

การวิเคราะห์และออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าในรถสูตรนักศึกษา

Analysis and Design of Formula SAE electric Powertrain



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล ร่วมกับ
หลักสูตรวิศวกรรมขนส่งทางราง
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์และออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าในรถสูตรนักศึกษา

Analysis and Design of Formula SAE electric Powertrain



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกล ร่วมกับ

หลักสูตรวิศวกรรมขนส่งทางราง

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Analysis and Design of Formula SAE electric Powertrain



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING AND
RAILTRANSPORTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2019

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์และออกแบบระบบส่งกำลังไฟฟ้าในรถสูตรนักศึกษา

นายณัฐพงศ์	พงศ์พนางาม	รหัส 59010446
น.ส.เมธาวิณี	ชาปัญญา	รหัส 59011101
นายอุกฤษฏ์	มิกลีน	รหัส 59011584
ผศ.ดร. สุตาภัทร แคว้นเขาเม็ง		อาจารย์ที่ปรึกษา
ผศ.ดร. ปัญญา ชันธุ์สุวรรณ		อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2562

บทคัดย่อ

ปัจจุบันรถไฟฟ้าได้เกิดความยอดนิยมขึ้นอันเนื่องมาจากปัญหามลภาวะทางอากาศของโลก ได้เป็นประเด็นที่หลายคนต่างให้ความสนใจมากขึ้น และยังทำให้การแข่งขันรถสูตรนักศึกษาในประเทศไทยมีนักศึกษาลงแข่งรายการรถไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้การออกแบบรถไฟฟ้าสูตรศึกษานั้น ต้องมีการใช้งบประมาณอย่างระมัดระวังมากที่สุด การที่จะสร้างต้นแบบออกมานั้นจึงเป็นการสิ้นเปลืองโดยใช่เหตุ โพรเจกต์จึงต้องการที่จะสร้างแบบจำลองของรถสูตรไฟฟ้านักศึกษาโดยใช้โปรแกรม Simulink จากข้อมูลวงจรการขับซี่ในปี พ.ศ. 2561 ที่ได้รับรางวัลการแข่งขัน Autocross อันดับหนึ่งของทีมมหาวิทยาลัย เพื่อจำลองหาค่าต่าง ๆ เช่น กำลังของรถที่ต้องใช้ช่วงแรงบิดและรอบในการทำงานของมอเตอร์ พลังงานของระบบแบตเตอรี่ที่รถต้องการและปริมาณแบตเตอรี่ที่หลงเหลือหลังจบการแข่งขันทดสอบสมรรถนะเพื่อใช้ในการตัดสินใจในการสร้างรถ จุดมุ่งหมายของเราคือเพื่อให้สามารถประมาณข้อเปรียบเทียบต่าง ๆ ของรถเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงรูปแบบระบบส่งกำลังของรถ ได้แก่ แบบขับล้อหลังโดยใช้มอเตอร์เดี่ยวแบบขับล้อหลังโดยใช้มอเตอร์แยกในแต่ละล้อ และแบบขับซี่สี่ล้อ โดยจำกัดมวลของรถให้คงที่ และโปรแกรมจะต้องสามารถปรับแต่งค่าตัวแปรต่าง ๆ ได้ เพื่อให้สามารถจำลองรถรูปแบบต่าง ๆ ได้ในอนาคต

คำหลัก: ยานพาหนะที่ใช้มอเตอร์ขับเคลื่อนที่, รถไฟฟ้าสูตรนักศึกษา, ระบบ Powertrain, Formula SAE

Analysis and Design of Formula SAE electric Powertrain

NATTAPHONG PHONGPANANGAM 59010446

MAYTAWINEE CHAPANYA 59011101

UKRIT MEEKLIN 59011584

Asst.Prof.Dr. SUTAPAT KWANKAOMENG Advisor

Asst.Prof.Dr. PANYA KANSUWAN Advisor

Year 2019

ABSTRACT

Nowadays the electric vehicles become more popular due to the world air pollution problem. This project presents a simulation program using Simulink about Formula SAE electric vehicles from driving circle data in the year 2018 which won the 1st prize in an autocross event and collects the data about the required torque, the required motor RPM, the required tractive power, the required current and the state of charge of the batteries to make decisions building a car. Our archived goal is to estimate the trade-offs from changing powertrain configurations of the car, a rear-wheel-drive with a motor, a rear-wheel-drive with 2 motors on each wheel and an all-wheel-drive, with restricted mass and create an adjustable program that can be used with other car models in the future.

Keyword: Formula Electric Vehicle, Powertrain System, Formula SAE

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยดี ด้วยความกรุณาจากอาจารย์หลาย ๆ ท่าน ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ผศ.ดร. สุตาภัทร แคว้นเขาเม็ง และ ผศ.ดร. ปัญญา ชันธุ์สุวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งได้กรุณาให้ความช่วยเหลือในการให้คำแนะนำ ติดตามความก้าวหน้าในการทำปริญญาานิพนธ์ ชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ และการดูแลเอาใจใส่เป็นอย่างดีและสม่ำเสมอตลอดการทำงาน อีกทั้งขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ผู้เป็นกรรมการคุมสอบที่ได้ให้คำแนะนำในข้อบกพร่องที่ควรแก้ไขเพิ่มเติม เพื่อให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ ผู้ทำวิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความเมตตากรุณาจากท่านอาจารย์ทุก ๆ ท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัวเป็นอย่างยิ่งที่ได้ให้การสนับสนุน เลี้ยงดูมาอย่างดี ให้ทุนการศึกษาพร้อมให้โอกาสด้านการศึกษาอย่างเต็มที่ และให้กำลังใจเสมอมาในทุก ๆ ด้านรวมถึงในการทำปริญญาานิพนธ์นี้ด้วย ขอขอบพระคุณรุ่นพี่ และเพื่อน ๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และคำแนะนำในการทำปริญญาานิพนธ์ หากปราศจากบุคคลที่กล่าวมาข้างต้น ปริญญาานิพนธ์เล่มนี้คงไม่สามารถสมบูรณ์ได้

คุณค่าและประโยชน์อันมีค่า ที่ได้จากปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน ตลอดจนผู้ให้ความช่วยเหลือในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

นายณัฐพงศ์	พงศ์พนางาม
น.ส.เมธาวิณี	ชาปัญญา
นายอุกฤษฏ์	มีกลิ่น

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 การแข่งขันรถสูตรนักศึกษาในประเทศไทย (TSAE Competition)	1
1.2 กฎการแข่งขันที่เกี่ยวข้องในการออกแบบ.....	2
1.3 วัตถุประสงค์.....	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.5 แผนการดำเนินงาน.....	3
1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ข้อมูลเกี่ยวกับรถและการแข่งขัน.....	5
2.1 การเลือกโครงรถเดิมและข้อมูลของรถ.....	6
2.2 ข้อมูลการแข่งขันเดิม.....	8
2.3 รูปแบบระบบส่งกำลังรถไฟฟ้าสูตรนักศึกษา.....	9
2.3.1 ระบบขับเคลื่อนล้อหน้า (Front-wheel Drive).....	9
2.3.2 ระบบขับเคลื่อนล้อหลัง (Rear-wheel Drive).....	10
2.3.3 ระบบขับเคลื่อนรถ 4 ล้อ (4-wheel Drive).....	11
บทที่ 3 ข้อพิจารณาในการออกแบบ.....	12
3.1 แรงต้านทางพลศาสตร์.....	12
3.2 แรงยกและแรงกด.....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3 ความต้านทานการหมุน.....	14
3.4 แรงที่ใช้ในการเร่ง.....	15
3.5 แรงที่ใช้ในขับเคลื่อน.....	17
3.6 ความเร็วล้อหลังแต่ละล้อ.....	17
3.7 ความเร็วล้อทุกล้อ.....	19
3.8 การเบรกฟื้นฟู (Regenerative Breaking).....	20
3.8.1 การเบรกฟื้นฟูแบบอนุกรม.....	21
3.8.2 การเบรกฟื้นฟูแบบขนาน.....	21
3.9 ประสิทธิภาพของมอเตอร์.....	24
3.9.1 การสูญเสียจากทองแดง (copper losses).....	24
3.9.2 การสูญเสียจากเหล็ก (Iron losses).....	24
3.9.3 การสูญเสียจากแรงเสียดทานและลม (friction and windage losses).....	25
3.9.4 การสูญเสียที่คงที่ (constant losses).....	25
3.10 การคำนวณปริมาณแบตเตอรี่.....	25
3.11 การเลือกแบตเตอรี่.....	29
3.11.1 การเลือกชนิดของแบตเตอรี่.....	29
3.11.1.1 แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด(Lead acid battery).....	29
3.11.1.2 นิกเกิลแคดเมียม (Nickel cadmium, NiCad).....	30
3.11.1.3 นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ (Nickel metal hydride, NiMH).....	31
3.11.1.4 แบตเตอรี่โซเดียมซัลเฟอร์ (Sodium Sulphur batteries).....	31
3.11.1.5 แบตเตอรี่โซเดียมเมทัลคลอไรด์ (Sodium metal chloride batterie)...	32
3.11.1.6 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (The lithium ion battery).....	33
3.11.2 การเลือกประเภทของแบตเตอรี่.....	34

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 กรณีศึกษาและผลลัพธ์ของโปรแกรมจำลอง.....	38
4.1 กรณีศึกษาของการจำลองรถไฟฟ้าด้วยวงจรการขับเคลื่อน.....	38
4.2 ผลลัพธ์ที่ได้ของโปรแกรมจำลอง.....	42
4.2.1 การจำลองเมื่อทุกรูปแบบมีน้ำหนักมอเตอร์โดยรวมเท่ากัน.....	43
4.2.2 การจำลองเมื่อเปลี่ยนอัตราทดเกียร์ของรถขับเคลื่อนสี่ล้อ.....	45
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	48
5.1 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	48
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	49
เอกสารอ้างอิง.....	50
ภาคผนวก ก.....	51
ภาคผนวก ข.....	56

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงาน.....	3
2.1 ข้อมูลโดยทั่วไปของรถแข่ง KF2018.....	7
3.1 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านการหมุน.....	15
3.2 ตารางแสดงการเปรียบเทียบแบตเตอรี่ประเภทต่าง ๆ.....	35
4.1 ตารางแสดงคุณลักษณะของรถสกูตเตอร์ไฟฟ้า.....	39
4.2 ตารางแสดงคุณลักษณะรถแข่งที่ใช้ในการจำลอง.....	42



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เส้นทางการแข่งขันใน Skidpad event.....	5
2.2 เส้นทางการแข่งขันใน Endurance event ในปี พ.ศ. 2562 ที่ประเทศไทย.....	6
2.3 Driving circle ของการแข่งขัน skid pad ปี พ.ศ.2562.....	8
2.4 Curving Radius ของการแข่งขัน skid pad ปี พ.ศ.2562 โดยค่าที่เป็นบวกคือโค้งเลียวยซ้าย ลบคือ เลียวยขวาและศูนย์คือขับตรงไป.....	8
2.5 แสดงแผนภาพอิสระของแรงที่กระทำกับรถสูตรนักศึกษา แบบระบบขับเคลื่อนรถ 2 ล้อหน้า.....	9
2.6 แสดงแผนภาพอิสระของแรงที่กระทำกับรถสูตรนักศึกษา แบบระบบขับเคลื่อนรถ 2 ล้อหลัง.....	10
2.7 แสดงแผนภาพอิสระของแรงที่กระทำกับรถสูตรนักศึกษา แบบระบบขับเคลื่อนรถ 4 ล้อ.....	11
3.1 แรงดันด้านหน้าของตัวรถที่เกิดจากแรงต้านของอากาศ.....	13
3.2 การเกิดแรงยก แรงกดบนตัวรถ.....	14
3.3 แรงที่กระทำกับรถที่เคลื่อนที่บนทางชัน.....	15
3.4 การจัดเรียงอย่างง่ายของมอเตอร์ล้อที่เพลลาขับ.....	16
3.5 รูปทรงการเรียงตัวของล้อขณะขับเลียวยซ้าย.....	18
3.6 รูปทรงการเรียงตัวของล้อขณะขับเลียวยขวา.....	18
3.7 รัศมีการโค้งของแต่ละล้อ.....	19
3.8 ลักษณะแรงเบรกกับการกดแป้นเบรกของการเบรกไฟฟ้าแบบขนานและอนุกรม.....	21
3.9 แผนภาพแสดงการทำงานของการทำงานของการเบรกฟื้นฟูแบบอนุกรม.....	22
3.10 แผนภาพแสดงการทำงานของการทำงานของการเบรกฟื้นฟูแบบขนาน.....	23
3.11 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ Amphours charge capacity ของแบตเตอรี่ 42 Ah (C10) โดย กราฟนี้ได้มาจากการวัดของระบบแบตเตอรี่ lead acid โดย Hawker Energy Product Inc.....	26
3.12 แสดงค่าจากการจำลองโดย Peukert ที่เข้าใจข้อมูลจากการวัดของแบตเตอรี่ lead acid 42V....	27
3.13 แสดงการเปรียบเทียบแบตเตอรี่ชนิดต่าง ๆ.....	34
3.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ SOC-OCV ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน.....	37
4.1 แผนภาพแสดงการทำงานของแบบจำลองรถไฟฟ้า.....	38
4.2 แผนภาพแสดงวงจรการขับเคลื่อนของ ECE-47.....	39
4.3 แผนภาพแสดงแรงบิดและความเร็วในการทำงานของมอเตอร์รถสูตรนักศึกษาไฟฟ้าวงจรขับเคลื่อนของ ECE-47 ซึ่งบริเวณที่ชี้แสดงถึงจุดที่มอเตอร์ทำงานเป็นส่วนใหญ่บริเวณนั้น.....	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 แผนภาพแสดงแรงบิดและความเร็วในการทำงานของมอเตอร์รถสกูตเตอร์ไฟฟ้าวงจรการขับเคลื่อนของ ECE-47 ที่ได้ผลลัพธ์จากการจำลองโดยโปรแกรมที่เขียนใน Simulink.....	40
4.5 (บน)แผนภาพแสดงกำลังที่ใช้ขับเคลื่อนรถสกูตเตอร์ไฟฟ้าในวงจร ECE-47 โดนด้านซ้ายเป็นกราฟจากข้อมูล MATLAB ของหนังสือส่วนด้านขวาเป็นข้อมูลจากโปรแกรมจำลองที่ได้ (ล่าง)แผนภาพแสดงปริมาณแบตเตอรี่ที่ใช้ไป.....	41
4.6 กราฟ SOC vs time[s] ของรถในแต่ละระบบส่งกำลัง.....	43
4.7 กราฟ Motor Energy Losses[KJ] vs time[s].....	43
4.8 กราฟ Regenerative Braking Energy[KJ] vs time[s].....	44
4.9 กราฟ Efficiency Map ของมอเตอร์.....	45
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์แต่ละระบบส่งกำลัง.....	45
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์แต่ละอัตราทดเกียร์.....	46
4.12 กราฟแสดงพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากมอเตอร์ในแต่ละอัตราทดเกียร์.....	46
4.13 กราฟแสดงพลังงานที่ฟื้นฟูจากการใช้เบรกไฟฟ้าของแต่ละอัตราทดเกียร์.....	47
ข-1 Driving circle Block.....	57
ข-2 Driver Block.....	57
ข-3 Car Block.....	58
ข-4 Normal Force on Tires Block.....	58
ข-5 Brake Block.....	59
ข-6 Gear Block.....	60
ข-7 Motor Block.....	60
ข-8 Calculating Motor Efficiency Block.....	61
ข-9 Implementation of battery model.....	62

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์และคำย่อ

คำอธิบาย

A	พื้นที่หน้าตัดวัตถุ
C_D	Coefficient of Drag; ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน
C_L	Coefficient of Lift; ค่าสัมประสิทธิ์แรงยก
C_p	Peukert Capacity; ความจุแบตเตอรี่
CR_n	ประจุที่ออกจากแบตเตอรี่ทั้งหมดโดยการจำลองทั้ง n
DoD_n	Depth of discharge; ปริมาณแบตเตอรี่ที่ถูกใช้ไป
EV	Electric Vehicle; รถที่ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้า
F_D	Drag force; แรงต้านจากอากาศ
F_L	Lift force; แรงต้านที่กระทำกับรถในแนวแกน y
F_{down}	Down force; แรงกด
F_{te}	Tractive Effort; แรงที่ใช้ในการขับเคลื่อน
F_{rr}	Rolling resistance force; แรงต้านการหมุนของล้อ
F_{ad}	Aerodynamic drag; แรงต้านทางพลศาสตร์
F_{la}	Force required to give linear acceleration; แรงที่ใช้ในการเร่งเชิงเส้น
F_{ω_a}	Rotational acceleration; แรงที่ใช้ในการเร่งเชิงมุม
g	ความเร่งโน้มถ่วง
G	อัตราทดเกียร์ของระบบที่ต่อกับมอเตอร์
k	Peukert Coefficient
k_c	ค่าคงที่ที่ขึ้นกับความต้านทานของแปรงถ่านและขดลวดรวมถึงฟลักซ์แม่เหล็ก
k_i	ค่าคงที่ที่ขึ้นกับความแข็งแรงของสนามแม่เหล็ก
k_w	ค่าคงที่ที่ขึ้นกับขนาดและรูปร่างของมอเตอร์
m	มวลของรถ
SOC	battery state of charge; สถานการณ์ชาร์จ
V_{RR}	ความเร็วของล้อหลังด้านขวา
V_{RL}	ความเร็วของล้อหลังด้านซ้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

สัญลักษณ์และคำย่อ

คำอธิบาย

V_{FR}	ความเร็วของล้อหน้าด้านขวา
V_{FL}	ความเร็วของล้อหน้าด้านซ้าย
ρ	ความหนาแน่นของของไหล
v	ความเร็วของวัตถุที่เทียบของไหล
r	ความหนาแน่นของของไหล
μ_{rr}	สัมประสิทธิ์แรงต้านการหมุน
η_m	ประสิทธิภาพจากมอเตอร์



บทที่ 1

บทนำ

รถขับเคลื่อนพลังงานไฟฟ้าในปัจจุบัน กำลังเป็นที่นิยมจากกระแสลมพิษไอเสียจากเครื่องยนต์สันดาป ราคาแบตเตอรี่ที่ค่อยๆมีราคาที่ถูกลงและสมรรถนะที่ดีของรถขับเคลื่อนไฟฟ้าที่เทียบเท่าหรือดีกว่าเครื่องยนต์สันดาปหลาย ๆ รุ่น รวมทั้งบริษัทรถยนต์อื่น ๆ ที่ผลิตรถยนต์สันดาปก็เริ่มให้ความสนใจในพลังงานทางเลือก ทางทีมของชมรมรถยนต์ Initial ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จึงเริ่มสนใจที่จะหันมาพัฒนารถจากเดิมที่เป็นแบบสันดาปมาทำเป็นแบบพลังงานไฟฟ้า ในการแข่งขัน TSAE ทั้งนี้สิ่งแรกที่เราควรคำนึงก็คือ การเลือกใช้อุปกรณ์ให้เหมาะสม และการออกแบบระบบ Powertrain ให้รถเรามีข้อได้เปรียบกว่าทีมอื่น ๆ มากที่สุด

1.1 การแข่งขันรถสูตรนักศึกษาแห่งประเทศไทย (TSAE Competition)

การแข่งขันทีเอสเออี(TSAE) นั้น จัดมานานกว่า 10 ปีมาแล้ว จัดตั้งโดยสมาคมวิศวกรรมยานยนต์ไทย (สวท.) เป็นการแข่งขันทดสอบและพัฒนาทางด้านวิศวกรรมยานยนต์ที่จัดขึ้นทุกปีในประเทศไทย นักศึกษาแต่ละมหาวิทยาลัยจะมาแข่งขันกันออกแบบ สร้าง ทดสอบและแข่งขันรถสูตรแข่งขันขนาดเล็ก โดยใช้กฎการแข่งขันเดียวกับเอฟเอสเออี(FSAE) โดยจุดประสงค์ของการจัดคือ เพื่อให้โอกาสสำหรับนักศึกษาได้แสดงไอเดียการออกแบบ สาธิต พัฒนาความสามารถและการจัดการทรัพยากรมนุษย์ในแต่ละทีม เพื่อสร้างชิ้นงานที่เป็นความต้องการของอุตสาหกรรมยานยนต์และการแข่งขันมอเตอร์สปอร์ต โดยการแข่งขันทันทีมีอยู่ 8 รายการใหญ่ ๆ ได้แก่

- การจัดทำเอกสารการเงิน (Cost Report)
- การนำเสนอการออกแบบทางวิศวกรรม (Engineering Design)
- การทดสอบสมรรถภาพ (Autocross)
- การทดสอบการยึดเกาะถนน (Skidpad)
- การทดสอบอัตราเร่ง (Acceleration)
- ประสิทธิภาพของรถ (Efficiency)
- ความทนทานของรถ (Endurance)

ซึ่งเป็นการแข่งขันที่ต้องจัดการค่าใช้จ่ายและกระบวนการผลิตกันเองด้วย คล้ายกับการแข่งขันทางธุรกิจในโลกจริง และเมื่อไม่นานมานี้ทางสมาคมได้จัดการแข่งขันเพิ่มเติมอีกหนึ่งประเภทคือ การแข่งขัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รถสูตรนักศึกษาที่ขับเคลื่อนโดยไฟฟ้า จากเดิมที่มีแต่ระบบสันดาปภายใน ทั้งนี้ทางทีมของสถาบันยังไม่เคยได้เข้าร่วมรายการแข่งขัน และการที่จะเริ่มสร้างนั้นจะต้องให้ผลลัพธ์ที่มีความเป็นไปได้สูง ดังนั้นการออกแบบ และเลือกใช้อุปกรณ์จะต้องอ้างอิงตามกฎระเบียบ กฎระเบียบนี้จึงเป็นส่วนในการตัดสินใจในการออกแบบโครงการขึ้นนี้ด้วย

1.2 กฎการแข่งขันที่เกี่ยวข้องในการออกแบบ

การแข่งขันทีเอสเอไอ(TSAE) นั้นใช้กฎเดียวกับเอฟเอสเอไอ(FSAE) 2019 ซึ่งกฎเหล่านี้เป็นเงื่อนไขเริ่มต้น และเป็นข้อจำกัดในการกำหนดคุณลักษณะของรถ กฎกติกา อนุญาตให้ใช้มอเตอร์ฟ้าชนิดใดก็ได้ และจำนวนเท่าไรก็ได้ แต่มีข้อแม้คือ พลังงานสูงสุดที่ดึงจากแบตเตอรี่ต้องไม่เกิน 80 กิโลวัตต์ และมีความต่างศักย์ไฟฟ้าทุกจุดไม่เกิน 600VDC การใช้การเบรกเพื่อชาร์จกลับ(Regenerative Breaking)นั้นสามารถทำได้ที่ความเร็วมากกว่า 5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และ 90 เปอร์เซ็นต์ของแรงเบรกจากแป้นเบรคนั้นสามารถใช้เป็นการเบรกเพื่อชาร์จกลับได้โดยไม่ต้องใช้งานปั๊มเบรกไฮดรอลิก Rain Test ตัวครอบของมอเตอร์นั้นสามารถออกแบบเอง ใช้แบบเดิม หรือปรับแต่งจากของโรงงานได้ โดยเงื่อนไขคือ วัสดุควรมีความแข็งแรงเทียบเท่า Aluminum alloy 6061-T6 ที่หนาขั้นต่ำ 3 มิลลิเมตร หรือ 2 มิลลิเมตร สำหรับ Steel

