 1 นิ้ว
3. ชนิดเกลียว (Thread series)

#### มาตรฐานเกลียวเมตริก

การระบุเกลียวเมตริกทำได้โดย

1. บ่งบอกว่าเป็นเกลียวเมตริก
2. Major diameter
3. ระยะPitch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.10.2 Bolt Strength

ในการกำหนดมาตรฐานสำหรับสลักเกลียว ถูกกำหนดความแข็งแรงโดย SAE หรือ ASTM โดยการบอกปริมาณขั้นต่ำ เช่น minimum proof strength หรือ minimum proof load และ minimum tensile strength

Proof load คือ ภาระโหลดสูงสุด ( $F$ ) ที่ Bolt สามารถรับได้โดยไม่เกิดความเสียหาย

proof strength คือ ผลหารระหว่าง proof load และพื้นที่ความเค้นแรงดึง

จากตาราง 2-5, 2-6 และ 2-7 ให้ข้อมูล จำเพาะความแข็งแรงขั้นต่ำสำหรับสลักเกลียวเหล็ก The values of the mean proof strength, the mean tensile strength ค่าเหล่านี้ไม่ได้ถูกระบุในตาราง แต่ผู้ออกแบบสามารถนำไปทดลองได้ในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 2- 5 ตาราง SAE Specifications for Steel Bolts

SAE Grade No.	Size Range, in	Minimum Proof Strength,* kpsi	Minimum Tensile Strength,* kpsi	Minimum Yield Strength,* kpsi	Material	Head Marking
1	$\frac{1}{4}$ -1 $\frac{1}{2}$	33	60	36	Low or medium carbon	
2	$\frac{1}{4}$ -1 $\frac{1}{2}$	55	74	57	Low or medium carbon	
		33	60	36		
4	$\frac{1}{4}$ -1 $\frac{1}{2}$	65	115	100	Medium carbon, cold-drawn	
5	$\frac{1}{4}$ -1 $\frac{1}{2}$	85	120	92	Medium carbon, Q&T	
		74	105	81		
5.2	$\frac{1}{4}$ -1	85	120	92	Low-carbon martensite, Q&T	
7	$\frac{1}{4}$ -1 $\frac{1}{2}$	105	133	115	Medium-carbon alloy, Q&T	
8	$\frac{1}{4}$ -1 $\frac{1}{2}$	120	150	130	Medium-carbon alloy, Q&T	
8.2	$\frac{1}{4}$ -1	120	150	130	Low-carbon martensite, Q&T	

ข้อมูลจำเพาะของ SAE ในตารางที่ 2-4 การจัดลำดับ (grade) ของน็อตจะถูกกำหนดหมายเลข ตามความต้านทานแรงดึงโดยใช้ทศนิยม สำหรับการแปรผันที่ระดับความแข็งแรงเท่ากัน สลักเกลียวและสกรูใช้ได้ในทุกลำดับที่ระบุไว้ สัตตมิให้เลือกในเกรด 1, 2, 4, 5, 8 และ 8.1 แต่ในตารางนี้ไม่มีเกรด 8.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2- 6 ASTM Specifications for Steel Bolts

ASTM Designation No.	Size Range, Inclusive, in	Minimum Proof Strength,* kpsi	Minimum Tensile Strength,* kpsi	Minimum Yield Strength,* kpsi	Material	Head Marking
A307	$\frac{1}{2}$ -1 $\frac{1}{2}$	33	60	36	Low carbon	
A325, type 1	$\frac{1}{2}$ -1	85	120	92	Medium carbon, Q&T	
	$1\frac{1}{4}$ -1 $\frac{1}{2}$	74	105	81		
A325, type 2	$\frac{1}{2}$ -1	85	120	92	Low-carbon, martensitic, Q&T	
	$1\frac{1}{4}$ -1 $\frac{1}{2}$	74	105	81		
A325, type 3	$\frac{1}{2}$ -1	85	120	92	Weathering steel, Q&T	
	$1\frac{1}{4}$ -1 $\frac{1}{2}$	74	105	81		
A354, grade BC	$\frac{1}{2}$ -2 $\frac{1}{2}$	105	125	109	Alloy steel, Q&T	
	2 $\frac{3}{4}$ -4	95	115	99		
A354, grade BD	$\frac{1}{2}$ -4	120	150	130	Alloy steel, Q&T	
A449	$\frac{1}{2}$ -1	85	120	92	Medium carbon, Q&T	
	$1\frac{1}{4}$ -1 $\frac{1}{2}$	74	105	81		
	$1\frac{1}{2}$ -3	55	90	58		
A490, type 1	$\frac{1}{2}$ -1 $\frac{1}{2}$	120	150	130	Alloy steel, Q&T	
A490, type 3	$\frac{1}{2}$ -1 $\frac{1}{2}$	120	150	130	Weathering steel, Q&T	

ข้อมูลจำเพาะของ ASTM ในตารางที่ 2-5 เกือบจะ สั้นกว่า SAE เพราะว่าเกี่ยวกับ โครงสร้างเป็นส่วนใหญ่ ; โดยปกติแล้วการต่อกันของโครงสร้างจะได้รับแรงเหวี่ยงจึงได้ทำเกลียวให้สั้นลงเพื่อให้ได้พื้นที่ที่เป็นส่วนที่ไม่ใช่เกลียว(shank) มากขึ้น

ตารางที่ 2- 7 Metric Mechanical-Property Classes for Steel Bolts, Screws, and Studs

Property Class	Size Range, Inclusive	Minimum Proof Strength,* MPa	Minimum Tensile Strength,* MPa	Minimum Yield Strength,* MPa	Material	Head Marking
4.6	M5-M36	225	400	240	Low or medium carbon	
4.8	M1.6-M16	310	420	340	Low or medium carbon	
5.8	M5-M24	380	520	420	Low or medium carbon	
8.8	M16-M36	600	830	660	Medium carbon, Q&T	
9.8	M1.6-M16	650	900	720	Medium carbon, Q&T	
10.9	M5-M36	830	1040	940	Low-carbon martensitic, Q&T	
12.9	M1.6-M36	970	1220	1100	Alloy, Q&T	

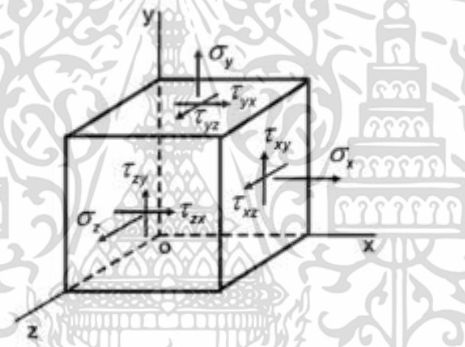
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.11 ทฤษฎีความเสียหาย

### 2.11.1 เกณฑ์ความเสียหาย (failure criterion)

ภายใต้ภาระที่มากกว่าแบบผสม วิศวกรได้กำหนดขีดจำกัดของภาระเพื่อเป็นเกณฑ์ในการพิจารณาการทำงานของชิ้นส่วนเครื่องจักรให้ตอบสนองเป้าหมายทางวิศวกรรมและความปลอดภัย โดยเรียกว่า เกณฑ์ความเสียหาย (failure criterion) แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ เกณฑ์การคราก (yield criterion) และเกณฑ์การแตกหัก (fracture criterion) โดยค่าตัวแทนของความเค้นจะถูกคำนวณจากภาระผสม และนำมาเปรียบเทียบความเค้นครากหรือความเค้นดึงสูงสุดของวัสดุ

วัสดุเหนียวมีการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบถาวรก่อนเกิดความเสียหายสุดท้ายสูง ส่งผลให้เกิดความครากมีขนาดต่ำกว่าความเค้นดึงสูงสุด ดังนั้นความครากจึงถูกนำมาเป็นเกณฑ์เปรียบเทียบกับความเค้นสูงสุด หรือ เกณฑ์การคราก



รูปที่ 2-13 รูปความเค้น 3 มิติ

ความเค้นหลักในกรณีความเค้นในสามมิติ ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) สามารถหาได้จากรากทั้งสามของสมการ

$$\sigma^3 - A\sigma^2 + B\sigma - C = 0 \quad (2.33)$$

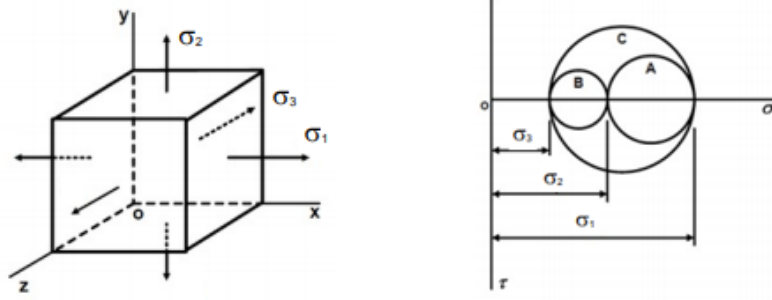
โดยค่าคงที่ของความเค้น (A,B,C)

$$A = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

$$B = \sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_x\sigma_z - \tau_{xy}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{yz}^2$$

$$C = \sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{xy}\tau_{xz}\tau_{yz} - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{xz}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2- 14 ความเค้นตั้งฉากตามแนวแกนใน 3 มิติ

ความเค้นเฉือนสูงสุดคำนวณจากความเค้นหลัก

$$(\tau_{\max})_3 = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \tag{2.34}$$

$$(\tau_{\max})_2 = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \tag{2.35}$$

$$(\tau_{\max})_1 = \pm \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \tag{2.36}$$

ค่าที่มากที่สุดของทั้ง 3 ค่านี้ คือ ความเค้นเฉือนสัมบูรณ์

2.11.2 ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด (maximum shear stress yield criteria)

ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุด ทำนายว่า การครากจะเริ่มเกิดเมื่อ ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดของจุดใดๆ เท่ากับหรือมากกว่า ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่ได้จาก Tension-test specimen ของวัสดุชนิดเดียวกับวัสดุที่กำลังพิจารณา โดยอาจเรียกว่า Tresca หรือ Guest theory



รูปที่ 2- 15 (ก) State of stress ของจุดใดๆ (ข) การทดสอบ Tension-test

สมการ Yield คือ  $\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \geq \frac{S_y}{2}$  หรือ  $\sigma_1 - \sigma_3 \geq S_y$  และจะได้  $S_{sy} = 0.5S_y$  (2.37)

กรณีที่มี S.F. คือ  $\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \geq \frac{S_y}{n}$  หรือ  $\sigma_1 - \sigma_3 \geq S_y / n$  (2.38)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.12 การวิเคราะห์ชิ้นส่วนด้วยหลักการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ในการ simulation นี้ใช้หลักการทางไฟไนต์เอลิเมนต์(Finite Element Method, FEM) ในการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ โดยมีหลักการคือการสมมติว่าชิ้นงานขนาดใหญ่นั้นเกิดมาจากการประกอบเอลิเมนต์ที่มีรูปร่างทางเรขาคณิตขนาดเล็กหลายๆ เอลิเมนต์เข้าด้วยกันจนได้เป็นชิ้นงานขึ้นมา โดยแต่ละเอลิเมนต์จะถูกโปรแกรมจะวิเคราะห์แล้วนำผลลัพธ์มารวมกันเพื่อทำนายพฤติกรรมของวัสดุ[4] สำหรับการวิเคราะห์ความแข็งแรงของแต่ละชิ้นส่วนของตัวรถนั้น ใช้การวิเคราะห์แบบ static โดยการตัดสินใจว่าชิ้นส่วนจะรับน้ำหนักได้หรือไม่ ต้องดูจากค่า Stress สูงสุดที่เกิดขึ้นโดยต้องมีค่าน้อยกว่า Yield Stress ของวัสดุ ชิ้นงานจึงจะรับภาระแรงได้อย่างปลอดภัย

### 2.12.1 หลักการสร้างแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

1. ถ้าแบบจำลองประกอบด้วยชิ้นส่วนประกอบหลายชิ้น ควรเลือกแต่ชิ้นส่วนที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ ปัญหา โดยละทิ้งส่วนที่ไม่จำเป็นออกไป ซึ่งจะช่วยให้ขนาดของปัญหาลดลง และลดระยะเวลาในการคำนวณได้ รวมถึงการกำหนดจุดยึด (support) และภาระกระทำ (loading) ต่างๆ ให้เหมาะสมกับสภาพจำลอง
2. การตรวจสอบคุณภาพของแบบจำลอง 3 มิติ ถ้าพบจุดบกพร่องของแบบจำลอง เช่น ผิวของแบบจำลองทับซ้อนกัน ความไม่ต่อเนื่องของผิว เป็นต้น ก็ควรแก้ไขจุดบกพร่องเหล่านั้นให้เรียบร้อยก่อน ถ้าแบบจำลองมีรายละเอียดมากเกินไป เช่น ขอบ รู หรือช่องเล็กๆ บางครั้งก็สามารถละทิ้งได้ หากรายละเอียดเหล่านั้นไม่ได้มีส่วนเกี่ยวข้องหรือผลกระทบกับการวิเคราะห์ปัญหา

## 2.13 ระบบเบรก (Braking System)

เบรก คือ ส่วนหนึ่งที่ทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ของยานพาหนะลดลงหรือหยุดตามความต้องการ ซึ่งระบบเบรกคือส่วนหนึ่งที่ทำหน้าที่ในการควบคุมความเร็วของยานพาหนะ ความปลอดภัยในการควบคุมการขับขี่จึงขึ้นอยู่กับระบบเบรกเป็นสำคัญ โดยมีเบรกประเภทต่างๆดังนี้

- 1.1 Disc brake
- 2.1 Drum brake
- 3.1 ABS
- 4.1 เบรกก้ามปู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.13.1 Disc brake

ทำงานโดยดันผ้าเบรกให้สัมผัสกับจานเบรกทำให้รถหยุด ซึ่งข้อดีอยู่ที่การถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าดรัมเบรก รวมไปถึงการไล่น้ำออกจากระบบเบรกก็ทำได้ดีกว่าดรัมเบรก อีกด้วย ข้อเสียของดิสเบรก มีราคาแพงกว่า อีกทั้งไม่มี ระบบมัลติเพลย์อิ่ง แอ็กชั่น เหมือนกับดรัมเบรก ทำให้ผู้ขับต้องออกแรงมากในการเหยียบเบรก แต่ตามหลักการใช้งานจริง เราจะรู้สึกว่า ดิสเบรก ออกแรงน้อยกว่านั้น เป็นเพราะว่า มีระบบช่วยผ่อนกำลังต่างๆ เช่นหม้อลมเบรก ซึ่งใน ดรัมเบรก ไม่มี เป็นต้น



รูปที่ 2- 16 Disc brake

ดิสเบรก แบ่งออกเป็น 2 ระบบคือ เบรกที่ส่งกำลังเชิงกล และเบรกที่ส่งกำลังแบบไฮดรอลิก ลักษณะของเบรกทั้ง 2 แบบ แบ่งได้ตามตารางที่ 2-8

ตารางที่2- 8 แสดงลักษณะของเบรกเชิงกลและไฮดรอลิก

ลักษณะ	เบรกเชิงกล	เบรกไฮดรอลิก
ตัวส่งกำลัง	สายสลิง	ของไหล
น้ำหนัก	หนัก	เบา
ประสิทธิภาพเบรก	ตอบสนองในการเบรกช้ากว่า	ตอบสนองในการเบรกเร็วกว่า
การปรับ	ง่าย	ยาก
การบำรุงรักษา	บ่อย	-
ราคา	ถูก	ถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.13.2 Drum Brake

ดรัมเบรก จะติดตั้งในแบบที่ติดแน่นกับลูกล้อ เบรกจะทำงานเมื่อมีการถ่วงก้ามเบรกให้เสียดสีกับตัวเบรก ดรัมเบรกใช้มากในรถบรรทุก รวมทั้งรถยนต์ส่วนบุคคลบางรุ่น รถบางรุ่นอาจใช้ระบบนี้เฉพาะล้อหลัง ซึ่งข้อดีของมันคือ หยุดรถได้เร็ว เพราะก้ามเบรกและดรัมเบรกถูกยึดติดกับดุมล้อ

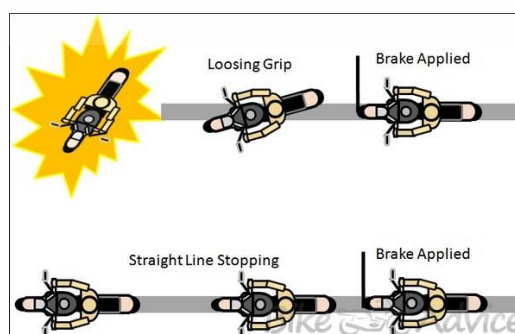
แต่ข้อเสียของมันก็มีเช่นกัน คือ ผ้าเบรกในดรัมเบรคนั้นถ่ายเทความร้อนได้ยาก ในบางครั้งผ้าเบรกมีอุณหภูมิสูงมาก มีผลทำให้ประสิทธิภาพการเบรกด้อยลง



รูปที่ 2- 17 Drum brake

### 2.13.3 เบรกป้องกันล้อล็อก (ABS)

ระบบเบรก ABS ย่อมาจาก Anti-Lock Brake System หรือระบบป้องกันการเบรกจนล้อล็อกตาย ซึ่งเกิดมาจากการแก้ไขปัญหาการเบรกครถแล้วเกิดการลื่นไถล ระบบ ABS จะประกอบด้วยฟีนเฟืองวงแหวนที่ติดตั้งอยู่กับเพลาหมุน และจะมีเซนเซอร์ติดตั้งอยู่ใกล้กับฟีนเฟือง เมื่อล้อรถเริ่มหมุนฟีนเฟืองจะหมุนตาม แล้วเซนเซอร์ก็จะทำการตรวจจับอัตราการหมุนของฟีนเฟือง แล้วรายงานอัตราความเร็วดังกล่าว ไปให้ระบบ ABS ซึ่งโดยปกติทั่วไปทุกล้อจะมีเซนเซอร์เพื่อตรวจสอบความเร็วติดอยู่ทุกล้อ โดย ABS จะสั่งการผ่านเซนเซอร์ตัวนี้ เพื่อให้ชุดปั๊มเบรกทำงาน โดยจะมีการจับและปล่อยระหว่างจานเบรกกับผ้าเบรกที่ 16-50 ครั้ง/วินาที เพราะการที่จับกันเร็วอย่างนี้จะทำให้ผู้ขับสามารถควบคุมทิศทางของรถได้ในขณะที่เหยียบเบรกกระทันหันเพื่อหลบสิ่งกีดขวาง หรืออุบัติเหตุ หรือเบรกในระยะที่สั้นกว่าปกติ



รูปที่ 2- 18 Anti-Lock Brake System

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.13.4 เบรคก้ามปู (Side-pull caliper brakes)

การหยุดรถโดยใช้ผ้าเบรคไปโดนกับขอบล้อ เป็นเบรคที่มีน้ำหนักเบาที่สุด ขนาดเล็ก นิยมมากในจักรยานเสือหมอบ การดูแลรักษาง่าย ส่วนมากใช้กับรถจักรยาน



รูปที่ 2- 19 เบรคก้ามปู

#### 2.13.5 เบรคในสกุตเตอร์

โดยทั่วไปแล้วเบรคในสกุตเตอร์มีด้วยกัน 2 แบบ คือ เบรคโดยใช้มือ และเบรคโดยใช้เท้า ดังภาพ

1. เบรคโดยใช้เท้าเหยียบ วิธีการใช้งาน โดยใช้เท้าเหยียบแป้นให้สัมผัสกับล้อ เพื่อจะลดความเร็วของล้อและทำให้ล้อหยุดในที่สุด



รูปที่ 2- 20 เบรคเท้าสกุตเตอร์

2. เบรคโดยใช้มือ วิธีการใช้งาน โดยใช้แรงจากมือกดไปที่ก้านเบรค โดยก้านเบรคจะต่อกับสายสลิงที่ต่อกับผ้าเบรค เพื่อส่งกำลังจากก้านเบรคไปที่ผ้าเบรค ซึ่งเวลากดเวลาถก้านเบรค ผ้าเบรคจะเคลื่อนที่ไปสัมผัสกับดิสก์เบรค ทำให้ความเร็วลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2- 21 เบรกมือในสกูตเตอร์

### 2.13.6 การคำนวณแรงเบรกสูงสุดที่ใช้ในการเบรก

$$F_{b\max} = F_r + F_f$$

$$= \mu(N_r + N_f) \quad (2.39)$$

เมื่อ	$N_r$	คือ	แรงปฏิกิริยาที่ล้อหน้าในขณะที่เบรก มีหน่วยเป็น N
	$N_f$	คือ	แรงปฏิกิริยาที่ล้อหลังในขณะที่เบรก มีหน่วยเป็น N
	$\mu$	คือ	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างยางกับบราจรถไฟ
	$F_f$	คือ	แรงเบรกสูงสุดที่ล้อหน้า
	$F_r$	คือ	แรงเบรกสูงสุดที่ล้อหลัง
	$F_{b\max}$	คือ	แรงสูงสุดที่ใช้ในการเบรก

กำลังที่ใช้ในการเบรก

$$P_b = F_b v \quad (2.40)$$

เมื่อ	$P_b$	คือ	กำลังเบรก มีหน่วยเป็น W
	$F_b$	คือ	แรงเบรก มีหน่วยเป็น N
	$v$	คือ	อัตราเร็วใดๆในขณะที่เบรก มีหน่วยเป็น m/s

### 2.13.7 แรงและการเคลื่อนที่

1) อัตราเร็ว ความเร่ง และความหน่วงในการเคลื่อนที่ของวัตถุ

1. อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุ คือ ระยะทางที่วัตถุเคลื่อนที่ใน 1 หน่วยเวลา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ความเร่งในการเคลื่อนที่ หมายถึง ความเร็วเพิ่มขึ้นใน 1 หน่วยเวลา
3. ความหน่วงในการเคลื่อนที่ของวัตถุ หมายถึง ความเร็วที่ตกลงใน 1 หน่วยเวลา

2) สูตรที่ใช้

$$s = \frac{u_1^2 - u_2^2}{2a_b} \quad (2.41)$$

เมื่อ	$u_1$	คือ	ความเร็วเมื่อเริ่มต้น
	$u_2$	คือ	ความเร็วตอนปลาย
	$a_b$	คือ	ขนาดของความเร่ง
	$s$	คือ	ระยะทางในการเคลื่อนที่

จากกฎการเคลื่อนที่ข้อสองของนิวตัน จะได้สมการ  $\Sigma F = ma$

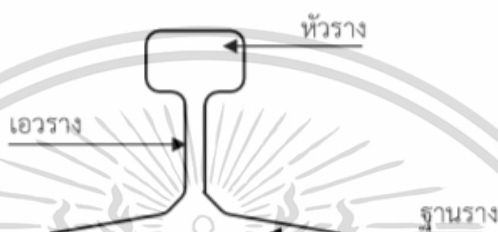
$$a_b = \frac{F_{b\max}}{m} \quad (2.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.14 รางรถไฟ

