

การพัฒนารถไฟฟ้ารางเดี่ยวอัตโนมัติสำหรับขนส่งเอกสารระหว่างอาคาร



นายนนทพัทธ์ สุทธิมล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2565

DEVELOPMENT OF AUTOMATED MONORAIL FOR DOCUMENTS
TRANSPORTATION BETWEEN BUILDINGS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical and Process
System Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2022

การพัฒนาหลักสูตรรายวิชาด้วยวัตโนมิติสำหรับขนส่งเอกสารระหว่างอาคาร

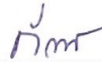
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นหน่วยงานหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



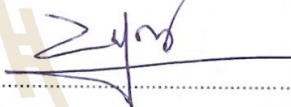
(ผศ. ดร.ทศพล รัตนนิมิตชัย)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.กิริติ สุลักษณ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.บัณฑิต กฤตาคม)

กรรมการ



(ผศ. ดร.กระวี ตรีอำนาจ)

กรรมการ



(ผศ. ดร.สุเดช ตัญตรัยรัตน์)

กรรมการ



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

นนทพัทธ์ สุทธิมล : การพัฒนารถไฟฟ้ารางเดี่ยวอัตโนมัติสำหรับขนส่งเอกสารระหว่างอาคาร (DEVELOPMENT OF AUTOMATED MONORAIL FOR DOCUMENTS TRANSPORTATION BETWEEN BUILDINGS)
อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิริติ สุลักษณ์ , 97 หน้า.

คำสำคัญ : รถไฟฟ้ารางเดี่ยวอัตโนมัติ การขนส่งอัตโนมัติ ระบบควบคุม

งานวิจัยนี้พัฒนาต้นแบบรถไฟฟ้ารางเดี่ยวอัตโนมัติสำหรับขนส่งเอกสารระหว่างอาคาร การออกแบบรถได้คำนวณหาค่าพิกัดกำลังมอเตอร์เพื่อใช้ในระบบขับเคลื่อน โปรไฟล์ความเร็วการเคลื่อนที่ที่ถูกออกแบบเป็น 4 โหมด คือ การเร่งความเร็ว ความเร็วคงที่ การลดความเร็ว และการหยุด RFID ถูกติดตั้งบนรางจำนวน 6 ชุด เพื่อใช้ระบุตำแหน่งรถบนรางและนำไปสู่การปรับความเร็วให้เป็นไปตามโปรไฟล์ความเร็วที่ออกแบบ แบตเตอรี่ลิเทียมโพลีเมอร์ขนาด 3000 mAh ถูกใช้เป็นแหล่งพลังงานให้รถ กล้องและระบบปัญญาประดิษฐ์ถูกนำมาใช้ตรวจจับผู้สัญจรบริเวณด้านหน้ารถเพื่อสั่งให้รถชะลอความเร็ว ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ออกแบบเป็นระบบควบคุมแบบวงปิดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาจากผลการทดลองช่วงความเร็วใช้งาน ถูกนำไปใช้วิเคราะห์ผล การตอบสนองของระบบนำไปสู่การปรับอัตราขยายของตัวควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์ (PI) ที่เหมาะสม ระบบถูกออกแบบให้สามารถสั่งงานและแสดงสถานะการทำงานผ่านหน้าจอมือถือ อุปกรณ์ในระบบสื่อสารกันด้วยโปรโตคอล IoT เพื่อส่งค่าไปที่ Blynk Platform เพื่อแสดงค่าน้ำหนักบรรทุก เปอร์เซ็นต์แบตเตอรี่ ตำแหน่งตัวรถ และจำนวนรอบในการรับส่งเอกสาร จากการทดสอบสมรรถนะการใช้งานบนรางทดสอบยาว 8.3 m ในกรณีมีโหลดและกรณีไม่มีโหลด พบว่ารถสามารถแล่นไปกลับระหว่างสถานีปลายทางได้ด้วยการสั่งการผ่านมือถือ ค่า PI ที่เหมาะสมสำหรับใช้ควบคุมความเร็วการขับเคลื่อน เท่ากับ 0.06 และ 0.0085 ตามลำดับ รถสามารถเคลื่อนที่ได้ตามโปรไฟล์ความเร็วที่ออกแบบโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุด 8 เปอร์เซ็นต์ จากการทดสอบการใช้พลังงานของรถพบว่าความเร็ว 0.5 m/s ใช้พลังงานต่ำสุด โดยให้ระยะทางทำการประมาณ 10,375 m ในกรณีไม่มีโหลด

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนักศึกษา จ.จ.จ.จ.จ.
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ก.ก.ก.

NONTHAPHAT SUTTHIMON : DEVELOPMENT OF AUTOMATED MONORAIL FOR DOCUMENTS TRANSPORTATION BETWEEN BUILDINGS. THESIS ADVISOR : ASST.PROF.KEERATI SULUKSNA, D.Eng., 97 PP.

Keyword : AUTOMATIC MONORAIL/AUTOMATED TRANSPORTATION /CONTROL SYSTEM

This research develops a prototype of automated monorail for transporting the documents between buildings. The vehicle design has calculated the motor power rating for using in the propulsion system. The motion speed profile has designed on four modes: acceleration, constant speed, deceleration and stopping. Six sets RFID were installed on the track to identify the vehicle's position on the track and to adjust the speed according to the designed speed profile. A 3000 mAh lithium polymer battery is used to be the vehicle power source. Camera integrate artificial intelligence systems are used to detect the passers-by in front of the vehicle to instruct the vehicle slow down the speed. The motor speed control system is designed with closed-loop model. A mathematical model developed from operating speed range experimental data was used to analyze the system response leading to an adjustment for the appropriate gain of the proportional-integral (PI) control. The system is designed to operate and display the operating status through mobile. The system devices communicate to each other via IoT protocols and send data to Blynk Platform. The payload, battery percentage, vehicle location and number of transferring cycles are displayed. From performance testing on a 8.3 m long track in cases of load and no load. It was found that the vehicle can run between two setting stations by commanding via mobile phone. The optimum PI values for driving speed control were 0.06 and 0.0085, respectively. The vehicle can run according to the designed speed profile with a maximum error of 8 percent. From testing of energy consumption, a speed of 0.5 m/s was found to be the lowest energy consume. The total operating distance is around 10,375 m in case of no load.

School of Mechanical Engineering
Academic Year 2022

Student's Signature *Nonthaphat*
Advisor's Signature *Keerati Sulak*

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกลและกระบวนการ ผู้จัดทำขอกราบ ขอบพระคุณ บุคคล และกลุ่มบุคคล ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลือการทำวิจัยอย่าง ดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการ และการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กীরติ สุกษณม์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำและแนะแนวทางในการแก้ปัญหาตลอดการทำงานวิจัย รวมทั้งตรวจทานและแก้ไขเล่ม วิทยานิพนธ์นี้จนเสร็จสมบูรณ์

คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำและให้ความรู้ทางด้านวิชาการเป็นอย่างดีตลอด ระยะเวลาการเข้าศึกษา

ขอบคุณ คุณศิวศิลป์ พรจำศิลป์ ที่ได้ให้คำปรึกษา และอำนวยความสะดวกสำหรับสถานที่ และอุปกรณ์ในการทำงาน

ขอบคุณเพื่อน และพี่ ที่กำลังศึกษาและสำเร็จการศึกษา ที่คอยให้คำปรึกษาและให้กำลังใจ ผู้วิจัยเสมอมา

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การสนับสนุนทางการศึกษา รวมทั้งให้กำลังใจเป็น อย่างดีมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จเสมอมา

สุดท้ายนี้ขออาราธนา สิ่งศักดิ์สิทธิ์ทั้งหลายจงดลบันดาลให้บุคคลทั้งหลายที่ได้กล่าวนามและ ไม่ได้กล่าวนาม จงมีแต่ความสุขและความเจริญ หากท่านปรารถนาสิ่งใดขอจงสำเร็จสมหวังทุก ประการเทอญ

นนทพัทธ์ สุทธิมล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
2 ปรัชญานวัตกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 แบบจำลองรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร.....	5
2.3 หลักการของระบบควบคุมการเคลื่อนที่.....	6
2.3.1 ระบบควบคุมในตัวรถ.....	7
2.3.2 ระบบควบคุมกลาง.....	7
2.3.3 ชุดควบคุมสำหรับการเดินรถ.....	7
2.3.4 ชุดควบคุมระบบขับเคลื่อน.....	8
2.4 กลศาสตร์การเคลื่อนที่ของยานพาหนะ.....	8
2.5 มอเตอร์ไฟฟ้า.....	10

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.1	มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง..... 11
2.5.2	ค่าพิกัดกำลังมอเตอร์..... 12
2.5.3	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง..... 12
2.6	ระบบควบคุม 15
2.6.1	ระบบควบคุมแบบเปิด..... 15
2.6.2	ระบบควบคุมแบบปิด..... 15
2.6.3	ตัวควบคุมแบบพีไอดี..... 16
2.6.4	การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ 17
2.6.5	การออกแบบโปรไฟล์ความเร็วการเคลื่อนที่..... 19
2.7	อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง..... 20
2.7.1	โปรโตคอล MQTT 20
2.7.2	โปรโตคอล TCP/IP 21
2.7.3	โปรโตคอล HTTP..... 21
2.8	การตรวจจับวัตถุ..... 21
2.8.1	การตรวจจับวัตถุโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบสังวัตนาการ 21
2.8.2	การตรวจจับวัตถุด้วยเซนเซอร์ 25
2.9	เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 25
2.10	สรุป 29
3	วิธีการดำเนินการวิจัย 30
3.1	บทนำ..... 30
3.1.1	แนวคิดการออกแบบ 30
3.1.2	แผนการดำเนินงานวิจัย..... 31
3.2	อัลกอริทึมการทำงานหลักของระบบรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร 32
3.3	การออกแบบและสร้างต้นแบบรถไฟฟ้าสำหรับขนส่งเอกสาร 39

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.1	การออกแบบตัวรถ 39
3.3.2	การคำนวณหาพิกัดกำลังการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร..... 40
3.3.3	การติดตั้งอุปกรณ์..... 46
3.4	การออกแบบระบบควบคุมการขับเคลื่อน 48
3.4.1	การระบุเอกลักษณ์ของระบบขับเคลื่อน..... 49
3.4.2	การใช้ MATLAB ในการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมพีไอ..... 50
3.5	การออกแบบอัลกอริทึมควบคุมการเดินรถ 51
3.5.1	อัลกอริทึมการทำงานของระบบขับเคลื่อน..... 52
3.5.2	อัลกอริทึมระบบตรวจจับสัญญาณสำหรับการควบคุมการเดินรถ..... 54
3.5.3	อัลกอริทึมระบบการสื่อสาร..... 55
3.6	การออกแบบระบบอินเทอร์เน็ตเฟสสำหรับสื่อสารกับผู้ใช้งาน..... 56
3.6.1	การออกแบบหน้าจออินเทอร์เน็ตเฟส..... 56
3.6.2	วิธีการใช้งานสำหรับผู้ใช้..... 57
3.7	การออกแบบโปรไฟล์ความเร็วการเคลื่อนที่ 57
3.8	การออกแบบระบบตรวจจับผู้สัญจรด้วยกล้อง 61
3.8.1	การเก็บข้อมูล..... 61
3.8.2	การเตรียมข้อมูล..... 61
3.8.3	การเลือกโมเดล 62
3.8.4	การฝึกโมเดล..... 63
3.8.5	การประเมินโมเดล 63
3.8.6	การทดสอบโมเดล 63
3.8.7	การนำโมเดลไปใช้งาน..... 64
3.9	สรุป 64

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4	ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	65
4.1	บทนำ.....	65
4.2	อุปกรณ์และเครื่องมือวัดพื้นฐานที่ใช้ในการทดสอบ.....	65
4.3	การทดสอบระบบควบคุมการเดินรถไฟฟ้า	65
4.4	การทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร.....	71
4.4.1	ผลการทดสอบการระบุเอกลักษณ์ของระบบขับเคลื่อน	71
4.4.2	การปรับปรุงผลการตอบสนองของระบบด้วยตัวควบคุมพีไอ	73
4.4.3	การทดสอบการติดตามความเร็วตามโปรไฟล์การออกแบบ.....	74
4.4.4	การทดสอบเสถียรภาพการเคลื่อน.....	79
4.5	การทดสอบการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร	80
5	สรุปและข้อเสนอแนะ.....	83
5.1	สรุปผลการวิจัย	83
5.2	ข้อเสนอแนะ	84
รายการอ้างอิง	85
ภาคผนวก		
	ภาคผนวก ก. บทความทางวิชาการที่เผยแพร่ระหว่างการศึกษา	88
ประวัติผู้เขียน	97

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ค่าใช้จ่ายการส่งเอกสารของหน่วยงานใน มทส. ปีงบประมาณ 2564.....	2
2.1 ผลกระทบของระบบจากคุณสมบัติของพารามิเตอร์ควบคุม.....	16
3.1 กำหนดค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณแรงขับเคลื่อนรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร.....	42
4.1 ระยะเวลาอ่านค่าของ RFID.....	69
4.2 ระยะเวลาตรวจจับของกล้อง.....	70