สำหรับอุปกรณ์ Drivetrain เป็นส่วนที่มีการเคลื่อนที่เร็ว อย่างเช่น Continuously Variable Transmission (CVTs), Sprocket, Gear pulley, Torque Converter, Belt drivers และมอเตอร์ไฟฟ้า ต้องใช้ใน scatter shield ที่สามารถกันชิ้นส่วนอุปกรณ์ได้เมื่อกรณีเกิดความเสียหาย รวมถึง Sprocket ด้วย ตัวยึด (Fastener) ต้องใช้ตามมาตรฐานที่กติกากำหนด รวมทั้งต้องมีการเสริมความปลอดภัยด้วย Positive Locking Mechanism

1.3 วัตถุประสงค์

- 1.) เพื่อศึกษาระบบของรถไฟฟ้าเพื่อที่จะสามารถใช้ในการจำลองการทำงานของระบบส่งกำลังและการใช้พลังงานของรถแข่ง
- 2.) เพื่อวิเคราะห์และออกแบบระบบส่งกำลังของรถจากข้อมูลวงจรการขับขี่ใด ๆ ได้
- 3.) เพื่อสร้างโปรแกรมจำลองที่สามารถปรับค่าได้โดยสามารถปรับแต่งและใช้ได้ในอนาคต
- 4.) เพื่อเป็นแหล่งศึกษาค้นคว้า อ้างอิงและต่อยอดให้สมาชิกชมรมยานยนต์หรือผู้ที่สนใจต่อไป

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.) ศึกษาภาระเบี่ยงของการแข่งขัน FSAE 2019 ในการออกแบบรถไฟฟ้าสูตรนักศึกษาและศึกษาการคำนวณความเกี่ยวเนื่องของแต่ละระบบ อาทิเช่น ระบบมอเตอร์ ระบบเบรกพื่นฟูและระบบแบตเตอรี่
- 2.) ใช้โปรแกรม Simulink software เพื่อสร้างโปรแกรมจำลอง ที่สามารถหาค่าวิกฤตแต่ละค่าของแต่ละระบบได้รวมถึงพลังงานที่ใช้และปริมาณแบตเตอรี่ที่หลงเหลือหลังจากการจำลองวงจรการขับเคลื่อนด้วยระยะทาง 22 กิโลเมตร เพื่อใช้เป็นตัวเลือกในการตัดสินใจเลือกอุปกรณ์ต่าง ๆ และสามารถปรับแต่งได้ในแต่ละระบบส่งกำลัง
- 3.) วิเคราะห์เปรียบเทียบผลลัพธ์แต่ละแบบ เพื่อวิเคราะห์และสรุปผล

1.5 แผนการดำเนินงาน

ตาราง 1.1 แผนการดำเนินงาน

หัวข้อ	2562					2563		
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ศึกษาการแข่งขัน EV, รถแข่งที่ใช้และกฎกติกาในการแข่งขัน Formula SAE, วิเคราะห์แต่ละทีมที่ได้คะแนนสูง								
2. ศึกษารถคันก่อนที่จะนำมาดัดแปลงเป็นรถขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์และคำนวณในการหามอเตอร์และระบบส่งกำลังที่เหมาะสม								
3. ศึกษาโปรแกรม Simulink ในการทำการ Simulation								
4. เขียนแผนผัง Flow Chart ของระบบการทำงานต่าง ๆ ของรถแข่ง								
5. เริ่มสร้างโปรแกรม ทดสอบความถูกต้องและทำการปรับแต่งให้ใช้งานได้ง่าย								
6. เก็บผลการศึกษาและเปรียบเทียบผลที่ได้								
7. สรุปผลการทำการศึกษาและจัดทำรูปเล่ม								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.) สามารถนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ทั้งการทำงานของมอเตอร์ ความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้า ในการทำงานของระบบจ่ายไฟฟ้า มาปรับใช้จริงได้กับโครงรถเดิมที่เป็นแบบสันดาปภายใน ในการแข่งขัน Formula SAE EV ได้
- 2.) ได้เรียนรู้การใช้ Simulink simulation ที่ให้ผลที่มีความน่าเชื่อถือ
- 3.) สามารถนำผลจากการวิจัยครั้งนี้ไปต่อยอดให้กับรุ่นต่อ ๆ ไปของชมรมยานยนต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

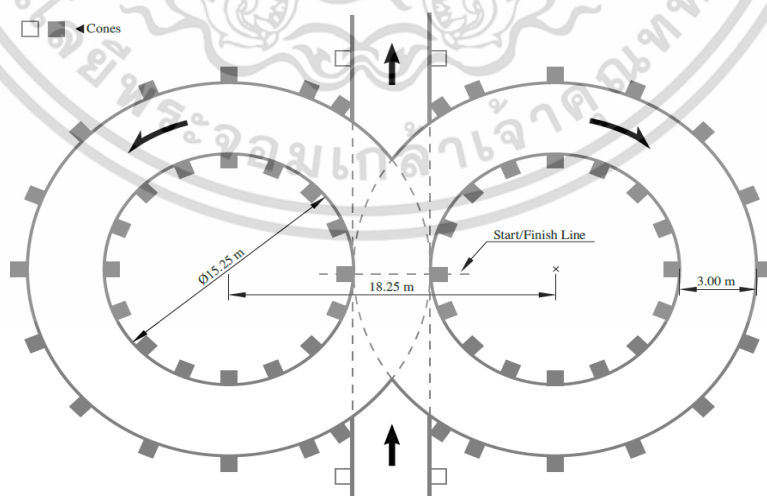
บทที่ 2

ข้อมูลเกี่ยวกับรถและการแข่งขัน

ในการกำหนดเป้าหมายของโครงการ เริ่มจากการศึกษาข้อมูลของการแข่งขัน ควบคู่ไปกับกำหนดเป้าหมายขั้นต่ำ คือสถิติของชมรมที่ทำได้ในการแข่งขันครั้งก่อน และนำเป้าหมายที่ตั้งไว้ไปใช้ในการคำนวณเพื่อหาปัจจัยต่าง ๆ ให้บรรลุได้ โดยใช้ตัวแปรและค่าพื้นฐานจากข้อมูลรถยนต์ที่มีอยู่

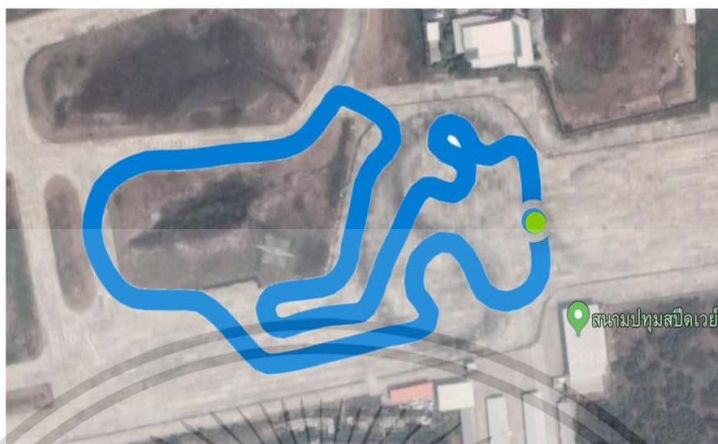
การแข่งขัน TSAE จัดการแข่งขันเหมือนกับ FSAE ซึ่งการทดสอบทั้งหมด 4 ประเภท ได้แก่

1. Acceleration event เป็นการทดสอบอัตราเร่งของรถยนต์ในระยะทาง 75 เมตรทางเรียบในแนวตรง
2. Skidpad event เป็นการทดสอบความสามารถในการเข้าโค้งของรถยนต์ บนพื้นผิวเรียบที่ในขณะที่ทำการเข้าโค้งที่มีรัศมีคงที่ โดยต้องวนรอบวงกลมฝั่งขวา 2 รอบและวนรอบวงกลมฝั่งซ้าย 2 รอบ แสดงดังรูปที่ 2.1
3. Autocross event เป็นการทดสอบความคล่องแคล่วของรถยนต์ ความสามารถในการเร่งและเบรก และการควบคุมรถยนต์ตามเส้นทางในสนามแข่งระยะทาง 1 กิโลเมตร ซึ่งจะมีทั้งทางตรง ทางโค้ง และทางซิกแซก
4. Endurance event เป็นการทดสอบความทนทานของรถยนต์ โดยใช้สนามแข่งเดียวกับ Autocross แต่จะวิ่งเป็นระยะทางรวม 22 กิโลเมตร แสดงดังรูปที่ 2.2 และเมื่อวิ่งไปถึงครึ่งทางต้องมีการเปลี่ยนตัวนักขับ ในระหว่างการเปลี่ยนตัวห้ามไม่ให้มีการชาร์จแบตเตอรี่และปรับแต่งรถยนต์ ซึ่งการแข่งขันนี้มีความเครียดการแข่งขันมากที่สุด



รูปที่ 2.1 เส้นทางการแข่งขันใน Skidpad event [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 เส้นทางการแข่งขันใน Endurance event ในปี พ.ศ. 2562 ที่ประเทศไทย

2.1 การเลือกโครงรถเดิมและข้อมูลของรถ

ในการพิจารณาเลือกระบบขับเคลื่อนรถ จะนำข้อมูลของรถแข่งคันเก่าตามตารางที่ 2.1 มาใช้ในการคำนวณหาอัตราเร่งของแต่ละระบบ ผู้ทำวิจัยเลือกใช้โครงรถเดิมในปี พ.ศ. 2562 หรือรหัส KF2018 เนื่องจากเป็นรถคันแรกของชมรมที่ถูกทำจากคาร์บอนไฟเบอร์และอลูมิเนียมรูปทรงรังผึ้ง (Honeycomb) จึงมีความแข็งแรงและน้ำหนักเบา ทั้งนี้ตามกฎนั้น โครงรถเดิมจะใช้ในการแข่งขันรถเครื่องยนต์สันดาปแค่ 2 ปีเท่านั้น แต่สามารถนำกลับมาแข่งขันในรายการรถขับเคลื่อนพลังงานไฟฟ้าได้อีก 2 ปี จึงเป็นตัวเลือกที่ดีหากเทียบกับโครงรถรุ่นก่อนๆที่ถูกเก็บมาเป็นระยะเวลาอันยาวนานแล้ว ซึ่งเดิมทีนั้นรถแข่งคันดังกล่าวได้ทดสอบสมรรถนะด้วยไดโน ได้ข้อมูลว่า

- เครื่องยนต์ SUZUKI LTR 1 ความจุกระบอกสูบ 450 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- Break Horsepower 65 แรงม้า หรือ 48.5 กิโลวัตต์
- น้ำหนักตัวรถ 197 กิโลกรัม
- น้ำหนักตัวรถ รวมคนขับ (60 กิโลกรัม) 257 กิโลกรัม

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลโดยทั่วไปของรถแข่ง KF2018

น้ำหนักรถ (kg)	197
น้ำหนักรถรวมคนขับ (60 kg)	257
Mass Equivalent (kg)	269.85
Coefficient of Lift	2.490
Coefficient of Drag	1.350
Area of Attack (m ²)	1.000
รัศมีล้อรถ Hoosier R25B (m)	0.23
ระยะห่างระหว่างล้อหน้าและล้อหลัง (m)	1.530
ความสูงจุด CG จากพื้น (m)	0.210

จากตารางที่ 2.1 ผู้ทำวิจัยได้อ้างอิงค่า Coefficient of Friction มาจากข้อมูลของยางรถที่ใช้ในปีที่ผ่านมา ส่วนค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (Coefficient of Lift, C_L) และค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน (Coefficient of Drag, C_D) อ้างอิงมาจากวิจัยเรื่อง “หลักอากาศพลศาสตร์สำหรับรถแข่งสูตรนักศึกษา” ของรุ่นพี่ในชมรมปีการศึกษา 2560 [2] โดยทำการจำลองโมเดลรถและทดสอบในอุโมงค์ลมและทดสอบ CFD ด้วยโปรแกรม SIMSCALE ได้สัมประสิทธิ์แรงยกเป็น 2.49 และสัมประสิทธิ์แรงต้าน 1.35 จากการติดตั้ง ปีกหลัง ปีกหน้า และอุปกรณ์ Ground effect โดยจะนำมาคำนวณหาแรงต้านจากอากาศและแรงที่กระทำกับรถในแนวแกน y จากสมการ 2.1 และ 2.2 ดังต่อไปนี้

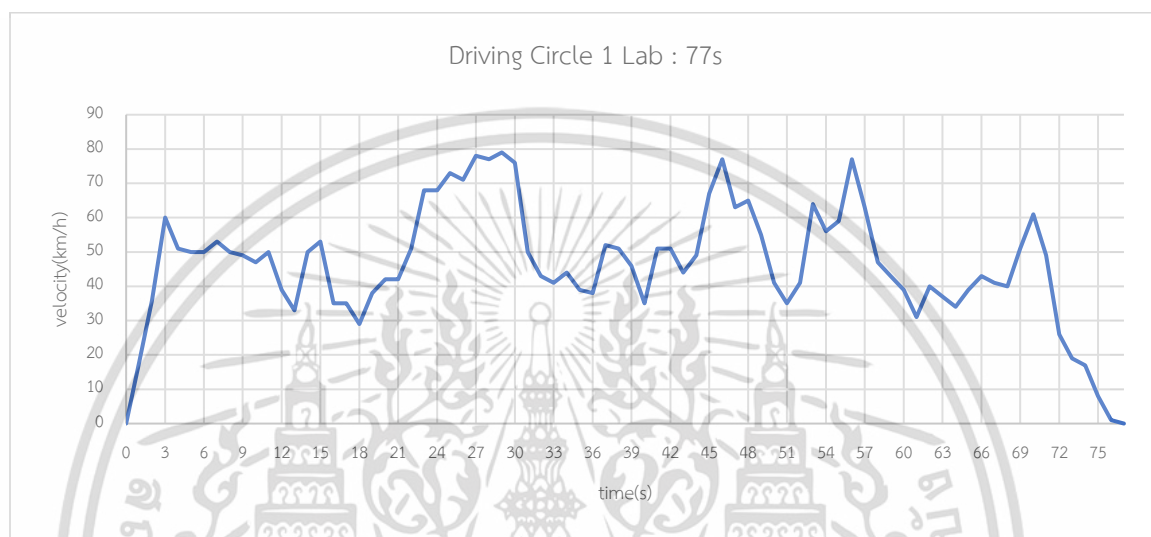
$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_D \quad (2.1)$$

$$F_L = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_L \quad (2.2)$$

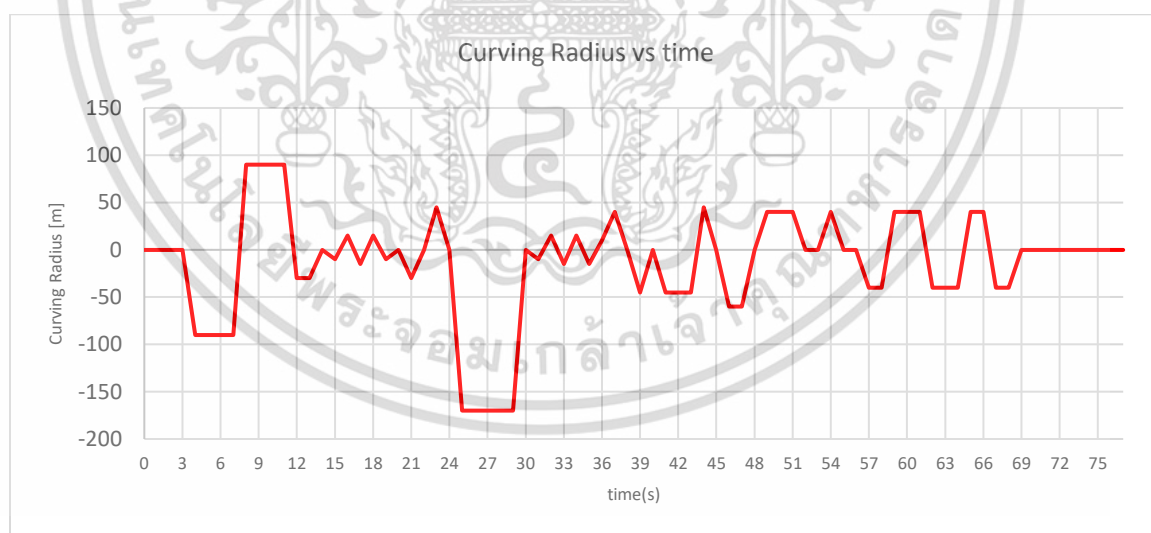
โดยข้อมูลพื้นฐานของรถพวกนี้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณเพื่อหาแรงขับเคลื่อนรถในโปรแกรมจำลอง แต่ทั้งนี้เพื่อความยืดหยุ่นในอนาคต พวกเราจึงต้องให้โปรแกรมสามารถปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรต่าง ๆ เหล่านี้ได้

2.2 ข้อมูลการแข่งขันเดิม

การแข่งขันในปี พ.ศ. 2561 นั้นนักขับ กฤษฎี วสุรัตน์ เป็นผู้ขับ Skidpad ซึ่งได้อันดับที่ 1 ในการแข่งขันและบันทึกข้อมูลความเร็วไว้จากแอปพลิเคชัน (Application) ของกล้องโกโปร (GoPro) ทำให้ทางทีมสามารถเก็บข้อมูลการแข่งขันต่อ 1 วงการขับหรือ Driving Circle ได้ดังนี้



รูปที่ 2.3 Driving circle ของการแข่งขัน skid pad ปี พ.ศ.2562



รูปที่ 2.4 Curving Radius ของการแข่งขัน skid pad ปี พ.ศ.2562 โดยค่าที่เป็นบวกคือโค้งเลี้ยวซ้าย ลบคือเลี้ยวขวาและศูนย์คือขับตรงไป

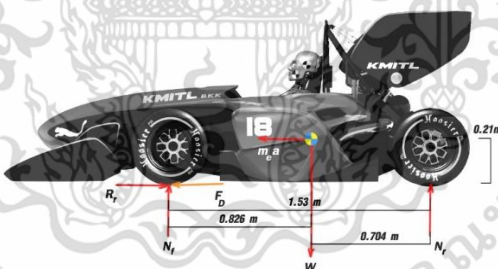
รูปภาพของสนามอยู่ในรูปที่ 2.2 โดยข้อมูลชั้นนี้มีความสำคัญมากในการออกแบบรถ พลังงานที่ใช้ทั้งหมดในการสรรหาแบตเตอรี่และการเลือกมอเตอร์ที่เพียงพอต่อการขับเคลื่อน รวมทั้งการหาการทำงานของมอเตอร์ คุณลักษณะทั้งแรงบิดและรอบของมอเตอร์ที่ใช้ส่วนใหญ่ในการแข่งขัน เพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกซื้อมอเตอร์ในอนาคต

2.3 รูปแบบระบบส่งกำลังรถไฟฟ้าสูตรนักศึกษา

โดยทั่วไป เรามักจะคุ้นเคยกับระบบส่งกำลังรถแบบขับเคลื่อนล้อหน้า ขับเคลื่อนล้อหลัง และขับเคลื่อนสี่ล้อ แต่ระบบส่งกำลังของรถไฟฟ้าสูตรศึกษานั้นจะไม่นิยมขับเคลื่อนล้อหน้า เนื่องจากน้ำหนักส่วนใหญ่ของรถจะเบี่ยงเบนไปที่ด้านหลัง ทำให้ควบคุมยาก อัตราเร่งสูงสุดของการขับเคลื่อนล้อน้ำหนักน้อย โดยสามารถคิดคำนวณอัตราเร่งการออกตัวสูงสุดของรถได้จากสมการ

2.3.1 ระบบขับเคลื่อนล้อหน้า (Front-wheel Drive)

รถสูตรนักศึกษาจะไม่นิยมออกแบบให้ขับเคลื่อนล้อหน้าเนื่องจากมีโอกาสเกิดการเสียการควบคุมของล้อหน้าได้มากหากให้กำลังมากเกินไปขณะเร่งเพื่อแข่งกับการทำเวลาในการแข่งขัน เนื่องจากการถ่ายโอนมวลไปที่ด้านหลังของรถทำให้สูญเสียการยึดเกาะที่ล้อหน้า



รูปที่ 2.5 แสดงแผนภาพอิสระของแรงที่กระทำกับรถสูตรนักศึกษา แบบระบบขับเคลื่อนรถ 2 ล้อหน้า

อัตราเร่งสูงสุดในกรณีที่ใช้ระบบขับเคลื่อน 2 ล้อหน้าหาได้จากสมการที่ 2.3

$$a = \frac{\mu mg(B) - R_r I_{wb}}{m_c (I_{wb} + \mu h_{cg})} \quad (2.3)$$

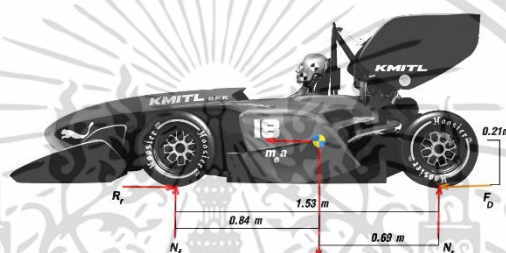
จากสมการที่ 2.3 ได้อัตราเร่งสูงสุดเท่ากับ 4.64 m/s^2 การขับเคลื่อนล้อหน้าของรถไฟฟ้านั้นสามารถทำได้อยู่หลัก ๆ 2 แบบ คือการติดมอเตอร์บริเวณใต้คันเร่งคนขับแล้วส่งกำลังสู่ล้อหรือการติดตั้งมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่บริเวณล้อเลยแบบ In-hub motor แล้วทดกำลังด้วยเฟืองสุริยะแต่ข้อเสียคือเป็นการเพิ่มน้ำหนักล้อ หรือ Unsprung Mass ทำให้การทรงตัวรถแยลง

2.3.2 ระบบขับเคลื่อนล้อหลัง (Rear-wheel Drive)

รถสูตรนักเรียนนิยมออกแบบให้ขับเคลื่อนล้อหลังเพราะจะทำให้ได้อัตราเร่งสูงสุดมากกว่าขับเคลื่อนล้อหน้า เนื่องจากการเร่งรถจะเกิดการถ่ายโอนมวลจากล้อหน้าสู่ล้อหลัง ทำให้การส่งแรงที่ล้อหลังสามารถทำได้มากกว่าล้อหน้านั่นเอง โดยการคำนวณสามารถทำได้ดังนี้



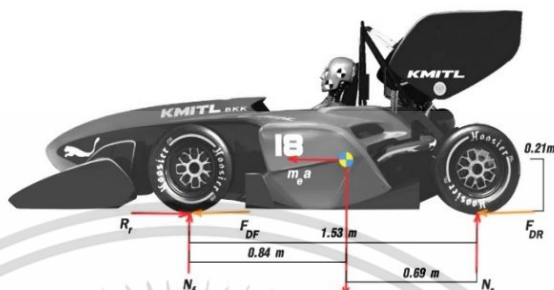
รูปที่ 2.6 แสดงแผนภาพอิสระของแรงที่กระทำกับรถสูตรนักเรียน แบบระบบขับเคลื่อนรถ 2 ล้อหลัง