รูปแบบของรางรถไฟมีหน้าตัดคล้ายกับเหล็กรูปพรรณตัวไอ (I) ซึ่งเป็นรูปแบบที่ได้รับการยอมรับการใช้งานด้าน เทคนิคและเป็นหน้าตัดรางที่ประหยัด (Economic) ให้ความแข็งแรง (Stiffness) และมีความคงทนต่อการใช้งาน (Durability)

รางรถไฟจะทำได้ด้วยเหล็กเหนียวรีดร้อนมีรูปร่าง ซึ่งจะประกอบด้วยส่วนที่สำคัญคือ หัวราง (Head) เอวราง (Web) และฐานราง (Foot) ดังรูปที่ 2-18



รูปที่ 2 - 22 ส่วนประกอบของราง

### 2.14.1 ขนาดของราง

ขนาดรางที่ใช้งานจะกำหนดเป็นน้ำหนักของรางต่อความยาว เช่น ระบบเมตริกที่ใช้ในมาตรฐาน UIC กำหนดเป็นกิโลกรัมต่อเมตร ระบบมาตรฐานอังกฤษ (BS) กำหนดเป็นปอนด์ต่อหลา ขนาดน้ำหนักของหน้าตัดรางที่แตกต่างกัน จะให้คุณสมบัติความแข็งแรงในการรับน้ำหนักได้ไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องออกแบบคำนวณหาขนาดของรางที่เหมาะสมเพื่อนำมาใช้งานได้ตามมาตรฐานที่กำหนด

การรถไฟแห่งประเทศไทย กำหนดขนาดรางใช้กับทางประธาน ให้รับน้ำหนักเพลา 20 ตัน ความเร็ว 120 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ใช้ขนาดราง 100 ปอนด์ หน้าตัดตามมาตรฐานอังกฤษ (BS) คุณสมบัติของเนื้อวัสดุรางตามมาตรฐาน UIC 860 Grade 900 A



รูปที่ 2- 23 (จากซ้ายไปขวา) รางขนาด 100, 80, 70 และ 50 ปอนด์ต่อหลา

### 2.14.2 มาตรฐานหน้าตัดราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปร่างของหน้าตัดราง (Profile) จะแตกต่างกันตามมาตรฐานที่การรถไฟในแต่ละประเทศใช้งาน เช่น

AREA, AREMA มาตรฐานของอเมริกา

BS มาตรฐานของอังกฤษ

EN มาตรฐานของยุโรป

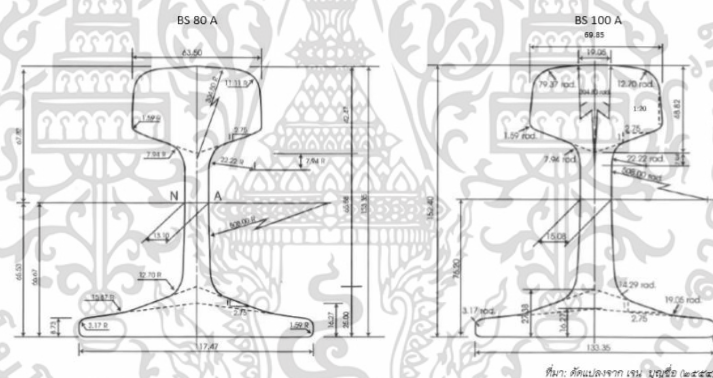
GB, TB มาตรฐานของจีน

JIS มาตรฐานของญี่ปุ่น

RSR, SRT มาตรฐานของการรถไฟแห่งประเทศไทย

UIC มาตรฐานของ International Union of Railways

ปัจจุบันการรถไฟฯ ใช้รางหน้าตัดตามมาตรฐานของอังกฤษ (BS) เป็นหลักสำหรับรถไฟธรรมดา และใช้รางหน้าตัดตามมาตรฐาน UIC และ EN สำหรับรถไฟฟ้า



รูปที่ 2- 24 หน้าตัดราง BS 80 A และ 100 A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การออกแบบและการคำนวณ

#### 3.1 การคำนวณแรงที่กระทำต่อล้อ

เนื่องจากมีวัตถุประสงค์ในการออกแบบให้รถสามารถวิ่งได้ทั้งบนรางจึงออกแบบให้รถมีล้อด้านข้าง ลักษณะคล้ายรถพ่วงชาเล้ง ตามที่แสดงในรูปที่ 3-1 และ 3-2 ในการคำนวณแรงที่กระทำต่อล้อเพื่อนำไปคำนวณขนาดของเพลลาหรือส่วนประกอบอื่นๆของรถนั้น จะพิจารณาตอนที่ล้อมีแรงกระทำสูงที่สุดเพื่อที่ขนาดของเพลลาที่คำนวณออกมาจะสามารถรองรับการใช้งานทั้ง 2 กรณีได้อย่างปลอดภัย โดยกำหนดให้น้ำหนักสูงสุดที่รถจะรับได้คือ 105 กิโลกรัม และรถมีน้ำหนักประมาณ 15 กิโลกรัม



รูปที่ 3- 1 แสดงภาพด้านข้างของรถ

รูปที่ 3- 2 แสดงภาพIsometricและจุดC.G.ของรถ

จากรูปที่ 3-1 กำหนด

$m$  = มวลรวมของตัวรถกับผู้โดยสาร

$g$  = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก,  $9.81m/s^2$

$N_f$  = แรงปฏิกิริยาที่รางกระทำต่อล้อหลักด้านหน้า

$N_r$  = แรงปฏิกิริยาที่รางกระทำต่อล้อหลักด้านหลัง

$L$  = ระยะจากจุดศูนย์กลางล้อหน้าถึงจุดศูนย์กลางล้อหลัง

$a$  = ระยะจากจุดศูนย์กลางมวลของตัวรถถึงล้อหน้า

$b$  = ระยะจากจุดศูนย์กลางมวลของตัวรถถึงล้อหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$c$  = ระยะจากล้อเสริมด้านข้างถึงแนวตัวรถ

$d$  = ระยะจากจุดศูนย์กลางมวลรถถึงแนวตัวรถ

$h$  = ความสูงของจุดศูนย์กลางมวลรถเทียบกับพิวราจ

$\mu_1$  = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างล้อหลักกับราง

$\mu_2$  = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างล้อเสริมกับราง

โดยออกแบบให้รถรับน้ำหนักสูงสุดได้ 120 กิโลกรัม (แบ่งเป็นน้ำหนักตัวรถประมาณ 15 กิโลกรัม รวมกับ น้ำหนักผู้โดยสารไม่เกิน 105 กิโลกรัม)

$$\therefore mg = 120 \times 9.81$$

$$mg = 1177.2N$$

และจากรูปที่ 3-5 จะได้

$$L = 600mm$$

$$a = 235.85mm$$

$$b = 364.5mm$$

$$c = 1030.91mm$$

$$d = 286.40mm$$

$$h = 45.39mm$$

พิจารณารูปที่ 3-5 จากกฎของนิวตันข้อที่ 1  $\sum F = 0$  ดังนั้นพิจารณาแรงในแนวตั้งได้

$$N_f + N_r + N_s = mg$$

$$N_r = mg - N_f - N_s \quad (3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้น take moment ตามแนว x-x จะได้

$$mgd = N_s c$$

$$N_s = \frac{Mgd}{c} \quad (3.2)$$

จากนั้น take moment ที่จุด C.G. จะได้

$$N_f(L-b) = N_r b + \mu_1 N_f h + \mu_1 N_r h + \mu_2 N_s h$$

แทนค่าจาก (3.1) และ (3.2) จากนั้นจัดรูป จะได้

$$N_f = \frac{N_s(c-d)(\mu_1 h + b)}{Ld} + \frac{\mu_2 N_s h}{L} \quad (3.3)$$

แทนค่า  $L, a, b, c, d, h$  ลงในสมการ (3.1), (3.2), (3.3) จะได้

$$N_f = 408.381N$$

$$N_r = 421.075N$$

$$N_s = 347.744N$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 อุปกรณ์และการติดตั้ง

### 3.2.1 การติดตั้งระบบเบรก

ระบบเบรกประกอบด้วย

1. มือเบรก : อลูมิเนียม
2. จานดิสก์เบรก : ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 160 mm. จำนวน 2 จาน
3. ก้านปุมเบรก : อลูมิเนียม
4. สายเบรก : แบบไฮดรอลิก

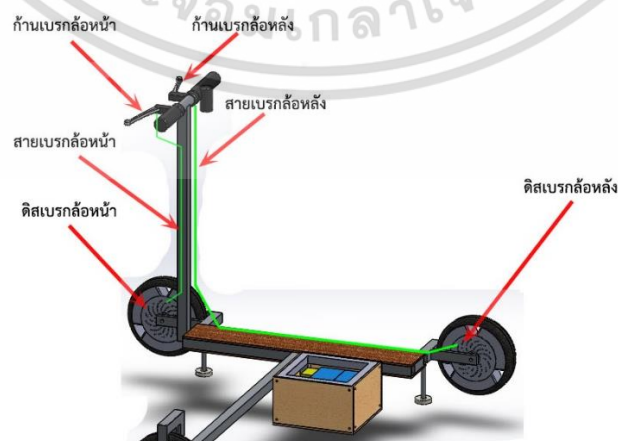
สำหรับการติดตั้ง ติดตั้งก้านเบรกไว้บริเวณแฮนด์จับของรถเหมือนกับการติดตั้งในรถสกูเตอร์ทั่วไป

ตามรูปที่ 3-3



รูปที่ 3- 3 เบรกแบบไฮดรอลิกติดกับจานดิสก์เบรก

ติดตั้งดิสเบรกไว้ที่ล้อหน้าและล้อหลังของรถ ต่อสายเบรกจากก้านเบรกไปที่ตัวจับดิสเบรกทั้งล้อหน้าและล้อหลัง ตามที่แสดงในรูปที่ 3-4



รูปที่ 3- 4 แสดงตำแหน่งการติดตั้งชุดเบรก

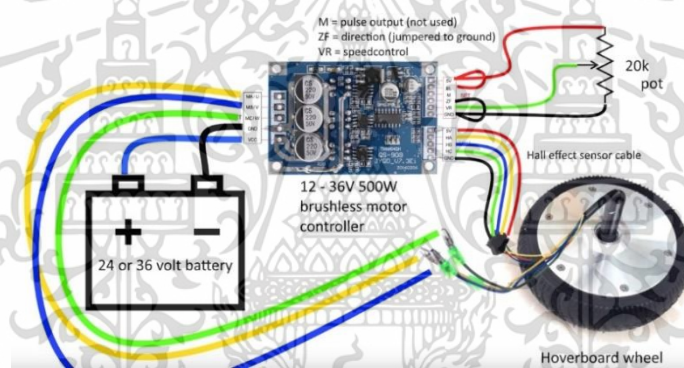
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 การติดตั้งชุดควบคุมความเร็ว

ชุดควบคุมความเร็ว ประกอบด้วย

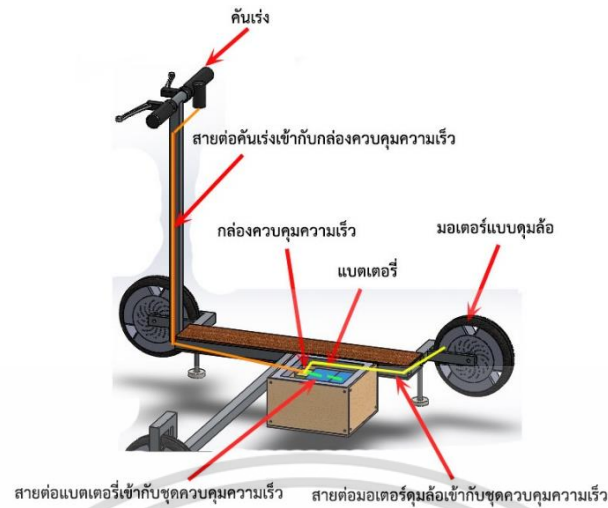
1. คันเร่ง
2. กล่องควบคุมความเร็วมอเตอร์
3. แบตเตอรี่แบบ deep cycle 12V ต่ออนุกรมกัน
4. มอเตอร์แบบดุมล้อขนาด 350W 24V

มอเตอร์แบบดุมล้อนั้นเป็นอุปกรณ์ที่เป็นทั้งมอเตอร์และล้อในตัวเดียวกัน ในการติดตั้งนั้นจึงติดตั้งไว้เป็นล้อหลังของรถ สำหรับคันเร่งติดตั้งไว้ที่แฮนด์รถเหมือนกับสกูตเตอร์โดยทั่วไป แบตเตอรี่และกล่องควบคุมความเร็วของมอเตอร์ติดตั้งไว้ในกล่องด้านข้างตัวรถ สำหรับการต่อสายไฟระหว่างมอเตอร์และกล่องควบคุมความเร็วนั้นทำการต่อตามรูปที่ 3-5



รูปที่ 3- 5 วิธีการต่อชุดควบคุมความเร็ว

โดยจะทำการต่อสายไฟจากคันเร่ง,มอเตอร์และแบตเตอรี่เข้าสู่กล่องควบคุมความเร็ว ตามที่แสดงในรูปที่ 3-6 ทำให้กล่องควบคุมความเร็วเป็นเสมือนจุดเชื่อมต่อระหว่างคันเร่ง มอเตอร์และแบตเตอรี่ โดยมีหลักการทำงานคร่าวๆ คือ เมื่อผู้ขับขี่ทำการบิดคันเร่ง คันเร่งจะส่งสัญญาณไฟฟ้าไปที่กล่องควบคุม กล่องควบคุมก็จะควบคุมปริมาณกระแสไฟฟ้าที่แบตเตอรี่จ่ายให้กับมอเตอร์ตามหลัก PWM ให้สัมพันธ์กับสัญญาณที่ได้รับจากคันเร่ง



รูปที่3- 6 ตำแหน่งการติดตั้งชุดควบคุมความเร็ว

### 3.3 การคำนวณหาขนาดของมอเตอร์

จากทฤษฎีการคำนวณหาขนาดของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 มีตัวแปรหลายตัวแปรที่เกี่ยวข้องโดยมีทั้งตัวแปรที่เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและตัวแปรที่มีค่าขึ้นกับการออกแบบ โดยตัวแปรที่ขึ้นกับการออกแบบ

#### 3.3.1 การหาแรงต้านการเคลื่อนที่ แรงต้านการหมุนที่ล้อ

$$R_r = K_r W \quad (2.7)$$

ออกโดยให้รถมีความเร็วใช้งานสูงสุดอยู่ที่  $20 \text{ km/hr}$  หรือประมาณ  $5.56 \text{ m/s}$

จากสมการ  $K_r = 0.015 + 0.00016v \quad (2.8)$

แทนค่า  $v$  จะได้  $K_r = 0.015 + (0.00016 \times 5.56)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$K_r = 0.01589$$

และแรงที่กระทำกับล้อหลัง  $N_r$  จากสมการที่ 2-5 จะได้

$$R_r = 0.01589 \times 421.075$$

$$R_r = 6.691N$$

จะได้แรงต้านการหมุนของล้อเท่ากับ 6.691 นิวตัน

แรงต้านจากอากาศ

$$R_a = \frac{C_d A \rho v^2}{2} \quad (2.9)$$

โดยประมาณพื้นที่หน้าตัดรถจากสมการ  $A = 0.75 \times B \times H$  (2.10)

ค่า  $H$  และ  $B$  เป็น 0.8 และ 0.15 ตามลำดับ

จะได้

$$A = 0.75 \times 0.1 \times 0.7$$

$$A = 0.0525m^2$$

ค่า  $C_d = 0.3$  ,  $v = 5.56m/s$  ,  $\rho = 1.25kg/m^3$  และ  $A = 0.0525m^2$  แทนค่าลงในสมการ (2.9)

$$R_a = \frac{0.3 \times 1.25 \times 0.0525 \times 5.56^2}{2}$$

$$R_a = 0.3038N$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากต้องการออกแบบให้รถใช้งานบนทางราบเท่านั้นจึงไม่ได้มีการนำแรงต้านจากความลาดชันมาคำนวณ จึงจะได้แรงต้านการเคลื่อนที่รวมตามสมการที่ 2.9 เป็น

$$R = R_r + R_a \quad (3.4)$$

$$R = 6.691 + 0.3038$$

$$R = 6.9948N$$

### 3.3.2 การคำนวณแรงเสียดทาน

จากสมการที่ (2.12)

$$f = \mu N$$

โดยที่สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิต ( $\mu_s$ ), ประสิทธิภาพแรงเสียดทานจลน์ ( $\mu_k$ ) ระหว่างยางกับเหล็กมีค่าประมาณตามรูปที่ 3-7 โดย  $\mu_s = 0.3$  และ  $\mu_k = 0.25$



รูปที่ 3- 7 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างยางกับเหล็ก

ตอนเริ่มออกตัวจะได้

$$f = \mu_s N$$

$$f = 0.3 \times 421.075$$

$$f = 126.32N$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขณะวิ่งด้วยความเร็ว

$$f = \mu_k N_r$$

$$f = 0.25 \times 421.075$$

$$f = 105.27 N$$

ดังนั้นขณะออกตัวรถจะต้องมีแรงขับไม่เกิน 126.32 นิวตัน และมีแรงขับขณะวิ่งด้วยความเร็ว ไม่เกิน 105.27 นิวตัน จึงจะไม่เกินอาการลื่นไถลที่ล้อ

### 3.3.3 การคำนวณความเร่งของรถ

จากสมการที่ (2.17)

$$F = ma + R$$

เมื่อพิจารณาขณะรถเริ่มออกตัว

ค่า  $R_a$  จะมีค่าประมาณศูนย์ จะได้

$$F = ma + R_r$$

โดยที่  $F \leq f$  เพื่อที่จะไม่เกิดการลื่นไถลที่ล้อ

$$f = ma + R_r$$

$$126.32 = (120a) + 6.691$$

$$a = 0.997 m/s^2$$

ดังนั้น ขณะออกตัวความเร่งของรถจะต้องมีค่าไม่เกิน  $0.997 m/s^2$  จึงจะออกตัวได้โดยไม่เกิดอาการลื่นไถล

เมื่อพิจารณาขณะรถวิ่งด้วยความเร็ว

จากสมการที่ (3.1) ค่า  $R = R_r + R_a$  จะได้

$$f = ma + R_r + R_a$$

$$105.27 = 120a + 6.9948$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$a = 0.819m/s^2$$

ดังนั้น ขณะวิ่งด้วยความเร็ว ความเร่งของรถจะต้องมีค่าไม่เกิน  $a = 0.819m/s^2$  จึงจะออกตัวได้โดยไม่เกิดอาการล้อฟรี

∴ กำหนดความเร่งของรถเป็น  $a = 0.231m/s^2$  ซึ่งเป็นค่าความเร่งเฉลี่ยของจักรยานบนพื้นราบ<sup>[12]</sup>

### 3.3.4 การคำนวณแรงบิดที่ใช้ในการขับเคลื่อน

จากสมการที่ (2.17)

$$F = ma + R$$

จะได้

$$F = (120 \times 0.231) + 6.9948$$

$$F = 34.71N$$

คำนวณหาแรงบิดที่ล้อได้จากสมการที่ (2.18)

$$T_w = F \times r$$

โดยที่ล้อมีรัศมี  $r$  เท่ากับ  $0.1m$  จะได้

$$T_w = 34.71 \times 0.1$$

$$T_w = 3.471N \cdot m$$

นำไปแทนในสมการ 2.19 โดยประมาณว่ามีประสิทธิภาพการส่งกำลัง 90 เปอร์เซ็นต์และเนื่องจากเลือกใช้มอเตอร์แบบดุมล้อ ดังนั้น  $i = 1:1$  จะได้

$$T_m = \frac{100 \times T_w}{i \times \eta_t}$$

$$T_m = \frac{100 \times 3.471 \times 1}{1 \times 90}$$

$$T_m = 3.8567N \cdot m$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

∴ หากมอเตอร์มีประสิทธิภาพ 90 เปอร์เซ็นต์ มอเตอร์จะต้องมีแรงบิดไม่ต่ำกว่า  $3.8567 N \cdot m$  จึงจะเพียงพอในการใช้ขับเคลื่อนรถ

### 3.3.5 การคำนวณความเร็วรอบของมอเตอร์

กำหนดให้ความเร็วสูงสุดที่รถวิ่งได้ คือ 20 km/hr หรือ 5.56 m/s และล้อมีรัศมี 0.1 m จากสมการที่ 2.20 จะได้

$$N = \frac{V \times i}{2\pi r}$$

$$N = \frac{5.56 \times 1}{2\pi \times 0.1 \times 1}$$

$$N = 8.85 rps$$

$$N = 530.94 rpm$$

หรือ

∴ เพื่อให้รถสามารถทำความเร็วได้ตามที่ออกแบบ มอเตอร์จะต้องทำความเร็วรอบสูงสุดได้ไม่น้อยกว่า 530.94 รอบต่อนาที

### 3.3.6 การคำนวณกำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อน

จากสมการที่ 2.21

$$P_w = F \times v$$

หากออกแบบให้รถมีความเร็วใช้งานที่ 20 km/hr หรือ 5.56 m/s จะได้กำลังขับที่ล้อเป็น

$$P_w = 34.71 \times 5.56$$

$$P_w = 192.988 W$$

จากนั้นหาค่ากำลังขับของมอเตอร์ จากสมการ 2.22

$$P_m = \frac{100 \times P_w}{\eta_t}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อให้ประสิทธิภาพการส่งกำลังมีค่า 90% จะได้

$$P_m = \frac{100 \times 192.988}{90}$$

$$P_m = 214.43W$$

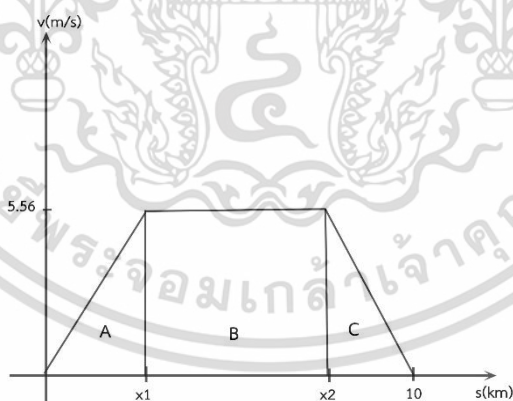
∴ มอเตอร์ต้องมีกำลังไม่น้อยกว่า 214.43 วัตต์

#### เลือกมอเตอร์

จากที่ได้คำนวณไปในหัวข้อที่ผ่านมาจึงเลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบดุมล้อขนาด 350 W 24 V แรงบิดสูงสุด  $5N \cdot m$  ความเร็วรอบ 930 rpm เป็นมอเตอร์ขับ