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 เส้นทางและเวลาในการส่งเอกสารใน มทส.	1
2.1 ระบบ Tele lift.....	6
2.2 ระบบจำลองเส้นทางการเดินรถของงานวิจัย.....	7
2.3 แผนภาพแรงที่กระทำบนตัวรถขณะรถเคลื่อนที่.....	8
2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์ชนิดต่างๆ.....	11
2.5 โครงสร้างมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน.....	11
2.6 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น.....	13
2.7 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น.....	15
2.8 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบเปิด.....	15
2.9 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบปิด.....	16
2.10 โครงสร้างของระบบควบคุมแบบพีไอดี.....	17
2.11 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมดีซีมอเตอร์.....	18
2.12 แผนภาพโบทของระบบเปิด.....	19
2.13 การแทนค่าฟังก์ชันลงบนรูป.....	22
2.14 จำลองเมทริกซ์ที่ได้จากรูปที่รับเข้ามาและเมทริกซ์ตัวกรองค่า.....	22
2.15 Feature Map.....	23
2.16 ReLU.....	23
2.17 Max pooling.....	24
2.18 Fully Connected Layer.....	24
3.1 ลักษณะการเดินรถไฟฟ้ารางเดียวสำหรับขนส่งเอกสาร.....	31
3.2 ลักษณะของรางในงานวิจัย.....	31
3.3 แผนผังอัลกอริทึมการทำงานหลักของระบบ.....	33
3.4 อุปกรณ์สำหรับระบบการทำงานหลักและทิศทางการแลกเปลี่ยนสัญญาณ.....	35
3.5 องค์ประกอบระบบอ่านค่าของ RFID.....	37
3.6 แสดงส่วนประกอบของ Incremental Encoder และสัญญาณพัลส์ออก.....	38

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 โครงสร้างของโมเดลรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร.....	39
3.8 การติดตั้งตัวรถสำหรับใช้งาน.....	40
3.9 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงพร้อมชุดเฟืองเกียร์ทด.....	44
3.10 โมดูลขับมอเตอร์.....	45
3.11 แผงการต่อวงจรของระบบรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร.....	46
3.12 การติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดบนรถ.....	46
3.13 โมเดลรถที่สร้างขึ้นสำหรับทดสอบ.....	47
3.14 การติดตั้งรถบนราง.....	47
3.15 ลักษณะของรางทดสอบแนวระนาบ แนวลาดชัน 10 องศา และทางโค้ง 90 องศา.....	48
3.16 แผนภาพระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร.....	48
3.17 ระบบย่อย.....	49
3.18 ระบบควบคุมแบบเปิด.....	49
3.19 สัญญาณเข้า.....	50
3.20 การระบุเอกลักษณ์ของระบบ.....	50
3.21 ระบบควบคุมแบบปิด.....	51
3.22 การปรับค่าตัวควบคุมพีไอ.....	51
3.23 แผงการเชื่อมต่ออุปกรณ์และเซนเซอร์บนบอร์ด Arduino Mega 2560.....	52
3.24 แผงภาพรวมการควบคุมระบบขับเคลื่อน.....	52
3.25 แผงการทำงานของระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร.....	53
3.26 แผนผังการทำงานของเซนเซอร์ RFID tacking.....	54
3.27 แผนผังการทำงานของ ESP32 CAM.....	55
3.28 แผนผังระบบสื่อสารไร้สาย.....	56
3.29 อินเตอร์เฟสสำหรับผู้ใช้งาน.....	57
3.30 ตำแหน่งติดตั้ง RFID tag บนราง.....	58
3.31 การออกแบบโปรไฟล์ความเร็วของระบบ.....	58
3.32 แผนผังโปรไฟล์การเคลื่อนที่จากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2.....	60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.33 การเก็บข้อมูล.....	61
3.34 การเตรียมข้อมูล.....	62
3.35 การเลือกโมเดล.....	62
3.36 ผลการฝึกโมเดล.....	63
3.37 การทดสอบโมเดล.....	63
3.38 การสร้าง library.....	64
4.1 แสดงตำแหน่งของรถขณะเคลื่อนที่ผ่านสถานี.....	68
4.2 ลักษณะการใช้งานตรวจจับมนุษย์.....	70
4.3 ผลการตอบสนองของระบบ.....	72
4.4 การปรับค่าตัวควบคุมพีไอด้วย MATLAB.....	72
4.5 ผลการติดตามความเร็วของระบบจากการทดสอบด้วย MATLAB.....	73
4.6 ผลการตอบสนองระบบปิดด้วยความเร็วรอบ 220 rpm.....	74
4.7 การติดตามโปรไฟล์ความเร็วที่ 238 rpm.....	74
4.8 มุมมองด้านบนของราง.....	75
4.9 มุมมองด้านหน้าของราง.....	75
4.10 ผลการทดสอบความเร็วโปรไฟล์สี่เหลี่ยมคางหมู.....	76
4.11 ตำแหน่งการติดตั้ง RFID หมายเลข 3.....	76
4.12 การติดตามโปรไฟล์ความเร็วจากสถานี 1 ไป 2 กรณีไม่มีโหลดบรรทุก.....	77
4.13 การติดตามโปรไฟล์ความเร็วจากสถานี 1 ไป 2 กรณีมีโหลดบรรทุก 2.5 kg.....	77
4.14 การติดตามโปรไฟล์ความเร็วจากสถานี 2 ไป 1 กรณีไม่มีโหลดบรรทุก.....	78
4.15 การติดตามโปรไฟล์ความเร็วจากสถานี 2 ไป 1 กรณีมีโหลดบรรทุก 2.5 kg.....	78
4.16 การทดสอบเสถียรภาพระบบควบคุมการเคลื่อนที่จากสถานี 1 ไป 2.....	79
4.17 การทดสอบเสถียรภาพระบบควบคุมการเคลื่อนที่จากสถานี 2 ไป 1.....	80
4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การใช้พลังงาน และความเร็ว.....	81
4.19 Vehicle energy economy at different speeds.....	81

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

F	=	ค่าแรงทั้งหมดที่กระทำกับตัวรถ ($\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$)
m	=	ค่าน้ำหนักของตัวรถ (kg)
a	=	ค่าความเร่งขณะรถเคลื่อนที่ (m/s^2)
ρ	=	ค่าความหนาแน่นของอากาศมีค่าประมาณ $1.225 \text{ kg}/\text{m}^3$
C_d	=	ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (Coefficient of Drag)
V	=	ค่าความเร็วสัมพัทธ์ของการไหลของอากาศเทียบกับความเร็วของรถ (m/s)
A	=	ค่าพื้นที่ด้านหน้าของรถที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของอากาศ (m^2)
k_r	=	ค่าสัมประสิทธิ์ของการเสียดทานการหมุน
θ	=	ค่ามุมความชันของรถ (rad)
W	=	ค่าน้ำหนักของตัวรถ ($\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$)
a	=	ค่าความเร่งของรถขณะมีการเพิ่มความเร็ว (m/s^2)
g	=	ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)
T_w	=	ค่าแรงบิดที่ล้อของระบบ ($\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$)
r	=	ค่ารัศมีของล้อ (m)
T_m	=	ค่าแรงบิดมอเตอร์ ($\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$)
i_g	=	ค่าอัตราทดของเกียร์
η_t	=	ค่าประสิทธิภาพการส่งกำลัง
R_g	=	แรงต้านทานจากน้ำหนักรถ (Gravitational or gradient force)
R_A	=	แรงต้านอากาศ (Aerodynamic drag force)
R_r	=	แรงต้านการหมุนของล้อ (Frictional force or rolling resistance)
R_a	=	แรงต้านเนื่องจากการเร่ง (Acceleration force)
R	=	แรงต้านทั้งหมด
F.s	=	ค่าความปลอดภัย
T	=	ค่าแรงบิดของมอเตอร์ที่หาได้จากห้องตลาด ($\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$)
V_a	=	แรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์ทางด้านวงจรรีเลย์ (V)
I_a	=	กระแสอาร์เมเจอร์ (A)
L_a	=	ความเหนี่ยวนำทางด้านอาร์เมเจอร์ (H)

อธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

ω_n	=	ความเร็วเชิงมุม (rad/s)
R_a	=	ความต้านทานอาร์เมเจอร์ (Ohm)
J_m	=	โมเมนต์ความเฉื่อยทั้งหมดของมอเตอร์ ($kg \cdot m^2$)
B	=	ค่าคงที่เนื่องจากความเสียดทานความหนืด ($kg \cdot m^2 / s^3 / rad$)
e	=	แรงดันย้อนกลับ (V)
T_L	=	แรงบิดของโหลด ($kg \cdot m^2 / s^2$)
T_d	=	แรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้น ($kg \cdot m^2 / s^2$)
K_p	=	ค่าอัตราขยายแบบสัดส่วน
K_i	=	ค่าอัตราขยายแบบปริพันธ์
K_d	=	ค่าอัตราขยายแบบอนุพันธ์
$e(t)$	=	ค่าความผิดพลาดของระบบ
t	=	ค่าเวลา หน่วยวินาที (s)
G_s	=	ตัวควบคุม
V	=	ค่าความเร็วเชิงเส้น หน่วยเมตรต่อวินาที (m/s)
A	=	ค่าความเร่งเชิงเส้น หน่วยเมตรต่อวินาทีกำลังสอง (m/s^2)
ω	=	ความเร็วเชิงมุม หน่วยเรเดียนต่อวินาที (rad/s)
N	=	ค่าความเร็วรอบมอเตอร์ หน่วยรอบต่อนาที (rpm)
P	=	ค่ากำลังมอเตอร์ หน่วยวัตต์ (W)
I	=	โมเมนต์ความเฉื่อย หน่วย ($kg \cdot m^2$)
d	=	เส้นผ่านศูนย์กลาง (m)
α	=	ค่าความเร่งเชิงมุม (rad/s^2)
S	=	ฟังก์ชันถ่ายโอนในโดเมนความถี่

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ข้อมูลจากงานไปรษณีย์ ส่วนสารบรรณและนิติการ ที่เป็นหน่วยงานรวบรวม คัดแจก และรับส่งเอกสารระหว่างหน่วยงานต่าง ๆ ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี พบว่าการขนส่งเอกสารปัจจุบันใช้รถยนต์ 2 คัน พนักงาน 4 คน ส่งเอกสาร 2 รอบ/วัน ใน 2 เส้นทาง กระจายไปตามอาคารหลัก 20 แห่ง ดังรูปที่ 1.1 และตารางที่ 1.1 คิดเป็นระยะทางที่ต้องเดินเอกสารไปกลับเฉลี่ยวันละ 20 km นอกจากนี้ หากหน่วยงานใดมีเอกสารด่วนที่ต้องส่งนอกรอบการขนส่งปกติ เจ้าหน้าที่ประจำหน่วยงานนั้นจะต้องเดินเอกสารส่งเอง ทำให้เกิดการผลงงานเพื่อไปส่งเอกสาร จากข้อมูลเส้นทางและรอบวิ่งประมาณค่าน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ในการจัดส่งเอกสาร ทั้งแบบตรง (โดยงานไปรษณีย์ ส่วนสารบรรณและนิติการ) และแบบอ้อม (โดยเจ้าหน้าที่หน่วยงานต่าง ๆ เดินเอกสารเอง) คิดเป็นเงินกว่า 350,000 บาท/ปี กรณีเจ้าหน้าที่หน่วยงานเดินเอกสารเองคิดการสูญเสียเวลาจากการผลงงานประมาณ 4,500 ชั่วโมง/ปี



รูปที่ 1.1 เส้นทางและเวลาในการส่งเอกสารใน มทส.

