



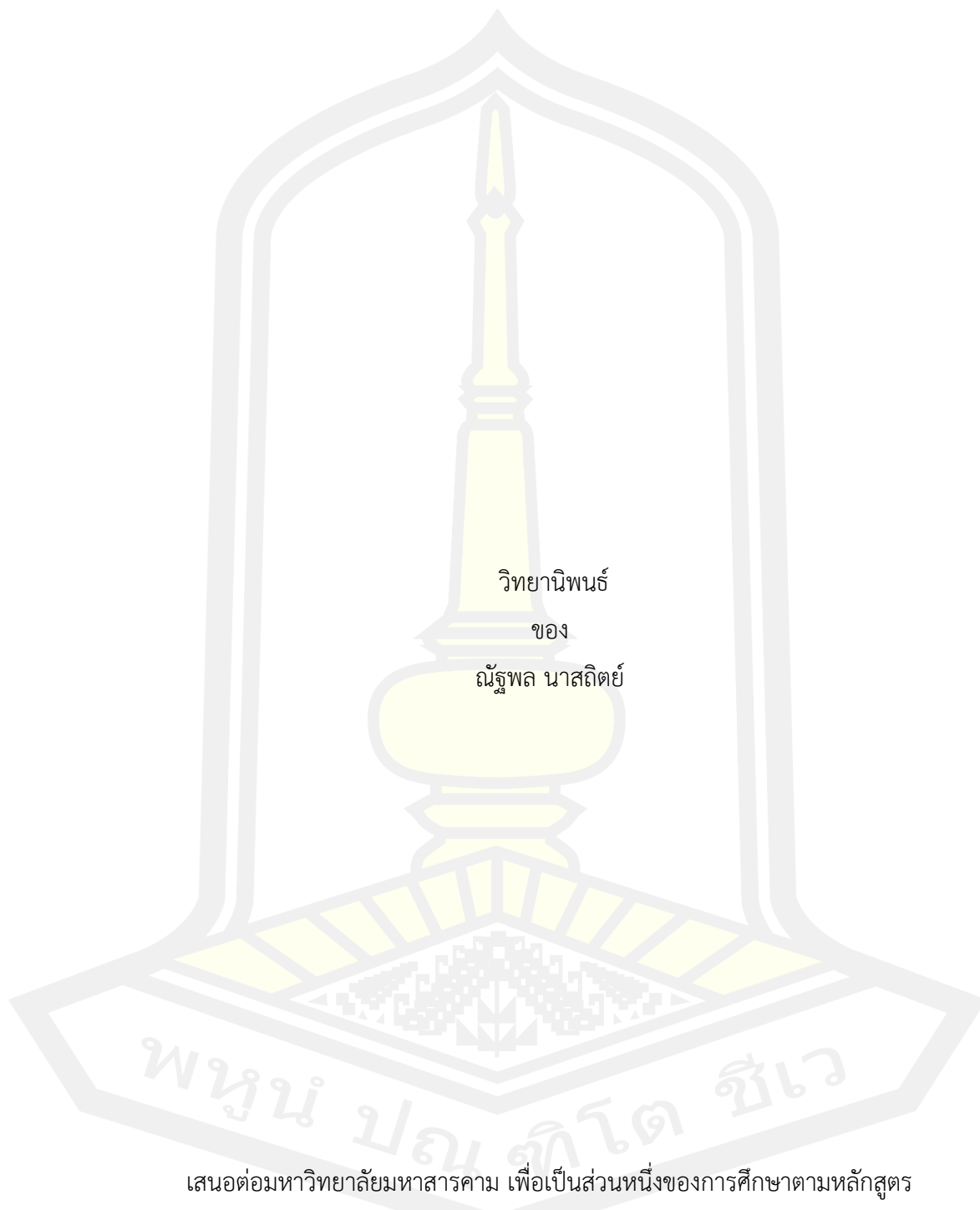
การพัฒนารถแทรกเตอร์ไฟฟ้าควบคุมด้วยรีโมท

วิทยานิพนธ์
ของ
ณัฐพล นาสถิตย์

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
ธันวาคม 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

การพัฒนารถแทรกเตอร์ไฟฟ้าควบคุมด้วยรีโมท

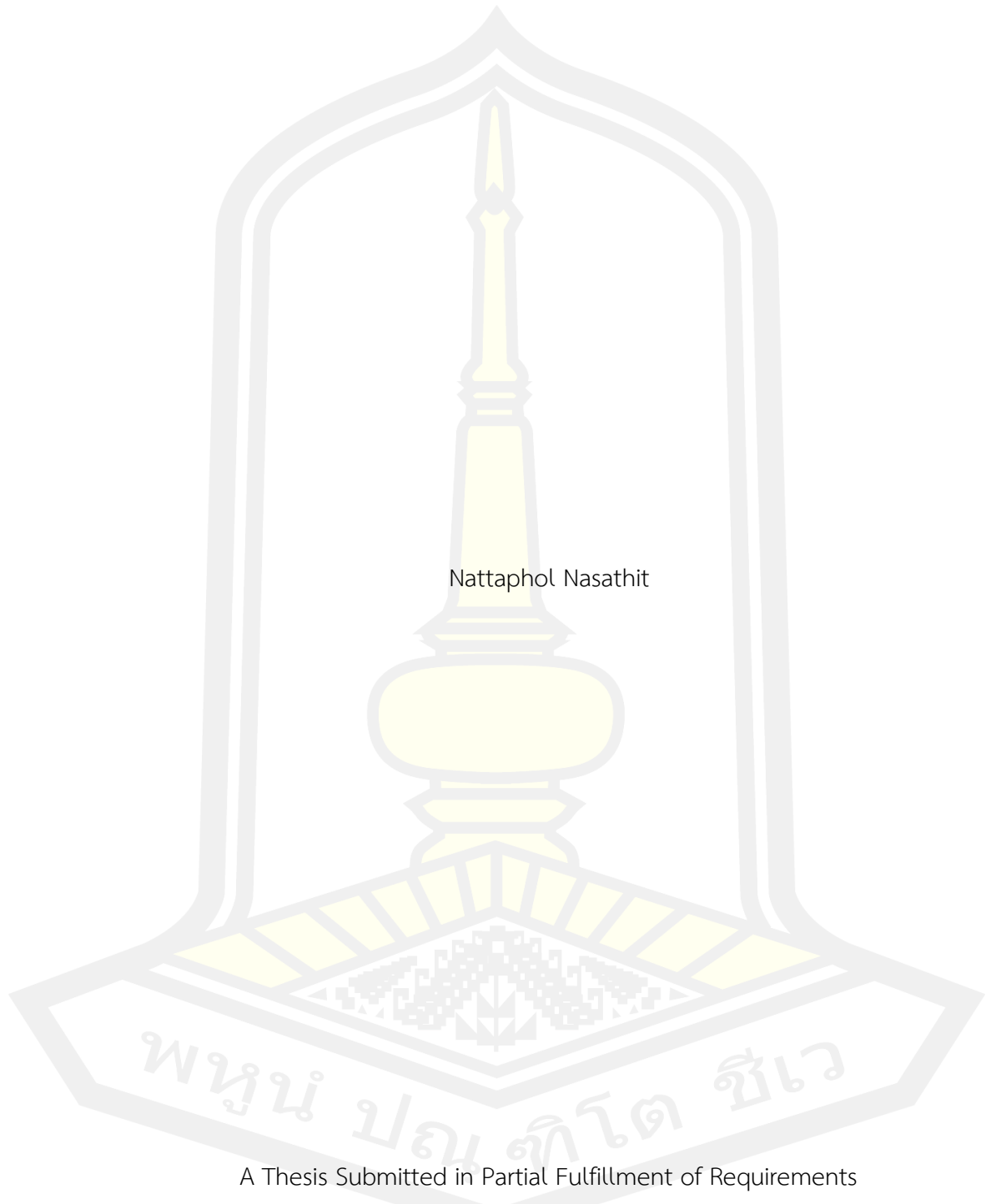


เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ธันวาคม 2564

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Development of Electric Tractor using Remote Control



Nattaphol Nasathit

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for Master of Engineering (Electrical and Computer Engineering)

December 2021

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายณัฐพล นาสถิตย์ แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. อติเรก จันทะคุณ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. ชลธิ์ โพธิ์ทอง)

.....กรรมการ

(รศ. ดร. วรวัฒน์ เสี่ยงมวิบูล)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. นิวัฒน์ อังควิศิษฐพันธ์)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

.....
(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อเรื่อง	การพัฒนารถแทรกเตอร์ไฟฟ้าควบคุมด้วยรีโมท		
ผู้วิจัย	ณัฐพล นาสถิตย์		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. ชลธิ์ โพธิ์ทอง		
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
มหาวิทยาลัย	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม	ปีที่พิมพ์	2564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา ออกแบบ และจัดสร้างรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าควบคุมด้วยรีโมทอย่างง่าย ประหยัดพลังงานสามารถชาร์จไฟฟ้าได้จากคริวเรือน และมีสมรรถนะในการขับเคลื่อนและการไถพรวนดินดี เป็นรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า 4 ล้อ บังคับด้วยรีโมทสัญญาณวิทยุ การทดสอบสมรรถนะของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าต้นแบบประกอบด้วยทดสอบการทำงานในภาคสนาม ขณะปั่นดิน มอเตอร์ปั่นดินขนาด 1,000 วัตต์ ใช้พลังงานในอัตราภาระโหลดที่แตกต่างกันคือ 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่ของตัวรถต่างระดับคือ 4 5 6 7 8 9 10 และ 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ของระบบการขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่ ขนาดพิกัด 250 วัตต์ จำนวน 2 ตัว ในการเคลื่อนที่ ผลการทดสอบพบว่า 1) ความเร็วที่เหมาะสมในการเคลื่อนที่พรวนดิน คือ 7 8 และ 9 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ เนื่องจากความเร็วในระดับนี้ทำให้สามารถควบคุมทิศทางในการเคลื่อนที่ได้ง่าย 2) ความเร็วในการเคลื่อนที่พรวนดินที่ 4 5 และ 6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่ารถเคลื่อนที่ช้า และมีแรงในขับเคลื่อนน้อย ทำให้เกิดปัญหาติดกับก้อนดินบ่อย ไม่สามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้ 3) ความเร็วในการเคลื่อนที่พรวนดินที่ 10 และ 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่ารถเคลื่อนที่เร็วเกินไป ทำให้ควบคุมทิศทางในการเคลื่อนที่ยาก ทำให้รถวิ่งออกนอกเส้นทางบ่อย 4) อัตราภาระโหลดการใช้พลังงานของมอเตอร์ปั่นดินที่เหมาะสมคือ 80 60 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ 5) อัตราภาระโหลดการใช้พลังงานของมอเตอร์ปั่นดินที่ 20 และ 40 เปอร์เซ็นต์ พบว่าเครื่องปั่นดินหมุนช้าและปั่นดินได้ไม่สม่ำเสมอ รถแทรกเตอร์ไฟฟ้าสามารถทำงานได้ประมาณ 7 ชั่วโมง ต่อการประจุหนึ่งครั้ง

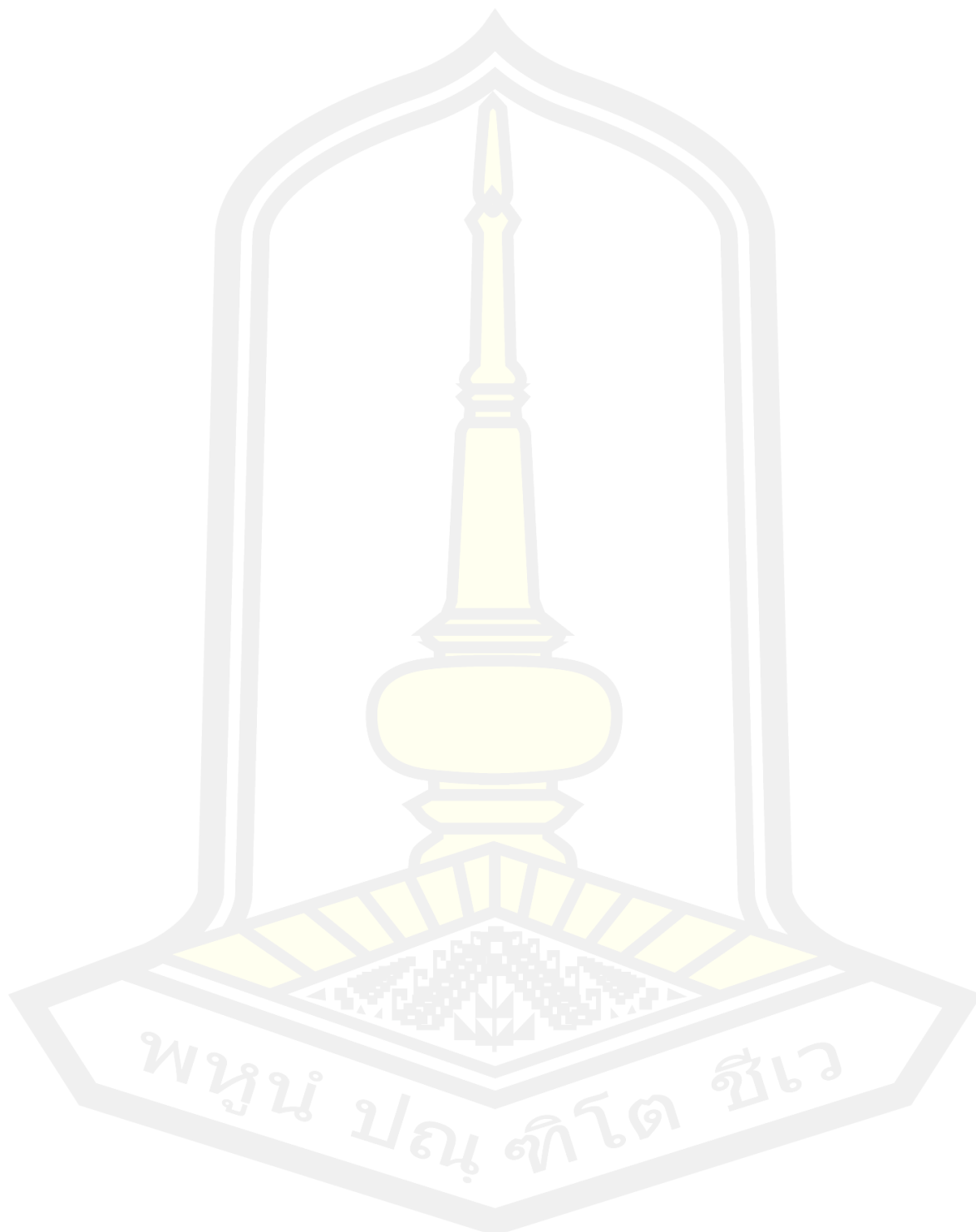
คำสำคัญ : รถแทรกเตอร์ไฟฟ้า, ควบคุมด้วยรีโมท, เครื่องปั่นดิน

TITLE	Development of Electric Tractor using Remote Control		
AUTHOR	Nattaphol Nasathit		
ADVISORS	Associate Professor Chonlatee Photong , Ph.D.		
DEGREE	Master of Engineering	MAJOR	Electrical and Computer Engineering
UNIVERSITY	Maharakham University	YEAR	2021

ABSTRACT

The objective of this research is to study, design and construction of a simple remote-controlled electric tractor with low energy consumption, ability of electric charging from the household and good driving and plowing performance. The prototype is a 4 wheel electric tractor controlled by radio remote control. Performance testing of the prototype electric tractor consisted of off-road field conditions while plowing the soil. The soil power was driven by a 1,000 W motor operating under power load rates of 20, 40, 60, 80 and 100%. The tractor ran at 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 and 11 km/hr. The drive system consisted of 2 sets of 250 W dual motors. It is found that: 1) The optimal moving speeds when plowing the soil were 7, 8 and 9 km/hr, as these speeds was easy to control the direction of movement. 2) Moving speed while plowing the soil at the speeds of 4, 5 and 6 km/hr caused slow movement and less thrust, which consequently caused the wheels to stuck with a lump of clay and eventually be unable to move further. 3) Moving speed while plowing the soil at the speeds of 10 and 11 km/hr, it was found that the rather fast. This caused the difficulty to control the direction of movement tractor moved. 4) Motor power consumption rates with a soil blender, the optimum were 80, 60 and 100%, respectively. 5) Motor power consumption with the soil blenders at 20 and 40%, it was found that the blenders were slow and unable to till the soil. The electric tractor could operate by approximately 7 hours for one charging.

Keyword : Electric tractor, Remote Control, Soil blender



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เสร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี โดยได้รับความกรุณาจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อติเรก จันทะคุณ ประธานกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.วรวิวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิวัตร อังควิศิษฐพันธ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์และที่สำคัญท่านอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์รองศาสตราจารย์ ดร.ชลธิ โปธิ์ทอง ให้ความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่งในการทำการวิจัย ในครั้งนี้ อีกทั้งยังชี้แนะแนวทางให้คำปรึกษาด้วยดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณหน่วยวิจัยรังสีอาทิตย์และแหล่งพลังงานสำรอง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ผู้สนับสนุนทุนทรัพย์ สถานที่ด้านการศึกษา และอุปกรณ์ในการศึกษาทำวิจัย ขอขอบคุณเพื่อนบัณฑิตศึกษาที่คอยให้ความช่วยเหลือ และที่ขาดมิได้ขอขอบพระคุณบิดา มาตา ผู้เป็นครอบครัวให้กำลังใจในการศึกษาทั้งยังสนับสนุนในทุกๆด้านด้วยดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม และเจ้าหน้าที่บัณฑิตวิทยาลัยประจำคณะที่ชี้แนะแนวทางจนสามารถสำเร็จ การศึกษาในครั้งนี้ได้

ณัฐพล นาสถิตย์

พหุบัณฑิต ชีวะ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญภาพ.....	ฒ
บทที่ 1.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 ความมุ่งหมายของงานวิจัย.....	7
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	7
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
บทที่ 2.....	8
2.1 บทนำ.....	8
2.2 รถแทรกเตอร์ไฟฟ้า.....	8
2.2.1 ระบบขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า.....	9
2.3 ระบบกำลังขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า.....	10
2.3.1 แรงต้านการเคลื่อนที่.....	10
2.4 ระบบกลศาสตร์ของแรงที่กระทำกับเพลารถแทรกเตอร์.....	13
2.4.1 จุดศูนย์ถ่วง.....	13
2.4.2 การถ่ายน้ำหนัก.....	15
2.4.3 การถ่ายโอนน้ำหนักด้วยระบบแบบพวงลากร.....	16

2.5 การฉุดลาก (Traction)	17
2.5.1 แรงฉุดลาก (Tractive Force)	17
2.5.2 กำลังฉุดลาก (Tractive Power).....	18
2.5.3 ประสิทธิภาพการฉุดลาก (Tractive Efficiency, T.E.).....	18
2.5.4 สัมประสิทธิ์การฉุดลากสุทธิ (Net Tractive Coefficient).....	18
2.6 ระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า.....	18
2.6.1 ประเภทและโครงสร้างของระบบขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า.....	19
2.6.2 หลักการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า.....	20
2.6.3 มอเตอร์ขับเคลื่อนสำหรับรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า.....	21
2.6.3.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Motor).....	21
2.6.3.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor).....	22
2.6.3.3 ชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง	26
2.6.4 ชุดควบคุมไฟฟ้ากำลัง	28
2.6.4.1 อินเวอร์เตอร์.....	28
2.6.4.2 DC-DC Converter.....	28
2.6.5 แบตเตอรี่.....	31
2.6.6 ระบบขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าแบบมอเตอร์คู่.....	35
2.7 การควบคุมและอุปกรณ์ส่งแบบไร้สาย	36
2.7.1 การควบคุมแบบไร้สาย	36
2.7.2 อุปกรณ์ส่งแบบไร้สาย.....	38
2.7.3 บอร์ด Arduino	39
2.7.4 การควบคุมมอเตอร์.....	43
2.7.4.1 บอร์ดขับมอเตอร์กระแสตรง MDD10A.....	43
2.7.4.2 บอร์ดขับมอเตอร์กระแสตรง DC Motor Drive Module BTN7960.....	47

2.7.4.3 บอร์ด Relay.....	47
2.8 บทสรุป	48
บทที่ 3	49
3.1 แผนการดำเนินงาน	49
3.2 ขั้นตอนการคำนวณเพื่อเลือกใช้อุปกรณ์.....	50
3.2.1 วิธีการคำนวณเพื่อหาพิกัดกำลังของมอเตอร์ในการขับเคลื่อน.....	50
3.3 การออกแบบรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า	55
3.3.1 การออกแบบโครงสร้างรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า	55
3.3.2 ระบบขับเคลื่อนและชุดควบคุมไฟฟ้าของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า	59
3.3.3 การออกแบบระบบควบคุมรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าด้วยรีโมท.....	60
3.4 อุปกรณ์ที่ใช้กับรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า	60
3.4.1 รีโมทคอนโทรล และรีซีฟเวอร์สัญญาณวิทยุ	60
3.4.2 Arduino Mega 2560.....	62
3.4.3 มอเตอร์ขับเคลื่อน	63
3.4.4 มอเตอร์ป่นดิน	63
3.4.5 แบตเตอรี่.....	64
3.4.6 เครื่องมือป่นดิน	66
3.4.7 บอร์ดขับมอเตอร์	66
3.4.8 บอร์ด Relay	68
3.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	68
3.5.1 อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ	68
3.5.2 อุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้า	69
บทที่ 4	70
4.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าควบคุมด้วยรีโมท.....	70

4.5.4 วิเคราะห์แผนภูมิเปรียบเทียบคุณภาพดินจากอัตราการใช้กำลังมอเตอร์ปั่นดินที่แตกต่าง
กัน..... 91

บทที่ 5 93

5.1 สรุปผลการทดลอง 93

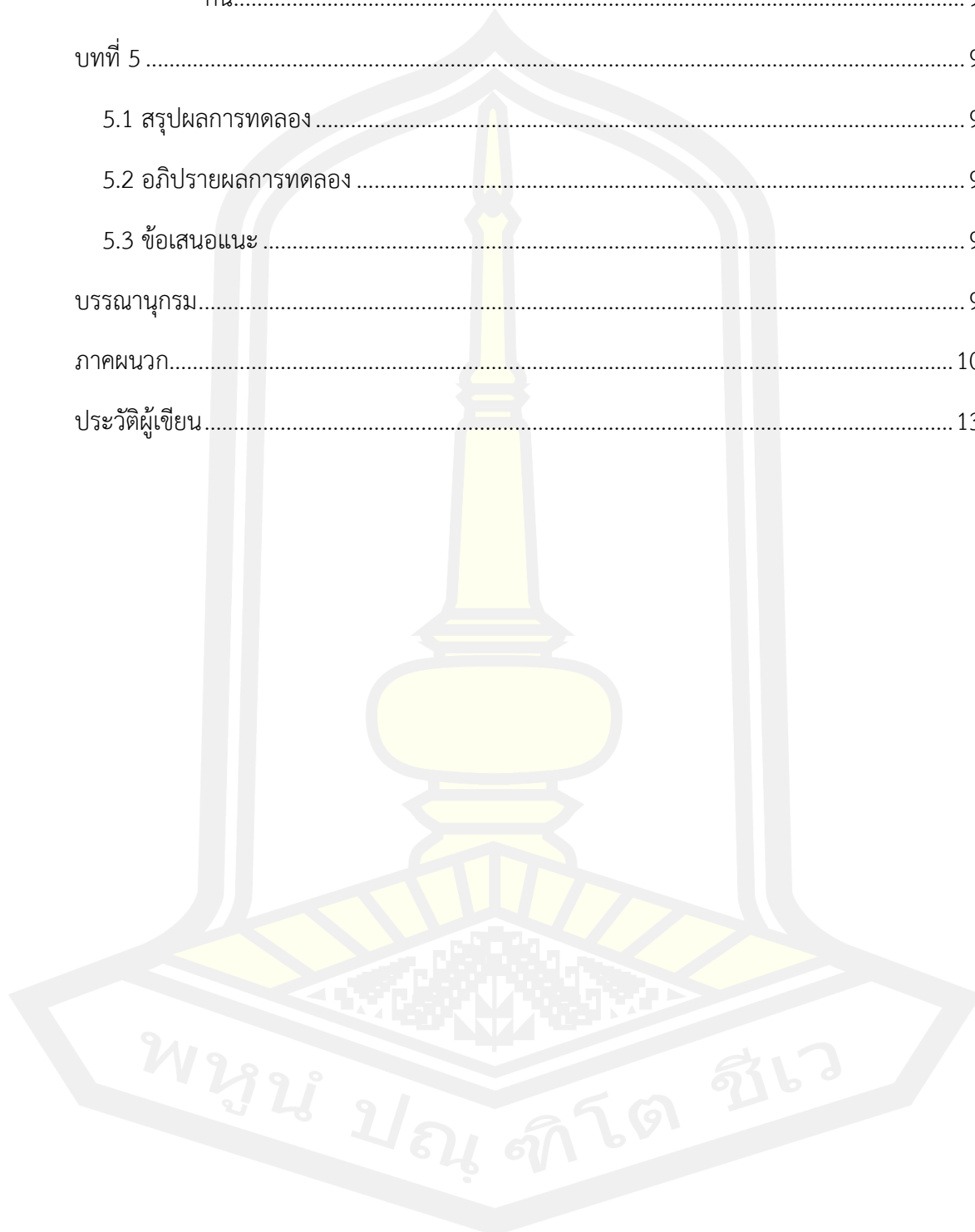
5.2 อภิปรายผลการทดลอง 94

5.3 ข้อเสนอแนะ 95

บรรณานุกรม..... 96

ภาคผนวก..... 104

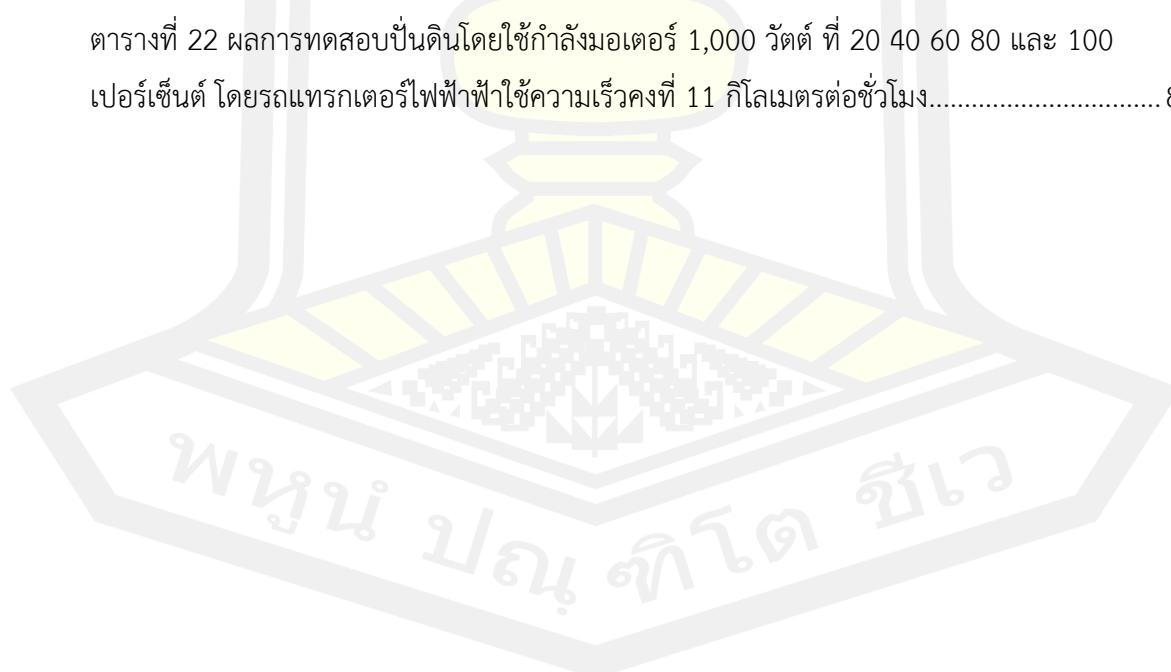
ประวัติผู้เขียน..... 132



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนประเภทต่างๆ วัสดุขั้วลบและบวก และการใช้งาน [36]	34
ตารางที่ 2 น้ำหนักของรถ.....	50
ตารางที่ 3 สัมประสิทธิ์แรงต้านการหมุนของล้อ (μ_{rr}) ตามชนิดและสภาพของถนน	50
ตารางที่ 4 Climbing coefficient (C_d).....	51
ตารางที่ 5 ความเร็วรอบของล้อที่ได้จากการคำนวณ.....	55
ตารางที่ 6 ทดสอบวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความเร็วรอบของล้อ ของมอเตอร์ที่ใช้ ขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า โดยใช้ความเร็วคงที่ 4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง	74
ตารางที่ 7 ทดสอบวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความเร็วรอบของล้อ ของมอเตอร์ที่ใช้ ขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า โดยใช้ความเร็วคงที่ 5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง	75
ตารางที่ 8 ทดสอบวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความเร็วรอบของล้อ ของมอเตอร์ที่ใช้ ขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า โดยใช้ความเร็วคงที่ 6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง	75
ตารางที่ 9 ทดสอบวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความเร็วรอบของล้อ ของมอเตอร์ที่ใช้ ขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า โดยใช้ความเร็วคงที่ 7 กิโลเมตรต่อชั่วโมง	75
ตารางที่ 10 ทดสอบวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความเร็วรอบของล้อ ของมอเตอร์ที่ใช้ ขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า โดยใช้ความเร็วคงที่ 8 กิโลเมตรต่อชั่วโมง	76
ตารางที่ 11 ทดสอบวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความเร็วรอบของล้อ ของมอเตอร์ที่ใช้ ขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า โดยใช้ความเร็วคงที่ 9 กิโลเมตรต่อชั่วโมง	76
ตารางที่ 12 ทดสอบวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความเร็วรอบของล้อ ของมอเตอร์ที่ใช้ ขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า โดยใช้ความเร็วคงที่ 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง	76
ตารางที่ 13 ทดสอบวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความเร็วรอบของล้อ ของมอเตอร์ที่ใช้ ขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า โดยใช้ความเร็วคงที่ 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง	77
ตารางที่ 14 หลักเกณฑ์การประเมินให้คะแนน [56].....	77

ตารางที่ 15 ผลการทดสอบบ่่นดินโดยใช้กำลังมอเตอร์ 1,000 วัตต์ ที่ 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ความเร็วคงที่ 4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง.....	78
ตารางที่ 16 ผลการทดสอบบ่่นดินโดยใช้กำลังมอเตอร์ 1,000 วัตต์ ที่ 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ความเร็วคงที่ 5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง.....	79
ตารางที่ 17 ผลการทดสอบบ่่นดินโดยใช้กำลังมอเตอร์ 1,000 วัตต์ ที่ 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ความเร็วคงที่ 6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง.....	81
ตารางที่ 18 ผลการทดสอบบ่่นดินโดยใช้กำลังมอเตอร์ 1,000 วัตต์ ที่ 2, 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ความเร็วคงที่ 7 กิโลเมตรต่อชั่วโมง.....	82
ตารางที่ 19 ผลการทดสอบบ่่นดินโดยใช้กำลังมอเตอร์ 1,000 วัตต์ ที่ 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ความเร็วคงที่ 8 กิโลเมตรต่อชั่วโมง.....	83
ตารางที่ 20 ผลการทดสอบบ่่นดินโดยใช้กำลังมอเตอร์ 1,000 วัตต์ ที่ 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ความเร็วคงที่ 9 กิโลเมตรต่อชั่วโมง.....	85
ตารางที่ 21 ผลการทดสอบบ่่นดินโดยใช้กำลังมอเตอร์ 1,000 วัตต์ ที่ 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ความเร็วคงที่ 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง.....	86
ตารางที่ 22 ผลการทดสอบบ่่นดินโดยใช้กำลังมอเตอร์ 1,000 วัตต์ ที่ 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ความเร็วคงที่ 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง.....	88



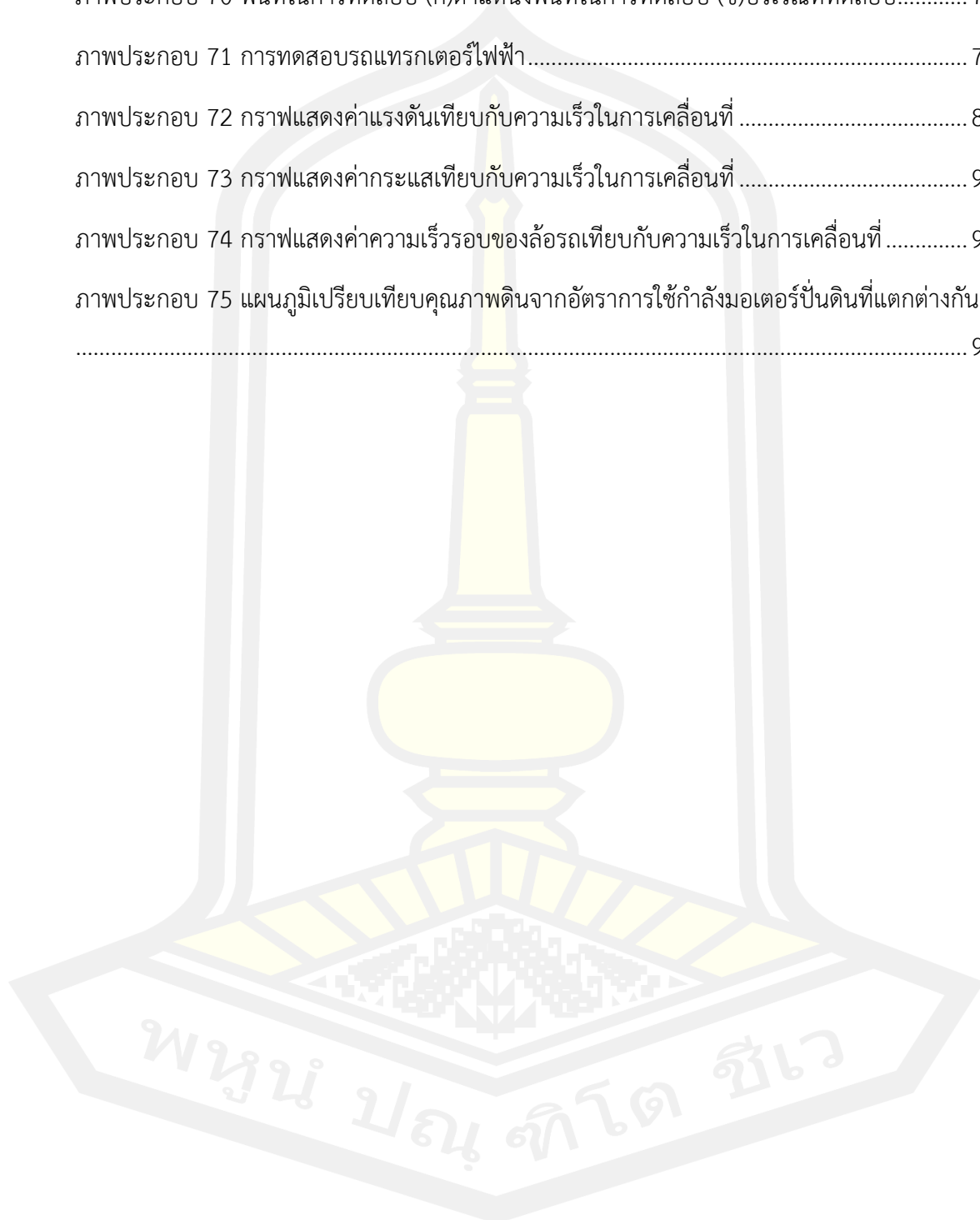
สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 ระบบแรงที่กระทำต่อยานยนต์ที่กำลังเคลื่อนที่ [21].....	11
ภาพประกอบ 2 ตำแหน่งของตำแหน่งล้อหน้าและหลัง พร้อมกับจุดศูนย์ถ่วงของรถแทรกเตอร์ [22]	13
ภาพประกอบ 3 รถแทรกเตอร์อยู่ในตำแหน่งยกขึ้น [22].....	14
ภาพประกอบ 4 รถแทรกเตอร์สำหรับการวิเคราะห์การถ่ายเทน้ำหนัก [22].....	15
ภาพประกอบ 5 รถแทรกเตอร์ที่มีระบบแบบลากพ่วงชนิดต่อท้าย [22].....	17
ภาพประกอบ 6 แผนผังของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า [7].....	20
ภาพประกอบ 7 รูปถ่ายของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า [7].....	20
ภาพประกอบ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด กำลัง และความเร็วรอบของมอเตอร์ [25].....	21
ภาพประกอบ 9 Brushed DC Motor Construction [31].....	23
ภาพประกอบ 10 Brushed DC Motor Main Components [31].....	23
ภาพประกอบ 11 Brushed DC Motor Rotor [31].....	24
ภาพประกอบ 12 Stator of a BLDC Motor [31].....	25
ภาพประกอบ 13 Rotor of a BLDC Motor [31].....	25
ภาพประกอบ 14 BLDC Rotor Magnet Positions [31].....	25
ภาพประกอบ 15 Hall Sensors on BLDC [31].....	26
ภาพประกอบ 16 วงจรแสดงการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม [32].....	26
ภาพประกอบ 17 วงจรแสดงการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน [32].....	27
ภาพประกอบ 18 วงจรแสดงการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงซอร์ทซ์อินท์คอมเปานด์มอเตอร์ [32]	27
ภาพประกอบ 19 วงจรแสดงการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบลงชั้นท์เปา์วต์มอเตอร์ [32] ...	27
ภาพประกอบ 20 หลักการของวงจร DC-DC converter [33].....	29

ภาพประกอบ 21 วงจร chopper ชนิด A [33].....	29
ภาพประกอบ 22 วงจร chopper ชนิด B [33].....	30
ภาพประกอบ 23 วงจร chopper ชนิด C [33].....	30
ภาพประกอบ 24 วงจร chopper ชนิด D [33]	30
ภาพประกอบ 25 วงจร chopper ชนิด E [33].....	31
ภาพประกอบ 26 เซลล์ไฟฟ้าเคมี [34]	32
ภาพประกอบ 27 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน [35].....	33
ภาพประกอบ 28 คุณสมบัติและคุณลักษณะของแบตเตอรี่ [37]	35
ภาพประกอบ 29 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่ [39].....	35
ภาพประกอบ 30 รีโมทคอนโทรลและตัวรับสัญญาณอินฟราเรด	38
ภาพประกอบ 31 รีโมทคอนโทรลและรีซีฟเวอร์สัญญาณวิทยุ [44]	39
ภาพประกอบ 32 Arduino Uno [45]	40
ภาพประกอบ 33 Arduino Dno [45]	40
ภาพประกอบ 34 Arduino Leonardo [45]	41
ภาพประกอบ 35 Arduino MEGA ADK [45].....	41
ภาพประกอบ 36 Arduino Mega 2560 [45]	41
ภาพประกอบ 37 Arduino Micro [45].....	42
ภาพประกอบ 38 Arduino Nano [45]	42
ภาพประกอบ 39 Arduino Mini [45]	43
ภาพประกอบ 40 Arduino Pro Mini [45]	43
ภาพประกอบ 41 ส่วนประกอบของบอร์ด MDD10A [46]	44
ภาพประกอบ 42 วิธีการใช้งานเพื่อการทดสอบมอเตอร์ [46].....	45
ภาพประกอบ 43 การต่อวงจรใช้งานร่วมกับบอร์ด Arduino UNO R3 [46].....	46
ภาพประกอบ 44 ตัวอย่างโค้ดโปรแกรมการควบคุมมอเตอร์ [46].....	46

ภาพประกอบ 45 DC Motor Drive [47].....	47
ภาพประกอบ 46 ขอรต์ Relay [48].....	48
ภาพประกอบ 47 Flowchart แสดงแผนการดำเนินงาน	49
ภาพประกอบ 48 Isometric (a) ด้านหน้า (b) ด้านหลัง	55
ภาพประกอบ 49 Front View	56
ภาพประกอบ 50 Back View	56
ภาพประกอบ 51 Right View.....	56
ภาพประกอบ 52 Left View	56
ภาพประกอบ 53 Top View	57
ภาพประกอบ 54 ส่วนประกอบของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าควบคุมด้วยรีโมท	57
ภาพประกอบ 55 Flowchart แสดงหลักการทำงานของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าควบคุมด้วยรีโมท.....	59
ภาพประกอบ 56 Schematic diagram for the electric tractor	60
ภาพประกอบ 57 รีโมทคอนโทรล และรีซีฟเวอร์สัญญาณวิทยุ [44].....	61
ภาพประกอบ 58 Arduino Mega 2560 [45].....	62
ภาพประกอบ 59 มอเตอร์กระแสตรง 250 วัตต์ 12 โวลต์ [51]	63
ภาพประกอบ 60 มอเตอร์ 1,000 วัตต์ 24 โวลต์ [52]	64
ภาพประกอบ 61 แบตเตอรี่ ขนาด 12 โวลต์ 40 แอมป์ [53].....	65
ภาพประกอบ 62 แบตเตอรี่ ขนาด 12 โวลต์ 50 แอมป์ [54].....	65
ภาพประกอบ 63 เครื่องมือปั้นดิน [55].....	66
ภาพประกอบ 64 Motor drive IBT-2 (BTS7960) [47].....	67
ภาพประกอบ 65 ขอรต์ Relay [48].....	68
ภาพประกอบ 66 Digital laser Tachometer RPM meter.....	69
ภาพประกอบ 67 มัลติมิเตอร์	69
ภาพประกอบ 68 โครงสร้างและส่วนประกอบของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าควบคุมด้วยรีโมท	70

ภาพประกอบ 69 วงจรควบคุมระบบรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าควบคุมด้วยรีโมท	72
ภาพประกอบ 70 พื้นที่ในการทดสอบ (ก)ตำแหน่งพื้นที่ในการทดสอบ (ข)บริเวณที่ทดสอบ.....	73
ภาพประกอบ 71 การทดสอบรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า.....	74
ภาพประกอบ 72 กราฟแสดงค่าแรงดันเทียบกับความเร็วในการเคลื่อนที่	89
ภาพประกอบ 73 กราฟแสดงค่ากระแสเทียบกับความเร็วในการเคลื่อนที่	90
ภาพประกอบ 74 กราฟแสดงค่าความเร็วรอบของล้อรถเทียบกับความเร็วในการเคลื่อนที่	91
ภาพประกอบ 75 แผนภูมิเปรียบเทียบคุณภาพดินจากอัตราการใช้กำลังมอเตอร์บนดินที่แตกต่างกัน	92