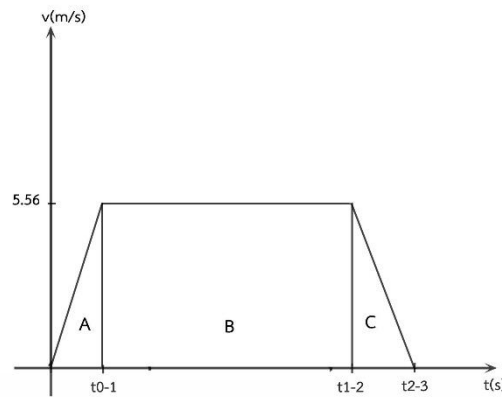
### 3.4 การคำนวณขนาดแบตเตอรี่

หาพลังงานที่แบตเตอรี่จะต้องจ่ายให้กับมอเตอร์ในการเคลื่อนที่ระยะทาง 10 กิโลเมตร เพื่อนำไปคำนวณหาขนาดแบตเตอรี่ที่เหมาะสม



รูปที่ 3- 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับระยะทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่3- 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับระยะเวลา

โดยจากรูปที่ 3-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับระยะทางในการเคลื่อนที่ของรถ และรูปที่ 3-9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลาในการเคลื่อนที่ของรถ โดยช่วง A คือ ช่วงที่แบตเตอรี่จ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ ทำให้รถเคลื่อนที่จากจุดหยุดนิ่ง ด้วยความเร่ง  $0.231\text{m/s}^2$  จนมีความเร็ว  $20\text{ km/h}$  หรือ  $5.56\text{ m/s}$  ในระยะเวลา  $t_{0-1}$  ช่วง B คือช่วงรักษาความเร็วสูงสุด เมื่อรถทำความเร็วจนถึงความเร็วสูงสุดในช่วง A แล้ว จะทำการวิ่งด้วยความเร็วคงที่ในช่วง B โดยแบตเตอรี่จะทำการจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์เพื่อรักษาความเร็วของรถ โดยในช่วงนี้มีเวลา  $t_{1-2}$  วินาที และช่วง C คือ ช่วงที่ทำการเบรก โดยจากการคำนวณในหัวข้อที่ผ่านมาระยะเบรกเท่ากับ  $8.94$  เมตร เป็นระยะที่รถจะต้องทำการเบรกก่อนถึงจุดหมาย โดยใช้เวลาเบรก  $t_{2-3}$  วินาที สำหรับในช่วงนี้แบตเตอรี่จะไม่มีจ่ายพลังงานให้กับมอเตอร์ เนื่องจากต้องการลดความเร็ว

### ช่วง A(รถมีความเร่ง)

คำนวณหาระยะที่ใช้ในการเร่งความเร็วจนถึงความเร็วสูงสุดหรือระยะ  $x_1$  จากสมการที่ 2.19

$$s = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2a} \quad (2.19)$$

โดย  $u_1 = 0\text{ m/s}^2$  ,  $u_2 = 5.56\text{ m/s}^2$  และ  $a = 0.231\text{ m/s}^2$

จะได้

$$s = \frac{5.56^2 - 0^2}{2 \times 0.231}$$

$$x_1 = 66.91\text{m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นหาระยะเวลาที่ใช้ในการเร่ง ,  $t_{0-1}$  จากสมการที่ (3.5)

$$s = ut + \frac{1}{2}at^2 \quad (3.5)$$

โดยความเร็วต้น  $u = 0$  m/s และ  $a = 0.231$  m/s<sup>2</sup>

$$t_{0-1} = \sqrt{\frac{66.91 \times 2}{0.231}}$$

$$t_{0-1} = 24.07$$

ได้ระยะเวลาในการเร่งความเร็วรถจนถึงความเร็วสูงสุด 24.07 วินาที

### ช่วง C(รถมีความหน่วง)

เนื่องจากเราทราบว่าระยะต้องเริ่มเบรกก่อนถึงจุดหมาย 8.94 เมตร และรู้ระยะปลายทางคือ 10 กิโลเมตร หรือ 10,000 เมตร ดังนั้นสามารถคำนวณหาระยะ  $x_2$  ซึ่งเป็นระยะที่รถเริ่มเบรก ได้ดังนี้

$$x_2 = 10000 - 8.94$$

$$x_2 = 9991.66m$$

และคำนวณเวลาที่ใช้ในการเบรกได้จากสมการที่ (3.6)

$$s = ut + \frac{1}{2}at^2 \quad (3.6)$$

โดยระยะเบรก  $s = 8.94$  m และความหน่วงจากการเบรก  $a_b = 1.728$  m/s<sup>2</sup> จะได้

$$t_{2-3} = \sqrt{\frac{8.94 \times 2}{1.728}}$$

$$t_{2-3} = 3.22$$

จากการคำนวณใช้เวลาในการเบรกจากความเร็วสูงสุดจนรถหยุดนิ่งประมาณ 3.22 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ช่วง B(กรณีมีความเร็วคงที่)

คำนวณหาระยะเวลาทำความเร็วสูงสุด  $t_{1-2}$  จาก สมการที่ (3.7)

$$s = ut + \frac{1}{2}at^2 \quad (3.7)$$

โดยเราทราบระยะ  $x_2 = 9991.66m$  และ  $u = 5.56m/s^2$  และเนื่องจากรถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ดังนั้น  $a = 0 m/s^2$

จะได้

$$t_{1-2} = \frac{9991.66}{5.56}$$

$$t_{1-2} = 1784.92$$

ได้ระยะเวลาในการทำความเร็วคงที่ 1784.92 วินาที

### พลังงานที่ใช้ตลอดการเคลื่อนที่

คำนวณพลังงานที่ใช้ตลอดการเคลื่อนที่ 10 กิโลเมตร จากสมการ (3.8)

$$P = \frac{F \times s}{t} \quad (3.8)$$

จากที่แสดงในรูปที่ 3-5 แบตเตอรี่มีการจ่ายพลังงานในช่วง A และ B ดังนั้นจะได้

$$P = \frac{F_{0-1} \times x_{0-1}}{t_{0-1}} + \frac{F_{1-2} \times x_{1-2}}{t_{1-2}}$$

$$P = \frac{F_{0-1} \times x_1}{t_{0-1}} + \frac{F_{1-2} \times (x_2 - x_1)}{t_{1-2}} \quad (3.9)$$

โดย  $F_{0-1}$  คือ แรงที่มอเตอร์ใช้ในการทำความเร็ว มีค่า 34.71 นิวตัน ตามหัวข้อที่ 3.2.4

$F_{1-2}$  คือ แรงที่มอเตอร์ใช้ในการรักษาความเร็วมีค่า 6.99 นิวตัน (มีค่าเท่ากับแรงต้านการเคลื่อนที่)

จะได้

$$P = \frac{34.71 \times 66.91}{24.07} + \frac{6.99 \times (9991.06 - 66.91)}{1784.92}$$

$$P = 135.35W$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้พลังงานที่รถใช้ในการเคลื่อนที่ 10 กิโลเมตร เท่ากับ 135.35 วัตต์ ซึ่งเป็นค่าพลังงานที่แบตเตอรี่ต้องจ่ายให้กับมอเตอร์ (กำหนดให้แบตเตอรี่ส่งพลังงานไปมอเตอร์โดยไม่มีการสูญเสีย)

จากสมการที่ (2.22)

$$I = \frac{P_m}{V} \quad (2.22)$$

เลือกใช้แบตเตอรี่ขนาด 24 V แบตเตอรี่จะต้องจ่ายกระแส

$$I = \frac{135.35}{24}$$

$$I = 5.64A$$

ต้องการให้รถสามารถใช้งานที่ระยะทาง 10 กิโลเมตรต่อการชาร์จแบตเตอรี่ 1 ครั้ง ด้วยความเร็วสูงสุด 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยระยะเวลาในการใช้งานต่อการชาร์จ 1 ครั้ง คำนวณจาก

$$t = t_{0-1} + t_{1-2} + t_{2-3}$$

จากการคำนวณที่ผ่านมา

$$t = 24.07 + 1784.92 + 3.22$$

$$t = 1812.21$$

ดังนั้นระยะเวลาที่รถใช้ในการเคลื่อนที่ 10 กิโลเมตร คือ 1812.21 วินาที หรือประมาณ 30.2 นาที หรือ 0.503 ชั่วโมง

แบตเตอรี่จึงต้องมีขนาดอย่างน้อย

$$I = 5.64 \times 0.503Ah$$

$$I = 2.84Ah$$

ที่แรงดันไฟ 24 V รถจึงจะสามารถขับเคลื่อนได้ระยะทางและความเร็วตามที่กำหนด

ดังนั้นเลือกแบตเตอรี่แบบ deep cycle 7Ah 12 V สองลูก มาต่ออนุกรมกัน เนื่องจากมาราคาถูกและมีค่า C-rate ไม่ต่ำจนเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 การคำนวณเบรก

#### 3.5.1 แรงเบรก

เลือกใช้ชุดดิสเบรกสำหรับล้อรถสกูตเตอร์ขนาด 8 นิ้ว ติดตั้งที่ล้อหน้าและล้อหลังของรถ จากสมการที่ 2.36 แรงเบรกสูงสุดเท่ากับ

$$F_{b\max} = \mu(N_f + N_r)$$

เนื่องจากเบรกที่ใช้เป็นดิสเบรกธรรมดาไม่มีระบบABS(Anti-lock braking system) ดังนั้นจึงคำนวณในกรณีล้อล๊อคตาย ค่า  $\mu$  ในสมการ 2.36 จึงใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์ระหว่างล้อยางกับเหล็ก

$\mu_k = 0.25$  เมื่อแทนค่า  $N_f = 408.381N$ ,  $N_r = 421.075N$  จากหัวข้อที่ 3.1 จะได้

$$F_{b\max} = 0.25 \times (408.381 + 421.075)$$

$$F_{b\max} = 102.095 + 105.269$$

$$F_{b\max} = 207.364N$$

ดังนั้นจะทำการเบรกได้ด้วยแรงสูงสุดเท่ากับ 207.364 นิวตัน โดยแบ่งเป็นแรงเบรกที่ล้อหน้า 102.095 นิวตัน และแรงเบรกที่ล้อหลัง 105.269 นิวตัน

เนื่องจากรถมีความเร็วสูงสุด 20 km/h หรือประมาณ 5.56 m/s ดังนั้นจากสมการที่ 2.37

$$P_b = F_{b\max} v$$

$$P_b = 207.364 \times 5.56$$

$$P_b = 1.153kW$$

กำลังเบรกเท่ากับ 1.153 กิโลวัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.2 คำนวณระยะเบรก

คำนวณระยะเบรกจากสมการที่ 2.38

$$s = \frac{u_1^2 - u_2^2}{2a_b}$$

โดย  $u_1$  คือ ความเร็วเมื่อเริ่มทำการเบรก ในที่นี้ใช้ความเร็วสูงสุด 5.56 m/s

$u_2$  คือ ความเร็วเมื่อรถหยุด 0 m/s

$a_b$  คือ ความหน่วงจากการเบรก

โดยคำนวณความหน่วงสูงสุดเมื่อเบรกเต็มที่ จากสมการที่ 2.39

$$a_b = \frac{F_{b\max}}{m}$$

โดย  $m$  คือมวลรวมของรถและผู้โดยสารเท่ากับ 120 กิโลกรัม

$$a_b = \frac{207.364}{120}$$

$$a_b = 1.728 \text{ m/s}^2$$

ดังนั้นรถสามารถทำการเบรกด้วยความหน่วงสูงสุด 1.728 m/s<sup>2</sup>

เมื่อแทนค่า  $u_1, u_2, a_b$  ลงในสมการ 2.39 จะได้

$$s = \frac{5.56^2 - 0^2}{2 \times 1.728}$$

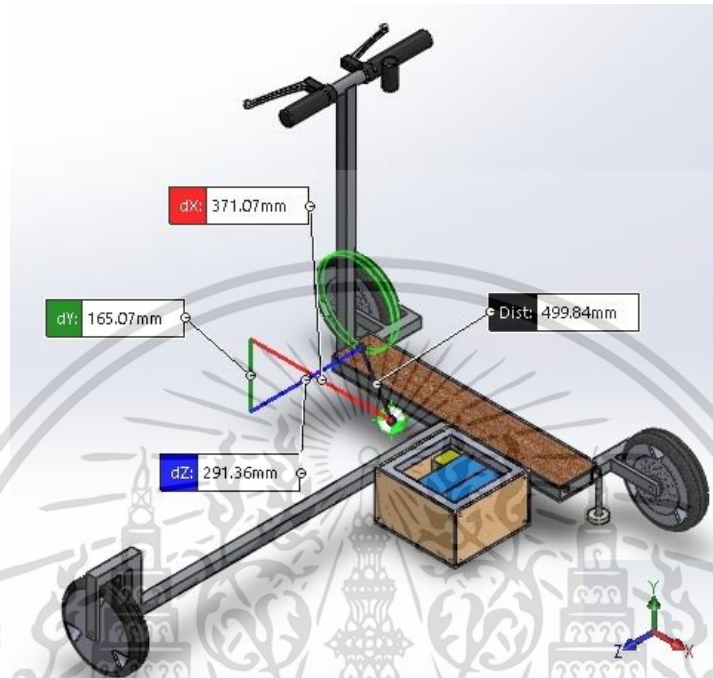
$$s = 8.94 \text{ m}$$

จากการคำนวณรถมีระยะเบรก 8.94 เมตร เมื่อเริ่มเบรกขณะทำความเร็วสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 การคำนวณหาจุดศูนย์ถ่วง (C.G.)

จากรูปที่ 3-10



รูปที่ 3- 10 แสดงพิกัดของตัวรถ

รถมีจุด C.G. อยู่ที่พิกัด (371.07,291.36,165.07)mm เมื่อกำหนดให้พิกัดที่ล้อหน้าสัมผัสกับรางมีพิกัด (0,0,0)

สำหรับจุด C.G. ของผู้ขับขี่ จากข้อมูลการสำรวจรูปร่างและสรีระของประชากรไทย ในปี 2551 โดยศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ร่วมกับสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) รายงานว่าความสูงเฉลี่ยของชายไทยอยู่ที่ 169.46 เซนติเมตร โดยมนุษย์จะมีจุด C.G. สูงประมาณ 56 เปอร์เซ็นต์ ของความสูงร่างกาย<sup>[13]</sup>

จะได้ความสูง C.G. ของผู้ขับขี่ที่เป็นชายไทย

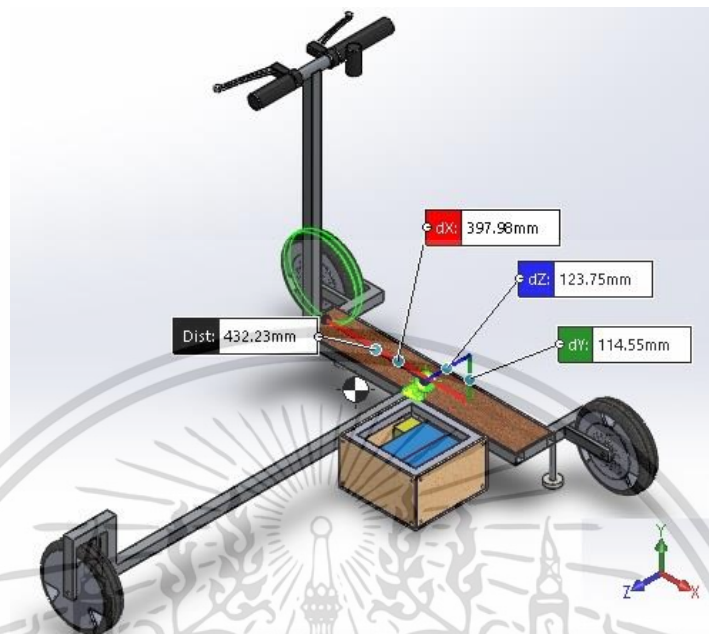
$$h = 0.56 \times 169.46$$

$$h = 94.9 \text{ cm}$$

ดังนั้นจุด C.G. ของผู้ขับขี่ที่เป็นชายไทยมีค่าความสูงประมาณ 95 เซนติเมตร หรือ 950 มิลลิเมตร วัดจากตำแหน่งที่เท้าสัมผัสกับพื้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้จุดวางเท้าของผู้ขับขี่อยู่ที่ตำแหน่งตรงกลางที่วางเท้า ซึ่งมีพิกัด(397.98,123.75,114.55)mm เมื่อกำหนดให้พิกัดที่ล้อหน้าสัมผัสกับรางมีพิกัด (0,0,0) ตามที่แสดงในรูปที่ 3-11



รูปที่ 3- 11 แสดงพิกัดผู้ขับขี่

ดังนั้นจุด C.G. ของผู้ขับขี่จะมีพิกัด (397.98,123.75,1064.55)mm เมื่อกำหนดให้พิกัดที่ล้อหน้าสัมผัสกับรางมีพิกัด (0,0,0)

คำนวณหาพิกัดของจุด C.G. ระหว่างตัวรถกับผู้ขับขี่จากสมการที่ 2.23, 2.24 และ 2.25

$$\bar{x}_A = \frac{M_B x_B + M_C x_C + M_D x_D}{M_B + M_C + M_D} \quad (2.23)$$

$$\bar{y}_A = \frac{M_B y_B + M_C y_C + M_D y_D}{M_B + M_C + M_D} \quad (2.24)$$

$$\bar{z}_A = \frac{M_B z_B + M_C z_C + M_D z_D}{M_B + M_C + M_D} \quad (2.25)$$

กำหนดให้ผู้ขับขี่มีมวลประมาณ 105 กิโลกรัม และตัวรถมีน้ำหนักประมาณ 15 กิโลกรัม โดยมีพิกัดของรถที่ (371.07,291.36,165.07)mm พิกัดผู้ขับขี่ (397.98,123.75,1064.55)mm แทนค่าพิกัดและมวลลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้จุด  $x$  เท่ากับ

$$x_A = \frac{(15 \times 371.07) + (105 \times 397.98)}{15 + 105}$$

$$x_A = 394.62 \text{ mm}$$

จุด  $y$  เท่ากับ

$$y_A = \frac{(15 \times 291.36) + (105 \times 123.75)}{15 + 105}$$

$$y_A = 144.7 \text{ mm}$$

และจุด  $z$  เท่ากับ

$$z_A = \frac{(15 \times 165.07) + (105 \times 1064.55)}{15 + 105}$$

$$z_A = 952.12 \text{ mm}$$

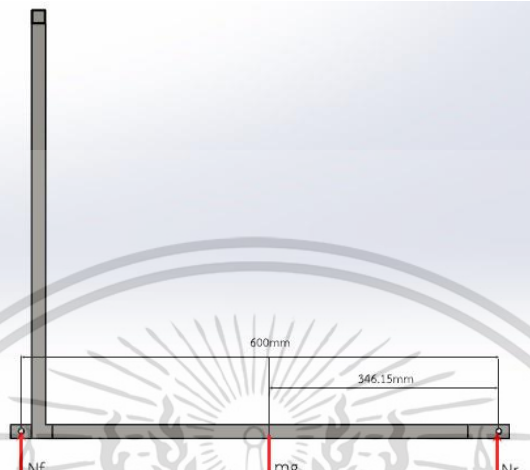
ดังนั้นจะได้พิกัดของจุด C.G. รวมของรถและผู้ขับขี่ที่พิกัด (394.62, 144.70, 952.12) มิลลิเมตร เมื่อกำหนดให้พิกัด (0,0,0) คือจุดที่ล้อหน้าสัมผัสกับราง ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่ระหว่างล้อที่สัมผัสรางทั้ง 2 ฟัน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่ารถมีเสถียรภาพในขณะที่มีผู้ขับขี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7 การวิเคราะห์โครงสร้าง

#### โครงรถ

พิจารณาที่โครงรถจะเห็นได้ว่ามีแรงกระทำตามรูป ที่ 3-6



รูปที่ 3- 12 แรงแสดงแรงที่กระทำต่อโครงรถ

โดย  $m$  คือ น้ำหนักสูงสุดของผู้โดยสาร 105 กิโลกรัม

$M_1$  คือ โมเมนต์ที่เกิดขึ้นบนโครงรถ

พิจารณาจากสมดุลโมเมนต์ ( $\sum M = 0$ ) รอบจุดที่แรง  $N_f$  กระทำ

ตาม=ทวน

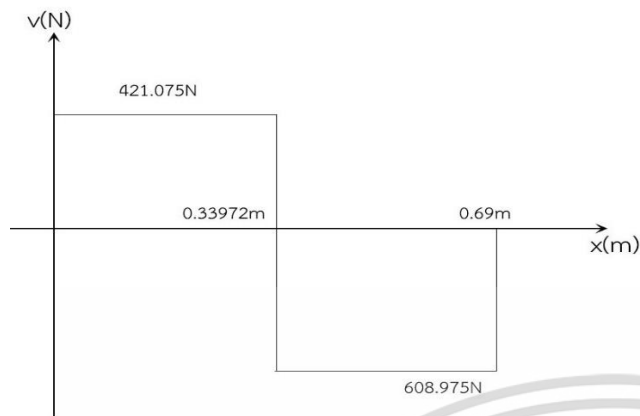
$$mg(a) = N_r(L) + M_1$$

$$M_1 = (9.81 \times 105 \times 0.35028) - (421.075 \times 0.69)$$

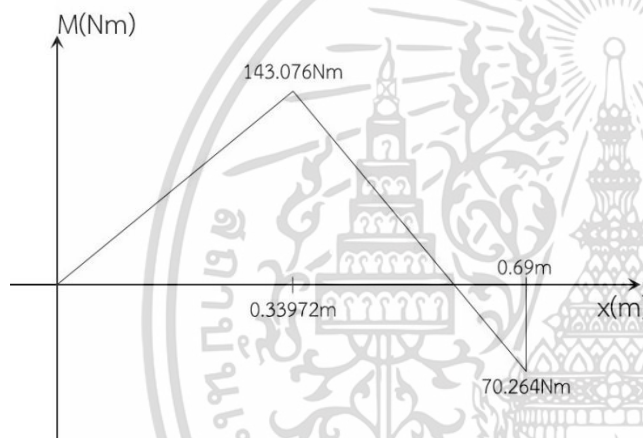
$$M_1 = 70.264 \text{ N} \cdot \text{m} \text{ ทิศทวนเข็มนาฬิกา}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำมาวาดเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับระยะ



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์กับระยะ



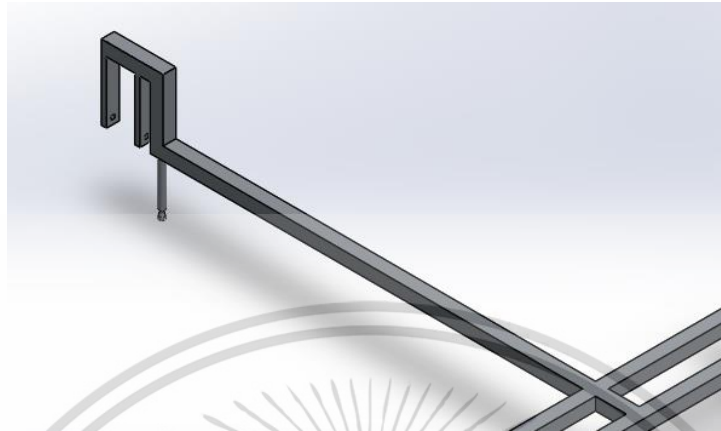
$$\therefore v_{\max} = 608.975\text{ N}$$

$$M_{\max} = 143.076\text{ N}\cdot\text{m}$$

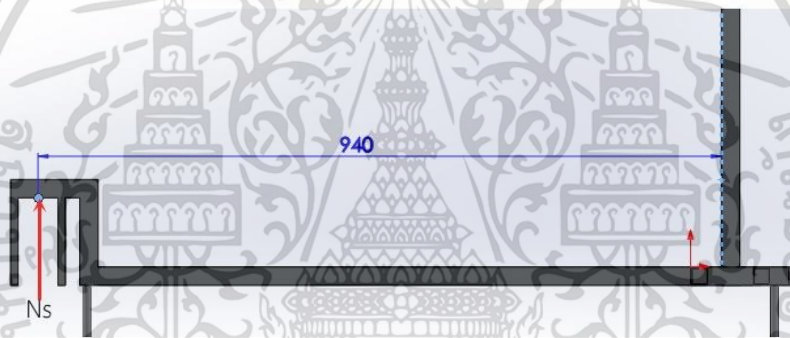
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## โครงรถด้านข้าง

พิจารณาโครงรถด้านข้างจากรูปที่ 3-13 และ 3-14



รูปที่ 3- 13 ภาพแสดงโครงรถด้านข้าง แบบ side view



รูปที่ 3- 14 ภาพแสดงโครงรถด้านข้างแบบ Isometric

จะได้ว่ามีแรงกระทำคือแรง  $N_s$  ซึ่งทำให้เกิดโมเมนต์ขึ้นในชิ้นส่วนนี้ และเมื่อพิจารณาจากสมดุลของโมเมนต์ ( $\sum M = 0$ ) รอบจุดเชื่อมต่อระหว่างชิ้นงาน จะได้

ตาม=ทวน

$$M_2 = N_s \times c$$

$$M_2 = 347.744 \times 0.910$$

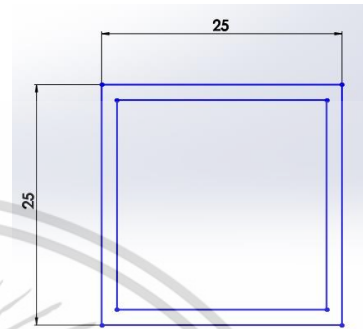
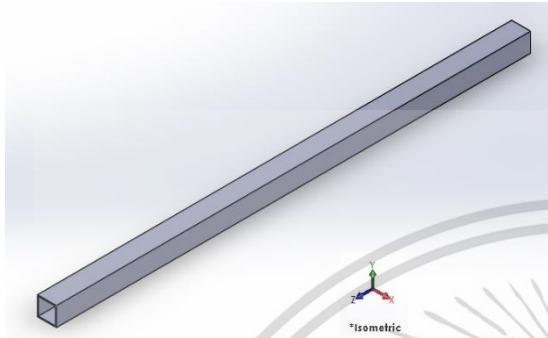
$$M_2 = 316.47N \cdot m \quad \text{เป็นโมเมนต์สูงสุดที่เกิดขึ้น}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.8 การคำนวณขนาดของส่วนต่างๆ

#### 3.8.1 การคำนวณขนาดของโครงรถ

เลือกใช้เหล็กใช้เหล็กกล่องสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1x1 นิ้ว (25mm) ตามรูปที่ 3-15 เป็นวัสดุสำหรับสร้างโครงรถ โดยมีภาพหน้าตัดตามที่แสดงในภาพที่ 3-16



รูปที่ 3- 15 แสดงภาพ3Dของเหล็กกล่อง

รูปที่ 3- 16 แสดงภาพหน้าตัดของเหล็กกล่อง

จากสมการที่ (2.23), (2.24) เนื่องจากตัวท่อมมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ทำให้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยค่า

$$I = \frac{1}{12} (bd^3 - b_1d_1^3) \text{ และหาค่าความเค้นที่เกิดจากผลของโมเมนต์ดัด ได้จาก } \sigma_x = \frac{Mc}{I}$$

จากรูปที่ 3-9 ทราบค่า  $b = d = 25\text{mm}$  และมีความหนาเท่ากันทุกด้าน ดังนั้น  $b_1 = d_1$  จะได้

$$I = \frac{1}{12} (0.025^4 - d_1^4)$$

#### พิจารณาที่โครงรถ

โดยจากหัวข้อที่ 3.6 ที่โครงรถมี  $M_{\max} = 143.076\text{N}\cdot\text{m}$ ,  $c = \frac{d}{2}$

จะได้

$$\sigma_x = \frac{143.076 \times \frac{0.025}{2}}{\frac{1}{12} (0.025^4 - d_1^4)}$$

$$d_1^4 = 0.025^4 - \frac{143.076 \times 0.15}{\sigma_x}$$

เลือกวัสดุเหล็กกล่อง โดยตามมาตรฐาน มอก.107-2533 ชั้นคุณภาพ STKR400 ตามตารางที่ 2-4 จะมีค่า Yield Strength ที่ 245 MPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้

$$d_1^4 = 0.025^4 - \frac{143.076 \times 0.15}{245 \times 10^6}$$

$$d_1 = 0.0235m$$

ดังนั้นเหล็กกล่องจะต้องมีความหนา  $t$  อย่างน้อย

$$t = \frac{d - d_1}{2}$$

$$t = \frac{25 - 23.5}{2}$$

$$t = 0.75mm$$

∴ หากเลือกใช้เหล็กกล่องมาตรฐาน STKR400 ขนาด 1x1 นิ้ว หนา 2 มิลลิเมตร

#### พิจารณาที่โครงสร้างด้านข้าง

จากหัวข้อที่ 3.4 มีโมเมนต์สูงสุดในโครงสร้าง  $M_2 = 316.47Nm$  ใช้วัสดุเป็นเหล็กรีดเย็นขนาดเท่ากับที่ใช้ในโครงรถ จะคำนวณหาความหนาของเหล็กกล่องได้ ดังนี้

$$d_1^4 = 0.025^4 - \frac{316.47 \times 0.15}{245 \times 10^6}$$

$$d_1 = 0.02106m$$

ดังนั้นเหล็กกล่องจะต้องมีความหนา  $t$  อย่างน้อย

$$t = \frac{d - d_1}{2}$$

$$t = \frac{25 - 21.06}{2}$$

$$t = 1.97mm$$

∴ หากเลือกใช้เหล็กกล่องมาตรฐาน STKR400 ขนาด 1x1 นิ้ว หนา 2 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.8.2 การคำนวณเพลาล้อหน้า

ในการคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพลาล้อหลังที่เล็กที่สุดที่สามารถรับภาระ โดยใช้ทฤษฎีแรงเฉือนสูงสุดจะมีแรง ( $N_f$ ) ที่กระทำกับเพลาดังรูปที่ 3-17



รูปที่ 3- 17 เพลาล้อหน้า

คำนวณแรงเฉือนที่กระทำต่อเพลาล้อหลัง

$$\sum F = 0$$

$$N_r - 2V_r = 0$$

$$V_f = 408.381 / 2$$

$$V_r = 204.19 \text{ N}$$

Yield strength ของเหล็ก ASTM A36 steel  $S_y = 250 \text{ MPa}$

ใช้ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดในการคำนวณ  $\tau_{\max}$  และค่าความปลอดภัย ( $n$ ) เท่ากับ 10

$$\tau_{\max} = S_y / 2n$$

$$\tau_{\max} = 250 * 10^6 / 2 * 10$$

$$\tau_{\max} = 12.5 \text{ MPa}$$

คำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางเพลานขนาดเล็กที่สุดที่สามารถรับภาระได้

$$\tau_{\max} = V_f / A$$

$$\tau_{\max} = 4V_f / \pi d^2$$

$$d = (4V_f / \pi \tau_{\max})^{0.5}$$

$$d = (4 * 204.19 / \pi * 12.5 * 10^6)^{0.5}$$

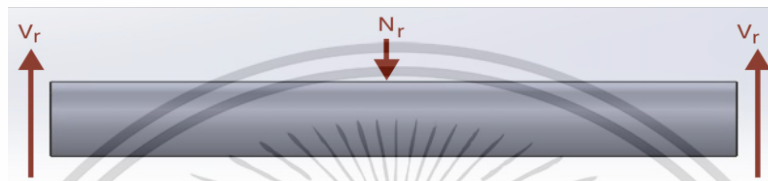
$$d = 4.56 \text{ mm.}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กที่สุดที่สามารถรับภาระได้มีค่าเท่ากับ 4.56 mm. แต่เพลลาที่ใช้มีขนาด 8 mm. ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าเพลลาที่คำนวณได้ แสดงว่าเพลลาที่ใช้มีความปลอดภัยสามารถใช้งานได้โดยไม่เกิดความเสียหาย

### 3.8.3 การคำนวณเพลลอล้อหลัง

ในการคำนวณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเพลลอล้อหลังที่เล็กที่สุดที่สามารถรับภาระ โดยใช้ทฤษฎีแรงเฉือนสูงสุดจะมีแรง ( $N_r$ ) ที่กระทำกับเพลลาดังรูปที่ 3-18



รูปที่ 3- 18 เพลลอล้อหลัง

คำนวณแรงเฉือนที่กระทำต่อเพลลอล้อหลัง

$$\sum F = 0$$

$$N_r - 2V_r = 0$$

$$V_r = 421.075 / 2$$

$$V_r = 210.54N$$

Yield strength ของเหล็ก ASTM A36 steel  $S_y = 250$  MPa

ใช้ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดในการคำนวณ  $\tau_{max}$  และค่าความปลอดภัย ( $n$ ) เท่ากับ 10

$$\tau_{max} = S_y / 2n$$

$$\tau_{max} = 250 * 10^6 / 2 * 10$$

$$\tau_{max} = 12.5MPa$$

คำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางเพลลาขนาดเล็กที่สุดที่สามารถรับภาระได้

$$\tau_{max} = V_r / A$$

$$\tau_{max} = 4V_r / \pi d^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$d = (4V_r / \pi\tau_{\max})^{0.5}$$

$$d = (4 * 210.54 / \pi * 12.5 * 10^6)^{0.5}$$

$$d = 4.63 \text{ mm.}$$

เส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กที่สุดที่สามารถรับภาระได้มีค่าเท่ากับ 4.63 mm. แต่เพลลาที่ใช้มีขนาด 8 mm. ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าเพลลาที่คำนวณได้ แสดงว่าเพลลาที่ใช้มีความปลอดภัยสามารถใช้งานได้โดยไม่เกิดความเสียหาย

### 3.8.4 การคำนวณส่วนยึดเหนี่ยวระหว่างตะเกียบหลัง กับ ล้อ

ในการคำนวณขนาดของ Bolt ในการใช้ยึดติดระหว่างตะเกียบหลัง กับ ล้อ ใช้รองรับแรงที่มากระทำ เพื่อให้ได้ Bolt ที่มีขนาดที่เหมาะสมในการใช้งาน จะสามารถคำนวณได้ดังนี้



รูปที่ 3- 19 bolt ระหว่างตะเกียบหลังกับล้อ

คำนวณแรงที่กระทำต่อ Bolt ได้ดังนี้

$$\sum F = 0$$

$$V_r - N_r / 2 = 0$$

$$V_r = N_r / 2$$

$$V_r = 421.075 / 2$$

$$V_r = 210.54 \text{ N.}$$

Yield strength ของเหล็ก ASTM A36 steel  $S_y = 340 \text{ MPa}$

ใช้ทฤษฎีความเค้นเฉือนสูงสุดในการคำนวณ  $\tau_{\max}$  และค่าความปลอดภัย ( $n$ ) เท่ากับ 3

$$\tau_{\max} = S_y / 2n$$

$$\tau_{\max} = 340 * 10^6 / 2 * 3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau_{\max} = 56.67 \text{ MPa}$$

คำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Bolt ที่เล็กที่สุดสำหรับรองรับแรงที่มากกระทำ

$$\tau_{\max} = V_r / A$$

$$\tau_{\max} = 4V_r / \pi d^2$$

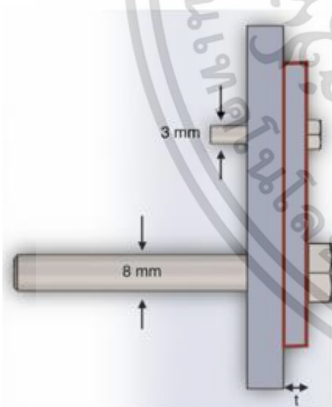
$$d = (4V_r / \pi \tau_{\max})^{0.5}$$

$$d = (4 * 210.54 / \pi * 56.67 * 10^6)^{0.5}$$

$$d = 2.17 \text{ mm.}$$

∴ เส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กที่สุดสำหรับการรองรับโหลดมีขนาด 3 mm. โดยการใช้ bolt ที่ปลอดภัยคือ M3x10 mm.

3.8.5 คำนวณความหนา ( $t$ ) ที่เหมาะสมของส่วนรองรับตะเกียบหลัง กับ ล้อ  
การคำนวณความหนาที่เหมาะสมของส่วนรองรับตะเกียบหลังกับ ล้อ เพื่อสามารถรองรับภาระได้โดยไม่เกิดความเสียหาย ใช้สูตรการคำนวณความเค้นตามแนวแรง



สำหรับโลหะอูมิเนียมมีค่า yield strength,  $S_y = 95 \text{ MPa}$  โดยมีค่าความปลอดภัย ( $n$ ) เท่ากับ 3

โดยขนาดของเพลาล้อหลังเท่ากับ 8 mm. จะได้ว่า

$$S_y / n = F_b / t * d_r$$

$$t = n F_b / S_y * d_r$$

$$t = (3) 210.54 / 95 * 10^6 * 0.008$$

รูปที่ 3- 20 แสดงส่วนรองรับ

$$t = 0.83 \text{ mm.}$$

ดังนั้นความหนาที่เหมาะสมสำหรับรับภาระมีค่าเท่ากับ 2 mm.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.9 การวิเคราะห์ความแข็งแรง von misses stress

#### โครงรถ

โครงรถเป็นส่วนที่สำคัญสำหรับตัวรถ speeder เพราะว่าเป็นส่วนที่รับแรงจากน้ำหนักของผู้ขับขี่ ซึ่งเป็นโหลดหลักๆ โดยสำหรับรถตรวจทางนี้ได้ออกแบบมาสำหรับใช้งานเพียงคนเดียว โดยที่ผู้ใช้งานมีน้ำหนักไม่เกิน 100 กิโลกรัม สำหรับวัสดุทางผู้จัดทำได้เลือกใช้เหล็กกล่องขนาด 1x1 นิ้ว (25 มิลลิเมตร)หนา 2 มิลลิเมตร

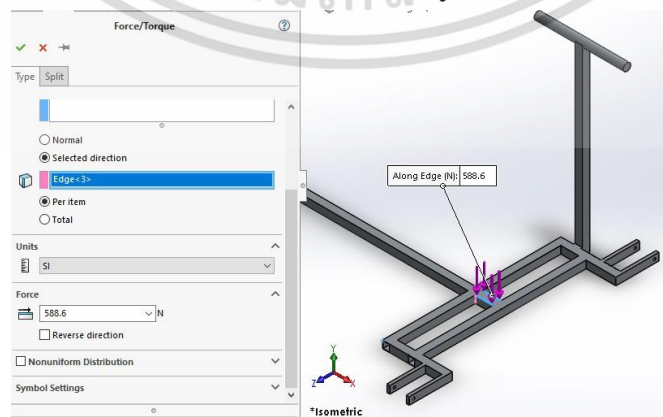
สำหรับการวิเคราะห์ความแข็งแรงจาก von misses stress ใช้การ Simulation ตามหลักไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. สร้างแบบจำลอง 3 มิติ ของชิ้นงาน โดยอาจละส่วนที่ไม่สำคัญ เช่น รูเล็กๆหรือส่วนที่ไม่ได้รับแรงออกไปเพื่อที่จะได้แบ่งเอลิเมนต์ (mesh) น้อยลงและลดเวลาในการคำนวณ ตามรูปที่ 3-21



รูปที่ 3- 21 แบบจำลอง3Dของโครงรถ

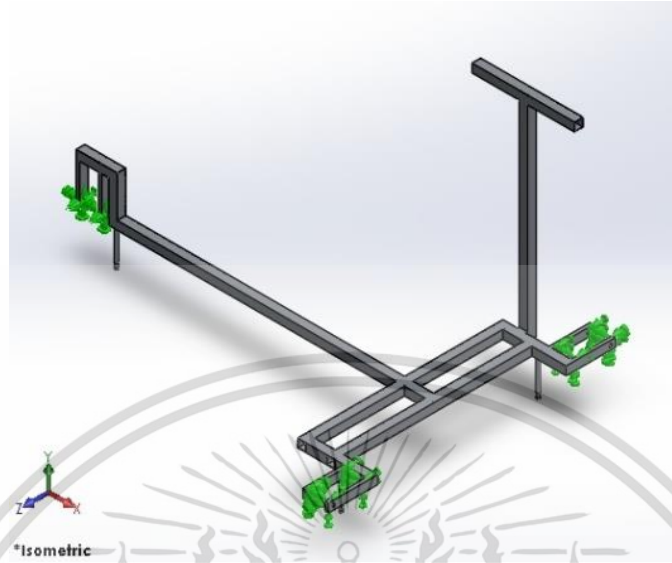
2. กำหนดตำแหน่งและขนาดของแรงที่ผู้ขับขี่กระทำต่อชิ้นงาน โดยที่ลูกศรสีม่วง คือ น้ำหนักของผู้ขับขี่มีขนาด 1177.2 N. และมีทิศทางตามลูกศร แต่เนื่องจากไม่สามารถทำแรงรวมที่จุดกึ่งกลางได้ จึงแบ่งแรงเป็นสองแรง แรงละ 588.6 N. ตามรูปที่ 3-23



รูปที่ 3- 22 แสดงแรงที่กระทำบนชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. กำหนดจุดยึดของชิ้นงาน คือ จุดสี่เหลี่ยมที่อยู่บริเวณล้อหน้า ล้อหลัง และล้อเสริม ซึ่งกำหนดเป็นจุด Fix ชิ้นงาน ตามรูปที่ 3-22



รูปที่ 3- 23 แสดงจุดFixบนชิ้นงาน

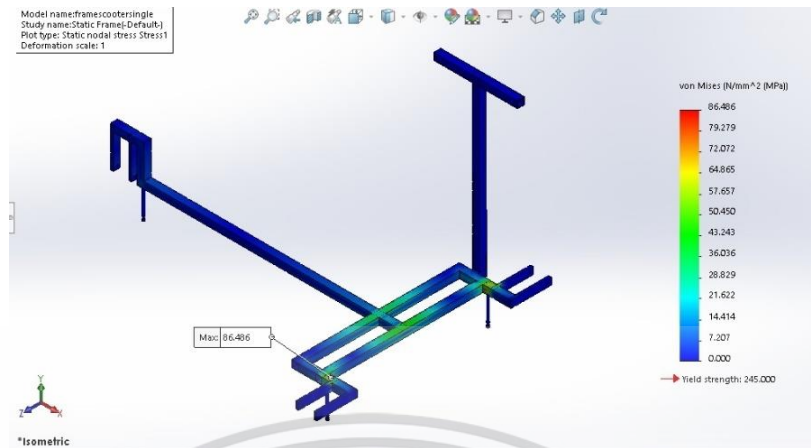
4. สร้าง mesh ตามรูปที่ 3-24



รูปที่ 3- 24 แสดงการ mesh

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5. รันโปรแกรมเพื่อคำนวณ von mises stress ได้ผลตามรูปที่ 3-25

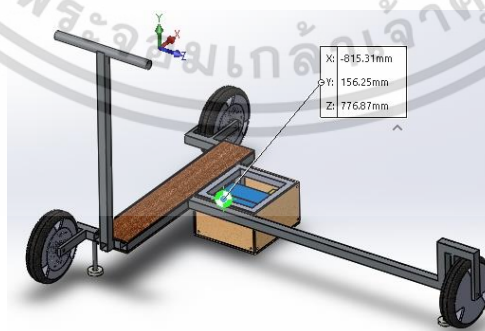


รูปที่ 3- 25 แสดงผลการ Simulation

จากการวิเคราะห์ที่พบว่าเมื่อโครงรถรับน้ำหนัก 120 กิโลกรัม จะมีค่า von mises stress สูงสุดที่ 86.486 MPa ตามที่แสดงในรูปที่ 3-25 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่า yield strength ที่มีค่า 245 MPa ตามที่แสดงในรูปที่ 3-25 ทำให้ที่โครงรถที่สร้างจากเหล็กกล่องมาตรฐาน STKR400 ขนาด 1x1 นิ้วหนา 2 มิลลิเมตรสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี

### 3.10 การจำลองการเคลื่อนที่ของรถ

จากรูปที่ 3-26 จะเห็นได้ว่ารถขณะที่ยังไม่มีผู้ขับขี่มีจุด C.G. อยู่ระหว่างล้อที่ทำการสัมผัสรางทั้ง 2 ฝั่ง ทำให้รถขณะไม่มีผู้ขับขี่มีสมดุล และไม่ล้มขณะที่จอดอยู่นิ่งๆ และเนื่องจากจุดวางเท้าของผู้ขับขี่ก็อยู่ระหว่างล้อทั้ง 2 ฝั่งเช่นกัน ทำให้เมื่อมีผู้ขับขี่รถ จุด C.G. ใหม่ของผู้ขับขี่และรถก็จะยังคงอยู่ระหว่างล้อทั้ง 2 ฝั่งเช่นเดิม รถจึงมีเสถียรภาพทั้งขณะที่มีและไม่มีผู้ขับขี่



รูปที่ 3- 26 แสดงจุด C.G. ของรถขณะไม่มีผู้ขับขี่

สำหรับการเคลื่อนที่ของรถเนื่องจากสถานการณ์การระบาดของเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (COVID-19) ได้ทวีความรุนแรงและมีการแพร่ระบาดอย่างรวดเร็วและกว้างขวางไปหลายประเทศทั่วโลก ส่งผลให้รัฐบาลเอกซารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไทยประกาศสถานการณ์ฉุกเฉินในทุกเขตท้องที่ทั่วราชอาณาจักร ทำให้จำเป็นต้องปิดสถานศึกษาทั่วประเทศ เป็นการชั่วคราว ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำโปรเจกต์นี้ โดยไม่สามารถนำรถออกมาทดลองวิ่งจริงบนทางรถไฟได้