ตารางที่ 1.1 ค่าใช้จ่ายการส่งเอกสารของหน่วยงานใน มทส. ปีงบประมาณ 2564

หน่วยงาน	ค.ค. 63	พ.บ. 63	ธ.ค. 63	ม.ค. 64	ก.พ. 64	มี.ค. 64	เม.ย. 64	พ.ค. 64	มิ.ย. 64	ก.ค. 64	ส.ค. 64	ก.ย. 64	รวม
1 สำนักบริหารกรรมการศาสตร์	2,323.00	1,171.00	2,497.00	1,810.00	2,210.00	2,836.00	1,802.00	7,439.00	2730.00	1,174.00	3,766.00	1,879.00	31,637.00
2 สำนักวิชาเทคโนโลยีสังคม	829.00	703.00	1,051.00	1,396.00	1,115.00	611.00	718.00	1,240.00	860.00	628.00	929.00	1,435.00	11,515.00
3 ดิจิทัล	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	36.00	0.00	0.00	21.00	0.00	0.00	0.00	57.00
4 สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร	2,067.00	1,473.00	7,859.00	1,050.00	2,492.00	3,019.00	1,353.00	1,464.00	2705.00	1,024.00	4,700.00	4,357.00	33,563.00
5 สำนักวิชาพยาบาลศาสตร์	9,658.00	3,044.00	3,933.00	1,680.00	1,309.00	1,690.00	1,452.00	1,216.00	3510.00	724.00	1,634.00	1,138.00	30,988.00
6 โบรณ	37.00	0.00	393.00	57.00	5.00	5.00	5.00	5.00	0.00	0.00	0.00	5.00	512.00
7 สำนักวิชาพยาบาลศาสตร์	3,098.00	3,124.00	2,512.00	2,918.00	1,152.00	1,774.00	3,812.00	3,160.00	3584.00	848.00	2,095.00	2,580.00	30,657.00
8 สำนักวิชาพยาบาลศาสตร์	323.00	461.00	212.00	405.00	464.00	874.00	75.00	488.00	460.00	1,297.00	762.00	1,031.00	6,852.00
9 สำนักวิชาทันตแพทยศาสตร์	2,933.00	2,665.00	2,176.00	1,780.00	1,618.00	3,184.00	1,330.00	1,573.00	3,299.00	2,807.00	3,874.00	3,510.00	30,749.00
10 สำนักวิชาสาธารณสุขศาสตร์	461.00	69.00	409.00	452.00	249.00	37.00	37.00	621.00	611.00	477.00	2,776.00	270.00	6,469.00
11 ศูนย์คอมพิวเตอร์	96.00	207.00	0.00	0.00	0.00	37.00	0.00	0.00	37.00	64.00	32.00	74.00	547.00
12 ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์	6,239.00	4,322.00	6,919.00	7,446.00	4,696.00	11,792.00	4,572.00	5,897.00	7101.00	7,228.00	6,217.00	7,826.00	80,255.00
13 ศูนย์บรรณสาร	276.00	780.00	977.00	990.00	1,106.00	1,067.00	117.00	117.00	434.00	453.00	292.00	338.00	6,947.00
14 ศูนย์บริการการศึกษา	11,358.00	10,079.00	18,825.00	10,691.00	10,734.00	17,331.00	18,279.00	22,595.00	47914.00	44,359.00	111,377.00	77,013.00	400,555.00
15 ศูนย์กิจการนานาชาติ	2,402.00	116.00	720.00	74.00	752.00	2,114.00	794.00	854.00	868.00	3,015.00	3,237.00	1,620.00	16,566.00
16 สถาบันวิจัยและพัฒนา	2,433.00	440.00	1,003.00	3,583.00	1,276.00	608.00	213.00	399.00	3772.00	363.00	761.00	1,332.00	16,183.00
17 ส่วนส่งเสริมวิชาการ	37.00	511.00	32.00	302.00	106.00	32.00	116.00	163.00	924.00	190.00	79.00	215.00	2,707.00
18 ส่วนสารบรรณและนิติการ	275.00	262.00	787.00	591.00	438.00	342.00	662.00	191.00	430.00	521.00	517.00	696.00	5,712.00
19 ส่วนการเจ้าหน้าที่	2,657.00	1,546.00	4,028.00	2,619.00	1,260.00	1,093.00	1,411.00	1,119.00	2186.00	3,661.00	2,390.00	2,189.00	26,159.00
20 ส่วนการเงินและบัญชี	2,337.00	2,422.00	2,339.00	4,232.00	3,409.00	2,160.00	2,973.00	2,306.00	2219.00	2,062.00	2,994.00	2,536.00	31,989.00
21 ส่วนบริหารสินทรัพย์	384.00	313.00	266.00	101.00	160.00	276.00	37.00	106.00	447.00	148.00	74.00	111.00	2,423.00
22 ส่วนอาคารสถานที่	0.00	0.00	16.00	16.00	0.00	0.00	0.00	50.00	144.00	0.00	38.00	0.00	264.00
23 งานระบบประปา	0.00	0.00	0.00	52.00	0.00	52.00	0.00	0.00	82.00	52.00	859.00	0.00	1,097.00
24 ส่วนพัสดุ	2,862.00	4,643.00	8,622.00	11,864.00	6,707.00	5,426.00	5,281.00	6,274.00	6968.00	5,886.00	3,729.00	2,676.00	70,938.00
25 ส่วนแผนงาน	0.00	0.00	0.00	0.00	36.00	0.00	0.00	111.00	228.00	111.00	13,491.00	293.00	14,270.00
26 ส่วนประชาสัมพันธ์	190.00	14,111.00	16,642.00	661.00	13,116.00	116.00	13,161.00	308.00	121.00	126.00	37.00	32.00	58,621.00
27 ส่วนกิจการนักศึกษา	474.00	414.00	556.00	2,513.00	918.00	544.00	679.00	479.00	664.00	437.00	1,519.00	1,776.00	10,973.00
28 งานบริการและพัฒนานักศึกษา	0.00	0.00	0.00	3.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.00
29 สถานีวิทยุและสุขภาพ	0.00	259.00	0.00	222.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	259.00	0.00	740.00
30 หน่วยตรวจสอบภายใน	166.00	74.00	84.00	84.00	106.00	0.00	136.00	0.00	84.00	37.00	32.00	0.00	803.00
31 สำนักงานสภามหาวิทยาลัย	3,985.00	4,134.00	5,457.00	3,872.00	4,211.00	3,032.00	1,029.00	9,255.00	3478.00	4,105.00	4,367.00	4,005.00	50,930.00
32 ศูนย์นวัตกรรมและเทคโนโลยี	18.00	37.00	32.00	0.00	67.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	154.00
33 สถานพัฒนาอาจารย์	260.00	3.00	0.00	0.00	16.00	48.00	0.00	0.00	0.00	40.00	16.00	19.00	402.00
34 เทคโนโลยี	6,563.00	2,238.00	5,817.00	8,860.00	4,132.00	7,664.00	3,995.00	7,271.00	18179.00	6,613.00	14,044.00	7,750.00	93,126.00
35 ศูนย์สหกิจศึกษา	3,002.00	7,124.00	4,548.00	19,729.00	3,476.00	7,216.00	5,828.00	2,592.00	7428.00	371.00	134.00	1,816.00	63,264.00
36 การเรียนการสอนและวิจัยฟาร์ม	0.00	32.00	37.00	6.00	69.00	103.00	37.00	0.00	924.00	58.00	37.00	37.00	1,340.00
37 วิทยาลัยฟาร์ม มทส.	794.00	1,054.00	1,108.00	1,266.00	1,205.00	1,414.00	817.00	1,303.00	1046.00	884.00	1,808.00	1,209.00	13,908.00
38 สถานส่งเสริมและพัฒนา(MIS)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
39 สุรสัมพันธ์	64.00	69.00	37.00	69.00	217.00	217.00	32.00	121.00	50.00	34.00	36.00	16.00	962.00
40 สหกรณ์การเกษตรวิสาหกิจ	303.00	2,671.00	1,336.00	37.00	492.00	202.00	6,217.00	3,688.00	468.00	1,277.00	4,291.00	0.00	20,982.00
41 SEDA	205.00	296.00	37.00	192.00	0.00	0.00	0.00	0.00	37.00	0.00	0.00	37.00	804.00
42 วิชาของวิทยาลัย	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20,141.00	10,584.00	4,999.00	18406.00	4,776.00	1,338.00	907.00	61,151.00
43 งานเกษตรแห่งชาติ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
44 งานประชุมสัตวศาสตร์	2,214.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1,184.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3,398.00
45 โรงเรียนสุรวิวัฒน์	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,570.00	2,569.00	6,139.00
รวมทุกหน่วยงาน	71,323.00	70,867.00	101,267.00	91,623.00	69,319.00	97,093.00	87,554.00	88,588.00	142,419.00	95,850.00	194,541.00	130,728.00	1,247,311.00

ประเด็นปัญหา ผลกระทบ และความเสี่ยง ที่เกิดการจัดส่งเอกสารในปัจจุบัน ดังนี้

1. สิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงจากการใช้รถยนต์ขนส่ง เกิดมลพิษจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงทั้งระหว่างเดินทาง ขณะจอดรอรับและส่งเอกสาร
2. การใช้รถยนต์มีโอกาสก่ออุบัติเหตุบนท้องถนนได้ เพิ่มความแออัดให้การจราจรและที่จอดรถตามอาคารต่างๆ ที่ไปส่งเอกสาร เกิดมลพิษทางเสียงและอากาศ
3. การส่งมีโอกาสผิดพลาด ลำช้า หรือสูญหายของเอกสาร เนื่องจากมีจำนวนมาก หลายประเภท และการซ้อนติดกันของเอกสารขณะขนย้าย
4. กรณีเอกสารที่ต้องจัดส่งด่วนต้องใช้เจ้าหน้าที่หน่วยงานเดินเอกสารเอง เกิดการผลงงานกรณีหน่วยงานที่มีเจ้าหน้าที่คนเดียว (เช่น สาขาวิชาต่างๆ) การผลงงานส่งผลต่อประสิทธิภาพให้การ

ให้บริการของหน่วยงาน

5. เป็นการเพิ่มอัตราการติดต่อและสัมผัสระหว่างบุคคลในหน่วยงานต่าง ๆ เป็นการเพิ่มความเสถียรโดยเฉพาะในสถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคโควิด

การพัฒนาต้นแบบระบบรถรางขนส่งเอกสารระหว่างอาคาร โดยตัวรถจะถูกออกแบบอัลกอริทึมการทำงานอย่างอัตโนมัติ ผู้ใช้งานมีหน้าที่ส่งงานผ่านระบบสื่อสารไร้สายบนหน้าจอจอมอนิเตอร์ และนำเอกสารใส่รถ การออกแบบตัวรถได้คำนวณหาค่าพิกัดกำลังมอเตอร์เพื่อใช้ในระบบขับเคลื่อน การออกแบบโปรไฟล์ความเร็วการเคลื่อนที่ประกอบด้วย 4 โหมด คือ การเร่งความเร็ว ความเร็วคงที่ การลดความเร็ว และการหยุด รวมถึงการเคลื่อนที่ที่มีระบบปัญญาประดิษฐ์จะถูกนำมาใช้ตรวจจับผู้สัญจรในบริเวณใกล้เพื่อสั่งให้รถชะลอความเร็วด้วยโมเดล SSD การออกแบบระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ใช้ระบบควบคุมแบบวงปิดเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพในการทำงาน โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจากการทดลองช่วงความเร็วที่ใช้งาน เพื่อวิเคราะห์ผลการตอบสนองของระบบและปรับอัตราการขยายของตัวควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์ (PI) เพื่อให้ได้ผลการตอบสนองของระบบที่ต้องการ การออกแบบอัลกอริทึมการทำงานเพื่อให้ระบบสามารถส่งงานและแสดงสถานะการทำงานผ่านหน้าจอจอมอนิเตอร์ โดยใช้ระบบแบบไร้สายที่ทำให้อุปกรณ์สามารถสื่อสารกันได้ ด้วยโปรโตคอล IOT สื่อสารร่วมกันระหว่าง Arduino Mega 2560, ESP32, ESP32-CAM และ Blynk Platform เพื่อแสดงค่าน้ำหนัก เปอร์เซ็นต์แบตเตอรี่ ตำแหน่งตัวรถ และจำนวนรอบในการรับส่งเอกสาร

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อสร้างต้นแบบรถไฟฟ้ารางเดี่ยวที่ใช้ขนส่งเอกสารระหว่างอาคาร

1.2.2 เพื่อพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับขนส่งเอกสารด้วยอัลกอริทึมการควบคุมการทำงานของรถ

1.2.3 เพื่อทดสอบและประเมินการทำงานของระบบที่พัฒนาขึ้น

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ใช้บอร์ด Microcontroller ชนิด Arduino Mega 2560 เป็นศูนย์กลางการควบคุมการทำงานของระบบในตัวรถ

1.3.2 ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า

1.3.3 ตู้บรรจุของรถสามารถบรรทุกเอกสารได้ไม่เกิน 2.5 kg หรือกระดาษ 1 รีม

- 1.3.4 รถมีความเร็วคงที่ 1 m/s ในขณะที่เดินรถทางตรง
- 1.3.5 ใช้ระบบตรวจจับตำแหน่งด้วย RFID (Radio Frequency Identification)
- 1.3.6 ใช้ระบบ cloud ในการเก็บข้อมูลและแสดงผล

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้รถต้นแบบและระบบควบคุมรถขนส่งเอกสาร
- 1.4.2 ลดความสูญเสียเวลาของเจ้าหน้าที่ในหน่วยงาน ในการเดินส่งเอกสาร
- 1.4.3 ช่วยลดเวลาในการขนส่งเอกสารและพัสดุภัณฑ์ และลดการใช้งานรถยนต์
- 1.4.4 ช่วยเพิ่มความเร็วและความปลอดภัยในการส่งเอกสารเร่งด่วนที่สำคัญ



บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสร้างต้นแบบรถไฟฟ้าขนส่งเอกสารที่มีลักษณะของตัวโมเดลเป็นแบบกล่องสี่เหลี่ยม ตัวโมเดลสามารถใช้งานได้จริง ตัวรถประกอบด้วยระบบขับเคลื่อนที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 V เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อนตัวรถบนรางอะลูมิเนียม ติดตั้งอุปกรณ์การควบคุมบนตัวรถซึ่งจะทำหน้าที่ในการควบคุมการทำงานของตัวรถ เช่น ความเร็วรอบมอเตอร์ อัลกอริทึมการทำงาน การแจ้งเตือนตำแหน่งตัวรถ การแจ้งปริมาณน้ำหนักรถ การแจ้งเตือนรถขณะวิ่งด้วยแสงเสียงจากหลอดไฟบัสเซอร์ และการแจ้งเตือนปริมาณพลังงานของแบตเตอรี่ ในการจ่ายพลังงานให้กับตัวต้นแบบจะใช้แบตเตอรี่ลิเทียมพอลิเมอร์ขนาด 12 V 3000 mAh โดยตัวรถสามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติเพียงแคผู้ใช้งานทำการเลือกสถานีในการส่งผ่านแอปพลิเคชัน การติดต่อกับผู้ใช้จะผ่านแอปพลิเคชัน Blynk ใช้หลักการสื่อสารไร้สายด้วยระบบอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่ง เป็นระบบที่สามารถส่งงานระยะไกลได้ ส่งข้อมูลเข้าไปเก็บในระบบคลาวด์และแสดงผลบนหน้าจออินเทอร์เน็ตเฟสของแอปพลิเคชัน รวมถึงตัวรถมีการติดตั้งกล่องเพื่อใช้เป็นระบบความปลอดภัยจากการใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการตรวจจับมนุษย์ที่เดินผ่านเพื่อลดความเร็วของตัวรถลง ดังนั้นตัวโมเดลจึงเหมาะสมกับการใช้งานในการอำนวยความสะดวกให้กับหน่วยงานที่ต้องการส่งเอกสารระหว่างอาคารเป็นจำนวนหลายรอบต่อหนึ่งวัน

