



การออกแบบและสร้างรถขนของขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้า

Design and Construction Electric Convey Car



นายนาวา ฟองมี
นายอุเทน ย้ายหน้า
นายเกร็ดิต ศรีอยู่

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

ปีการศึกษา 2544

1203904X

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์	
วันที่รับ.....	18 มี.ค. 2546
เลขทะเบียน.....	4700023
เลขเรียกหนังสือ.....	216.
มหาวิทยาลัยมหิดล ๑๖๓๙๔ ๑	

2540



ใบรับรองโครงการวิศวกรรมเครื่องกล

หัวข้อโครงการ : การออกแบบและสร้างรถขนส่งของขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้า
(Design and Construction Electric Convey Car)

ผู้ดำเนินโครงการ : นายนาวา พองมี รหัส 41361254
นายอุเทน ช้ายหน้าย รหัส 41361510
นายเกรกิต ศรีอยู่ รหัส 41361528

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ : อาจารย์สุรัตน์ ปัญญาแก้ว

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงการ : อาจารย์ขวัญชัย ไกรทอง

ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา : 2544

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี อนุมัติให้โครงการฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการสอบโครงการ

..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์สุรัตน์ ปัญญาแก้ว)

..... รองประธานกรรมการ

(อาจารย์ขวัญชัย ไกรทอง)
..... กรรมการ

(อาจารย์ชูพงษ์ ช่วยเพ็ญ)
..... กรรมการ

(อาจารย์รัตนา สอนำ)

หัวข้อโครงการ	: การออกแบบและสร้างรถขนของขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้า	
ผู้ดำเนินโครงการ	: นายนาวา ฟองมี	รหัส 41361254
	: นายอุเทน ย้ายหน้าย	รหัส 41361510
	: นายเกรกิต ศรีอยู่	รหัส 41361528
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ	: อาจารย์สุรัตน์ ปัญญาแก้ว	
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงการ	: อาจารย์ขวัญชัย ไกรทอง	
ภาควิชา	: วิศวกรรมเครื่องกล	
ปีการศึกษา	: 2544	

บทคัดย่อ

รถขนของขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้านี้ ออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อใช้ขนของในพื้นที่ที่ไม่ต้องการมลพิษด้านต่างๆ หรือใช้ในพื้นที่เฉพาะ ซึ่งรถขนของไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนี้จะใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1.5 แรงม้า ขับเคลื่อนด้วยแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์จำนวน 2 ลูก และมีชุดอุปกรณ์ควบคุมความเร็วที่สามารถปรับระดับความเร็วได้ 3 ระดับ รถขนของไฟฟ้านี้มีขนาดกว้าง 1.04 เมตร ความยาว 2.2 เมตร ความสูง 1.6 เมตร น้ำหนักขณะไม่บรรทุกภาระ 182 กิโลกรัม ระยะห่างระหว่างช่วงล้อหน้ากับล้อหลัง 1.4 เมตร ระยะห่างของช่วงล้อหน้า 0.83 เมตร ระยะห่างช่วงล้อหลัง 0.9 เมตร ระยะค้ำสูงสุดจากพื้น 0.11 เมตร ขนาดยางของล้อทั้งสี่คือ หน้ายางกว้าง 3.6 นิ้ว เส้นผ่านศูนย์กลางล้อ 10.75 นิ้ว จุดสำคัญที่เน้นในการสร้างรถขนของไฟฟ้านี้คือ ต้องไม่มีมลพิษด้านต่างๆ มีความคล่องตัว ราคาถูก และซ่อมบำรุงง่าย

จากการทดสอบรถขนของขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้า พบว่า สามารถรับภาระได้สูงสุด 200 กิโลกรัม กำลังสูงสุดที่ล้อคือ 804.1 วัตต์ มีความเร็วสูงสุดเฉลี่ยขณะไม่บรรทุกภาระเท่ากับ 8.17 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และบรรทุกภาระ 200 กิโลกรัมเฉลี่ย 7.1 กิโลเมตรต่อชั่วโมง อายุการใช้งานสูงสุดของแบตเตอรี่ต่อการชาร์ตหนึ่งครั้งที่ระดับความเร็วสูงสุดขณะไม่บรรทุกภาระคือ 2 ชั่วโมง 36 นาที 54.48 วินาที และขณะบรรทุกภาระ 200 กิโลกรัม คือ 1 ชั่วโมง 30 นาที 3.74 วินาที ระยะเวลาการชาร์ตแบตเตอรี่ 6 ชั่วโมง รัศมีวงเลี้ยวกว้างสุดโดยเฉลี่ยของขอบยางล้อหน้าด้านนอก 2.83 เมตร

Project Title : Design and Construction Electric Convey Car
Name : Mr. Nawà Fongmee Code 41361254
Mr. Utane Yaynay Code 41361510
Mr. Kradit Sriyu Code 41361528
Project Advisor : Mr. Surat Panyakaew
Project Co-advisor : Mr. Kwanchai Kraitong
Department : Mechanical Engineering
Academic : 2001

Abstract

An electric convey car was designed and constructed for specific and non-pollution area, such as air and noise pollution. This project consists of 1.5 hp DC electric motor, two 12 V 75 Ah batteries and 3 step of speed control. The electric convey car is 1.04 m wide, 2.2 m long and 1.6 m high with 182 kg weight at no load. And 1.4 m wheel base, 0.83 m front track, 0.9 m rear track, 3.6 inches of skin width tires and 10.75 inch effective rolling diameter of tires. The lowest point is 0.11 m high from ground. The electric convey car emphasized on strictness environment requirement, cheapness and dexterity of operation and repair

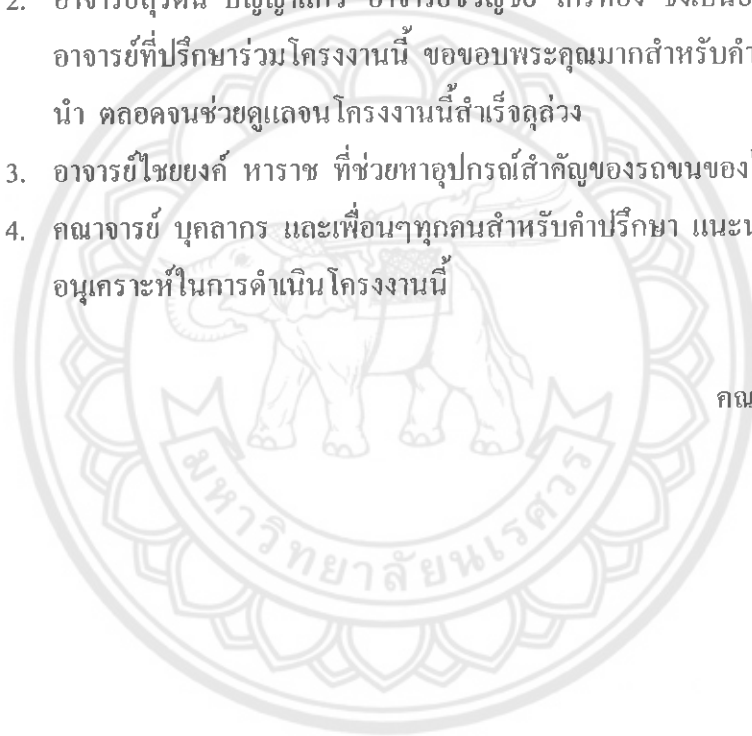
As tested, this car enables load capacity of 200 kg, maximum power input was 804.1 watt, the average maximum velocity at no load was 8.17 km/hr and 7.1 km/hr at 200 kg of load, covering a time of 2 hour 36 minute and 54.48 second per charge at maximum speed for no load and 1 hour 30 minute and 3.74 second for 200 kg of load. The batteries take 6 hours to recharge. The average maximum radius of curvature for outer of path at the outer rim of front was 2.83 m

กิตติกรรมประกาศ

โครงการรถขนของไฟฟ้านี้สามารถประสบผลสำเร็จลงได้ด้วยดี คณะผู้ดำเนินโครงการต้องขอขอบพระคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา แนะนำ และความอนุเคราะห์ในการดำเนินโครงการตลอดมาจนสำเร็จดังนี้

1. พ่อและแม่ ที่อบรมสั่งสอนเป็นอย่างดี และสนับสนุนในทุกๆด้านจนสำเร็จการศึกษา
2. อาจารย์สุรัตน์ ปัญญาแก้ว อาจารย์ขวัญชัย ไกรทอง ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมโครงการนี้ ขอขอบพระคุณมากสำหรับคำปรึกษาและคำแนะนำ ตลอดจนช่วยเหลือจนโครงการนี้สำเร็จลุล่วง
3. อาจารย์ไชยยงค์ ทหาราช ที่ช่วยหาอุปกรณ์สำคัญของรถขนของไฟฟ้าหลายชิ้น
4. คณาจารย์ บุคลากร และเพื่อนๆทุกคนสำหรับคำปรึกษา แนะนำ และให้ความอนุเคราะห์ในการดำเนิน โครงการนี้

คณะผู้ดำเนินโครงการ



สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองโครงการ	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ฌ
สารบัญกราฟ	ฎ
สารบัญสัญลักษณ์	ฏ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบข่ายของโครงการ	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	3
1.6 งบประมาณที่ใช้	3
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	
2.1 กำลังขับเคลื่อน	5
2.2 โครงรถขนของไฟฟ้า	13
2.3 ระบบกันสะเทือน	14
2.4 เพลาหน้า	19
2.5 โรลลิงแบร์ริง	21
2.6 เพลาท้าย	26
2.7 ล้อ	29
2.8 ระบบห้ามล้อ	29
2.9 ระบบบังคับเลี้ยว	32
2.10 ชุดเฟืองท้าย	36

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.11 มอเตอร์	38
2.12 แบตเตอรี่	39
2.13 รถไฟฟ้าทั่วไป	40
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 การออกแบบ	42
3.2 วิธีการดำเนินการสร้าง	61
3.3 ขั้นตอนการทดสอบ	70
บทที่ 4 ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์	
4.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของรถขนของไฟฟ้า	74
4.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบประสิทธิภาพของรถขนของไฟฟ้า	81
บทที่ 5 สรุปผลโครงการและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลโครงการ	84
5.2 ข้อเสนอแนะ	85
บรรณานุกรม	86
ภาคผนวก ก	88
ภาคผนวก ข	109
ภาคผนวก ค	119
ภาคผนวก ง	122
ภาคผนวก จ	143
ประวัติผู้ทำโครงการ	146

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แสดงแผนการดำเนินงานที่ออกแบบ	2
ตารางที่ 1.2 แสดงระยะเวลาการดำเนินงานจริง	3
ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดของรถชนของไฟฟ้า	69
ตารางที่ 4.1 แสดงรัศมีวงเลี้ยว	78
ตารางที่ ข.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานการหมุนของล้อรถยนต์	110
ตารางที่ ข.2 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านทานของลม	110
ตารางที่ ข.3 แสดงประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของรถยนต์ประเภทต่างๆ	111
ตารางที่ ข.4 ตัวประกอบของการกระแทก	111
ตารางที่ ข.5 มิติมาตรฐานและแรงประเิมินของโรลลิ่งแบร์ริง	112
ตารางที่ ข.6 แนวทางในการเลือกอายุใช้งานสำหรับเครื่องจักรกลชนิดต่างๆ	113
ตารางที่ ข.7 โมเมนต์และระยะ โกงของคาน	114
ตารางที่ ข.8 ขนาดต่างๆและน้ำหนักของเหล็กกลวงสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular tube)	115
ตารางที่ ข.9 คุณสมบัติของหน้าตัดรูปแฉกร่อง	116
ตารางที่ ข.10 คุณสมบัติของเหล็กกลม	117
ตารางที่ ข.11 คุณสมบัติของเหล็กเหลี่ยม	118
ตารางที่ ง.1 อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ระดับความเร็วที่ 1 เมื่อมีภาระ 0 กิโลกรัม	123
ตารางที่ ง.2 อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ระดับความเร็วที่ 2 เมื่อมีภาระ 0 กิโลกรัม	124
ตารางที่ ง.3 อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ระดับความเร็วที่ 3 เมื่อมีภาระ 0 กิโลกรัม	125
ตารางที่ ง.4 อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ระดับความเร็วที่ 1 เมื่อมีภาระ 200 กิโลกรัม	125
ตารางที่ ง.5 อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ระดับความเร็วที่ 2 เมื่อมีภาระ 200 กิโลกรัม	126
ตารางที่ ง.6 อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ระดับความเร็วที่ 3 เมื่อมีภาระ 200 กิโลกรัม	126
ตารางที่ ง.7 เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่เป็นระยะทาง 40 เมตรที่ระดับความเร็วและภาระต่างๆ	127
ตารางที่ ง.8 ความเร็วเฉลี่ยของรถไฟฟ้า	127
ตารางที่ ง.9 ระยะทางและเวลาที่ใช้ในการเบรก	127
ตารางที่ ง.10 กำลังไฟฟ้าสูงสุดของระดับความเร็วที่ 1 ที่ภาระ 0 กิโลกรัม	127
ตารางที่ ง.11 กำลังไฟฟ้าสูงสุดของระดับความเร็วที่ 2 ที่ภาระ 0 กิโลกรัม	128

สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ ง.12 กำลังไฟฟ้าสูงสุดของระดับความเร็วที่ 3 ที่ภาระ 0 กิโลกรัม	130
ตารางที่ ง.13 กำลังไฟฟ้าสูงสุดของระดับความเร็วที่ 1 ที่ภาระ 50 กิโลกรัม	131
ตารางที่ ง.14 กำลังไฟฟ้าสูงสุดของระดับความเร็วที่ 2 ที่ภาระ 50 กิโลกรัม	132
ตารางที่ ง.15 กำลังไฟฟ้าสูงสุดของระดับความเร็วที่ 3 ที่ภาระ 50 กิโลกรัม	133
ตารางที่ ง.16 กำลังไฟฟ้าสูงสุดของระดับความเร็วที่ 1 ที่ภาระ 100 กิโลกรัม	134
ตารางที่ ง.17 กำลังไฟฟ้าสูงสุดของระดับความเร็วที่ 2 ที่ภาระ 100 กิโลกรัม	135
ตารางที่ ง.18 กำลังไฟฟ้าสูงสุดของระดับความเร็วที่ 3 ที่ภาระ 100 กิโลกรัม	136
ตารางที่ ง.19 กำลังไฟฟ้าสูงสุดของระดับความเร็วที่ 1 ที่ภาระ 150 กิโลกรัม	137
ตารางที่ ง.20 กำลังไฟฟ้าสูงสุดของระดับความเร็วที่ 2 ที่ภาระ 150 กิโลกรัม	138
ตารางที่ ง.21 กำลังไฟฟ้าสูงสุดของระดับความเร็วที่ 3 ที่ภาระ 150 กิโลกรัม	139
ตารางที่ ง.22 กำลังไฟฟ้าสูงสุดของระดับความเร็วที่ 1 ที่ภาระ 200 กิโลกรัม	140
ตารางที่ ง.23 กำลังไฟฟ้าสูงสุดของระดับความเร็วที่ 2 ที่ภาระ 200 กิโลกรัม	141
ตารางที่ ง.24 กำลังไฟฟ้าสูงสุดของระดับความเร็วที่ 3 ที่ภาระ 200 กิโลกรัม	142

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แรงขับเคลื่อนเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างยางกับถนนขณะที่รถยนต์กำลังเคลื่อนที่	6
รูปที่ 2.2 การเกิดแรงต้านทานการหมุนบนถนน	8
รูปที่ 2.3 แรงต้านทางขึ้น	10
รูปที่ 2.4 แรงต้านการเคลื่อนที่ทั้งหมด	11
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างโครงรถยนต์แบบหนึ่ง	14
รูปที่ 2.6 ระบบกันสะเทือนแบบคานแข็งกับแหนบ	15
รูปที่ 2.7 สปริงแผ่นหรือแหนบ	15
รูปที่ 2.8 สปริงแผ่น	16
รูปที่ 2.9 สปริงแหนบทั่วไป	17
รูปที่ 2.10 ความโค้งของแผ่นสปริง	18
รูปที่ 2.11 รูปแสดงความโค้งของแหนบ	18
รูปที่ 2.12 เพลาน้ำแบบ drop type	20
รูปที่ 2.13 แสดงส่วนต่างๆ ของบอลเบริง	22
รูปที่ 2.14 บอลเบริงชนิดต่างๆ	23
รูปที่ 2.15 แสดงขอบเขตของมิติ สำหรับอนุกรมมิติของเบริงต่างๆ	23
รูปที่ 2.16 แสดงชิ้นส่วนของชุดห้ามล้อ	30
รูปที่ 2.17 แสดงกลไกการห้ามล้อ	31
รูปที่ 2.18 การบังคับเลี้ยวของรถยนต์	32
รูปที่ 2.19 ระบบการเลี้ยวแบบอ็คเคมานันท์	33
รูปที่ 2.20 แสดงชุดเฟืองท้ายแบบเฟืองฉลาก	37
รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะโครงสร้างของเบตเตอร์	39
รูปที่ 3.1 แสดงรูปแบบของรถขนของไฟฟ้าที่ได้ทำการออกแบบ	45
รูปที่ 3.2 แสดงการสมมุติรูปแบบของโครงรถขนของไฟฟ้า	46
รูปที่ 3.3 แสดงการรับแรงของโครงรถขนของไฟฟ้า	47
รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะของแหนบของที่นั่งที่ได้ทำการออกแบบ	52
รูปที่ 3.5 แสดง FBD ของคานหน้า	55
รูปที่ 3.6 แสดงรายละเอียดของล้อรถสกูตเตอร์ที่นำมาใช้กับรถขนของไฟฟ้า	58

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.7 โครงรถขนของไฟฟ้าที่ได้ทำการสร้าง	61
รูปที่ 3.8 แสดงชุดคานหน้าและเพลาน้ำ	61
รูปที่ 3.9 แสดงรูปล้อหน้า	62
รูปที่ 3.10 แสดงรูปมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในรถขนของไฟฟ้า	62
รูปที่ 3.11 แสดงเพลาท้ายที่ใช้ในรถขนของไฟฟ้า	63
รูปที่ 3.12 แสดงรูปการติดตั้งหมอบ	63
รูปที่ 3.13 แสดงรูปส่วนประกอบต่างๆของระบบบังคับลิ้วที่ใช้ในรถขนของไฟฟ้า	64
รูปที่ 3.14 แสดง กระบะรถขนของไฟฟ้า	65
รูปที่ 3.15 แสดงที่นั่งของรถขนของไฟฟ้า	66
รูปที่ 3.16 แสดงหลังคาของรถขนของไฟฟ้าที่สร้างขึ้น	66
รูปที่ 3.17 แสดงรูปกล่องควบคุมความเร็วของรถขนของไฟฟ้า	67
รูปที่ 3.18 แสดงรูปรถขนของไฟฟ้าที่เสร็จสมบูรณ์	67
รูปที่ จ.1 แสดงวงจรการทำงานจของรถขนของไฟฟ้า	144
รูปที่ จ.2 แสดงวงจรไฟฟ้าของกล่องควบคุม	145

สารบัญกราฟ

	หน้า
กราฟที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับความต่างศักย์ไฟฟ้า, ระดับความเร็วที่ 1	74
กราฟที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้า, ระดับความเร็วที่ 1	75
กราฟที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับความต่างศักย์ไฟฟ้า, ระดับความเร็วที่ 2	75
กราฟที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้า, ระดับความเร็วที่ 2	76
กราฟที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับความต่างศักย์ไฟฟ้า, ระดับความเร็วที่ 3	76
กราฟที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้า, ระดับความเร็วที่ 3	77
กราฟที่ 4.7 แสดงความเร็วของรถไฟฟ้า	77
กราฟที่ 4.8 แสดงระยะทางที่ใช้ในการเบรก	78
กราฟที่ 4.9 แสดงเวลาที่ใช้ในการเบรก	79
กราฟที่ 4.10 กำลังไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นที่ระดับความเร็วที่ 1	79
กราฟที่ 4.11 กำลังไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นที่ระดับความเร็วที่ 2	80
กราฟที่ 4.12 กำลังไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นที่ระดับความเร็วที่ 3	80

ลำดับสัญลักษณ์ (กำลังขับเคลื่อน)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
a	ความเร่งของรถ	m/s^2
A	พื้นที่หน้าตัดของรถยนต์ส่วนที่ด้านกับลม	m^2
F	แรงขับเคลื่อน	N
i_g	อัตราทดที่เฟืองท้าย	
K_a	สัมประสิทธิ์ความเสียดของแรงต้านทานของอากาศ	
K_r	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานการหมุน	
m	มวลของรถ	kg
m_c	มวลสมมูล	kg
m_t	มวลของชิ้นส่วนที่หมุน	kg
P_m	กำลังขับเคลื่อนของมอเตอร์	W
P_w	กำลังขับเคลื่อนที่ล้อ	W
r	รัศมีของล้อรถยนต์	m
R_a	แรงต้านทานจากอากาศ	N
R_g	แรงต้านทางชัน	N
R_i	แรงต้านความเฉื่อย	N
R_t	แรงต้านทานการขับเคลื่อนทั้งหมด	N
R_r	แรงต้านทานการหมุน	N
T_m	แรงบิดของมอเตอร์	$N \cdot m$
T_w	แรงบิดที่ล้อ	$N \cdot m$
V	ความเร็วของรถ	m/s
W	น้ำหนักของรถทั้งหมด	N
η_t	ประสิทธิภาพการถ่ายทอดกำลัง	
β	อัตราส่วนมวล	
θ_g	มุมความชันของถนนที่รถขึ้นได้	

ลำดับสัญลักษณ์ (ระบบกันสะเทือน)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
b	ความกว้างของແນบ	m
F_1	แรงกระทำที่หุແນบแต่ละข้าง	N
F_s	แรงกระทำที่ปลายແນบเนื่องจากคนของที่นั่ง	N
L	ครึ่งหนึ่งของความແນบแผ่นหลัก	m
L_1	ความยาวของແນบแผ่นหลัก	m
L_s	ความยาวของແນบจากจุดยึดถึงปลายແນบ ในแนวระดับของที่นั่ง	m
n	จำนวนแผ่นของແນบ	
R_1	รัศมีความโค้งของແນบที่ล้อ	m
t	ความหนาของແນบ	m
Z	ระยะ โกงของແນบที่ล้อ	m
σ_a	ความเค้นของແນบที่สามารถรับได้จริง	N/m^2
σ_f	ความเค้นของແນบเนื่องจากภาระที่กระทำ	N/m^2
δ_1	ระยะ โกงของແນบที่ล้อ	m
δ_m	ระยะ โกงของແນบของที่นั่ง	m

ลำดับสัญลักษณ์ (โครงรถ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
E	โมดูลัสความยืดหยุ่น	N/m^2
M	โมเมนต์คัต	$N \cdot m$
M_{max}	โมเมนต์คัตสูงสุด	$N \cdot m$
R_{fr}	แรงกระทำต่อแหนด้านหน้า	N
R_{r}	แรงกระทำต่อแหนด้านหลัง	N
V	แรงเฉือน	N
Z	โมดูลัสของหน้าตัด	m^3
σ	ความเค้น	N/m^2



ลำดับสัญลักษณ์ (เพลาและโรตลิงแบร์ริง)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
C	แรงประเอนของ โรตลิ่งแบร์ริง	N
C _๐	แรงประเอนของ โรตลิ่งแบร์ริง	N
d	เส้นผ่านศูนย์กลางของเพลา	m
F	แรงกดที่กระทำต่อคานหน้า	N
F _r	แรงในแนวรัศมี	N
l	ระยะระหว่างเส้นกึ่งกลางยางถึงลูกปืนตัวนอกของเพลา	m
L	ความยาวของคานหน้า	m
L ₁₀	อายุการใช้งาน	hr
N _a	ความเร็วรอบของเพลาล้อ	rpm
N _s	ตัวประกอบของการกระแทรก	
P	แรงสมมูล	N
r	รัศมีของล้อ	m
T	แรงบิด	N•m
v	ความเร็วสูงสุดของรถยนต์	m/s
V	ตัวประกอบการหมุน	
W	แรงกระทำที่ล้อแต่ละล้อ	N
y _{max}	ระยะ โกงสูงสุด	m
Z	โมดูลัสของหน้าตัด	m ³
μ	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานความฝืดระหว่างยางกับถนน	
τ _{max}	ความเค้นเฉือนสูงสุดของเพลา	N/m ²

ลำดับสัญลักษณ์ (ระบบบังคับเดียว)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
θ_a	มุมเลี้ยวของล้อใน	m
θ_o	มุมเลี้ยวของล้อนอก	m
d	ระยะระหว่างสลักล้อถึงศูนย์กลางของของยาง	m
H	ความกว้างของช่วงล้อหลัง	m
L	ระยะจากกึ่งกลางของตัวรถที่เพลาหลังถึงจุดศูนย์กลางของการเลี้ยว	m
P	ความกว้างระหว่างสลักล้อหน้า	m
S	รัศมีการเลี้ยวของล้อหน้าล้อใน	m
T	ความกว้างของช่วงล้อหน้า	m
W	ความยาวของช่วงล้อหน้า – หลัง	m



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

เนื่องจากในปัจจุบันการใช้พลังงานไฟฟ้ายังไม่ได้รับความนิยมนัก กอปรกับมีการรณรงค์ในเรื่องมลพิษที่เกิดจากเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศและเสียง สิ่งเหล่านี้ต้องทำให้เกิดขึ้นน้อยที่สุดหรือไม่มีเลยในบางสถานที่ เช่น

- โรงพยาบาล การขนของภายในอาคารโรงพยาบาล เช่น เครื่องมือแพทย์ เสื้อผ้าคนไข้ อาหาร และการขนอุปกรณ์เครื่องใช้ต่าง ๆ ปัจจุบันยังใช้รถเข็นหรือบางสถานที่ได้นำรถกอล์ฟมาดัดแปลงใช้ในการขนของ แต่ไม่เหมาะสม เนื่องจากรถกอล์ฟถูกออกแบบสำหรับใช้ในสนามกอล์ฟและรับน้ำหนักได้ไม่มาก เพื่อความสะดวกสบายมากขึ้นและขนของได้มากขึ้น รถไฟฟ้านี้จึงเป็นทางเลือกที่ดีอีกทางเลือกหนึ่ง

- โรงงาน บริเวณโรงงานส่วนมากมีขนาดใหญ่ การติดต่องานภายในโรงงานเพื่อปฏิบัติงานหรือการขนของที่มีขนาดไม่ใหญ่และมีปริมาณไม่มากนัก บางที่ต้องใช้รถยนต์ส่วนบุคคลซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองพลังงานเชื้อเพลิงมากเกินไป และรถเหล่านั้นไม่สามารถขนของเข้าไปภายในอาคารของโรงงานได้ จึงจำเป็นต้องใช้รถเข็นเข้าไปยังสถานที่เหล่านั้นอีกต่อหนึ่ง รถไฟฟ้าขนาดเล็กนี้สามารถทำงานเหล่านี้ได้ จึงเป็นการประหยัดงบประมาณในส่วนที่ไม่จำเป็นอีกด้วย

- ห้างสรรพสินค้า ในการขนของจากห้องเก็บของมาไว้ที่ชั้นวางของปัจจุบันได้นำรถลากโดยใช้แรงคน ซึ่งเป็นการสิ้นเปลืองเวลามากเกินไป การใช้รถไฟฟ้านี้จึงน่าจะเป็นการประหยัดเวลาและสะดวกกว่า

ดังนั้นผู้ดำเนินโครงการจึงอยากร่วมสนับสนุนให้มีการนำรถพลังงานไฟฟ้ามาใช้ในสถานที่ต่าง ๆ มากขึ้น ฉะนั้นการใช้รถขนของไฟฟ้านี้จึงเป็นทางเลือกที่ดีอีกทางเลือกหนึ่ง ซึ่งสามารถนำมาใช้งานได้ตามสถานที่ ที่ได้กล่าวมาแล้ว

ตาราง 1.2 แสดงระยะเวลาการดำเนินงานจริง

กิจกรรม	ระยะเวลาการทำงาน					
	มี.ย.	ก.ก.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค. – ก.พ.	มี.ค. – เม.ย.
1. ศึกษาและเก็บข้อมูล	■					
2. ออกแบบ		■	■	■		
3. สร้าง					■	■
4. ทดสอบ						■
5. แก้ไขข้อผิดพลาด						■
6. รวบรวมข้อมูล						■

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ได้รับขนของไฟฟ้าที่ไม่มีมลภาวะทางเสียงและทางอากาศ ซึ่งสามารถนำมาใช้งานได้ตามโรงพยาบาล โรงงาน หรือห้างสรรพสินค้า

1.6 งบประมาณที่ใช้

1. เหล็กกล่องขนาด 50 X 25 X 1.6 mm	500	บาท
2. ล้อยางและกะทะล้อ	1850	บาท
3. ชุดระบบบังคับลิฟต์	1500	บาท
4. เหล็กรูปตัวซีขนาด C50 X 7 mm	2000	บาท
5. เหล็กแผ่น ขนาด 750 X 1100 X 2 mm	375	บาท
6. เหล็กกลม 27.2 X 2 mm	160	บาท
7. ชุดเบรก	700	บาท
8. แบตเตอรี่ขนาด 75 แอมแปร์ จำนวน 2 ลูก	500	บาท
9. มอเตอร์ + ชุดเฟืองท้าย	7000	บาท
10. แบริ่ง	300	บาท
11. สลักเกลียว	500	บาท
12. ถังเหล็ก 50 ลิตร	100	บาท
13. สีสเปรย์	1500	บาท
14. เหล็กเก่า	700	บาท

15. แทนบ	300	บาท
16. บุชรองแทนบ	100	บาท
17. แปลงลวด	230	บาท
18. อื่น ๆ	3000	บาท
รวม	19515	บาท



บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

การออกแบบรถไฟฟ้าจะมีหลักการและทฤษฎีส่วนใหญ่เหมือนกับการออกแบบรถยนต์ทั่วๆ ไป มีเพียงบางส่วนเท่านั้นที่เพิ่มเติมเข้ามา และบางส่วนของหลักการและทฤษฎีในรถยนต์ทั่วๆ ไปที่ไม่จำเป็นในการออกแบบสำหรับรถไฟฟ้า ดังนั้นจึงสามารถแสดงหลักการและทฤษฎีที่จำเป็นและเกี่ยวข้องกับ การออกแบบรถไฟฟ้าได้ดังนี้

1. กำลังขับเคลื่อน
2. โครงรถไฟฟ้า
3. ระบบกันสะเทือน
4. เพลาหน้า
5. โรลลิงแบร์ริง
6. เพลาท้าย
7. ล้อรถไฟฟ้า
8. ระบบห้ามล้อ
9. ระบบบังคับเลี้ยว
10. ชุดเฟืองท้าย
11. มอเตอร์
12. แบตเตอรี่

2.1 กำลังขับเคลื่อน

การเคลื่อนที่ของรถยนต์จะต้องอาศัยแรงขับเคลื่อนที่ถ่ายทอดมาจากเครื่องยนต์จนถึงล้อรถยนต์ แรงขับเคลื่อนจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างล้อกับถนนซึ่งทำให้รถยนต์เคลื่อนที่ไปได้ เมื่อนำแรงขับเคลื่อนมาพิจารณา จะได้เป็นกำลังขับเคลื่อนซึ่งจะศึกษาได้ดังนี้

2.1.1 แรงต้านการเคลื่อนที่

รถยนต์เคลื่อนที่ได้ต้องอาศัยกำลังจากเครื่องยนต์ซึ่งส่งผ่านระบบถ่ายทอดกำลังมาถึงล้อขับเคลื่อน และอาศัยความเสียดทานระหว่างยางและผิวถนน ทำให้เกิดแรงขับเคลื่อนในขณะที่ถ่ายทอดกำลัง รถยนต์จึงเคลื่อนที่ได้

ในขณะที่รถยนต์กำลังเคลื่อนที่อยู่จะมีแรงด้านการเคลื่อนที่และมีทิศทางสวนกับแรงขับเคลื่อน เช่น ถ้ารถยนต์เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงที่ 60 km/h อาศัยกฎข้อที่หนึ่งของนิวตันจะได้ว่า

$$\text{แรงขับเคลื่อน} = \text{แรงต้านทั้งหมด}$$

แต่ถ้าแรงขับเคลื่อนมากกว่าแรงต้านทั้งหมดในขณะนั้น รถยนต์จะมีอัตราเร่งซึ่งทำให้อัตราเร็วเพิ่มขึ้น จนในที่สุดแรงขับเคลื่อนจะเท่ากับแรงต้านทั้งหมดอีกครั้งหนึ่ง

แต่ถ้าแรงขับเคลื่อนน้อยกว่าแรงต้านทั้งหมดในขณะนั้น รถยนต์จะมีอัตราหน่วงซึ่งทำให้อัตราเร็วลดลง ในขณะที่อัตราเร็วลดลงนั้นแรงต้านทั้งหมดก็จะลดลงด้วย จนในที่สุดแรงขับเคลื่อนจะเท่ากับแรงต้านทั้งหมด รถยนต์จะวิ่งด้วยอัตราเร็วคงที่ต่อไป รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงขับเคลื่อนกับแรงต้านทั้งหมดในขณะที่รถยนต์กำลังเคลื่อนที่



รูปที่ 2.1 แรงขับเคลื่อนเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสระหว่างยางกับถนนในขณะที่รถยนต์กำลังเคลื่อนที่
(ที่มา หนังสือวิศวกรรมยานยนต์,ธีระยุทธ สุวรรณประทีป)

แต่เดิมนั้นรถยนต์ส่วนมากขับเคลื่อนล้อหลังซึ่งมีข้อดีหลายประการ เช่น สามารถลดแรงกระตุกได้ดีเพราะมีเพลากลางและเพลาขับยาว ได้ขึ้นทางชันได้มากกว่าเพราะน้ำหนักรถยนต์จะกดที่ล้อหลังมากขึ้น ในขณะที่ได้ขึ้นทางชันทำให้การลื่นไถลของล้อหลังเกิดขึ้นได้ยาก ฯลฯ ส่วนรถยนต์

ขับเคลื่อนล้อหน้าก็มีข้อดีหลายอย่าง เช่น พื้นรถยนต์ต่ำลงและราบเรียบ ทำให้มีเนื้อที่ภายในรถยนต์กว้างมากขึ้น การทรงตัวอาจดีขึ้นเพราะล้อหน้าเป็นล้อนำทาง ฯลฯ

ในกรณีของรถยนต์ที่ขับเคลื่อนล้อหลัง แรงขับเคลื่อนจะเกิดขึ้นที่ล้อหลังตรงบริเวณผิวสัมผัส ระหว่างยางกับถนน ถ้ารถยนต์ขับเคลื่อนล้อหน้า แรงขับเคลื่อนจะเกิดขึ้นที่ล้อหน้า และถ้ารถยนต์ขับเคลื่อนสี่ล้อ แรงขับเคลื่อนจะเกิดขึ้นทั้งล้อหน้าและล้อหลัง

กำลังจากเครื่องยนต์ที่ส่งไปยังล้อขับเคลื่อนจะใช้ประโยชน์ได้ไม่เต็มที่เพราะมีบางส่วนสูญเสียไปในระบบถ่ายเทกำลัง เรียกว่าการสูญเสียในการถ่ายเท (transmission loss) กำลังส่วนที่เหลือที่ล้อขับเคลื่อนจะใช้ไปเพื่อเอาชนะแรงต้านต่าง ๆ เพื่อให้รถยนต์เคลื่อนที่ได้ แรงต้านการเคลื่อนที่เหล่านั้น ได้แก่

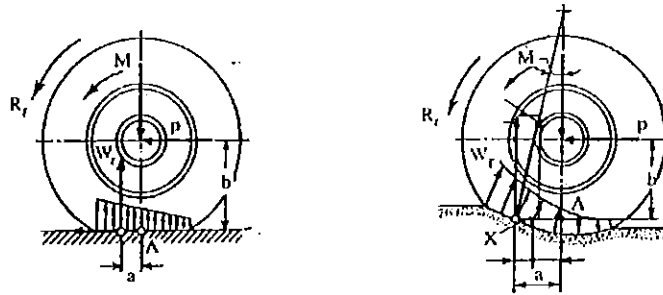
1. แรงต้านการหมุนของล้อ (rolling resistance)
2. แรงต้านอากาศ (air resistance)
3. แรงต้านทางชัน (gradient resistance)

นอกจากนี้ ในขณะที่เร่งเครื่องยนต์ กำลังบางส่วนต้องสูญเสียไปเพื่อเอาชนะความเฉื่อยของรถยนต์ เรียกว่า แรงต้านความเฉื่อย (inertia resistance) แต่ในกรณีนี้ไม่กล่าวถึง เนื่องจากความเร่งของรถยนต์ของไฟฟ้ามีค่าน้อย

1. แรงต้านทานการหมุนของล้อ (Rolling Resistance)

แรงต้านทานการหมุนของล้อรถนี้จัดว่าเป็นแรงต้านทานบนถนนอย่างหนึ่ง แรงต้านทานการหมุนนี้เกิดขึ้นจากปัจจัยหลายอย่าง ตัวอย่างเช่น ลักษณะโครงสร้างของขนาดของยาง (ยางกลวงหรือยางตัน) ลักษณะของผิวจราจร ลักษณะของดอกยางและสภาพของดอกยาง ความดันของลมในยาง ความเร็วของรถยนต์ ความฝืดของลูกปืนล้อ น้ำหนักของรถ

ขณะที่รถเคลื่อนที่นั้น ล้อจะหมุนไปในลักษณะดังรูป 2.2 และน้ำหนักบรรทุก (W) ที่กดลงที่ล้อจะมีแรงต้านทานขึ้นตลอดหน้าสัมผัสระหว่างยางกับถนน โดยที่แรงต้านที่จุดซึ่งยางเริ่มสัมผัสกับผิวถนนจะมีค่ามากกว่าจุดอื่น ๆ ถ้าให้แรงต้านที่เกิดขึ้นทั้งหมดเป็นแรงเฉื่อย (W_r) ซึ่งจะมีขนาดของแรงเท่ากับแรง W ด้วยเช่นกัน และแรง (W_r) นี้จะห่างไปทางด้านหน้าของแนวแรง W เป็นระยะทางเท่ากับ a



(ก) แรงเสียดทานบนถนนคอนกรีต (ข) แรงเสียดทานบนถนนประเภทดินทราย

รูปที่ 2.2 การเกิดแรงต้านทานการหมุนบนถนน
(ที่มา หนังสือกลศาสตร์ยานยนต์, เฟื่อง แซนเกษม)

ถ้าพิจารณาโมเมนต์ที่จุดสัมผัส A จะได้ว่า

$$Pb = Wa \quad (P = R_r)$$

$$\therefore R_r = \frac{Wa}{b}$$

แต่ $\frac{a}{b}$ เป็นค่าคงที่ซึ่งอยู่กับลักษณะของผิวถนน และขนาดของยางรถ ถ้ากำหนดให้

$$\frac{a}{b} = k_r$$

$$\therefore R_r = k_r W$$

ถ้ากำหนดให้ k_r คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานการหมุน

W คือ น้ำหนักของรถที่ตกลงที่ล้อ (N)

W_1, W_2 คือ น้ำหนักของรถที่ตกลงที่ล้อหน้าและหลัง (N)

k_{r1}, k_{r2} คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานการหมุนที่ล้อหน้าและหลัง

ถ้าพิจารณาทั้งล้อหน้าและล้อหลัง

$$R_r = k_{r1}W_1 + k_{r2}W_2$$

สมมติว่า $W_1 = W_2$ และ $k_{r1} = k_{r2}$

$$\therefore R_r = k_r W \quad (2.1)$$

(ให้ $W_1 + W_2 = W =$ น้ำหนักของรถยนต์)

จะเห็นได้ว่าแรงต้านทานชนิดนี้มีผลเนื่องมาจากล้อได้รับแรงกระทำซึ่งเป็นผลมาจากความขรุขระของผิวถนนและหน้ายาง เป็นต้น และจากเหตุนี้แรงต้านทานจะขึ้นอยู่กับสภาพของถนน น้ำหนักรถ ถ้าหากคำนึงถึงความลาดของถนนจะได้

$$R_r = k_r W \cos \theta$$

โดย θ คือ ความลาดของถนน

สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านทานการหมุนได้จากลักษณะของถนน จากตารางที่ ข.1

2. แรงต้านอากาศ (Air Resistance)

รถยนต์ทุกชนิดที่วิ่งบนถนนนั้น เมื่อวิ่งสัมผัสกับถนนในขณะที่ล้อหมุน เพื่อวิ่งไปข้างหน้าจะเกิดแรงต้านทานการหมุนกลิ้งของผิวถนน หรือแรงเสียดทาน และอีกอย่างคือแรงต้านทานจากรถ เนื่องจากรถต้องวิ่งแหวกอากาศออกไปซึ่งที่ความเร็วต่ำ แรงต้านทานจากลมน้อยมากจนไม่สามารถไปเปรียบเทียบกับแรงต้านทานการหมุน แต่ถ้ารถวิ่งด้วยความเร็วสูง แรงต้านทานจากลมจะมีผลต่อการขับเคลื่อนอย่างยิ่ง

แรงต้านทานจากอากาศมี 2 ประเภท คือ

1. แรงต้านทานภายนอก คือ แรงต้านทานจากภายนอกของตัวถังที่รับลม
2. แรงต้านทานภายใน คือ ผลของอากาศที่ไหลเข้าไปภายในตัวรถ ซึ่งเกิดจากอากาศที่ไหลเข้ามาทางช่องระบายอากาศ เพื่อถ่ายเทอากาศภายในรถ แต่เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่างแรง 2 แรงนี้ แรงต้านทานภายในมีค่าน้อย กระแสอากาศที่ไหลผ่านตัวรถนั้นจะต้องพยายามไม่ให้เกิดการหมุนวน ยิ่งถ้ากระแสอากาศที่ไหลเกิดเป็นเกลียวหมุนขึ้น จะทำให้มีแรงต้านทานมากขึ้น ดังนั้น จึงต้องออกแบบให้ตัวถังรถยนต์มีลักษณะลู่ลม เพื่อลดแรงต้านทานที่จะเกิดขึ้น

แรงต้านทานของอากาศจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. แรงต้านทานของลมที่ส่วนหน้าและส่วนหลังของรถยนต์ในขณะที่รถวิ่งไป (ประมาณ 55 - 60%)
2. พื้นที่หน้าตัดของรถ บังโคลนและชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ติดไว้ด้านหลัง (ประมาณ 12 - 18%)
3. แรงต้านทานจะสูงขึ้นเมื่อลมพัดผ่านหม้อน้ำ และช่องว่างใต้ฝากระโปรงของรถ (ประมาณ 10 - 15%)
4. แรงต้านทานที่ผิวตัวถังรถ (ประมาณ 8 - 10%)
5. ความแตกต่างระหว่างลมที่ส่วนบนของรถและส่วนล่างของรถ ซึ่งเมื่อลมพัดผ่านรถไปแล้วจะทำให้เกิดเป็นลมหมุนที่ข้างหลัง คล้ายกับว่าเป็นแรงดูดรถเอาไป ฉะนั้นจึงต้องออกแบบรูป-ทรงของรถยนต์ที่ป้องกันไม่ให้เกิดลมหมุนขึ้นที่ท้ายรถ (5 - 8%)

ทั้งนี้ปัจจัยต่าง ๆ ดังกล่าวนั้นจะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับความเร็วของรถยนต์ที่วิ่งไปที่จะเป็นผลทำให้แรงต้านทานของลมเพิ่มขึ้น และการทดลองพบว่า

$$R_a = k_a AV^2 \quad (2.2)$$

โดย k_a คือ สัมประสิทธิ์ของแรงต้านทานของอากาศ (kg/m^3)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของรถยนต์ส่วนที่ต้านกับลม (m^2)

V คือ ความเร็วของรถยนต์ (m/s)

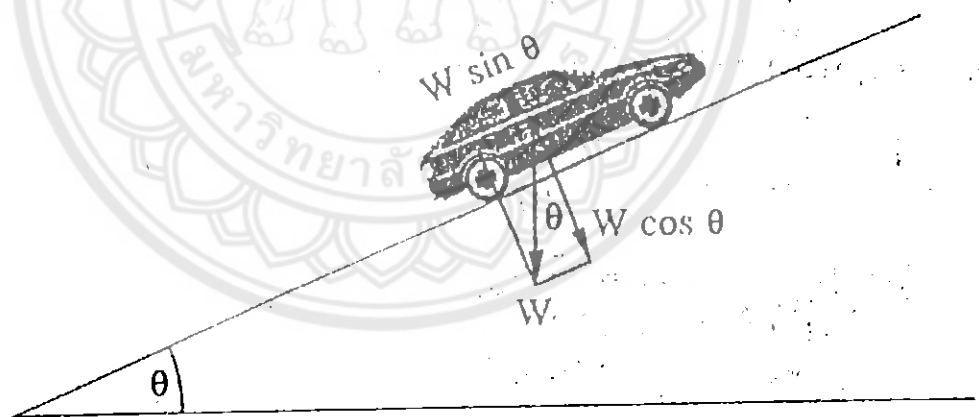
ค่าคงที่ k_a เป็นค่าที่กำหนดรูปร่างของรถซึ่งหาได้โดยการนำรถที่มีรูปร่างต่างๆ ไปทดสอบในอุโมงค์ลม ก็จะทราบค่าที่แน่นอนของ k_a ได้ สำหรับค่า k_a ของรถยนต์ต่างๆ มีค่าโดยประมาณดังแสดงในตารางที่ ข.2

3. แรงต้านทางชัน (gradient resistance)

ในขณะที่รถยนต์วิ่งขึ้นทางชัน ถ้าหลังจากเครื่องยนต์บางส่วนต้องถูกใช้ไปเพื่อเอาชนะแรงต้านทางชัน (gradient resistance) ทำให้เครื่องยนต์ต้องทำงานหนักมากกว่าการวิ่งบนถนนระดับแต่ในทางกลับกัน ถ้ารถยนต์วิ่งลงทางลาด เครื่องยนต์จะทำงานน้อยลงเพราะมีแรงเสริมจากแรงโน้มถ่วงของโลก

แรงต้านทางชันจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ

- 1) น้ำหนักของรถยนต์
- 2) ความชันของถนน



รูปที่ 2.3 แรงต้านทางชัน

(ที่มา หนังสือวิศวกรรมยานยนต์,ธีระบุท สุวรรณประณีป)

น้ำหนัก w ของรถยนต์สามารถแตกออกเป็นสองแนวตามรูปที่ 2.3 ได้แก่ $W \sin \theta_g$ และ $W \cos \theta_g$ แรงต้านทางชันเกิดจาก $W \sin \theta_g$ คือ รถยนต์จะต้องเพิ่มแรงขับเคลื่อนเพื่อเอาชนะแรง $W \sin \theta_g$ ดังนั้นแรงต้านทางชัน

$$R_g = W \sin \theta_g \quad (2.3)$$

เมื่อรวมแรงต้านการหมุนของล้อ แรงต้านอากาศ และแรงต้านทางชัน จะได้แรงต้านทั้งหมดของรถยนต์ในขณะที่กำลังวิ่งขึ้นทางชัน (ถ้ารถยนต์วิ่งบนถนนระดับ แรงต้านทั้งหมดจะมีเพียงแรงต้านการหมุนของล้อและแรงต้านอากาศ) ดังนั้น จะได้

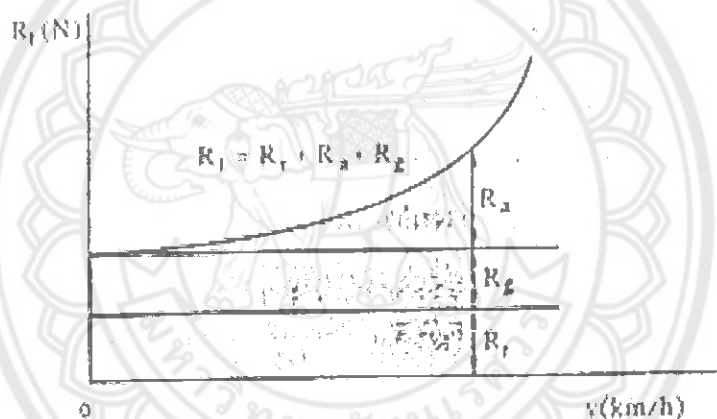
$$R_t = R_r + R_a + R_g \quad (2.4)$$

เมื่อ R_t = แรงต้านทั้งหมด มีหน่วยเป็น N

R_r = แรงต้านการหมุนของล้อ มีหน่วยเป็น N

R_a = แรงต้านอากาศ มีหน่วยเป็น N

R_g = แรงต้านทางชัน มีหน่วยเป็น N



รูปที่ 2.4 แรงต้านการเคลื่อนที่ทั้งหมด

(ที่มา หนังสือวิศวกรรมยานยนต์,ธีระยุทธ สุวรรณประทีป)