อัตราเร่งสูงสุดในกรณีที่ใช้ระบบขับเคลื่อน 2 ล้อหลังหาได้จากสมการที่ 2.4

$$a = \frac{\mu mg(A) - R_r l_{wb}}{m_c(l_{wb} - \mu h_{cg})} \quad (2.4)$$

จากสมการที่ 2.4 ได้อัตราเร่งสูงสุดเท่ากับ 8.05 m/s^2 การขับเคลื่อนล้อหลังของรถไฟฟ้านั้นสามารถทำได้อยู่หลัก ๆ 2 แบบ คือการติดมอเตอร์ 1 ตัวแล้วทำการกระจายแรงให้แก่ล้อทางกลโดยเฟืองท้าย (Differential) หรือการใช้มอเตอร์ 2 ตัวที่ควบคุมการขับโดยคอมพิวเตอร์เรียกว่า เฟืองท้ายไฟฟ้า (Electronic Differential) ซึ่งจะสามารถปรับควบคุมการกระจายแรงได้ดีกว่าแบบทางกล (Passive LSD) และลดการเกิดปัญหา oversteer ได้

2.2.3 ระบบขับเคลื่อนรถ 4 ล้อ (4-wheel Drive)



รูปที่ 2.7 แสดงแผนภาพอิสระของแรงที่กระทำกับรถสูตรนักศึกษา แบบระบบขับเคลื่อนรถ 4 ล้อ

อัตราเร่งสูงสุดในกรณีที่ใช้ระบบขับเคลื่อน 4 ล้อหาได้จากสมการที่ 2.5

$$a = \frac{\mu mg - R_r}{m_c} \quad (2.5)$$

จากสมการที่ 2.5 ได้อัตราเร่งสูงสุดเท่ากับ 12.15 m/s^2 การขับเคลื่อน 4 ล้อนั้นเป็นที่นิยมมากที่สุดในการแข่งขันเอฟเอสเออี(FSAE) เนื่องจากให้อัตราเร่งสูงสุดที่มากที่สุด และสามารถลดการควบคุมทางกลของรถได้มาก เน้นการควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ในการส่งกำลังให้แต่ละล้อ แต่การจะสร้างต้องมีการออกแบบรถทั้งคันรวมถึงล้อที่ต้องรองรับการติดตั้งมอเตอร์และเฟืองสุริยะภายใน

จากการคำนวณอัตราเร่งในแต่ละระบบขับเคลื่อน ระบบขับเคลื่อนแบบ 4 ล้อมีอัตราเร่งสูงที่สุด โดยเราจะสนใจระบบการส่งกำลังเฉพาะแบบขับเคลื่อนล้อหลังโดยมีมอเตอร์หนึ่งตัว แบบขับเคลื่อนล้อหลังโดยมีมอเตอร์สองตัวทำงานเป็นเฟืองท้ายไฟฟ้าและแบบขับเคลื่อนสี่ล้อ ซึ่งเป็นที่นิยมในการใช้แข่งขันรถไฟฟ้าสูตรนักศึกษาทั่วโลก

บทที่ 3

ข้อพิจารณาในการออกแบบ

รถสูตรนักศึกษาที่ขับเคลื่อนด้วยระบบไฟฟ้าเป็นการพัฒนาฝีมือนักศึกษาวิศวกรรมเพื่อก้าวเข้าสู่ยุควงการยานยนต์สมัยใหม่ที่หันมาใส่ใจสิ่งแวดล้อมมากขึ้น และมีการใช้เทคโนโลยีด้านคอมพิวเตอร์เข้ามาเกี่ยวข้องมากขึ้น เพื่ออำนวยความสะดวกและสร้างประสิทธิภาพของรถให้ได้มากที่สุด รถสูตรนักศึกษาพลังงานไฟฟ้าจึงมีการออกแบบที่แตกต่างจากเครื่องยนต์สันดาปอย่างมาก ทั้งระบบที่ให้พลังงานกับรถหรือแบตเตอรี่ (Tractive System) และการส่งกำลังโดยมอเตอร์ การควบคุมกระแสที่จ่ายให้มอเตอร์ด้วยแป้นคันเร่งไฟฟ้า ระบบเบรกมอเตอร์ที่สามารถแปลงพลังงานจากการเบรก ที่จากเดิมเครื่องยนต์สันดาปจะเสียไปในรูปแบบความร้อน แต่ในระบบไฟฟ้าเราสามารถนำพลังงานที่เสียเปล่าบางส่วนกลับมาใช้ใหม่ได้หรือเรียกว่า Regenerative Braking ระบบเดิม ๆ ที่ทำงานทางกลก็เปลี่ยนเป็นไฟฟ้า อย่างเช่นเฟืองท้ายไฟฟ้าเป็นต้น ที่สามารถควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อการขับเคลื่อนที่ดีที่สุด รวมถึงระบบ Torque Vectoring ที่ช่วยถ่ายโอนแรงบิดจากล้อหนึ่งสู่อีกล้อหนึ่ง เพื่อให้การขับเคลื่อนมีประสิทธิภาพมากขึ้น

ที่กล่าวมานั้นเป็นส่วนหนึ่งในการออกแบบเพื่อตั้งประสิทธิภาพรถให้ออกมามากที่สุด โดยลดภาระทางกลออกไป แต่กระนั้นการออกแบบทางกลเบื้องต้นยังคงสำคัญ และเป็นปัจจัยหลักที่ขาดไม่ได้ก่อนที่จะทำการพัฒนารถให้ถึงขั้นขีดสุดต่อไป การเลือกระบบขับเคลื่อนก็เป็นสิ่งสำคัญที่นักออกแบบต้องคำนึงเป็นอย่างแรก โดยเลือกให้เหมาะสมกับรถ เพื่อเค้นความสามารถในการเร่งด้วยอัตราสูงสุดให้ได้ ข้อพิจารณาในการออกแบบรถไฟฟ้าสูตรศึกษามีดังนี้

3.1 แรงต้านทางพลศาสตร์

เป็นที่ทราบกันว่า ยิ่งรถมีแรงต้านพลศาสตร์น้อยเท่าไร ก็จะใช้พลังงานในการขับเคลื่อนน้อยลงเท่านั้น เมื่อปรับใช้กับรถไฟฟ้านั้น การประหยัดพลังงานรถถือเป็นเรื่องสำคัญเพราะเราต้องการใช้พลังงานให้น้อยสุดเท่าที่จะเป็นไปได้ อีกทั้งการชาร์จพลังงานกลับนั้นค่อนข้างใช้เวลาด้วย

โดยแรงต้านพลศาสตร์เป็นแรงที่กระทำตรงข้ามกับแรงที่ขับเคลื่อนวัตถุไปข้างหน้า ซึ่งเกิดขึ้นจากความเค้นเฉือนของผิววัตถุและแรงดูดเนื่องจากอากาศโดยมีสมการดังนี้

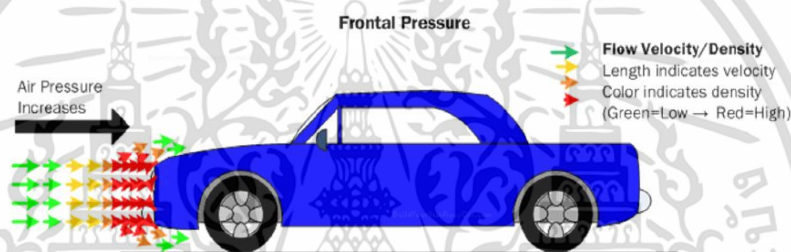
$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_D \quad (3.1)$$

โดย F_D คือ แรงต้าน

- ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล
 v คือ ความเร็วของวัตถุที่เทียบของไหล
 A คือ พื้นที่หน้าตัดวัตถุ
 C_D คือ สัมประสิทธิ์แรงต้าน

โดยแรงต้านที่เกิดขึ้นกับอากาศพลศาสตร์ของรถแข่งนั้น ประกอบด้วย 3 สิ่งหลัก คือ

1. แรงดันด้านหน้าของรถหรือผลกระทบที่เกิดจากรูปร่างของรถแข่งที่พยายามผลักอากาศออกไป
2. บริเวณท้ายของรถที่เป็นสุญญากาศหรือผลกระทบที่ทำให้อากาศไม่เต็มเต็มตามรูปร่างของรถ
3. ชั้นขอบเขต (Boundary layer) หรือผลกระทบของแรงเสียดทานที่เกิดจากไหลของอากาศที่ผิวของรถ



รูปที่ 3.1 แรงดันด้านหน้าของตัวรถที่เกิดจากแรงต้านของอากาศ

(ที่มา: <https://www.buildyourownracecar.com/race-car-aerodynamics-basics-and-design/>)

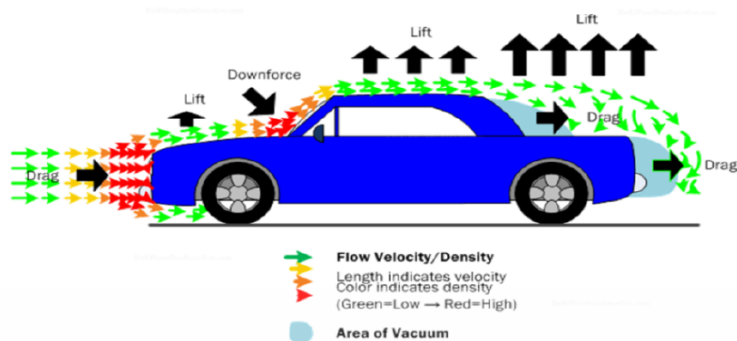
3.2 แรงยกและแรงกด

สมการแบร์นูลลีเป็นสมการที่ใช้อธิบายเกี่ยวกับความดันในของไหล ซึ่งความดันในของไหลที่เคลื่อนที่มีค่าน้อยกว่าความดันในของไหลที่อยู่นิ่ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของของไหลด้วย สมการของแบร์นูลลี โดยค่าของแรงยกหรือแรงกดหาได้จากสมการ

$$F_L = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_L \quad (3.2)$$

- โดย F_L คือ แรงดัน
 ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล
 v คือ ความเร็วของวัตถุที่เทียบของไหล
 A คือ พื้นที่หน้าตัดวัตถุ
 C_L คือ สัมประสิทธิ์แรงยก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 การเกิดแรงยก แรงกดบนตัวรถ

(ที่มา: <https://www.buildyourownracecar.com/race-car-aerodynamics-basics-and-design/>)

ทั้งนี้การเกิดแรงกดที่ตัวรถจำนวนมากจะส่งผลดีเมื่อเกิดการขับเสี้ยวโค้งด้วยความเร็วสูง เนื่องจากจะเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะถนนของตัวรถ แต่จะเกิดผลเสียเมื่อต้องขับขึ้นทางตรง เนื่องจากแรงกดนี้จะเปรียบเสมือนน้ำหนักที่เพิ่มบนตัวรถซึ่งส่งผลให้แรงต้านการหมุนของล้อเพิ่มมากขึ้น ทำให้ต้องใช้แรงขับเคลื่อนมากขึ้นเพื่อต้านแรงกดนี้ด้วย การเพิ่มแรงกดให้แก่รถนั้นสามารถทำได้ เช่น การติดตั้งแพนอากาศ (Aero foil) เพื่อเพิ่มแรงกดที่ล้อหลัง

3.3 ความต้านทานการหมุน

เป็นแรงพื้นฐานที่เกิดจากแรงเสียดทานของยางล้อรถกับพื้นถนน ซึ่งแรงเสียดทานที่เกิดจากแบร์ริงและพื้นเพื่อง (Spin loss) ก็มีผลด้วยเช่นกัน โดยค่าความต้านทานของมันจะขึ้นตรงกับน้ำหนักของรถที่กระทำกับพื้น เมื่อขับด้วยความเร็วที่มากขึ้นทำให้น้ำหนักรถโดนกดด้วยแรงกดทางพลศาสตร์มากขึ้น ส่งผลให้มีแรงต้านการหมุนมากขึ้น จากสมการ

$$F_{rr} = \mu_{rr}(mg + F_{down}) \quad (3.3)$$

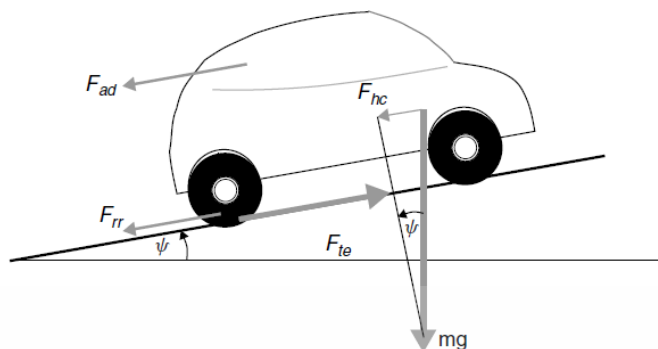
โดย F_{rr} คือ แรงต้านทานการหมุน

μ_{rr} คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านการหมุน

F_{down} คือ แรงกด

m คือ มวลของรถ

g คือ ความเร่งโน้มถ่วง



รูปที่ 3.3 แรงที่กระทำกับรถที่เคลื่อนที่บนทางชัน [4]

โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านการหมุนนั้นสามารถหาได้จากการวัดแรงที่ต้องการดึงของรถในการเคลื่อนที่อย่างช้า ๆ ที่ความเร็วต่ำอย่างคงที่ แต่โดยทั่วไปสามารถประมาณได้ว่าประมาณ 0.005 - 0.02 สำหรับรถที่ขับเคลื่อนล้อหน้า ซึ่งในการจำลองเราจะใช้ค่าที่แย่ที่สุดคือ 0.02 ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านการหมุน [5]

	Rolling Resistance Coefficient
low resistance tubeless tires	0.002 - 0.005
bicycle tire on concrete	0.002
bicycle tire on asphalt road	0.004
dirty tram rails	0.005
truck tire on asphalt	0.006 - 0.01
bicycle tire on rough paved road	0.008
ordinary car tires on concrete, new asphalt, cobbles small new	0.01-0.015
car tires on tar or asphalt	0.02

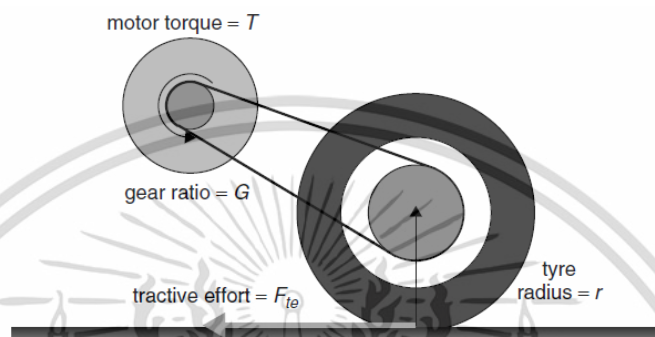
3.4 แรงที่ใช้ในการเร่ง

เมื่อรถเกิดการเปลี่ยนแปลงความเร็ว ย่อมต้องมีแรงกระทำดังรูปที่ 3.3 โดยเป็นแรงที่ทำให้เกิดการเร่งในแนวเส้นตรงกับรถตามกฎของนิวตัน

$$F_{1a} = ma \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามเพื่อให้การคำนวณแม่นยำมากขึ้น แรงที่ใช้ในการเร่งความเร็วนั้น ต้องพิจารณาถึงแรงที่ต้องใช้ในการเคลื่อนขึ้นส่วนที่หมุนของรถให้เร็วขึ้นไปด้วย หรือเรียกว่าเราต้องพิจารณาความเร่งในการหมุนเช่นเดียวกับความเร่งแบบเส้นตรง โดยปัญหาหลักคือมอเตอร์ ซึ่งไม่ใช่เพราะโมเมนต์ความเฉื่อยที่มีค่าสูงแต่เป็นเพราะความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ที่สูงต่างหาก



รูปที่ 3.4 การจัดเรียงอย่างง่ายของมอเตอร์สล็อตที่เพลลาขับ [4]

จากรูปที่ 3.4 จะเห็นได้ว่า

$$T = \frac{F_{te} r}{G} \quad (3.5)$$

โดย T คือ แรงบิดตามเพลลา

r คือ ความหนาแน่นของของไหล

F_{te} คือ แรงขับเคลื่อนของรถ

G คือ อัตราทดเกียร์ของระบบที่ต่อกับมอเตอร์

อัตราเร่งเชิงมุมของมอเตอร์มีค่าตามสมการ 3.6

$$\dot{\omega} = G \frac{a}{r} \text{ rad.s}^{-2} \quad (3.6)$$

แรงบิดที่ใช้ในการหมุนมอเตอร์จึงมีค่าเท่ากับ

$$T = IG \frac{a}{r} \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์ของมอเตอร์ ดังนั้นแรงที่ต้องใช้ในการเร่งเชิงมุมจะสามารถหาได้จากสมการ 3.8 ดังนี้

$$F_{\omega a} = IG^2 \frac{a}{r^2} \quad (3.8)$$

โดยสมการนี้เพื่อความง่ายจึงสมมติให้ประสิทธิภาพของฟันเฟืองเป็น 100% อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของฟันเฟืองไม่สามารถเป็น 100% จึงต้องนำสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพระบบฟันเฟืองมาคิดด้วยหรือเรียกว่า spin loss สำหรับรถไฟฟ้าที่มักจะมีฟันเฟืองน้อยกว่ารถเครื่องยนต์สันดาปทำให้มีความสูญเสียเนื่องจากฟันเฟืองน้อยมาก

โดยส่วนมาก แรงที่ใช้ในการเร่งเชิงมุมมักมีค่าน้อยกว่าแรงที่ใช้ในเชิงเส้น และเรามักจะไม่รู้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ จึงสามารถที่จะประมาณแรงนี้ได้ด้วยการเพิ่มมวลไปอีก 5% ในสมการ 3.4 เพื่อลดค่า $F_{\omega a}$

3.5 แรงที่ใช้ในขับเคลื่อน

สำหรับการแข่งขัน แรงที่ใช้ในการขับเคลื่อนก็คือ ผลรวมแรงที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมด เป็นแรงที่ใช้ขับเคลื่อนรถที่ต้องได้รับมาจากระบบส่งกำลังหรือมอเตอร์

$$F_{te} = F_r + F_{ad} + F_{la} + F_{\omega a} \quad (3.9)$$

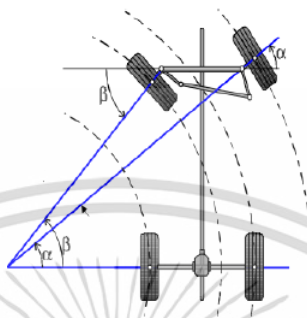
โดย F_{te} คือ แรงที่ใช้ในการขับเคลื่อน (Tractive Effort)
 F_{rr} คือ แรงต้านการหมุนของล้อ
 F_{ad} คือ แรงต้านทางพลศาสตร์
 F_{la} คือ แรงที่ใช้ในการเร่งเชิงเส้น
 $F_{\omega a}$ คือ แรงที่ใช้ในการเร่งเชิงมุม

3.6 ความเร็วล้อหลังแต่ละล้อ

เมื่อเลือกใช้มอเตอร์สองตัวในการขับเคลื่อนล้อหลัง ความเร็วของล้อในแต่ละล้อจะมีค่าไม่เท่ากัน ทำให้พลังงานที่ใช้แต่ละล้อต่างกันไปด้วย โดย Ackerman Steering Principle (Yildirim et al., 2015) ได้กำหนดรูปทรงที่ใช้กับรถให้สามารถเลี้ยวโค้งตามมุมของวงพวงมาลัยได้อย่างถูกต้อง เพื่อป้องกันล้อลื่นไถลออกข้างทาง โดยกำหนดให้แต่ละล้อแต่ละล้อมีเพลลาที่เรียงตามรัศมีของวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางเป็นจุด

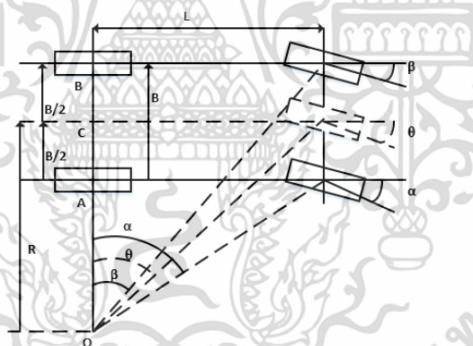
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปกติ เมื่อล้อหลังโดนยึดกับที่ จุดศูนย์กลางจะอยู่ในแนวแกนเดียวกับเพลาท้าย แล้วทำการหมุนล้อแต่ละล้อหน้าให้แกนผ่านจุดศูนย์กลางนั้น ๆ ตามรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 รูปทรงการเรียงตัวของล้อขณะขับเคลื่อนด้วย [7]

โดยความสัมพันธ์ของความเร็วของล้อด้านในกับด้านนอกนั้น จะพิจารณาโดยใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์จากมุมในการหมุนของล้อดังนี้



รูปที่ 3.6 รูปทรงการเรียงตัวของล้อขณะขับเคลื่อนด้วย [7]

โดย R คือ รัศมีของทางโค้ง

L คือ ระยะห่างระหว่างล้อหน้าและล้อหลัง

α คือ มุมที่เปลี่ยนของล้อซ้ายด้านหน้า

β คือ มุมที่เปลี่ยนของล้อขวาด้านหน้า

θ คือ มุมที่เปลี่ยนของล้อจินตภาพตรงกลางระหว่างล้อคู่หน้า

B คือ ความกว้างของล้อซ้ายและล้อขวา

O คือ จุดศูนย์กลางของทางโค้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ว่า

$$R = L \cot\alpha + \frac{B}{2} = L \cot\beta - \frac{B}{2} = L \cot\theta = \frac{L}{\tan\theta} \quad (3.10)$$

และ

$$\cot\theta = \frac{(L \cot\alpha + L \cot\beta)}{2} \quad (3.11)$$

จากสมการเมื่อ $\theta = 0$ ความเร็วเชิงเส้นของล้อแต่ละข้าง สามารถอธิบายได้ตามสมการ 3.12 โดยล้อทั้งสองจะหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมที่เท่ากัน

$$v = \omega R \quad (3.12)$$

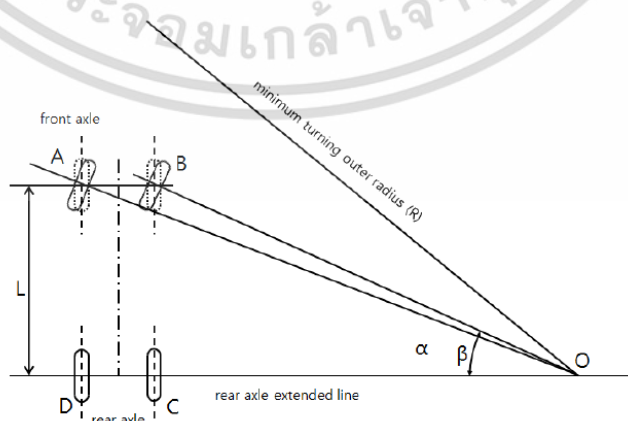
แต่เมื่อ $\theta \neq 0$ จะทำให้มีความเร็วเชิงมุมที่ต่างกัน

$$v_{RR} = \omega \left(R - \frac{B}{2} \right) = \frac{v}{R} \left[1 - \left(\frac{B \tan\theta}{2L} \right) \right] \quad (3.13)$$

$$v_{RL} = \omega \left(R + \frac{B}{2} \right) = \frac{v}{R} \left[1 + \left(\frac{B \tan\theta}{2L} \right) \right] \quad (3.14)$$