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

รถแทรกเตอร์ (Tractor) เป็นหนึ่งในเครื่องทุ่นแรงที่นิยมนำมาใช้ทางการเกษตรในประเทศไทยมากที่สุด โดยรถแทรกเตอร์ถูกนำมาใช้เพื่อลดเวลา ลดต้นทุน เพื่อเป็นการเพิ่มผลผลิตและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำการเกษตร [1] ปัจจุบันรถแทรกเตอร์ส่วนใหญ่ ใช้พลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นหลัก นอกจากนี้จะมีข้อจำกัดทางด้านราคาน้ำมันที่ผันผวน การสันดาปเครื่องยนต์ที่ไม่สมบูรณ์ยังสร้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ [2] ที่ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม มนุษย์ สิ่งมีชีวิตและชุมชน อีกทั้งยังมีเสียงดังรบกวนที่เกิดจากเครื่องยนต์ด้วย ในขณะที่เดียวกันภาพรวมของโลกมีแนวโน้มการเปลี่ยนเครื่องยนต์แบบเดิมที่ใช้พลังงานเชื้อเพลิงเป็นเครื่องยนต์ไฟฟ้าแทน ดังนั้นการศึกษาวิจัยในส่วนของ การออกแบบรถแทรกเตอร์ให้สามารถใช้เครื่องยนต์ไฟฟ้าได้จึงมีน่าสนใจอย่างยิ่ง ซึ่งนอกจากจะเป็นไปตามแนวโน้มของโลกแล้ว ยังสามารถลดปัญหาการก่อมลพิษทางอากาศและทางเสียงได้ด้วย ยิ่งไปกว่านั้น ยังสามารถใช้ไฟฟ้าจากบ้านเรือนเพื่อลดค่าใช้จ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงลงได้อีกด้วย

จากข้อมูลกระทรวงคมนาคมของประเทศไทย [3] ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2555-2562 พบว่ามีการจดทะเบียนรถแทรกเตอร์ตั้งแต่ 334,292- 560,573 คัน หรือจำนวน 226,281 คัน ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น รถแทรกเตอร์ 1 คัน ใช้งานประมาณ 200 ไร่ต่อปี ซึ่งใช้น้ำมันประมาณ 3 ลิตรต่อไร่ ประมาณ 3.77 บาร์เรลต่อปี เมื่อเทียบกับราคาน้ำมันในปัจจุบันต้องจ่ายค่าน้ำมันประมาณ 10,000-15,000 บาทต่อปี รถแทรกเตอร์กว่า 560,000 คัน ในประเทศไทยนั้นมีการใช้พลังงานประมาณ 2.11 ล้านบาร์เรลต่อปี โดยเฉลี่ยซึ่งมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากมีการจดทะเบียนรถแทรกเตอร์เพิ่มขึ้นทุกปี ดังนั้นเมื่อเปลี่ยนเครื่องยนต์พลังงานเชื้อเพลิงเป็นเครื่องยนต์ไฟฟ้า จะมีจุดคุ้มทุนอยู่ประมาณ 3-5 ปี โดยมีต้นทุนที่แปรผันตามราคาของอุปกรณ์ [4]

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและจัดสร้างรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าสำหรับการเกษตรนั้นยังมีอยู่ไม่มาก โดยมีงานวิจัยที่น่าสนใจ ดังสรุปได้โดยสังเขปดังนี้

Seung-Yun Baek และคณะ [5] ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองของรถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนทุก ล้อ (AWD) กำลังไฟฟ้า 120 กิโลวัตต์ แพลตฟอร์มนี้พัฒนาโดยใช้ระบบส่งกำลัง รวมถึงแบตเตอรี่ มอเตอร์ไฟฟ้า ตัวลดขนาดล้อ และระบบชาร์จที่ประกอบด้วยตัวแปลง AC/DC และที่ชาร์จในแต่ละ เพลา แรงบิดของเพลาคำนวณโดยใช้เส้นโค้งกระแสและแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้า เพื่อเปรียบเทียบผล ของการจำลองการทดสอบการขับขี่โดยใช้แพลตฟอร์มได้ดำเนินการที่ความเร็วพื้น 10 กิโลเมตรต่อ ชั่วโมง ในสภาพออฟโรดและบนถนน จากการใช้แบบจำลองนี้คาดว่าเวลาในการขับเคลื่อนที่สามารถ ทำงานได้จะอยู่ที่ประมาณ 6 ชั่วโมง และเวลาไถพรวนที่สามารถทำงานได้ประมาณ 2.4 ชั่วโมง ผล การศึกษาพบว่าความจุของแบตเตอรี่ต่ำเล็กน้อยสำหรับการไถพรวน

Matache M.G. และคณะ [6] ได้ศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพการทำงานของรถแทรกเตอร์ ไฟฟ้าขนาด 28.8 กิโลวัตต์ ในระหว่างการทำงาน แบตเตอรี่ที่จ่ายไฟให้กับรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า 17.28 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง มีความเร็ว 1.71-26 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ความเร็วในการหมุนของมอเตอร์ที่ 2,350 รอบต่อนาที น้ำหนักของรถคือ 1,210 กิโลกรัม คันไถมีความกว้าง 0.5 เมตร และความลึกสูงสุด 0.2 เมตร ทดสอบการไถพรวนในสนามกว้าง 16 เมตร ความยาวรวม 100 เมตร รวมพื้นที่ 0.16 เฮก เตอร์ ระบบการทำงานที่ดีที่สุดสำหรับรถแทรกเตอร์การเกษตรรุ่นทดลองขนาดเล็กในระหว่างการไถ พรวน ค่าประสิทธิภาพการส่งกำลังที่ดีที่สุดที่มากกว่า 0.54 ความลึกในการทำงานระดับกลางที่ 0.15 เมตร ความเร็วที่เพิ่มขึ้นทำให้อัตราส่วนลดการเดินทางเพิ่มขึ้นและสำหรับรุ่นทดลองนี้การใช้พลังงาน ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นแบบทวีคูณ อัตราส่วนแรงดึงสูงสุดต่อน้ำหนักที่ได้ในระหว่างการทดลองคือ 0.64 ซึ่งเป็น ค่าที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงของรถแทรกเตอร์เครื่องยนต์ดีเซลซึ่งให้ความเป็นไปได้ในการพัฒนา รูปแบบการทดลองไปสู่ต้นแบบในอนาคต

Yuko UEKA และคณะ [7] ในการศึกษาที่รถแทรกเตอร์เครื่องยนต์ขนาด 10 กิโลวัตต์ ที่มีอยู่ ถูกออกแบบใหม่เป็นรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า มีการสรุปข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของระบบรถ แทรกเตอร์ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้านี้

1) การเปลี่ยนเครื่องยนต์รถแทรกเตอร์เป็นไฟฟ้าทำให้น้ำหนักโดยรวมเพิ่มขึ้น 80 กิโลกรัม การกระจัดสัมพัทธ์ของจุดศูนย์ถ่วงอยู่ที่ 1-6 เปอร์เซ็นต์ มีผลเสียหายน้อยต่อสมดุลของ รถ

2) การใช้พลังงานที่จำเป็นสำหรับการเดินทางและการไถพรวน สามารถลดลงได้สูงสุด 70 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากน้ำหนักของรถสูงขึ้นความต้านทานมากขึ้น ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์

3) ต้นแบบรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าระดับ 10 กิโลวัตต์ สามารถทำงานในพื้นที่ 32 ไร่ โดยทำงานอย่างต่อเนื่องกับแบตเตอรี่ที่ชาร์จไฟเพียงก้อนเดียวด้วยความเร็วประมาณ 0.3 เมตรต่อวินาที และความลึก 10 เซนติเมตร

4) กำจัดการปล่อยก๊าซไอเสียโดยตรง ช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับรถแทรกเตอร์ดีเซลที่คล้ายคลึงกัน

ประพันธ์ พิภูลทอง และคณะ [8] งานวิจัยนี้ได้นำเสนอระบบสะสมพลังงานสำหรับอาคารสำหรับการประจุไฟฟ้าแบบด่วนสำหรับรถยนต์ไฟฟ้าในระดับครัวเรือน โดยใช้ระบบควบคุมเชิงตรรกศาสตร์ โดยระบบควบคุมจะสั่งให้ระบบสะสมพลังงานมีการคายประจุเพื่อลดความต้องการพลังงานไฟฟ้าที่สูงขึ้นจากการประจุไฟฟ้าให้รถยนต์ไฟฟ้าเพื่อลดการดึงพลังงานไฟฟ้าจากกริด เมื่อทำการติดตั้งระบบสะสมพลังงาน พบว่าการติดตั้งระบบสะสมพลังงานนอกจากจะช่วยให้ไม่เกิดความเสียหายให้กับระบบไฟฟ้าภายในบ้านเมื่อมีความต้องการกำลังไฟฟ้าสูงเนื่องจากการประจุไฟฟ้าแบบด่วนแล้ว ยังสามารถลดค่าพลังงานไฟฟ้าต่อการประจุไฟฟ้าให้รถยนต์ไฟฟ้าได้ถึง 71 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อมีการใช้ซอฟต์แวร์เพื่อกำหนดแผนการประจุไฟฟ้าให้กับรถยนต์ไฟฟ้าล่วงหน้าจะลดค่าพลังงานไฟฟ้าต่อการประจุไฟฟ้าให้รถยนต์ไฟฟ้าลงได้น้อย 16 และ 71 เปอร์เซ็นต์ เมื่อมีกำหนดการล่วงหน้าอย่างน้อย 5 ชั่วโมง และ 10 ชั่วโมง ตามลำดับ

อริวัฒน์ ศรีวิไล [9] งานวิจัยนี้ได้มีการศึกษาและสำรวจปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานของรถยนต์นั่งส่วนบุคคล, รถยนต์บริการสาธารณะและรถยนต์ไฟฟ้า เพื่อนำปัจจัยที่ได้ศึกษามาเป็นข้อมูลอินพุตของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบฟuzzy จำลองความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการใช้พลังงานเพื่อคำนวณหาผลประหยัดพลังงานจากการแทนที่ของรถยนต์เชื้อเพลิงฟอสซิลด้วยรถยนต์ไฟฟ้า ผลที่ได้แสดงให้เห็นผลประหยัดที่เกิดขึ้นที่สถานการณ์ทั่วไป, สถานการณ์ความเป็นไปได้และสถานการณ์ที่เกินความคาดหมายในปี พ.ศ. 2573

Adam Polcar และคณะ [10] บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดลองว่าการกระจายน้ำหนักของรถแทรกเตอร์ในระหว่างการไหลโดยการดึงคานลากเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร และน้ำหนักของการดึงคานของรถแทรกเตอร์มีผลต่อคุณสมบัติของมันอย่างไร ขับเคลื่อนล้อบัลลาสต์มีผลอย่างมากต่อ

การดึงและการสิ้นของล้อของรถแทรกเตอร์ เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์เหล่านี้ได้ทำการวัดทดลองใน CASE ของรถแทรกเตอร์ IH Magnum 370 CVX ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการดึงเหล็กเส้นที่สูงขึ้นสามารถทำได้ในรถแทรกเตอร์ที่มีค่าสูงกว่าน้ำหนัก แรงดึงที่เพิ่มขึ้นที่วัดได้คือ 15.8 กิโลนิวตัน ระหว่างน้ำหนักสูงสุดและน้ำหนักต่ำสุด ($\Delta 2,320$ กิโลกรัม) ตัวแปรทั้งหมดแสดงเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเท่ากันบนเพลาล้อหลังของรถแทรกเตอร์ (+6 เปอร์เซ็นต์) เมื่อเพิ่มขนาดของคานลากของรถแทรกเตอร์จะทำให้มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นและมีผลกระทบต่อการเล่นไถเพียงเล็กน้อย

อรรถศาสตร์ วิเศียรศาสตร์ และ สุจินต์ สิมารักษ์ [11] การศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาพทั่วไปของตำบลและการใช้งานรถแทรกเตอร์ขนาดกลางและรถไถเดินตามโดยใช้วิธีการประชุมกลุ่มตัวแทนเจ้าของรถแทรกเตอร์ขนาดกลาง (34-50 แรงม้า) และรถไถเดินตาม (8-11.5 แรงม้า) จำนวนกลุ่มละ 10 คน และศึกษาการใช้และปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจใช้บริการรถแทรกเตอร์ขนาดกลางในการปลูกพืชของผู้ให้บริการ โดยใช้แบบสอบถามจากกลุ่มตัวอย่างผู้ให้บริการรถแทรกเตอร์ขนาดกลาง จำนวน 217 คน จากการศึกษา พบว่า เกษตรกรในตำบลน้ำอ้อมนิยมใช้รถแทรกเตอร์ขนาดกลางในการเตรียมดินในการปลูกข้าว (ร้อยละ 98.2) การเตรียมดินปลูกอ้อย (ร้อยละ 100) และการปรับพื้นที่นาเพื่อปลูกอ้อย (ร้อยละ 100) มากที่สุด สำหรับการเตรียมดินในการปลูกมันสำปะหลังนั้น เกษตรกรนิยมใช้รถไถเดินตามในการไถเตรียมดิน (ร้อยละ 80) เนื่องจากต้องปลูกแซม ในพื้นที่ปลูกยางพารา หากใช้รถแทรกเตอร์ขนาดกลางอาจมีผลต่อการเจริญเติบโตของรากยางพารา นอกจากนั้นรถไถเดินตามยังถูกเปลี่ยนบทบาทไปเป็นเครื่องสูบน้ำ (ร้อยละ 100) และใช้ในการขนส่ง (ร้อยละ 92.2) จากการศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อการตัดสินใจของผู้ให้บริการรถแทรกเตอร์ขนาดกลาง พบว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการตัดสินใจใช้บริการรถแทรกเตอร์ขนาดกลางในระดับสูง คือ ด้านประสิทธิภาพในการทำงาน (ร้อยละ 84.2), ด้านแรงงาน (ร้อยละ 65.7), ด้านกายภาพ (ร้อยละ 59.4), ด้านอายุและสุขภาพ (ร้อยละ 52.9) ส่วนปัจจัยหลักที่มีผลต่อการตัดสินใจใช้บริการรถแทรกเตอร์ขนาดกลางในระดับต่ำ คือ ด้านเศรษฐกิจ (ร้อยละ 23.6), ด้านสังคม (ร้อยละ 9.2) และด้านอื่นๆ คือ การที่เกษตรกรไม่มีรถไถเดินตามเป็นของตนเอง มีผลต่อการตัดสินใจใช้บริการรถแทรกเตอร์ขนาดกลางอยู่ในระดับต่ำที่สุด

เกรียงไกร แซมสีม่วง และคณะ [12] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ สร้างต้นแบบรถแทรกเตอร์อัตโนมัติไร้คนขับนำทางด้วยระบบ GPS สำหรับเกษตรกรสมัยใหม่ และออกแบบ อัลกอริทึมตัวควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ตามเส้นทางเคลื่อนที่แบบเส้นตรง และเส้นโค้งและสุดท้าย การทดสอบหาความสามารถในการทำงานจริงของรถแทรกเตอร์โดยรถแทรกเตอร์ฯ จะ

ประกอบด้วย รถแทรกเตอร์ขนาดเครื่องยนต์เบนซิน 15 แรงม้า ส่วนควบคุมทิศทางและตำแหน่งของตัวรถส่วนระบุตำแหน่งและทิศทางของตัวรถส่วนควบคุมและประมวลผลและสุดท้ายส่วนควบคุมการมองเห็นระยะไกล จากการทดสอบภาคสนามพบว่าระบบควบคุมทิศทางและตำแหน่งของตัวรถที่ได้ ออกแบบนั้น สามารถควบคุมให้รถแทรกเตอร์ฯ เคลื่อนที่ตามเส้นทางการเคลื่อนที่ได้ แต่ขณะที่รถแทรกเตอร์ฯ เคลื่อนที่ติดตามเส้นทางการเคลื่อนที่ที่เป็นเส้นตรงในช่วงที่ความเร็วคงที่ รถแทรกเตอร์ฯ จะมีค่าความผิดพลาดของตำแหน่งค่อนข้างคงที่ นั่นแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมที่นำเสนอนี้ยังมีข้อจำกัดอยู่ กล่าวคือ ไม่สามารถทำให้ค่าความผิดพลาดมีค่าลดลงได้อีก และยังพบอีกว่ามีค่าความสามารถในการทำงานเท่ากับ 3.57 ไร่ต่อชั่วโมง ที่ความเร็วในการทำงาน 0.9 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และทำงาน 1,440 ชั่วโมงต่อปี จะสามารถคืนทุนถ้าทำการไถให้ได้ปริมาณพื้นที่เท่ากับ 1,646 ไร่ โดยรถแทรกเตอร์ต้นแบบฯ มีแรงฉุดลาก 15,168 นิวตัน มีความเร็วในการทำงาน 0.25 เมตรต่อวินาที มีประสิทธิภาพการทำงาน 85.30 เปอร์เซ็นต์ มีอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง 3.99 ลิตรต่อชั่วโมง มีค่าการลื่นไถล (% Slip) 21.4 มีค่ากำลังฉุดลาก 3.792 กิโลวัตต์ และมีค่าความสามารถในการทำงาน 3.57 ไร่ต่อชั่วโมง ตามลำดับ

ธีรวัฒน์ เจเถื่อน และคณะ [13] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่สำหรับรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ ฟังก์ชันโพลีโนเมียลถูกนำมาใช้ในการสร้างเส้นทางที่ครอบคลุมเงื่อนไขของตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งเป้าหมายสมรรถนะของระบบออกแบบเส้นทางถูกตรวจสอบโดยการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม LabVIEW ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า ระบบออกแบบเส้นทางสามารถนำรถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายได้อย่างราบเรียบทั้งกรณีเคลื่อนที่ไปข้างหน้า และเคลื่อนที่ถอยหลัง อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของมุมเลี้ยวทำให้รถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ไปไม่ถึงเป้าหมายที่ตั้งไว้

ธีรวัฒน์ เจเถื่อน และคณะ [14] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบควบคุมการบังคับเลี้ยวของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ ค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมของตัวควบคุม PID ถูกปรับจูนโดยใช้วิธีการ Ziegler-Nichols มุมเลี้ยวของรถแทรกเตอร์ถูกวัดด้วยทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่ง ตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่านถูกนำมาใช้เพื่อลดสัญญาณรบกวนจากทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่ง การทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมกระทำบนพื้นคอนกรีตขัดมันขณะรถแทรกเตอร์จอดติดเครื่องยนต์อยู่กับที่ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ตัวกรองสัญญาณแบบความถี่ต่ำผ่านสามารถลดสัญญาณรบกวนของทรานสดิวเซอร์วัดตำแหน่งได้ เมื่อสมรรถนะของตัวควบคุม PID ถูกนำมาเปรียบเทียบพบว่า ตัว

ควบคุม P สามารถบังคับลิฟต์รถแทรกเตอร์ได้อย่างราบเรียบ ดังนั้นระบบควบคุมการบังคับลิฟต์ด้วยตัวควบคุม P สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง

เนติพงษ์ คำพรหม และ ปฏิภาณ นيرانนท์ [15] การออกแบบและสร้างเครื่องตัดหญ้าพลังงานไฟฟ้าควบคุมด้วยรีโมทประกอบไปด้วยกลไกการเคลื่อนที่โดยมีโซ่เป็นตัวเชื่อมกำลังระหว่างเฟืองที่ติดอยู่กับเพลาล้อหน้าเชื่อมไปหาเฟืองที่ติดอยู่กับเพลาล้อหลังโดยจะมีเฟืองที่ติดอยู่กับเพลามอเตอร์ตรงกลางระหว่างล้อหน้าและล้อหลังเป็นตัวขับเคลื่อน การทำงานทั้งหมดนี้ใช้แหล่งจ่ายจากแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 45 แอมป์ชั่วโมง 2 ลูก การควบคุม ใช้รีโมทบังคับวิทยุส่งสัญญาณไปให้ Receiver เป็นตัวรับสัญญาณและส่งต่อไปให้บอร์ด Arduino UNO R3 เพื่อเป็นตัวประมวลผลแล้วส่งสัญญาณไปยังบอร์ด MDD10A ที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถโดยมีมอเตอร์ขนาด 36 วัตต์ จำนวน 2 ตัว ส่วนใบตัดหญ้าเป็นมอเตอร์ขนาด 250 วัตต์ เปิดปิดโดยสวิตช์ ในการทดลองจะพบว่าเครื่องตัดหญ้าพลังงานไฟฟ้าควบคุมด้วยรีโมทสามารถควบคุมระยะไกลได้สูงสุด 115 เมตร ใช้งานได้ในระยะเวลาสูงสุด 2 ชั่วโมง 30 นาที เคลื่อนที่ในสนามหญ้าด้วยความเร็วสูงสุด 3 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และตัดหญ้าได้พื้นที่ 700 ตารางเมตร

กนกกัญญากรรณ์ พรราชาจรกุล และคณะ [16] การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อออกแบบและสร้างรถตัดหญ้าบังคับวิทยุรวมทั้งหาประสิทธิภาพของรถตัดหญ้าบังคับวิทยุ คณะผู้วิจัยได้ศึกษาหาข้อมูลจากเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และนำข้อมูลจากการศึกษาข้อมูลข้างต้นมาดำเนินการพัฒนารถตัดหญ้าบังคับวิทยุ ให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานโดยคณะผู้วิจัยได้คำนึงถึงโครงสร้างที่มีขนาดเหมาะสมสำหรับการใช้งานและปรับปรุงพัฒนาและทดสอบประสิทธิภาพแบ่งการทดสอบออกเป็น 5 ข้อ โดยทำการทดลองข้อละ 5 ครั้ง เพื่อหาประสิทธิภาพของชุดทดลอง และนำมาหาค่าร้อยละและค่าเฉลี่ย จากการทดลองหาประสิทธิภาพของรถตัดหญ้าบังคับวิทยุ พบว่าผลการหาประสิทธิภาพของรถตัดหญ้าบังคับวิทยุ จากการทดสอบทั้ง 5 ครั้ง สรุปผลการทดลองของรถตัดหญ้าบังคับวิทยุ ได้จำแนกค่าความถูกต้องในแต่ละข้อซึ่งมีผลการทดลองดังต่อไปนี้ 1) บังคับลิฟต์ด้วยรีโมทควบคุมทำการทดลองจำนวน 5 ครั้ง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1 ซึ่งมีค่าความถูกต้องเท่ากับร้อยละ 100 2) บังคับลิฟต์ด้วยรีโมทควบคุม ทำการทดลองจำนวน 5 ครั้ง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1 ซึ่งมีค่าความถูกต้องเท่ากับร้อยละ 100 3) บังคับเดินหน้าด้วยรีโมทควบคุม ทำการทดลองจำนวน 5 ครั้ง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1 ซึ่งมีค่าความถูกต้องเท่ากับร้อยละ 100 4) บังคับถอยหลังด้วยรีโมทควบคุม ทำการทดลองจำนวน 5 ครั้ง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1 ซึ่งมีค่าความถูกต้องเท่ากับร้อยละ 100 5) การตัดหญ้าทำการทดลองจำนวน 5 ครั้ง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1 ซึ่งมีค่าความถูกต้องเท่ากับร้อยละ 100

ในการวิจัยนี้ได้ให้ความสนใจในการเปลี่ยนเครื่องยนต์สันดาปพลังงานเชื้อเพลิง ให้เป็นรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าต้นแบบ โดยจะใช้การออกแบบโดยนำข้อดีของการออกแบบโครงสร้างรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าในการทดสอบสมรรถนะในการขับเคลื่อน [5-7] ประสิทธิภาพในการประจุไฟฟ้าในการชาร์จแบตเตอรี่ [8-9] ระบบควบคุมรถแทรกเตอร์ด้วยรีโมท [12-16] ซึ่งประกอบด้วยมอเตอร์กระแสตรงขนาด 250 วัตต์ 2 ตัว ใช้ในการขับเคลื่อน มอเตอร์กระแสตรงขนาด 1,000 วัตต์ ใช้ในการปั่นดิน ระบบควบคุม รีโมทควบคุม และแบตเตอรี่ โดยจะนำมาทดสอบในพื้นที่โล่ง ภายใต้ภูมิประเทศของประเทศไทย จังหวัดขอนแก่นในบางพื้นที่ มีการรวบรวมข้อมูลประสิทธิภาพการใช้พลังงานแบตเตอรี่ และสมรรถนะในการขับเคลื่อนของรถแทรกเตอร์ในการปั่นดิน

1.2 ความมุ่งหมายของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษา ออกแบบและจัดสร้าง ต้นแบบรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า โดยมีลักษณะพิเศษคือ มีโครงสร้างในการออกแบบอย่างง่าย ประหยัดพลังงาน ใช้ระบบควบคุมผ่านรีโมท

1.2.2 ทดสอบและประเมินสมรรถนะของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าที่ได้จากการออกแบบและจัดสร้าง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ทดสอบในพื้นที่ ภายใต้ภูมิประเทศของประเทศไทยแถบภาคอีสานในจังหวัดขอนแก่น

1.3.2 ทดสอบในระบบขับเคลื่อนทางตรงเท่านั้น

1.3.3 ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในการขับเคลื่อนขนาดกำลังไฟฟ้า 250 วัตต์ จำนวน 2 ตัว และในการปั่นดิน ใช้มอเตอร์กระแสตรงขนาด 1,000 วัตต์ เป็นรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า 4 ล้อ สามารถชาร์จพลังงานได้จากคริวเรือน

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ต้นแบบรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า

1.4.2 ได้ต้นแบบรถไฟฟ้าที่มีสมรรถนะดี สามารถทำงานได้จริง

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

การศึกษาและพัฒนารถแทรกเตอร์ไฟฟ้าควบคุมด้วยรีโมท ความเป็นไปได้ถึงระบบที่มีความสมดุลงของการขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า สมรรถนะของระบบขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้านั้นขึ้นอยู่กับประเภทของมอเตอร์กำลังขับเคลื่อน มีองค์ประกอบในการศึกษาอยู่หลายส่วนด้วยกัน เช่น การออกแบบระบบโครงสร้างอย่างง่าย ระบบควบคุมรีโมท และหลักการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ จึงต้องมีความเข้าใจทฤษฎีโครงสร้าง ทฤษฎีเกี่ยวกับมอเตอร์ ทฤษฎีเกี่ยวกับแบตเตอรี่ ทฤษฎีเกี่ยวกับระบบควบคุม ปัจจัยและระบบกลศาสตร์การขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า จากที่กล่าวมา ผู้วิจัยได้รวบรวมแนวคิด ทฤษฎี และหลักการต่างๆ จากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในส่วนที่จำเป็นเกี่ยวกับการศึกษาและออกแบบสำหรับโครงการวิจัยเรื่องการพัฒนา รถแทรกเตอร์ไฟฟ้าควบคุมด้วยรีโมท ซึ่งประกอบไปด้วยเนื้อหาต่างๆ ได้แก่ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยจึงได้ศึกษา ค้นคว้าและทำการวิจัยดังนี้

2.2 รถแทรกเตอร์ไฟฟ้า

G.P. Moreda และคณะ [17] การลดการพึ่งพาพลังงานน้ำมันเชื้อเพลิงและการปล่อยมลพิษ เป็นเป้าหมายของนโยบายพลังงานทั่วโลก มีการส่งเสริมให้ใช้ยานพาหนะที่มีประสิทธิภาพในหลายประเทศ เช่น รถยนต์ไฟฟ้าไฮบริดจ์ การรวมตัวขับเคลื่อนไฟฟ้าในรถแทรกเตอร์และเครื่องจักรกลการเกษตร มีข้อดีในแง่ของการเพิ่มประสิทธิภาพพลังงานและฟังก์ชันที่เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพที่สูงขึ้นหมายถึงการลดการใช้เชื้อเพลิงและคาร์บอนไดออกไซด์ที่ลดลงตามมา ฟังก์ชันใหม่ปรับปรุงคุณภาพงานและเพิ่มความสะดวกสบายของผู้ปฏิบัติงาน การใช้พลังงานไฟฟ้าของรถแทรกเตอร์ใช้ประโยชน์จากการแยกโพลและไดร์ฟจากเครื่องยนต์ ซึ่งช่วยให้การทำงานหลังอยู่ในจุดที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ข้อดีที่สำคัญของการใช้พลังงานไฟฟ้าของเครื่องจักรคือการควบคุมแรงบิดและความเร็วการลดเสียงรบกวนและการออกแบบที่ยืดหยุ่นมากขึ้น

ครุ วาทกิจ [18] ปัญหาการขาดแคลนแรงงานในภาคการเกษตร รวมไปถึงจำนวนพื้นที่ที่ลดลงเนื่องจากถูกเปลี่ยนไปเป็นที่อยู่อาศัยหรืออื่นๆ ส่งผลให้การทำการเกษตรจำเป็นต้องหาวิธีการในการเพิ่มจำนวนครั้งของการปลูกพืชต่อหนึ่งฤดูกาลหรือเพิ่มผลผลิตต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เพื่อให้ได้ปริมาณผลผลิตมากเพียงพอต่อความต้องการของจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น รถแทรกเตอร์ถูกนำไปใช้ในทุกขั้นตอนของการเพาะปลูกพืช อาทิเช่น การเตรียมพื้นที่แปลง การต่อพ่วงอุปกรณ์เพื่อปลูกพืช (เครื่องหยอดเมล็ด) การดูแลบำรุงรักษาพืช(เครื่องหว่านปุ๋ย/เครื่องฉีดพ่นสารเคมี) การเก็บเกี่ยว (เครื่องซุด) เป็นต้น แสดงให้เห็นว่า การใช้งานรถแทรกเตอร์นั้น ได้กลายเป็นส่วนหนึ่งของวิธีการทำการเกษตรในปัจจุบัน

อนุตร จำลองกุล [19] รถแทรกเตอร์ในปัจจุบันได้ออกแบบมาเพื่อใช้กับเครื่องจักรกลเกษตรที่ต้องการกำลังฉุดลากหรือกำลังขับเคลื่อนมากๆ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนารถแทรกเตอร์ให้มีความแตกต่างกันออกไปด้วย ปัจจุบันได้มีการออกแบบรถแทรกเตอร์ใน 2 ลักษณะคือ รถแทรกเตอร์ล้อยาง (Wheel Tractors) และรถแทรกเตอร์ล้อตะขาบ (Crawler Tractors)

1) ประเภทของรถแทรกเตอร์

- รถแทรกเตอร์ขับเคลื่อน 2 ล้อ (Two Wheel Drive Tractors) กำลังการขับเคลื่อนของเครื่องยนต์จะถูกถ่ายทอดไปยังล้อหลังทั้งสองของรถแทรกเตอร์
- รถแทรกเตอร์ขับเคลื่อน 4 ล้อ (Four Wheel Drive Tractors) กำลังการขับเคลื่อนของเครื่องยนต์จะถูกถ่ายทอดไปยังล้อทั้งสองของรถแทรกเตอร์

2) ขนาดของรถแทรกเตอร์ ขนาดของรถแทรกเตอร์ในปัจจุบัน อาจบอกได้ 3 อย่างคือ

- การบอกขนาดเป็นน้ำหนักของตัวรถ
- การบอกขนาดเป็นกำลังแรงม้า
- การบอกขนาดเป็นขนาดของเครื่องจักรกลที่ถูกฉุดลาก

2.2.1 ระบบขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า

ระบบขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า เป็นระบบทำให้รถแทรกเตอร์สามารถเคลื่อนที่ไปได้ พร้อมทั้งออกแรงในการฉุดลากอุปกรณ์ที่ต่อพ่วงหลังไปในทิศทางที่ต้องการได้ [20] ในระบบขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าจะประกอบด้วย

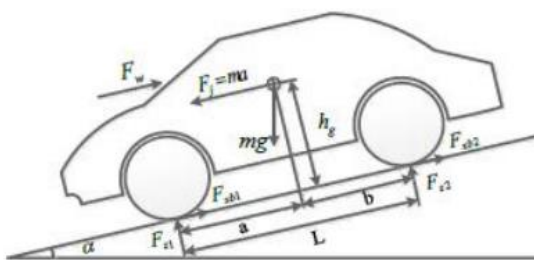
- ระบบมอเตอร์กำลัง ทำหน้าที่เป็นกำลังหลักในการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์
- ระบบเกียร์ ทำหน้าที่ลดความเร็วและแรงบิดจากเพลลาของมอเตอร์กำลังไปยังเพลลาขับเคลื่อน เพื่อให้รถแทรกเตอร์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วตามต้องการ
- ระบบเฟืองท้าย ทำหน้าที่ถ่ายทอดกำลังจากระบบเกียร์ไปยังเพลลาล้อขับเคลื่อน ทำให้ล้อขับเคลื่อนทั้งสองข้างหมุนด้วยความเร็วเท่ากันในขณะวิ่งตรง และจะหมุนด้วยความเร็วแตกต่างกันในขณะเลี้ยว
- ระบบเฟืองทดเพลลาล้อ ทำหน้าที่ทดรอบความเร็วของเพลลาเฟืองท้ายที่ส่งไปยังเพลลาล้อขับเคลื่อนให้ช้าลง เพื่อเพิ่มแรงบิดที่เพลลาล้อขับเคลื่อนให้สูงขึ้นอีก
- ระบบเบรก ทำหน้าที่สำหรับบังคับการหยุดรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า
- ระบบล้อ ทำหน้าที่ให้รถแทรกเตอร์สามารถเคลื่อนที่ไปบนพื้นดินได้ ประกอบด้วยล้อขับเคลื่อนและล้อควบคุมทิศทาง
- ระบบบังคับเลี้ยวควบคุมทิศทาง ทำหน้าที่ถ่ายทอดการควบคุมทิศทางจากผู้ขับไปยังล้อควบคุมทิศทาง

2.3 ระบบกำลังขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า

ระบบการขับเคลื่อนของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า มีตัวแปรและปัจจัยต่างๆที่สำคัญ เพื่อที่จะช่วยให้การประเมินพิกัดกำลังของต้นกำลังและพิกัดกำลังงานของแหล่งพลังงานที่ป้อน รวมไปถึงระยะทางในการขับขี่ ซึ่งจะสามารถทำได้โดยใช้การคำนวณความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ จึงต้องมีการประเมินถึงระบบแรงเคลื่อนที่แรงต้านการเคลื่อนที่ มวลของรถ และความเร่งของการเคลื่อนที่ รวมไปถึงการใช้พลังงานต่อระยะทาง

2.3.1 แรงต้านการเคลื่อนที่

การที่ยานยนต์จะเคลื่อนที่ได้ นั้น เป็นไปตามระบบแรงตามกฎของนิวตัน ดังภาพประกอบ 1 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงขับเคลื่อน แรงต้านการเคลื่อนที่ มวลของรถ และความเร่งของการเคลื่อนที่



ภาพประกอบ 1 ระบบแรงที่กระทำต่อยานยนต์ที่กำลังเคลื่อนที่ [21]

แรงต้านการเคลื่อนที่ ซึ่งในการเคลื่อนที่ของรถยนต์นั้นระบบขับเคลื่อนจะต้องสามารถเร่งขับเคลื่อนเพื่อเอาชนะแรงต้านการเคลื่อนที่ต่างๆ ของรถเพื่อให้รถสามารถเคลื่อนที่ได้ตามความต้องการ แรงต้านการเคลื่อนที่สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ แรงต้านทานการหมุน แรงต้านทานจากอากาศ และน้ำหนักที่ถ่ายไปตามทางลาดชัน การตอบสนองของแรงต้านเหล่านี้ต่อแรงขับที่ได้จากต้นกำลังระบุถึงสมรรถนะของยานยนต์ที่จะกระทำได้

แรงต้านทานการหมุนเป็นการสูญเสียในตัวอย่างที่เกิดขึ้นจากหลายปัจจัย โดยปัจจัยหลักมาจากการเสียดสีของล้ออย่างต่อเนื่องเมื่อบิดไปกับพื้นถนน รวมไปถึงการเกาะยึดและสิ้นเปลืองของดอกยาง สามารถหาความสัมพันธ์ของแรงต้านทานการหมุน [21] ได้ดังสมการดังต่อไปนี้

$$F_{rr} = \mu_{rr} mg \cos(\alpha) \quad (2.1)$$

โดยที่ F_{rr} คือ แรงต้านทานการหมุน (นิวตัน)

μ_{rr} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการหมุน ขึ้นอยู่กับชนิดของยาง แรงดันลม และพื้นถนน

m คือ มวลรวมของรถและน้ำหนักบรรทุกทั้งหมด (กิโลกรัม)

g คือ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก เท่ากับ 9.81 m/s^2

α คือ มุมความลาดเอียงของพื้นถนน (เรเดียน)

แรงต้านจากอากาศ โดยเมื่อรถยนต์ขับเคลื่อนผ่านมวลอากาศจะเกิดแรงต้านจากอากาศ ซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์ใน 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นผลจากแรงเฉือนจากอากาศที่ไหลผ่านตัวรถ ซึ่งมีผลไม่มากนักในกรณีที่ขับเคลื่อนของยานยนต์ทั่วไป และส่วนที่สองคือ แรงต้านอากาศที่เป็นผลจากลักษณะรูปร่างของตัวถังรถที่ต้านกระแสอากาศจากการขับเคลื่อนตัวรถ สามารถประเมินจากสมการ

ดังนี้

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \rho A C_d v^2 \quad (2.2)$$

โดยที่ F_{ad} คือ แรงต้านทานจากอากาศ (นิวตัน)

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของรถ (ตารางเมตร)

C_d คือ สัมประสิทธิ์ความต้านทาน (Drag coefficient)

v คือ ความเร็วของอากาศ (เมตรต่อวินาที)

น้ำหนักที่ถ่ายไปตามทางลาดชัน นอกเหนือจากแรงต้านที่มาจากการสัมผัสของรถยนต์กับพื้นถนนและมวลอากาศโดยรอบ เมื่อรถขึ้นทางลาดชัน น้ำหนักของตัวรถจะส่งผลเป็นแรงต้านทานการหมุนแล้วยังสามารถเกิดแรงย่อยจากน้ำหนักของรถในทิศทางที่ตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของตัวรถ คือน้ำหนักที่ถ่ายไปตามทางลาดชัน หรือหากรถลงทางลาดชันก็จะเกิดแรงย่อยของน้ำหนักของรถขึ้นในทิศทางเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของรถยนต์ และสามารถแสดงได้ดังสมการดังนี้

$$F_{hc} = mg \sin(\alpha) \quad (2.3)$$

โดยที่ F_{hc} คือ แรงต้านทางลาดชัน (นิวตัน)

α คือ มุมความลาดเอียงของพื้นถนน (เรเดียน)

แรงต้านจากความเร่ง แรงต้านนี้มีผลต่อแรงขับที่ต้องการจากต้นกำลัง ได้แก่ แรงต้านจากความเร่ง ซึ่งได้แก่ แรงต้านจากความเร่ง (acceleration force) โดยที่ที่ยานยนต์จะขับเคลื่อนได้ ซึ่งหมายถึงการออกตัวจากหยุดนิ่ง รวมทั้งการเร่งตัวเพื่อไปสู่ความเร็วที่สูงขึ้น นั่นก็หมายถึงว่าที่ความเร็วหนึ่ง ๆ นอกจากยานยนต์จะต้องการแรงขับที่จะเอาชนะแรงต้านการเคลื่อนที่ ที่เกิดที่ความเร็วนั้น ยังต้องการแรงขับที่เกินจากแรงต้านการเคลื่อนที่เพื่อสร้างความเร่งด้วย ซึ่งแรงต้านจากความเร่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ แรงเพื่อความเร่งเชิงเส้น และแรงเพื่อความเร่งเชิงมุม สำหรับแรงต้านในขณะขับเคลื่อนสามารถแสดงในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$F_{acc} = ma \quad (2.4)$$

โดยที่ F_{acc} คือ แรงต้านจากความเร่ง (นิวตัน)

m คือ น้ำหนักรวมของรถยนต์ (กิโลกรัม)

a คือ ความหน่วง (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)

2.4 ระบบกลศาสตร์ของแรงที่กระทำกับเพลาทดแทรกเตอร์

คำว่า 'กลศาสตร์' ในที่นี้หมายถึงการวิเคราะห์แรงที่กระทำกับเพลาทดแทรกเตอร์ [22] แรงที่สำคัญคือแรงโน้มถ่วงและน้ำหนัก มีหน่วยมวล (Kg) ในการวิเคราะห์ทางวิศวกรรม (เกี่ยวข้องกับสถิตยศาสตร์) น้ำหนักทั้งหมดจะถูกแปลงเป็นหน่วยแรง (kN)

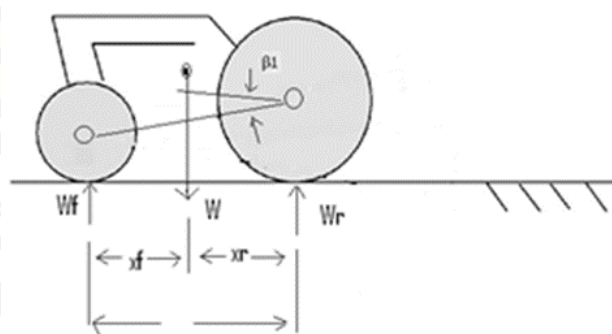
2.4.1 จุดศูนย์ถ่วง

จุดศูนย์ถ่วงคือจุดที่พิจารณามวลและน้ำหนักของรถแทรกเตอร์ ตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงขึ้นอยู่กับการจัดการของมวลต่างๆ ประกอบด้วยการวิเคราะห์โครงและเพลลาของแทรกเตอร์ จึงจำเป็นต้องทราบตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วง

ตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงในทิศทางตามยาว (X) อาจพบได้จากการวัดน้ำหนักที่ล้อหน้า (W_f) และล้อหลัง (W_r) การประยุกต์ใช้สภาวะสมดุลของแรง จะได้สมการน้ำหนักของรถแทรกเตอร์ดังนี้

$$W = W_f + W_r \quad (2.5)$$

การประยุกต์ใช้สภาวะสมดุลทำให้ได้ตำแหน่งตามยาวที่ต้องการ X_r ดังภาพประกอบ 2



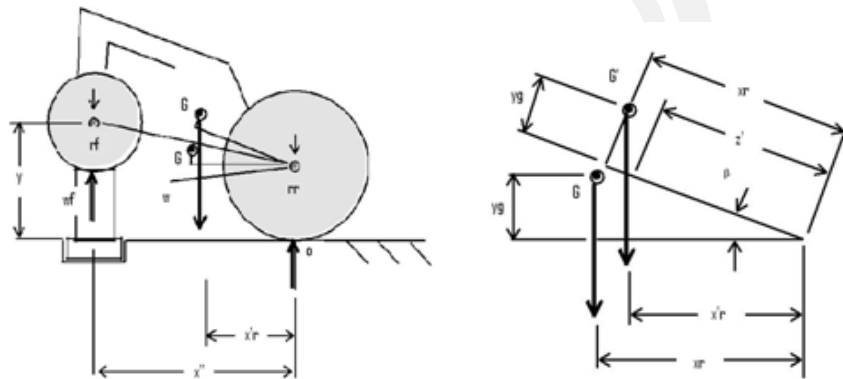
ภาพประกอบ 2 ตำแหน่งของตำแหน่งล้อหน้าและหลัง พร้อมกับจุดศูนย์ถ่วงของรถแทรกเตอร์ [22]

$$W \cdot X_r = X \cdot W_f$$

$$X_r = W_f \frac{X}{W}$$

(2.6)

ตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงในแนวตั้ง (Y) ทำได้ยากกว่า วิธีการทั่วไปคือการยกด้านหน้าหรือด้านหลัง ดังภาพประกอบ 3 และวัดน้ำหนักบนล้อหน้า (W_f) ในสภาพที่ยกขึ้น [23]



ภาพประกอบ 3 รถแทรกเตอร์อยู่ในตำแหน่งยกขึ้น [22]

การประยุกต์ใช้สมภาวะสมดุลโมเมนต์ให้ตำแหน่งแนวตั้งที่ต้องการ Y_g จะได้สมการดังนี้

$$X'_r = \frac{W_f}{W} X''$$

(2.7)

ตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงให้

$$Z = \frac{X'_r}{\cos \beta}$$

$$Y_g = \frac{X_r - Z}{\tan \beta}$$

การแทนที่ z ให้

$$Y_g = \frac{\{X_r - \frac{X'_r}{\cos \beta}\}}{\tan \beta}$$

(2.8)

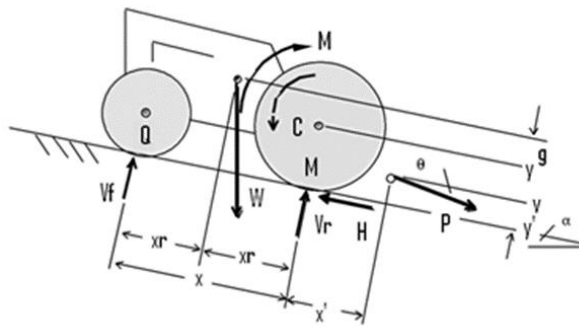
$$\beta = \beta_1 + \beta_2$$

$$\beta = a \tan \frac{(R_r - R_f)}{X} + a \tan \frac{(Y' - R_r)}{X''}$$

(2.9)

2.4.2 การถ่ายเทน้ำหนัก

สำหรับรถแทรกเตอร์ในสภาวะการทำงานน้ำหนักของล้อจะแตกต่างจากค่าคงที่ การเปลี่ยนแปลงนี้เรียกว่า “การถ่ายเทน้ำหนัก” กล่าวคือการเปลี่ยนแปลงของระนาบแนวยาวตามแนวตั้งหรือจากด้านหน้าไปด้านหลัง ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพของรถแทรกเตอร์มากที่สุด การถ่ายเทน้ำหนักเป็นผลจากการกระทำของแรงที่เกิดขึ้นบนเพลารถแทรกเตอร์โดยพื้นดินและการใช้งาน เนื่องจากแรงบิดของล้อหลังที่จำเป็นในการขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์กับความต้านทานการหมุนของล้อทั้งหมด รถแทรกเตอร์ได้รับการออกแบบมาเพื่อใช้ประโยชน์จากมันโดยการมีล้อขับเคลื่อนอย่างน้อยบางส่วนที่ด้านหลังซึ่งสำหรับการเดินทางตามปกติน้ำหนักล้อหลังที่เพิ่มขึ้นจะเป็นสัดส่วนกับการดึงแถบเลื่อน ในเกียร์ถอยหลังแรงไปทางด้านหน้าของรถแทรกเตอร์จะถ่ายเทน้ำหนักจากล้อหลังไปยังล้อหน้า [22] รถแทรกเตอร์ขับเคลื่อนล้อหลังบนทางลาดชันดังภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 รถแทรกเตอร์สำหรับการวิเคราะห์การถ่ายเทน้ำหนัก [22]

แรงนำ P กระทำผ่านจุด (x', y') ที่มุม Φ กับพื้นผิวดิน จะได้สมการดังนี้

$$\begin{aligned} V_f \cdot X + Y_g W \sin \alpha + X' P \sin \theta + M &= X_r W \cos \alpha + Y P \cos \theta \\ V_f &= \frac{X_r}{X} W \cos \theta + \frac{Y}{X} P \cos \theta - \frac{W}{X} Y_g \sin \alpha - W \frac{X_r}{X} \cos \alpha + P \frac{Y}{X} \cos \theta \end{aligned} \quad (2.10)$$

โดยที่ $M = H \cdot r$ และความชัน $H = W \sin \alpha + P \cos \theta$

แทนที่ M และ H จากด้านบน จะได้สมการดังนี้

$$V_f = W \frac{X_r}{X} \cos \alpha + P \frac{Y}{X} \cos \theta - W \frac{Y_g}{X} \sin \alpha - P \frac{X'}{X} \sin \theta - W \frac{r}{X} \sin \alpha - P \frac{r}{X} \cos \theta$$

เมื่อรวมกันจะได้

$$V_f = W\left(\frac{X_r}{X}\right)\cos\alpha - W\left(\frac{Y_g+r}{X}\right)\sin\alpha - P\left(\frac{r-Y}{X}\right)\cos\theta - P\left(\frac{X'}{X}\right)\sin\theta$$

$$V_f = W_f - W\left(\frac{Y_g+r}{X}\right)\sin\alpha - P\left(\frac{Y'}{X}\right)\cos\theta - P\left(\frac{X'}{X}\right)\sin\theta \quad (2.11)$$

ในทำนองเดียวกันน้ำหนักบนล้อหลัง (V_r) ที่ตั้งฉากกับความลาดชันจะได้

$$V_r = W_r + P\left(\frac{Y'}{X}\right)\cos\theta + W\left(\frac{Y_g+r}{X}\right)\sin\alpha + P\left(\frac{X+X'}{X}\right)\sin\theta \quad (2.12)$$

ตัวแปรในสมการสามารถระบุได้ดังนี้

W_f, W_r คือน้ำหนักคางที่บนล้อเมื่อรถแทรกเตอร์อยู่บนทางลาดชัน

- $W\left(\frac{Y_g+r}{X}\right)\sin\alpha$: ผลของโมเมนต์น้ำหนักกลางทางลาดชันลดน้ำหนักล้อหน้าและเพิ่มล้อหลัง
- $P\left(\frac{Y'}{X}\right)\cos\theta$: ผลกระทบจากโมเมนต์ของส่วนประกอบบังคับใช้ลงทางลาดชันลดน้ำหนักล้อหน้าและเพิ่มล้อหลัง
- $P\left(\frac{X'}{X}\right)\sin\theta$: ผลโมเมนต์ของส่วนประกอบแรงใช้งานที่ตั้งฉากกับความลาดชันทำให้น้ำหนักล้อหน้าลดลง
- $P\left(\frac{X+X'}{X}\right)\sin\theta$: ทางตรง ($P\sin\theta$) และโมเมนต์เอฟเฟกต์ $P\left(\frac{X'}{X}\right)\sin\theta$ ของส่วนประกอบแรงใช้งานที่ตั้งฉากกับความลาดชันทำให้น้ำหนักล้อหลังเพิ่มขึ้น

2.4.3 การถ่ายโอนน้ำหนักด้วยระบบแบบพวงลาจ

ระบบการพวงลาจทั่วไปมีการถ่ายเทน้ำหนักคือการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักบนล้อหลังอันเป็นผลมาจากการใช้งานระบบลาจพวงหรือเรียกว่าขณะไถพรวน รถแทรกเตอร์ที่มีระบบแบบพวงลาจ ดังภาพประกอบ 5

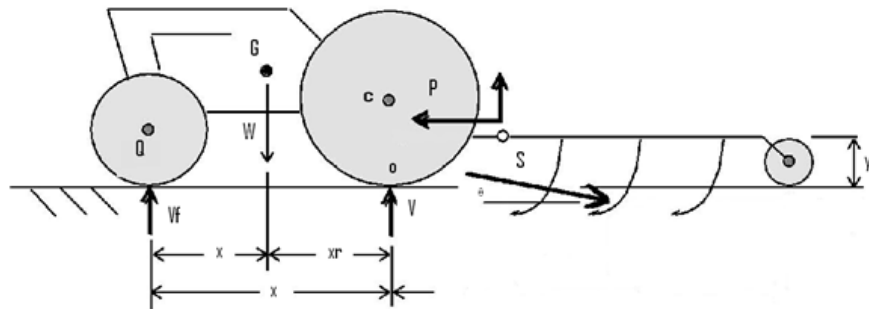
สมการในแนวนอน : $P = S\cos\theta$

$$V_r \cdot X = W \cdot X_f + P \cdot Y'$$

$$V_r = W_r + S \frac{Y'}{X} \cos\theta \quad (2.13)$$

และ

$$V_f = W_f - S \frac{Y}{X} \cos\theta \quad (2.14)$$



ภาพประกอบ 5 รถแทรกเตอร์ที่มีระบบแบบลากพ่วงชนิดต่อท้าย [22]

การถ่ายโอนน้ำหนักจะเกิดขึ้นถ้า $V_r > W_r$ คือถ้า y' เป็นบวก เช่น ถ้าแถบเลื่อนอยู่เหนือระดับพื้นดิน มันจะเพิ่มขึ้นโดยการเพิ่มความสูงของแถบเลื่อน, y'

2.5 การฉุดลาก (Traction)

รถแทรกเตอร์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ในหลายทางด้วยกัน อาทิ เพลาอำนาจกำลัง (Power Take Off , PTO), ล้อร่อนและสายพาน , ระบบไฮดรอลิกและทางกำลังฉุดลาก ซึ่งทางกำลังฉุดลากนี้จะใช้กำลังงานมากที่สุด [24] ในขณะที่รถแทรกเตอร์ทำงานลากอุปกรณ์จะมีแรงกระทำต่อตัวรถแทรกเตอร์ใน 3 ระนาบคือ

- แรงในแนวระนาบ (F_x) หรือในแนวการลากจูง จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์
- แรงในแนวด้านข้าง (F_y) เป็นแรงที่กระทำด้านข้างของตัวรถแทรกเตอร์เกิดขึ้นในขณะหันเลี้ยว
- แรงในแนวตั้ง (F_z) เป็นแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการถ่ายเทน้ำหนักของรถแทรกเตอร์และอุปกรณ์ต่อพ่วงลงสู่ดินในแนวตั้ง

2.5.1 แรงฉุดลาก (Tractive Force)

แรงฉุดลากคือแรงปฏิกิริยาของความต้านทานแรงเสียดทานของดิน กับพื้นที่ผิวสัมผัส ของล้อและแรงต้านทานการเฉือนของดินกับสันล้อ ซึ่งได้รับจากแรงบิดของเพลาขับเคลื่อน แรงฉุดลากของรถแทรกเตอร์จะเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับ โครงสร้างขนาด น้ำหนัก ของรถแทรกเตอร์น้ำหนักที่ลงบนล้อขับเคลื่อน การเลือกใช้เกียร์สภาพพื้นที่ เป็นต้น

2.5.2 กำลังฉุดลาก (Tractive Power)

กำลังฉุดลากหรือกำลังลากจูง คือผลคูณของแรงฉุดลากกับความเร็วของรถแทรกเตอร์กำลังฉุดลากจะใช้ในการระบุความสามารถของรถแทรกเตอร์

2.5.3 ประสิทธิภาพการฉุดลาก (Tractive Efficiency, T.E.)

ประสิทธิภาพการฉุดลากของรถแทรกเตอร์ คืออัตราส่วนของกำลังงานที่ได้รับหรือกำลังงานที่ใช้ในการลากจูง ต่อกำลังงานที่ป้อนจากล้อยางหรือล้อ ตะขบไปสู่อินดิน ดังสมการต่อไปนี้

$$T.E. = \frac{HV}{H_t V_w} \quad (2.15)$$

$$T.E. = \frac{(1-S)(H_t - \Sigma R)}{H_t} \quad (2.16)$$

$$T.E. = (1 - S) \left(1 - \frac{\Sigma R}{H_t} \right) \quad (2.17)$$

จากสมการที่ 2.13 แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพการฉุดลากของรถแทรกเตอร์จะลดลงอย่างเป็นสัดส่วนกับอัตราการใช้ล้อและแรงต้านทานการหมุนของล้อ ประสิทธิภาพการฉุดลากจะมีค่ามากหรือน้อยนั้น จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่างๆ อาทิการบังคับเลี้ยว, ความต้านทานการหมุน, การสิ้นเปลือง, ความเสียดทานที่เกิดขึ้นภายในชิ้นส่วนที่มีการเคลื่อนไหว, การเบี่ยงเบนอุปกรณ์ฉุดลาก เป็นต้น

2.5.4 สัมประสิทธิ์การฉุดลากสุทธิ (Net Tractive Coefficient)

สัมประสิทธิ์การฉุดลากสุทธิคืออัตราส่วนของแรงดึงสุทธิที่เกิดขึ้น ต่อภาระทางพลศาสตร์ (Dynamic Load) ที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ฉุดลากค่าดังกล่าวนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของอุปกรณ์ฉุดลาก ความดันลมยาง ชนิดและสภาพดิน ความชื้นในดิน การออกแบบดอกยาง การกระจายแรงดันบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างล้อยางกับพื้นดิน [19]

2.6 ระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้าของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า

ระบบการขับเคลื่อนทางไฟฟ้าสำหรับรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า แตกต่างจากการขับเคลื่อนของรถแทรกเตอร์ที่ใช้พลังงานน้ำมันเชื้อเพลิงชัดเจน กล่าวคือการใช้พลังงานไฟฟ้าที่กักเก็บอยู่ในแบตเตอรี่ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า ซึ่งเป็นอุปกรณ์แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานขับเคลื่อนทางกลแทนการใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงในการจุดระเบิดผ่านกระบวนการสันดาปภายในเครื่องยนต์ ดังนั้นการขับเคลื่อน

ด้วยระบบไฟฟ้าจึงไม่มีการปลดปล่อยมลพิษ ระบบขับเคลื่อนสำหรับรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าจะประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 4 ส่วนด้วยกัน ได้แก่

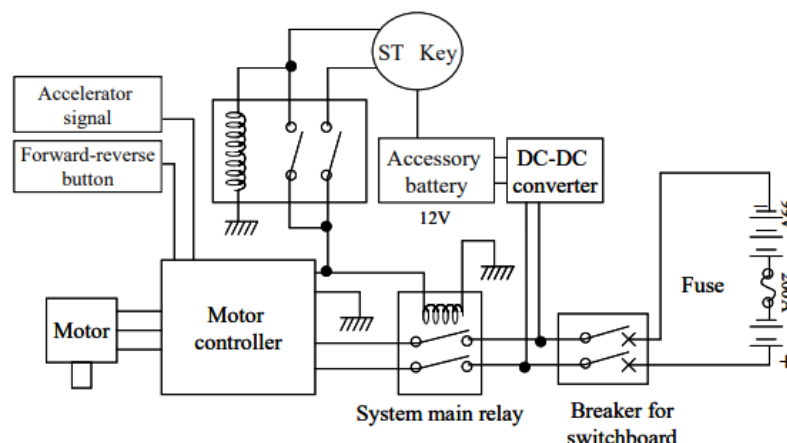
- 1) มอเตอร์ขับเคลื่อน (Traction Motor)
- 2) ชุดควบคุมมอเตอร์ (Motor Controller)
- 3) ระบบไฟฟ้ากำลัง (Power Electronics)
- 4) ระบบสนับสนุนย่อย (Supporting Systems)

มอเตอร์ขับเคลื่อนจะทำหน้าที่เป็นต้นกำลังหลักแทนเครื่องยนต์ โดยมอเตอร์จะถูกควบคุมด้วยชุดควบคุมมอเตอร์ ซึ่งจะทำหน้าที่ควบคุมแรงบิดและกำลังขับโดยใช้การควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าไปยังมอเตอร์ให้เหมาะสมกับภาระโหลด ทั้งนี้ระบบไฟฟ้ากำลังจะทำหน้าที่ปรับระดับกระแสและแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ให้เหมาะสมกับคำสั่งจากชุดควบคุมมอเตอร์ตามประเภทของมอเตอร์ ข้อสำคัญอีกประการหนึ่งของระบบขับเคลื่อนของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าที่เหนือกว่าระบบขับเคลื่อนของรถแทรกเตอร์ที่ใช้ น้ำมันเชื้อเพลิงก็คือต้องการชุดเฟืองทดที่มีความซับซ้อนน้อยกว่า เนื่องจากมอเตอร์ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าสามารถสร้างแรงบิดที่แปรผันกับความเร็วยาวอย่างเหมาะสมต่อการขับเคลื่อน จึงไม่จำเป็นต้องใช้ชุดเฟืองทดที่มีหลายอัตราทด และโดยส่วนใหญ่มักจะใช้ชุดเฟืองทดที่มีอัตราทดคงที่

รถแทรกเตอร์ไฟฟ้าที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งเป็นพลังงานไฟฟ้าจะเก็บอยู่ในแบตเตอรี่หรืออุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าแบบอื่นๆ และด้วยข้อดีของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ให้แรงบิดได้ทันทีทำให้รถแทรกเตอร์พลังงานไฟฟ้ามี อัตราเร่งที่เรียบและรวดเร็ว โดยจะมีชุดอุปกรณ์หลักคือ ตัวแบตเตอรี่ที่มีความจุพลังงานไฟฟ้าสูงซึ่งเก็บไว้ในรถ และตัวมอเตอร์ไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ในการขับเคลื่อนโดยใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ ส่วนมากเรื่องของระยะเวลาและระยะทางของรถไฟฟ้าจะมากน้อยแค่ไหนขึ้นอยู่กับขนาดความจุของแบตเตอรี่เป็นสำคัญ

2.6.1 ประเภทและโครงสร้างของระบบขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า

โครงสร้างของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า [7] ระบบขับเคลื่อน 4 ล้อระดับ 10 กิโลวัตต์ ที่ค่อนข้างระบบส่งกำลังที่เรียบง่ายและระดับไอเสียของเครื่องยนต์ขนาดเล็กได้รับการออกแบบและใช้ใหม่ การรักษาการส่งกำลังเราเปลี่ยนเครื่องยนต์ดีเซลสองสูบด้วยมอเตอร์ AC สามเฟส 10 กิโลวัตต์ ใช้กำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้าผ่านเกียร์ทดรอบเพื่อขับเคลื่อนไถนาแบบหมุนและล้อหน้าและล้อหลัง



ภาพประกอบ 6 แผนผังของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า [7]

ภาพประกอบ 6 แสดงแผนภาพของไฟฟ้าระบบของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าต้นแบบ ภาพประกอบ 7 แสดงไฟล์รูปถ่ายของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าต้นแบบซึ่งได้รับการติดตั้งแบตเตอรี่ (เซลล์ละ 30 3.3 โวลต์ รวมเป็น 99 โวลต์) ตัวควบคุมมอเตอร์และแบตเตอรี่เสริม 12 โวลต์ ซึ่งก็คือชาร์จจากแบตเตอรี่หลักผ่านตัวแปลง DC-DC เอาต์พุตของตัวแปลงจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสถานะของการชาร์จของแบตเตอรี่เสริมที่มีเอาต์พุตสูงสุด 8.5 แอมป์

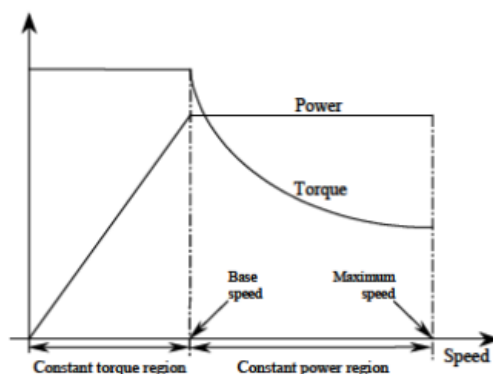


ภาพประกอบ 7 รูปถ่ายของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า [7]

2.6.2 หลักการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า

ชุดมอเตอร์ขับเคลื่อนในรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า [25-26] ประกอบด้วย มอเตอร์ขับเคลื่อน ชุดควบคุมไฟฟ้า กำลังและชุดเฟืองทด สำหรับการใช้งานในรถแทรกเตอร์ไฟฟ้านั้น เพื่อสมรรถนะการขับเคลื่อน มอเตอร์ต้องสามารถจ่ายทั้งแรงบิดและกำลังได้อย่างเหมาะสม ในส่วนของอัตราเร่งในการออกตัว มอเตอร์ต้องให้แรงบิดที่เพียงพอในขณะที่การขับเคลื่อนที่ความเร็วสูงสุดนั้น มอเตอร์ต้องให้กำลังขับที่

เพียงพอ ลักษณะการแปรผันระหว่างแรงบิดกับความเร็วรอบของมอเตอร์ที่เหมาะสมต่อการขับเคลื่อนดังภาพประกอบ 8 ดังนี้



ภาพประกอบ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิด กำลัง และความเร็วรอบของมอเตอร์ [25]

โดยในการออกตัว (ที่ความเร็วเป็นศูนย์) นั้น แรงบิดจะมีค่าสูงสุดและจะมีค่าประมาณคงที่ไปถึงความเร็วรอบหนึ่ง ที่เรียกว่าความเร็วฐาน (base speed) ของมอเตอร์ ซึ่งเป็นความเร็วอ้างอิงสำหรับกำหนดค่าพิกัดกำลังของมอเตอร์ และเมื่อความเร็วเพิ่มขึ้นเกินความเร็วฐาน แรงบิดจะลดต่ำลงและให้กำลังขับที่คงที่ โดยมอเตอร์ที่ให้แรงบิดได้สูงที่รอบต่ำ หมายถึงการออกตัวและการขึ้นทางลาดชันได้ดี และหากให้ช่วงความเร็วที่มีแรงบิดคงที่สูงสุดได้กว้าง ก็จะทำให้ลดความจำเป็นในการใช้ชุดเฟืองทดได้อีกด้วย

2.6.3 มอเตอร์ขับเคลื่อนสำหรับรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า

หากพิจารณาประเภทของมอเตอร์สำหรับรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า พบว่ามีการใช้งานมอเตอร์ใน 2 รูปแบบ คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) และ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Motor) ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดและประเภทย่อยของมอเตอร์ทั้ง 2 ประเภท ดังนี้

2.6.3.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Motor)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับนั้นมีโครงสร้างคล้ายกับมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน คือ มีขดลวดเหนี่ยวนำอยู่บริเวณสเตเตอร์เพื่อรับพลังงานไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสสลับแล้วแปลงเป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า การแบ่งชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบ่งออกเป็น 3 ชนิดได้แก่

- 1) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 1 เฟส

- Split-Phase motor

- Capacitor motor
- Repulsion-type motor
- Universal motor
- Shaded-pole motor

2) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 2 เฟส

3) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับชนิด 3 เฟส

ในส่วนของมอเตอร์กระแสสลับนั้นได้กล่าวถึงข้อมูลเพียงเบื้องต้น ซึ่งงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมาเป็นจุดต้นกำลังในระบบขับเคลื่อนของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า จึงได้กล่าวรายละเอียดเฉพาะมอเตอร์กระแสตรงเท่านั้น

2.6.3.2 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor)

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีโครงสร้างเหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสตรงแต่แตกต่างกันที่มอเตอร์ต้องการแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงมาป้อนขดลวดภายในมอเตอร์ เพื่อให้เกิดแรงบิดหรือทอร์ก (Torque) ทำให้เพลลาหมุนเป็นเครื่องจักรต้นกำลัง (Primer mover) นำมาใช้ในการขับเคลื่อนรูปแบบต่างๆ เนื่องจากมีแรงบิดออกตัว (Starting torque) ที่สูง นอกจากนั้นยังสามารถควบคุมความเร็วในย่านที่กว้างอีกด้วย ซึ่งทำการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

ดุสิต สุรย์ราช [27] กล่าวว่า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงอาศัยหลักการผลกักันระหว่างตัวนำที่มีกระแสไหลกับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากขั้วแม่เหล็กหลัก

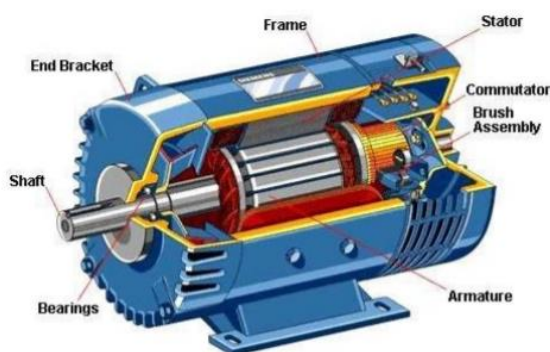
นภัทร วัจนเทพินทร์ และ ประเสริฐ ปินปฐมรัฐ [28] กล่าวว่า มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีโครงสร้างและส่วนประกอบเหมือนกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า แต่เน้นที่การคำนวณหาพลังงานกลที่เอาต์พุตนั้นคือแรงบิดที่เพลลาของมอเตอร์

สุธน แก่นตัน [29] กล่าวว่า เมื่อตัวนำวางอยู่ในสนามแม่เหล็กและมีกระแสไหลผ่านจะส่งผลทำให้ตัวนำเกิดการเคลื่อนที่เกิดแรงผลกั ดังนั้นทิศทางการเคลื่อนที่ของตัวนำหาได้จากกฎมือซ้ายของเฟรมมิ่งซึ่งเป็นหลักการเบื้องต้นของมอเตอร์ไฟฟ้า

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Motor) เป็นรูปแบบของมอเตอร์ที่มีความซับซ้อนในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าน้อย เนื่องจากมอเตอร์กระแสตรงสามารถรับไฟฟ้ากระแสตรงจากแหล่งจ่าย เช่น

แบตเตอรี่ และสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องการระบบไฟฟ้ากำลังเพิ่มเติม ที่นิยมนำมาใช้เป็น มอเตอร์กำลังให้กับรถยนต์ไฟฟ้ามี 2 ประเภทได้แก่ Series wound motor และ Brushless DC Motor (BLDC) [27-30]

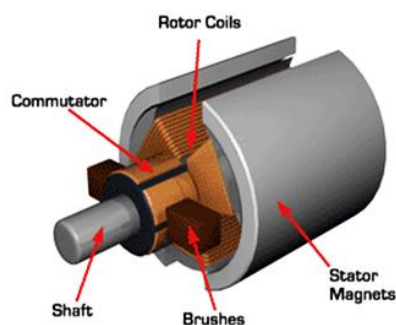
1) Series wound motor เป็นมอเตอร์แบบใช้แปรงถ่านชนิดหนึ่ง (DC brush motor) โดยโครงสร้างพื้นฐานดังภาพประกอบ 11 มอเตอร์ชนิดนี้จะต้องใช้ไฟฟ้ากระแสตรงเพื่อกระตุ้นตัวเองให้มีการสับเปลี่ยนตำแหน่งด้วยตนเอง ซึ่งต้องใช้ แปรงถ่านและแม่เหล็กถาวร หรือขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า การสับเปลี่ยนดังกล่าวจะทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของโรเตอร์



ภาพประกอบ 9 Brushed DC Motor Construction [31]

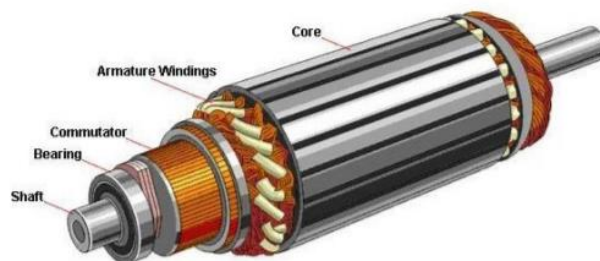
ส่วนประกอบหลักของมอเตอร์ชนิดนี้จะประกอบไปด้วย stator rotor brushes และ commutator ดังภาพประกอบ 12

- สเตเตอร์จะประกอบด้วย Frame เป็นโครงภายนอกทำหน้าที่ยึดส่วนประกอบอื่นๆให้แข็งแรงทำด้วยเหล็กหล่อหรือเหล็กแผ่นหนาเป็นรูปทรงกระบอก สเตเตอร์จะสร้างสนามแม่เหล็กรอบโรเตอร์ด้วยแม่เหล็กถาวร (Permanent magnet) หรือแกนแม่เหล็กพันขดลวด (Electromagnetic Windings)



ภาพประกอบ 10 Brushed DC Motor Main Components [31]

- โรเตอร์หรือเรียกว่า Armature (ภาพประกอบ 13) สำหรับมอเตอร์ชนิดนี้ทำให้เกิดกำลังงานมีแกนวางอยู่ในตลับลูกปืน (Ball Bearing) ซึ่งประกอบอยู่ในแผ่นปิดหัวท้าย (End Plate) บน โรเตอร์จะประกอบไปด้วย แกนเพลลา (Shaft) แกนเหล็กอาร์มาเจอร์ (Armature Core) คอมมิวเตเตอร์ (Commutator) ขดลวดอาร์มาเจอร์ (Armature Winding)



ภาพประกอบ 11 Brushed DC Motor Rotor [31]

- แกนเพลลา (Shaft) เป็นตัวสำหรับยึดคอมมิวเตเตอร์ และยึดแกนเหล็กอาร์มาเจอร์ (Armature Core) โดยแกนเหล็กอาร์มาเจอร์ (Armature Core) ทำด้วยแผ่นเหล็กบางอาบฉนวน (Laminated Sheet Steel) คอมมิวเตเตอร์ (Commutator) ทำด้วยทองแดงออก แบบเป็นซี่ส่วนหัว ซี่ของคอมมิวเตเตอร์ จะมีร่องสำหรับใส่ปลายสายของขดลวดอาร์มาเจอร์ ตัวคอมมิวเตเตอร์จะอัดแน่นติดกับแกนเพลลา เป็นรูปกลมทรงกระบอก มีหน้าที่สัมผัสกับแปรงถ่าน (Carbon Brushes)

2) Brushless DC Motor (BLDC) เป็นมอเตอร์ซิงโครนัสชนิดหนึ่ง ซึ่งหมายความว่าสนามแม่เหล็กที่สร้างโดยสเตเตอร์และสนามแม่เหล็กที่สร้างโดยโรเตอร์จะหมุนด้วยความถี่เดียวกัน

มอเตอร์ BLDC มีในรูปแบบ 1 เฟส 2 เฟส และ 3 เฟส ตามประเภทของมัน สเตเตอร์มีจำนวนขดลวดเท่ากัน จากทั้งหมดนี้มอเตอร์ 3 เฟสเป็นที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งจะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

- สเตเตอร์ของ Brushless DC Motor ประกอบด้วยการเคลือบเหล็กแบบเรียงซ้อนโดยมีขดลวดวางอยู่ในช่องที่ตัดตามแนวแกนตามขอบด้านใน ส่วนใหญ่มีขดลวดสเตเตอร์สามเส้นที่เชื่อมต่อกันในรูปดาว ขดลวดแต่ละเส้นเหล่านี้สร้างขึ้นด้วยขดลวดจำนวนมากที่เชื่อมต่อกันเพื่อสร้างขดลวดขดลวดอย่างน้อยหนึ่งตัววางอยู่ในช่องและเชื่อมต่อกันเพื่อให้เป็นขดลวด ขดลวดแต่ละเส้นเหล่านี้กระจายอยู่เหนือรอบนอกของสเตเตอร์เพื่อสร้างจำนวนขั้วคู่

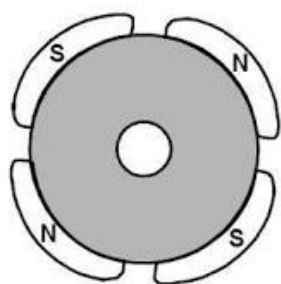


ภาพประกอบ 12 Stator of a BLDC Motor [31]

- โรเตอร์ทำจากแม่เหล็กถาวรและสามารถเปลี่ยนคู่ขั้วได้ตั้งแต่สองถึงแปดขั้วโดยมีขั้วเหนือ (N) และขั้วใต้ (S) สลับกันขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของสนามแม่เหล็กที่ต้องการในโรเตอร์วัสดุแม่เหล็กที่เหมาะสมจะถูกเลือกเพื่อทำโรเตอร์ แม่เหล็กเฟอร์ไรต์มักใช้ในการสร้างแม่เหล็กถาวร



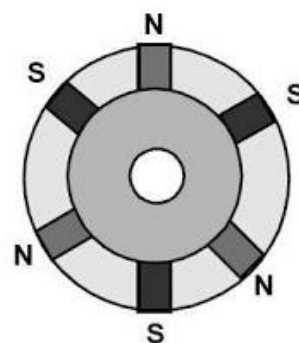
ภาพประกอบ 13 Rotor of a BLDC Motor [31]



Circular core with magnets on the periphery



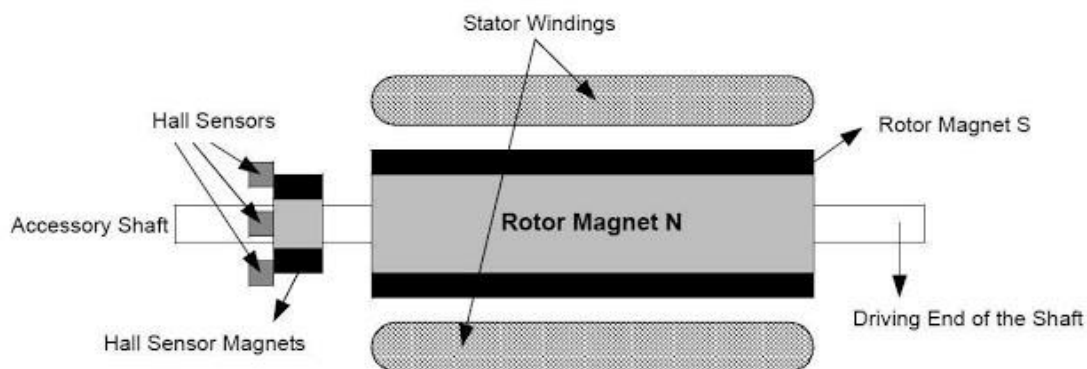
Circular core with rectangular magnets embedded in the rotor



Circular core with rectangular magnets inserted into the rotor core

ภาพประกอบ 14 BLDC Rotor Magnet Positions [31]

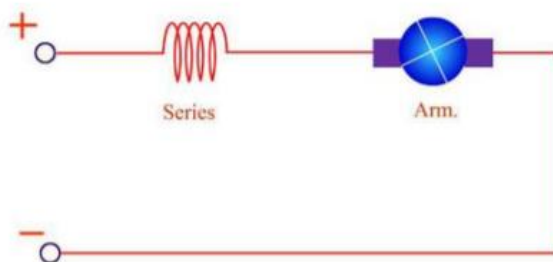
นอกจากนี้ BLDC ยังจำเป็นต้องมี Hall sensor เพื่อทำหน้าที่บอกตำแหน่งของ โรเตอร์โดยส่วนใหญ่ BLDC จะประกอบไปด้วย Hall Sensor 3 ชุด ดังภาพประกอบ 15



ภาพประกอบ 15 Hall Sensors on BLDC [31]

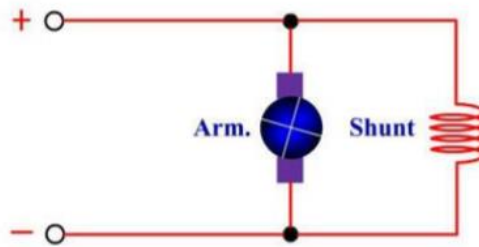
2.6.3.3 ชนิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

1) มอเตอร์แบบอนุกรม (Series Motor) คือมอเตอร์ที่ต่อขดลวดสนามแม่เหล็กอนุกรมกับอาร์เมเจอร์ของมอเตอร์ชนิดนี้ว่า ซีรีส์ฟิลด์ (Series Field) มีคุณลักษณะที่ดีคือให้แรงบิดสูงนิยมใช้เป็นต้นกำลังของรถไฟฟ้ารถยนต์ของเครื่องบิน ความเร็วรอบของมอเตอร์อนุกรมเมื่อไม่มีโหลดความเร็วจะสูงมากแต่ถ้ามีโหลดมาต่อความเร็ว ก็จะลดลงตามโหลด โหลดมากหรือทำงานหนักความเร็วลดลง แต่ขดลวด ของมอเตอร์ ไม่เป็นอันตราย จากคุณสมบัตินี้จึงนิยมนำมาใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้า ในบ้านหลายอย่าง เช่น เครื่องดูดฝุ่น เครื่องผสมอาหาร สว่านไฟฟ้า จักรเย็บผ้า เครื่องเป่าผม มอเตอร์กระแสตรงแบบอนุกรม ใช้งานหนักได้ดีเมื่อใช้งานหนักกระแสจะมากความเร็วรอบจะลดลงเมื่อไม่มีโหลดมาต่อความเร็วจะสูงมากอาจเกิดอันตรายได้ดังนั้นเมื่อเริ่มสตาร์ทมอเตอร์แบบอนุกรมจึงต้องมีโหลดมาต่ออยู่เสมอ [32]



ภาพประกอบ 16 วงจรแสดงการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบอนุกรม [32]

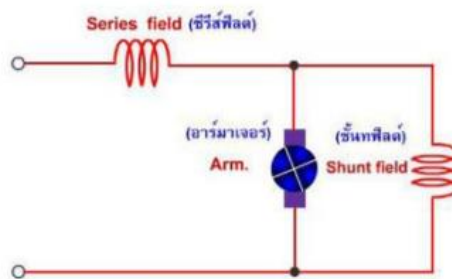
2) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน (Shunt Motor) หรือเรียกว่าชันทมอเตอร์ มอเตอร์แบบขนานนี้ ขดลวดสนามแม่เหล็กจะต่อ (Field Coil) จะต่อขนานกับขดลวด ชุดอาร์เมเจอร์ มอเตอร์แบบขนานนี้มีคุณลักษณะ มีความเร็วคงที่ แรงบิดเริ่มหมุนต่ำ แต่ความเร็วรอบคงที่



ภาพประกอบ 17 วงจรแสดงการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน [32]

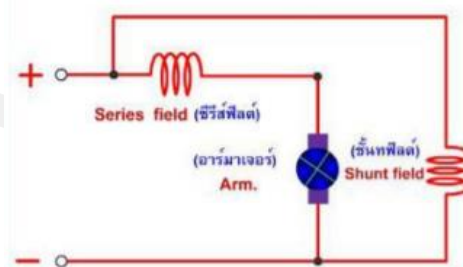
3) มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสม (Compound Motor) หรือเรียกว่าคอมเปานด์มอเตอร์ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบผสมนี้ จะนำคุณลักษณะที่ดีของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบขนาน และแบบอนุกรมมารวมกัน มอเตอร์แบบผสม มีคุณลักษณะพิเศษคือมีแรงบิดสูง (High starting torque) แต่ความเร็วรอบคงที่ ตั้งแต่ยังไม่มีโหลดจนกระทั่งมีโหลดเต็มที่ มอเตอร์แบบผสมมีวิธีการต่อขดลวดขนานหรือขดลวดชั้นที่อยู่ที่ 2 วิธี

3.1) ต่อขดลวดแบบชั้นที่ขนานกับอาเมเจอร์เรียกว่า ชอร์ตชันท (Short Shunt Compound Motor)



ภาพประกอบ 18 วงจรแสดงการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชอร์ตชันทคอมเปานด์มอเตอร์ [32]

3.2) ต่อขดลวด ขนานกับขดลวดอนุกรมและขดลวดอาเมเจอร์ เรียกว่า ลองชันทคอมเปานด์มอเตอร์ (Long shunt motor)



ภาพประกอบ 19 วงจรแสดงการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบลองชันทเปาว์ดมอเตอร์ [32]

2.6.4 ชุดควบคุมไฟฟ้ากำลัง

ชุดควบคุมไฟฟ้ากำลัง เป็นอีกหนึ่งส่วนประกอบสำคัญที่ต้องทำงานผสมผสานกับชุดมอเตอร์ขับเคลื่อน โดยชุดควบคุมไฟฟ้ากำลัง จะทำหน้าที่ปรับสภาวะของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ให้เหมาะสมกับการขับเคลื่อนของมอเตอร์ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าชุดควบคุมไฟฟ้ากำลังเป็นอุปกรณ์ที่ทำงานระหว่างมอเตอร์ขับเคลื่อน และแบตเตอรี่ ซึ่งในการทำงานร่วมกับมอเตอร์นั้น ชุดควบคุมไฟฟ้ากำลังจะทำงานใน 2 รูปแบบหลักประกอบด้วย 1) การขับเคลื่อนเดินหน้า และ 2) การขับเคลื่อนถอยหลัง ซึ่งในการทำงานในรูปแบบดังกล่าว สามารถปรับแต่งรูปแบบการทำงานย่อยเพื่อเพิ่มสมรรถนะในการขับเคลื่อนหรือการประหยัด พลังงานได้อีก [26] การทำงานของชุดควบคุมไฟฟ้ากำลัง จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ย่อยต่างๆ ดังนี้

2.6.4.1 อินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยใช้ IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่อกระแสไฟฟ้าเพื่อแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ โดยอาศัยเทคนิค PWM (Pulse width modulation) แปรความกว้างของพัลส์ที่ใช้ เปิด-ปิด ทราานซิสเตอร์ เพื่อสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับสำหรับขับเคลื่อนมอเตอร์ 1 ตัว จะใช้อินเวอร์เตอร์ 1 ชุด อินเวอร์เตอร์สามารถต่อชุดแบตเตอรี่เข้าทางขาเข้า (Input) ได้โดยตรง โดยทั่วไปวงจรกำลังจะประกอบขึ้นจากสวิตช์กำลังชนิด IGBT เป็นหลักอินเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงจากชุดแบตเตอรี่ ให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับที่โดยทั่วไปมีรูปคลื่นเป็นแรงดัน PWM การควบคุมแรงดัน PWM ให้เหมาะสมกับมอเตอร์กระแสสลับนี้เป็นหน้าที่หลักของชุดควบคุมอินเวอร์เตอร์ (Inverter controller) ที่จะประมวลผลสัญญาณเข้าและสัญญาณป้อนกลับต่างๆ แล้วสั่งการทำงานวงจรกำลังผ่านทางวงจรขับ IGBT (IGBT driver) ในอินเวอร์เตอร์พิกัดกำลังค่อนข้างสูง จะมีวงจรป้องกันในตัวเองเพื่อไม่ให้สวิตช์กำลังเกิดความเสียหายโดยง่ายอินเวอร์เตอร์ที่มีสมรรถนะสูงๆ โดยทั่วไปใช้หลักการควบคุมแบบเวกเตอร์ (Vector control) เพื่อให้สมรรถนะไดนามิกส์ที่ดีหลักการสำคัญของการควบคุมแบบเวกเตอร์คือการควบคุมแรงบิดของมอเตอร์ได้ตามต้องการ

