การออกแบบและพัฒนารถจักรไฟฟ้าสำหรับขนาดความกว้างทาง $7\frac{1}{4}$ นิ้ว

DESIGN AND DEVELOPMENT OF $7\frac{1}{4}$ INCH TRACK GAUGE ELECTRIC LOCOMOTIVE

ธนพร พูลสวัสดิ์

ภูมินทร์ เศวตะพุกกะ

วีรวัฒน์ เจริญรัตนไพศาล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

การออกแบบและพัฒนารถจักรไฟฟ้าสำหรับขนาดความกว้างทาง $7\frac{1}{4}$ นิ้ว

DESIGN AND DEVELOPMENT OF $7\frac{1}{4}$ INCH TRACK GAUGE ELECTRIC LOCOMOTIVE

ธนพร พูลสวัสดิ์

ภูมินทร์ เศวตะพุกกะ

วีรวัฒน์ เจริญรัตนไพศาล

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND DEVELOPMENT OF $7\frac{1}{4}$ INCH TRACK GAUGE ELECTRIC LOCOMOTIVE

TANAPORN POOLSAWAT

PHUMIN SEVATAPUKKA

WEERAWAT CHAROENRATANAPAISAL

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและพัฒนารถจักรไฟฟ้าสำหรับขนาดความกว้างทาง $7\frac{1}{4}$ นิ้ว

DESIGN AND DEVELOPMENT OF $7\frac{1}{4}$ INCH TRACK GAUGE ELECTRIC LOCOMOTIVE

ผู้จัดทำ

1. นางสาวธนพร พูลสวัสดิ์ รหัสประจำตัว 57010547
2. นายภูมินทร์ เศวตะพุกกะ รหัสประจำตัว 57010998
3. นายวีรวัฒน์ เจริญรัตนไพศาล รหัสประจำตัว 57011203



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและพัฒนารถจักรไฟฟ้าสำหรับขนาดความกว้างทาง $7\frac{1}{4}$ นิ้ว

นางสาวธนพร พูลสวัสดิ์ 57010547
นายภูมินทร์ เศวตะพุกกะ 57010998
นายวีรวัฒน์ เจริญรัตนไพศาล 57011203
ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2560

บทคัดย่อ

ขบวนรถไฟโดยสารโดยทั่วไปนั้นประกอบด้วยรถจักรไฟฟ้าและรถโดยสาร ซึ่งปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบและพัฒนารถจักรไฟฟ้าสำหรับขนาดความกว้างทาง $7\frac{1}{4}$ นิ้ว ดังนั้นปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ทำการศึกษาและออกแบบระบบต้นกำลังของรถจักรไฟฟ้าโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นต้นกำลังและควบคุมการขับเคลื่อนโดยใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้แล้วนำไปสร้างรถจักรไฟฟ้าโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาและการคำนวณจากนั้นนำมาทดสอบการขับเคลื่อน โดยมีเงื่อนไขในการออกแบบระบบต้นกำลังในการขับเคลื่อนแบ่งได้ดังนี้ 1) อัตราส่วนขนาดรถจักรไฟฟ้ามีขนาด 1 ต่อ 8 ซึ่งเป็นขนาดของความกว้างทาง $7\frac{1}{4}$ นิ้ว 2) ลากจูงตู้โดยสารสองตู้ซึ่งมีน้ำหนัก 500 กิโลกรัมต่อตู้ 3) มีความเร็วสูงสุดที่ 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง 4) มีความเร่งเฉลี่ย ไปยังความเร็วสูงสุดที่ 1 เมตรต่อ(วินาที)^2 และ 5) มีความแข็งแรงในการรับน้ำหนักกดเพลา 300 กิโลกรัมที่รถจักรไฟฟ้า โดยในการคำนวณตามทฤษฎีพบว่าเงื่อนไขทั้ง 5 นั้นต้องใช้ต้นกำลังในการลากจูงคือ 8,830 วัตต์ แต่ด้วยเงื่อนไขด้านงบประมาณในการทำปริญญานิพนธ์นั้นจึงเลือกใช้มอเตอร์ขนาด 1,000 วัตต์ ประสิทธิภาพ 78 เปอร์เซ็นต์ แล้วจึงนำไปทดสอบโดยการทดสอบโดยรถจักรไฟฟ้ามีภาระ140 กิโลกรัม ซึ่งผลที่ได้จากการทดสอบพบว่า แรงที่สามารถคำนวณจากการทดสอบ และแรงที่ได้จากการคำนวณจากทฤษฎีนั้นในช่วงความเร็วคงที่มีค่าที่แตกต่างกันมากที่สุดอยู่ 50.88 เปอร์เซ็นต์ เป็นผลมาจากค่าคงตัวแรงต้านล้อ จากนั้นจึงกำหนดให้ค่าแรงจากทฤษฎีมีค่าเท่ากับแรงจากการทดสอบเพื่อแก้สมการหาค่าแรงต้านล้อที่เหมาะสม และคาดการณ์การลากจูงภาระ 1,300 กิโลกรัมนั้น จะได้ความเร็วสูงที่สุดคือ 13.11 กิโลเมตรต่อชั่วโมงซึ่งใช้เวลาเร่งนานเกินไป จึงแนะนำให้ใช้ค่าที่ 9 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ด้วยความเร่งเฉลี่ย 0.1 เมตรต่อ(วินาที)^2 เพื่อให้หัวรถจักรที่ออกแบบและจำลองนี้สามารถขับเคลื่อนได้อย่างเหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND DEVELOPMENT OF $7\frac{1}{4}$ INCH TRACK GAUGE ELECTRIC LOCOMOTIVE

Tanaporn Poolsawat 57010547

Phumin Sevatapukka 57010998

Weerawat Charoenratanapaisal 57011203

Asst.Prof.Dr.Monsak Pimsarn Advisor

Year 2017

ABSTRACT

Generally, a train consists of locomotive and passenger cars. This thesis studies about the design and development of $7\frac{1}{4}$ inch track gauge electric locomotive. Therefore this thesis study and design the power system of the electric locomotive by using power from electric motors and control its driving unit by using potentiometer to create the electric locomotive. By using data from the study and calculation to test driving. The conditions for the design of the power system are as follows. 1) Scaled down of the electric locomotive to 1:8 of $7\frac{1}{4}$ inch track gauge. 2) Towing two passenger cars with weight of 500 kg each. 3) Maximum speed at 20 km/h. 4) Average acceleration to the maximum speed of $1\,m/s^2$. 5) Carriage 300 kg of axle load of the electric locomotive. Theoretical, calculations show that all five conditions require the power to towing of 8,830 watts. However, the budget for the thesis must choose 1,000 watts motor with 78% efficiency. This experiment is testing 140 kg load of the electric locomotive. The result shows, force that calculated between from testing and from theory at constant velocity, the difference is highest at 50.88% because stable of the wheel resistance. Then the theoretical force is equal to the force from the test to solve the equation for the right wheel resistance. And Anticipate for towing of 1,300 kg load. Therefore the maximum speed will be 13.11 km/h, but it takes too long. Recommended

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

speed is 9 km/h at average acceleration at $0.1\,m/s^2$ to allow design and development of a scaled locomotive can be appropriate driven.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดีก็เพราะความเอาใจใส่ คำแนะนำ และความช่วยเหลือในด้านต่างๆ เสมอมาจาก ผศ.ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร อาจารย์ที่ปรึกษา รวมทั้งเป็นผู้ตรวจทานความถูกต้องของปริญญานิพนธ์ของคณะผู้ศึกษา ทางคณะผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง รวมทั้งครูและอาจารย์ในทุกระดับการศึกษา ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แขนงต่างๆ รวมทั้งกรรมการสอบปริญญานิพนธ์ที่ได้แนะนำข้อผิดพลาดต่างๆในการจัดทำ

ขอขอบพระคุณบุคคลที่สำคัญที่สุด ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูข้าพเจ้าเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุกๆ ด้าน อันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่เอื้อเฟื้อให้ยืมเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในโครงงานนี้และขอขอบคุณนายจุลวิชญ์ มาฟัก นายเจตจำนง เกษประดิษฐ์ และนายวทัญญู ไพโรจน์ ที่คอยให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆในการทำโครงงานนี้

และท้ายที่สุดขอขอบคุณเพื่อนๆในคณะผู้จัดทำที่ได้ทุ่มเทแรงกายและใจในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

นางสาวธนพร พูลสวัสดิ์
นายภูมินทร์ เศวตะพุกกะ
นายวีรวัฒน์ เจริญรัตนไพศาล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	IV
สารบัญ	V
สารบัญตาราง	IX
สารบัญรูป	XI
รายการคำย่อและสัญลักษณ์	XV
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 วิธีการดำเนินงาน	3
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 บทนำ	4
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.3 ทฤษฎี	5
2.3.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับรถไฟ (Basic Knowledge of Train)	5
2.3.1.1 รถจักรไฟฟ้า (Electric locomotive)	7
2.3.2 มอเตอร์ไฟฟ้า (Electric motor)	7
2.3.2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC motor)	7
2.3.2.1.1 การขับมอเตอร์กระแสตรงของรถไฟฟ้า	8
2.3.2.2 มอเตอร์กระแสสลับ (AC motor)	8
2.3.3 แรงต้านการเคลื่อนที่ (Resistance force)	8
2.3.3.1 แรงต้านการหมุนของล้อ (Rolling resistance force)	9
2.3.3.2 แรงต้านอากาศ (Air resistance force)	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3.3 แรงต้านทางชัน (gradient resistance force) 10
2.3.3.4 แรงต้านจากขบวนลากจูง (passenger train resistance force) 11
2.3.3.5 แรงต้านทั้งหมด (total resistance force) 11
2.3.4 ประสิทธิภาพการถ่ายทอดกำลัง (Transmission efficiency) 11
2.3.5 อัตราทดเฟือง (Gear ratio) 12
2.3.6 ระบบเบรก (Braking system) 12
2.3.6.1 ดรัมเบรก (Drum brake) 12
2.3.6.2 ดิสก์เบรก (Disk brake) 13
2.3.6.3 วงจรไฮโดรลิกของระบบเบรก 13
2.3.6.4 ความได้เปรียบเชิงกลของระบบเบรกโดรลิก 14
2.3.7 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis) 14
2.3.6 ความเสียหายของวัสดุ 15
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน 16
3.1 บทนำ 16
3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน 16
3.3 อุปกรณ์ประกอบชิ้นงาน 17
3.3.1 ภาพรวมระบบรถจักรไฟฟ้าต้นแบบ 17
3.3.2 แคร่รถจักรไฟฟ้าต้นแบบ 18
3.3.3 แชสซี (Chassis) 22
3.3.4 อุปกรณ์การส่งกำลัง 22
3.3.5 อุปกรณ์ควบคุมความเร็ว 24
3.3.6 แบตเตอรี่ 25
3.4 การออกแบบระบบต้นกำลัง 26
3.5 การเลือกมอเตอร์ 37
3.5.1 การวิเคราะห์ความเร็วของมอเตอร์รุ่น MY 1020 40
3.5.2 การวิเคราะห์ความเร่งของมอเตอร์รุ่น MY 1020 42
3.6 อัตราทดเฟือง (Gear ratio) 44
3.7 ความเร็วและความเร่งที่เหมาะสมในการเคลื่อนที่ 44
3.8 การออกแบบระบบเบรก 47
3.8.1.ความได้เปรียบเชิงกลของระบบเบรกไฮดรอลิก 49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 การวิเคราะห์ผลกระทบด้านโครงสร้าง 50

บทที่ 4 การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง 52

4.1 บทนำ 52

4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 52

4.2.1 เครื่องชั่งน้ำหนัก 52

4.2.2 มัลติมิเตอร์ไฟฟ้า 53

4.2.3 กล่องควบคุมระบบไฟฟ้าในรถไฟฟ้าต้นแบบ 53

4.2.4 เครื่องวัดกระแสไฟฟ้าแบบหนีบ (Clamp meter) 54

4.2.5 กล้องวีดีโอโทรศัพท์และขาตั้งกล้อง 54

4.2.6 รางขนาดทาง $7\frac{1}{4}$ นิ้ว 55

4.2.7 รถไฟฟ้าต้นแบบ 55

4.3 การสอบเทียบเครื่องชั่งน้ำหนักและการชั่งน้ำหนักของผู้ทดสอบและรถจักรไฟฟ้าต้นแบบ 56

4.4 การสอบเทียบซันมิเตอร์แสดงผลกระแสที่จ่ายจากแบตเตอรี่ 57

4.5 การทดสอบความแม่นยำในการเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าด้วยการหมุนตามองศาของตัวแบ่งแรงดัน 58

4.5.1 ขั้นตอนการทดสอบความแม่นยำในการเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าด้วยการหมุนตามองศาของตัวแบ่งแรงดัน 58

4.5.2 ตารางการทดสอบความแม่นยำในการเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าด้วยการหมุนตามองศาของตัวแบ่งแรงดัน 60

4.6 ขั้นตอนการทดลอง 61

4.7 ผลการทดลอง 63

4.7.1.1 การทดลอง เมื่อพิจารณาที่ แรงดันคงที่ 5.06 โวลต์ 63

4.7.1.2 วิเคราะห์ผลการทดลองการขับเคลื่อนที่แรงดันไฟฟ้าขาเข้ามอเตอร์ 5.06 โวลต์ 66

4.7.2.1 การทดลอง เมื่อพิจารณาที่ แรงดันคงที่ 9.40 โวลต์ 69

4.7.2.2 วิเคราะห์ผลการทดลองการขับเคลื่อนที่แรงดันไฟฟ้าขาเข้ามอเตอร์ 9.40 โวลต์ 71

4.7.3.1 การทดลอง เมื่อพิจารณาที่ แรงดันคงที่ 19.67 โวลต์ 77

4.7.3.2 วิเคราะห์ผลการทดลองการขับเคลื่อนที่แรงดันไฟฟ้าขาเข้ามอเตอร์ 19.6 โวลต์ 80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.4 เปรียบเทียบผลการทดลองกับการลากภาระ 1300 กิโลกรัมด้วยความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง 83
4.8 วิจารณ์ผลการทดลอง 84
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 86
5.1 สรุปผลการทดลอง 86
5.2 ปัญหาที่พบในการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ 87
เอกสารอ้างอิง 89
ภาคผนวก 90
ภาคผนวก ก แบบจำลองแคร่รถไฟ 91
ภาคผนวก ข แบบแชสซี (Chassis) 99
ภาคผนวก ค แบบจานเบรก 100
ภาคผนวก ง พื้นที่หน้าตัดรถจักรไฟฟ้าและขบวนผู้โดยสาร 101
ภาคผนวก จ สัมประสิทธิ์แรงฉุดของอากาศ 102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ตารางแสดงวิธีการดำเนินงาน	3
3.1 ตารางแสดงกำลังที่มอเตอร์ต้องการตามเงื่อนไขที่กำหนด	37
3.2 ตารางแสดงรายละเอียดแรงบิด ความเร็วรอบ กำลังที่ขาออก กำลังขาเข้ากระแสไฟฟ้า และประสิทธิภาพของมอเตอร์	38
3.3 ตารางแสดงกำลังที่มอเตอร์ต้องการตามเงื่อนไขที่กำหนด	45
3.4 ตารางแสดงค่าคุณสมบัติของเหล็ก SS400	50
3.5 ตารางแสดงค่าความเค้นวอนมิสเซสที่มากที่สุดจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในภาระสถิตของแคร่รถไฟ	51
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักของมวลทราบน้ำหนัก (กิโลกรัม) และค่าน้ำหนักที่แสดงผลบนเครื่องชั่งน้ำหนัก (กิโลกรัม)	56
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสซึ่งแสดงผลบนซันมิเตอร์ (แอมแปร์) และค่ากระแสซึ่งแสดงผลบนเครื่องวัดกระแสไฟฟ้าแบบหนีบ (แอมแปร์)	57
4.3 ความสัมพันธ์ขององศาที่หมุนที่กำหนดไว้และแรงดันไฟฟ้าจากการอ่านค่า	60
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่และระยะทางเมื่อใช้แรงดันคงที่ 5.06 โวลต์	63
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่จ่ายออกจากแบตเตอรี่และระยะทางในการเคลื่อนที่	64
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกระแสที่จ่ายออกจากแบตเตอรี่และค่าเฉลี่ยเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ เทียบกับระยะทางในการเคลื่อนที่	64
4.7 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการทดลองการขับเคลื่อนที่แรงดันไฟฟ้าคงที่ 5.06 โวลต์	68
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่และระยะทางเมื่อใช้แรงดันคงที่ 9.40 โวลต์	69
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่จ่ายออกจากแบตเตอรี่และระยะทางในการเคลื่อนที่	69
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกระแสที่จ่ายออกจากแบตเตอรี่และค่าเฉลี่ยเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่เทียบกับระยะทางในการเคลื่อนที่	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.11 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการทดลองการขับเคลื่อน ที่แรงดันไฟฟ้าคงที่ 9.40 โวลต์ 76

4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่และระยะทางเมื่อใช้แรงดันคงที่ 19.67 โวลต์ 77

4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่จ่ายออกจากแบตเตอรี่และระยะทางในการเคลื่อนที่ 78

4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกระแสที่จ่ายออกจากแบตเตอรี่และค่าเฉลี่ยเวลา ที่ใช้ในการเคลื่อนที่เทียบกับระยะทางในการเคลื่อนที่ 78

4.15 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการทดลองการขับเคลื่อน ที่แรงดันไฟฟ้าคงที่ 19.67 โวลต์ 82

4.16 ค่าความเร่ง ความเร็ว ระยะเร่ง และเวลาในการเร่งที่เหมาะแก่การขับเคลื่อน 84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของขบวนรถไฟ	5
2.2 รถจักรไอน้ำ	6
2.3 รถจักรดีเซล	6
2.4 รถจักรไฟฟ้า	7
2.5 แรงต้านการหมุนของล้อ	9
2.6 แรงต้านอากาศ	10
2.7 แรงต้านทางชัน	10
2.8 แรงกระทำต่อหัวรถจักรรถไฟ	11
2.9 ระบบเบรกแบบดรัมเบรก	12
2.10 ระบบเบรกแบบดิสก์เบรก	13
2.11 วงจรไฮโดรลิกของระบบเบรก	13
2.12 ความได้เปรียบเชิงกลของระบบเบรกไฮโดรลิก	14
3.1 แผนภาพแสดงภาพรวมระบบหัวรถจักรไฟแบบย่อขนาด	17
3.2 ภาพสามมิติภาพแสดงภาพรวมระบบหัวรถจักรไฟแบบย่อขนาดด้วยโปรแกรม AutoCAD	17
3.3 โครงสร้างส่วนกลางของแคร่	18
3.4 โครงสร้างแคร่ด้านข้าง	19
3.5 เพลาล้อ	19
3.6 ล้อรถไฟ	20
3.7 สปริง	20
3.8 ตลับลูกปืนรุ่น SKF 6001	21
3.9 ภาพประกอบของแคร่รถจักรไฟฟ้า	21
3.10 แชสซี	22
3.11 จานโซ่จำนวนฟัน 28 ซี่	22
3.12 จานโซ่จำนวนฟัน 10 ซี่	23
3.13 โซ่ลูกกลิ้ง ASME เบอร์ 40	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.14 กล่องคอนโทรลมอเตอร์กระแสตรงรุ่น 36 โวลต์ 1000 วัตต์	24
3.15 ตัวต้านทานปรับค่าได้แบบหมุนแกนขนาด 10 กิโลโอห์ม	24
3.16 แบตเตอรี่ลิเทียมขนาด 36V 7.5 Ah	25
3.17 (ก) แผนภูมิอิสระของวัตถุ (ข) แผนภูมิจลนพลศาสตร์ ของทั้งระบบ	26
3.18 (ก) แผนภูมิอิสระของวัตถุ (ข) แผนภูมิจลนพลศาสตร์ ของหัวจักรรถไฟฟ้า	27
3.19 (ก) แผนภูมิอิสระของวัตถุ (ข) แผนภูมิจลนพลศาสตร์ ของรถขบวนโดยสาร	28
3.20 ขนาดของเพลาล้อ	30
3.21 (ก) แผนภูมิอิสระของวัตถุ (ข) แผนภูมิจลนพลศาสตร์ ของรถขบวนโดยสารที่พิจารณาที่ล้อ	31
3.22 (ก) แผนภูมิอิสระของวัตถุ (ข) แผนภูมิจลนพลศาสตร์ของหัวจักรไฟฟ้า ที่พิจารณาที่ล้อขับเคลื่อน และ ล้อ	33
3.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วรอบ และกำลัง กับ แรงบิดของมอเตอร์ 39	
3.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้า และกำลัง กับ แรงบิดของมอเตอร์	39
3.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กำลำลังขาเข้า กำลังขาออก และประสิทธิภาพ กับ แรงบิดของมอเตอร์	40
3.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ล้อ และกำลังต้านการเคลื่อนที่ กับความเร็วของรถไฟ	41
3.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด กับ ความเร็ว	42
3.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง แรงบิด กับ ความเร็ว	43
3.29 (ก) แผนภูมิอิสระของวัตถุ (ข) แผนภูมิจลนพลศาสตร์ของหัวจักรไฟฟ้าที่พิจารณา ที่ล้อ และ ล้อซึ่งอยู่เพลาเดียวกับจานเบรก	47
3.30 แผนภูมิอิสระของโครงสร้างส่วนกลางของแคร่	50
3.31 ผลความเค้นวอนมิสเซสจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในภาระ สถิตของแคร่รถไฟ	51
4.1 เครื่องชั่งน้ำหนัก	52
4.2 มัลติมิเตอร์ไฟฟ้า	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3 กล่องควบคุมระบบไฟฟ้าในรถไฟฟ้าต้นแบบ	53
4.4 เครื่องวัดกระแสไฟฟ้าแบบหนีบ	54
4.5 กล้องวีดีโอโทรศัพท์และขาตั้งกล้อง	54
4.6 รางขนาดความกว้างทาง $7\frac{1}{4}$ นิ้ว	55
4.7 รถไฟฟ้าต้นแบบ	55
4.8 ตัวอย่างการสอบเทียบเครื่องชั่งน้ำหนัก	56
4.9 การต่ออุปกรณ์เพื่อสอบเทียบซันมิเตอร์และการปรับการสอบเทียบกระแสของซันมิเตอร์	58
4.10 อุปกรณ์เพื่อใช้ในการทดสอบความแม่นยำในการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าด้วยการหมุนตามองศาของตัวแบ่งแรงดัน	58
4.11 การต่ออุปกรณ์เพื่อทดสอบความแม่นยำในการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าด้วยการหมุนตามองศาของตัวแบ่งแรงดัน	59
4.12 องศาของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองและค่าที่อ่านได้	59
4.13 การติดตั้งทางวิ่งความยาว 12 เมตรสำหรับทดลองการวิ่งของรถไฟฟ้าต้นแบบ	61
4.14 การติดตั้งกล้องถ่ายวีดีโอสำหรับทดลองการวิ่งของรถไฟฟ้าต้นแบบ	61
4.15 การเปิดระบบไฟฟ้าโดยการเสียบกุญแจของรถไฟฟ้าต้นแบบ	62
4.16 การบันทึกวีดีโอขณะเริ่มการทดลอง	62
4.17 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่กับระยะทางเมื่อใช้แรงดันคงที่ 5.06 โวลต์	65
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลื่อนที่และกำลังที่ใช้เมื่อใช้แรงดันคงที่ 5.06 โวลต์	65
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและเวลา	66
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งและเวลา	67
4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่กับระยะทางเมื่อใช้แรงดันคงที่ 9.40 โวลต์	70
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลื่อนที่และกำลังที่ใช้เมื่อใช้แรงดันคงที่ 9.40 โวลต์	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและเวลา	72
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและเวลา	72
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและเวลา	73
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งและเวลา	74
4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและเวลา	74
4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งและเวลา	75
4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่กับระยะทาง เมื่อใช้แรงดันคงที่ 19.67 โวลต์	79
4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลื่อนที่และกำลังที่ใช้ เมื่อใช้แรงดันคงที่ 19.67 โวลต์	79
4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและเวลา	80
4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและเวลา	81
4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งและเวลา	81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

α = มุมที่แรงลมกระทำกับรถ

μ = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างล้อกับราง

μ_b = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างผ้าเบรกกับจานเบรก

A_{in} = พื้นที่หน้าตัดของฝั่งทางเข้ากระบอกสูบเบรก (ตารางเมตร)

A_{fl} = พื้นที่หน้าตัดของรถจักรไฟฟ้าต้นแบบ (ตารางเมตร)

A_{fp} = พื้นที่หน้าตัดของรถโดยสาร (ตารางเมตร)

A_{out} = พื้นที่หน้าตัดของฝั่งทางออกกระบอกสูบเบรก (ตารางเมตร)

C = สัมประสิทธิ์ความหนืดต้านทานการหมุน

C_{Dl} = สัมประสิทธิ์แรงฉุดของอากาศที่กระทำต่อรถจักรไฟฟ้า

C_{Dp} = สัมประสิทธิ์แรงฉุดของอากาศที่กระทำต่อรถโดยสาร

C_l = สัมประสิทธิ์ต้านทานการหมุนของล้อ (มิลลิเมตร)

f_w = แรงเสียดทานที่ล้อ (นิวตัน)

$F.S.$ = ค่าตัวประกอบความปลอดภัย

F_x = แรงตามแนวแกนระดับ (นิวตัน)

F_{hand} = แรงที่มือต้องออกกำเบรก (นิวตัน)

F_{brake} = แรงที่ใช้เบรก (นิวตัน)

F_P = แรงที่ใช้ลากจูงตู้โดยสาร (นิวตัน)

F_T = แรงขับเคลื่อน (นิวตัน)

G = เปอร์เซ็นความชัน (%)

I = โมเมนต์ความเฉื่อย (กิโลกรัม เมตรกำลังสอง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

i = อัตราทดเฟือง

m_l = มวลของรถไฟฟ้าต้นแบบ (กิโลกรัม)

m_p = มวลของขบวนผู้โดยสาร (กิโลกรัม)

m_T = มวลรวมของขบวนรถไฟฟ้า (กิโลกรัม)

m_w = มวลของล้อ (กิโลกรัม)

n_s = จำนวนฟันของจานโซ่

n_p = จำนวนฟันของเฟืองมอเตอร์

N = แรงปฏิกิริยาระหว่างล้อกับราง (นิวตัน)

N_e = ความเร็วรอบของมอเตอร์ (รอบ/วินาที)

N_w = ความเร็วรอบของล้อรถไฟ (รอบ/วินาที)

P_e = กำลังจากมอเตอร์ (วัตต์)

P_m = กำลังจากมอเตอร์ (วัตต์)

$P_{resistance}$ = กำลังเนื่องจากแรงต้านการเคลื่อนที่ (วัตต์)

P_w = กำลังที่ล้อรถไฟ (วัตต์)

r = รัศมีของล้อรถไฟ (มิลลิเมตร)

$r_{contract}$ = รัศมีของล้อรถไฟที่สัมผัสกับราง (มิลลิเมตร)

r_{touch} = รัศมีที่เบรกจับจานเบรก (มิลิเมตร)

R_a = แรงต้านอากาศ (นิวตัน)

R_b = แรงปฏิกิริยาระหว่างเพลาล้อและโครงโบกี้ (นิวตัน)

R_g = แรงต้านทางชัน (นิวตัน)

R_p = แรงต้านจากขบวนลากจูง (นิวตัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

R_r = แรงต้านการหมุนของล้อ (นิวตัน)

R_t = แรงที่รถกระทำต่อล้อขับเคลื่อน (นิวตัน)

R_T = แรงต้านทั้งหมดของขบวนรถไฟ (นิวตัน)

R_{touch} = แรงที่ต้องออกเพื่อจับผ้าเบรก (นิวตัน)

R_{ap} = แรงต้านอากาศของขบวนลากจูง (นิวตัน)

R_{rp} = แรงต้านการหมุนของล้อของขบวนลากจูง (นิวตัน)

R_w = แรงปฏิกิริยาเนื่องจากน้ำหนักของตัวรถกระทำต่อล้อ (นิวตัน)

T_T = แรงบิดรวมจากมอเตอร์ (นิวตันเมตร)

V = ความเร็วของขบวนรถไฟ (เมตร/วินาที)

V_a = ความเร็วของอากาศ (เมตร/วินาที)

W = น้ำหนักของขบวนรถไฟ (นิวตัน)

ρ = ความหนาแน่นของอากาศ (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

ρ_s = ความหนาแน่นของเหล็ก (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

η_t = แรงต้านอากาศของขบวนลากจูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีว่าปัญหาการจราจรนั้นกลายเป็นหนึ่งในปัญหาสำคัญของชุมชนเมืองในประเทศไทยจากการวิจัยทางสถิติของศูนย์วิจัยกสิกรไทย[1]พบว่าประชากรภายในกรุงเทพมหานครมีความเครียดจากการเสียโอกาสทางเวลาจากการเดินทางคิดเป็นมูลค่าสูงถึง60 ล้านบาทต่อวัน และยังส่งผลต่อการบริโภคทรัพยากรทางพลังงานเพื่อการขนส่งทั้งภายในประเทศและนำเข้าจากภายนอกประเทศเพิ่มสูงขึ้นถึงปีละ 6,000 ล้านบาท นอกจากนี้ ยังมีปัญหามลภาวะทางอากาศที่ส่งผลต่อสุขภาพและ อื่นๆ อีกมากมาย จากปัญหาดังกล่าวส่งผลให้รัฐบาลจัดทำแผนเพื่อแก้ไขปัญหาการจราจรเหล่านั้นซึ่งหนึ่งในนั้นคือแผนพัฒนาระบบขนส่งทางรางไม่ว่าจะเป็นโครงการรถไฟฟ้าต่างๆภายในกรุงเทพมหานครและหัวเมืองต่างๆที่สำคัญของแต่ละภูมิภาค อีกทั้งโครงการรถไฟทางคู่เชื่อมภูมิภาคสายต่างๆ ด้วยสาเหตุนี้ทางสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จึงได้พัฒนาและจัดทำหลักสูตรเพื่อสร้างบุคคลากรด้านระบบขนส่งทางรางเมื่อปีพ.ศ.2556 นั่นคือ หลักสูตรวิศวกรรมขนส่งทางราง ภายใต้ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งหนึ่งในนโยบายของหลักสูตรวิศวกรรมขนส่งทางราง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คือการสร้างขบวนรถไฟจำลองสำหรับใช้เป็นต้นแบบในการศึกษาและพัฒนาต่อไป

จากทั้งหมดที่กล่าวมาจึงเป็นที่มาของปริญญานิพนธ์การออกแบบและพัฒนารถจักรรถไฟฟ้าสำหรับขนาดความกว้างทาง $7\frac{1}{4}$ นิ้วของทางคณะผู้จัดทำ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของรถจักรรถไฟฟ้า การออกแบบระบบต้นกำลังโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้า ระบบส่งกำลังของหัวจักรรถไฟ และระบบควบคุมการขับเคลื่อน รวมไปถึงการสร้างโมเดลที่ได้จากการศึกษาข้อมูลดังที่กล่าวมาและทดสอบการขับเคลื่อนภายใต้ขอบเขตการศึกษาที่กำหนดไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถจักรรถไฟฟ้า
2. ศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการสร้างกำลังและควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้า
3. ศึกษาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการส่งกำลังโดยใช้โซ่และจานโซ่
4. ศึกษาการใช้โปรแกรมANSYS 14.0 เพื่อใช้ในการพิจารณาความเสียหายของโครงสร้างที่เกิดขึ้นจากภาระแบบสถิต (Static load)
5. ออกแบบ จัดทำและทดสอบรถจักรรถไฟฟ้าย่อส่วน 1 ต่อ 8 สำหรับขนาดความกว้างทาง $7\frac{1}{4}$ นิ้ว
6. ใช้แบบจำลองในการลากจูงตู้รถไฟน้ำหนัก 500 กิโลกรัมจำนวน 2 ตู้

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.ออกแบบและสร้างรถจักรรถไฟฟ้าย่อส่วน 1 ต่อ 8 สำหรับขนาดความกว้างทาง $7\frac{1}{4}$ นิ้ว
2. ออกแบบและสร้างแบบจำลองย่อส่วนหัวรถจักรรถไฟ สำหรับลากจูงตู้โดยสาร 2 ตู้ ซึ่งมีน้ำหนักตู้โดยสาร ตู้ละ 500 กิโลกรัม
3. ออกแบบและสร้างแบบจำลองย่อส่วนหัวรถจักรรถไฟ ที่มีความเร็วสูงสุดที่ 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
4. ออกแบบและสร้างแบบจำลองย่อส่วนหัวรถจักรรถไฟ ที่มีความเร่งเฉลี่ยไปยังความเร็วสูงสุดที่ 1 เมตรต่อ(วินาที)^2
5. ออกแบบและสร้างแบบจำลองย่อส่วนหัวรถจักรรถไฟ ที่มีความแข็งแรงในการรับน้ำหนักกดเพลา 300 กิโลกรัม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ความรู้จากการศึกษาเกี่ยวกับการลดขนาด (แบบจำลองทางเครื่องกล) เพื่อใช้สำหรับการออกแบบจำลองหัวรถจักรรถไฟ
2. ได้ความรู้เกี่ยวกับการออกแบบระบบขับเคลื่อนและระบบเบรกของหัวรถจักรรถไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ออกแบบและควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าโดยการใช้วงจรแบบแรงดันไฟฟ้า
4. เพื่อเป็นหัวรถจักรรถไฟต้นแบบในการศึกษาตัวแปรต่างๆในการออกแบบระบบขับเคลื่อนและระบบเบรกของรถจักรรถไฟฟ้า

1.5 วิธีการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ตารางแสดงวิธีการดำเนินงาน

เดือน / หัวข้อ	ส.ค. 2560	ก.ย. 2560	ต.ค. 2560	พ.ย. 2560	ธ.ค. 2560	ม.ค. 2561	ก.พ. 2561	มี.ค. 2561	เม.ย. 2561
1. ทบทวนการวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้อง ทฤษฎีและเนื้อหาเกี่ยวกับรถไฟที่เราต้องการศึกษา									
2. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสภาพปัจจุบันและการเร่งความเร็ว									
3. จำลองการออกแบบโดยการย่อขนาดจากขนาดจริง									
4. สร้างแบบจำลอง ระบบขับเคลื่อนและระบบเบรก									
5. ทดสอบและวัดผล เปรียบเทียบกับทฤษฎี									
6. แก้ไขข้อผิดพลาดอื่นๆ มากกว่าเชิงทฤษฎี									
7. การทดลองและเก็บผลการทดลอง									
8. นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์และเปรียบเทียบ									
9. สรุปผลการทดลอง									