ดังนั้นทางคณะผู้จัดทำจึงได้แก้ปัญหาโดยการจำลองการเคลื่อนที่ของ รถบนทางรถไฟด้วย ฟังก์ชัน Motion Analysis ของโปรแกรม *SolidWork*<sup>®</sup> แทนการนำรถมาทดลองวิ่งจริง

### 3.10.1 การสร้างแบบจำลอง (Motion Model Generation)

#### 3.10.1.1 การสร้างส่วนประกอบต่างๆ (Create Parts)

วาดส่วนต่างๆของรถตามขนาดที่ได้ออกแบบไว้ในบท 3 ในส่วน Part ของโปรแกรม *SolidWork*<sup>®</sup> ตามที่แสดง ในรูปที่ 3-27



รูปที่ 3- 27 a) โครงรถspeeder

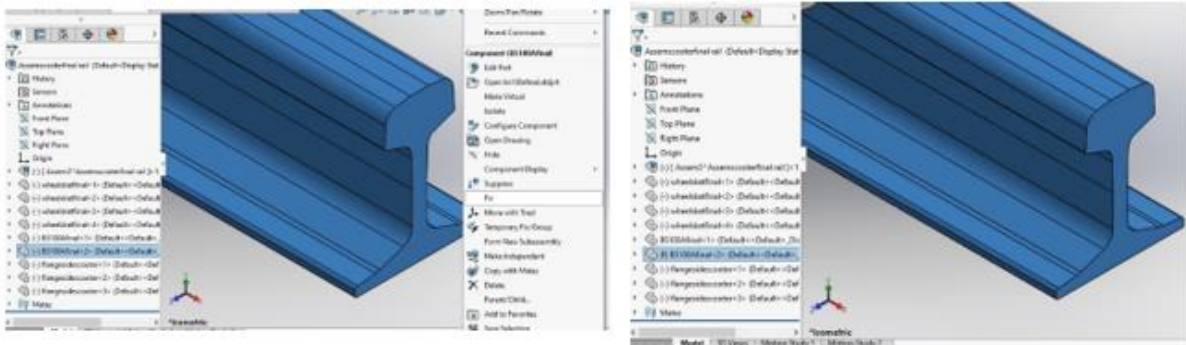
b) กล่องใส่มอเตอร์

#### 3.10.1.2 การกำหนดการเคลื่อนไหว (Defining Motion Entities)

สำหรับแบบจำลองการเคลื่อนที่นั้น โดยทั่วไปจะประกอบด้วย ส่วนที่ไม่มีการเคลื่อนที่, ส่วนที่มีการเคลื่อนที่, ชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนที่สัมพันธ์กับชิ้นส่วนอื่นและเงื่อนไขเริ่มต้น เช่น ความเร็วเริ่มต้น, น้ำหนักวัตถุ, แรงโน้มถ่วง เป็นต้น

##### ส่วนที่ไม่เคลื่อนที่ (Ground Parts)

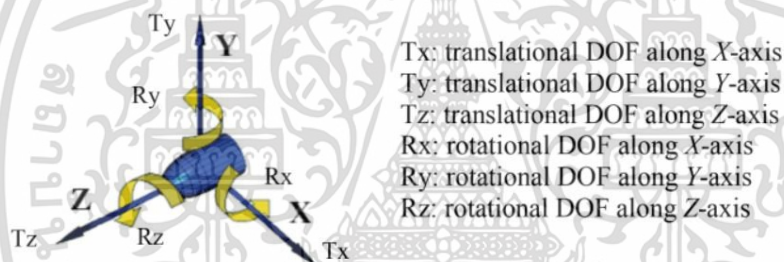
เป็นส่วนที่จะใช้เป็นจุดอ้างอิงการเคลื่อนที่ของส่วนที่มีการเคลื่อนไหว ในแบบจำลองนี้กำหนดให้รางรถไฟเป็น ground parts กำหนดโดยการคลิกขวาที่ชื่อชิ้นส่วนและเลือกคำสั่ง Fix ตามที่แสดงในรูปที่ 3-28 เมื่อตั้งค่าสำเร็จหน้าชื่อชิ้นส่วนที่เป็น ground parts จะมีสัญลักษณ์ (f) ปรากฏขึ้น



รูปที่ 3-28 จุดอ้างอิงหลังใช้คำสั่ง Fix

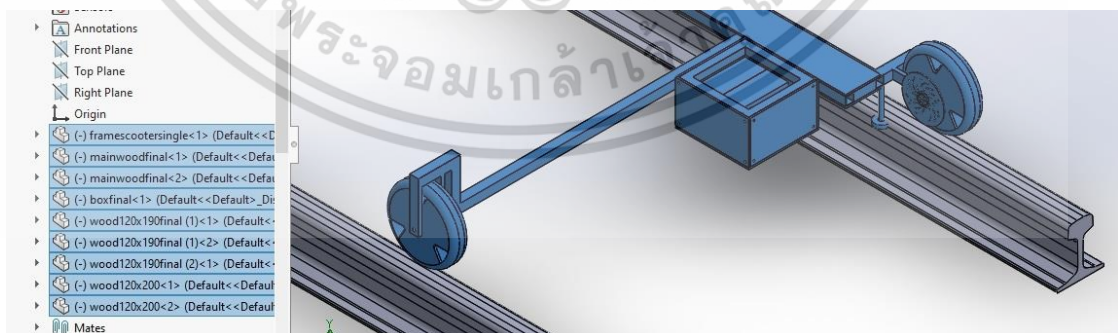
### ส่วนที่เคลื่อนที่ (Moving Parts)

ในที่นี้คือส่วนที่สามารถเคลื่อนที่ได้หรือก็คือส่วนที่ไม่ได้มีการตั้งค่าให้เป็น ground parts โดยสำหรับโปรแกรม *SolidWorks* ส่วนที่เป็น moving parts จะมี DOF (Degree of Freedom) ได้สูงสุด 6 DOF โดยแบ่งเป็น 3 DOF สำหรับการเคลื่อนที่เชิงเส้นและ 3 DOF สำหรับการเคลื่อนที่เชิงมุม ตามที่แสดงในรูปที่ 3-29



รูปที่ 3-29 แสดง DOF ของวัตถุ[10]

ในขณะที่ ground parts จะมี 0 DOF โดยส่วนที่เป็น Moving parts จะมีสัญลักษณ์ (-) แสดงอยู่หน้าชื่อและในแบบจำลองนี้กำหนดให้ทุกส่วนยกเว้นรางเป็น moving parts ตามรูปที่ 3-30











รูปที่ 3-30 การกำหนด moving parts

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้







### 3.10.1.3 Constrains

คือการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างชิ้นงาน เพื่อให้ชิ้นงานที่เป็น moving parts 2 ชิ้น เคลื่อนที่แบบมีความสัมพันธ์กัน สำหรับในโปรแกรม *SolidWork*<sup>®</sup> เรียกว่าการ Mate ชิ้นงาน โดยแบ่งเป็น Standard Mates และ Advanced Mates ตามที่แสดงในตารางที่ 3-1 และ 3-2

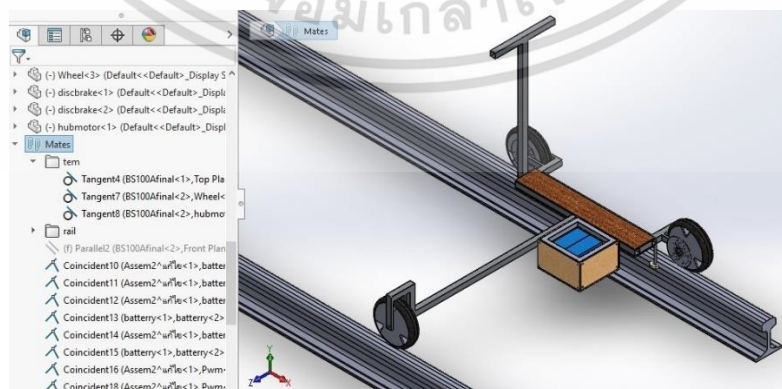
ตารางที่3- 1 แสดง Standard Mate[10]

Standard Mates	Descriptions
Coincident 	Positions selected faces, edges, and planes (in combination with each other or combined with a single vertex) so they share the same infinite plane. Positions two vertices so they touch.
Parallel 	Places the selected items so they remain a constant distance apart from each other.
Perpendicular 	Places the selected items at a 90° angle to each other.
Tangent 	Places the selected items tangent to each other (at least one selection must be a cylindrical, conical, or spherical face).
Concentric 	Places the selections so that they share the same center line.
Lock 	Maintains the position and orientation between two components.
Distance 	Places the selected items with the specified distance between them.
Angle 	Places the selected items at the specified angle to each other.
Default	Place the first part to the default coordinate system in assembly.

ตารางที่3-2 แสดง Advanced Mate[10]

Advanced Mates	Descriptions
Symmetric 	Forces two similar entities to be symmetric about a plane or planar face.
Width 	Centers a tab within the width of a groove.
Path 	Constrains a selected point on a component to a path.
Linear/Linear Coupler 	Establishes a relationship between the translation of one component and the translation of another component.
Limit 	Allows components to move within a range of values for distance and angle mates.
Profile Center 	Automatically center-aligns geometric profiles to each other and fully defines the components.

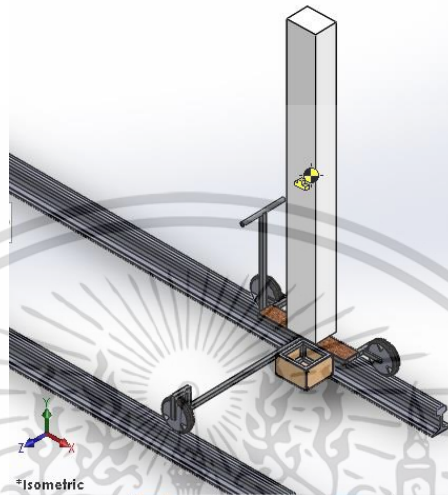
ทำการ mate ส่วนต่างๆของรถเข้าด้วยกันและจัดวางตำแหน่งของรถให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ จากนั้นทำการปิด mate (Suppress) ที่ทำให้ moving parts มีความสัมพันธ์กับ ground parts เพื่อให้รถสามารถเคลื่อนที่ได้ ตามรูปที่ 3-31



รูปที่3-31 แสดง mate ที่ส่วนต่างๆของspeeder

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการสร้างแบบจำลองแทนตัวผู้ขับขี่ โดยสร้างเป็นกล่องสี่เหลี่ยม กว้าง 150 มิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร และสูง 1900 มิลลิเมตร ซึ่งทำให้แบบจำลองมีจุด C.G. สูง 950 มิลลิเมตร เมื่อวัดจากฐาน ซึ่งเท่ากับความสูงของจุด C.G. ชายไทยที่มีความสูง 170 เซนติเมตร ตามที่ได้คำนวณไปในหัวข้อที่ 3.6 โดยกำหนดตำแหน่งของกล่องให้อยู่กลางตัวรถ ซึ่งเป็นตำแหน่งวางเท้าของผู้ขับขี่ ตามที่แสดงในรูปที่ 3-32



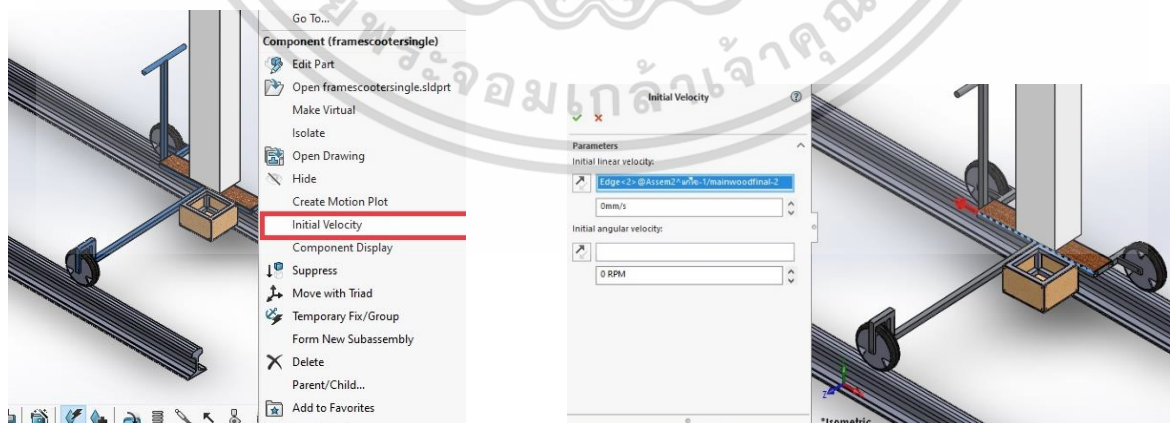
รูปที่ 3- 32 แสดงแบบจำลองตัวรถที่มีผู้โดยสาร

#### 3.10.1.4 Initial Condition (I.C.)

กำหนดให้เป็นการวิเคราะห์กำหนดแบบ Motion Analysis จากนั้นกำหนด I.C. ดังนี้

##### ความเร็วเริ่มต้น

เนื่องจากรถเริ่มวิ่งจากจุดหยุดนิ่ง กำหนดให้รถมีความเร็วเริ่มต้น  $V_x, V_y, V_z$  เท่ากับศูนย์ ตามรูปที่ 3-33

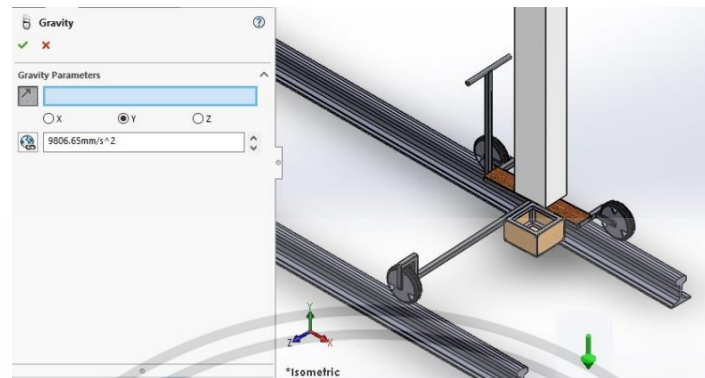


รูปที่ 3-33 การกำหนดความเร็วเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## แรงโน้มถ่วง

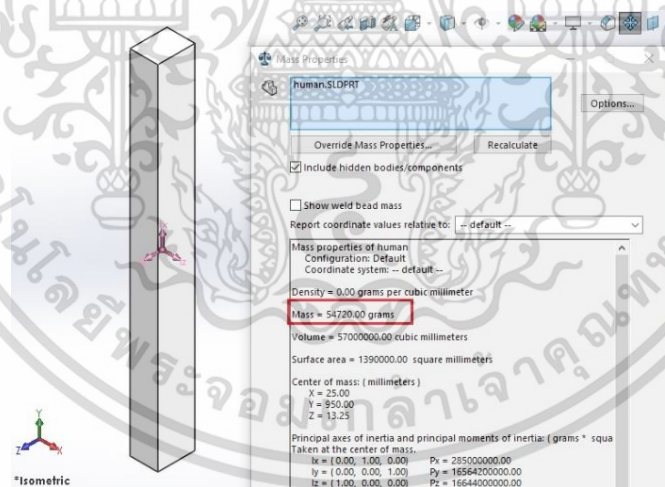
กำหนดมีความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงเท่ากับ  $9.81 \text{ m/s}^2$  ตามที่แสดงในรูปที่ 3-34



รูปที่3- 34 การกำหนดความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

## แรงที่กระทำต่อตัวรถ

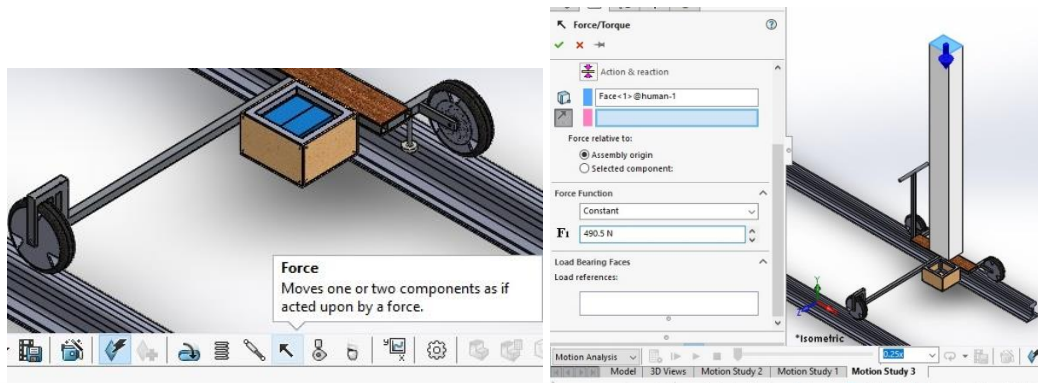
จากการนำกล่องวางไว้ที่ตำแหน่งกลางตัวรถนั้น ทำให้เกิดแรงกระทำอันเนื่องมาจากน้ำหนักของกล่องกระทำต่อตัวรถ โดยได้กำหนดวัสดุของกล่องเป็นยาง ทำให้กล่องมีมวลประมาณ 55 กิโลกรัม ตามที่แสดงในรูปที่ 3-35



รูปที่3- 35 แสดงมวลของกล่องตัวแทนผู้ขับขี่

เนื่องจากต้องการออกแบบให้รองรับน้ำหนักผู้ขับขี่ได้สูงสุด 105 กิโลกรัม แต่กล่องตัวแทนผู้ขับขี่มีมวลเพียง 55 กิโลกรัม จึงกำหนดให้มีแรงขนาด 490.5 นิวตัน กระทำต่อกล่องตัวแทนผู้ขับขี่ ในทิศ  $-y$  ตามที่แสดงในรูปที่ 3-36 ทำให้เสมือนว่ามีแรงอันเนื่องมาจากมวลผู้ขับขี่ 105 กิโลกรัม กระทำต่อตัวรถ

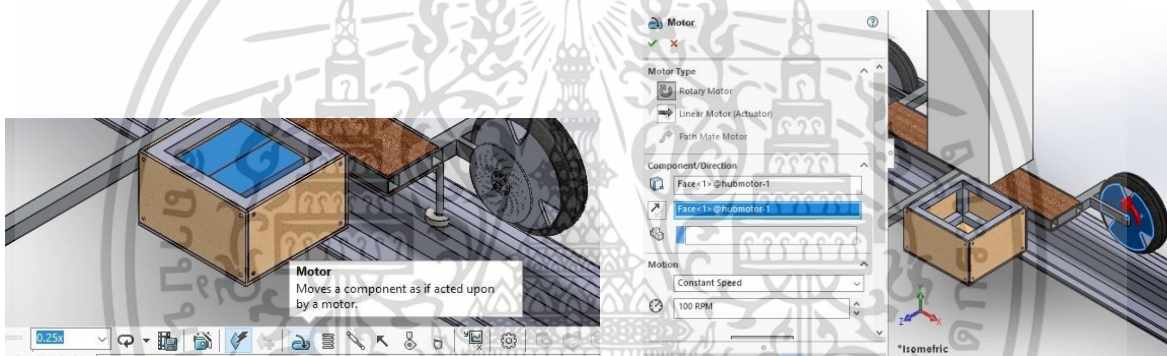
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่3- 36 การกำหนดแรงกระทำที่ตัวรถ

3.10.1.5 Motion Drivers

หรือการกำหนดมอเตอร์เพื่อที่จะกำหนดการเคลื่อนไหวเฉพาะช่วงเวลาของชิ้นงาน โดยกำหนดให้ล้อหลังของสกูตเตอร์เป็นล้อที่ถูกขับด้วยมอเตอร์แกนหมุนที่มีความเร็วรอบคงที่ 200 rpm ตามที่แสดงในรูปที่ 3-37

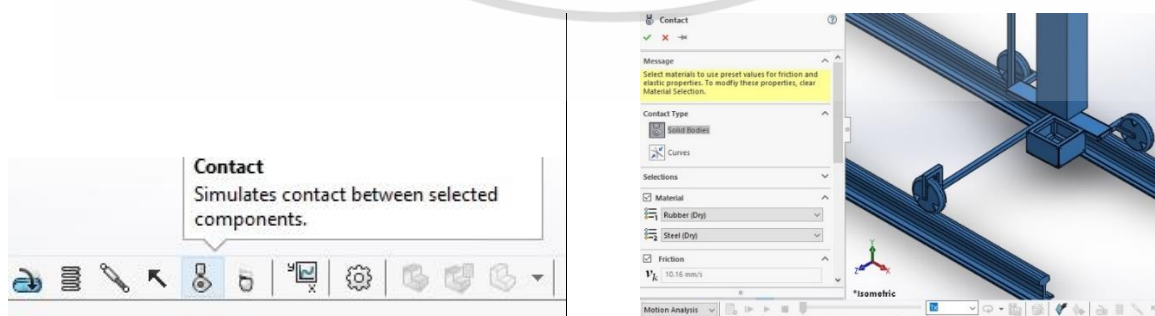


รูปที่3-37 Motion drivers a)

b)

3.10.1.6 การสัมผัส (Contact)

เลือกปุ่ม contact จากแถบเครื่องมือ โดยเลือกการสัมผัสแบบ Solid Bodies จากนั้นเลือกชิ้นงานที่การสัมผัสกันและกำหนดการสัมผัสกันระหว่างล้อกับรางให้เป็นการสัมผัสระหว่างเหล็กกับยางในสภาวะแห้ง โดยมีค่า Restitution Coefficient เท่ากับ 0.8 ดังรูปที่ 3-38

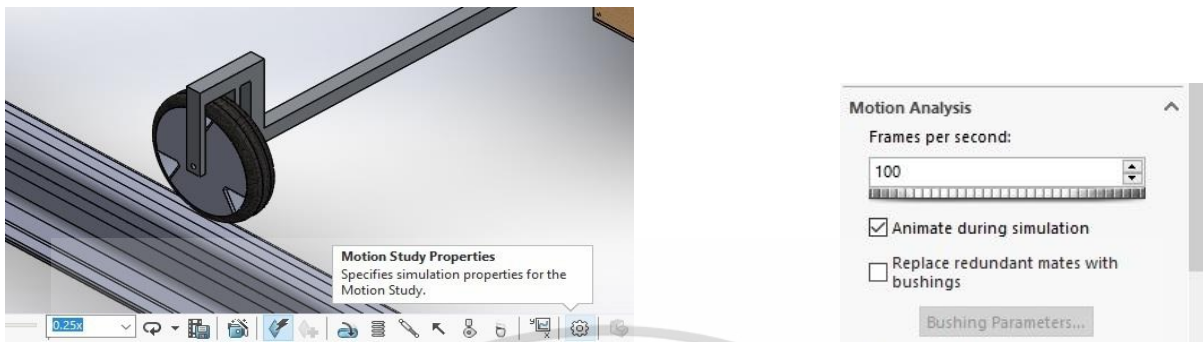


รูปที่ 3-38 แสดงการตั้งค่าcontact

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.10.2 การจำลองการเคลื่อนไหวก (Motion Simulation)