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่าแรงต้านทั้งหมดกับอัตราเร็วรถยนต์จะได้กราฟซึ่งมีลักษณะคล้ายกับที่แสดงในรูปที่ 2.4

2.1.2 แรงขับเคลื่อน

ในขณะที่รถยนต์กำลังวิ่งด้วยอัตราเร็วคงที่ใด ๆ เครื่องยนต์จะถ่ายทอดกำลังไปยังล้อขับเคลื่อนแรงขับเคลื่อนที่ล้อจะต้องมีค่าเท่ากับแรงต้านทั้งหมดในขณะนั้นเพื่อรักษาอัตราเร็วรถยนต์ให้คงที่แรงขับเคลื่อนจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างยางกับถนน ดังนั้นสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างยางกับถนนต้องสูงมากพอที่จะไม่ทำให้เกิดการลื่นไถลบริเวณผิวสัมผัสดังกล่าว

แรงขับเคลื่อนที่ล้อสามารถหาได้จากกำลังเครื่องยนต์ หรือในทางกลับกันก็สามารถหา กำลังเครื่องยนต์ได้จากแรงขับเคลื่อนที่ล้อ โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังเครื่องยนต์กับทอร์ก ของเครื่องยนต์ดังต่อไปนี้

$$P_c = 2\pi NT_c \quad (2.5)$$

เมื่อ P_c = กำลังของเครื่องยนต์ มีหน่วยเป็นวัตต์ (W)

N = อัตราเร็วรอบของเครื่องยนต์ มีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที (rpm)

T_c = ทอร์กของเครื่องยนต์ มีหน่วยเป็นนิวตัน - เมตร (N-m)

ทอร์กจากเครื่องยนต์ที่ถ่ายทอดไปยังล้อขับเคลื่อนจะมีบางส่วนสูญเสียไปในกระบวนการถ่ายทอดกำลัง แต่ทอร์กจะเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากอัตราทดเฟืองที่ห้องเกียร์และเฟืองท้าย ดังนั้น เมื่อรวมทั้งหมดแล้ว จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างทอร์กที่ล้อขับเคลื่อนกับทอร์กของเครื่องยนต์ดังนี้

$$T_w = \frac{\eta_i i_g i_r T_c}{100} \quad (2.6)$$

เมื่อ T_w = ทอร์กที่ล้อขับเคลื่อน มีหน่วยเป็น N · m

η_i = ประสิทธิภาพการถ่ายทอดกำลัง มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์

i_g = อัตราทดเฟืองของห้องเกียร์

i_r = อัตราทดเฟืองของชุดเฟืองท้าย

T_c = ทอร์กที่เครื่องยนต์ มีหน่วยเป็น N · m

ค่าประสิทธิภาพการถ่ายทอดกำลังสามารถได้จากตารางที่ ข.3

ทอร์กที่ล้อขับเคลื่อนสามารถเปลี่ยนเป็นแรงขับเคลื่อนได้ โดยใช้สูตรดังนี้

$$F = \frac{T_w}{r} \quad (2.7)$$

เมื่อ F = แรงขับเคลื่อนมีหน่วยเป็น N

T_w = ทอร์กที่ล้อขับเคลื่อนมีหน่วยเป็น N · m

r = รัศมีของยางรถยนต์ มีหน่วยเป็น m

ดังนั้น เมื่อรวมสูตรทั้งสองเข้าด้วยกันจะสามารถหาแรงขับเคลื่อนได้ดังนี้

$$F = \frac{\eta_i i_g i_r T_c}{100r} \quad (2.8)$$

$$\text{หรือ} \quad F = \frac{\eta_i i_o T_c}{100r}$$

เมื่อ $i_o = i_b \cdot i_r =$ อัตราทดเฟืองรวมทั้งหมด (overall gear ratio)

2.1.3 กำลังขับเคลื่อนของเครื่องยนต์

จากกฎข้อที่หนึ่งของนิวตัน เราสามารถสรุปได้ว่าในขณะที่รถยนต์กำลังเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วคงที่นั้น แรงขับเคลื่อนจะมีค่าเท่ากับแรงต้านทั้งหมดในขณะนั้น

$$\text{ดังนั้น} \quad \text{แรงขับเคลื่อน } F = \text{แรงต้านทั้งหมด } R_t$$

เราสามารถคำนวณหา กำลังขับเคลื่อนที่ล้อรถยนต์ได้โดยใช้แรงขับเคลื่อนคูณกับอัตราเร็วของรถยนต์ในขณะนั้น ดังนั้น จะได้

$$P_w = Fv \quad (2.9)$$

เมื่อ $P_w =$ กำลังขับเคลื่อนที่ล้อ มีหน่วยเป็น w

$F =$ แรงขับเคลื่อน มีหน่วยเป็น N

$v =$ อัตราเร็วของรถยนต์ มีหน่วยเป็น m/s

จากกำลังขับเคลื่อนที่ล้อ เราสามารถหากำลังของเครื่องยนต์ได้ เนื่องจากการถ่ายทอดกำลังจะมีการสูญเสียกำลังไปบางส่วน ดังนั้น เมื่อหาย้อนกลับไปหที่เครื่องยนต์ กำลังของเครื่องยนต์จะต้องมีค่ามากกว่ากำลังขับเคลื่อนที่ล้อ ดังนั้น จะได้

$$P_c = \frac{100P_w}{\eta_i}$$

หรือสามารถเขียนได้ดังนี้

$$P_c = \frac{100Fv}{\eta_i} \quad (2.10)$$

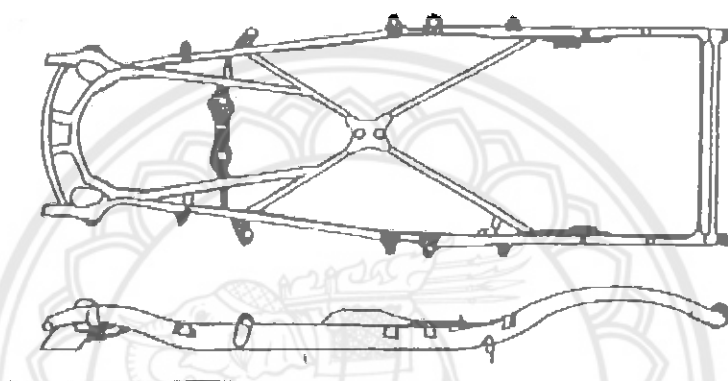
เมื่อ $P_c =$ กำลังของเครื่องยนต์ มีหน่วยเป็น w

$\eta_i =$ ประสิทธิภาพการถ่ายทอดกำลัง มีหน่วยเป็น %

2.2 โครงรถขนของไฟฟ้า

โครง (frame) ถูกออกแบบมาให้สามารถรองรับส่วนประกอบ หรือระบบต่าง ๆ ของแชสซิสและตัวถังได้อย่างแข็งแรงและรักษาให้ส่วนประกอบหรือระบบต่างๆเหล่านั้นอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องของมันได้อย่างมั่นคง โครงจะต้องมีน้ำหนักเบา แต่จะต้องแข็งแรงเพียงพอที่จะรับน้ำหนักและภาระของยานยนต์ได้โดยไม่ทำให้เกิดการบิดเบี้ยวผิดรูปร่าง โครงจะต้องแข็งแรง

มากพอที่จะ ปกป้องระบบต่าง ๆ ให้ปลอดภัยจากแรงต่าง ๆ ที่กระทำกับมันด้วย วัสดุที่นิยมใช้ทำ โครงโดยทั่วไปคือเหล็กกล้ารีดเย็น แต่บางครั้งเหล็กกล้าผสมที่ผ่านกรรมวิธีทางความร้อนก็นำมา ใช้ทำโครงด้วย เพื่อให้ได้ความแข็งแรงเท่ากัน แต่มีน้ำหนักน้อยกว่า เพื่อให้โครงแข็งแรงและ เบา เหล็กที่ใช้ทำโครงจึงมักจะเป็นเหล็กแผ่นที่ถูกอัดเย็นขึ้นรูปเป็นเหล็กทรงรถบรรทุกขนาดใหญ่ บางครั้งจะใช้โครงที่ทำจากเหล็กคานที่มีหน้าตัดเป็นรูปตัว I หรือหน้าตัดรูปอื่นๆ รูปที่ 2.5 ได้ แสดงตัวอย่างรูปร่างของโครงรถยนต์แบบหนึ่งไว้

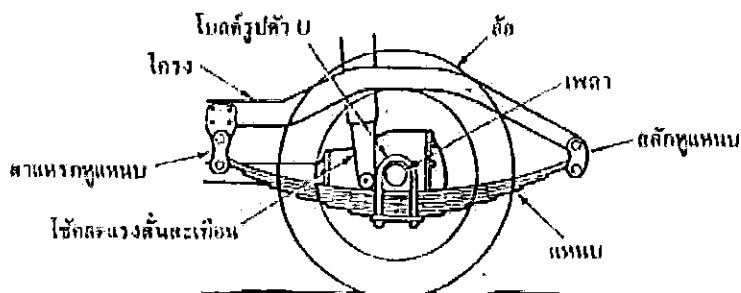


รูปที่ 2.5 ตัวอย่างโครงรถยนต์แบบหนึ่ง
(ที่มา หนังสือกลศาสตร์ยานยนต์, บัญชา กิ่งตระกูล)

2.3 ระบบกันสะเทือน

ระบบกันสะเทือนจะประกอบด้วยสปริงกับช็อคแอ็บซอร์บเบอร์ (chock absorber) สปริงมีหน้าที่รับแรงกระแทก ส่วนช็อคแอ็บซอร์บเบอร์มีหน้าที่หน่วงการกระแทกไม่ให้เห็นตาม การโค้งของสปริง สปริงที่นิยมใช้มีอยู่ 3 แบบคือ แหนบหรือสปริงแผ่น สปริงขดและทอร์ชั่นบาร์ (torsion bar)

รถยนต์ขนาดเล็ก เช่น รถเก๋ง รถสปอร์ต และรถกระบะเล็กทั่วไปในปัจจุบันนี้นิยมใช้ ระบบกันสะเทือนล้อหน้าเป็นแบบอิสระ ซึ่งอาจจะเป็นปีกนกกับสปริงขด หรือทอร์ชั่นบาร์ หรือ แม็กเฟอร์สันสตรัท ส่วนที่ล้อหลังเป็นคานแข็งกับแหนบ รถยนต์นั่งสมัยใหม่อาจใช้ระบบ กันสะเทือนอิสระทั้ง 4 ล้อ ก็ได้ แต่สำหรับรถยนต์ขนาดใหญ่ เช่น รถโดยสารและรถบรรทุกจะใช้ ระบบกันสะเทือนแบบคานแข็งร่วมกับแหนบทั้งล้อหน้าและล้อหลัง รูปที่ 2.6 ได้แสดงระบบกัน- สะเทือนแบบคานแข็งกับแหนบไว้ตามลำดับ

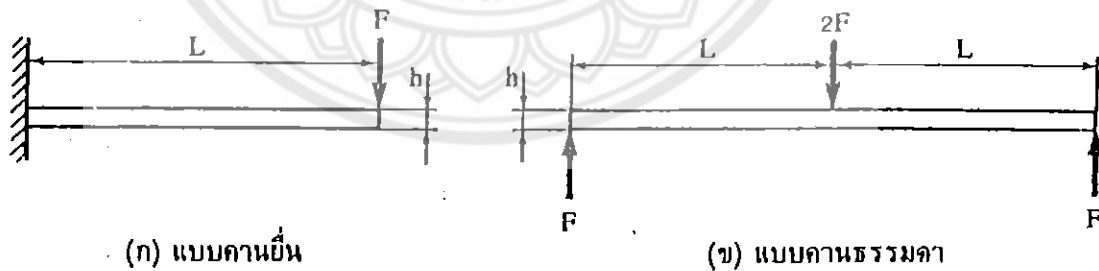


รูปที่ 2.6 ระบบกันสะเทือนแบบคานแข็งกับแหนบ
(ที่มา หนังสือกลศาสตร์ยานยนต์, บัญชา กิ่งตระกูล)

ในที่นี้จะขอลำดับถึงระบบกันสะเทือนแบบสปริงแผ่นหรือแหนบเพียงอย่างเดียว เนื่องจากเป็นระบบกันสะเทือนที่เลือกใช้

สปริงแผ่น (leaf spring) หรือแหนบ อาจเป็นลักษณะหนึ่งของคานยื่น (cantilever) ดังรูปที่ 2.7 (ก) หรือคานธรรมดาจดังรูปที่ 2.7 (ข) ก็ได้ ในที่นี้ให้พิจารณารูปที่ 2.8 (ก) ซึ่งคานมีความยาว l และความกว้าง b จากวิชากลศาสตร์วัสดุจะพบว่าที่หน้าตัดใดๆ ของคานจะมีความเค้นคัตที่ผิวนอกเท่ากับ

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = \frac{Fx(t/2)}{bt^3/12} = \frac{6Fx}{bt^2} \tag{2.11}$$



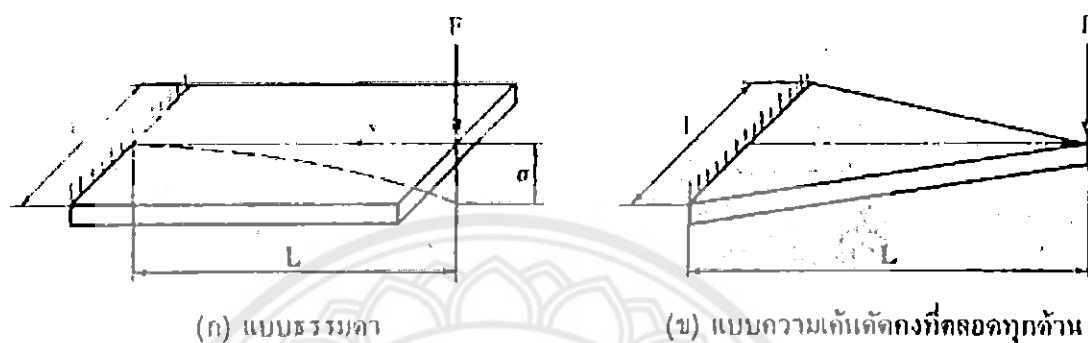
รูปที่ 2.7 สปริงแผ่นหรือแหนบ

(ที่มา หนังสือการออกแบบเครื่องจักรกล, วรวิทย์ อึ้งภากรณ์)

จากสมการนี้จะเห็นได้ว่า ความเค้นคัตสูงสุดเกิดขึ้นที่ $x = L$ และลดลงตามลำดับเมื่อเข้าไปใกล้ปลายอิสระแสดงว่าวัสดุที่อยู่ห่างจากปลายยึดแน่น มิได้นำมาใช้งานอย่างเต็มที่ ถ้าต้องการ

ใช้งานให้มีประโยชน์มากที่สุด เนื้อวัสดุควรจะรับความเค้นดัดเท่ากันทุกส่วน นั่นคือถ้าให้ σ ในสมการที่ 2.11 เป็นค่าคงที่แล้วจะเขียนใหม่ได้เป็น

$$b = \frac{6Fx}{\sigma t^2} \quad (2.12)$$



(ก) แบบธรรมดา

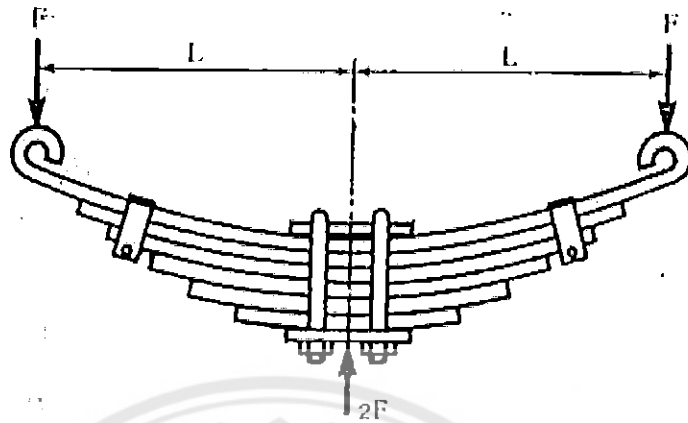
(ข) แบบความเค้นดัดคงที่ตลอดทุกด้าน

รูปที่ 2.8 สปริงแผ่น

(ที่มา หนังสือการออกแบบเครื่องจักรกล, วริทธิ์ อังภากรณ์)

ถ้าความหนาเท่ากันตลอด จากสมการที่ 2.12 จะเห็นได้ว่าความกว้างของคานจะต้องแปรผันตามระยะ x ในลักษณะเส้นตรง ดังนั้นคานที่มีความเค้นดัดคงที่ตลอดหน้าตัดจะต้องมีลักษณะดังรูปที่ 2.8 (ข) ซึ่งทำให้ประหยัดวัสดุได้ถึง 50 % ถ้าพิจารณาสปริงแผ่นตามรูปที่ 2.7 (ข) จะเห็นว่า การโค้งงอของครึ่งหนึ่งของคานมีลักษณะเหมือนรูปที่ 2.7 (ก) ทุกประการจึงสามารถใช้สมการเดียวกันได้ สปริงแทนบใช้หลักการเดียวกันนี้ โดยใช้คานรูปสามเหลี่ยมหน้าจั่วมาตัดเป็น n แถบ ซึ่งมีความกว้างแต่ละแผ่นเท่ากับ b แล้วนำมาประกบซ้อนกัน

แถบหรือแผ่นของสปริงแทนบดังกล่าวนี้จะมีปลายแหลม แต่ในการรับแรงขณะใช้งาน จะมีแรงเสียดทานเกิดขึ้นด้วย รวมทั้งต้องมีหูเกี่ยวเพื่อให้แรงส่งผ่าน ดังนั้นแผ่นประธาน (main leaf) ของสปริงแทนบจึงต้องทำให้ปลายไม่แหลม ลักษณะดังรูปที่ 2.9 นอกจากนี้ยังปรับปรุงให้ใช้งานได้ดีขึ้นโดยทำให้สปริงแทนบโค้งลง ส่วนโค้งที่ต้องการคือส่วนโค้งที่ทำให้แผ่นประธานเกือบจะตรงในขณะที่รับแรงตามต้องการ



รูปที่ 2.9 สปริงเหินบทั่วไป
(ที่มา หนังสือการออกแบบเครื่องจักรกล, วริทธิ์ อึ้งภากรณ์)

ค่าความเค้นโดยประมาณของสปริงเหินบที่มีจำนวน n แผ่น หาได้จากสมการที่ 2.12 โดยการแทนค่า $x = L$ และ $l = nb$ คือ

$$\sigma = \frac{6FL}{nbt^2} \quad (2.14)$$

จากสูตรของคานาอื่นจะพบว่า ระยะโค้งที่ปลายคานาแบบความเค้นค้ดคงที่มีค่าเท่ากับ

$$\delta = \frac{FL^3}{2EI} \quad (2.15 ก)$$

แทนค่า $I = \frac{nbt^3}{12}$ ลงในสมการข้างบนจะได้ว่า

$$\delta = \frac{6FL^3}{Enbt^3} \quad (2.16 ข)$$

ซึ่งเป็นระยะโค้งโดยประมาณของสปริงเหินบที่ต้องการ

ค่าความแข็งของสปริงเหินบก็หาได้โดยใช้ค่านิยาม $k = F/\delta$ ซึ่งจากสมการที่ 2.16 (ข) จะได้

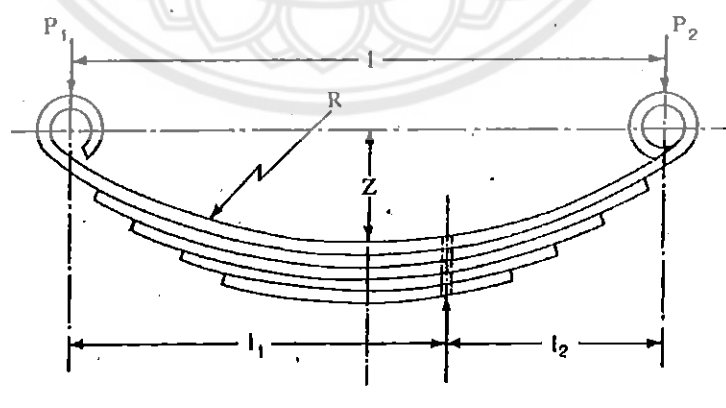
$$K = \frac{Enbt^3}{6L^3} \quad (2.17)$$

ในทางปฏิบัติผู้ผลิตมักจะทำให้ความโค้งของสปริงแต่ละแผ่นไม่เท่ากัน โดยที่แผ่นซึ่งสั้นกว่าจะทำให้มีความโค้งมากกว่าดังรูปที่ 2.10 แสดงถึงความโค้งของแผ่นสปริงแต่ละแผ่น โดยให้คิดเฉพาะแผ่นแรกและแผ่นที่สอง หลังจากที่ยึดติดกันแน่นแล้วแผ่นล่างจะบีบแผ่นบนให้มีความเค้นกดเกิดขึ้นที่ผิวบนของแผ่นบน แต่ในการใช้งานดังลักษณะของรูปที่ 2.9 ที่ผิวบนจะรับความเค้นดึง ดังนั้นจึงทำให้สปริงสามารถรับแรงได้มากขึ้นอีก



รูปที่ 2.10 ความโค้งของแผ่นสปริง
(ที่มา หนังสือการออกแบบเครื่องจักรกล, วริทธิ์ อึ้งภากรณ์)

ความเค้นสูงสุดในแนบแต่ละแผ่นของชุดแนบที่มีความยาวลดหลั่นกันลงไปจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาของมัน คือแนบแผ่นที่บางกว่าจะมีค่าความเค้นสูงสุดน้อยกว่าแนบแผ่นที่หนากว่า



รูปที่ 2.11 รูปแสดงความโค้งของแนบ

(ที่มา หนังสือกลศาสตร์ยานยนต์, บัญชา คังตระกูล)

ความโค้งค้งเคิม หรือ camber ของແหนบจะถูกรำหนดขึ้นในลักษณะที่มันจะกลายเป็นแผ่นตรง เมื่อมันรับภาระสถิต (static load) เติมที่ความโค้งของແหนบจะหาได้จากสูตร (ดูรูปที่ 2.11 ประกอบ)

$$R = \frac{l^3}{8Z} + \frac{Z}{2} \approx \frac{l^2}{8Z} \quad (2.18)$$

เมื่อ R คือ รัศมีความโค้งของແหนบ

Z คือ ระยะตั้งฉากวัดจากเส้นที่ลากผ่านศูนย์กลางของແหนบทั้งสองมาถึงผิวด้านบนของແหนบแผ่นหลัก

l คือ ความยาวของແหนบแผ่นหลัก

2.4 เพลาหน้า

เพลาหน้า (front axle) โดยทั่วไปเป็นเพลาที่ไม่หมุน คุมล้อหน้าจะหมุนอยู่บนลูกเป็นตลับแบบลูกตั้งเอียง ซึ่งอยู่ติดกับแกนล้อและเป็นชิ้นเดียวกับชุดคุมล้อ เพื่อให้แกนล้อกับชุดคุมล้อสามารถหมุนได้ เมื่อถูกกลไบบังคับเลี้ยวมาด้นหรือค้ง คุมล้อกับแกนล้อทั้งชุดจะถูกยึดด้วยสลักเข้ากับปลายของเพลาหน้าสลักซึ่งทำหน้าที่เป็นจุดหมุนนี้เรียกว่า สลักล้อหน้า (king pin) หรือ (steering knuckle pin)

เพลาหน้าจะเกิดความค้งขึ้น 2 อย่าง คือ ความค้งค้งกับความค้งเอียง ในสภาวะที่อยู่กับที่หรืออยู่ค้ง เลาหน้าสามารถพิจารณาให้เป็นคานที่ถูกรองรับตรงปลายได้ คือ ถูกรองรับตรงจุดศูนย์กลางของล้อ และมีภาระกระทำตรงจุดศูนย์กลางของແหนบ โมเมนต์ค้งในแนวค้งที่เกิดขึ้นจะมีค่าเป็นศูนย์ตรงจุดรองรับ และมีค่าสูงสุดตรงจุดที่ภาระกระทำ จากนั้นจะมีค่าค้งที่ลดลง

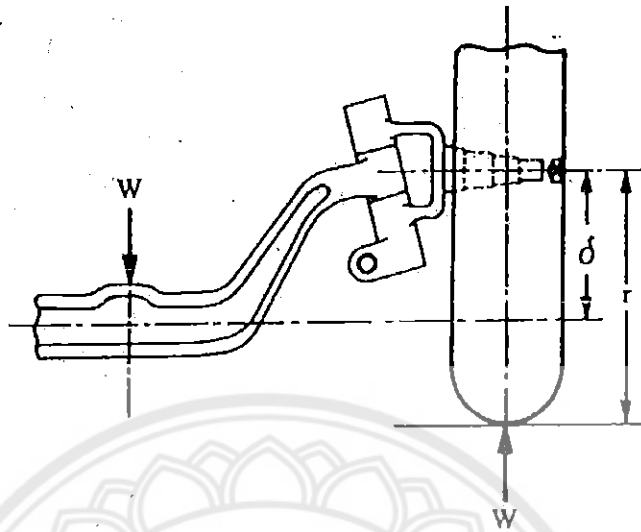
ค้งนั้น โมเมนต์ค้งสูงสุด จะมีค่าเป็น

$$M = Wl \quad (2.19)$$

เมื่อ W คือ ภาระที่กระทำกับล้อแต่ละข้าง

l คือ ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางล้อถึงจุดศูนย์กลางของແหนบ

ในสภาวะที่รถยนต์เคลื่อนที่ โมเมนต์ค้งในแนวค้งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากความขรุขระของถนน แต่ค่าโมเมนต์ค้งหาได้ยาก และค้งนั้นจึงขจัดความยุ่งยากออกไปโดยนำเกณฑ์ความปลอดภัย (safety factor) เข้ามาใช้ในการออกแบบ เลาหน้าจะเกิดโมเมนต์ค้งในแนวระดับเนื่องจากแรงต้านทานการเคลื่อนที่ด้วยโมเมนต์ค้งอันนี้มีลักษณะคล้ายกับ โมเมนต์ค้งในแนวค้งแต่มีค้งน้อยกว่ามากจึงตัดทิ้งไปได้ ยกเว้นในกรณีที่มีค่าสูงจึงจะนำมาพิจารณา



รูปที่ 2.12 เพลาน้ำแบบ drop type
(ที่มา หนังสือกลศาสตร์ยานยนต์, บัญชา กิ่งตระกูล)

แรงต้านทานการเคลื่อนที่จะทำให้เกิดแรงบิดขึ้นกับเพลาน้ำด้วย ถ้าเพลาน้ำเป็นแบบ drop type ที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.12 ดังนั้น เพลาน้ำส่วนที่ยื่นออกมาจากแหวนจะมีภาระทั้งการบิดและการตัดแรงบิดที่กระทำจะมีค่าเป็น

$$T_R = R\delta \tag{2.20}$$

เมื่อ R คือ แรงหรือความต้านทานการเคลื่อนที่
 δ คือ ระยะจากแกนล้อถึงจุดศูนย์กลางหน้าตัดขวางของเพลาน้ำ โดยวัดในแนวตั้ง

ความเค้นเฉือนในเพลาน้ำเกิดจากแรงบิดในการห้ามล้อด้วย ซึ่งแรงบิดในการห้ามล้อนี้อาจมีค่าเป็น

$$T_b = \mu W r \tag{2.21}$$

เมื่อ μ คือ สัมประสิทธิ์การขีดเกาะระหว่างถนนกับยางรถยนต์
 = 0.6 สำหรับถนนที่แห้งและแข็ง (เป็นค่าสูงสุดของ μ)

r คือ รัศมีของล้อ

แรงบิดห้ามล้อจะมีค่าน้อยลงสำหรับเพลาน้ำส่วนที่อยู่ระหว่างแหวนและมีค่าเป็น

$$T_b = \mu W (r - \delta) \tag{2.22}$$

สำหรับเพลาน้ำส่วนนี้ โมเมนต์คัมมีอิทธิพลมากกว่าแรงบิดแต่สำหรับส่วนที่เป็น steering head แรงบิดจะมีอิทธิพลเหนือกว่า ดังนั้น เพลาน้ำในส่วนที่โมเมนต์คัมมีอิทธิพลมากกว่า จึงสร้างเป็นคานซึ่งมีหน้าตัดเป็นรูปตัว I และในส่วนที่แรงบิดมีอิทธิพลมากกว่า หน้าตัดของเพลาน้ำจะค่อย ๆ เปลี่ยนไปเป็นหน้าตัดกลม รี หรือสี่เหลี่ยมตรงช่วงที่ต่อกับชุดคุมล้อ

สำหรับเพลาน้ำส่วนที่แรงบิดมีอิทธิพลมากกว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและแรงบิด จะหาได้จากสูตรของการบิด คือ

$$\tau = \frac{Tc}{J} \quad (2.23)$$

- เมื่อ τ คือ ค่าความเค้นเฉือนสูงสุดที่เกิดขึ้นในเพลาน้ำ
 T คือ แรงบิดสูงสุดบนระนาบของหน้าตัดของเพลาน้ำ
 c คือ ระยะจากแกนสะเทินถึงผิวนอกสุดของเพลาน้ำ

$$= \frac{d}{2}$$

- ซึ่ง d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของเพลาน้ำ ในกรณีที่เพลาน้ำมีหน้าตัดกลม เท่ากับแกนหลัก (major axis) ของหน้าตัดในกรณีที่เพลาน้ำมีหน้าตัดเป็นวงรีหรือรูปไข่

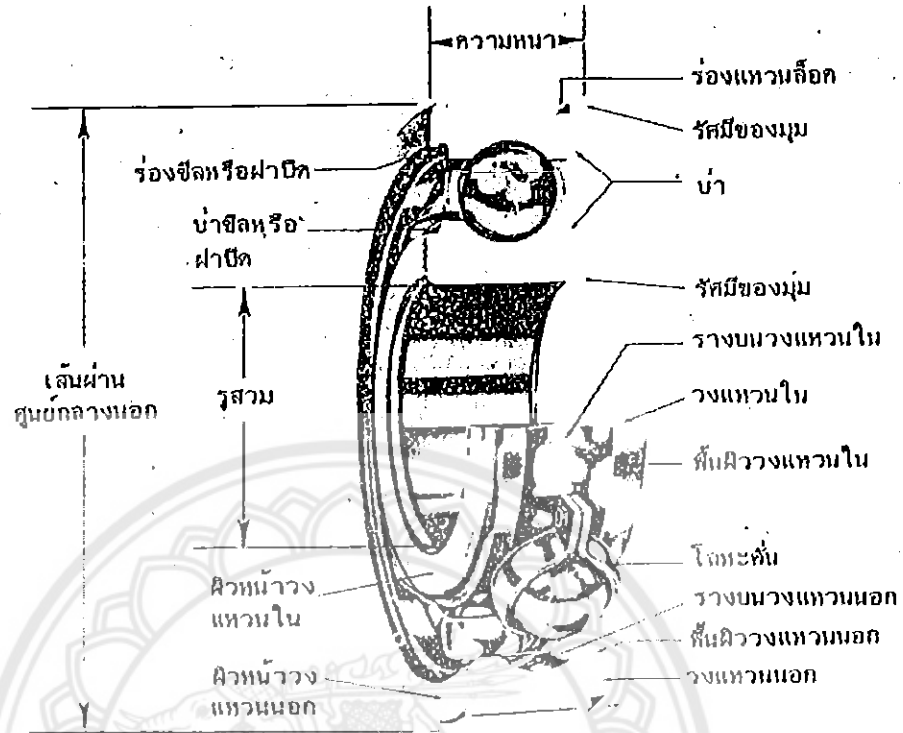
- และ J คือ โมเมนต์ความเฉื่อย (polar moment of inertia) ของหน้าตัด

$$= \frac{\pi}{32} d^4 \text{ สำหรับหน้าตัดกลม}$$

$$= \frac{\pi}{32} d^3 b \text{ สำหรับหน้าตัดรูปวงรี ซึ่งมี } d \text{ เป็นแกนหลัก และ } b \text{ เป็นแกนรอง}$$

2.5 โรลลิงแบร์ริง

โรลลิงแบร์ริง (rolling bearing) หมายถึงแบร์ริงที่รับแรงโดยอาศัยชิ้นส่วนของแบร์ริงที่มีผิวสัมผัสแบบกลิ้ง (Rolling contact) แทนที่จะเป็นผิวสัมผัสแบบเลื่อน (sliding contact) เนื่องจากแบร์ริงชนิดนี้มีค่าความเสียดทานน้อยมาก ดังนั้นจึงมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งที่นิยมใช้กันทั่วไปในวงการอุตสาหกรรมว่า แอนติฟริกชันแบร์ริง (anti-friction bearing) ตัวอย่างเช่น บอลแบร์ริง (ball bearing) หรือคัตกลับลูกปืน ดังรูป 2.13 ซึ่งประกอบด้วยวงแหวนเหล็กกล้าสองวงแยกออกจากกันด้วยลูกกลิ้งทรงกลม ลูกกลิ้งเหล่านี้รับแรงมาจากวงแหวนหนึ่งแล้วส่งผ่านไปยังวงแหวนอีกวงหนึ่ง โดยการกลิ้งไปบนวงแหวน

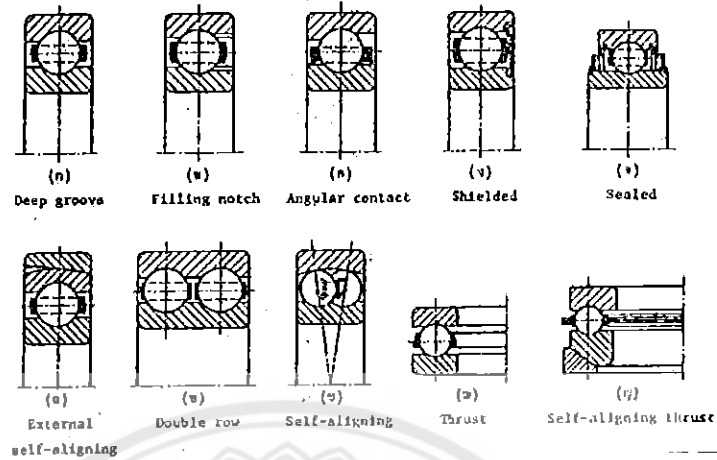


รูปที่ 13 ส่วนต่างๆของบอลแบร์ริง
(ที่มา หนังสือการออกแบบเครื่องจักรกล, วรวิทย์ อึ้งภากรณ์)

2.5.1 ชนิดของแบร์ริง

โดยทั่วไปแล้วบอลแบร์ริงจะแบ่งออกได้เป็นสองพวกใหญ่ๆ คือ บอลแบร์ริงชนิดมีลูกกลิ้งเป็นรูปทรงกลม และ โรลเลอร์แบร์ริงซึ่งมีลูกกลิ้งเป็นทรงกระบอกตรงหรือเป็นรูปทรงกระบอกเรียวก็ได้ โดยปกติแล้วแบร์ริงเหล่านี้จะรับแรงได้ในแนวรัศมีและแรงรุนได้ ยกเว้นโรลเลอร์แบร์ริงชนิดทรงกระบอกตรงเท่านั้น แบร์ริงทั้งสองนี้ยังแยกออกเป็นชนิดต่างๆดังที่แสดงไว้ในรูป 2.14 ในที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะแบร์ริงชนิด Deep groove ซึ่งเป็นชนิดที่ใช้เท่านั้น

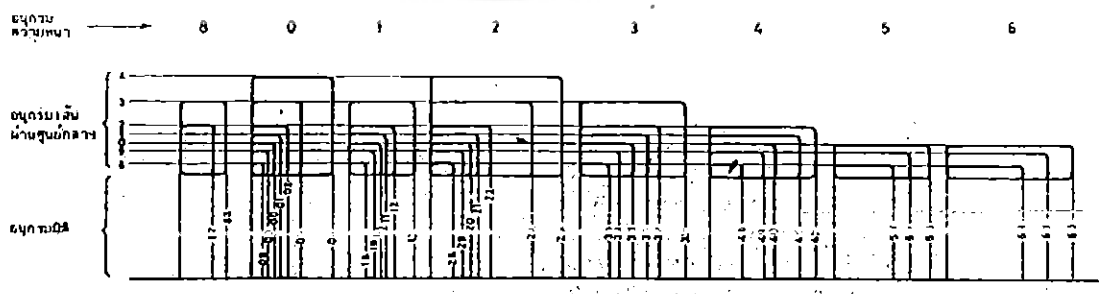
สำหรับบอลแบร์ริงชนิดที่มีลูกกลิ้งหนึ่งแถวร่องลึก (Single-row Deep-Groove) ประกอบด้วยร่องลึกเป็นทางกลิ้งสำหรับลูกกลิ้งทรงกลม ดังรูป 2.14(ก) สามารถรับแรงในแนวแกนได้เป็น 0.7 เท่าของแรงในแนวรัศมี และสามารถรับการเอียงแนวของเพลลาได้ประมาณ $\pm 0^{\circ}15'$ เมื่อต้องการเพิ่มความสามารถในการรับแรงในแนวรัศมีขึ้นไปอีก ก็อาจทำได้โดยการเพิ่มจำนวนลูกกลิ้งที่บรรจุในรางให้มากขึ้น ซึ่งจำเป็นที่จะต้องตัดคิ้วหน้าวงแหวนด้านหนึ่งให้มีช่องสำหรับใส่ลูกกลิ้งเพิ่มเข้าไป การทำเช่นนี้จะทำให้แบร์ริงรับแรงในแนวรัศมีเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 20 ถึง 40 % แต่ความสามารถในการรับแรงในแนวแกนจะลดลง



รูปที่ 2.14 บอลเบร้งชนิดต่างๆ
(ที่มา หนังสือการออกแบบเครื่องจักรกล, วริทธิ์ อิงภากรณ์)

2.5.2 มิติมาตรฐานของโรลลิงเบร้ง

การกำหนดมาตรฐานของเบร้ง ทำให้ผู้ผลิตสามารถที่จะผลิตเบร้งได้ราคาถูกลง ทำให้ผู้
ออกแบบสามารถที่จะเลือกใช้ได้สะดวก และทำให้ดูแลรักษา ตลอดจนการเก็บเบร้งสำรองกระทำ
ได้ง่ายขึ้น ด้วยเหตุนี้ สมาคม AFBMA ซึ่งเป็นผู้รับผิดชอบในการจัดพิมพ์มาตรฐานของเบร้งชนิด
ต่างๆ จึงร่วมกับสมาคมเกี่ยวกับโรลลิงเบร้งอื่นๆ จัดทำมาตรฐานให้เข้ากับขององค์การมาตรฐาน
ระหว่างประเทศ (ISO) มาตรฐานนี้จะบอกถึงมิติภายนอกของเบร้งคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
ภายนอก-ภายในและคงามหนา ส่วนมิติภายในเบร้งให้เป็นไปตามที่ผู้ผลิตจะออกแบบ



รูปที่ 2.15 แสดงขอบเขตของมิติ สำหรับอนุกรมมิติของเบร้งต่างๆ
(ที่มา หนังสือการออกแบบเครื่องจักรกล, วริทธิ์ อิงภากรณ์)

มาตรฐานดังกล่าวนี้จะเห็นได้จากรูป 2.15 ซึ่งประกอบด้วยอนุกรมเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter Series) เรียงเบอร์จากต่ำสุด 8 9 0 1 2 3 และ 4 โดยอนุกรม 8 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กที่สุด และอนุกรม 4 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโตที่สุด ส่วนความหนา (Width Series) เรียงเบอร์จากต่ำสุด 8 0 1 2 3 4 5 และ 6 ซึ่งเป็นอนุกรมหนาที่สุด ดังนั้นมาตรฐานของเบร้งจึงบอกได้โดยรวมเบอร์ของอนุกรมเส้นผ่านศูนย์กลาง กับอนุกรมความหนาเข้าด้วยกัน เรียกว่า อนุกรมมิติ (Dimension Series) โดยที่เลขตัวแรกเลขอนุกรมความหนาและเลขตัวที่สองแทน อนุกรมเส้นผ่านศูนย์กลางเช่นอนุกรม 03 หมายถึง เบร้งที่มีอนุกรมความหนา 0 และอนุกรมเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 เป็นต้น

2.5.3 อายุการใช้งานของโรลลิงเบร้ง

เบร้งที่ได้รับการติดตั้งและหล่อลื่นอย่างดี ตลอดจนดูแลรักษาให้ปราศจากฝุ่น หรือผงต่างๆ และไม่อยู่ภายใต้แรงกระทำที่มีค่าสูงมากจนเกินความสามารถที่เบร้งจะรับไว้ได้แล้ว เบร้งจะเสียหาย เนื่องจากความล้าที่เกิดขึ้นในวัสดุเบร้งเท่านั้น ดังจะเห็นได้ว่าเบร้งที่เสียหายจะมีเศษผงหลุดออกมาเป็นจำนวนมาก ทั้งนี้เพราะพื้นที่สัมผัสระหว่างลูกกิ้งและวงแหวนมีค่าน้อย ดังนั้นความเค้นที่เกิดขึ้นในลูกกิ้งหรือวงแหวนจึงมีค่าสูงเข้าใกล้ความเค้นของเอิร์ชในขณะที่ลูกกิ้งหมุนไปรอบวงแหวน วัสดุส่วนที่รับแรงของเบร้งจะอยู่ภายใต้ความเค้นที่เปลี่ยนแปลงจากศูนย์ไปยังค่าสูงสุดแล้วกลับลงมาเป็นศูนย์อยู่ตลอดเวลา แต่เนื่องจากค่าความเค้นนี้สูงกว่าขีดจำกัดความทนทานของวัสดุเบร้ง ดังนั้นจึงเกิดการเสียหายขึ้น โดยความล้าซึ่งแสดงว่าอายุการใช้งานของเบร้งมีระยะเวลาจำกัดขึ้นอยู่กับค่าความเค้นที่กระทำซ้ำตามการทดสอบของ Lundberg และ Plamgren ซึ่งเป็นพื้นฐานสำหรับการประเมินค่ามาตรฐานของ AFBMA จะทำให้ทราบว่ายอายุการใช้งาน L เป็นสัดส่วนกลับกับแรงในแนวรัศมี P (ในกรณีที่มีทั้งแรงในแนวรัศมีและแรงรุน P จะเป็นแรงในแนวรัศมีสมมูล(Equivalent Radial)) ฉะนั้นจะเป็นไปดังนี้

$$L \propto \frac{1}{P^k} \quad (2.24)$$

โดยที่ค่าคงที่ $k = 3$ สำหรับบอลเบร้ง

$k = 3.33$ สำหรับโรลเลอร์เบร้ง

อายุการใช้งาน L นี้มักจะนับเป็นจำนวนซึ่งโมงที่ความเร็วรอบของเพลอันหนึ่ง หรือนับเป็นจำนวนล้านรอบ mr (millions of revolution) จากสมการ 2.24 จะได้ว่า

$$\frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^k \quad (2.25)$$

2.5.4 การประเมินค่าอายุใช้งานและแรง

สมาคม AFBMA ได้ตั้งนิยามและจัดตั้งวิธีการเลือกแบร์ริง ดังต่อไปนี้

1. อายุการใช้งานของโรตลิ่งแบร์ริง หมายถึง จำนวนรอบ(หรือจำนวนชั่วโมงที่ความเร็วรอบคงที่) ซึ่งแบร์ริงหมุนก่อนที่จะเริ่มเกิดความล้าขึ้นในวงแหวนหรือลูกกลิ้ง
2. อายุประเมิน (Rating life) ของโรตลิ่งแบร์ริงจำนวนหนึ่ง ซึ่งจะมีลักษณะเหมือนกันทุกประการ หมายถึง จำนวนรอบ (หรือจำนวนชั่วโมง) ที่ความเร็วคงที่ ซึ่งแบร์ริง 90 % จากจำนวนนี้สามารถหมุนได้โดยไม่เกิดความเสียหายเนื่องมาจากความล้าและใช้แทนด้วยอายุใช้งาน L_{10}
3. แรงสถิตย์ประเมิน (Basic Static load rating) หมายถึงแรงในแนวนอนที่ทำให้เกิดระยะยุบตัวทำให้เกิดระยะยุบตัวของลูกกลิ้งและวงแหวนรวมกันเท่ากับ 0.0001 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกกลิ้ง และใช้แทนด้วย C_0 และค่าของ C_0 สำหรับแบร์ริงอนุกรมมิติต่าง ๆ ดูได้จากตารางที่ ข.5 ค่า C_0 นี้ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำแบร์ริง จำนวนแฉกของลูกกลิ้งในแบร์ริง จำนวนลูกกลิ้งต่อแฉก มุมสัมผัสตลอดจนขนาดของลูกกลิ้งและวงแหวน

โดยปกติแล้วแรงสถิตย์ประเมินไม่ค่อยจะมีผล ต่อการเลือกแบร์ริงมากนัก แต่ถ้าแบร์ริงรับแรงสูงและอยู่หนึ่งเป็นเวลานานก็อาจทำให้เกิดการยุบตัวอย่างถาวร (Permanent Deformation) เป็นแห่ง ๆ ได้ ดังนั้นในบางครั้งจึงต้องมีการตรวจสอบว่า แรงที่มากกระทำมีค่ามากเกินไปกว่า C_0 หรือไม่

4. แรงพลวัตประเมิน (Basic Load Rating) บางครั้งอาจจะเรียกว่า สมรรถนะแรงพลวัต (Basic Dynamic Capacity) ของโรตลิ่งแบร์ริง หมายถึง แรงที่กระทำในแนวนอน ซึ่งแบร์ริงที่มีลักษณะเหมือนกันจำนวนหนึ่งจะรับได้ โดยประเมิน L_{10} เท่ากับหนึ่งร้อยรอบเมื่อวงแหวนอันในเป็นตัวหมันและวงแหวนอันนอกอยู่นิ่ง และใช้แทนด้วย C ซึ่งอยู่ในตารางที่ ข.5

แรงพลวัตประเมิน C นี้ เป็นค่าที่ใช้ในการเลือกแบร์ริงเพื่อให้รับแรง และมีอายุการใช้งานได้ตามต้องการ โดยการเปลี่ยนแรงและอายุใช้งานจริงมาเป็นแรงและอายุใช้งานที่แสดงไว้ในแคตตาล็อก หรือในทางกลับกัน คือเลือกแบร์ริงจากแคตตาล็อกแล้วเปลี่ยนให้รับแรงเท่าที่ต้องการใช้งานจริง และดูว่าอายุประเมินจะได้ตามอายุใช้งานที่ต้องการหรือไม่ สามารถทำได้โดยใช้สมการ 2.25 ดังนี้

ให้ L_{10} เป็นอายุใช้งานจริงซึ่งมีหน่วยเป็นล้านรอบ (mr) และ P เป็นแรงในแนวนอนที่แบร์ริงจะต้องรับขณะใช้งานจริง จากสมการ 2.25 จะเห็นว่า

$$\begin{aligned} L_1 &= L_{10} & P_1 &= P \\ L_2 &= 1 \text{ mr} & P_2 &= C \end{aligned}$$

หรือ
$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^k \tag{2.26}$$

2.5.5 แรงสมมูล

ในการใช้งานจริง โรลลิงแบร์ริงอาจจะรับแรงในแนวรัศมีและแนวแกน และวงแหวนในหรือนอกจะเป็นอันที่หมุนก็ได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องเปลี่ยนแรงและเงื่อนไขจากที่ใช้ทำงานจริง ๆ มาให้เป็นแรงในแนวรัศมี โดยมีวงแหวนในค้ำหมัน เรียกว่า แรงสมมูล (Equivalent Force) เพื่อจะได้ใช้ในการเลือกแบร์ริงจากแค็ตตาล็อกได้ และคำนวณได้จากสมการ

$$P = XV F_r + Y F_a \quad (2.27)$$

หรือ $P = V F_r \quad (2.28)$

โดยที่

$$P = \text{แรงสมมูล}$$

$$F_r = \text{แรงในแนวรัศมี}$$

$$F_a = \text{แรงในแนวแกนหรือแรงรูน}$$

$$V = \text{ตัวประกอบการหมุน (Rotation Factor) : มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อวงแหวนในเป็นค้ำหมัน และ 1.2 เมื่อวงแหวนนอกหมัน ถ้าเป็นบอลแบร์ริงชนิด self-aligning ให้ใช้ค่าเท่ากับ 1 เสมอ}$$

$$X = \text{ตัวประกอบแรงในแนวรัศมี (Radial load factor)}$$

$$Y = \text{ตัวประกอบแรงรูน (Thrust load factor)}$$

2.6 เพลาท้าย

เพลาท้ายมีอยู่สองแบบคือ เพลาไม่หมุน (dead axles) และเพลาหมุน (live axles) แบบเพลาไม่หมุนนั้นจะอยู่กับที่โดยไม่หมุนไปบนเพลลา อย่างเช่น คานหน้าของรถบรรทุก (solid axle) ก็จัดเป็นเพลาไม่หมุน แบบเพลาหมุน ตัวเพลลาจะยึดติดกับล้อ ดังนั้นล้อและเพลลาจะหมุนไปด้วยกัน แบบเพลาหมุนนี้มีอยู่ 3 แบบ แบ่งตามการรองรับน้ำหนักของเพลลาและการยึดติดกับล้อคือ แบบเพลาลอย (full floating axle) แบบกึ่งลอย (semi-floating axle) และแบบเพลาลอยสามในสี่ส่วน (three quarter floating axle)