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและทฤษฎี

2.1 บทนำ

ในการศึกษาเรื่องการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟจำเป็นต้องอาศัยความรู้ ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์แรงที่กระทำกับหัวรถจักรรถไฟเพื่อคิดต้นกำลังให้รถไฟทั้งขบวนสามารถเคลื่อนที่ได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด ประเภทของมอเตอร์ ประเภทเบรก และการวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงสร้าง ซึ่งจะได้กล่าวในบทนี้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sovicka, et.al. [2] ได้ทำการออกแบบการวัดและวิเคราะห์รถจักรรถไฟฟ้าและขนาดความกว้างทางโดยลดขนาดมา 1 ต่อ 8 โดยทำการวัดความเร็วและกำลังขับเคลื่อน และนำข้อมูลทั้ง 2 อย่างนี้มาวิเคราะห์และเปรียบเทียบกับขนาดหัวรถจักรและขนาดทางตามจริง ผลที่ได้คือหัวรถจักรที่มีกำลังขับเพียง 160 วัตต์และมีน้ำหนักเพียง 73 กิโลกรัม สามารถลากภาระได้ถึง 1,300 กิโลกรัม ถึงแม้ความเร็วจะต่ำมากก็ตาม

Liu, et.al. [3] ได้ศึกษาการออกตัวของหัวรถจักรโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งในกระบวนการวิเคราะห์ผลของการออกตัวของหัวรถจักรเพื่อดูการตอบสนองของมอเตอร์กระแสตรงและมอเตอร์กระแสสลับ ผลการทดลองพบว่ามอเตอร์กระแสสลับมีประสิทธิภาพมากกว่ามอเตอร์กระแสตรง และมอเตอร์กระแสสลับมีการสึกหรอน้อยกว่ามอเตอร์กระแสตรงเมื่อสภาวะคงตัว แต่อย่างไรก็ตามมอเตอร์กระแสสลับมีการสึกหรอจากการสั่นมากกว่ามอเตอร์กระแสตรง พฤติกรรมดังต่อไปนี้มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการออกตัว เช่น ความล้า การสึกหรอ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ทฤษฎี

2.3.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับรถไฟ (Basic Knowledge of Train)

โดยทั่วไปนั้นขบวนรถไฟจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆคือ 1. รถจักรรถไฟ 2. ขบวนผู้โดยสาร ดังรูปที่ 2.1 โดยหน้าที่หลักๆของรถจักรรถไฟนั้นคือการทำให้ขบวนรถไฟสามารถเคลื่อนที่ได้ การทำให้รถไฟสามารถเคลื่อนที่ได้นั้นต้องอาศัยต้นกำลังจากหัวรถจักรรถไฟโดยต้นกำลังในยุคแรกๆนั้นมาจากเครื่องจักรไอน้ำดังรูปที่ 2.2 ต่อมามีการใช้ต้นกำลังจากการสันดาปภายในดังรูปที่ 2.3 และในยุคปัจจุบันนั้นมีการใช้ต้นกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้าดังรูป 2.4 ดังนั้นโครงงานนี้ จึงได้ทำการออกแบบและพัฒนาหัวรถจักรเพื่อเป็นต้นแบบในการศึกษาของนักศึกษารุ่นต่อไป



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของขบวนรถไฟ

(ภาพจาก https://constantasimplicity.wordpress.com)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 รถจักรไอน้ำ

(ภาพจาก http://www.asvrr.org/steamlocomotive.html)



รูปที่ 2.3 รถจักรดีเซล

(ภาพจาก https://picpost.postjung.com/295728.html)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 รถจักรไฟฟ้า

(ภาพจาก http://bluetrainshop.weloveshopping.com)

2.3.1.1 รถจักรไฟฟ้า (Electric Locomotive)

รถจักรไฟฟ้า คือ รถไฟที่ไม่มีเครื่องยนต์แต่จะรับกระแสไฟฟ้ามาจากโรงไฟฟ้าผ่านการปรับแรงดันและเข้าตัวกลางในการจ่ายแล้วส่งเข้าไปขับมอเตอร์ที่ตั้งอยู่บนยานพาหนะเพื่อขับเคลื่อนขบวนรถ รถไฟฟ้ามีข้อดี คือ รถไฟฟ้ามีสรรถนะทำงานสูงกว่ารถดีเซลมาก รถไฟฟ้ามีพิสัยทำการเท่ากับความยาวของระบบจ่ายไฟเท่าที่จะไปถึงได้ ไม่ต้องซ่อมบำรุงบ่อยเท่ารถจักรดีเซล ไม่มีเสียงดังและไม่ปล่อยไอเสีย แต่ข้อเสียคือการที่ระบบโครงสร้างพื้นฐานของรถไฟฟ้านั้นมีราคาที่สูง อาทิ ระบบป้อนกระแสไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตามรถไฟฟ้ารางและรถจักรไฟฟ้าก็เป็นที่นิยมอย่างกว้างขวาง

2.3.2 มอเตอร์ไฟฟ้า (Electric motor)

มอเตอร์ไฟฟ้าส่วนใหญ่หมุนได้โดยเกิดจากการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กในตัวมอเตอร์และสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสในขดลวดทำให้เกิดแรงดูดและแรงผลักของสนามแม่เหล็กทั้งสอง โดยทั่วไปมอเตอร์ไฟฟ้าจะมีอยู่ 2 ประเภท คือ มอเตอร์กระแสตรง กับ มอเตอร์กระแสสลับ

2.3.2.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC motor)

หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าเข้าไปยังมอเตอร์ แรงดันไฟฟ้าจะแบ่งออกเป็น 2ส่วน ส่วนที่ 1 จะทำหน้าที่แปรงถ่านผ่านคอมมิวเตเตอร์เข้าไปยังขดลวดอาร์เมเจอร์ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กในตัวมอเตอร์ขึ้น ส่วนที่ 2 กระแสไฟฟ้าจะไหลไปยังขดลวดสนามแม่เหล็ก สร้างสนามแม่เหล็กขั้วเหนือ – ขั้วใต้ขึ้น ตามคุณสมบัติของของสนามแม่เหล็ก เส้นแรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แม่เหล็กทิศตรงข้ามจะหักล้างกัน ทิศเดียวกันจะเสริมแรงกัน ด้วยเหตุนี้ทำให้เกิดแรงบิดที่ตัวโรเตอร์ ข้อดีของมอเตอร์ประเภทนี้ คือ การให้แรงบิดที่สูงที่ความเร็วต่ำ

2.3.2.1.1 การขับมอเตอร์กระแสตรงของรถไฟฟ้า

การควบคุมรอบการหมุนของมอเตอร์กระแสตรงของรถไฟฟ้าทำได้ง่ายที่สุดโดยการใช้ชุดความต้านทานลดแรงดันไฟฟ้าที่เข้าสู่มอเตอร์กระแสตรงโดยทั่วไปรู้จักกันในชื่อ Rheostatic Control อย่างไรก็ตามการควบคุมรอบโดยการใช้ชุดความต้านทานนั้น ทำให้เกิดความร้อนบนชุดต้านทานมากทำให้สูญเสียพลังงานและอาจเกิดการไฟไหม้ในระบบได้ เพื่อปรับปรุงให้ระบบควบคุมรอบการหมุนของมอเตอร์กระแสตรงให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นโดยลดการสูญเสียพลังงานและลดการเสี่ยงต่อการเกิดเพลิงไหม้ จึงมีการประดิษฐ์อุปกรณ์ที่เรียกว่า ไทริสเตอร์ ขึ้นมาควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์กระแสตรง

2.3.2.2 มอเตอร์กระแสสลับ (AC motor)

หลักการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับโดยกระแสไฟฟ้าไหลเข้าขดลวดภายในสเตเตอร์ก็จะสร้างสนามแม่เหล็กขึ้น เนื่องจากกระแสไฟฟ้ากระแสสลับทำให้เกิดเฟสกระแสไฟฟ้าต่างกันและการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้สนามแม่เหล็กเหนือพุ่งเข้าหาสนามแม่เหล็กใต้จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำของกระแสไฟฟ้าในขดลวดโรเตอร์ด้วยเหตุนี้ทำให้โรเตอร์เกิดจะพลังงานกลและสามารถนำไปขับภาระที่ต้องการหมุนได้ ข้อได้เปรียบของมอเตอร์กระแสสลับคือการไม่ต้องใช้แปรงถ่าน ดังนั้นค่าซ่อมบำรุงจะน้อยลง แต่ต้องใช้อินเวอร์เตอร์ในการควบคุมรอบการหมุนอาจก่อให้เกิดคลื่นไฟฟ้ารบกวนการสื่อสาร โดยมอเตอร์กระแสสลับที่นิยมใช้ในงานถ่ายทอดกำลังของขบวนรถไฟต้องมีแรงบิดที่สูงตอนออกตัวซึ่งมอเตอร์กระแสสลับที่นิยมใช้กันมี 2 ประเภท คือ ซิงโครนัสมอเตอร์ และ อะซิงโครนัสมอเตอร์แบบ 3เฟส นอกจากนี้ มอเตอร์กระแสสลับยังมีน้ำหนักเบากว่ามอเตอร์กระแสตรงอีกด้วย

2.3.3 แรงต้านการเคลื่อนที่ (Resistance force)

การที่จะทำให้รถไฟหนึ่งขบวนนั้นเคลื่อนที่ได้นั้นจะต้องอาศัยแรงขับเคลื่อนที่มีทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของขบวนรถซึ่งต้นกำลังอาจมาจากมอเตอร์ไฟฟ้าก็ได้และในทางตรงกันข้ามก็จะเกิดแรงต้านการเคลื่อนที่ของขบวนรถซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกัน การคิดต้นกำลังและแรงต้านการเคลื่อนที่ในการเคลื่อนที่ของขบวนรถอาศัยกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน

$$\Sigma \vec{F} = m\vec{a} \qquad (2.1)$$

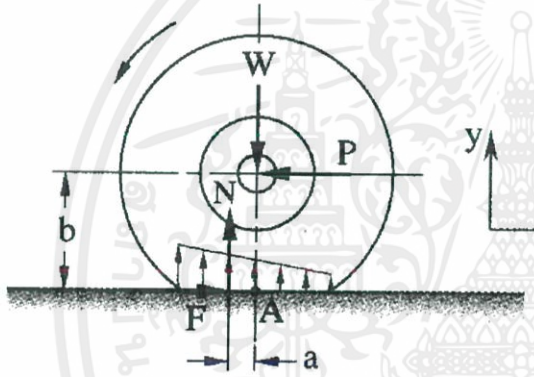
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการเคลื่อนที่ของรถไฟจะมีแรงต้านการเคลื่อนที่อยู่มากตามเงื่อนไขของการเคลื่อนที่ แต่แรงต้านการเคลื่อนที่ส่วนใหญ่ที่พิจารณา คือ แรงต้านการหมุนของล้อ (R_r) , แรงต้านอากาศ (R_a) , แรงต้านจากขบวนลากจูง (R_p)และแรงต้านเนื่องจากความชัน (R_g) ในการถ่ายทอดกำลังจากมอเตอร์ไปยังล้อนั้นจะมีการสูญเสียกำลังไปส่วนหนึ่งก่อนที่กำลังจะถ่ายทอดไปถึงยังล้อ (transmission loss)

2.3.3.1 แรงต้านการหมุนของล้อ (Rolling resistance force)

แรงต้านการหมุนของล้อหรือแรงเสียดทานของล้อเกิดบนพื้นผิวของล้อรถไฟเวลารถไฟเคลื่อนที่นิยามตามสมการ

$$R_r = \frac{C_l W}{r} \tag{2.2}$$



โดย R_r คือ แรงต้านการหมุนของล้อ (นิวตัน)

C_l คือ สัมประสิทธิ์ต้านทานการหมุนของล้อ (มิลลิเมตร)

W คือ น้ำหนักของขบวนรถไฟ (นิวตัน)

r คือ รัศมีของล้อรถไฟ (มิลลิเมตร)

รูปที่ 2.5 แรงต้านการหมุนของล้อ

ถ้า *P* เป็นแรงดันที่ทำให้ล้อสามารถหมุนได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ในขณะที่ล้อกลิ้งไปบนรางนั้นทำให้เกิดความเสียดทานขึ้นและก่อให้เกิดความร้อนขึ้น ถ้าให้ *N* เป็นแรงลัพธ์ทั้งหมดของแรงย่อยในแนวตั้งฉากกับรางและ *W* เป็นน้ำหนักที่กดลงบนล้อจากรูปที่ 2.5 เมื่อล้อกลิ้งด้วยความเร็วคงที่จะได้

$$\Sigma Fy = 0,\ N = W$$

$$\Sigma MA = 0\ Pb - Na = 0$$

$$\therefore P = Na/b = Wa/b$$

เมื่อ *P* เป็นแรงที่กระทำให้ล้อกลิ้งไปบนถนนด้วยความเร็วคงที่ แรงต้านการหมุนของล้อจะมีค่าเท่ากับแรง *P* ในขณะนั้นแรงต้านการหมุนของล้อจะมีค่ามากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับสัดส่วนระหว่าง *a/b* และเรียกสัดส่วนนี้ว่าสัมประสิทธิ์แรงต้านการหมุนของล้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3.2 แรงต้านอากาศ (Air resistance force)

แรงต้านอากาศส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากการที่วัตถุเคลื่อนที่ผ่านอากาศที่มีความต่างความดันด้านหน้าและความดันด้านหลังแตกต่างกันนิยายตามสมการ

$$R_a = \frac{1}{2}\rho A_f C_D V_a^2 \qquad (2.3)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าแรงต้านอากาศจะมีค่าแปรผันตามความเร็วของความเร็วของขบวนรถไฟยกกำลังสอง



รูปที่ 2.6 แรงต้านอากาศ

2.3.3.3 แรงต้านทางชัน (gradient resistance force)

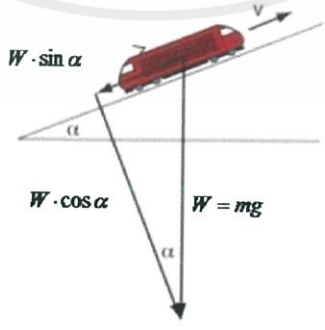
เมื่อขบวนรถไฟเคลื่อนที่ขึ้นทางชัน จะทำให้เกิดแรงต้านทางชันจากน้ำหนักของขบวนรถโดยแรงต้านทางชันจะขึ้นกับน้ำหนักรถ และมุมของความชันของทางนิยามตามสมการ

$$R_g = \frac{WG}{100} \qquad (2.4)$$

โดย R_g คือ แรงต้านทางชัน (นิวตัน)

W คือ น้ำหนักของรถจักรไฟฟ้า (นิวตัน)

G คือ ความชัน (เปอร์เซ็นต์)



รูปที่ 2.7 แรงต้านทางชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3.4 แรงต้านจากขบวนลากจูง (passenger train resistance force)

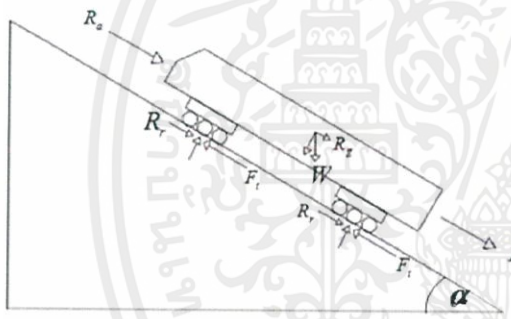
แรงต้านจากขบวนลากจูงเกิดจากผลรวมของแรงต้านอากาศของขบวนลากจูงรวมกับแรงต้านทานการหมุนของล้อขบวนลากจูงนิยามตามสมการ

$$R_p = R_{ap} + R_{rp} \tag{2.5}$$

2.3.3.5 แรงต้านทั้งหมด(total resistance force)

แรงต้านทั้งหมดเกิดจากผลรวมของแรงต้านการหมุนของล้อ แรงต้านอากาศ แรงต้านจากขบวนลากจูงนิยามตามสมการ

$$R_t = R_r + R_a + R_p \tag{2.6}$$



โดย R_t = แรงต้านทั้งหมด (นิวตัน)
R_r = แรงต้านการหมุนของล้อ (นิวตัน)
R_a = แรงต้านทางชัน (นิวตัน)
R_p = แรงต้านจากขบวนลากจูง (นิวตัน)

รูปที่ 2.8 แรงกระทำต่อหัวรถจักรรถไฟ

2.3.4 ประสิทธิภาพการถ่ายทอดกำลัง(Transmission efficiency)

กำลังที่ถูกสร้างจากมอเตอร์ถูกส่งผ่านมายัง โซ่ เพลา และล้อ กำลังส่วนหนึ่งที่ถูกส่งผ่านจะไปยังอุปกรณ์ต่างๆจะมีการสูญเสียออกมาบางส่วน ส่วนที่เหลือยังถูกส่งให้อุปกรณ์นั้นๆ สาเหตุของการสูญเสียกำลังหลักๆ มาจากเช่น 1. ความฝืดของชิ้นส่วนต่างที่ใช้ในการถ่ายทอดกำลัง 2. แรงต้านอากาศที่มีผลต่อชิ้นส่วนต่างๆ ที่กำลังหมุน เป็นต้น

$$P_w = \eta_t P_e \tag{2.7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5 อัตราทดเฟือง (Gear ratio)

ความเร็วของขบวนรถไฟและความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์กัน โดยเมื่อเพิ่มขึ้นความเร็วรอบของมอเตอร์ จะทำให้ความเร็วของขบวนรถไฟเพิ่มขึ้นด้วย และจะขึ้นอยู่กับการใช้อัตราทดเฟืองของโซ่แต่ละชุดด้วย

เมื่อความเร็วของขบวนรถไฟ $$V = 2\pi N_w r \quad (2.8)$$

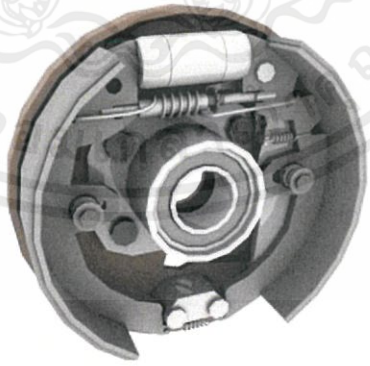
อัตราทดเฟือง $$i = \frac{N_w}{N_e} = \frac{n_s}{n_p} \quad (2.9)$$

2.3.6 ระบบเบรก (Braking system)

ระบบเบรกจะเป็นระบบลดความเร็วของขบวนรถไฟเพื่อให้ปลอดภัยกับผู้โดยสารโดยปกติแล้วระบบเบรกส่วนใหญ่จะใช้หลักการแรงเสียดทานของผ้าเบรกเปลี่ยนแปลงเป็นความร้อนซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ โดยระบบเบรกส่วนใหญ่มีอยู่ 2 ประเภทคือ 1.ดรัมเบรก 2.ดิสก์เบรก

2.3.6.1 ดรัมเบรก (Drum brake)

ดรัมเบรกจะติดตั้งแน่นกับลูกล้อ เมื่อเบรกทำงานกระบอกสูบจะยืดออกทำให้ผ้าเบรกไปเสียดสีกับดุมล้อทำให้ความเร็วลดลงโดยระบบนี้จะทำให้หยุดรถได้โดยเร็ว การเบรกแบบนี้เป็นการถ่ายเทความร้อนได้ยากทำให้ประสิทธิภาพลดลง



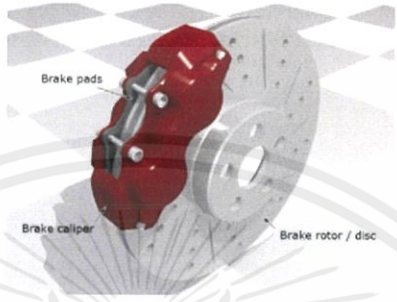
รูปที่ 2.9 ระบบเบรกแบบดรัมเบรก

(ภาพจากhttp://runstop.co.th)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.6.2 ดิสก์เบรก (Disk brake)

การเบรกแบบดิสก์เบรกนั้นจะใช้หลักการเดียวกับดรัมเบรกแต่จะใช้ก้ามเบรกบีบเข้ากับจานเบรก ซึ่งระบบนี้จะถ่ายเท่ความร้อนได้ดีเพราะจานเบรก

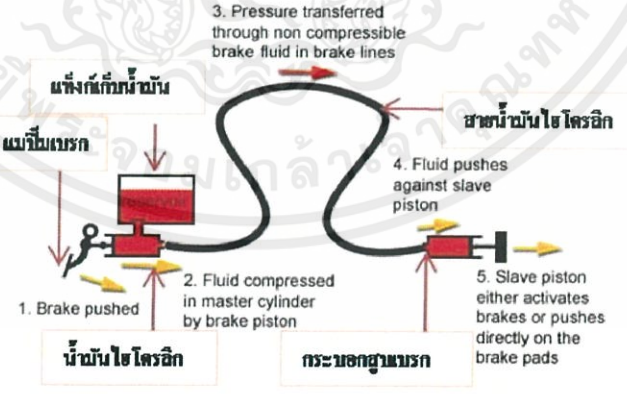


รูปที่ 2.10 ระบบเบรกแบบดิสก์เบรก

(ภาพจาก http://www.tsmotor.co.th)

2.3.6.3 วงจรไฮโดรลิกของระบบเบรก

วงจรไฮโดรลิกของระบบเบรกจะประกอบด้วย แม่ปั๊มเบรก น้ำมันไฮโดรลิก สายน้ำมันไฮโดรลิก แท็งก์เก็บน้ำมันไฮโดรลิก กระบอกสูบเบรก เมื่อกำเบรกน้ำมันไฮโดรลิกจากแท็งก์จะไหลโดยสายน้ำมันไฮโดรลิกเข้ากระบอกสูบเบรก เมื่อคลายเบรกน้ำมันจะไหลออกจากกระบอกสูบเบรกเข้าสู่แท็งก์เก็บน้ำมัน



รูปที่ 2.11 วงจรไฮโดรลิกของระบบเบรก

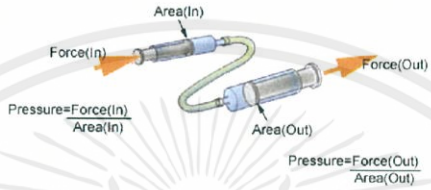
(http://www.tsmotor.co.th)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.6.4 ความได้เปรียบเชิงกลของระบบเบรกไฮโดรลิก

ความได้เปรียบเชิงกลของระบบเบรกไฮโดรลิก คือ อัตราส่วนของแรงที่ใช้ในการกำเบรกต่อแรงเบรก ในการคำนวณแรงที่ต้องกำเบรกกับแรงที่ใช้ในการเบรกสามารถใช้ความได้เปรียบเชิงกลมาใช้ได้ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$F_{brake} = F_{hand} \frac{A_{out}}{A_{in}} \tag{2.10}$$



รูปที่ 2.12 ความได้เปรียบเชิงกลของระบบเบรกไฮโดรลิก

(ภาพจาก http://www.tsmotor.co.th)

2.3.7 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element)

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เป็นการวิเคราะห์เชิงตัวเลข โดยใช้สมการอนุพันธ์ย่อยๆและสมการปริพันธ์ในการวิเคราะห์ เพื่อหาค่าเฉลยและดูแนวโน้มของพฤติกรรมต่างๆโดยการแบ่งลักษณะรูปร่างของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนย่อย(Element) ตามรูปทรงเรขาคณิตพื้นฐานและเชื่อมต่อกันโดย (Node) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ของค่าเฉลยโดยประมาณซึ่งวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถวิเคราะห์ปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็งและโครงสร้างที่ซับซ้อนได้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จึงถูกนำมาใช้ในการศึกษาปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็งเนื่องจากเป็นวิธีที่สามารถเลือกใช้วัสดุและทดสอบได้ก่อนลงมือสร้างจริงได้ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดสอบและวัสดุโดยผลลัพธ์เป็นที่ยอมรับโดยทั่วในวงการวิศวกรรม

ขั้นตอนการทำของระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนหลักๆได้ 3 ขั้นตอน 1.กระบวนการเริ่มต้น เป็นกระบวนการที่แบ่งปัญหาเป็นรูปทรงทางเรขาคณิตย่อยๆออกมา โดยรูปทรงเรขาคณิตจะต้องมีเค้าโครงของเดิมให้มากที่สุดต่อจากนั้นจึงกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุให้เช่น ค่าโมดูลัสของวัสดุ เป็นต้น 2.กระบวนการวิเคราะห์ เป็นขั้นตอนที่จะสร้างสมการอนุพันธ์ย่อยๆออกมาแต่ละชิ้นส่วนย่อยแล้วโปรแกรมจะทำการวิเคราะห์เพื่อหาสมการใหญ่ของปัญหา แล้วจึงหาค่าเฉลยของปัญหาซึ่งจะสามารถอธิบายภาพรวมของปัญหาได้ 3.กระบวนการนำเสนอ โดยปกติแล้วผลเฉลยจะออกมาใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบของค่าตัวเลขในแต่ละชิ้นส่วนย่อย เพื่อเป็นการนำเสนอที่เข้าใจได้ง่ายนั้นสามารถนำเสนอออกมาได้หลากหลายรูปแบบเช่น การแสดงเป็นแถบสีต่างๆ ซึ่งจะสามารถอธิบายผลเฉลยได้ง่าย

2.3.8 ความเสียหายของวัสดุ

การออกแบบชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ต่างๆ ต้องคำนึงถึงความเสียหายของวัสดุ ซึ่งในปริญญานิพนธ์นี้เลือกใช้เหล็กเป็นวัสดุ โดยส่วนมากแล้วนั้นเราจะใช้ทฤษฎีพลังงานของการเปลี่ยนรูป(Distortion energy) โดยมีการใช้ทฤษฎีของวอนมิสเซส (Von Mises) เป็นเกณฑ์ในการพิจารณาความเสียหายที่เป็นที่น่าเชื่อถือสูง โดยจะพิจารณาความเค้นทุกทิศทางที่กระทำกับวัสดุตามสูตร

$$\sigma_{von} = \sqrt{0.5[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 3(\tau_{xy}{}^2 + \tau_{yz}{}^2 + \tau_{zx}{}^2)} \qquad (2.11)$$

โดยที่ σ_{von} คือ ความเค้นตามทฤษฎีความเสียหายของวอนมิสเซส (นิวตันต่อตารางเมตร)

σ_x คือ ความเค้นตั้งฉากตามแนวแกน x (นิวตันต่อตารางเมตร)

σ_y คือ ความเค้นตั้งฉากตามแนวแกน y (นิวตันต่อตารางเมตร)

σ_z คือ ความเค้นตั้งฉากตามแนวแกน z (นิวตันต่อตารางเมตร)

τ_{xy} คือ ความเค้นเฉือนตามแนวระนาบ xy (นิวตันต่อตารางเมตร)

τ_{yz} คือ ความเค้นเฉือนตามแนวระนาบ yz (นิวตันต่อตารางเมตร)

τ_{zx} คือ ความเค้นเฉือนตามแนวระนาบ zx (นิวตันต่อตารางเมตร)

จากนั้นจึงนำสมการที่2.11มาคำนวณหาค่าความปลอดภัย (Factor of Safety: F.S) ที่ค่าความเค้นสูงสุดที่หาได้จากชิ้นงานทดสอบของวัสดุนั้น แต่ไม่สามารถที่จะนำค่าเหล่านั้นมาใช้ในการออกแบบหรือคำนวณได้เลยเพราะแรงหรือน้ำหนักที่เกิดขึ้นจริงในโครงสร้างนั้นอาจจะสูงกว่าค่าที่ได้จากชิ้นทดสอบ ดังนั้นเพื่อป้องกันไม่ให้ค่าความเค้นที่เกิดขึ้นจริงเกินค่าสูงสุดในโครงสร้างนั้นจะรับได้เราจึงจำเป็นต้องกำหนดค่าความปลอดภัยหรือค่าเผื่อ ในการออกแบบชิ้นงานเอาไว้ดังนี้

$$F.S = \frac{\sigma_y}{\sigma_{von}} \qquad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงาน

3.1 บทนำ

ขั้นตอนการดำเนินงานจะเริ่มตั้งแต่การวัดขนาดและเขียนแบบแคร่รถจักรรถไฟฟ้าต้นแบบ จัดทำแคร่รถจักรไฟฟ้าต้นแบบ ออกแบบต้นกำลัง คำนวณอัตราทดเฟือง การเลือกมอเตอร์ การออกแบบระบบเบรก การวิเคราะห์ความเสียหายโดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ความเสียหายของแคร่รถจักรไฟฟ้าต้นแบบด้วยวิธีระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ และการควบคุมความเร็ว

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

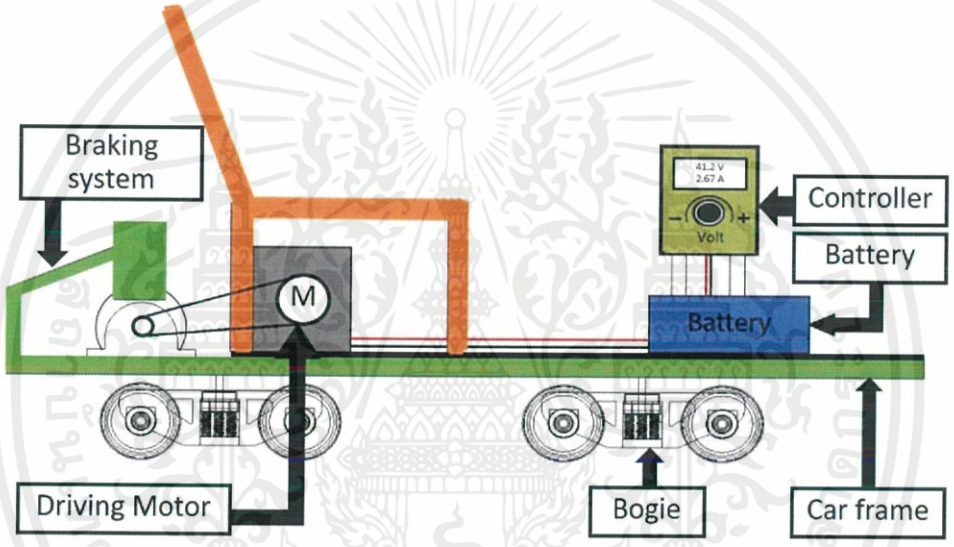
1. เก็บขนาดและเขียนแบบแคร่รถจักรไฟฟ้าต้นแบบ 3D โดยใช้โปรแกรม AutoCAD
2. จัดทำแคร่รถจักรไฟฟ้าต้นแบบ
2. ออกแบบและคำนวณระบบต้นกำลัง
3. คำนวณอัตราทดเฟือง
4. ออกแบบระบบเบรก
5. เลือกมอเตอร์
6. วิเคราะห์ความเสียหายของแคร่รถจักรไฟฟ้าต้นแบบ
7. ประกอบรถ
8. ออกแบบการเก็บผลการทดสอบ และทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

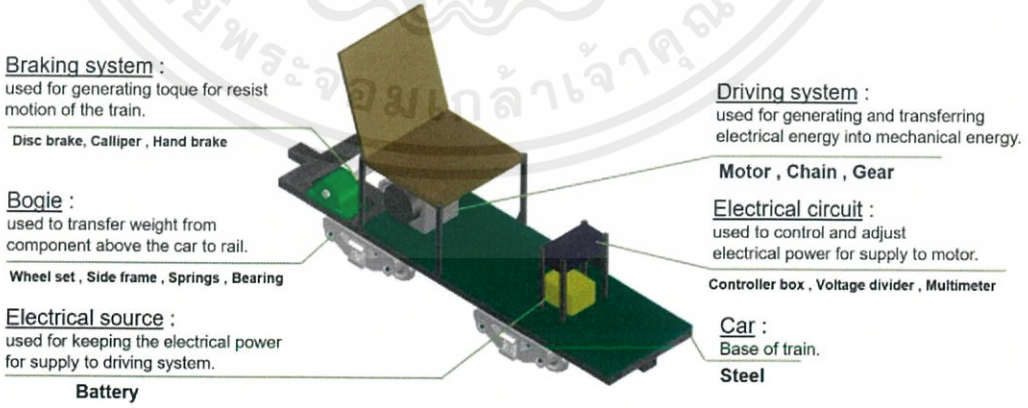
3.3 อุปกรณ์ประกอบชิ้นงาน

3.3.1 ภาพรวมระบบรถจักรไฟฟ้าต้นแบบ

รถจักรไฟฟ้าต้นแบบแบบย่อขนาดประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่างๆที่จำเป็นในการขับเคลื่อนและควบคุมความเร็วของการขับเคลื่อน ได้แก่ ระบบเบรก ระบบส่งกำลังและมอเตอร์ไฟฟ้า แคร่รถไฟ แบตเตอรี่ ระบบควบคุมความเร็วการขับเครื่องโดยใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้และโครงรถไฟ ดังรูปที่ 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงภาพรวมระบบหัวรถจักรไฟแบบย่อขนาด



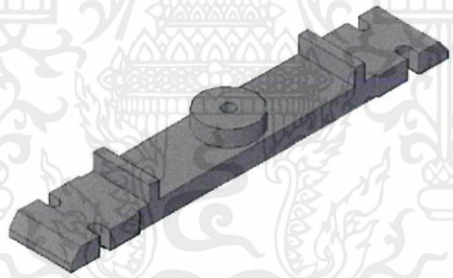
รูปที่ 3.2 ภาพสามมิติแสดงภาพรวมระบบหัวรถจักรไฟแบบย่อขนาดด้วยโปรแกรม Auto CAD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 แคร่รถจักรไฟฟ้าต้นแบบ

แคร่รถจักรไฟฟ้าต้นแบบที่เก็บขนาดและวาดแบบ มีต้นแบบมาจากโครงแคร่แบบ 3 ชิ้น โดยได้ทำการวัดและเขียนแบบโดยใช้โปรแกรม AutoCADไว้ (ภาคผนวก) และได้สร้างชิ้นงานจากวัสดุเหล็ก SS400 ซึ่งสามารถรับภาระได้ 300 กิโลกรัม โดยไม่เกิดความเสียแบบการรับภาระเกิน และความล้า แคร่รถจักรไฟฟ้าต้นแบบมีองค์ประกอบ ดังนี้

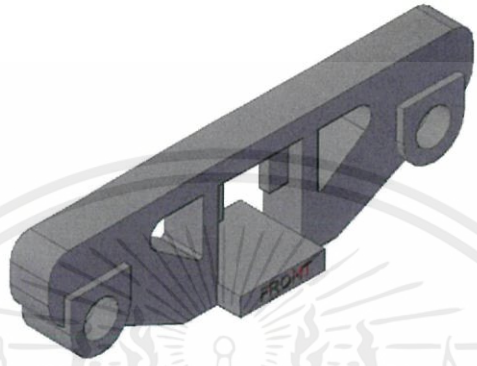
1. โครงสร้างส่วนกลางของแคร่ (Mid Bogie Frame) โดยชิ้นส่วนนี้มีจำนวน 1 ชิ้น ทำการผลิตชิ้นงานออกมาโดยนำเหล็ก SS400 ตัดเป็นท่อนสี่เหลี่ยมให้ได้ขนาดความกว้างและความยาวให้ใหญ่กว่าขนาดที่ออกแบบไว้เล็กน้อย ส่วนความสูงใช้ความสูงจากฐานด้านล่างถึงฐานด้านบนโดยได้ไม่คำนึงถึงชิ้นส่วนที่ยื่นออกมา แล้วนำเหล็กท่อนนั้นไปทำการกลึงขึ้นรูปให้ได้ตามขนาดที่ออกแบบเอาไว้ ส่วนชิ้นส่วนที่ยื่นออกมานั้นจะทำการใช้เหล็กขนาดเท่าที่ออกแบบไว้มาประกอบเข้ากับตัวโครงกลางโดยการเชื่อม