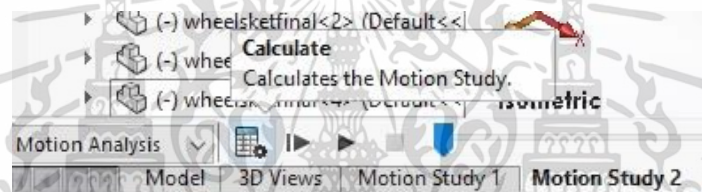
กำหนดความละเอียดของภาพเคลื่อนไหวกเป็น 100 เฟรมต่อวินาที ตามที่แสดงในรูปที่ 3-39



รูปที่3-39 การกำหนดรายละเอียดภาพ a)

b)

กำหนดเวลา 5 วินาทีในการจำลองการเคลื่อนไหวก จากนั้น Run โปรแกรม ตามรูปที่ 3-40



รูปที่3-40 Run โปรแกรมจำลองการเคลื่อนไหวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

#### ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนที่

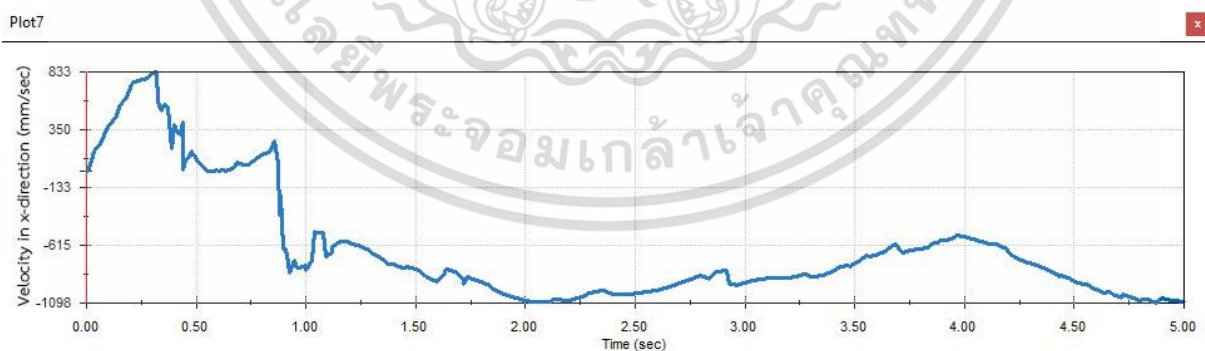
แบบจำลองที่ใช้จำลองการเคลื่อนที่มีทั้งหมด 3 แบบจำลอง คือ แบบที่ 1.สقوطเตอร์ 2 ล้อ 2.สقوطเตอร์แบบมีล้อด้านข้างแต่ไม่มีล้อที่ทำหน้าที่ประคองรถไว้กับราง 3.สقوطเตอร์แบบมีล้อด้านข้างและมีล้อประคอง โดยทั้ง 3 แบบจำลอง มี I.C. เหมือนกัน ได้ผลลัพธ์ ดังนี้

#### 1.สقوطเตอร์ 2 ล้อ

แบบจำลองมีลักษณะเป็นรถสقوطเตอร์ 2 ล้อ วิ่งบนรางเดี่ยว โดยกำหนดให้ตัวรถมีความเร็วเริ่มต้นเป็นศูนย์และอยู่ภายใต้ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง  $9.81 \text{ m/s}^2$  ในทิศ  $-y$  และมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตระหว่างล้อกับรางเท่ากับ 0.3 และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์เท่ากับ 0.25 และมีแรง 1030.05 นิวตัน อันเนื่องมาจากน้ำหนักของผู้ขับขี่กระทำอยู่ที่กลางตัวรถ

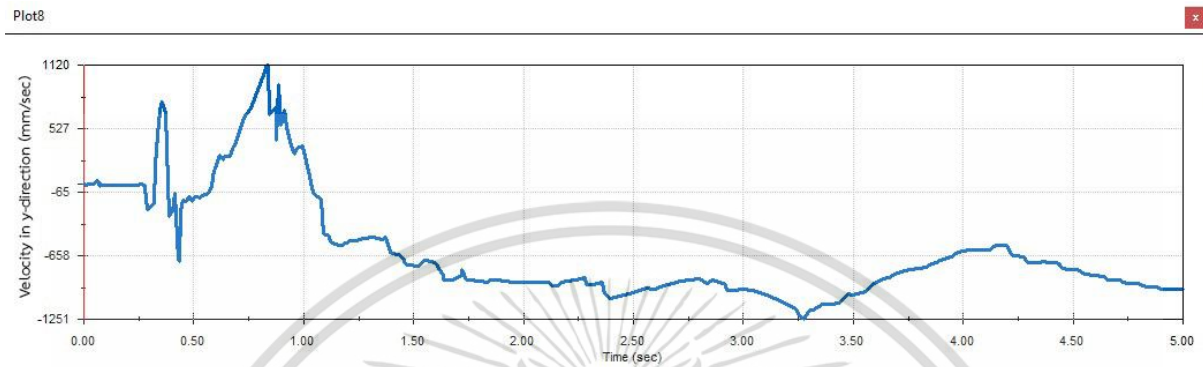
โดยจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมได้ผลลัพธ์ ดังนี้

กราฟความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน  $x$  ของตัวรถ ตามที่แสดงในรูปที่ 4-1 โดยเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน  $x$  ของตัวรถเทียบกับเวลา ตามที่แสดงในรูปที่ 4-1 จะเห็นได้ว่าช่วงวินาทีที่ 0-0.3 รถมีความเร็วเชิงเส้น เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น ช่วงนี้จึงเป็นช่วงที่รถมีความเร่งคงที่ ต่อมาในช่วงหลังวินาทีที่ 0.3 ตัวรถก็มีความเร็วเชิงเส้นลดลง โดยที่ไม่ได้มีการเบรก



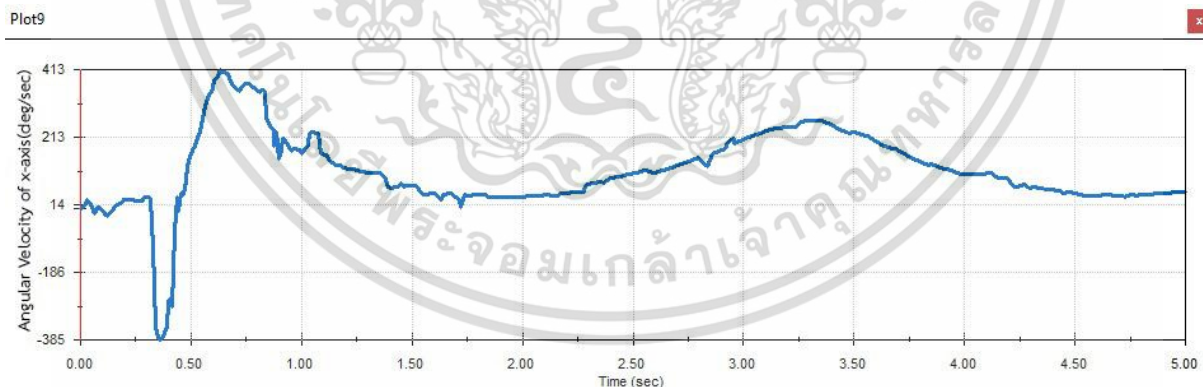
รูปที่ 4- 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน  $x$  เทียบกับเวลาของแบบจำลองที่ 1

กราฟความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน  $y$  ของตัวรถ ตามที่แสดงในรูปที่ 4-2 โดยเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน  $y$  ของตัวรถเทียบกับเวลา ตามที่แสดงในรูปที่ 4-2 จะเห็นได้ว่าช่วงวินาทีที่ 0-0.3 รถมีความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน  $y$  เป็น 0 แสดงว่ารถไม่มีการส่ายในช่วงนี้ ต่อมาในช่วงหลังวินาทีที่ 0.3 ความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน  $y$  ของตัวรถได้เพิ่มขึ้น ในระยะเวลาสั้นๆ



รูปที่ 4- 2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน  $y$  เทียบกับเวลาของแบบจำลองที่ 1

กราฟความเร็วเชิงมุมรอบแกน  $x$  ของตัวรถ ตามที่แสดงในรูปที่ 4-3 โดยเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมรอบแกน  $x$  ของตัวรถเทียบกับเวลา ตามที่แสดงในรูปที่ 4-3 จะเห็นได้ว่าช่วงวินาทีที่ 0-0.3 รถมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมรอบแกน  $x$  น้อยมากและมีค่าใกล้เคียง 0 แสดงว่ารถไม่มีการโคลงในช่วงนี้ ต่อมาในช่วงหลังวินาทีที่ 0.3 รถมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมรอบแกน  $x$  ในระยะเวลาสั้นๆ

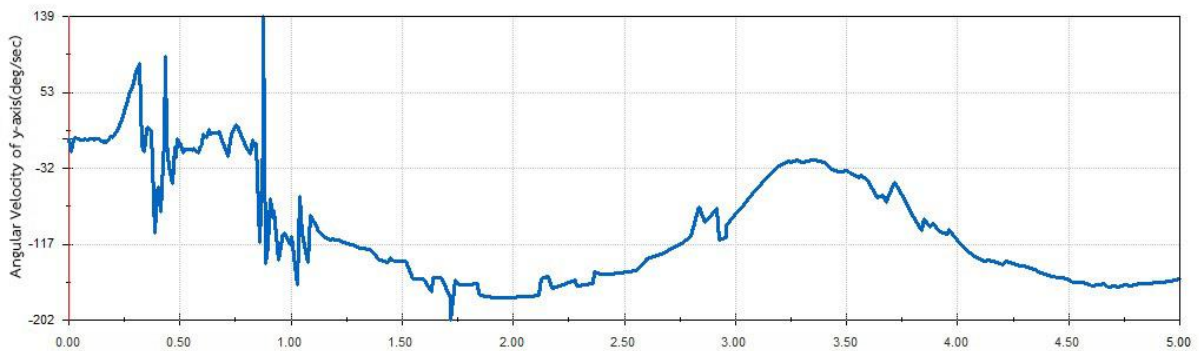


รูปที่ 4- 3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมรอบแกน  $x$  เทียบกับเวลาของแบบจำลองที่ 1

กราฟความเร็วเชิงมุมรอบแกน  $y$  ของตัวรถ ตามที่แสดงในรูปที่ 4-4 โดยเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมรอบแกน  $y$  ของตัวรถเทียบกับเวลา ตามที่แสดงในรูปที่ 4-4 จะเห็นได้ว่าช่วงวินาทีที่ 0-0.3 รถมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมรอบแกน  $y$  น้อยมากและมีค่าใกล้เคียง 0 ต่อมาในช่วงหลังวินาทีที่ 0.3 รถมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมรอบแกน  $y$  โดยมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

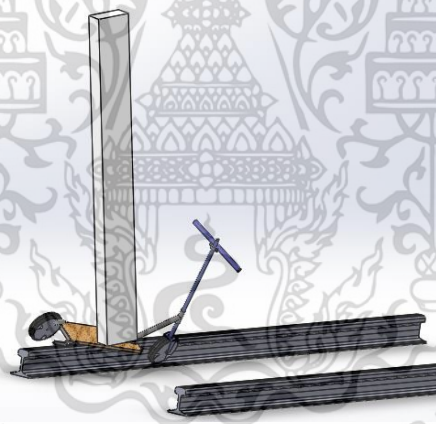
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Plot10



รูปที่ 4- 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมรอบแกน y เทียบกับเวลาของแบบจำลองที่ 1

จากข้อมูลที่ได้แสดงในข้างต้น จึงสรุปได้ว่าในช่วงวินาทีที่ 0-0.3 ตัวรถวิ่งบนรางโดยมีการส่ายของรถเล็กน้อยและตัวรถได้เริ่มล้มประมาณวินาทีที่ 0.3 โดยสาเหตุคาดว่ามาจากกรณีที่ล้อมีความกว้างที่น้อยเมื่อเทียบกับขนาดของตัวรถ ทำให้จุด C.G. มีระยะห่างจากจุดรองรับน้ำหนักน้อยมาก ส่งผลให้รถไม่มีเสถียรภาพตามที่แสดงในรูปที่ 4-5



รูปที่ 4- 5 ผลการวิเคราะห์แบบจำลองที่ 1

## 2.สกูตเตอร์แบบมีล้อด้านข้างแต่ไม่มีล้อประกอบ

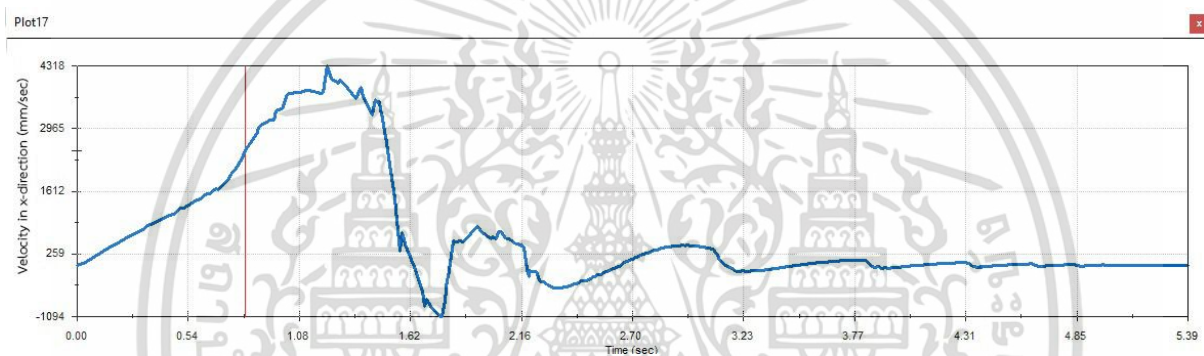
แบบจำลองนี้มีลักษณะคล้ายกับแบบจำลองที่ 1 แต่มีการเพิ่มกล่องตัวแทนผู้ขับขี่ ซึ่งมีจุดศูนย์กลางมวลสูง 95 เซนติเมตร ซึ่งเท่ากับความสูงของจุด C.G. ชายไทยที่มีความสูง 170 เซนติเมตร ขึ้นมา โดยวางไว้ที่ตำแหน่งกลางตัวรถซึ่งเป็นตำแหน่งวางเท้าของผู้ขับขี่ และมีการเพิ่มล้อขึ้นมาอีก 1 ล้อ โดยมีลักษณะคล้ายรถซาเล้งพ่วงข้าง โดยกำหนดให้ตัวรถมีความเร็วเริ่มต้นเป็นศูนย์และอยู่ภายใต้ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง  $9.81 \text{ m/s}^2$  ในทิศ  $-y$  และมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตระหว่างล้อกับรางเท่ากับ 0.3 และสัมประสิทธิ์แรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เสียดทานจลน์เท่ากับ 0.25 และมีแรง 1030.05 นิวตัน อันเนื่องมาจากน้ำหนักของผู้ขับขี่กระทำอยู่ที่กลางตัวรถ

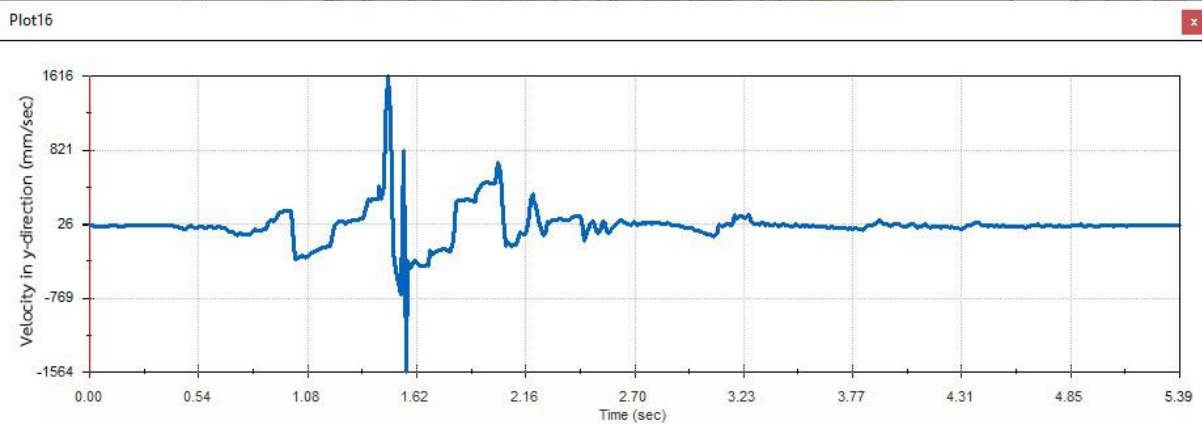
โดยจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมได้ผลลัพธ์ ดังนี้

กราฟความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน x ของตัวรถ ตามที่แสดงในรูปที่ 4-6 โดยเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน x ของตัวรถเทียบกับเวลา ตามที่แสดงในรูปที่ 4-6 จะเห็นว่าช่วงวินาทีที่ 0-0.8 รถมีความเร็วเชิงเส้น เพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น ช่วงนี้จึงเป็นช่วงที่รถมีความเร่งคงที่ ต่อมาในช่วงหลังวินาทีที่ 0.8-1.2 ตัวรถก็มีความเร็วเพิ่มขึ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยที่ไม่ได้มีการเพิ่มความเร่งของมอเตอร์ จึงคาดว่าเกิดมาจากการที่รถเริ่มตกราง และในวินาทีที่ 1.2 ความเร็วในแนวแกน x ของรถก็ได้ลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นช่วงที่รถล้มลง



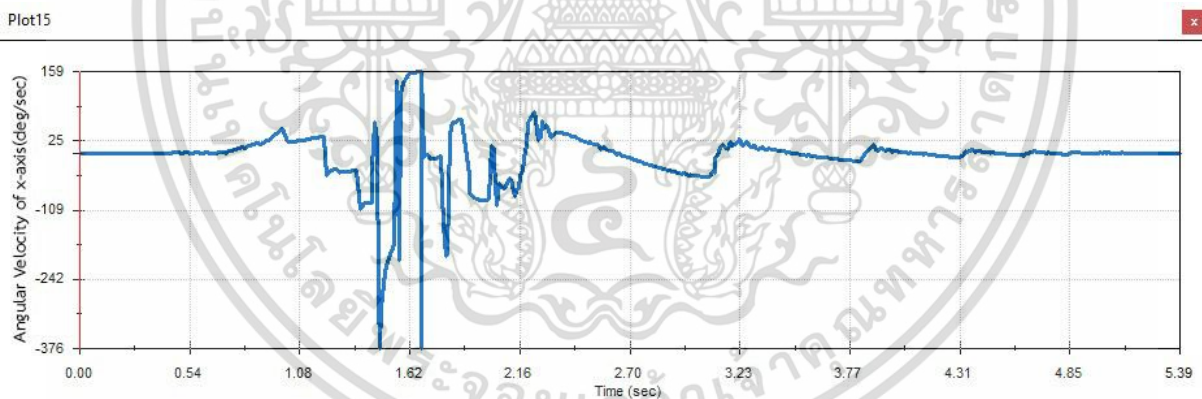
รูปที่ 4- 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน x กับเวลาของแบบจำลองที่ 2

กราฟความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน y ของตัวรถ ตามที่แสดงในรูปที่ 4-7 โดยเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน y ของตัวรถเทียบกับเวลา ตามที่แสดงในรูปที่ 4-7 จะเห็นว่าช่วงวินาทีที่ 0-0.8 รถมีความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน y ค่อนข้างคงที่แต่ไม่เป็นศูนย์ แสดงว่ารถมีการส่าย ในช่วงนี้ ต่อมาในช่วงหลังวินาทีที่ 0.8 ความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน y ของตัวรถได้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างผันผวน โดยมีค่าสูงที่สุดประมาณวินาทีที่ 1.2



รูปที่ 4- 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน y กับเวลาของแบบจำลองที่ 2

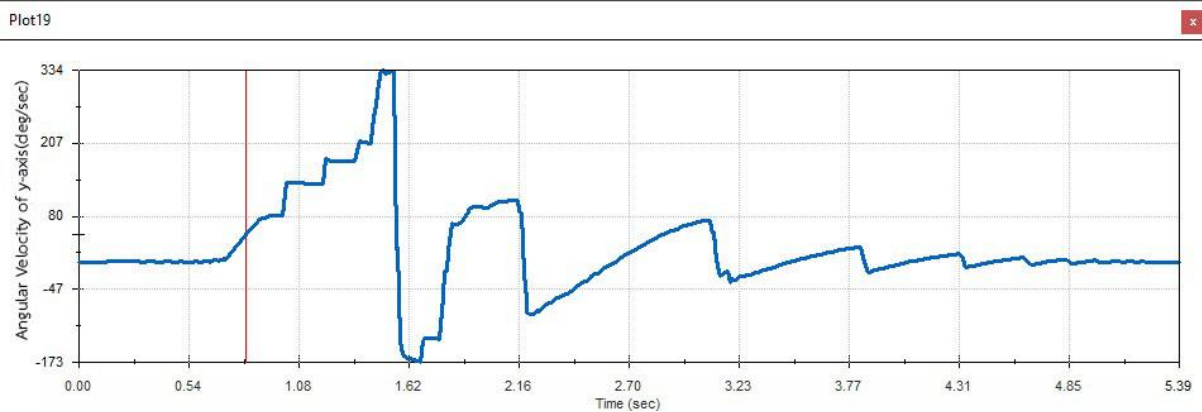
กราฟความเร็วเชิงมุมรอบแกน x ของตัวรถ ตามที่แสดงในรูปที่ 4-8 โดยเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมรอบแกน x ของตัวรถเทียบกับเวลา ตามที่แสดงในรูปที่ 4-8 จะเห็นได้ว่าช่วงวินาทีที่ 0-0.8 รถมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมรอบแกน x น้อยมากแต่ไม่เป็นศูนย์ แสดงว่ารถมีการโคลงในช่วงนี้ ต่อมาในช่วงหลังวินาทีที่ 0.8-1.2 รถมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมรอบแกน x ในระยะเวลาสั้นๆ และมีค่าสูงที่สุดในวินาทีที่ 1.2



รูปที่ 4- 8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมรอบแกน x กับเวลาของแบบจำลองที่ 2