2.2 แบบจำลองรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร

สำหรับโมเดลรถไฟฟ้าขนส่งเอกสารในวิทยานิพนธ์ จะออกแบบให้ตัวรถสามารถวิ่งบนรางแขวนได้ เนื่องจากพื้นที่ทำงานจริงของตัวรถจะเป็นทางเดินในมหาวิทยาลัยจึงจำเป็นต้องติดตั้งให้ไม่เป็นที่อุปสรรคต่อผู้ใช้ทางเดิน โดยตัวรถติดตั้งล้อในการขับเคลื่อนจำนวน 1 ล้อ และล้อประกอบให้ตัวรถไม่เกิดการเสียดสีกับรางจำนวน 3 ล้อ ตัวโมเดลจะสร้างโดยใช้อะลูมิเนียมโปรไฟล์ในการสร้างโครงสร้างส่วนล่างที่ติดกับล้อ และใช้แผ่นอะคริลิกความหนา 5 mm ในการสร้างส่วนตัวถังของรถซึ่งประกอบไปด้วยส่วนที่ใช้สำหรับติดตั้งชุดควบคุมระบบของตัวรถซึ่งถือเป็นส่วนสำคัญในการทำวิจัยนี้ และส่วน

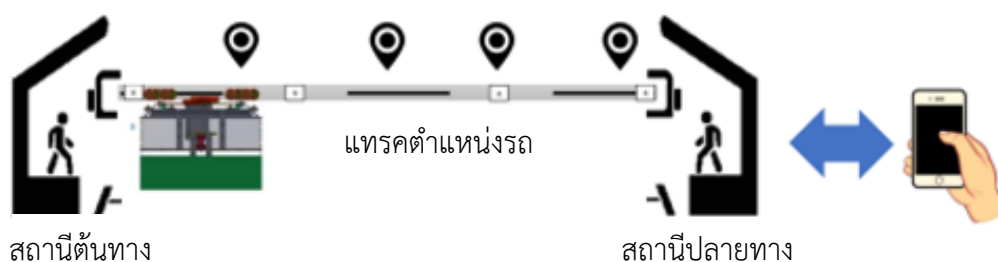
ที่ใช้สำหรับการบรรทุกเอกสาร ในส่วนของชุดควบคุมจะประกอบไปด้วยตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของตัวรถและชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารรับ-ส่งข้อมูลกับผู้ใช้งานด้วยระบบอินเทอร์เน็ต และสามารถสั่งการทำงานระยะไกลได้ด้วยโปรโตคอลไอโอที รวมถึงมีการติดตั้งระบบกล้องในการตรวจจับมนุษย์ด้วยการประยุกต์ใช้ร่วมกับปัญญาประดิษฐ์เพื่อให้เกิดความปลอดภัยขณะมีผู้สัญจรเดินผ่าน ตัวอย่างตัวโมเดลรถและลักษณะการใช้งานที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ระบบ Tele lift (ที่มา : <https://telelift-logistic.com>)

2.3 หลักการของระบบควบคุมการเคลื่อนที่

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการออกแบบระบบจำลองการทำงานของรถไฟฟ้ารางเดี่ยว (Monorail) ซึ่งเป็นรถที่เคลื่อนที่บนรางเดี่ยว ทำให้ประหยัดงบประมาณในการสร้าง วิ่งด้วยความเร็วสูงสุดไม่เกิน 1 m/s ในส่วนของเส้นทางจะกำหนดทางเดินรถเป็นเส้นทางเดียวที่สามารถวิ่งไป-กลับในสถานีต้นทางและปลายทางได้ ในสถานีจะมีจุดรับส่งเอกสาร โดยผู้ใช้สามารถเรียกใช้รถได้ผ่านแอปพลิเคชัน Blynk บนมือถือหรือจุดสถานี ในส่วนของหน้าจอบอร์ดเฟสผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบข้อมูลสถานะรถไฟฟ้าได้ ขณะรถไฟฟ้าทำงานจะวิ่งตามโปรไฟล์ที่ทางผู้วิจัยได้ออกแบบให้ตัวรถเคลื่อนที่ด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ ทำให้รถสามารถวิ่งที่ความเร็วตามโปรไฟล์ทั้งในกรณีมีโหลดจากการบรรทุกเอกสาร รวมถึงเมื่อถึงสถานีปลายทางตัวรถจะสามารถเปิดประตูเพื่อทิ้งเอกสารที่จุดส่งได้ จากนั้นระบบจะทำการอัปเดตสถานะว่างบนหน้าจอบอร์ดเฟสให้ผู้ใช้งานรับรู้ รูปแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขนส่งเอกสารจะสามารถวิ่งไปกลับได้ในเส้นทาง ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ระบบจำลองเส้นทางการเดินรถของงานวิจัย

ระบบรถไฟฟ้าประกอบด้วย

- 1.ระบบควบคุมในตัวรถ (Unit Controller)
- 2.ระบบควบคุมกลาง (Main Controller)
- 3.ชุดควบคุมสำหรับการเดินรถ
- 4.ชุดควบคุมระบบขับเคลื่อน

2.3.1 ระบบควบคุมในตัวรถ

ระบบควบคุมในตัวรถจะทำหน้าที่ในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ภายในตัวรถทั้งหมด รวมถึงการรับ-ส่งข้อมูล โดยระบบควบคุมจะทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ทั้งหมดในตัวรถสามารถแก้ไขระบบได้โดยเจ้าหน้าที่จากศูนย์ควบคุมกลาง ระบบการทำงานในตัวรถ เช่น การควบคุมความเร็ว การระบุตำแหน่ง การส่งข้อมูลและการรับข้อมูลคำสั่งจากส่วนกลางด้วยอินเทอร์เน็ต

2.3.2 ระบบควบคุมกลาง

ระบบควบคุมที่ทำหน้าที่ในการควบคุมการเดินรถด้วยการสั่งการจากผู้ใช้งาน ให้รถเคลื่อนที่ไปยังสถานีที่ต้องการรวมถึงการส่งคำสั่งระยะไกลด้วยระบบอินเทอร์เน็ต และรับข้อมูลจากระบบควบคุมในตัวรถมาประมวลผลและแสดงสถานะการทำงานของรถผ่านหน้าจออินเทอร์เน็ต นอกจากนี้ระบบควบคุมกลางยังสามารถสั่งแก้ไขอัลกอริทึมการทำงานของตัวรถได้ด้วยเจ้าหน้าที่ดูแลระบบ

2.3.3 ชุดควบคุมสำหรับการเดินรถ

ในการขนส่งเอกสารด้วยรถไฟฟ้าผู้ใช้งานจะต้องรอรถที่สถานี จะต้องมีการเรียกใช้รถผ่านแอปพลิเคชันหรือถ้ารถจอดที่สถานีอยู่แล้วผู้ใช้งานสามารถใส่เอกสารเข้าไปในรถและกดเลือกสถานีในการจัดส่งได้เลย ในส่วนของรถขณะวิ่งจะต้องมีการแจ้งเตือนด้วยแสงเสียงให้กับคนที่เดินบริเวณโดยรอบรถทราบเพื่อให้ระวังตัว และตัวรถมีการติดตั้งกล้องเพื่อใช้ในการตรวจจับผู้สัญจรเพื่อ

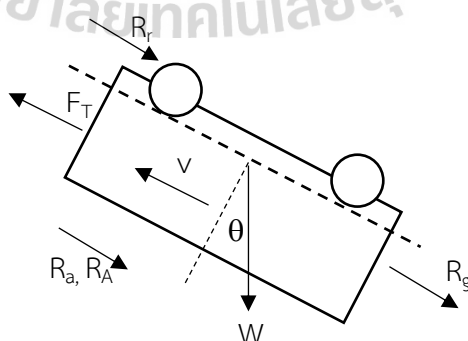
ทำการลดความเร็วลงเพื่อให้เกิดความปลอดภัย รวมถึงขณะใส่เอกสารจะมีการตรวจสอบน้ำหนักด้วย โหลดเซลล์เพื่อไม่ให้เกิดการบรรทุกเอกสารที่มากเกินไปกว่าค่าพิกัดของตัวรถที่สามารถทำงานได้

2.3.4 ชุดควบคุมระบบขับเคลื่อน

ในวิทยานิพนธ์นี้ตัวรถขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ควบคุมความเร็วการเคลื่อนที่ด้วยระบบควบคุมแบบปิด ใช้ตัวควบคุมพีไอ (PI-controller) ในการชดเชยสัญญาณค่าความคลาดเคลื่อน จากความเร็วที่ต้องการของระบบ วัดค่าความเร็วด้วยเซนเซอร์ชนิดโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์ ประมวลผลด้วยบอร์ดชนิด Arduino Mega 2560 ซึ่งทำหน้าที่ในการควบคุมการขับเคลื่อนทั้งหมด เช่น การเดินรถด้วยความเร่ง การเดินรถด้วยความเร็วคงที่ การเดินรถด้วยความหน่วง และการหยุดรถ โดยรถต้องวิ่งตามโปรไฟล์ความเร็วที่ออกแบบจากผู้วิจัย

2.4 กลศาสตร์การเคลื่อนที่ของยานพาหนะ

การพิจารณาการเคลื่อนที่ของรถจะต้องมีความรู้พื้นฐานในเรื่องของแรงต้านการเคลื่อนที่ของตัวรถ เพื่อใช้ในการพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นกับโมเดลรถ (พเนตร์ สุขสิงห์, 2555) ดังรูปที่ 2 พบว่ามีค่าแรงที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักของตัวรถ (W) แรงขับเคลื่อนของตัวรถ (Tractive effort : T_e) และแรงต้านการเคลื่อนที่ (Movement resistance : R) โดยแรงต้านทานการเคลื่อนที่แบ่งได้เป็นสามแรงหลักได้แก่ แรงต้านทานจากน้ำหนักรถขณะขึ้นถนนชัน (Gravitational or gradient force : R_g) แรงต้านอากาศ (Aerodynamic drag force: R_A) แรงต้านการหมุนของล้อ (Frictional force or rolling resistance : R_r) และอีกหนึ่งแรงต้านเพิ่มเติมที่พิจารณาในกรณีที่รถจะต้องเร่งเครื่องเพื่อวิ่งแข่งคือแรงต้านเนื่องจากการเร่ง (Acceleration force: R_a) สามารถเขียนสมการได้ดังนี้



รูปที่ 2.3 แผนภาพแรงที่กระทำบนตัวรถขณะรถเคลื่อนที่

จากสมการทั่วไปตามหลักพลศาสตร์การเคลื่อนที่

$$\sum F = ma \quad (2.1)$$

เมื่อพิจารณาหาแรงขับเคลื่อนสูงสุดสำหรับการเคลื่อนที่ของตัวรถ จะต้องพิจารณาในกรณีที่ตัวรถกำลังวิ่งขึ้นทางชันด้วยความเร่ง จะได้สมการความสัมพันธ์ของแรงขับเคลื่อนมีค่าเท่ากับแรงต้านทั้งหมดดังสมการที่ 2.2

$$T_e = R \quad (2.2)$$

จากรูปที่ 2.3 พิจารณาแรงต้านการเคลื่อนที่ของตัวรถทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วย แรงต้านทานจากน้ำหนักของตัวรถขณะขึ้นถนนชัน แรงต้านอากาศ แรงต้านการหมุนของล้อ และอีกหนึ่งแรงต้านเพิ่มเติมที่พิจารณาในกรณีที่รถจะต้องเร่งความเร็วเพื่อวิ่งแซงคือ แรงต้านเนื่องจากการเร่ง โดยแรงทุกแรงมีหน่วยเป็นนิวตัน (N) สามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 2.3

$$R = R_g + R_A + R_r + R_a \quad (2.3)$$

สมการแรงต้านอากาศมีค่าขึ้นกับพื้นที่ผิวหน้ารถของตัวโมเดลรถไฟฟ้า ซึ่งจะรองรับการปะทะของอากาศทำให้เกิดแรงต้านขึ้น ดังสมการที่ 2.4

$$R_A = C_d \frac{\rho}{2} A v^2 \quad (2.4)$$

สมการแรงต้านที่เกิดจากแรงเสียดทานการหมุนของล้อที่กระทำระหว่างล้อและพื้นถนนของตัวรถเขียนได้ดังสมการที่ 2.5

$$R_r = k_r W \cos \theta \quad (2.5)$$

เนื่องจากพื้นถนนในการเคลื่อนที่มีระดับที่ไม่คงที่ คือทำให้แรงโน้มถ่วงที่กระทำกับตัวรถมีการ