รูปที่ 3.3 โครงสร้างส่วนกลางของแคร่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. โครงสร้างแคร่ด้านข้าง (Side Bogie Frame) โดยชิ้นส่วนนี้ประกอบด้วยกัน 2 ชิ้น ทำการผลิตชิ้นงานออกมาโดยนำเหล็ก SS400 ตัดตามต้นแบบรูปทรงใหญ่กว่าต้นแบบเล็กน้อยโดยใช้การตัดแก๊สแล้วนำเหล็กชิ้นนั้นไปขึ้นรูปโดยกระบวนการกลึง



รูปที่ 3.4 โครงสร้างแคร่ด้านข้าง

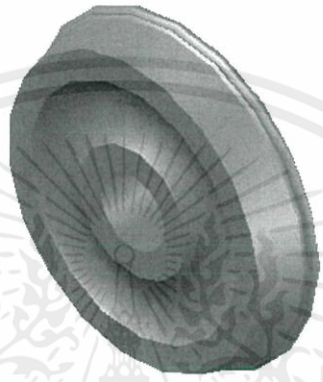
3. เพลาล้อ (Wheel Shaft) โดยชิ้นส่วนนี้มีจำนวนหน่วย 2 ชิ้น ทำการผลิตงานออกมาโดยใช้เหล็ก SS400 เหล็กเพลาขาวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตามขนาดโตสุดของเพลา ความยาวยาวกว่าขนาดที่ออกแบบมาเล็กน้อย แล้วนำเพลาไปผ่านกระบวนการกลึงขึ้นรูปตามขนาด และทำการกลึงเกลียวตามที่ออกแบบไว้



รูปที่ 3.5 เพลาล้อ

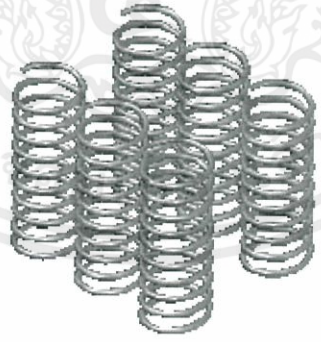
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ล้อรถไฟ (Wheel) โดยชิ้นส่วนนี้มีจำนวน 4 ชิ้น ทำการผลิตชิ้นงานออกมาโดยใช้เหล็ก SS400 ทำการหาเหล็กที่เหลือใช้ที่มีลักษณะเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาใหญ่กว่าที่ออกแบบไว้เล็กน้อย แล้วนำชิ้นงานไปผ่านกระบวนการกลึง



รูปที่ 3.6 ล้อรถไฟ

5. สปริง (Spring) ใช้สำหรับเป็นตัวรับการสั่นสะเทือน โดยชิ้นส่วนนี้มีจำนวน 24 ชิ้น ทำการผลิตชิ้นงานนี้ออกมาโดยใช้เหล็ก SS400 โดยมีจำนวนขด 9 ขดต่อชิ้น



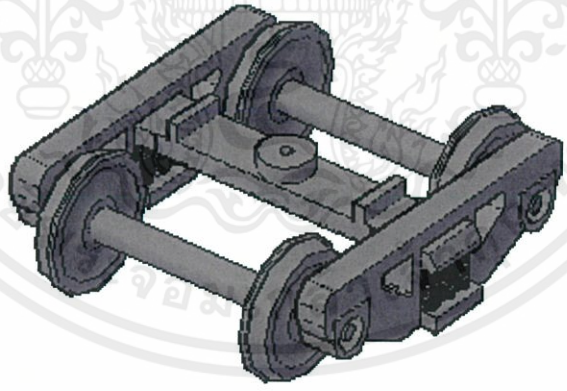
รูปที่ 3.7 สปริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ตลับลูกปืน (Bearing) เป็นชิ้นส่วนที่ทำหน้าที่รักษาแนวรัศมีและแนวแกนของเพลา รับน้ำหนักและถ่ายทอดแรงลงส่วนต่างและช่วยลกแรงเสียดทานในเครื่องจักรที่มีการหมุนโดยชิ้นส่วนนี้มีจำนวน 4 ชิ้น โดยเลือกใช้ตลับลูกปืนรุ่น SKF 6001



รูปที่ 3.8 ตลับลูกปืนรุ่น SKF 6001

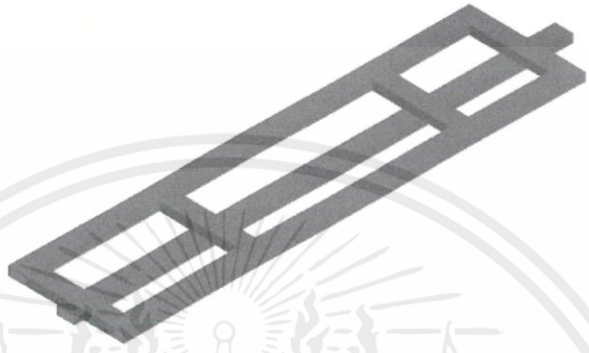


รูปที่ 3.9 ภาพประกอบของแคร่รถจักรไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 แชสซี (Chassis)

แชสซีเป็นโครงของตัวรถไฟที่อยู่ถัดขึ้นมาจากตัวแคร่รถไฟ ทำหน้าที่ในการรับภาระและเป็นที่ว่างอุปกรณ์ต่างๆ ของรถไฟฟ้าต้นแบบ โดยโครงสร้างจะทำมาจากเหล็กกล่อง



รูปที่ 3.10 แชสซี

3.3.4 อุปกรณ์การส่งกำลัง

อุปกรณ์การส่งกำลังทำหน้าที่ส่งกำลังจากมอเตอร์ไปยังเพลาล้อรถไฟ โดยอุปกรณ์ส่งกำลังมีองค์ประกอบดังนี้

1. จานโซ่ (Sprocket) ทำหน้าที่ขับเพลาโดยรับกำลังมาจากมอเตอร์ซึ่งมีจำนวนฟัน 28 ซี่ และ 10 ซี่



รูปที่ 3.11 จานโซ่จำนวนฟัน 28 ซี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 จานโซ่จำนวนฟัน 10 ซี่

2. โซ่ลูกกลิ้ง (Roller Chain) เป็นหนึ่งในชนิดโซ่ที่ใช้ส่งกำลังที่นิยมใช้เพราะมีความแข็งแรงและทนทานต่อการสึกหรอ ซึ่งได้เลือกใช้โซ่ลูกกลิ้ง ASME เบอร์ 40



รูปที่ 3.13 โซ่ลูกกลิ้ง ASME เบอร์ 40

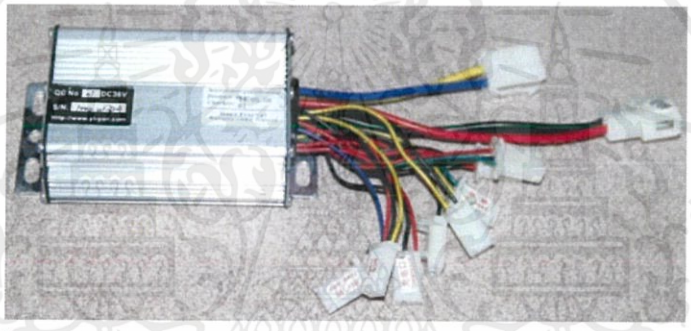
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 อุปกรณ์ควบคุมความเร็ว

อุปกรณ์ควบคุมความเร็วทำหน้าที่ควบคุมความเร็วของรถจักรไฟฟ้า โดยประกอบด้วยอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

1. กล่องคอนโทรล (Controller) กล่องคอนโทรลทำหน้าที่ในการควบคุมระบบอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ตามที่ต้องการเช่น ระบบควบคุมความเร็ว ระบบเบรกไฟฟ้า เสียงแตร เป็นต้น กล่องคอนโทรลมอเตอร์กระแสตรงรุ่น 36 โวลต์ 1000 วัตต์

ทำหน้าที่ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์กระแสตรงขนาด 36 โวลต์ 1000 วัตต์



รูปที่ 3.14 กล่องคอนโทรลมอเตอร์กระแสตรงรุ่น 36 โวลต์ 1000 วัตต์

2. ตัวต้านทานปรับค่าได้แบบหมุนแกน (Potentiometer) ตัวต้านทานปรับค่าได้ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมรงดันไฟฟ้าขาเข้ามอเตอร์กระแสตรง โดยทั่วไปจะใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ขนาด 10 กิโลโอห์ม



รูปที่ 3.15 ตัวต้านทานปรับค่าได้แบบหมุนแกนขนาด 10 กิโลโอห์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.6 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจะประกอบด้วยขั้วบวกและขั้วลบ โดยอิเล็กตรอนจากขั้วลบเคลื่อนที่เข้าสู่วงจรที่ต่อแล้วไหลกลับขั้วบวกของแบตเตอรี่ เมื่อความต่างศักย์เท่ากันแสดงว่าแบตเตอรี่หมด

โดยรายละเอียดแบตเตอรี่จะบอกมา เช่น 36V 7.5Ah ความหมายคือ แบตเตอรี่นี่จะจ่ายแรงดัน 36 โวลต์ แล้วใช้กระแสไฟฟ้าคงที่ 7.5 แอมแปร์ ภายใน 1 ชั่วโมง แบตเตอรี่ถึงจะหมด



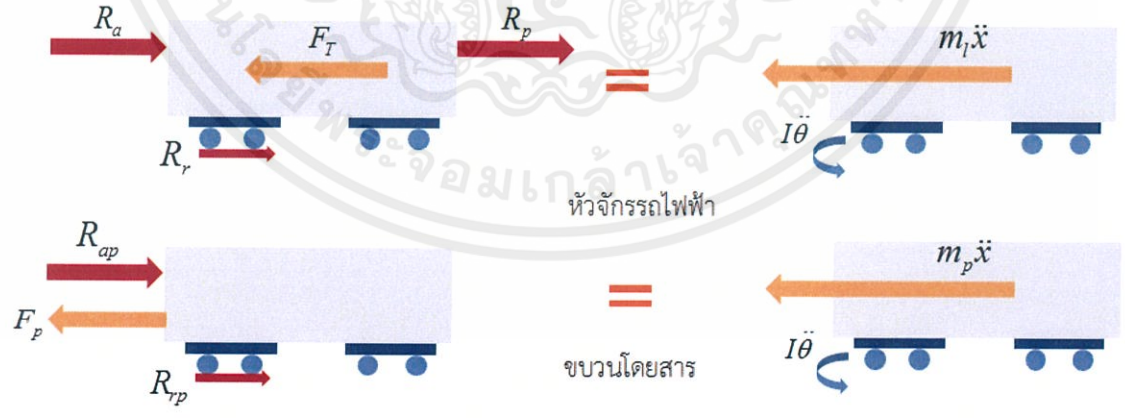
รูปที่ 3.16 แบตเตอรี่ลิเทียมขนาด 36V 7.5 Ah

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การออกแบบระบบต้นกำลัง

<u>สมมติฐาน</u>

1. แรงเบรกไม่ตกค้าง
2. แรงเสียดทานเนื่องจากการรั่วซึมของแบริ่งเป็นศูนย์
3. แรงลมที่กระทำต่อรถมี α = 0 และแรงลมภายนอกเป็นศูนย์
4. ไม่พิจารณาแรงยกหรือแรงกดที่อาจเพิ่มขึ้นจากแรงยก
5. พิจารณาหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมและมี C_D เป็น 0.76 และ 0.21 (ภาคผนวก)
6. สัมประสิทธิ์ต้านทานการหมุนของล้อ C_l = 0.5 mm. [8]
7. น้ำหนักรถรวมอยู่ที่ 300 กิโลกรัม (รวมคนขับ)
8. ประสิทธิภาพการส่งกำลังเป็น 90%
9. วิ่งในแนวระดับแรงต้านจากความชันเป็น $0 < R_g >$
10. ไม่คิดผลของแรงฝืดจากการส่ายไปมาของรถ
11. ไม่คิดถึงความฝืดขณะเข้าโค้ง
12. .ให้ขบวนรถเคลื่อนที่ ที่ความเร็วสูงสุดที่ 20 km/hr หรือ 5.56 m/s

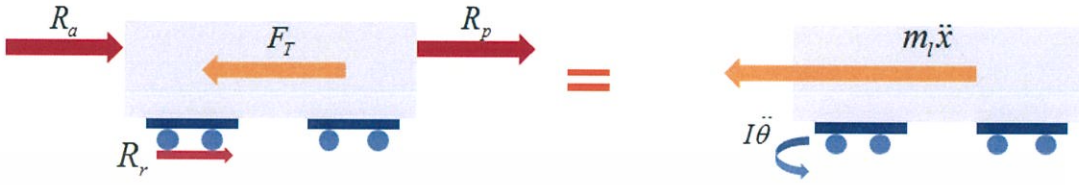


(ก) (ข)

รูปที่ 3.17 (ก) แผนภูมิอิสระของวัตถุ (ข) แผนภูมิจลนพลศาสตร์ ของทั้งระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์หัวจักรรถไฟฟ้า



(ก) (ข)

รูปที่ 3.18 (ก) แผนภูมิอิสระของวัตถุ (ข) แผนภูมิจลนพลศาสตร์ ของหัวจักรรถไฟฟ้า

จากกฎการเคลื่อนเชิงเส้นที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน $\xleftarrow{+} \sum F_x = m_l\ddot{x}$

จะได้ $$F_T - R_a - R_p - R_r = m_T\ddot{x} \qquad (3.1)$$

เพราะฉะนั้นจากรูปสมการที่ (3.1) จะได้ $F_T \geq R_a + R_p + R_r$

พิจารณาที่ความเร็วสูงสุดและคงที่ จะได้($\ddot{x} = 0$) ทำให้($m\ddot{x} = 0$)

จะได้ $$F_T = R_a + R_p + R_r \qquad (3.2)$$

พิจารณาแรงต้านอากาศที่หัวจักรรถไฟฟ้า

จากสมการที่ (2.3) $$R_a = \frac{1}{2}\rho A_{f_l} C_{D_l} V^2$$

โดย $\rho = 1.21\ {}^{kg}/_{m^3}$, $A_{f_l} = 0.18\ m^2$ (ภาคผนวก) , $C_{D_l} = 0.76$, $V = 5.56\ m/s$

จะได้ $$R_a = \frac{1}{2}\times 1.21\times 0.18\times 0.76\times 5.56^2\ N$$

$$R_a = 2.56\ N$$

พิจารณาแรงต้านการหมุนของหัวจักรรถไฟฟ้า

จากสมการที่ (2.2) $$R_r = \frac{C_l W}{r}$$

โดย $C_l = 0.5\ mm$, $r = 50.85\ mm$, $W = 300\times 9.81\ N$

จะได้ $$R_r = \frac{0.5\times 300\times 9.81}{50.85} = 28.94\ N$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์รถขบวนโดยสาร



(ก) (ข)

รูปที่ 3.19 (ก) แผนภูมิอิสระของวัตถุ (ข) แผนภูมิจลนพลศาสตร์ ของรถขบวนโดยสาร

กำหนดให้วิเคราะห์ล้อเช่นเดียวกับสมการที่ (3.1)

ดังนั้น $\overset{+}{\longleftarrow} \sum F_x = m_p\ddot{x}$; $F_p - R_{ap} - R_{rp} = m_p\ddot{x}$ (3.3)

พิจารณาที่ความเร็วคงที่ ($\ddot{x} = 0\ m/s$) ทำให้ ($m_p\ddot{x} = 0$)

ทำให้ $F_p = R_p$

จะได้ $F_p = R_{ap} + R_{rp}$ (3.4)

พิจารณาแรงต้านอากาศ

จากสมการที่ (2.3) $R_{ap} = \frac{1}{2}\rho A_{f_p} C_{D_p} V^2$ (3.5)

โดย $\rho = 1.21\ {}^{kg}/_{m^3}$, $A_{f_p} = 0.27\ m^2$ (ภาคผนวก) , $C_D = 0.21$, $V = 5.56\ m/s$

จะได้ $R_{ap} = \frac{1}{2}(1.21)(0.27)(0.21)(5.56)^2 = 1.06\ N$

พิจารณาแรงต้านการหมุน

จากสมการที่ (2.2) $R_{rp} = \frac{C_l W}{r}$ (3.6)

โดย $C_l = 0.5\ mm$, $r = 50.85\ mm$, $W = 500 \times 9.81\ N$

จะได้ $R_{rp} = \frac{0.5 \times 500 \times 9.81}{50.85} = 48.23\ N$

เพราะฉะนั้นแรงต้านการเคลื่อนที่จากขบวนลากจูงต่อ 1 ขบวนคิดได้จาก

$R_p = R_{ap} + R_{rp}$ (3.7)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_p = 1.06 + 48.23 \quad N$$

$$R_p = 49.29 \quad N$$

ขบวนลากจูง 2 ขบวนจะได้ $R_p = 2 \times 49.29 = 98.58 \quad N$

จากสมการที่ (3.2) $F_T = R_a + R_p + R_r$

จะได้ $F_T = 2.56 + 98.58 + 28.94 \quad N$

$$F_T = 130.08 \quad N$$

จาก $Power = FV$

ดังนั้น กำลังที่ใช้ในการขับเคลื่อนที่(ความเร็วสูงสุด)

คือ $Power = 130.04 \times 5.56 \quad Watts$

$Power = 723.1 \quad Watts$ หรือ $Power = 0.97 \quad Hp$

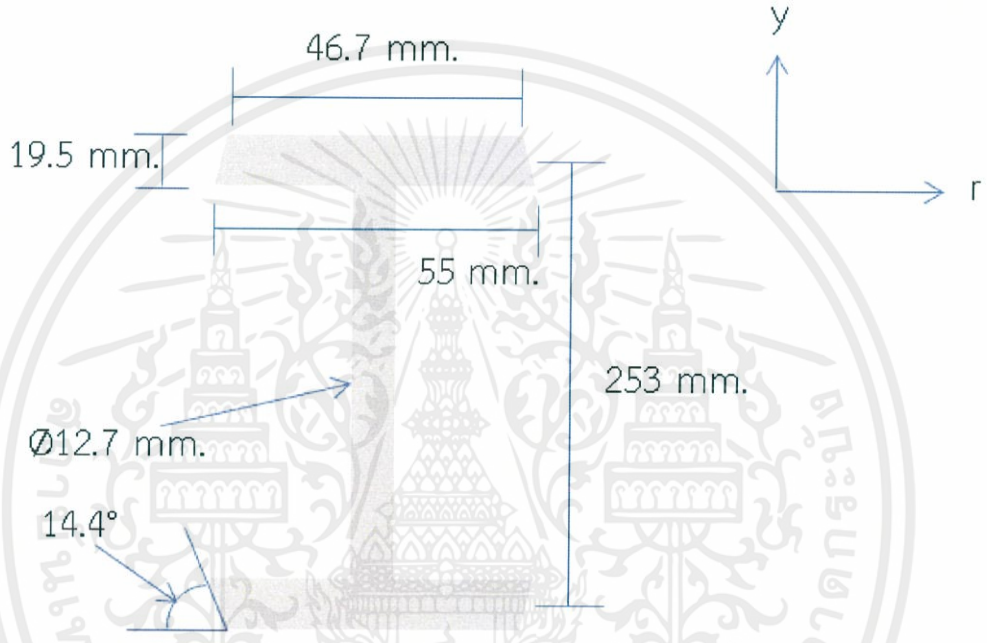
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>พิจารณาค่า I ของชุดล้อ</u>

สมมุติฐาน : 1. ไม่คิดโมเมนต์ความเฉื่อยของชุดเกียร์

2. ไม่พิจารณาความโค้งของบังใบล้อ

3. พิจารณาแกนหมุนอยู่แกนเดียวกันทั้งหมด



รูปที่ 3.20 ขนาดของเพลาล้อ

จากรูปจะได้สมการเส้นตรงของ

$$r = \frac{46.7}{2} + 4.15 - 0.23y$$

$$r = 27.5 - 0.23y \qquad (3.8)$$

จาก $I = \int r^2 dm$

จาก $dm = \rho dV$ จะได้ $I = \rho \int r^2 dV$

จาก $dV = \pi r^2 dy$ จะได้ $I = \rho \int r^2 \left(\pi r^2\right) dy \qquad (3.9)$

จัดสมการที่ (3.8) จะได้ $y = 20 - 4.35r$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แทนสมการที่ (3.8) ลงในสมการที่ (3.9) $I=\rho\left[\int_0^{253}\pi r^4 dy+2\int_0^{19.5}\pi\left(27.5-0.23y\right)^4 dy\right]$

$$I=\pi\rho\left[\int_0^{253}\left(\frac{12.7}{2}\right)^4 dy+2\int_0^{19.5}\left(27.5-0.23y\right)^4 dy\right]$$

$$I=\pi\rho\left(411353.7+2\left(8061111\right)\right)$$

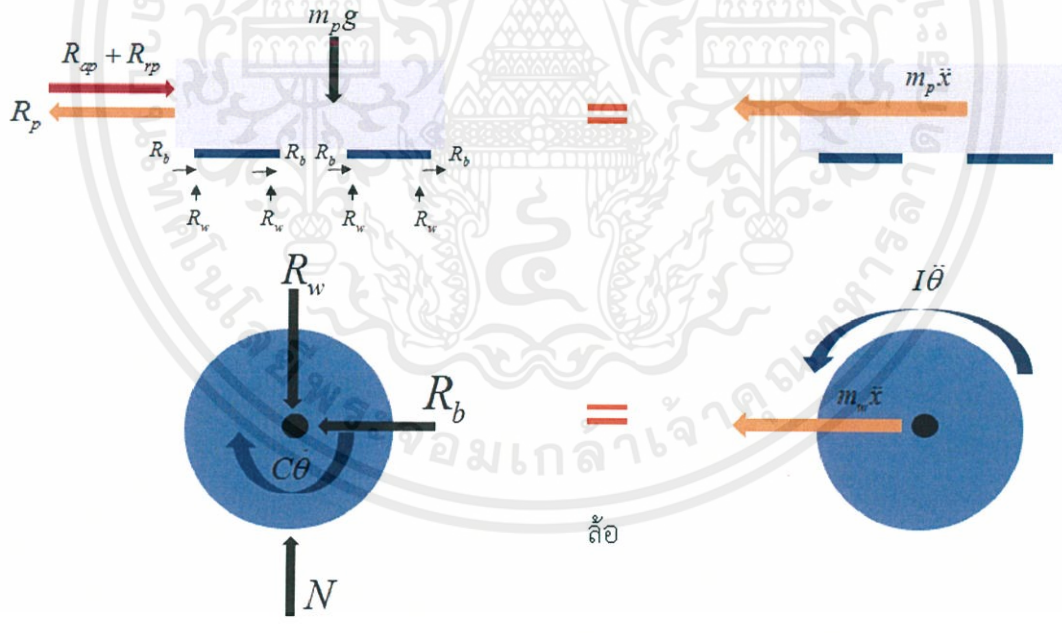
$$I=\pi\rho\left(16533576.7mm^5\right)$$

กำหนดให้ (ความหนาแน่นของเหล็ก) $\rho_s=7.86\times10^3\ \ kg/m^3$

$\therefore$ $$I=\pi\left(7.86\times10^3\ kg/m^3\right)\left(16533576.7\times10^{-8}m^2\right)$$

$$I=4.08\times10^{-4}\ \ kg\cdot m^2$$

<u>พิจารณารถขบวนผู้โดยสาร</u> < หา R_p ขณะเร่ง>



(ก) (ข)

รูปที่ 3.21 (ก) แผนภูมิอิสระของวัตถุ (ข) แผนภูมิจลนพลศาสตร์ ของรถขบวนโดยสารที่พิจารณาที่ล้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติฐาน : 1. ไม่คิดความหนืดต้านการหมุน $C\dot{\theta}=0$

2. พิจารณาว่าล้อของรถทุกล้อรับน้ำหนักเท่ากัน นั่นคือ $R_w=\frac{m_l g}{8}$

3. มวลของรถที่พิจารณารวมผู้โดยสารเป็น 600 kg

<u>พิจารณารูปรถ</u>

$\overset{+}{\longleftarrow}\sum F_x=m\ddot{x}$; $R_p-R_{ap}-R_{rp}-8R_b=m_l\ddot{x}$ (3.10)

<u>พิจารณาล้อ</u>

$\circlearrowleft\sum M_o=I\ddot{\theta}$; $(f_w)r_{contact}-C\ddot{\theta}=I\ddot{\theta}$

$(f_w)r_{contact}=I\ddot{\theta}$ (3.11)

$\overset{+}{\longleftarrow}\sum F_x=m\ddot{x}$; $R_b-f_w=m\ddot{x}$ (3.12)

เพื่อไม่ให้เกิดการลื่นไถล $m\ddot{x}=0$ ดังนั้น $R_b\le f_w$

ดังนั้น หากเร่งที่ความเร่งมากที่สุด $R_b=f_w=\mu N$ (3.13)

จะได้ $R_b=f_w$ แทนในสมการ (3.11)

ดังนั้น จะได้ว่า $R_b=\frac{I\ddot{\theta}}{r_{contact}}$ (3.14)

แทน สมการ (3.14) ลงในสมการ (3.10)

จะได้ $R_p-R_{ap}-R_{rp}-8\left(\frac{I\ddot{\theta}}{r_{contact}}\right)=m_l\ddot{x}$

เนื่องจาก $\ddot{\theta}=\frac{\ddot{x}}{r_{contact}}$ จะได้จากสมการ (3.14) $R_p=R_{ap}+R_{rp}+\left(\frac{8I}{r^2_{contact}}+m_l\right)\ddot{x}$ (3.15)

โดย $R_{ap}=0.03(\dot{x})^2\ N$, $R_{rp}=48.23\ N$, $I=4.08\times10^{-4}\ kg\cdot m^2$, $m_l=500\ kg$

แทนใน สมการที่ (3.15)จะได้

$$R_p=0.03(\dot{x})^2+48.23+\left(\frac{8\left(4.08\times10^{-4}\right)}{0.05^2}+500\right)\ddot{x}$$

$$R_p=501.26\ddot{x}+0.03(\dot{x})^2+48.23 \quad (3.16)$$

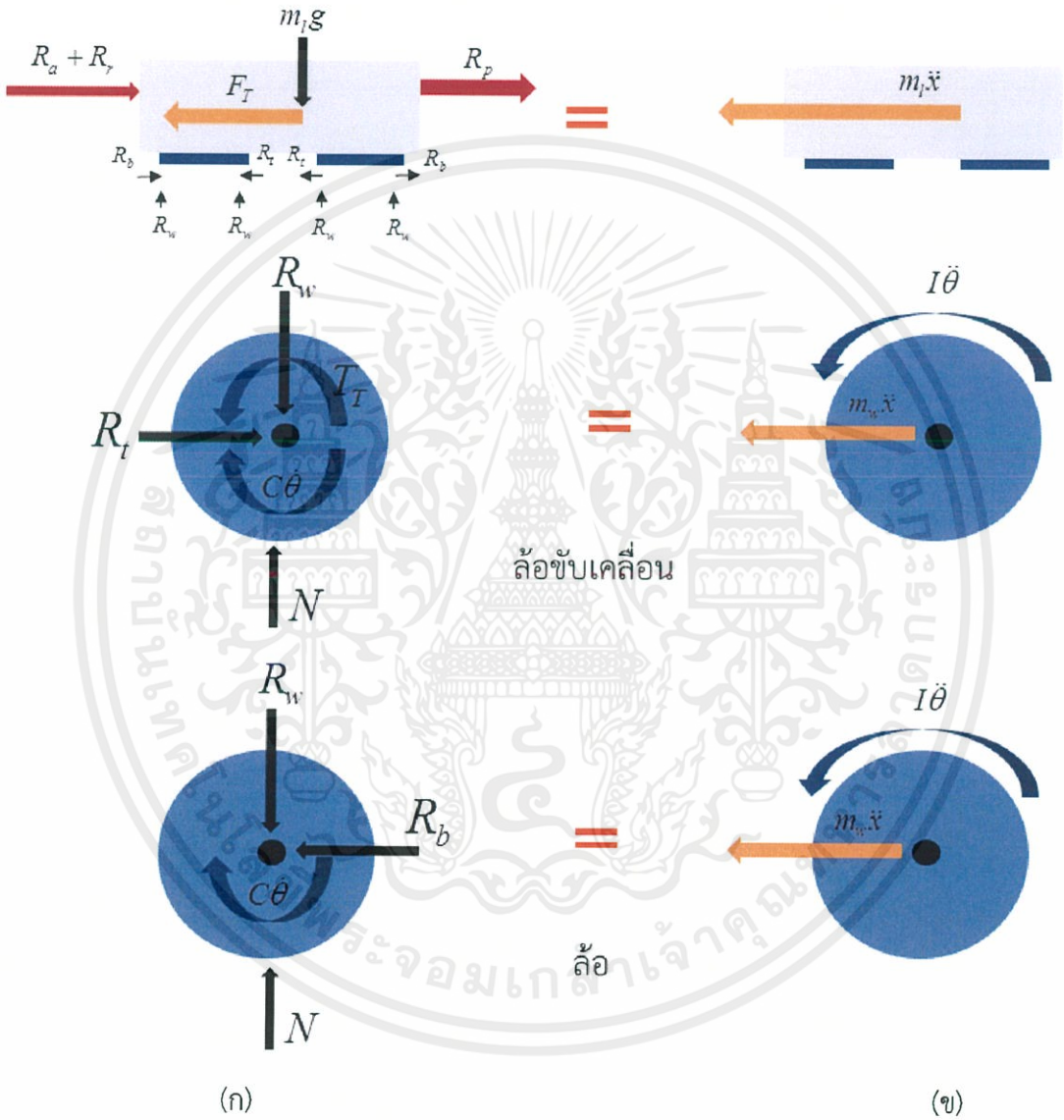
สมการที่ (3.16) แสดงสมการแรงต้านการเคลื่อนที่ของขบวนผู้โดยสาร 1 ขบวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\therefore$ 2 ตู้ จะได้ $R_p = 1002.53\ddot{x} + 0.07\dot{x}^2 + 96.46$

<u>พิจารณาหัวจักรไฟฟ้า</u>

<u>ภาพแยกส่วนวิเคราะห์</u> สมมติฐาน : ล้อทั้ง 8รับแรงเท่ากัน



รูปที่ 3.22 (ก) แผนภูมิอิสระของวัตถุ (ข) แผนภูมิจลนพลศาสตร์ของหัวจักรไฟฟ้าที่พิจารณาที่ล้อขับเคลื่อน และ ล้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<u>พิจารณาหัวจักรรถไฟฟ้า</u>

$$\xleftarrow{+}\sum F_x = m_l\ddot{x}\,; \qquad 4R_t - 4R_b - R_a - R_r - R_p = m_l\ddot{x} \tag{3.17}$$

<u>พิจารณาล้อขับเคลื่อน</u>

$$\circlearrowright \sum M_o = I\ddot{\theta} \quad ; \quad T_T - C\dot{\theta} - r\left(f_w\right) = I\ddot{\theta} \tag{3.18}$$

$$+\uparrow \sum F_y = 0 \quad ; \quad N - R_w = 0 \rightarrow N = R_w$$

$$\xleftarrow{+}\sum F_x = m\ddot{x} \quad ; \quad f_w - R_t = m\ddot{x} \tag{3.19}$$

พิจารณาสมการที่ (3.19) เนื่องจาก แรงเสียดทานถูกจำกัดมากที่สุด ที่ μN เพื่อให้ $m\ddot{x} = 0$

ดังนั้น เพื่อไม่ให้เกิดการ Slip : $R_t \le f_w$

เนื่องจากแรงเสียดทานจะเกิดต้านเท่าที่แรงกระทำ ดังนั้น $R_t = f_w$

จะได้สมการที่ (3.18) เป็น $T_T - r\left(R_t\right) = I\ddot{\theta}$

$$R_t = \frac{T_T - I\ddot{\theta}}{r_{contact}}$$

จาก $\ddot{\theta} = \dfrac{\ddot{x}}{r_{contact}}$ ดังนั้น $R_t = \dfrac{T_T}{r_{contact}} - \left(\dfrac{I}{r_{contact}^{\,2}}\right)\ddot{x}$ (3.20)

<u>พิจารณาล้อปกติ</u>

จากการคำนวณขบวนผู้โดยสารพบว่า $R_b = \left(\dfrac{I}{r_{contact}^{\,2}}\right)\ddot{x}$ (3.21)

แทนสมการ (3.15), (3.20) และ(3.21)แทนในสมการ (3.10)

จะได้ $4\left[\dfrac{T_T}{r_{contact}} - \left(\dfrac{I}{r_{contact}^{\,2}}\right)\ddot{x}\right] - 4\left(\dfrac{I}{r_{contact}^{\,2}}\right)\ddot{x} - R_a - R_r - R_p = m_l\ddot{x}$ (3.22)

$I = 4.08\times10^{-4}\ kg\cdot m^2$, $R_a = 0.08\dot{x}^2$

$R_r = 28.94\ N$, $m_l = 300\ kg$

แทนค่าตัวแปรต่างๆลงในสมการ (3.22) จะได้

$$4\left[\frac{T_T}{0.05}\right] - \left(\frac{4.08\times10^{-4}\times8}{0.051^2} + 300\right)\ddot{x} - 0.08\dot{x}^2 - 28.94 - 1002.53\ddot{x} - 0.07\dot{x}^2 - 96.46 = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นคือ $$78.66T_T - 1303.8\ddot{x} - 0.15\dot{x}^2 - 125.4 = 0 \quad (3.23)$$

จากโจทย์ต้องการเร่งความเร็วไปที่ความเร็วสูงสุดที่ 20 km/hr ด้วยความเร่งเฉลี่ย 1 m/s^2

<u>พิจารณาเวลาที่ใช้เร่งจากออกตัว</u>

จาก $v = u + at$ ดังนั้น $5.56 = 0 + (1)(t)$

นั่นคือ $t = 5.56$ sec

ทำการจัดรูปสมการที่ (3.23)

จะได้ $$78.66T_T - 0.15v^2 - 125.4 = 1303.8\frac{dv}{dt}$$

$$-0.15\left(v^2 + 833.78 - 523.03T_T\right) = 1303.8\frac{dv}{dt}$$

$$\left(\frac{-0.15}{1303.8}\right)dt = \frac{dv}{\left(v^2 + 833.78 - 523.03T_T\right)} \quad (3.24)$$

สมมุติ $a^2 = -833.78 + 523.03T_T$ (3.25)

แทนสมการที่ (3.25) และทำการอินทิเกรตเวลาจาก 0-5.56 sec และความเร็วจาก 0-5.56 m/s ลงในสมการที่ (3.24)