2.6.4.2 DC-DC Converter

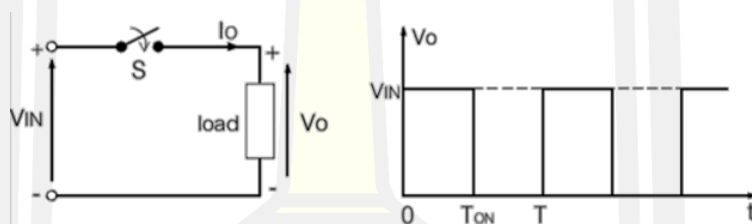
DC-DC Converter หรือ DC chopper เป็นอุปกรณ์อีกชิ้นหนึ่งที่มีความสำคัญสำหรับรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า สามารถปรับแรงดันของไฟฟ้าให้สูงขึ้นหรือต่ำลง โดยอุปกรณ์ดังกล่าวจะใช้เพื่อปรับค่าแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ที่มีค่าต่ำให้มีค่าแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้นก่อนส่งต่อไปยังชุดควบคุมมอเตอร์ซึ่ง

Converter ที่ปรับแรงดันไฟฟ้าให้สูงขึ้น เรียกว่า Boost Converter ในขณะที่ Converter ที่ปรับแรงดันไฟฟ้าให้ต่ำลงเรียกว่า Step Down Converter หรือ Buck Converter [33]

อิเล็กทรอนิกส์สวิตช์ หรือ chopping DC voltage จะนำไปใช้ขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ด้วยพลังงานไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ การ เปิด-ปิด อิเล็กทรอนิกส์สวิตช์ มีวิธีการ 2 แบบคือ

1. แบบ Constant-frequency เป็นวงจร chopper ที่ควบคุมให้ time period (T) คงที่ แล้วปรับเวลา ON time (T_{ON}) การควบคุมในลักษณะนี้เรียกว่า pulse-width-modulation (PWM)

2. แบบ Variable-frequency เป็นวงจร chopper ที่ปรับ time period โดยการปรับ ON time หรือ OFF time ($T-T_{ON}$) การควบคุมแบบนี้เรียกว่า frequency-modulation แต่เนื่องจากการควบคุมในลักษณะนี้ความถี่มีการเปลี่ยนแปลงในย่านกว้างทำให้ยากในการ filter

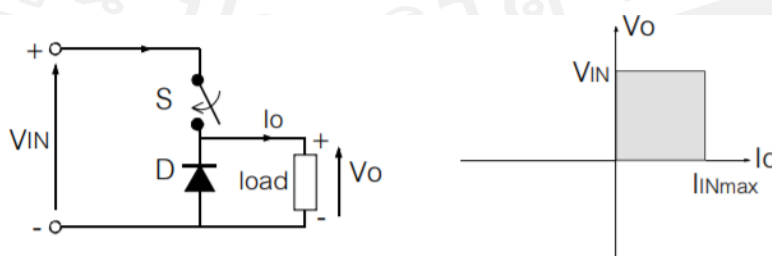


ภาพประกอบ 20 หลักการของวงจร DC-DC converter [33]

เนื่องจากอิเล็กทรอนิกส์สวิตช์และไดโอดที่ใช้ในวงจรเป็นอุปกรณ์ที่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ทางเดียว ดังนั้นทิศทางการไหลของกระแสและ polarity ของเอาต์พุต voltage จะถูกกำหนด ด้วยชนิดของวงจร chopper ที่นำมาใช้ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ ดังนี้

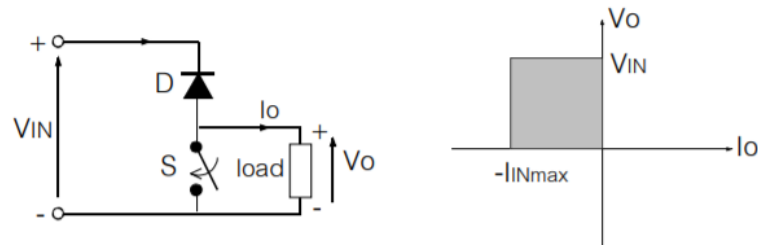
1) Single Quadrant Chopper การทำงานของวงจรจะให้กระแสและแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงอยู่ใน quadrant เดียว มีการต่อวงจรอยู่ 2 แบบ คือ

- ชนิด A เป็นวงจรที่มีการทำงานอยู่ใน quadrant 1 กำลังไฟฟ้าจะไหลจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าไปยังโหลด



ภาพประกอบ 21 วงจร chopper ชนิด A [33]

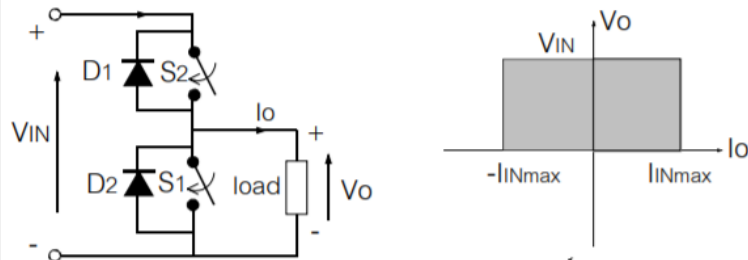
- ชนิด B เป็นวงจรที่มีการทำงานอยู่ใน quadrant 2 วงจรชนิดนี้กำลังไฟฟ้าจะไหลออกจากโหลด จะเกิดใน active load เช่นการสร้าง regenerative braking ของ dc drives



ภาพประกอบ 22 วงจร chopper ชนิด B [33]

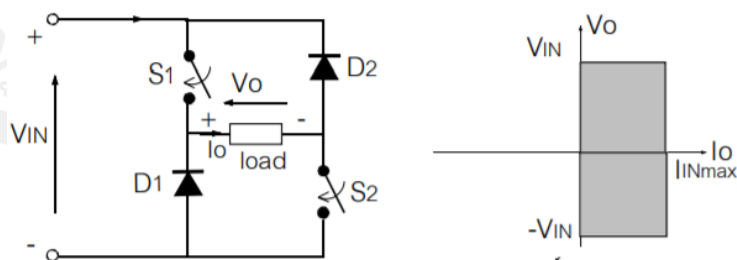
- 2) Two Quadrant Chopper ในกรณีนี้การทำงานของวงจรจะให้กระแสและแรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงอยู่ใน 2 quadrant มีการต่อวงจรอยู่ 2 แบบ คือ

- ชนิด C เป็นวงจรที่ทิศทางการไหลของกระแส I_o สามารถเป็นบวกหรือลบได้ เมื่อ S1 หรือ D1 นำกระแส I_o จะเป็นลบ แต่ถ้า S2 หรือ D2 นำกระแส I_o จะเป็นบวก ซึ่งจะมีการทำงานอยู่ใน quadrant 1 และ 2 แต่วงจรนี้ถ้า S1 และ S2 ทำงานพร้อมกันจะเกิดการลัดวงจร



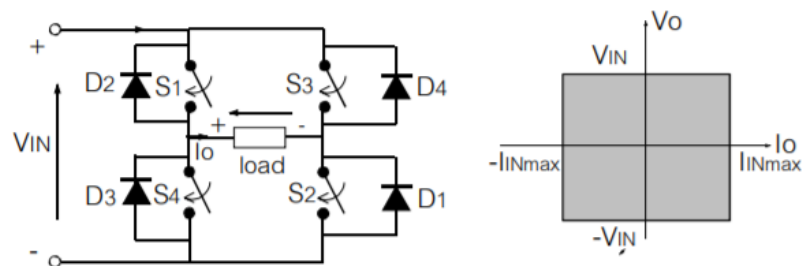
ภาพประกอบ 23 วงจร chopper ชนิด C [33]

- ชนิด D เป็นวงจรที่กระแส I_o ไหลได้ทิศทางเดียวแต่แรงดันเอาต์พุตสามารถมี polarity เป็นบวกหรือลบได้วงจรชนิดนี้จะมีการทำงานอยู่ใน quadrant 1 และ 4



ภาพประกอบ 24 วงจร chopper ชนิด D [33]

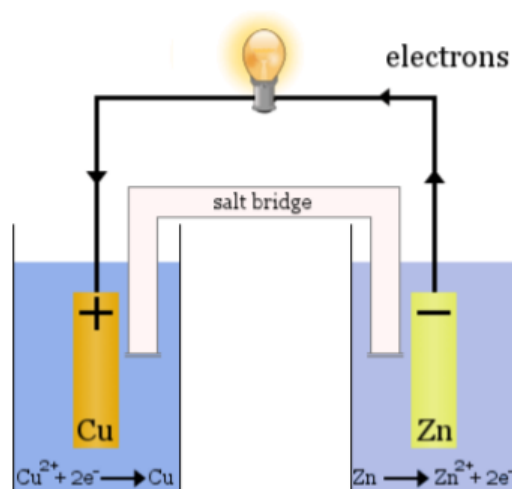
3) Four Quadrant Chopper (ชนิด E) ในกรณีนี้การทำงานของวงจรจะให้กระแสและแรงดันเปลี่ยนแปลงอยู่ใน 4 Quadrant โดยที่ ถ้า S1 และ S2 ทำงานทิศทางของกระแสและ polarity ของแรงดันจะเป็นบวก(quadrant 1) ในขณะที่ถ้า S3 และ S4 ทำงานทิศทางของกระแสและ polarity ของแรงดันจะเป็นลบ(quadrant 3) ส่วน quadrant 2 และ 4 จะเป็นการทำงานแบบ regenerative ด้วย D1 กับ D2 และ D3 กับ D4



ภาพประกอบ 25 วงจร chopper ชนิด E [33]

2.6.5 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ (Battery) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บพลังงานไฟฟ้าเพื่อเอาไว้ใช้งาน เนื่องจากแบตเตอรี่มีขนาดและคุณสมบัติที่หลากหลายสามารถเลือกใช้ได้ตามคุณสมบัติที่ต้องการ โดยหลักการของแบตเตอรี่จะเก็บรักษาพลังงานในรูปของพลังงานเคมี [34] ซึ่งแบตเตอรี่จะประกอบด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical cell) หนึ่งเซลล์หรือมากกว่า แบตเตอรี่มีความสามารถในการเปลี่ยนพลังงานเคมีให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยสามารถจะให้กำลังไฟฟ้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้าภายนอกได้ เมื่อมีการเชื่อมต่อประกอบไปด้วยมี ขั้วบวก (Cathode) และ ขั้วลบ (Anode) ขั้วบวกจะมีพลังงานศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าขั้วลบ โดยขั้วลบคือแหล่งที่มาของอิเล็กตรอนที่เมื่อเชื่อมต่อกับวงจรภายนอกแล้ว อิเล็กตรอนเหล่านี้จะไหลและส่งมอบพลังงานให้กับอุปกรณ์ภายนอก เมื่อนำไปใช้งานแบตเตอรี่จะคายพลังงานดังกล่าวเพื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโหลดที่ใช้งาน โดยแบตเตอรี่จะทำการเปลี่ยนพลังงานที่เก็บรักษาในรูปของพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้าแล้วนำไปใช้งาน



ภาพประกอบ 26 เซลล์ไฟฟ้าเคมี [34]

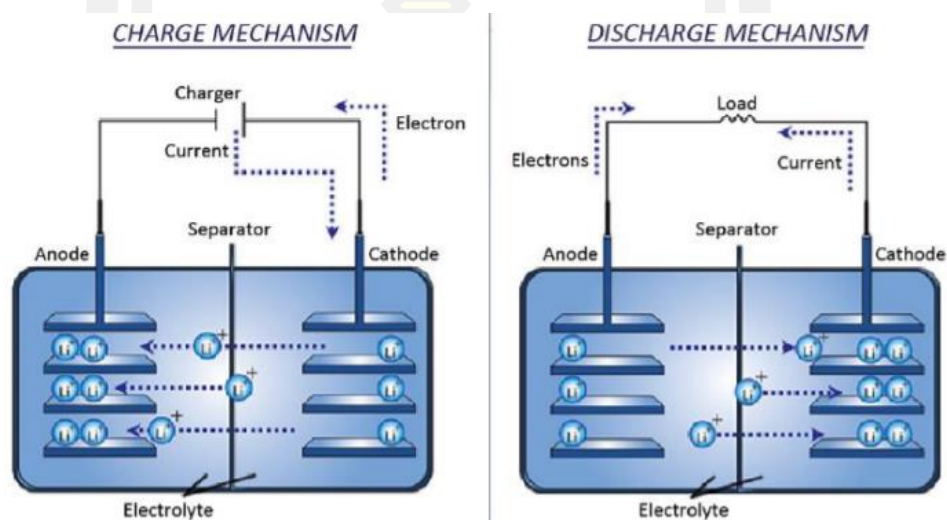
ในปัจจุบันแบตเตอรี่มีหลายชนิดหลายขนาดและมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน ดังนั้น การเลือกใช้แบตเตอรี่ต้องเลือกให้มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งาน และจำเป็นต้องรู้จักคุณสมบัติของแบตเตอรี่ในแต่ละชนิด แบตเตอรี่ที่ดีจะต้องออกแบบให้มีขนาดเล็ก มีอายุการใช้งานยาวนาน ความทนทานในการใช้งานตรงกับความต้องการของผู้ใช้ ซึ่งตามความเป็นจริงแล้วผู้ผลิตสามารถผลิตได้ แต่ราคาของแบตเตอรี่จะแพงตามไปด้วยจึงไม่เหมาะสมกับผู้ใช้ทั่วไป การแยกประเภทแบตเตอรี่สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท ได้ดังนี้

1) แบตเตอรี่ปฐมภูมิมีความสามารถในการจ่ายไฟฟ้าได้เพียงครั้งเดียว เมื่อปล่อยประจุออกไปแล้วไม่สามารถประจุใหม่ได้อีก แบตเตอรี่ประเภทนี้และจะถูกใช้เพียงครั้งเดียวหรือใช้แล้วทิ้ง วัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างถาวรในช่วงการคายประจุ (Discharge) ตัวอย่างที่พบบ่อยก็คือ แบตเตอรี่อัลคาไลน์ที่ใช้สำหรับ ไฟฉาย และอีกหลายอุปกรณ์พกพา

2) แบตเตอรี่ทุติยภูมิ สามารถดิสชาร์จและชาร์จใหม่ได้หลายครั้ง ในการนี้องค์ประกอบเดิมของขั้วไฟฟ้าสามารถเรียกคืนสภาพเดิมได้โดยกระแสย้อนกลับ โดยแบตเตอรี่ที่นำมาใช้สำหรับกักเก็บพลังงานบนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าเพื่อการขับเคลื่อน (Traction Battery) จะเป็นแบตเตอรี่ประเภทนี้ทั้งหมด

ในอดีตที่ผ่านแบตเตอรี่กลุ่มตะกั่วกรด (Lead acid) และกลุ่มนิกเกิล (Nickel Metal Hydride NiMH) ได้ถูกนำมาใช้งานเป็น Traction Battery แต่ในปัจจุบันแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนได้รับความนิยมเพิ่ม มากขึ้นและมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากจุดเด่นของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนคือความจุพลังงานและกำลังไฟฟ้าที่สูงกว่าแบตเตอรี่ตะกั่วกรดและนิกเกิล นอกจากนี้

ยังมีค่าศักย์ไฟฟ้าสูงมีอัตราการสูญเสีย ประจุระหว่างไม่ใช้งาน (self-discharge rate) ที่ต่ำ ไม่มีปรากฏการณ์ความจำและมีความปลอดภัยสูงกว่า แบตเตอรี่ที่ใช้โลหะลิเทียมเป็นขั้ว ซึ่งในงานวิจัยนี้ จึงขอนำเสนอรายละเอียดของแบตเตอรี่ในกลุ่มแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนเป็นแบตเตอรี่ที่ใช้โลหะลิเทียมเป็นขั้วแบตเตอรี่ มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ ขั้วลบ มีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์บอนที่มีรูพรุน (เช่น แกรไฟต์) เคลือบบนแผ่นทองแดงขั้วบวกเป็น ลิเทียมเมทัลออกไซด์เคลือบบนแผ่นอะลูมิเนียม โดยมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วยเกลือของลิเทียม เช่น LiPF_6 หรือ LiBF_4 ในตัวทำละลายเช่น เอทิลีนคาร์บอเนต (Ethylene carbonate) ไดเอทิลคาร์บอเนต (Diethyl carbonate) หรือไดเมทิลคาร์บอเนต (Dimethyl carbonate) และมีเยื่อเลือกผ่าน (Separator) กั้นระหว่างขั้วทั้งสอง ซึ่งทำจากพอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) หรือพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE)



ภาพประกอบ 27 หลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน [35]

จากภาพประกอบ 27 แสดงหลักการทำงานของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน เมื่อมีการอัดประจุ (Charge) ไอออนของลิเทียม จะเคลื่อนออกจากโครงสร้างของขั้วบวก ผ่านเยื่อเลือกผ่าน เข้าสู่ขั้วลบ เกิดเป็น สารประกอบของลิเทียมและคาร์บอน ในขณะเดียวกันอิเล็กตรอนจะเคลื่อนจากขั้วบวกสู่ขั้วลบ ผ่านวงจร ภายนอก และขณะเกิดการคายประจุปฏิกิริยาจะเกิดในทางตรงกันข้าม

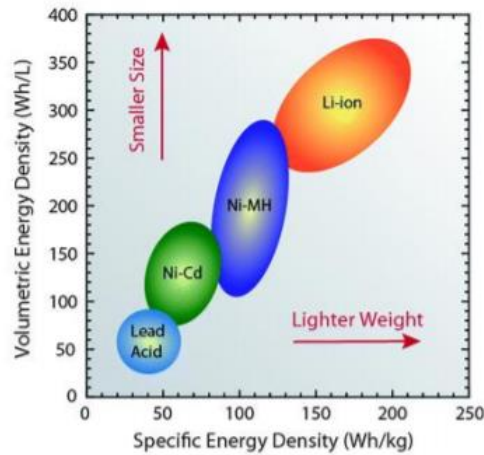
แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่มีใช้ในปัจจุบันมี 6 ประเภทหลัก โดยทั่วไปจะแบ่งตามวัสดุที่ใช้ทำขั้วบวก ส่วนขั้วลบ ทำมาจากแกรไฟต์เป็นหลัก ทั้งนี้แบตเตอรี่ประเภท LTO (Lithium Titanate) มีความแตกต่าง ออกไปคือ มีขั้วลบเป็นลิเทียมไททาเนต แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแต่ละประเภทมีสมบัติแตกต่างกัน จึงเหมาะสม ต่อการใช้งานที่แตกต่างกันไปด้วย [36]

ตารางที่ 1 แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนประเภทต่างๆ วัสดุขั้วลบและบวก และการใช้งาน [36]

ประเภท	วัสดุขั้วบวก	วัสดุขั้วลบ	การใช้งาน
1	Lithium Cobalt Oxide (LiCoO ₂ , LCO)	แกรไฟต์	โทรศัพท์มือถือ แท็บเล็ต แล็ปท็อป กล้องดิจิทัล
2	Lithium Manganese Oxide (LiMn ₂ O ₄ , LMO)	แกรไฟต์	เครื่องมือไฟฟ้า (Power tools) อุปกรณ์การแพทย์ Traction Battery ในรถยนต์ไฟฟ้า
3	Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (Li(Ni,Mn,Co)O ₂ , NMC, NCM)	แกรไฟต์	จักรยานไฟฟ้า อุปกรณ์การแพทย์ Traction Battery ในรถยนต์ ไฟฟ้า (มักใช้ในรถไฮบริดจ์) ระบบสำรองไฟฟ้า
4	Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide (Li(Ni,Co,Al)O ₂ , NCA)	แกรไฟต์	อุปกรณ์การแพทย์ Traction Battery ในรถยนต์ไฟฟ้า (Tesla Model S) ระบบสำรองไฟฟ้า
5	Lithium Iron Phosphate (LiFePO ₄ , LFP)	แกรไฟต์	Traction Battery ในรถยนต์ ไฟฟ้า หรือแทนแบตเตอรี่กรด ตะกั่วในรถยนต์ (Start-Lighting Ignition battery) ระบบที่ ต้องการกระแสและความทนทาน สูง
6	แกรไฟต์ หรือ LMO	Lithium Titanate (Li ₄ Ti ₅ O ₁₂ , LTO)	ระบบสำรองไฟฟ้า Traction Battery ในรถยนต์ไฟฟ้า (Mitsubishi i-MiEV, Honda Fit EV)

จากคุณสมบัติและคุณลักษณะของแบตเตอรี่แต่ละประเภทมีความแตกต่างกันสำหรับการใช้งานเพื่อเป็น Traction Battery แล้วคุณสมบัติที่ควรคำนึงถึงความจุพลังงานไฟฟ้าต่อน้ำหนัก รวมไปถึงความจุพลังงานไฟฟ้าต่อขนาดของแบตเตอรี่ ซึ่งคุณสมบัติทั้งสองมีผลต่อการนำไปใช้ติดตั้งบนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า ภาพประกอบ 30 แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติที่กล่าวมาข้างต้น จากภาพจะเห็นว่าแบตเตอรี่ในกลุ่ม Li-ion สามารถบรรจุพลังงานไฟฟ้าได้มาก โดยที่ยังรักษาขนาดให้เล็กและยังมี

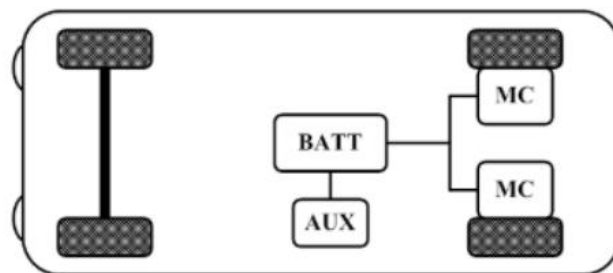
น้ำหนักเบาในทางกลับกัน แบตเตอรี่ Lead Acid มีต้องใช้แบตเตอรี่ที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักที่มากที่สุด แต่ก็ยังมีความสามารถในการ บรรจุพลังงานได้น้อยที่สุด เมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ประเภทอื่น



ภาพประกอบ 28 คุณสมบัติและคุณลักษณะของแบตเตอรี่ [37]

2.6.6 ระบบขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าแบบมอเตอร์คู่

การขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าแบบใช้มอเตอร์คู่ ได้ออกแบบระบบขับเคลื่อนโดยมีต้นแบบ [38] ซึ่งภายใต้สภาวะไร้โหลดมอเตอร์ตัวที่หนึ่งจะทำงาน แต่เมื่อมีสภาวะโหลดเพิ่มขึ้นมอเตอร์ทั้งสองตัวจะทำงานพร้อมกัน ได้ออกแบบโครงสร้างของระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่ [39] โครงสร้างแสดงดังภาพประกอบ 29 ประกอบด้วยมอเตอร์ จำนวน 2 ตัว จากการออกแบบได้ดำเนินการจัดสร้างชุดทดลองที่ได้ออกแบบไว้ในการควบคุมจะต้องควบคุมให้มอเตอร์ทั้งสองตัวให้ทำงานพร้อมกันในสภาวะเมื่อมีการปรับความเร็วหรือมีการเปลี่ยนแปลงโหลดในสภาวะต่างๆ เพื่อควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ให้มีเสถียรภาพและสมรรถนะที่ดี



ภาพประกอบ 29 โครงสร้างของระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่ [39]

2.7 การควบคุมและอุปกรณ์ส่งแบบไร้สาย

2.7.1 การควบคุมแบบไร้สาย

การควบคุมแบบไร้สาย หมายถึง การถ่ายโอนข้อมูลสารสนเทศระหว่างจุดสองจุดหรือมากกว่า โดยไม่ได้เชื่อมต่อกันด้วยตัวนำไฟฟ้า เทคโนโลยีไร้สายที่พบมากที่สุดใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น คลื่นวิทยุ ซึ่งอาจใช้ในระยะเวลาทางสั้นๆ ไม่กี่เมตรสำหรับโทรศัพท์มือถือ หรือไกลเป็นล้านกิโลเมตรลึกเข้าไปในอวกาศ [40]

สำหรับวิทยุการสื่อสารไร้สาย มีหลากหลายชนิดของการใช้งาน ทั้งอยู่กับที่ และแบบพกพา สำหรับเคลื่อนที่ ได้แก่ วิทยุสองทาง โทรศัพท์มือถือ เป็นต้น ชนิดของสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมแบบไร้สายแบ่งเป็น 2 ชนิดดังนี้

1) สัญญาณอินฟราเรด (Infrared, IR) [41] มีชื่อเรียกอีกชื่อว่ารังสีใต้แดงหรือรังสีความร้อน เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่างคลื่นวิทยุและแสงมีความถี่ในช่วง 1,011-1,014 เฮิรตซ์ หรือความยาวคลื่นตั้งแต่ 1-1,000 ไมโครเมตร มีความถี่ในช่วงเดียวกับไมโครเวฟมีความยาวคลื่นอยู่ระหว่างแสงสีแดงกับคลื่นวิทยุสสารทุกชนิดที่มีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง -200 องศาเซลเซียส ถึง 4,000 องศาเซลเซียส จะปล่อยรังสีอินฟราเรดออกมา คุณสมบัติเฉพาะตัวของรังสีอินฟราเรด เช่น ไม่เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ก็คือ คุณสมบัติที่ขึ้นอยู่กับความถี่คือยิ่งความถี่สูงมากขึ้นพลังงานก็สูงขึ้นด้วยถูกค้นพบโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวอังกฤษคือ Sir William Herschel ซึ่งได้ค้นพบรังสีอินฟราเรดสเปกตรัมในปี ค.ศ. 1,800 จากการทดลองโดยทดสอบว่าในเลนส์แต่ละสีจะเปลี่ยนค่าแสดงความร้อนของดวงอาทิตย์หรือไม่ จึงประดิษฐ์อุปกรณ์การทดลองเพื่อหาคำตอบใช้ปริซึมแยกแสงแล้วให้แสงต่างๆ มาตกที่เทอร์โมมิเตอร์ก็ตั้งเทอร์โมมิเตอร์ตัวหนึ่ง นอกเหนือจากแสงสีต่างๆ นั้น เพื่อเป็นตัวควบคุมการทดลอง ปรากฏว่าแสงสีต่างมีอุณหภูมิสูงกว่าแสงสีขาว และอุณหภูมิสูงขึ้นจากสีม่วง ไปหาสีแดง ปรากฏว่าเทอร์โมมิเตอร์ตัวที่อยู่นอกเหนือจากแสงสีแดงนั้นกลับวัดได้อุณหภูมิสูงกว่าทุกตัวพบว่าส่วนของแสงที่มองไม่เห็นแต่ร้อนกว่าสีแดงนี้มีคุณสมบัติทางกายภาพเช่นเดียวกับคลื่นแสงที่มองเห็นได้ทุกประการ เช่น การหักเห ดูดซับ ส่องผ่านหรือไม่ผ่านตัวกลางรังสีที่ถูกค้นพบใหม่นี้ตั้งชื่อว่า "รังสีอินฟราเรด" (ขอบเขตที่ต่ำกว่าแถบสีแดงหรือรังสีใต้แดง) ในการใช้ประโยชน์ ใช้ในการควบคุมเครื่องใช้ระบบไกล (remote control)

2) สัญญาณวิทยุ (Radio Frequency, RF) [42] คลื่นวิทยุเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่เกิดขึ้นในช่วงความถี่วิทยุบนเส้นสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้าคลื่นวิทยุไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่

ใช้ในการสื่อสารมี 2 ระบบคือ A.M และ F.M. ความถี่ของคลื่น หมายถึง จำนวนรอบของการเปลี่ยนแปลงของคลื่นในเวลา 1 วินาที คลื่นเสียงมีความถี่ช่วงที่หูของคนรับฟังได้คือ ตั้งแต่เริ่มมีคลื่นวิทยุแต่ละช่วงความถี่จะถูกกำหนดให้ใช้งานด้านต่างๆ ตามความเหมาะสม ส่วนประกอบของคลื่นมีดังนี้

- สันคลื่น (Crest) ตำแหน่งสูงสุดของคลื่นหรือเป็นตำแหน่งที่มีการกระจัดสูงสุดในทางบวก
- ท้องคลื่น (Trough) ตำแหน่งต่ำสุดของคลื่นหรือเป็นตำแหน่งที่มีการกระจัดสูงสุดในทางลบ
- แอมพลิจูด (Amplitude) เป็นระยะการกระจัดมากที่สุดทั้งค่าบวกและค่าลบ
- ความยาวคลื่น (Wavelength) เป็นความยาวของคลื่นหนึ่งลูกมีค่าเท่ากับระยะระหว่างสันคลื่นหรือท้องคลื่นที่อยู่ติดกันความยาวคลื่นแทนด้วยสัญลักษณ์มีหน่วยเป็นเมตร (m)
- ความถี่ (Frequency) หมายถึง เวลาที่ตำแหน่งใดๆในหนึ่งหน่วยเวลาแทนด้วยสัญลักษณ์มีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที (S-1) หรือ เฮิรตซ์ (Hz)
- คาบ (Period) หมายถึง เวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งใดๆครบหนึ่งลูกคลื่นแทนด้วยสัญลักษณ์มีหน่วยเป็นวินาทีต่อรอบ (S)
- อัตราเร็วของคลื่น (Wave speed) หาได้จากผลคูณระหว่างความยาวคลื่นและความถี่

2.1) ระบบ A.M สื่อสารโดยใช้คลื่นเสียงผสมเข้าไปกับคลื่นวิทยุเรียกว่า "คลื่นพาหะ" โดยแอมพลิจูดของคลื่นพาหะจะเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณคลื่นความถี่ของการขอย ในการส่งคลื่นระบบ A.M. สามารถส่งคลื่นได้ทั้งคลื่นดินเป็นคลื่นที่เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงขนานกับผิวโลกและคลื่นฟ้าโดยคลื่นจะไปสะท้อนที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์แล้วสะท้อนกลับลงมาจึงไม่ต้องใช้สายอากาศตั้งสูงรับ

2.2) ระบบ F.M. สื่อสารโดยใช้คลื่นเสียงผสมเข้ากับคลื่นพาหะโดยความถี่ของคลื่นพาหะจะเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณคลื่นเสียงในการส่งคลื่นระบบ F.M. ส่งคลื่นได้เฉพาะคลื่นดินอย่างเดียวถ้าต้องการส่งให้คลุมพื้นที่ต้องมีสถานีถ่ายทอดและเครื่องรับต้องตั้งเสาอากาศสูงรับ

ข้อแตกต่างระหว่าง สัญญาณ อินฟราเรด (Infrared, IR) และสัญญาณวิทยุ (Radio Frequency, RF) [43] ก็คือการใช้คลื่นที่มีความถี่ต่างกันในการสื่อสารแบบไร้สายอินฟราเรดใช้คลื่นย่านอินฟราเรดรับส่งข้อมูลโดยส่วนมากก็จะอยู่ที่ราวๆ 38 กิโลเฮิรตซ์(kHz) ข้อดีและข้อจำกัดของทั้งสองชนิด มีดังนี้

- สัญญาณอินฟราเรด (Infrared, IR) ข้อดี คือ เทคโนโลยีไม่ซับซ้อนจึงถูกใช้มากในการควบคุมเครื่องใช้ไฟฟ้า ข้อจำกัด คือ รีโมทต้องหันไปในทิศทางเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ต้องการควบคุม ห้ามมีสิ่งกีดขวางกั้นทิศทางของรีโมทและระยะรับส่งประมาณ 10 เมตร

- สัญญาณวิทยุ (Radio Frequency, RF) ข้อดี คือ ทิศทางสัญญาณรอบด้านไม่จำเป็นต้องหันทิศไปที่อุปกรณ์ สามารถทะลุสิ่งกีดขวางได้ และระยะสัญญาณไกลกว่า 15-20 เมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสิ่งกีดขวางด้วย ข้อจำกัด คือ เทคโนโลยีซับซ้อนกว่าและมีหลายคลื่นความถี่ใช้งาน ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องเชื่อว่าใช้งานร่วมกันได้หรือไม่

2.7.2 อุปกรณ์ส่งแบบไร้สาย

อุปกรณ์ส่งแบบไร้สายแบ่งออกเป็น 2 ชนิดได้แก่ ชนิดสัญญาณอินฟราเรด และ ชนิดสัญญาณวิทยุ โดยมีรายละเอียดดังนี้ [40-44]

1) อุปกรณ์ส่งแบบไร้สายชนิดสัญญาณอินฟราเรด (IR)

รีโมทคอนโทรลที่ส่งสัญญาณแบบอินฟราเรดที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เช่น รีโมทโทรทัศน์ รีโมทแอร์ เป็นต้น การส่งสัญญาณคือ ตัวรีโมทจะส่งสัญญาณโดยใช้รังสีอินฟราเรด เป็นรังสีที่ตาเรามองไม่เห็น ส่งไปยังตัวรับสัญญาณ แล้วส่งไปให้ตัวควบคุม เพื่อไปควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 30 ตัวอย่างอุปกรณ์ส่งแบบไร้สายชนิดสัญญาณอินฟราเรด [41]



ภาพประกอบ 30 รีโมทคอนโทรลและตัวรับสัญญาณอินฟราเรด

(ที่มา <http://fitrox.lnwshop.com>)

2) อุปกรณ์ส่งแบบไร้สายชนิดสัญญาณวิทยุ (RF)

รีโมทคอนโทรลปัจจุบันรีโมทคอนโทรลเปลี่ยนจากคลื่นวิทยุ FM มาเป็นความถี่สูง 2.4 จิกะเฮิร์ตซ์(GHz) ทำให้สามารถนำรีโมทคอนโทรลและรีซีฟเวอร์ หลายๆตัวมาใช้ในที่เดียวกันได้โดยคลื่น

ไม่ชนกันที่เห็นในรูปแบบเป็นรีโมทคอนโทรลแบบ 6 ช่องสัญญาณ ซึ่งมีราคาขายไม่สูงมากนักโดยตัวมันจะมาพร้อมรีซีฟเวอร์ ที่มีรหัสหมายเลขตรงกันการส่งสัญญาณคือตัวรีซีฟเวอร์ จะคอยรับสัญญาณที่ส่งมาจากรีโมทคอนโทรลในรูปแบบสัญญาณวิทยุแล้วนำสัญญาณนี้ส่งต่อไปยังบอร์ด Arduino เพื่อไปสั่งตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ ไปควบคุมมอเตอร์ ข้อดีของรีโมทคอนโทรลชนิดสัญญาณวิทยุ คือ สามารถสั่งงานได้ทิศทางรอบด้านไม่จำเป็นต้องหันทิศไปที่อุปกรณ์ สามารถทะลุสิ่งกีดขวางได้และระยะสั่งงานไกลกว่าแบบอินฟราเรด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสิ่งกีดขวางด้วย [42]



ภาพประกอบ 31 รีโมทคอนโทรลและรีซีฟเวอร์สัญญาณวิทยุ [44]

2.7.3 บอร์ด Arduino

Arduino คือ บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สำเร็จรูป หรือโครงการที่นำไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูลต่างๆ มาใช้ร่วมกันในภาษา C ซึ่งภาษา C นี้เป็นลักษณะเฉพาะคือมีการเขียนไลบรารีของ Arduino ขึ้นมาเพื่อให้การสั่งงานไมโครคอนโทรลเลอร์ที่แตกต่างกันสามารถใช้งานโค้ดตัวเดียวกันได้ โดยตัวโครงการได้ออกบอร์ดทดลองมาหลายรูปแบบเพื่อใช้งานกับ IDE ของตนเอง สาเหตุหลักที่ทำให้ Arduino เป็นนิยมมากเป็นเพราะซอฟต์แวร์ที่ใช้งานร่วมกันสามารถโหลดได้ฟรี บอร์ด Arduino มีด้วยกันหลักๆประมาณ 9 บอร์ด ดังนี้ [45]

1) Arduino Uno คำว่า Uno เป็นภาษาอิตาลีซึ่งแปลว่าหนึ่ง เป็นบอร์ด Arduino รุ่นแรกที่มีขนาดประมาณ 68.6 x 53.4 มิลลิเมตร เป็นบอร์ดมาตรฐานที่นิยมใช้งานมากที่สุดเนื่องจากเป็นขนาดที่เหมาะสมสำหรับการเริ่มต้นเรียนรู้ Arduino และมี Shields ให้เลือกใช้งานได้มากกว่าบอร์ด Arduino รุ่นอื่นๆที่ออกแบบมาเฉพาะมากกว่า โดยบอร์ด Arduino Uno ได้มีการพัฒนาเรื่อยมาตั้งแต่ R2 R3 และรุ่นย่อยที่เปลี่ยนไอซีแบบ SMD



ภาพประกอบ 32 Arduino Uno [45]

2) Arduino Dno คำว่า Dno เป็นภาษาอิตาลี แปลว่า สอง เป็นรุ่นที่เพิ่มพอร์ตให้มากขึ้น เป็น 54 พอร์ตดิจิทัลอินพุตเอาต์พุต และ 12 พอร์ตอนาล็อกอินพุต 2 พอร์ตอนาล็อกเอาต์พุตเพิ่ม พื้นที่โปรแกรมเป็น 512 กิโลไบต์(KB) สามารถใช้งานพื้นที่ได้เต็มไม่มี Bootloader เนื่องจากสามารถใช้กับพอร์ต USB ได้โดยตรง มีขนาดบอร์ด 101.52 x 53.3 มิลลิเมตร สามารถใช้ Shields ของ Arduino Uno ได้ แต่บางตัวจำเป็นต้องแก้ไขให้ถูกต้องจากภาพประกอบ 33 จะเห็นได้ว่าบอร์ดได้เปลี่ยนมาใช้ไอซีแบบ SMD จึงไม่นิยมนำมาใช้ในแบบ Standalone แต่นิยมนำมาใช้ในงานที่จำเป็นต้องพื้นที่โปรแกรมมากขึ้นทำงานที่ซับซ้อนมากยิ่งขึ้นบอร์ด Arduino Duo ใช้ไอซีเบอร์ AT91SAM3X8E ซึ่งเป็นไอซีที่ใช้เทคโนโลยี ARM Core สถาปัตยกรรม 32 บิต แรงความถี่คริสตอลขึ้นไปถึง 84 เมกะเฮิร์ตซ์(MHz) จึงทำให้สามารถงานด้านการคำนวณหรือการประมวลผลอัลกอริทึมได้เร็วกว่า Arduino Uno มากแต่เนื่องจากไอซีทำงานที่แรงดัน 3.3 โวลต์ ดังนั้นการนำไปใช้งานกับเซ็นเซอร์ควรระวังไม่ให้แรงดัน 5 โวลต์



ภาพประกอบ 33 Arduino Dno [45]

3) Arduino Leonardo บอร์ด Arduino Leonard เป็นบอร์ดที่เลือกใช้ไอซีเบอร์ ATmega32u4 ที่รองรับการเชื่อมต่อกับพอร์ต USB ได้โดยตรงทำให้บอร์ดสามารถเขียนโปรแกรมเพื่อจำลองตัวเองให้เป็นเมาส์หรือคีย์บอร์ดได้ทำงานที่แรงดัน 5 โวลต์ ทำให้ไม่มีปัญหาเกี่ยวกับเซ็นเซอร์หรือ Shields ที่ใช้งานกับ Arduino Uno



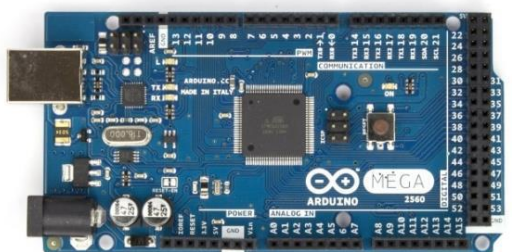
ภาพประกอบ 34 Arduino Leonardo [45]

4) Arduino MEGA ADK บอร์ด Arduino MEGA ADK ใช้ชิปไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT mega 2560 มีชิปไอซี USB Host เบอร์ MAX3421e มาให้บนบอร์ดใช้สำหรับเชื่อมต่อกับโทรศัพท์มือถือแอนดรอยด์ผ่าน OTG มีพอร์ตดิจิตอลอินพุตเอาต์พุตจำนวน 54 พอร์ต มีนาฬิกาอินพุตมาให้ 16 พอร์ต ทำงานที่ความถี่ 16 เมกะเฮิร์ตซ์(MHz) บอร์ด Arduino MEGA ADK จะแตกต่างกับบอร์ด Arduino Duo



ภาพประกอบ 35 Arduino MEGA ADK [45]

5) Arduino Mega 2560 บอร์ด Arduino Mega 2560 จะเหมือนกับ Arduino MEGA ADK ต่างกันตรงที่บนบอร์ดไม่มี USB Host มาให้การโปรแกรมยังต้องทำผ่านโปรโตคอล UART อยู่บนบอร์ดใช้ชิปไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT mega 2560



ภาพประกอบ 36 Arduino Mega 2560 [45]

6) Arduino Micro บอร์ด Arduino Micro ออกแบบให้มีขนาดเล็กและทันสมัยกว่าบอร์ด Arduino Mini หรือ Arduino Nano เนื่องจากบนบอร์ดใช้ไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT mega 32u4 ซึ่งมาพอร์ต USB สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้โดยตรงและมีดิจิทัลอินพุตเอาต์พุตมาก ถึง 20 พอร์ต มีพื้นที่เก็บโปรแกรมขนาด 32 กิโลไบต์(KB) แต่ต้องใช้พื้นที่สำหรับ Bootloader ไป 4 กิโลไบต์(KB) มีขนาดเพียง 48 x 18 มิลลิเมตร เนื่องจากบอร์ดใช้ไอซีตัวเดียวกับ Arduino Leonardo ทำให้สามารถทำให้บอร์ดจำลองตัวเองเป็นเมาส์



ภาพประกอบ 37 Arduino Micro [45]