เปลี่ยนแปลงตามมุมเอียงที่เกิดขึ้นจากพื้นถนน โดยแรงนี้อาจมีทิศทางเสริมการเคลื่อนที่หรือต้านการเคลื่อนที่ก็ได้ ดังสมการที่ 2.6

$$R_g = \pm W \sin \theta \quad (2.6)$$

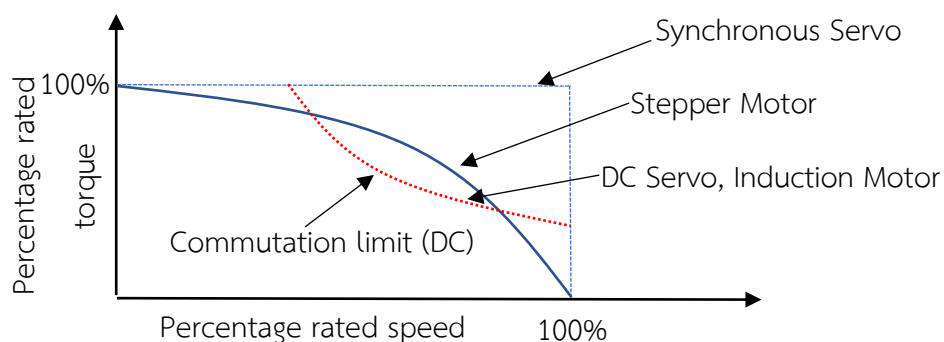
ต่อมาในกรณีที่รถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่คงที่ หรือเกิดการเร่งความเร็วของรถ ทำให้เกิดแรงต้านที่เกิดจากการเร่งของตัวรถซึ่งต้องนำไปคิดรวมกับแรงต้านตัวอื่นๆด้วย ดังนั้นสมการความสัมพันธ์ของแรงต้านที่เกิดจากความเร่งเขียนได้ดังสมการที่ 2.7

$$R_a = \frac{Wa}{g} \quad (2.7)$$

จากสมการที่กล่าวมาข้างต้น สามารถนำมาหาค่าแรงขับเคลื่อนของตัวรถได้ เมื่อได้ค่าแรงขับเคลื่อนสูงสุดของตัวรถ นำค่าแรงไปใช้ในการคำนวณหาค่าพิกัดกำลังของมอเตอร์ เพื่อให้สามารถเลือกขนาดมอเตอร์ที่เหมาะสมกับงาน ทำให้ระบบสามารถทำงานได้แบบไม่เกิดปัญหาตามมา

2.5 มอเตอร์ไฟฟ้า

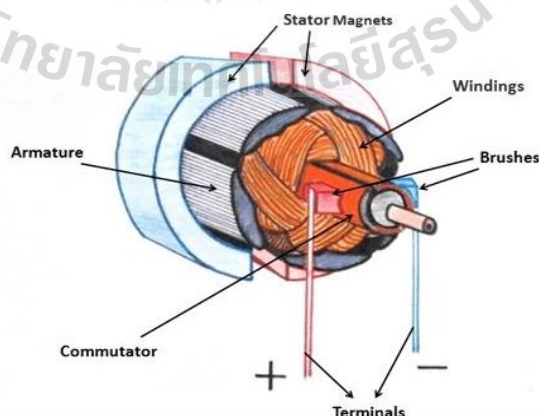
มอเตอร์ไฟฟ้ามีคุณสมบัติในการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกล ดังนั้นมอเตอร์จึงเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เช่น การนำไปใช้ในอุตสาหกรรม หุ่นยนต์ อุตสาหกรรมยานยนต์ อุตสาหกรรมโรดโรน และอุตสาหกรรมระบบอัตโนมัติ เป็นต้น ซึ่งมอเตอร์ในปัจจุบันมีหลายชนิดขึ้นกับเงื่อนไขในการแบ่งประเภทดังนี้ แบ่งตามชนิดการใช้กระแส ออกเป็น 2 ประเภทหลักคือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงและมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ โดยมอเตอร์กระแสตรงสามารถแบ่งย่อยได้อีกสองประเภทดังนี้ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน (Brushed DC motor) และมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (Brushless DC motor) ในส่วนมอเตอร์กระแสสลับสามารถแบ่งย่อยออกเป็นสองประเภทคือ มอเตอร์อะซิงโครนัส (Asynchronous motor) และมอเตอร์ซิงโครนัส (Synchronous motor) โดยมอเตอร์แต่ละชนิดจะมีข้อดีข้อเสียและประสิทธิภาพการทำงานที่แตกต่างกันดังรูปที่ 2.4 ดังนั้นผู้ใช้งานจำเป็นต้องศึกษาข้อมูลของมอเตอร์แต่ละชนิดและเลือกใช้งานมอเตอร์ให้เหมาะสมกับลักษณะงานเพื่อให้เกิดความง่ายต่อการควบคุมมอเตอร์



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดและความเร็วของมอเตอร์ชนิดต่างๆ

2.5.1 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

หลักการการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงทำงานโดยวิธีการส่งผ่านกระแสให้กับขดลวดในสนามแม่เหล็ก ทำให้เกิดแรงแม่เหล็กขึ้นซึ่งแรงจะขึ้นอยู่กับขนาดของกระแส (I) ที่จ่ายเข้ามาในขดลวด และความเข้มของสนามแม่เหล็ก จากรูปที่ 2.5 ทางเดินของฟลักซ์แม่เหล็ก (Magnetic flux) และสนามแม่เหล็กเกิดจากแท่งแม่เหล็กเฟอร์ไรต์ 2 ชิ้น ที่ยึดติดกับตัวถัง (Stator) เพื่อที่จะให้เส้นแรงแวงผ่านจุดศูนย์กลางของมอเตอร์ โดยลักษณะของแรงแม่เหล็กจะวิ่งจากขั้วเหนือไปยังขั้วใต้ ทำให้แรงแม่เหล็กถาวรของตัวถังต้านกับสนามแม่เหล็กที่เกิดจากการจ่ายกระแสเข้าขดลวดของโรเตอร์ (Rotor) เกิดเป็นแรงบิดที่ทำให้ตัวโรเตอร์หมุน โดยแปรงถ่าน (Brush) มีหน้าที่ในการสัมผัสกับคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) เพื่อนำกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ขดลวดโรเตอร์



รูปที่ 2.5 โครงสร้างมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบมีแปรงถ่าน

(ที่มา : <https://www.allaboutcircuits.com>)

2.5.2 ค่าพิกัดกำลังมอเตอร์

งานวิจัยนี้มีการสร้างโมเดลรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร ดังนั้นจึงมีการคำนวณค่าแรงบิดหรือกำลังของรถเพื่อใช้ในระบบขับเคลื่อน ระบบขับเคลื่อนมีการเลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในการเคลื่อนที่ของตัวรถ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องคำนวณหาค่าพิกัดกำลังของมอเตอร์ให้เหมาะสมกับค่าแรงบิดที่รถต้องใช้ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.8

$$T_w = R \times r \quad (2.8)$$

จากนั้นนำค่าที่ได้จากสมการที่ 2.8 แทนค่าในสมการที่ 2.9 เพื่อหาแรงบิดของตัวมอเตอร์ โดยทั่วไปค่าประสิทธิภาพการส่งกำลังของตัวมอเตอร์อยู่ที่ 85% ดังนี้ (บัณรี เข้มกลัดมุกต์, 2562)

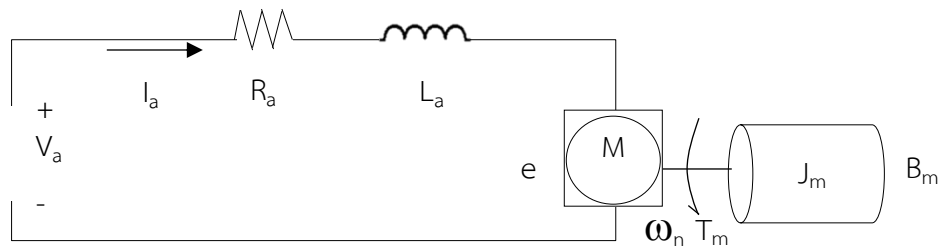
$$T_m = \frac{T_w}{i_g \times \eta_t} \quad (2.9)$$

นอกจากนี้ผู้ใช้งานควรคำนึงถึงการออกแบบให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด และเพื่อให้มั่นใจว่าระบบสามารถทำงานได้ภายใต้แรงบิดที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.9 ดังนั้นจึงนำค่าที่ได้จากสมการที่ 2.9 มาคำนวณหาความปลอดภัยในการออกแบบ Factor safety (F.S) ดังสมการที่ 2.10

$$F.s = \frac{T}{T_m} \quad (2.10)$$

2.5.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

โดยงานวิจัยนี้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเป็นระบบขับเคลื่อน มีวงจรสมมูลดังแสดงรูปที่ 2.6 ซึ่งมอเตอร์ชนิดนี้นิยมใช้กันมากในภาคอุตสาหกรรม ด้วยคุณสมบัติที่เหมาะสมในการควบคุมความเร็วในการขับเคลื่อนและมีแรงบิดเริ่มต้นเครื่องสูงเหมาะกับงานยกของ งานชุดลาก และงานขับเคลื่อน เป็นต้น



รูปที่ 2.6 วงจรสมมูลของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

จากรูปที่ 2.6 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของวงจรสมมูลทางไฟฟ้า และวงจรสมมูลทางกลเพื่อหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบมอเตอร์ไฟฟ้า (Faroqi et al., 2018 ; กองพันธ์ อารีรักษ์, 2555 ; ปณิธิ เพ็ชรนอก, 2562) ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนถ่ายพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานทางกล ดังนั้นการหมุนของมอเตอร์จะเกิดจากความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และค่าคงที่ของมอเตอร์เช่น ความเหนี่ยวนำขดลวดอาเมเจอร์ ความต้านทานอาเมเจอร์ เป็นต้น จากวงจรสมมูลทางไฟฟ้าสามารถเขียนสมการ แรงดันของมอเตอร์ไฟฟ้าโดยใช้กฎ KVL (Kirchoff's Voltage Law) ดังต่อไปนี้

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e \quad (2.11)$$

พิจารณากรณีกระแสสนามมีค่าคงที่ และเมื่อ $e = k_e \omega$ ดังนั้นสมการของแรงดันทางด้านอาร์เมเจอร์จะได้ดังสมการที่ (2.12)

$$V_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + k_e \omega \quad (2.12)$$

เมื่อพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในระบบทางกลของมอเตอร์จะได้ดังสมการที่ (2.13)

$$T_d = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \quad (2.13)$$

จากสมการที่ (2.13) เมื่อกระแสสนามมีค่าคงที่ ดังนั้น เมื่อแทนค่า $T_d = k_t i_a$ ในสมการที่

(2.13) จะได้สมการที่ (2.14) ดังนี้

$$k_t i_a = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \quad (2.14)$$

จากสมการที่ (2.12) และ (2.14) เมื่อจัดอยู่ในรูปสมการสถานะ (State space equation) จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังสมการที่ (2.15)

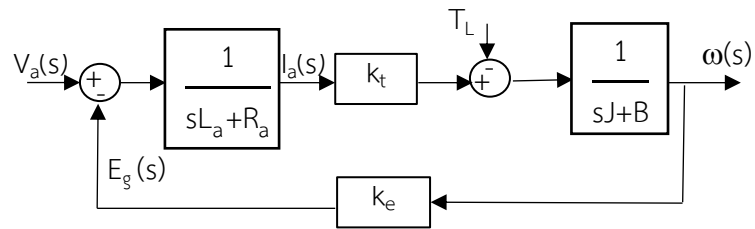
$$\begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{d\omega}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_a & -k_e \\ L_a & L_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ T_L \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง สามารถพิจารณาสมการทางไฟฟ้า และสมการทางกลของมอเตอร์ จากสมการที่ (2.12) และ (2.14) จากนั้นทำการแปลงลาปลาซจากโดเมนเวลาให้อยู่ในโดเมนเอสเพื่อสร้างบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ โดยพิจารณาเงื่อนไขเริ่มต้นมีค่าเท่ากับศูนย์ และจัดรูปสมการใหม่ให้อยู่ในรูปของกระแสอาร์เมเจอร์และความเร็วดังสมการที่ (2.16) และ (2.17)

$$I_a(s) = \frac{V_a(s) - k_e \omega(s)}{sL_a + R_a} \quad (2.16)$$

$$\omega(s) = \frac{k_t I_a(s) - T_L(s)}{(sJ + B)} \quad (2.17)$$

จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (2.16) และ (2.17) สามารถนำมาเขียนเป็นแผนภาพบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงชนิดแยกกระตุ้น

2.6 ระบบควบคุม

ระบบการควบคุมคือ รูปแบบของระบบใดๆ ที่มีการจัดองค์ประกอบต่างๆ ภายในระบบ เพื่อให้มีผลตอบสนองของระบบเป็นไปตามที่ต้องการ ส่วนมากอาศัยพื้นฐานทฤษฎีระบบเชิงเส้นมาช่วยในการวิเคราะห์ พิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างเหตุผลของแต่ละองค์ประกอบของระบบ ซึ่งองค์ประกอบที่สำคัญมี 3 ส่วนดังนี้

1. วัตถุประสงค์ของการควบคุม
2. กระบวนการ ขั้นตอน หลักที่ใช้ในการควบคุม
3. ค่าที่ได้รับจริง

2.6.1 ระบบควบคุมแบบเปิด

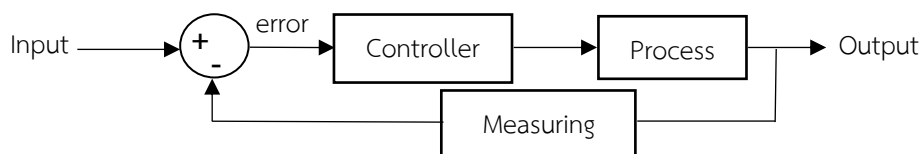
เป็นระบบควบคุมที่ไม่ได้ใช้สัญญาณจากเอาต์พุตมาบ่งบอกถึงลักษณะการควบคุม ทำให้การควบคุมแบบวงเปิดไม่สามารถตรวจสอบเสถียรภาพของระบบได้ มีข้อดีคือไม่จำเป็นต้องเสียค่าใช้จ่ายในส่วนของการติดตั้งอุปกรณ์ในการตรวจวัดค่าสัญญาณเอาต์พุต