3.7 ความเร็วล้อทุกล้อ

เมื่อขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์สี่ตัวในแต่ละล้อ เพื่อที่จะคำนวณพลังงานที่ใช้ เราต้องทราบความเร็วของทุกล้อ เนื่องจากการขับเลี้ยว ความเร็วเชิงมุมจะต่างกันจากความต่างของรัศมีการเลี้ยวโค้งระหว่างล้อด้านในและด้านนอก



รูปที่ 3.7 รัศมีการโค้งของแต่ละล้อ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.5 เราสามารถหาความเร็วล้อหน้าได้โดยการหารัศมีจากล้อนั้นไปถึงจุดศูนย์กลางของการเลี้ยวโค้ง เมื่อ B คือระยะห่างระหว่างล้อซ้ายและล้อขวา

$$R_{FL} = \sqrt{\left(R + \frac{t}{2}\right)^2 + L^2} \quad (3.15)$$

$$R_{FR} = \sqrt{\left(R - \frac{t}{2}\right)^2 + L^2} \quad (3.16)$$

จะได้ว่า

$$v_{FR} = \omega \left(\sqrt{\left(R - \frac{t}{2}\right)^2 + L^2} \right) \quad (3.17)$$

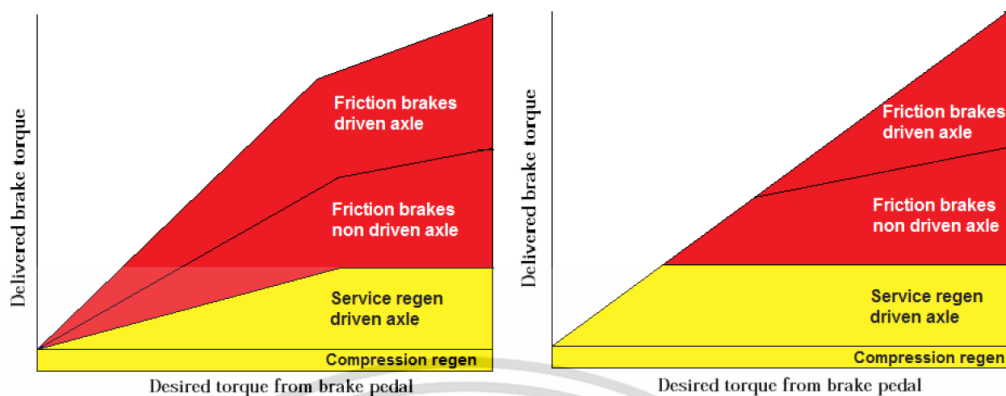
$$v_{FL} = \omega \left(\sqrt{\left(R + \frac{t}{2}\right)^2 + L^2} \right) \quad (3.18)$$

3.8 การเบรกฟื้นฟู (Regenerative Braking)

เมื่อประสิทธิภาพรถไฟฟ้าขึ้นอยู่กับการจัดการพลังงานแบตเตอรี่ ดังนั้นการรักษาพลังงานให้ได้มากที่สุดจึงเกิดการใช้มอเตอร์ในการนำพลังงานจลน์ที่สูญเสียไปจากการเบรกด้วยระบบทางกลผ่านแรงเสียดทาน ไปเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้ากลับสู่แบตเตอรี่ระหว่างการขับขี่ได้ อ้างอิงจากงานวิจัย Benchmarking of Regenerative Braking for a Fully Electric Car ของ B. J. Varocky เงื่อนไขของการใช้การเบรกฟื้นฟูจะไม่สามารถใช้ได้ในสภาวะดังนี้

- แบตเตอรี่มีสถานะการชาร์จ (SOC) มากกว่า 80%
- แบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูง
- ความเร็วของรถต่ำกว่า 5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ตามกฎ FSAE 2019 เพื่อป้องกันการเกิดการชาร์จซ้ำ ๆ ที่หน่วยเซลล์แบตเตอรี่เดิม ซึ่งจะลดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่

เมื่อเงื่อนไขไม่ตรงตามข้างต้น ก็ต้องมีการนำเบรกทางกลมาใช้ เพื่อให้บรรลุตามแรงเบรกที่ต้องการ ดังนั้นรถไฟฟ้าจะต้องทำงานควบคู่กันระหว่างเบรกไฟฟ้าและเบรกทางกล กรณีที่แรงเบรกมากเกินไป มอเตอร์จะสามารถทำได้ เพราะทุกมอเตอร์จะมีทอร์คสูงสุดที่สามารถฟื้นฟูพลังงานกลับไปให้ได้ จะต้องใช้งานเบรกทางกลร่วมด้วย ทั้งนี้เบรกทั้งสองระบบสามารถที่จะทำงานพร้อมกันได้



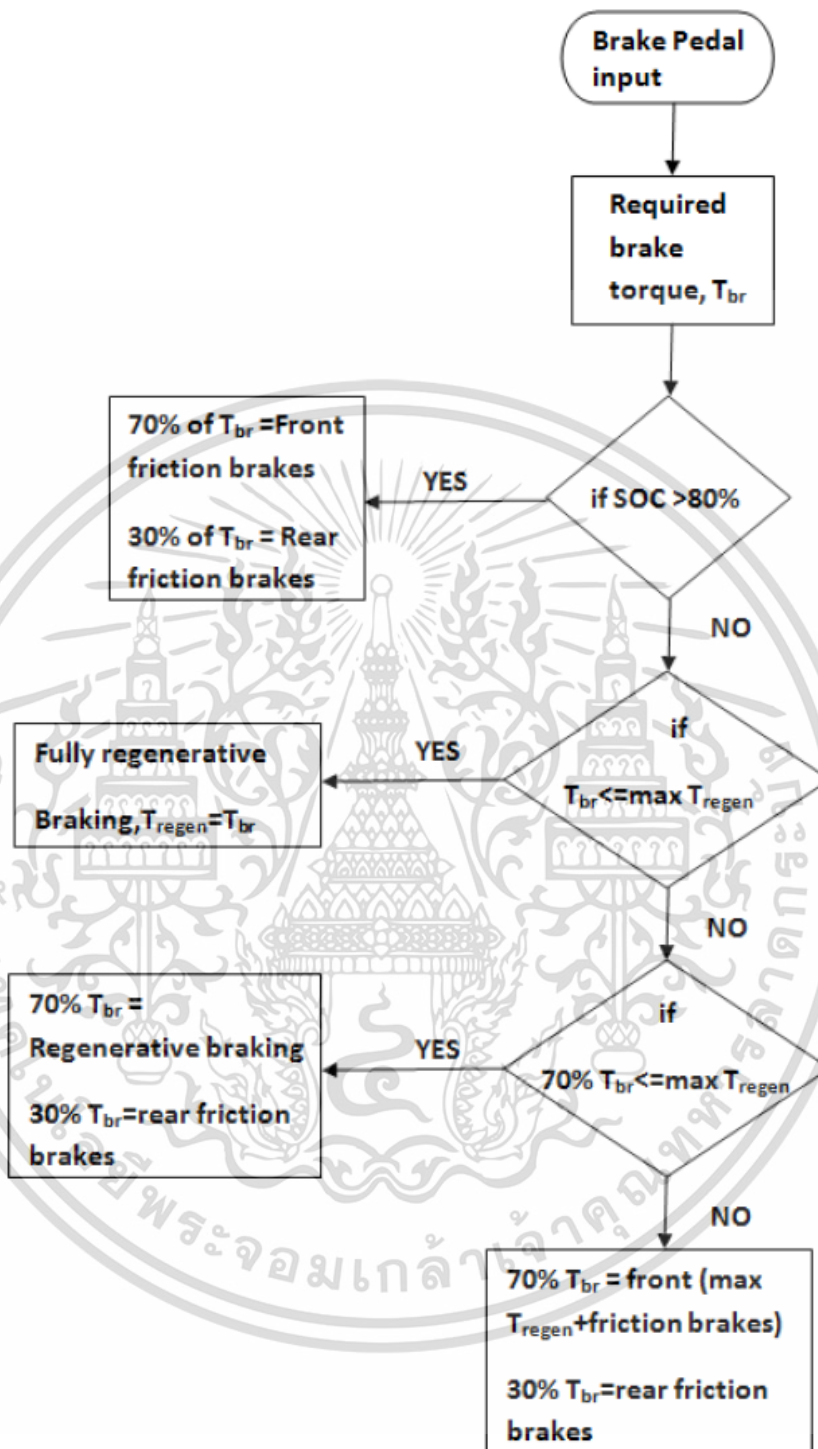
รูปที่ 3.8 ลักษณะแรงเบรกกับการกดแป้นเบรกของการเบรกไฟฟ้าแบบขนานและอนุกรม [6]

3.8.1 การเบรกฟื้นฟูแบบอนุกรม

เมื่อทำการเหยียบแป้นเบรกเพื่อส่งแรงเบรกไปยังกล่องควบคุม สิ่งแรกที่ทำให้การเช็คคือการตรวจดูว่าสถานะแบตเตอรี่มีค่ามากกว่า 80% หรือไม่ ซึ่งเป็นปริมาณสูงสุดที่สามารถใช้การเบรกฟื้นฟูได้ หากไม่เกิน ระบบจะทำการตรวจสอบว่าแรงเบรกที่ต้องการนั้นสูงกว่าแรงเบรกฟื้นฟูสูงสุดที่มอเตอร์นั้นยอมรับได้หรือไม่ เพื่อที่จะใช้การเบรกไฟฟ้าทั้งหมดหรือต้องเพิ่มแรงเบรกทางกลเข้ามาช่วย

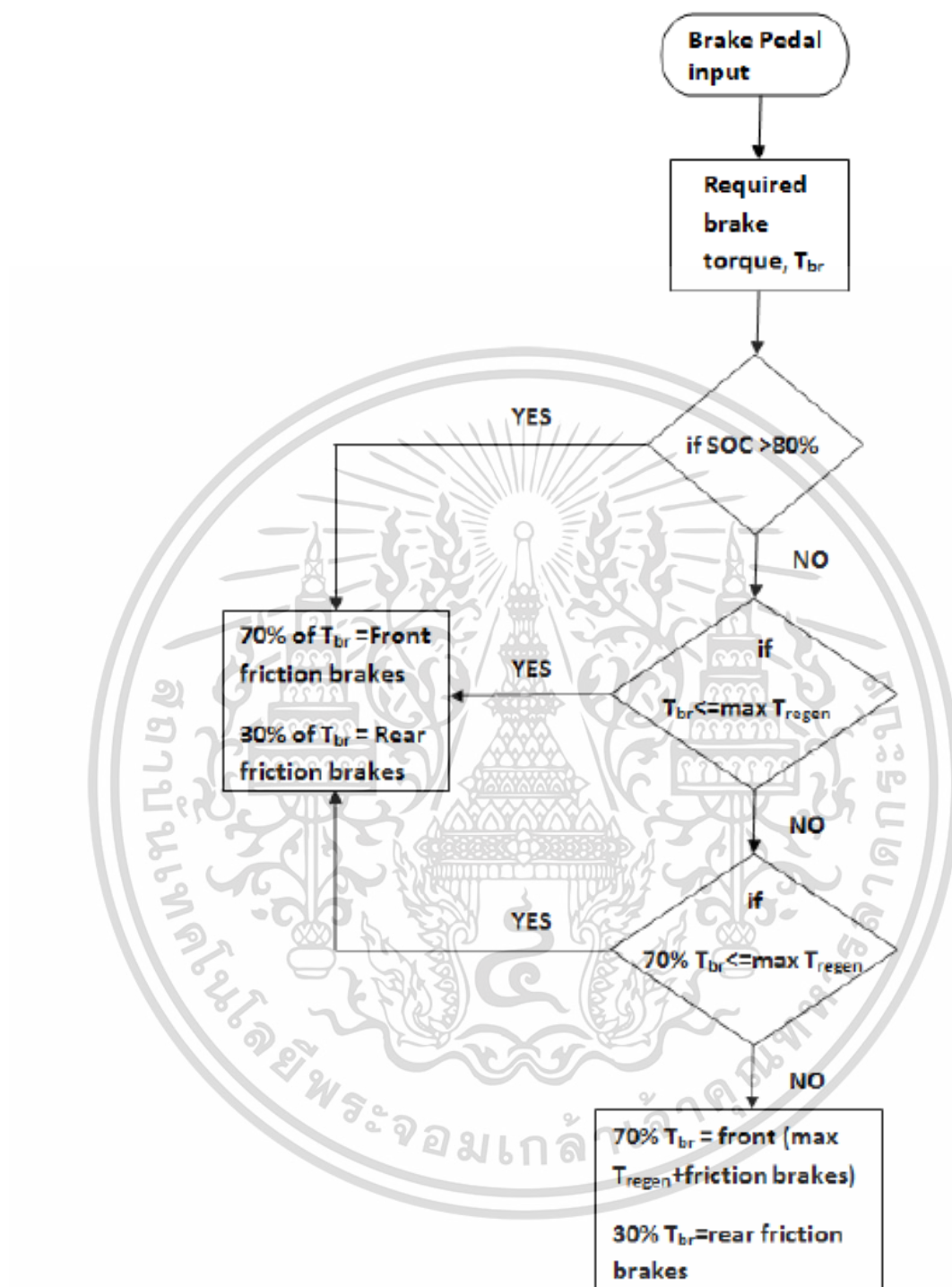
3.8.2 การเบรกฟื้นฟูแบบขนาน

การเบรกฟื้นฟูแบบขนานเป็นการทำงานโดยไร้การควบคุมเพิ่มเติม เป็นเหมือนการปรับแต่งเพิ่มระบบนี้ขึ้นมาจากระบบเบรกทางกลแบบเดิม เพื่อที่จะให้มันทำงานได้อย่างราบรื่นมันจะถูกจำกัดการใช้งานในช่วงทอร์คของมอเตอร์ช่วงหนึ่งและจะทำงานก็ต่อเมื่อแรงเบรกทั้งหมดมีค่ามากกว่าแรงเบรกไฟฟ้าเท่านั้น นอกจากนั้นจะใช้แรงเบรกทางกลเพียงอย่างเดียว เมื่อทำการเหยียบแป้นเบรกเพื่อส่งแรงเบรกไปยังกล่องควบคุม



รูปที่ 3.9 แผนภาพแสดงการทำงานของการทำงานของเบรกฟื้นฟูแบบอนุกรม [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 แผนภาพแสดงการทำงานของเบรกฟื้นฟูแบบขนาน [6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.9 ประสิทธิภาพของมอเตอร์

ประสิทธิภาพของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของแรงบิดและรอบของมอเตอร์ที่ใช้งาน โดยปกติบางบริษัทจะสามารถตรวจสอบดูกราฟประสิทธิภาพของมอเตอร์ได้เลย การเลือกมอเตอร์ที่เหมาะสมคือการเลือกมอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพในการทำงานสูงในช่วงแรงบิดและรอบของมอเตอร์ที่ใช้งานมากที่สุด จึงเกิดการสูญเสียพลังงานน้อยที่สุด การสูญเสียพลังงานส่วนใหญ่ของมอเตอร์จะเหมือนกันกับมอเตอร์อื่น ๆ ทั้งหมด และสามารถแบ่งย่อยออกเป็น 4 ประเภทหลัก ๆ ได้แก่

3.9.1 การสูญเสียจากทองแดง (Copper losses)

เกิดจากความต้านทานทางไฟฟ้าของสายไฟของมอเตอร์ ซึ่งจะสร้างความร้อนและเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าบางส่วนเป็นพลังงานความร้อนมากกว่าเป็นงานทางไฟฟ้า ซึ่งความร้อนค่าเป็นกำลังสองของกระแสไฟฟ้าและแปรผันตรงกับความต้านทาน อย่างไรก็ตาม กระแสไฟฟ้าแปรผันตรงกับแรงบิดทำให้เราทราบว่า

$$\text{Copper Losses} = k_c T^2 \quad (3.19)$$

โดยที่ k_c คือค่าคงที่ที่ขึ้นกับความต้านทานของแปรงถ่านและขดลวดรวมถึงฟลักซ์แม่เหล็ก

3.9.2 การสูญเสียจากเหล็ก (Iron losses)

เกิดจากผลของแม่เหล็กของเหล็กมอเตอร์ โดยเฉพาะที่โรเตอร์ เนื่องจากสนามแม่เหล็กในโรเตอร์มักจะเปลี่ยนแปลงตลอด จึงต้องมีพลังงานที่คอยสร้างสนามแม่เหล็กและลดสนามแม่เหล็กของเหล็กอย่างต่อเนื่อง และการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กในแผ่นเหล็กจะสร้างกระแสไฟฟ้าที่เหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดความร้อนเพราะกระแสไฟฟ้าจะไหลภายในโรเตอร์ เรียกว่า “กระแสไฟฟ้าของเอ็ดดี้” ซึ่งลดกระแสนี้ได้ด้วยการทำให้โรเตอร์มีลักษณะเป็นแผ่นบาง ๆ หลายชั้นซ้อนกัน ไม่ใช่ชิ้นใหญ่ชิ้นเดียวและเคลือบแต่ละแผ่นเพื่อเพิ่มความต้านทานของเหล็กอย่างมีประสิทธิภาพ

การสูญเสียจากเหล็กมีค่าแปรผันตรงกับความถี่ที่สนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลง ซึ่งอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กแปรผันตรงกับความเร็วของโรเตอร์

$$\text{Iron Losses} = k_i \omega \quad (3.20)$$

โดยที่ k_i คือค่าคงที่ที่ขึ้นกับความแข็งแรงของสนามแม่เหล็ก

3.9.3 การสูญเสียจากแรงเสียดทานและลม (Friction and windage losses)

เกิดจากการเสียดสีของชิ้นส่วนแบร์ริงและแปรงถ่านของมอเตอร์ โรเตอร์ยังคงมีแรงต้านจากลมซึ่งจะมีค่าที่สูงหากมีการใช้งานลมในการถ่ายโอนความร้อนของมอเตอร์ ซึ่งแปรผันตรงกับกำลังสองของความเร็วโรเตอร์และกำลังที่เกี่ยวข้องกับตัวคูณของความเร็วอีกที

$$\text{Windage power} = k_w \omega^3 \quad (3.21)$$

โดยที่ k_w คือค่าคงที่ที่ขึ้นกับขนาดและรูปร่างของมอเตอร์

3.9.4 การสูญเสียที่คงที่ (Constant losses)

เกิดขึ้นแม้กระทั่งมอเตอร์อยู่ในสภาวะนิ่ง และไม่เปลี่ยนแปลงตามความเร็วและแรงบิด เป็นกำลังที่ใช้ในแผงวงจรควบคุมไฟฟ้าที่ทำงานตลอดเวลา

$$\text{Constant losses} = C \quad (3.22)$$

ทำให้ได้กำลังที่สูญเสียทั้งหมดจากมอเตอร์ได้ตามสมการ 3.23

$$\text{total loss} = k_c T^2 + k_f \omega + k_w \omega^3 + C \quad (3.23)$$

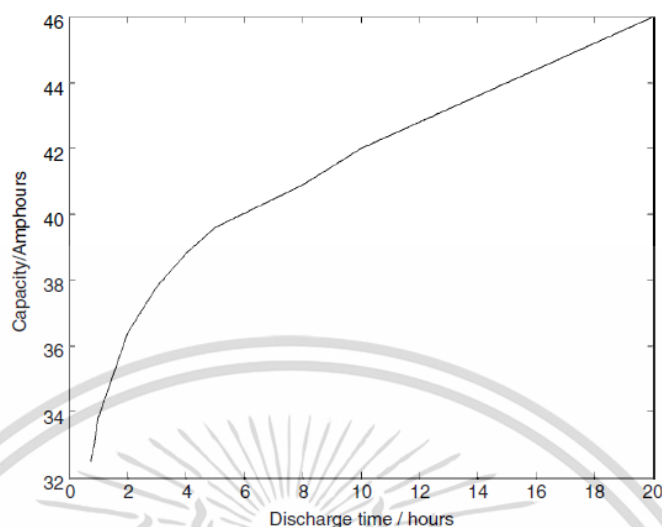
ประสิทธิภาพจากมอเตอร์จึงหาได้จาก

$$\eta_m = \frac{\text{output}}{\text{input}} = \frac{T\omega}{T\omega + k_c T^2 + k_f \omega + k_w \omega^3 + C} \quad (3.24)$$

3.10 การคำนวณปริมาณแบตเตอรี่

จากหนังสือ Electric Vehicle Technology Explained ของ James Larminie & John Lowry กล่าวว่าความสามารถในการจุพลังงานของแบตเตอรี่ถูกเรียกด้วย Amphours ซึ่งในทางทฤษฎี แบตเตอรี่ 10 Ah จะสามารถให้พลังงาน 1A ใน 10 ชั่วโมง, 5A ใน 2 ชั่วโมง และ 10A ใน 1 ชั่วโมง แต่ในทางปฏิบัติ ถ้าแบตเตอรี่ 10 Ah สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้า 1A ใน 10 ชั่วโมง แต่ถ้าจ่ายที่ 10A มันจะจ่ายได้น้อยกว่า 1 ชั่วโมง ในรูปที่ 3.11 แสดงถึงความจุที่ได้รับผลกระทบจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าที่เร็วขึ้นหรือช้าลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

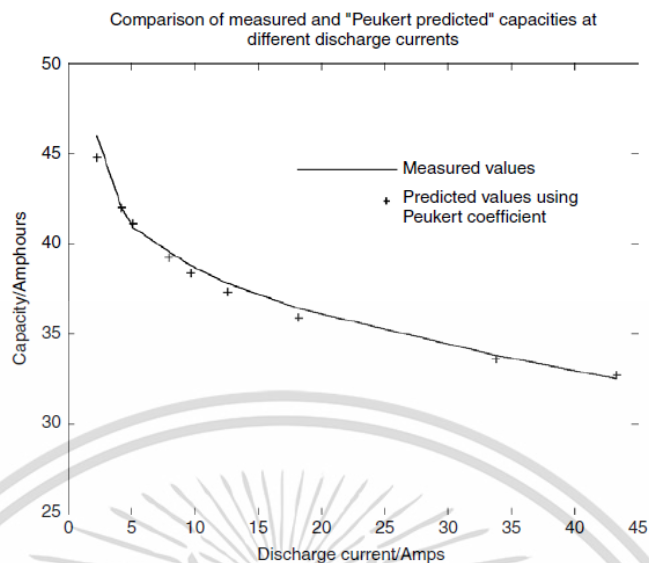


รูปที่ 3.11 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของ Amphours charge capacity ของแบตเตอรี่ 42 Ah (C_{10}) โดยกราฟนี้ได้มาจากการวัดของระบบแบตเตอรี่ lead acid โดย Hawker Energy Product Inc