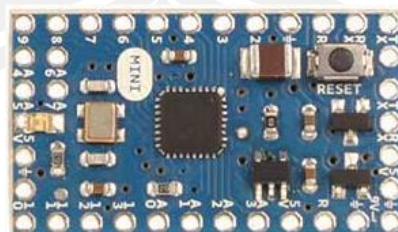
7) Arduino Nano บอร์ด Arduino Nano ออกแบบมาให้มีขนาดเล็กและใช้กับงานทั่วไป ใช้ชิปไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT mega 168 หรือเบอร์ AT mega 328 (มีรุ่น 2.3 กับ 3) โปรแกรมผ่านโปรโตคอล UART มีชิป USB to UART มาให้ ใช้ Mini USB เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์มีพอร์ตดิจิทัลอินพุตเอาต์พุต 14 พอร์ต มีพอร์ตอนาล็อกอินพุต 8 พอร์ต บนบอร์ดยังมีเรกกูเรเตอร์สามารถจ่ายไฟได้ตั้งแต่ 7-12 โวลต์ เพื่อให้บอร์ดทำงานได้ (จ่ายไฟที่ขา Vin) กรณีมีแหล่งจ่ายไฟ 5 โวลต์ อยู่แล้ว ก็จ่ายเข้าได้เลยที่ขา 5 โวลต์



ภาพประกอบ 38 Arduino Nano [45]

8) Arduino Mini มีขนาดเล็กกว่าบอร์ด Arduino อื่นๆอยู่มาก แต่ยังคงความสามารถไว้เท่ากับบอร์ด Arduino Uno R3 แล้วยังมีพอร์ต A6 และ A7 เพิ่มขึ้นมาทำให้บอร์ดมีอนาล็อกอินพุตเพิ่มมากขึ้น จากเดิมมี 6 พอร์ต เพิ่มเป็น 8 พอร์ต เนื่องจากบอร์ด Arduino Mini เน้นที่ขนาดเล็ก ดังนั้นจึงไม่สามารถทำการโปรแกรมได้โดยตรงหากต้องการโปรแกรมบอร์ดจำเป็นต้องซื้อโมดูล USB to UART มาใช้แยกต่างหาก แต่ข้อดีของการไม่สามารถเสียบโปรแกรมได้โดยตรงคือหากโปรเจกต์อยู่ตัวแล้วความเสี่ยงที่จะถูกนำมาเขียนโปรแกรมเข้าไปใหม่ก็จะลดน้อยลงบอร์ด Arduino Mini ยังคงมี

รูปแบบคล้ายๆกับ Arduino เดิมคือใช้ชิป AT mega328 ที่ความถี่ 16 เมกะเฮิร์ตซ์(MHz) ภายในบอร์ดสามารถใช้แหล่งจ่ายไฟ 7-12 โวลต์ มาจ่ายได้หากมีแหล่งจ่ายไฟ 5 โวลต์ ก็สามารถนำมาจ่ายได้เลย



ภาพประกอบ 39 Arduino Mini [45]

9) Arduino Pro Mini เป็นบอร์ดที่แตกต่างจากบอร์ด Arduino Mini คือย้ายช่อง A4 A5 A6 A7 ออกมาภายในบอร์ดเพื่อให้บอร์ดมีขนาดที่เล็กลงกว่าเดิมอีกและมีให้เลือกใช้ทั้ง 5 โวลต์ และ 3.3 V Arduino Pro Mini ได้ใช้ไอซีเบอร์ AT mega328 เช่นเดิม แต่มีขนาดใหญ่ขึ้นเล็กน้อยทำให้ไอซีดูเต็มบอร์ดมากขึ้นและโมเดลที่ใช้แรงดันไฟ 3.3 โวลต์ ลดความถี่ลงเป็น 8 เมกะเฮิร์ตซ์(MHz) ใช้พื้นที่ Bootloader น้อยลงเหลือเพียง 500 ไบต์(B) การโปรแกรมยังคงต้องใช้โมดูล USB to UART ในการเชื่อมต่อเพื่อโปรแกรมเช่นเดิม



ภาพประกอบ 40 Arduino Pro Mini [45]

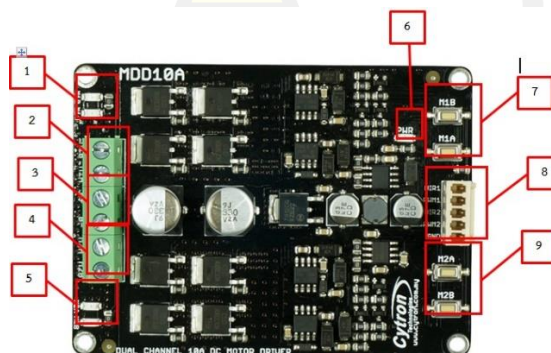
2.7.4 การควบคุมมอเตอร์

2.7.4.1 บอร์ดขับมอเตอร์กระแสตรง MDD10A

MDD10A เป็นชื่อรุ่นของบอร์ดขับมอเตอร์ซึ่งผลิตโดยบริษัท Cytron Technologies ในประเทศมาเลเซีย โดยบอร์ดสามารถขับมอเตอร์ไฟกระแสตรงได้สูงสุด 25 โวลต์ 10 แอมป์ สามารถควบคุมได้ทั้งทิศทางและความเร็ว ง่ายต่อการใช้งาน ขับมอเตอร์ได้พร้อมกันถึง 2 ตัว และใช้งานควบคู่กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ทุกตระกูล โดยมีคุณสมบัติทางเทคนิคดังนี้ [46]

- 1) ควบคุมได้ 2 ทิศทางสำหรับมอเตอร์กระแสตรงชนิดแบบมีแปรงถ่าน (Brushed Motor)

- 2) รองรับมอเตอร์ที่ใช้แรงดันได้ในช่วง 5 โวลต์ ถึง 25 โวลต์
- 3) ขั้วกระแสไฟต่อเนื่องได้สูงสุด 10 โวลต์ และขั้วกระแสไฟได้ถึงค่าสูงสุด (Peak) 30 แอมป์ ต่อเนื่องนานถึง 10 วินาที ในแต่ละช่อง
- 4) ใช้โซลิตคาปาซิเตอร์เพื่อช่วยให้การตอบสนองที่รวดเร็วและมีความคงทนช่วยให้มีอายุการใช้งานที่ยืนยาว
- 5) ใช้ NMOS H-Bridge โดยไม่จำเป็นต้องต่อ Heat sink ระบายความร้อน
- 6) ควบคุมความถี่ PWM (Pulse Width Modulation) สูงสุด 20 กิโลเฮิร์ตซ์(kHz) และรองรับการทางาน PWM ทั้งแบบ Locked-Antiphase และ Sign-Magnitude
- 7) มีปุ่มกดสำหรับทดสอบการหมุนของมอเตอร์ได้ 2 ทิศทางในแต่ละช่องเพื่อความรวดเร็วในการทดสอบ ไม่จำเป็นต้องต่อวงจรเพิ่มเติมหรือใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม
- 8) ขนาดบอร์ด กว้าง 84.5 มิลลิเมตร และยาว 62 มิลลิเมตร



ภาพประกอบ 41 ส่วนประกอบของบอร์ด MDD10A [46]

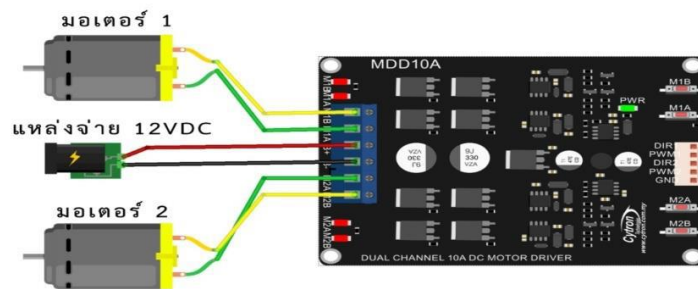
ส่วนประกอบของบอร์ด MDD10A มีดังนี้

- 1) หลอดไฟ LED สีแดงแสดงสถานการณ์ทำงานของมอเตอร์ที่ช่อง 1
- 2) ช่องเสียบมอเตอร์ของช่อง 1 โดยเป็น Output Pin ของบอร์ด
- 3) ช่องเสียบแหล่งจ่ายไฟ
- 4) ช่องเสียบมอเตอร์ของช่อง 2 โดยเป็น Output Pin ของบอร์ด
- 5) หลอดไฟ LED สีแดงแสดงสถานการณ์ทำงานของมอเตอร์ที่ช่อง 2

- 6) หลอดไฟ LED สีเขียวแสดงสถานะไฟที่จ่ายให้กับบอร์ด
- 7) ปุ่มทดสอบการควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ช่อง 1
- 8) ช่องเสียบ Input Pin ใช้สำหรับควบคุมการทำงานด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์
- 9) ปุ่มทดสอบการควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ช่อง 2

วิธีการใช้งานสามารถใช้งานได้ 2 วิธีด้วยกัน

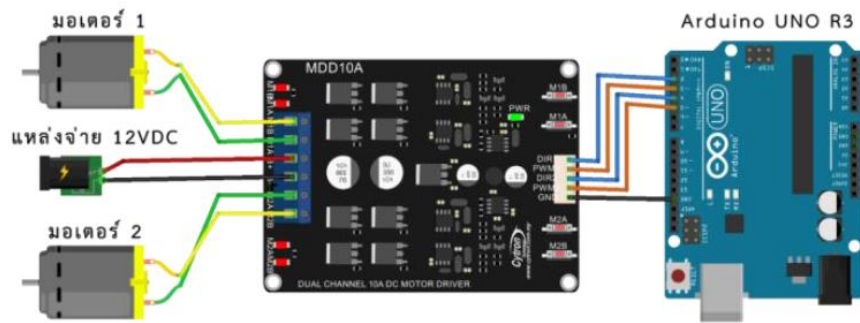
- 1) วิธีใช้โดยไม่ต้องวงจรหรือไมโครคอนโทรลเลอร์เพิ่มเติมซึ่งวิธีนี้จะใช้สำหรับทดสอบการควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ในเบื้องต้นเท่านั้นโดยการต่อ ดังภาพประกอบ 42



ภาพประกอบ 42 วิธีการใช้งานเพื่อการทดสอบมอเตอร์ [46]

เมื่อต่อวงจรดังภาพประกอบ 42 เสร็จเรียบร้อยแล้วป้อนแหล่งจ่ายไฟกระแสตรง 12 โวลต์ให้กับบอร์ด แล้วทดลองกดปุ่ม M1A บนบอร์ด MDD10A ค้างไว้มอเตอร์ 1 ก็จะหมุนทันทีเมื่อปล่อยปุ่มกดมอเตอร์ 1 ก็จะหยุดหมุนทันทีหากกดปุ่ม M1B ทิศทางการหมุนของมอเตอร์ก็จะหมุนทิศทางตรงกันข้ามกันกับการกดปุ่ม M1A ซึ่งขั้นตอนนี้จะขั้นตอนทดสอบมอเตอร์ 1 ที่ช่อง 1 ของบอร์ด MDD10A ในขณะเดียวกันก็สามารถกดปุ่ม M2A และ M2B ได้มอเตอร์ 2 ก็จะทำงานทันทีและเราสามารถให้มอเตอร์ 1 และ 2 ทำงานพร้อมกันได้เมื่อกดปุ่มของมอเตอร์ช่อง 1 และช่อง 2 พร้อมกันแต่ไม่สามารถกดปุ่ม M1A และ M1B หรือ M2A และ M2B พร้อมกันได้หากกดปุ่มพร้อมกัน 2 ปุ่มในช่องเดียวกันมอเตอร์จะหยุดหมุน

- 2) วิธีใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมทิศทางและความเร็ว ซึ่งวิธีนี้จะป็นวิธีที่นำไปใช้งานที่ต้องการควบคุมทั้งทิศทางและความเร็วของมอเตอร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานอื่นๆ ได้เช่น หุ่นยนต์รถบังคับ เป็นต้น ซึ่งบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้จะเป็นบอร์ด Arduino UNO R3 สามารถต่อวงจรใช้งานบอร์ดได้ดังรูป



ภาพประกอบ 43 การต่อวงจรใช้งานร่วมกับบอร์ด Arduino UNO R3 [46]
โดยหน้าที่ของแต่ละขา ประกอบไปด้วย

- 1) DIR1, DIR2 จะเป็น Pin สำหรับการควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ 1 และ 2 ตามลำดับ
- 2) PWM1, PWM2 จะเป็น Pin สำหรับควบคุมความเร็วการหมุนของมอเตอร์ 1 และ 2 ตามลำดับ
- 3) GND จะเป็น Pin ของ Ground บอร์ด

ในการเขียนโค้ดโปรแกรมการควบคุมมอเตอร์สามารถใช้คำสั่งในตัวอย่างดังภาพเพื่อไปประยุกต์ใช้ให้เข้ากับงาน [46]

```

1  #define DIR_1 2 // PIN ควบคุมทิศทางหมุนของมอเตอร์ 1
2  #define PWM_1 3 // PIN ความเร็วของมอเตอร์ 1
3  #define DIR_2 4 // PIN ควบคุมทิศทางหมุนของมอเตอร์ 2
4  #define PWM_2 5 // PIN ความเร็วของมอเตอร์ 2
5
6  #define SPEED_MOTOR_1 255 // ค่าความเร็วมอเตอร์ 1 มีค่าตั้งแต่ 0 - 255 (Duty Cycle)
7  #define SPEED_MOTOR_2 255 // ค่าความเร็วมอเตอร์ 2 มีค่าตั้งแต่ 0 - 255 (Duty Cycle)
8
9  void setup() {
10 pinMode(DIR_1, OUTPUT); // ตั้งค่า DIR_1 ของมอเตอร์ 1 เป็น Output
11 pinMode(PWM_1, OUTPUT); // ตั้งค่า PWM_1 ของมอเตอร์ 1 เป็น Output
12 pinMode(DIR_2, OUTPUT); // ตั้งค่า DIR_2 ของมอเตอร์ 2 เป็น Output
13 pinMode(PWM_2, OUTPUT); // ตั้งค่า PWM_2 ของมอเตอร์ 2 เป็น Output
14 analogWrite(PWM_1, SPEED_MOTOR_1); // สร้างสัญญาณ PWM เป็น Output ให้กับมอเตอร์ 1
15 analogWrite(PWM_2, SPEED_MOTOR_2); // สร้างสัญญาณ PWM เป็น Output ให้กับมอเตอร์ 2
16 }
17
18 void loop() {
19 digitalWrite(DIR_1, LOW); // กำหนดทิศทางให้มอเตอร์ 1 หมุนตามเข็มนาฬิกา
20 digitalWrite(DIR_2, LOW); // กำหนดทิศทางให้มอเตอร์ 2 หมุนตามเข็มนาฬิกา
21 delay(1000); // หน่วงเวลา 1 วินาที
22 digitalWrite(DIR_1, HIGH); // กำหนดทิศทางให้มอเตอร์ 1 หมุนทวนเข็มนาฬิกา
23 digitalWrite(DIR_2, HIGH); // กำหนดทิศทางให้มอเตอร์ 2 หมุนทวนเข็มนาฬิกา
24 delay(1000); // หน่วงเวลา 1 วินาที
25 }

```

ภาพประกอบ 44 ตัวอย่างโค้ดโปรแกรมการควบคุมมอเตอร์ [46]

2.7.4.2 บอร์ดขับมอเตอร์กระแสตรง DC Motor Drive Module BTN7960

DC Motor Drive Module BTN7960 Full-Bridge (6-27 V 47 Amax) โมดูลขับดีซีมอเตอร์ แบบฟูลบริดจ์ ใช้ไอซีเบอร์ BTN7960 สเปคกระแสสูงสุด 47 แอมป์ ควบคุมมอเตอร์หมุนกลับทางได้ [47]



ภาพประกอบ 45 DC Motor Drive [47]

- 1) ใช้สำหรับขับดีซีมอเตอร์ที่ต้องการกระแสสูงๆ
- 2) ใช้สัญญาณ PWM ในการควบคุมความเร็ว รองรับความเร็ว ของ PWM ได้ถึง 25 กิโลเฮิร์ตซ์ (KHz)
- 3) สามารถควบคุมมอเตอร์ได้ 1 ตัว และควบคุมหมุนซ้าย ขวา (กลับทาง) ได้
- 4) แรงดันไฟเลี้ยงมอเตอร์ 6-27 โวลต์ (Vdc)
- 5) กระแสเอาต์พุตสูงสุด 47 แอมป์ (Amax) (กำหนดจากสเปคของ BTS7960) ในทางปฏิบัติ ควรใช้กระแสไม่เกิน 20 แอมป์ เพื่อความปลอดภัย
- 6) แรงดันอินพุต (PWM) สำหรับใช้ควบคุม 5 โวลต์ (Vdc) DC Motor Drive (6-27 V 47Amax) 1x BN7960 BTS7960 H-Bridge

2.7.4.3 บอร์ด Relay

บอร์ด Relay 1 ช่อง 30 แอมป์ 5 โวลต์(Vdc) บอร์ด Relay 5 โวลต์ ขนาด 220 โวลต์(Vac) กระแส 30 แอมป์ แบบแยกสัญญาณ Isolation ป้องกันอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์จากไฟฟ้าแรงสูง ทำงานแบบ Active High หรือเมื่อมีไฟ 3.3-5 โวลต์ มาทริกที่ขา IN การต่อขาใช้งาน GND 0 โวลต์ VCC 5 โวลต์ IN 5 โวลต์ ออปโตคัปเปิลอร์ออนบอร์ด EL817 ตัวแยกแสงมีความสามารถในการป้องกันการรบกวน 5 โวลต์ 30 แอมป์/220 โวลต์(Vac) ถ่ายทอด 30 แอมป์/30 โวลต์(Vdc) ถ่ายทอดชีวิตยาวต่อเนื่องถึง 100,000 ครั้งโมดูลสามารถเชื่อมโยงโดยตรงแลไมโครคอนโทรลเลอร์ I/O พร้อม

สัญญาณออกโมดูลมีการป้องกันไดโอดอิสระอยู่ตลอดเวลาตอบสนองสั้นๆ โมดูลมีเอาต์พุตปกติ (NO), ปกติปิด (NC) เอาต์พุตขนาด PCB 34 x 39 มิลลิเมตร [48]



ภาพประกอบ 46 บอร์ด Relay [48]

2.8 บทสรุป

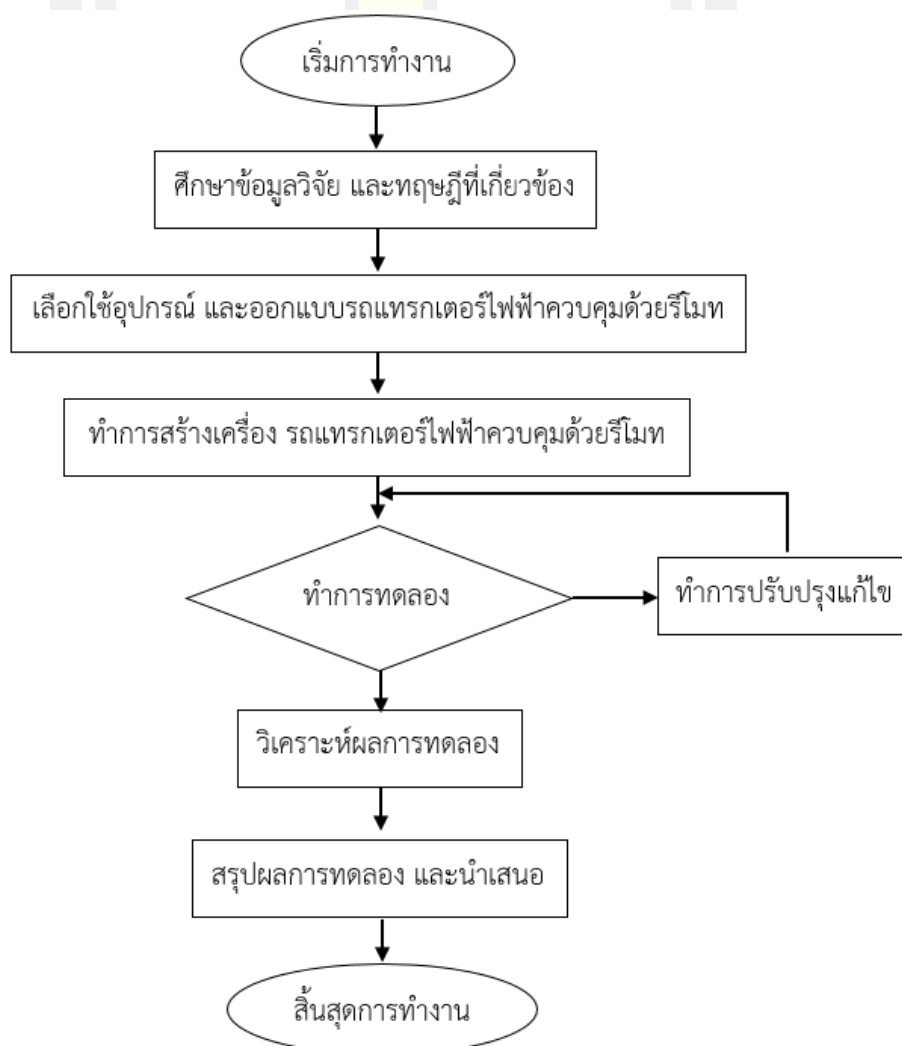
บทนี้กล่าวถึงงานวิจัยและทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนารถแทรกเตอร์ไฟฟ้าควบคุมด้วยรีโมท โดยกล่าวถึงประเภท การออกแบบระบบโครงสร้างอย่างง่ายของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า ระบบควบคุมรีโมท ระบบควบคุมมอเตอร์ และหลักการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ ทฤษฎีโครงสร้าง ทฤษฎีเกี่ยวกับมอเตอร์ หลักการทำงานของมอเตอร์กระแสตรง ระบบควบคุมและการขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรง ทฤษฎีเกี่ยวกับแบตเตอรี่ ระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์คู่ของยานยนต์ ซึ่งเป็นพื้นฐานที่จะนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

หลังจากที่ได้ศึกษาทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 แล้วนั้น ในบทนี้เป็นการนำเสนอแผนการดำเนินงาน แผนการออกแบบและร่างต้นแบบ เพื่อใช้ในการสร้างชุดทดลองจริงในลำดับถัดไป เพื่อให้ได้งานการดำเนินการวิจัยออกมาตามขอบเขตที่กำหนดไว้

3.1 แผนการดำเนินงาน



ภาพประกอบ 47 Flowchart แสดงแผนการดำเนินงาน

3.2 ขั้นตอนการคำนวณเพื่อเลือกใช้อุปกรณ์

ในการคำนวณเพื่อเลือกอุปกรณ์ จำเป็นที่จะต้องหาแรงทั้งหมดที่กระทำต่อรถในการเคลื่อนที่จากน้ำหนักของรถทั้งหมด สัมประสิทธิ์แรงต้านการหมุนของล้อตามสภาพของถนน และอื่นๆ

3.2.1 วิธีการคำนวณเพื่อหาพิกัดกำลังของมอเตอร์ในการขับเคลื่อน

1) การคำนวณหาพิกัดมอเตอร์จำเป็นจะต้องทราบข้อมูล น้ำหนักทั้งหมดของรถ (m) ดังตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของดิน (μ_{rr}) ดังตารางที่ 3 และค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานของรถ (Cd) ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 2 น้ำหนักของรถ

รายการ	จำนวน	น้ำหนัก (Kg)
แบตเตอรี่ 12 โวลต์ 40 แอมป์	2	21.2
แบตเตอรี่ 12 โวลต์ 50 แอมป์	1	12
มอเตอร์ 250 วัตต์ 12 โวลต์	2	6
มอเตอร์ 1,000 วัตต์ 24 โวลต์	1	8
กล่องควบคุมมอเตอร์ 1,000 วัตต์ 24 โวลต์	1	1
โครงรถ	1	20

จากตารางที่ 1 น้ำหนักทั้งหมดของรถแทรกเตอร์แทรกเตอร์ไฟฟ้า คือ 68.2 kg

ตารางที่ 3 สัมประสิทธิ์แรงต้านการหมุนของล้อ (μ_{rr}) ตามชนิดและสภาพของถนน

Type/Condition	μ_{rr}
Paved, Concrete	
- excellent	0.014-0.018
- fair	0.018-0.020
Flagstone	0.023-0.030
Gravel	0.020-0.025
Soil	
- dried	0.025-0.035
- wet	0.050-0.150
Sand	0.100-0.300

จากตารางที่ 3 พื้นที่ทดสอบเป็นดินแห้งขรุขระ ซึ่งมีสัมประสิทธิ์แรงต้านทานการหมุนใกล้เคียงกับถนนทราย จึงกำหนดให้มีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านทานการหมุนของล้อ (μ_{rr}) คือ 0.3

ตารางที่ 4 Climbing coefficient (C_d)

Vehicle Type	C_d
Aerodynamic design	0.15-0.20
Research design	0.22
General car	0.3
Sport car	0.43
Adapted car	0.53
Universal Sport car	0.57-0.63
Motorcycle	0.56-0.63
Convertible car	0.6-0.7
Bus	0.6-0.7
Truck	0.7-1.50

จากตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานของรถ (C_d) ที่ในการออกแบบการวิจัย คือ 0.22

2) จากตารางที่ 2, 3 และ 4 ทำให้ได้ข้อมูลมาเพียงพอสำหรับการคำนวณ [21] ดังต่อไปนี้

การคำนวณหาแรงต้านทานการหมุน (F_{rr}) แรงต้านทานการหมุนเป็นการสูญเสียในตัวอย่างที่เกิดขึ้น โดยปัจจัยหลักมาจากการเสีรูปร่างของล้ออย่างต่อเนื่องเมื่อติดไปกับพื้นถนน รวมไปถึงการเกาะยึดและสิ้นเปลืองของดอกยาง สามารถหาความสัมพันธ์ของแรงต้านทานการหมุน

$$\text{จากสมการ (2.1) จะได้ } F_{rr} = \mu_{rr}mg\cos(\alpha) \quad (3.1)$$

โดยที่ F_{rr} คือ แรงต้านทานการหมุน (N)

μ_{rr} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานการหมุน

m คือ มวลรวมทั้งหมดของรถ (kg)

g คือ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก เท่ากับ 9.81 m/s^2

α คือ มุมความลาดเอียงของพื้นถนน (rad)

จะได้
$$F_{rr} = 0.30 \times 68.2 \times 9.81 \times \cos(0)$$

$$F_{rr} = 200.71 \text{ นิวตัน}$$

ดังนั้น แรงต้านทานการหมุนของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า คือ 200.71 นิวตัน

การคำนวณแรงต้านจากอากาศ (F_{ad}) ซึ่งเกิดจากปรากฏการณ์ใน 2 ส่วน คือ จากแรงเฉือนอากาศที่ไหลผ่านตัวรถ และแรงต้านอากาศจากลักษณะรูปร่างของตัวถังรถที่ต้านกระแสอากาศจากการขับเคลื่อนตัวรถ สามารถคำนวณจากสมการดังนี้

จากสมการ (2.2) จะได้
$$F_{ad} = \frac{1}{2} \rho A C_d v^2 \quad (3.2)$$

โดยที่ F_{ad} คือ แรงต้านทานจากอากาศ (N)

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของรถ (m^2)

C_d คือ สัมประสิทธิ์ความต้านทาน (Drag coefficient)

v คือ ความเร็วของอากาศ (m/s)

จะได้
$$F_{ad} = \frac{1}{2} \times 1.225 \times 39.6 \times 0.22 \times 1^2$$

$$F_{ad} = 5.34 \text{ นิวตัน}$$

ดังนั้น แรงต้านทานจากอากาศ คือ 5.34 นิวตัน

แรงต้านทางลาดชัน (F_{hc}) คือน้ำหนักที่ถ่ายไปตามทางลาดชัน หรือหากรถลงทางลาดชันก็จะเกิดแรงย่อยของน้ำหนักของรถขึ้นในทิศทางเดียวกันกับการเคลื่อนที่ของรถยนต์ และสามารถแสดงได้ดังสมการดังนี้

จากสมการ (2.3) จะได้
$$F_{hc} = mg \sin(\alpha) \quad (3.3)$$

โดยที่ F_{hc} คือ แรงต้านทางลาดชัน (N)

m คือ มวลรวมทั้งหมดของรถ (kg)

g คือ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก เท่ากับ 9.81 m/s^2

α คือ มุมความลาดเอียงของพื้นถนน (rad)

จะได้
$$F_{hc} = 68.2 \times 9.81 \times \sin(0)$$

$$F_{hc} = 0 \text{ นิวตัน}$$

ดังนั้น แรงต้านทานทางลาดชัน คือ 0 นิวตัน

แรงต้านจากความเร่ง (F_{acc}) สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนคือ แรงเพื่อความเร่งเชิงเส้น และแรงเพื่อความเร่งเชิงมุม สำหรับแรงต้านในขณะขับเคลื่อนสามารถแสดงในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

จากสมการ (2.4) จะได้
$$F_{acc} = ma \tag{3.4}$$

โดยที่ F_{acc} คือ แรงต้านจากความเร่ง (N)

m คือ น้ำหนักรวมของรถยนต์ (kg)

a คือ ความหน่วง (m/s^2)

จะได้
$$F_{acc} = 68.2 \times 0$$

$$F_{acc} = 0 \text{ นิวตัน}$$

ดังนั้น แรงต้านทานทางจากความเร่ง คือ 0 นิวตัน

จากสมการที่ 3.1 3.2 3.3 และ 3.4 จะได้ค่าแรงต้านต่างๆ มาใช้ประกอบการหาแรงทั้งหมดที่กระทำต่อรถในการเคลื่อนที่ ดังสมการต่อไปนี้

ดังนั้นแรงต้านทานรวมคือ
$$F_{total} = F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} + F_{acc} \tag{3.5}$$

$$F_{total} = 200.71 + 5.34 + 0 + 0$$

$$F_{total} = 206.05 \text{ นิวตัน}$$

หากำลังของมอเตอร์ในการขับเคลื่อน จากสมการจะได้

$$P = F_{total} + v \quad (3.6)$$

$$P = 206.05 + 1$$

$$P = 207.05 \text{ วัตต์}$$

ออกแบบเพื่อ 25 เปอร์เซ็นต์ จะได้ $P = 207.05 \times 1.25 = 258.81$ วัตต์

ดังนั้น พิกัดกำลังมอเตอร์ของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลื่อนที่ คือ 258.81 วัตต์

ในงานวิจัยนี้ใช้ระบบขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่ จึงจำเป็นต้องใช้มอเตอร์ 250 วัตต์ 12 โวลต์ จำนวน 2 ตัวในการขับเคลื่อน

3) หาความเร็วรอบของล้อ กำหนดให้ขนาดของล้อมีเส้นผ่านศูนย์กลาง คือ $d = 32$ เซนติเมตร จากสมการจะได้

$$C = \pi d \quad (3.7)$$

$$C = \pi \times 32$$

$$C = 100.48 \text{ เซนติเมตร}$$

กำหนดให้รถวิ่งที่ความเร็วสูงสุด 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ต้องการหาความเร็วรอบของล้อรถจะได้ดังนี้

$$\text{จากสมการจะได้ } V = \frac{S}{T} \quad (3.8)$$

$$V = \frac{11,000}{60 \times 60}$$

$$V = 3.06 \text{ เมตรต่อนาที}$$

$$\text{จากสมการจะได้ } n = \frac{V}{C} \quad (3.9)$$

$$n = \frac{183.33}{1.0048}$$

$$n = 182.45 \text{ รอบต่อนาที}$$

จากการคำนวณ จะได้จำนวนรอบของล้อที่หมุนสูงสุด ขณะที่รถขับเคลื่อนที่ความเร็วสูงสุด 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง คือ 182.45 รอบต่อนาที และจะได้จำนวนรอบที่ความเร็วต่างๆ ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ความเร็วรอบของล้อที่ได้จากการคำนวณ

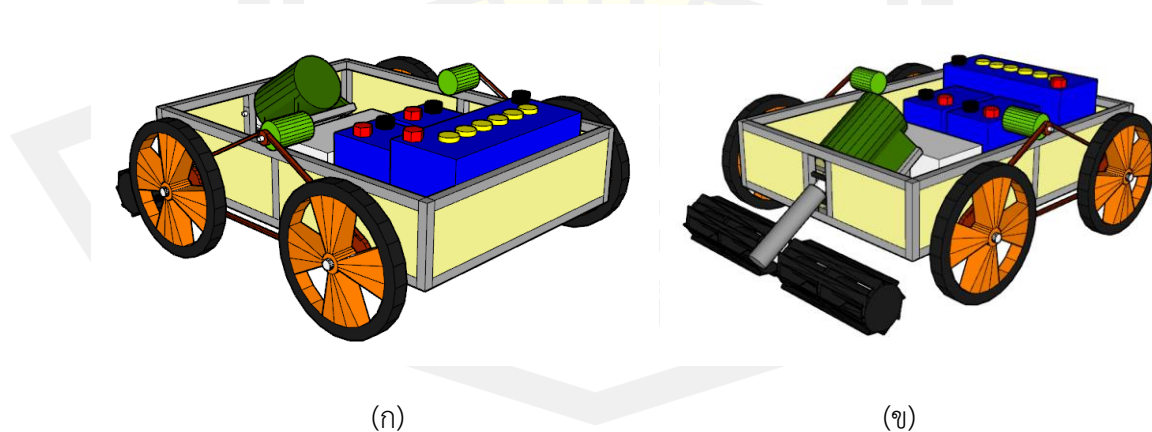
ความเร็ว (km/hr)	รอบต่อนาที (RPM)
4	66.35
5	82.94
6	99.52
7	116.1
8	132.69
9	149.28
10	165.87
11	182.46

3.3 การออกแบบรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า

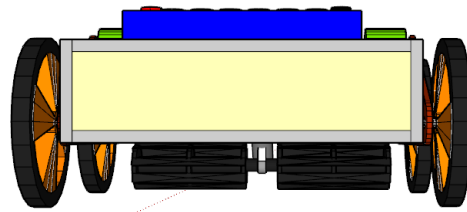
การพัฒนารถแทรกเตอร์ไฟฟ้าควบคุมด้วยรีโมท จำเป็นต้องมีการออกแบบโครงสร้างของรถแทรกเตอร์ออกมาอย่างเป็นระบบ เพื่อความสะดวกสบาย และลดน้ำหนักการบรรทุกคนขับที่มีผลต่อระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ลดลงกว่า 70% [7]

3.3.1 การออกแบบโครงสร้างรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า

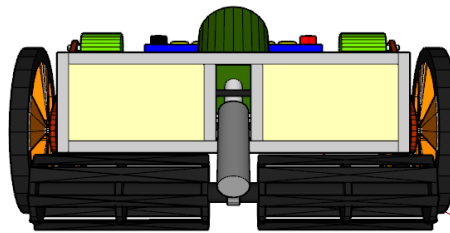
การออกแบบระบบโครงสร้างของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าอย่างง่าย เฉพาะตัวโครงรถ มีความกว้าง 66 เซนติเมตร ความยาว 100 เซนติเมตร และความสูง 30 เซนติเมตร ดังภาพประกอบ 48-53



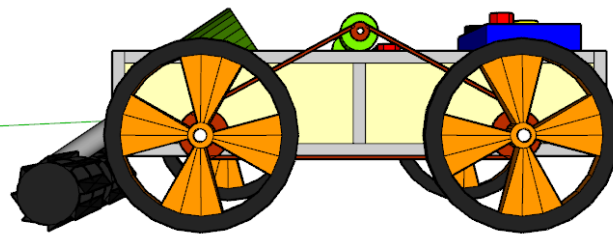
ภาพประกอบ 48 Isometric (a) ด้านหน้า (b) ด้านหลัง



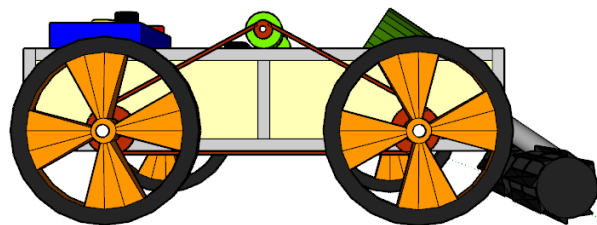
ภาพประกอบ 49 Front View



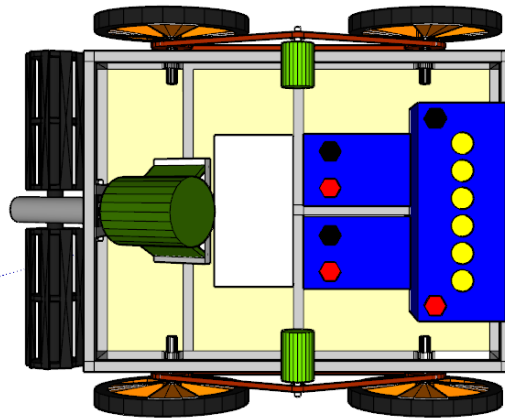
ภาพประกอบ 50 Back View



ภาพประกอบ 51 Right View

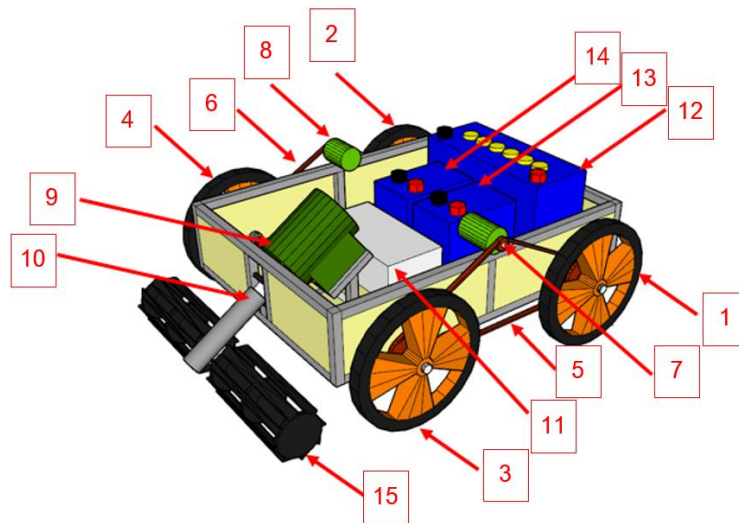


ภาพประกอบ 52 Left View



ภาพประกอบ 53 Top View

เมื่อทำการออกแบบโครงสร้างของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าอย่างง่าย ทำการออกแบบระบบส่งกำลังและระบบควบคุมสำเร็จ ในการติดตั้งอุปกรณ์ในตัวรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าควบคุมด้วยรีโมทเบื้องต้น จะมีรายละเอียด ดังภาพประกอบ 54



ภาพประกอบ 54 ส่วนประกอบของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าควบคุมด้วยรีโมท โดยอุปกรณ์ในรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ดังนี้

1) ล้อหน้าด้านขวา (Right Front Wheel) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 เซนติเมตร มีขอบกว้าง 4.5 เซนติเมตร สามารถรับน้ำหนักได้ 100 กิโลกรัม

2) ล้อหน้าด้านซ้าย (Left Front Wheel) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 เซนติเมตร มีขอบกว้าง 4.5 เซนติเมตร สามารถรับน้ำหนักได้ 100 กิโลกรัม

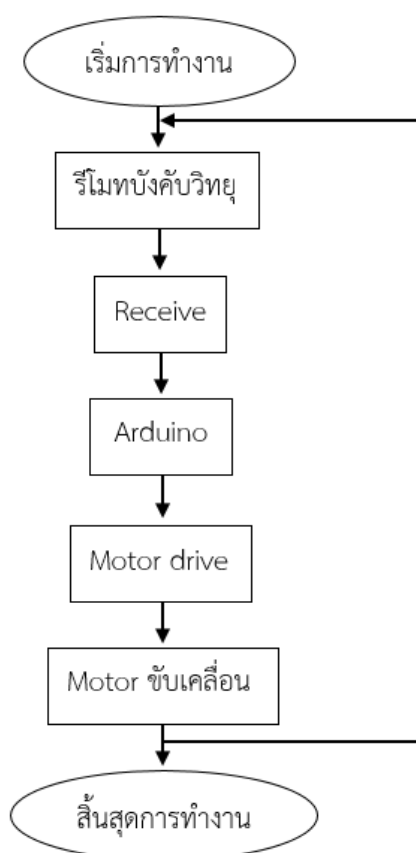
- 3) ล้อหลังด้านขวา (Right Rear Wheel) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 เซนติเมตร มีขอบกว้าง 4.5 เซนติเมตร สามารถรับน้ำหนักได้ 100 กิโลกรัม
- 4) ล้อหลังด้านซ้าย (Left Rear Wheel) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 เซนติเมตร มีขอบกว้าง 4.5 เซนติเมตร สามารถรับน้ำหนักได้ 100 กิโลกรัม
- 5) โช้ด้านขวา ใช้สำหรับขับเฟืองล้อฝั่งทางด้านขวาทั้งหมดโดยตัวส่งกำลังหลักจากมอเตอร์ 250 วัตต์
- 6) โช้ด้านซ้าย ใช้สำหรับขับเฟืองล้อฝั่งทางด้านซ้ายทั้งหมดโดยตัวส่งกำลังหลักจากมอเตอร์ 250 วัตต์
- 7) มอเตอร์ 250 วัตต์ 12 โวลต์ ด้านขวา ใช้สำหรับขับล้อฝั่งทางด้านขวาทั้งหมด โดยใช้เฟืองจากมอเตอร์กับโช้เป็นตัวกลางในการเชื่อมกับเฟืองล้อรถเพื่อส่งกำลังและขับเคลื่อน
- 8) มอเตอร์ 250 วัตต์ 12 โวลต์ ด้านซ้าย ใช้สำหรับขับล้อฝั่งทางด้านซ้ายทั้งหมด โดยใช้เฟืองจากมอเตอร์กับโช้เป็นตัวกลางในการเชื่อมกับเฟืองล้อรถเพื่อส่งกำลังและขับเคลื่อน
- 9) มอเตอร์ 1,000 วัตต์ 24 โวลต์ ใช้เป็นต้นกำลังหลักในการปั่นดิน โดยเชื่อมกับแกนหมุนเพื่อหมุนเฟืองที่อยู่ข้างในเครื่องปั่นดิน จากนั้นใบปั่นดินก็จะหมุน
- 10) แกนหมุนมอเตอร์ ใช้เป็นตัวส่งกำลังที่ต่อกับเครื่องปั่นดิน
- 11) กล่องระบบควบคุมรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าควบคุมด้วยรีโมท จะมีแผงวงจรสำหรับควบคุมระบบส่งกำลังและระบบขับเคลื่อนด้วยสัญญาณวิทยุ
- 12) แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 50 แอมป์ ใช้เป็นพลังงานหลักเพื่อส่งพลังงานให้กับมอเตอร์ 250 วัตต์ ในการขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า
- 13) แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 40 แอมป์ ต่อกับแบตเตอรี่อีก 1 ตัว จะได้เป็น 24 โวลต์ ใช้เป็นพลังงานหลักเพื่อส่งพลังงานให้กับมอเตอร์ 1,000 วัตต์ ในการปั่นดิน
- 14) แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 40 แอมป์ ต่อกับแบตเตอรี่ 13) 1 ตัว จะได้เป็น 24 V ใช้เป็นพลังงานหลักเพื่อส่งพลังงานให้กับมอเตอร์ 1,000 วัตต์ ในการปั่นดิน