จะได้ $$\int_0^{5.56}\left(-1.15\times10^{-4}\right)dt = \int_0^{5.56}\frac{dv}{v^2 + a^2} \quad (3.26)$$

$$-6.41\times10^{-4} = \frac{1}{a}\left[\arctan\left(\frac{v}{a}\right)\Big|_0^{5.56}\right]$$

$$\frac{1}{a}\left[\arctan\left(\frac{5.56}{a}\right) - \arctan\left(\frac{0}{a}\right)\right] = -6.41\times10^4$$

$$\frac{1}{a}\left[\arctan\left(\frac{5.56}{a}\right)\right] + \left(6.41\times10^4\right) = 0$$

จากตรงนี้ แสดงว่า $T_T \geq \frac{833.78}{523.03}$

$$\frac{1}{v^2 - a^2} = \frac{1}{(v-a)(v+a)}$$

$$\frac{1}{v^2 - a^2} = \frac{A}{v-a} + \frac{B}{v+a}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$1 = Av + aA + Bv - aB$$

เทียบสัมประสิทธิ์ $Av + Bv = 0 \rightarrow A = -B$

$$aA - aB = 1$$

$$-aB - aB = 1$$

$$2aB = -1 \rightarrow B = -\frac{1}{2a}$$

$$\int \frac{1}{v^2 - a^2} dv = \int \frac{A}{v-a} dv + \int \frac{B}{v+a} dv$$

$$\int \frac{1}{v^2 - a^2} dv = A \ln(v-a) + B \ln(v+a) + C$$

$$\int \frac{1}{v^2 - a^2} dv = -B \ln(v-a) + B \ln(v+a) + C$$

$$\int \frac{1}{v^2 - a^2} dv = \left(\frac{1}{2a}\right) \ln(v-a) - \left(\frac{1}{2a}\right) \ln(v+a) + C$$

$$\left(-1.15\text{X}10^{-4}\right)(5.56) = \left(\frac{1}{2a}\right) \ln\left(\frac{5.56-a}{-a}\right) - \left(\frac{1}{2a}\right) \ln\left(\frac{5.56+a}{a}\right)$$

จากการแก้สมการ : $a = -93.16 \therefore a^2 = 8679.2$

นั่นคือ $-833.78 + 523.03 T_T = 8679.2$

$T_T = 18.19 \ N \cdot m / wheel$

และเมื่อพิจารณาทั้ง 4 ล้อ $T_T = 72.76 N \cdot m$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การเลือกมอเตอร์

จากสมการที่ (3.1) $$F_T - R_a - R_p - R_r = m_T \ddot{x}$$

พิจารณาแรงต้านอากาศของหัวจักรไฟฟ้า

จะได้ $$R_a = \frac{1}{2} \times 1.21 \times 0.18 \times 0.76 \times V^2 N = 0.083V^2 \quad N$$

พิจารณาแรงต้านอากาศของขบวนผู้โดยสาร

จะได้ $$R_{ap} = \frac{1}{2} \times 1.21 \times 0.27 \times 0.21V^2 = 0.034V^2 \quad N$$

พิจารณาแรงต้านล้อของทั้งขบวนรถไฟ

จะได้ $$R_r = \frac{0.5 \times 1300 \times 9.81}{50.85} = 125.4 \quad N$$

แทนค่าตัวแปรลงในสมการ (3.1)จะได้สมการของขบวนรถไฟ

$$F_T = 0.083V^2 + 0.034V^2 + 125.4 + 1300a \tag{3.27}$$

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงกำลังที่มอเตอร์ต้องการตามเงื่อนไขที่กำหนด

ลำดับ No.	ความเร็ว $v_n(m/s)$	เวลา $t(s)$	ความเร่ง $a_n(m/s^2)$	แรงขับ N	กำลังที่ล้อ $(W) \rightarrow P = Fv$	กำลังที่มอเตอร์ $(W) \rightarrow P_m = \frac{P_w}{0.9}$
1	0	0	1	1,425.4	0	0
	5.56	5.56	1	1,429.02	7,945.33	**8,828.15**
2	5.56	-	0	129.01	717.29	797
3	5.56	0	-0.5	-520.98	2,896.65	3,218.5
	0	11.11	-0.5	-524.6	0	0

จากเงื่อนไขความเร่ง 1 เมตรต่อวินาทีกำลังสองและความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (5.56 เมตรต่อวินาที) ต้องใช้มอเตอร์ขนาด 8,830 วัตต์ แต่เนื่องจากงบประมาณของกลุ่มจึงได้เลือกใช้มอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

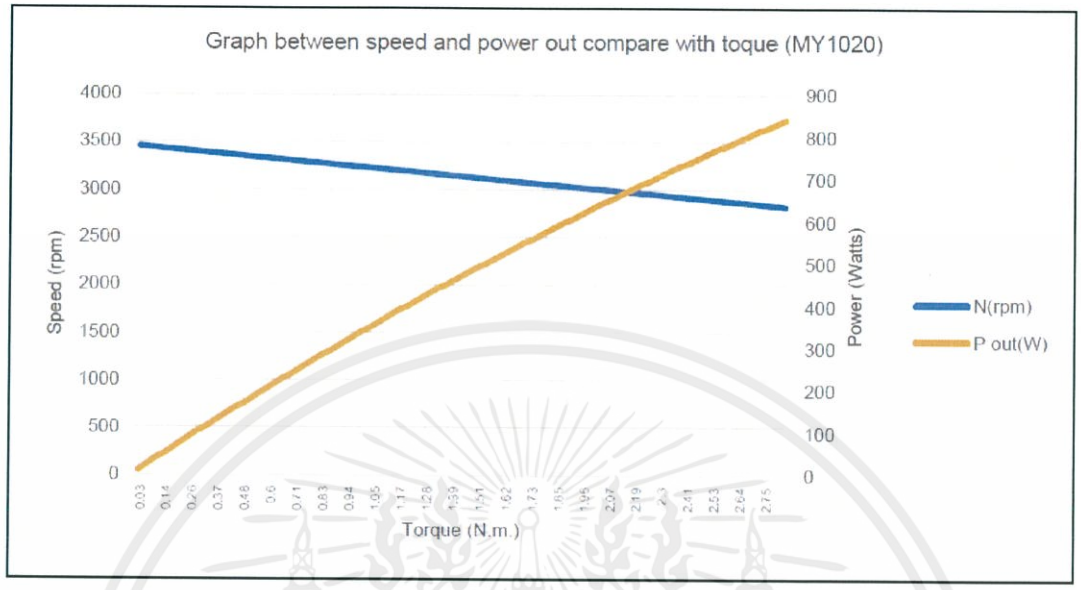
กระแสตรงรุ่น motor MY 1020 1,000 วัตต์ ประสิทธิภาพ 78% ซึ่งรายละเอียดของมอเตอร์จะแสดงใน ตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงรายละเอียดแรงบิด ความเร็วรอบ กำลังที่ขาออก กำลังขาเข้ากระแสไฟฟ้า และประสิทธิภาพของมอเตอร์

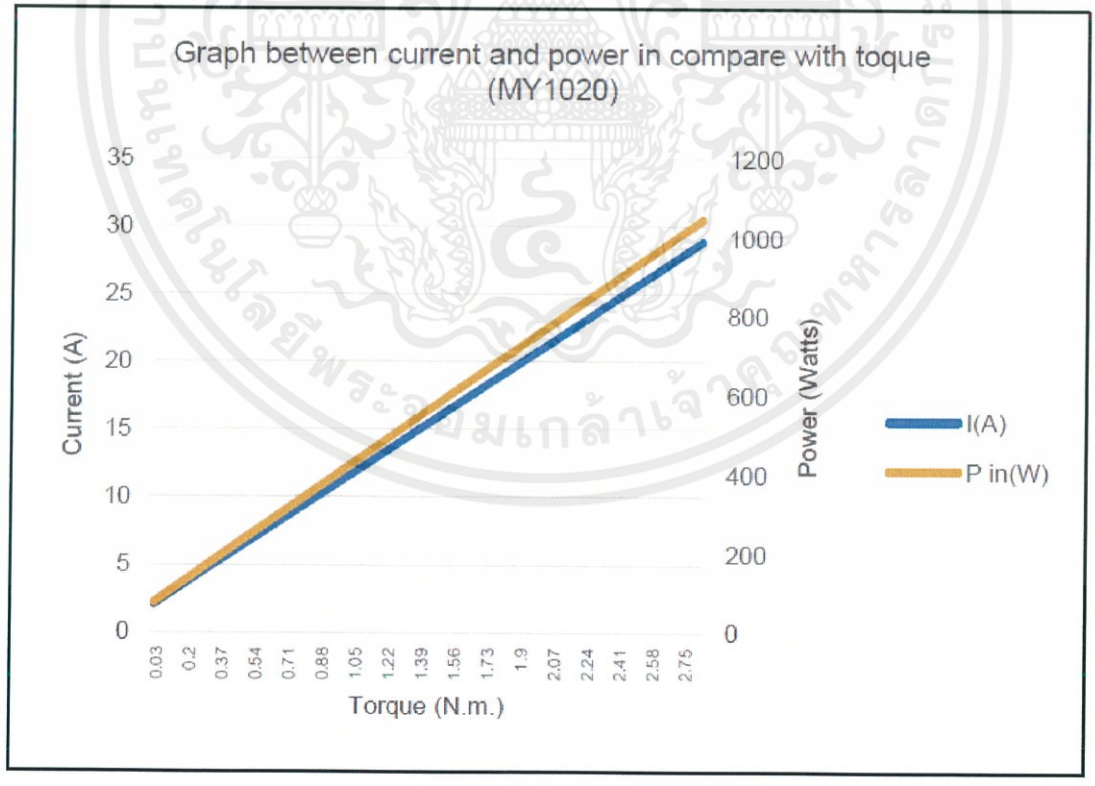
	T(N.m)	N(rpm)	P out(W)	Volt(V)	I(A)	P in(W)	eff (%)
1	0.03	3451	10.84132	36.65	2.07	75.8655	14.29018
2	0.06	3444	21.63865	36.65	2.34	85.761	25.23134
3	0.09	3438	32.40143	36.64	2.61	95.6304	33.88194
4	0.12	3432	43.12651	36.64	2.88	105.5232	40.86922
5	0.14	3425	50.21164	36.63	3.15	115.3845	43.5168
6	0.17	3419	60.86447	36.63	3.42	125.2746	48.58484
7	0.2	3413	71.4796	36.63	3.69	135.1647	52.88333
8	0.23	3406	82.03294	36.62	3.96	145.0152	56.56851
9	0.26	3400	92.56953	36.62	4.23	154.9026	59.75983
10	0.29	3394	103.0684	36.61	4.51	165.1111	62.42368
11	0.31	3387	109.9494	36.61	4.78	174.9958	62.82971
12	0.34	3381	120.376	36.6	5.05	184.83	65.12795
13	0.37	3375	130.7649	36.6	5.32	194.712	67.15813
14	0.4	3368	141.0743	36.6	5.59	204.594	68.95329
15	0.43	3362	151.3847	36.59	5.86	214.4174	70.6028
16	0.46	3356	161.6574	36.59	6.13	224.2967	72.07302
17	0.48	3349	168.3341	36.58	6.4	234.112	71.90325
18	0.51	3343	178.5346	36.58	6.67	243.9886	73.17333
19	0.54	3337	188.6973	36.58	6.94	253.8652	74.32974
20	0.57	3331	198.8224	36.57	7.21	263.6697	75.40586
21	0.6	3324	208.8469	36.57	7.48	273.5436	76.34868
22	0.63	3318	218.8934	36.56	7.75	283.34	77.25469
23	0.66	3312	228.9023	36.56	8.02	293.2112	78.06736
24	0.68	3305	235.3402	36.55	8.29	302.9995	77.67017
25	0.71	3299	245.2768	36.55	8.56	312.868	78.39626
26	0.74	3293	255.1757	36.55	8.84	323.102	78.97681
27	0.77	3286	264.9562	36.54	9.11	332.8794	79.59525
28	0.8	3280	274.7765	36.54	9.38	342.7452	80.16933
29	0.83	3274	284.5592	36.53	9.65	352.5145	80.72268
30	0.85	3267	290.7929	36.53	9.92	362.3776	80.24584
31	0.88	3261	300.5033	36.52	10.19	372.1388	80.75033
32	0.91	3255	310.176	36.52	10.46	381.9992	81.19808
33	0.94	3248	319.7125	36.51	10.73	391.7523	81.61089
34	0.97	3242	329.3067	36.51	11	401.61	81.99664
35	1	3236	338.8631	36.51	11.27	411.4677	82.35473
36	1.02	3230	344.9995	36.5	11.54	421.21	81.90678
37	1.05	3223	354.3769	36.5	11.81	431.065	82.20962
38	1.08	3217	363.8234	36.49	12.08	440.7992	82.53722
39	1.11	3211	373.2322	36.49	12.35	450.6515	82.82058
40	1.14	3204	382.4839	36.48	12.62	460.3776	83.08048
41	1.17	3198	391.8142	36.48	12.89	470.2272	83.32444
42	1.19	3192	397.7642	36.48	13.16	480.0768	82.85428
43	1.22	3185	406.8976	36.47	13.44	490.1568	83.01375
44	1.25	3179	416.1179	36.47	13.71	500.0037	83.22295
45	1.28	3173	425.3005	36.46	13.98	509.7108	83.43956
46	1.31	3166	434.3082	36.46	14.25	519.555	83.59234
47	1.34	3160	443.4123	36.46	14.52	529.3992	83.75764
48	1.36	3154	449.1759	36.45	14.79	539.0955	83.32028
49	1.39	3147	458.0653	36.45	15.06	548.937	83.44587
50	1.42	3141	467.0594	36.45	15.33	558.7785	83.58578
51	1.45	3135	476.0158	36.44	15.6	568.464	83.73719
52	1.48	3129	484.9345	36.44	15.87	578.3028	83.85477
53	1.51	3122	493.6574	36.43	16.14	587.9802	83.95817
54	1.53	3116	499.2346	36.43	16.41	597.8163	83.5097
55	1.56	3110	508.0434	36.43	16.68	607.6524	83.60757
56	1.59	3103	516.6479	36.42	16.95	617.319	83.69222
57	1.62	3097	525.3782	36.42	17.22	627.1524	83.77201
58	1.65	3091	534.0707	36.41	17.49	636.8109	83.86645
59	1.68	3084	542.5496	36.41	17.77	647.0057	83.85546
60	1.71	3078	551.1636	36.41	18.04	656.8364	83.91186
61	1.73	3072	556.523	36.4	18.31	666.484	83.50133
62	1.76	3065	564.8836	36.4	18.58	676.312	83.52411
63	1.79	3059	573.3876	36.39	18.85	685.9515	83.59011
64	1.82	3053	581.854	36.39	19.12	695.7768	83.62653
65	1.85	3046	590.0889	36.38	19.39	705.4082	83.65212
66	1.88	3040	598.4767	36.38	19.66	715.2308	83.67602
67	1.9	3034	603.6497	36.38	19.93	725.0534	83.25589
68	1.93	3028	611.9684	36.37	20.2	734.674	83.29795
69	1.96	3021	620.0441	36.37	20.47	744.4939	83.28398
70	1.99	3015	628.2843	36.36	20.74	754.1064	83.31507
71	2.02	3009	636.4867	36.36	21.01	763.9236	83.31812
72	2.05	3002	644.4368	36.36	21.28	773.7408	83.28847
73	2.07	2996	649.4234	36.35	21.55	783.3425	82.90415
74	2.1	2990	657.516	36.35	21.82	793.157	82.89859
75	2.13	2983	665.3477	36.34	22.09	802.7506	82.88349
76	2.16	2977	673.3617	36.34	22.37	812.9258	82.83187
77	2.19	2971	681.3379	36.34	22.64	822.7376	82.81352
78	2.22	2964	689.044	36.33	22.91	832.3203	82.78592
79	2.24	2958	693.8443	36.33	23.18	842.1294	82.39164
80	2.27	2952	701.7106	36.32	23.45	851.704	82.38902
81	2.3	2945	709.2983	36.32	23.72	861.5104	82.33195
82	2.33	2939	717.0861	36.31	23.99	871.0769	82.32179
83	2.36	2933	724.8362	36.31	24.26	880.8806	82.28541
84	2.39	2927	732.5486	36.31	24.53	890.6843	82.24559
85	2.41	2920	736.9121	36.3	24.8	900.24	81.8573
86	2.44	2914	744.5523	36.3	25.07	910.041	81.81524
87	2.47	2908	752.1547	36.29	25.34	919.5886	81.79252
88	2.5	2901	759.4576	36.29	25.61	929.3869	81.71598
89	2.53	2895	766.9815	36.29	25.88	939.1852	81.66457
90	2.56	2889	774.4677	36.28	26.15	948.722	81.63273
91	2.58	2882	778.6271	36.28	26.42	958.5176	81.23242
92	2.61	2876	786.041	36.27	26.7	968.409	81.16829
93	2.64	2870	793.4172	36.27	26.97	978.2019	81.10976
94	2.67	2863	800.4762	36.26	27.24	987.7224	81.04263
95	2.7	2857	807.7739	36.26	27.51	997.5126	80.97882
96	2.73	2851	815.0339	36.25	27.78	1007.025	80.93482
97	2.75	2844	818.9891	36.25	28.05	1016.813	80.54475
98	2.78	2838	826.1768	36.24	28.32	1026.317	80.4992
99	2.81	2832	833.3269	36.24	28.59	1036.102	80.42907
100	2.84	2825	840.1418	36.24	28.86	1045.886	80.32821

(อ้างอิงข้อมูลจาก https://www.motiondynamics.com.au)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

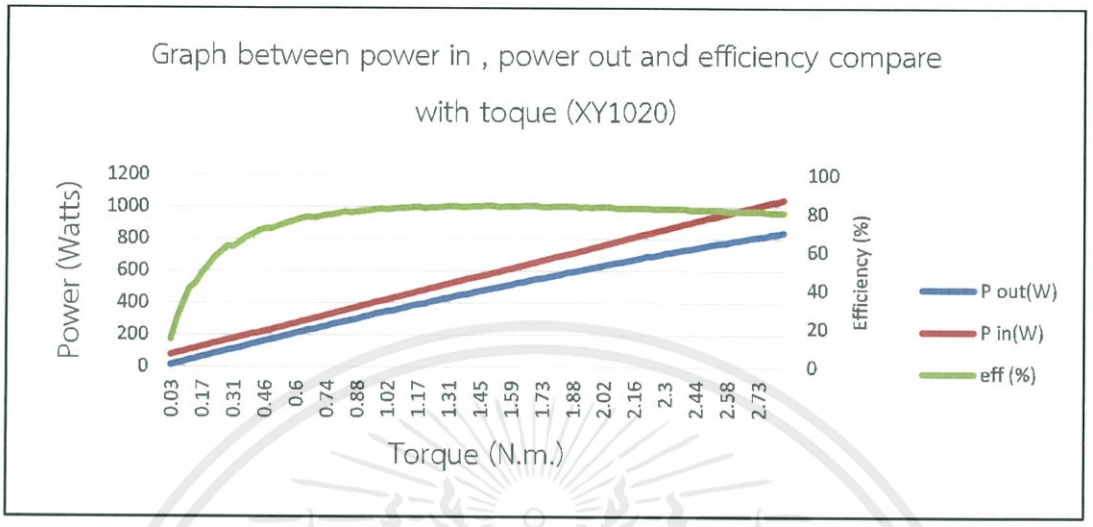


รูปที่ 3.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วรอบ และกำลัง กับ แรงบิดของมอเตอร์



รูปที่ 3.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้า และกำลัง กับ แรงบิดของมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กำลำลังขาเข้า กำลังขาออก และประสิทธิภาพ กับ แรงบิดของมอเตอร์

3.5.1 การวิเคราะห์ความเร็วของมอเตอร์รุ่น MY 1020

จากสมการที่ (3.27) $F_T = 0.083V^2 + 0.034V^2 + 125.4 + 1300a$

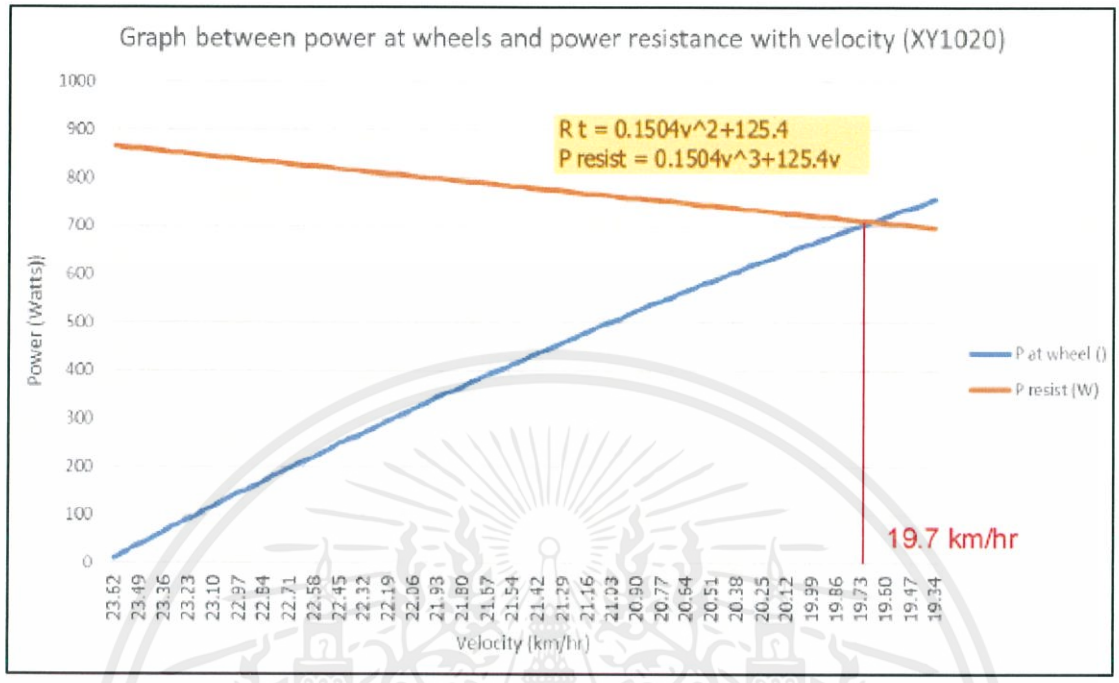
คิดที่ความเร็วสูงสุดและคงที่ ความเร่งจะเป็น $0 \ \ m/s^2$

จะได้ $R_t = 0.117V^2 + 125.4$

จาก $P = FV$ จะได้ $P_{resistance} = 0.117V^2 + 125.4V$

จากการออกแบบ อัตราส่วนเกียร์ คือ 2.8 การสูญเสียการส่งกำลัง คือ 0.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

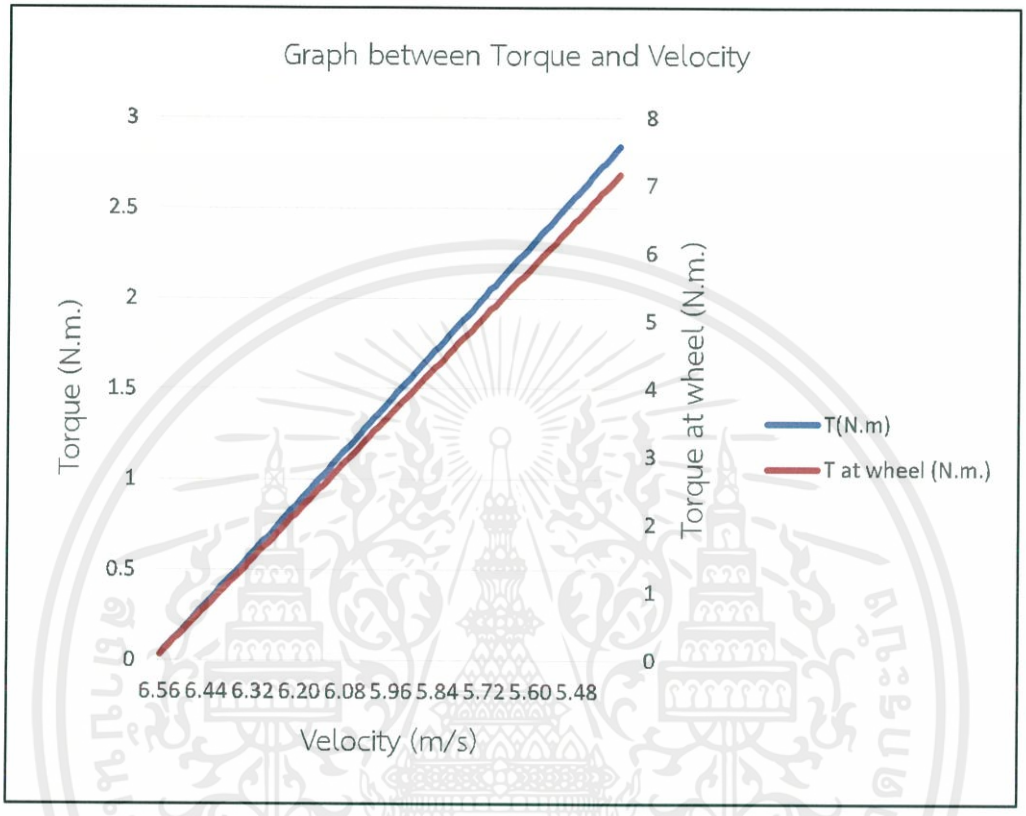


รูปที่ 3.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังที่ล้อ และกำลังต้านการเคลื่อนที่ กับความเร็วของรถไฟ

จากกราฟจะพบว่าความเร็วสูงสุดที่ทำได้ คือ 19.7 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 การวิเคราะห์ความเร่งของมอเตอร์รุ่น MY 1020



รูปที่ 3.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด กับ ความเร็ว

ข้อมูลจากกราฟ สมมุติว่า เราต้องใช้แรงบิด $7.18\ N\cdot m$ ที่จะทำให้ความเร็วเริ่มจาก $0-19.7\ km/hr$

จากการวิเคราะห์สำหรับรถไฟขับเคลื่อน 2 ล้อ

จากสมการที่ (3.23) $$78.66T_T - 1303.8\ddot{x} - 0.15\dot{x}^2 - 125.4 = 0$$

จากรายละเอียดมอเตอร์ : $T_T = 7.16\ N\cdot m$

จากการพิจารณาล้อ 2 ล้อ : $T_T = 3.58\ N\cdot m$

จากสมการที่ (3.24) $$\left(\frac{-0.15}{1303.8}\right)dt = \frac{dv}{\left(v^2 + 833.78 - 523.03T_T\right)}$$

ทำการอินทิเกรตทั้ง 2 ข้างจากเวลาที่ $0-t(s)$ ความเร็วจาก $0-19.7\ km/hr$ หรือ $0-5.47\ m/s$ แล้วแทนแรงบิดเป็น $1.79N\cdot m$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

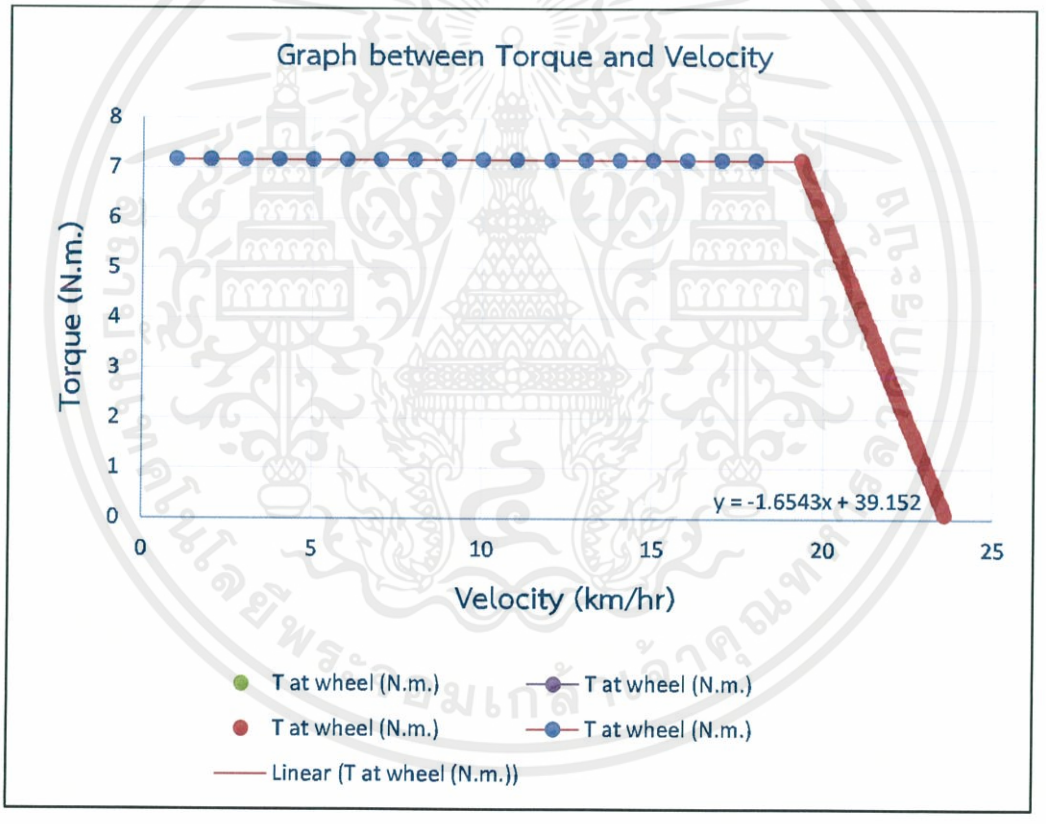
ดังนั้น $$\int_0^t \left(\frac{-0.15}{1303.8}\right)dt = \int_0^{5.47} \frac{dv}{(v^2 + 833.78 - 523.03 \cdot (\frac{3.58}{2}))}$$

เมื่อ $t = 528.86$ sec = 8 min 49 sec

จาก $v = u + at$

$5.56 = 0 + a \cdot (528.86)$

ดังนั้น $a = 0.010513\ m/s^2$



รูปที่ 3.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง แรงบิด กับ ความเร็ว

อย่างไรก็ตามความเร่งเฉลี่ยที่ทำได้นั้นย่อมมากกว่า 0.0105 เมตรต่อ(วินาที)^2 เนื่องจากค่าแรงบิดที่ใช้ในการคำนวณนั้นพิจารณาจากแรงบิดที่สูงที่สุดที่ความเร็วรอบ 2825 รอบต่อนาที ซึ่งหากพิจารณาที่ความเร็วรอบที่ต่ำกว่านั้นย่อมมีแรงบิดที่มากขึ้นเป็นผลให้ความเร่งเฉลี่ยเพิ่มมากขึ้น โดยหากต้องการที่จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ค่าความเร่งเฉลี่ยที่แม่นยำยิ่งขึ้นควรทำการทดลองหาค่าแรงบิดและความเร็วรอบที่ความเร็วรอบเริ่มต้นที่ศูนย์รอบต่อนาทีจนถึงที่ความเร็วรอบ 3000 รอบต่อนาทีและสร้างสมการระหว่างแรงบิดและความเร็วรอบมาเพื่อพิจารณาต่อไป

3.6 อัตราทดเฟือง (Gear ratio)

จากสมการที่ (2.8) $$V = 2\pi N_w r$$

กำหนดให้ $V = 5.56 \ \ m/s, r = 50.85 \ \ mm.$

แทนค่าลงสมการที่ (2.8) $$5.56 = 2\pi N_w \times \frac{50.85}{1,000}$$

ดังนั้น $$N_w = 17.4 \ \ rev/s$$

จากตารางข้อมูลรายละเอียดมอเตอร์รุ่น MY 1020 ตารางที่ 3.1 ที่กำลังประมาณ 730 วัตต์ รอบของมอเตอร์ประมาณ 3,000 รอบ/นาที

$$i = \frac{N_e}{N_w} = \frac{(3000/60)}{17.4} = 2.87$$

จากการคำนวณอัตราทดเราจะได้อัตราทดที่ 2.8 แต่ในความเป็นจริงเราควรเลือกใช้จานโซ่ที่มีขายตามท้องตลาดที่มีคือ 10 ฟัน และ 28 ฟัน เพราะฉะนั้นอัตราทดจะเป็น 2.8 ซึ่งอัตราทดเฟือง 2.8 นอกจากจะส่งผลต่อความเร็วรอบของจานโซ่ที่เพลาขับแล้วยังส่งผลต่อแรงบิดด้วยเช่นกัน โดยจะเพิ่มแรงบิดจากที่มอเตอร์มายังจานโซ่ที่เพลาขับเป็น 2.8 เท่า ซึ่งเพิ่มจาก 2.84 เป็น 7.95 เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการส่งกำลังที่ 90 เปอร์เซ็นจะได้แรงบิดที่ใช้ในการพิจารณาการเร่งเป็น 7.16 ดังแสดงในหัวข้อ 3.5.2

3.7 ความเร็วและความเร่งที่เหมาะสมในการเคลื่อนที่

จากหัวข้อ 3.5 พบว่าระยะเวลาในการเร่งของมอเตอร์ MY1020 ตามเงื่อนไขจากหยุดนิ่งไปยังความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงใช้เวลาทั้งสิ้น 8 นาที 49 วินาทีและจำเป็นต้องมีระยะเร่งรวมทั้งสิ้น 1430 เมตรหรือ 1.43 กิโลเมตร(2.78 เมตรต่อวินาที) ซึ่งไม่เหมาะสมในการเคลื่อนที่ทางคณะผู้จัดทำจึงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบเงื่อนไขใหม่ในการเคลื่อนที่คือความเร็วสงสุดที่ 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมงและความเร่งเฉลี่ย 0.1 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง

จากสมการที่ (3.1) $$F_T - R_a - R_p - R_r = m_T\ddot{x}$$

พิจารณาแรงต้านอากาศของ locomotive

จะได้ $$R_a = \frac{1}{2}\times 1.21\times 0.18\times 0.76\times V^2 N = 0.083V^2 \quad N$$

พิจารณาแรงต้านอากาศของขบวนผู้โดยสาร

จะได้ $$R_{ap} = \frac{1}{2}\times 1.21\times 0.27\times 0.21V^2 = 0.034V^2 \quad N$$

พิจารณาแรงต้านล้อของทั้งขบวนรถไฟ

จะได้ $$R_{rt} = \frac{0.5\times 1300\times 9.81}{50.85} = 125.4 \quad N$$

แทนค่าตัวแปรลงในสมการ (3.1)จะได้สมการของขบวนรถไฟ

$$F_T = 0.083V^2 + 0.034V^2 + 125.4 + 1300a$$

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงกำลังที่มอเตอร์ต้องการตามเงื่อนไขที่กำหนด

ลำดับ No.	ความเร็ว $v_n(m/s)$	เวลา $t(s)$	ความเร่ง $a_n(m/s^2)$	แรงขับ N	กำลังที่ล้อ $(W) \rightarrow P = Fv$	กำลังที่มอเตอร์ $(W) \rightarrow P_m = \frac{P_w}{0.9}$
1	0	0	0.1	255.4	0	0
	2.78	27.8	0.1	256.3	712.53	**780.7**
2	2.78	-	0	126.3	351.11	390.13