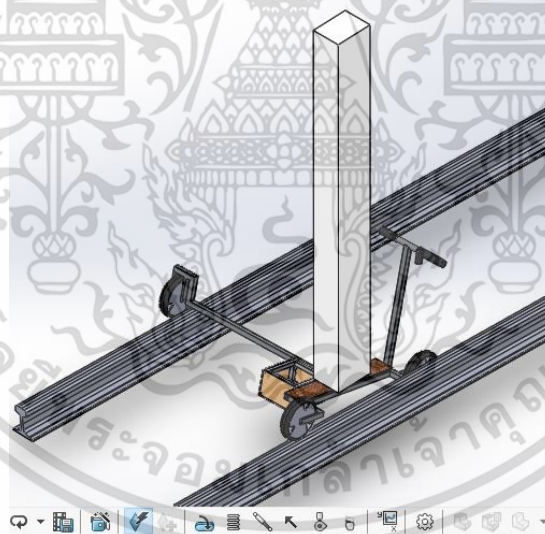
กราฟความเร็วเชิงมุมรอบแกน y ของตัวรถ ตามที่แสดงในรูปที่ 4-9 โดยเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมรอบแกน y ของตัวรถเทียบกับเวลา ตามที่แสดงในรูปที่ 4-9 จะเห็นได้ว่าช่วงวินาทีที่ 0-0.8 รถมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมรอบแกน y น้อยมากและมีค่าใกล้เคียงศูนย์ ต่อมาในช่วงหลังวินาทีที่ 0.8 รถมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมรอบแกน y โดยมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4- 9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมรอบแกน y กับเวลาของแบบจำลองที่ 2

จะเห็นได้ว่าแบบจำลองที่ 2 จะมีระยะเวลาที่รถจะล้มนานกว่าแบบจำลองที่ 1 โดยสามารถวิ่งบนรางได้ในช่วงวินาทีที่ 0-0.8 เนื่องจากมีล้อที่เพิ่มเข้ามา ส่งผลให้จุด C.G. มีระยะห่างจากจุดรับน้ำหนักหรือล้อมากกว่าแบบจำลองที่ 1 ทำให้รถมีเสถียรภาพ ส่งผลให้รถสามารถวิ่งบนทางรถไฟได้นานกว่าแบบจำลองที่ 1 แต่เนื่องจากไม่มีส่วนที่ยึดรถไว้กับรางทำให้รถไม่สามารถวิ่งไปตามทางได้และเกิดการตกวางในที่สุด ตามที่แสดงในรูปที่ 4-10

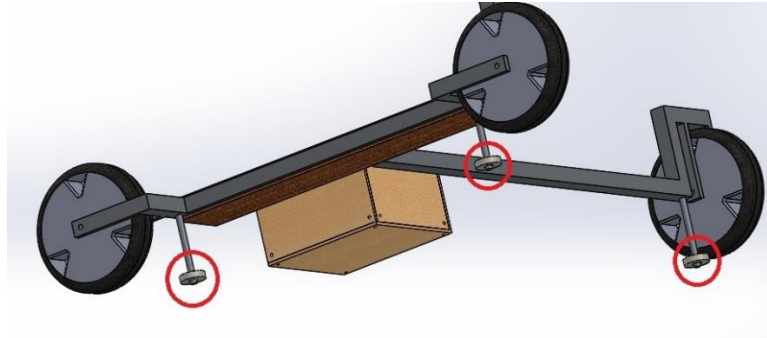


รูปที่ 4-10 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนไหวแบบจำลองที่ 2

### 3. สกอตเตอร์แบบมีล้อด้านข้างและมีล้อประคอง

แบบจำลองนี้มีลักษณะเหมือนแบบจำลองที่ 2 แต่มีการเพิ่มล้อด้านข้างที่มีหน้าที่ในการประคองรถให้สามารถวิ่งไปตามทางรถไฟได้ขึ้นมา ตามที่แสดงในรูปที่ 4-11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

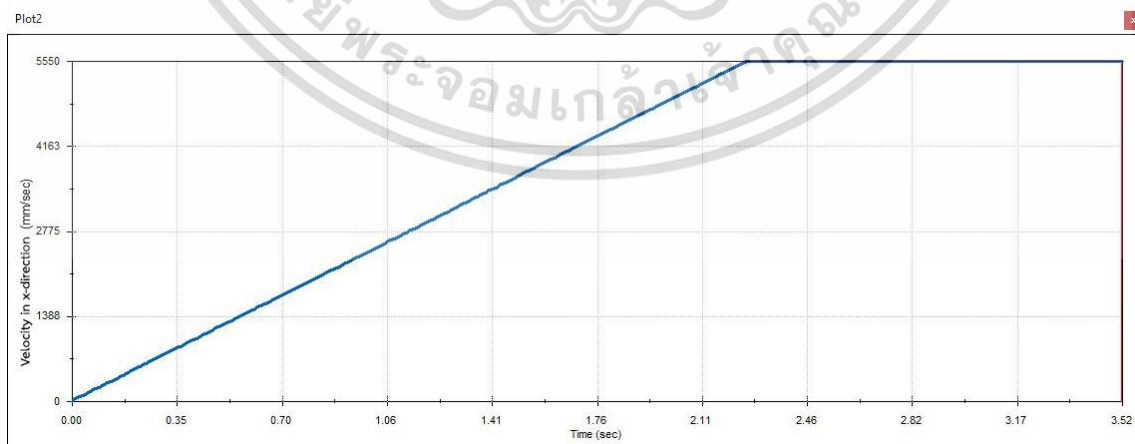


รูปที่ 4-11 สกอตเตอร์แบบมีล้อด้านข้างและมีล้อประกอบ

โดยกำหนดให้ตัวรถมีความเร็วเริ่มต้นเป็นศูนย์และอยู่ภายใต้ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง  $9.81 \text{ m/s}^2$  ในทิศ  $-y$  และมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสถิตระหว่างล้อกับรางเท่ากับ 0.3 และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจลน์เท่ากับ 0.25 และมีกล่องตัวแทนผู้ขับขี่อยู่ที่กลางตัวรถ ส่งผลให้มีแรง 1030.05 นิวตัน อันเนื่องมาจากน้ำหนักของกล่องตัวแทนผู้ขับขี่กระทำอยู่ที่กลางตัวรถ

โดยจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมได้ผลลัพธ์ ดังนี้

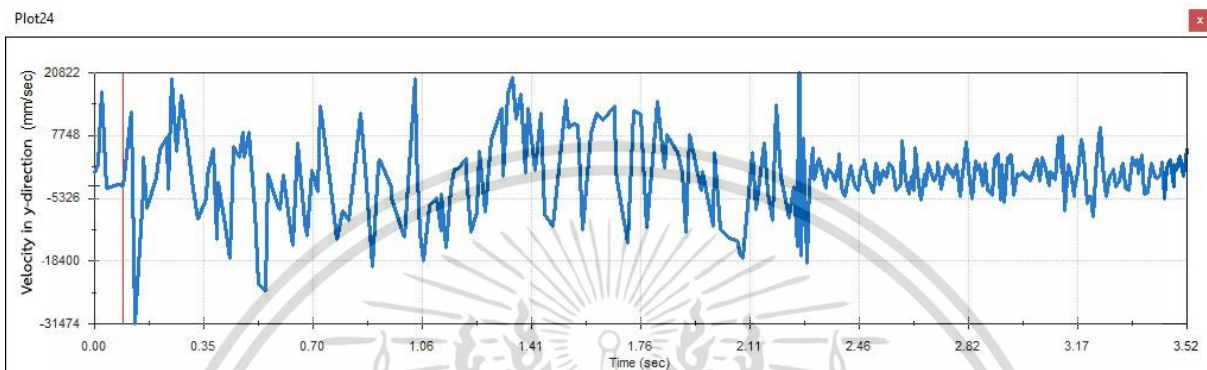
ผลของกราฟความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน  $x$  ของล้อขับ ตามที่แสดงในรูปที่ 4-12 โดยเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน  $x$  ของล้อขับเทียบกับเวลา ตามที่แสดงในกราฟรูปที่ 4-12 จะเห็นได้ว่าล้อขับมีความเร็วเชิงเส้นเพิ่มขึ้นแบบเส้นตรง ในช่วงวินาทีที่ 0-2.3 ช่วงนี้จึงเป็นช่วงที่ล้อขับมีความเร่งคงที่ โดยความเร็วจะเพิ่มขึ้นจนถึง  $5550 \text{ mm/s}$  หรือประมาณ  $20 \text{ km/h}$  ซึ่งเป็นความเร็วสูงสุดของรถตามที่ได้ออกแบบไว้ ต่อมาในช่วงหลังวินาทีที่ 2.3 ล้อขับก็มีความเร็วเชิงเส้นคงตัว ที่  $5550 \text{ mm/s}$  เป็นช่วงที่รถวิ่งด้วยความเร็วสูงสุด



รูปที่ 4- 12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน  $x$  กับเวลาของแบบจำลองที่ 3

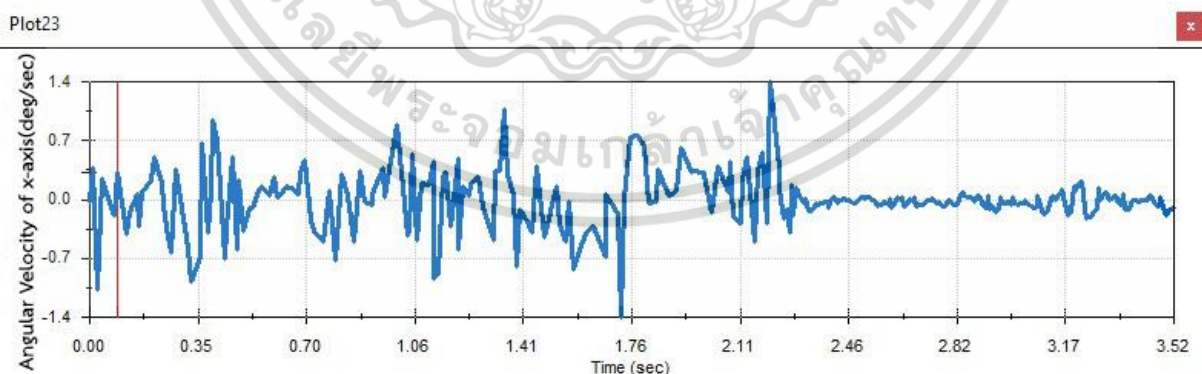
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน y ของตัวรถ ตามที่แสดงในรูปที่ 4-13 โดยเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน y ของตัวรถเทียบกับเวลา ตามที่แสดงในรูปที่ 4-13 จะเห็นว่าช่วงวินาทีที่ 0-2.3 รถมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน y ผันผวนอย่างมาก แสดงว่ารถมีการส่ายอย่างมากในช่วงนี้ ต่อมาในช่วงหลังวินาทีที่ 2.3 ความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน y ของตัวรถได้มีการเปลี่ยนแปลงน้อยลงกว่าช่วงแรก



รูปที่ 4- 13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน y กับเวลาของแบบจำลองที่ 3

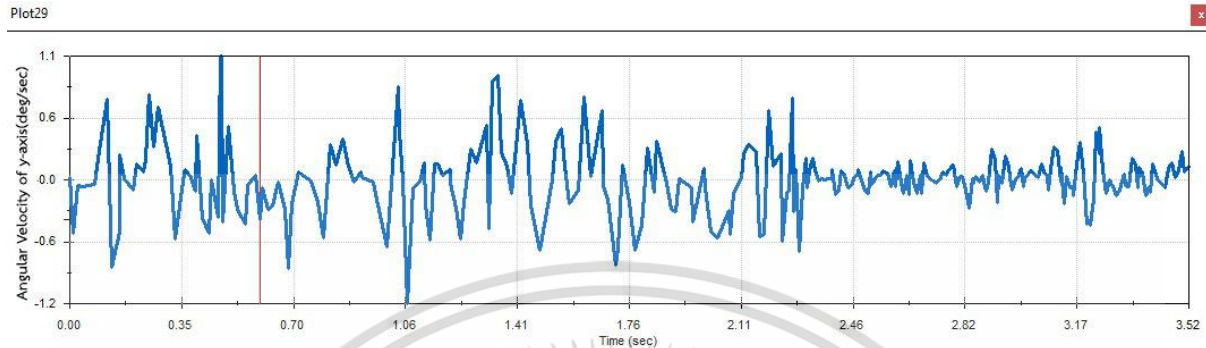
กราฟความเร็วเชิงมุมรอบแกน x ของตัวรถ ตามที่แสดงในรูปที่ 4-14 โดยเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมรอบแกน x ของตัวรถเทียบกับเวลา ตามที่แสดงในรูปที่ 4-14 จะเห็นว่าช่วงวินาทีที่ 0-2.3 รถมีอาการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมรอบแกน x ผันผวนอย่างมาก แสดงว่ารถมีการโคลงสูงในช่วงนี้ ต่อมาในช่วงหลังวินาทีที่ 2.3 รถมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมรอบแกน x น้อยมากและมีค่าใกล้เคียงศูนย์ แสดงว่ารถมีการโคลงเล็กน้อยในช่วงนี้



รูปที่ 4- 14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมรอบแกน x กับเวลาของแบบจำลองที่ 3

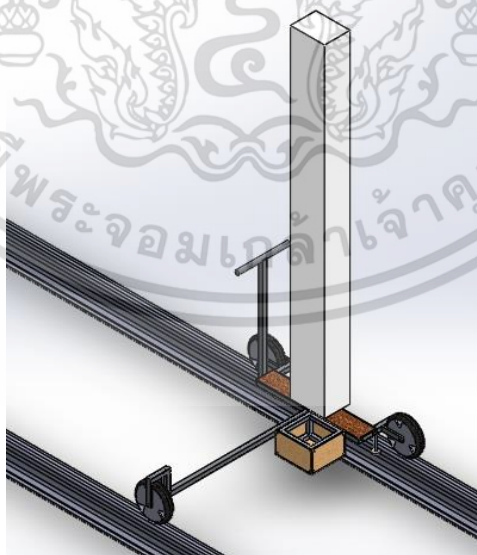
กราฟความเร็วเชิงมุมรอบแกน y ของตัวรถ ตามที่แสดงในรูปที่ 4-15 โดยเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมรอบแกน y ของตัวรถเทียบกับเวลา ตามที่แสดงในรูปที่ 4-15 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่นเดียวกับกราฟความเร็วเชิงมุมรอบแกน x ของตัวรถ จะเห็นได้ว่าช่วงวินาทีที่ 0-2.3 รถมีอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมรอบแกน y ผันผวนอย่างมาก และในช่วงหลังวินาทีที่ 2.3 รถมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมรอบแกน y น้อย



รูปที่ 4- 15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมรอบแกน y กับเวลาของแบบจำลองที่ 3

จะเห็นได้ว่าในแบบจำลองที่ 3 ความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน x ของรถเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นและคงที่ ที่ความเร็วสูงสุดโดยไม่มี การผันผวนของความเร็วเหมือนในแบบจำลองที่ 1 และ 2 และมีความเร็วเชิงเส้นในแนวแกน y เปลี่ยนแปลงตลอดการเคลื่อนที่ เนื่องในขณะ ที่เคลื่อนที่ล้อด้านข้างที่ช่วยประคองให้ตัวรถสามารถวิ่งไปตามทางรถไฟ ได้ชนกับรางทำให้ตัวรถเกิดการส่ายขึ้น จึงสรุปได้ว่าในแบบจำลองที่ 3 ตัวรถสามารถทำความเร็วสูงสุดที่ 20 km/h และวิ่งบนทางรถไฟได้โดยไม่ตกราง ตามที่แสดงในรูปที่ 4-16



รูปที่ 4-16 ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนไหวแบบจำลองที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

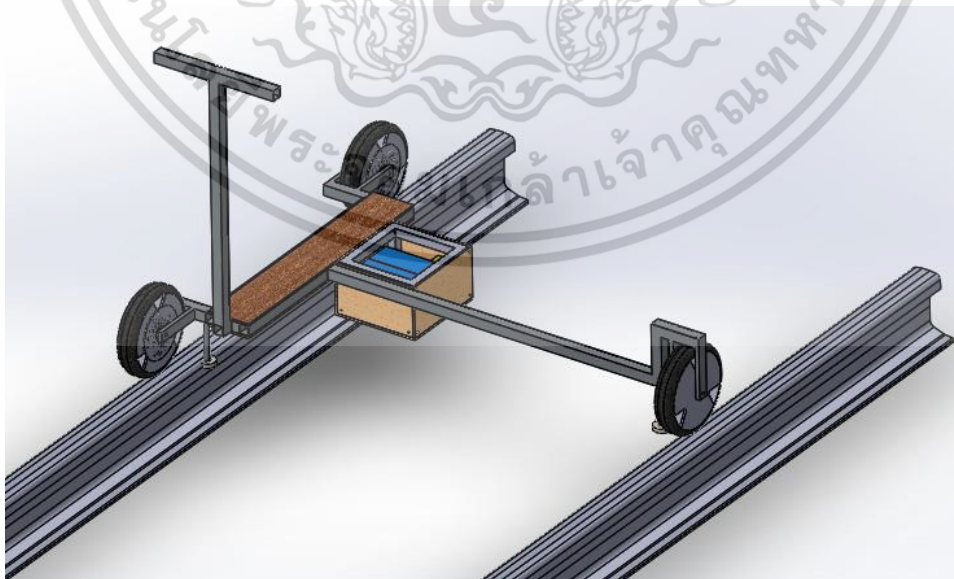
## บทที่ 5

### สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

จากการออกแบบและคำนวณในบทที่ 3 และ 4 ได้รถตรวจทางรถไฟน้ำหนักรถเบา ตามที่แสดงในรูป 5-1 โดยใช้เหล็กแป๊ปเหลี่ยมคุณภาพ STKR400 ตามมาตรฐานมอก. ขนาด 1x1 นิ้ว (25x25 มิลลิเมตร) เป็นวัสดุในการสร้างโครงรถ ด้านการขับเคลื่อนสามารถขับเคลื่อนได้ 2 วิธี คือ 1.อาศัยแรงทางกลจากผู้ขับเคลื่อนที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า โดยการที่ผู้ขับเคลื่อนใช้เท้าไถลกับรางเพื่อให้เกิดแรงส่งให้รถวิ่งไปข้างหน้าและ 2.ใช้การส่งกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้าแบบที่ใช้ในรถสกูตเตอร์มาขับเคลื่อนล้อหลังทำให้รถเกิดการเคลื่อนที่ โดยใช้มอเตอร์กระแสตรงแบบคัมล้อ(Hub Motor) ขนาด 350 W 24 V แรงบิดสูงสุด 5 Nm ความเร็วรอบ 930 rpm มีอัตราทด 1:1 ใช้แบตเตอรี่ตะกั่วกรดแบบ Deep cycle ขนาด 12 V 7Ah จำนวน 2 ลูก ต่ออนุกรมกันเป็นแหล่งพลังงานในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า สำหรับเบรกใช้ชุดดิสเบรกของรถสกูตเตอร์ติดตั้งที่ล้อหน้าและล้อหลังของรถ

สำหรับน้ำหนักบรรทุกกับแบตเตอรี่หนักประมาณ 15 กิโลกรัม ซึ่งเป็นน้ำหนักที่สามารถเคลื่อนย้ายได้ด้วยคน 1 คนและมีน้ำหนักเบาว่าเมื่อเทียบกับรถยนต์ราง ซึ่งเป็นรถตรวจทางเบาที่มีขนาดเล็กที่สุดของ รฟท. โดยรถยนต์รางจะมีน้ำหนักประมาณ 80 กิโลกรัม ทำให้จำเป็นต้องใช้กำลังคนไม่ต่ำกว่า 2 คนในการเคลื่อนย้าย

ด้านระยะทางในการใช้งาน มีระยะทางใช้งานสูงสุด 10 กิโลเมตรต่อการชาร์จแบตเตอรี่เต็มหนึ่งครั้ง ซึ่งเป็นระยะทางที่สั้นกว่ารถยนต์รางของ รฟท. โดยรถยนต์รางมีระยะทางรับผิดชอบ 30 กิโลเมตรต่อการตรวจทางรถไฟหนึ่งครั้ง



รูปที่ 5- 1 แบบ 3D ของรถตรวจทางรถไฟน้ำหนักรถเบา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อเสนอแนะ

ควรสร้างชิ้นงานและนำไปทดสอบวิ่งบนทางรถไฟจริง เพื่อทดสอบว่าตัวรถสามารถใช้งานได้ตามที่ได้ ออกแบบไว้หรือไม่และจะได้ทราบว่าปัญหาใดเกิดขึ้นบ้างในการใช้งานจริงเพื่อที่จะได้ทำการแก้ไขปรับปรุงต่อไป เนื่องจากในการใช้งานจริงจะมีปัจจัยหลายๆอย่างที่เกี่ยวข้อเพิ่มเข้ามา ซึ่งการวิเคราะห์การเคลื่อนไหวด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์นั้นอาจไม่ครอบคลุมถึงปัจจัยเหล่านั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