15) เครื่องปั้นดิน จะอยู่ที่ด้านหลังของรถโดยยื่นออกมาจากตัวรถ ประมาณ 30 เซนติเมตร ใช้สำหรับปั้นดินให้ละเอียด

3.3.2 ระบบขับเคลื่อนและชุดควบคุมไฟฟ้าของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า

ระบบส่งกำลังในรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า รับพลังงานจากแบตเตอรี่ โดยมีเบรกเกอร์ป้องกันการช็อตที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์อื่นๆ ตัวแปลง DC-DC ผ่านชุดควบคุมมอเตอร์ ซึ่งตัวควบคุมมอเตอร์นี้ประกอบด้วยอุปกรณ์ เร่งความเร็วมอเตอร์ เดินหน้า-ถอยหลัง หน้าจอแสดงผล เป็นต้น เพื่อควบคุมการทำงานของมอเตอร์ตามต้องการซึ่งมอเตอร์จะติดตั้งกับชุดเพลาล้ออิสระ ที่มีส่วนประกอบคือ ล้อด้านขวา หน้า-หลัง และล้อด้านซ้าย หน้า-หลัง ควบคุมการหมุนของล้อจากมอเตอร์ฝั่งละตัวในการเคลื่อนที่

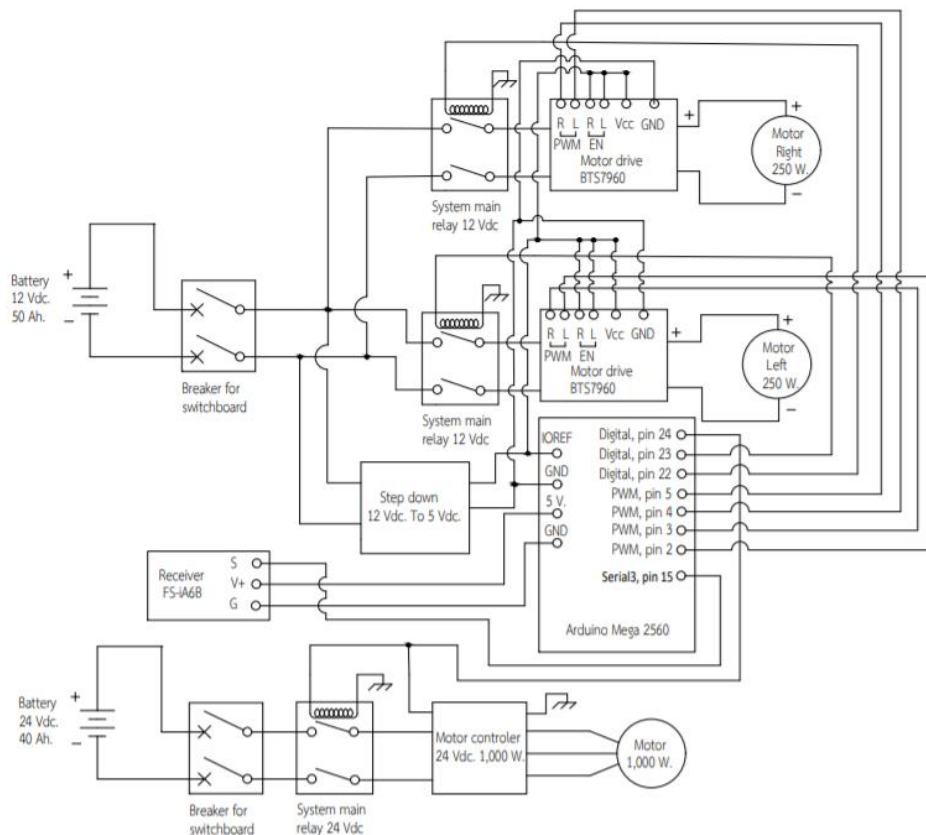
การออกแบบระบบควบคุมการขับเคลื่อนของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าควบคุมด้วยรีโมทนั้น ได้ออกแบบการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เช่น คันเร่ง ระบบเดินหน้า-ถอยหลัง ระบบบังคับเลี้ยว และการเปิด-ปิด การทำงาน เพื่อใช้ในการไถพรวน ดังภาพประกอบ 55



ภาพประกอบ 55 Flowchart แสดงหลักการทำงานของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าควบคุมด้วยรีโมท

3.3.3 การออกแบบระบบควบคุมรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าด้วยรีโมท

การออกแบบระบบควบคุมรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าด้วยรีโมท ในการควบคุมมอเตอร์เพื่อใช้ในการขับเคลื่อน และควบคุมมอเตอร์เพื่อใช้ในการปั่นดิน ดังภาพประกอบ 56 โดยมีการแบ่งจ่ายแรงดันขาเข้าออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) แรงดันขาเข้า 12 โวลต์ จะจ่ายให้กับโพลดมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนขนาด 250 วัตต์ จำนวน 2 ตัว และ 2) แรงดันขาเข้า 24 โวลต์ จะจ่ายให้กับโพลดมอเตอร์ที่ใช้ในการปั่นดิน 1,000 วัตต์



ภาพประกอบ 56 Schematic diagram for the electric tractor

3.4 อุปกรณ์ที่ใช้กับรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า

3.4.1 รีโมทคอนโทรล และรีซีฟเวอร์สัญญาณวิทยุ

รีโมทคอนโทรล (remote control) คือเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่ง ใช้สำหรับควบคุมการดำเนินการของสิ่งประดิษฐ์หรือเครื่องจักรต่างๆ จากระยะไกล โดยไม่ใช่สายไฟเป็นตัวส่งสัญญาณ แต่ใช้อินฟราเรดแทน หรือใช้สัญญาณวิทยุ [44]

รีซีฟเวอร์สัญญาณวิทยุ คือเครื่องรับสัญญาณเข้ามาทางสายอากาศ โดยใช้การกรองด้วยอิเล็กทรอนิกส์ electronic filters เพื่อแยกสัญญาณวิทยุเฉพาะช่วงที่ต้องการออกจากสัญญาณอื่นที่รับเข้ามาทางสายอากาศ แล้วขยายมันให้ถึงระดับที่เหมาะสมในการใช้ในกระบวนการอื่นต่อไป [49]



ภาพประกอบ 57 รีโมทคอนโทรล และรีซีฟเวอร์สัญญาณวิทยุ [44]

มีรายละเอียด Specifications: FLYSKY FS-i6X Transmitter [49] ดังต่อไปนี้

- Channels 6-10 (default 6)
- Frequency range 2.408-2.475 กิกะเฮิรตซ์
- Bandwidth 500 กิโลเฮิรตซ์
- น้ำหนัก 392 กรัม
- Power input 4 x 1.5V AA (6 V)
- Display STN LCD, 128 x 64 lattice, VA 73 x 39 มิลลิเมตร, with white backlight

และรายละเอียด FLYSKY FS - iA10B Receiver [49] ดังต่อไปนี้

- Channels 10
- RF range 2.4055-2.475 กิกะเฮิรตซ์
- RF channels 140
- RF receiver sensitivity -105 dBm
- Bandwidth 500 กิโลเฮิรตซ์

- Power 4-6.5 โวลต์ (Vdc)
- Antenna length 26 มิลลิเมตร (dual antennas)
- น้ำหนัก 17.6 กรัม
- ขนาด 50.6 x 34.9 x 14.9 มิลลิเมตร

3.4.2 Arduino Mega 2560

ใช้ติดต่อสื่อสารและควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้า ด้วยการเขียนโปรแกรมให้กับ MCU เพื่อควบคุมการรับส่งสัญญาณทางไฟฟ้าตามเงื่อนไขต่างๆ สำหรับใช้ควบคุมความเร็วและทิศทางการหมุนของมอเตอร์ [45]



ภาพประกอบ 58 Arduino Mega 2560 [45]

โดยมีรายละเอียด Summary [50] ดังต่อไปนี้

- Microcontroller ATmega2560
- Operating Voltage 5 โวลต์
- Input Voltage (recommended) 7-12 โวลต์
- Input Voltage (limits) 6-20 โวลต์
- Digital I/O Pins 54 (of which 14 provide PWM output)
- Analog Input Pins 16
- DC Current per I/O Pin 40 มิลลิแอมป์
- DC Current for 3.3 โวลต์ Pin 50 มิลลิแอมป์
- Flash Memory 256 กิโลไบต์ of which 8 กิโลไบต์ used by bootloader

- SRAM 8 กิโลไบต์
- EEPROM 4 กิโลไบต์
- Clock Speed 16 เมกะเฮิรตซ์

3.4.3 มอเตอร์ขับเคลื่อน

มอเตอร์ DC 250 W 12 V จำนวน 2 ตัว เพื่อใช้ในการขับเคลื่อน ความเร็วรอบ 306 RPM
Rated current 23 A



ภาพประกอบ 59 มอเตอร์กระแสตรง 250 วัตต์ 12 โวลต์ [51]

โดยมีรายละเอียด Specification (Motor) [51] ดังต่อไปนี้

- Type Brushed
- Power 250 วัตต์
- Voltage 12 โวลต์ (Vdc)
- Rated torque 7.82 นิวตันเมตร
- Rated speed 306 รอบต่อนาที
- Rated current 23 แอมป์
- Motor efficiency 78 เปอร์เซ็นต์

3.4.4 มอเตอร์ปั่นดิน

มอเตอร์ DC 1,000 วัตต์ 24 โวลต์ จำนวน 1 ตัว เพื่อใช้ในการปั่นดิน ความเร็วรอบ 2,600 รอบต่อนาที Rated current 34 แอมป์



ภาพประกอบ 60 มอเตอร์ 1,000 วัตต์ 24 โวลต์ [52]

โดยมีรายละเอียด Specification (Motor) [52] ดังต่อไปนี้

- Power 1000 วัตต์
- Rate Voltage 17-50 โวลต์(Vdc)
- Voltage 24 โวลต์(Vdc)
- Rated speed 500 รอบต่อนาที (+-5 เปอร์เซ็นต์)
- Rated Torque 35 นิวตัน
- น้ำหนัก 6.2 กิโลกรัม
- Motor efficiency >80 เปอร์เซ็นต์
- Rated current 34 แอมป์
- แกนเพลลา 19 มิลลิเมตร

3.4.5 แบตเตอรี่

1) แบตเตอรี่ ขนาด 12 โวลต์ 40 แอมป์ จำนวน 2 ลูก เพื่อใช้ต่ออนุกรมกันให้ได้ 24 โวลต์ ใช้กับมอเตอร์ 1,000 วัตต์ ในการปั่นดิน



ภาพประกอบ 61 แบตเตอรี่ ขนาด 12 โวลต์ 40 แอมป์ [53]

รายละเอียด แบตเตอรี่ MFX-50L [53] ดังต่อไปนี้

- ยี่ห้อ GS Battery รหัส 44B19L
- ชนิด GS แบตเตอรี่กึ่งแห้ง (Maintenance Free Battery, GS Hybrid Battery)
- 12 โวลต์(V)
- 40 แอมป์(Ah)
- ขนาด (กว้าง x ยาว x สูง) 12.7 x 18.7 x 22.5 เซนติเมตร

2) แบตเตอรี่ ขนาด 12 โวลต์ 50 แอมป์ จำนวน 1 ลูก เพื่อใช้กับมอเตอร์ 250 วัตต์ 2 ตัว ในการขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า



ภาพประกอบ 62 แบตเตอรี่ ขนาด 12 โวลต์ 50 แอมป์ [54]

รายละเอียด แบตเตอรี่ 3K PMF50L [54] ดังต่อไปนี้

- ประเภทแบตเตอรี่ : ชนิดไม่ต้องดูแลน้ำกลั่น (กึ่งแห้ง)
- 3K Battery รุ่น PMF50L-50 Ah
- ขนาด (กว้าง x ยาว x สูง) 12.7 x 23.6 x 22.2 เซนติเมตร

- 12 โวลต์(V)
- 50 แอมป์(Ah)

3.4.6 เครื่องมือปั่นดิน

เครื่องปั่นดิน ใบตรงยาว 64 มิลลิเมตร ก้านแต่ละก้านยาว 28 มิลลิเมตร 9 ฟัน ใช้สำหรับปั่นดินหรือตายหญ้าได้ โดยนำมาต่อเข้ากับมอเตอร์เพื่อปั่นดินขนาด 1,000 วัตต์



ภาพประกอบ 63 เครื่องมือปั่นดิน [55]

รายละเอียดสินค้า หัวพรวนดิน หัวตายหญ้า ตะกูดิน [55] ดังต่อไปนี้

- วัสดุคุณภาพสูง แข็งแรง ทนทานด้วยชุดเฟืองซบแข็ง อายุการใช้งานยาวนาน
- ใบตรงยาว 64 เซนติเมตร
- ใช้กับก้านท่อ 28 มิลลิเมตร และแกนในฟันเฟือง 9 ฟัน
- ระบบเกียร์แบบเฟืองตัวหนอน อัตราทำ 1:40
- ถ้าใช้กับเครื่องตัดหญ้าจะได้รอบหมุนที่ 120-180 รอบต่อนาที
- เหมาะสำหรับดินร่วนหรือดินที่ไม่แข็งมาก หรือดินที่ผ่านการไถมาแล้ว(ไม่สามารถใช้พรวนดินแข็งได้)

3.4.7 บอร์ดขับมอเตอร์

Motor drive บอร์ดขับมอเตอร์ IBT-2 (BTS7960) ควบคุมแรงดัน 6-27 โวลต์ และกระแสสูงสุด 47 แอมป์ ใช้กับมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว และแยกเป็นจำนวน 3 ชุด



ภาพประกอบ 64 Motor drive IBT-2 (BTS7960) [47]

โดยมีรายละเอียด Specification Motor drive IBT-2 (BTS7960) [47] ดังต่อไปนี้

- ใช้สำหรับขับดีซีมอเตอร์ที่ต้องการกระแสสูงๆ
- ใช้สัญญาณ PWM ในการควบคุมความเร็ว รองรับความเร็ว ของ PWM ได้ถึง 25 กิโลเฮิรตซ์
- สามารถควบคุมมอเตอร์ได้ 1 ตัว และควบคุมหมุนซ้าย ขวา (กลับทาง) ได้
- แรงดันไฟเลี้ยงมอเตอร์ 6-27 โวลต์(Vdc)
- กระแสเอาต์พุตสูงสุด 43 แอมป์ (กำหนดจากสเปคของ BTS7960) ในทางปฏิบัติควรใช้กระแสไม่เกิน 20 แอมป์ เพื่อความปลอดภัย
- แรงดันอินพุต (PWM) สำหรับใช้ควบคุม 5 โวลต์(Vdc)
- ดาวน์โหลด BTN7960 Datasheet คลิก

ไอซี BTN7960 มีระบบป้องกันดังต่อไปนี้

- Under voltage Shutdown
- Over temperature protection ถ้าอุณหภูมิภายในตัวไอซีสูงเกินค่าที่กำหนดไว้ ไอซีจะหยุดทำงาน
- Current Limitation มีระบบป้องกันกระแสเกิน 33 แอมป์

3.4.8 บอร์ด Relay

บอร์ด Relay (จำนวน 3 ชุด) 1 ช่อง 30 แอมป์ 5 โวลต์(Vdc) บอร์ด Relay 5 โวลต์ ขนาด 220 โวลต์ กระแส 30 แอมป์ แบบแยกสัญญาณ Isolation ใช้ต่อไฟอินพุตจากแบตเตอรี่ และจากนั้นเอาต์พุตจะต่อกับ Motor drive IBT-2



ภาพประกอบ 65 บอร์ด Relay [48]

โดยมีรายละเอียด บอร์ด Relay [48] ดังต่อไปนี้

- An onboard EL817 opt couplers, optical isolation has strong anti-jamming capability
- The onboard 5 โวลต์, 30 แอมป์/220 โวลต์(Vac), 30 แอมป์/30 โวลต์(Vdc) relay, relay lifelong continuous pull 100,000 times
- The module can be directly and microcontroller I/O link, with an output signal indicative
- The module has a freewheeling diode protection, short response time
- The module has a normally open (NO), normally closed (NC) output
- PCB size 34 x 39 มิลลิเมตร

3.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.5.1 อุปกรณ์วัดความเร็วรอบ

เครื่องวัดความเร็วรอบ คืออุปกรณ์ที่วัดความเร็วในหน่วย RPM หรือ รอบต่อนาที โดยใช้แสงเลเซอร์ในการวัดรอบ



ภาพประกอบ 66 Digital laser Tachometer RPM meter

3.5.2 อุปกรณ์วัดแรงดันไฟฟ้า

มัลติมิเตอร์ (Multimeter) คือเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าซึ่งสามารถวัดได้หลายค่า เช่น แรงดัน (Voltage) กระแส (Current) ความต้านทาน (Resistance)



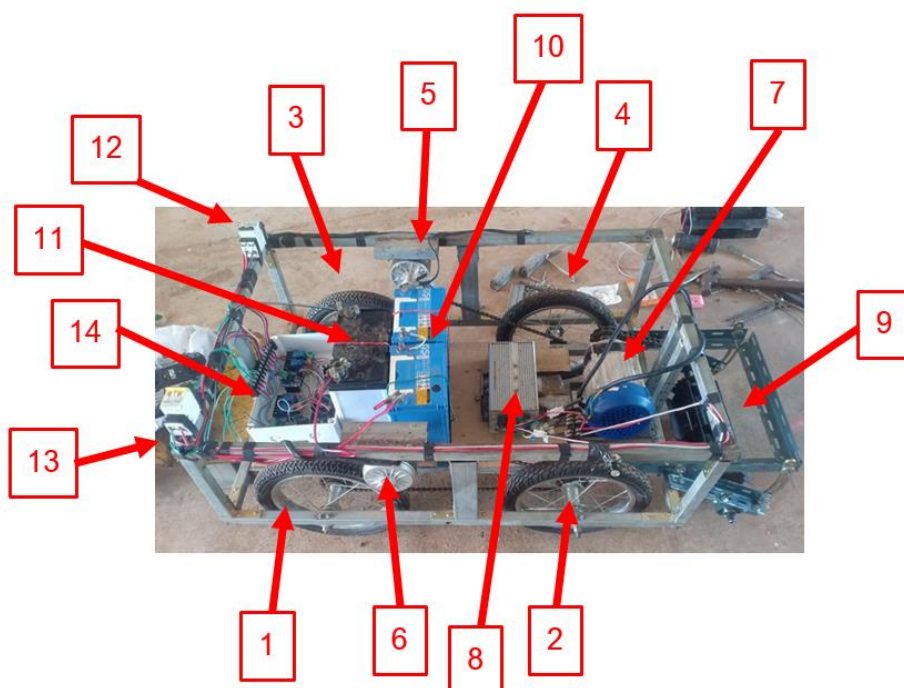
ภาพประกอบ 67 มัลติมิเตอร์

บทที่ 4

โครงสร้างและผลการทดลอง

เมื่อได้ทำการออกแบบโครงสร้างของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าอย่างง่ายในบทที่ 3 แล้ว จึงได้มีการจัดสร้างรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าขึ้นเพื่อทดสอบเก็บค่าต่างๆ ในบทนี้เพื่อนำไปวิเคราะห์ผล และสรุปผลดังต่อไปนี้

4.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าควบคุมด้วยรีโมท



ภาพประกอบ 68 โครงสร้างและส่วนประกอบของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าควบคุมด้วยรีโมท โดยอุปกรณ์ในรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ดังนี้

(1) ล้อหน้าด้านซ้าย (Left Front Wheel), (2) ล้อหลังด้านซ้าย (Left Rear Wheel), (3) ล้อหน้าด้านขวา (Right Front Wheel), และ (4) ล้อหลังด้านขวา (Right Rear Wheel) ในการวิจัยนี้ใช้ล้อซี่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 เซนติเมตร ขอบกว้าง 4.5 เซนติเมตร ทำมาจากเหล็กแข็ง แต่ละล้อสามารถรับน้ำหนักได้สูงสุด 100 กิโลกรัม จึงทำให้สามารถรับน้ำหนักและแรงกระแทกของรถได้ดี เป็นล้อยางเพื่อลดแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากการหมุนของมอเตอร์ขณะรถทำงาน โดยใช้หลักการคำนวณ และวิธีการจากบทที่ 2 ประกอบการวิจัย

(5) มอเตอร์ขับเคลื่อนกระแสตรง 250 วัตต์ 12 โวลต์ ด้านขวา และ(6) มอเตอร์ขับเคลื่อนกระแสตรง 250 วัตต์ 12 โวลต์ ด้านซ้าย เป็นมอเตอร์ที่นำมาใช้เป็นกำลังหลักของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าในการขับเคลื่อน โดยมีรายละเอียด ดังที่กล่าวในหัวข้อ 3.4.3

(7) มอเตอร์ปั่นดินกระแสตรง 1,000 วัตต์ 24 โวลต์ ได้จากกำลังเครื่องยนต์เครื่องตัดหญ้าที่ใช้กับเครื่องปั่นดิน ขนาดกำลัง 1.25 แรงม้า โดยมีรายละเอียด ดังที่กล่าวในหัวข้อ 3.4.4

(8) กล่องควบคุมมอเตอร์ 1,000 วัตต์ 24 โวลต์ ใช้ควบคุมในการแปลงแรงดัน และควบคุมความเร็วมอเตอร์ เปิด-ปิด การทำงาน เป็นต้น

(9) เครื่องปั่นดิน ดังในภาพได้มีการแก้ไข ให้เหลือเพียงด้านเดียว เนื่องจากอัตราการทดรอบของเฟืองมากเกินไปจึงไม่ทำให้เครื่องปั่นดินหมุนได้ตามที่ผู้วิจัยต้องการ มีขนาดความยาว 32 เซนติเมตร มี 6 ใบ เป็นเหล็กแข็ง ความเร็วที่เหมาะสมสำหรับเครื่องปั่นดินคือ 120-180 รอบต่อนาที โดยมีรายละเอียด ดังที่กล่าวในหัวข้อ 3.4.6

(10) แบตเตอรี่ 24 โวลต์ 40 แอมป์ (แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 40 แอมป์ 2 ลูก ต่ออนุกรมกัน) เพื่อให้ใช้กับมอเตอร์ 1,000 วัตต์ ที่ใช้ตามสเปคของมอเตอร์ จากการออกแบบระบบควบคุมในหัวข้อที่ 3.3.3 โดยมีรายละเอียดของแบตเตอรี่ ดังที่กล่าวในหัวข้อ 3.4.5

(11) แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 50 แอมป์ ได้จากแรงดันสเปคของมอเตอร์กระแสตรงที่ใช้ในการขับเคลื่อน โดยมีรายละเอียดของแบตเตอรี่ ดังที่กล่าวในหัวข้อ 3.4.5

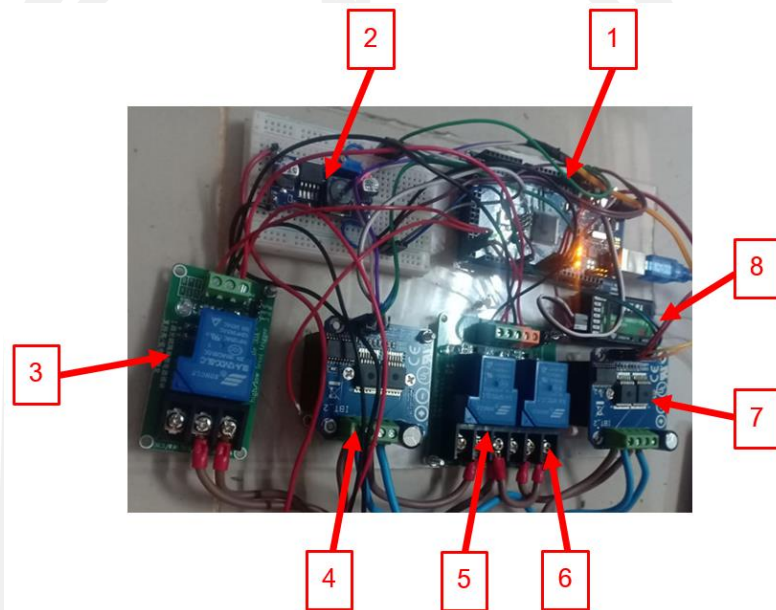
(12) Dc breaker (แบตเตอรี่ 24 โวลต์) นำมาใช้เพื่อป้องกันการลัดวงจรของวงจรมอเตอร์ 24 โวลต์ ที่อาจจะก่อให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ไฟฟ้าภายในตัวรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าได้

(13) Dc breaker (แบตเตอรี่ 12 โวลต์) นำมาใช้เพื่อป้องกันการลัดวงจรของวงจรมอเตอร์ 12 โวลต์ ที่อาจจะก่อให้เกิดความเสียหายแก่อุปกรณ์ไฟฟ้าภายในตัวรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าได้

(14) กล่องวงจรควบคุมระบบ มีขนาด (กว้างxยาวxสูง) 15x30x8 เซนติเมตร ส่วนระบบควบคุมได้จากบทที่ 3 ในหัวข้อ 3.3.3 โดยรายละเอียดของอุปกรณ์ภายในกล่องจะกล่าวในหัวข้อถัดไป ดังภาพประกอบ 69

4.2 ส่วนประกอบของกล่องวงจรควบคุมระบบรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าควบคุมด้วยรีโมท

เมื่อทำการออกแบบระบบควบคุมในบทที่ 3 หัวข้อ 3.3.3 ที่ผ่านมาจากภาพประกอบ 56 Schematic diagram for the electric tractor จึงได้ทำการนำมาต่อวงจรในการควบคุมระบบส่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า และระบบส่งจ่ายกำลังในการควบคุมความเร็วมอเตอร์ ดังภาพประกอบ 69 ดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 69 วงจรควบคุมระบบรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าควบคุมด้วยรีโมท โดยอุปกรณ์ในกล่องวงจรควบคุมระบบรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ดังนี้

- 1) Arduino Mega 2560 ใช้ติดต่อสื่อสารหรือรับคำสั่งจากรีซีฟเวอร์สัญญาณวิทยุ เพื่อควบคุมอุปกรณ์ไฟฟ้า ด้วยการเขียนโปรแกรมให้กับ MCU เพื่อควบคุมการรับส่งสัญญาณทางไฟฟ้าตามเงื่อนไขต่างๆ สำหรับใช้ควบคุมความเร็วและทิศทางการหมุนของมอเตอร์ [45] ซึ่งในวงจรจะควบคุม Relay และ Motor drive IBT-2 (BTS7960) ในการขับมอเตอร์
- 2) Dc-Dc step down ใช้ลดแรงดันจาก 12 โวลต์ เป็น 5 โวลต์ เพื่อจ่ายแรงดันให้กับ Arduino Mega 2560 และ Motor driver IBT-2 จำนวน 2 ตัว
- 3) Relay 24 โวลต์ ใช้ควบคุมเปิด-ปิดการทำงานของมอเตอร์ 1,000 วัตต์
- 4) Motor drive IBT-2 (BTS7960) ใช้ควบคุมมอเตอร์ 250 วัตต์ 12 โวลต์ ด้านขวาในการขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ โดยรับคำสั่งเป็น PWM จาก Arduino Mega 2560 มา โดยมีรายละเอียดดังที่กล่าวในหัวข้อ 3.4.7

5) Relay 12 โวลต์ ใช้ควบคุมเปิด-ปิดการทำงานของมอเตอร์ 250 วัตต์ 12 โวลต์ ด้านขวา โดยรับคำสั่งเป็น Digital จาก Arduino Mega 2560

6) Relay 12 โวลต์ ใช้ควบคุมเปิด-ปิดการทำงานของมอเตอร์ 250 วัตต์ 12 โวลต์ ด้านซ้าย โดยรับคำสั่งเป็น Digital จาก Arduino Mega 2560

7) Motor drive IBT-2 (BTS7960) ใช้ควบคุมมอเตอร์ 250 วัตต์ 12 โวลต์ ด้านซ้ายในการขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ โดยรับคำสั่งเป็น PWM จาก Arduino Mega 2560 มา โดยมีรายละเอียด ดังที่กล่าวในหัวข้อ 3.4.7

8) รีซีฟเวอร์สัญญาณวิทยุ รับคำสั่งจากรีโมทวิทยุ จากนั้นจะส่งข้อมูลไปยัง Arduino Mega 2560 ไปควบคุมอุปกรณ์อื่นดังที่กล่าวมา โดยมีรายละเอียด ดังที่กล่าวในหัวข้อ 3.4.1

4.3 พื้นที่ในการทดสอบ

การทดสอบในงานวิจัยนี้ ทำการทดสอบภายใต้ภูมิประเทศไทย จังหวัดขอนแก่น พื้นที่ทดสอบจริง ดังภาพประกอบ 70 อยู่ในพื้นที่ หมู่ 4 ต.พระบุ อ.พระยืน จ.ขอนแก่น 40320 โดยมีตำแหน่งละติจูด ลองจิจูด คือ 16.249923, 102.713881 โดยพื้นที่ ที่ใช้ในการทดสอบมีขนาด ความกว้าง 20 เมตร ยาว 40 เมตร โดยประมาณ



(ก)

(ข)

ภาพประกอบ 70 พื้นที่ในการทดสอบ (ก)ตำแหน่งพื้นที่ในการทดสอบ (ข)บริเวณที่ทดสอบ

4.4 วิธีการทดสอบรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า

ทำการทดสอบระบบขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า เดินหน้า-ถอยหลัง ในระยะทาง 10, 20, 30 เมตรตามลำดับ พบว่ารถแทรกเตอร์สามารถทำงานได้ดี โดยรถแทรกเตอร์สามารถวิ่งได้สูงสุด 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และความเร็วในการปั่นดิน 190 รอบต่อนาที



ภาพประกอบ 71 การทดสอบรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า

4.4.1 การทดสอบรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า

การทดสอบนี้ได้ออกแบบเพื่อทดสอบที่ความเร็วคงที่ 4 5 6 7 8 9 10 และ 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ทดสอบการใช้แรงดัน ทดสอบการใช้กระแส เพื่อประเมินสมรรถนะของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อน 2 ตัว ในแต่ละตัว

ตารางที่ 6 ทดสอบวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความเร็วรอบของล้อ ของมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า โดยใช้ความเร็วคงที่ 4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ครั้งที่	แรงดัน (V)		กระแส (A)		ความเร็วรอบ (RPM)	
	มอเตอร์ซ้าย	มอเตอร์ขวา	มอเตอร์ซ้าย	มอเตอร์ขวา	ล้อซ้าย	ล้อขวา
1	4.81	4.76	2.60	2.59	65.6	65.4
2	4.80	4.77	2.62	2.74	65.5	65.4
3	4.83	4.77	2.62	2.76	65.9	65.6
4	4.79	4.78	2.69	2.83	65.5	65.5
5	4.79	4.78	2.56	2.79	65.2	65.5

ตารางที่ 7 ทดสอบวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความเร็วรอบของล้อ ของมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า โดยใช้ความเร็วคงที่ 5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ครั้งที่	แรงดัน (V)		กระแส (A)		ความเร็วรอบ (RPM)	
	มอเตอร์ซ้าย	มอเตอร์ขวา	มอเตอร์ซ้าย	มอเตอร์ขวา	ล้อซ้าย	ล้อขวา
1	5.80	5.76	2.87	2.98	82.9	83.2
2	5.78	5.76	2.91	2.98	83.2	82.9
3	5.79	5.76	2.86	3.01	83.0	83.0
4	5.82	5.77	2.95	3.08	82.9	83.0
5	5.82	5.73	3.00	3.15	83.1	83.4

ตารางที่ 8 ทดสอบวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความเร็วรอบของล้อ ของมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า โดยใช้ความเร็วคงที่ 6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ครั้งที่	แรงดัน (V)		กระแส (A)		ความเร็วรอบ (RPM)	
	มอเตอร์ซ้าย	มอเตอร์ขวา	มอเตอร์ซ้าย	มอเตอร์ขวา	ล้อซ้าย	ล้อขวา
1	6.92	6.91	3.19	3.18	100.2	102.3
2	6.94	6.88	3.16	3.33	100.1	102.1
3	6.94	6.89	2.98	3.19	100.2	100.2
4	6.95	6.90	2.98	3.23	100.2	100.2
5	6.92	6.90	3.16	3.19	100.1	102.5

ตารางที่ 9 ทดสอบวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความเร็วรอบของล้อ ของมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า โดยใช้ความเร็วคงที่ 7 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ครั้งที่	แรงดัน (V)		กระแส (A)		ความเร็วรอบ (RPM)	
	มอเตอร์ซ้าย	มอเตอร์ขวา	มอเตอร์ซ้าย	มอเตอร์ขวา	ล้อซ้าย	ล้อขวา
1	7.87	7.83	3.10	3.22	116.2	116.8
2	7.87	7.83	3.33	3.33	116.3	116.6
3	7.88	7.83	3.13	3.19	116.1	116.7
4	7.88	7.85	3.12	3.16	116.0	116.9
5	7.89	7.86	3.17	3.20	116.2	116.4

ตารางที่ 10 ทดสอบวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความเร็วรอบของล้อ ของมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า โดยใช้ความเร็วคงที่ 8 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ครั้งที่	แรงดัน (V)		กระแส (A)		ความเร็วรอบ (RPM)	
	มอเตอร์ซ้าย	มอเตอร์ขวา	มอเตอร์ซ้าย	มอเตอร์ขวา	ล้อซ้าย	ล้อขวา
1	9.07	9.02	3.25	3.34	134.8	136.1
2	9.05	8.97	3.24	3.46	134.8	133.6
3	9.06	9.01	3.34	3.31	134.5	134.2
4	9.09	9.01	3.27	3.28	134.5	133.7
5	9.06	8.99	3.32	3.39	134.6	136.1

ตารางที่ 11 ทดสอบวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความเร็วรอบของล้อ ของมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า โดยใช้ความเร็วคงที่ 9 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ครั้งที่	แรงดัน (V)		กระแส (A)		ความเร็วรอบ (RPM)	
	มอเตอร์ซ้าย	มอเตอร์ขวา	มอเตอร์ซ้าย	มอเตอร์ขวา	ล้อซ้าย	ล้อขวา
1	9.80	9.72	3.39	3.55	149.5	150.4
2	9.79	9.73	3.42	3.49	149.5	150.2
3	9.79	9.73	3.50	3.43	149.4	150.3
4	9.76	9.70	3.45	3.41	149.6	150.2
5	9.76	9.71	3.38	3.39	149.5	150.3

ตารางที่ 12 ทดสอบวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความเร็วรอบของล้อ ของมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า โดยใช้ความเร็วคงที่ 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ครั้งที่	แรงดัน (V)		กระแส (A)		ความเร็วรอบ (RPM)	
	มอเตอร์ซ้าย	มอเตอร์ขวา	มอเตอร์ซ้าย	มอเตอร์ขวา	ล้อซ้าย	ล้อขวา
1	10.73	10.65	3.58	3.54	164.2	165.8
2	10.69	10.66	3.60	3.65	164.0	165.9
3	10.71	10.67	3.64	3.58	164.2	165.7
4	10.74	10.69	3.61	3.61	164.2	165.7
5	10.71	10.69	3.62	3.63	164.3	165.4

ตารางที่ 13 ทดสอบวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความเร็วรอบของล้อ ของมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า โดยใช้ความเร็วคงที่ 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

ครั้งที่	แรงดัน (V)		กระแส (A)		ความเร็วรอบ (RPM)	
	มอเตอร์ซ้าย	มอเตอร์ขวา	มอเตอร์ซ้าย	มอเตอร์ขวา	ล้อซ้าย	ล้อขวา
1	11.57	11.57	3.72	3.79	178.9	179.3
2	11.56	11.58	3.70	3.74	179.1	178.8
3	11.57	11.60	3.75	3.77	178.8	178.9
4	11.59	11.58	3.70	3.72	179.3	179.3
5	11.61	11.58	3.79	3.75	178.8	179.1

จากการทดสอบวัดค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความเร็วรอบของล้อ ของมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า โดยใช้ความเร็วคงที่ 4 5 6 7 8 9 10 และ 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งจะได้ผลการทดลองเป็นค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความเร็วรอบของล้อที่หมุน ดังแสดงในตารางที่ 6-13 และจะนำค่าที่ได้จากการทดสอบไปพล็อตกราฟเป็นค่าเฉลี่ย เพื่อวิเคราะห์ผลการทดสอบ ในหัวข้อที่ 4.5

4.4.2 การทดสอบสมรรถนะรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าขณะวิ่งบนดิน

การทดสอบนี้ได้ออกแบบเพื่อทดสอบมอเตอร์ปั่นดิน โดยใช้พลังงานในการปั่นตามประสิทธิภาพคือ 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วคงที่ 4 5 6 7 8 9 10 และ 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เพื่อประเมินสมรรถนะของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าในการปั่นดิน โดยมีการประเมินคุณภาพของดินจากกรมส่งเสริมการเกษตร [56] โดยการให้คะแนนในแต่ละภาพ 0-5 คะแนนอธิบายในตารางดังต่อไปนี้



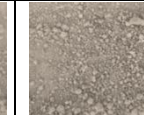
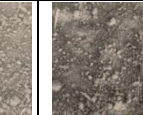
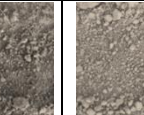


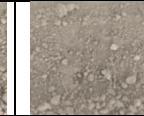
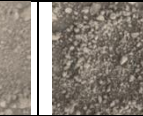



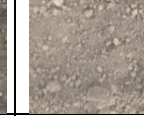
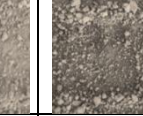




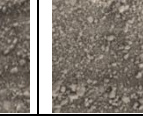



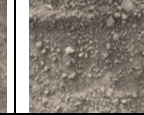

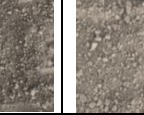
ตารางที่ 14 หลักเกณฑ์การประเมินให้คะแนน [56]

คะแนน	คุณภาพของดินที่ปั่น(พรวน)
5	ยอดเยี่ยม
4	ดีมาก
3	ดี
2	ปานกลาง
1	น้อย
0	น้อยที่สุด

4.4.2.1 การทดสอบสมรรถนะรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าขณะวิ่งบนดินที่ความเร็วคงที่ 4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

การทดสอบนี้ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 15 ทั้งนี้ ทำการถ่ายภาพแนวตรง ห่างจากพื้นเป็นระยะ 70 เซนติเมตร อย่างเท่ากันทุกภาพ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบได้ โดยในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะส่วนของขนาดก้อนดินต่างๆ และสภาพการพรวนดิน โดยไม่ขึ้นกับสีของดินแต่อย่างใด

ตารางที่ 15 ผลการทดสอบป่นดินโดยใช้กำลังมอเตอร์ 1,000 วัตต์ ที่ 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าใช้ความเร็วคงที่ 4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

กำลังมอเตอร์ ป่นดิน(%)	20%	40%	60%	80%	100%
รูปที่ 1					
คุณภาพดิน	0	3	3	5	3
รูปที่ 2					
คุณภาพดิน	0	3	2	5	2
รูปที่ 3					
คุณภาพดิน	0	1	2	4	2
รูปที่ 4					
คุณภาพดิน	3	1	3	3	1
รูปที่ 5					
คุณภาพดิน	3	1	3	3	2
คุณภาพเฉลี่ย	1.2	1.8	2.6	4	1.8

การทดสอบในตารางที่ 15 จะได้ผลจากการป่นดินโดยใช้กำลังจากมอเตอร์ในระดับ 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าใช้ความเร็วคงที่ 4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยทำการถ่ายภาพแนวตรง ห่างจากพื้นเป็นระยะ 70 เซนติเมตร อย่างเท่ากันทุกภาพ จากนั้นมีการประเมินให้คะแนนจากข้อมูลการประเมินกรมส่งเสริมการเกษตร [56] เมื่อนำคะแนนแต่ละภาพมา





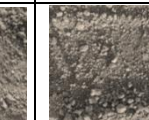









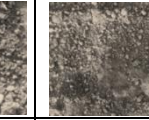





รวมกันและเฉลี่ย ผลที่ได้สรุปว่าขณะที่รถวิ่งด้วยความเร็วคงที่ 4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่าเมื่อใช้กำลังมอเตอร์ในการปั่นดินที่ เหมาะสมที่สุดสำหรับความเร็วนี้คือ 80 เปอร์เซ็นต์ โดยความเร็วในการปั่นดินประมาณ 152 รอบต่อนาที และลำดับที่เหมาะสมถัดมาคือ 60 เปอร์เซ็นต์ โดยความเร็วในการปั่นดินประมาณ 114 รอบต่อนาที

สำหรับความเร็วในการวิ่ง 4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เป็นความเร็วที่มอเตอร์ใช้กำลังในการเคลื่อนที่น้อยเมื่อรถวิ่งไปเจอสิ่งกีดขวางหรือทางที่ขรุขระจะทำให้รถไม่สามารถวิ่งต่อไปได้ ความเร็วนี้จึงยังไม่เหมาะสมสำหรับการเคลื่อนที่ในพื้นที่ออฟโรด




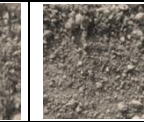
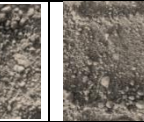
4.4.2.2 การทดสอบสมรรถนะรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าขณะวิ่งปั่นดินที่ความเร็วคงที่ 5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

การทดสอบนี้ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 16 ทั้งนี้ ทำการถ่ายภาพแนวตรง ห่างจากพื้นเป็นระยะ 70 เซนติเมตร อย่างเท่ากันทุกภาพ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบได้ โดยในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะส่วนของขนาดก้อนดินต่างๆ และสภาพการพรวนดิน โดยไม่ขึ้นกับสีของดินแต่อย่างใด

ตารางที่ 16 ผลการทดสอบปั่นดินโดยใช้กำลังมอเตอร์ 1,000 วัตต์ ที่ 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าใช้ความเร็วคงที่ 5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