1. เพลาแบบ semi-floating เพลาท้ายแบบนี้จะใช้กับรถยนต์นั่งทั่ว ๆ ไป และรถบรรทุกเล็ก ในกรณีนี้เรือนชุดเฟืองคอกจอกจะมีลูกปืนรองรับ เพลาขับล้อจะมีร่องสไปนส์สอดอยู่ในเฟืองคอกจอกที่ด้านข้าง ดังนั้น ปลายด้านในของเพลาขับล้อจะถ่ายทอดเฉพาะแรงบิดและไม่มีแรงอื่นใดกระทำอีก จึงเรียกว่า ลอยตัว (floating) ความเค้นที่เกิดจากการทำงานของชุดเฟืองคอกจอกจะถูกเรือนเพลาท้ายรับไป ปลายด้านนอกของเพลาขับล้อจะถูกรองรับด้วยลูกปืน 1 คู่ตั้งอยู่ในเรือนเพลา และล้อจะถูกยึดเข้าไปกับส่วนที่เรียว (taper) ของปลายเพลลาส่วนนี้ เพราะฉะนั้นเพลาขับล้อจึงรับโมเมนต์ค้ำที่เกิดจากการลื่นไถล (slip) การหมุนและการเค็งของล้อ ส่วนเพลาล้อจะรับน้ำหนักทั้งหมดของรถยนต์

2. เพลาแบบ tree - quarter floating เพลาท้ายแบบนี้จะใช้กับรถบรรทุกขนาดกลางและรถยนต์นั่งขนาดใหญ่บางประเภท ในกรณีนี้ล้อจะถูกรองรับด้วยลูกปืนตลับหนึ่งบนด้านนอกของเรือนเพลาลงและยึดเข้ากับปลายเพลาด้านที่เรียว ความเค้นที่เกิดจากการหมุน การสิ้นไถลและการเค็งของล้อจะเกิดขึ้นที่เพลาล้อคล้ายกับแบบ semi-floating แต่น้ำหนักรถยนต์ประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์จะตกลงที่เรือนเพลาลงและน้ำหนักส่วนที่เหลือจะถูกเพลาล้อรับไว้

3. เพลาแบบ full - floating เพลาท้ายแบบนี้ส่วนมากจะใช้กับรถบรรทุกขนาดใหญ่ ในกรณีนี้ลูกปืนแบบลูกกลิ้งเรียว 2 ตลับจะอยู่ระหว่างด้านนอกของเรือนเพลากับคุมล้อ ล้อจะถูกขับผ่าน dog หรือสไปลน์ตรงปลายของเพลาล้อ ในกรณีนี้เพลาล้อจะถ่ายทอเฉพาะแรงบิดที่ใช้ในการขับเคลื่อนความเค้นที่เกิดจากการหมุน การสิ้นไถลและการเค็งของล้อจะเกิดขึ้นที่เรือนเพลาลงโดยส่งผ่านมาจากลูกปืนล้อ เรือนเพลาลงจะรับน้ำหนักทั้งหมดของรถยนต์ (ส่วนที่ตกลงที่ล้อนั้น) เพลาล้อสามารถถอดออก และประกอบเข้าไปได้โดยไม่ต้องถอดล้อ หรือไม่ต้องยุ่งกับชุดเพื่องคอกจอก ซึ่งไม่เหมือนกับแบบ semi-floating และ three-quarter floating ในกรณีนี้ล้อจะยังคงอยู่ในตำแหน่งเดิมแม้ว่าเพลาล้อจะขาดไปแล้ว ซึ่งไม่สามารถทำได้ถ้าเป็นแบบ semi-floating หรือ three - quarter floating

2.6.1 ความแข็งแรงของเพลาท้าย

ในที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะรายละเอียดความแข็งแรงของเพลาท้ายแบบกึ่งลอยเท่านั้น เนื่องจากเป็นแบบที่เลือกใช้ เพลาแบบนี้จะได้รับแรงค้ำและแรงบิด ฉะนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางของเพลาลงจะขึ้นอยู่กับโมเมนต์ค้ำและความยาวของเพลาลงที่ปลายเพลาด้านเพื่องท้ายจะมีขนาดเล็กที่สุด ที่จุดนี้จะเป็นที่รวมแรงบิด ส่วนปลายด้านนอกจะมีขนาดใหญ่ที่สุดเพราะว่าที่จุดนี้โมเมนต์ค้ำจะมีค่ามากที่สุด เมื่อล้อเกิดสิ้นไถลหรือหยุดหมุนเนื่องจากการเร่งหรือการห้ามล้อจะทำให้เพลาลงเกิดความเครียดมากที่สุด

แรงเสียดทานที่เกิดขึ้น คือ μW

กำหนดให้ μ คือ สัมประสิทธิ์ระหว่างยางกับถนน (สำหรับถนนแห้ง = 0.6)

W คือ น้ำหนักที่ตกลงที่แต่ละล้อ

แรงเสียดทาน μW จะทำให้เกิดแรงบิดเท่ากับ $\mu W r$ และโมเมนต์ค้ำ ที่จุดกึ่งกลางของลูกปืนด้านนอกเท่ากับ $\mu W l$

กำหนดให้ r คือ รัศมีทำการของล้อ

l คือ ระยะระหว่างเส้นกึ่งกลางยางถึงลูกปืนด้านนอกของเพลาลง

น้ำหนัก W จะทำให้เกิดโมเมนต์ค้ำบนเพลาลงที่กึ่งกลางของลูกปืนด้านนอก เท่ากับ Wl

แต่แรงบิดข้อเคลื่อนแต่ละข้อ $= \frac{T_w}{2}$
 $= \frac{1}{2} G \eta_t T_e$

แรงบิดจากการข้อเคลื่อนจะมากกว่าแรงบิดเนื่องจากความฝืด ในขณะที่เดียวกันจะมี
 โมเมนต์ดัดเกิดขึ้นบนเพลลาที่ถูกป็นตัวนอกในแนวตั้งเท่ากับ Wl และในแนวนอนเท่ากับ μWl

∴ ผลลัพธ์ของ โมเมนต์ดัดบนเพลลา

$$\begin{aligned} M_b &= \sqrt{(Wl)^2 + (\mu Wl)^2} \\ &= Wl \sqrt{1 + \mu^2} \quad (\text{Nm}) \end{aligned} \tag{2.29}$$

และความเค้นดัด $\sigma_b = \frac{M_b y}{I} \quad (\text{N/m}^2)$

กำหนดให้ y คือ ระยะจากแกนสะเทิน (neutral axis) ไปยังผิวของเพลลา (m)

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของเพลลา

$$\begin{aligned} I &= \frac{\pi d^4}{64} \\ \sigma_b &= \frac{M_b d/2}{\pi d^4 / 64} \\ &= \frac{32 Wl \sqrt{1 + \mu^2}}{\pi d^3} \quad (\text{N/m}^2) \end{aligned} \tag{2.30}$$

ความเค้นเฉือนของเพลลา

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{T_y}{J} \\ J &= \text{โมเมนต์ภาคตัดเชิงขั้วของพื้นที่} \\ &= \frac{\pi d^4}{32} \quad (\text{m}^2) \end{aligned}$$

T_{max} คือ แรงบิดสูงสุดที่เกิดบนเพลลา

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{\mu W r}{\frac{\pi d^3}{32}} \quad (\text{N/m}^2) \end{aligned} \tag{2.31}$$

ถ้าใช้สูตรของความเค้นรวม ความเค้นดึง หรือความเค้นอัดสูงสุดของเพลาก็เท่ากับ

$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &= \frac{\sigma_b}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{2}\right)^2 + \tau^2} \\ &= \frac{16Wl}{\pi d^3} \left(\sqrt{1+\mu^2} \pm \sqrt{\mu^2(r^2+l^2)+l^2} \right) \quad (2.32)\end{aligned}$$

ความเค้นเฉือนสูงสุดของเพลาก็

$$\begin{aligned}\tau_{\max} &= \sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{2}\right)^2 + \tau^2} \\ &= \frac{16W}{\pi d^3} \sqrt{\mu^2(r^2+l^2)+l^2} \quad (2.33)\end{aligned}$$

โดยทั่วไปความเค้นเฉือนของเพลาก็มีค่าประมาณ 294 – 326 MN/m²

2.7 ล้อ

ล้อจะเป็นตัวที่รับน้ำหนักทั้งหมดของยานยนต์ โดยถ่ายทอดการหมุนและแรงบิดในการขับเคลื่อนยานยนต์ และแรงบิดในการห้ามล้อสำหรับการลดความเร็วของยานยนต์ ล้อที่มีโครงไม่สมมูลจะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนมากซึ่งจะมีผลทำให้ยางและสลักล้อหน้า (king pin) สึกกร่อนมากขึ้น ส่วนที่จำเป็นของล้อคือ คุมล้อ ซึ่งยึดติดอยู่กับแกนล้อและขอบกระทะล้อซึ่งใช้ในการใส่ยางคุมล้อกับกระทะล้อจะถูกยึดต่อเข้าด้วยกัน โดยใช้ชิ้นส่วนที่เป็นงานหรือซี่ลวด (หรือซี่กงล้อ) ก็ได้ คุมเบรกหรือจานเบรกจะยึดติดอยู่กับคุมล้อ โครงสร้างของล้อมีอยู่หลายแบบ แล้วแต่ชนิดของยานยนต์ ยางที่ใช้กับรถยนต์เป็นแบบสูบลม แบบใช้ยางใน (tube tyre)

2.8 ระบบห้ามล้อ

ห้ามล้อที่ใช้ในรถยนต์มี 2 ชนิด คือ ห้ามล้อเท้ากับห้ามล้อมือ (หรือห้ามล้อฉุกเฉิน) ห้ามล้อเท้าใช้ในการควบคุมความเร็วของรถยนต์หรือหยุดรถยนต์เมื่อต้องการ โดยออกแรงเหยียบที่เป็นเหยียบห้ามล้อ ห้ามล้อมือทำงานด้วยคันห้ามล้อ ใช้ในการป้องกันไม่ให้รถยนต์ที่เมื่อจอดรถยนต์ไว้ ห้ามล้อมือเรียกว่าเป็นห้ามล้อฉุกเฉินได้เพราะว่าสามารถใช้ห้ามล้อมือ เพื่อหยุดรถยนต์ได้เมื่อห้ามล้อเท้าเสียไม่สามารถใช้งานได้ รถยนต์ในปัจจุบันนี้จะห้ามล้อทั้ง 4 ล้อ ห้ามล้อที่ล้อหน้าจะต้องไม่ไปทำให้การควบคุมการเลี้ยวของล้อหน้าขัดข้อง

2.8.1 ชนิดของห้ามล้อ

ห้ามล้อถูกจำแนกออกตามการทำงานของฝักเบรก (brake shoe) กับกระทะเบรก (brake drum) เป็นแบบขยายออกจากภายนอก (internal-expanding) กับแบบจับเข้าจากภายนอก (external contraction) นอกจากนี้ยังแบ่งออกเป็นแบบกลไกกับแบบไฮดรอลิกขึ้นอยู่กับวิธีถ่ายทอดแรงจากคันห้ามล้อหรือแป้นเหยียบห้ามล้อไปยังฝักห้ามล้อ (brake shoe) ว่าใช้กลไกกันต่อหรือใช้ความดันของน้ำมันไฮดรอลิก สำหรับรถยนต์สมัยใหม่ห้ามล้อเท้าโดยทั่วไปจะเป็นแบบทำงานด้วยไฮดรอลิกและเป็นแบบขยายออกจากภายใน ส่วนห้ามล้อมือจะเป็นแบบทำงานด้วยกลไก ซึ่งจะเป็นแบบจับหรือรัดเข้าจากภายนอก หรือขยายออกจากภายในก็ได้

การจำแนกชนิดของห้ามล้ออีกอย่างหนึ่ง คือ แยกออกเป็นแบบห้ามล้อกระทะ (drum brake) กับห้ามล้อจาน (disc brake) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวเฉพาะห้ามล้อกระทะเท่านั้น

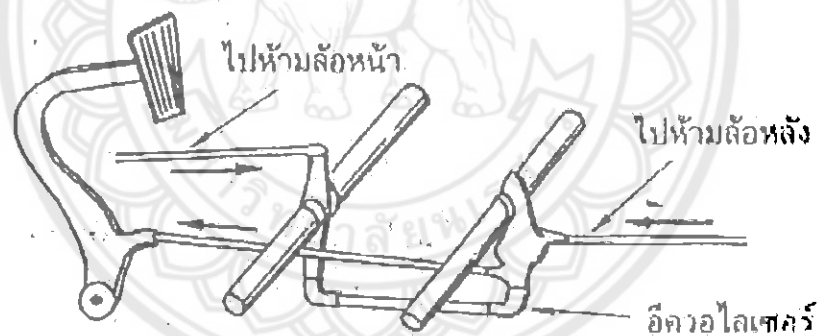


รูปที่ 2.16 แสดงชิ้นส่วนของชุดห้ามล้อ
(ที่มา หนังสือกลศาสตร์ยานยนต์, บัญชา กิ่งตระกูล)

2.8.2 ส่วนประกอบหลัก

ส่วนประกอบหลักของระบบห้ามล้อ คือ ชุดห้ามล้อที่ล้อและกลไก ซึ่งทำให้ชุดห้ามล้อที่ล้อทำงาน ชุดห้ามล้อประกอบด้วยชิ้นส่วนหลักตามรูปที่ 2.16 backing plate เป็นแผ่นหรือจานเหล็กกล้าอัดขึ้นรูปติดอยู่ตรงปลายของเพลาล้อ และฝักห้ามล้อติดอยู่กับ backing plate นี้ ฝักห้ามล้อเป็นชิ้นส่วนที่มีลักษณะโค้ง ตามปกติจะมีอยู่ 2 ฝักต่อล้อ 1 ล้อ และยึดด้วยสลัก ที่ติดอยู่กับ backing plate โดยมีจุดศูนย์กลางร่วมกับล้อ ปลายข้างหนึ่งของฝักห้ามล้อยึดกับสลัก ส่วนปลายอีกข้างหนึ่ง

(ในกรณีที่เป็นแบบขยายออกจากภายใน) ถูกคั้นให้เคลื่อนที่ต่างออกเมื่อห้ามล้อทำงาน ผ้าห้ามล้อ ซึ่งเป็นวัสดุพิเศษที่ผสมด้วยแอสเบสตอสอาจจะติดกับฝักห้ามล้อด้วยการอัดหรือด้วยการบ้ำหุ้ม ผ้าห้ามล้อจะเข้าไปสัมผัสกับกระทะเมื่อห้ามล้อทำงาน ความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างผ้าห้ามล้อกับกระทะจะต้านทานการหมุนของล้อ ผ้าห้ามล้อจะเกิดความร้อนสูงและเกิดแรงขึ้นมาเมื่อถูกอัดติดกับกระทะห้ามล้อ ในขณะที่ห้ามล้อเต็มที่อาจจะเกิดความดันขึ้นถึง 6.38 นิวตัน/ตารางมิลลิเมตร และอุณหภูมิอาจจะสูงถึง 260 องศาเซลเซียส ครีบบระบายความร้อนที่ติดอยู่ด้านนอกของกระทะล้อ จะช่วยระบายความร้อนออกจากชุดห้ามล้อออกสู่บรรยากาศ กระทะห้ามล้อ จะติดอยู่กับค้อนล้อด้วยการยึดด้วยโบลต์และหมุนไปพร้อมกับล้อ สำหรับห้ามล้อแบบขยายออกจากภายใน ผ้าห้ามล้อจะสัมผัสกับผิวด้านในของกระทะและแบบจับเข้าจากภายนอก ผ้าห้ามล้อจะสัมผัสกับผิวด้านนอกของกระทะ สลักหมุนที่ปลายของฝักห้ามล้อ เรียกว่า anchors ถูกบีบห้ามล้อ (wheel cylinder) ใช้ในการดันฝักห้ามล้อให้สัมผัสกับกระทะเมื่อความดันของน้ำมันไฮดรอลิกกระทำสำหรับ ห้ามล้อกลไกจะใช้ลูกเบี้ยวแทนในการทำให้ฝักห้ามล้อเข้าไปสัมผัสกับกระทะ เมื่อปล่อยเป็นเหยียบห้ามล้อ สปริงห้ามล้อจะดึงฝักห้ามล้อกลับไปอยู่ในตำแหน่งที่ห้ามล้อไม่ทำงาน

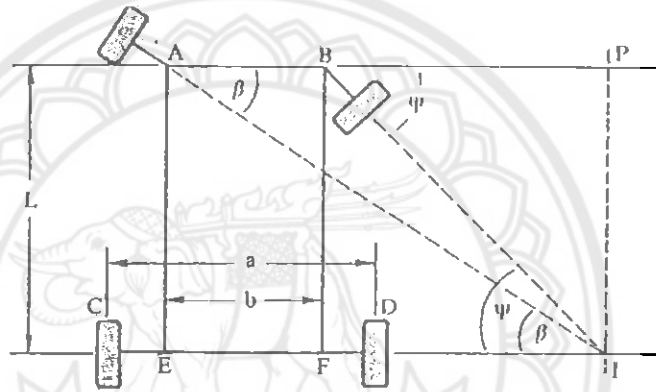


รูปที่ 2.17 แสดงกลไกการห้ามล้อ
(ที่มา หนังสือกลศาสตร์ยานยนต์, บัญชา กิ่งตระกูล)

กลไกในการห้ามล้อประกอบด้วยแป้นเหยียบห้ามล้อ คันห้ามล้อ และก้านต่อต่าง ๆ คนขับจะออกแรงเหยียบที่เป็นเหยียบห้ามล้อ ก้านต่อจะถ่ายทอดแรงเหยียบของคนขับไปยังฝักห้ามล้อ ในกรณีที่เป็นห้ามล้อกลไก ก้านต่อเหล่านี้จะมีลักษณะเป็นแท่งและคานต่อเข้าด้วยกัน โดยทำให้การห้ามล้อเท่ากันทั้ง 4 ล้อ (ดูรูปที่ 2.17) สำหรับระบบไฮดรอลิก คันเหยียบห้ามล้อจะทำให้แม่ปั๊มห้ามล้อ(master pump) ทำงานอัดน้ำมันไฮดรอลิกไปยังลูกปั๊มที่ล้อ และถ่ายทอดแรงให้ฝักห้ามล้อเข้าไปสัมผัสกับกระทะ

2.9 ระบบบังคับเลี้ยว

เมื่อรถยนต์วิ่งไปบนถนนจะเห็นรอยสั้บคัสต์ที่เสียดสีกันระหว่างยางกับถนน การกลิ้งตัวของยางบนผิวถนนนั้นจะพิจารณาได้จากการเขียนวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน ในขณะที่รถเลี้ยวแกนล้อ (stub axle) ของล้อจะเอียงตัวไปตามทิศทางของการเลี้ยว แนวแกนล้อทั้งสองที่หันเลี้ยวจะพบกันที่จุดศูนย์กลางของการเลี้ยว โดยจุดนี้จะอยู่ในแนวเดียวกับเพลาลัง จากรูปที่ 2.18 จะเห็นว่าแกนล้อด้านในของการเลี้ยวเอียงทำมุมกับแนวเส้นเพลาลังเป็นมุม Ψ และมีขนาดกว้างกว่ามุม β ของแกนล้อด้านนอกของการเลี้ยว



รูปที่ 2.18 การบังคับเลี้ยวของรถยนต์

(ที่มา หนังสือกลศาสตร์ยานยนต์, เผล็ง แสนเกษม)

- กำหนดให้
- $a = CD$ คือ ช่วงกว้างระหว่างล้อ
 - $b = AB$ คือ ระยะระหว่างจุดหมุนของเพลาลัง
 - $L = AE$ คือ ช่วงยาวระหว่างล้อ
 - I คือ จุดศูนย์กลาง การเลี้ยวของล้อทั้ง 4

ถ้าลากเส้น IP ตั้งฉากกับ AB ที่จุด P ดังรูปที่ 2.18

$$b = AP - BP$$

$$= L \cot \beta - L \cot \Psi$$

นั่นคือ $\cot \beta - \cot \Psi = \frac{b}{L}$ (2.34)

สูตรนี้เป็นสูตรเบื้องต้นถ้าหากล้อไม่ตีไถล อัตราส่วน $\frac{b}{L}$ ก็จะเป็นไปตามสมการ

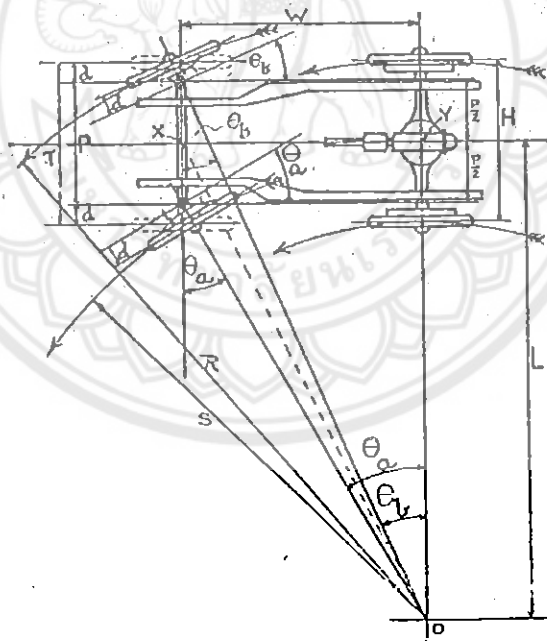
2.9.1 วิธีการของระบบบังคับเลี้ยว

ระบบบังคับเลี้ยว แบ่งได้ 2 แบบ คือ

1. แบบเดวิส (Davis steering gear)
2. แบบอ็คเคอแมนน์ (Ackermann steering gear)

สองแบบนี้มีลักษณะแตกต่างกันคือแบบเดวิสเป็นแบบชิ้นส่วนต่าง ๆ เลื่อนไปมา ทำให้เกิดความฝืดและสึกหรออันเป็นผลทำให้ค่าของมุมผิดพลาดไป ส่วนแบบอ็คเคอแมนน์ เป็นแบบที่ชิ้นส่วนต่าง ๆ เคลื่อนที่โดยการหมุนเพียงอย่างเดียว ในที่นี้ขอกล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับระบบบังคับเลี้ยวแบบอ็คเคอแมนน์เท่านั้น ซึ่งเป็นระบบที่เลือกใช้

ระบบการเลี้ยวแบบอ็คเคอแมนน์ เป็นระบบการเลี้ยว ซึ่งขณะเลี้ยวรถเพลาล้อหน้าจะไม่เคลื่อนที่ไปทั้งแกน จะมีเฉพาะชิ้นส่วนที่อยู่ค้ำนอกของสลักล้อเท่านั้นที่เคลื่อนที่ โดยการบังคับของชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่ต่อจากพวงมาลัย ระบบการเลี้ยวแบบอ็คเคอแมนน์ นี้ใช้กับรถยนต์ในปัจจุบันทั้งหมด นอกจากรถที่ใช้ระบบบังคับเลี้ยวด้วยไฮดรอลิกส์



รูปที่ 2.19 ระบบการเลี้ยวแบบอ็คเคอแมนน์
(ที่มา หนังสือกลศาสตร์ยานยนต์, ชัยสวัสดิ์ เทียนวิบูลย์)

พิจารณารูปที่ 2.19 จะเห็นว่าจุดศูนย์กลางของการเลี้ยวของทุกล้ออยู่ที่จุด O แต่มุมเลี้ยวจะมีสองมุม คือมุมเลี้ยวของล้อใน (θ_a) และมุมเลี้ยวของล้อนอก (θ_b)

การหาความสัมพันธ์ของมุมเงี้ยวและระยะต่าง ๆ สามารถกระทำได้อาศัยคลึงกับระบบการเลี้ยวของจักรยาน คือ

1. ความสัมพันธ์ของมุมเงี้ยวและความยาวอื่น ๆ

$$\cot \theta_a = \frac{L - 0.5P}{W} \quad (2.35)$$

$$\cot \theta_b = \frac{L + 0.5P}{W} \quad (2.36)$$

$$\cot \theta_b - \cot \theta_a = \frac{L + 0.5P - L + 0.5P}{W}$$

$$\cot \theta_b - \cot \theta_a = \frac{P}{W} \quad (2.37)$$

เมื่อ P = ความกว้างระหว่างสลักล้อหน้า

W = ความยาวช่วงล้อหน้า - หลัง

θ_a = มุมเงี้ยวของล้อใน

θ_b = มุมเงี้ยวของล้อนอก

2. ระยะระหว่างสลักล้อถึงศูนย์กลางของยาง

จากรูปที่ 2.19 $d = 0.5(T - P)$ (2.38)

เมื่อ d = ระยะระหว่างสลักล้อถึงศูนย์กลางของยาง

T = ความกว้างของช่วงล้อหน้า

3. ระยะจากกึ่งกลางของตัวรถที่เพลาหลังถึงจุดศูนย์กลางของการเลี้ยว

จากสมการที่ 2.35 $\cot \theta_a = \frac{L - 0.5P}{W}$

$$W \cot \theta_a = L - 0.5P$$

$$L = W \cot \theta_a + 0.5P \quad (2.39)$$

4. รัศมีของการเลี้ยว

รัศมีการเลี้ยวของล้อหน้าล้อใน

$$\begin{aligned} S &= W \operatorname{cosec} \theta_a - d \\ &= W \operatorname{cosec} \theta_a - 0.5(T - P) \end{aligned} \quad (2.40)$$

รัศมีการเลี้ยวของล้อหน้าล้อนอก

$$R = W \operatorname{cosec} \theta_b + d$$

$$= W \operatorname{cosec} \theta_b + 0.5(T-P) \quad (2.41)$$

รัศมีการเลี้ยวของล้อหลังล้อใน

$$\begin{aligned} L - 0.5H &= W \cot \theta_a + 0.5P - 0.5H \\ &= W \cot \theta_a - 0.5(H-P) \end{aligned} \quad (2.42)$$

รัศมีการเลี้ยวของล้อหลังล้อนอก

$$\begin{aligned} L + 0.5H &= W \cot \theta_a + 0.5P + 0.5H \\ &= W \operatorname{cosec} \theta_a + 0.5(T+P) \end{aligned} \quad (2.43)$$

5. มุมเลี้ยว

การหามุมเลี้ยวขณะที่รัศมีการเลี้ยวเท่ากับ R หาได้จากสมการที่ 2.41 คือ

$$\begin{aligned} R &= W \operatorname{cosec} \theta_b + 0.5(T-P) \\ \operatorname{cosec} \theta_b &= \frac{R - 0.5(T-P)}{W} \end{aligned}$$

$$\operatorname{cosec}^2 \theta_b = \left[\frac{R - 0.5(T-P)}{W} \right]^2$$

จากสมการตรีโกณมิติ

$$\operatorname{cosec}^2 \theta_b = 1 + \cot^2 \theta_b$$

หรือ $1 + \cot^2 \theta_b = \operatorname{cosec}^2 \theta_b$

$$1 + \cot^2 \theta_b = \left[\frac{R - 0.5(T-P)}{W} \right]^2 \quad (ก)$$

จากสมการที่ 2.37

$$\cot \theta_b - \cot \theta_a = \frac{P}{W}$$

หรือ $\cot \theta_b = \cot \theta_a + \frac{P}{W}$

$$\cot^2 \theta_b = \left(\cot \theta_a + \frac{P}{W} \right)^2 \quad (ข)$$

แทนค่าสมการ (ข) ลงในสมการ (ก)

$$1 + \left(\cot \theta_a + \frac{P}{W} \right)^2 = \left[\frac{R - 0.5(T-P)}{W} \right]^2$$

$$\begin{aligned}
 \left(\cot \theta_a + \frac{P}{W}\right)^2 &= \left[\frac{R - 0.5(T - P)}{W}\right]^2 - 1 \\
 \cot \theta_a + \frac{P}{W} &= \sqrt{\left[\frac{R - 0.5(T - P)}{W}\right]^2 - 1} \\
 \cot \theta_a &= \sqrt{\left[\frac{R - 0.5(T - P)}{W}\right]^2 - 1} - \frac{P}{W} \quad (2.44)
 \end{aligned}$$

2.9.2 การติดตั้งกลไกการบังคับลิ้น

การติดตั้งกันส่งมี 2 ลักษณะ คือ

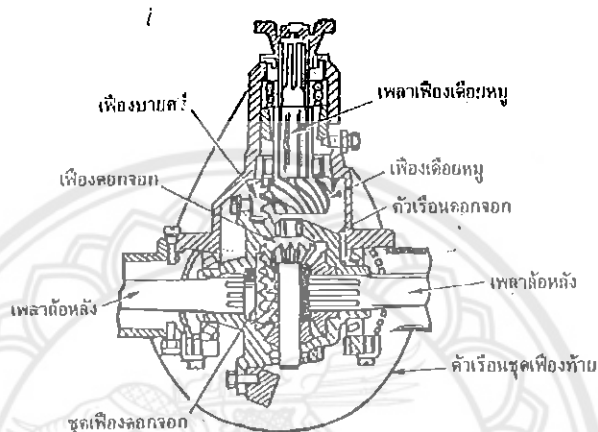
1. แบบติดตั้งภายใน แบบนี้กันส่งจะติดตั้งอยู่หลังคานหน้า เพื่อป้องกันไม่ให้ตัวกันส่งกระแทกกับสิ่งกีดขวางบนถนนและตัวกันส่งจะอยู่ในลักษณะรับแรงอัด
2. แบบติดตั้งภายนอก แบบนี้ตัวกันส่งจะติดตั้งอยู่ทางด้านหน้าคาน อาจทำให้กระแทกกับสิ่งกีดขวางได้ ถ้าตัวกันส่งอ้อมก็จะมีผลต่อมุมล้อหน้าได้ การติดตั้งในลักษณะนี้ตัวกันส่งจะรับแรงดึง

2.10 ชุดเฟืองท้าย

ชุดเฟืองท้าย (final drive) คือ ระบบส่งกำลังระหว่างเพลากลางกับชุดเฟืองคอกจอก (differential) จุดประสงค์ในการใช้ชุดเฟืองท้ายก็เพื่อเปลี่ยนทิศทางการส่งกำลังจากเพลากลางไปสู่เพลาท้าย ซึ่งเพลาทั้ง 2 ทำมุมกัน 90 องศา และทำให้เกิดการได้เปรียบเชิงกลจากเพลากลางไปสู่เพลาขับล้อ อัตราทดของชุดเฟืองท้ายจะมีค่าคงที่

ชุดเฟืองท้ายจะประกอบด้วยเฟืองฉาก (bevel gear) คู่หนึ่ง เฟืองขับเรียกว่าเฟืองเดือยหมุน (drive pinion) ซึ่งต่ออยู่กับเพลากลาง เฟืองตามเรียกว่าเฟืองบายศรี (ring gear หรือ crown wheel) ซึ่งต่ออยู่กับเรือนของชุดเฟืองคอกจอก ตามธรรมชาติเฟืองที่ใช้มักเป็นเฟืองฉากเกลียว (spiral bevel gear) ส่วนเฟืองไฮโปอยด์ (hypoid gear) ซึ่งเป็นเฟืองฉากเกลียวแบบพิเศษนั้นจะใช้กับรถยนต์นั่งและรถบรรทุกขนาดเล็ก เฟืองไฮโปอยด์ทำให้เฟืองเดือยหมุนสามารถวางอยู่ต่ำกว่าศูนย์กลางของเฟืองบายศรีได้ ดังนั้นจะทำให้เพลากลางมีตำแหน่งต่ำลงและทำให้มีระยะห่างจากตัวถังมากขึ้น ชุดเฟือง-หนอน (worm drive) ใช้กับรถบรรทุกเป็นส่วนใหญ่ เพราะสามารถทำให้เกิดอัตราทด สูง ๆ ได้ ชุดเฟืองหนอนประกอบด้วยเกลียวหนอนแบบปากเคียว 2, 3 หรือ 4 ปาก ที่ขบอยู่กับเฟืองหนอนแบบเฉียง เรือนชุดเฟืองคอกจอกจะถูกยึดด้วยโบลต์ติดอยู่กับเฟืองหนอนและเกลียวหนอน จะวางอยู่ด้านบนของเฟืองหนอน โดยให้มีระยะห่างระหว่างถนนกับด้านล่างของเรือนเพลาท้ายมากพอ

อัตราทดของชุดเฟืองท้ายแบบเฟืองฉากหาได้โดยหารจำนวนฟันของเฟืองบายศรีด้วยจำนวนฟันของเฟืองเดือยหมุ สำหรับชุดเฟืองท้ายแบบเฟืองหนอน จะหาได้โดยหารจำนวนฟันของเฟืองหนอนด้วยจำนวนปากเกลียวของเกลียวหนอน รถยนต์นั่งจะมีอัตราทดชุดเฟืองท้ายอยู่ระหว่าง 3 : 1 ถึง 5 : 1 ส่วน รถบรรทุกจะอยู่ระหว่าง 5 : 1 ถึง 11 : 1 ชุดเฟืองท้ายแบบเฟืองฉากได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 แสดงชุดเฟืองท้ายแบบเฟืองฉาก
(ที่มา หนังสือกลศาสตร์ยานยนต์, บัญชา กิ่งตระกูล)

ภายในชุดเฟืองท้ายจะมีชิ้นส่วนประกอบด้วยหลายอย่าง ที่สำคัญคือ ชุดเฟืองคอกจอก โดยในขณะที่รถยนต์วิ่งเข้าโค้ง ล้อด้านนอกจะต้องหมุนเร็วกว่าล้อด้านใน เพื่อให้ได้ระยะทางมากกว่าล้อด้านใน สำหรับรถยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยล้อหลัง ที่ล้อหน้าไม่มีปัญหายุ่งยากอะไร เพราะล้อหน้าแต่ละล้อสามารถหมุนเป็นอิสระต่อกัน แต่ที่ล้อหลังจะต่อเข้าเพลากับล้อและหมุนไปด้วย จึงต้องมีอุปกรณ์มาช่วยให้ล้อทั้ง 2 ข้าง หมุนด้วยความเร็วต่างกันได้ ชุดเฟืองคอกจอกจะทำให้ล้อหลังหมุนด้วยความเร็วต่างกัน โดยไม่มีผลต่อการขับเคลื่อนของรถยนต์ขณะวิ่งเข้าโค้ง

ชุดเฟืองคอกจอก (รูปที่ 2.20) ประกอบด้วยเฟืองเฟืองคอกจอก ซึ่งยึดเข้ากับเฟืองบายศรี เฟืองคอกจอกซึ่งเป็นเฟืองขับ (differential pinion) จำนวนหนึ่ง (ตามปกติจะมี 2 หรือ 4 เฟือง) จะยึดติดกับเฟืองชุดเฟืองคอกจอกด้วยสลักและขบอยู่กับเฟืองคอกจอกทางด้านข้าง (differential side gear) 2 เฟือง

เฟืองคอกจอกทางด้านข้างจำนวน 2 เฟือง จะอยู่บนสไปนของเพลากับล้อทั้ง 2 ข้างที่สอดเข้ามาในเฟืองชุดเฟืองคอกจอกแต่ละด้าน เพลากับล้อจะหมุนอยู่ในเฟืองชุดเฟืองคอกจอกและขับล้อให้หมุน ตามธรรมชาติแล้วเฟืองคอกจอกจะเป็นเฟืองฉากเกลียว

กำลังจะถ่ายทอดจากเฟืองบายศรีไปยังเพลาขับล้อย้อนผ่านเฟืองดอกจอกขับและเฟืองดอกจอกทางด้านข้าง เมื่อรถยนต์เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง ความเร็วของเฟืองบายศรี เฟืองดอกจอกขับเฟืองดอกจอกทางด้านข้าง และเพลาขับล้อยจะเท่ากัน เฟืองดอกจอกขับและเฟืองดอกจอกทางด้านข้างจะไม่หมุนขั้บกันในกรณีนี้ แต่จะหมุนเป็นชุดเดียวกันกับเรือนชุดเฟืองดอกจอก เมื่อรถยนต์วิ่งเข้าโค้ง ล้อข้างหนึ่งจะหมุนเร็วกว่าล้ออีกข้างหนึ่ง ดังนั้นในกรณีนี้เฟืองดอกจอกขับจะหมุนไปรอบ ๆ ฟันของเฟืองดอกจอกทางด้านข้าง มีผลทำให้เฟืองดอกจอกทางด้านข้าง เพลาขับล้อและล้อชุดหนึ่งจะหมุนเร็วกว่าอีกชุดหนึ่ง ความเร็วเฉลี่ยของเฟืองดอกจอกทางด้านข้าง เพลาขับล้อหรือล้อจะเท่ากับความเร็วของชุดเฟืองท้าย

2.11 มอเตอร์

มอเตอร์ที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันมีอยู่ 2 ประเภท คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ แต่ในที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเท่านั้น เนื่องจากมอเตอร์กระแสตรงเป็นมอเตอร์ที่เลือกใช้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.11.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ถูกใช้งานอย่างกว้างขวางในงานอุตสาหกรรม เนื่องจากความสัมพันธะระหว่าง ความเร็วกับแรงบิด สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงตามการใช้งานได้เกือบทุกรูปแบบ การทำงานอย่างต่อเนื่องของ DC Motors โดยทั่วไปจะอยู่ในช่วงความเร็ว 8 ต่อ 1 รวมทั้ง การลดภาระหรือการลดความเร็วในระยะเวลาสั้น ๆ จะอยู่ในช่วงไว้ขอบเขต (ควบคุมการลดความเร็วลงถึงศูนย์รอบต่อนาทีได้อย่างราบเรียบนุ่มนวล) มักจะใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเมื่อมันต้องจ่ายแรงบิดที่จะทำให้มอเตอร์หมุนมากกว่าแรงบิดขณะใช้งานปกติ 3 เท่าหรือมากกว่า และในสถานการณ์ฉุกเฉิน มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถที่จะจ่ายแรงบิดได้มากกว่า 5 เท่าของแรงบิดใช้งานปกติ โดยปราศจากการหยุดกลางคัน (Stalling) (ต้นกำลังสามารถจ่ายกำลังให้ได้)

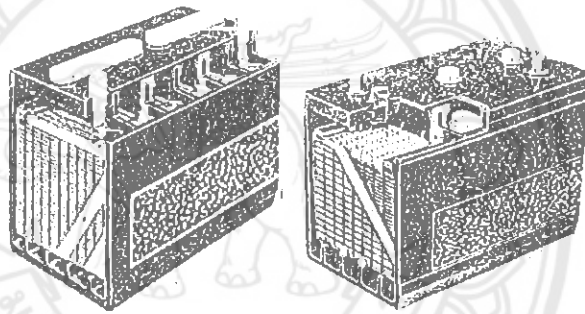
การเบรกแบบ Dynamic (พลังงานที่เกิดจากมอเตอร์จะถูกป้อนเข้าไปยังขดลวดความต้านทาน) หรือการเบรกแบบ Regenerative (พลังงานที่เกิดจากมอเตอร์จะถูกป้อนกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง) สามารถทำได้อย่างง่ายคล้ายกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อต้องการให้มอเตอร์หยุดอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องมีเบรกทางกลหรืออาจจะลดขนาดของเบรกทางกลได้

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถจะควบคุมความเร็วจนถึงศูนย์รอบต่อนาทีได้อย่างไม่มีอุปสรรคโดยการเร่งในทิศทางตรงกันข้ามอย่างทันทีทันใด โดยไม่ต้องสับเปลี่ยนวงจรกำลังและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงจะตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณควบคุมได้อย่างรวดเร็วเนื่องจากมันมีอัตราแรงบิดต่อความถี่สูง

โดยมอเตอร์ที่นำมาใช้ในที่นี้เป็นมอเตอร์แบบอนุกรม (Series-wound) โดยความเร็วรอบของมอเตอร์อนุกรมจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของโหลด โดยโหลดเพิ่มขึ้น ความเร็วรอบลดลง และเมื่อโหลดลดลง ความเร็วรอบจะเพิ่มขึ้น ลักษณะงานจะใช้หมุนขั้วงานที่ต้องการ ทอร์คเริ่มหมุนสูง และความเร็วรอบเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เช่น รถไฟฟ้า รถราง รถยก ลิฟต์ คอนเวเยอร์

2.12 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ที่ใช้ทั่วไปในรถยนต์เป็นชนิดตะกั่วกรดบรรจุอยู่ในโครงซึ่งเปลือกทำจากยางแข็ง โดยแบ่งเป็นช่อง ๆ ละ 2 โวลต์ กล่าวคือ แบตเตอรี่ 6 โวลต์ จะมี 3 ช่อง และ 12 โวลต์ จะมี 6 ช่อง ลักษณะ โครงสร้างของมอเตอร์แสดงได้ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะ โครงสร้างของแบตเตอรี่
(ที่มา หนังสือรถพลังงานไฟฟ้า, สมบัติ แสงจันทร์)

แบตเตอรี่เป็นหัวใจของระบบไฟฟ้าในรถยนต์ โดยเป็นตัวเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไว้ในรูปของสารเคมี เมื่อมีการต่อวงจรไฟฟ้าระหว่างขั้วบวก (+) และขั้วลบ (-) สารเคมีจะทำปฏิกิริยาระหว่างแผ่นธาตุ แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้านำไปใช้งาน

แบตเตอรี่ประกอบด้วยจำนวนเซลล์ทุติยภูมิต่ออนุกรมกันเข้าด้วยกันหลายเซลล์ เป็นแหล่งของพลังงานเคมีที่ใช้ทำให้เกิดพลังงานไฟฟ้า แบตเตอรี่มีด้วยกัน 3 ชนิด คือ

1. ชนิดตะกั่ว - กรด (Lead Acid Type) ซึ่งมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเซลล์ละ 2.2 โวลต์
2. ชนิดนิกเกิล - เหล็ก - ด่าง (Nickel - iron - Alkaline Type)
3. ชนิดนิกเกิล - แคดเมียม - ด่าง (Nickel - Cadmium - Alkaline Type)

สองชนิดหลังนี้จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเซลล์ละ 1.2 โวลต์ โดยในจำนวนแบตเตอรี่ทั้ง 3 ชนิดนี้ ชนิดตะกั่ว - กรด ถูกนำไปใช้อยู่กว้างขวาง ในที่นี้จะกล่าวถึงแบตเตอรี่แบบตะกั่วกรด เพียงอย่างเดียวเท่านั้น ซึ่งแบตเตอรี่ชนิดนี้ได้นำมาใช้ในรถไฟฟ้า

2.12.1 แบตเตอรี่ตะกั่ว - กรด (Lead - Acid Battery)

ในสภาพที่มีประจุไฟฟ้า (Charged) เต็มที่ วัตถุที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา (Active Materials) ในแบตเตอรี่ชนิดตะกั่วกรด จะใช้ตะกั่วเปอร์ออกไซด์ (Lead Peroxide) เป็นแผ่นบวก และใช้ตะกั่วพรุน (Spongy Lead) เป็นแผ่นลบ โดยน้ำยาอิเล็กโทรไลต์เป็นส่วนผสมของกรดกำมะถัน (Sulfuric Acid) กับน้ำ ความเข้มข้นของน้ำยาอิเล็กโทรไลต์วัดอยู่ในรูปของความถ่วงจำเพาะ นั่นคืออัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของน้ำยาอิเล็กโทรไลต์ต่อน้ำหนักของน้ำบริสุทธิ์ที่ปริมาณเท่ากัน กรดกำมะถันที่เข้มข้นจะมีความถ่วงจำเพาะ 1.83 น้ำบริสุทธิ์มีความถ่วงจำเพาะ 1.00 กรดกำมะถันและน้ำจะนำมาผสมกันในอัตราส่วนที่จะทำให้ได้ถ่วงจำเพาะตามต้องการ เช่น น้ำยาอิเล็กโทรไลต์มีความถ่วงจำเพาะ 1.21 จะประกอบด้วยกรดกำมะถันอย่างเข้มข้น 1 ส่วน และน้ำ 4 ส่วน ในกรณีที่แบตเตอรี่ประจุไฟฟ้าไว้เต็มที่ (Fully Charged) แผ่นบวกจะมีตะกั่วเปอร์ออกไซด์บริสุทธิ์ (Pure lead Peroxide) แผ่นลบจะมีตะกั่วบริสุทธิ์ (Pure lead) และกรดทั้งหมดที่เป็นอิเล็กโทรไลต์จะมีความถ่วงจำเพาะขณะนี้สูงสุด วัตถุที่เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยา (Active Material) โดยทั้งแผ่นบวกและแผ่นลบจะมีลักษณะเป็นรูพรุนเต็มไปหมด

2.13 รถไฟฟ้าทั่วไป

ปัจจุบันมลพิษจากยานยนต์เป็นปัญหาของคนทั้งโลก โดยเฉพาะในเมืองใหญ่ ๆ เช่น นิวยอร์ก ลอนดอน คาลิฟอร์เนีย ปารีส โตเกียว รวมทั้งกรุงเทพมหานคร สถานะแวดล้อมได้ถูกทำลาย และอากาศก็เริ่มพิษ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนารถไฟฟ้า เพื่อนำมาใช้แทนรถยนต์สันดาปภายใน ทั้งนี้ได้มีการพัฒนายานยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์ทั้งเบนซินและดีเซลมาตลอดตั้งแต่ปี พ.ศ. 2508 เป็นต้นมา เพื่อลดมลพิษจากไอเสียรถยนต์ซึ่งก็สามารถลดไปได้บางส่วน แต่หากต้องการให้สารมลพิษน้อยที่สุดหรือไม่มีเลยนั้น ทางเลือกที่เป็นไปได้ในปัจจุบันก็คือรถไฟฟ้า ดังนั้นจะเห็นว่ามีรถพัฒนารถไฟฟ้าโดยบริษัทผู้ผลิตรถทั่วโลกมาตลอดกว่า 20 ปี โดยพยายามพัฒนาทั้งทางด้านระบบแบตเตอรี่ (ตัวแบตเตอรี่และระบบชาร์จไฟ) และระบบการขับเคลื่อน (ระบบมอเตอร์ไฟฟ้าทั้งแบบ DC และ AC) การพัฒนาได้ดำเนินการอย่างจริงจังมาเมื่อ 20 ปีที่แล้ว มีการวิจัยโดยความร่วมมือของสมาคมต่าง ๆ นักวิจัยและผู้ผลิตรถยนต์ทั่วโลก

ในปัจจุบันการขนส่งด้วยรถไฟฟ้ามีอย่างหลากหลาย ดังตัวอย่างต่อไปนี้

1. CONVEY ELECTRIC 3 Wheel INDUSTRIAL CART

รถไฟฟ้านี้เป็นรถขนของไฟฟ้าที่ใช้ในโรงงานที่เข้มงวดเกี่ยวกับเรื่องการรักษาสภาพแวดล้อม รถนี้สามารถบรรทุกน้ำหนักได้ 350 กิโลกรัม มีความคล่องตัวในการขับขี่สูง มอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนมีขนาด 0.67 แรงม้า ใช้แบตเตอรี่ 2 ลูกๆ 12 โวลต์ 100 แอมแปร์ วิ่งได้ความเร็วสูงสุด 8.5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีเกียร์เดินหน้าและถอยหลัง มีอัตราเร่งจาก 0-8 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ภายใน 8 วินาที ระยะทางการชาร์ตแต่ละครั้ง 40 กิโลเมตร ในการชาร์ตแต่ละครั้งจะใช้เวลา 8 ชั่วโมง อีกทั้งยังมีไฟสัญญาณเตือนเมื่อแบตเตอรี่อ่อน

2. CONGO ELECTRIC 3 Wheels RESORT CART

รถไฟฟ้านี้เป็นรถที่ใช้สำหรับขับขี่ภายในบริเวณ รีสอร์ท โรงแรม โรงพยาบาล สวนสาธารณะ สนามกอล์ฟ และสวนสัตว์ ซึ่งสถานที่เหล่านี้ต้องการความเงียบและไม่ต้องการมลพิษด้านต่างๆ

รถนี้สามารถควบคุมได้ง่ายและมีความคล่องตัวสูง ลักษณะทั่วไปของรถนี้คล้ายกับ CONVEY ELECTRIC 3 Wheel INDUSTRIAL CART แต่ด้วยเหตุที่มีน้ำหนักเบา จึงทำให้สามารถวิ่งได้ด้วยความเร็วสูงกว่า คือ 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