เมื่อพิจารณาอัตราทดเกียร์ (Gear ratio) สำหรับความเร็ว 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

จากสมการที่ (2.8) $$V = 2\pi N_w r$$

กำหนดให้ $V = 2.78\ m/s\ , r = 50.85\ \ mm.$

แทนค่าลงสมการที่ (2.8) $$2.78 = 2\pi N_w \times \frac{50.85}{1,000}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น $$N_w = 8.70 \ \ rev/s$$

จากตารางข้อมูลรายละเอียดมอเตอร์รุ่น MY 1020 ตารางที่ 3.1 ที่กำลังประมาณ 730 วัตต์ รอบของมอเตอร์ประมาณ 3,000 รอบ/นาที

$$i = \frac{N_e}{N_w} = \frac{(3000/60)}{8.70} = 5.75$$

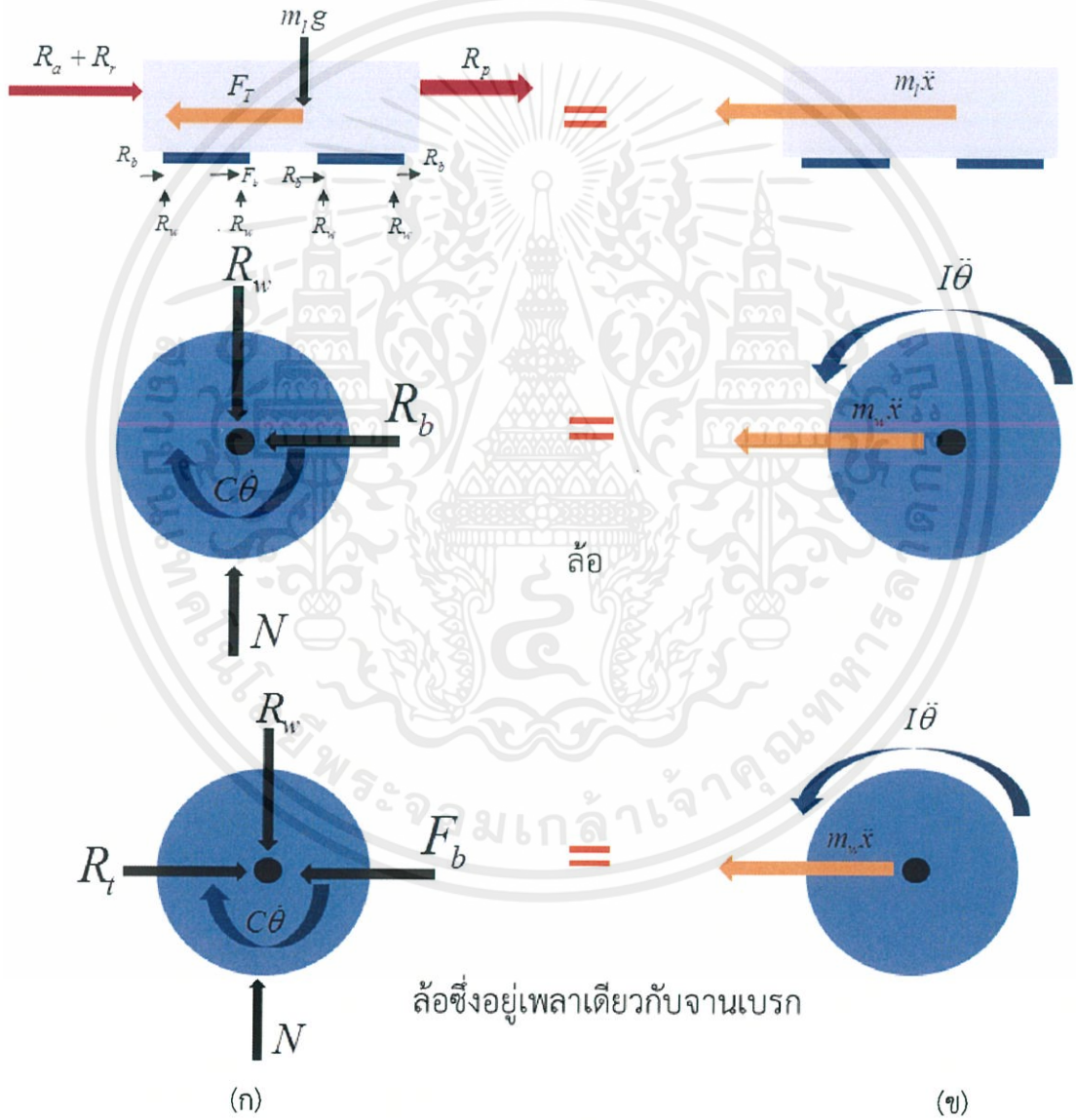
จากการคำนวณอัตราทดเราจะได้อัตราทดที่ 5.75 แต่ในความเป็นจริงเราเลือกใช้จานโซ่ที่สามารถทำความเร็วได้สูงสุดที่ 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมงตามเงื่อนไขในหัวข้อ 3.6 ซึ่งมีอัตราทด 2.8 ซึ่งสามารถทำความเร็วสูงสุดที่ 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เพราะฉะนั้นอัตราทดจะเป็น 2.8 ดังเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8 การออกแบบระบบเบรก

กำหนดให้ $a=-0.5\ m/s^2$, $u=20\ km/hr\ =5.56\ m/s$, $v=0\ m/s$, $\rho=1.21\ kg/m^3$, $r=50.85\ mm$, $A_{fl}=0.18\ m^2$, $C_{dl}=0.76$, $A_{fp}=0.27\ m^2$, $C_{dp}=0.21$, $m=1303.8\ kg$, $C_l=0.5$

<u>พิจารณาหัวจักรไฟฟ้า</u>



รูปที่ 3.29 (ก) แผนภูมิอิสระของวัตถุ (ข) แผนภูมิจลนพลศาสตร์ของหัวจักรไฟฟ้าที่พิจารณาที่ล้อ และ ล้อซึ่งอยู่เพลาเดียวกับจานเบรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ $v = u + at$

แทนค่าลงสมการ $0 = 5.56 + (-0.5)t$

ดังนั้น $t = 11.12$ sec

จากสมการข้อที่ 2 ของนิวตัน $\sum F = ma$

$$-F - R_a - R_{ap} - R_r = m\frac{dv}{dt}$$

$$-F - \frac{1}{2}\rho A_{f_l} C_{d_l} V^2 - 2\times\frac{1}{2}\rho A_{f_p} C_{d_p} V^2 - \frac{C_l W}{r} = m\frac{dv}{dt}$$

$$-F - \frac{1}{2}\times 1.21\times 0.18\times 0.76\times V^2 - 1.21\times 0.27\times 0.21\times V^2 - \frac{0.5\times 9.81\times 1300}{50.85} = 1300\times\frac{dv}{dt}$$

$$-F - 0.08V^2 - 0.07V^2 - 125.4 = 1300\frac{dv}{dt}$$

$$-0.15(V^2 + 125.4 + 6.667F) = 1300\frac{dv}{dt}$$

$$\int_0^{11.12}\left(\frac{-0.15}{1300}\right)dt = \int_{5.56}^{0}\frac{dv}{(V^2 + 125.4 + 6.67F)}$$

สมมุติ $F = 500,\quad -1.602\times10^{-3} = \int_{5.56}^{0}\frac{dv}{(V^2 + 125.4 + 6.67F)} \neq -1.283\times10^{-3}$

$F = 550,\quad -1.461\times10^{-3} = \int_{5.56}^{0}\frac{dv}{(V^2 + 125.4 + 6.67F)} \neq -1.283\times10^{-3}$

$F = 590,\quad -1.365\times10^{-3} = \int_{5.56}^{0}\frac{dv}{(V^2 + 125.4 + 6.67F)} \neq -1.283\times10^{-3}$

$F = 610,\quad -1.322\times10^{-3} = \int_{5.56}^{0}\frac{dv}{(V^2 + 125.4 + 6.67F)} \neq -1.283\times10^{-3}$

$F = 629,\quad -1.283\times10^{-3} = \int_{5.56}^{0}\frac{dv}{(V^2 + 125.4 + 6.667F)} = -1.283\times10^{-3}$

เพราะฉะนั้นแรงที่ใช้ในการเบรกคือ $629N$

$$T = F_{brake} r_{wheel} = 2\mu_b R_{touch} r_{touch}$$

$$629\times 50.85\times10^{-3} = 2\times 0.35\times R\times 4\times10^{-2}$$

$$R = 1{,}142\ N \text{ หรือ } R = 116\ kg$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.1.ความได้เปรียบเชิงกลของระบบเบรกไฮดรอลิก

กำหนดให้

จากรายละเอียดของเบรกรถจักรยานยนต์ $A_{in} = \pi \times 0.25 \times (12.7 \times 10^{-3})^2 = 0.00013 \ m^2$

$$A_{out} = 2\pi \times 0.25 \times (45 \times 10^{-3})^2 = 0.0032 \quad m^2$$

(อ้างอิงจากเบรกมอเตอร์ไซค์รุ่น wave 110)

จากสมการที่ (2.10) $$F_{brake} = F_{hand} \frac{A_{out}}{A_{in}}$$

แทนค่าลงสมการ (2.10) $$1142 = F_{hand} \times \frac{0.0032}{0.00013}$$

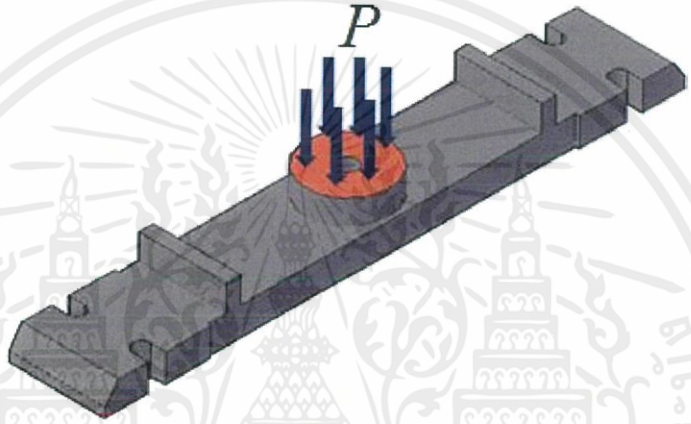
เพราะฉะนั้นต้องออกแรงเบรกมือ $F_{hand} = 46.4 \ N$ หรือ $F_{hand} = 4.7 \ kg$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 การวิเคราะห์ผลกระทบด้านโครงสร้าง

กำหนดให้ $A = 1553\ mm^2$ (พื้นที่รับแรงบริเวณโครงสร้างส่วนกลางของแคร่)

จากเงื่อนไข หัวรถจักรไฟฟ้ารับภาระ 300 กิโลกรัม โดยหัวรถจักรไฟฟ้าประกอบด้วยแคร่ 2 แคร่ แสดงว่า 1 แคร่ จะรับภาระ 150 กิโลกรัม ($F = 150 \times 9.81 = 1471.5\ N$)



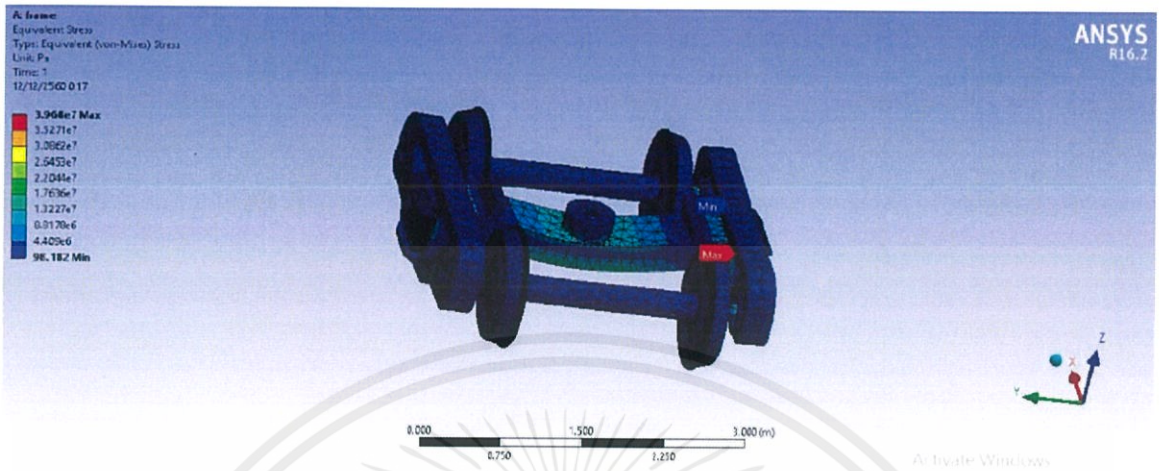
รูปที่ 3.30 แผนภูมิอิสระของโครงสร้างส่วนกลางของแคร่

$$P = \frac{F}{A} = \frac{1471.5}{1.553 \times 10^{-3}} = 947.5\ kPa$$

ตารางที่ 3.4 แสดงค่าคุณสมบัติของเหล็ก SS400

วัสดุ	ความเค้นคราก
SS400Steel	290MPa.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.31 ผลความเค้นวอนมิสเซสจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในภาระสถิตของแคร่รถไฟ

ตารางที่ 3.5 แสดงค่าความเค้นวอนมิสเซสที่มากที่สุดจากการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในภาระสถิตของแคร่รถไฟ

วัสดุ	ความเค้นวอนมิสเซส(สูงสุด)
SS400Steel	39.68 MPa.

$$F.S. = \frac{S_y}{S_{von}}$$

$$F.S. = \frac{290 \times 10^6 Pa}{39.68 \times 10^6 Pa} = 7.3$$

เพราะฉะนั้น ค่าตัวประกอบความปลอดภัย คือ 7.3 แสดงว่าสามารถใช้เหล็กเกรด SS400Steel สามารถรับภาระตามเงื่อนไขที่กำหนดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 บทนำ

การทดลองการขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าต้นแบบนั้นทำขึ้นเพื่อทดลองและวิเคราะห์เปรียบเทียบเปอร์เซ็นความคลาดเคลื่อนของแรงต้านที่เกิดขึ้นภายในระบบจริงกับแรงต้านที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีโดยการเปรียบเทียบนั้นจำเป็นต้องทราบค่าของน้ำหนักของขบวนรถไฟฟ้าต้นแบบ กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ระบบขับเคลื่อนและแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้าของมอเตอร์ โดยในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์สำหรับใช้ในการทดลอง การสอบเทียบเครื่องชั่งน้ำหนักเพื่อใช้ในการชั่งหาค่าน้ำหนักรวมของการขับขี่รถจักรไฟฟ้าต้นแบบ การสอบเทียบชันมิเตอร์สำหรับใช้ในการหาค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ระบบขับเคลื่อน การทดสอบความแม่นยำในการเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าด้วยการหมุนตามองศาของตัวแบ่งแรงดันเพื่อระบุแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้าของมอเตอร์ตามองศาการหมุนของตัวต้านทานปรับค่าได้ ขั้นตอนการทดลองการวิ่งจริงและข้อมูลที่ได้จากการทดลอง นอกจากนี้ในบทนี้ยังอธิบายถึงการวิเคราะห์ผลเพื่อสรุปสมมติฐานการลากขบวนรถไฟฟ้าต้นแบบน้ำหนัก 1300 กิโลกรัม โดยพฤติกรรมการเคลื่อนที่ออกเป็นสองลักษณะ ได้แก่ การเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่และการเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่เพื่อให้ง่ายแก่การพิจารณา

4.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

4.2.1 เครื่องชั่งน้ำหนัก

เครื่องชั่งน้ำหนักใช้สำหรับวัดค่าของน้ำหนักตัวรถไฟฟ้าต้นแบบและผู้ขับขี่เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณต่อไป



รูปที่ 4.1 เครื่องชั่งน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 มัลติมิเตอร์ไฟฟ้า

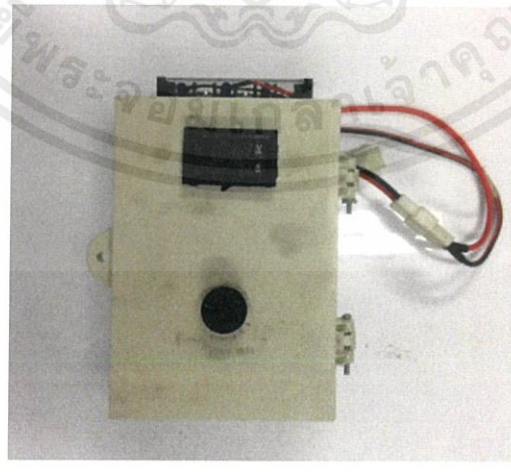
มัลติมิเตอร์ไฟฟ้าคืออุปกรณ์สำหรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้าและความต้านทาน ซึ่งในการทดลองนี้ได้นำมัลติมิเตอร์ไฟฟ้ามาเพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าเพื่อทดสอบความแม่นยำในการเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าด้วยการหมุนตามองศาของตัวแบ่งแรงดัน



รูปที่ 4.2 มัลติมิเตอร์ไฟฟ้า

4.2.3 กล่องควบคุมระบบไฟฟ้าในรถไฟฟ้าต้นแบบ

กล่องควบคุมระบบไฟฟ้าในรถไฟฟ้าต้นแบบ คือ อุปกรณ์เชื่อมแบตเตอรี่ มอเตอร์ไฟฟ้า ชุดแบ่งแรงดันไฟฟ้าสำหรับเร่งความเร็วของรถไฟฟ้าต้นแบบ กุญแจ และไฟต่างๆของรถไฟฟ้าต้นแบบเข้าด้วยกัน นอกจากนี้ยังติดตั้งซันมิเตอร์สำหรับวัดแรงดันและกระแสที่ออกจากแบตเตอร์รี่ ซึ่งในที่นี่เป็นกล่องที่สามารถใช้ได้กับแรงดันไฟฟ้า 36 โวลต์ 1000 วัตต์



รูปที่ 4.3 กล่องควบคุมระบบไฟฟ้าในรถไฟฟ้าต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 เครื่องวัดกระแสไฟฟ้าแบบหนีบ (Clamp meter)

เครื่องวัดกระแสไฟฟ้าแบบหนีบคืออุปกรณ์สำหรับวัดค่าแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าซึ่งในการทดลองนี้ใช้เพื่อวัดกระแสไฟฟ้าที่ทางออกของแบตเตอร์รี่ที่เข้าชันมิเตอร์เพื่อสอบเทียบชันมิเตอร์แสดงผลกระแสที่จ่ายจากแบตเตอรี่



รูปที่ 4.4 เครื่องวัดกระแสไฟฟ้าแบบหนีบ

4.2.5 กล้องวีดีโอโทรศัพท์และขาตั้งกล้อง

กล้องวีดีโอโทรศัพท์และขาตั้งกล้อง เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับบันทึกวีดีโอเพื่อเก็บค่าผลการทดลองและนำไปวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป

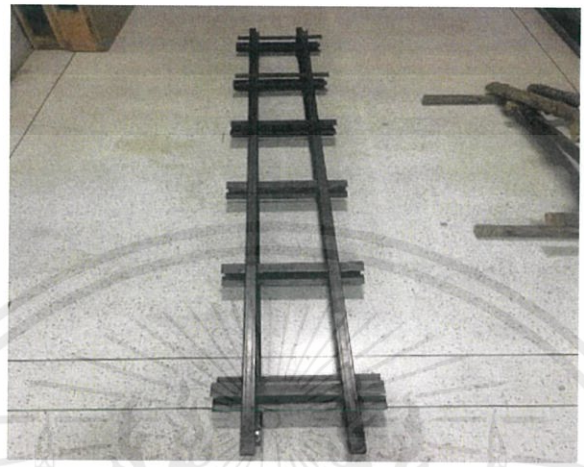


รูปที่ 4.5 กล้องวีดีโอโทรศัพท์และขาตั้งกล้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.6 รางขนาดความกว้างทาง $7\frac{1}{4}$ นิ้ว

รางขนาดความกว้างทาง $7\frac{1}{4}$ นิ้ว ใช้สำหรับเป็นเส้นทางในการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าต้นแบบ โดยมีจำนวน 4 ท่อน ท่อนละ 3 เมตร



รูปที่ 4.6 รางขนาดความกว้างทาง $7\frac{1}{4}$ นิ้ว

4.2.7 รถไฟฟ้าต้นแบบ

รถไฟฟ้าต้นแบบเป็นชิ้นงานที่นำมาทดสอบ ประกอบไปด้วยแบตเตอร์รี่ มอเตอร์ไฟฟ้า ระบบโซ่และจานโซ่ ระบบเบรก แคร่และเก้าอี้สำหรับผู้ควบคุมความเร็ว



รูปที่ 4.7 รถไฟฟ้าต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การสอบเทียบเครื่องชั่งน้ำหนักและการชั่งน้ำหนักของผู้ทดสอบและรถจักรไฟฟ้าต้นแบบ

ในการทดลองรถจักรไฟฟ้าต้นแบบนั้นจำเป็นต้องมั่นใจความเที่ยงตรงของเครื่องชั่งน้ำหนักซึ่งใช้เก็บค่าน้ำหนักของรถจักรไฟฟ้าต้นแบบเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับการทดลองในขั้นตอนต่อไป โดยการสอบเทียบเครื่องชั่งน้ำหนักนั้นจะทำได้โดยการเปรียบเทียบค่าน้ำหนักของมวลทราบน้ำหนักและค่าน้ำหนักที่แสดงผลบนเครื่องชั่งน้ำหนักซึ่งเมื่อสอบเทียบแล้วจะมีค่าน้ำหนักเปรียบเทียบตามตารางที่ (4.1) ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าน้ำหนักของมวลทราบน้ำหนัก (กิโลกรัม) และ ค่าน้ำหนักที่แสดงผลบนเครื่องชั่งน้ำหนัก (กิโลกรัม)

ลำดับ	ค่าน้ำหนักของมวลทราบน้ำหนัก (กิโลกรัม)	ค่าน้ำหนักที่แสดงผลบนเครื่องชั่งน้ำหนัก (กิโลกรัม)
1	5.00	5.00
2	5.00	5.00
3	5.00	5.00
4	10.00	10.00
5	10.00	10.00
6	10.00	10.00
7	15.00	15.00
8	15.00	15.00
9	15.00	15.00



รูปที่ 4.8 ตัวอย่างการสอบเทียบเครื่องชั่งน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางการสอบเทียบที่ (4.1) พบว่าเครื่องชั่งน้ำหนักมีความน่าเชื่อถือ โดยเมื่อนำมาชั่งน้ำหนักของผู้ทดสอบและรถจักรไฟฟ้าต้นแบบ จะพบว่า

น้ำหนักของผู้ทดสอบ	73.20	กิโลกรัม
น้ำหนักของรถจักรไฟฟ้าต้นแบบ	66.80	กิโลกรัม
น้ำหนักรวมทั้งขบวนรถไฟฟ้าต้นแบบ	140.00	กิโลกรัม

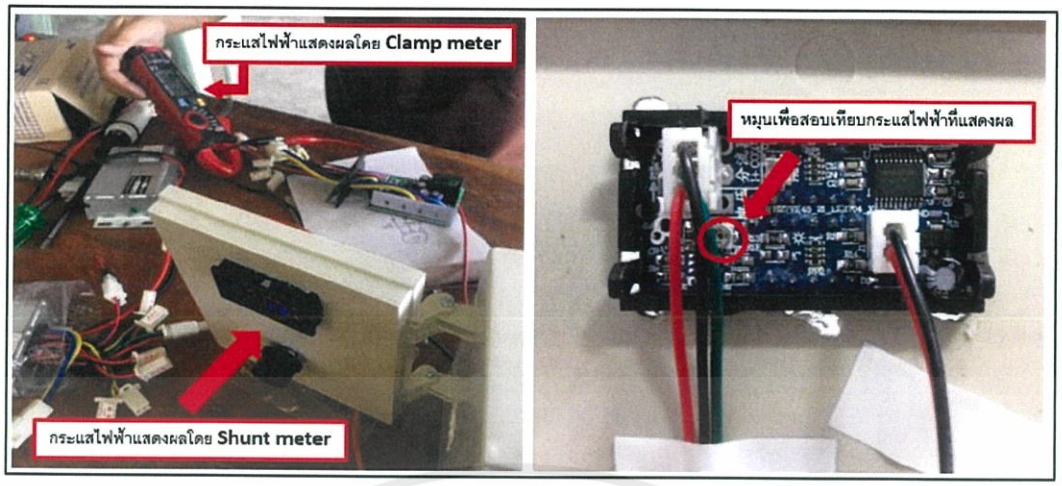
4.4 การสอบเทียบซันมิเตอร์แสดงผลกระแสที่จ่ายจากแบตเตอรี่

ในการทดลองรถไฟฟ้าต้นแบบนั้นจำเป็นต้องมั่นใจความเที่ยงตรงของซันมิเตอร์ซึ่งแสดงผลกระแสที่จ่ายจากแบตเตอรี่เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับการทดลองในขั้นตอนต่อไป โดยการสอบเทียบซันมิเตอร์นั้นจะทำได้โดยการเปรียบเทียบค่ากระแสที่แสดงผลกระแสบนซันมิเตอร์ซึ่งจ่ายจากแบตเตอรี่เพื่อนำมาเทียบกับที่ค่าแสดงผลกระแสบนเครื่องวัดกระแสไฟฟ้าแบบหนีบที่วัดได้จากสายบวก(สีแดง)ที่ต่อจากแบตเตอรี่เข้ามาซันมิเตอร์และปรับค่าให้ใกล้เคียงกันซึ่งเมื่อสอบเทียบแล้วจะมีค่าโวลต์เปรียบเทียบตามตารางที่ (4.1) ดังนี้

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสซึ่งแสดงผลบนซันมิเตอร์ (แอมแปร์) และ ค่ากระแสซึ่งแสดงผลบนเครื่องวัดกระแสไฟฟ้าแบบหนีบ (แอมแปร์)

ลำดับ	ค่ากระแสซึ่งแสดงผลบนซันมิเตอร์ (แอมแปร์)	ค่ากระแสซึ่งแสดงผลบนเครื่องวัดกระแสไฟฟ้าแบบหนีบ (แอมแปร์)
1	2.14	2.00
2	5.12	5.00
3	8.17	8.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 การต่ออุปกรณ์เพื่อสอบเทียบซันมิเตอร์และการปรับการสอบเทียบกระแสของซันมิเตอร์

4.5 การทดสอบความแม่นยำในการเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าด้วยการหมุนตามองศาของตัวแบ่งแรงดัน

4.5.1 ขั้นตอนการทดสอบความแม่นยำในการเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าด้วยการหมุนตามองศาของตัวแบ่งแรงดัน

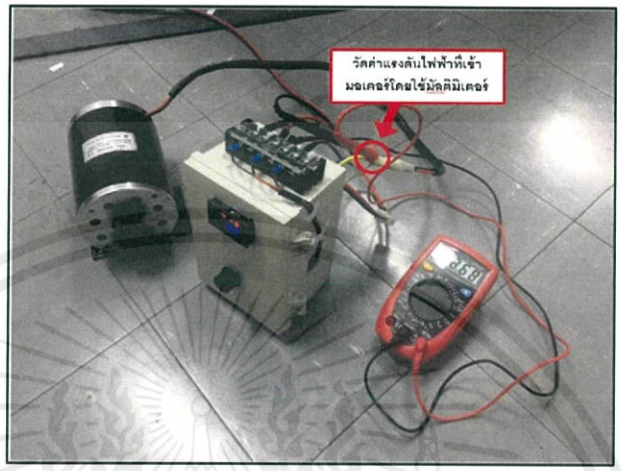
1. ทำการต่อวงจรขับเคลื่อนรถไฟฟ้าต้นแบบเข้ากับมอเตอร์ไฟฟ้าและแบตเตอรี่



รูปที่ 4.10 อุปกรณ์เพื่อใช้ในการทดสอบความแม่นยำในการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าด้วยการหมุนตามองศาของตัวแบ่งแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำการต่อมัลติมิเตอร์ไฟฟ้าเข้ากับขั้วบวกและลบของมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อวัดค่าแรงดันที่ทางเข้าของมอเตอร์ไฟฟ้าจากการหมุนแต่ละองศาของตัวแบ่งแรงดันซึ่งในที่นี่ แบ่งตามตำแหน่งที่เขียนไว้ ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.11 การต่ออุปกรณ์เพื่อทดสอบความแม่นยำในการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าด้วยการหมุนตามองศาของตัวแบ่งแรงดัน

3 ทำการหมุนองศาของตัวแบ่งแรงดันตามตำแหน่งที่เขียนไว้ และ บันทึกผลที่ได้ลงในตาราง



รูปที่ 4.12 องศาของตัวแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองและค่าที่อ่านได้

4. ทำตามข้อ 3. ซ้ำ 5 ครั้งในแต่ละองศาและหาค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 ตารางการทดสอบความแม่นยำในการเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าด้วยการหมุนตามองศาของตัวแบ่งแรงดัน

ตารางที่ 4.3 ความสัมพันธ์ขององศาที่หมุนที่กำหนดไว้และแรงดันไฟฟ้าจากการอ่านค่า

องศาที่	ครั้งที่	แรงดันไฟฟ้าที่แสดงผลโดยมัลติมิเตอร์ (โวลต์)	แรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (โวลต์)
1	1	4.85	5.06
	2	5.00	
	3	5.15	
	4	5.40	
	5	4.90	
2	1	9.75	9.40
	2	9.30	
	3	10.27	
	4	8.60	
	5	9.10	
3	1	17.75	19.67
	2	20.00	
	3	20.50	
	4	20.00	
	5	20.10	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

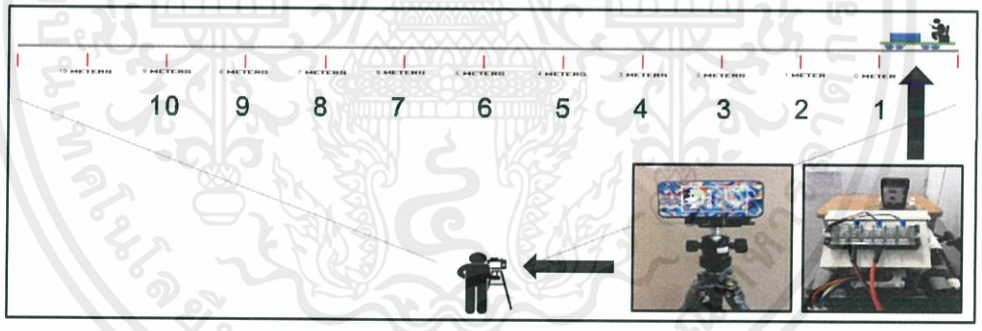
4.6 ขั้นตอนการทดลอง

1. ติดตั้งรางความยาว 12 เมตรสำหรับทดลองการวิ่งของรถไฟฟ้าต้นแบบ และนำสติ๊กเกอร์สีขาวมาติดเพื่อแบ่งช่วงความยาวของรางทุกๆ 1 เมตร



รูปที่ 4.13 การติดตั้งทางวิ่งความยาว 12 เมตรสำหรับทดลองการวิ่งของรถไฟฟ้าต้นแบบ

2. ติดตั้งกล้องถ่ายวีดีโอบนตัวรถไฟฟ้าต้นแบบและบนพื้นตามภาพเพื่อบันทึกผลการทดลอง ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.14 การติดตั้งกล้องถ่ายวีดีโอสำหรับทดลองการวิ่งของรถไฟฟ้าต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำการเสียบกุญแจเพื่อเปิดระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าต้นแบบดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.15 การเปิดระบบไฟฟ้าโดยการเสียบกุญแจของรถไฟฟ้าต้นแบบ

4. ทำการถ่ายวีดีโอและปรับระดับของแรงดันไฟฟ้าตามปุ่มปรับแรงดันไปตามแรงดันที่ต้องการดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.16 การบันทึกวีดีโอขณะเริ่มการทดลอง

5. เมื่อถึงระยะที่ต้องการให้ปรับแรงดันมาที่ 0 โวลต์และกดเบรกเพื่อหยุดรถไฟฟ้าต้นแบบ
6. นำวีดีโอการทดลองที่ได้มาตัดต่อผ่านโปรแกรม Adobe premiere pro CS6 และนำวีดีโอจากการตัดต่อมาบันทึกผลการทดลองลงไปในตารางบันทึกผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.7.1.1 ผลการทดลอง เมื่อพิจารณาที่ แรงดันคงที่ 5.06 โวลต์

ตารางที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่และระยะทางเมื่อใช้แรงดันคงที่ 5.06 โวลต์

ระยะทาง (เมตร)	เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (วินาที)					
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
1	1.86	1.71	1.74	1.82	1.78	1.78
2	3.16	3.57	3.42	3.59	3.50	3.45
3	5.02	5.20	5.13	5.23	5.18	5.15
4	6.35	6.82	6.85	6.89	6.95	6.77
5	7.61	8.23	8.22	8.34	8.43	8.17
6	8.94	9.93	9.68	10.02	9.95	9.70
7	10.45	11.40	11.31	11.82	11.56	11.31
8	11.97	12.82	12.69	13.12	12.98	12.72
9	13.45	14.31	14.26	14.87	14.59	14.30
10	15.00	16.00	15.91	16.32	16.30	15.91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

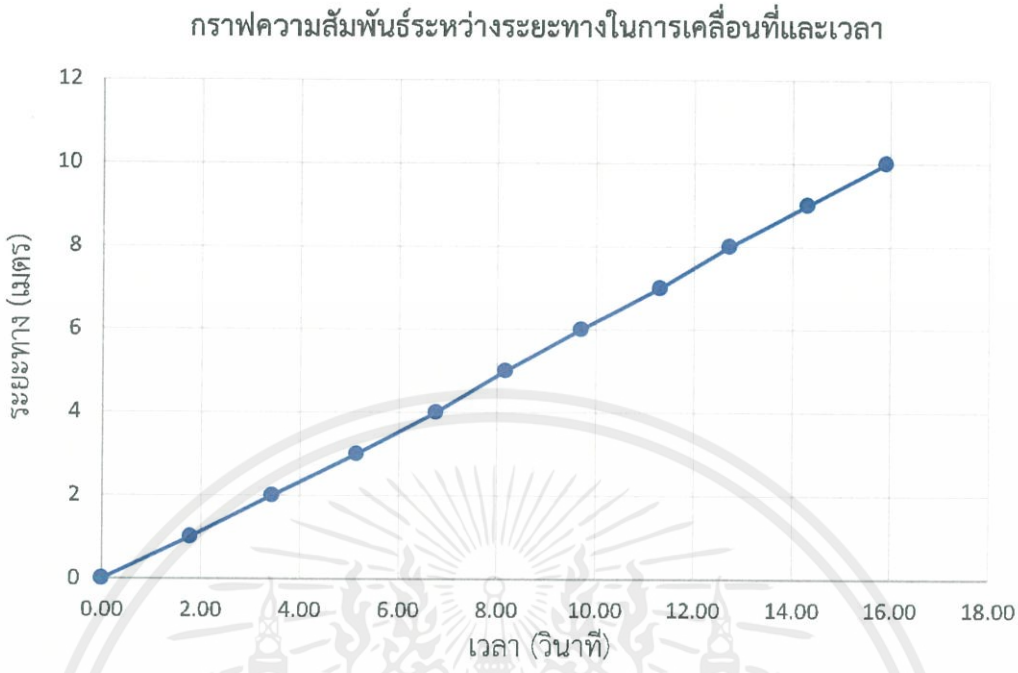
ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่จ่ายออกจากแบตเตอรี่และระยะทางในการเคลื่อนที่