รูปที่ 2.8 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบเปิด

2.6.2 ระบบควบคุมแบบปิด

เป็นระบบที่นำสัญญาณจากเอาต์พุตของระบบ ป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุตที่ป้อนให้กับระบบ ซึ่งผลต่างระหว่างสัญญาณทั้งสองที่นำมาเปรียบเทียบนั้นจะเป็นค่าความผิดพลาด เพื่อที่จะใช้เป็นสัญญาณป้อนเข้าตัวควบคุม ให้ตัวควบคุมนำไปสร้างสัญญาณควบคุมใหม่ เพื่อลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบและทำให้เอาต์พุตของระบบเข้าสู่ค่าที่ต้องการ (Set point)



รูปที่ 2.9 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบปิด

2.6.3 ตัวควบคุมแบบพีไอดี

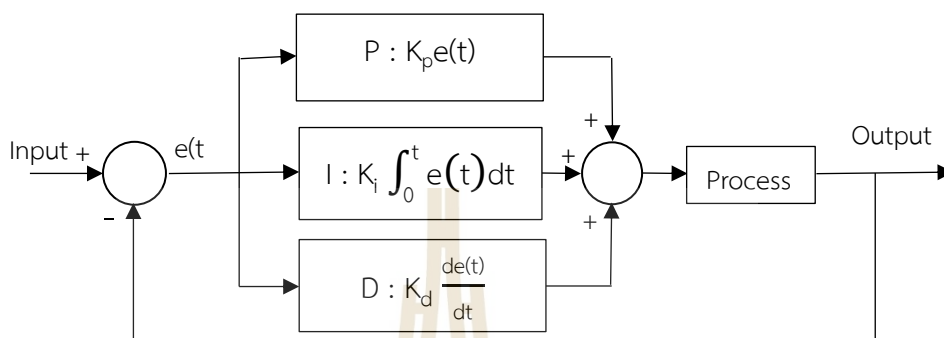
หรือระบบควบคุมแบบสัดส่วน ปริพันธ์ และอนุพันธ์ เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ค่าที่ใช้ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ PID คือค่าความผิดพลาดของระบบที่เกิดจากความแตกต่างของค่าอินพุตที่ต้องการและค่าเอาต์พุตที่ระบบส่งออกมา ดังนั้นตัวควบคุมพีไอดีจะช่วยในการลดค่าความผิดพลาดของระบบ รวมไปถึงทำให้ระบบมีการตอบสนองที่ดีขึ้น ซึ่งค่า PID จะถูกปรับเปลี่ยนตามช่วงการทำงานของระบบนั้นๆ

โดยการปรับค่า PID จะให้ผลกับระบบที่ต่างกัน สำหรับค่าสัดส่วนเป็นการปรับสัดส่วนสัญญาณทำให้ความเร็วในการตอบสนองของระบบเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นพารามิเตอร์พื้นฐานที่ต้องมีค่าปริพันธ์เป็นการอินทิเกรตสัญญาณเพื่อทำให้ระบบมีค่าความผิดพลาดลดลงซึ่งจำเป็นต้องทำงานคู่กับค่าสัดส่วน และค่าอนุพันธ์เป็นการอนุพันธ์สัญญาณเพื่อเพิ่มความเสถียรภายในระบบซึ่งจำเป็นต้องทำงานคู่กับค่าสัดส่วน ดังนั้นการดำเนินการควบคุมสามารถใช้พารามิเตอร์ร่วมกันได้ เช่น P, PI, PD และ PID ซึ่งค่าพารามิเตอร์ P, I และ D แต่ละตัวจะมีคุณสมบัติที่มีผลต่อระบบควบคุมเช่น ช่วงเวลาที่ระบบทำงานในช่วงเริ่มต้น (Rise time) เวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล (Setting time) ค่าการแกว่งของระบบ (Overshoot) ค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัว (Steady state error) และเสถียรภาพ (Stability) ของระบบ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลกระทบของระบบจากคุณสมบัติของพารามิเตอร์ควบคุม

พารามิเตอร์	Rise Time	Setting Time	Overshoot	Steady State Error	Stability
K_p	ลด	เพิ่มเล็กน้อย	เพิ่ม	ลด	ลด
K_i	ลดเล็กน้อย	เพิ่ม	เพิ่ม	ลด	ลด
K_D	ลดเล็กน้อย	ลด	ลด	ไม่มีผล	เพิ่ม

ดังนั้นในการออกแบบระบบควบคุม PID จำเป็นต้องตั้งค่าพารามิเตอร์ของ P, I หรือ D เพื่อให้ระบบสามารถตอบสนองต่อสัญญาณเอาต์พุตของระบบที่เป็นไปตามค่าอินพุตที่ต้องการ แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของระบบควบคุมแบบพีไอดี (ที่มา : Anas N., 2011)

จากรูปที่ 2.10 สามารถนำมาเขียนเป็นกฎสมการความสัมพันธ์การควบคุมระหว่างเอาต์พุตและอินพุตแสดงดังสมการที่ 2.18

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (2.18)$$

จากสมการที่ 2.18 นำมาสร้างเป็นสมการ PID อัลกอริทึมสำหรับการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมความเร็วของตัวรถได้ดังสมการที่ 2.19 (Liu G. F. and H. W. Li, 2016)

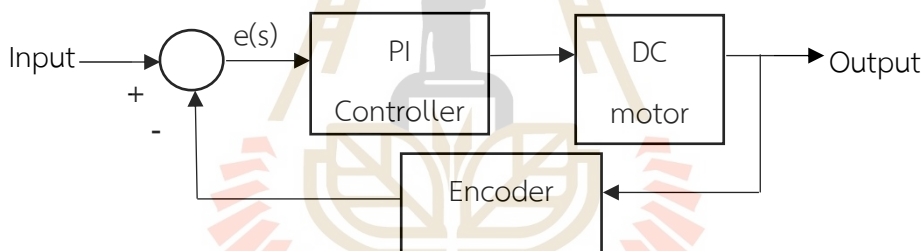
$$u(t) = K_p e(t) + K_i \left(\sum_{t=0}^{t-1} \frac{1}{2} (e(t) + e(t-1)) \Delta t \right) + K_d \frac{e(t) - e(t-1)}{\Delta t} \quad (2.19)$$

สมการที่ (2.19) ใช้วิธี Trapezoidal method ในการหาค่า Integral Controller (I-Controller) และใช้วิธี Backward difference method สำหรับหารหาค่าของพารามิเตอร์การควบคุม Derivative Controller (D-Controller)

2.6.4 การออกแบบตัวควบคุมแบบพีไอ

การหาค่าตัวควบคุมที่ดูเหมาะสมกับระบบสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การปรับจูน

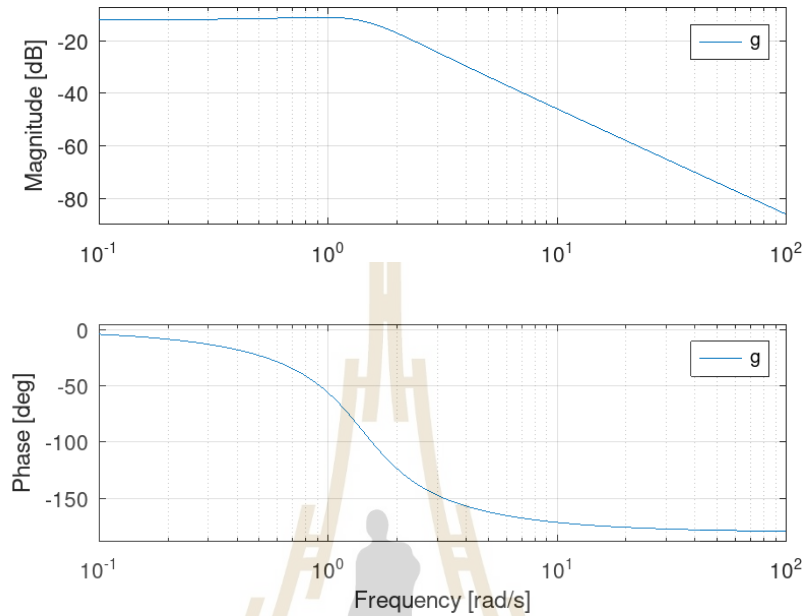
ด้วยตนเองจากการเขียนโปรแกรมอัลกอริทึม การใช้วิธีการหาค่าตัวควบคุมด้วยวิธีซิงเกิล-นิโคล และการหาค่าตัวควบคุมด้วยวิธีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ซึ่งการหาแบบจำลองของระบบสามารถหาได้สองวิธีคือ การหาแบบจำลองแบบกล่องดำและการหาแบบจำลองแบบกล่องขาว โดยทั่วไปมอเตอร์กระแสตรงจะมีค่าพารามิเตอร์ของสเปกมอเตอร์มาให้ซึ่งสามารถนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้เลย ส่วนระบบที่ไม่ทราบพารามิเตอร์สามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการทดลองแบบกล่องดำ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะอธิบายวิธีการออกแบบการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงด้วยการทดลองกล่องดำ โดยในงานวิจัยจะเลือกใช้ตัวควบคุมแบบพีไอ เพื่อควบคุมให้ความเร็วรอบของมอเตอร์เป็นไปตามความเร็วที่ระบบต้องการ ระบบควบคุมจะมีหลักการทำงานโดยการตั้งค่าความเร็วที่ต้องการเป็นค่าอินพุตของระบบ และนำค่าเอาต์พุตที่ได้จากการวัดนำกลับมาประมวลผลร่วมกับค่าอินพุต จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์และพารามิเตอร์ของมอเตอร์ด้วยการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MATLAB จากนั้นทำการออกแบบตัวควบคุมโดยบล็อกการควบคุมแบบย้อนกลับเขียนได้ดังรูปที่ (2.11)



รูปที่ 2.11 บล็อกไดอะแกรมของระบบควบคุมดีซีมอเตอร์

เมื่อทราบค่าพารามิเตอร์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ต่อมาจะทำการการออกแบบการควบคุมโดยผู้ออกแบบจะต้องกำหนดเงื่อนไขการตอบสนองของระบบที่ต้องการ เช่น ค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงที่ที่ต้องการ การพุ่งเกิน และเพื่อไม่ให้ระบบขาดเสถียรภาพเมื่อนำไปใช้งานจริง จึงจำเป็นต้องกำหนดค่าส่วนเผื่ออัตราขยายและส่วนเผื่อเฟสของการควบคุมแบบวงปิด โดยจะเริ่มพิจารณาจากฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดเพื่อสร้างแผนภาพโบลด์ดังรูปที่ 2.12 จากนั้นหาค่าส่วนเผื่ออัตราขยายและส่วนเผื่อเฟสของระบบจริง เพื่อนำค่าไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุม โดยตัวควบคุมแบบพีไออยู่ในรูปสมการฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ (2.20)

$$G_C = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (2.20)$$



รูปที่ 2.12 แผนภาพโบดของระบบเปิด

2.6.5 การออกแบบโปรไฟล์ความเร็วการเคลื่อนที่

ผู้วิจัยได้ออกแบบโปรไฟล์ความเร็วของรถไฟฟ้าขนส่งเอกสารจากหลักการออกแบบโปรไฟล์ความเร็วแบบสี่เหลี่ยมคางหมู โดยมีโหมดการขับเคลื่อน 4 โหมด คือ โหมดการเร่ง โหมดความเร็วคงที่ โหมดชะลอความเร็ว และการเบรก พฤติกรรมการปรับเปลี่ยนความเร็วของรถไฟฟ้าในช่วงเริ่มต้นรถจะวิ่งด้วยความเร่งทำให้ความเร็วของรถเพิ่มขึ้นจนถึงตำแหน่งที่รถเปลี่ยนโหมดการขับเคลื่อนเป็นแบบความเร็วคงที่ให้ความเร่งมีค่าเป็นศูนย์ จากนั้นรถจะวิ่งที่ความเร็วคงที่จนถึงจุดที่รถจะต้องเปลี่ยนโหมดการขับเคลื่อนเป็นแบบชะลอความเร็วเพื่อเข้าจอดสถานี ให้ความเร็วมีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ ซึ่งมีการคำนวณเพื่อออกแบบโปรไฟล์นี้ได้จากสมการที่ 2.21

$$v(t) = \begin{cases} At & 0 \leq t \leq t_1 \\ At_1 & t_1 < t \leq t_2 \\ At_1 - A(t-t_2) & t_2 < t \leq t_3 \end{cases} \quad (2.21)$$

ในการควบคุมความเร็วการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า จะต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว

เชิงเส้นของตัวรถ และความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ เพื่อให้สามารถควบคุมมอเตอร์ให้ขับเคลื่อนรถด้วยความเร็วที่ต้องการได้ เนื่องจากมอเตอร์เป็นอุปกรณ์ต้นกำลังหลักในระบบขับเคลื่อนของรถ ดังนั้นหาความสัมพันธ์เชิงเส้นและเชิงมุมได้ดังสมการที่ 2.22

$$v = \omega r \quad (2.22)$$

มอเตอร์จะควบคุมด้วยความเร็วเชิงมุมในหน่วยรอบต่ออนาที (rpm) ดังนั้นจะได้สมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.23