โครงการรถขนของไฟฟ้านี้ ได้วางวิธีการดำเนินงานไว้ดังนี้

1. ออกแบบรถขนของไฟฟ้า
 2. สร้างรถขนของไฟฟ้า
 3. ทดสอบประสิทธิภาพรถขนของไฟฟ้า
- รายละเอียดของวิธีการดำเนินงานที่ได้วางไว้มีรายละเอียดดังนี้

3.1 การออกแบบ

ในการออกแบบของรถไฟฟ้านี้ จะทำการออกแบบเหมือนกับการออกแบบรถยนต์ทั่วไป แต่ในที่นี้จะทำการดัดแปลงบางส่วนเพื่อให้เหมาะสมกับรถขนของไฟฟ้า และเพื่อบรรลุตามจุดประสงค์ที่ตั้งไว้คือ

1. สามารถขนของได้หนัก 200 กิโลกรัม
2. ทำให้น้ำหนักเบาที่สุดเท่าที่จะทำได้
3. ไม่มีมลพิษทางเสียงและอากาศ

3.1.1 การออกแบบกำลังขับเคลื่อน

การออกแบบกำลังขับเคลื่อนเป็นการหาแรงต้านการเคลื่อนที่ทั้งหมดของรถไฟฟ้าให้เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนด เพื่อนำแรงต้านการเคลื่อนที่ทั้งหมดนี้ไปออกแบบขนาดมอเตอร์ โดยเงื่อนไขเริ่มแรกที่กำหนดคือ

- | | | |
|------------------------------------|--------|------------------|
| 1. น้ำหนักทั้งหมด (Total Weight) | 400 | กิโลกรัม |
| 2. ความเร็วสูงสุดที่น้ำหนัก 400 kg | 10 | กิโลเมตร/ชั่วโมง |
| 3. รัศมีล้อ | 0.20 | เมตร |
| 4. ความชันที่รถสามารถขึ้นได้ | 7 | องศา |
| 5. อัตราทดเฟืองท้าย | 13 : 1 | |

แรงต้านการเคลื่อนที่มี 4 ชนิดคือ

1. แรงต้านการหมุนของล้อ (Rolling Resistance, R_r)

$$\text{จาก } R_r = k_r W$$

$$\text{โดย } k_r = 0.013 \text{ (จากตารางที่ ข.1 } k_r = 0.01-0.016 \text{ สำหรับถนน}$$

สภาพดี เลือกใช้ค่าเฉลี่ยคือ 0.013)

$$W = 400 \text{ kg} = 3924 \text{ N}$$

$$\therefore R_r = 0.013 \times 3924 = 51.012 \text{ N}$$

2. แรงต้านอากาศ (Air Resistance, R_a)

$$\text{จาก } R_a = k_a A V^2$$

$$\text{โดย } k_a = 0.13 \text{ (จากตารางที่ ข.2 } k_a = 0.13-0.15 \text{ สำหรับพื้นที่หน้าตัด}$$

ของรถยนต์ส่วนที่ต้านกับอากาศ 1.0-1.3 m² แต่เนื่อง-

จากรถไฟฟ้านี้มีพื้นที่หน้าตัดส่วนที่ต้านกับอากาศน้อย

จึงเลือก $k_a = 0.13$)

$$A = 1 \text{ m}^2 \text{ (จากตารางที่ ข.2 } A = 1-1.3 \text{ ได้เลือกใช้ } A = 1 \text{ m}^2$$

ซึ่งได้ทำการเพื่อพื้นที่ของสัมภาระที่จะบรรทุกไว้ด้วย)

$$V = 10 \text{ km/hr} = 2.7778 \text{ m/s}$$

$$\therefore R_a = 0.13 \times 1 \times 2.7778^2 = 1 \text{ N}$$

3. แรงต้านทางชัน (Gradient Resistance, R_g)

$$\text{จาก } R_g = W \sin \theta_g$$

$$\text{โดย } \theta_g = 7^\circ$$

$$\therefore R_g = 3924 \sin 7^\circ = 478.22 \text{ N}$$

ดังนั้น แรงต้านการเคลื่อนที่ทั้งหมดเท่ากับ

$$\begin{aligned} R_t &= R_r + R_a + R_g \\ &= 51 + 1 + 478.21 \\ &= 530 \text{ N} \end{aligned}$$

จะได้ แรงบิดที่ล้อ (T_w) มีค่าเท่ากับ

$$T_w = Fr$$

โดยที่ F คือแรงขับเคลื่อนที่ต้องมากกว่าหรือเท่ากับแรงต้านการเคลื่อนที่ทั้งหมด(R_t)

$$\therefore T_w = 530 \times 0.20 = 106.042 \text{ Nm}$$

และแรงบิดที่มอเตอร์ (T_m) มีค่าเท่ากับ

$$T_m = \frac{T_w \times 100}{\eta_i \eta_g}$$

โดย $\eta_i = 83.5\%$ (จากตารางที่ ข.3 สำหรับรถยนต์บรรทุก $\eta_i = 82 - 85\%$
เลือกใช้ค่าเฉลี่ยคือ 83.5%)

$$\begin{aligned} T_m &= \frac{106.042 \times 100}{83.5 \times 13} \\ &= 9.769 \text{ Nm} \end{aligned}$$

∴ ความเร็วเชิงมุมของเพลาล้อหลัง (ω_w) หาได้โดย

$$\begin{aligned} \omega_w &= \frac{V}{2\pi r} \\ &= \frac{2.7778}{2\pi \times 0.2} \\ &= 2.21 \text{ rev/s} \\ &= 2.21 \times 2\pi \\ &= 13.88 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

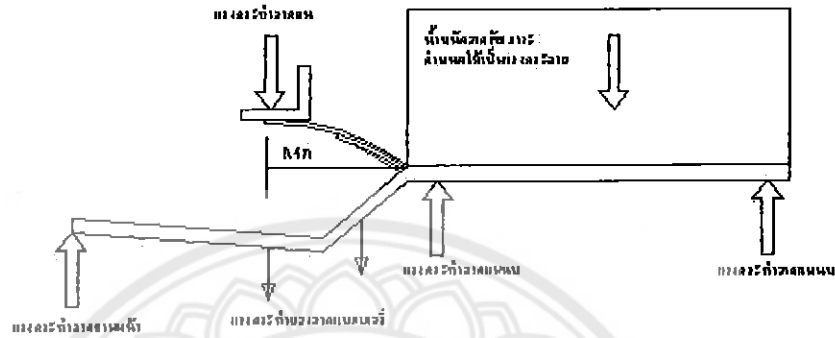
∴ ความเร็วเชิงมุมของเพลามอเตอร์ (ω_m) หาได้โดย

$$\begin{aligned} \omega_m &= \omega_w \times 13 \\ &= 13.88 \times 13 \\ &= 180.52 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก } P_m &= \omega_m \times T_m \\ &= 180.52 \times 9.769 \\ &= 1763.46 \text{ W} \\ &= \frac{1763.46}{1000} \times 13.41 \\ &= 2.36 \text{ hp} \end{aligned}$$

3.1.2 การออกแบบโครงรถขนของไฟฟ้า

ในการออกแบบโครงรถขนของไฟฟ้า จะทำการออกแบบให้มีลักษณะดังรูปที่ 3.1 โดยใช้เหล็กทำหน้าที่เป็นคานรับแรง



รูปที่ 3.1 แสดงรูปแบบของรถขนของไฟฟ้าที่ได้ทำการออกแบบ

แรงกระทำที่จุดต่างๆสามารถหาได้ดังนี้

1. แรงกระทำจากคานหน้า

ในการออกแบบนี้เป็นเรื่องยากที่จะหาแรงที่กระทำจากคานหน้าได้อย่างแน่นอน ดังนั้นในที่นี้จะทำการประมาณค่าแรงจากคานหน้าได้โดย

- น้ำหนักของแชสซีส่วนหน้า หาได้จากการคำนวณตามภาคผนวก ง. ซึ่งได้น้ำหนักของแชสซีส่วนหน้าเท่ากับ 15.86 N
- น้ำหนักจากแบตเตอรี่และคน กรณีนี้ กำหนดน้ำหนักจากแบตเตอรี่และคน 40 % ทำให้เกิดแรงกระทำที่คานหน้า ซึ่งกำหนดให้คนหนัก 60 kg และแบตเตอรี่หนัก 30 kg ดังนั้น

$$0.4(60+30) \times 9.81 = 353.16$$

ดังนั้นแรงกระทำที่คานหน้าทั้งหมดคือ 369.02 N แรงที่กระทำจากแชสซีแต่ละข้างคือ 184.51 N

2. แรงกระทำจากคน

ในที่นี้กำหนดให้คนหนัก 60 kg หรือ 588.6 N เมื่อทำการย้ายแรงกระทำจากคนให้มาอยู่ที่โครงรถจะทำให้เกิดโมเมนต์ 235.44 Nm ดังนั้นแรงกระทำจากคนที่กระทำกับแชสซีข้างเดียวคือ 294.3 N

3. แรงกระทำจากแบตเตอรี่

จากการทดลองซึ่งแบตเตอรี่ 1 ลูกจะหนัก 15 kg ดังนั้นแบตเตอรี่ 2 ลูกจะหนัก 30 kg เพื่อความสะดวกในที่นี้จะกำหนดให้แรงกระทำจากแบตเตอรี่กระทำเป็นจุด และกระทำที่กึ่งกลางระหว่างแขนรับน้ำหนักจากแบตเตอรี่ ดังนั้น เซสซีแต่ละข้างจะรับน้ำหนักจากแบตเตอรี่ 147.15 N

4. แรงกระทำจากภาระ

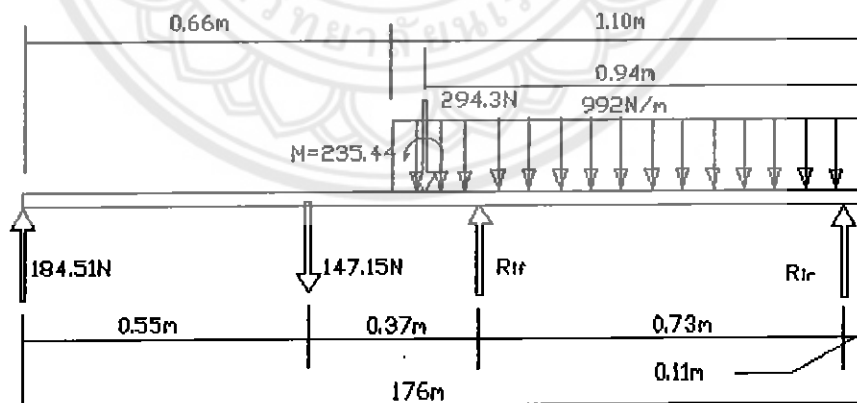
ในที่นี้กำหนดให้รถรับน้ำหนักได้ 200 kg หรือ 1962 N ส่วนน้ำหนักจากเหล็กที่ใช้ทำกระบะและจากเซสซี หาได้ดังนี้

ภาคผนวก ง. ได้แสดงการคำนวณน้ำหนักของเหล็กที่ใช้ไว้แล้ว ซึ่งได้ผลดังนี้

- น้ำหนักของเหล็กที่เหลื่อมกลวงรองรับกระบะคือ 28.9 N
- น้ำหนักของเหล็กแผ่นใช้ทำกระบะคือ 126.2 N
- น้ำหนักของเหล็กเหล็กกล่องทำเซสซีส่วนหลังคือ 41.3 N
- น้ำหนักของเหล็กกลมบนกระบะคือ 22.8 N

ดังนั้นน้ำหนักทั้งหมดที่ถือว่าเป็นแรงกระทำจากภาระคือ 2182 N ฉะนั้นน้ำหนักที่กระทำต่อเซสซีคือ 1091 N

จากรูปแบบของรถไฟฟ้าที่แสดงดังรูป 3.1 จะสามารถทำการคำนวณหาขนาดเหล็กกล่องได้ก่อนข้างลำบาก ดังนั้นเพื่อความสะดวกจะสมมุติให้โครงรถที่ได้ออกแบบไว้อยู่ในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงการสมมุติรูปแบบของโครงรถขนของไฟฟ้า

จากรูป สามารถหา R_{1f} และ R_{1r} ได้ดังนี้

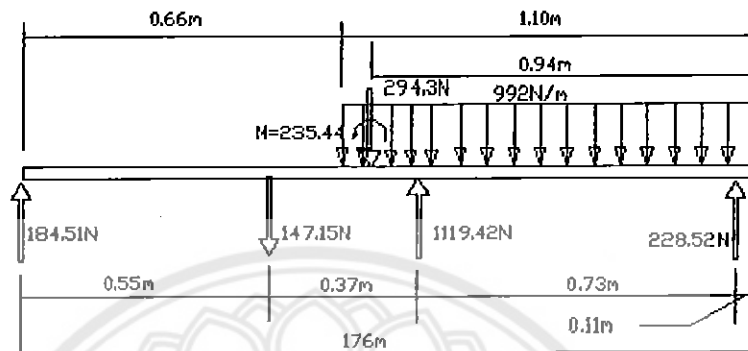
$$\sum M_{R_{1r}} = 0$$

$$235.44 + (294.3 \times 0.83) + (1091 \times 0.44) + (147.15 \times 1.1) = (184.51 \times 1.65) + R_{1f} \times 0.73$$

$$R_{1f} = 1119.4 \text{ N}$$

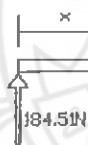
$$\text{ดังนั้น} \quad R_r = 228.52 \text{ N}$$

สามารถเขียนการรับแรงของโครงรถใหม่ได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงการรับแรงของโครงรถขนของไฟฟ้า

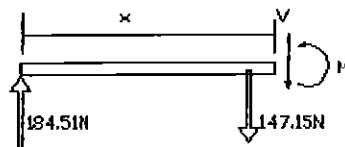
พิจารณาที่ $0 < X < 0.55 \text{ m}$



$$V = 184.51 \text{ N}$$

$$M = 184.51X \text{ Nm}$$

พิจารณาที่ $0.55 < X < 0.66 \text{ m}$

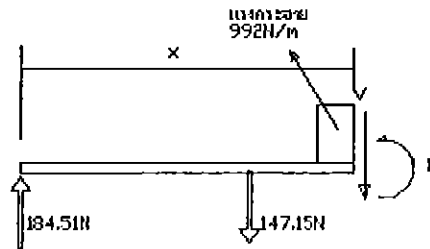


$$V = 37.36 \text{ N}$$

$$M = 184.51X - 147.15(X - 0.55) \text{ Nm}$$

$$= 37.36X + 81 \text{ Nm}$$

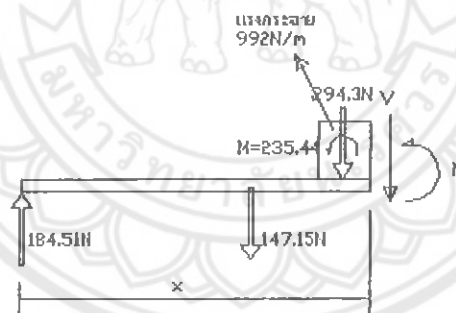
พิจารณาที่ $0.66 < X < 0.82$ m



$$\begin{aligned} V &= 184.51 - 147.15 - 992(X-0.66) \text{ N} \\ &= -992X + 692.08 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M &= 184.51X - 147.15(X-0.55) - 992(X-0.66)(X-0.66)/2 \text{ Nm} \\ &= -496(X-0.66)^2 + 37.36X - 81 \text{ Nm} \end{aligned}$$

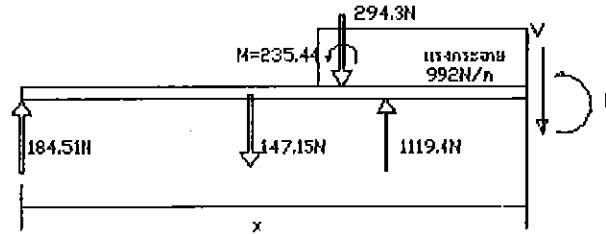
พิจารณาที่ $0.82 < X < 0.92$ m



$$\begin{aligned} V &= 184.51 - 147.15 - 294.3 - 992(X-0.66) \text{ N} \\ &= -992X + 397.78 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M &= 184.51X - 147.15(X-0.55) - 294.3(X-0.82) \\ &\quad - 992(X-0.66)(X-0.66)/2 - 235.44 \text{ Nm} \\ &= -496(X-0.66)^2 - 256.94X + 86.86 \text{ Nm} \end{aligned}$$

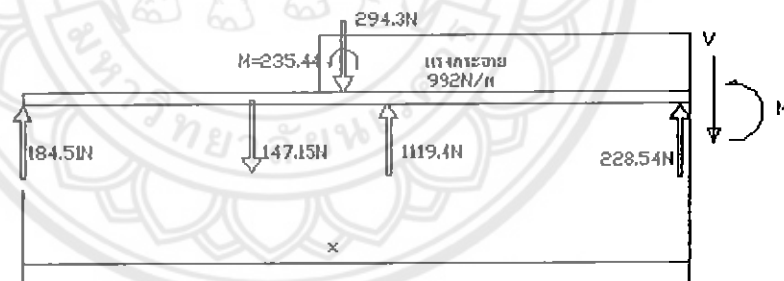
พิจารณาที่ $0.92 < X < 1.65$ m



$$\begin{aligned} V &= 184.51 - 147.15 - 294.3 + 1119.4 - 992(X - 0.66) \quad \text{N} \\ &= -992X + 1517.18 \quad \text{N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M &= 184.51X - 147.15(X - 0.55) - 235.44 - 294.3(X - 0.82) \\ &\quad + 1119.4(X - 0.92) - 992(X - 0.66)(X - 0.66)/2 \quad \text{Nm} \\ &= -496(X - 0.66)^2 + 862.46X - 943.03 \quad \text{Nm} \end{aligned}$$

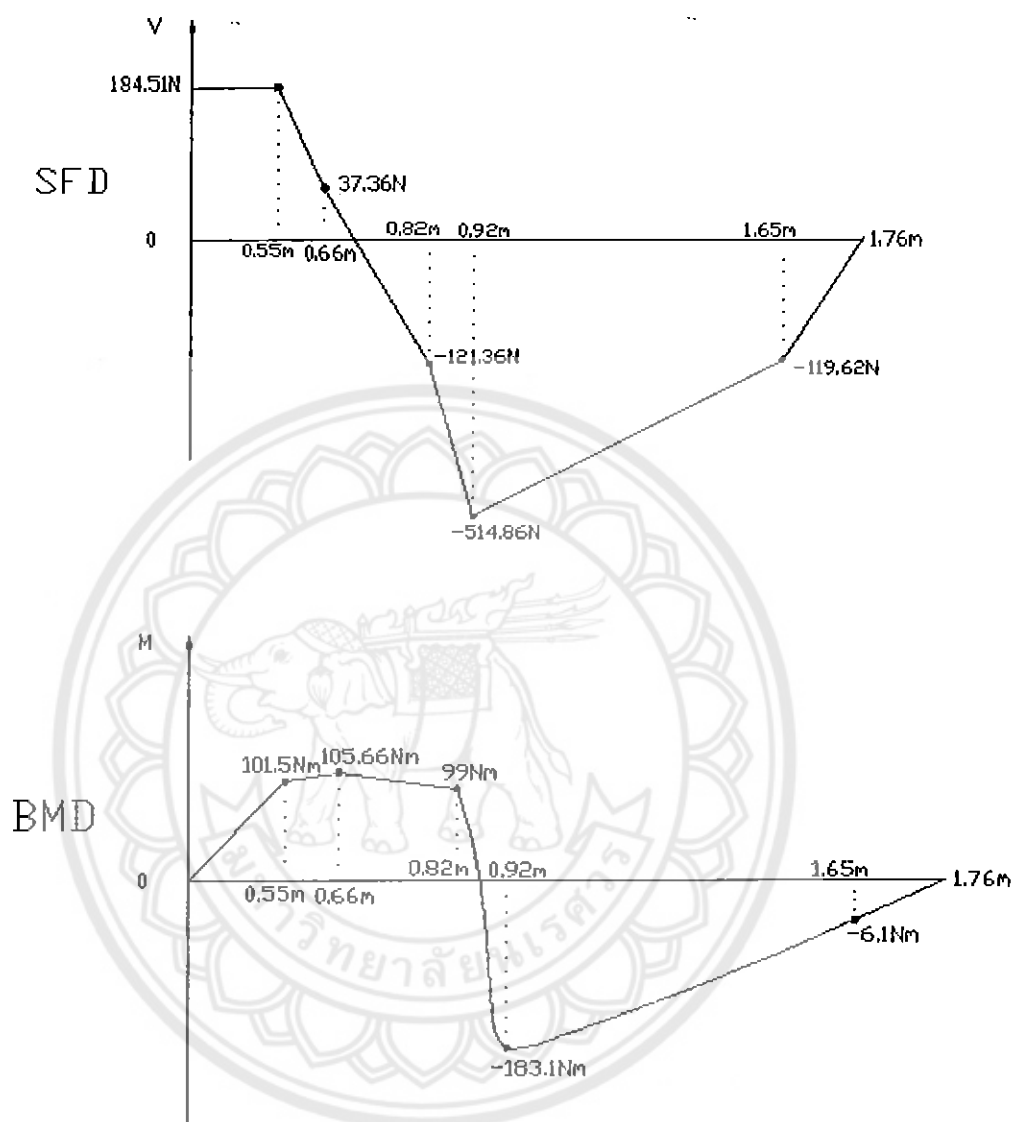
พิจารณาที่ $1.65 < X < 1.76$ m



$$\begin{aligned} V &= 184.51 - 147.15 - 294.3 + 1119.4 + 228.54 - 992(X - 0.66) \quad \text{N} \\ &= -992X + 1745.72 \quad \text{N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M &= 184.51X - 147.15(X - 0.55) - 235.44 - 294.3(X - 0.82) \\ &\quad + 1119.4(X - 0.92) + 228.54(X - 1.65) - 992(X - 0.66)(X - 0.66)/2 \quad \text{Nm} \\ &= -496(X - 0.66)^2 + 1091X - 1320.13 \quad \text{Nm} \end{aligned}$$

นำเอาสมการของ V และ M ในคานแต่ละช่วงมาเขียนแผนภาพได้ดังนี้



จากแผนภาพจะได้ M_{\max} ที่ 183.1 Nm

เหล็กที่เลือกใช้เลือกจากหนังสือตารางงานโลหะคังแสดงอยู่ในตารางที่ ข.11 คือเหล็กเหนียว U St 37-1 ซึ่งมีขายตามท้องตลาดทั่วไปและมีคุณสมบัติดังนี้

$$\sigma_y = 360 \text{ N/mm}^2 \quad E = 207 \text{ GPa}$$

คำนวณหาค่า Z ได้โดย

$$\text{จาก } \sigma = M/Z$$

$$\text{โดย } Z = I/C$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } Z &= 183054.4/360 \\ &= 508.484 \text{ mm}^3 \text{ หรือ } 0.5085 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

เมื่อนำค่า Z ที่ได้ไปเลือกขนาดหน้าตัดเหล็กกล่องจากตารางของหนังสือการออกแบบโครงสร้างไม้และเหล็ก ที่แสดงอยู่ในตารางที่ ข.8 จะได้เหล็กกล่องขนาดเล็กมากซึ่งอยู่นอกช่วงตารางออกไป แต่ในที่นี้เลือกใช้เหล็กกล่องขนาด 50 mm× 25 mm× 1.6 mm

3.1.3 การออกแบบระบบกันสะเทือน

ระบบกันสะเทือนที่ใช้ในรถไฟฟ้านี้ คือ แหนบ ซึ่งเหมาะกับรถยนต์ทั่ว ๆ ไป โดยเฉพาะรถยนต์ที่ใช้บรรทุกสัมภาระ โดยระบบกันสะเทือนของรถไฟฟ้านี้ใช้แหนบที่มี 2 ตำแหน่งคือ ระบบกันสะเทือนที่รองรับน้ำหนัก และระบบกันสะเทือนรองรับที่นั่ง ซึ่งทำการออกแบบได้ดังนี้

1. ระบบกันสะเทือนที่รองรับน้ำหนัก

เงื่อนไขเริ่มต้นจะกำหนดให้

$$\begin{aligned} l_1 &= 0.82 \text{ m} \\ L &= 0.41 \text{ m} \\ b &= 0.0515 \text{ m} \\ t &= 0.006 \text{ m} \\ E &= 207 \text{ KN/mm}^2 \\ n &= 4 \text{ แผ่น} \\ Z &= 0.085 \text{ m} \end{aligned}$$

ส่วนแรงที่กระทำกับแหนบ เนื่องจากแรงที่กระทำต่อหูแหนบไม่เท่ากัน ดังนั้นเพื่อความสะดวกจะกำหนดให้แรงกระทำที่แต่ละหูแหนบเท่ากัน ฉะนั้นน้ำหนักที่กระทำต่อแหนบทั้งหมดคือ 2182 N แรงที่กระทำต่อแหนบข้างเดียวคือ 1091 N และแรงที่กระทำต่อแหนบแต่ละข้างคือ 545.5 N

$$\begin{aligned} \therefore \text{จาก } \delta_1 &= \frac{6F_1L^3}{Enbt^3} \\ &= \frac{6 \times 545.5 \times 410^3}{207000 \times 4 \times 51.5 \times 6^3} \\ &= 24.5 \text{ mm} \end{aligned}$$

ดังนั้นระยะโค้งโดยประมาณของสปริงแหนบเนื่องจากภาระของรถคือ 24.5 mm เมื่อเปรียบเทียบกับระยะโค้งที่ยอมได้ซึ่งคือ 85 mm ดังนั้นระยะโค้งของแหนบที่เลือกใช้จึงยอมรับได้

ค่าความเค้นของสปริงแทนที่มีจำนวน 4 แผ่น หาได้จาก

$$\begin{aligned}\sigma_f &= \frac{6F_1L}{nbt^2} \\ &= \frac{6 \times 545.5 \times 410}{4 \times 51.5 \times 6^2} = 181 \text{ N/mm}^2 \\ \sigma_s &= \frac{ZE\delta}{L^2} \\ &= \frac{85 \times 207000 \times 6}{410^2} = 628 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

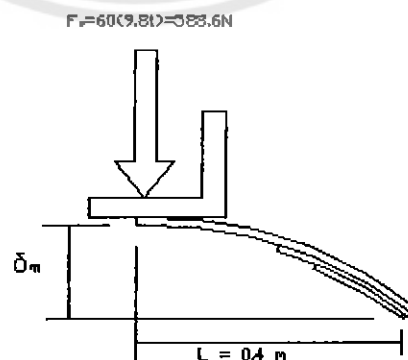
เมื่อนำความเค้นเนื่องจากภาระ σ_f มาเปรียบเทียบกับความเค้นของแทนที่เลือกใช้ σ_s จะสังเกตเห็นว่า σ_s มีค่ามากกว่า σ_f ดังนั้นแทนที่นี้จึงสามารถใช้งานได้ตามต้องการ

$$\begin{aligned}R_1 &= \frac{l_1^2}{8Z} \\ &= \frac{820^2}{8 \times 85} = 988.8 \text{ mm}\end{aligned}$$

ดังนั้นแทนที่มีรีซีมีความโค้งประมาณ 1 เมตร ซึ่งมีความเหมาะสมกับขนาดรถ จึงสามารถใช้งานได้

2. ระบบกันสะเทือนของที่นั่ง

ระบบกันสะเทือนของที่นั่งใช้หลักการของแทน ซึ่งลักษณะของแทนที่ใช้ในระบบกันสะเทือนของที่นั่งนี้จัดเป็นแบบคานยื่นที่มีความยาว L มีแรง F ทำที่ปลายคาน ลักษณะของแทนของที่นั่งที่ได้ทำการออกแบบนี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะของแทนของที่นั่งที่ได้ทำการออกแบบ

ในที่นี้ต้องการคำนวณหาระยะ โกงที่ปลายคานที่รับน้ำหนักของตน

$$\text{จากสูตร} \quad \delta_m = \frac{4F_s L_s^3}{E n b t^3}$$

$$\text{โดย} \quad F_s = 60(9.81) = 588.6 \text{ N (กำหนดให้คนหนัก 60 kg)}$$

$$L_s = 0.4 \text{ m}$$

แทนค่าจะได้

$$\begin{aligned} \delta_m &= \frac{4 \times 588.6 \times 0.4^3}{207 \times 10^9 \times 0.0515 \times 0.006^3 \times 3} \\ &= 0.02181 \text{ m หรือ } 2.181 \text{ cm} \end{aligned}$$

เมื่อนำค่า δ_m ที่ได้จากการคำนวณมาพิจารณา จะเห็นว่าเมื่อนำค่า δ_m มาเปรียบเทียบกับการใช้งาน ที่การ โกงนี้มีผลค่อนข้างน้อยต่อความรู้สึกของผู้ขับขี่ ดังนั้นที่ระยะการ โกงนี้ จึงเป็นค่าที่ยอมรับได้

3.1.4 การออกแบบเพลาท้าย

วัสดุที่ใช้ทำเพลาท้ายก็คือเหล็กกล้าอะลูมิเนียม เพลาขับท้ายที่เลือกใช้นี้เมื่อทำการแบ่งตามการรองรับน้ำหนักของเพลาและการยึดติดกับล้อเป็นแบบเพลากิ่งลอยเนื่องจากลักษณะของเพลาแบบนี้ นิยมใช้กับรถยนต์ทั่วไป สิ่งที่ต้องทำการออกแบบเกี่ยวกับเพลาขับท้ายมีดังนี้

1. การหาขนาดแบริ่งที่เพลาท้าย

แรงกระทำต่อเพลาลังส่วนใหญ่เป็นแรงในแนวรัศมีซึ่งเป็นแรงที่กระทำต่อล้อ ส่วนแรงตามแนวแกนหรือแรงรูดมีค่าน้อยมากจึงไม่นำมาพิจารณา

ในการออกแบบแบริ่งของล้อหลังจะเลือกบอลแบริ่งชนิด Single-row deep groove จากการคำนวณในภาคผนวก ง. แรงในแนวรัศมี 1521 N วงแหวนรอบในหมุน มีแรงเรียบสม่ำเสมอ ภาระทำ และมีอายุใช้งาน 4000-8000 hr อายุการใช้งานนี้เลือกจากตารางที่ ข.6 ที่เครื่องจักรกลสำหรับใช้งานช่วงเวลาสั้นๆ หรือทำงานเป็นพักๆ เช่น เครื่องจักรกลการเกษตร เครื่องขนย้าย เป็นต้น

ความเร็วรอบสูงสุดของเพลา หาได้ที่ความเร็วสูงสุดของรถ ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ในขณะวิ่งรถที่ยังไม่ได้บรรทุก คือที่ความเร็ว 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

$$\text{จาก} \quad v = 2\pi r n$$

$$10/3.6 = 2\pi \times 0.2 \times \frac{N_s}{60}$$

$$N_s = 132.63 \text{ rpm}$$

ดังนั้น ความเร็วสูงสุดที่เพลาหมุนคือ 132.63 รอบ/นาที

การเลือกเบร้งหมายถึงการพยายามคำนวณโดยการสุ่มหาขนาดที่ต้องการหลาย ๆ ครั้ง จนกว่าจะได้เบร้งที่ใช้งานตามความต้องการ โดยในที่นี้จะเลือกใช้บอลเบร้งชนิด Single – row deep groove และเลือกจากอนุกรมมิติ 02 ที่ขนาดครุสวม 20 mm มาทดลองคำนวณหาอายุการใช้งานจากตารางที่ ข.5

$$C_0 = 6180 \text{ N}$$

$$C = 9830 \text{ N}$$

จากตารางที่ ข.4 ตัวประกอบการกระแทก ชนิดแรงแรงราบเรียบสม่ำเสมอ $N_f = 1$

วงแหวนในหมุน จะได้ $V = 1$

$$\text{จาก } P = VF_f$$

$$\text{ดังนั้น } P = 1 \times 1521 = 1521 \text{ N}$$

อายุการใช้งานหาได้โดย

$$\begin{aligned} \text{จาก } L_{10} &= \left(\frac{C}{P} \right)^3 \\ &= \left(\frac{9830}{1 \times 1521} \right)^3 = 269.94 \text{ mr} \end{aligned}$$

$$\text{หรือ } L_{10} = \frac{269.94 \times 10^6}{132.63 \times 60} = 33921.88 \text{ hr}$$

ดังนั้นเบร้งขนาดครุสวม 20 mm อนุกรมมิติ 02 สามารถใช้งานได้เป็นเวลา 33921.88 ชั่วโมง อายุการใช้งานดังกล่าวอยู่นอกช่วงออกไปมากซึ่งแสดงถึงความปลอดภัย ดังนั้นขนาดครุสวม 20 mm อนุกรมมิติ 02 จึงสามารถใช้งานได้ตามต้องการ แต่เพื่อความเหมาะสมกับแรงของไฟฟ้า จะเลือกใช้ครุสวมขนาด 25 mm

2. การออกแบบขนาดของเพลาหลัง

โดยทั่วไปความเค้นเฉือนของเพลา มีค่าประมาณ $294 - 326 \text{ MN/m}^2$ และความเค้นดัดทั่วไปของเหล็กเหนียวธรรมดา U st 37-1 ที่ใช้ทำเพลา คือ 360 N/mm^2

ความเค้นเฉือนสูงสุดของเพลา

$$\tau_{\max} = \frac{16W}{\pi d^3} \sqrt{\mu^2(r^2 + l^2) + l^2}$$

$$\text{โดย } W = 1521 \text{ N}$$

$$d = ?$$

$$\tau_{\max} = 310 \text{ MN/m}^2 \quad (\text{เลือกใช้โดยการประมาณค่า})$$

$$\mu = 0.6 \quad (\text{สำหรับถนนแห้ง})$$

$$r = 0.2 \quad \text{m}$$

$$l = 0.0835 \quad \text{m}$$

$$\text{ดังนั้น } 310 \times 10^6 = \frac{16 \times 1521}{\pi d^3} \sqrt{0.6^2 (0.2^2 + 0.0835^2) + 0.0835^2}$$

$$d = 0.015689 \quad \text{m} = 15.69 \quad \text{mm}$$

นำขนาดเพลาลังที่ได้นี้ไปทดสอบกับสูตรความเค้นรวมได้ดังนี้

$$\text{จาก } \sigma_{\max} = \frac{16Wl}{\pi d^3} \left(\sqrt{1 + \mu^2} \pm \sqrt{\mu^2 (r^2 + l^2) + l^2} \right)$$

$$\text{ดังนั้น } \sigma_{\max} = \frac{16 \times 1521 \times 0.0835}{\pi \times 0.015689^3} \left(\sqrt{1 + 0.6^2} \pm \sqrt{0.6^2 (0.2^2 + 0.0835^2) + 0.0835^2} \right)$$

$$= 221216220.1 \text{ N/m}^2 \text{ หรือ } 221.22 \text{ N/mm}^2$$

จะเห็นได้ว่าเพลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.69 mm สามารถรับภาระจากน้ำหนักตามที่กำหนดได้ ทั้งนี้เพื่อความเหมาะสมกับขนาดรูสวมของแบริ่งจึงทำการเลือกเพลขนาด 25 mm ซึ่งทำให้เพลานี้มีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

3.1.5 การออกแบบเพลหน้า

1. การออกแบบคานหน้า

สิ่งที่ต้องการในการออกแบบคือขนาดหน้าตัดของคานหน้า โดยมีข้อกำหนดในการออกแบบคือ

1. คานหน้ายาว 0.86 m

2. คานหน้าทำจากเหล็กรูปตัวซี (channel)

แรงกระทำต่อคานหน้าเป็นแรงเนื่องจากน้ำหนักของชุดบังคับเลี้ยว และน้ำหนักบางส่วนของคนและแบตเตอรี่

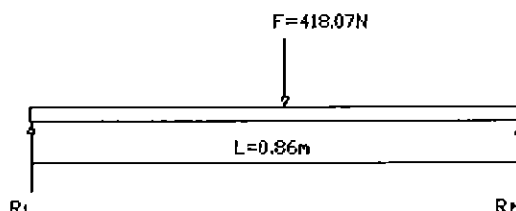
จากรูปที่ 3.5 ที่แสดง FBD ของคานหน้าสามารถหาแรงที่กระทำต่อคานหน้าได้ดังนี้

- น้ำหนักชุดบังคับเลี้ยว 5 kg
- บางส่วนของน้ำหนักคนและแบตเตอรี่ โดยกำหนดให้แชสซีรับน้ำหนัก 40 % จากคนและแบตเตอรี่ ซึ่งกำหนดให้คนหนัก 60 kg และแบตเตอรี่หนัก 30 kg ดังนั้น

$$0.4 \times (60+30) = 36 \text{ kg}$$

- น้ำหนักของเซสซีส่วนหน้าคือ 15.86 N (แสดงอยู่ในภาคผนวก ง.)

ดังนั้น แรงกระทำต่อคานหน้า $F = (5 + 35) \times 9.81 + 15.86 = 418.07$



รูปที่ 3.5 แสดง FBD ของคานหน้า

จากสมการ Max Moment (ตารางที่ ข.7)

$$(M_{\max}) = (FL / 4)$$

ดังนั้น

$$M_{\max} = \frac{418.07 \times 0.86}{4}$$

$$= 89885.05 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

เหล็กที่เลือกใช้เลือกจากหนังสือตารางงานโลหะ ดังแสดงอยู่ในตารางที่ ข.11 คือเหล็กเหนียว U St 37-1 ที่มีขายตามท้องตลาดและมีคุณสมบัติดังนี้

$$\sigma_y = 360 \text{ N/mm}^2 \quad E = 207 \text{ GPa}$$

คำนวณค่า Z (Modulus of section)

จาก

$$\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{Mc}{I}$$

แทนค่าจะได้

$$Z = 89885.15 / 360 = 0.25 \times 10^3 \text{ mm}^3$$

จากเหล็กรูปตัวซีที่เลือกใช้มีขนาด C50x7 ซึ่งมีค่า $Z_y = 3.10$ และ $I = 0.072 \times 10^6 \text{ mm}^4$ หรือ เท่ากับ $0.072 \times 10^{-6} \text{ m}^4$

เมื่อเปรียบเทียบค่า Z_y ที่ได้จากการเลือกใช้จากตารางในหนังสือกลศาสตร์ของวัสดุที่แสดงอยู่ในตารางที่ ข. 9 กับค่า Z จากการคำนวณซึ่งเป็นค่า Z เนื่องจากภาระ F พบว่าค่า Z_y มีค่ามากกว่า Z ซึ่งแสดงได้ถึงความปลอดภัยในการรับแรงที่กระทำ

ทำการทดสอบเพื่อหาระยะการโก่งได้ดังนี้

คำนวณหาระยะการโก่ง (Deflection)

$$\text{จากสมการ } y_{\max} = \frac{FL^3}{48EI}$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่าจะได้ } y_{\max} &= \frac{418.07 \times 0.86^3}{48 \times 207 \times 10^9 \times 0.072 \times 10^{-6}} \\ &= 3.72 \times 10^{-4} \text{ m} \end{aligned}$$

จากระยะโก่ง เท่ากับ 0.372 mm ถือว่ามีค่าน้อยมาก แสดงได้ถึงความปลอดภัย

2. การออกแบบเพลาน้ำ

สำหรับเพลาน้ำส่วนที่รับแรงบิดจะมีอิทธิพลมากที่สุด กำหนดให้ขนาดของเพลาน้ำมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 mm แล้วทำการคำนวณเพื่อตรวจสอบดูว่ารับภาระที่กระทำได้หรือไม่ ดังนี้

$$\text{จาก } \tau = \frac{Tc}{J}$$

$$\text{โดย } T = \mu Wr$$

โดย W คือ แรงกระทำที่ล้อแต่ละข้าง ดูได้จากภาคผนวก ง. ซึ่งเท่ากับ 348.255 N

$$= 0.6 \times 348.255 \times 0.2 = 41.8 \text{ Nm}$$

$$\begin{aligned} c &= \frac{d}{2} \\ &= \frac{0.022}{2} = 0.011 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J &= \frac{\pi}{32} d^4 \\ &= \frac{\pi}{32} (0.022)^4 = 2.3 \times 10^{-8} \text{ m}^4 \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น } \tau = \frac{41.8 \times 0.011}{2.3 \times 10^{-8}} = 20 \text{ MN/m}^2$$

สังเกตได้ว่าค่าความเค้นเฉือนที่คำนวณได้มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่าความเค้นเฉือนทั่วไป ซึ่งมีค่าประมาณ 294 – 326 MN/m² ดังนั้นเพลาน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 mm สามารถใช้งานได้ตามต้องการ

3. การออกแบบแบบริ้งของล้อหน้า

แรงกระทำต่อเพลาลังส่วนใหญ่เป็นแรงในแนวรัศมีซึ่งเป็นแรงที่กระทำต่อล้อ ส่วนแรงตามแนวแกนหรือแรงรุมมีค่าน้อยมากจึงไม่นำมาพิจารณา

ในการออกแบบแบบริ้งของล้อหลังจะเลือกบอลแบบริ้งชนิด Single-row deep groove รัปแรงในแนวรัศมี 348.2 N วงแหวนนอกหมุนด้วยความเร็วรอบเท่ากับล้อหลังซึ่งก็คือ 132.63 rpm มีแรงกระทำเล็กน้อย และมีอายุใช้งาน 4000-8000 hr อายุการใช้งานเลือกจากตารางที่ ข.6 ที่เครื่องจักรกลสำหรับใช้งานช่วงเวลาสั้นๆ หรือทำงานเป็นพักๆ เช่น เครื่องจักรกลการเกษตร เครื่องขยี้ข้าว เป็นต้น

การเลือกแบบริ้งหมายถึงการพยายามคำนวณโดยการสุ่มหาขนาดที่ต้องการหลาย ๆ ครั้ง จนกว่าจะได้แบบริ้งที่ใช้งานตามความต้องการ โดยในที่นี้จะเลือกใช้บอลแบบริ้งชนิด Single - row deep groove และเลือกจากอนุกรมมิติ 02 ที่ขนาดรูสวม 20 mm มาทดลองคำนวณหาอายุการใช้งานจากตารางที่ ข.5

$$C_0 = 6180 \text{ N}$$

$$C = 9830 \text{ N}$$

จากตารางที่ ข.4 ตัวประกอบการกระแทก ชนิดแรงเรียบสม่ำเสมอ $N_s = 1$
วงแหวนในหมุน จะได้ $V = 1.2$

$$\text{จาก } P = VF_r$$

$$\text{ดังนั้น } P = 1.2 \times 348.255 = 418 \text{ N}$$

หาอายุการใช้งานได้โดย

$$\begin{aligned} \text{จาก } L_{10} &= \left(\frac{C}{P} \right)^k \\ &= \left(\frac{9830}{1.5 \times 418} \right)^3 = 3853.5 \text{ mr} \end{aligned}$$

$$\text{หรือ } L_{10} = \frac{3853.5 \times 10^6}{132.63 \times 60} = 484244.73 \text{ hr}$$

จะเห็นได้ว่าอายุการใช้งานของเพลาลังที่เลือกมีค่ามากกว่าอายุการใช้งานจากตารางมาก ซึ่งเราสามารถเลือกให้เล็กลงได้ แต่ในที่นี้จะทำการเลือกขนาดรูสวม 22 mm อนุกรมมิติ 02 ซึ่งสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดี

3.1.6 ล้อ

ในการเลือกล้อที่จะนำมาใช้กับรถขนของไฟฟ้านี้ จำเป็นต้องทำการศึกษาก่อนว่าล้อที่เลือกมาสามารถรับภาระที่กำหนดไว้ได้หรือไม่ สำหรับรถขนของไฟฟ้านี้ได้ทำการเลือกล้อของรถสกูตเตอร์ ซึ่งเป็นวัสดุที่สามารถหาได้ตามท้องตลาด และล้อรถของรถสกูตเตอร์นี้สามารถรับภาระที่กำหนดไว้ได้ โดยในล้อหนึ่งของรถสกูตเตอร์จะรับน้ำหนักได้ 400 lb. หรือ 181.44 kg. ซึ่งภาระที่รถขนของไฟฟ้านี้คือ 400 kg. แต่ทั้งนี้ล้อรถสกูตเตอร์ที่ใช้มีจำนวน 4 ล้อ ดังนั้นล้อของรถสกูตเตอร์ที่เลือกใช้จึงสามารถรับภาระที่กำหนดไว้ได้ รายละเอียดของล้อรถสกูตเตอร์ที่เลือกมาใช้กับรถขนของไฟฟ้านี้คือ 3.6-10.75 แสดงได้ดังรูปที่ 3.6

โดย 3.6 คือ ความกว้างของยางมีหน่วยเป็นนิ้ว

10.75 คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกระทะล้อ มีหน่วยเป็นนิ้ว



รูปที่ 3.6 แสดงรายละเอียดของล้อรถสกูตเตอร์ที่นำมาใช้กับรถขนของไฟฟ้า

3.1.7 ระบบห้ามล้อ

ในการออกแบบระบบห้ามล้อหรือระบบเบรก จะใช้เบรกชนิดดรัมเบรก ซึ่งเบรกชนิดนี้เหมาะสำหรับการเบรกในงานหนักๆ เช่นระบบเบรกในรถบรรทุก

3.1.8 ระบบบังคับเลี้ยว

ระบบบังคับเลี้ยวที่ใช้ในรถขนของไฟฟ้านี้เป็นระบบการเลี้ยวแบบแอกเคอแมนด์ ซึ่งเป็นระบบการเลี้ยวที่ขณะเลี้ยวรถเพลาล้อหน้าจะไม่เคลื่อนที่ไปทั้งแกน จะมีเฉพาะชิ้นส่วนที่อยู่ด้านนอกของสติกส์เท่านั้นที่เคลื่อนที่ โดยการบังคับชิ้นส่วนต่างๆ ที่ต่อมาจากพวงมาลัย ระบบการเลี้ยวแบบแอกเคอแมนด์ใช้กับรถยนต์ในปัจจุบันทั่วไป หลังจากจัดหาระบบบังคับเลี้ยวที่เหมาะสมแล้วทำการทดสอบหาค่าต่างๆ ของระบบบังคับเลี้ยวต่างๆ และได้ข้อมูลต่างๆ ดังนี้

$$\begin{aligned}
 T &= 0.83 \text{ m} \\
 W &= 1.4 \text{ m} \\
 H &= 0.9 \text{ m} \\
 S &= 3.1 \text{ m} \\
 L &= 3.19 \text{ m} \\
 P &= 0.67 \text{ m} \\
 d &= 0.0825 \text{ m}
 \end{aligned}$$

การหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงและระยะต่างๆสามารถทำได้ดังนี้

1. ความสัมพันธ์ของมุมเอียงและความยาวอื่นๆ

จาก $\cot \theta_a = \frac{L - 0.5P}{W}$

ดังนั้น $\theta_a = \cot^{-1} \left[\frac{L - 0.5P}{W} \right]$

แทนค่าจะได้

$$\theta_a = \cot^{-1} \left[\frac{3.19 - 0.5(0.67)}{1.4} \right] = 26.1^\circ$$

จาก $\cot \theta_b = \frac{L + 0.5P}{W}$

$$\theta_b = \cot^{-1} \left[\frac{L + 0.5P}{W} \right]$$

$$\theta_b = \cot^{-1} \left[\frac{3.19 + 0.5(0.67)}{1.4} \right] = 21.66^\circ$$

2. รัศมีของการเอียง

- รัศมีการเอียงของล้อหน้าล้อใน

$$\begin{aligned}
 \text{จาก } s &= W \operatorname{cosec} a - d \\
 &= 1.4 \operatorname{cosec} 26.1 - 0.0825 \\
 &= 3.1 \text{ m}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นรัศมีการเอียงของล้อหน้าล้อส่วนในเท่ากับ 3.1 m

- รัศมีการเลี้ยวของล้อหน้าส่วนนอก

$$\begin{aligned} \text{จาก } s &= W \operatorname{cosec} \theta_b + d \\ &= 1.4 \operatorname{cosec} 26.1 + 0.0825 \\ &= 3.71 \end{aligned}$$

ดังนั้น รัศมีการเลี้ยวของล้อหน้าล้อส่วนนอกเท่ากับ 3.71 m

3.1.9 มอเตอร์ไฟฟ้า

มอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้กับรถขนของไฟฟ้านี้คือมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง จากการคำนวณหาขนาดของมอเตอร์ที่ผ่านมาได้มอเตอร์ขนาด 1763.2 W หรือ 2.36 hp

3.1.10 ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้า

การปรับระดับความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่ากระแสไฟฟ้ที่จ่ายจากแบตเตอรี่เข้าสู่มอเตอร์ โดยการใช้ตัวต้านทานที่มีค่าความต้านทาน 3 ค่า สามารถปรับความเร็วได้ 3 ระดับ ซึ่งสามารถเลือกระดับความเร็วได้โดยการปรับสวิตช์เพื่อเปลี่ยนให้ไฟฟ้ไหลไปตามสายไฟฟ้เข้าสู่ตัวต้านทานตัวที่ต้องการได้