ระยะทาง (เมตร)	กระแสที่จ่ายออกจากแบตเตอรี่ (แอมแปร์)					
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
1	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30
2	2.70	2.40	2.60	2.50	2.60	2.56
3	2.00	2.30	2.50	2.40	2.50	2.34
4	2.00	2.30	2.30	2.20	2.20	2.20
5	1.80	2.40	2.20	2.10	2.00	2.10
6	2.00	2.10	2.40	2.00	2.20	2.14
7	2.00	2.00	2.10	1.90	2.00	2.00
8	1.90	2.00	2.20	1.90	1.90	1.98
9	2.00	2.10	2.10	2.00	2.00	2.04
10	2.10	2.00	2.30	2.10	2.20	2.14

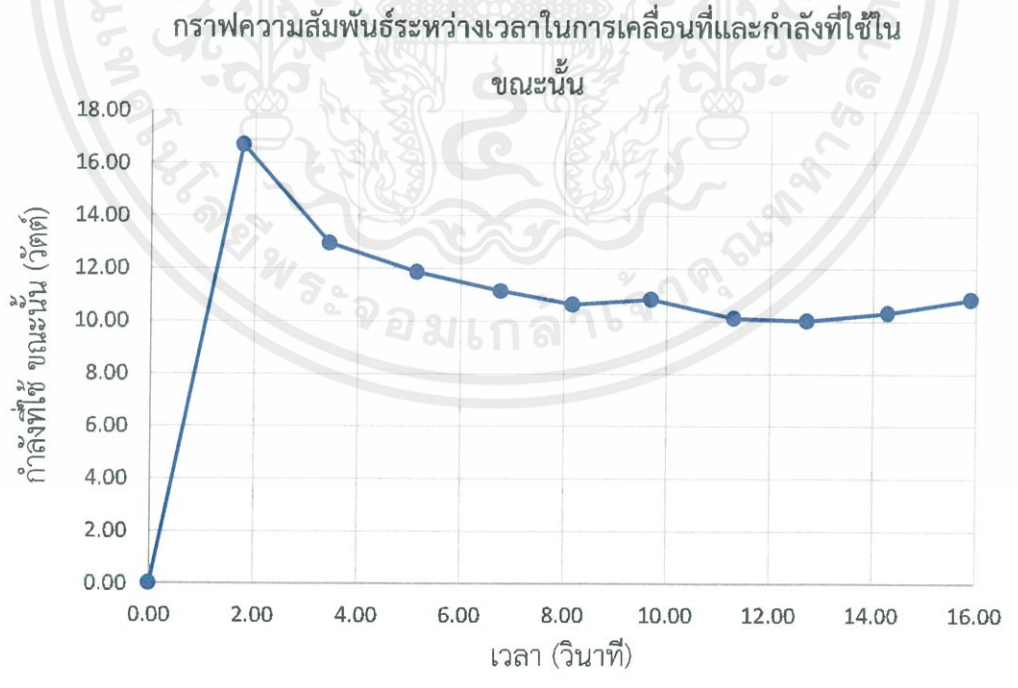
ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกระแสที่จ่ายออกจากแบตเตอรี่และค่าเฉลี่ยเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่เทียบกับระยะทางในการเคลื่อนที่

ระยะทาง (เมตร)	เวลา (วินาที)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	กำลังไฟฟ้าขาเข้ามอเตอร์ (วัตต์)
0	0.00	0	5.06	0.00
1	1.78	3.30	5.06	16.70
2	3.45	2.56	5.06	12.95
3	5.15	2.34	5.06	11.84
4	6.77	2.20	5.06	11.13
5	8.17	2.10	5.06	10.63
6	9.70	2.14	5.06	10.83
7	11.31	2.00	5.06	10.12
8	12.72	1.98	5.06	10.02
9	14.30	2.04	5.06	10.32
10	15.91	2.14	5.06	10.83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่กับระยะทางเมื่อใช้แรงดันคงที่ 5.06 โวลต์



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลื่อนที่และกำลังที่ใช้เมื่อใช้แรงดันคงที่ 5.06 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.1.2 วิเคราะห์ผลการทดลองการขับเคลื่อนที่แรงดันไฟฟ้าขาเข้ามอเตอร์ 5.06 โวลต์

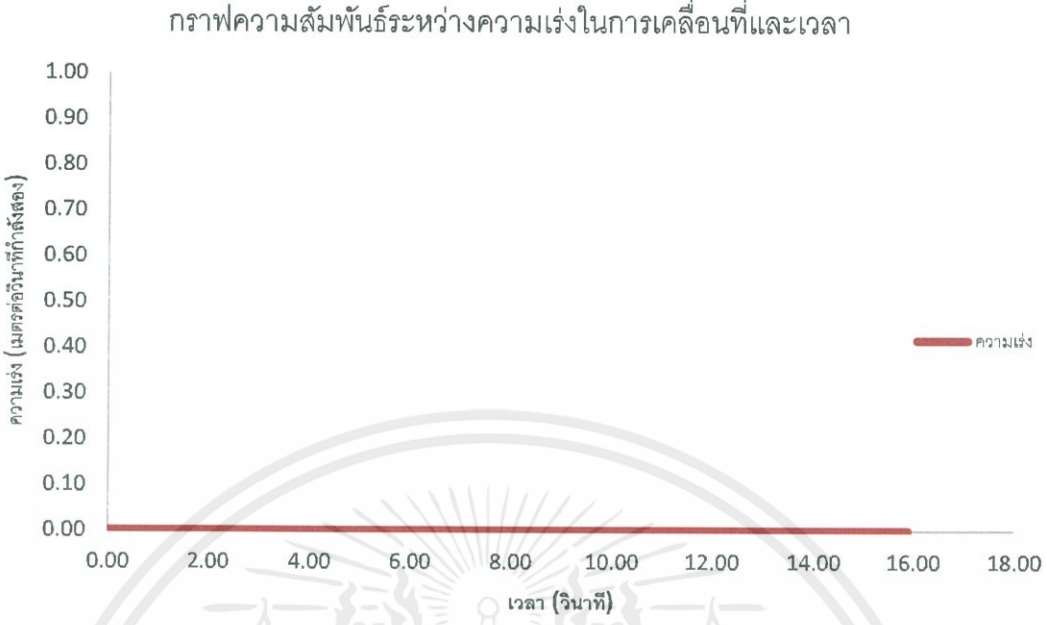
จากรูปที่ 4.16 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่และเวลามีลักษณะของรูปเป็นรูปเชิงเส้น ซึ่งมีสมการเส้นแนวโน้มเป็น $s = 0.6218t$ เมื่อพิจารณาความเร็วการเคลื่อนที่โดยการหาอนุพันธ์ของระยะทางเทียบกับเวลา จะได้ $v = \frac{ds}{dt} = 0.6218$ สามารถเขียนรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและเวลาได้เป็น



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและเวลา

เมื่อพิจารณาความเร่งการเคลื่อนที่โดยการหาอนุพันธ์ของความเร็วเทียบกับเวลา จะได้ $a = \frac{dv}{dt} = 0$ สามารถเขียนรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งและเวลาได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งและเวลา

นั่นหมายความว่าการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าต้นแบบเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ 0.6218 เมตร/วินาที หรือ 2.2385 กิโลเมตร/ชั่วโมงและมีความเร่งประมาณ 0 เมตร/วินาที^{2} โดยช่วงของการเร่งความเร็วอยู่ในช่วงวินาทีที่ 0 ถึงวินาทีที่ 1.78 ซึ่งสามารถสังเกตได้จากกำลังไฟฟ้าที่มีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงนั้นก่อนที่จะลดลงและคงที่หลังจากนั้น

จากหัวข้อ 4.2 พบว่าน้ำหนักรวมของรถไฟฟ้าต้นแบบคือ 140 กิโลกรัม ประสิทธิภาพการส่งกำลังในหัวข้อที่ 3 คือ 0.9 ประสิทธิภาพของมอเตอร์ คือ 0.78 และจากสมการแรงขับเคลื่อนรถไฟฟ้าต้นแบบการคำนวณในหัวข้อที่ 3 พบว่า

สมการแรงขับเคลื่อนจากการคำนวณ $= \frac{1}{2}(1.21)(0.17725)(0.75)V^2 + \frac{0.5(9.81)(m)}{50.85} + ma$

สมการแรงขับเคลื่อนจากการทดลอง $= \frac{(P_{\cdot\,Ai\,\S})(\eta_t)}{V}$

เมื่อนำมาพิจารณาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนตามสมการ $\%Error = \frac{Value_{test} - Value_{theory}}{Value_{theory}} \times 100\%$

และนำมาสร้างตารางแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการทดลองการขับเคลื่อนที่แรงดันไฟฟ้าคงที่ 5.06 โวลต์ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการทดลองการขับเคลื่อนที่แรงดันไฟฟ้าคงที่ 5.06 โวลต์

ระยะทาง (m)	เวลา (s)	ความเร็วณขณะนั้น (m/s)	ความเร่งณขณะนั้น (m/s^2)	กำลังของมอเตอร์ (Watts)	แรงขับตามทฤษฎี (N)	แรงขับตามการทดสอบ (N)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
0	0.00	0.62	0.00	0.00	13.52	0.00	ไม่พิจารณา
1	1.78	0.62	0.00	12.87	13.52	18.63	37.73
2	3.45	0.62	0.00	9.98	13.52	14.45	6.85
3	5.15	0.62	0.00	9.13	13.52	13.21	-2.34
4	6.77	0.62	0.00	8.58	13.52	12.42	-8.18
5	8.17	0.62	0.00	8.19	13.52	11.85	-12.35
6	9.70	0.62	0.00	8.35	13.52	12.08	-10.68
7	11.31	0.62	0.00	7.80	13.52	11.29	-16.53
8	12.72	0.62	0.00	7.72	13.52	11.18	-17.36
9	14.30	0.62	0.00	7.96	13.52	11.52	-14.86
10	15.91	0.62	0.00	8.35	13.52	12.08	-10.68

จากการพิจารณาตารางแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการทดลองการขับเคลื่อนที่แรงดันไฟฟ้าคงที่ 5.06 โวลต์ มีค่าความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์สูงสุดอยู่ที่ 37.73 เปอร์เซ็นต์ และค่าความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ต่ำสุดอยู่ที่ 2.34 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีสาเหตุมาจากสภาพล้อและรางที่แตกต่างจากการออกแบบโดยในการออกแบบนั่นใช้รางเป็นรูปตัวไอและใช้รัศมีเฉลี่ยในการคำนวณค่าคงที่แรงต้านระหว่างล้อกับราง เมื่อพิจารณาที่เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดด้านบวกที่ 37.73 เปอร์เซ็นต์จะพบว่าค่าคงที่ระหว่างล้อกับรางควรจะมีค่าประมาณ 0.014 ซึ่งจะทำให้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเป็น 3.27 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาที่เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดด้านลบที่ -17.36 เปอร์เซ็นต์จะพบว่าค่าคงที่ระหว่างล้อกับรางควรจะมีค่าประมาณ 0.008 ซึ่งจะทำให้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเป็น 1.44 เปอร์เซ็นต์ นั่นคือค่าคงที่แรงต้านระหว่างล้อกับรางควรจะมีค่าระหว่าง 0.008 ถึง 0.014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.2.1 ผลการทดลอง เมื่อพิจารณาที่ แรงดันคงที่ 9.40 โวลต์

ตารางที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่และระยะทางเมื่อใช้แรงดันคงที่ 9.40 โวลต์

	เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (วินาที)					
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
1	1.46	1.68	1.46	1.35	0.95	1.38
2	2.38	2.65	2.39	2.41	1.94	2.35
3	3.12	3.56	3.12	3.07	2.79	3.13
4	3.62	4.34	3.76	3.83	3.65	3.84
5	4.3	5.02	4.47	4.45	4.41	4.53
6	4.86	5.86	5.09	4.98	5.24	5.21
7	5.51	6.66	5.85	5.61	5.9	5.91
8	6.08	7.62	6.34	6.22	6.6	6.57
9	6.64	8.41	7.02	6.85	7.51	7.29
10	7.35	9.33	7.93	7.97	8.84	8.28

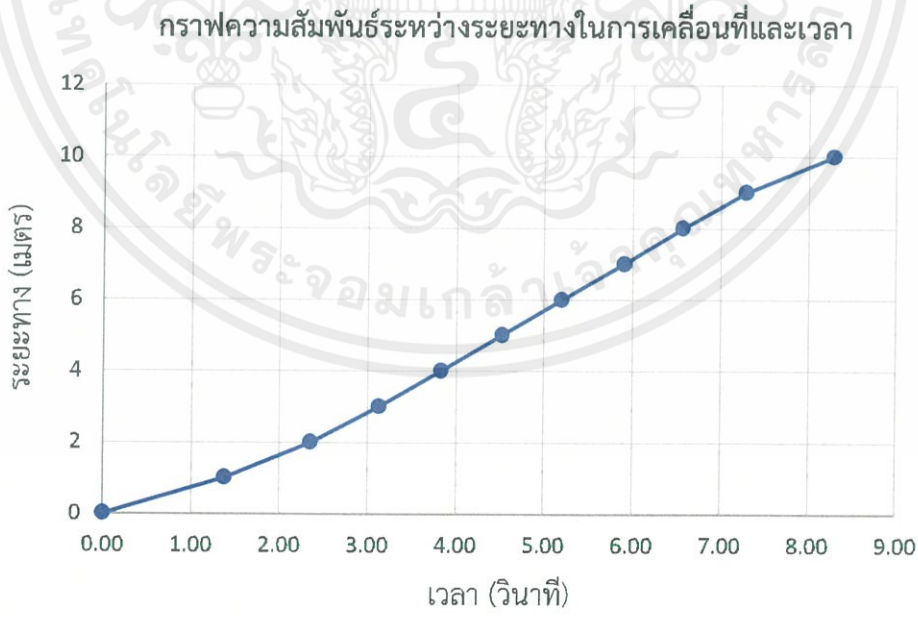
ตารางที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่จ่ายออกจากแบตเตอรี่และระยะทางในการเคลื่อนที่

ระยะทาง	กระแสที่จ่ายออกจากแบตเตอรี่ (แอมแปร์)					
(เมตร)	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
1	8.20	7.40	7.90	7.70	6.70	7.58
2	7.50	5.70	7.00	7.30	6.40	6.78
3	6.30	4.40	5.70	5.40	5.20	5.40
4	5.00	4.20	4.60	4.50	4.40	4.54
5	4.50	4.70	4.20	4.20	4.30	4.38
6	4.40	3.90	4.00	3.80	3.70	3.96
7	4.10	3.70	3.80	3.60	3.50	3.74
8	3.60	3.30	3.50	3.60	3.50	3.50
9	0.90	1.20	0.80	1.00	0.90	0.96
10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

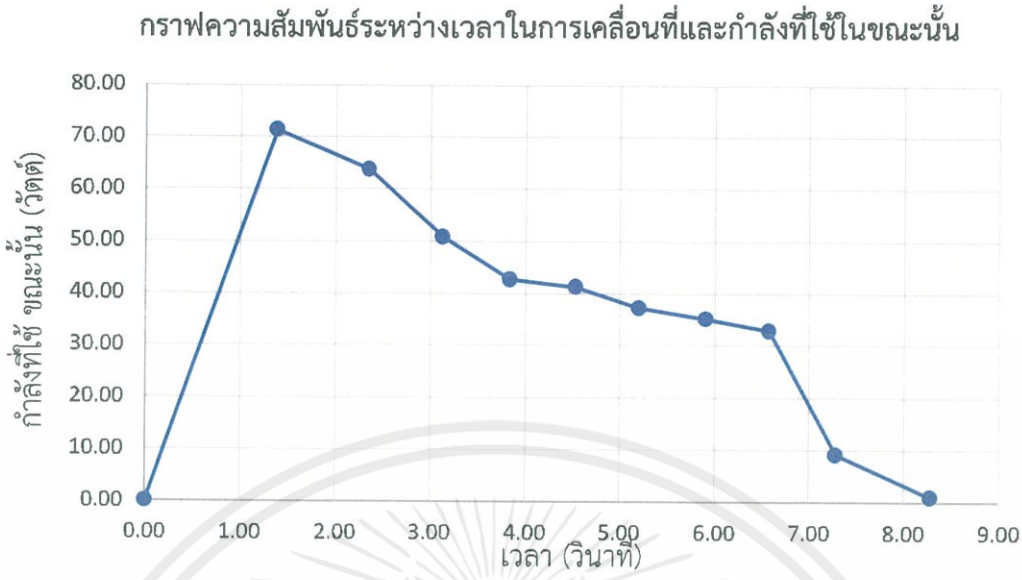
ตารางที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกระแสที่จ่ายออกจากแบตเตอรี่และค่าเฉลี่ยเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่เทียบกับระยะทางในการเคลื่อนที่

ระยะทาง (เมตร)	เวลา (วินาที)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	กำลังไฟฟ้าขาเข้ามอเตอร์ (วัตต์)
0	0.00	0.00	9.40	0.00
1	1.38	7.58	9.40	71.28
2	2.35	6.78	9.40	63.76
3	3.13	5.40	9.40	50.78
4	3.84	4.54	9.40	42.69
5	4.53	4.38	9.40	41.19
6	5.21	3.96	9.40	37.24
7	5.91	3.74	9.40	35.17
8	6.57	3.50	9.40	32.91
9	7.29	0.96	9.40	9.03
10	8.28	0.10	9.40	0.94



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่กับระยะทางเมื่อใช้แรงดันคงที่ 9.40 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

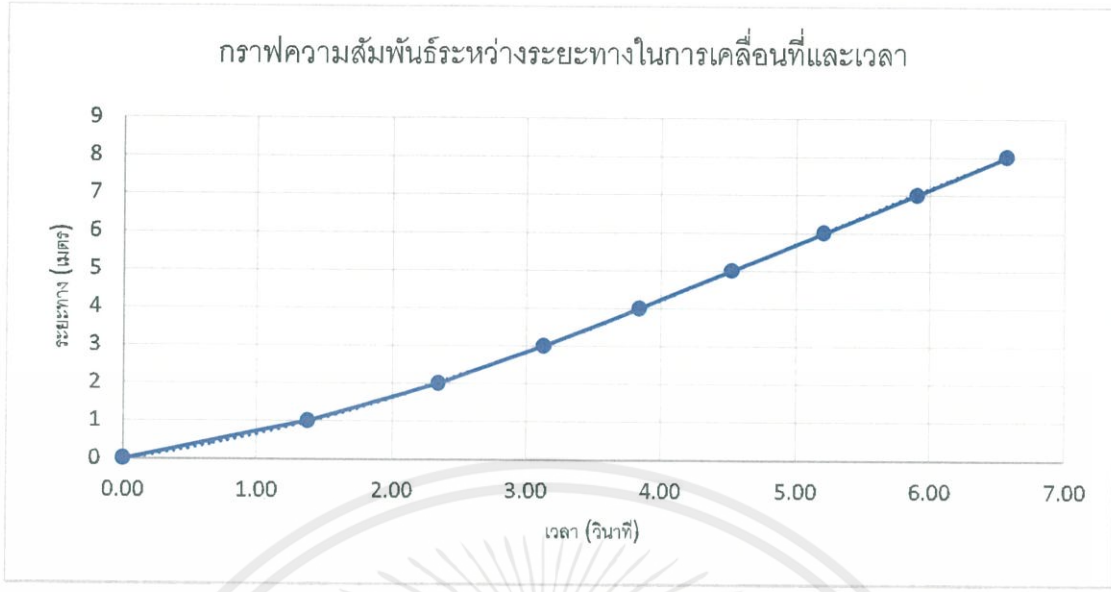


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลื่อนที่และกำลังที่ใช้เมื่อใช้แรงดันคงที่ 9.40 โวลต์

4.7.2.2 วิเคราะห์ผลการทดลองการขับเคลื่อนที่แรงดันไฟฟ้าขาเข้ามอเตอร์ 9.40 โวลต์

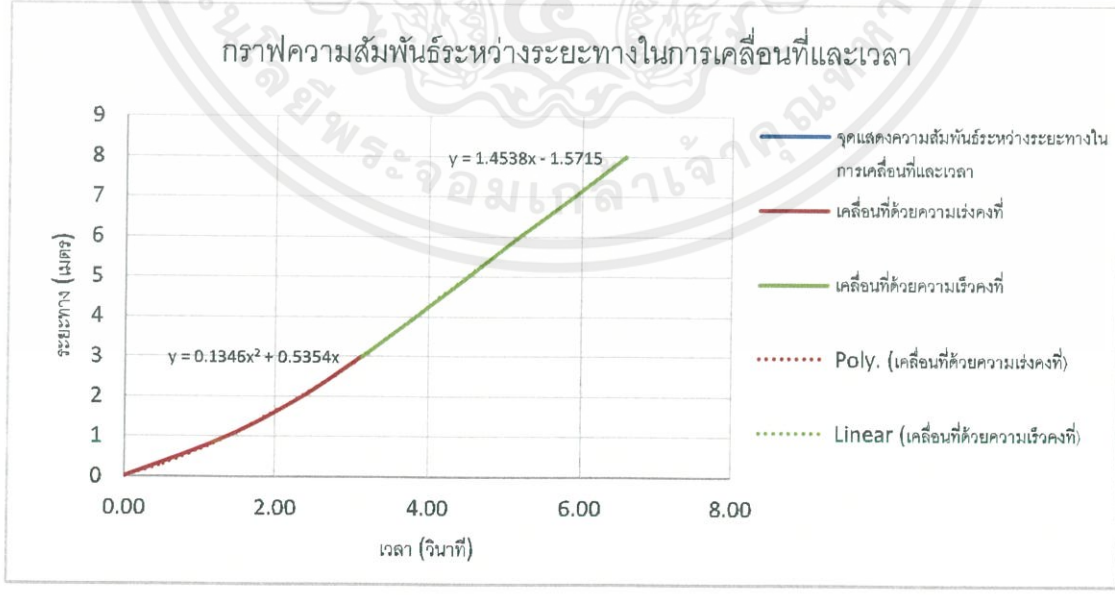
จากตาราง 4.7 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่จ่ายออกจากแบตเตอรี่และระยะทางในการเคลื่อนที่พบว่าระยะในช่วง 9 เมตรถึง 10 เมตรนั้น มีค่ากระแสที่จ่ายออกจากแบตเตอรี่ที่ต่ำมากกว่าที่ควรจะเป็นซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการปิดวงจรหรือลดความเร็วก่อนถึงจุดสิ้นสุดของรางเพื่อความปลอดภัย นั่นคือผลการทดลองที่นำมาพิจารณาได้อย่างมีประสิทธิภาพคือระยะ 0 เมตรถึง 8 เมตรสามารถเขียนรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่กับระยะทาง ได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและเวลา

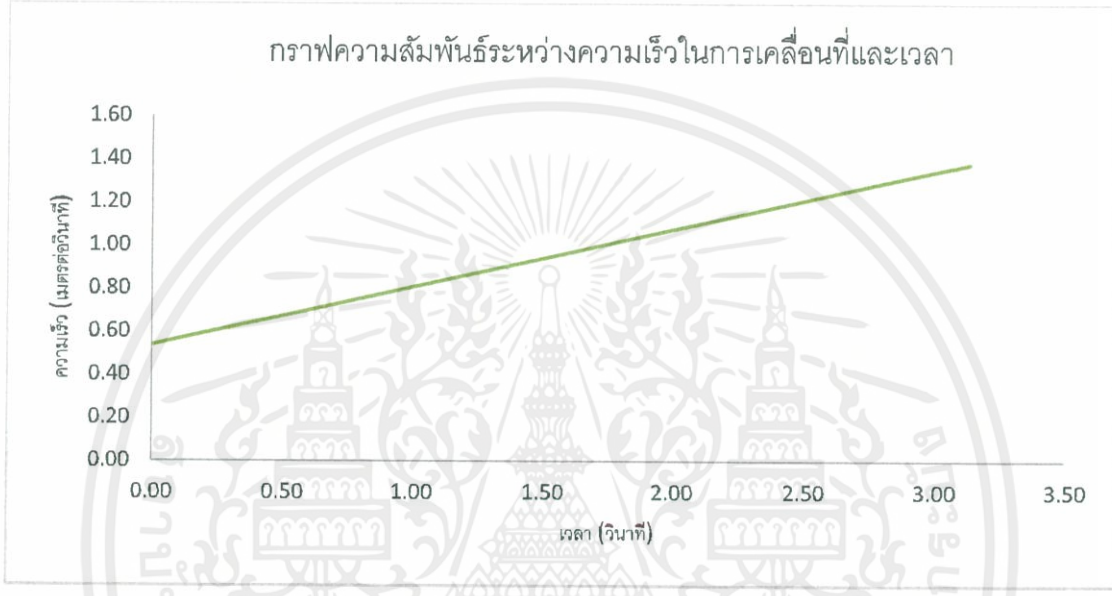
เมื่อพิจารณารูปที่ 5.3 จะพบว่าสามารถแบ่งการเคลื่อนที่ได้ออกเป็น 2 แบบ คือ เคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่ ในช่วงวินาทีที่ 0 ถึงวินาทีที่ 3.13 และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ตั้งแต่วินาทีที่ 3.13 ถึง 6.57 เมื่อนำมาเขียนรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่กับระยะทาง เพื่อหาเส้นแนวโน้ม ได้เป็น



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ช่วงความเร่งคงที่พบว่ามีเส้นแนวโน้มที่สมการเคลื่อนที่แบบพหุนามลำดับที่สองซึ่งมีสมการเส้นแนวโน้มเป็น $s = 0.1346t^2 + 0.5354t$ เมื่อพิจารณาความเร็วการเคลื่อนที่โดยการหาอนุพันธ์ของระยะทางเทียบกับเวลา จะได้ $v = \frac{ds}{dt} = 0.2692t + 0.5354$ สามารถเขียนรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและเวลาได้เป็น

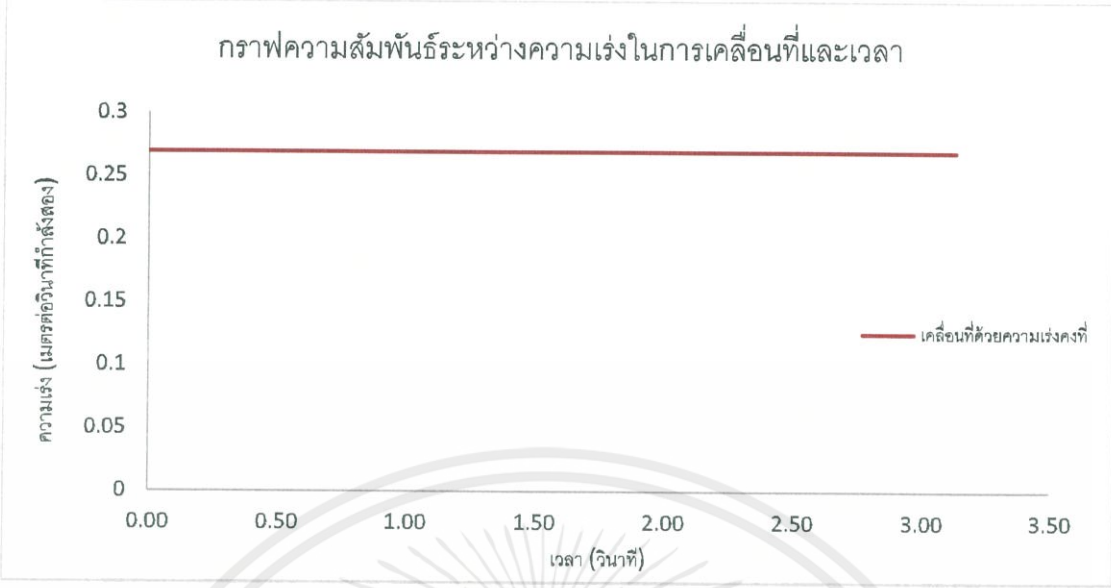


รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและเวลา

เมื่อพิจารณาความเร่งการเคลื่อนที่โดยการหาอนุพันธ์ของความเร็วเทียบกับเวลา

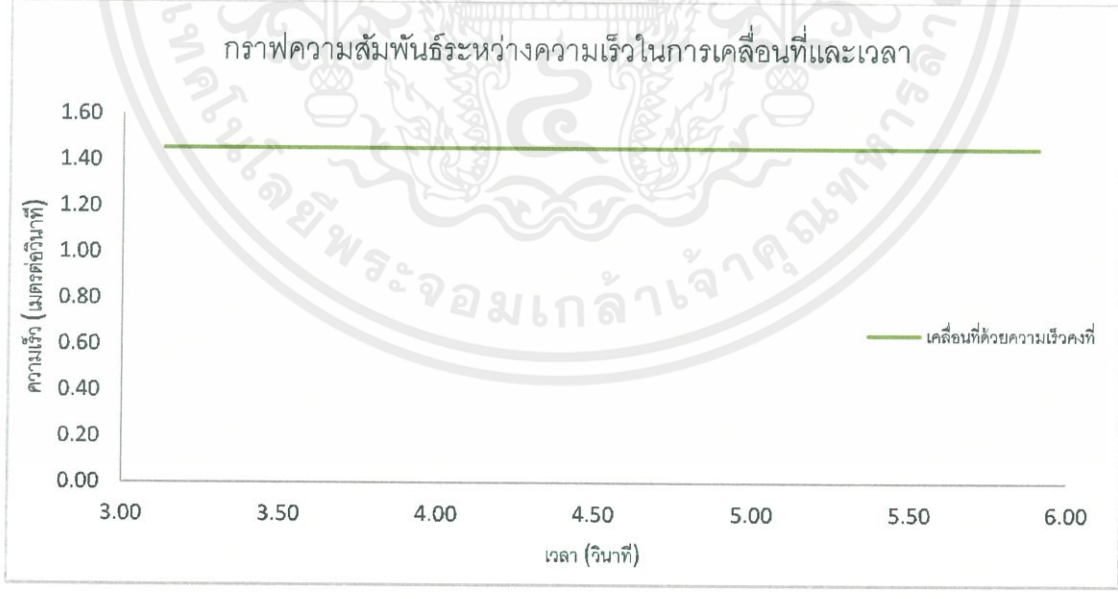
จะได้ $a = \frac{dv}{dt} = 0.2692$ สามารถเขียนรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งและเวลาได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งและเวลา

เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ช่วงความเร็วคงที่พบว่ามีรูปเป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งมีสมการเส้นแนวโน้มเป็น $s = 1.4538t - 1.5715$ เมื่อพิจารณาความเร็วการเคลื่อนที่โดยการหาอนุพันธ์ของระยะทางเทียบกับเวลา จะได้ $v = \frac{ds}{dt} = 1.4538$ สามารถเขียนรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและเวลาได้เป็น

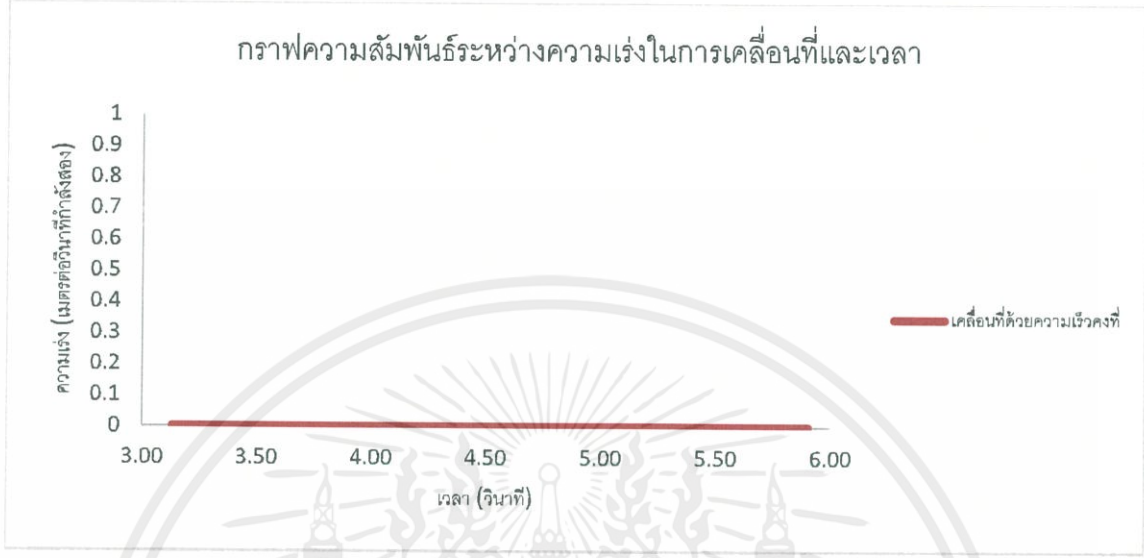


รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาความเร่งการเคลื่อนที่โดยการหาอนุพันธ์ของความเร็วเทียบกับเวลา

จะได้ $a = \frac{dv}{dt} = 0$ สามารถเขียนรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งและเวลาได้เป็น



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งและเวลา

นั่นหมายความว่าการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าต้นแบบเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่ 0.2692 เมตร/วินาทีกำลังสองในช่วงวินาทีที่ 0 ถึงวินาทีที่ 3.13 และหลังจากนั้นเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ที่ 1.4538 เมตรต่อวินาทีตั้งแต่วินาทีที่ 3.13 ถึง 6.57

จากหัวข้อ 4.2 พบว่าน้ำหนักรวมของรถไฟฟ้าต้นแบบคือ 140 กิโลกรัม ประสิทธิภาพการส่งกำลังในหัวข้อที่ 3 คือ 0.9 ประสิทธิภาพของมอเตอร์ คือ 0.78 และจากสมการแรงขับเคลื่อนรถไฟฟ้าต้นแบบจากการคำนวณในหัวข้อที่ 3 พบว่า

สมการแรงขับเคลื่อนจากการคำนวณ $= \frac{1}{2}(1.21)(0.17725)(0.75)V^2 + \frac{0.5(9.81)(m)}{50.85} + ma$

สมการแรงขับเคลื่อนจากการทดลอง $= \frac{(P_{\cdot\,\dot{A}\dot{I}\,\S})(\eta_t)}{V}$

เมื่อนำมาพิจารณาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนตามสมการ $\%Error = \frac{Value_{test} - Value_{theory}}{Value_{theory}} \times 100\%$

และนำมาสร้างตารางแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการทดลองการขับเคลื่อนที่แรงดันไฟฟ้าคงที่ 9.40 โวลต์ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการทดลองการขับเคลื่อนที่แรงดันไฟฟ้าคงที่ 9.40 โวลต์