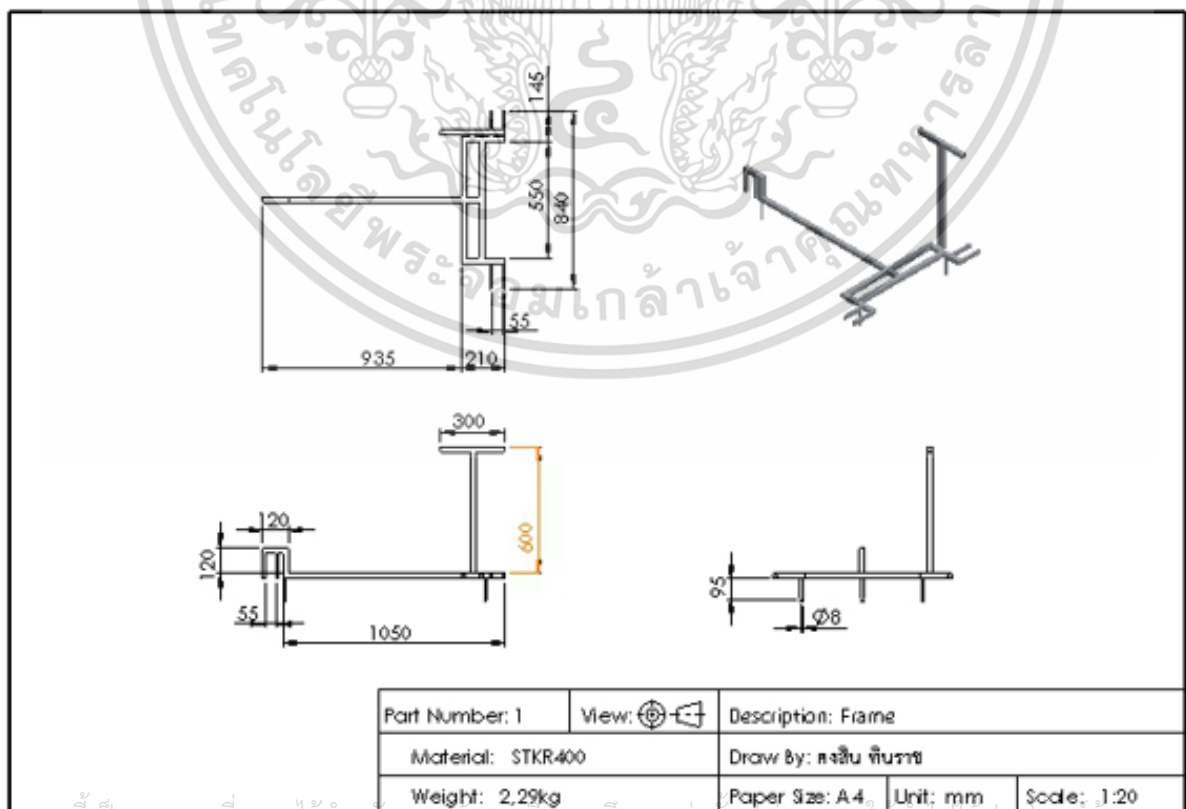
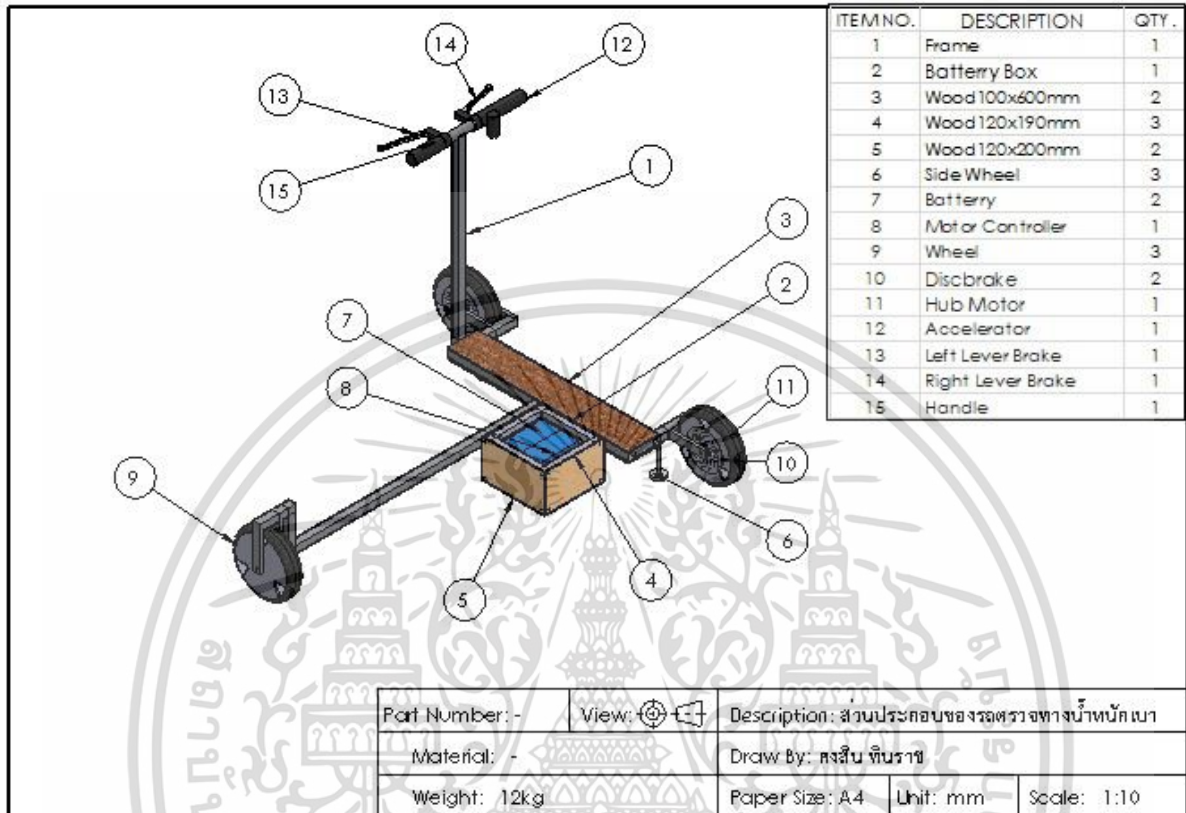
## บรรณานุกรม

- [1] วิศิษฐ์ศักดิ์ บัวระภา, สุชาติ ภูมิทองเงิน, “ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การออกแบบสร้างและทดสอบรถสามล้อขนาดเล็กโดยใช้เครื่องยนต์ 4 จังหวะ”, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2548
- [2] จักรกฤษณ์ เคลือบวัง, วสันต์ ยอดทัพ, สุนัน บุญมา, “ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การพัฒนารถไฟฟ้าสำหรับงานส่งเอกสารภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาตาก”, วิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก
- [3] Dr Hugh Hunt (2006) *Bicycles are not held up by the gyroscopic effect*, Available at: <http://www2.eng.cam.ac.uk/~hemh1/gyrobike.htm> (Accessed:28thNovember2019).
- [4] David E. H. Jones (1970) *The stability of the bicycle. feature article* [Online]. Available at: [http://www.phys.lsu.edu/faculty/gonzalez/Teaching/Phys7221/vol59no9p51\\_56.pdf](http://www.phys.lsu.edu/faculty/gonzalez/Teaching/Phys7221/vol59no9p51_56.pdf) (Accessed: 28th November).
- [5] เจน บุญซื่อ (2554) ความรู้เบื้องต้นวิศวกรรมรถไฟ, พิมพ์ครั้งที่ 1., ห้างหุ้นส่วนจำกัด แฉงไทย: .
- [6] door Ivan Yevhenovich SHEVTSOV (2008) *Wheel/Rail Interface Optimisation*, 1 edn., The Netherlands: I.Y. Shevtsov.
- [7] มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม(มอก.) (2537) *เหล็กโครงสร้างรูปพรรณรีดร้อน*, กรุงเทพฯ : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.
- [8] วรสิทธิ์ อึ้งภากรณ์และชาญ ถนัดงาน (2537) *การออกแบบเครื่องจักรกล เล่ม1*, : ซีเอ็ด ยูเคชั่น จำกัด.
- [9] J. Keith Nisbeth and Richard G. Budynas: “Mechanical Engineering Design” ,McGraw-Hill, 2008
- [10] J. Ed Akin: “Finite Element Analysis Concepts Via Solidworks” ,World Scientific, 2009
- [11] สุธี โอบารุทธีนันท์: “ไฟไนต์เอลิเมนต์กับความผิดพลาดในการออกแบบผลิตภัณฑ์” ,ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
- [12] Parkin, John Rotheram, Jonathon (2010) 'Design speeds and acceleration characteristics of bicycle traffic for use in planning, design and appraisal', *Transport Policy*, 17(0967-070X), pp. 335-341.
- [13] Paul Davidovits, in *Physics in Biology and Medicine (Fifth Edition)*, 2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

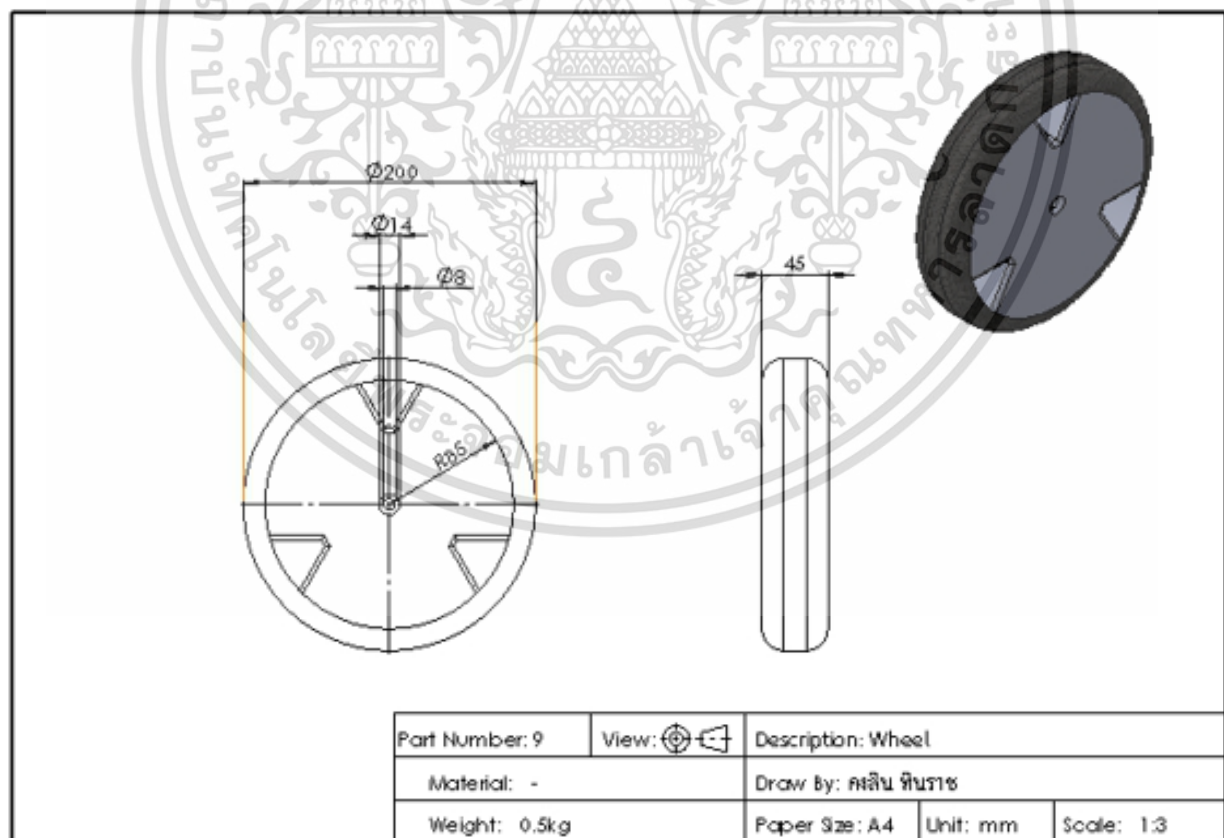
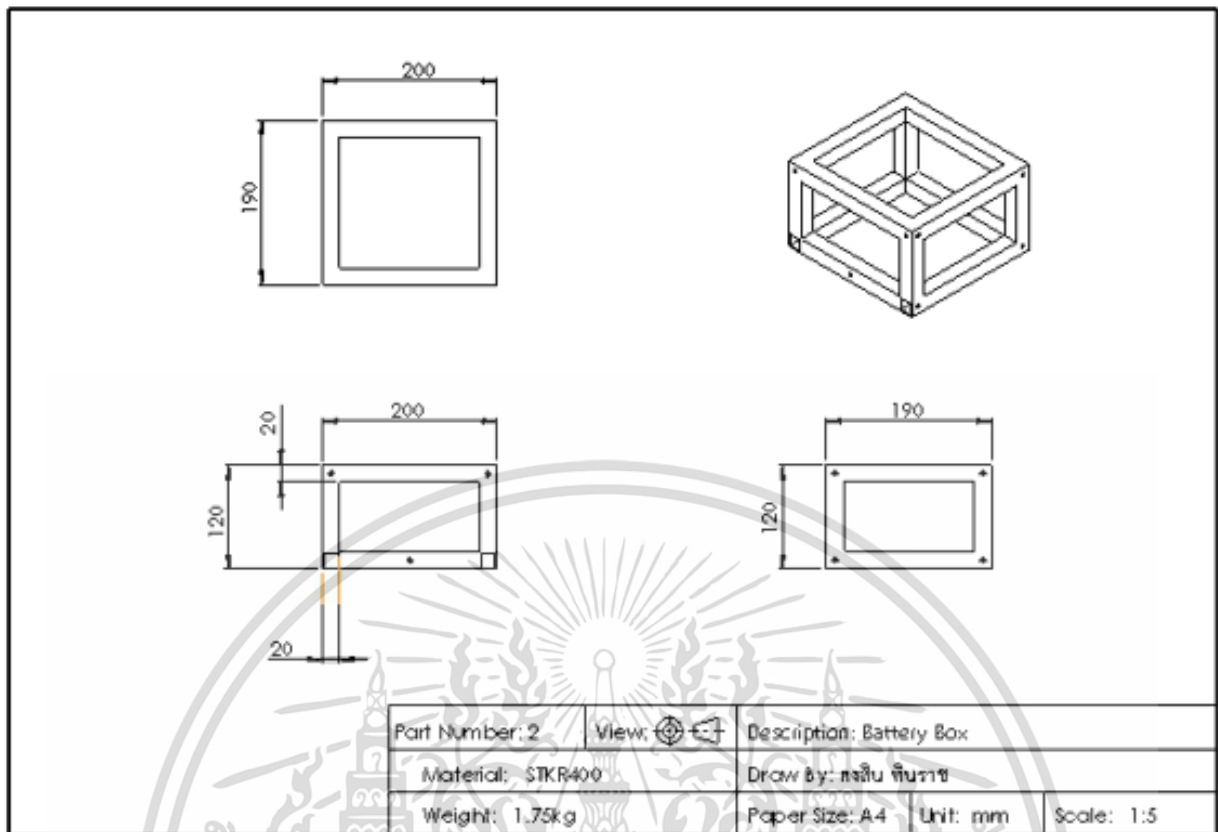
## ภาคผนวก

### ส่วนประกอบของตัวรถ

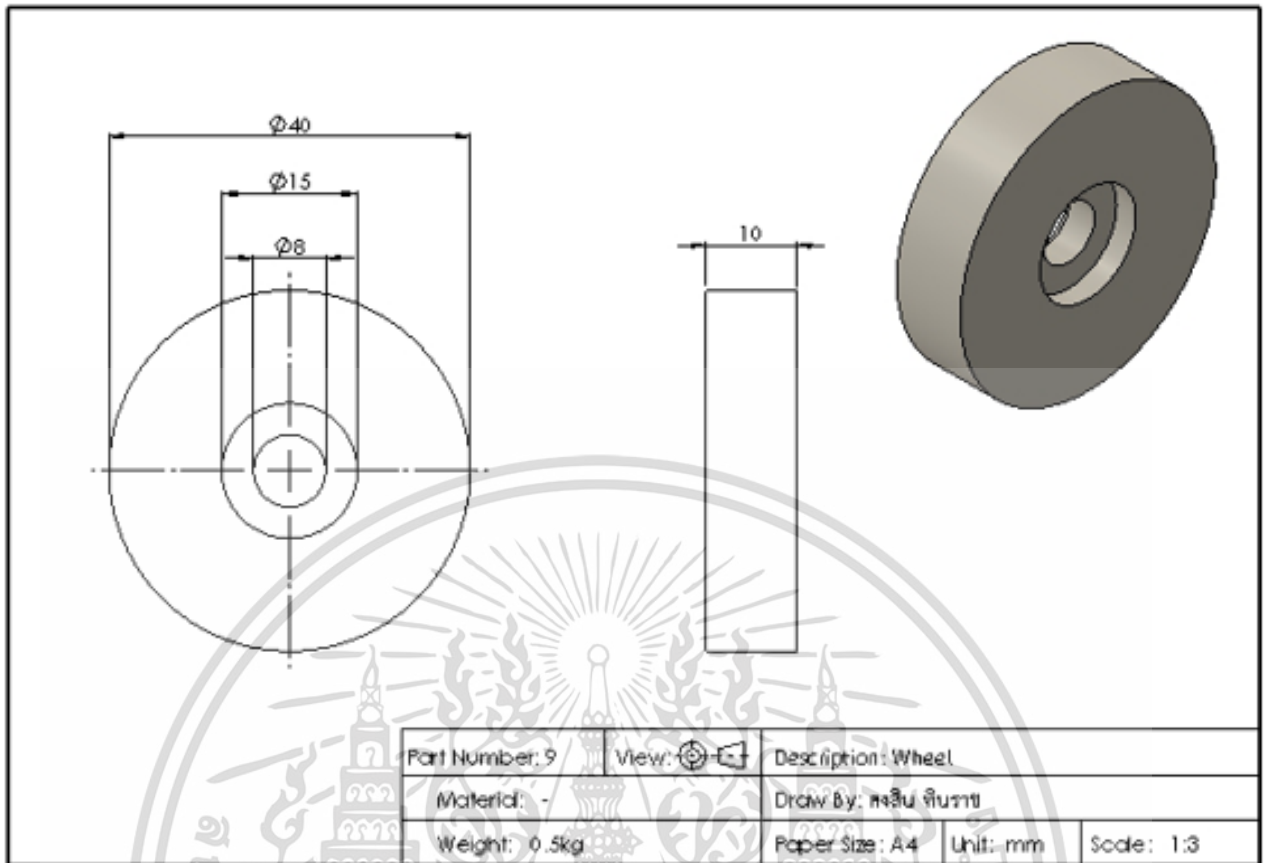


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

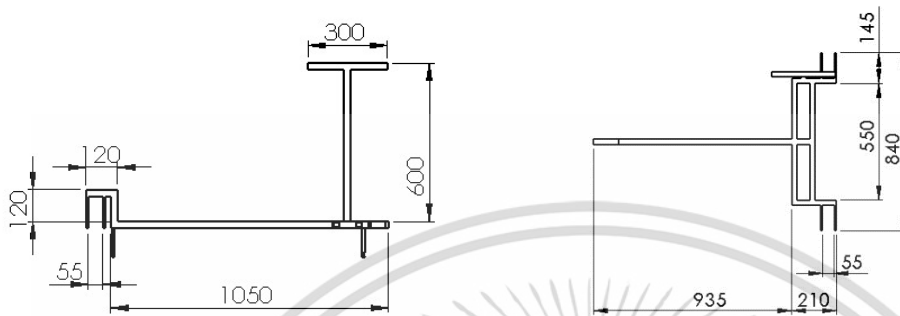


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## วัสดุ

### 1. เหล็กกล่อง

#### โครงรถ



จากรูปใช้เหล็กกล่อง ยาว 550 mm จำนวน 2 แท่ง เป็น 1100 mm

ยาว 210 mm จำนวน 2 แท่ง เป็น 420 mm

ยาว 580 mm จำนวน 1 แท่ง เป็น 580 mm

ยาว 300 mm จำนวน 1 แท่ง เป็น 300 mm

ยาว 935 mm จำนวน 1 แท่ง เป็น 935 mm

รวมใช้เหล็กกล่องประมาณ 3335 mm หรือประมาณ 3.34 m

โดยมีหน้าตัดขนาด 1x1 นิ้ว (25x25mm) หนา 2 mm มวลต่อเมตรเท่ากับ 0.86 kg/m

ดังนั้นน้ำหนักรวมโดยประมาณ เท่ากับ  $\frac{0.86\text{kg}}{1\text{m}} \times 3.34\text{m} \approx 2.88\text{ kg}$

#### กล่องแบตเตอรี่

จากรูปใช้เหล็กกล่อง ยาว 190 mm จำนวน 4 แท่ง เป็น 760 mm

ยาว 160 mm จำนวน 8 แท่ง เป็น 1280 mm

รวมใช้เหล็กกล่องประมาณ 2040 mm หรือประมาณ 2.04 m

โดยมีหน้าตัดขนาด 1x1 นิ้ว (25x25mm) หนา 2 mm มวลต่อเมตรเท่ากับ 0.86 kg/m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นน้ำหนักรวมโดยประมาณ เท่ากับ  $\frac{0.86kg}{1m} \times 2.04m \approx 1.75 \text{ kg}$

ดังนั้นน้ำหนักเหล็กกล่องทั้งหมดประมาณ 4.6 kg

## 2. แผ่นไม้

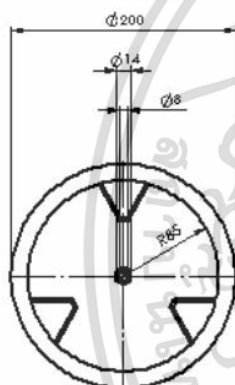
ขนาด 120x190 mmหนา 2.6 mm จำนวน 4 แผ่น

ขนาด 120x200 mmหนา 2.6 mm จำนวน 2 แผ่น

คิดเป็นปริมาตร  $3.62 \times 10^{-4} m^3$  โดยทั่วไปไม้อัดจะมีความหนาแน่นที่  $650kg/m^3$

ดังนั้นคิดเป็นน้ำหนักโดยประมาณเท่ากับ 0.235 kg

## 3. ล้อ



ใช้ล้อเปล่าขนาด 8 นิ้ว (20 cm) จำนวน 3 ล้อ โดยแต่ละล้อหนัก 0.5 kg

คิมน้ำหนักรวม 3 ล้อ ได้ 1.5 kg

## 5. มอเตอร์

ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบดุมล้อ 24 V 350 W น้ำหนัก 4 kg

## 6. แบตเตอรี่

ใช้แบตเตอรี่แบบตะกั่วกรด Deep Charge ขนาด 12V 7AH จำนวน 2 ลูก น้ำหนักลูกละ 2.2 kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตารางราคาและน้ำหนักวัสดุ

ชิ้นส่วน	ขนาด	จำนวน	ราคา	น้ำหนัก
1. เหล็กกล่อง	1x1 in หน้า 1.2 mm ยาว 1 m	1	75	4.63
	1x1 in หน้า 1.2 mm ยาว 1.8 m	1	125	
2. แผ่นไม้	20*60 cm	1	300	0.235
3. ล้อยาง	200 mm	3	600	1.5
4. มอเตอร์แบบดุมล้อ	350 W	1	4000	4
5. แบตเตอรี่	12V. 7Ah	2	2000	4.4
6. ชาร์จเจอร์	-	1	750	-
7. ชุดดิสเบรก(จานดิสเบรก,มือจับเบรก,ก้ามปูเบรก,สายเบรก)	-	1	2100	0.745
8. ชุดควบคุมกระแสมอเตอร์รวมคันเร่ง	36V 500W	1	617	-
รวม			8130	15.51

คาดว่าใช้งบในการสร้างรถตรวจทางขนาดเล็กประมาณ 8130 บาท และตัวรถมีน้ำหนักประมาณ 15 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## แหล่งที่มา

1. เหล็กกล่อง 1x1 in

<https://www.lazada.co.th/products/1x1-1-18-12-1-i462502908-s974198161.html>

2. แผ่นไม้

<https://www.lazada.co.th/products/topwood-mdf>

3. ล้อยาง

<https://www.lazada.co.th/products/8-120-4-i296854655-s505930023.html>

4. เพลลา

[https://www.ruengrawin.com/product\\_detail.php?product\\_id=244](https://www.ruengrawin.com/product_detail.php?product_id=244)

5. มอเตอร์

<https://www.facebook.com/pages/category/Shopping---Retail/ขาย-อะไหล่-รถไฟฟ้า-สกูตเตอร์ไฟฟ้า-1870013039884011>

6. แบตเตอรี่

<https://www.dako.in.th/อะไหล่และอุปกรณ์เสริม/อะไหล่-อุปกรณ์เสริมอื่นๆ>

7. อุปกรณ์ชาร์จแบตเตอรี่

<https://www.hobbyelec.com/product/432/ที่ชาร์จแบตเตอรี่ตะกั่วกรด-12v-2a-lead-acid-charger>

8. ชุดควบคุมความเร็ว

<https://www.lazada.co.th/products/dc-24-v-250-w-dc24v>

9. เบรค

<https://www.lazada.co.th/products/i386104073-s750398937.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้