จากรูปที่ 3.11 แสดงว่าความจุของแบตเตอรี่จะมีค่าเปลี่ยนไปในทางลดลงเร็วมากขึ้นหากใช้กระแสไฟฟ้ามากขึ้น แสดงว่าการดึงกระแส 4.2 A ที่ทำได้ 10 ชั่วโมง จะไม่สามารถให้กระแส 42 A ที่ 1 ชั่วโมงได้ เป็นเรื่องสำคัญที่เราต้องทำนายผลของกระแสไฟฟ้ากับความจุของแบตเตอรี่ได้เมื่อออกแบบรถแข่งและปริมาณประจุที่เหลือออกจากแบตเตอรี่ การทราบสถานะการชาร์จของแบตเตอรี่ก็เป็นผลดีในการคำนวณหาค่าแรงดันเปิดวงจร (open circuit voltage) เช่นกัน

โดยการจำลองแบบ Peukert จะถูกนำมาใช้ แม้ว่าแบบจำลองนี้จะใช้ไม่ได้กับระบบที่ใช้กระแสไฟฟ้าต่ำ แต่สำหรับระบบที่ใช้กระแสไฟฟ้าสูง สามารถให้ผลลัพธ์ที่ดีพอได้ เริ่มจากค่า Peukert Capacity ตามสมการ 3.25 ที่เป็นค่าคงที่และแบตเตอรี่ที่ชนิดเดียวกันจะต้องมีค่าเท่ากัน

$$C_p = I^k T \quad (3.25)$$



รูปที่ 3.12 แสดงค่าการจำลองโดย Peukert กับข้อมูลจากการวัดของแบตเตอรี่ lead acid 42V [4]

เมื่อนำมาใช้ในโปรแกรมจำลอง เราสามารถเห็นความดันแบตเตอรี่เปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดการจ่ายประจุออกไปโดยการคำนวณประจุที่ออกไปทีละลำดับ ลำดับเวลาสำหรับการคำนวณจะเรียกว่า δt แล้วกระแสที่ไฟออกไปคือ I A จะได้ประจุที่ออกจากแบตเตอรี่ว่า

$$\delta t \times I^k \quad (3.26)$$

เมื่อ δt มีหน่วยเป็นวินาทีแล้ว เมื่อหารด้วย 3600 จะได้หน่วยของ Amphours ถ้า CR_n เป็นประจุที่ออกจากแบตเตอรี่ทั้งหมดโดยการจำลองทั้ง n ลำดับแล้ว

$$CR_{n+1} = CR_n + \frac{\delta t \times I^k}{3600} \text{ Ah} \quad (3.27)$$

ปริมาณแบตเตอรี่ที่ถูกใช้ไป (Depth of discharge) คือสัดส่วนของประจุที่ถูกออกจากความจุเริ่มต้นทั้งหมด เมื่อทำเป็น n ลำดับสามารถได้ดังนี้

$$\text{DoD}_n = \frac{CR_n}{C_p} \quad (3.28)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับ open circuit voltage ของแบตเตอรี่สามารถหาได้จาก

$$P = V \times I = (E - IR) \times I = EI - RI^2 \quad (3.29)$$

สมการกำลังสองสำหรับค่า I สามารถหาได้จาก

$$I = \frac{E - \sqrt{E^2 - 4RP}}{2R} \quad (3.30)$$

ส่วนการใช้สำหรับการเบรกพื้นฟูจะมีประจุเข้าไปในแบตเตอรี่ทำให้ $V = E + IR$

$$I = \frac{-E + \sqrt{E^2 + 4RP}}{2R} \quad (3.31)$$

ส่วนสมการสำหรับเพิ่มประจุเข้าไปในแบตเตอรี่ จะคล้ายกับสมการ 3.27 แต่เปลี่ยนเป็นเครื่องหมายลบ และนำ Peukert Coefficient ออกไปเนื่องจากการชาร์จเข้านั้นตัวแบตเตอรี่มีการ self-discharge อยู่แล้วกระแสที่เข้าจึงมีค่าน้อยลง ดังสมการที่ 3.32

$$CR_{n+1} = CR - \frac{\delta t \times I}{3600} Ah \quad (3.32)$$

สำหรับการคำนวณ Peukert Coefficient เราต้องการเพียงความจุแบตเตอรี่ที่เวลาการจ่ายไฟฟ้าที่แตกต่างกัน แล้วจะได้ 2 สมการของ Peukert Capacity ดังสมการ 3.33

$$C_p = I_1^k \times T_1 \text{ และ } C_p = I_2^k \times T_2 \quad (3.33)$$

ใช้หลักการ logarithm และจัดเรียงใหม่จะได้ตามสมการ 3.34

$$k = \frac{(\log T_2 - \log T_1)}{(\log I_1 - \log I_2)} \quad (3.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยทั่วไปแล้ว ยิ่งค่า Peukert Coefficient ยิ่งน้อยเท่าไร แบตเตอรี่ยิ่งมีคุณภาพดีขึ้นเท่านั้น ทุกแบตเตอรี่ชนิดเดียวกันควรมีพฤติกรรมในทางเดียวกัน ส่งผลให้เป็นผลดีในการจำลองโดยวิธีนี้

3.11 การเลือกแบตเตอรี่

สำหรับรถขับเคลื่อนพลังงานไฟฟ้าที่เราใช้นั้นเป็นแบบที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขับเคลื่อนเพียงอย่างเดียว แบตเตอรี่จึงถือเป็นองค์ประกอบสำคัญ เนื่องจากพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ทั้งหมดจะได้อาจมาจากแบตเตอรี่ ผู้จัดทำจึงต้องพิจารณาคำนวณเลือกใช้แบตเตอรี่ที่เหมาะสมที่สุด โดยพิจารณาความต่าง ศักย์ที่ได้ กระแสไฟฟ้า น้ำหนักรวมของแบตเตอรี่เป็นหลัก นอกจากนี้ก็ต้องพิจารณาข้อดีข้อเสีย ความปลอดภัย และต้องไม่เป็นพิษกับสิ่งแวดล้อมด้วย

3.11.1 การเลือกชนิดของแบตเตอรี่

แบตเตอรี่ชนิดที่ชาร์จไฟได้ที่เป็นที่รู้จักกันดีก็คือ แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด (Lead acid battery) แต่จริง ๆ แล้วยังมีอีกหลายชนิด ซึ่งที่ทางผู้ทำวิจัยได้นำมาศึกษาเปรียบเทียบก็มี นิกเกิลแคดเมียม (Nickel cadmium, NiCad) นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ (Nickel metal hydride, NiMH) แบตเตอรี่โซเดียมซัลเฟอร์ (Sodium Sulphur batteries) แบตเตอรี่โซเดียมเมทัลคลอไรด์ (Sodium metal chloride (Zebra) batteries) และแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (The lithium ion battery) นอกจากนี้ยังมีแบตเตอรี่ประเภทอื่นที่สามารถเติมเชื้อเพลิงได้อีกด้วย จากหนังสือ Electric Vehicle Technology Explained ผู้ทำวิจัยได้นำข้อมูลแบตเตอรี่แต่ละชนิดมาพิจารณาในการที่จะเลือกใช้แบตเตอรี่

3.11.1.1 แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด (Lead acid battery)

แบตเตอรี่ตะกั่ว-กรดเป็นที่รู้จักกันดีและใช้อย่างแพร่หลายสำหรับยานพาหนะไฟฟ้า รวมไปถึงยานพาหนะแบบสันดาปภายในด้วย แบตเตอรี่ประเภทนี้มีข้อดีคือราคาถูก ให้ประสิทธิภาพของพลังงานจำเพาะในช่วงกว้าง แต่ก็มีข้อเสียในเรื่องการมีมลพิษกับสิ่งแวดล้อม พารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ตะกั่วกรด

- ค่าแรงดันของเซลล์แบตเตอรี่ 2 โวลต์
- ค่าความต้านทานภายใน ต่ำที่สุด ประมาณ 0.022 ต่อเซลล์
- ค่าความจุพลังงานจำเพาะ 20 ถึง 35 Wh./kg
- ความหนาแน่นของพลังงาน 54 ถึง 95 Wh./L
- ค่ากำลังจำเพาะ ประมาณ 250 W/kg ก่อนที่ประสิทธิภาพจะลดลง

- ประสิทธิภาพการคายประจุไฟฟ้า ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นอยู่กับอัตราการคายประจุและอุณหภูมิ
- อุณหภูมิใช้งาน ที่อุณหภูมิแวดล้อม แต่ประสิทธิภาพจะแย่มากเมื่ออยู่ที่ที่เย็นจัด
- การคายประจุด้วยตัวเอง ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน สำหรับชนิดเจล บางส่วนจะตกผลึกหากไม่ได้ใช้งานนาน 2 สัปดาห์
- จำนวนรอบการใช้งาน ใช้ได้มากถึง 800 รอบ จึงลดเหลือ 80 เปอร์เซ็นต์ของความจุ
- ระยะเวลาในการชาร์จ 8 ชั่วโมง (แต่สามารถชาร์จได้ 90% ภายใน 1 ชั่วโมง)

3.11.1.2 นิกเกิลแคดเมียม (Nickel cadmium, NiCad)

แบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียมถือเป็นหนึ่งในคู่แข่งหลักของแบตเตอรี่ตะกั่วกรดสำหรับการใช้ในยานพาหนะไฟฟ้าและแบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียมนี้ยังมีพลังงานเกือบสองเท่าของแบตเตอรี่ตะกั่วกรดด้วย สำหรับแบตเตอรี่ชนิดนี้มีข้อดีก็คือมีความต้านทานต่ออุณหภูมิสูง และการชาร์จมากเกินไปก็ไม่ก่อให้เกิดอันตรายใด ๆ เนื่องจากอัตราการผลิตแคดเมียมนั้น ไฮดรอกไซด์เท่ากับอัตราการแปลงกลับเป็นแคดเมียม ส่วนข้อเสียก็คือต้นทุนของแคดเมียมมีราคาเป็นหลายเท่าของสารตะกั่ว อีกทั้งยังเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นสารก่อมะเร็ง

พารามิเตอร์ของนิกเกิลแคดเมียม

- ค่าแรงดันของเซลล์แบตเตอรี่ 1.2 โวลต์
- ค่าความต้านทานภายใน ต่ำมาก ประมาณ 0.06 ต่อเซลล์
- ค่าความจุพลังงานจำเพาะ 40 ถึง 55 Wh./kg
- ความหนาแน่นของพลังงาน 70 ถึง 90 Wh./L
- ค่ากำลังจำเพาะ ประมาณ 125 W/kg ก่อนที่ประสิทธิภาพจะลดลง
- ประสิทธิภาพการคายประจุไฟฟ้า ดี
- อุณหภูมิใช้งาน อยู่ในช่วง -40°C ถึง 80°C
- การคายประจุด้วยตัวเอง คือ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ต่อวัน ถือว่าต่ำมาก
- จำนวนรอบในการใช้งาน คือ 1200 รอบ จึงลดเหลือ 80 เปอร์เซ็นต์ของความจุ
- ระยะเวลาในการชาร์จ 1 ชั่วโมง ชาร์จได้เร็ว 20 นาทีได้ความจุถึง 60%

3.11.1.3 นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ (Nickel metal hydride, NiMH)

แบตเตอรี่นิกเกิลเมทัลไฮไดรด์คล้ายกับแบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียม แต่มีความจุมากกว่า แบตเตอรี่นิกเกิลแคดเมียมถึง 2-3 เท่าในขนาดที่เท่ากัน แบตเตอรี่ชนิดนี้มีข้อดีคือ ปราศจากแคดเมียมซึ่งมีต้นทุกสูงและเป็นสารก่อมะเร็ง และมีข้อเสียคือ ราคาแพง ไม่อนุญาตให้อากาศเข้าไปในเซลล์แบตเตอรี่ จึงจำเป็นต้องมีการปิดผนึกอย่างดี และต้องการการควบคุมความร้อน เนื่องจากไฮโดรเจนนั้นมีความร้อนสูงมาก

พารามิเตอร์ของนิกเกิลเมทัลไฮไดรด์

- ค่าแรงดันของเซลล์แบตเตอรี่ 1.2 โวลต์
- ค่าความต้านทานภายในต่ำมาก ประมาณ 0.06 ต่อเซลล์
- ค่าความจุพลังงานจำเพาะ ประมาณ 65 Wh./kg
- ความหนาแน่นของพลังงาน 150 Wh./L
- ค่ากำลังจำเพาะ 200 W/kg ก่อนที่ประสิทธิภาพจะลดลง
- ประสิทธิภาพการคายประจุไฟฟ้า ค่อนข้างดี
- อุณหภูมิใช้งาน ที่อุณหภูมิแวดล้อม
- การคายประจุด้วยตัวเอง ถือว่าแย่มาก คายประจุด้วยตัวเองมากถึง 5 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน
- จำนวนรอบในการใช้งานประมาณ 1000 รอบ จึงลดเหลือ 80 เปอร์เซ็นต์ของการคายประจุ
- ระยะเวลาในการชาร์จ 1 ชั่วโมง ชาร์จได้เร็ว 20 นาทีได้ความจุถึง 60% สามารถชาร์จได้เร็วกว่านิกเกิลแคดเมียม (NiCad) แต่ต้องการการระบายความร้อน

3.11.1.4 แบตเตอรี่โซเดียมซัลเฟอร์ (Sodium Sulphur batteries)

แบตเตอรี่โซเดียมซัลเฟอร์มีข้อดีคือสามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิสูง ส่วนข้อเสียคือ ไม่ค่อยปลอดภัย ก่อนที่แบตเตอรี่จะสามารถใช้งานได้ นั้น จะต้องได้รับความร้อนเข้า ๆ จนถึงอุณหภูมิใช้งานก่อน และเมื่อไม่ใช้งานมากกว่าหนึ่งวัน แบตเตอรี่ภายในจะต้องคงความร้อนโดยการใช้เครื่องทำความร้อนไฟฟ้า พารามิเตอร์ของแบตเตอรี่โซเดียมซัลเฟอร์

- ค่าแรงดันของเซลล์แบตเตอรี่ 2 โวลต์
- ค่าความต้านทานภายใน ต่ำมาก
- ค่าความจุพลังงานจำเพาะ 100 Wh./kg
- ความหนาแน่นของพลังงาน 150 Wh./L

- ค่ากำลังจำเพาะ 200 W/kg ก่อนที่ประสิทธิภาพจะลดลง
- ประสิทธิภาพการคายประจุไฟฟ้า ต่ำมาก
- อุณหภูมิใช้งาน อยู่ในช่วง 300 ถึง 350°C
- การคายประจุด้วยตัวเองค่อนข้างต่ำ แต่เวลาไม่ใช้งาน พลังงานจะถูกนำไปทำให้แบตเตอรี่อุ่น
- จำนวนรอบในการใช้งานประมาณ 1000 รอบ จึงลดเหลือ 80 เปอร์เซ็นต์ ของความจุ
- ระยะเวลาในการชาร์จ 8 ชั่วโมง

3.11.1.5 แบตเตอรี่โซเดียมเมทัลคลอไรด์ (Sodium metal chloride (Zebra) batteries)

แบตเตอรี่โซเดียมเมทัลคลอไรด์มีข้อดีคือ พัฒนาจาก NaS เพื่อเอาชนะแบตเตอรี่ประเภทอื่นด้านความปลอดภัย และแบตเตอรี่ชนิดนี้ยังผ่านการทดสอบคุณสมบัติของประเทศยุโรปด้วย ส่วนข้อเสียคือ เมื่อไม่ได้ใช้งานมากกว่าหนึ่งวันแบตเตอรี่ภายในจะต้องคงความร้อนโดยการใช้เครื่องทำความร้อนไฟฟ้า และแบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถเย็นลงตัวลงได้ ถ้าเกิดเหตุการณ์เช่นนี้จะต้องให้ความร้อนกับแบตเตอรี่อย่างช้า ๆ และสม่ำเสมอ ซึ่งกระบวนการนี้จะใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง พารามิเตอร์ของแบตเตอรี่โซเดียมเมทัลคลอไรด์

- ค่าแรงดันของเซลล์แบตเตอรี่ ประมาณ 2 โวลต์ (2.5 โวลต์ เมื่อชาร์จเต็ม)
- ค่าความต้านทานภายใน ต่ำมาก
- ค่าความจุพลังงานจำเพาะ 100 Wh./kg
- ความหนาแน่นของพลังงาน 150 Wh./L
- ค่ากำลังจำเพาะ 150 W/kg ก่อนที่ประสิทธิภาพจะลดลง
- ประสิทธิภาพการคายประจุไฟฟ้า สูงมาก
- อุณหภูมิใช้งาน อยู่ในช่วง 300 ถึง 350°C
- การคายประจุด้วยตัวเอง เมื่อไม่ใช้งานจะต้องใช้พลังงานอย่างต่อเนื่องเพื่อให้แบตเตอรี่มีอุณหภูมิสูงถึงอุณหภูมิที่สัมพันธ์กับการคายประจุด้วยตัวเองประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน
- จำนวนรอบในการใช้งาน มากกว่า 1000 รอบ
- ระยะเวลาในการชาร์จ 8 ชั่วโมง

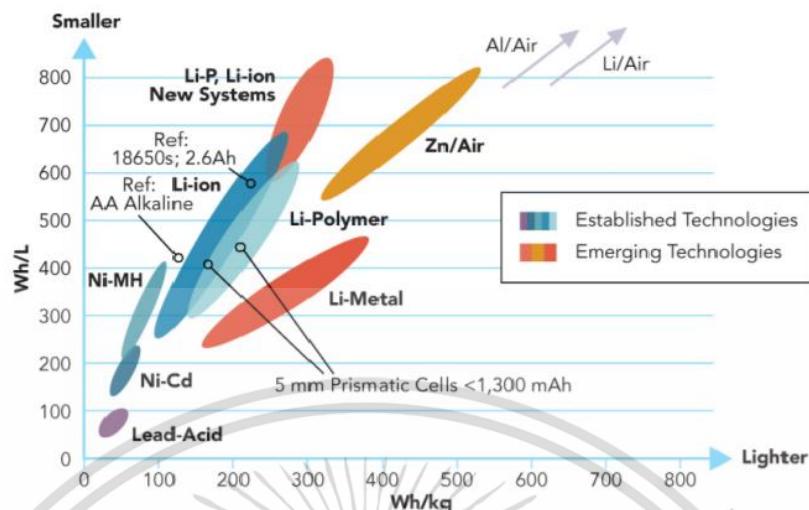
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.11.1.6 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Lithium ion battery)

แบตเตอรี่ลิเทียมมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการนำมาใช้งานในยานยนต์ไฟฟ้ามากที่สุดเนื่องจากคุณสมบัติด้านความหนาแน่นของพลังงานที่สูง ซึ่งแบตเตอรี่ลิเทียมนั้นมีขนาดและน้ำหนักน้อยกว่าแบตเตอรี่ตะกั่ว และแบตเตอรี่นิกเกิล ที่มีความจุเท่ากัน แต่ก็มีข้อเสียคือ ต้องมีการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่แม่นยำเมื่อชาร์จลิเทียมเซลล์ หากสูงเกินไปเพียงเล็กน้อยก็สามารถสร้างความเสียหายให้กับแบตเตอรี่ได้ หากต่ำเกินไปแบตเตอรี่จะถูกชาร์จไม่เพียงพอ และเครื่องชาร์จที่เหมาะสมนั้นต้องได้รับการพัฒนา มาพร้อมกับแบตเตอรี่

พารามิเตอร์ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

- ค่าแรงดันของเซลล์แบตเตอรี่ 3.5 โวลต์
- ค่าความต้านทานภายใน ต่ำมาก
- ค่าความจุพลังงานจำเพาะ 90 Wh/kg
- ความหนาแน่นของพลังงาน 153 Wh/L
- ค่ากำลังจำเพาะ 300 W/kg ก่อนที่ประสิทธิภาพจะลดลง
- ประสิทธิภาพการคายประจุไฟฟ้า ดีมาก
- อุณหภูมิใช้งาน ที่อุณหภูมิแวดล้อม
- การคายประจุด้วยตัวเอง ต่ำมาก ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ต่อเดือน
- จำนวนรอบในการใช้งาน มากกว่า 1000 รอบ
- ระยะเวลาในการชาร์จ 2-3 ชั่วโมง



รูปที่ 3.13 แสดงการเปรียบเทียบแบตเตอรี่ชนิดต่าง ๆ

(ที่มา: <http://batterymanagement.weebly.com/battery-parameters.html>)








จากรูปที่ 3.13 และข้อมูลที่ได้ศึกษาเปรียบเทียบข้อมูลของแบตเตอรี่ชนิดต่าง ๆ แบตเตอรี่ที่ผู้จัดทำวิจัยตัดสินใจเลือกใช้ คือ ลิเทียมไอออนแบตเตอรี่ โดยลิเทียมไอออนที่ได้รับความนิยมก็มีอยู่หลายชนิด อาทิ Lithium Iron Phosphate, Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide, Lithium Titanate และ Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide โดยแบตเตอรี่ที่ผู้ทำวิจัยเลือกก็คือ ลิเทียมไอออนฟอสเฟตและลิเทียมไอออน ซึ่งลิเทียมไอออนฟอสเฟตจะให้ความต่างศักย์ต่ำกว่าลิเทียมไอออนทั่วไปประมาณ 0.3 โวลต์ แต่ได้กำลังเยอะกว่า โดยแม้ค่ากำลังจำเพาะจะได้ประมาณ 200 W/kg ซึ่งน้อยกว่าลิเทียมไอออนทั่วไป แต่ก็เพียงพอสำหรับการใช้งานแล้ว อีกทั้งยังให้ความต่างศักย์ที่ค่อนข้างคงที่ สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิแวดล้อมปกติ นอกจากนี้ยังมีข้อดีคือ สามารถหาซื้อได้ง่าย ราคาถูก และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ส่วนข้อเสียก็มีบ้างคือ จำเป็นต้องมี ระบบจัดการแบตเตอรี่ (Battery Management System, BMS) เพื่อคอยตรวจสอบเพื่อไม่ให้มีแบตเตอรี่บางตัวมีความต่างศักย์ต่ำกว่า 2.5 โวลต์ ถ้าหากต่ำกว่านี้แบตเตอรี่ตัวอื่นจะจ่ายทดแทนความต่างศักย์ที่หายไป ทำให้เกิดการระเบิดได้ ซึ่งหลังจากที่เราเลือกชนิดของแบตเตอรี่ที่จะใช้ได้แล้ว เราก็ต้องนำไปหาข้อมูลเลือกประเภท คำนวณหาจำนวนแบตเตอรี่และน้ำหนักโดยรวมของแบตเตอรี่ต่อไป

3.11.2 การเลือกประเภทของแบตเตอรี่

เมื่อเลือกชนิดของแบตเตอรี่ได้แล้ว เราก็ต้องมาพิจารณาประเภทของแบตเตอรี่ เนื่องจากแบตเตอรี่มีหลายประเภท ซึ่งปัจจุบันที่นิยมใช้มี Cylindrical Cell, Prismatic Cell, Pouch Cell และ Button Cell โดยจากการพิจารณาเปรียบเทียบข้อดี ข้อเสียและข้อจำกัดของแต่ละประเภท ได้ประเภทที่

เหมาะสมคือ Cylindrical Cell และ Pouch Cell เมื่อเราเลือกใช้ Cylindrical Cell และ Pouch Cell ก็มาพิจารณาต่อว่าแต่ละประเภทมีสินค้าโดยอยู่บ้าง จากการศึกษาค้นคว้าได้ข้อมูลตามตารางที่ 3.2