3.1.11 แบตเตอรี่

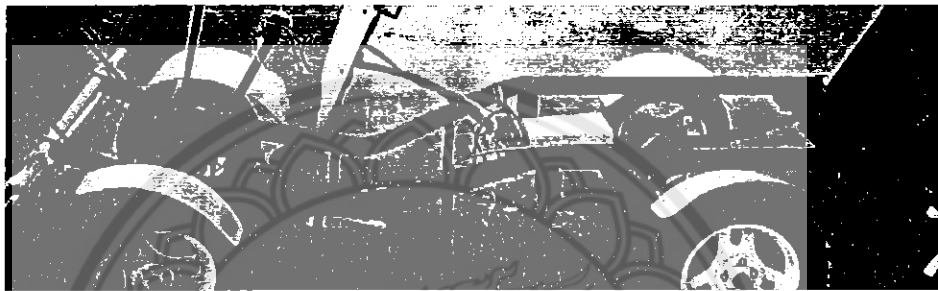
แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้ที่เป็นกระแสตรงให้กับมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งแบตเตอรี่นี้จะต้องเลือกให้มีขนาดเหมาะสมกับมอเตอร์ไฟฟ้า ในกรณีนี้เลือกใช้แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลท์ จำนวน 2 ลูก ๆ ละ 75 แอมแปร์

3.2 วิธีการดำเนินการสร้าง

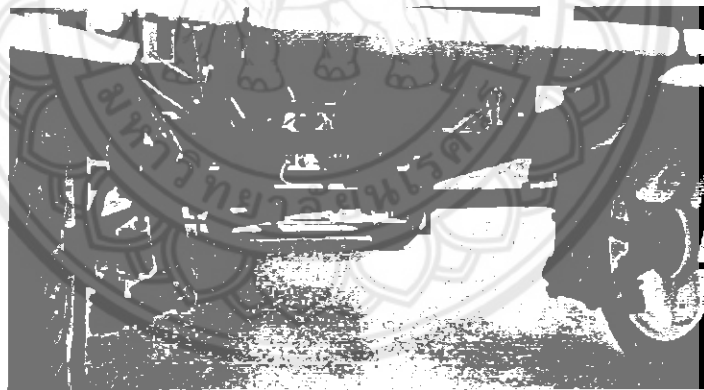
ในการสร้างรถขนของไฟฟ้สามารถทำได้ดังนี้

1. หลังจากทำการสำรวจออกแบบรถขนของไฟฟ้เสร็จเรียบร้อยแล้ว จากนั้นจึงจัดหาซื้อวัสดุอุปกรณ์หรือชิ้นส่วนที่นำมาสร้างรถขนของไฟฟ้ซึ่งชิ้นส่วนส่วนใหญ่จะเป็นชิ้นส่วนเก่าของรถหลาย ๆ ชนิดที่จะนำมาดัดแปลงให้เหมาะสมกับรถขนของไฟฟ้
2. หลังจากจัดหาวัสดุหรือชิ้นส่วนที่จะนำมาเริ่มสร้างได้แล้ว จากนั้นจึงทำความสะอาด
3. เริ่มสร้างโครงรถก่อน โดยจะสร้างจากเหล็กกล่องขนาด 50 mm× 25 mm×1.6 mm ซึ่งโครงรถที่สร้างเสร็จแล้วจะแสดงได้ดังรูปที่ 3.7

4. นำชุดคานหน้าและเพลาน้ำมาติดตั้งเข้ากับ โครงรถด้วยสลักยึดชุดคานหน้า และเพลาน้ำนี้ เป็นของเก่าจากรถชนปุ่น ซึ่งต้องรับน้ำหนักมากดังนั้นชุดคานหน้า และเพลาน้ำนี้จึงใช้ได้กับรถขนของไฟฟ้านี้ซึ่งบรรทุกน้ำหนักน้อยกว่า แต่ทั้งนี้ต้องทำการตรวจสอบ และผลจากการตรวจสอบ ชุดคานหน้าทำด้วยเหล็กรูปตัวซีขนาด C 50 x 7 และเพลาน้ำขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 mm นี้สามารถใช้ได้กับรถขนของไฟฟ้านี้ได้เป็นอย่างดี ชุดคานหน้าและเพลาน้ำแสดงได้ดังรูป 3.8



รูปที่ 3.7 โครงรถขนของไฟฟ้าที่ได้ทำการสร้าง



รูปที่ 3.8 แสดงชุดคานหน้าและเพลาน้ำ

5. ติดตั้งล้อหน้าเข้ากับชุดคานหน้าและเพลาน้ำ โดยล้อที่ติดตั้งนี้ใช้ล้อรถสกูตเตอร์นำมาดัดแปลงได้โดยการเจาะรูให้เข้าได้กับเพลาน้ำ จากนั้นจึงยึดล้อติดกับเบ้าแบริ่งของชุดคานหน้า ชุดคานหน้าและเพลาน้ำด้วยสลักเกลียวหรือน็อต แล้วนำชุดล้อหน้านี้สวมเข้ากับเพลาน้ำแล้วล็อกด้วยน็อตที่เพลาน้ำอีกทีสามารถแสดงรูปล้อหน้าได้ดังรูปที่ 3.9

6. ติดตั้งมอเตอร์และชุดเฟืองท้ายซึ่งมีเพลาท้ายประกอบอยู่ด้วยเข้ากับองค์ประกอบอื่น ๆ ของรถขนของไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.10 และจากการทดลองใช้งานสังเกตได้ว่ามอเตอร์นี้ไม่สามารถกลับทิศทางการหมุนได้จึงทำให้ไม่สามารถขับรถไฟฟ้าถอยหลังได้



รูปที่ 3.9 แสดงรูปล้อหน้า



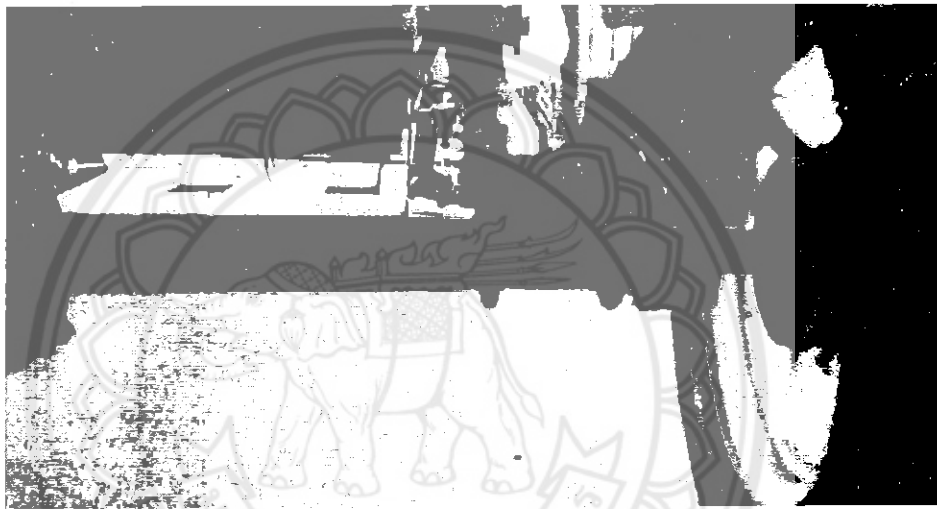
รูปที่ 3.10 แสดงรูปมอเตอร์ไฟฟ้าและเฟืองท้ายที่ใช้ในรถขนของไฟฟ้า

- เฟืองท้าย

เฟืองท้ายที่เลือกใช้กับรถขนของไฟฟ้าคือเฟืองคิฟเฟอเรนเชียลหรือเฟืองดอกจอก ซึ่งมีคุณสมบัติดังได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 คุณสมบัติที่สำคัญคือเป็นอุปกรณ์ช่วยให้ล้อทั้ง 2 ข้าง หมุนด้วยความเร็วต่างกันได้ในขณะเลี้ยว ดังรูปที่ 3.10 แสดงรูปเฟืองท้ายที่เลือกใช้ในรถขนของไฟฟ้า

- เพลาท้าย

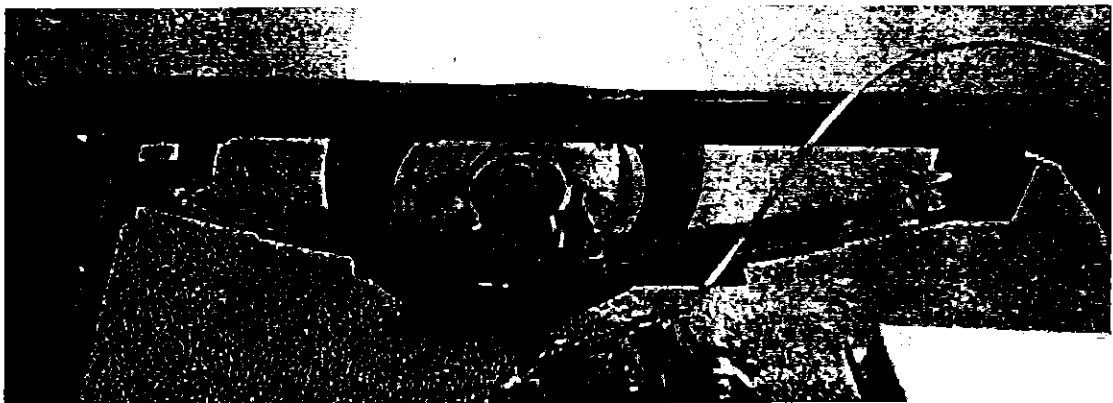
เพลาท้ายที่คิดมากับชุดเฟืองท้ายนี้มีขนาด 20 mm ซึ่งจากการตรวจสอบสามารถใช้งานได้เป็นอย่างดีกับภาระของรถขนของไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.11 แสดงเพลาท้าย



รูปที่ 3.11 แสดงรูปเพลาท้ายที่ใช้ในรถขนของไฟฟ้า

- แบริ่ง จะติดอยู่กับเสื้อเพลาท้าย แบริ่งที่ใช้มีขนาดรูสวน 20 mm ซึ่งสามารถใช้งานได้ดีกับภาระของรถขนของไฟฟ้านี้

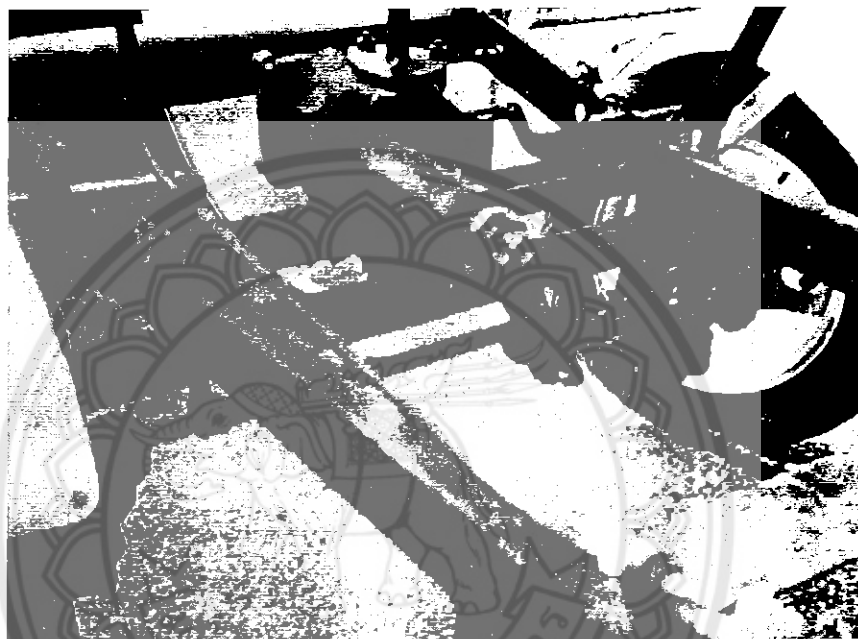
การติดตั้งชุดเฟืองท้ายเข้ากับโครงรถนี้ จะติดตั้งผ่านระบบกันสะเทือนซึ่งในที่นี้จะใช้แหนบ ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงรูปการติดตั้งแหนบ

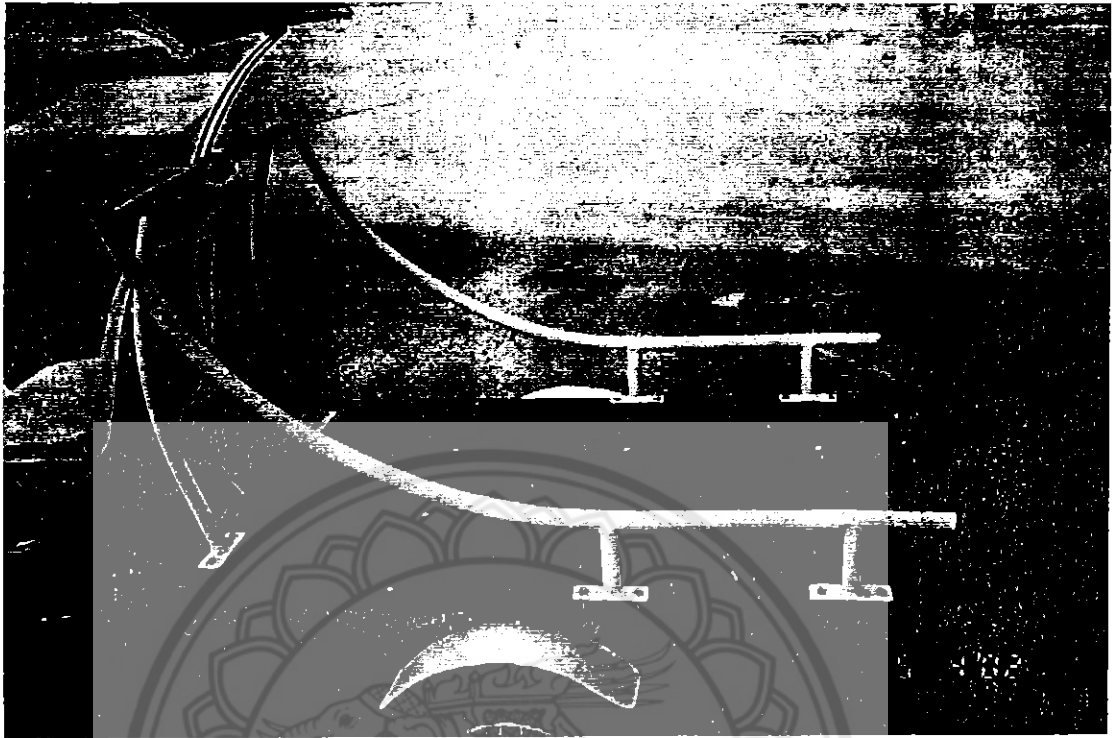
7. ทำการยึดติดกับเพลาท้าย

8. ติดตั้งชุดบังคับเกี่ยวกับล้อหน้า โดยชุดบังคับเลี้ยวนี้เป็นชุดบังคับเลี้ยวของรถขนปูน ซึ่งประกอบด้วย พวงมาลัย กระจุกเฟืองบังคับเลี้ยวและกันชักคันส่งต่าง ๆ ได้ทำการตัดแปลงให้มีขนาดเล็กลงให้มีขนาดเหมาะสมกับรถ รูปที่ 3.13 แสดงรูปส่วนประกอบของระบบบังคับเลี้ยว



รูปที่ 3.13 แสดงรูปส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบบังคับเลี้ยวที่ใช้ในรถขนของไฟฟ้า

9. สร้างกระบะยึดกับโครงรถ กระบะนี้ทำจากแผ่นเหล็กขนาด 750 x 1100 x 2 mm โดยมีขอบกระบะเพื่อป้องกันไม่ให้ภาระหล่นด้านข้างแสดงได้ดังรูปที่ 3.14 (ก) และสามารถเปิดเพื่อซ่อมบำรุงส่วนต่าง ๆ ของรถได้ง่ายขึ้น ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.14 (ข)



(ก) แสดงขอบกระเบรตชนของไฟฟ้า



(ข) แสดงการเปิดกระเบร

รูปที่ 3.14 แสดงกระเบรต

10. สร้างที่นั่ง ที่นั่งนี้จะนั่งได้คนเดียวจะใช้แทนจำนวน 4 แผ่น เป็นส่วนติดต่อระหว่างที่นั่งกับจุดยึด แสดงได้ดังรูป 3.15 เหตุที่ใช้แบบนี้เพื่อเป็นระบบกันสะเทือนให้กับที่นั่ง



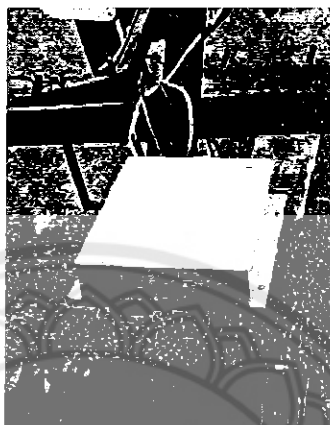
รูปที่ 3.15 แสดงที่นั่งของรถขนของไฟฟ้า

11. ติดตั้งหลังคาโดยทำให้มีรูปร่างโค้ง ดังรูป 3.16 จะมีจุดยึด 3 จุด คือยึดกับกันชนหน้า 2 จุด และยึดกับขอบกระบะรถอีก 1 จุด ส่วนที่เป็นหลังคาจะใช้ฟิวเจอร์บอร์ดเพราะมีน้ำหนักเบา โดยหลังคานี้สามารถเปิดได้



รูปที่ 3.16 แสดงหลังคาของรถขนของไฟฟ้า

12. ติดตั้งระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์ โดยระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์นี้เป็นการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของกระแสไฟฟ้า สามารถปรับความเร็วได้ 3 ระดับ ระบบควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 แสดงระบบควบคุมความเร็วของรถขนของไฟฟ้า

13. ทำการถอดชิ้นส่วนต่าง ๆ ออกเพื่อนำไปพ่นสี แล้วนำมาประกอบกันอีกครั้ง จะได้รถตามที่ได้ออกแบบไว้ ดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แสดงรถขนของไฟฟ้าที่เสร็จสมบูรณ์

สามารถแสดงรายละเอียดต่าง ๆ ของรถไฟฟ้าที่สร้างขึ้นได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดของรถขนของไฟฟ้า

SPECIFICATION		
ELECTRIC MOTOR	DC 24 V	
INPUT POWER	1.5 hp	
CONTROL SYSTEM	Variable Resistance	
BATTERY TYPE	2 units x 12 V , Capacity 75 Ah Deep Cycle Traction Battery	
CHARGER	Stationary (Off-Board)	
CHARGING TIME	6 hours.	
DISTANCE PER CHARGE	8.55 – 18 km	
TRANSMISSION	Differential gear	
FINAL DRIVE SYSTEM	Rear wheel drive	
MAX SPEED	8.17 km/h	
GRADIENT	12 % หรือ 7 °	
WHEELS & TIRES	3.6 – 10.75	
BRAKING SYSTEM	Drum brake	
CHASSIS	Channel shape steel	
DIMENSION	Length	2200 mm
	Width	1040 mm
	Height	1500±100 mm
EMPTY WEIGHT	182 kg	
CARRYING WEIGHT	218 kg	
TOTAL WEIGHT	400 kg	

หมายเหตุ 1500±100 หมายถึงรถมีความสูง 1500 mm และสามารถปรับให้ต่ำลงหรือสูงขึ้นได้
อีก 100 mm

3.3 ขั้นตอนการทดสอบ

การทดสอบรถไฟฟ้าที่ได้สร้างขึ้นนี้ มีจุดประสงค์เพื่อต้องการทราบข้อมูลต่าง ๆ ของรถไฟฟ้าในสภาพใช้งานจริงเปรียบเทียบกับข้อมูลตามทฤษฎี เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับการพัฒนาต่อไป และผลการทดสอบนี้ได้แสดงถึงสมรรถนะของรถไฟฟ้าคันนี้อีกด้วย

ในการทดสอบที่ได้ทำการทดสอบจริงต้องมีการตัดแปลงให้เข้ากับความจำกัดของอุปกรณ์ทดสอบ ดังนั้นจึงทำให้ผลการทดสอบที่ได้ไม่สามารถถือเป็นมาตรฐานที่จะใช้เปรียบเทียบกับมาตรฐานสากลได้

เนื่องจากรถไฟฟ้าคันนี้ได้ทำการสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการขนของ ดังนั้นในการทดสอบจึงต้องมีความเกี่ยวข้องกับการบรรทุกของ ซึ่งมีดังนี้

1. อายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ภาระต่าง ๆ
2. ความเร็วสูงสุดที่ระดับความเร็วต่าง ๆ
3. รัศมีวงเลี้ยว
4. ระยะทางและเวลาที่ใช้ในการเบรก
5. กำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้า

3.3.1 อายุการใช้งานของแบตเตอรี่

อุปกรณ์

1. แบตเตอรี่ 12 โวลท์ 75 แอมแปร์ - ชั่วโมง 2 ลูก
2. เครื่องชาร์จแบตเตอรี่
3. มัลติมิเตอร์
4. ชอล์ก
5. ตลับเมตร

วิธีทดสอบ

1. เลือกสถานที่ที่ใช้ทดสอบรถไฟฟ้าซึ่งมีระยะทาง 150 เมตร/รอบ
2. ก่อนทำการทดสอบใช้มัลติมิเตอร์วัดความต่างศักย์ไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ที่ชาร์จแล้วบันทึกเป็นค่าเริ่มต้น
3. เริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้าให้แก่มอเตอร์ที่ระดับความเร็วระดับที่ 1 ให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่โดยไม่มีน้ำหนักบรรทุก
4. จับเวลาและวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อครบรอบที่ 10 จากนั้นหยุดพัก 5 นาที เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับมอเตอร์

5. ขับรถไฟฟ้าจนกว่าเวลาต่อรอบที่ใช้ในการเคลื่อนที่มีค่าเป็น 2 เท่าของเวลาเฉลี่ยต่อรอบของรอบแรก (เนื่องจากขณะทำการทดสอบสังเกตได้ว่ากรณีที่รถไฟฟ้าเคลื่อนที่โดยใช้เวลาต่อรอบของรอบสุดท้ายมีค่าเป็น 2 เท่าของเวลาต่อรอบของรอบแรกเมื่อหยุดจ่ายกระแสให้รถไฟฟ้าแล้วทำการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้มอเตอร์อีกครั้ง รถไฟฟ้าจะไม่เคลื่อนที่เนื่องจากมีกำลังไม่เพียงพอที่จะทำให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่) แล้วบันทึกระยะทาง เวลา และความต่างศักย์ไฟฟ้า
6. นำแบตเตอรี่ไปชาร์ตใหม่ แล้วทดสอบตามขั้นที่ 2 – 5 แต่เปลี่ยนระดับความเร็วเป็นระดับที่ 2 และ 3 ตามลำดับ
7. ทำตามขั้นตอนที่ 1 – 6 โดยเปลี่ยนน้ำหนักบรรทุกทุกเป็น 200 กิโลกรัม

3.3.2 การทดสอบหาความเร็วของรถที่ระดับความเร็วและที่ภาระต่างๆ

อุปกรณ์

1. รถขนของไฟฟ้าพร้อมแบตเตอรี่
2. ตลับเมตร
3. นาฬิกาจับเวลา
4. ชอล์ก

วิธีทดสอบ

1. เลือกสถานที่ทดสอบ ให้สามารถปฏิบัติงานได้สะดวกและเหมาะสม
2. ใช้ตลับเมตรวัดระยะทางเป็น 2 ช่วงๆ ละ 40 เมตรจากนั้นให้ใช้ชอล์กทำเครื่องหมายไว้
3. ขับเคลื่อนรถไฟฟ้าโดยไม่บรรทุกน้ำหนักที่ระดับความเร็วที่ 1
4. จับเวลาที่ระยะทางและภาระดังกล่าว บันทึกผลการทดสอบ
5. ทำตามขั้นที่ 3 – 4 แต่เปลี่ยนระดับความเร็วเป็นระดับที่ 2 และ 3 ตามลำดับ
6. ทำตามขั้นตอนที่ 3 – 5 โดยเพิ่มน้ำหนักบรรทุกทุกเป็น 50, 100 , 150 และ 200 กิโลกรัม ตามลำดับ

3.3.3 การทดสอบหารัศมีวงเลี้ยว

อุปกรณ์

1. รถขนของไฟฟ้าพร้อมแบตเตอรี่
2. คลิปเมตร

วิธีทดสอบ

1. เลือกสถานที่ที่ใช้ทดสอบที่ปฏิบัติงานได้สะดวกและเหมาะสำหรับการเลี้ยว
2. ขับรถขนของไฟฟ้าโดยหมุนพวงมาลัยให้เลี้ยวซ้ายสุดเป็นวงกลม แล้ววัดขนาดวงกลมของล้อหน้า ด้านนอกและด้านใน บันทึกผล
3. ทำตามขั้นตอนที่ 2 แต่เปลี่ยนจากเลี้ยวซ้ายเป็นเลี้ยวขวา

3.3.4 การทดสอบหาระยะทางและเวลาในการเบรกที่ความเร็วและภาระต่างๆ

อุปกรณ์

1. รถขนของไฟฟ้าพร้อมแบตเตอรี่
2. คลิปเมตร
3. นาฬิกา
4. ซอล์ก

วิธีทดสอบ

1. เลือกสถานที่ทดสอบ ให้สามารถปฏิบัติงานได้สะดวกและเหมาะสม
2. กำหนดเส้นที่ต้องการเบรกพร้อมทั้งเริ่มจับเวลาที่เส้นนี้ และหยุดเวลาเมื่อรถหยุดนิ่ง บันทึกเวลาและวัฏระยะทางที่ได้
3. เริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้าให้มอเตอร์ที่ระดับความเร็วที่ 1 โดยไม่มีน้ำหนักบรรทุก
4. ทำตามขั้นตอนที่ 3 แต่เปลี่ยนระดับความเร็วเป็นระดับที่ 2 และ 3 ตามลำดับ
5. ทำตามขั้นตอนที่ 3-4 โดยเพิ่มน้ำหนักบรรทุกเป็น 50, 100, 150 และ 200 กิโลกรัม ตามลำดับ

3.3.5 การทดสอบหากำลังไฟฟ้าของรถไฟฟ้า

อุปกรณ์

1. รถขนของไฟฟ้าพร้อมแบตเตอรี่
2. โวลท์มิเตอร์
3. ทริปมิเตอร์ (ใช้วัดกระแสไฟฟ้า)

วิธีทดสอบ

1. เลือกสถานที่ทดสอบ ให้สามารถปฏิบัติงานได้สะดวกและเหมาะสม ในกรณีนี้ทดสอบโดยให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่เป็นรอบโดยระยะทาง 150 เมตร/รอบ
2. อ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ที่ชาร์ตเสร็จแล้ว จากนั้นนำแบตเตอรี่และโวลท์มิเตอร์มาต่ออนุกรมกับมอเตอร์
3. จ่ายกระแสไฟฟ้าให้มอเตอร์ที่ระดับความเร็วที่ 1 ระหว่างที่รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ในแต่ละรอบให้อ่านค่ากระแสไฟฟ้าโดยนำทริปมิเตอร์ไปคล้องจับสายไฟฟ้าที่เชื่อมต่อระหว่างแบตเตอรี่กับมอเตอร์ พร้อมกับอ่านค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากโวลท์มิเตอร์ในทุก ๆ ตำแหน่งที่น่าจะเกิดกำลังสูงสุด (จากการทดสอบสังเกตได้ว่าตำแหน่งที่เกิดกำลังสูงสุดคือตำแหน่งที่มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าน้อยที่สุดเนื่องจาก ณ จุดที่ความต่างศักย์มีค่าต่ำสุดแบตเตอรี่จะจ่ายกระแสไฟฟ้าให้มอเตอร์สูงสุด) โดยทำซ้ำกันประมาณ 5 รอบ เพื่อหาตำแหน่งที่แน่นอน
4. นำแบตเตอรี่ไปชาร์ตใหม่ด้วยอัตราการชาร์ต 30 แอมแปร์ เป็นเวลา 20 นาที แล้วต่อวงจรไฟฟ้าตามขั้นตอนที่ 2
5. อ่านค่ากระแส และค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าขณะเริ่มจ่ายกระแสไฟฟ้าให้มอเตอร์ ณ ตำแหน่งที่มีค่าความต่างศักย์ต่ำสุด (จากการทดสอบ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะต่ำที่สุดเมื่อรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ได้ประมาณ 1 เมตรจากจุดเริ่มต้น) หลังจากนั้นขับจี้รถไฟฟ้าไปตามเส้นทางที่กำหนดไว้ในขั้นตอนที่ 1 แล้วอ่านค่ากระแส และความต่างศักย์ไฟฟ้า ณ ตำแหน่งที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 โดยให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ทั้งหมด 15 รอบเพื่อศึกษาแนวโน้มของกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้น
6. นำแบตเตอรี่ไปชาร์ตใหม่ด้วยอัตราการชาร์ต 30 แอมแปร์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมงแล้วทำตามขั้นตอนที่ 3 – 5 แต่เปลี่ยนระดับความเร็วเป็นระดับที่ 2 และ 3 ตามลำดับ
7. ทำตามขั้นตอนที่ 3 – 6 โดยเพิ่มน้ำหนักบรรทุกเป็น 50 , 100 , 150 และ 200 กิโลกรัม ตามลำดับ บันทึกผลการทดสอบ

บทที่ 4

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์

4.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของรถขนของไฟฟ้า

4.1.1 อายุการใช้งานของแบตเตอรี่

เมื่อนำผลการทดสอบจากตารางที่ จ. 1 – จ.6 มาเขียนกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับความต่างศักย์ไฟฟ้า และเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ระดับความเร็วต่าง ๆ กรณีชาร์ตแบตเตอรี่ด้วยอัตราการชาร์ต 30 แอมแปร์ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ได้ดังนี้

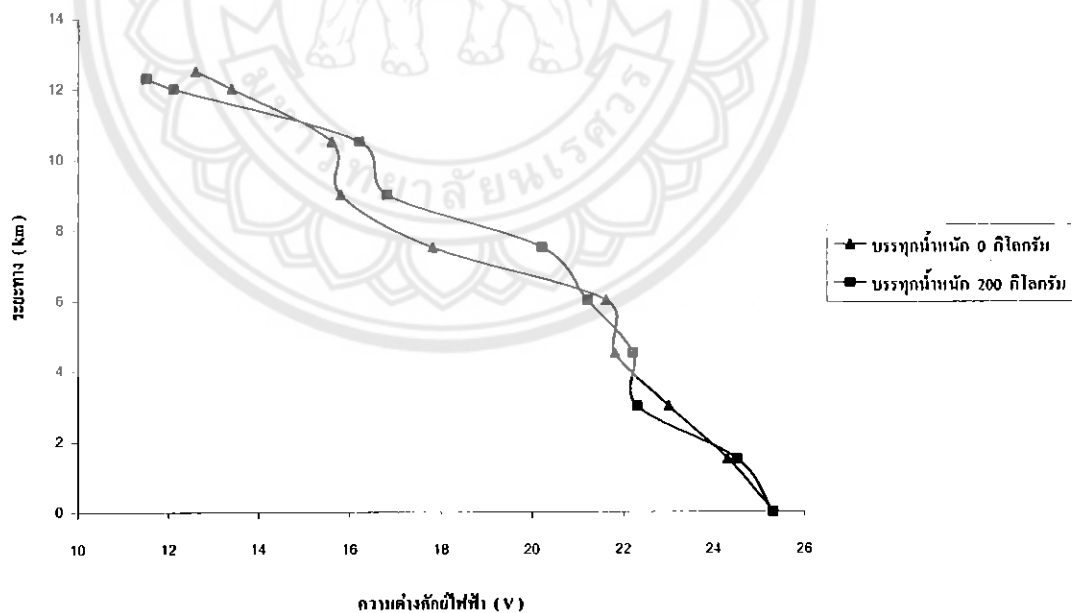
1. เมื่อขับเคลื่อนรถไฟฟ้าด้วยระดับความเร็วที่ 1

1.1 บรรทุกน้ำหนัก 0 กิโลกรัม

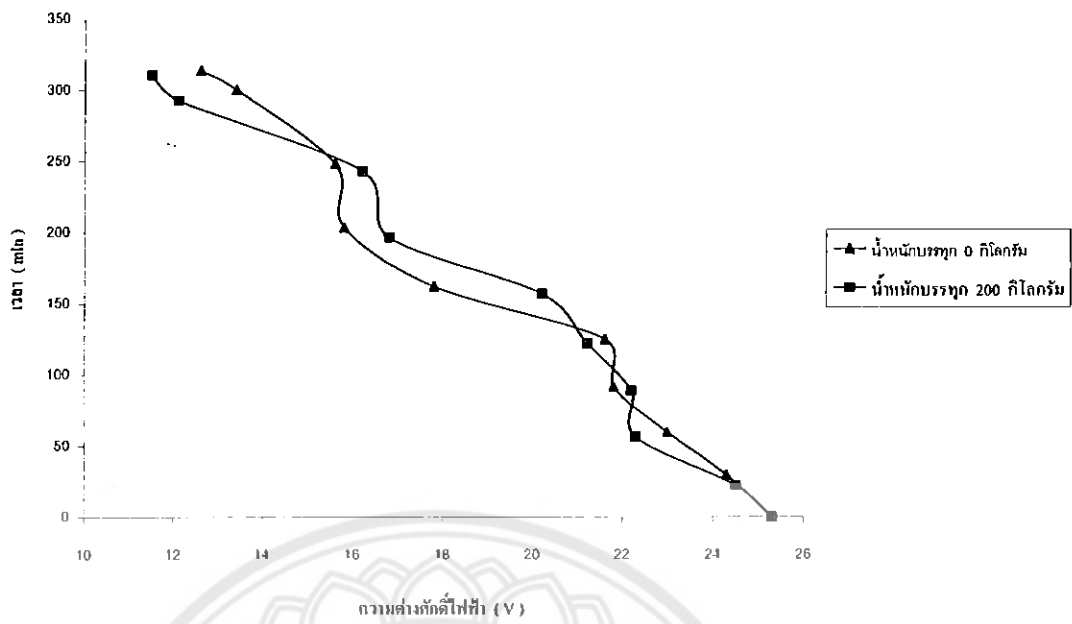
- ความต่างศักย์ไฟฟ้าก่อนชาร์ต 21.4 V
- ความต่างศักย์ไฟฟ้าหลังชาร์ต 25.3 V

1.2 บรรทุกน้ำหนัก 200 กิโลกรัม

- ความต่างศักย์ไฟฟ้าก่อนชาร์ต 21.9 V
- ความต่างศักย์ไฟฟ้าหลังชาร์ต 25.3 V



กราฟ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับความต่างศักย์ไฟฟ้า, ระดับความเร็วที่ 1



กราฟ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้า, ระดับความเร็วที่ 1

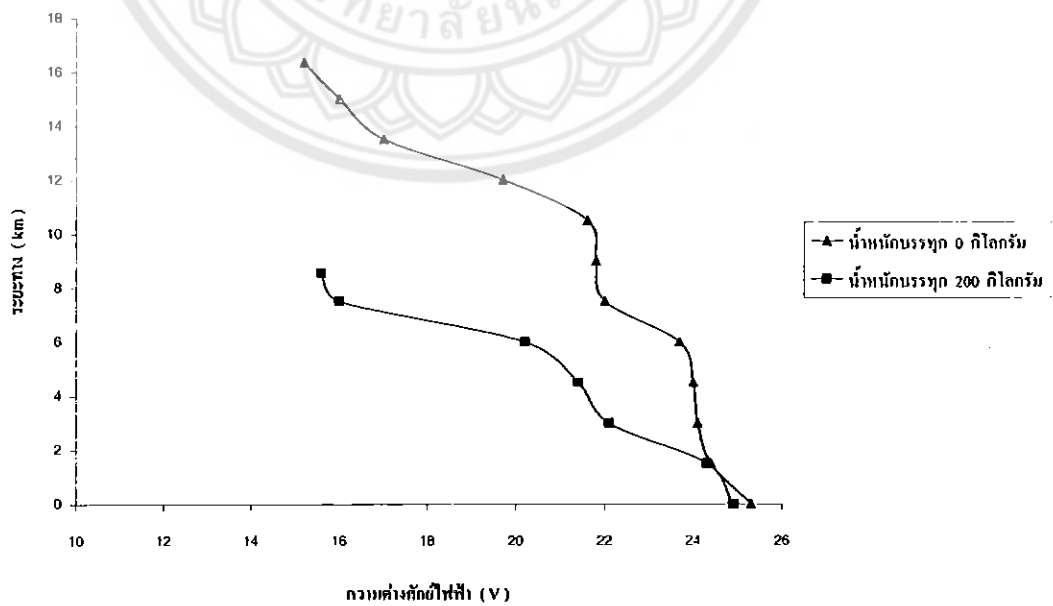
2. เมื่อขับเคลื่อนรถไฟฟ้าด้วยระดับความเร็วที่ 2

2.1 บรรทุกน้ำหนัก 0 กิโลกรัม

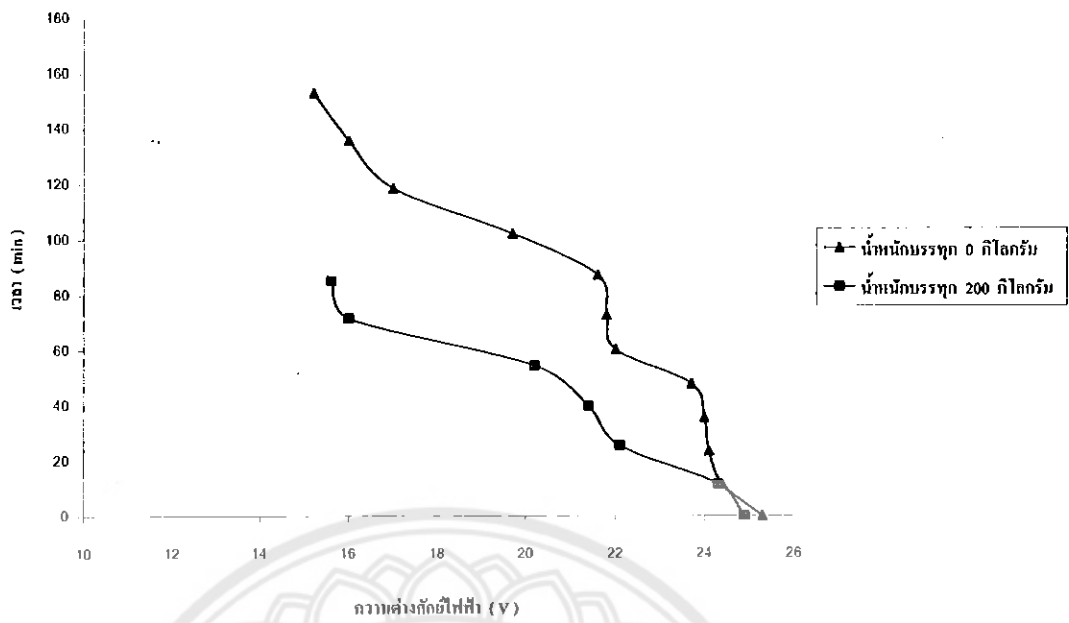
- ความต่างศักย์ไฟฟ้าก่อนชาร์ต 20.0 V
- ความต่างศักย์ไฟฟ้าหลังชาร์ต 25.6 V

2.2 บรรทุกน้ำหนัก 200 กิโลกรัม

- ความต่างศักย์ไฟฟ้าก่อนชาร์ต 22.0 V
- ความต่างศักย์ไฟฟ้าหลังชาร์ต 25.1 V



กราฟ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับความต่างศักย์ไฟฟ้า, ระดับความเร็วที่ 2



กราฟ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้า, ระดับความเร็วที่ 2

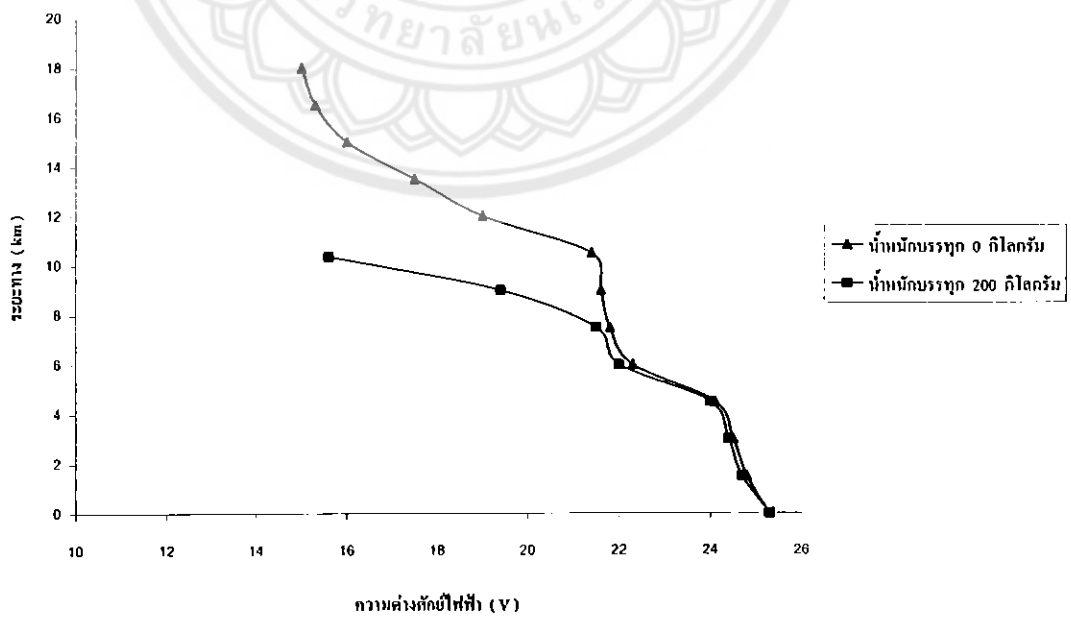
3. เมื่อจับเคลื่อนรถไฟฟ้าด้วยระดับความเร็วที่ 3

3.1 บรรทุกน้ำหนัก 0 กิโลกรัม

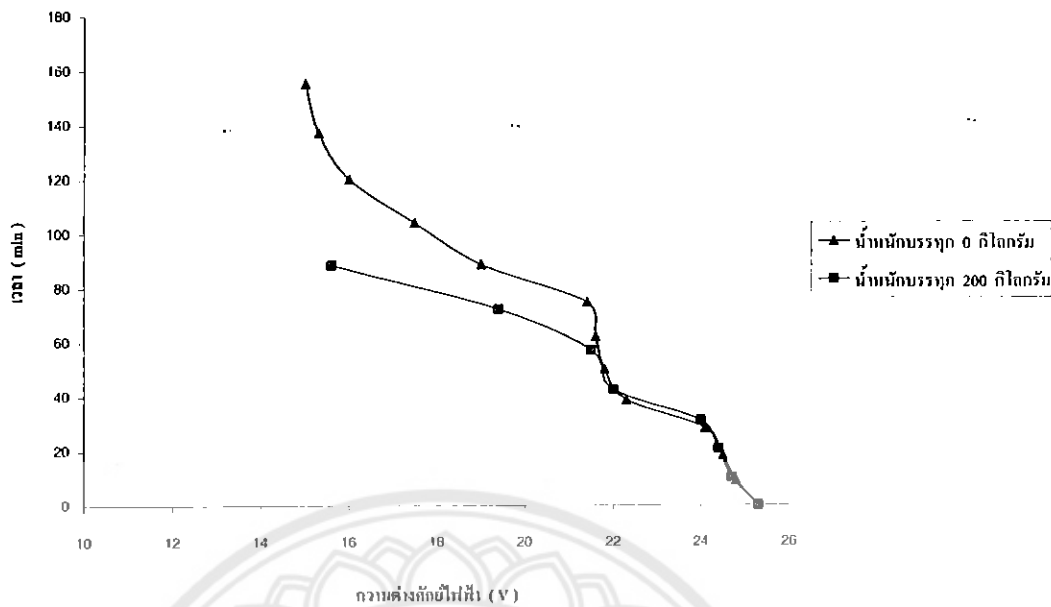
- ความต่างศักย์ไฟฟ้าก่อนชาร์ต 20.9 V
- ความต่างศักย์ไฟฟ้าหลังชาร์ต 25.7 V

3.2 บรรทุกน้ำหนัก 200 กิโลกรัม

- ความต่างศักย์ไฟฟ้าก่อนชาร์ต 21.8 V
- ความต่างศักย์ไฟฟ้าหลังชาร์ต 25.7 V



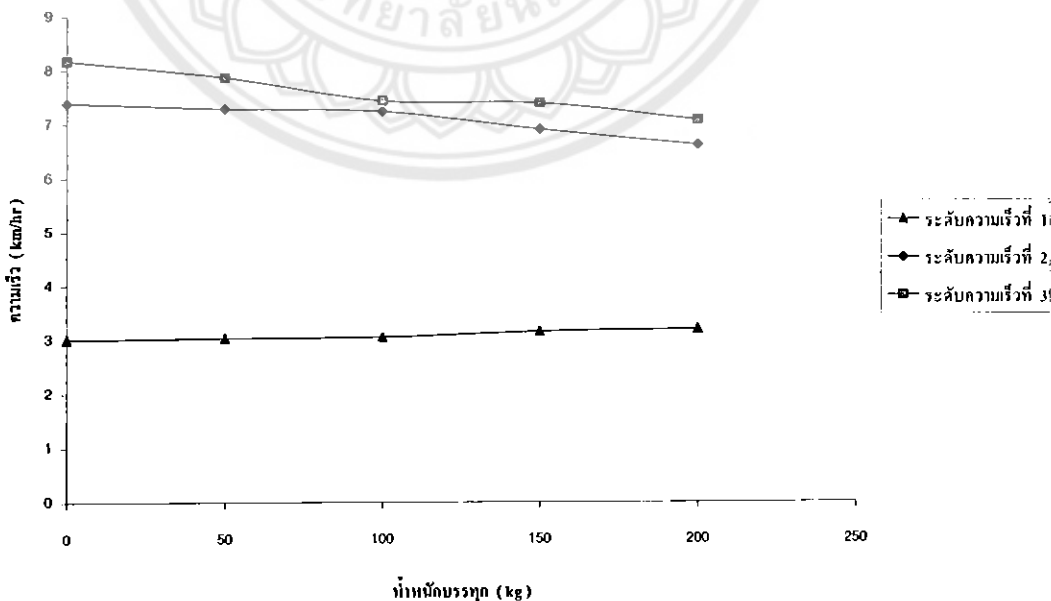
กราฟ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับความต่างศักย์ไฟฟ้า, ระดับความเร็วที่ 3



กราฟ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความต่างศักย์ไฟฟ้า, ระดับความเร็วที่ 3

4.1.2 ความเร็วของรถที่ระดับความเร็วและที่ภาระต่างๆ

จากผลการทดสอบในตารางที่ 4.7 สามารถหาความเร็วเฉลี่ยของรถไฟฟ้าที่ระดับความเร็วต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.8 และเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับน้ำหนักบรรทุกได้ดังกราฟ 4.7



กราฟ 4.7 แสดงความเร็วของรถไฟฟ้า

4.1.3 รัศมีวงเลี้ยว

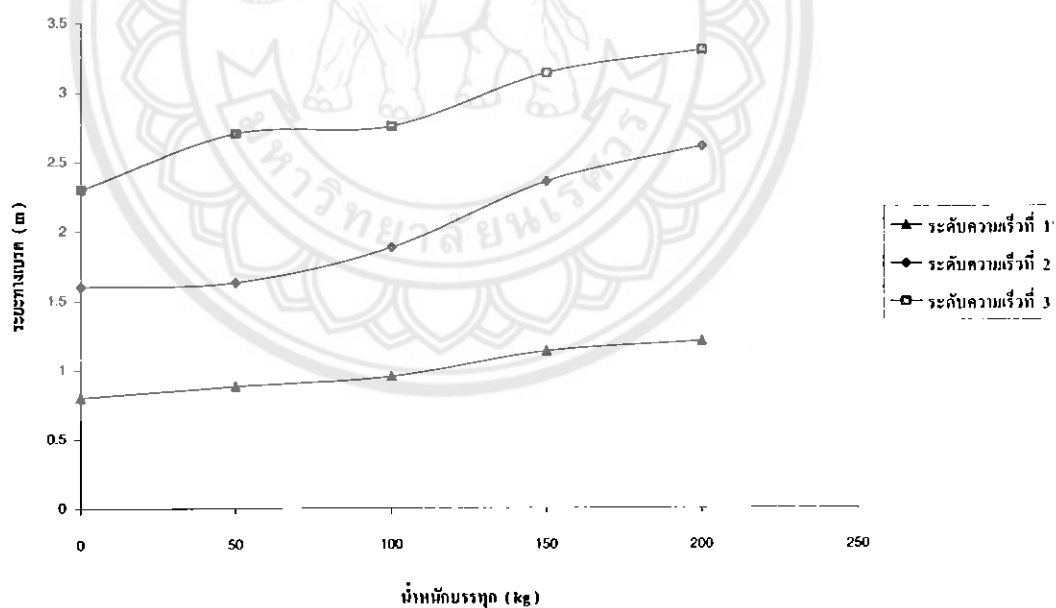
ผลการทดสอบหารัศมีวงเลี้ยวแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงรัศมีวงเลี้ยว