กำลังมอเตอร์ ปั่นดิน(%)	20%	40%	60%	80%	100%
รูปที่ 1					
คุณภาพดิน	1	1	3	4	3
รูปที่ 2					
คุณภาพดิน	1	1	3	3	2
รูปที่ 3					
คุณภาพดิน	1	1	3	5	3
รูปที่ 4					
คุณภาพดิน	0	1	5	4	2

ตารางที่ 16 ผลการทดสอบบ่อบนดินโดยใช้กำลังมอเตอร์ 1,000 วัตต์ ที่ 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ความเร็วคงที่ 5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (ต่อ)

กำลังมอเตอร์ บ่อบนดิน(%)	20%	40%	60%	80%	100%
รูปที่ 5					
คุณภาพดิน	0	3	4	4	2
คุณภาพเฉลี่ย	0.6	1.4	3.6	4	2.4

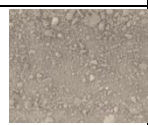
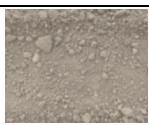
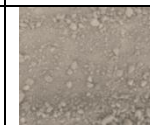


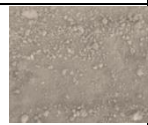
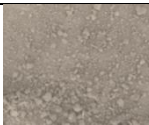




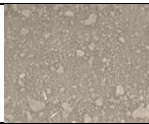


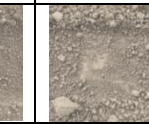
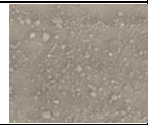
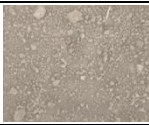
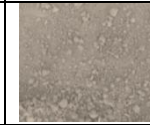

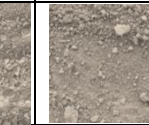


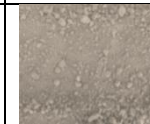


การทดสอบในตารางที่ 16 จะได้ผลจากการบ่อบนดินโดยใช้กำลังจากมอเตอร์ในระดับ 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ความเร็วคงที่ 5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยทำการถ่ายภาพแนวตรง ห่างจากพื้นเป็นระยะ 70 เซนติเมตร อย่างเท่ากันทุกภาพ จากนั้นมีการประเมินให้คะแนนจากข้อมูลการประเมินกรรมส่งเสริมการเกษตร [56] เมื่อนำคะแนนแต่ละภาพมารวมกันและเฉลี่ย ผลที่ได้สรุปว่าขณะที่รถวิ่งด้วยความเร็วคงที่ 5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่าเมื่อใช้กำลังมอเตอร์ในการบ่อบนดินที่เหมาะสมที่สุดสำหรับความเร็วนี้คือ 80 เปอร์เซ็นต์ โดยความเร็วในการบ่อบนดินประมาณ 152 รอบต่อนาที และลำดับที่เหมาะสมถัดมาคือ 60 เปอร์เซ็นต์ โดยความเร็วในการบ่อบนดินประมาณ 114 รอบต่อนาที

สำหรับความเร็วในการวิ่ง 5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เป็นความเร็วที่มอเตอร์ใช้กำลังในการเคลื่อนที่น้อยเมื่อรถวิ่งไปเจอสิ่งกีดขวางหรือทางที่ขรุขระจะทำให้รถไม่สามารถวิ่งต่อไปได้ ความเร็วนี้จึงยังไม่เหมาะสมสำหรับการเคลื่อนที่ในพื้นที่ออฟโรด

4.4.2.3 การทดสอบสมรรถนะรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าขณะวิ่งบ่อบนดินที่ความเร็วคงที่ 6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

การทดสอบนี้ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 17 ทั้งนี้ ทำการถ่ายภาพแนวตรง ห่างจากพื้นเป็นระยะ 70 เซนติเมตร อย่างเท่ากันทุกภาพ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบได้ โดยในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะส่วนของขนาดก้อนดินต่างๆ และสภาพการพรวนดิน โดยไม่ขึ้นกับสีของดินแต่อย่างใด

ตารางที่ 17 ผลการทดสอบบ้นดินโดยใช้กำลังมอเตอร์ 1,000 วัตต์ ที่ 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าใช้ความเร็วคงที่ 6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

กำลังมอเตอร์ บ้นดิน(%)	20%	40%	60%	80%	100%
รูปที่ 1					
คุณภาพดิน	1	3	3	4	4
รูปที่ 2					
คุณภาพดิน	1	2	3	4	2
รูปที่ 3					
คุณภาพดิน	1	2	3	3	2
รูปที่ 4					
คุณภาพดิน	2	2	3	5	2
รูปที่ 5					
คุณภาพดิน	0	1	3	5	2
คุณภาพเฉลี่ย	1	2	3	4.2	2.4

















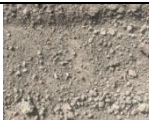








การทดสอบในตารางที่ 17 จะได้ผลจากการบ้นดินโดยใช้กำลังจากมอเตอร์ในระดับ 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าใช้ความเร็วคงที่ 6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยทำการถ่ายภาพแนวตรง ห่างจากพื้นเป็นระยะ 70 เซนติเมตร อย่างเท่ากันทุกภาพ จากนั้นมีการประเมินให้คะแนนจากข้อมูลการประเมินกรมส่งเสริมการเกษตร [56] เมื่อนำคะแนนแต่ละภาพมารวมกันและเฉลี่ย ผลที่ได้สรุปว่าขณะที่รถวิ่งด้วยความเร็วคงที่ 6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่าเมื่อใช้กำลังมอเตอร์ในการบ้นดินที่เหมาะสมที่สุดสำหรับความเร็วนี้คือ 80 เปอร์เซ็นต์ โดยความเร็วในการบ้นดินประมาณ 152 รอบต่อนาที และลำดับที่เหมาะสมถัดมาคือ 60 เปอร์เซ็นต์ โดยความเร็วในการบ้นดินประมาณ 114 รอบต่อนาที

สำหรับความเร็วในการวิ่ง 6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เป็นความเร็วที่มอเตอร์ใช้กำลังในการเคลื่อนที่ยังน้อยเมื่อรถวิ่งไปเจอสิ่งกีดขวางหรือทางที่ขรุขระจะทำให้รถไม่สามารถวิ่งต่อไปได้ ความเร็วนี้จึงยังไม่เหมาะสมสำหรับการเคลื่อนที่ในพื้นที่ออฟโรด

4.4.2.4 การทดสอบสมรรถนะรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าขณะวิ่งบนดินที่ความเร็วคงที่ 7 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

การทดสอบนี้ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 18 ทั้งนี้ ทำการถ่ายภาพแนวตรง ห่างจากพื้นเป็นระยะ 70 เซนติเมตร อย่างเท่ากันทุกภาพ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบได้ โดยในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะส่วนของขนาดก้อนดินต่างๆ และสภาพการพรวนดิน โดยไม่ขึ้นกับสีของดินแต่อย่างใด

ตารางที่ 18 ผลการทดสอบปั่นดินโดยใช้กำลังมอเตอร์ 1,000 วัตต์ ที่ 2, 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าใช้ความเร็วคงที่ 7 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

กำลังมอเตอร์ ปั่นดิน(%)	20%	40%	60%	80%	100%
รูปที่ 1					
คุณภาพดิน	1	3	3	5	3
รูปที่ 2					
คุณภาพดิน	1	3	3	4	3
รูปที่ 3					
คุณภาพดิน	0	3	4	4	3
รูปที่ 4					
คุณภาพดิน	0	2	4	4	3
รูปที่ 5					
คุณภาพดิน	1	2	4	4	3
คุณภาพเฉลี่ย	0.6	2.6	3.6	4.2	3











การทดสอบในตารางที่ 18 จะได้ผลจากการปั่นดินโดยใช้กำลังจากมอเตอร์ในระดับ 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าฟ้าใช้ความเร็วคงที่ 7 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยทำการถ่ายภาพแนวตรง ห่างจากพื้นเป็นระยะ 70 เซนติเมตร อย่างเท่ากันทุกภาพ จากนั้นมีการประเมินให้คะแนนจากข้อมูลการประเมินกรมส่งเสริมการเกษตร [56] เมื่อนำคะแนนแต่ละภาพมารวมกันและเฉลี่ย ผลที่ได้สรุปว่าขณะที่รถวิ่งด้วยความเร็วคงที่ 7 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่าเมื่อใช้กำลังมอเตอร์ในการปั่นดินที่เหมาะสมที่สุดสำหรับความเร็วนี้คือ 80 เปอร์เซ็นต์ โดยความเร็วในการปั่นดินประมาณ 152 รอบต่อนาที และลำดับที่เหมาะสมถัดมาคือ 60 เปอร์เซ็นต์ โดยความเร็วในการปั่นดินประมาณ 114 รอบต่อนาที

สำหรับความเร็วในการวิ่ง 7 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เป็นความเร็วที่มอเตอร์ใช้กำลังในการเคลื่อนที่พอดี เมื่อรถวิ่งไปเจอสิ่งกีดขวางหรือทางที่ขรุขระก็สามารถวิ่งต่อไปได้ ความเร็วนี้จึงเหมาะสมสำหรับการเคลื่อนที่ในพื้นที่ออฟโรด




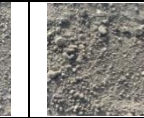
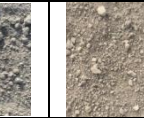










4.4.2.5 การทดสอบสมรรถนะรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าขณะวิ่งปั่นดินที่ความเร็วคงที่ 8 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

การทดสอบนี้ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 19 ทั้งนี้ ทำการถ่ายภาพแนวตรง ห่างจากพื้นเป็นระยะ 70 เซนติเมตร อย่างเท่ากันทุกภาพ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบได้ โดยในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะส่วนของขนาดก้อนดินต่างๆ และสภาพการพรวนดิน โดยไม่ขึ้นกับสีของดินแต่อย่างใด

ตารางที่ 19 ผลการทดสอบปั่นดินโดยใช้กำลังมอเตอร์ 1,000 วัตต์ ที่ 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าฟ้าใช้ความเร็วคงที่ 8 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

กำลังมอเตอร์ปั่นดิน(%)	20%	40%	60%	80%	100%
รูปที่ 1					
คุณภาพดิน	1	2	3	4	3
รูปที่ 2					
คุณภาพดิน	1	2	3	3	3

ตารางที่ 19 ผลการทดสอบบ่อบนดินโดยใช้กำลังมอเตอร์ 1,000 วัตต์ ที่ 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ความเร็วคงที่ 8 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (ต่อ)

กำลังมอเตอร์ บ่อบนดิน(%)	20%	40%	60%	80%	100%
รูปที่ 3					
คุณภาพดิน	2	2	3	5	4
รูปที่ 4					
คุณภาพดิน	2	2	3	5	3
รูปที่ 5					
คุณภาพดิน	1	3	3	4	4
คุณภาพเฉลี่ย	1.4	2.2	3	4.2	3.4




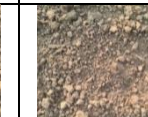
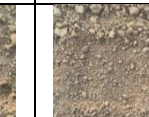


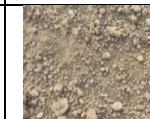






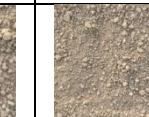







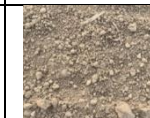


การทดสอบในตารางที่ 19 จะได้ผลจากการบ่อบนดินโดยใช้กำลังจากมอเตอร์ในระดับ 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ความเร็วคงที่ 8 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยทำการถ่ายภาพแนวตรง ห่างจากพื้นเป็นระยะ 70 เซนติเมตร อย่างเท่ากันทุกภาพ จากนั้นมีการประเมินให้คะแนนจากข้อมูลการประเมินกรมส่งเสริมการเกษตร [56] เมื่อนำคะแนนแต่ละภาพมารวมกันและเฉลี่ย ผลที่ได้สรุปว่าขณะที่รถวิ่งด้วยความเร็วคงที่ 8 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่าเมื่อใช้กำลังมอเตอร์ในการบ่อบนดินที่เหมาะสมที่สุดสำหรับความเร็วนี้คือ 80 เปอร์เซ็นต์ โดยความเร็วในการบ่อบนดินประมาณ 152 รอบต่อนาที และลำดับที่เหมาะสมถัดมาคือ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยความเร็วในการบ่อบนดินประมาณ 190 รอบต่อนาที

สำหรับความเร็วในการวิ่ง 8 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เป็นความเร็วที่มอเตอร์ใช้กำลังในการเคลื่อนที่พอดีและเหมาะสมที่สุด จากการทดสอบเมื่อรถวิ่งไปเจอสิ่งกีดขวางหรือทางที่ขรุขระก็สามารถวิ่งต่อไปได้ ความเร็วนี้จึงเหมาะสมสำหรับการเคลื่อนที่ในพื้นที่ออฟโรด

4.4.2.6 การทดสอบสมรรถนะรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าขณะวิ่งป่นดินที่ความเร็วคงที่ 9 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

การทดสอบนี้ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 20 ทั้งนี้ ทำการถ่ายภาพแนวตรง ห่างจากพื้นเป็นระยะ 70 เซนติเมตร อย่างเท่ากันทุกภาพ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบได้ โดยในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะส่วนของขนาดก้อนดินต่างๆ และสภาพการพรวนดิน โดยไม่ขึ้นกับสีของดินแต่อย่างใด

ตารางที่ 20 ผลการทดสอบป่นดินโดยใช้กำลังมอเตอร์ 1,000 วัตต์ ที่ 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ความเร็วคงที่ 9 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

กำลังมอเตอร์ ป่นดิน(%)	20%	40%	60%	80%	100%
รูปที่ 1					
คุณภาพดิน	1	1	4	5	4
รูปที่ 2					
คุณภาพดิน	2	2	3	5	4
รูปที่ 3					
คุณภาพดิน	1	2	4	3	3
รูปที่ 4					
คุณภาพดิน	1	3	3	3	3
รูปที่ 5					
คุณภาพดิน	1	3	3	4	4
คุณภาพเฉลี่ย	1.2	1.8	3.4	4	3.6

การทดสอบในตารางที่ 20 จะได้ผลจากการป่นดินโดยใช้กำลังจากมอเตอร์ในระดับ 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ความเร็วคงที่ 9 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยทำการถ่ายภาพแนวตรง ห่างจากพื้นเป็นระยะ 70 เซนติเมตร อย่างเท่ากันทุกภาพ จากนั้นมีการประเมินให้คะแนนจากข้อมูลการประเมินกรมส่งเสริมการเกษตร [56] เมื่อนำคะแนนแต่ละภาพมา









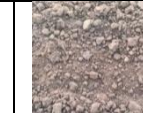




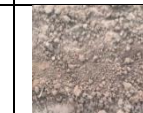
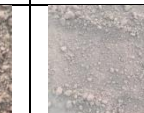
รวมกันและเฉลี่ย ผลที่ได้สรุปว่าขณะที่รถวิ่งด้วยความเร็วคงที่ 9 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่าเมื่อใช้กำลังมอเตอร์ในการปั่นดินที่ เหมาะสมที่สุดสำหรับความเร็วนี้คือ 80 เปอร์เซ็นต์ โดยความเร็วในการปั่นดินประมาณ 152 รอบต่อนาที ลำดับที่เหมาะสมถัดมาคือ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยความเร็วในการปั่นดินประมาณ 190 รอบต่อนาที และลำดับที่เหมาะสมถัดมาคือ 60 เปอร์เซ็นต์ โดยความเร็วในการปั่นดินประมาณ 114 รอบต่อนาที

สำหรับความเร็วในการวิ่ง 9 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เป็นความเร็วที่มอเตอร์ใช้กำลังในการเคลื่อนที่พอดีและเหมาะสมเป็นลำดับถัดมาจากความเร็วคงที่ 8 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จากการทดสอบเมื่อรถวิ่งไปเจอสิ่งกีดขวางหรือทางที่ขรุขระก็สามารถวิ่งต่อไปได้ ความเร็วนี้จึงเหมาะสมสำหรับการเคลื่อนที่ในพื้นที่ออฟโรด











4.4.2.7 การทดสอบสมรรถนะรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าขณะวิ่งปั่นดินที่ความเร็วคงที่ 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

การทดสอบนี้ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 21 ทั้งนี้ ทำการถ่ายภาพแนวตรง ห่างจากพื้นเป็นระยะ 70 เซนติเมตร อย่างเท่ากันทุกภาพ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบได้ โดยในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะส่วนของขนาดก้อนดินต่างๆ และสภาพการพรวนดิน โดยไม่ขึ้นกับสีของดินแต่อย่างใด

ตารางที่ 21 ผลการทดสอบปั่นดินโดยใช้กำลังมอเตอร์ 1,000 วัตต์ ที่ 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าใช้ความเร็วคงที่ 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

กำลังมอเตอร์ ปั่นดิน(%)	20%	40%	60%	80%	100%
รูปที่ 1					
คุณภาพดิน	1	1	3	4	3
รูปที่ 2					
คุณภาพดิน	1	2	4	5	4
รูปที่ 3					
คุณภาพดิน	1	2	4	5	3

ตารางที่ 21 ผลการทดสอบบ้นดินโดยใช้กำลังมอเตอร์ 1,000 วัตต์ ที่ 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ความเร็วคงที่ 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (ต่อ)

กำลังมอเตอร์ บ้นดิน(%)	20%	40%	60%	80%	100%
รูปที่ 4					
คุณภาพดิน	2	2	4	5	4
รูปที่ 5					
คุณภาพดิน	2	2	3	3	3
คุณภาพเฉลี่ย	1.4	1.8	3.6	4.4	3.4

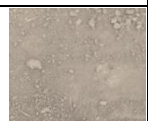
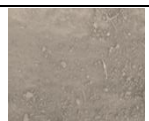



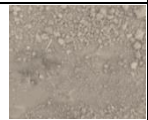




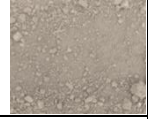

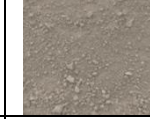






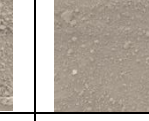


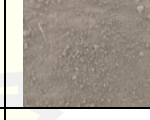
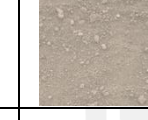
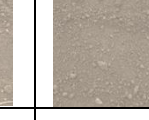
การทดสอบในตารางที่ 21 จะได้ผลจากการบ้นดินโดยใช้กำลังจากมอเตอร์ในระดับ 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ความเร็วคงที่ 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยทำการถ่ายภาพแนวตรง ห่างจากพื้นเป็นระยะ 70 เซนติเมตร อย่างเท่ากันทุกภาพ จากนั้นมีการประเมินให้คะแนนจากข้อมูลการประเมินกรมส่งเสริมการเกษตร [56] เมื่อนำคะแนนแต่ละภาพมารวมกันและเฉลี่ย ผลที่ได้สรุปว่าขณะที่รถวิ่งด้วยความเร็วคงที่ 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่าเมื่อใช้กำลังมอเตอร์ในการบ้นดินที่เหมาะสมที่สุดสำหรับความเร็วนี้คือ 80 เปอร์เซ็นต์ โดยความเร็วในการบ้นดินประมาณ 152 รอบต่อนาที ลำดับที่เหมาะสมถัดมาคือ 60 เปอร์เซ็นต์ โดยความเร็วในการบ้นดินประมาณ 114 รอบต่อนาที และลำดับที่เหมาะสมถัดมาคือ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยความเร็วในการบ้นดินประมาณ 190 รอบต่อนาที

สำหรับความเร็วในการวิ่ง 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เป็นความเร็วที่มอเตอร์ใช้กำลังในการเคลื่อนที่เร็วเกินไป จากการทดสอบเมื่อรถวิ่งไปเจอสิ่งกีดขวางหรือทางที่ขรุขระก็สามารถวิ่งต่อไปได้ แต่จะทำให้บังคับทิศทางของรถยาก ความเร็วนี้จึงไม่เหมาะสมสำหรับการเคลื่อนที่ในพื้นที่ออฟโรด

4.4.2.8 การทดสอบสมรรถนะรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าขณะวิ่งบ้นดินที่ความเร็วคงที่ 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

การทดสอบนี้ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 22 ทั้งนี้ ทำการถ่ายภาพแนวตรง ห่างจากพื้นเป็นระยะ 70 เซนติเมตร อย่างเท่ากันทุกภาพ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบได้ โดยในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะส่วนของขนาดก้อนดินต่างๆ และสภาพการพรวนดิน โดยไม่ขึ้นกับสีของดินแต่อย่างใด

ตารางที่ 22 ผลการทดสอบบ้นดินโดยใช้กำลังมอเตอร์ 1,000 วัตต์ ที่ 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าใช้ความเร็วคงที่ 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

กำลังมอเตอร์ บ้นดิน(%)	20%	40%	60%	80%	100%
รูปที่ 1					
คะแนนดิน	1	1	3	4	3
รูปที่ 2					
คะแนนดิน	2	1	3	4	3
รูปที่ 3					
คะแนนดิน	2	2	3	4	3
รูปที่ 4					
คะแนนดิน	1	3	3	4	4
รูปที่ 5					
คะแนนดิน	1	2	3	3	4
คะแนนเฉลี่ย	1.4	1.8	3	3.8	3.4

การทดสอบในตารางที่ 22 จะได้ผลจากการบ้นดินโดยใช้กำลังจากมอเตอร์ในระดับ 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าใช้ความเร็วคงที่ 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยทำการถ่ายภาพแนวตรง ห่างจากพื้นเป็นระยะ 70 เซนติเมตร อย่างเท่ากันทุกภาพ จากนั้นมีการประเมินให้คะแนนจากข้อมูลการประเมินกรมส่งเสริมการเกษตร [56] เมื่อนำคะแนนแต่ละภาพมารวมกันและเฉลี่ย ผลที่ได้สรุปว่าขณะที่รถวิ่งด้วยความเร็วคงที่ 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่าเมื่อใช้กำลังมอเตอร์ในการบ้นดินที่เหมาะสมที่สุดสำหรับความเร็วนี้คือ 80 เปอร์เซ็นต์ โดยความเร็วในการบ้นดินประมาณ 152 รอบต่อนาที และลำดับที่เหมาะสมถัดมาคือ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยความเร็วในการบ้นดินประมาณ 190 รอบต่อนาที

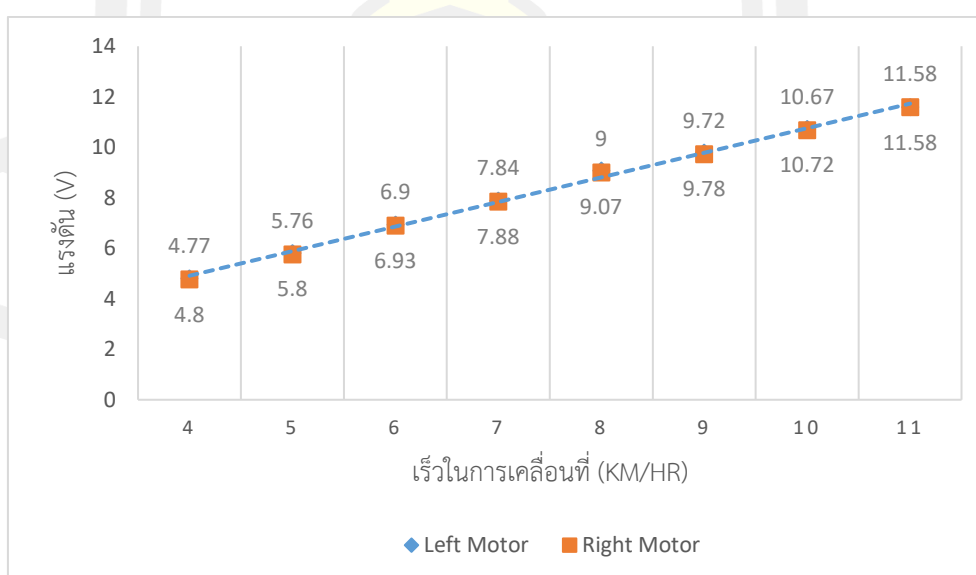
สำหรับความเร็วในการวิ่ง 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เป็นความเร็วที่มอเตอร์ใช้กำลังในการเคลื่อนที่เร็วเกินไป จากการทดสอบเมื่อรถวิ่งไปเจอสิ่งกีดขวางหรือทางที่ขรุขระก็สามารถวิ่งต่อไปได้ แต่จะทำให้บังคับทิศทางของรถยาก ความเร็วนี้จึงไม่เหมาะสมสำหรับการเคลื่อนที่ในพื้นที่ออฟโรด

4.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

การเก็บรวบรวมข้อมูลที่ได้ทำการวัดค่าพารามิเตอร์ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า ความเร็วของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ในการใช้งานสภาพออฟโรดขณะปั่นดิน ในระดับความเร็วคงที่ 4 5 6 7 8 9 10 และ 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง การทดสอบทั้งหมดจะได้ ค่าเฉลี่ยดังกราฟต่อไปนี้

4.5.1 วิเคราะห์ผลค่าแรงดันเทียบกับความเร็วในการเคลื่อนที่

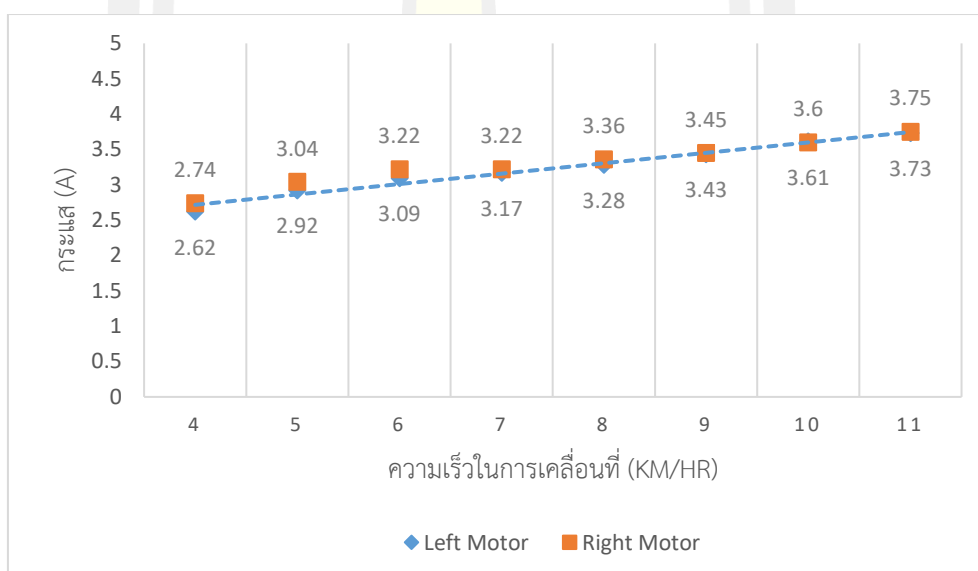
รถแทรกเตอร์ไฟฟ้าต้นแบบประกอบไปด้วยมอเตอร์ขับเคลื่อน 2 ตัว ซึ่งต้องการความเร็วในการควบคุมที่มีค่าความเร็วแตกต่างกันน้อยที่สุด การทดลองนี้เป็นการวัดค่าแรงดันปรากฏที่ขั้วมอเตอร์แต่ละตัว ซึ่งค่าแรงดันมีค่าแปรตามความเร็วรอบของมอเตอร์ ในลักษณะเชิงเส้น ตามข้อมูลการควบคุมที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 หัวข้อ 2.6.4 ชุดควบคุมไฟฟ้ากำลัง ภาพประกอบ 72 แสดงกราฟแรงดันดังกล่าวเทียบกับความเร็วที่ใช้ในการทดสอบที่ความเร็วคงที่ 4 5 6 7 8 9 10 และ 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (จากข้อมูลผลการทดลองตารางที่ 6-13) ซึ่งจากภาพจะแสดงให้เห็นได้ว่า แรงดันที่ใช้จะแปรผันตรงกับความเร็วที่ใช้ กล่าวคือเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นความเร็วของรถก็จะเพิ่มขึ้นตามนั่นเอง และแรงดันของมอเตอร์ทั้ง 2 ตัวมีค่าแตกต่างกันน้อยมาก (ไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์)



ภาพประกอบ 72 กราฟแสดงค่าแรงดันเทียบกับความเร็วในการเคลื่อนที่

4.5.2 วิเคราะห์ผลค่ากระแสเทียบกับความเร็วในการเคลื่อนที่

รถแทรกเตอร์ไฟฟ้าต้นแบบประกอบไปด้วยมอเตอร์ขับเคลื่อน 2 ตัว ซึ่งต้องการความเร็วในการควบคุมที่มีค่าความเร็วแตกต่างกันน้อยที่สุด การทดลองนี้เป็นการวัดค่ากระแสปรากฏที่มอเตอร์แต่ละตัว ซึ่งค่ากระแสมีค่าแปรตามความเร็วรอบของมอเตอร์ ในลักษณะเชิงเส้น ตามข้อมูลการควบคุมที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 หัวข้อ 2.6.4 ชุดควบคุมไฟฟ้ากำลัง ภาพประกอบ 73 แสดงกราฟกระแสดังกล่าวเทียบกับความเร็วที่ใช้ในการทดสอบที่ความเร็วคงที่ 4 5 6 7 8 9 10 และ 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (จากข้อมูลผลการทดลองตารางที่ 6-13) ซึ่งจากภาพจะแสดงให้เห็นได้ว่า กระแสที่ใช้จะแปรผันตรงกับความเร็วที่ใช้ แต่จะเปลี่ยนไปไม่มาก กล่าวคือเมื่อกระแสเพิ่มขึ้นความเร็วของรถก็จะเพิ่มขึ้นตามนั่นเอง และกระแสของมอเตอร์ทั้ง 2 ตัวมีค่าแตกต่างกันน้อยมาก (ไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์)

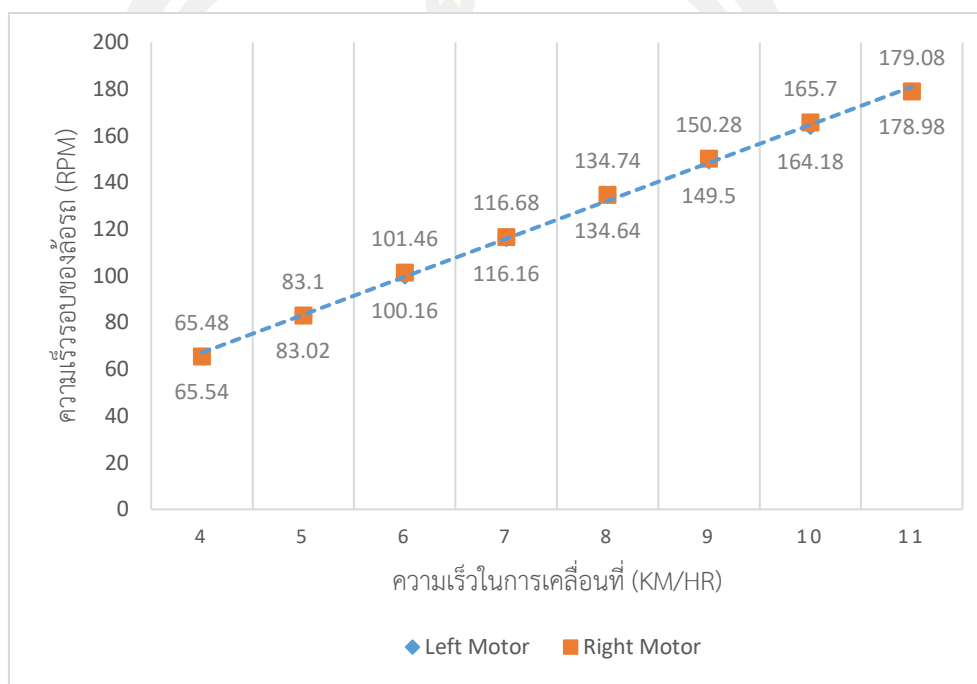


ภาพประกอบ 73 กราฟแสดงค่ากระแสเทียบกับความเร็วในการเคลื่อนที่

4.5.3 วิเคราะห์ผลค่าความเร็วรอบของล้อรถเทียบกับความเร็วในการเคลื่อนที่

รถแทรกเตอร์ไฟฟ้าต้นแบบประกอบไปด้วยมอเตอร์ขับเคลื่อน 2 ตัว ซึ่งต้องการความเร็วในการควบคุมที่มีค่าความเร็วแตกต่างกันน้อยที่สุด การทดลองนี้เป็นการวัดค่าความเร็วรอบของล้อรถปรากฏที่ล้อรถด้านหลังของรถแต่ละข้าง จะแบ่งเป็นข้างซ้าย-ขวา อย่างละ 2 ล้อ ซึ่งแต่ละข้างจะใช้กำลังจากมอเตอร์แต่ละตัวส่งกำลังจากฟันเฟืองและโซ่ไปยังฟันเฟืองของล้อรถ ซึ่งค่าความเร็วรอบของล้อรถมีค่าแปรตามความเร็วรอบของมอเตอร์ ในลักษณะเชิงเส้น ตามข้อมูลการควบคุมที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 หัวข้อ 2.6.4 ชุดควบคุมไฟฟ้ากำลัง ภาพประกอบ 74 แสดงกราฟค่าความเร็วรอบของ

ล้อรถดังกล่าวเทียบกับความเร็วที่ใช้ในการทดสอบที่ความเร็วคงที่ 4 5 6 7 8 9 10 และ 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (จากข้อมูลผลการทดลองตารางที่ 6-13) ซึ่งจากภาพจะแสดงให้เห็นได้ว่า ค่าความเร็วรอบของล้อรถที่ใช้จะแปรผันตรงกับความเร็ว ค่าแรงดัน และค่ากระแสที่ใช้ กล่าวคือเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้น ความเร็วของล้อรถก็จะเพิ่มขึ้นตามนั่นเอง และค่าความเร็วรอบของล้อรถทั้ง 2 ข้างมีค่าแตกต่างกัน น้อยมาก (ไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์)

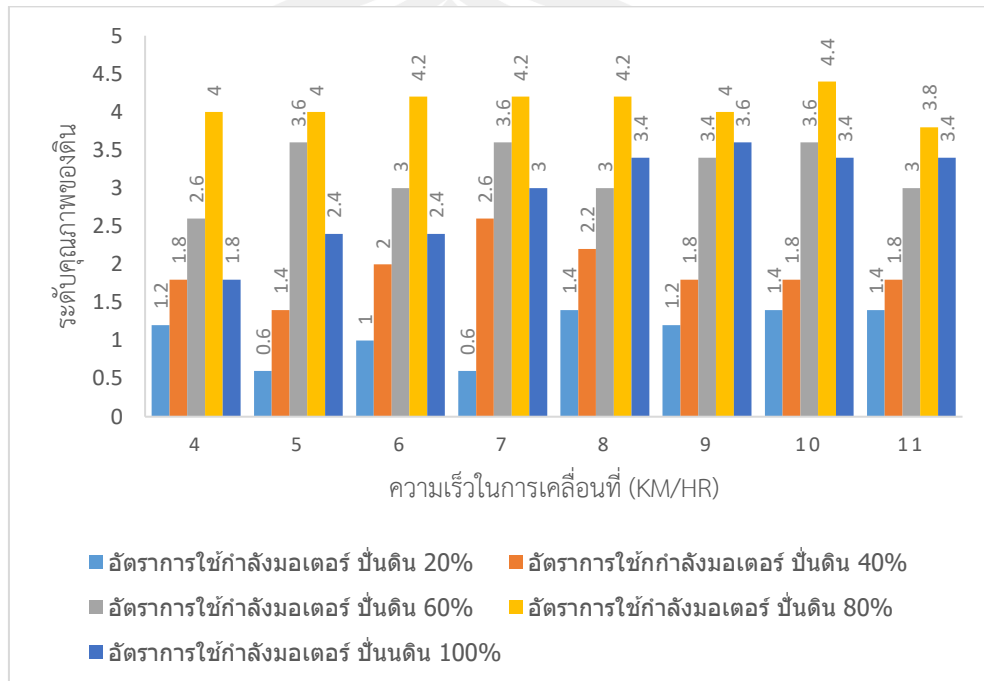


ภาพประกอบ 74 กราฟแสดงค่าความเร็วรอบของล้อรถเทียบกับความเร็วในการเคลื่อนที่

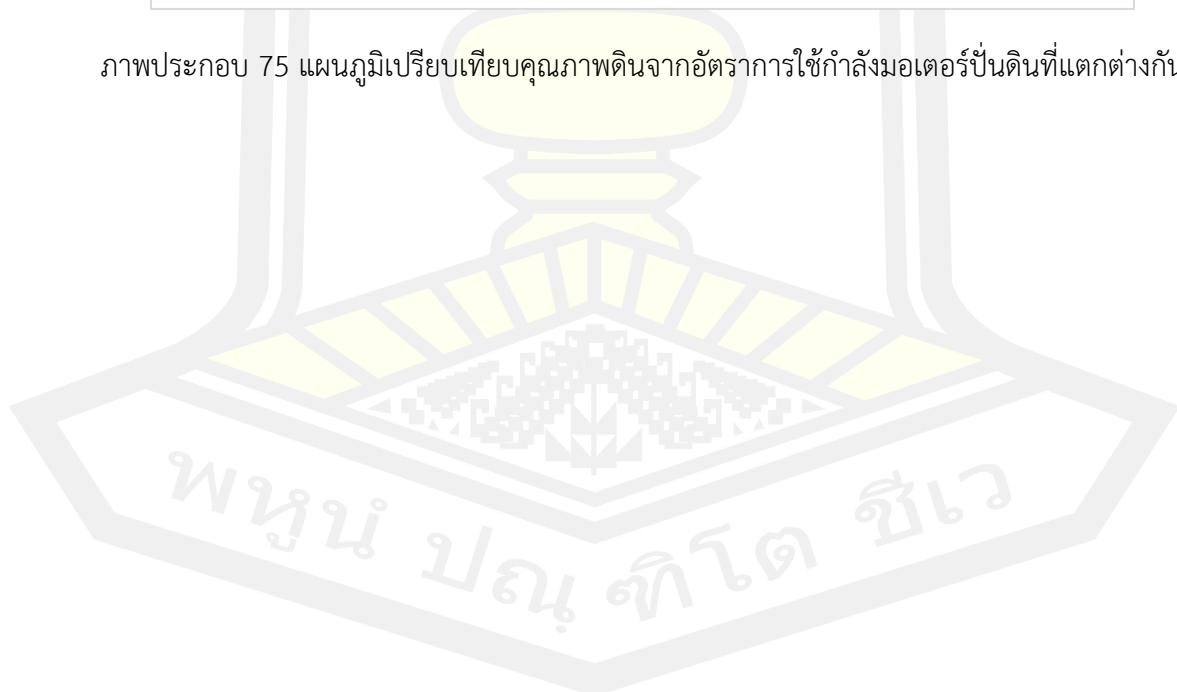
4.5.4 วิเคราะห์แผนภูมิเปรียบเทียบคุณภาพดินจากอัตราการใช้กำลังมอเตอร์ปั่นดินที่แตกต่างกัน

จากการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.5.1-4.5.3 จะวิเคราะห์ค่า แรงดัน กระแส และความเร็วรอบของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าต้นแบบเทียบกับความเร็วของรถในการเคลื่อนที่ ซึ่งในการวิเคราะห์ในหัวข้อนี้ จะวิเคราะห์ในการทดลองปั่นดินโดยใช้อัตรากำลังมอเตอร์ปั่นดินที่แตกต่างกัน 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ และค่าความเร็วรอบประมาณจะอยู่ที่ 38 76 114 152 190 รอบต่อนาที ตามลำดับ ภาพประกอบ 75 แสดงแผนภูมิเปรียบเทียบคุณภาพดินจากอัตราการใช้กำลังมอเตอร์ปั่นดินที่แตกต่างกัน โดยใช้ความเร็วในการทดสอบที่ความเร็วคงที่ 4 5 6 7 8 9 10 และ 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (จากข้อมูลผลการทดลองตารางที่ 15-22) ซึ่งจากภาพจะแสดงให้เห็นได้ว่า อัตราการใช้กำลังของมอเตอร์ปั่นดินกับเครื่องปั่นดินที่อัตรากำลัง 80 เปอร์เซ็นต์ ของมอเตอร์โดยมีความเร็วรอบของเครื่องปั่นดินประมาณ 152 รอบต่อนาที เป็นอัตราที่ใช้กำลังที่ทำให้คุณภาพของดินออกมาได้คุณภาพ

ดีที่สุดเมื่อเทียบกับอัตราการใช้กำลังของมอเตอร์ปั่นดินในช่วงอื่นๆ และความเร็วที่เหมาะสมที่จะใช้ในการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าในการปั่นดินช่วงความเร็ว 7-9 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นความเร็วที่ได้จากผู้วิจัยทดลองในพื้นที่ทดลองจริง



ภาพประกอบ 75 แผนภูมิเปรียบเทียบคุณภาพดินจากอัตราการใช้กำลังมอเตอร์ปั่นดินที่แตกต่างกัน



บทที่ 5

สรุปผล และอภิปรายผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. การวิจัยนี้เป็นการศึกษาและออกแบบรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าควบคุมด้วยรีโมทอย่างง่าย เกี่ยวกับการเปลี่ยนเครื่องยนต์พลังงานน้ำมันเป็นไฟฟ้า การออกแบบรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าอย่างง่าย และระบบควบคุมรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าด้วยรีโมท

2. ต้นแบบรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าที่จัดสร้างขึ้นเป็นไปตามการออกแบบโดยสมบูรณ์ ซึ่งมี ส่วนประกอบทั้งหมดได้แก่ ล้อที่ใช้ในการขับเคลื่อนที่ 4 ล้อ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 เซนติเมตร มีขอบกว้าง 4.5 เซนติเมตร ทำมาจากเหล็กแข็ง ซึ่งแต่ละล้อสามารถรับน้ำหนักได้สูงสุด 100 กิโลกรัม สามารถรับแรงกระทะของรถได้ดี มอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่ขนาดกำลัง 250 วัตต์ จำนวน 2 ตัว ที่ได้จากการคำนวณ และมอเตอร์ที่ใช้ในการปั่นดิน 1,000 วัตต์ ได้จากกำลังเครื่องยนต์ เครื่องตัดหญ้าที่ใช้กับเครื่องปั่นดิน ขนาดกำลัง 1.25 แรงม้า แบตเตอรี่ 24 โวลต์ ได้จากแรงดันที่ มอเตอร์ 1,000 วัตต์ ที่ใช้ตามสเปคของมอเตอร์ และแบตเตอรี่ 12 โวลต์ ได้จากแรงดันสเปคของ มอเตอร์กระแสตรงที่ใช้ในการขับเคลื่อน เครื่องปั่นดินมีขนาดความยาว 32 เซนติเมตร มี 6 ใบ เป็น เหล็กแข็ง ความเร็วที่เหมาะสมสำหรับเครื่องปั่นดินคือ 120-180 รอบต่อนาที เบรกเกอร์จำนวน 2 ตัว ป้องกันการลัดวงจรจากแบตเตอรี่ไปยังกล่องวงจรระบบควบคุมรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าควบคุมด้วยรีโมท