ตารางที่3.2 ตารางแสดงการเปรียบเทียบแบตเตอรี่ประเภทต่าง ๆ

ชื่อ	รูปภาพ	ประเภท	ลักษณะอัตราการคายประจุ	การดำเนินงาน
SAMSUNG INR21700-40T		Cylindrical Cell	Li-ion	4 modules(99 cells each) : 396 cells DoD: 59.26% 415 V I _{max} 140 A weight: 27.72 kg Volume: 10830 cm ³ Cost: 2772\$
SAMSUNG INR21700-50E		Cylindrical Cell	Li-ion	7 modules (126 cells each): 882 cells DoD: 29.6% 530 V _{max} I _{max} 103 A weight: 60.85 kg Volume: 22123 cm ³ Cost: 5292\$
Molicel INR21700- P42A		Cylindrical Cell	Li-ion	4 modules (81 cells each): 324 cells DoD: 86.37% 340 V _{max} I _{max} 180 A weight: 21.06 kg Volume: 8973 cm ³ Cost: 2592\$
SANYO-NCR20700A (PANASONIC)		Cylindrical Cell	Li-ion	4 modules (118 cells each): 472 cells DoD: 81.63% 494 V _{max} I _{max} 120 A weight: 28.32 kg Volume: 11872 cm ³ Cost: 2592\$
KOK AMP20M1HD-A		Pouch Cell	LiFePO ₄	1 module (93 cells each): 93 cells DoD: 90.49% 330 V _{max} I _{max} 190 A weight: 46.13 kg Volume: 26938 cm ³ Cost: 2832\$
KOK-Pouch-3726 (Li-ion)		Pouch Cell	Li-ion	1 module (127 cells each): 127 cells DoD: 45.56% 532 V _{max} I _{max} 104 A weight: 74.2 kg Volume: 45102 cm ³ Cost: 1968.5\$
LiFePO ₄ 32700 Rechargeable Cell		Cylindrical Cell	LiFePO ₄	4 modules (135 cells each): 540 cells DoD: 52.56% 476 V _{max} I _{max} 119 A weight: 78.3 kg Volume: 33441 cm ³ Cost: 5400\$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 3.2 ผู้จัดทำวิจัยได้นำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ มาคำนวณในโปรแกรม MATLAB เพื่อหาแบตเตอรี่ที่มีประสิทธิภาพในการให้พลังงานมากที่สุดจาก driving circle ในการแข่งขัน Autocross จวนครบระยะทางทั้งหมด 23 กิโลเมตร แล้วเลือกพิจารณา โดยเมื่อพิจารณาแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนฟอสเฟต แบตเตอรี่ LiFePO₄ 32700 Rechargeable Cell ซึ่งเป็นลิเทียมไอออนฟอสเฟต ประเภท Cylindrical Cell นั้น มีน้ำหนักรวมแล้วมากเกินไป ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ จึงเลือกพิจารณา แบตเตอรี่ KOK AMP20M1HD-A ซึ่งเป็นลิเทียมไอออนฟอสเฟต ประเภท Pouch Cell โดยได้นำมาเปรียบเทียบกับ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ประเภท Cylindrical Cell แบบต่าง ๆ ด้วย ซึ่งแบบที่ดีที่สุดจากการคำนวณก็คือ Molicel INR21700-P42A

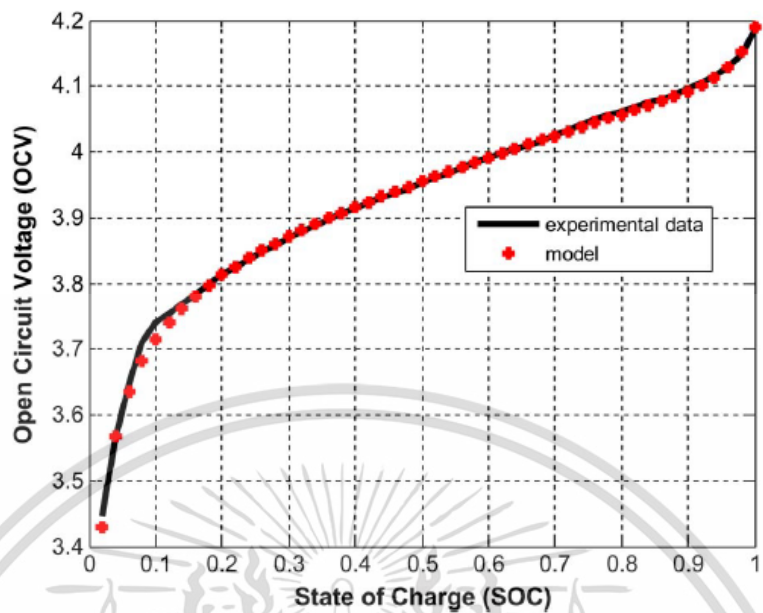
เมื่อนำทั้งสองประเภทมาเปรียบเทียบกัน เราเลือกใช้ Molicel INR21700-P42A เนื่องจาก Molicel INR21700-P42A มีน้ำหนักรวม 21.06 กิโลกรัม ส่วน KOK-AMP20M1HD-A มีน้ำหนักรวม 46.13 กิโลกรัม ซึ่งมีน้ำหนักมากกว่า ราคาแพงกว่า และจากจำนวนแบตเตอรี่ก้อนต่อโมดูล เมื่อเกิดการเสียหายขึ้น Molicel INR21700-P42A ส่งผลกระทบต่อระบบน้อยกว่า KOK-AMP20M1HD-A และราคาของ Molicel INR21700-P42A ก็ถูกกว่า KOK-AMP20M1HD-A อีกด้วย

จากการคำนวณทั้งหมด สรุปได้ว่า ผู้ทำวิจัยเลือกใช้ Molicel INR21700-P42A ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ประเภท Cylinder Cell ในการอ้างอิงตัวแปรของแบตเตอรี่ในการคำนวณแบบจำลองรถไฟฟ้าสุตกรนักศึกษา

สำหรับความสัมพันธ์ของ SOC กับ open circuit voltage ของแบตเตอรี่ประเภทลิเทียมไอออนนั้น พวกเราได้อ้างอิงจากงานวิจัยของ Caiping Zhang เรื่อง Robust and Adaptive Estimation of State of Charge for Lithium-Ion Batteries(2014) โดยมีสมการว่า

$$V_{oc} = 3.81 - 0.022(-\ln(s))^{2.1} + 0.31s + 0.07e^{30(s-1)} \quad (3.30)$$

โดย s คือ State of charge



รูปที่ 3.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ SOC-OCV ของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน [10]

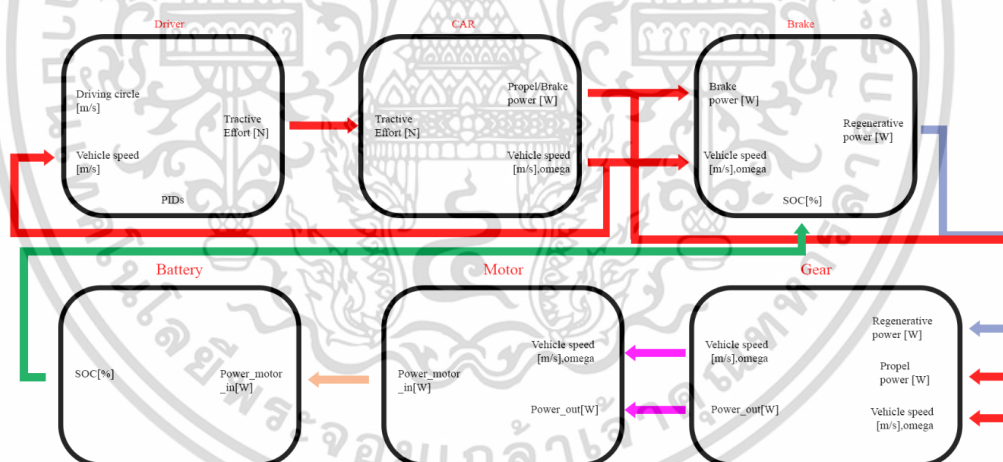
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

กรณีศึกษาและผลลัพธ์ของโปรแกรมจำลอง

4.1 กรณีศึกษาของการจำลองรถไฟฟ้าด้วยวงจรการขับเคลื่อน

การจำลองรถไฟฟ้าสำหรับนักศึกษาจากวงจรการขับเคลื่อน เป็นการจำลองแรงขับเคลื่อนรถที่ส่งกำลังมาจากมอเตอร์และใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ การเขียนผังโปรแกรมเริ่มจากการรับข้อมูลวงจรการขับเคลื่อนจาก workspace ของโปรแกรม MATLAB จากนั้นใน block ของ Driver ใช้ PID ในการปรับค่าผลลัพธ์ความเร็วที่ออกมาจาก block CAR เพื่อให้ค่าแรงที่ใช้ในการขับเคลื่อนทั้งหมด ส่งไปยัง block CAR เพื่อคำนวณหา กำลังที่ใช้ขับเคลื่อนรถ จากนั้นกำลังที่มีค่าติดลบหรือเกิดจากความหน่วงของรถจะส่งไปยัง BLOCK Brake เพื่อใช้หาแรงเบรกฟื้นฟูและกำลังที่คืนกลับไปยังแบตเตอรี่ เมื่อได้กำลังที่จะเข้าสู่มอเตอร์แล้วจะเกิดการสูญเสียบางส่วนจากฟันเฟือง เมื่อเส้นค่ากำลังเข้าสู่ BLOCK Gear จะได้ผลลัพธ์เป็นกำลังที่มาจากมอเตอร์เข้าสู่ BLOCK Motor เพื่อคำนวณประสิทธิภาพของตัวมอเตอร์และส่งกำลังที่ออกมาจากแบตเตอรี่ เพื่อใช้วิธี Peukert ในการหาปริมาณแบตเตอรี่ที่หลงเหลืออยู่ในระบบ



รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงการทำงานของแบบจำลองรถไฟฟ้า

เมื่อทำการเขียนโปรแกรมจำลองเสร็จ ทำการตรวจสอบความถูกต้องโดยใช้กรณีศึกษาจากหนังสือ Electric Vehicle Technology Explained ของ James Larminie & John Lowry ในหัวข้อ Electric Scooter Range Modelling

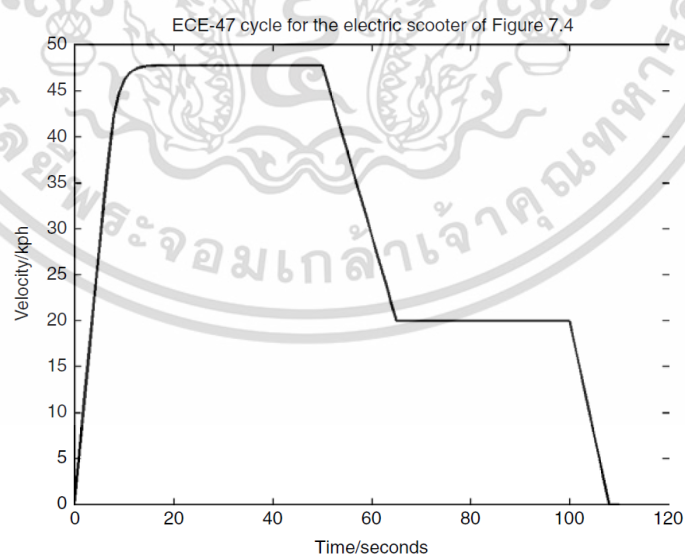
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงคุณลักษณะของรถสกูเตอร์ไฟฟ้า

Vehicle Characteristics	
น้ำหนักรถ (kg)	115
น้ำหนักกรรวมคนขับ (70 kg)	185
Coefficient of Lift	-
Coefficient of Drag	0.75
Area of Attack (m ²)	0.6
รัศมีล้อรถ Hoosier R25B (m)	0.21
อัตราทดเกียร์ Gearing Ratio	2
ความสูงจุด CG จากพื้น (m)	0.210

กำหนดใช้แบตเตอรี่ NiCad 15 cells และมีความจุ 100 Ah ค่าสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพมอเตอร์ไว้
ดังนี้

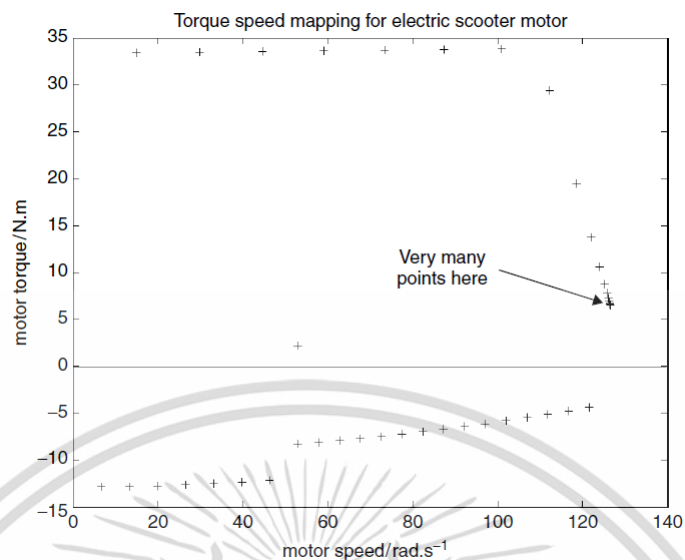
$$P_{ac} = 50, k = 1.05, k_c = 1.5, k_i = 0.1, k_e = 0.0001, C = 20$$

โดยกำหนดให้รถวิ่งใน Driving Circle : ECE-47 ซึ่งมีลักษณะดังนี้



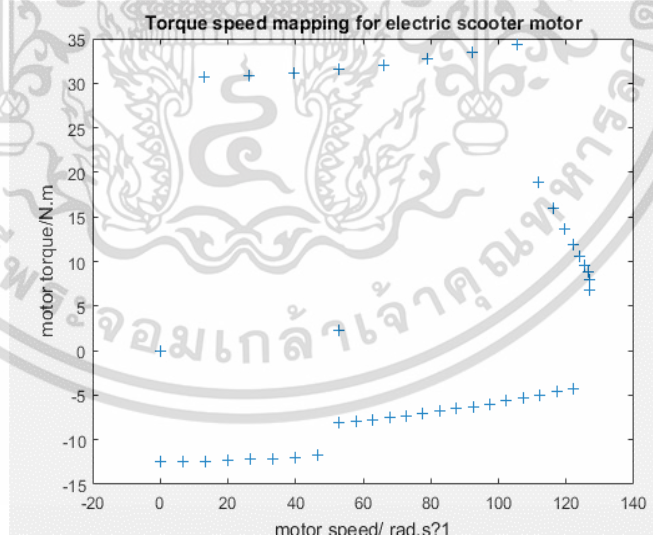
รูปที่ 4.2 แผนภาพแสดงวงจรการขับขี่ของ ECE-47 [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แผนภาพแสดงแรงบิดและความเร็วในการทำงานของมอเตอร์รถสกูตเตอร์ไฟฟ้าวงจรการขับซีของ ECE-47 ซึ่งบริเวณที่ชี้แสดงถึงจุดที่มอเตอร์ทำงานเป็นส่วนใหญ่บริเวณนั้น [4]

จากการทดสอบโปรแกรมที่เขียนใน Simulink แล้วได้ผลลัพธ์ของแรงบิดและความเร็วใกล้เคียงกับผลที่ได้จากกรณีศึกษาของหนังสือ

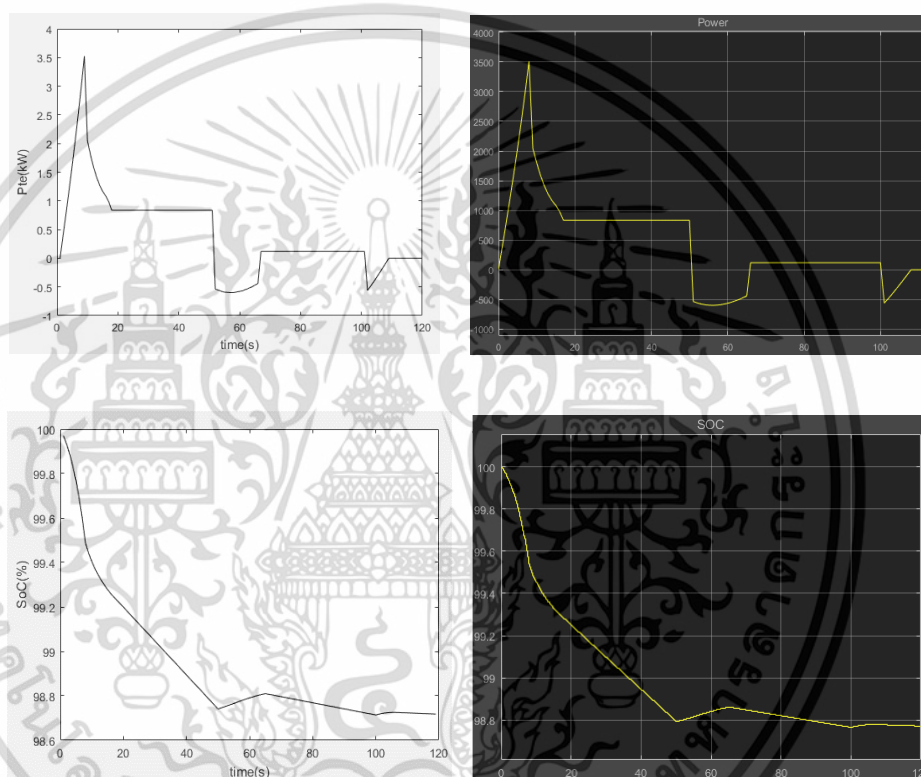


รูปที่ 4.4 แผนภาพแสดงแรงบิดและความเร็วในการทำงานของมอเตอร์รถสกูตเตอร์ไฟฟ้าวงจรการขับซีของ ECE-47 ที่ได้ผลลัพธ์จากการจำลองโดยโปรแกรมที่เขียนใน Simulink

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถสังเกตได้ว่ามีบางช่วงที่มีค่าไม่ตรงกับกรณีศึกษาในหนังสือ เนื่องจากความเร็วของวินาทีที่ 9 – 15 นั้นมีค่าไม่เหมือนกันกับ driving circle ที่หนังสือระบุไว้ โดยทั้งนี้เราได้ปรับค่าให้ใกล้เคียงที่สุดแล้วผลลัพธ์ที่ได้จึงเป็นดังกล่าว

ทั้งนี้ผลลัพธ์จากการจำลองยังทราบปริมาณกำลังที่ใช้ขับเคลื่อนของรถ และปริมาณแบตเตอรี่ที่คงเหลือด้วยเมื่อเทียบกับผลลัพธ์ที่ใช้โปรแกรม MATLAB ตามกรณีศึกษาในหนังสือและโปรแกรมจำลองใน Simulink แล้ว



รูปที่ 4.5 (บน) แผนภาพแสดงกำลังที่ใช้ขับเคลื่อนรถสตาร์ทเตอร์ไฟฟ้าในวงจร ECE-47 โดนด้านซ้ายเป็นกราฟจากข้อมูล MATLAB ของหนังสือส่วนด้านขวาเป็นข้อมูลจากโปรแกรมจำลองที่ได้ (ล่าง) แผนภาพแสดงปริมาณแบตเตอรี่ที่ใช้ไป

ข้อมูลที่ได้จากการจำลองสามารถนำไปตัดสินใจในการผลิตต้นแบบให้ได้ตามที่ต้องการได้ และเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่าง ๆ ได้ตามความเหมาะสมของการทำงาน

4.2 ผลลัพธ์ที่ได้ของโปรแกรมจำลอง

ข้อมูลเบื้องต้นของรถที่ผู้จัดทำได้ใช้ในการจำลองอ้างอิงมาจากรถแข่งที่เคยกล่าวไว้ในข้างต้น

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงคุณลักษณะรถแข่งที่ใช้ในการจำลอง

Vehicle Characteristics	
น้ำหนักรถไม่รวมมอเตอร์และแบตเตอรี่ (kg)	130
น้ำหนักกรรรวมคนขับ (70 kg)	200
Coefficient of Lift	2.49
Coefficient of Drag	1.35
Area of Attack (m ²)	1
รัศมีล้อรถ Hoosier R25B (m)	0.23
Weight bias to rear	0.55
ความสูงจุด CG จากพื้น (m)	0.210
Wheelbase (m)	1.53
Wheel Track (m)	1.15
Coefficient of rolling friction, Rrr	0.02

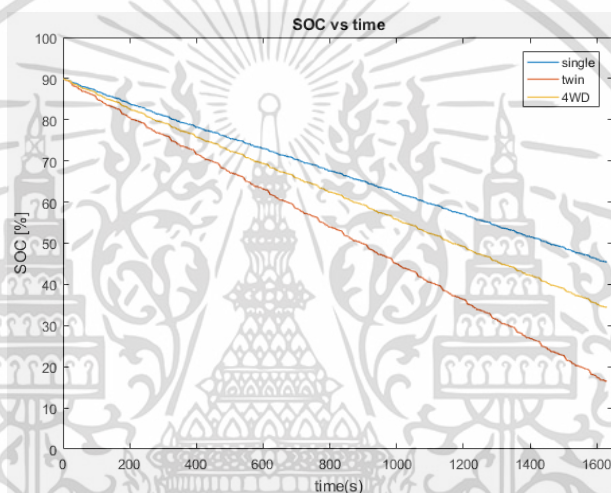
โดยแรงเบรกสูงสุดของรถที่ออกแบบไว้คือ 4000 N และอัตราส่วนแรงเบรกล้อหลังคือ 30% แสดงว่าแรงเบรกสูงสุดที่ล้อหลังสามารถทำได้คือ 1200 N spin loss 3% Regenerative breaking ที่ล้อหลังเป็นแบบอนุกรม สามารถใช้ได้อย่างเต็มที่เมื่อ SOC > 80% และความเร็วรถมากกว่า 2 m/s และกำหนดให้มอเตอร์ทุกตัวมีประสิทธิภาพเท่ากัน โดยมี

$$P_{ac} = 100, k_c = 0.3, k_i = 0.01, k_w = 0.00005, C = 30$$

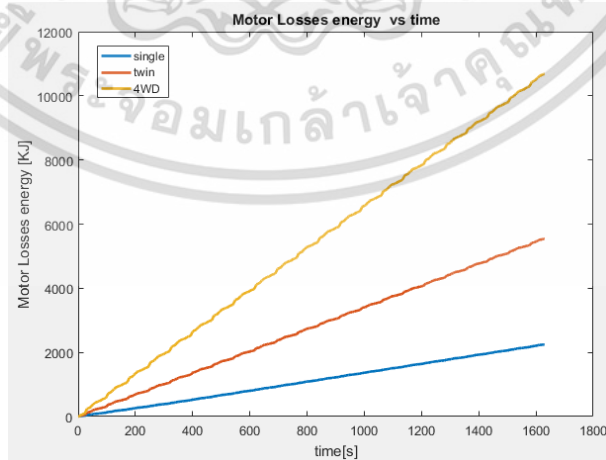
และแบตเตอรี่ที่ใช้เป็นยี่ห้อ Molicel INR21700-P42A ที่เป็นชนิดลิเทียมไอออน มี Nominal Capacity 4.2 Ah Nominal Voltage 3.6 V Typical Impedance 16 milliohms น้ำหนัก 70 กรัมต่อขนานกัน 4 เซลล์ต่อ 1 โมดูล เพิ่ม Peukert Coefficient, $k = 1.03$ เพื่อชดเชยเมื่อแบตเตอรี่เกิดความร้อน ทุกคันเริ่มต้นปริมาณแบตเตอรี่ที่ 90% ทำการจำลองโดยดูกำลังที่สูญเสียไปทั้ง 3 รูปแบบของระบบส่งกำลังได้แก่ ขับเคลื่อนล้อหลังแบบมอเตอร์ 1 ตัวและ 2 ตัวแยกกัน และขับเคลื่อน 4 ล้อ