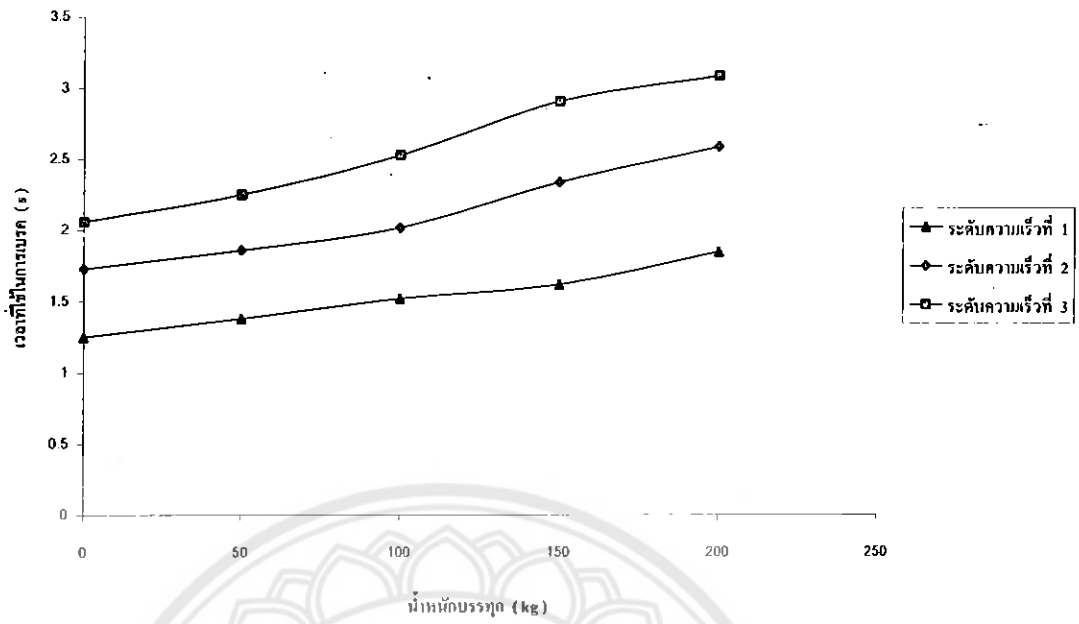
ครั้งที่	เลี้ยวซ้าย (เมตร)		เลี้ยวขวา (เมตร)	
	ขอบล้อใน	ขอบล้อนอก	ขอบล้อใน	ขอบล้อนอก
1	2.12	2.83	1.94	2.77
2	2.11	2.85	1.95	2.75
3	2.13	2.80	1.95	2.76
เฉลี่ย	2.12	2.88	1.94	2.76

4.1.4 ระยะทางและเวลาที่ใช้ในการเบรก

ผลการทดสอบแสดงได้ดังกราฟต่าง ๆ ดังนี้



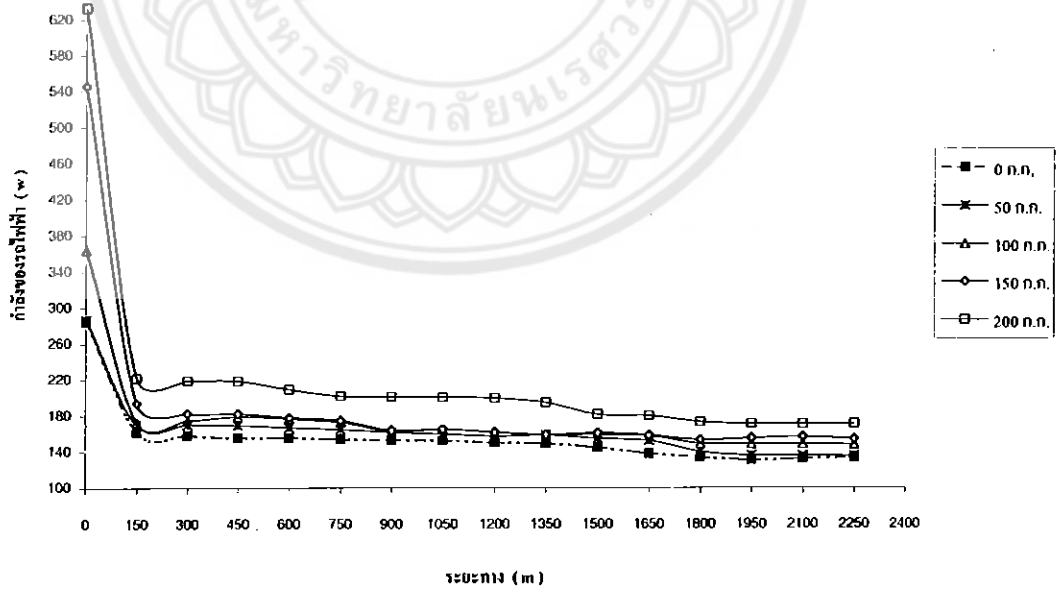
กราฟ 4.8 แสดงระยะทางที่ใช้ในการเบรก



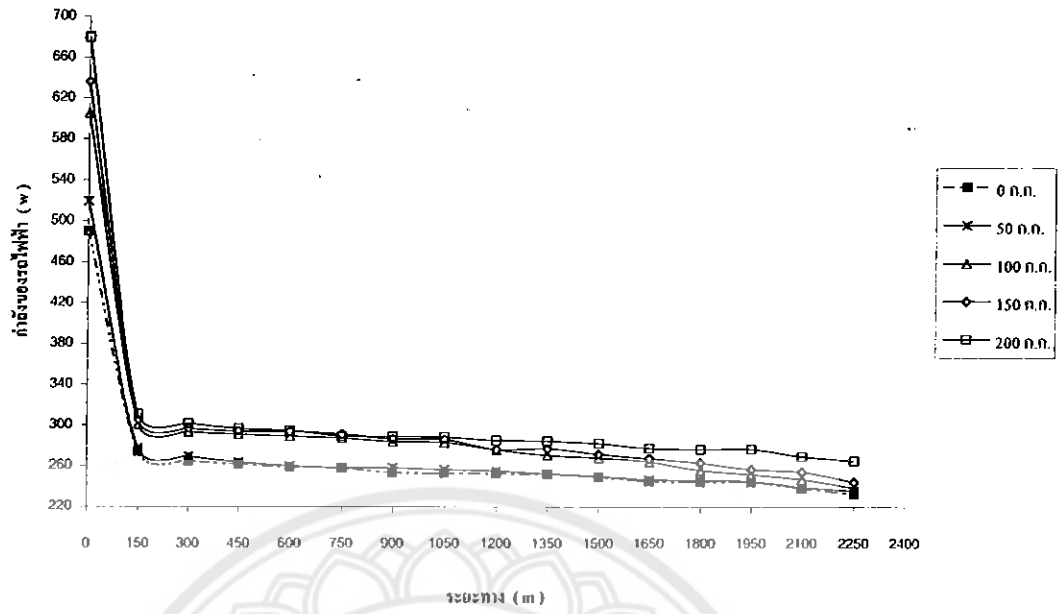
กราฟ 4.9 แสดงเวลาที่ใช้ในการเบรก

4.1.5 กำลังของรถไฟฟ้า

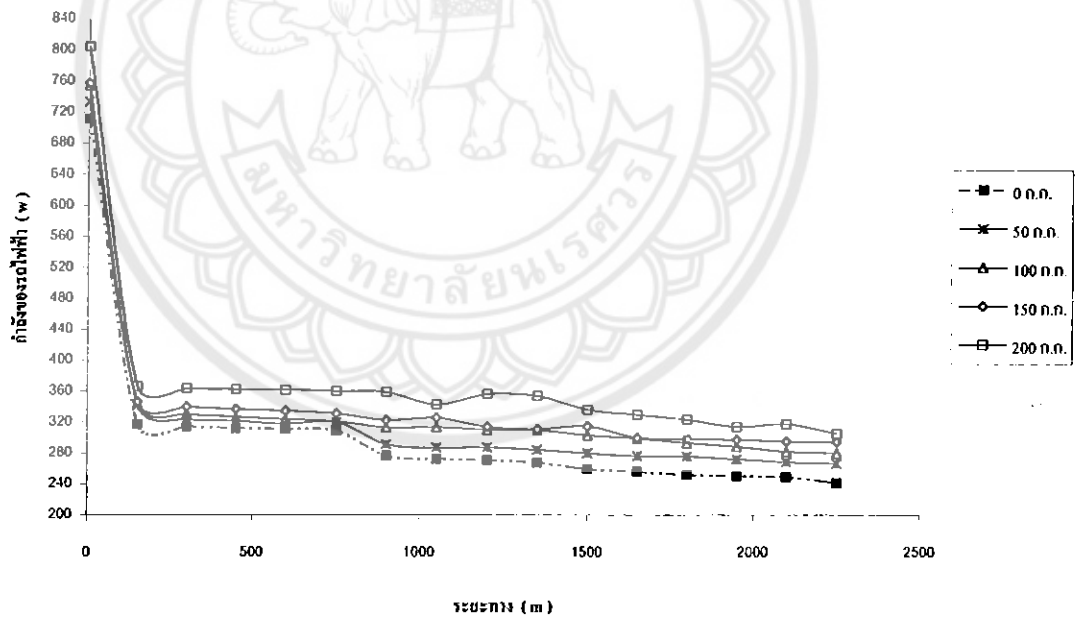
ผลการทดสอบแสดงได้ดังกราฟต่างๆ ดังนี้



กราฟ 4.10 กำลังไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นที่ระดับความเร็วที่ 1



กราฟ 4.11 กำลังไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นที่ระดับความเร็วที่ 2



กราฟ 4.12 กำลังไฟฟ้าซึ่งเกิดขึ้นที่ระดับความเร็วที่ 3

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดสอบประสิทธิภาพพรตชนของไฟฟ้า

4.2.1 อายุการใช้งานของแบตเตอรี่

จากผลการทดสอบ สรุปได้ว่า

- ระดับความเร็วที่ 1 ขณะไม่บรรทุกน้ำหนักได้ระยะทางสูงสุด 12.5 กิโลเมตร ด้วยเวลา 5 ชั่วโมง 15 นาที 49.24 วินาที และขณะบรรทุกน้ำหนักเต็มที่ ได้ระยะทางสูงสุด 12.3 กิโลเมตร ด้วยเวลา 4 ชั่วโมง 30 นาที 33.35 วินาที

- ระดับความเร็วที่ 2 ขณะไม่บรรทุกน้ำหนักได้ระยะทางสูงสุด 16.35 กิโลเมตร ด้วยเวลา 2 ชั่วโมง 34 นาที 59.00 วินาที และขณะบรรทุกน้ำหนักเต็มที่ ได้ระยะทางสูงสุด 8.55 กิโลเมตร ด้วยเวลา 1 ชั่วโมง 26 นาที 45.35 วินาที

- ระดับความเร็วที่ 3 ขณะไม่บรรทุกน้ำหนักได้ระยะทางสูงสุด 18.00 กิโลเมตร ด้วยเวลา 2 ชั่วโมง 36 นาที 54.48 วินาที และขณะบรรทุกน้ำหนักเต็มที่ ได้ระยะทางสูงสุด 10.35 กิโลเมตร ด้วยเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที 3.74 วินาที

จะเห็นได้ว่าเมื่อขับเคลื่อนรถไฟฟ้าด้วยระดับความเร็วเดียวกันแล้วระยะทางและเวลาที่รถไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ได้ กรณีบรรทุกน้ำหนักเต็มที่ที่มีแนวโน้มน้อยกว่ากรณีไม่มีน้ำหนักบรรทุก เนื่องจากเมื่อภาระเพิ่มขึ้นรถไฟฟ้าต้องการกำลังในการที่จะขับให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่มากขึ้น ทำให้แบตเตอรี่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้มอเตอร์มากขึ้น (เปรียบเทียบค่ากระแสไฟฟ้าที่แบตเตอรี่จ่ายให้มอเตอร์ได้จากตารางที่ จ.10 กับตารางที่ จ.16 เป็นต้น) เมื่อแบตเตอรี่จ่ายกระแสไฟฟ้ามากขึ้น อายุการใช้งานต่อการชาร์ตหนึ่งครั้งของแบตเตอรี่ก็จะสั้นลง เป็นผลให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ได้ระยะทางและเวลาน้อยลงไปด้วย

4.2.2 ความเร็วของรถที่ระดับความเร็วและภาระต่าง ๆ

จากผลการทดสอบ สรุปได้ว่า

- ระดับความเร็วที่ 1 ความเร็วขณะไม่มีภาระคือ 3.005 km/hr และขณะบรรทุกน้ำหนักเต็มที่ (200kg) คือ 3.195 km/hr

- ระดับความเร็วที่ 2 ความเร็วขณะไม่มีภาระคือ 7.39 km/hr และขณะบรรทุกน้ำหนักเต็มที่ (200kg) คือ 6.6 km/hr

- ระดับความเร็วที่ 3 ความเร็วขณะไม่มีภาระคือ 8.17 km/hr และขณะบรรทุกน้ำหนักเต็มที่ (200kg) คือ 7.065 km/hr

จะสังเกตได้ว่า

- กรณีขับเคลื่อนรถไฟฟ้าด้วยระดับความเร็วเดียวกัน แต่เพิ่มน้ำหนักบรรทุก

1. ระดับความเร็วที่ 1 ความเร็วของรถไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเนื่องจากเมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่ม จะทำให้กำลังไฟฟ้าที่เบตเตอร์จ่ายให้มอเตอร์เพิ่มขึ้น ขณะที่แรงต้านทานการเคลื่อนที่ก็เพิ่มขึ้นด้วยแต่เพิ่มขึ้นในอัตราที่น้อยกว่าอัตราการเพิ่มของกำลังไฟฟ้า จึงเป็นผลให้ความเร็วมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (จาก กำลังไฟฟ้า = ผลคูณของแรงต้านทานการเคลื่อนที่กับความเร็ว)

2. ระดับความเร็วที่ 2 และ 3 ความเร็วของรถไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลงเนื่องจากเมื่อน้ำหนักบรรทุกเพิ่ม จะทำให้กำลังไฟฟ้าที่เบตเตอร์จ่ายให้มอเตอร์เพิ่มขึ้น ขณะที่แรงต้านทานการเคลื่อนที่ก็เพิ่มขึ้นด้วยและเพิ่มขึ้นในอัตราที่มากกว่าอัตราการเพิ่มของกำลังไฟฟ้า จึงเป็นผลให้ความเร็วมีแนวโน้มลดลง (จาก กำลังไฟฟ้า = ผลคูณของแรงต้านทานการเคลื่อนที่กับความเร็ว)

- กรณีขับเคลื่อนรถไฟฟ้าโดยบรรทุกน้ำหนักเท่ากันเปลี่ยนระดับความเร็ว จะได้ว่าความเร็วที่ระดับความเร็วที่ 3 > ความเร็วที่ระดับความเร็วที่ 2 > ความเร็วที่ระดับความเร็วที่ 1 เนื่องจากที่ภาระเดียวกันจะมีความต้านทานเนื่องจากการเคลื่อนที่ใกล้เคียงกัน (แรงต้านทานการเคลื่อนที่ใกล้เคียงกันเนื่องจากรถไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยความเร็วใกล้เคียงกันทำให้แรงต้านอากาศใกล้เคียงกันด้วย) แต่กำลังไฟฟ้าที่เบตเตอร์จ่ายให้แก่มอเตอร์ที่ระดับความเร็วที่ 3 มีค่ามากกว่าที่ระดับความเร็วที่ 2 และระดับความเร็วที่ 1 ตามลำดับ ทำให้ความเร็วที่ระดับความเร็วที่ 3 มากกว่าความเร็วที่ระดับความเร็วที่ 2 และระดับความเร็วที่ 1 ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

4.2.3 รัศมีวงเลี้ยว

จากการทดสอบหารัศมีวงเลี้ยวของรถขนของไฟฟ้า ผลที่ได้คือ

- รัศมีการเลี้ยวซ้ายของล้อหน้าล้อในด้านนอก 2.12 m
- รัศมีการเลี้ยวซ้ายของล้อหน้าล้อนอกด้านนอก 2.83 m
- รัศมีการเลี้ยวขวาของล้อหน้าล้อในด้านนอก 1.94 m
- รัศมีการเลี้ยวขวาของล้อหน้าล้อนอกด้านนอก 2.76 m

เมื่อนำผลการทดสอบที่ได้มาเปรียบเทียบกับกรคำนวณไว้แต่ตอนต้น จะเห็นได้ว่ารัศมีวงเลี้ยวจริงน้อยกว่าที่คำนวณไว้ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนจากการทดสอบ และความเคลื่อนของข้อมูลที่น่ามาคำนวณ ซึ่งต้องทำทดลองเพื่อให้ได้ค่ามาเช่นกัน ดังนั้นรัศมีวงเลี้ยวของรถขนของไฟฟ้านี้จึงมีความเหมาะสมกับการใช้ในพื้นที่เฉพาะ หรือพื้นที่แคบ ๆ ตามจุดประสงค์ที่ตั้งไว้

4.2.4 ระยะทางและเวลาที่ใช้ในการเบรก

จากผลการทดสอบสรุปได้ว่าระยะทางและเวลาที่ใช้ในการเบรกจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อขับเคลื่อนรถไฟฟ้าด้วยระดับความเร็วมากขึ้นหรือรถไฟฟ้าบรรทุกน้ำหนักมากขึ้น เนื่องจากมีความเฉื่อยเนื่องจากการเคลื่อนที่มากขึ้น

4.2.5 กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ส่งเข้ามอเตอร์

จากผลการทดสอบสรุปได้ว่า

- ระดับความเร็วที่ 1 กำลังไฟฟ้าที่ส่งเข้ามอเตอร์สูงสุดคือ 632.775 W
- ระดับความเร็วที่ 2 กำลังไฟฟ้าที่ส่งเข้ามอเตอร์สูงสุดคือ 679.752 W
- ระดับความเร็วที่ 3 กำลังไฟฟ้าที่ส่งเข้ามอเตอร์สูงสุดคือ 804.102 W

จะเห็นได้ว่ากำลังไฟฟ้าจะมีค่าสูงสุดขณะออกตัว และมีแนวโน้มลดลงเมื่อระยะทางในการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้น แต่ถ้ายับรถน้ำหนักเพิ่มขึ้นแล้วกำลังไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากคุณสมบัติของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงคือกำลังไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับแรงบิดที่เพลาล้อหลังซึ่งจะมากขึ้นเมื่อภาระมากขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลโครงการและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลโครงการ

โครงการนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างรถขนของที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้า ซึ่งสร้างขึ้นเพื่อใช้ในสถานที่ที่ไม่ต้องการมลพิษทางเสียงและอากาศ อาจใช้ในสถานที่เฉพาะหรือสถานที่แถบ ๆ เช่น โรงพยาบาล ห้างสรรพสินค้า โรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น โดยจากการออกแบบและทำการสร้างจึงได้รถขนของไฟฟ้าที่มีขนาดกว้าง 1.04 เมตร ความยาว 2.2 เมตร ความสูง 1.6 เมตร น้ำหนักขณะไม่บรรทุกภาระ 182 กิโลกรัม ระยะห่างระหว่างช่วงล้อหน้ากับล้อหลัง 1.4 เมตร ระยะห่างของช่วงล้อหน้า 0.83 เมตร ระยะห่างช่วงล้อหลัง 0.9 เมตร ระยะต่ำสุดสูงจากพื้น 0.11 เมตร ขนาดขั้วของล้อทั้งสี่คือ 3.6-10.75 และรถขนของไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนี้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 1.5 แรงม้า ขับเคลื่อนด้วยแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์จำนวน 2 ลูก และมีชุดอุปกรณ์ควบคุมความเร็วที่สามารถปรับระดับความเร็วได้ 3 ระดับ

เมื่อนำรถขนของไฟฟ้าที่สร้างขึ้นไปทดสอบ ผลการทดสอบที่ได้มีดังนี้

1. รถขนของไฟฟ้านี้สามารถบรรทุกน้ำหนักได้สูงสุด 200 กิโลกรัม
2. อัตราการสิ้นเปลืองกระแสไฟฟ้าที่ระดับความเร็วต่างๆ สรุปได้ดังนี้
 - ระดับความเร็วที่ 1 ขณะไม่บรรทุกน้ำหนักได้ระยะทางสูงสุด 12.5 กิโลเมตร ด้วยเวลา 5 ชั่วโมง 15 นาที 49.24 วินาที และขณะบรรทุกน้ำหนักเต็มที่ ได้ระยะทางสูงสุด 12.3 กิโลเมตร ด้วยเวลา 4 ชั่วโมง 30 นาที 33.35 วินาที
 - ระดับความเร็วที่ 2 ขณะไม่บรรทุกน้ำหนักได้ระยะทางสูงสุด 16.35 กิโลเมตร ด้วยเวลา 2 ชั่วโมง 34 นาที 59.00 วินาที และขณะบรรทุกน้ำหนักเต็มที่ ได้ระยะทางสูงสุด 8.55 กิโลเมตร ด้วยเวลา 1 ชั่วโมง 26 นาที 45.35 วินาที
 - ระดับความเร็วที่ 3 ขณะไม่บรรทุกน้ำหนักได้ระยะทางสูงสุด 18.00 กิโลเมตร ด้วยเวลา 2 ชั่วโมง 36 นาที 54.48 วินาที และขณะบรรทุกน้ำหนักเต็มที่ ได้ระยะทางสูงสุด 10.35 กิโลเมตร ด้วยเวลา 1 ชั่วโมง 30 นาที 3.74 วินาที
3. ความเร็วสูงสุดของระดับความเร็วที่ 1 จะเกิดขึ้นขณะบรรทุกเต็มที่ภาระ คือ 3.195 km/hr ระดับความเร็วที่ 2 และที่ 3 จะเกิดขึ้นขณะไม่บรรทุกภาระ คือ 7.39 km/hr และ 8.17 km/hr ตามลำดับ

4. รัศมีวงเลี้ยวกว้างสุด โดยเฉลี่ยของขอบยางล้อหน้าด้านนอก 2.83 เมตร
5. ระยะทางและเวลาที่ใช้ในการเบรกจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อขับเคลื่อนรถไฟฟ้าด้วยระดับความเร็วมากขึ้นหรือรถไฟฟ้าบรรทุกน้ำหนักมากขึ้น เนื่องจากมีความเฉื่อยเนื่องจากการเคลื่อนที่มากขึ้น
6. กำลังส่งเข้าสูงสุดที่ระดับความเร็วต่างๆ จะเกิดขึ้นขณะออกตัวของการบรรทุกเต็มภาระ ซึ่งสรุปได้ดังนี้
 - กำลังส่งเข้าสูงสุดที่ระดับความเร็วที่ 1 คือ 632.775 W
 - กำลังส่งเข้าสูงสุดที่ระดับความเร็วที่ 2 คือ 679.752 W
 - กำลังส่งเข้าสูงสุดที่ระดับความเร็วที่ 3 คือ 804.102 W

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรปรับปรุงระบบบังคับเลี้ยวให้ใช้งานได้สะดวกขึ้น
2. ควรปรับปรุงให้รถมีระบบขับเคลื่อนถอยหลังได้
3. ควรปรับปรุงให้รถมีความเร็วเพิ่มขึ้น
4. อาจทำการติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์เพื่อทำการชาร์จไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์แทนที่การชาร์จจากการใช้ไฟฟ้าในบ้าน

บรรณานุกรม

1. ชีระบุทร สุวรรณประทีป. วิศวกรรมยานยนต์. กรุงเทพฯ : บริษัท วิทย์พัฒนา จำกัด. 2542
2. เพลี้ย แสนเกษม. กลศาสตร์ยานยนต์. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด. 2536
3. บัญชา คังตระกูล, และคณะ. กลศาสตร์ยานยนต์. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด. 2532
4. ศ.ดร. วรวิทย์ อึ้งภากรณ์. การออกแบบเครื่องจักรกลเล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพฯ : บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด. 2537.
5. ศ.ดร. วรวิทย์ อึ้งภากรณ์. การออกแบบเครื่องจักรกลเล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพฯ : บริษัท ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด. 2537.
6. ชัยสวัสดิ์ เทียนวิบูลย์. กลศาสตร์ยานยนต์. นนทบุรี : วิทยาลัยเทคโนโลยีและอาชีวศึกษา วิทยาเขตเทคนิคนนทบุรี. 2528.
7. มนัส อนุศิริ. การออกแบบโครงสร้างไม้และเหล็ก. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด. 2539
8. รศ. มนตรี พิรุณเกษตร. กลศาสตร์ของวัสดุ ฉบับเตรียมสอบและเสริมประสบการณ์. กรุงเทพฯ : วิทย์พัฒนา. 2540
9. รศ.บรรเลง ศรีนิล, ผู้ร่วมแปล. ตารางงานโลหะ. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
10. สมบัติ แสงจันทร์, อากม มุตสา. รถพลังงานไฟฟ้า. มหาวิทยาลัยนเรศวร วิทยาเขตภาคเหนือ(พิษณุโลก). 2530
11. รศ.ดร.จักรวิศน์ กนกกันตพงษ์. รวมศัพท์วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดดูเคชั่น จำกัด. 2536
12. www.evthai.co.th

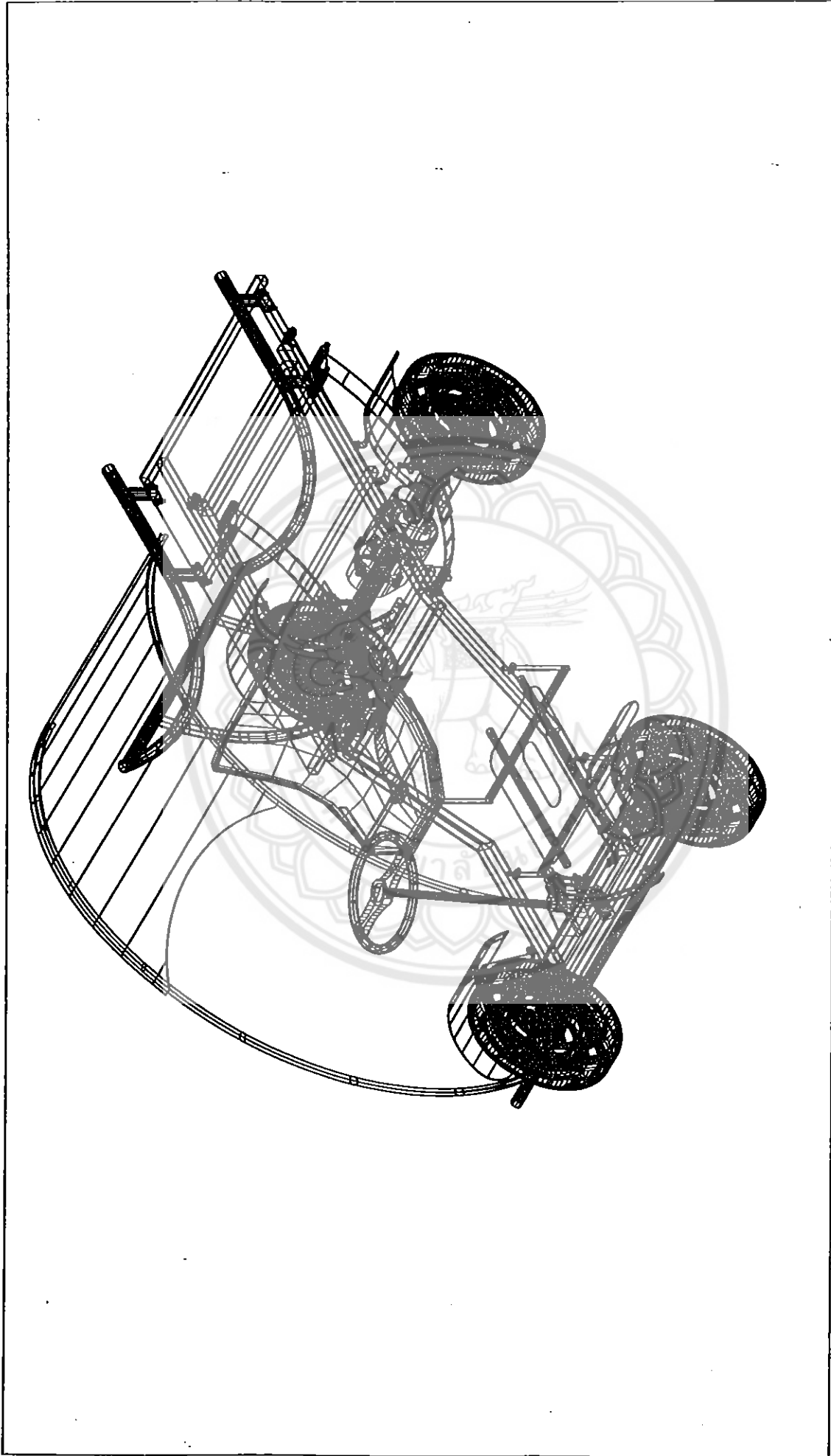




ภาคผนวก ก.

แบบ (Drawing) ของรถขนของไฟฟ้า

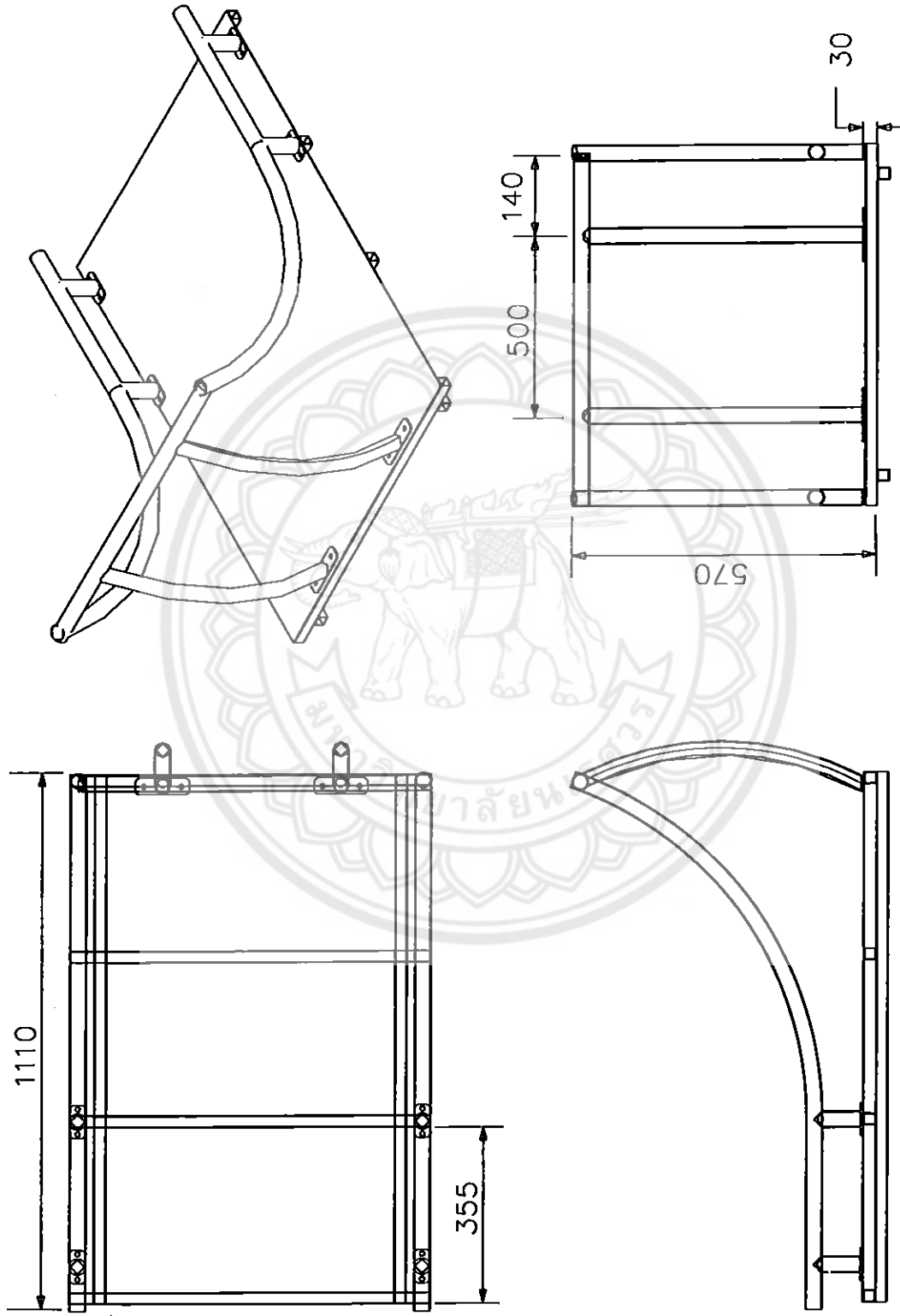
มหาวิทยาลัยนเรศวร



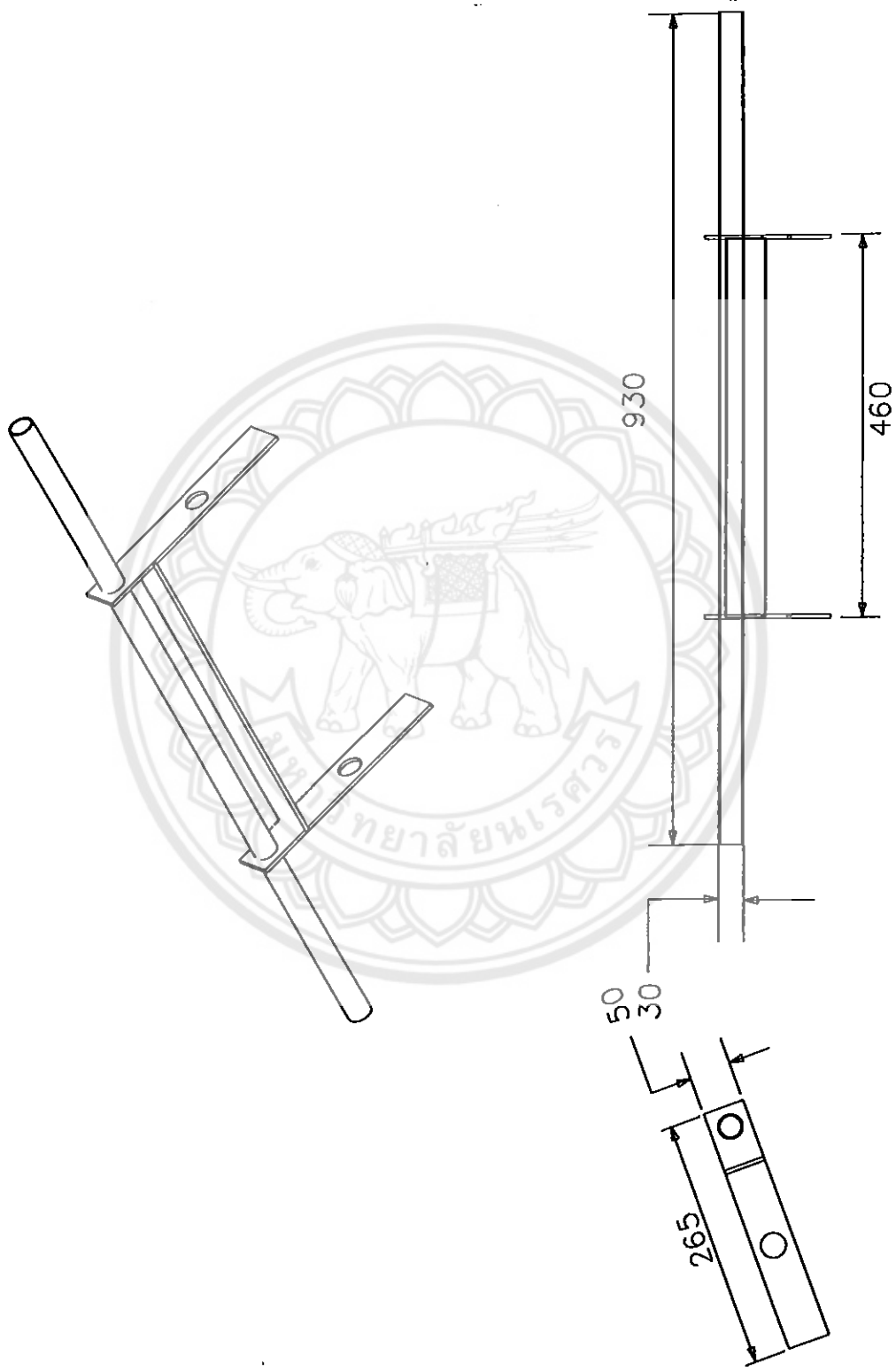
Faculty of Engineering	Electric Conveyor Car	Date 04/04/02	Mechanical Project
Naresuan University		Scale	Plate 1/20

Part List			
Item	Qty	Name	Material
1	1	Conveyer	Plate steel
2	1	Fender	Tube carbon steel
3	2	Front beam	Chanel carbon steel
4	1	Diferential housing	
5	2	Rear axle housing	
6	1	Motor	
7	2	Semi-floating rear axle	
8	1	Steering box	
9	4	Balljoint	
10	2	tie rod	
11	3	Leaf spring	
12	1	Chassis	Rectangular steel
13	1	Battery supportor	
14	1	Armor	
15	2	Steering head	
16	2	Rear wheelhub	
17	2	Front wheelhub	
18	4	Wheel	Wheel of scooter
19	1	Top armor	
20	1	Seat	Plastic

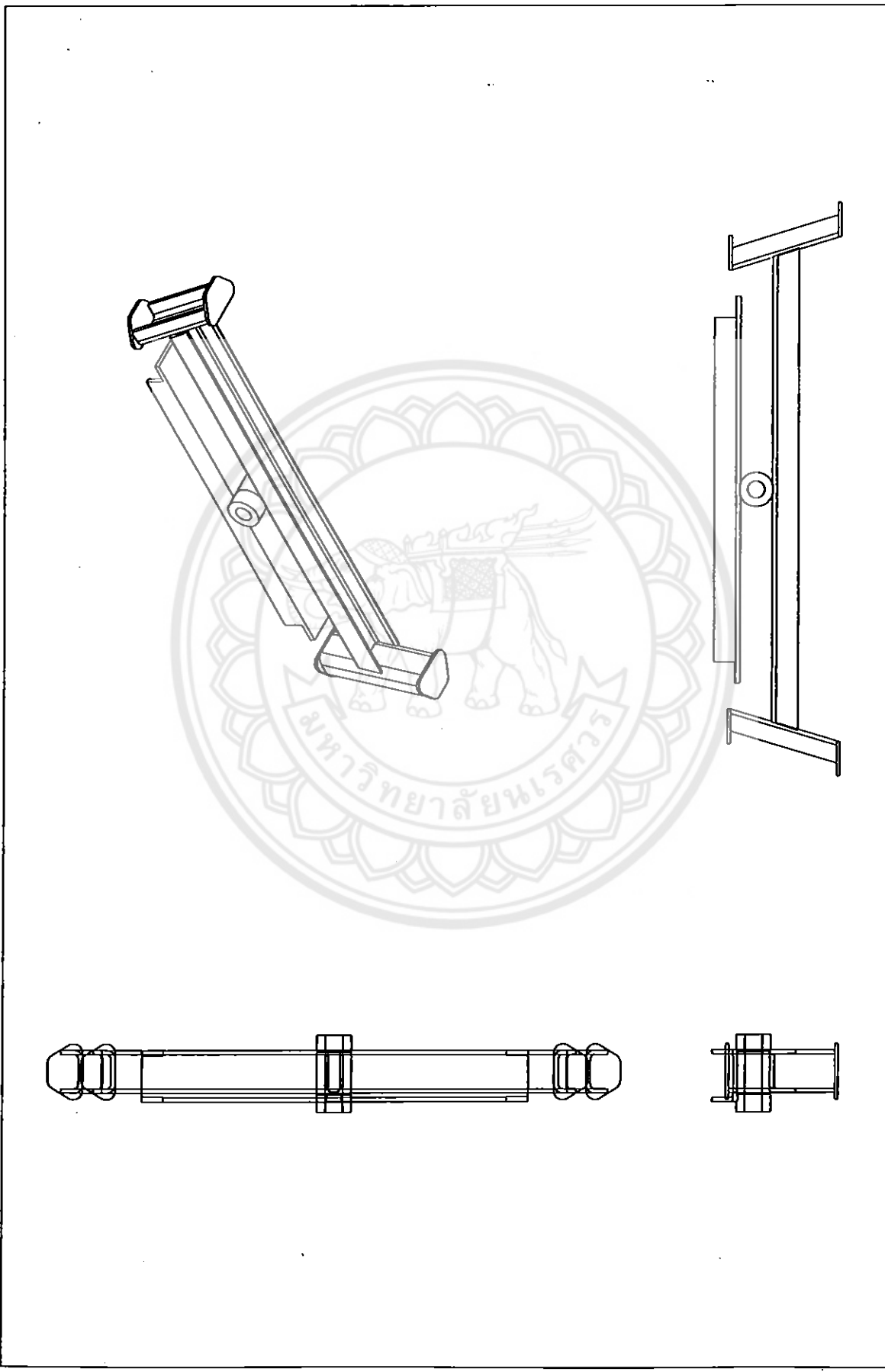
Faculty of Engineering	Part List	Date 04/04/02	MechanicalProject
Naresuan University		Scale	Plate 2/20



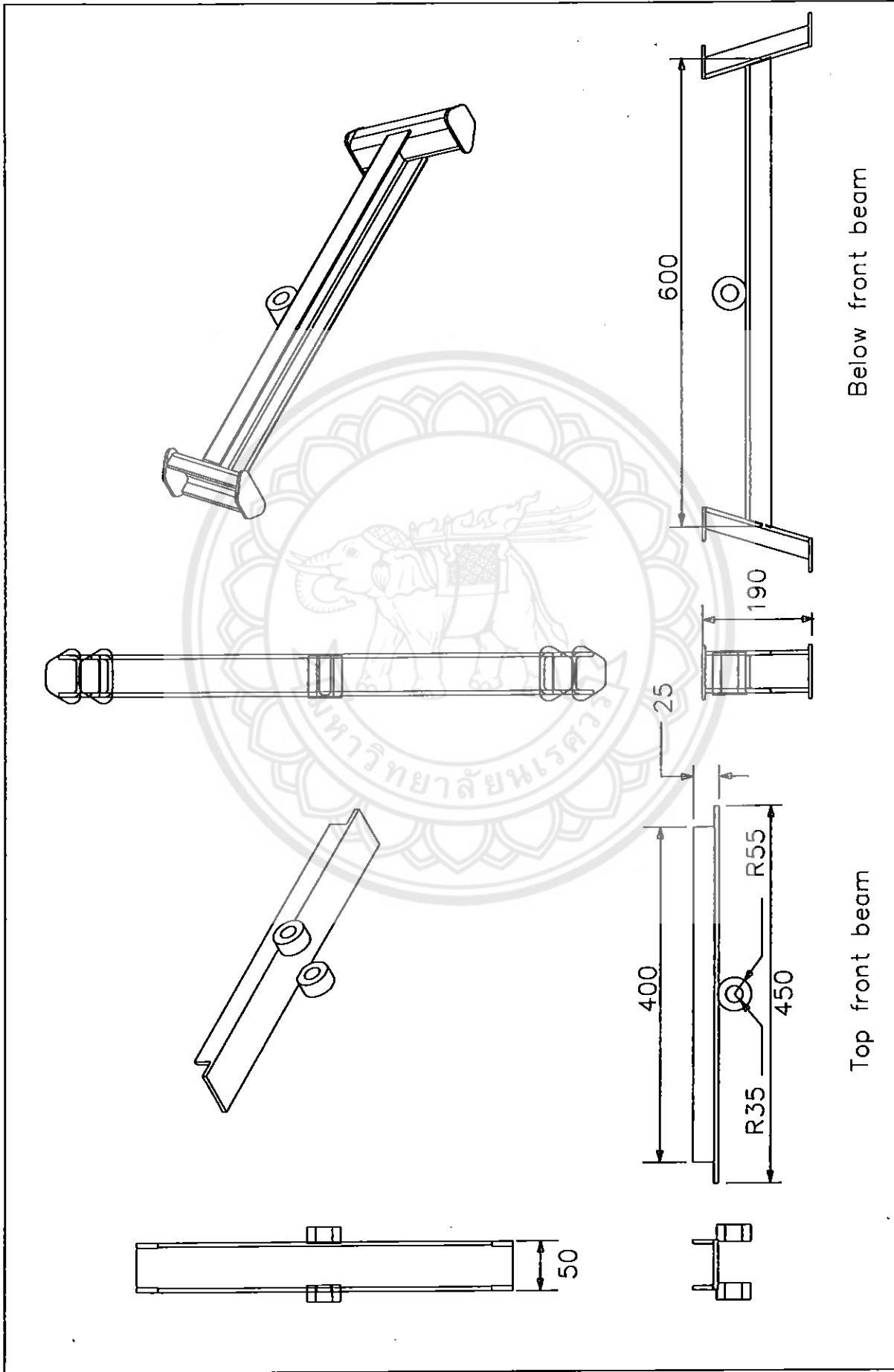
Faculty of Engineering	Conveyer	Date 04/04/02	Mechanical Project
Naresuan University	All dimensions are in millimetres.	Scale 1:1	Plate 3/20



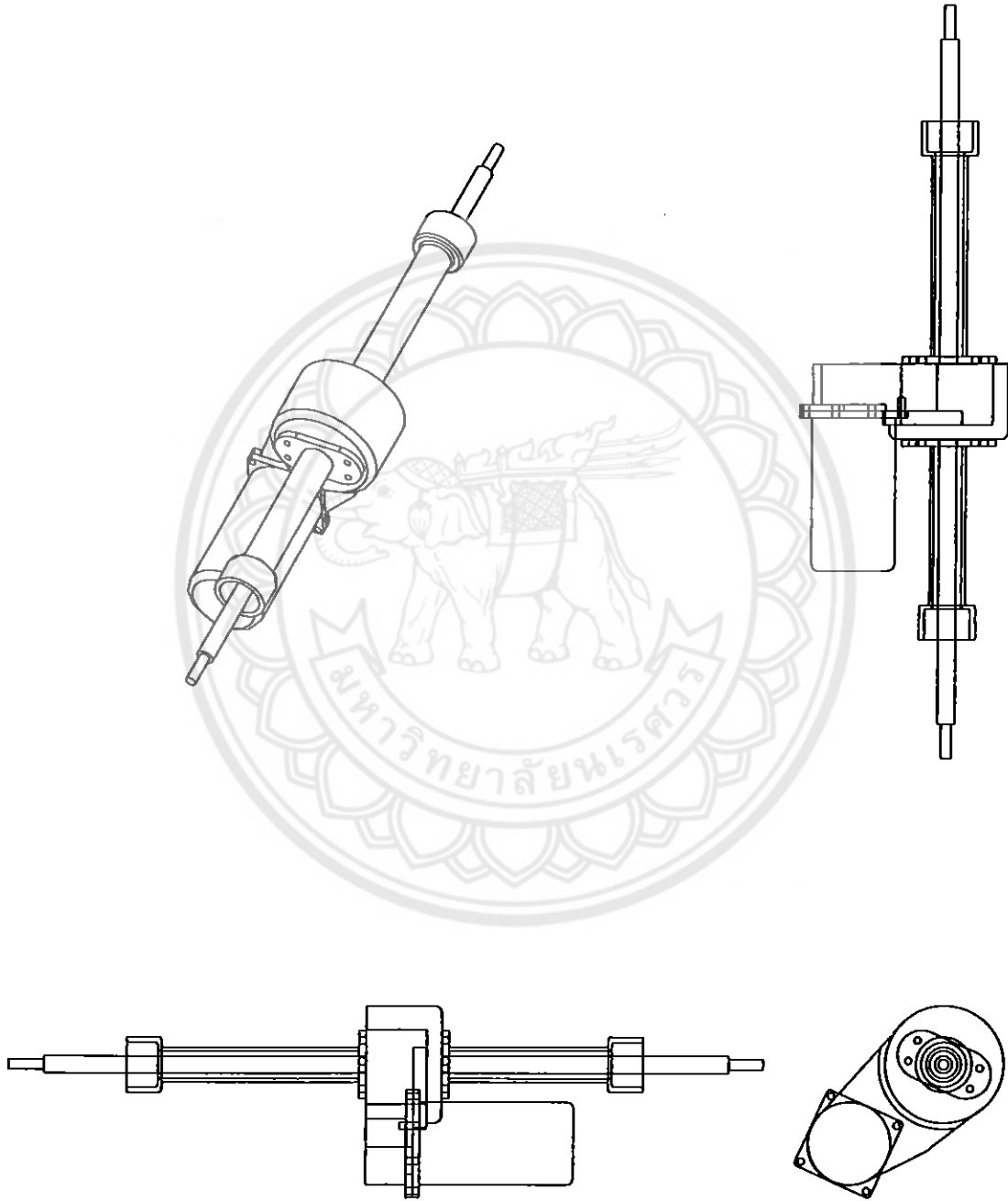
Faculty of Engineering	Fender	Date 04/04/02	Mechanical Project
Naresuan University	All dimensions are in millimetres.	Scale 1:1	Plate 4/20