ระยะทาง (m)	เวลา (s)	ความเร็ว ณ ขณะนั้น (m/s)	ความเร่ง ณ ขณะนั้น (m/ s^2)	กำลังของมอเตอร์ (Watts)	แรงขับตามทฤษฎี (N)	แรงขับตามการทดสอบ (N)	เปอร์เซ็นความแตกต่าง (%)
0	0.00	0.54	0.2692	0.00	51.20	0.00	ไม่พิจารณา
1	1.38	0.91	0.2692	55.60	51.25	55.18	7.67
2	2.35	1.17	0.2692	49.73	51.29	38.29	-25.36
3	3.13	1.38	0.2692	39.61	51.33	25.86	-49.62
4	3.84	1.45	0	33.30	13.66	20.62	50.88
5	4.53	1.45	0	32.13	13.66	19.89	45.56
6	5.21	1.45	0	29.05	13.66	17.98	31.60
7	5.91	1.45	0	27.43	13.66	16.98	24.29
8	6.57	1.45	0	25.67	13.66	15.89	16.32

จากการพิจารณาตารางแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการทดลองการขับเคลื่อนที่แรงดันไฟฟ้าคงที่ 9.40 โวลต์ พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์สูงสุดอยู่ที่ 50.88 เปอร์เซ็นต์ และค่าความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ต่ำสุดอยู่ที่ 7.67 เปอร์เซ็นต์ เมื่อแบ่งการพิจารณาออกเป็นสองช่วงคือช่วงที่มีความเร่งคงที่และช่วงที่ความเร็วคงที่จะพบว่า

ช่วงที่เคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจะมีค่าเป็นบวกในช่วงแรกตั้งแต่วินาทีที่ 0 ถึง 1.38 และเป็นลบในช่วงต่อมาตั้งแต่วินาทีที่ 2.35 ถึง 3.13 เมื่อพิจารณาสมการเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน $\%Error = \dfrac{\left\{\dfrac{(\eta_t)(\mathrm{P})}{V}\right\} - \left\{(8.30x10^{-2})\,\mathrm{V}^2 + 140a + 13.45\right\}}{\left\{(8.30x10^{-2})\,\mathrm{V}^2 + 140a + 13.45\right\}} \times 100\%$

พบว่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจะมีค่าลดลงเมื่อความเร่ง(a)เพิ่มขึ้น และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร่ง(a)ลดลง ดังนั้นในช่วงที่เคลื่อนที่ด้วยความเร่งในวินาทีที่ 0 ถึง 1.38 ควรจะมีความเร่งมากกว่า 0.2692 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง และในช่วงที่เคลื่อนที่ด้วยความเร่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวินาทีที่ 1.38 ถึง 3.13 ควรจะมีความเร่งน้อยกว่า 0.2692 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง นั่นคือการพิจารณาความเร่งควรจะมีสมการเส้นแนวโน้มเป็นแบบเชิงเส้นที่ความชันติดลบ

ช่วงที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่เมื่อพิจารณาที่เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดด้านบวกที่ 50.88 เปอร์เซ็นต์จะพบว่าค่าคงที่ระหว่างล้อกับรางควรจะมีค่าประมาณ 0.015 ซึ่งจะทำให้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเป็น -0.75 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อพิจารณาที่เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนต่ำสุดที่ 16.32 เปอร์เซ็นต์จะพบว่าค่าคงที่ระหว่างล้อกับรางควรจะมีค่าประมาณ 0.011 ซึ่งจะทำให้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเป็น 4.03 เปอร์เซ็นต์ นั่นคือค่าคงที่แรงต้านระหว่างล้อกับรางควรจะมีค่าระหว่าง 0.011 ถึง 0.015

4.7.3.1 ผลการทดลอง เมื่อพิจารณาที่ แรงดันคงที่ 19.67 โวลต์

ตารางที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่และระยะทางเมื่อใช้แรงดันคงที่ 19.67 โวลต์

ระยะทาง (เมตร)	เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (วินาที)					
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
1	1.87	1.23	1.35	1.27	1.43	1.43
2	2.97	2.02	2.20	2.10	2.40	2.34
3	3.64	2.81	2.95	2.71	2.89	3.00
4	4.09	3.47	3.78	3.19	3.93	3.69
5	4.59	4.01	3.85	3.60	3.95	4.00
6	5.09	4.33	4.12	4.05	4.35	4.39
7	5.59	4.83	4.79	4.49	5.03	4.95
8	5.96	5.20	5.10	4.85	5.76	5.37
9	6.49	5.60	6.10	5.33	6.30	5.96
10	7.13	6.10	6.90	5.66	7.20	6.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

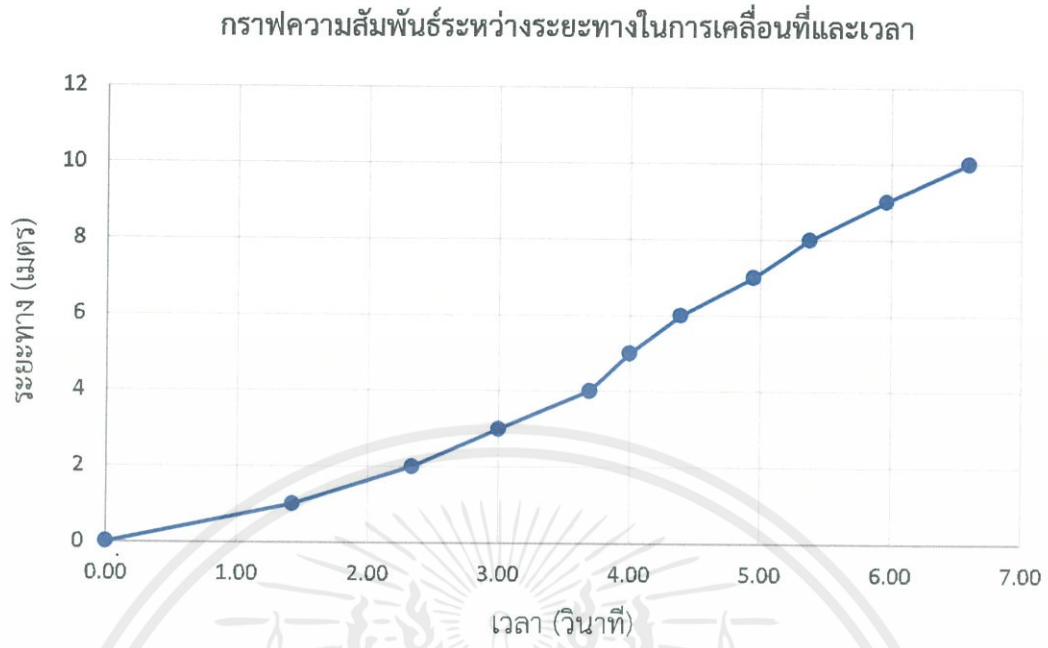
ตารางที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่จ่ายออกจากแบตเตอรี่และระยะทางในการเคลื่อนที่

ระยะทาง (เมตร)	กระแสที่จ่ายออกจากแบตเตอรี่ (แอมแปร์)					
	1	2	3	4	5	ค่าเฉลี่ย
1	31.80	29.80	30.10	22.30	28.00	28.40
2	30.20	26.80	29.20	21.70	26.80	26.94
3	27.20	24.50	26.80	22.30	23.50	24.86
4	27.10	23.80	26.00	20.10	23.00	24.00
5	26.70	24.20	25.70	18.00	20.00	22.92
6	26.00	23.60	23.00	17.00	19.20	21.76
7	19.00	18.00	17.00	15.00	17.40	17.28
8	10.40	0.90	7.00	8.00	9.50	7.16
9	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10

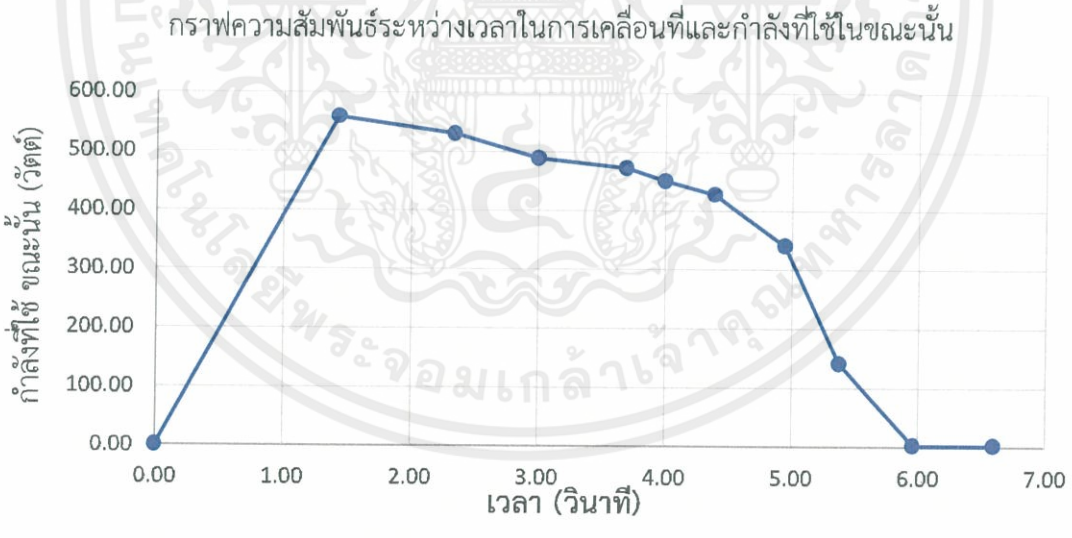
ตารางที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยกระแสที่จ่ายออกจากแบตเตอรี่และค่าเฉลี่ยเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่เทียบกับระยะทางในการเคลื่อนที่

ระยะทาง (เมตร)	เวลา (วินาที)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	แรงดันไฟฟ้า (โวลต์)	กำลังไฟฟ้าขาเข้ามอเตอร์ (วัตต์)
0	0.00	0.00	19.67	0.00
1	1.43	28.40	19.67	558.63
2	2.34	26.94	19.67	529.91
3	3.00	24.86	19.67	489.00
4	3.69	24.00	19.67	472.08
5	4.00	22.92	19.67	450.84
6	4.39	21.76	19.67	428.02
7	4.95	17.28	19.67	339.90
8	5.37	7.16	19.67	140.84
9	5.96	0.10	19.67	1.97
10	6.60	0.10	19.67	1.97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่กับระยะทางเมื่อใช้แรงดันคงที่ 19.67 โวลต์

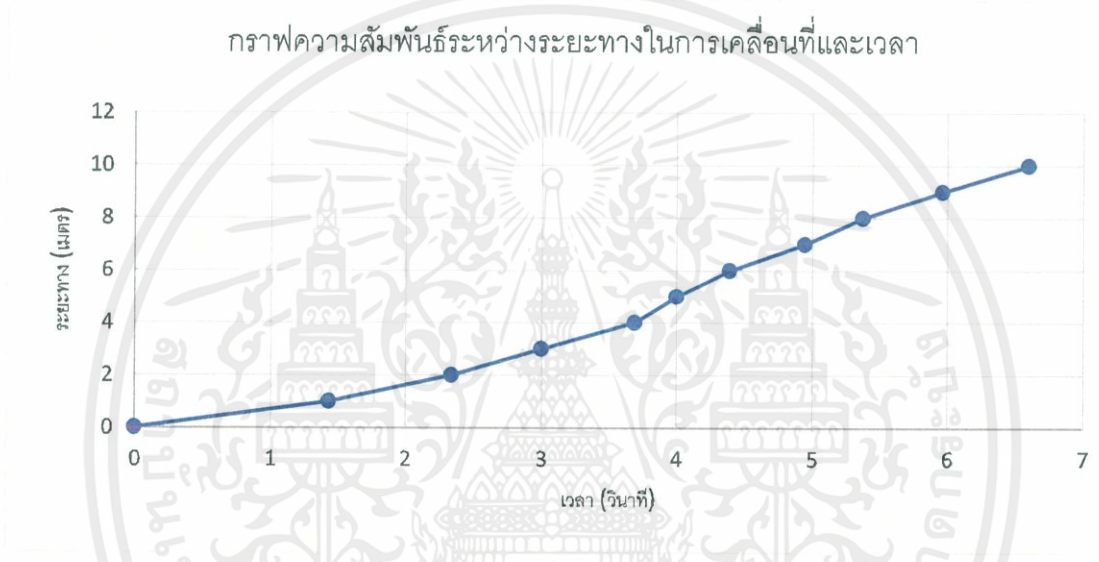


รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลื่อนที่และกำลังที่ใช้เมื่อใช้แรงดันคงที่ 19.67 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7.3.2 วิเคราะห์ผลการทดลองการขับเคลื่อนที่แรงดันไฟฟ้าขาเข้ามอเตอร์ 19.67 โวลต์

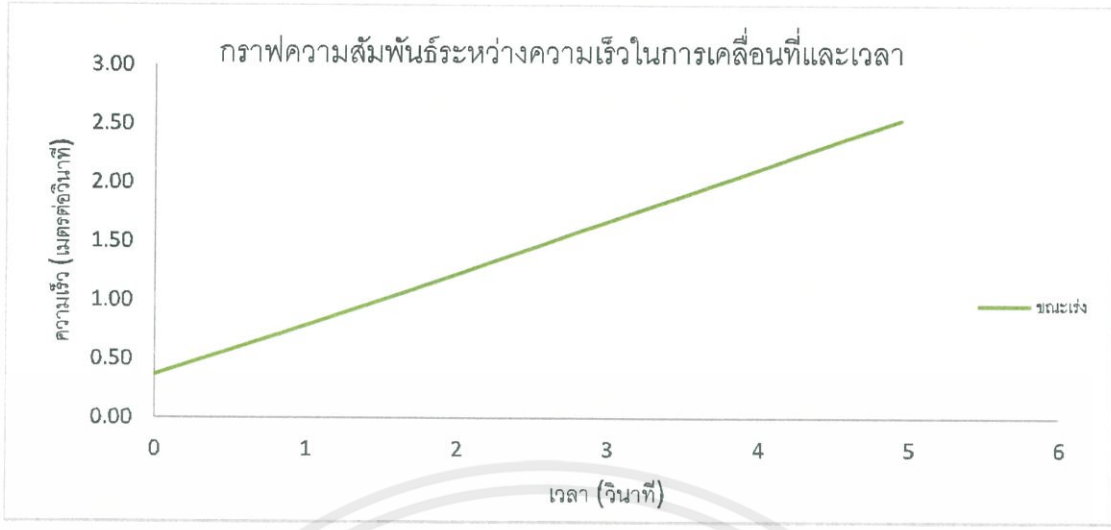
จากตาราง 4.10 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่จ่ายออกจากแบตเตอรี่และระยะทางในการเคลื่อนที่พบว่าระยะในช่วง 8 เมตรถึง 10 เมตรนั้น มีค่ากระแสที่จ่ายออกจากแบตเตอรี่ที่ต่ำมากกว่าที่ควรจะเป็นซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการปิดวงจรหรือลดความเร็วก่อนถึงจุดสิ้นสุดของรางเพื่อความปลอดภัย นั่นคือผลการทดลองที่นำมาพิจารณาได้อย่างมีประสิทธิภาพคือระยะ 0 เมตรถึง 7 เมตรสามารถเขียนรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่กับระยะทาง ได้เป็น



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางและเวลา

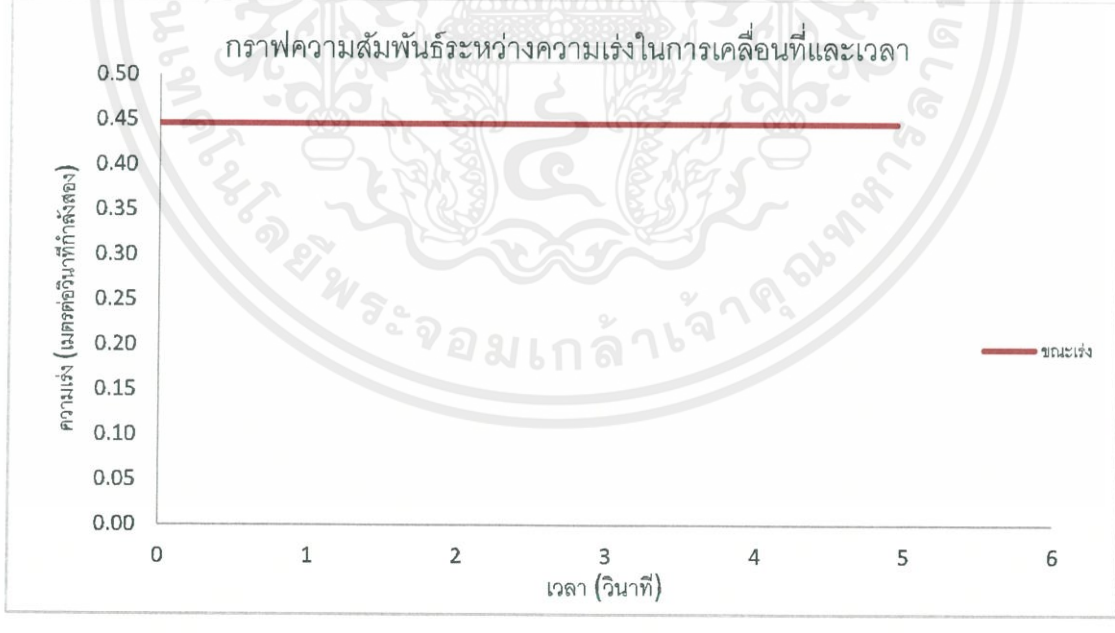
เมื่อพิจารณารูปที่ 5.3 จะพบว่าเคลื่อนที่นั่นยังไม่ได้เข้าสู่การเป็นเส้นตรง นั่นคือการเคลื่อนที่ยังอยู่ในช่วงของการเร่งความเร็ว ซึ่งนำเส้นแนวโน้มมาเขียนรูปวิเคราะห์ความเร่งโดยเส้นแนวโน้มที่พิจารณาคือพหุนามกำลังสองหรือช่วงความเร่งคงที่ จะมีสมการเส้นแนวโน้มเป็น $s = 0.223t^2 + 0.336t$ เมื่อพิจารณาความเร็วการเคลื่อนที่โดยการหาอนุพันธ์ของระยะทางเทียบกับเวลา จะได้ $v = \frac{ds}{dt} = 0.446t + 0.336$ สามารถเขียนรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและเวลาได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและเวลา

เมื่อพิจารณาความเร่งการเคลื่อนที่โดยการหาอนุพันธ์ของความเร็วเทียบกับเวลา จะได้ $a = \frac{dv}{dt} = 0.446$ สามารถเขียนรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งและเวลาได้เป็น



รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งและเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นหมายความว่าการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าต้นแบบเคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่ 0.446 เมตร/วินาทีกำลังสอง และมีความเร็วเริ่มต้นที่ 0.336 เมตร/วินาที

จากหัวข้อ 4.2 พบว่าน้ำหนักรวมของรถไฟฟ้าต้นแบบคือ 140 กิโลกรัม ประสิทธิภาพการส่งกำลังในหัวข้อที่ 3 คือ 0.9 ประสิทธิภาพของมอเตอร์ คือ 0.78 และจากสมการแรงขับเคลื่อนรถไฟฟ้าต้นแบบจากการคำนวณในหัวข้อที่ 3 พบว่า

สมการแรงขับเคลื่อนจากการคำนวณ $= \frac{1}{2}(1.21)(0.17725)(0.75)V^2 + \frac{0.5(9.81)(m)}{50.85} + ma$

สมการแรงขับเคลื่อนจากการทดลอง $= \frac{(P_{\cdot\,Ai\,\S})(\eta_t)}{V}$

เมื่อนำมาพิจารณาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนตามสมการ $\%Error = \frac{Value_{test} - Value_{theory}}{Value_{theory}} \times 100\%$

และนำมาสร้างตารางแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการทดลองการขับเคลื่อนที่แรงดันไฟฟ้าคงที่ 19.67 โวลต์ จะได้

ตารางที่ 4.15 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการทดลองการขับเคลื่อนที่แรงดันไฟฟ้าคงที่ 19.67 โวลต์

ระยะทาง (m)	เวลา (s)	ความเร็ว ณ ขณะนั้น (m/s)	ความเร่ง ณ ขณะนั้น (m/s^2)	กำลังของมอเตอร์ (Watts)	แรงขับตามทฤษฎี (N)	แรงขับตามการทดสอบ (N)	เปอร์เซ็นความแตกต่าง (%)
0	0.00	0.37	0.45	0.00	94.91	0.00	ไม่พิจารณา
1	1.43	0.97	0.45	435.73	86.86	403.71	364.80
2	2.34	1.38	0.45	413.33	86.93	270.28	210.90
3	3.00	1.67	0.45	381.42	87.01	205.36	136.03
4	3.69	1.98	0.45	368.22	87.10	167.35	92.15
5	4.00	2.12	0.45	351.65	87.14	149.46	71.51
6	4.39	2.29	0.45	333.85	87.20	131.17	50.42
7	4.95	2.54	0.45	265.12	87.30	93.96	7.63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการพิจารณาตารางแสดงการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนพบว่าค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของการทดลองการขับเคลื่อนที่แรงดันไฟฟ้าคงที่ 19.67 โวลต์ พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์สูงสุดอยู่ที่ 364.80 เปอร์เซ็นต์ และค่าความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ต่ำสุดอยู่ที่ 7.63 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาช่วงที่เคลื่อนที่ด้วยความเร่งคงที่ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจะมีค่าเป็นบวกแบบลดลงในช่วงแรกตั้งแต่วินาทีที่ 0 ถึง 4.95 เมื่อพิจารณาสมการเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน $\%Error = \frac{\left\{\frac{(\eta_t)(\mathrm{P})}{V}\right\} - \left\{(8.30x10^{-2})\,\mathrm{V}^2 + 140a + 13.45\right\}}{\left\{(8.30x10^{-2})\,\mathrm{V}^2 + 140a + 13.45\right\}} \times 100\%$

พบว่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจะมีค่าลดลงเมื่อความเร่ง(a)เพิ่มขึ้น และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเร่ง(a)ลดลง ดังนั้นในช่วงที่เคลื่อนที่ด้วยความเร่งในวินาทีที่ 0 ถึง 4.95 ควรจะมีความเร่งมากกว่า 0.446 เมตรต่อวินาทีกำลังสองเพื่อลดค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนในช่วงแรกให้เฉลี่ยใกล้เคียงกับช่วงหลัง ซึ่งจากการพิจารณาแล้วแนวโน้มของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนหลังวินาทีที่ 4.95 ควรจะมีค่าติดลบ นั่นหมายความว่า การพิจารณาความเร่งแบบเฉลี่ยเท่ากันนั้นให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ไม่เหมาะสมเท่ากับการพิจารณาความเร่งเป็นแบบเชิงเส้นที่มีความชันติดลบ นั่นคือควรใช้สมการเชิงเส้นความชันติดลบในการพิจารณามากกว่าการใช้ค่าความเร่งเฉลี่ย

4.7.4 เปรียบเทียบผลการทดลองกับการลากภาระ 1300 กิโลกรัมด้วยความเร็ว 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

จากผลการทดลองพบว่าค่าแรงต้านระหว่างล้อกับรางของรถไฟฟ้าต้นแบบและรางเหล็กจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.008 ถึง 0.015 ถึงในที่นี่จะพิจารณาค่าสูงสุดซึ่งจะทำให้เกิดแรงต้านล้อสูงสุดคือ 0.015 เมื่อนำมาพิจารณาเทียบกับสมการการเคลื่อนที่ในหัวข้อที่ 3 จะพบว่าสมการการเคลื่อนที่จะเปลี่ยนแปลงจาก $F_T = 0.083V^2 + 0.034V^2 + 125.40 + 1300a$ เป็นสมการการเคลื่อนที่ใหม่ซึ่งคือ $F_T = 0.083V^2 + 0.034V^2 + 191.295 + 1300a$ ซึ่งเมื่อพิจารณาที่ความเร็วคงที่สูงที่สุดที่ 20 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จะพบว่ากำลังที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าต้นแบบคือ

$$P_{motor} = \frac{F_T V}{\eta_t} = \frac{\left[0.083(5.56)^2 + 0.034(5.56)^2 + 191.295 + 1300(0)\right](5.56)}{0.9} = 1204.12 \quad \text{วัตต์}$$

ซึ่งมากกว่ากำลังสูงสุดที่มอเตอร์ไฟฟ้าสามารถทำได้ที่ 780 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ในการลากน้ำหนักบรรทุก 1300 กิโลกรัม สามารถทำความเร็วสูงสุดได้ที่ $780 = \frac{\left[0.083(\mathrm{V})^2 + 0.034(\mathrm{V})^2 + 191.295 + 1300(0)\right](\mathrm{V})}{0.9} \rightarrow V = 3.64$ เมตรต่อวินาที หรือ 13.11 กิโลเมตรต่อชั่วโมงเมื่อพิจารณาว่าความเร่งตลอดช่วงการเคลื่อนที่มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาสมการแรงขับเคลื่อนใหม่ $F_T = 0.083V^2 + 0.034V^2 + 191.295 + 1300a$ สามารถพิจารณารูปแบบการเคลื่อนที่ที่ผู้จัดทำแนะนำในการขับเคลื่อนได้เป็นตาราง ดังนี้

ตารางที่ 4.16 ค่าความเร่ง ความเร็ว ระยะเร่ง และเวลาในการเร่งที่เหมาะแก่การขับเคลื่อน

No	Distance (m)	Velocity (m/s)	Time (s)	Acceleration (m/s^2)	Force (N)	Wheel power (W)	Motor power (W)
1	0.00	0.00	0.00	0.10	281.75	0.00	0.00
2	-	2.50	-	0.10	282.48	706.20	784.67
3	31.25	2.50	25.00	0.00	168.48	421.20	468.00

4.8 วิจารณ์ผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ความผิดพลาดจากการคำนวณและความผิดพลาดจากการทดลอง

ความผิดพลาดจากการคำนวณนั้นเป็นผลโดยมากมาจากค่าคงที่แรงต้านล้อและการพิจารณาความเร่งแบบความเร่งเฉลี่ย ดังนั้นหากต้องการลดเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณควรวัดค่าแรงต้านล้อให้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้นโดยใช้การทดสอบ**การหาแรงต้านการหมุนของล้อโดยใช้ไดนาโมมิเตอร์**เพื่อให้ได้ค่าคงที่แรงต้านล้อที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น สำหรับการพิจารณาความเร่งนั้นเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการคำนวณมากยิ่งขึ้นผู้ออกแบบควรพิจารณาความเร่งให้อยู่ในฟังก์ชันเชิงเส้นที่มีค่าความชันติดลบจึงจะให้ค่าที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อความผิดพลาดในการออกแบบ เช่น ประสิทธิภาพการส่งกำลัง การหมุนฟรีของล้อ แรงตกค้างในเบรก เป็นต้น ซึ่งหากสามารถคำนวณค่าคงที่เหล่านี้ก่อนออกแบบได้อย่างแม่นยำก็จะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการออกแบบเพิ่มขึ้นอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับความผิดพลาดทางการทดลองนั้นเกิดเนื่องจากวิธีการทดลองที่มีความน่าเชื่อถือน้อยโดยการปรับตัวแบ่งแรงดันโดยใช้สายตามนุษย์นั้นอาจเกิดความผิดพลาดได้สูง ดังนั้นการออกแบบการทดลองแบบใหม่โดยการหมุนไปยังระดับที่ต้องการก่อนหลังจากนั้นใช้สวิตถ์เปิดปิดเป็นตัวเริ่มทำงานระบบพร้อมทั้งติดตัววัดแรงดันไฟฟ้าไว้ที่ทางเข้าของมอเตอร์จะช่วยให้เก็บผลการทดลองซ้ำได้อย่างแม่นยำและมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ความผิดพลาดทางการทดลองอาจเกิดจากอุปกรณ์การวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ทางออกของแบตเตอรี่ที่มีความไวไม่เหมาะสม ความแม่นยำไม่เท่าที่ควร อีกทั้งความละเอียดของเวลาในกล้องวีดีโอก็มีผลเช่นกัน ดังนั้นการปรับปรุงอุปกรณ์ในการวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขาออกจากแบตเตอรี่และปรับปรุงกล้องบันทึกภาพให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นก็จะช่วยลดค่าเปอร์เซ็นความผิดพลาดได้อีกทางหนึ่งได้ด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาทฤษฎี ออกแบบ จัดทำ และทดลองรถจักรไฟฟ้าต้นแบบสำหรับขนาดความกว้างทาง $7\frac{1}{4}$ นิ้ว พบว่า

1. ตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อแรงต้านการเคลื่อนที่ของรถจักรไฟฟ้าต้นแบบประกอบไปด้วย น้ำหนักลากจูงรวม (m) , แรงต้านอากาศ (R_a) , แรงต้านล้อ (R_r) , ประสิทธิภาพการส่งกำลัง (η_t) , ประสิทธิภาพมอเตอร์ไฟฟ้า (η_m) , ความเร็วในการเคลื่อนที่ (V) และความเร่งในการเคลื่อนที่ (a)

2. การสร้างกำลังขับเคลื่อนของรถจักรไฟฟ้าต้นแบบทำโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าในการสร้างกำลังขับเคลื่อนด้วยหลักการสร้างสนามแม่เหล็กจากขดลวดทองแดงที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านทำให้เกิดการหมุนของแกนเพลาที่ได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นหลักการเปลี่ยนแปลงพลังงานในรูปของไฟฟ้ามาเป็นพลังงานเชิงกล โดยการควบคุมความเร็วของรถจักรไฟฟ้าต้นแบบทำได้โดยควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้เพื่อแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมมอเตอร์ไฟฟ้าให้มีค่าน้อยลงมีผลให้กำลังไฟฟ้าที่ตกคร่อมบนมอเตอร์มีค่าน้อยลงทำให้ความเร็วรอบของมอเตอร์ไฟฟ้าลดลงที่แรงบิดเท่าเดิม

3. จากการศึกษาทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการส่งกำลังโดยใช้โซ่และจานโซ่ พบว่า การส่งกำลังโดยใช้โซ่และจานโซ่นั้นเป็นวิธีการส่งกำลังเชิงกลที่ทำได้ง่ายและประสิทธิภาพของการส่งกำลังนั้นจะลดลง 5 เปอร์เซ็นต่อหนึ่งวงโซ่ (loop)

4. การพิจารณาความแข็งแรงของรถจักรไฟฟ้าต้นแบบโดยใช้เหล็กเพลาขาวเป็นโครงสร้างมีความแข็งแรงเพียงพอในการรับภาระแบบสถิต 300 กิโลกรัม ด้วยค่าตัวประกอบความปลอดภัย 7.3 เมื่อพิจารณาผ่านโปรแกรม ANSYS 14.0

5. จากการทดลองพบว่ารถจักรไฟฟ้าต้นแบบย่อส่วน 1 ต่อ 8 สำหรับขนาดความกว้างทาง $7\frac{1}{4}$ นิ้ว สามารถขับเคลื่อนได้โดยการใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1000 วัตต์เป็นต้นกำลังขับเคลื่อนและใช้โซ่และจานโซ่เป็นระบบส่งกำลัง

6. จากการทดลองพบว่ารถจักรไฟฟ้าต้นแบบสามารถที่จะลากจูงตู้รถไฟน้ำหนัก 500 กิโลกรัมจำนวน 2 ตู้ ได้ความเร็วสูงสุดที่ 13.11 กิโลเมตรต่อชั่วโมงเมื่อพิจารณาว่าความเร่งตลอดช่วงการเคลื่อนที่มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ และมีค่าแนะนำที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟจำลองที่ความเร่งเฉลี่ย 0.1 เมตรต่อวินาทีกำลังสอง ความเร็วสูงสุดเป็น 2.50 เมตรต่อวินาที หรือ 9 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ปัญหาที่พบในการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงอุปสรรคและปัญหาในการออกแบบและพัฒนารถจักรไฟฟ้าต้นแบบสำหรับขนาดความกว้างทาง $7\frac{1}{4}$ นิ้ว โดยสามารถแบ่งเป็นเป็น 4 ข้อ ดังนี้

1. การเลือกใช้มอเตอร์และระบบส่งกำลัง ในการออกแบบและพัฒนารถจักรไฟฟ้าต้นแบบในปริญญานิพนธ์นี้นั้นได้ทำการเลือกมอเตอร์ MY1020 ขนาด 1000 วัตต์มาใช้งานซึ่งเป็นผลให้ไม่สามารถทำความเร็วและความเร่งตามเงื่อนไขได้เนื่องจากข้อจำกัดของงบประมาณ อีกทั้งการออกแบบระบบส่งกำลังด้วยการติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าฟ้าไว้บนตัวรถจักรไฟฟ้าต้นแบบและใช้โซ่เพื่อส่งกำลังไปยังเพลาขับแทนการใช้แบบห้อยมอเตอร์ไฟฟ้าไว้ที่แคร่ของรถจักรไฟฟ้าต้นแบบส่งผลให้รัศมีการเลี้ยวของรถจักรไฟฟ้าต้นแบบนั้นต่ำลง ซึ่งทางคณะผู้จัดทำเห็นว่าสามารถแก้ไขปัญหานี้ได้โดยการออกแบบระบบต้นกำลังให้เป็นชุดเดียวกับแคร่ของรถจักรไฟฟ้าต้นแบบ (motor bogie) โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาดเล็กแต่กำลังสูงจำนวนสี่ตัวติดไว้ยังแต่ละล้อของมอเตอร์โบกี้และใช้ระบบควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าตัวเดียวกัน การทำเช่นนี้จะช่วยให้กำลังรวมในการส่งกำลังเพิ่มสูงขึ้น อีกทั้งยังลดการลื่นไถลของล้อที่อาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากการเพิ่มล้อขับเคลื่อนจากสองล้อเป็นสี่ล้อ และสามารถเพิ่มรัศมีการเลี้ยวของรถจักรไฟฟ้าต้นแบบได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามงบประมาณในการทำเช่นนี้นั้นจะสูงมากขึ้นตามไปด้วย
2. การวิเคราะห์ความเร่ง ในการวิเคราะห์ความเร่งนั้นจำเป็นต้องทราบแรงบิดของมอเตอร์ที่พิจารณาอย่างแท้จริง อย่างไรก็ตามในการออกแบบรถจักรไฟฟ้าต้นแบบทางคณะผู้จัดทำได้สมมติใช้ค่าแรงบิดสูงสุดจากข้อมูลที่ทราบจากผู้ผลิตที่ความเร็วรอบ 2,825 รอบต่อนาที ซึ่งให้ค่าแรงบิด 2.84 นิวตันเมตร แต่ในความเป็นจริงค่าแรงบิดจะสูงกว่า 2.84 นิวตันเมตร ดังนั้นค่าความเร่งที่วิเคราะห์ได้ในความเป็นจริงจึงควรมีค่าสูงกว่าที่แสดงในหัวข้อที่ 3 โดยสามารถลดความผิดพลาดลงด้วยการนำมอเตอร์ไปทดสอบแรงบิดผ่านเครื่องทดสอบแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์เพื่อนำกราฟที่ได้มาสร้างสมการเพื่อพิจารณาต่อ
3. อุปกรณ์ภายในเวิคชอป ในการออกแบบและพัฒนารถจักรไฟฟ้าต้นแบบในปริญญานิพนธ์นี้ คณะผู้จัดทำได้ประสบปัญหาการขาดแคลนอุปกรณ์ภายในเวิคชอปสำหรับสร้างและแก้ไขชิ้นงาน อาทิ การใช้เครื่องเอ็นซี ใบมีดกลึง ดอกสว่านขนาด 1 นิ้ว เครื่องมือสำหรับต๊าปชิ้นงาน และอื่นๆ ซึ่งเป็นผลให้อุปกรณ์บางอย่างภายในรถจักรไฟฟ้าต้นแบบไม่ได้ขนาดหรือมาตรฐานตามที่ต้องการและอุปกรณ์บางอย่างภายในรถจักรไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้นแบบจำเป็นต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจ้างผู้ผลิตจากภายนอกทำขึ้น ด้วยเหตุเหล่านี้ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการทำปริญญานิพนธ์นี้มากยิ่งขึ้นและมาตรฐานในการรถจักรไฟฟ้าต้นแบบต่ำลง ทางคณะผู้จัดทำจึงเห็นว่าทางเวิคชอปของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลควรมีการซื้ออุปกรณ์ต่างๆเพื่อใช้ในการส่งเสริมการเรียนการสอนมายิ่ง

4. การออกแบบและเก็บผลการทดลอง จากการทดลองพบว่ามีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการทดลองซึ่งสามารถแบ่งออก ได้แก่ ความผิดพลาดจากการคำนวณและความผิดพลาดจากการทดลอง โดยความผิดพลาดจากการคำนวณนั้นเป็นผลโดยมากมาจากค่าคงที่แรงต้านล้อและการพิจารณาความเร่งแบบความเร่งเฉลี่ย ดังนั้นหากต้องการลดเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณควรวัดค่าแรงต้านล้อให้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้นโดยใช้การทดสอบการหาแรงต้านการหมุนของล้อโดยใช้ไดนาโมมิเตอร์เพื่อให้ได้ค่าคงที่แรงต้านล้อที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น สำหรับการพิจารณาความเร่งนั้นเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการคำนวณมากยิ่งขึ้นผู้ออกแบบควรพิจารณาความเร่งให้อยู่ในฟังก์ชันเชิงเส้นที่มีค่าความชันติดลบจึงจะให้ค่าที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อความผิดพลาดในการออกแบบ เช่น ประสิทธิภาพการส่งกำลัง การหมุนฟรีของล้อ แรงตกค้างในเบรก เป็นต้น ซึ่งหากสามารถคำนวณค่าคงที่เหล่านี้ก่อนออกแบบได้อย่างแม่นยำก็จะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการออกแบบเพิ่มขึ้นด้วย

สำหรับความผิดพลาดทางการทดลองนั้นเกิดเนื่องจากวิธีการทดลองที่มีความน่าเชื่อถือน้อยโดยการปรับตัวแบ่งแรงดันโดยใช้สายตามนุษย์นั้นอาจเกิดความผิดพลาดได้สูง ดังนั้นการออกแบบการทดลองแบบใหม่โดยการหมุนไปยังระดับที่ต้องการก่อนหลังจากนั้นใช้สวิตถ์เปิดปิดเป็นตัวเริ่มทำงานระบบพร้อมทั้งติดตัววัดแรงดันไฟฟ้าไว้ที่ทางเข้าของมอเตอร์จะช่วยให้เก็บผลการทดลองซ้ำได้อย่างแม่นยำและมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ความผิดพลาดทางการทดลองอาจเกิดจากอุปกรณ์การวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ทางออกของแบตเตอรี่ที่มีความไวไม่เหมาะสม ความแม่นยำไม่เท่าที่ควร อีกทั่งความละเอียดของเวลาในกล้องวีดีโอก็มีผลเช่นกัน ดังนั้นการปรับปรุงอุปกรณ์ในการวัดแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ขาออกจากแบตเตอรี่และปรับปรุงกล้องบันทึกภาพให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นก็จะช่วยลดค่าเปอร์เซ็นความผิดพลาดได้อีกทางหนึ่งได้ด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] ศูนย์วิจัยกสิกรไทยชี้รถติดทำสูญเงิน60ลบ./วัน ,กรุงเทพธุรกิจ 9 กันยายน 2559 [Online] http://www.bangkokbiznews.com/news/detail/717128

[2] Pavel Sovička, Matej Pácha, Pavol Rafajdus. 2017. **Model railway traction performance measurements and analysis.** Procedia Engineering (2017) 192: 824 – 829. Accessed 12 November 2017. doi: 10.1016/j.proeng.2017.06.142.