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \quad (2.23)$$

แทนค่า ω จากสมการที่ 2.23 ลงในสมการที่ 2.22 จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบมอเตอร์และความเร็วเชิงเส้นของรถดังสมการที่ 2.24

$$N = \frac{60v}{2\pi r} \quad (2.24)$$

2.7 อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

ระบบ IOT คือ ระบบที่ทำหน้าที่ในการทำให้อุปกรณ์ต่างๆ สามารถติดต่อสื่อสารและแลกเปลี่ยนข้อมูลกันผ่านระบบอินเทอร์เน็ต โดยมีข้อกำหนดหรือเงื่อนไขที่ใช้ในการสื่อสารกันที่เรียกว่า โพรโตคอล ซึ่งในปัจจุบันโพรโตคอลมาตรฐานสำหรับระบบ IOT คือ โพรโตคอล MQTT (Message Queue Telemetry Transport) โดยพัฒนาต่อจากโพรโตคอล TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) ดังนั้นการใช้โพรโตคอล MQTT จึงทำให้อุปกรณ์ในระบบ IOT มีการส่งข้อมูลถึงกันแบบไม่มีตกหล่นหรือสูญหายของข้อมูลระหว่างทาง ในปัจจุบันโพรโตคอลสำหรับระบบ IOT มีการใช้งานกันหลากหลาย ดังนี้

2.7.1 โพรโตคอล MQTT

ออกแบบมาเพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์แบบ M2M หรือ Machine to Machine โดยมีข้อกำหนดในการสื่อสารที่ใช้โมเดล publish/subscribe ซึ่งมีการนำข้อมูลส่งไปที่ระบบ Server จากนั้นอุปกรณ์ต้องเป็นตัวที่ต้องเรียกข้อมูลมาอ่านหรือส่งข้อมูลไปเก็บใน Cloud server โดยใช้

โมเดล publish เมื่อต้องการส่งข้อมูล และ subscribe เมื่อต้องการรับข้อมูลจาก server ซึ่ง MQTT server นั้นถูกเรียกว่า Broker และอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับระบบเรียกว่า Client

2.7.2 โพรโทคอล TCP/IP

ถือเป็นอีกหนึ่งโพรโทคอลที่สำคัญที่สุด เนื่องจากเป็นโพรโทคอลที่ถูกใช้ในการสื่อสารผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต เพื่อให้สามารถสื่อสารจากต้นทางข้ามเครือข่ายไปสู่ปลายทางได้ และสามารถหาเส้นทางที่จะส่งข้อมูลได้เองโดยอัตโนมัติซึ่งแบ่งแยกออกได้เป็น 2 อย่างคือ

1. โพรโทคอล TCP ย่อมาจาก Transmission Control Protocol ซึ่งทำหน้าที่ในการแยก package ส่งออกไป ส่วนปลายทางจะทำการรวมข้อมูลไปประมวลผลต่อ ดังนั้นระหว่างการรับส่งข้อมูลจะมีการตรวจสอบข้อมูลความถูกต้องด้วย และถ้าหากมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้น ทางโพรโทคอล TCP ปลายทางจะทำการขอไปยังต้นทางเพื่อส่งข้อมูลใหม่มาให้

2. โพรโทคอล IP ย่อมาจาก Internet Protocol ทำหน้าที่ในการส่งข้อมูลจากต้นทางไปสู่ปลายทางโดยผ่าน IP Address

2.7.3 โพรโทคอล HTTP

ย่อมาจาก Hypertext Transfer Protocol คือการสื่อสารกันระหว่าง Web server และ Client โดยนำไปสู่การเชื่อมต่อกับ World Wide Web (WWW) ซึ่งถูกออกแบบมาให้มีการทำงานที่รวดเร็ว ไม่ซับซ้อน ใช้การสื่อสารแบบ request/response หมายความว่า จะต้องมีการตอบกลับ กลับไปหาผู้ที่ส่งความต้องการ (request) ข้อมูลมาเสมอ HTTP พัฒนาต่อมาจาก TCP/IP ดังนั้นข้อมูลข้อจะไม่หล่นหายเช่นเดียวกัน HTTP นั้นใช้ Web server ดังนั้น Client จะเป็นใครก็ได้ในโลก ถ้ามีอินเทอร์เน็ต ตัว server นั้นจะสามารถรับ request มา และประมวลผลแล้วทำการแจกแจงข้อมูลและส่งกลับไปยังผู้ที่ส่ง request มา ตัว client นั้นหลังจากส่งแล้วจะต้องรอจนกว่าจะได้รับข้อมูลกลับมา

2.8 การตรวจจับวัตถุ

2.8.1 การตรวจจับวัตถุโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบสังวัตนาการ

ความรู้เกี่ยวกับการเรียนรู้เชิงลึก เป็นแนวคิดในการให้คอมพิวเตอร์เรียนรู้ เข้าใจ ข้อมูลที่ได้รับ โดยมีสถาปัตยกรรมการเรียนรู้ข้อมูลของคอมพิวเตอร์มากมายโดยจะกล่าวถึง โครงข่ายประสาทเทียมแบบสังวัตนาการ ที่นำมาใช้เพื่อการสกัดเอาลักษณะเด่นของรูปภาพหรือวิดีโอที่ได้จากกล้อง จนกระทั่งทราบถึงผลลัพธ์หรือทราบวัตถุที่ตรวจจับ ในการสกัดรูปภาพหรือวิดีโอจะมีการสกัด

ในรูปแบบของค่าพิกเซล ดังนั้นเมื่อนำรูปเข้าสู่การประมวลผลจะต้องมีการแทนค่าพิกเซลลงในรูปภาพ ดังรูปที่ 2.13 การทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมแบบสังวัตนาการมี 4 ขั้นตอนดังนี้

0	255	255	150					
0	255	200	150					
0	255	200	150					
0	255	255	150					
0	0	255	150					
0	255	255	150					

รูปที่ 2.13 การแทนค่าพิกเซลลงในรูป

-**ขั้นตอนที่ 1 คอนโวลูชัน (Convolution)** คอนโวลูชันเป็นกระบวนการที่ทำเพื่อสกัดเอาลักษณะสำคัญจากภาพออกมา โดยการใช้ค่า พิกเซล ค่าพิกเซลได้มาจากการมองของกล้อง โดยทั่วไปมีด้วยกันสามแชนแนล (Channel) แบ่งเป็นสีได้แก่ สีแดง, สีน้ำเงิน และสีเขียว แต่ละจุดสามารถแทนค่าด้วยตัวเลขเพื่อบอกความเข้มของสีนั้นๆ มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 255 จากความเข้มน้อยไปหามาก ในการทำภาพขาวดำแชนแนลของภาพนั้น จะมีเพียงหนึ่งแชนแนลเท่านั้นคือแชนแนลของสีดำ ซึ่งค่าตัวเลขศูนย์นั้นคือสีขาวไล่ไปจนถึง 255 ซึ่งเป็นสีดำสนิทตามรูปที่ 2.13 ในแต่ละจุดจะทำการคำนวณแล้วเก็บตัวอย่างการทำงานของคอนโวลูชันดังรูปที่ 2.14(ก) ในรูปแต่ละรูปจะมีค่าเมทริกซ์ที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับข้อกำหนดค่าขนาดพิกเซลและข้อกำหนดค่าเริ่มต้นของระดับสีดังรูปที่ 2.14(ก) เป็นรูปภาพที่มีเมทริกซ์ขนาด 5x5 พิกเซลและมีค่าระดับสี คือ ค่า 0 แทนสีขาวและค่า 1 แทนสีดำ จากนั้นจะมีการกำหนดเมทริกซ์เคอเนล (Kernel) ที่ทำหน้าที่ในการกรอง (Filter) ค่าเมทริกซ์ภาพให้มีขนาดเมทริกซ์เล็กลงหรือเป็นตัวจับลักษณะสำคัญ (Feature Detector) ดังรูปที่ 2.14(ข)

1	1	1	0	0
0	1	1	1	0
0	0	1	1	1
0	0	1	1	0
0	1	1	0	0

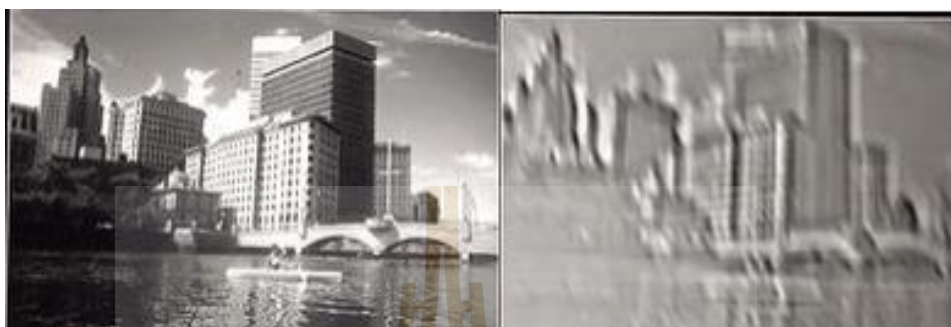
(ก)

1	0	1
0	1	0
1	0	1

(ข)

รูปที่ 2.14 จำลองเมทริกซ์ที่ได้จากรูปที่รับเข้ามาและเมทริกซ์ตัวกรองค่า

เมทริกซ์คอนโวลจะเคลื่อนที่ไปทั่วภาพโดยจะมีการคูณเก็บค่าไว้ที่เมทริกซ์ชุดใหม่ ซึ่งเรียกเมทริกซ์ชุดใหม่นี้ว่า คอนโวลฟีเจอร์ (Convolved Feature) หรือฟีเจอร์แมพ (Feature Map) โดยตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้เมื่อผ่านการทำฟีเจอร์แมพดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 Feature Map (ที่มา : <https://core.ac.uk>)

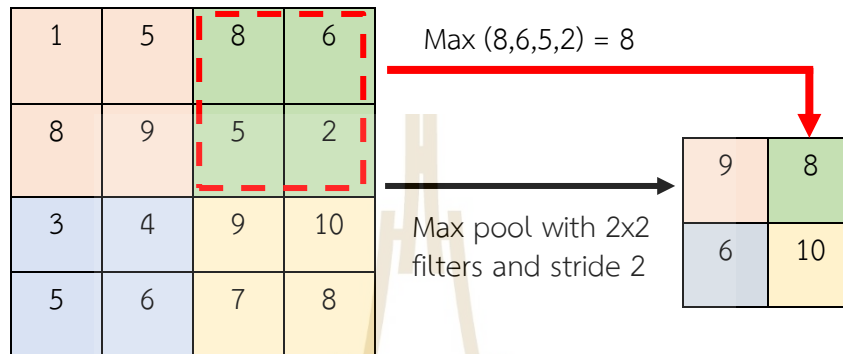
-**ขั้นตอนที่ 2 การขจัดความเป็นเชิงเส้น (ReLU)** หลังจากขั้นตอนในการทำคอนโวลูชันจะได้ฟีเจอร์แมพมาแล้วจะต้องทำการปรับแต่งรูปด้วยฟังก์ชัน ReLU เพื่อให้ภาพมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น คือกำหนดค่าพิกเซลที่มีค่าลบเป็นศูนย์ ค่าเป็นบวกยังคงค่าเดิม วัตถุประสงค์เพื่อให้ตัวโมเดลสามารถเรียนรู้ข้อมูลที่เป็นเชิงเส้นจากรูปได้ ดังตัวอย่างรูปที่ 2.16 เมื่อค่าลบแทนสีดำและค่าบวกแทนสีขาว



รูปที่ 2.16 ReLU (ที่มา : <https://core.ac.uk>)

-**ขั้นตอนที่ 3 การพูลลิ่ง (Pooling)** การพูลลิ่งเป็นขั้นตอนในการคัดลักษณะเด่นของตัวรูปภาพไว้ ซึ่งสามารถทำได้หลายประเภทดังนี้ การพูลลิ่งด้วยค่าสูงสุด (Max Pooling) และค่าเฉลี่ย (Average Pooling) โดยการทำการพูลลิ่งทำให้ได้ผลลัพธ์ขนาดเล็กลงและสามารถจัดการได้ง่ายขึ้นรวมถึง

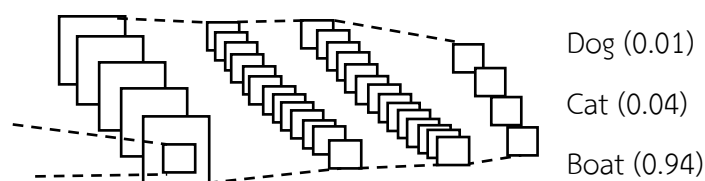
ทำให้สามารถกำจัดการคำนวณที่เกินจำเป็นของโครงข่าย ในกรณีที่ต้องการพูลลิงด้วยค่าสูงสุดจะกำหนดหน้าต่างหนึ่งขึ้นมา ตัวอย่างในที่นี้สมมติให้หน้าต่างมีขนาด 2×2 และหน้าต่างนี้จะทำการเคลื่อนที่ทีละ 2 พิกเซลไปจนทั่วเมทริกซ์ของพีเจอร์แมพเพื่อทำการเก็บค่าที่สูงที่สุดในทุกๆ 2 พิกเซลตามรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 Max pooling

-ขั้นตอนที่ 4 การเชื่อมต่อกันของแต่ละชั้นอย่างสมบูรณ์ (Fully Connected Layer)

กระบวนการคอนโวลูชัน ReLU และการพูลลิง กระบวนการทั้งสามกระบวนการต้องมีการทำซ้ำจนกว่าจะมีการเชื่อมต่อกันของแต่ละชั้นอย่างสมบูรณ์ (Fully Connected Layer) ผลลัพธ์จากคอนโวลูชัน และพูลลิงนั้นให้ลักษณะเด่นในระดับสูง (High-level features) ของรูปที่รับเข้ามาจุดประสงค์ของการทำให้เชื่อมต่อกันแต่ละชั้นโดยสมบูรณ์นั้น เพื่อนำลักษณะเด่นไปทำการคัดกรองรูปที่รับเข้ามาให้อยู่ในรูปของคลาส (Classes) โดยผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงค่าความมั่นใจ (Confident) ออกมา ตัวอย่างของการคัดกรองที่มีการทราบข้อมูลไว้ 4 ประเภท เมื่อรูปถูกนำเข้าสู่กระบวนการทั้งหมดจะแสดงค่าดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 Fully Connected Layer