Faculty of Engineering	Front beam system	Date 04/04/02	Mechanical Project
Naresuan University		Scale	Plate 5/20



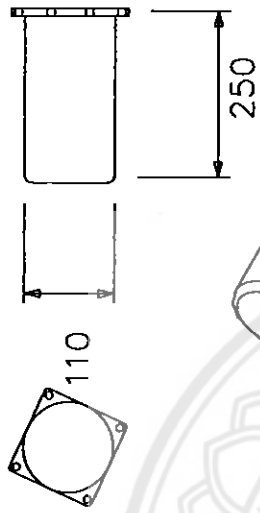
Faculty of Engineering	Front beam	Date 04/04/02	MechanicalProject
Naresuan University	All dimensions are in millimetres.	Scale 1:1	Plate 6/20



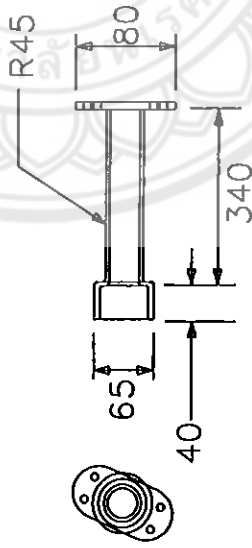
Faculty of Engineering	Transmission system	Date 04/04/02	Mechanical Project
Naresuan University		Scale	Plate 7/20



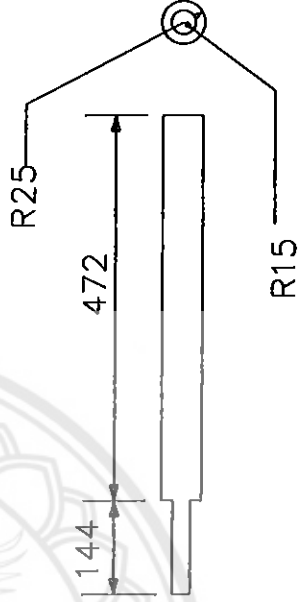
Differential housing



Motor



Rear axle housing



Semi-floating rear axle

Faculty of Engineering

Transmission system

Date 04/04/02

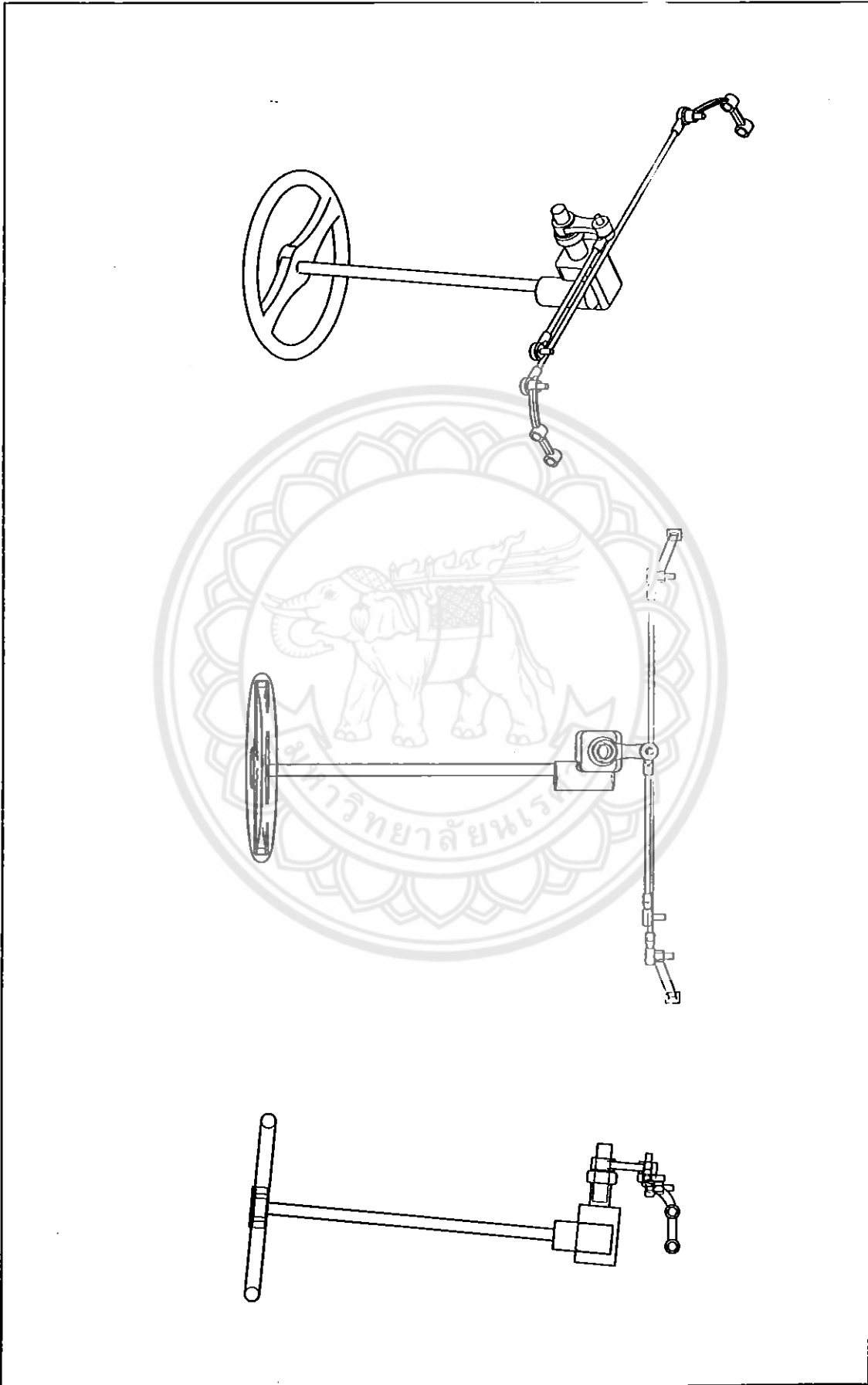
Mechanical Project

Naresuan University

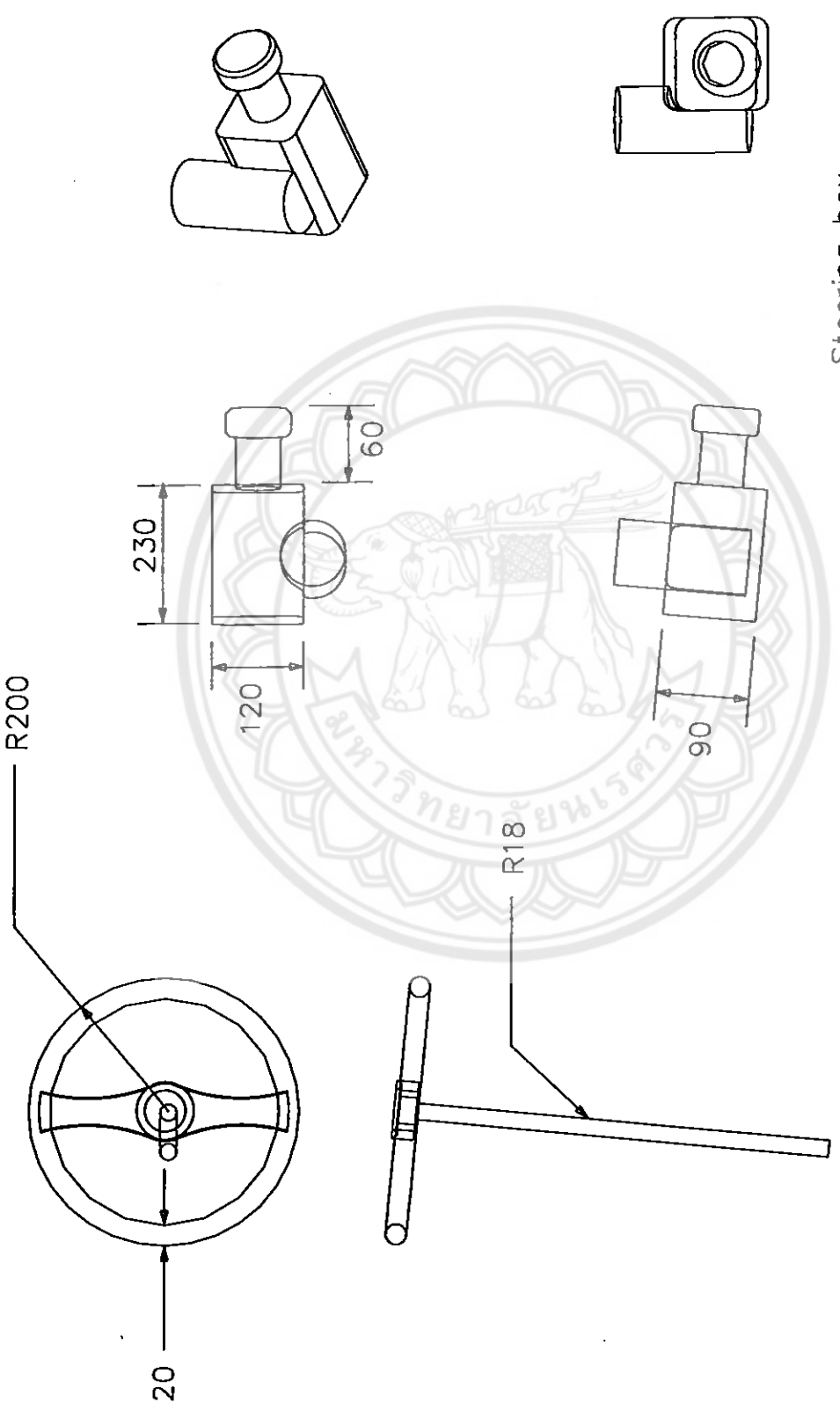
All dimensions are in millimetres.

Scale 1:1

Plate 8/20



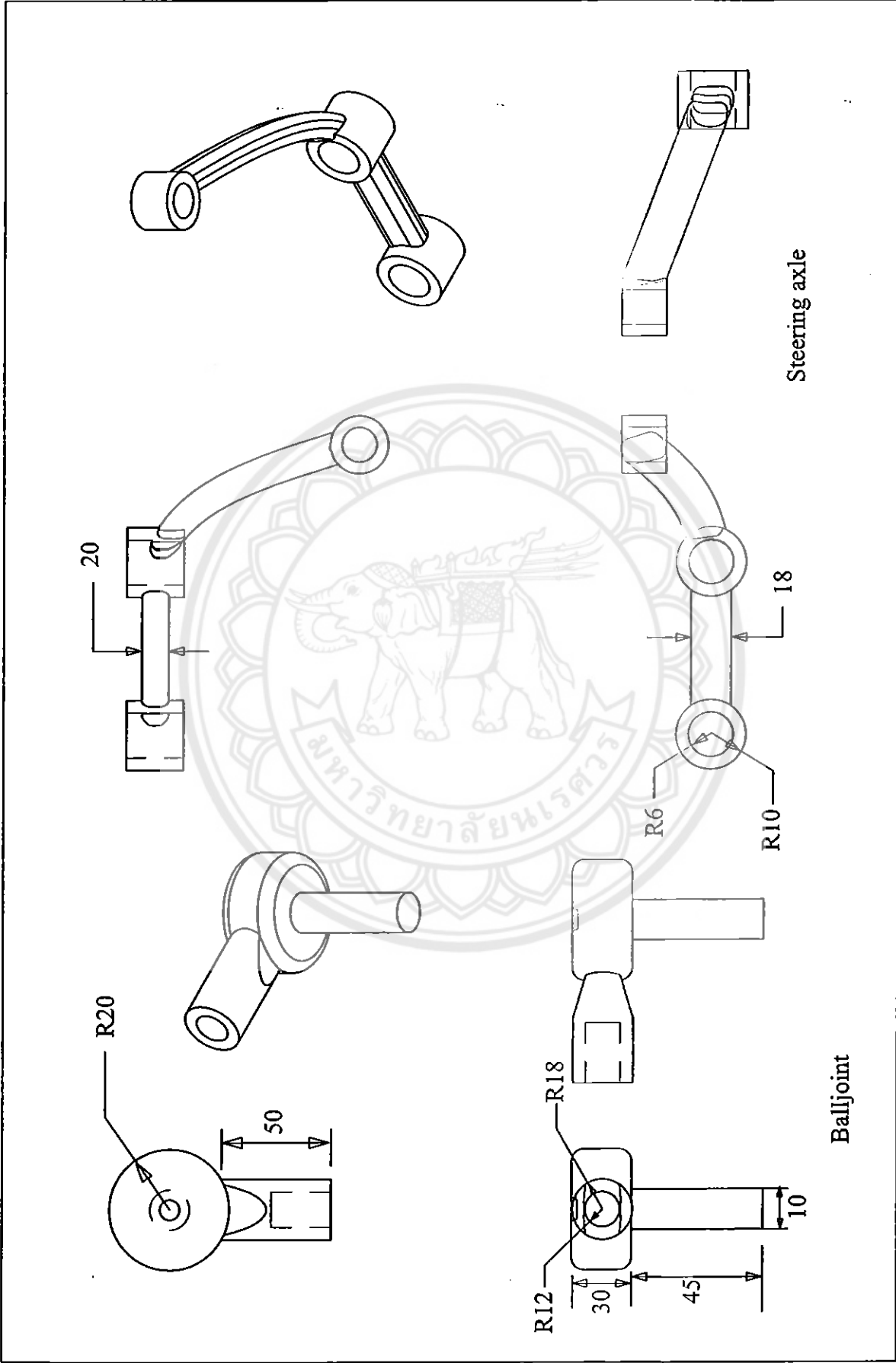
Faculty of Engineering	Steering system	Date 04/04/02	Mechanical Project
Naresuan University		Scale	Plate 9/20



Steering box

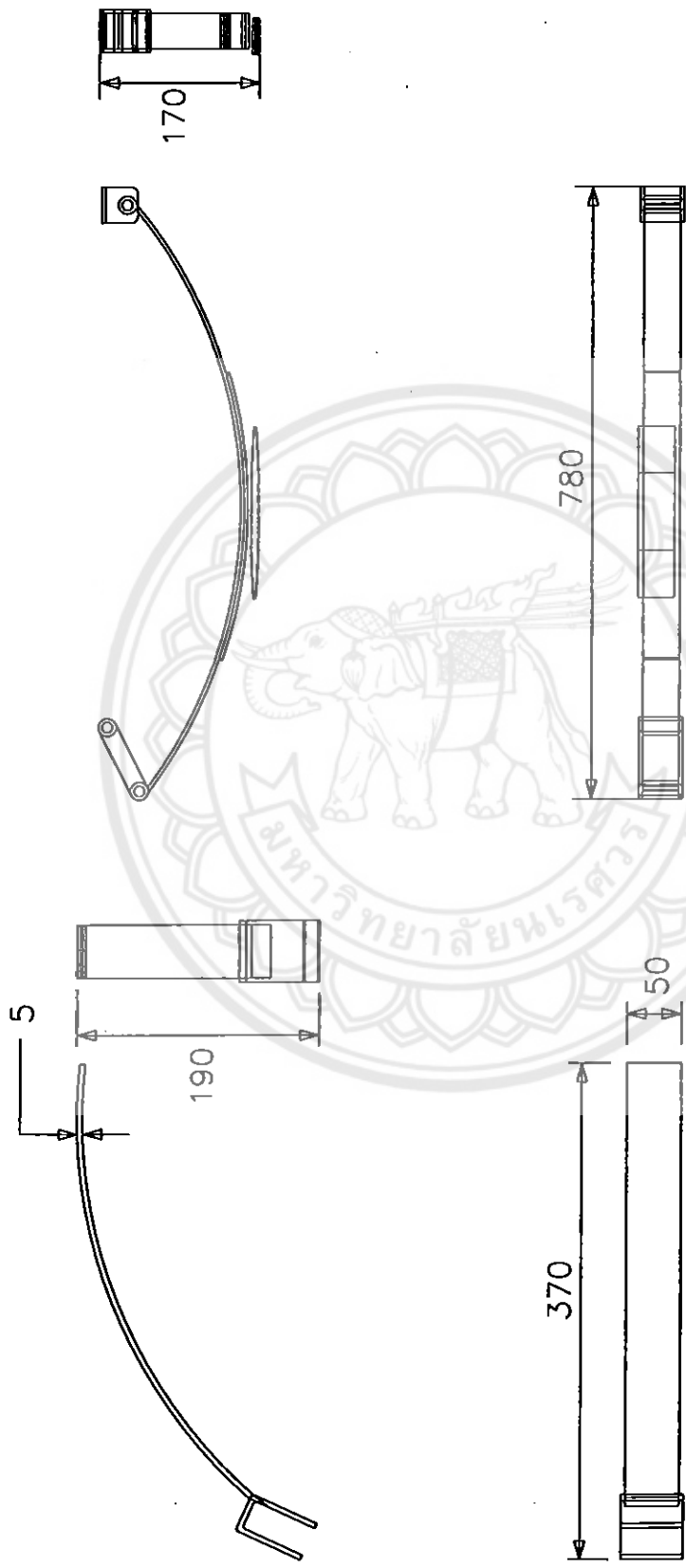
Steering shaft and steering handling

Faculty of Engineering	Steering system	Date 04/04/02	Mechanical Project
Naresuan University	All dimensions are in millimetres.	Scale 1:1	Plate 10/20



Faculty of Engineering	Steering system	Date 04/04/02	Mechanical Project
------------------------	-----------------	---------------	--------------------

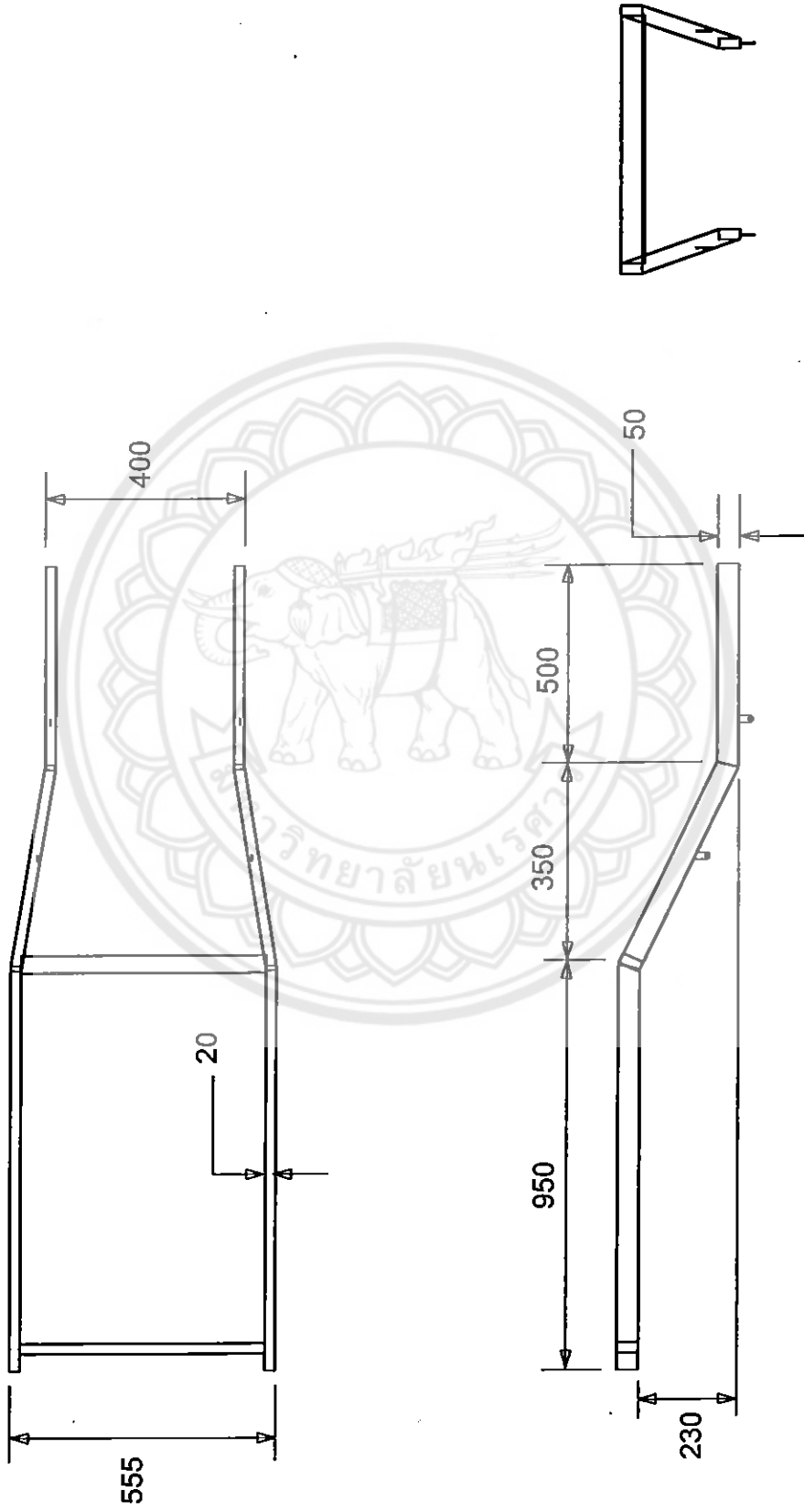
Naresuan University	All dimensions are in millimetres.	Scale 1:1	Plate 11/20
---------------------	------------------------------------	-----------	-------------



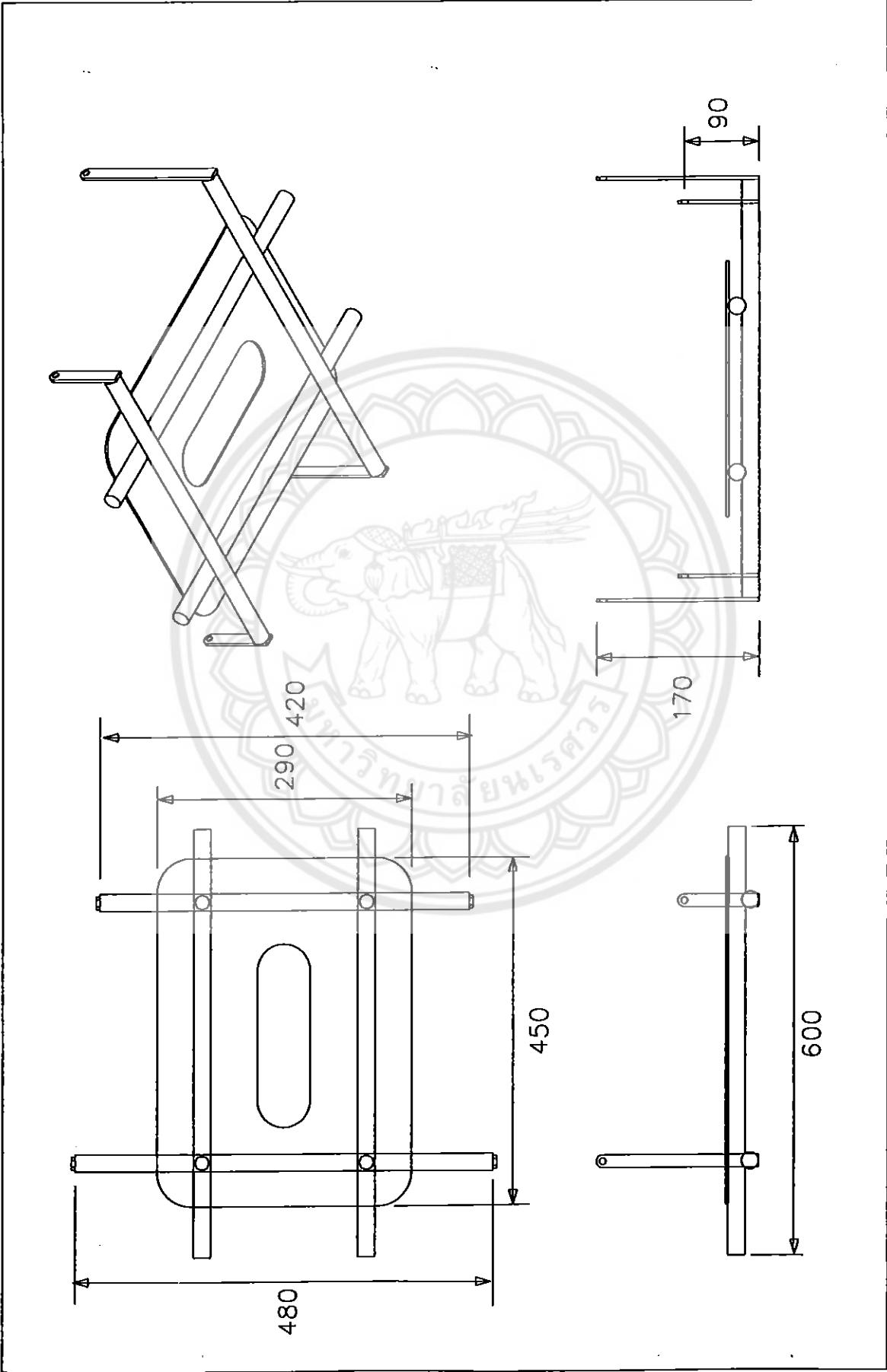
Leaf spring of seat

Leaf spring from load

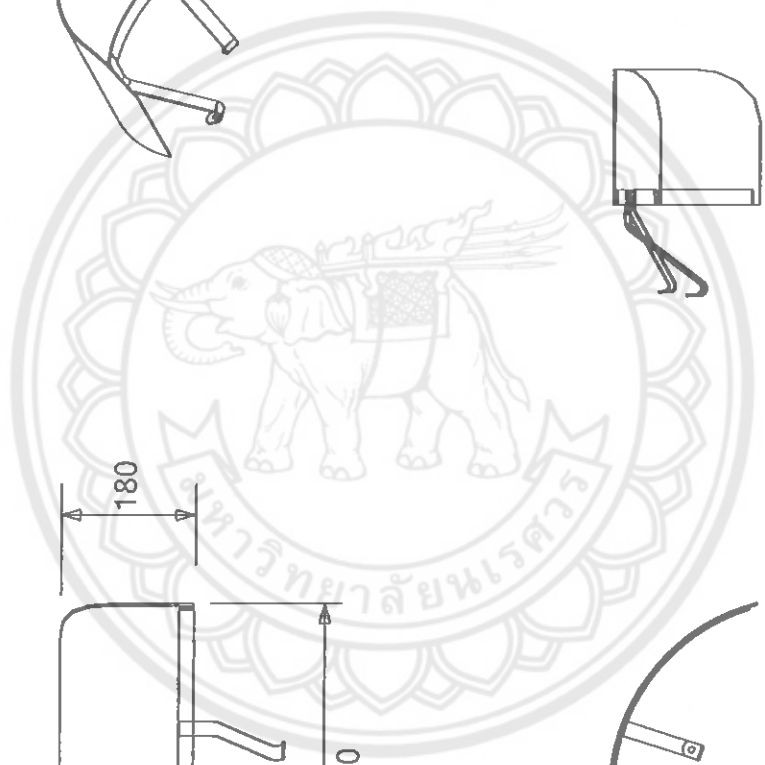
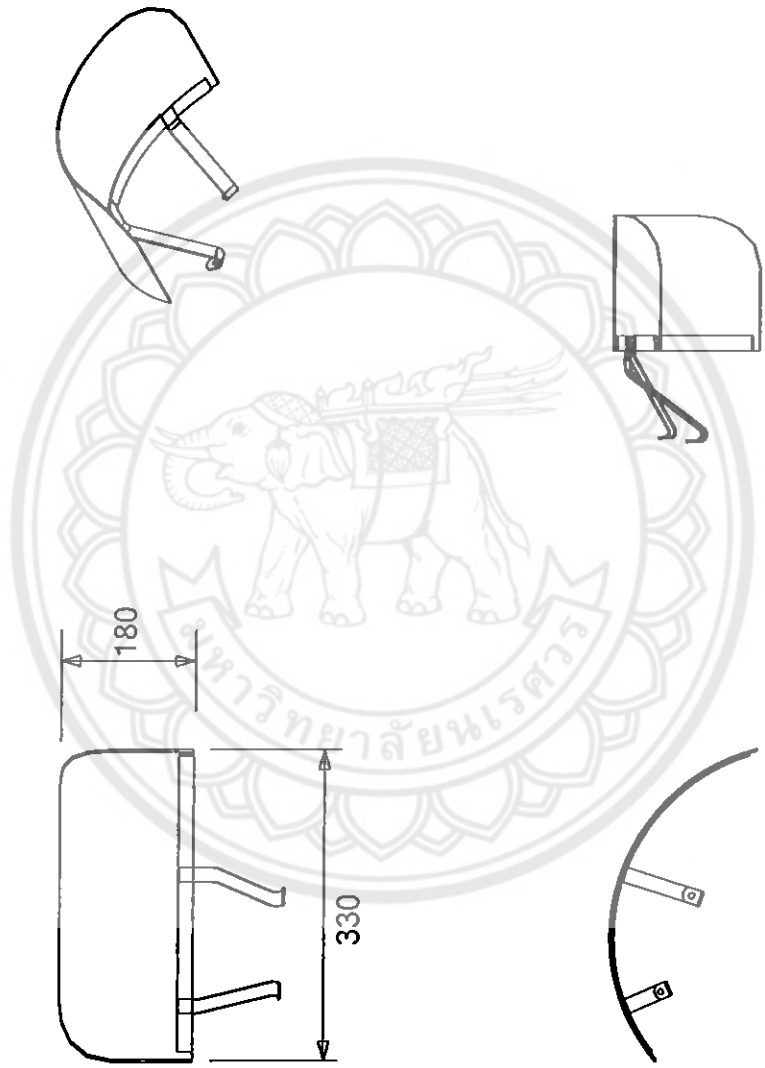
Faculty of Engineering	Leaf spring	Date 04/04/02	Mechanical Project
Naresuan University	All dimensions are in millimetres.	Scale 1:1	Plate 12/20



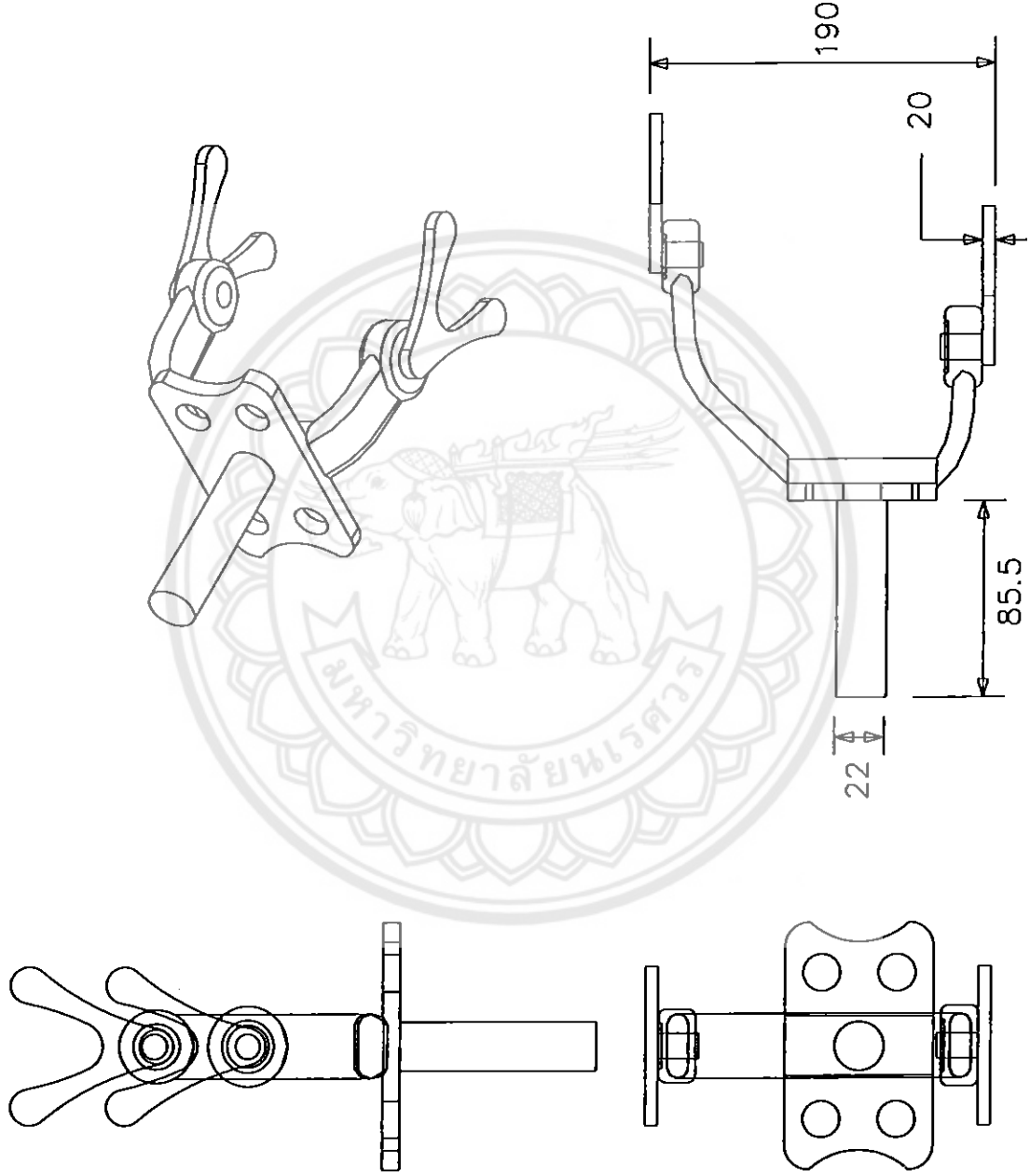
Faculty of Engineering	Chassis	Date 04/04/02	Mechanical Project
Naresuan University	All dimensions are in millimetres.	Scale 1:1	Plate 13/20



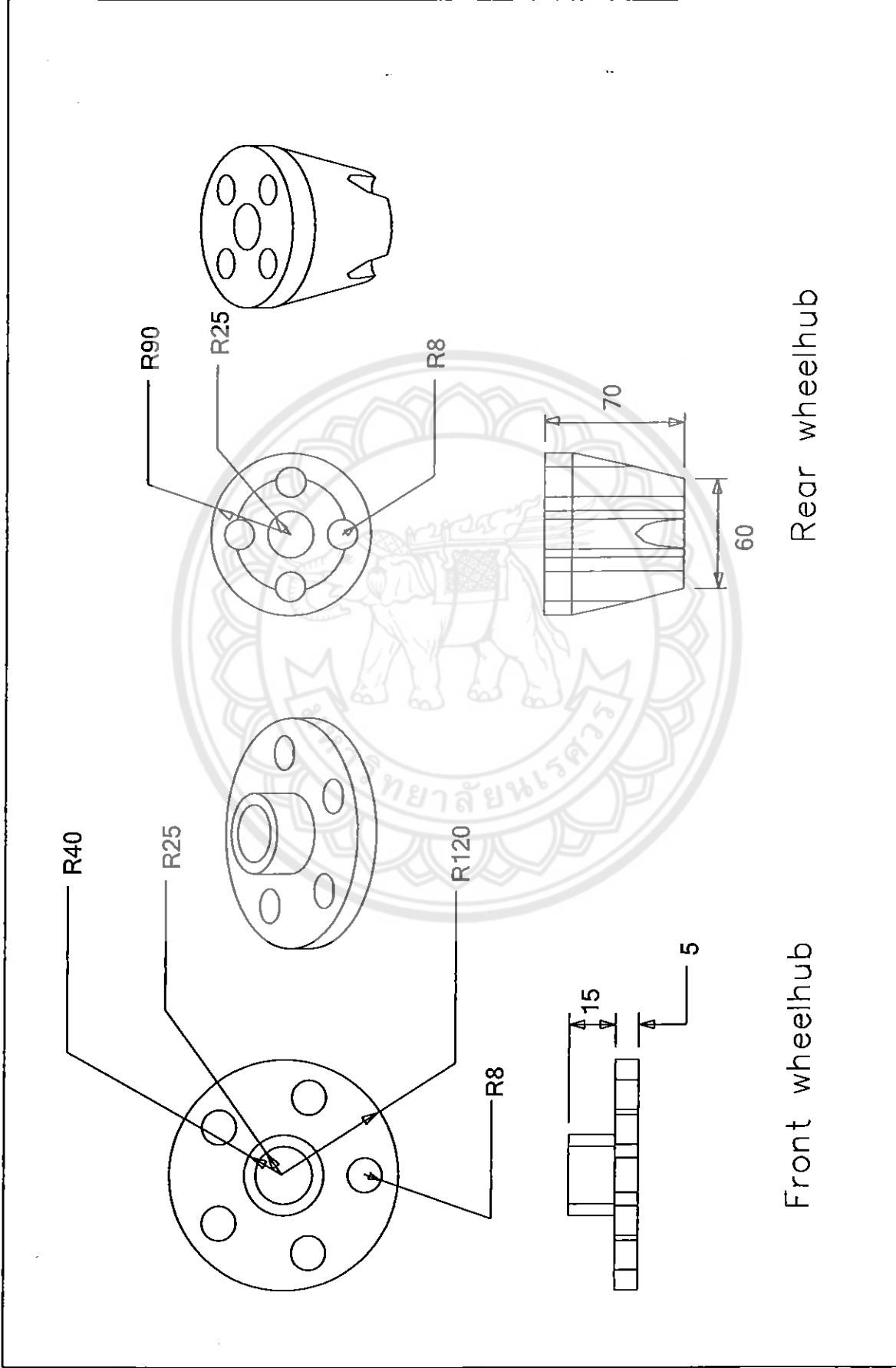
Faculty of Engineering	Battery support	Date 04/04/02	Mechanical Project
Naresuan University	All dimensions are in millimetres.	Scale 1:1	Plate 14/20



Faculty of Engineering	Armor	Date 04/04/02	Mechanical Project
Naresuan University	All dimensions are in millimetres.	Scale 1:1	Plate 15/20



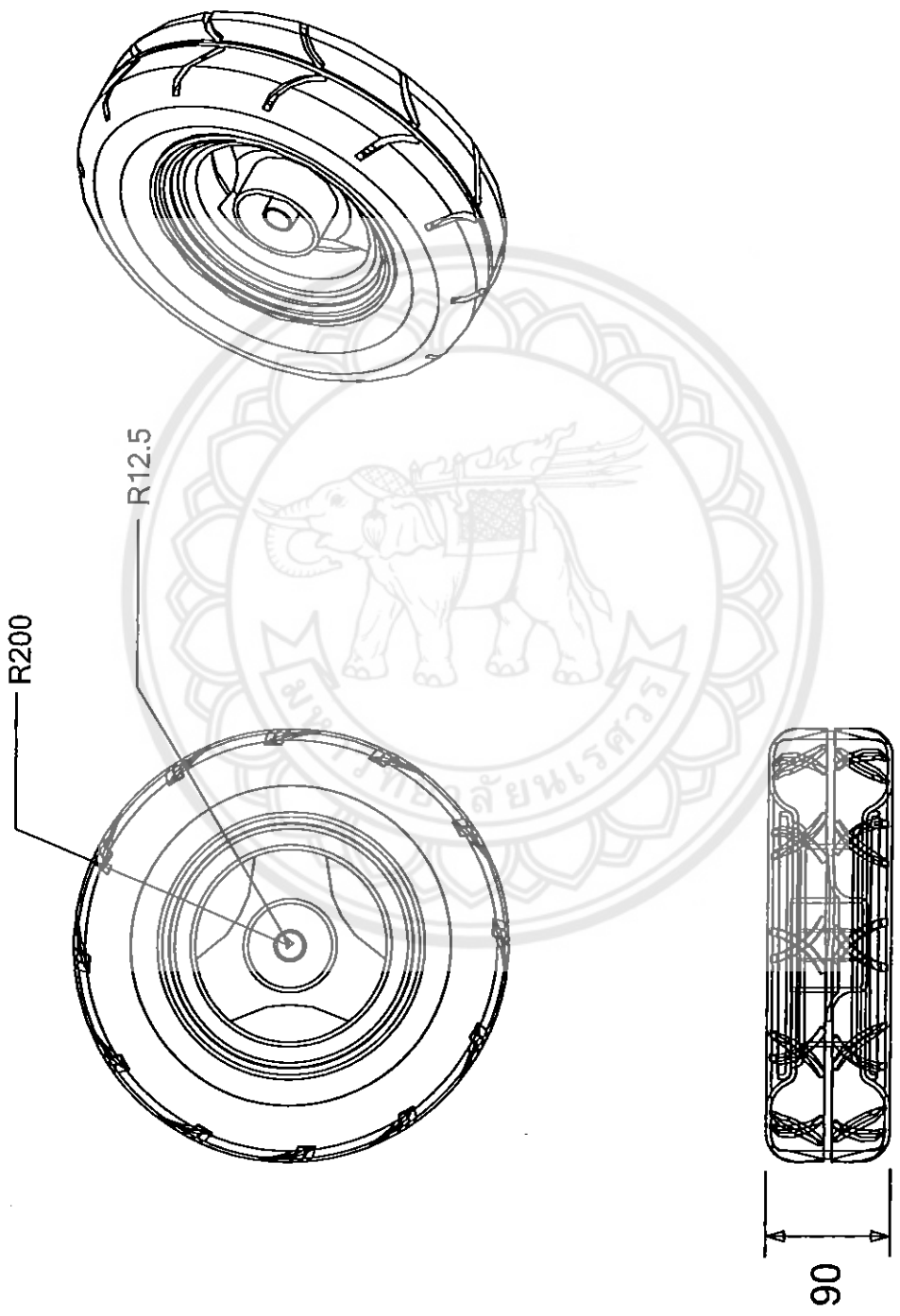
Faculty of Engineering	Steering head and A-arm	Date 04/04/02	Mechanical Project
Naresuan University	All dimensions are in millimetres.	Scale 1:1	Plate 16/20



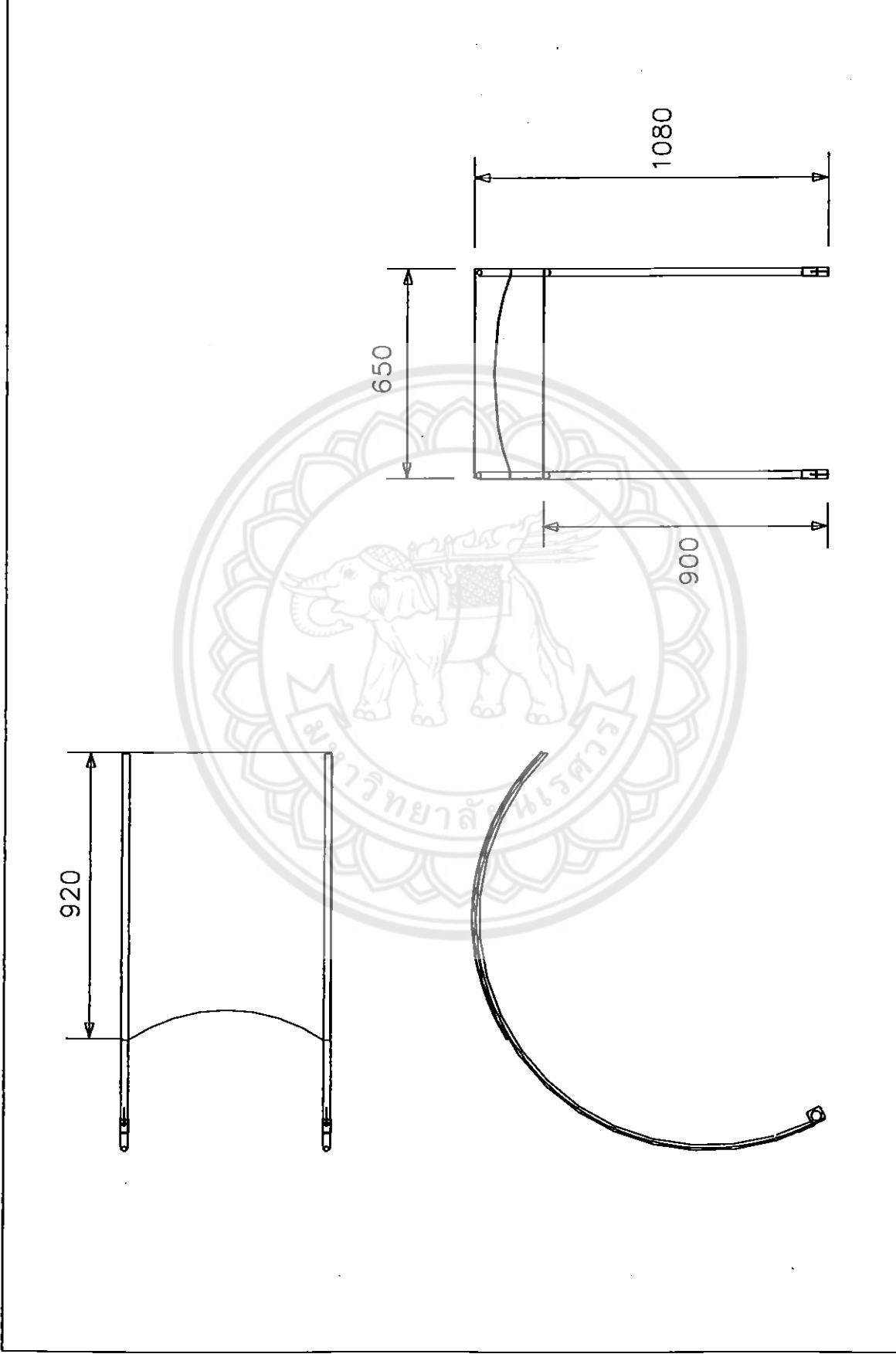
Front wheelhub

Rear wheelhub

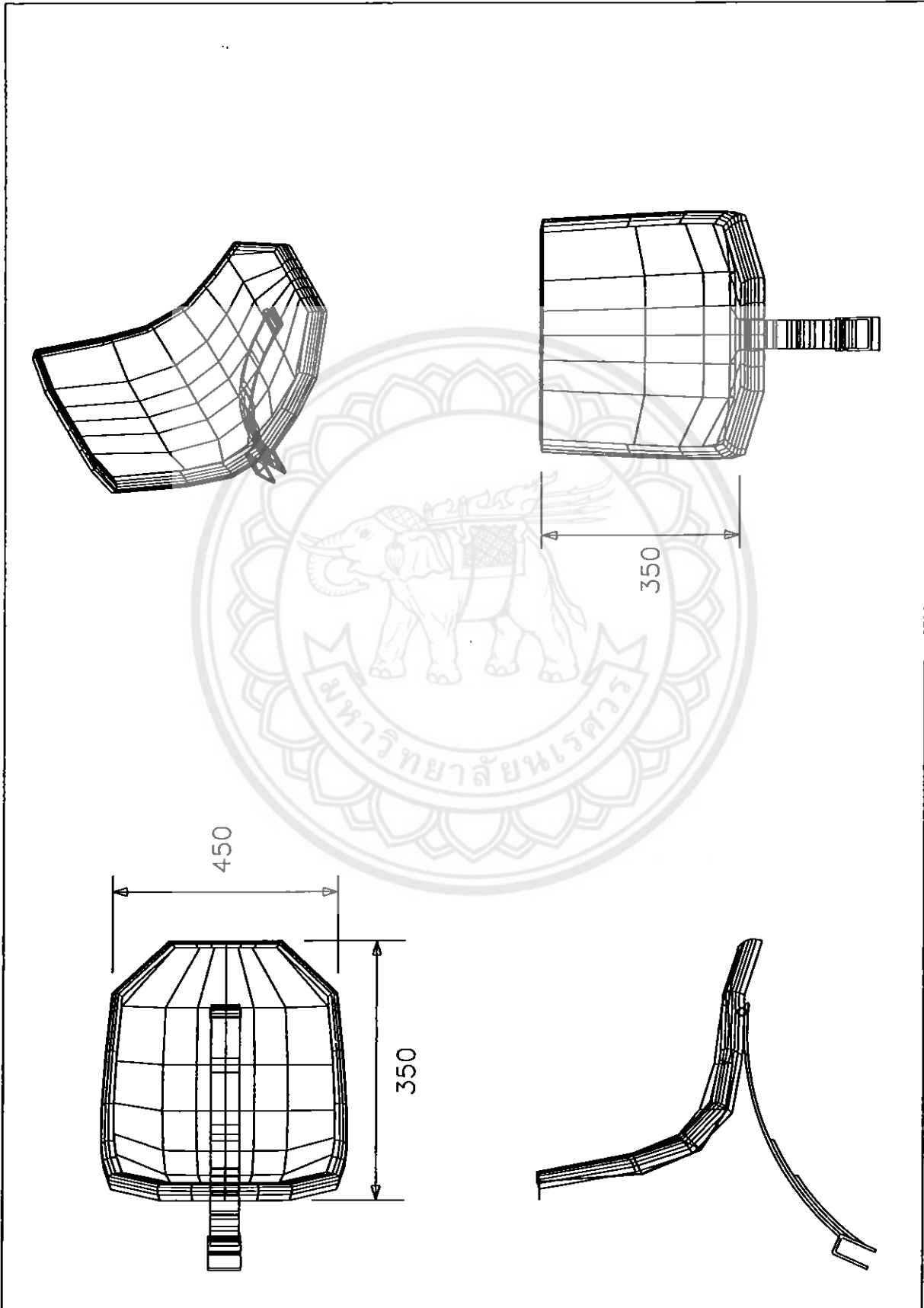
Faculty of Engineering	Wheelhub	Date 04/04/02	Mechanical Project
Naresuan University	All dimensions are in millimetres.	Scale 1:1	Plate 17/20



Faculty of Engineering	Wheel	Date 04/04/02	Mechanical Project
Naresuan University	All dimensions are in millimetres.	Scale 1:1	Plate 18/20.