4.2.1 การจำลองเมื่อทุกรูปแบบมีน้ำหนักมอเตอร์โดยรวมเท่ากัน

กำหนดให้รถทุกคันมีน้ำหนักมากที่สุด 250 kg และมีน้ำหนักมอเตอร์ทั้งหมด 20 kg ทำให้น้ำหนักเหลือสำหรับแบตเตอรี่ 30 กิโลกรัมเท่ากัน ระบบแบตเตอรี่จะมีจำนวนทั้งหมด 107 โมดูล หรือ 428 เซลล์ และช่วงแรงดันของระบบจะอยู่ที่ 410-438 Vdc กระแสไฟฟ้าสูงสุดไม่เกิน 180 A จากรูปที่ 4.5 สำหรับปริมาณแบตเตอรี่คงเหลือ จะพบว่ารถที่มีระบบส่งกำลังแบบมอเตอร์เดียวนั้นประหยัดพลังงานมากที่สุด คงเหลือที่ 45.5% รองลงมาคือแบบมอเตอร์คู่ที่ 34.5% และต่ำสุดคือแบบขับเคลื่อน 4 ล้อโดยอยู่ที่ 16.5%



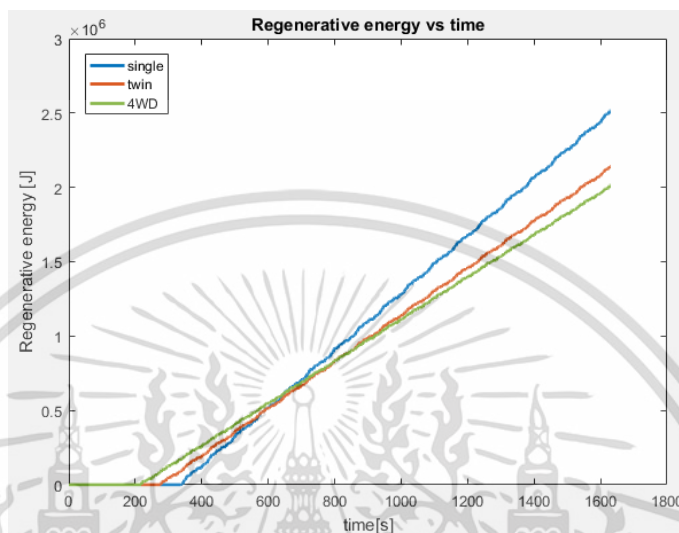
รูปที่ 4.6 กราฟ SOC vs time[s] ของรถในแต่ละระบบส่งกำลัง



รูปที่ 4.7 กราฟ Motor Energy Losses[KJ] vs time[s]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อันเนื่องมาจากการติดตั้งมอเตอร์ที่มากขึ้น ซึ่งในแต่ละมอเตอร์จะมีค่า Constant loss อยู่ ทำให้พลังงานสูญเสียเพิ่มขึ้น รวมถึงการทำงานของแรงบิดและรอบของมอเตอร์ที่ทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ออกมาต่างกัน แม้จะมีค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมือนกัน ในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.8 กราฟ Regenerative Braking Energy[KJ] vs time[s]

เมื่อพลังงานจลน์ทั้งหมดที่ใช้ในการเบรกใน driving circle Autocross มีค่าเท่ากับ $\sum E_{kin} = 4.03 \text{ MJ}$

พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ฟื้นฟูจากเบรกไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ตัวเดียว $\sum E_{bat} = 2.52 \text{ MJ}$

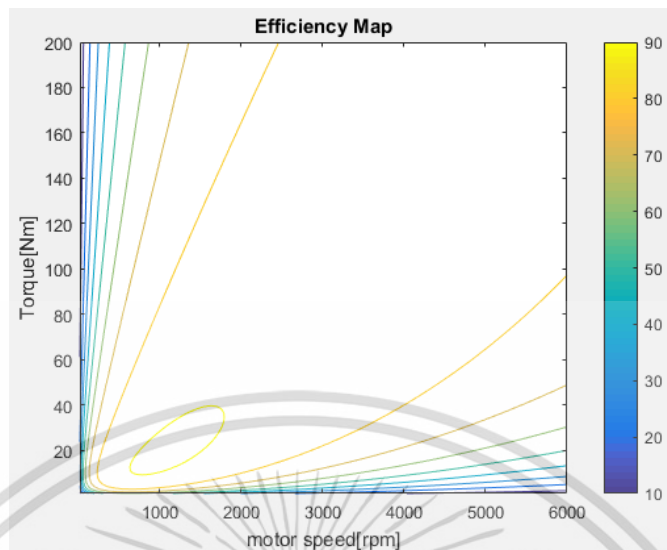
พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ฟื้นฟูจากเบรกไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ $\sum E_{bat} = 2.14 \text{ MJ}$

พลังงานไฟฟ้าทั้งหมดที่ฟื้นฟูจากเบรกไฟฟ้าของระบบขับเคลื่อนสี่ล้อ $\sum E_{bat} = 2.01 \text{ MJ}$

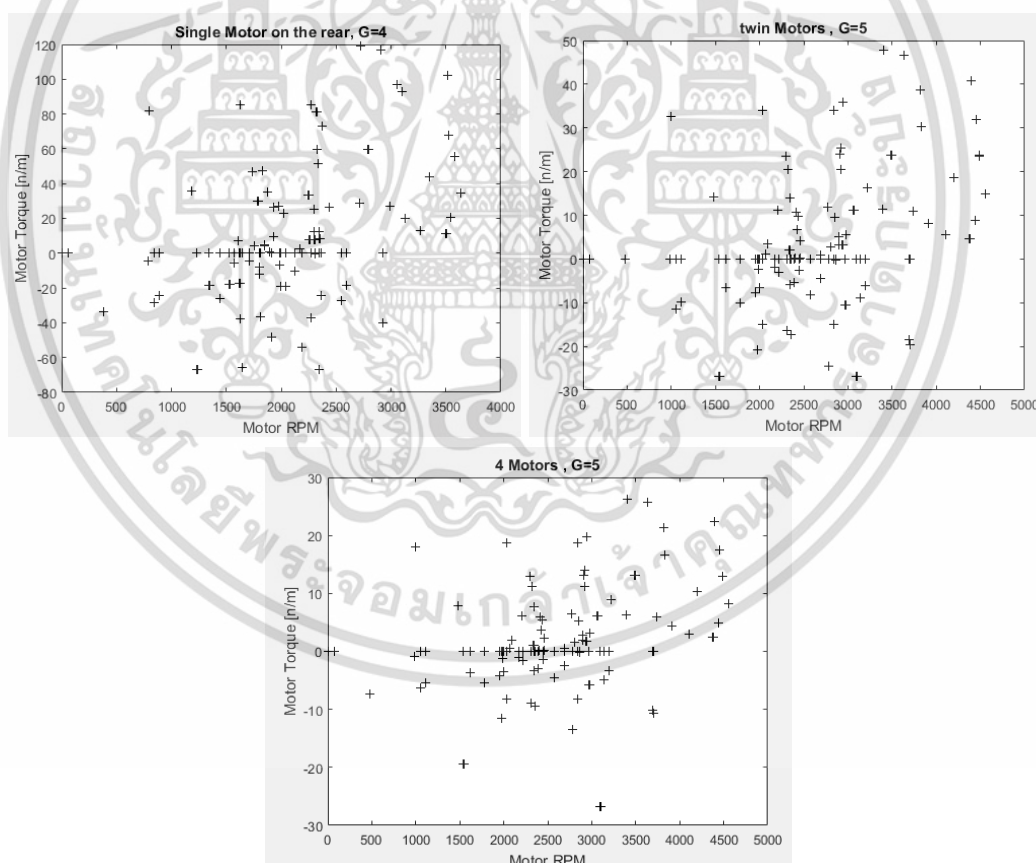
$$\text{Regenerative ratio;} \quad \varepsilon = \frac{\sum E_{bat}}{\sum E_{kin}} \quad (4.1)$$

จะได้ว่าระบบมอเตอร์ขับเคลื่อนแบบมอเตอร์เดี่ยวมีอัตราส่วนการฟื้นฟูสูงที่สุดที่ 62.5% ระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่อยู่ที่ 53.1% และระบบขับเคลื่อนสี่ล้อมีทั้งหมด 49.9% สาเหตุที่อัตราส่วนฟื้นฟูมีค่าสูงเนื่องจากการใช้งานระบบเบรกแบบอนุกรม ซึ่งต่างจากแบบขนานที่มีประสิทธิภาพการฟื้นฟูอยู่ที่ 15-30% เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กราฟ Efficiency Map ของมอเตอร์

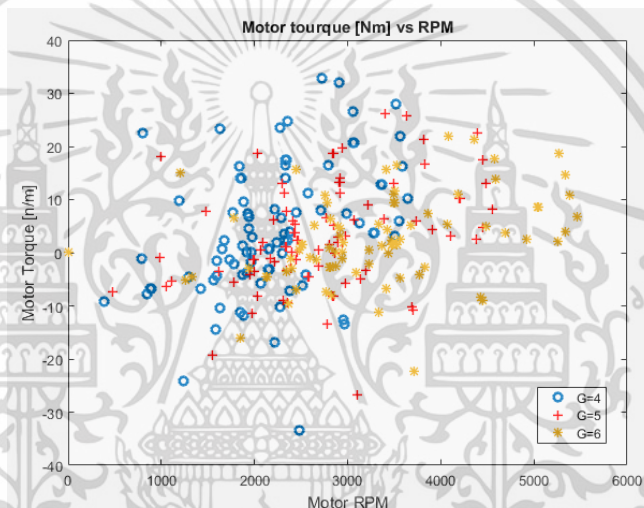


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์แต่ละระบบส่งกำลัง

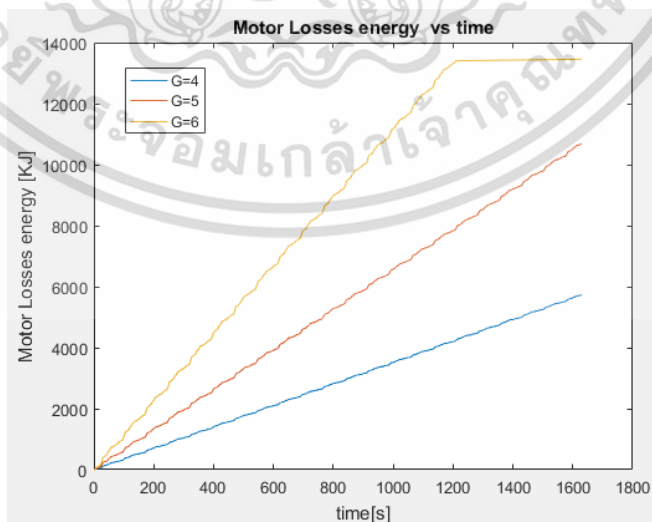
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การจำลองเมื่อเปลี่ยนอัตราทดเกียร์ของรถขับสี่ล้อ

เนื่องจากรถขับสี่ล้อโดยใช้มอเตอร์ จะต้องใช้ระบบเกียร์สุริยะในการทดกำลังของมอเตอร์ ผู้ทําวินิจฉัยจึงต้องการทราบความสัมพันธ์ของอัตราทดฟันเฟืองกับพลังงานที่ใช้ของมอเตอร์ โดยใช้ค่าตัวแปรเดิมจากข้อที่ 4.2.2 แต่ทดสอบจากอัตราทด 4:1, 5:1 และ 6:1 ผลลัพธ์ข้างต้นกราฟของแรงบิดและรอบของมอเตอร์ เมื่อเราเพิ่มอัตราทดฟันเฟืองทำให้การทำงานของมอเตอร์เบี่ยงออกจากกราฟไปทางขวา ซึ่งหากดูในรูปที่ 4.9 แล้วจะพบว่าที่ความเร็วรอบที่มากกว่า 3000 RPM และแรงบิดต่ำกว่า 40 Nm ประสิทธิภาพของมอเตอร์ช่วงนั้นจะน้อยมาก ทำให้เกิดการสูญเสียที่บริเวณมอเตอร์จำนวนมหาศาล ดูจากรูปที่ 4.12

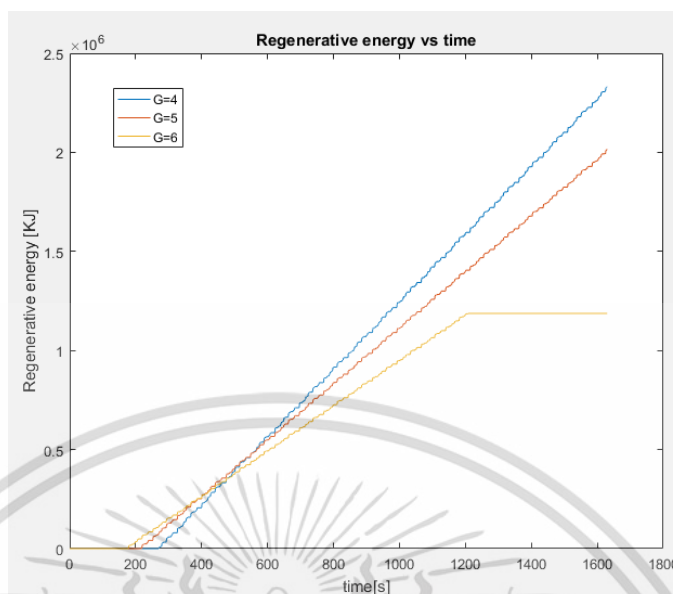


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงบิดและความเร็วรอบของมอเตอร์แต่ละอัตราทดเกียร์



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงพลังงานที่สูญเสียเนื่องจากมอเตอร์ในแต่ละอัตราทดเกียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงพลังงานที่ฟื้นฟูจากการใช้เบรกไฟฟ้าของแต่ละอัตราทดเกียร์

รูปที่ 4.13 บริเวณเส้นที่ความชันเป็นศูนย์แสดงถึงแบตเตอรี่ของระบบมีค่าต่ำกว่า 15% จึงสั่งการปิดเครื่องเพราะแบตเตอรี่ลิเทียมไม่ควรใช้งานจนมีปริมาณ SOC ต่ำกว่า 15% แสดงว่าพลังงานจะไม่เพียงพอหากใช้อัตราทดเกียร์ 6:1 การที่ปรับอัตราทดเพิ่มขึ้น ผลเสียก็คือความเร็วสูงสุดของรถแข่งจะลดลง แสดงว่าหากผู้ออกแบบต้องการใช้อัตราทดนี้ต้องกระทำการลดน้ำหนักของรถลงเพื่อเพิ่มความจุแบตเตอรี่ หรือใช้มอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงในช่วงการทำงานของรอบและแรงบิดนั้น ๆ เช่น หากสามารถลดน้ำหนักรถได้ 10 กิโลกรัม แล้วนำไปเพิ่มแบตเตอรี่จะทำให้รถขับขึ้นสี่ล้อวิ่งตลอดวงจรถขับขึ้น Autocross จนจบได้ และยังเหลือปริมาณแบตเตอรี่อีก 36.6%

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการศึกษาเพื่อสร้างโปรแกรมในการจำลองการทำงานของรถไฟฟ้าสุตุนักศึกษา โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink บล็อกของนักขับทำหน้าที่ให้แรงขับเคลื่อนและแรงเบรกโดยเปลี่ยนแปลงตาม PIDs ที่กำหนดโดยความเร็วของรถและความเร็วของวงจรถับขี่ แรงเบรกของรถได้กำหนดโดยผู้จัดทำรถในปีก่อน เพื่อป้องกันความไม่เสถียรและล้อลื้อขณะขับขี่ แรงขับเคลื่อนที่มาจากนักขับจะส่งต่อไปยังบล็อกของรถเพื่อให้ได้กำลังในการขับเคลื่อนและหยุดรถ หากทำการจำลองเฉพาะขี่ล้อหลังที่ควบคุมความเร็วแต่ละล้อด้วยเฟืองท้าย ข้อมูลวงจรถับขี่ก็เพียงพอ แต่หากต้องการจำลองระบบส่งกำลังแบบขับเคลื่อนโดยควบคุมความเร็วมอเตอร์เองด้วย ผู้จัดทำต้องทราบอัลกอริทึมสำหรับควบคุมความเร็วของล้อในการเข้าโค้ง โดยคณะผู้จัดทำได้อ้างอิงจาก Ackerman และทราบรัศมีความโค้งจากการวัดเทียบแผนที่การแข่งขัน เมื่อสามารถทราบความเร็วแต่ละล้อได้ การกระจายกำลังในแต่ละล้อจะต้องจัดทำด้วยการกระจายตามน้ำหนักรถที่ถ่ายโอนไปในแต่ละล้อ คล้ายกับการ Torque Vectoring การเลือกใช้ระบบเบรกก็นั้น มีผลต่อพลังงานแบตเตอรี่ที่ต้องใช้ในการแข่งขัน สำหรับระบบเบรกไฟฟ้าแบบอนุกรมนั้นมีประสิทธิภาพสูงมาก แต่ต้องมีการควบคุมที่ดีต่างจากชุดควบคุมกลไกของรถ ต่างจากแบบขนานที่ทำงานควบคุมกับระบบเบรกทางกลเกือบทุกครั้ง เมื่อสามารถจัดการระบบเบรกได้แล้ว กำลังที่ต้องผ่านไปยังฟันเฟืองต้องได้รับความสูญเสียจากแรงเสียดทาน ซึ่งมีค่าน้อยสำหรับรถไฟฟ้าไม่เหมือนรถระบบสันดาปภายใน เมื่อแรงผ่านระบบฟันเฟืองแล้วก็ต้องเข้าสู่มอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งปัจจัยหลักในการเลือกใช้คือ ต้องเลือกให้รอบและแรงบิดที่ทำงานให้อยู่ในช่วงนี้มีประสิทธิภาพสูงสุดของมอเตอร์นั้น ถึงแม้เลือกมอเตอร์ที่ให้แรงบิดสูง ๆ ในรอบสูง ๆ ได้ แต่ถ้าใช้งานในช่วงที่มีประสิทธิภาพต่ำของมอเตอร์ก็สิ้นเปลืองพลังงานเสียเปล่า เมื่อคำนวณหา กำลังที่เข้ามายังมอเตอร์ได้แล้ว ก็จะทำกำลังภายในแบตเตอรี่ ซึ่งทางคณะผู้จัดทำได้ใช้การจำลองโดยวิธี Peukert ที่ให้ความน่าเชื่อถือที่ยอมรับได้สำหรับระบบที่มีกระแสไฟฟ้าสูง ๆ อย่างรถไฟฟ้า เมื่อทำการเขียนโปรแกรมสำเร็จ ต้องทำการตรวจสอบโปรแกรมที่ทำจากกรณีศึกษา โดยคณะผู้จัดทำได้ทดลองจากกรณีศึกษาของรถไฟฟ้าสุตุนักศึกษา และได้ผลลัพธ์ออกมาว่าพอใจใกล้เคียงตามตำรา การพัฒนาต่อคือเพิ่มตัวเลือกการปรับอย่างแรงเบรกสูงสุด อัตราส่วนการใช้แรงเบรกไฟฟ้า การเปลี่ยนคุณสมบัติของแบตเตอรี่ คุณสมบัติของมอเตอร์ และคุณลักษณะต่าง ๆ ของรถ ทั้งที่ยังจัดทำเป็นสามระบบได้แก่ ระบบส่งกำลังแบบขับเคลื่อนล้อหลังโดยมอเตอร์หนึ่งตัว ระบบส่งกำลัง

แบบขับเคลื่อนล้อหลังโดยมอเตอร์สองตัว และระบบส่งกำลังแบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ทั้งสี่ล้อ เพื่อใช้เป็นโปรแกรมในการช่วยตัดสินใจสร้างรถไฟฟ้าสูตรนักศึกษาในอนาคต

5.2 ข้อเสนอแนะ

สำหรับการเก็บข้อมูลสำหรับการสร้างโปรแกรมจำลองครั้งต่อไป ควรบันทึกมุมการบิดของพวงมาลัยด้วย เพื่อที่จะสามารถคำนวณมุมล้ออื่น ๆ และความเร็วล้ออื่น ๆ ได้อย่างแม่นยำ รวมถึงสามารถคำนวณมุมไถลของรถมาใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของล้อจากข้อมูลยางรถได้อย่างถูกต้อง และในอนาคตหากสามารถใช้โปรแกรมที่เหมาะสมกว่านี้อย่าง Adams Car ได้ก็จะเป็นการดีอย่างยิ่งสำหรับรุ่นน้องรุ่นต่อไป เพราะสามารถที่จะจำลองรถทั้งคันรวมทั้งความเสถียรของรถได้ด้วย



เอกสารอ้างอิง

- [1] 2019 FSAE International (2019). **Formula SAE Rules 2020 Version 1.0**
- [2] จักรินทร์ ไตรแก้วเจริญ, ณัฐพล มั่งคั่ง และ ปณต พิระกันทา (2560). **หลักอากาศพลศาสตร์สำหรับรถแข่งสูตรนักศึกษา**, ปริญญาานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [3] รศ.ธีระยุทธ สุวรรณประทีป (2016), **วิศวกรรมยานยนต์**, บริษัทวิทยพัฒน์ จำกัด, ภาควิชาวิศวกรรมยานยนต์และกลศาสตร์ยานยนต์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [4] James Larminie and Joh Lowry (2003). **Electric Vehicle Technology Explained**, John Wiley & Sons, Ltd.
- [5] Engineering ToolBox (2008). Rolling Resistance. [online] Available at: https://www.engineeringtoolbox.com/rolling-friction-resistance-d_1303.html, access on 19/01/2020
- [6] B. J. Varocky (2011). **Benchmarking of Regenerative Braking for a Fully Electric Car**, Department of Mechanical Engineering, Eindhoven University of Technology
- [7] Isuru Premaratne (2016). **Wheel Speed Control Algorithm for Rear Wheel Motor Driven Vehicle**, The Open University of Sri Lanka
- [8] Jinhyun Park , Houn Jeong , In Gyu Jang and Sung-Ho Hwang (2015). **Torque Distribution Algorithm for an Independently Driven Electric Vehicle Using a Fuzzy Control Method**, School of Mechanical Engineering Sungkyunkwan University
- [9] Caiping Zhang, Le Yi Wang, Xue Li, Wen Chen, George G. Yin, and Jiuchun Jiang (2015). **Robust and Adaptive Estimation of State of Charge for Lithium-Ion Batteries**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