[3] ShengLiu, YeTian, W.J.T.(Bill)Daniel, PaulA.Meehan. 2016. **Modelling of track wear damage due to changes in friction conditions: A comparison between AC and DC electric drive locomotives.** Wear (2016) 366-367: 338-345. Accessed 12 November 2017. doi.org/10.1016/j.wear.2016.05.023.

[4] Yi Zhu. 2013. **Adhesion in the wheel contact.** Sweden: KTH Industrial Engineering and Management.

[5] SIGHARD F. HOERNER. 1965. **Fluid-Dynamic Drag** theoretical, experimental and statistical information

[6] นคร จันทศร. 2554 **ช่างรถไฟ ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ โครงการพัฒนาระบบขนส่งทางรางและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวเนื่องของประเทศไทย**. พิมพ์ครั้งที่1(2554). กรุงเทพฯ:สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโนยีแห่งชาติ

[7] Program AutoCAD 2012, (Autodesk, Inc.)

[8] Program Ansys 14.0, (ANSYS, Inc.)

[9] Engineering ToolBox, (2008). *Rolling Resistance*. [online] Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/rolling-friction-resistance-d_1303.html [Accessed 26 November 2017].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

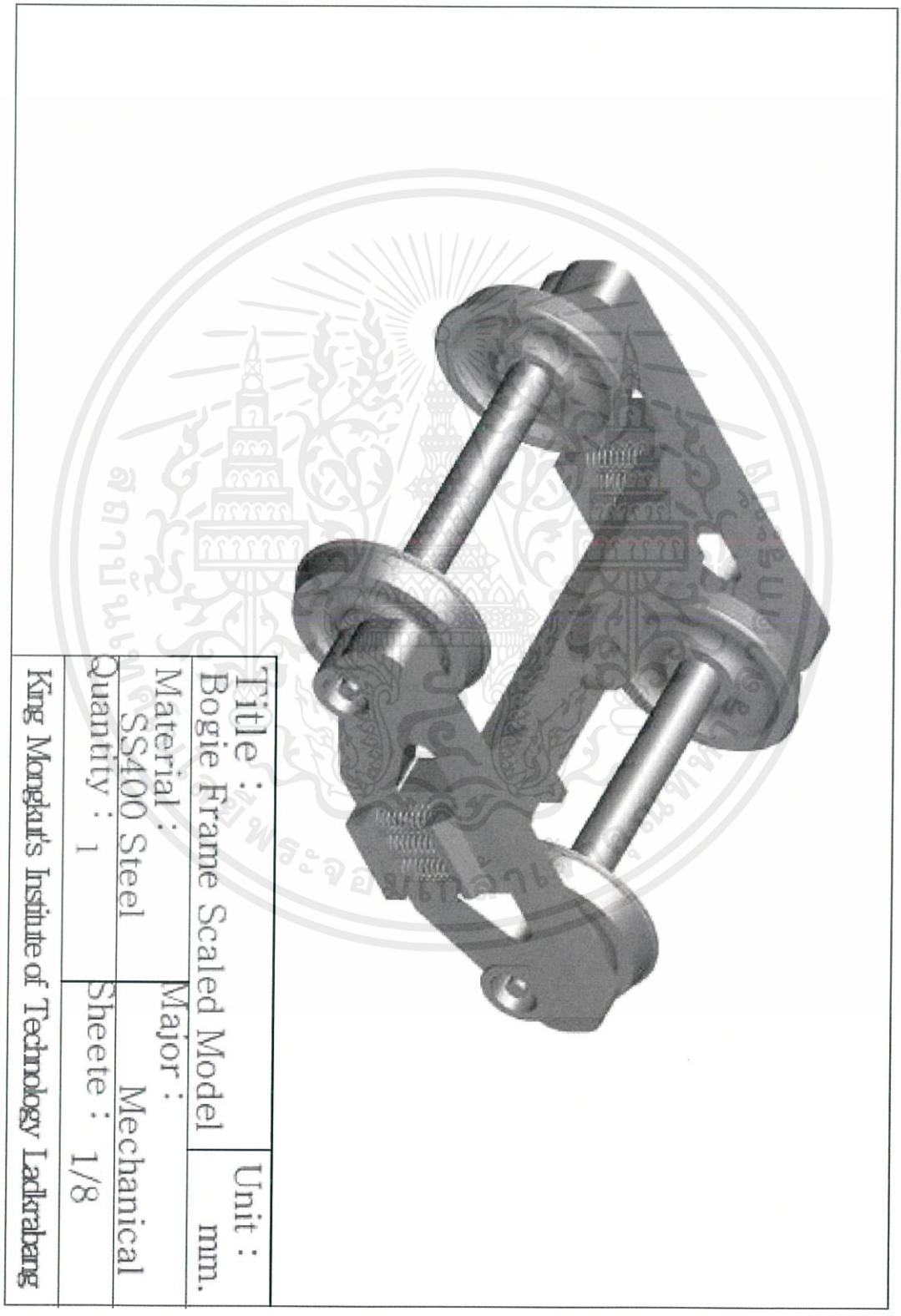


ภาคผนวก

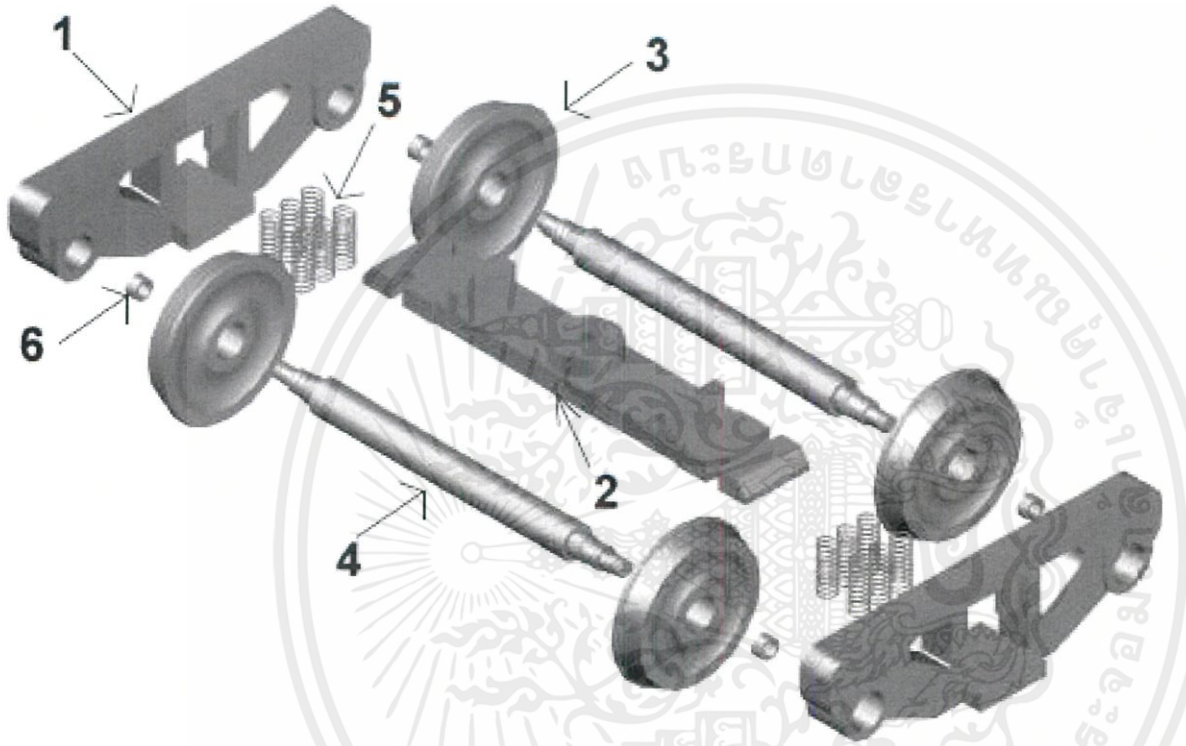
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

แบบจำลองแคร่รถไฟ



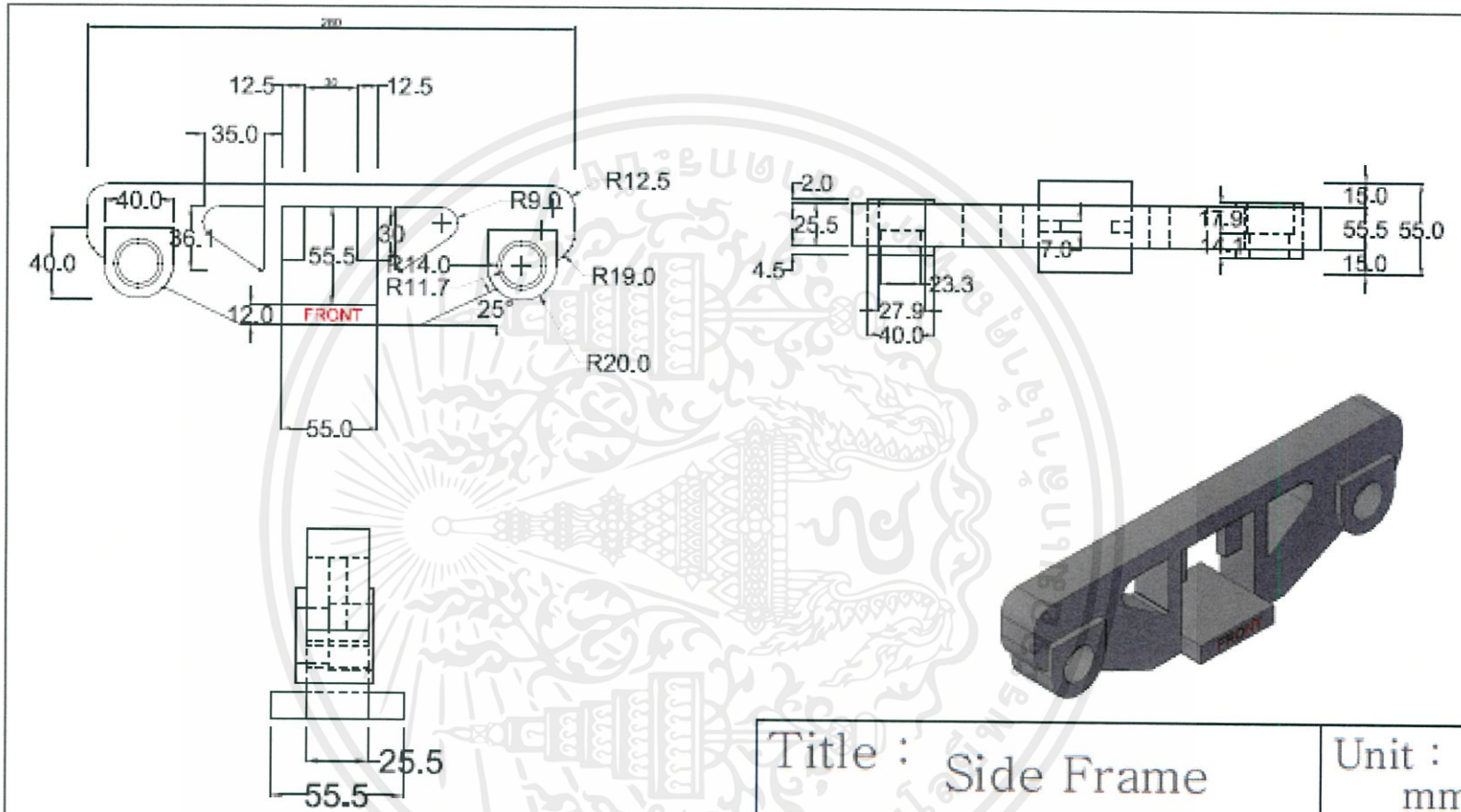
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



No.	Name	Qty
1	Side Frame	2
2	Mid Frame	1
3	Wheel	4
4	Shaft	2
5	Spring	12
6	Bearing	4

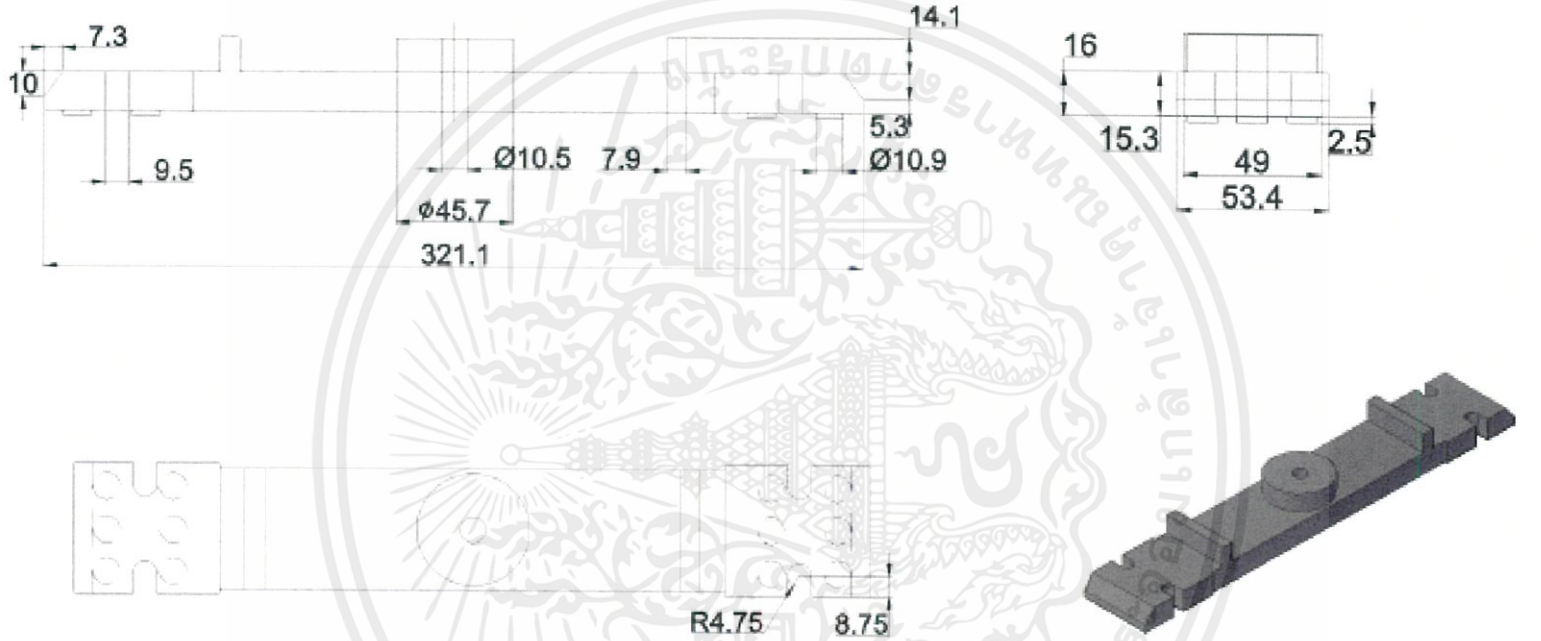
Title : Deatails of Bogie Frame Scaled Model	
Material : SS400 Steel	Major : Mechanical
Quantity : 1	Sheete : 2/8
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



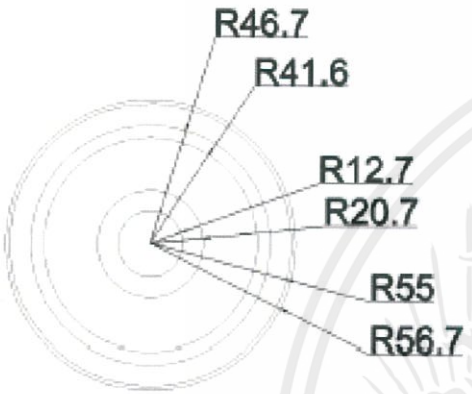
Title : Side Frame		Unit : mm.
Material : SS400 Steel	Major : Mechanical	
Quantity : 2	Sheete : 3/8	
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ ทำซ้ำ ดัดแปลง ไม่ว่าส่วนหนึ่งส่วนใดของเอกสารนี้ ในรูปแบบหรือช่องทางใดๆ ทั้งสิ้น นอกจากนี้ยังไม่อนุญาตให้นำเอกสารนี้ไปเผยแพร่ต่อ ในลักษณะที่ก่อให้เกิดการละเมิดลิขสิทธิ์ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น



Title : Bogie Mid Frame	Unit : mm.
Material : SS400 Steel	Major : Mechanical
Quantity : 1	Sheete : 4/8
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ ทำสำเนา ดัดแปลง หรือเผยแพร่ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ลบข้อความนี้ออก และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้







Title : Wheel	Unit : mm.
Material : SS400 Steel	Major : Mechanical
Quantity : 4	Sheete : 5/8
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

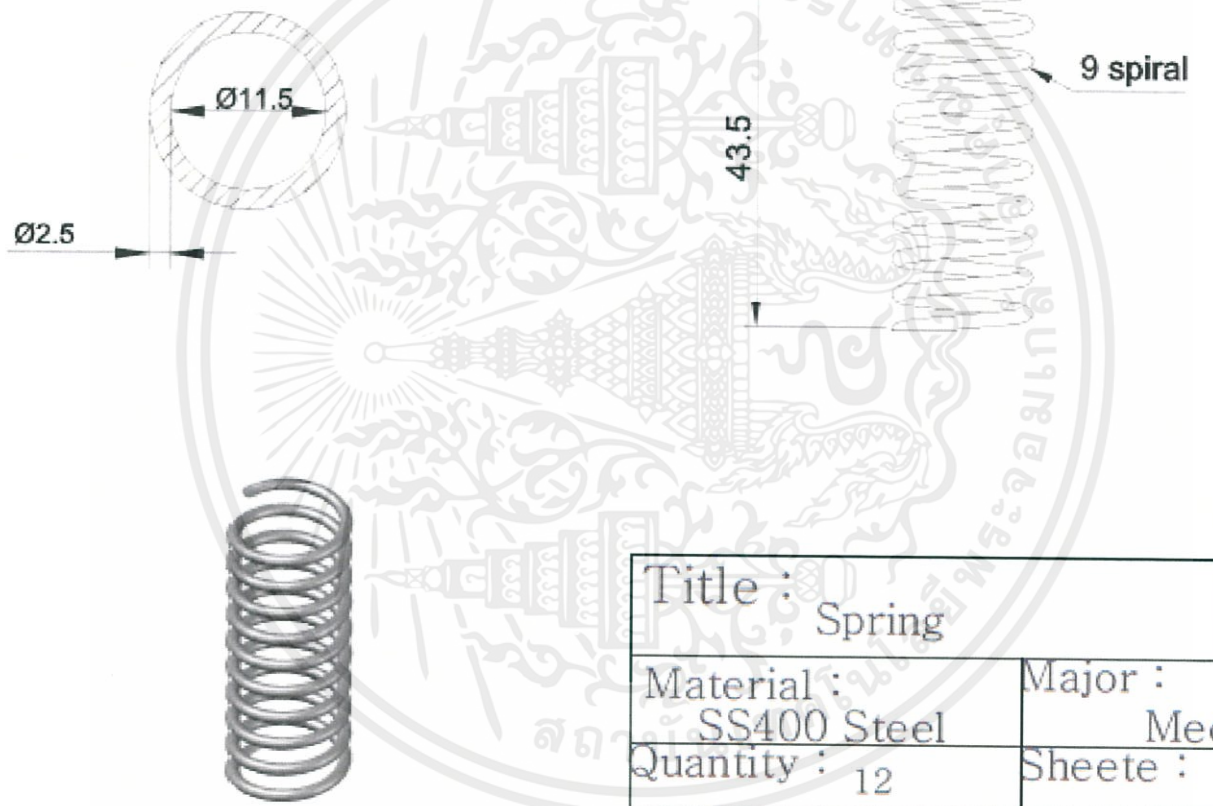






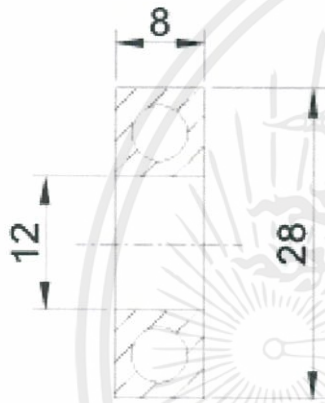
Title : Shaft	Unit : mm.
Material : SS400 Steel	Major : Mechanical
Quantity : 2	Sheete : 6/8
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่การณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Title : Spring		Unit : mm.
Material : SS400 Steel	Major : Mechanical	
Quantity : 12	Sheete : 7/8	
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่อนุญาตให้ ทำสำเนา ดัดแปลง หรือส่งต่อให้กับบุคคลอื่น และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



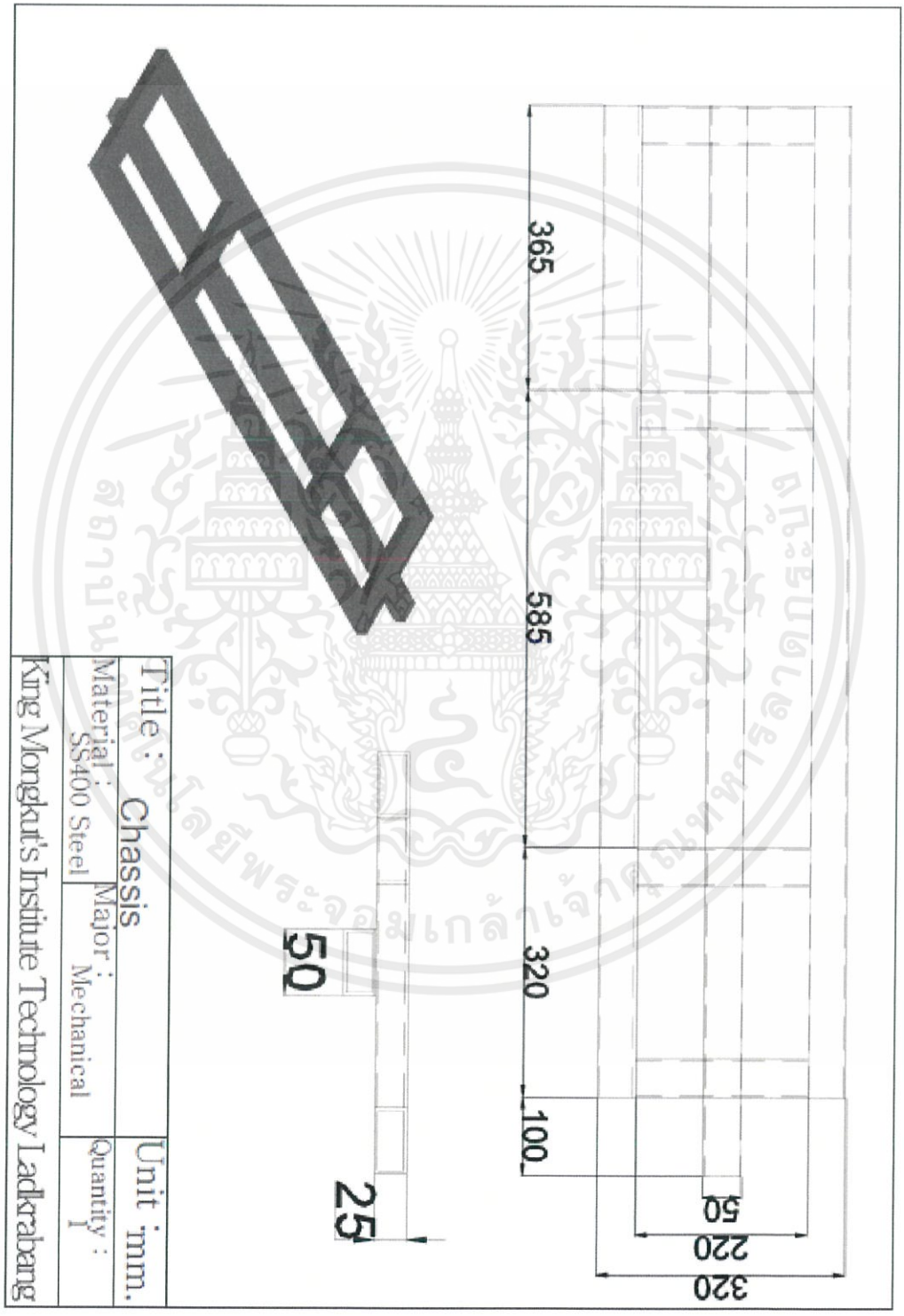


Title	Unit :
Bearing	mm.
Material : SKF 6001	Major : Mechanical
Quantity : 4	Sheete : 8/8
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

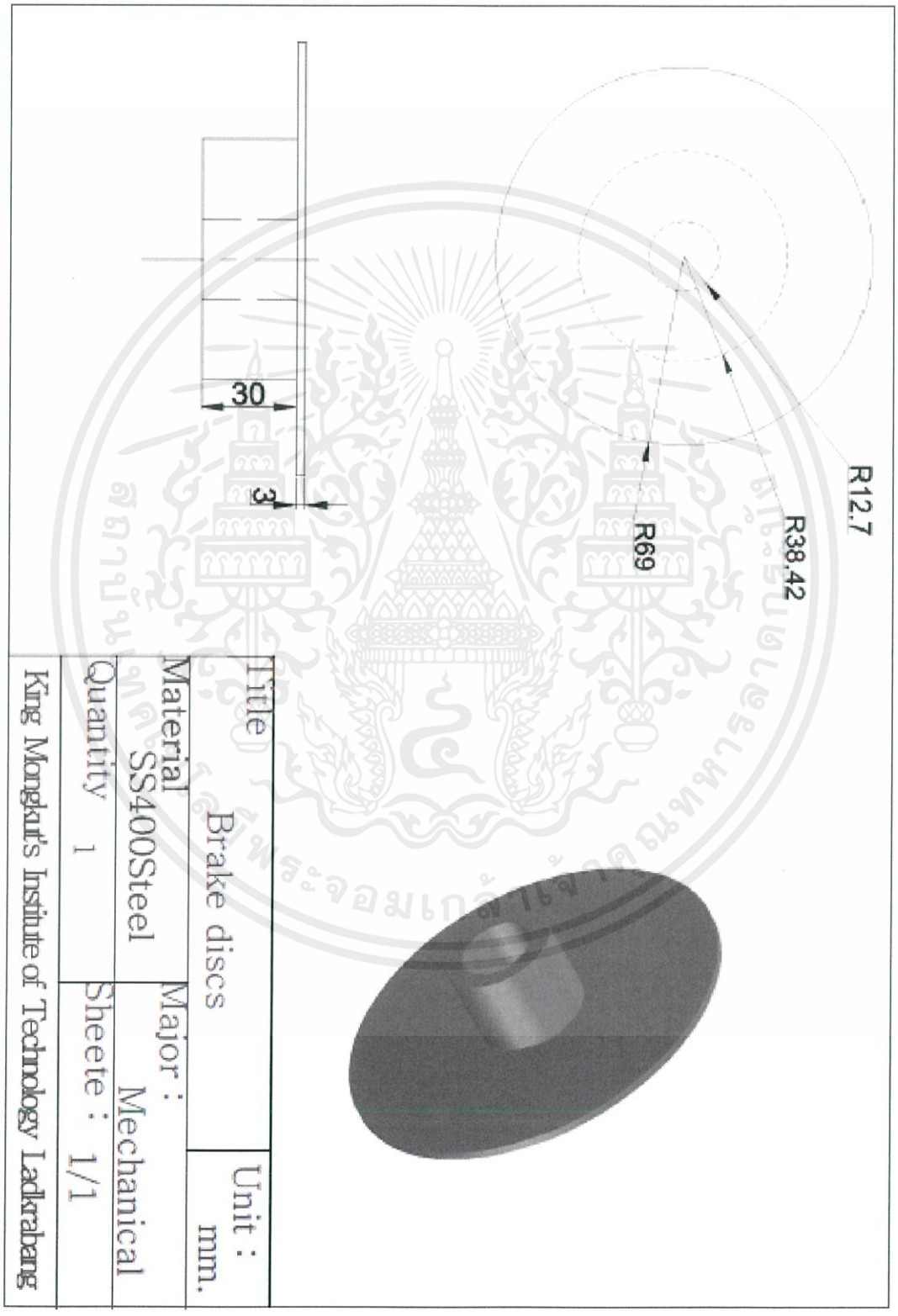
แบบแชสซี (Chassis)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

แบบจานเบรก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง
พื้นที่หน้าตัดรถจักรไฟฟ้าและขบวนผู้โดยสาร

พื้นที่หน้าตัดรถจักรไฟฟ้า (A_{fl})

พื้นที่หน้าตัดรถไฟฟ้ามีต้นแบบมาจาก รถจักรดีเซลไฟฟ้า CSR ความยาวของตัวรถจักร 20,490 มิลลิเมตร ความกว้างของตัวรถ 2,836 มิลลิเมตร ความสูง 4,000 มิลลิเมตร (ข้อมูลอ้างอิง http://portal.rotfaithai.com) โดยนำเอาขนาดความกว้างและความสูงของตัวรถ มาย่อขนาดลง 1 ต่อ 8

$$\text{ความกว้างของรถจักรไฟฟ้า} = \frac{2836}{8}\ mm. = 354.5\ mm. = 0.3545\ m.$$

$$\text{ความสูงของรถจักรไฟฟ้า} = \frac{4000}{8}\ mm. = 500\ mm. = 0.5\ m.$$

$\therefore$ พื้นที่หน้าตัดรถจักรไฟฟ้า (A_{fl}) = ความกว้างของรถจักรไฟฟ้า $\times$ ความสูงของรถจักรไฟฟ้า

$$= 0.3545 \times 0.5 = 0.17725\ m^2 \approx 0.18\ m^2$$

พื้นที่หน้าตัดขบวนผู้โดยสาร (A_{fp})

พื้นที่หน้าตัดขบวนผู้โดยสารขนาดความสูงยึดมาจากค่าเฉลี่ยสูงนั่งของคนไทย คือ 85 เซนติเมตร (ข้อมูลอ้างอิง มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช , 2534 , หน้า.130) ขนาดความกว้างของขบวนผู้โดยสาร คือ 32 เซนติเมตร (ข้อมูลอ้างอิง http://titantrains.net)

$\therefore$ พื้นที่หน้าตัดขบวนผู้โดยสาร (A_{fl}) = ความกว้างของขบวนผู้โดยสาร $\times$ ความสูงของขบวนผู้โดยสาร

$$= 0.32 \times 0.85 = 0.272\ m^2 \approx 0.27\ m^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ

สัมประสิทธิ์แรงฉุดของอากาศ

สัมประสิทธิ์แรงฉุดของอากาศของรถจักรไฟฟ้าและขบวนผู้โดยสารอ้างอิงจากหนังสือ Fluid-Dynamic Drag [4]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้