Faculty of Engineering	Top armor	Date 04/04/02	Mechanical Project
Naresuan University	All dimensions are in millimetres.	Scale 1:1	Plate 19/20



Faculty of Engineering	seat	Date 04/04/02	Mechanical Project
Naresuan University	All dimensions are in millimetres.	Scale 1:1	Plate 20/20



ภาคผนวก ข.

ตารางอ้างอิง

ตารางที่ ข.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานการหมุนของล้อรถยนต์
(ที่มา หนังสือกลศาสตร์ยานยนต์, เผล็จ แสนเกษม)

สภาพของถนน	ค่าสัมประสิทธิ์ (k_r)
สภาพดี	0.010 - 0.016
ถนนเป็นกรวด	0.015 - 0.020
ถนนมีไม้อัดกันเรียบ	0.020 - 0.030
ถนนเป็นหิน	0.016 - 0.070
ถนนเป็นทราย	0.150 - 0.300

ตารางที่ ข.2 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านทานของลม
(ที่มา หนังสือกลศาสตร์ยานยนต์, เผล็จ แสนเกษม)

ลักษณะของรถยนต์	k_d	A (m ²)
รถแข่ง	0.13-0.15	1.0-1.3
รถยนต์นั่ง	0.20-0.35	1.6-2.8
รถตู้	0.25-0.40	4.5-6.5
รถบรรทุก	0.60-0.70	3.0-5.0

ตารางที่ ข.3 แสดงประสิทธิภาพการถ่ายเทกำลังโดยแบ่งตามประเภทของรถยนต์
(ที่มา หนังสือวิศวกรรมยานยนต์,ธีระบุท สุวรรณประทีป)

ประเภทของรถยนต์	ประสิทธิภาพ,η, %
รถแข่ง	90-95
รถยนต์นั่ง	90-92
รถยนต์บรรทุก รถยนต์โดยสาร	82-85
รถยนต์สำหรับพื้นที่ทุรกันดาร (off-road car)	80-85

ตารางที่ ข.4 ตัวประกอบของการกระแทก
(ที่มา หนังสือการออกแบบเครื่องจักรกล,วริทธิ์ อึ้งภากรณ์)

ชนิดของแรง	N _s		ตัวอย่าง
	บอลเบริง	โรลเลอร์เบริง	
แรงเรียบสม่ำเสมอ	1.0	1.0	มอเตอร์ไฟฟ้า เครื่องอัดอากาศ
แรงกระแทกเล็กน้อย	1.5	1.0	เครื่องตัดโลหะ ปั้นขึ้น
แรงกระแทกอย่างหนัก	2.0-3.0	1.3-2.0	เครื่องบดแร่ เครื่องเขย่า

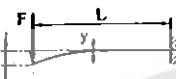

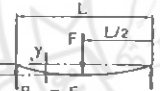
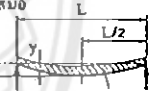
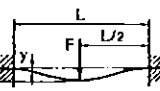
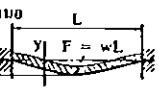
ตารางที่ ข.6 แนวทางในการเลือกอายุใช้งานสำหรับเครื่องจักรกลชนิดต่างๆ
(ที่มา หนังสือการออกแบบเครื่องจักรกล, วนิษฐ์ อึ้งภากรณ์)

ชนิดของเครื่องจักรกล	อายุเป็นชั่วโมงทำงาน
เครื่องมือวัดและเครื่องมือที่ใช้ไม่บ่อยนัก ตัวอย่างเช่น เครื่องมือสำหรับห้องทดลอง อุปกรณ์สำหรับประตูลื่น	500
เครื่องยนต์ เครื่องบิน	500-2,500
เครื่องจักรสำหรับใช้งานช่วงเวลานั้น ๆ หรือทำงานเป็นพัก ๆ ตัวอย่างเช่น เครื่องมือต่าง ๆ รอกยกของในโรงงาน เครื่องจักรที่ทำงานโดยใช้มือจับ เครื่องจักรกล เมาเตอร์ ปั่นจั่นที่ใช้ในงานประกอบ เครื่องขนถ่าย ปั่นจั่นที่ใช้ในงานหล่อ เครื่องจักรกลที่ใช้ในบ้าน	4000-8000
เครื่องจักรสำหรับใช้งาน เป็นพัก ๆ แต่มีความสำคัญต่องานที่ทำมาก ตัวอย่างเช่น เครื่องจักรสำรองของโรงเดินกำลัง อุปกรณ์ลำเลียงในสายงานผลิต ลิฟท์ ปั่นจั่นยกสินค้าทั่วไป เครื่องมือกลที่ใช้ไม่บ่อยนัก	8000-12 000
เครื่องจักรที่ใช้งาน 8 ชั่วโมง แต่ไม่ได้ทำงานเต็มที่ ตัวอย่างเช่น มอเตอร์ไฟฟ้า ชุดเฟืองทดสำหรับงานทั่วไป	12 000-20 000
เครื่องจักรที่ใช้งาน 8 ชั่วโมง แต่ทำงานเต็มที่ ตัวอย่างเช่น เครื่องจักรกลในงานอุตสาหกรรมทั่วไป ปั่นจั่นที่ใช้ยกของตลอดเวลา เครื่องเป่าลม เพล่าส่งกำลัง	20 000-30 000
เครื่องจักรที่ใช้งานต่อเนื่อง (ทำงาน 24 ชั่วโมง) ตัวอย่างเช่น เครื่องแยกของ เครื่องอัดอากาศ ปั๊ม เพล่าส่งกำลัง ลูกกลิ้งของสายพานลำเลียง รอกในเหมืองแร่ มอเตอร์ไฟฟ้า	40 000-60 000
เครื่องจักรที่ใช้งานตลอด ชั่วโมง ละหารทำงานมีความสำคัญมาก ตัวอย่างเช่น เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตกระดาษและเยื่อกระดาษ โรงไฟฟ้า ปั๊มในเหมืองแร่ สถานีส่งน้ำประปา เครื่องจักรในเรือเดินสมุทร	100 000-200 000

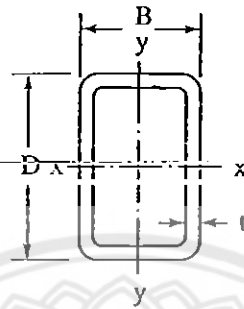
ตารางที่ ข.7 โมเมนต์และระยะโค้งของคาน

(ที่มา หนังสือการออกแบบเครื่องจักรกล, วริทธิ์ อึ้งภากรณ์)

- F คือแรงกระทำ
- w คือแรงกระทำต่อหน่วยความยาว
- F = wL ; L คือความยาว
- E คือโมดูลัสความยืดหยุ่น
- I คือโมเมนต์ความเฉื่อย
- y คือระยะโค้ง
- θ rad คือความลาด

<p>$y_{max} = -\frac{FL^3}{3EI}$</p>  <p>แรงเฉือน</p> <p>โมเมนต์</p> <p>โมเมนต์ค้ำยัน $M_x = Fx$</p> <p>$x = 0 : \theta = \frac{FL^2}{2EI}$</p> <p>$x = L : M_{max} = -FL$</p> <p>$y = -\frac{F}{6EI} (x^3 - 3L^2x + 2L^2)$</p>	<p>แรงกระทำสม่ำเสมอ</p> <p>$y_{max} = -\frac{wL^4}{8EI}$</p>  <p>$V_x = -wx$ แรงเฉือน</p> <p>$M_x = -\frac{wx^2}{2}$ พหุคูณกำลังสอง</p> <p>$x = L : M_{max} = -\frac{FL}{2} = -\frac{wL^2}{2} \cdot x = 0 : \theta = \frac{wL^3}{6EI}$</p> <p>$y = -\frac{w}{24EI} (x^4 - 4L^3x + 3L^4)$</p>
<p>$y_{max} = -\frac{FL^3}{48EI}$</p>  <p>To $x = \frac{L}{2}$, $V_x = \frac{F}{2}$</p> <p>$M_x = \frac{Fx}{2}$</p> <p>$x = 0 : \theta = -\frac{FL^3}{16EI}$</p> <p>$x = \frac{L}{2} : M_{max} = \frac{FL}{4}$</p> <p>To $x = \frac{L}{2}$, $y = -\frac{F}{48EI} (3L^2x - 4x^3)$</p>	<p>แรงกระทำสม่ำเสมอ</p> <p>$y_{max} = -\frac{5FL^3}{384EI}$</p>  <p>$R_1 = wL/2$, $F = wL$, $R_2 = wL/2$</p> <p>$V_x = \frac{w}{2}(L-2x)$</p> <p>$M_x = \frac{w}{2}(Lx-x^2)$</p> <p>$x = \frac{L}{2} : M_{max} = \frac{FL}{8} = \frac{wL^2}{8}$</p> <p>$x = 0 : \theta = -\frac{wL^3}{24EI}$</p> <p>$y = -\frac{wx}{24EI} (L^3 - 2Lx^2 + x^3)$</p>
<p>ปลายยึดแน่น</p> <p>$y_{max} = -\frac{FL^3}{192EI}$</p>  <p>To $x = \frac{L}{2}$, $V_x = \frac{F}{2}$</p> <p>$M_x = -\frac{FL}{8} + \frac{Fx}{2}$</p> <p>$FL/8 = M_{max}$</p>	<p>แรงกระทำสม่ำเสมอ</p> <p>$y_{max} = \frac{wL^4}{384EI}$</p>  <p>$V_x = \frac{wL}{2} - wx$</p> <p>$M_x = \frac{wL^2}{12} + \frac{wLx}{2} - \frac{wx^2}{2}$</p>

ตารางที่ ข.8 ขนาดต่าง ๆ และน้ำหนักของเหล็กกลวงสี่เหลี่ยมผืนผ้า (rectangular tube)
(ที่มา หนังสือการออกแบบโครงสร้างไม้และเหล็ก, มนัส อนุศิริ)



ขนาด (D × B) (mm)	ความหนา (t) (mm)	น้ำหนัก (w) (kg/m)	พื้นที่ หน้าตัด (A) (cm ²)	โมเมนต์อินเนอร์เซีย		โมลัสหน้าตัด		รัศมีไจเรชัน	
				$I_x = I_y$ (cm ⁴)	I_x	I_y	$S_x = S_y$ (cm ³)	S_x	S_y
50 × 25	1.6	1.75	2.232	7.02	2.37	2.81	0.95	1.77	1.03
	2.3	2.44	3.102	9.31	3.10	3.72	1.24	1.73	1.00
60 × 30	1.6	2.13	2.712	12.49	4.25	4.16	1.42	2.15	1.25
	2.3	2.98	3.792	16.82	5.65	5.61	1.88	2.11	1.22
75 × 45	2.3	4.06	5.172	38.86	17.61	10.36	4.69	2.74	1.84
	3.2	5.50	7.007	50.77	22.81	13.54	6.08	2.69	1.80
90 × 45	2.3	4.60	5.862	60.98	20.75	13.55	4.61	3.23	1.88
	3.2	6.25	7.967	80.24	27.01	17.83	6.00	3.17	1.84
100 × 50	2.3	5.14	6.552	84.83	28.95	16.97	5.79	3.60	2.10
	3.2	7.01	8.927	112.29	37.95	22.46	7.59	3.55	2.06
125 × 40	2.3	5.69	7.242	130.92	21.64	20.95	3.46	4.25	1.73
	3.2	7.76	9.887	173.84	28.19	27.81	4.51	4.19	1.69
125 × 75	3.2	9.52	12.127	256.93	116.80	41.11	18.69	4.60	3.10
	4.0	11.73	14.948	310.76	140.65	49.72	22.50	4.56	3.07
150 × 80	4.5	15.20	19.369	562.76	211.47	75.03	28.20	5.39	3.30
	6.0	19.81	25.233	710.20	264.42	94.69	35.26	5.31	3.24
150 × 100	4.5	16.62	21.169	658.06	351.96	87.74	46.93	5.58	4.08
	6.0	21.69	27.633	834.68	444.19	111.29	59.23	5.50	4.01
200 × 100	4.5	20.15	25.669	1331.44	454.64	133.14	45.46	7.20	4.21
	6.0	26.40	33.633	1703.30	576.91	170.33	57.69	7.12	4.14

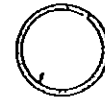
ตารางที่ ข.9 คุณสมบัติของหน้าตัดรูปแฉกร่อง
(ที่มา หนังสือกลศาสตร์ของวัสดุ, มนตรี พิรุณเกษม)

ขนาดหน้าตัด	หน้าแปลน		ความหนา		แกน X - X			แกน Y - Y					
	ความหนา (mm)	ความหนา (mm)	ความหนา (mm)	ความหนา (mm)	I (10 ⁶ mm ⁴)	S = I/c (10 ³ mm ³)	r = √(I/A) (mm)	I (10 ⁶ mm ⁴)	S = I/c (10 ³ mm ³)	r = √(I/A) (mm)			
C200 x 28	27.9	3560	203	64	9.9	12.4	18.2	180	71.6	0.825	16.6	15.2	14.4
x 21	20.4	2600	203	59	9.9	7.7	14.9	147	75.8	0.627	13.9	15.5	14.0
x 17	17.0	2170	203	57	9.9	5.6	13.5	133	78.8	0.544	12.8	15.8	14.5
C180 x 22	21.9	2780	178	58	9.3	10.6	11.3	127	63.7	0.568	12.8	14.3	13.5
x 18	18.2	2310	178	55	9.3	8.0	10.0	113	65.9	0.476	11.4	14.3	13.2
x 15	14.5	1850	178	53	9.3	5.3	8.86	99.6	69.3	0.405	10.3	14.8	13.8
C150 x 19	19.2	2450	152	54	8.7	11.1	7.12	93.7	53.9	0.425	10.3	13.2	12.9
x 16	15.5	1980	152	51	8.7	8.0	6.22	81.9	56.1	0.351	9.13	13.3	12.6
x 12	12.1	1540	152	48	8.7	5.1	5.36	70.6	59.1	0.279	7.93	13.5	12.8
C130 x 13	13.3	1700	127	47	8.1	8.3	3.66	57.6	46.5	0.252	7.20	12.2	11.9
x 10	9.9	1260	127	44	8.1	4.8	3.09	48.6	49.5	0.195	6.14	12.5	12.2
C100 x 11	10.8	1370	102	43	7.5	8.2	1.91	37.4	37.3	0.174	5.52	11.3	11.5
x 8	8.0	1020	102	40	7.5	4.7	1.61	31.6	39.7	0.132	4.65	11.4	11.6
C75 x 9	8.8	1120	76	40	6.9	9.0	0.85	22.3	27.4	0.123	4.31	10.5	11.4
x 7	7.3	933	76	37	6.9	6.6	0.75	19.7	28.3	0.096	3.67	10.1	10.8
x 6	6.0	763	76	35	6.9	4.3	0.67	17.6	29.6	0.077	3.21	10.1	10.9

ตารางที่ ข.10 คุณสมบัติของเหล็กกลม
(ที่มา หนังสือการออกแบบ โครงสร้าง ไม้และเหล็ก, มนัส อนุศิริ)

ท่อเหล็กกล้าคาร์บอนสำหรับงานโครงสร้างทั่วไป

มาตรฐาน JIS G 3444



เส้นผ่าศูนย์กลาง กลางภายนอก (mm)	ความหนา (mm)	น้ำหนัก (kg/m)	พื้นที่หน้าตัด (cm ²)	โมเมนต์ อินเนอร์เซีย (cm ⁴)	โมดูลัสหน้าตัด (cm ³)	รัศมีไจเรชั่น (cm)
21.7	2.0	0.972	1.238	0.607	0.560	0.700
27.2	2.0	1.24	1.583	1.28	0.930	0.890
	2.3	1.41	1.799	1.41	1.03	0.880
34.0	2.3	1.80	2.291	2.89	1.70	1.12
42.7	2.3	2.29	2.919	5.97	2.80	1.43
	2.8	2.78	3.510	7.02	3.29	1.41
48.6	2.3	2.63	3.345	8.99	3.70	1.64
	2.8	3.16	4.029	10.6	4.36	1.62
	3.2	3.58	4.564	11.8	4.86	1.61
60.5	2.3	3.30	4.205	17.8	5.90	2.06
	3.2	4.52	5.760	23.7	7.84	2.03
	4.0	5.57	7.100	28.5	9.41	2.00
78.3	2.8	5.08	6.465	43.7	11.5	2.60
	3.2	5.77	7.349	49.2	12.9	2.59
	4.0	7.13	9.085	59.5	15.8	2.56
89.1	2.8	5.96	7.591	70.7	15.9	3.05
	3.2	6.78	8.636	79.8	17.9	3.04
	4.0	8.39	10.69	97.0	21.8	3.01
101.6	3.2	7.76	9.892	120	23.8	3.48
	4.0	9.63	12.26	146	28.8	3.45
	5.0	11.9	15.17	177	34.9	3.42
114.3	3.2	8.77	11.17	172	30.2	3.93
	3.6	9.83	12.52	192	33.6	3.92
	4.5	12.2	15.52	234	41.0	3.89
	5.6	15.0	19.12	283	49.6	3.85
139.8	3.6	12.1	15.40	357	51.1	4.82
	4.0	13.4	17.07	394	56.3	4.80
	4.5	15.0	19.13	438	62.7	4.79
	5.0	19.8	25.22	566	80.9	4.74
165.2	4.5	17.8	22.72	734	88.9	5.68
	5.0	19.8	25.16	808	97.8	5.67
	6.0	23.6	30.01	952	115	5.63
	7.0	27.3	34.79	109x10	132	5.60
190.7	4.5	20.7	26.32	114x10	120	6.59
	5.0	22.9	29.17	126x10	132	6.57
	6.0	27.3	34.82	149x10	156	6.53
	7.0	31.7	40.40	171x10	179	6.50

ตารางที่ ข.11 คุณสมบัติของเหล็กเหนียว.

(ที่มา หนังสือตารางงานโลหะ,บรรเลง ศรีนิล)

เหล็กเหนียว (Steel)										
เหล็กโครงสร้างทั่ว ๆ ไป (Structural steel)										DIN 17100 (9.66)
คุณสมบัติ ทั่ว ๆ ไป	กลุ่มคุณภาพ				C เป็น%	ทนแรงดึง R_m N/mm ²	ทนแรงดึง ที่จุด ต่ำสุด R_e N/mm ²	อัตราการ ยืด A_5 in %	คุณสมบัติและการใช้งานของ เหล็กโครงสร้างทั่ว ๆ ไป ตาม DIN 17100 โดยไม่มี การปรับปรุงคุณภาพด้วยความ ร้อน	
	คุณสมบัติ สูง	คุณสมบัติ สูง	คุณสมบัติ พิเศษ	คุณสมบัติ พิเศษ						
ชื่อ	เลขที่วัสดุ	ชื่อ	เลขวัสดุ	ชื่อ	เลขที่ วัสดุ					
	1.0033	St 33-2	1.0035	—	—	—	320...490	185	18	สำหรับชิ้นส่วนที่ไม่สำคัญ
U St 34-1	1.0055	U St 34-2	1.0028	—	—	0,17	330...410	205	28	สำหรับโครงสร้างธรรมดา งานค้ำยันรูป, เหล็ก, สลัก
U St 37-1	1.0055	U St 37-2	1.0036	St 37-3	1.0116	0,20	360...440	235	25	
U St 42-1	1.0075	U St 42-2	1.0042	St 42-3	1.0136	0,25	410...490	255	22	
—	—	R St 46-2	1.0477	St 46-3	1.0463	0,20	430...530	285	22	
—	—	—	—	St 52-3	1.0570	0,20	510...610	355	22	สำหรับความแข็งแรงสูง
St 50-1	1.0052	St 50-2	1.0050	—	—	0,25	490...590	295	20	เรือ, ยี่, สลักวาง
St 60-1	1.0062	St 60-2	1.0060	—	—	0,35	590...710	335	15	
—	—	St 70-2	1.0070	—	—	0,50	690...840	365	10	ชิ้นส่วนที่รับภาระมาก

ในตารางนี้เป็นหมายเลขวัสดุที่บริษัทผู้ผลิตเหล็กใช้กันเป็นจำนวนมาก ซึ่งบางส่วนใช้แทนหมายเลขวัสดุตาม DIN 17100
กรรมวิธีหล่อ : เหล็กทั้งหมดของกลุ่มคุณภาพ 1 และ 2 หล่อแบบไม่กำจัดแก๊ส (nonkilled) หรือกำจัดแก๊ส(killed)
ซึ่งจะมีตัวอักษร U หรือ R นำหน้าเช่น U St 37-2 หรือ R St 37-2 เหล็กตั้งแต่ St 42-3 ถึง
St 70-2 จะหล่อแบบกำจัดแก๊ส (killed) กลุ่มคุณภาพ 3 หล่อแบบกำจัดแก๊สพิเศษ Special
Killed) ไม่ต้องเขียนตัวอักษรย่อกรรมวิธีหล่อ ยกเว้นเหล็ก R St 46-2
สำหรับเหล็กกลุ่มคุณภาพ 2 และ 3 ผู้ซึ่งสามารถตกลงกรรมวิธีหลอมกับบริษัทผู้ผลิตได้ตามต้องการ เช่น
YRST 37-2 (เหล็กเป่าออกซิเจน หล่อแบบกำจัดแก๊ส (killed))
ความหนาแน่นของเหล็กโครงสร้างทั่ว ๆ ไป $\rho = 7.85 \text{ kg/dm}^3$



ภาคผนวก ค.

ข้อมูลต่าง ๆ ของรถขนของไฟฟ้า

1. การหาน้ำหนักของเหล็ก

น้ำหนักของชิ้นส่วนบนรถขนของไฟฟ้ามีผลต่อการออกแบบชิ้นส่วนบางอย่างที่มีผลต่อความแข็งแรงของรถนี้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องคำนวณหาน้ำหนักของชิ้นส่วนเหล่านี้ ซึ่งแสดงได้โดย

1.1 เหล็กกล่องรองรับกระบะมีพื้นที่หน้าตัด กว้าง x ยาว x หนา เท่ากับ $25 \times 25 \times 1.5 \text{ mm}^3$ และยาวทั้งหมด 5.2 m

$$\therefore \text{ปริมาตรทั้งหมดของเหล็ก} = 3.783 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\therefore \text{น้ำหนักเหล็ก} = 28.94 \text{ N} = 3 \text{ kg}$$

1.2 เหล็กแผ่นกระบะกว้าง x ยาว x หนา เท่ากับ $0.75 \times 1.1 \times 0.002 \text{ m}^3$

$$\therefore \text{ปริมาตรทั้งหมดของเหล็ก} = 1.65 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\therefore \text{น้ำหนักเหล็ก} = 126.225 \text{ N} = 13 \text{ kg}$$

1.3 เหล็กกล่อง

- โครงรถทั้งหมดมีพื้นที่หน้าตัด กว้าง x ยาว x หนา เท่ากับ $25 \times 50 \times 2 \text{ mm}^3$ และยาวทั้งหมด 5.12 m

$$\therefore \text{ปริมาตรทั้งหมดของเหล็ก} = 7.4752 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\therefore \text{น้ำหนักเหล็ก} = 57.18 \text{ N} = 6 \text{ kg}$$

- เฉพาะที่มีผลต่อล้อหลัง(ที่ระยะ 1.1 m จากล้อหลัง)

$$\therefore \text{ปริมาตรของเหล็ก} = 5.402 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\therefore \text{น้ำหนักเหล็ก} = 41.32 \text{ N} = 4.2 \text{ kg}$$

- มีผลต่อล้อหน้า(ที่ระยะ 1.1 m ถึง 1.76 m จากด้านหลัง)

$$\therefore \text{น้ำหนักเหล็ก} = 15.86 \text{ N}$$

1.4 เหล็กกลมบนกระบะมีเส้นผ่านศูนย์กลางวงนอก 26 mm หนา 1.5 mm และยาว 5 m

$$\therefore \text{ปริมาตรของเหล็ก} = 2.975 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\therefore \text{น้ำหนักเหล็ก} = 22.76 \text{ N} = 2.3 \text{ kg}$$

2. ผลการชั่งน้ำหนักของรถขนของไฟฟ้า

- น้ำหนักทั้งหมดของรถขณะไม่มีภาระคือ 182 kg หรือ 1785.42 N
- น้ำหนักที่กระทำต่อล้อหลัง 110 kg หรือ 1079.1 N
- น้ำหนักที่กระทำต่อล้อหน้า 71 kg หรือ 696.51 N
- เมื่อบรรทุกภาระจะกำหนดให้น้ำหนักของภาระทั้งหมดกระทำที่ล้อหลังซึ่งทำให้น้ำหนักของล้อหลังหนักเพิ่มเป็น 310 kg หรือ 3041.1 N





ภาคผนวก ง
ข้อมูลจากการทดสอบ

ตารางที่ ง.1 แสดงอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ระดับความเร็วที่ 1 เมื่อมีภาระ 0 กิโลกรัม

ระยะทาง (km)	แรงดัน (V)	เวลา (min)
0	25.3	0
1.5	24.3	29.46.38
1.5	23.0	30.28.27
1.5	21.8	32.08.69
1.5	21.6	33.25.60
1.5	17.8	37.24.49
1.5	15.8	41.57.03
1.5	15.6	44.37.38
1.5	13.4	52.16.30
0.5	12.6	13.45.10

ตารางที่ ง.2 แสดงอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ระดับความเร็วที่ 2 เมื่อมีภาระ 0 กิโลกรัม

ระยะทาง (km)	แรงดัน (V)	เวลา (min)
0	25.3	0
1.5	24.4	11.57.85
1.5	24.1	12.01.19
1.5	24.0	12.05.20
1.5	23.7	12.27.12
1.5	22.0	12.44.56
1.5	21.8	12.50.41
1.5	21.6	14.51.79
1.5	19.7	15.00.87
1.5	17.0	16.23.71
1.5	16.0	17.13.74
1.35	15.2	17.22.56

ตารางที่ ง.3 แสดงอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ระดับความเร็วที่ 3 เมื่อมีภาระ 0 กิโลกรัม

ระยะทาง (km)	แรงดัน (V)	เวลา (min)
0	25.3	0
1.5	24.8	9.05.26
1.5	24.5	9.28.74
1.5	24.1	10.05.85
1.5	22.3	10.44.20
1.5	21.8	11.24.28
1.5	21.6	12.05.87
1.5	21.4	12.58.87
1.5	19.0	14.09.89
1.5	17.5	15.24.22
1.5	16.0	16.03.66
1.5	15.3	17.08.10
1.5	15.0	18.16.54

ตารางที่ ง.4 แสดงอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ระดับความเร็วที่ 1 เมื่อมีภาระ 200 กิโลกรัม

ระยะทาง (km)	แรงดัน (V)	เวลา (min)
0	25.3	0
1.5	24.5	22.09.52
1.5	22.3	27.00.10
1.5	22.2	29.06.25
1.5	21.2	30.45.18
1.5	20.2	32.03.10
1.5	16.8	34.46.47
1.5	16.2	39.22.50
1.5	12.1	44.50.17
0.3	11.5	10.30.06

ตารางที่ ง.5 แสดงอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ระดับความเร็วที่ 2 เมื่อมีภาระ 200 กิโลกรัม

ระยะทาง (km)	แรงดัน (V)	เวลา (min)
0	24.9	0
1.5	24.3	11.58.22
1.5	22.1	14.00.52
1.5	21.4	14.30.55
1.5	20.2	14.57.99
1.5	16.0	17.20.05
1.05	15.6	13.58.02

ตารางที่ ง.6 แสดงอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ที่ระดับความเร็วที่ 3 เมื่อมีภาระ 200 กิโลกรัม

ระยะทาง (km)	แรงดัน (V)	เวลา (min)
0	25.3	0
1.5	24.7	10.25.88
1.5	24.4	10.39.56
1.5	24.0	10.45.70
1.5	22.0	11.46.53
1.5	21.5	14.55.15
1.5	19.4	15.12.42
1.35	15.6	16.18.50

ตารางที่ ง.7 แสดงเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่เป็นระยะทาง 40 เมตรที่ระดับความเร็วและภาระต่างๆ

น้ำหนัก (kg)	เวลา (s)					
	ระดับความเร็วที่ 1		ระดับความเร็วที่ 2		ระดับความเร็วที่ 3	
	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2	ช่วงที่ 1	ช่วงที่ 2
0	48.40	47.80	19.70	19.28	17.77	17.47
50	47.59	47.45	19.88	19.65	18.40	18.24
100	47.39	47.20	20.02	19.80	19.49	19.31
150	45.74	45.51	20.95	20.80	19.59	19.44
200	45.09	45.00	22.63	21.06	20.60	20.18

ตารางที่ ง.8 แสดงความเร็วเฉลี่ยของรถไฟเหาะ

น้ำหนักบรรทุก (kg)	ความเร็ว (km/hr)		
	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3
0	3.005	7.39	8.17
50	3.025	7.285	7.86
100	3.05	7.23	7.425
150	3.15	6.895	7.38
200	3.195	6.6	7.065

หมายเหตุ $\text{ความเร็ว} = (\text{ระยะทาง} / \text{เวลา}) \times 3.6$ (km/hr)

ตารางที่ ง.9 แสดงระยะทางและเวลาที่ใช้ในการเบรก

น้ำหนัก (kg)	ระยะทาง (m)			เวลา (s)		
	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3	ระดับที่ 1	ระดับที่ 2	ระดับที่ 3
0	0.80	1.60	2.30	1.25	1.73	2.06
50	0.88	1.63	2.70	1.38	1.86	2.25
100	0.95	1.88	2.75	1.52	2.02	2.53
150	1.13	2.35	3.13	1.62	2.34	2.91
200	1.20	2.60	3.29	1.85	2.59	3.09

ตารางที่ ง.10 แสดงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระดับความเร็วที่ 1 ที่ภาระ 0 กิโลกรัม

ระยะทาง (m)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
1	23.57	12.1	285.197
150	23.79	6.8	161.772
300	23.58	6.7	157.986
450	23.55	6.6	155.430
600	23.53	6.6	155.298
750	23.25	6.6	153.450
900	23.17	6.6	152.922
1050	22.70	6.7	152.09
1200	22.37	6.7	149.879
1350	22.24	6.7	149.008
1500	21.86	6.6	144.276
1650	21.20	6.5	137.8
1800	20.89	6.4	133.696
1950	20.70	6.3	130.41
2100	20.60	6.4	131.84
2250	20.54	6.5	133.51

- หมายเหตุ
- ความต่างศักย์ไฟฟ้าไฟฟ้าหลังชาร์ต 25.25 V
 - ระยะเวลาในการชาร์ต 1 ชั่วโมง
 - อัตราการชาร์ต 30 amps

(กำลังไฟฟ้า = ผลคูณระหว่างค่าความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า)

ตารางที่ ง.11 แสดงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระดับความเร็วที่ 2 ที่ภาระ 0 กิโลกรัม

ระยะทาง (m)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
1	21.87	22.4	489.888
150	23.4	11.7	273.78
300	22.43	11.8	264.674
450	22.35	11.7	261.495
600	22.29	11.6	258.564
750	22.19	11.6	257.404
900	22.02	11.5	253.23
1050	21.98	11.5	252.77
1200	21.58	11.7	252.486
1350	20.99	12	251.88
1500	20.76	12	249.12
1650	20.59	11.9	245.021
1800	20.34	12	244.08
1950	20.17	12.1	244.057
2100	19.85	12	238.2
2250	19.54	11.9	232.526

- หมายเหตุ
- ความต่างศักย์ไฟฟ้าไฟฟ้าหลังชาร์ต 25.01 V
 - ระยะเวลาในการชาร์ต 1 ชั่วโมง
 - อัตราการชาร์ต 30 amps

(กำลังไฟฟ้า = ผลคูณระหว่างค่าความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า)

ตารางที่ ง.12 แสดงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระดับความเร็วที่ 3 ที่ภาระ 0 กิโลกรัม

ระยะทาง (m)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
1	21.95	32.4	711.18
150	23.86	13.3	317.338
300	23.47	13.4	314.498
450	23.3	13.4	312.22
600	22.86	13.6	310.896
750	22.84	13.5	308.34
900	20.97	13.2	276.804
1050	20.81	13.1	272.611
1200	20.69	13.1	271.039
1350	20.61	13	267.93
1500	20.29	12.8	259.712
1650	20.17	12.7	256.159
1800	19.99	12.6	251.874
1950	19.72	12.7	250.444
2100	19.58	12.7	248.666
2250	19.31	12.5	241.375

- หมายเหตุ
- ความต่างศักย์ไฟฟ้าไฟฟ้าหลังชาร์ต 25.33 V
 - ระยะเวลาในการชาร์ต 1 ชั่วโมง
 - อัตราการชาร์ต 30 amps

(กำลังไฟฟ้า = ผลคูณระหว่างค่าความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า)

ตารางที่ ง.13 แสดงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระดับความเร็วที่ 1 ที่ภาระ 50 กิโลกรัม

ระยะทาง (m)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
1	23.49	12.2	286.578
150	23.59	7.2	169.848
300	23.57	7.2	169.704
450	23.52	7.2	169.344
600	23.49	7.1	166.779
750	23.18	7.1	164.578
900	23.06	7	161.42
1050	22.49	7.1	159.679
1200	22.16	7.1	157.336
1350	22.04	7.2	158.688
1500	21.8	7.1	154.78
1650	21.14	7.2	152.208
1800	20.59	6.8	140.012
1950	20.56	6.6	135.696
2100	20.54	6.6	135.564
2250	20.42	6.6	134.772

- หมายเหตุ
- ความต่างศักย์ไฟฟ้าไฟฟ้าหลังชาร์ต 25.1 V
 - ระยะเวลาในการชาร์ต 1 ชั่วโมง
 - อัตราการชาร์ต 30 amps

(กำลังไฟฟ้า = ผลคูณระหว่างค่าความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า)

ตารางที่ ง.14 แสดงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระดับความเร็วที่ 2 ที่ภาระ 50 กิโลกรัม

ระยะทาง (m)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
1	20.94	24.8	519.312
150	21.49	12.9	277.221
300	21.35	12.6	269.01
450	21.07	12.5	263.375
600	20.94	12.4	259.656
750	20.31	12.7	257.937
900	20.14	12.8	257.792
1050	20.01	12.8	256.128
1200	19.93	12.8	255.104
1350	19.86	12.7	252.222
1500	19.81	12.6	249.606
1650	19.41	12.7	246.507
1800	19.21	12.8	245.888
1950	19.11	12.8	244.608
2100	18.97	12.6	239.022
2250	18.86	12.5	235.75

- หมายเหตุ
- ความต่างศักย์ไฟฟ้าไฟฟ้าหลังชาร์ต 25.41 V
 - ระยะเวลาในการชาร์ต 1 ชั่วโมง
 - อัตราการชาร์ต 30 amps

(กำลังไฟฟ้า = ผลคูณระหว่างค่าความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า)

ตารางที่ ง.15 แสดงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระดับความเร็วที่ 3 ที่ภาระ 50 กิโลกรัม

ระยะทาง (m)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
1	21.9	33.4	731.46
150	23.75	14.3	339.625
300	23.38	13.8	322.644
450	23.31	13.8	321.678
600	22.77	13.9	316.503
750	21.99	14.1	310.059
900	20.85	13.9	289.815
1050	20.72	13.8	285.936
1200	20.6	13.9	286.34
1350	20.52	13.8	283.176
1500	20.2	13.8	278.76
1650	20.08	13.7	275.096
1800	19.89	13.8	274.482
1950	19.63	13.8	270.894
2100	19.49	13.7	267.013
2250	19.29	13.8	266.202

- หมายเหตุ
- ความต่างศักย์ไฟฟ้าไฟฟ้าหลังชาร์ต 25.24 V
 - ระยะเวลาในการชาร์ต 1 ชั่วโมง
 - อัตราการชาร์ต 30 amps

(กำลังไฟฟ้า = ผลคูณระหว่างค่าความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า)

ตารางที่ ง.16 แสดงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระดับความเร็วที่ 1 ที่ภาระ 100 กิโลกรัม

ระยะทาง (m)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
1	23.5	15.5	364.25
150	23.66	7.3	172.718
300	23.58	7.4	174.492
450	23.55	7.6	178.98
600	23.52	7.5	176.4
750	23.3	7.4	172.42
900	23.21	7	162.47
1050	22.89	7.2	164.808
1200	22.41	7.2	161.352
1350	22.38	7.1	158.898
1500	21.5	7.4	159.1
1650	20.71	7.6	157.396
1800	20.68	7.2	148.896
1950	20.61	7.2	148.392
2100	20.59	7.2	148.248
2250	20.5	7.2	147.6

- หมายเหตุ
- ความต่างศักย์ไฟฟ้าไฟฟ้าหลังชาร์ต 25.15 V
 - ระยะเวลาในการชาร์ต 1 ชั่วโมง
 - อัตราการชาร์ต 30 amps

(กำลังไฟฟ้า = ผลคูณระหว่างค่าความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า)

ตารางที่ ง.17 แสดงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระดับความเร็วที่ 2 ที่ภาระ 100 กิโลกรัม

ระยะทาง (m)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
1	22.49	26.9	604.981
150	22.78	13.2	300.696
300	21.87	13.4	293.058
450	21.85	13.3	290.605
600	21.71	13.3	288.743
750	21.41	13.4	286.894
900	21.16	13.4	283.544
1050	20.94	13.5	282.69
1200	20.26	13.6	275.536
1350	20.17	13.4	270.278
1500	19.98	13.4	267.732
1650	19.56	13.5	264.06
1800	19.23	13.3	255.759
1950	19.05	13.2	251.46
2100	18.84	13.1	246.804
2250	18.35	13	238.55

- หมายเหตุ
- ความต่างศักย์ไฟฟ้าไฟฟ้าหลังชาร์ต 25.6 V
 - ระยะเวลาในการชาร์ต 1 ชั่วโมง
 - อัตราการชาร์ต 30 amps

(กำลังไฟฟ้า = ผลคูณระหว่างค่าความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า)

ตารางที่ ง.18 แสดงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระดับความเร็วที่ 3 ที่ภาระ 100 กิโลกรัม

ระยะทาง (m)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
1	22.45	33.6	754.32
150	22.96	15	344.4
300	22.78	14.5	330.31
450	22.7	14.4	326.88
600	22.48	14.4	323.712
750	22.13	14.5	320.885
900	21.9	14.3	313.17
1050	21.63	14.5	313.635
1200	21.27	14.6	310.542
1350	20.95	14.8	310.06
1500	20.49	14.8	303.252
1650	20.34	14.7	298.998
1800	20.23	14.5	293.335
1950	20.04	14.4	288.576
2100	19.85	14.2	281.87
2250	19.58	14.3	279.994

- หมายเหตุ
- ความต่างศักย์ไฟฟ้าไฟฟ้าหลังชาร์ต 25.12 V
 - ระยะเวลาในการชาร์ต 1 ชั่วโมง
 - อัตราการชาร์ต 30 amps

(กำลังไฟฟ้า = ผลคูณระหว่างค่าความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า)

ตารางที่ ง.19 แสดงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระดับความเร็วที่ 1 ที่ภาระ 150 กิโลกรัม

ระยะทาง (m)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
1	21.58	25.3	545.974
150	23.07	8.4	193.788
300	22.8	8	182.4
450	22.23	8.2	182.286
600	21.69	8.2	177.858
750	21.55	8.1	174.555
900	20.47	8	163.76
1050	20.35	8.1	164.835
1200	19.98	8.1	161.838
1350	19.88	8	159.04
1500	19.85	8.1	160.785
1650	19.8	8	158.4
1800	19.38	7.9	153.102
1950	19.35	8	154.8
2100	19.31	8.1	156.411
2250	19.24	8	153.92

- หมายเหตุ
- ความต่างศักย์ไฟฟ้าไฟฟ้าหลังชาร์ต 24.97 V
 - ระยะเวลาในการชาร์ต 1 ชั่วโมง
 - อัตราการชาร์ต 30 amps

(กำลังไฟฟ้า = ผลคูณระหว่างค่าความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า)

ตารางที่ ง.20 แสดงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระดับความเร็วที่ 2 ที่ภาระ 150 กิโลกรัม

ระยะทาง (m)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
1	21.55	29.5	635.725
150	22.44	13.6	305.184
300	21.8	13.6	296.48
450	21.75	13.5	293.625
600	21.57	13.6	293.352
750	21.07	13.8	290.766
900	20.89	13.7	286.193
1050	20.71	13.8	285.798
1200	20.15	13.7	276.055
1350	19.92	13.9	276.888
1500	19.81	13.7	271.397
1650	19.51	13.7	267.287
1800	19.47	13.5	262.845
1950	19	13.5	256.5
2100	18.82	13.5	254.07
2250	18.2	13.4	243.88

- หมายเหตุ
- ความต่างศักย์ไฟฟ้าไฟฟ้าหลังชาร์ต 25.14 V
 - ระยะเวลาในการชาร์ต 1 ชั่วโมง
 - อัตราการชาร์ต 30 amps

(กำลังไฟฟ้า = ผลคูณระหว่างค่าความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า)

ตารางที่ ง.21 แสดงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระดับความเร็วที่ 3 ที่ภาระ 150 กิโลกรัม

ระยะทาง (m)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
1	22.01	34.4	757.144
150	22.94	15.1	346.394
300	22.64	15	339.6
450	22.59	14.9	336.591
600	22.43	14.9	334.207
750	22.06	15	330.9
900	21.8	14.8	322.64
1050	21.56	15.1	325.556
1200	21.09	14.9	314.241
1350	20.9	14.9	311.41
1500	20.45	15.4	314.93
1650	20.27	14.8	299.996
1800	20.15	14.8	298.22
1950	19.97	14.9	297.553
2100	19.8	14.9	295.02
2250	19.48	15.1	294.148

- หมายเหตุ
- ความต่างศักย์ไฟฟ้าไฟฟ้าหลังชาร์ต 25.27 V
 - ระยะเวลาในการชาร์ต 1 ชั่วโมง
 - อัตราการชาร์ต 30 amps

(กำลังไฟฟ้า = ผลคูณระหว่างค่าความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า)

ตารางที่ ง.22 แสดงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระดับความเร็วที่ 1 ที่ภาระ 200 กิโลกรัม

ระยะทาง (m)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
1	23.01	27.5	632.775
150	23.58	9.4	221.652
300	23.56	9.3	219.108
450	23.51	9.3	218.643
600	23.5	8.9	209.15
750	23.19	8.7	201.753
900	23.07	8.7	200.709
1050	22.5	8.9	200.25
1200	22.17	9	199.53
1350	22.6	8.6	194.36
1500	20.86	8.7	181.482
1650	20.67	8.7	179.829
1800	20.6	8.4	173.04
1950	20.57	8.3	170.731
2100	20.55	8.3	170.565
2250	20.54	8.3	170.482

- หมายเหตุ
- ความต่างศักย์ไฟฟ้าไฟฟ้าหลังชาร์ต 25.51 V
 - ระยะเวลาในการชาร์ต 1 ชั่วโมง
 - อัตราการชาร์ต 30 amps

(กำลังไฟฟ้า = ผลคูณระหว่างค่าความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า)

ตารางที่ ง.23 แสดงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระดับความเร็วที่ 2 ที่ภาระ 200 กิโลกรัม

ระยะทาง (m)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
1	20.98	32.4	679.752
150	22.5	13.8	310.5
300	21.54	14	301.56
450	21.31	13.9	296.209
600	21.18	13.9	294.402
750	21.08	13.7	288.796
900	20.92	13.8	288.696
1050	20.87	13.8	288.006
1200	20.79	13.7	284.823
1350	20.59	13.8	284.142
1500	20.59	13.7	282.083
1650	20.39	13.6	277.304
1800	20.29	13.6	275.944
1950	20.17	13.7	276.329
2100	19.79	13.6	269.144
2250	19.33	13.7	264.821

- หมายเหตุ
- ความต่างศักย์ไฟฟ้าไฟฟ้าหลังชาร์ต 25.39 V
 - ระยะเวลาในการชาร์ต 1 ชั่วโมง
 - อัตราการชาร์ต 30 amps

(กำลังไฟฟ้า = ผลคูณระหว่างค่าความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า)

ตารางที่ ง.24 แสดงกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระดับความเร็วที่ 3 ที่ภาระ 200 กิโลกรัม

ระยะทาง (m)	ความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (W)
1	21.97	36.6	804.102
150	22.73	16.1	365.953
300	22.7	16	363.2
450	22.91	15.8	361.978
600	22.73	15.9	361.407
750	22.62	15.9	359.658
900	22.41	16	358.56
1050	22.25	15.4	342.65
1200	22.13	16.1	356.293
1350	21.45	16.5	353.925
1500	21.27	15.8	336.066
1650	20.86	15.8	329.588
1800	20.21	16	323.36
1950	20.15	15.6	314.34
2100	20.09	15.8	317.422
2250	19.95	15.3	305.235

- หมายเหตุ
- ความต่างศักย์ไฟฟ้าไฟฟ้าหลังชาร์ต 25.22 V
 - ระยะเวลาในการชาร์ต 1 ชั่วโมง
 - อัตราการชาร์ต 30 amps

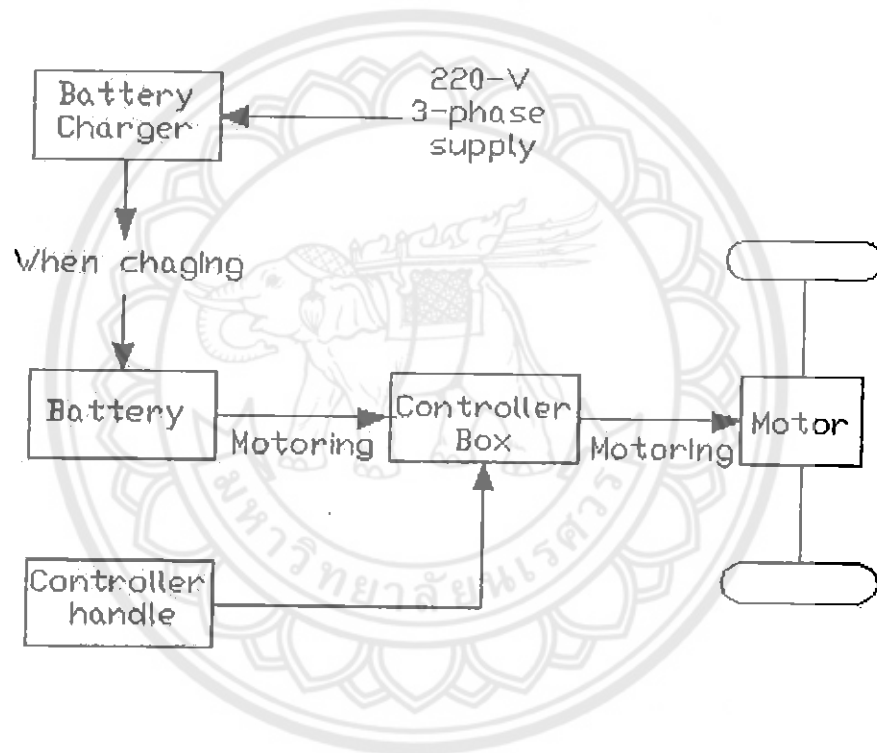
(กำลังไฟฟ้า = ผลคูณระหว่างค่าความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า)



ภาคผนวก จ.

วงจรไฟฟ้าของรถขนของไฟฟ้า

รูปที่ จ.1 แสดงวงจรการทำงานของรถขนของไฟฟ้า



รูปที่ จ.2 แสดงวงจรไฟฟ้าของกล่องควบคุม