คำสั่งการจำลองปริมาณแบตเตอรี่ที่ใช้โดยโปรแกรม MATLAB

```

DCscript; %drivingcircle
N = length(V);

V = V/3.6;
mass = 250;
area = 1;
Cd = 1.35;
Cl = 2.49;
Gratio = 4;
TireR = 0.229;
G_eff = 0.96;
Regen_ratio = 0.4;
Pac=50;
module = 1;

%Battery coefficient
bat_06;

k = (log10(T2)-log10(T1))/(log10(I1)-log10(I2));
PeuCap= ((Capacity/1)^k)*1;
pack = 1;

D=zeros(1,N);

check = 0;
E = 0;
E_test = open_circuit_voltage_Liion(0,1);

while D(1) < 22
    DoD_end = zeros(1,100);
    CR_end = zeros(1,100);
    D_end = zeros(1,100);

    DoD=zeros(1,N);
    CR=zeros(1,N);
    D=zeros(1,N);

    CY=1;
    DD=0;
    pack=pack+1;

    while DD < 0.9 && check == 0 && D(1) < 22
        cycle_forBat;
        DoD_end(CY) = DoD(N);
        CR_end(CY) = CR(N);
        D_end(CY) = D(N);
        DoD(1) = DoD(N);
        CR(1) = CR(N);
        D(1) = D(N);
    
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        DD = DoD_end(CY) % Update state of discharge

        CY = CY +1;
    end;
    check = 0;
end;

Weight = W_bat * NoCells /1000 ; %Kg
Volume = V_bat * NoCells *1.1 /1000 ; %cubic cm
Price_all = Price * NoCells;
module_all = module * pack;

plot(X_plot,Y_plot,'-r*');
ylabel('Depth of discharge');
xlabel('Distance traveled/km');

```

```

%circle_forBat function
for C=2:N

    C_collector(CY,C) = C;
    if bat_type=='NC'
        NoCells= pack;
        Rin = (0.06/Capacity)*NoCells;
    elseif bat_type=='LA'
        NoCells= pack*6;
    elseif bat_type=='Li'
        NoCells= pack*1;
        Rin= (0.018*pack)/module;
    elseif bat_type=='LP'
        NoCells= pack*1;
        Rin= (0.002*pack)/module;
    elseif bat_type=='LC'
        NoCells= pack*1;
    elseif bat_type=='LT'
        NoCells= pack*1;
    else error('Please select a new battery type');
    end;

    Rin = Rin + 0.004;

    accel = V(C)-V(C-1);
    accel_collector(CY,C) = accel;
    Fad = 0.625 * area * Cd * V(C)^2;
    Frr = 0.007 * (mass) * 9.81;
    Fhc = 0;
    Fla = (1.05*mass)* accel;

    Pte = (Frr + Fad + Fhc + Fla)*V(C);
    omega = V(C)/TireR*Gratio;
    if omega == 0
        Pte=0;
        Pmot_in=0; % No power into motor
    end;
end;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Torque=0;
Fte=0;
eff_mot=0; % Dummy value, to make sure not zero.
elseif omega > 0 % Moving
    if Pte < 0
        Pte = Regen_ratio * Pte
    end;

    if Pte>=0
        Pmot_out=Pte/G_eff;
    elseif Pte<0
        Pmot_out=Pte*G_eff;
    end;

    Torque=Pmot_out/omega;

    if Torque>0
eff_mot=(Torque*omega)/((Torque*omega)+((Torque^2)*kc)+(omega*ki)+((ome
ga^3)*kw)+ConL);

    elseif Torque<0
        eff_mot=(-Torque*omega)/((-Torque*omega) +
(Torque^2)*kc)+(omega*ki)+((omega^3)*kw)+ConL);
    end;
    eff_mot_collector(CY,C) = eff_mot;
    if Pmot_out >= 0
        Pmot_in = Pmot_out/eff_mot;
    elseif Pmot_out < 0
        Pmot_in = Pmot_out * eff_mot;
    end;
end;
Torque_collector(CY,C) = Torque;
RPM_collector(CY,C) = V(C)*60*Gratio/(2*pi*TireR);

if V(C)==0
    F_collector(CY,C)=0;
else F_collector(CY,C) = Pte/V(C);
end;

Pbat = Pmot_in + Pac;

if bat_type=='NC'
    E=open_circuit_voltage_NC(DoD(C-1),NoCells);
elseif bat_type=='LA'
    E=open_circuit_voltage_LA(DoD(C-1),NoCells);
elseif bat_type=='Li'
    E=open_circuit_voltage_Liion(DoD(C-1),NoCells);
elseif bat_type=='LP'
    E=open_circuit_voltage_LiFePO4(DoD(C-1),NoCells);
elseif bat_type=='LC'
    E=3.7*NoCells;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

elseif bat_type=='LT'
    E=open_circuit_voltage_LTO(DoD(C-1),NoCells);
else
    error('Invalid battery type');
end;

if Pbat > 0
    if ((E*E) - (4*Rin*Pbat)) < 0
        error('Sorry! Imaginary number may occur!');
    else
        I = (E - ((E*E) - (4*Rin*Pbat))^0.5)/(2*Rin);
        CR(C) = CR(C-1) + ((I^k)/3600);
    end;
elseif Pbat==0
    I=0;
    CR(C) = CR(C-1);
elseif Pbat < 0
    Pbat = - 1 * Pbat;
    I = (-E + (E*E + (4*2*Rin*Pbat))^0.5)/(2*2*Rin);
    CR(C) = CR(C-1) - (I/3600);
end;

I_collector(CY,C) = I;
E_collector(CY,C) = E;
Pte_collector(CY,C) = Pte;
P_collector(CY,C) = Pte/1000;

DoD(C) = CR(C)/PeuCap;

if DoD(C)>1
    DoD(C) =1;
end;

if DoD(C)<0
    DoD(C) =0;
end;

DoD_collector(CY,C) = DoD(C);

D(C) = D(C-1) + (V(C)/1000);
D_collector(CY,C-1)=D(C);

XDATA(time)=time;
YDATA(time)=D(C);
time = time + 1;
end;

```

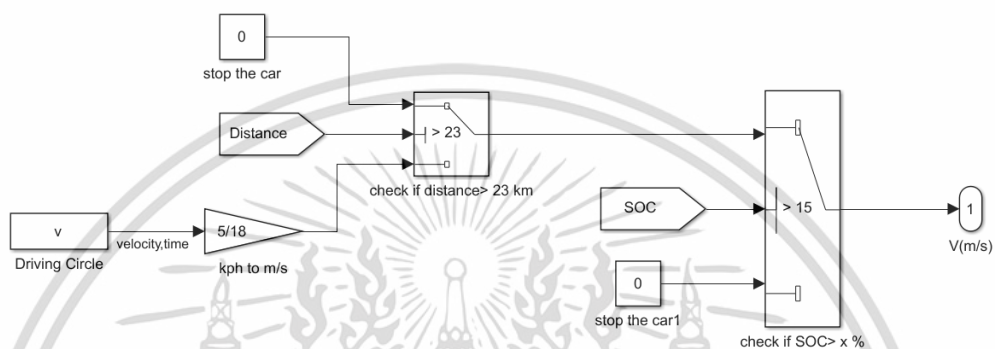
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



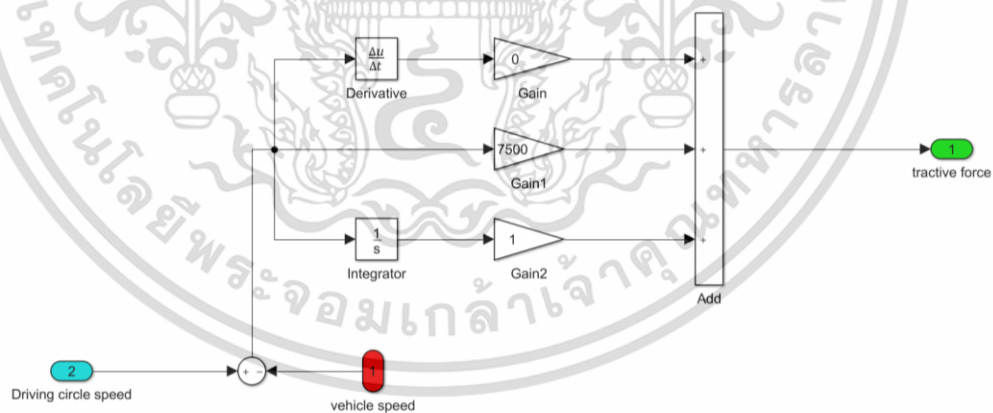
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

Simulink Figures

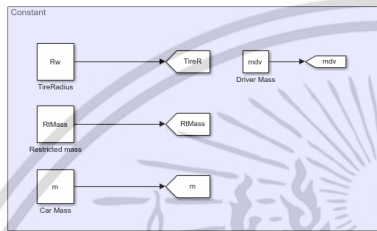
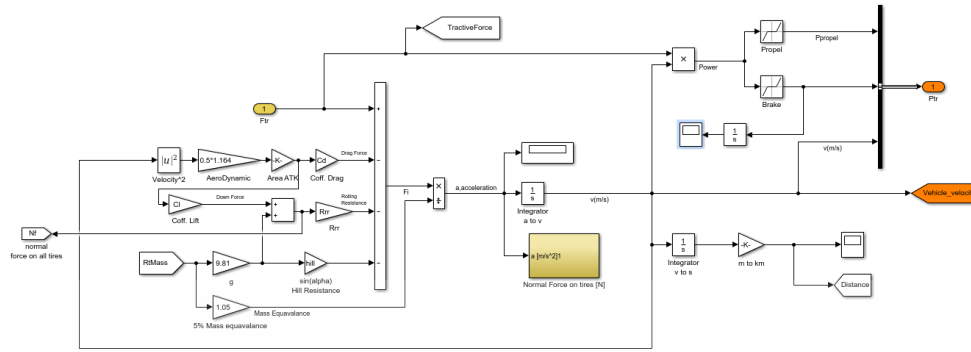


รูปที่ ข-1 Driving circle Block

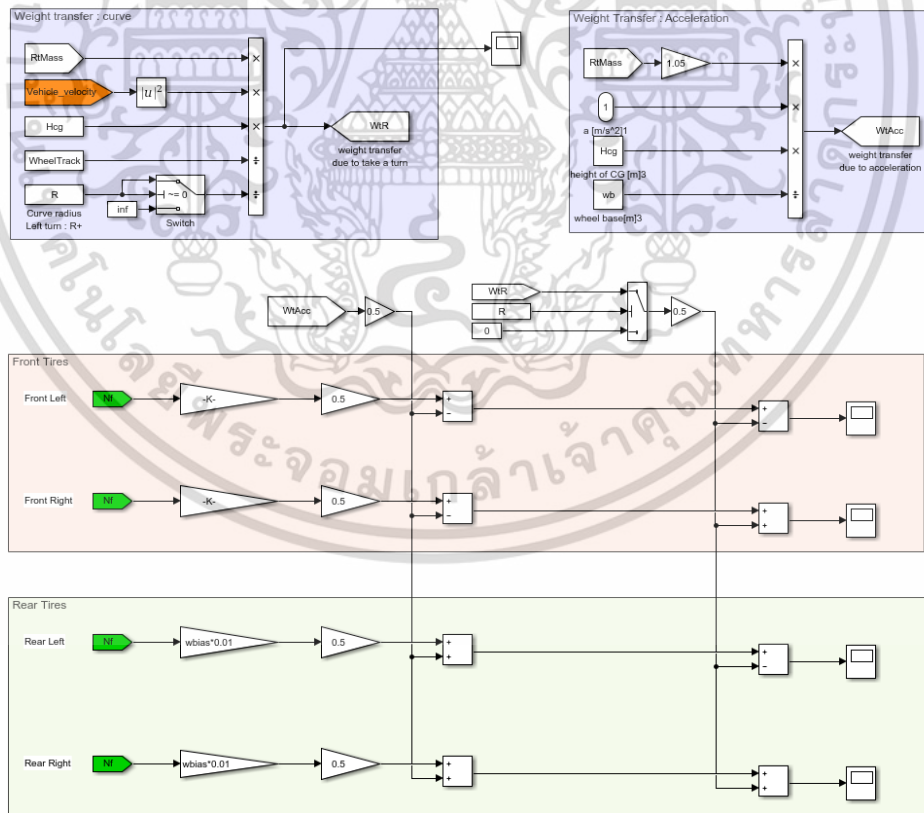


รูปที่ ข-2 Driver Block

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

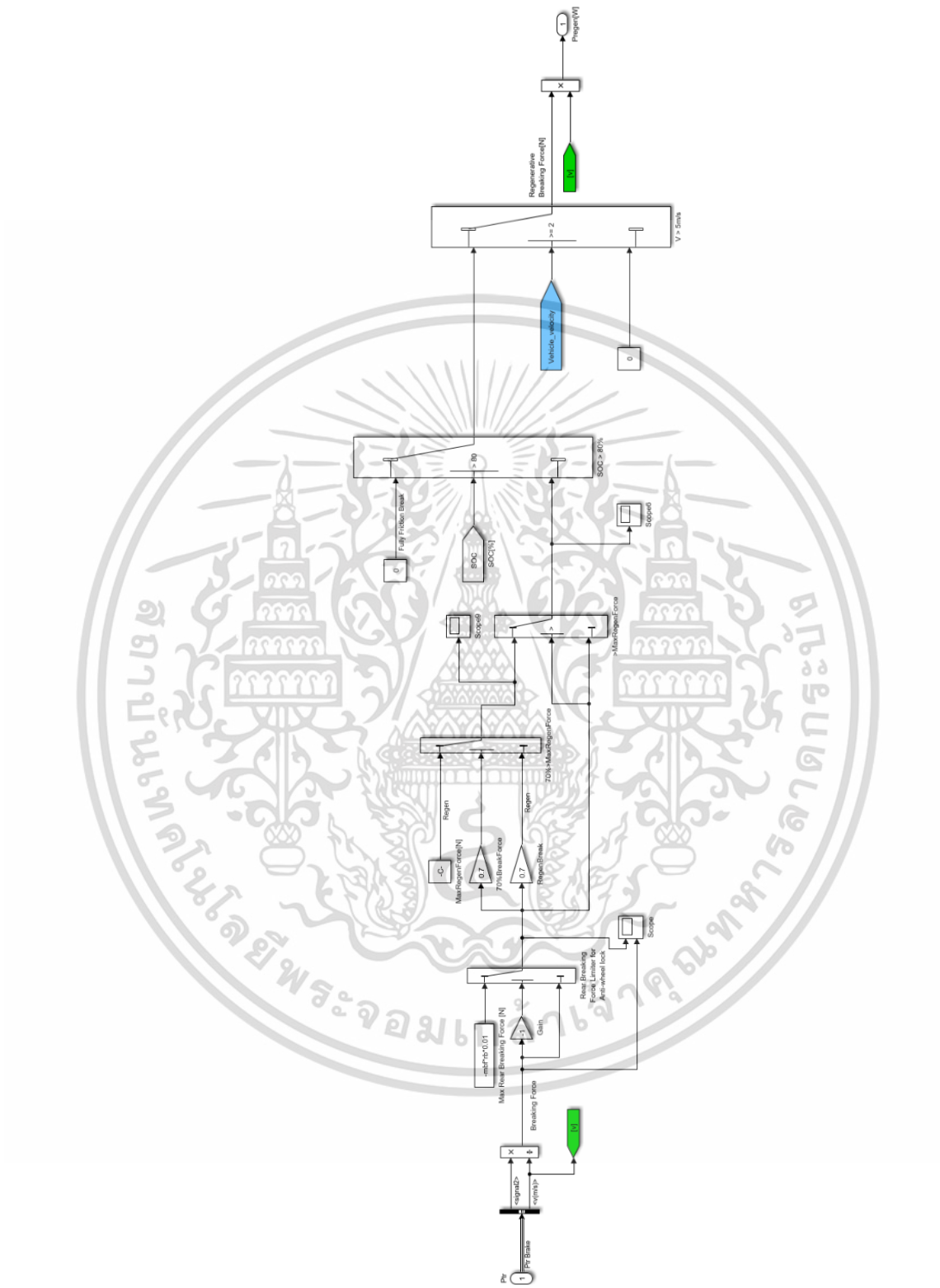


รูปที่ ข-3 Car Block



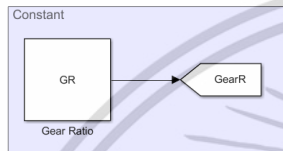
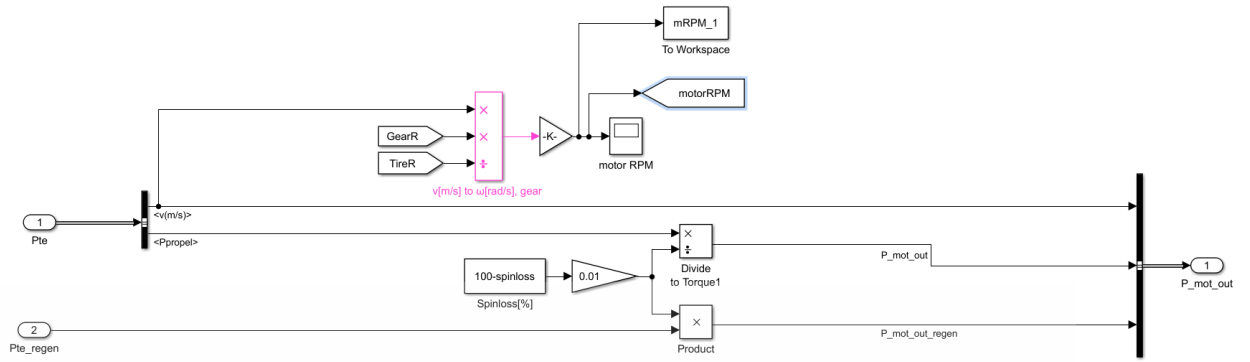
รูปที่ ข-4 Normal Force on Tires Block

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

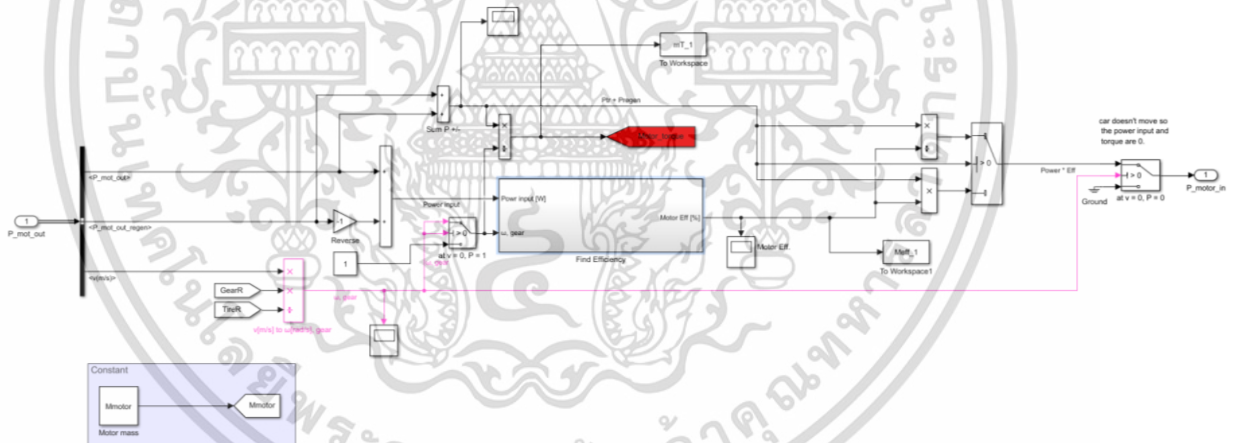


รูปที่ ข-5 Brake Block

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

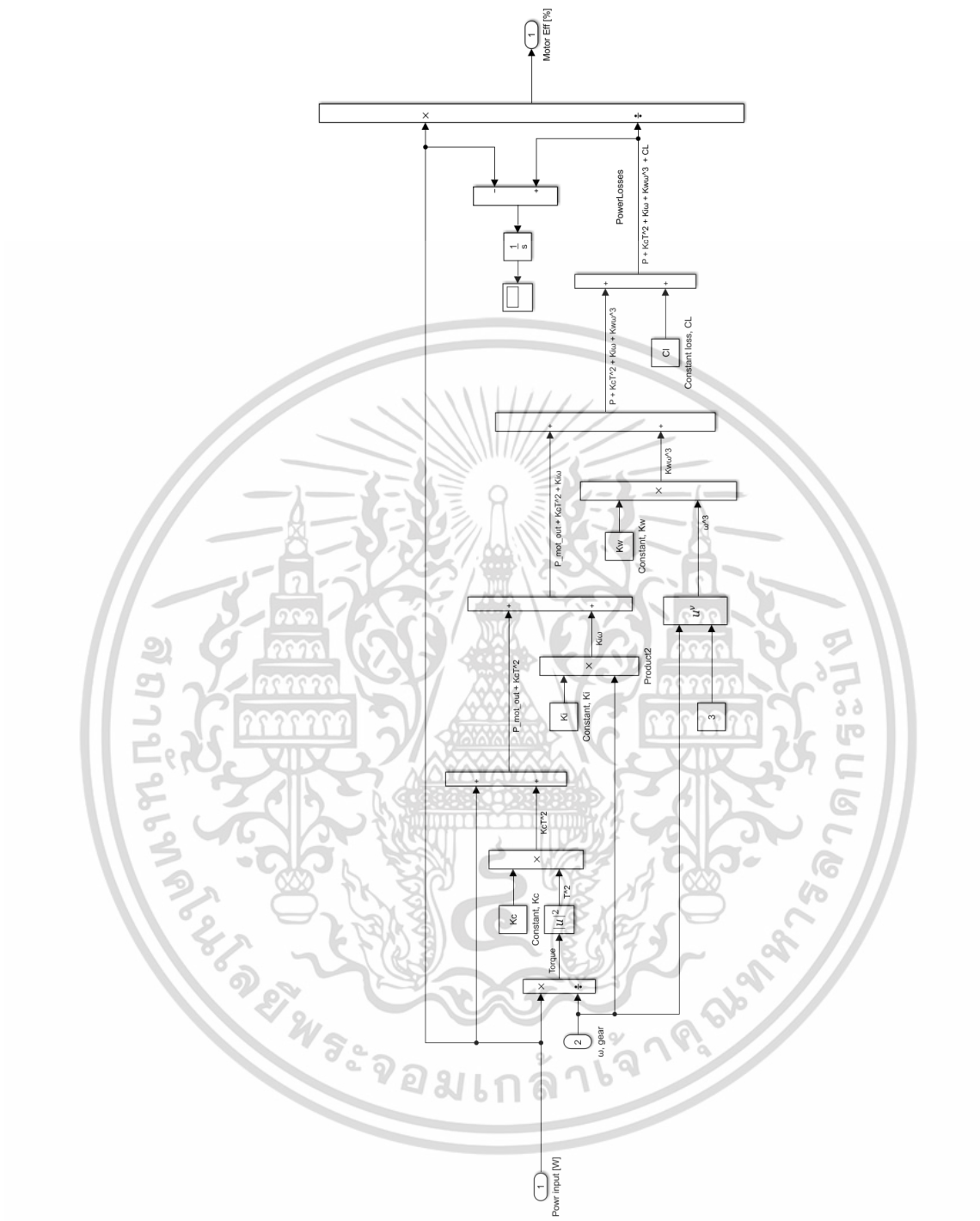


รูปที่ ข-6 Gear Block



รูปที่ ข-7 Motor Block

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข-8 Calculating Motor Efficiency Block

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้