2.1 การออกแบบระบบควบคุมรถแทรกเตอร์ไฟฟ้า ในการควบคุมมอเตอร์เพื่อใช้ในการ ขับเคลื่อน และควบคุมมอเตอร์เพื่อใช้ในการพรวนดิน โดยมีการแบ่งจ่ายแรงดันขาเข้าออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) แรงดันขาเข้า 12 โวลต์ จะจ่ายให้กับโพลมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนขนาด 250 วัตต์ จำนวน 2 ตัว และ 2) แรงดันขาเข้า 24 โวลต์ จะจ่ายให้กับโพลมอเตอร์ที่ใช้ในการพรวนดิน 1,000 วัตต์

2.2 โครงรถใช้เหล็กจำนวน 20 ชิ้น มีหน้าที่ยึดอุปกรณ์ทุกชิ้นเข้าด้วยกันให้เกิดเป็น รถแทรกเตอร์ไฟฟ้าขึ้นมา โดยมีความยาว 100 เซนติเมตร ความกว้าง 66 เซนติเมตร แล้วความสูง 30 เซนติเมตร มีความแข็งแรงทนทาน

3. การทดสอบสมรรถนะของรถแทรกเตอร์ไฟฟ้าต้นแบบ ประกอบด้วย การทดสอบ รถแทรกเตอร์ทำงานในสภาพออฟโรดขณะปั่นดิน มอเตอร์ปั่นดินใช้พลังงานในอัตราที่แตกต่างกันคือ 20 40 60 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเร็วต่างระดับคือ 4 5 6 7 8 9 10 และ 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ของระบบการขับเคลื่อนแบบมอเตอร์คู่ จากบทที่ 4 การวิเคราะห์สัดส่วนความเร็วที่เหมาะสมสำหรับการวิ่งบนสภาพออฟโรดขณะปั่นดิน โดยได้ผลสรุปดังนี้

3.1 ความเร็วที่เหมาะสมในการเคลื่อนที่พรวนดิน คือ 7 8 และ 9 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ เนื่องจากความเร็วในระดับนี้ทำให้สามารถควบคุมทิศทางในการเคลื่อนที่ได้ง่าย

3.2 ความเร็วในการเคลื่อนที่พรวนดินที่ 4 5 และ 6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่ารถเคลื่อนที่ช้า และมีแรงในขับเคลื่อนน้อย ทำให้เกิดปัญหาติดกับก้อนดินบ่อย ไม่สามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้

3.3 ความเร็วในการเคลื่อนที่พรวนดินที่ 10 และ 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พบว่ารถเคลื่อนที่เร็วเกินไป ทำให้ควบคุมทิศทางในการเคลื่อนที่ยาก ทำให้รถวิ่งออกนอกเส้นทางบ่อย

3.4 อัตราภาระโหลดการใช้พลังงานของมอเตอร์ปั่นดินที่เหมาะสมคือ 80 60 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

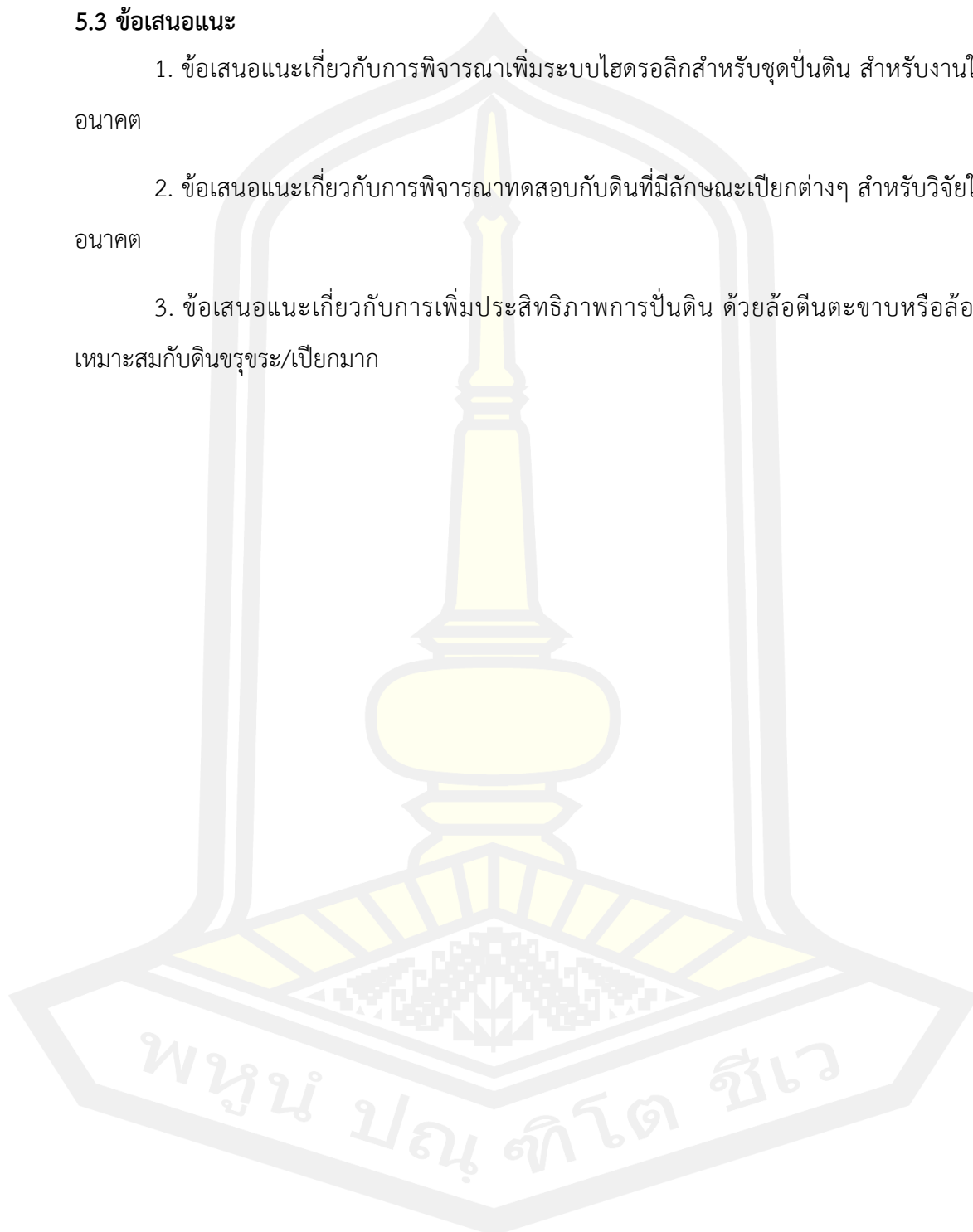
3.5 อัตราภาระโหลดการใช้พลังงานของมอเตอร์ปั่นดินที่ 20 และ 40 เปอร์เซ็นต์ พบว่าเครื่องปั่นดินหมุนช้าและปั่นดินได้ไม่สม่ำเสมอ

5.2 อภิปรายผลการทดลอง

จากผลการทดลองในบทที่ 4 หัวข้อ 4.5.1-4.5.3 สังเกตได้จากภาพประกอบ จะเห็นได้ว่ากราฟที่ได้จะเป็นเชิงเส้น โดยแรงดัน กระแส และความเร็วรอบของล้อที่วัดได้ มีค่าแปรผันตามความเร็วมอเตอร์ ซึ่งอธิบายไว้ในบทที่ 2 ความเร็วในการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมต่อการปั่นดินได้แก่ 7 8 และ 9 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และอัตราการใช้พลังงานของมอเตอร์ปั่นดินที่เหมาะสมคือ 80 เปอร์เซ็นต์ เครื่องปั่นดินปั่นได้ประมาณ 152 รอบต่อนาที ทำให้ได้ดินที่มีคุณภาพดีที่สุด ทั้งนี้เป็นไปตามแนวคิดของงานวิจัยที่ได้ศึกษาในบทที่ 1 และบทที่ 2 ที่ได้นำเสนอสมการคำนวณค่าความเร็วต่อการลากจูง ซึ่งอธิบายไว้แล้วในหัวข้อ 2.3 และได้นำมาแสดงการคำนวณในหัวข้อ 3.2 รถแทรกเตอร์ไฟฟ้าสามารถทำงานได้ประมาณ 7 ชั่วโมง ต่อการประจุแบตเตอรี่ 1 ครั้ง

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการพิจารณาเพิ่มระบบไฮดรอลิกสำหรับชุดปั้นดิน สำหรับงานในอนาคต
2. ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการพิจารณาทดสอบกับดินที่มีลักษณะเปียกต่างๆ สำหรับวิจัยในอนาคต
3. ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพการปั้นดิน ด้วยล้อดินตะขาบหรือล้อที่เหมาะสมกับดินขรุขระ/เปียกมาก



บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

- [1] กวี คงมั่น, พยุงศักดิ์ จุลยุเสณ, คธา วาทกิจ, & จริญญาศักดิ์ สมพงษ์. (2013). การพัฒนา เครื่องมือวัดแรงแบบสามแนวแกนสำหรับการต่อพ่วงสามจุดของรถแทรกเตอร์เกษตรขนาดเล็ก.
- [2] Olivier, J. G., Schure, K. M., & Peters, J. A. H. W. (2017). Trends in global CO2 and total greenhouse gas emissions. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 5
- [3] กระทรวงคมนาคม. (2562). “จำนวนรถที่จดทะเบียนสะสม ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2555–2562”. สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร. [Online]. Available: http://mistran.otp.go.th/mis/Interview_HIRegisteredCar.aspx. (25 January 2021)
- [4] ชูชาติ เฉลิมถ้อย, สุรเชษฐ์ บำรุงศิริ, อำนวยยศ ทองคำ,เจษฎา อนุรักษ์, นฤเบศร์ สัมมาเกต, & สุชาติ บำรุงกิจ. (2015). “การศึกษาการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับไถพรวนงาน”. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Choochart-Chaloemthoi/publication/307982045_Study_of_Fuel_Consumption_for_Disk_Harrow/links/57d6021208ae5f03b49329d3/Study-of-Fuel-Consumption-for-Disk-Harrow.pdf. (25 January 2021)
- [5] Baek, S. Y., Kim, Y. S., Kim, W. S., Baek, S. M., & Kim, Y. J. (2020). Development and Verification of a Simulation Model for 120 kW Class Electric AWD (All-Wheel-Drive) Tractor during Driving Operation. *Energies*, 13(10), 2422.
- [6] Matache M.G., Cristea M., Găgeanu I., Zapciu A., Tudor E., Carpus E. & Popa L.D. (2020). Small power Electric Tractor performance during ploughing works. *INMATEH – Agricultural Engineering* Vol. 60, No. 1 /2020 pp. 123-128.
- [7] Ueka, Y., Yamashita, J., Sato, K., & Doi, Y. (2013). Study on the development of the electric tractor: specifications and traveling and tilling performance of a prototype electric tractor. *Engineering in agriculture, environment and food*, 6(4), 160-164.

- [8] ประพันธ์ พิกุลทอง, ดร.ณัฐวุฒิ อินทบุตร, ดร.ภูเทพ ดอนท้วม, ธเนศ วิชาสมงคลชัย, & ผศ. ศิริชัย แดงเอม. (2018). ระบบควบคุมการจ่ายพลังงานไฟฟ้าสำหรับการประจุไฟฟ้าแบบตัววนให้กับรถยนต์ไฟฟ้าในระดับครัวเรือน. *Journal of Energy and Environment Technology of Graduate School Siam Technology College*, 5(1), 43-51.
- [9] อธิวัฒน์ ศรีวิไล & วรรัตน์ ปัตตประกร. (2558). “การศึกษาผลกระทบของยานยนต์ไฟฟ้าประเภทรถยนต์ต่อการใช้พลังงานของประเทศไทย”. [Online]. Available: http://ethesisarchive.library.tu.ac.th/thesis/2015/TU_2015_5510036485_4523_3413.pdf. (27 January 2021)
- [10] Polcar, A., Renčín, L., & Votava, J. (2017). Drawbar pull and its effect on the weight distribution of a tractor. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*.
- [11] อรรถศาสตร์ วิเศียรศาสตร์, & สุจินต์สิมารักษ์. (2013). ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจใช้บริการรถแทรกเตอร์ขนาดกลางของเกษตรกรใน ตำบลน้ำอ้อม อำเภอกระนวน จังหวัดขอนแก่น (Factors Influencing Decision Making to Middle Size Tractor Utilization of Farmers in Nam-Oam Sub-district, Kanuan District, Khon Kaen Province). *KKU Research Journal (Graduate Studies)*, 13(4), 14-26.
- [12] Samseemoung, A. P. D. G. (2017). การออกแบบและสร้างรถไถขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบไร้คนขับพร้อมติดตั้งอุปกรณ์นำทางด้วยระบบ GPS สำหรับเกษตรกรสมัยใหม่. *Thai Society of Agricultural Engineering Journal*, 23(1).
- [13] อธิวัฒน์ เจเถื่อน. (2016). Trajectory Planning for Autonomous Tractor using Polynomial Function. *วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ*, 2(2), 131-138.
- [14] Jatuan, T., Ruangchoho, C., Kathapant, M., Vongstan, K., & Junyusen, P. (2019). การพัฒนาระบบควบคุมการบังคับเลี้ยวสำหรับรถแทรกเตอร์อัตโนมัติ. *วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ*, 5(1), 1-11.
- [15] เนติพงษ์ คำพรหม, ปฏิภาณ นีรานนท์ & ทวีศักดิ์ ทองแสน. (2019). “เครื่องตัดหญ้าไฟฟ้าควบคุมด้วยรีโมท”. *ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่พิมพ์* 2562.

- [16] กนกกัญญากรณ์ พรพราชจรกุล, ชาญวิทย์ ราชกระโทก, เตมีย์ วงษ์ศรี & ศุภวัชร นิยมพันธ์. (2020). รถตัดหญ้าบังคับวิทยุ. วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมมหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์, 5(2), 51-60.
- [17] Moreda, G. P., Muñoz-García, M. A., & Barreiro, P. J. E. C. (2016). High voltage electrification of tractor and agricultural machinery—A review. *Energy Conversion and Management*, 115, 117-131.
- [18] คธา วาทกิจ. (2016). “เอกสารประกอบการสอนวิชาวิศวกรรมรถแทรกเตอร์เกษตร”. สำนักวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [19] อนุตร จำลองกุล. (2008). “ทฤษฎีของระบบเดิน-เครื่องจักรกล”. พิมพ์ครั้งที่ 1. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- [20] อธิวัฒน์, & เจเอ็อน. การพัฒนาระบบออกแบบเส้นทางของรถแทรกเตอร์อัตโนมัติเพื่อการเลี้ยงกลับหัวแปลง (Doctoral dissertation, สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี).
- [21] Larminie, J., & Lowry, J. (2012). *Electric vehicle technology explained*. John Wiley & Sons.
- [22] Manjit Singh. (2014). *Tractor Design and Testing*. “Lesson 9 Mechanics of tractor chassis and stability analysis”. Research Engineer. Department of Farm Machinery and Power Engg., PAU, Ludhiana. [Online]. Available: <http://ecoursesonline.iasri.res.in/mod/page/view.php?id=126183>. (28 January 2021)
- [23] Barger, E. L., CARLETON, W. M., McKibben, E. G., & Bainer, R. (1952). *Tractors and their power units* (Vol. 73, No. 5, p. 418). LWW.
- [24] มานะ ศักดิ์, & ทิพย์ ภูจอม. การหาแบบเหมาะสมของล้อเหล็กรถไฟเดินตามสำหรับการใช้งานในสภาพไร่ (Doctoral dissertation, สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี). Electric Vehicles Initiative (2018). *Global EV Outlook: Understand the electric vehicle landscape to 2020*.
- [25] อรัญ ประกอบสิทธิ์ & ชลธิ์ โพธิ์ทอง. (2020). อัตราส่วนกำลังไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับมอเตอร์ในระบบขับเคลื่อนมอเตอร์คู่ของยานยนต์ไฟฟ้าภายใต้สถานะการผลิตกำลังไฟฟ้า

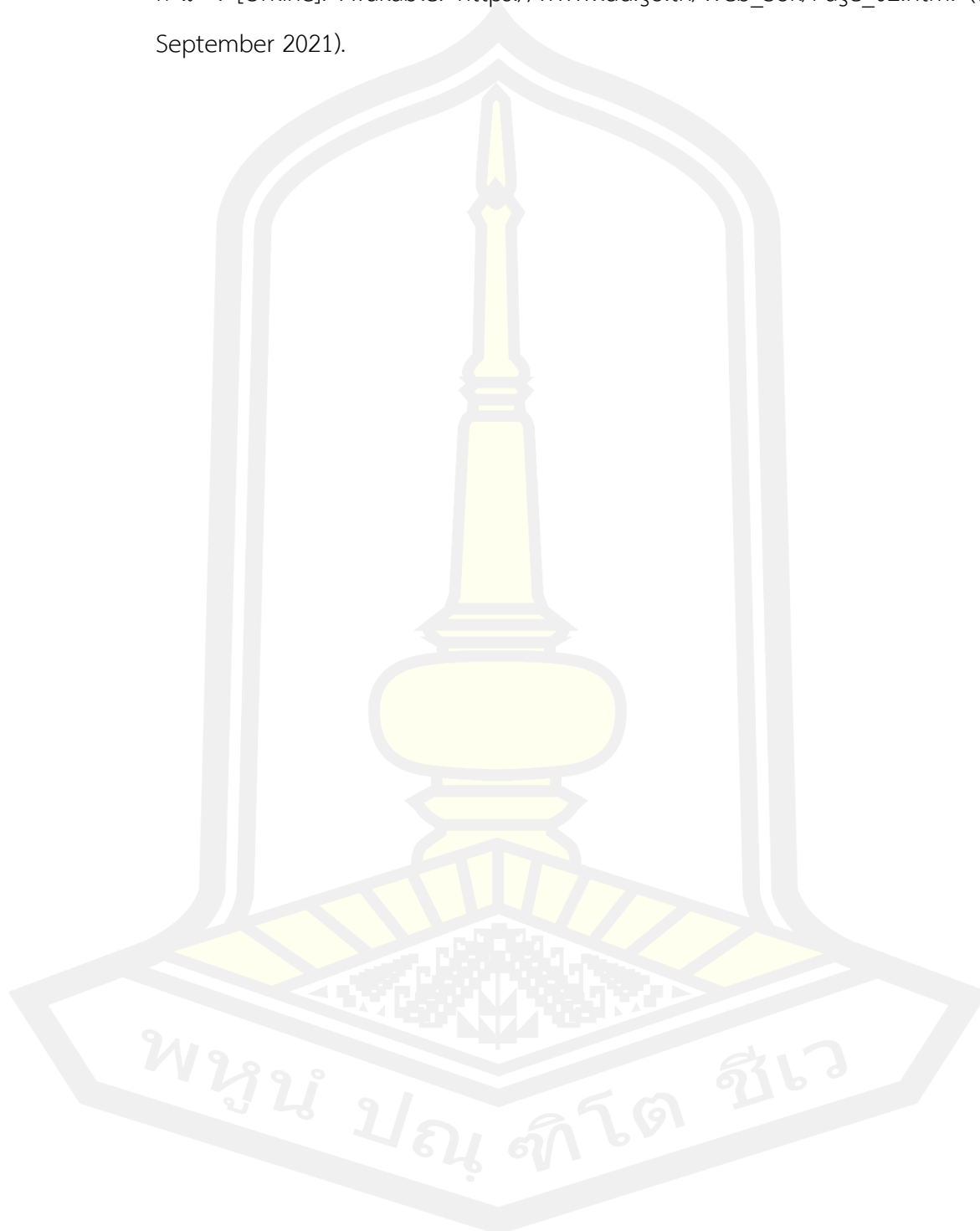
ป้อนกลับขณะเบรก. ปรินญาปรัชญาดุสิตบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

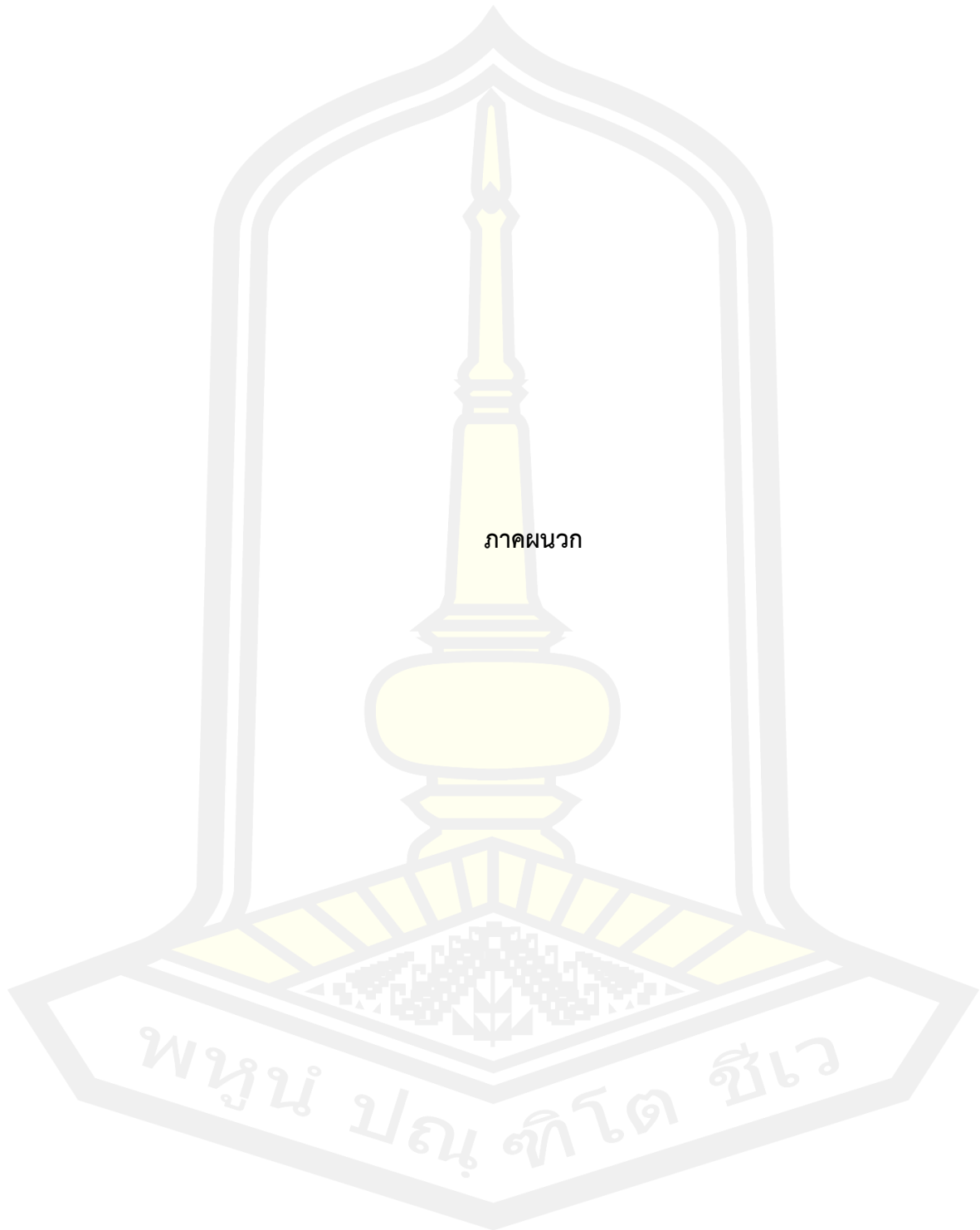
- [26] ดุสิต สุรย์ราช. (2546). เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง . กรุงเทพฯ ฯ : ศูนย์ส่งเสริมวิชาการ.
- [27] นภัทร วัจนเทพินทร์ และ ประเสริฐ ปิ่นปฐมรัฐ (2548). เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง. ปทุมธานี : สกายบุ๊ก.
- [28] สุรน แก่นตัน. (2556). เครื่องกลไฟฟ้ากระแสตรง . นนทบุรี: ศูนย์หนังสือเมืองไทย จำกัด.
- [29] บริษัท สีขร จำกัด, (2018), โครงการศึกษาวิจัยถอดแบบชิ้นส่วนยานยนต์ไฟฟ้า, โครงการศูนย์การเรียนรู้เทคโนโลยีและนวัตกรรม เพื่อการพัฒนาอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้า ปี 2561, สถาบันยานยนต์อุตสาหกรรมพัฒนามูลนิธิ, [Online]. Available: <https://www.thaiauto.or.th/2012/th/services/ev/pdf/research/2018/โครงการศึกษาวิจัยถอดแบบชิ้นส่วนยานยนต์ไฟฟ้า.pdf>, (28 January 2021)
- [30] Electrical Motors Basic Components, Classification of Electric Motors, [Online]. Available: <http://www.electrical-knowhow.com/search?q=Brushed+DC+Motor+Construction+>. (20 February 2021).
- [31] “บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง”. [Online]. Available: http://www.c-engineer.com/images/pulldown_1304840984/DC%20electric%20motors.pdf. (21 February 2021)
- [32] วิโรจน์ เพชรพันธุ์ศรี , DC-DC CONVERTER, [Online]. Available: http://samraeng.com/lab_power/dc-dc%20con-1.pdf. (22 February 2021).
- [33] Curran, S. J., Wagner, R. M., Graves, R. L., Keller, M., & Green Jr, J. B. (2014). Well-to-wheel analysis of direct and indirect use of natural gas in passenger vehicles. *Energy*, 75, 194-203.
- [34] Andersen, G. (2012). Fueling the Future. *State Legislatures*, 20. [Online]. Available: <http://www.ncsl.org/research/energy/fueling-the-future.aspx>. (24 February 2021).

- [35] Khayyam, H., & Bab-Hadiashar, A. (2014). Adaptive intelligent energy management system of plug-in hybrid electric vehicle. *Energy*, 69, 319-335.
- [36] Claytex, NAIGT sets out hybrid, low carbon emission future for the automotive industry. [Online]. Available: <http://www.claytex.com/applications/hybrids/naigt>. (26 February 2021).
- [37] College of engineering, Energy Storage, San Diego State University. [Online]. Available: <http://engineering.sdsu.edu/~hev/energy.html>. (05 March 2021).
- [38] Fuel Cell Today, PEMFC, 2012. [Online]. Available: <http://www.fuelcelltoday.com/about-fuelcells/technologies/pemfc>. (15 March 2021).
- [39] Wikipedia. “การสื่อสารไร้สาย”. [Online]. Available: <http://th.wikipedia.org/wiki/การสื่อสารไร้สาย>. (06 March 2021).
- [40] Wikipedia. “อินฟราเรด”. [Online]. Available: <http://th.wikipedia.org/wiki/อินฟราเรด>. (06 March 2021).
- [41] Wikipedia. “คลื่นวิทยุ”. [Online]. Available: <http://th.wikipedia.org/wiki/คลื่นวิทยุ>. (06 March 2021).
- [42] Wikipedia. “ข้อแตกต่างระหว่างรีโมทอินฟราเรดและรีโมทสัญญาณวิทยุ”. [Online]. Available: <http://th.wikipedia.org/wiki/คลื่นวิทยุ>. (06 March 2021).
- [43] Wikipedia. “รีโมทคอนโทรล”. [Online]. Available: <http://th.wikipedia.org/wiki/รีโมทคอนโทรล>. (06 March 2021).
- [44] กรัณวิณัฐ วงษ์ไชยมูล. บทเรียนวิชาเทคนิคการอินเทอร์เฟซ, “บทที่ 1 เกี่ยวกับ Arduino”. [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/karanwinatktech/unit1>. (08 March 2021).
- [45] ธนภณ ศุภอัครวโภคิน. “Review Cytron MDD10A Dual Channel 10A DC Motor Driver”. POSTED ON 23 SEPTEMBER 2016 BY SUPPORT THAIEASYLEC. [Online]. Available: <https://blog.thaieasyelec.com/review-cytron-mdd10a-dual-channel-10a-dc-motor-driver/>. (08 March 2021).

- [46] arduino4. “DC Motor Drive Module BTN7960”. [Online]. Available: <https://www.arduino4.com/product/844/btn7960-bts7960-43a-current-limiting-high-power-h-bridge-dc-motor-drive-module-โม้ดูล์ข้บ-motor-dc>. (12 March 2021).
- [47] Allnewstep. “บอร์ด Relay 5V 1 ช่อง 30A 5VDC Active High”. [Online]. Available: <https://www.allnewstep.com/product/1755/บ้อร์ด-relay-5v-1-ช่อง-30a-5vdc-active-high>. (12 March 2021).
- [48] Rankrc. “FLYSKY 2.4Ghz FS-i6X”. [Online]. Available: <http://www.rankrc.com/FLYSKY-2.4Ghz-FS-i6X>. (12 March 2021).
- [49] www.robotshop.com “Arduino Mega 2560 Datasheet” [Online]. Available: <http://eprints.polsri.ac.id/4598/8/File%20VIII%20%28Lampiran%29.pdf>. (12 September 2021).
- [50] “UNITE มอเตอร์ทดเกียร์ (เฟือง) DC12V 250W 306RPM”. [Online]. Available: [https://shopee.co.th/UNITE-มอเตอร์ทดเกียร์-\(เฟือง\)-DC12V-250W-306RPM-พร้อมกล่องคอนโทรล-สำหรับรถไฟฟ้า-i.94060987.5534877053](https://shopee.co.th/UNITE-มอเตอร์ทดเกียร์-(เฟือง)-DC12V-250W-306RPM-พร้อมกล่องคอนโทรล-สำหรับรถไฟฟ้า-i.94060987.5534877053). available online, access (12 September 2021).
- [51] “มอเตอร์ dc บัสเลส ปุ่มชัก โซล่าเซลล์ 1000W 24v” [Online]. Available: <https://www.lazada.co.th/products/dc-1000w-24v-19-i1634652140.html>. (12 September 2021).
- [52] “แบตเตอรี่รถยนต์ (กิ่งแห้ง) GS 40 แอมป์ รุ่น MFX-50L”. [Online]. Available: <https://bit.ly/3H8OIDL>. (12 September 2021).
- [53] “3K Battery รุ่น PMF50L / 12V 50Ah แบตเตอรี่รถยนต์”. [Online]. Available: <https://shopee.co.th/3K-Battery-รุ่น-PMF50L-12V-50Ah-แบตเตอรี่รถยนต์-i.123401445.7836967925>. (12 September 2021).
- [54] “หัวพรวนดิน หัวดายหญ้า ตะกุดดิน (ใบตรงยาว64ซม.)”. [Online]. Available: <https://www.lazada.co.th/products/64-289-i2288948697.html>. (12 September 2021).

- [55] กรมส่งเสริมการเกษตร (Department of Agricultural Extension). “ข้อมูลการจัดการดิน”. [Online]. Available: https://www.ldd.go.th/Web_Soil/Page_02.htm. (12 September 2021).





ภาคผนวก

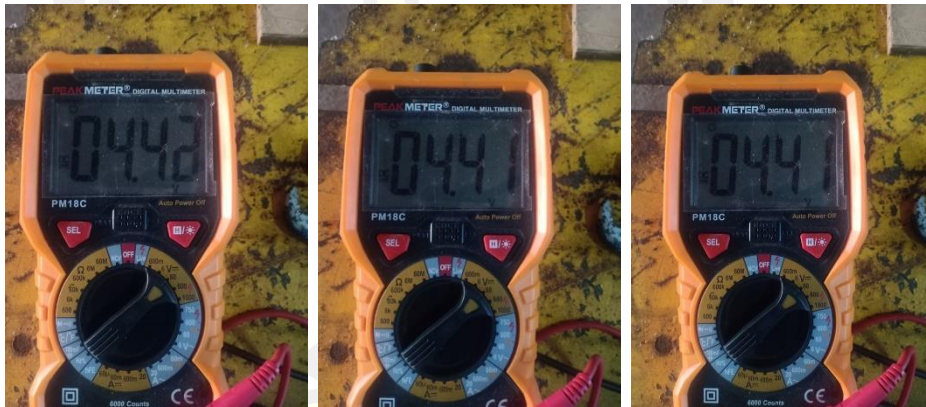
พหุมนุ ปณฺ ทิโต ชีเว



ภาคผนวก ก

ภาพแสดงผลจากการวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าวัดแรงดันไฟฟ้าของมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนทั้งสองตัว

วัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อใช้ความเร็ว 4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



วัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อใช้ความเร็ว 5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



วัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อใช้ความเร็ว 6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



วัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อใช้ความเร็ว 7 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



วัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อใช้ความเร็ว 8 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



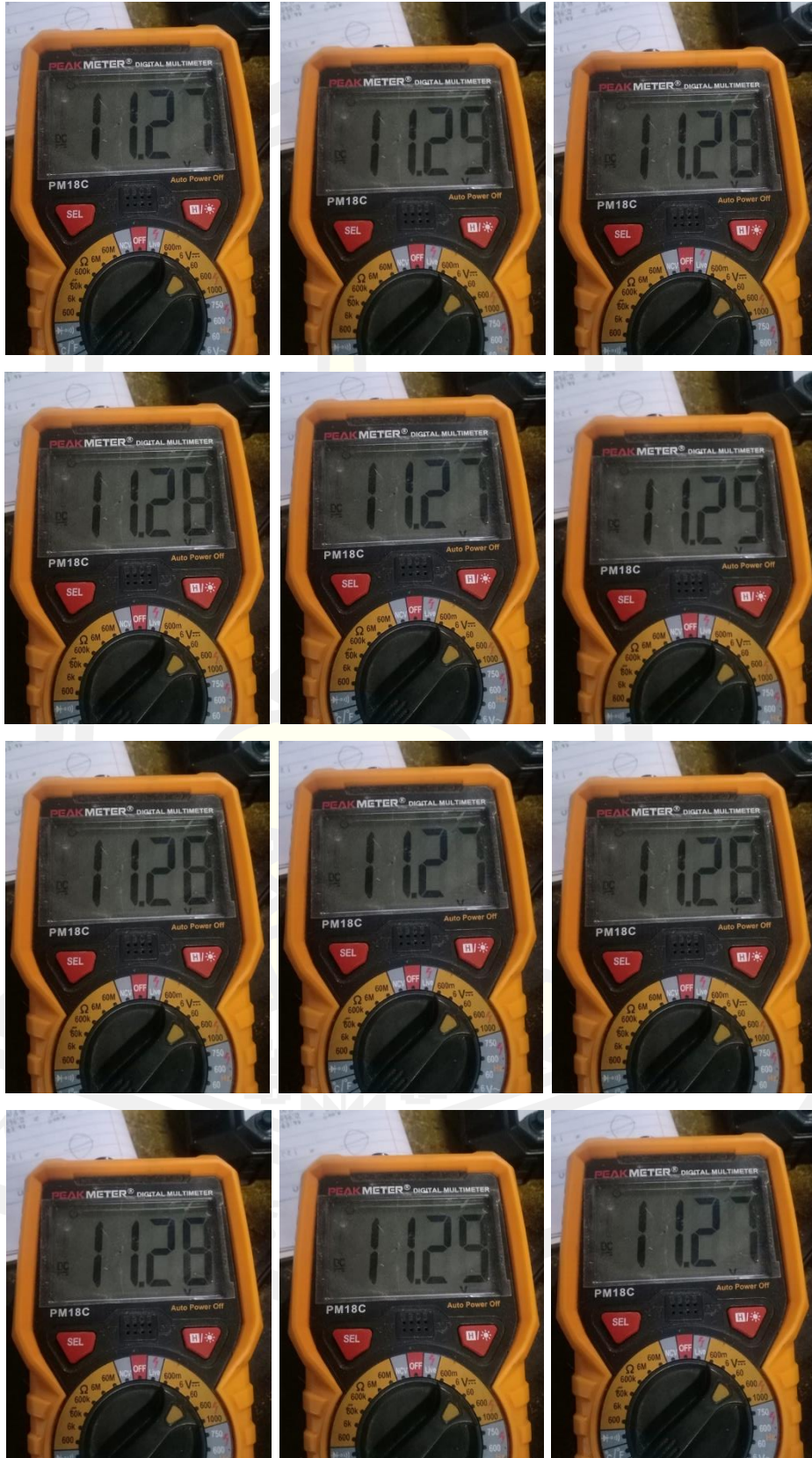
วัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อใช้ความเร็ว 9 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



วัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อใช้ความเร็ว 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



วัดค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อใช้ความเร็ว 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง





วัดค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อใช้ความเร็ว 4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



วัดค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อใช้ความเร็ว 5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



วัดค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อใช้ความเร็ว 6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



วัดค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อใช้ความเร็ว 7 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



วัดค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อใช้ความเร็ว 8 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



วัดค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อใช้ความเร็ว 9 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

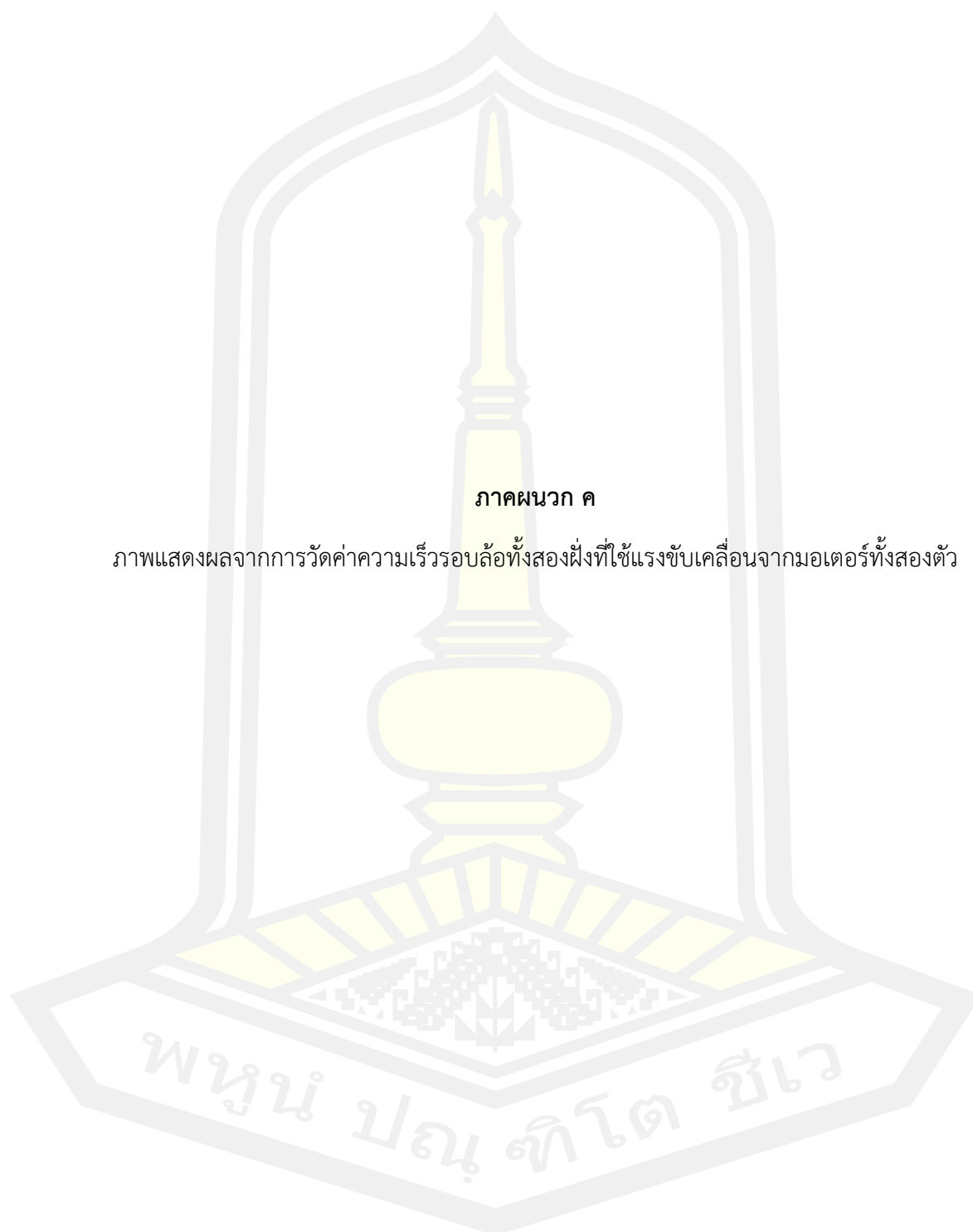


วัดค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อใช้ความเร็ว 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



วัดค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อใช้ความเร็ว 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง





ภาคผนวก ค

ภาพแสดงผลจากการวัดค่าความเร็วรอบล้อทั้งสองฝั่งที่ใช้แรงขับเคลื่อนจากมอเตอร์ทั้งสองตัว

วัดค่าความเร็วรอบล้อทั้งสองฝั่งที่วัดได้เมื่อใช้ความเร็ว 4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



วัดค่าความเร็วรอบล้อทั้งสองฝั่งที่วัดได้เมื่อใช้ความเร็ว 5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



วัดค่าความเร็วรอบล้อทั้งสองฝั่งที่วัดได้เมื่อใช้ความเร็ว 6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



วัดค่าความเร็วรอบล้อทั้งสองฝั่งที่วัดได้เมื่อใช้ความเร็ว 7 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



วัดค่าความเร็วรอบล้อทั้งสองฝั่งที่วัดได้เมื่อใช้ความเร็ว 8 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



วัดค่าความเร็วรอบล้อทั้งสองฝั่งที่วัดได้เมื่อใช้ความเร็ว 9 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



วัดค่าความเร็วรอบล้อทั้งสองฝั่งที่วัดได้เมื่อใช้ความเร็ว 10 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



วัดค่าความเร็วรอบล้อทั้งสองฝั่งที่วัดได้เมื่อใช้ความเร็ว 11 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายณัฐพล นาสถิตย์
วันเกิด	29 ธันวาคม 2540
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลศูนย์ขอนแก่น
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	47 บ้านโจดน้อย หมู่ 4 ต.พระบุ อ.พระยืน จ.ขอนแก่น 40320
ประวัติการศึกษา	พ.ศ.2559 มัธยมปลาย โรงเรียนประชารัฐวิทยาเสริม พ.ศ.2563 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม พ.ศ.2564 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วศ.ม.) สาขา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย มหาสารคาม

พหุบัณฑิต ชีวะ