2.8.2 การตรวจจับวัตถุด้วยเซนเซอร์

การตรวจจับวัตถุด้วยเซนเซอร์อาศัยหลักการดูดซับของสีหรือการสะท้อนวัตถุกลับมา ยังตำแหน่งการติดตั้งของตัวเซนเซอร์ ซึ่งตัวเซนเซอร์สามารถแบ่งออกได้หลายประเภทขึ้นอยู่กับ การเลือกใช้งานของผู้ใช้ โดยส่วนใหญ่เซนเซอร์จะมีส่วนประกอบหลักสองชิ้นคือตัวรับสัญญาณและตัวส่ง สัญญาณ ซึ่งชิ้นส่วนทั้งสองสามารถทำงานแบบแบ่งเป็นสองชิ้นส่วนหรือรวมเป็นตัวเดียวที่สามารถทำ ได้ทั้งรับและส่งสัญญาณ ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้ในงานที่ทิศทางการเคลื่อนที่ของรถอยู่ในแนวขนานกับถนน ตัวอย่างเซนเซอร์ เช่น Proximity Sensors, Photoelectric Sensor และ Ultrasonic Sensors

2.9 เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ระบบการขนส่งเอกสารด้วยรถไฟฟ้างานเดียวขับเคลื่อนอัตโนมัติ ประกอบด้วยการออกแบบ หลัก 4 ส่วนดังนี้ 1.การออกแบบตัวรถ 2.การออกแบบโปรแกรมควบคุมความเร็วการเคลื่อนที่ 3.การออกแบบ ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ใช้ระบบควบคุมแบบวงปิดเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพในการทำงาน โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบจากการทดลองช่วงความเร็วที่ใช้งาน เพื่อวิเคราะห์ผล การตอบสนองของระบบและปรับอัตราขยายของตัวควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์ (PI) เพื่อให้ได้ผล การตอบสนองของระบบที่ต้องการ 4.การออกแบบอัลกอริทึมการทำงานเพื่อให้ระบบสามารถส่งงาน และแสดงสถานะการทำงานผ่านหน้าจอมอนิเตอร์ได้ โดยใช้โปรโตคอลสื่อสารของระบบ IOT ทำให้ อุปกรณ์สามารถสื่อสารกันได้ผ่านระบบอินเทอร์เน็ต ซึ่งในปัจจุบันงานที่มีความคล้ายกับงานวิจัยจะมี การใช้งานอยู่ที่โรงพยาบาลรามาริบัติ มีชื่อว่า เทลิฟท์ (Tele lift) เป็นรถที่วิ่งบนรางอะลูมิเนียมที่ สามารถเดินทาง ถอยหลัง เลี้ยวซ้าย เลี้ยวขวา และขึ้นลงได้อย่างอิสระ

การออกแบบตัวรถจะต้องอาศัยหลักการของแรงที่กระทำกับตัวรถขณะเคลื่อนที่เพื่อหา ค่าแรงต้านสูงสุดที่เกิดขึ้น (บันรี เข็มกลัดมุกต์, 2562) ได้ทำวิจัยเรื่องการออกแบบรถขนส่งผู้โดยสาร อัตโนมัติโดยการสร้างโมเดลรถสำหรับทดสอบ ซึ่งมีการคำนวณหาค่าพิกัดกำลังมอเตอร์ที่ระบบ ต้องการเพื่อจัดซื้อมอเตอร์ที่เหมาะสมกับงานและออกแบบตัวรถด้วยโปรแกรมเขียนแบบ จากนั้น ดำเนินการสร้างตัวโมเดลรถขึ้นมา มีการออกแบบระบบควบคุมด้วยจอมอนิเตอร์ที่สามารถส่งการที่ สถานีได้ โดยมีการใช้ PLC เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์หลักในการควบคุมเงื่อนไขการทำงาน ซึ่งทำงาน ร่วมกับ เซนเซอร์ชนิด Photoelectric Sensor ในการตรวจจับตำแหน่งของตัวรถขณะทำงาน เพื่อให้ มีการแจ้งเตือนสถานะและตำแหน่งของรถขณะวิ่งผ่านจุดนั้นๆ โดยการเคลื่อนที่ของตัวรถจะเคลื่อนที่ บนรางตรง มีการออกแบบล้อประคองให้กับตัวรถ

(พนนตรี์ สุขสิงห์, 2555) ทำวิจัยเรื่องการออกแบบและสร้างระบบควบคุมรถไฟฟ้าแบบไร้คนขับขนาดเล็ก โดยเสนอหลักการพิจารณาให้ทดแทนด้วยวัตถุอิสระ เพื่อให้ง่ายสำหรับการพิจารณาแรงที่กระทำกับตัวรถ มีการออกแบบตัวรถและตำแหน่งการจัดวางอุปกรณ์ด้วยโปรแกรมเขียนแบบในส่วนของการทำงานของระบบประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC ทำงานเป็นตัวควบคุมหลักของระบบ ทำงานร่วมกับเซนเซอร์ต่างๆที่ติดตั้งบนตัวรถ โดยตัวรถสามารถส่งการแบบไร้สายได้ด้วย GPRS การตรวจจับตำแหน่งอาศัยเซนเซอร์ GPS ในส่วนของระบบการเคลื่อนที่ทำงานด้วยการควบคุมแบบ V/F Control ด้วยตัวขับเคลื่อนแบบอินเวอร์เตอร์ มีการติดตั้งระบบเบรกและการป้องกันการชนด้วย Photoelectric Sensor

การออกแบบโปรไฟล์ความเร็ว (ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์ และธนัตชัย กุลวรรณิพงษ์, 2557) ได้เสนอการวางแผนการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนระหว่างสถานีโดยมีเป้าหมายใช้พลังงานน้อยที่สุด ด้วยการออกแบบโปรไฟล์การขับเคลื่อนเป็น 4 โหมด คือ โหมดการเร่ง โหมดความเร็วคงที่ โหมดการเล่น และโหมดการเบรก เนื่องจากการขับเคลื่อนจะต้องเป็นไปตามโปรไฟล์การทำงานจึงมีการออกแบบโปรไฟล์ความเร็วแบบสี่เหลี่ยมคางหมูและแบบเอส (Zhang, L., et al., 2017 ; Wang, Y., et al., 2008) โดยกำหนดค่าเวลาและความเร็วที่ต้องการ ทำให้เกิดการเดินรถที่มีประสิทธิภาพและตรงเวลา (Bing, 2009)

การออกแบบระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ โดยในงานวิจัยได้เลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในการขับเคลื่อน มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงสามารถให้การตอบสนองแบบไดนามิกที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพ (T.V.Mahendiran, 2013) ดังนั้นในการออกแบบตัวขับเคลื่อนกระแสตรงเป็นกระบวนการที่มีความยากเนื่องจากระบบมีความซับซ้อน เช่น การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การจำลองการใช้ฮาร์ดแวร์ และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของระบบ ข้อดีคือการจำลองสามารถลดเวลาในการออกแบบตัวขับเคลื่อนได้ แต่ต้องเสียเวลามากในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบขึ้นมา (Faieghi & Azimi, 2010) การสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการปรับแต่งคอนโทรลเลอร์ เนื่องจากแบบจำลองจะป้องกันไม่ให้เกิดสภาวะการทำงานที่ไม่ปลอดภัยจนทำให้ฮาร์ดแวร์เสียหาย ดังนั้นจึงมีการสร้างแบบจำลองเพื่อตรวจสอบตัวควบคุมในสภาพการทำงานที่หลากหลายโดยการจำลองสถานการณ์แบบ What if โดยไม่มีความเสี่ยง (Vinnakota, 2012) ขั้นตอนการพัฒนาตัวขับเคลื่อนนั้นมีค่าใช้จ่ายสูง และใช้เวลานาน อย่างไรก็ตามสามารถใช้วิธีการอื่น ๆ เพื่อลดเวลาในการพัฒนาตัวขับเคลื่อนได้ด้วยเทคนิคการสร้างแบบจำลองของมอเตอร์กระแสตรงโดยใช้ MATLAB/Simulink พร้อมชุดบล็อกสนับสนุนที่รองรับไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด Arduino โดยใช้วิธีการสร้างแบบจำลองแบบกล่องขาวในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ใช้ในการ

ควบคุมมอเตอร์ จากนั้นทำการแปลงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้เป็นบล็อก Simulink เพื่อให้สามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้ด้วยการใช้ PID Controller ในการควบคุมมอเตอร์แบบวงปิด และมีการปรับจูน PID อัตโนมัติจากการใช้ตัว Fuzzy Algorithm (Shamseldin, 2014) การหาแบบจำลองด้วยวิธีการกล่องขาวไม่เหมาะสมกับระบบที่มีความซับซ้อนเนื่องจากการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำให้ต่อมาได้มีการใช้เทคนิคสร้างแบบจำลองด้วยกล่องดำ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ไม่จำเป็นที่จะต้องทราบค่าตัวแปรของระบบ แต่จะใช้ข้อมูลเอาต์พุตของระบบมาใช้เป็นข้อมูลในการประมวลผลสัญญาณโดยใช้ MATLAB Simulink ทำให้สามารถหาแบบจำลองและตัวแปรของระบบได้ จากนั้นตัว PID Controller จะได้รับการออกแบบและปรับแต่งภายในการจำลองเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพของตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ สำหรับตัวควบคุมที่ออกแบบดีแล้วจะถูกอัปโหลดไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด Arduino Mega 2560 (Hat, M. , et al, 2015) ต่อมามอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงมีการใช้งานแบบปรับความเร็วได้ โดยการใช้การควบคุมแบบอัจฉริยะที่เรียกว่า Fuzzy logic controller ซึ่งระบบควบคุมนี้จะต้องมีความรู้ ความเชี่ยวชาญและประสบการณ์เพื่อใช้ในการการจัดหมวดหมู่ของข้อมูลพื้นฐานของมอเตอร์เป็นกลุ่ม จากนั้นกำหนดกฎในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์โดยใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์คือกฎ if-then Law ด้วยโปรแกรม MATLAB Simulink เพื่อให้สามารถควบคุมมอเตอร์ได้โดยไม่ต้องหาสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบ (Gowthaman, E. , et al, 2017) จากนั้นได้มีการออกแบบตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์ โดยการควบคุมแบบ Fuzzy logic controller optimization แบบการปรับหาค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์ที่ทำให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการควบคุมแบบอื่นๆ พบว่าการควบคุมแบบ Fuzzy logic controller optimization มีประสิทธิภาพในการควบคุมดีที่สุด ซึ่งตรวจสอบได้จากความสามารถในการควบคุมความเร็วได้อย่างแม่นยำ มีการลู่เข้าค่าความเร็วที่ตั้งไว้อย่างรวดเร็ว และไม่เกิด Overshoot (Rushabhkumar&Chetan, 2020)

ระบบควบคุมอัตโนมัติคือระบบที่สามารถทำงานได้ด้วยตนเองผ่านการตั้งค่าจากผู้ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการใช้งานระบบอัตโนมัติกันอย่างแพร่หลายเนื่องจากสามารถลดแรงงานในการทำงานได้ มีระบบการทำงานที่แน่นอน และแม่นยำกว่าการใช้มนุษย์ โดยได้มีการนำเซนเซอร์มาใช้ในการตรวจจับวัตถุ ระยะห่างของวัตถุแล้วนำค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์ไปใช้ในการควบคุมสัญญาณ Pulse Width Modulation(PWM) โดยหลักการเปิด/ปิดมอเตอร์ด้วยความเร็วสูงๆ จนผลค่าเฉลี่ยของแรงดันที่ได้ออกมาเทียบเท่ากับการเปลี่ยนแรงดันโดยตรง เทคนิคนี้ทำให้ไม่ต้องใช้วงจรซับซ้อน แต่การเขียนโปรแกรมจะยุ่งยาก สัญญาณสามารถปรับความถี่ของสัญญาณได้โดยการกำหนดค่า Duty cycle ดังนั้นสามารถใช้ในการหยุดมอเตอร์และชะลอความเร็วของมอเตอร์ได้ตาม

ความถี่ของสัญญาณ PWM ที่ปรับตามระยะทางที่เซนเซอร์ตรวจจับสิ่งกีดขวางได้ (Allam, T., et al. 2016) ทำให้เมื่อรถเคลื่อนที่เข้าใกล้สิ่งกีดขวางจะสามารถชะลอความเร็วของมอเตอร์จนมอเตอร์หยุดทำงานเมื่อถึงระยะห่างที่กำหนดจากการเขียนโปรแกรมเงื่อนไขการควบคุมบนไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด Arduino ต่อมาได้มีการออกแบบและสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติจากการออกแบบด้วยโปรแกรม LabVIEW 2017 เป็นโปรแกรมที่ออกแบบมาเพื่อเป็นเครื่องมือในการวัดค่าและแสดงค่าผลการทดลอง (Sangngern, 2019) แต่ปัจจุบันตัวโปรแกรมสามารถทำงานได้ทั้งการออกแบบวงจรการควบคุม การทำงานร่วมกับฮาร์ดแวร์ภายนอก การสอบเทียบค่าเครื่องมือวัด และการออกแบบหน้าต่างในการควบคุมระบบอัตโนมัติ ในระบบอัตโนมัติมีการสั่งงานจากส่วนกลางด้วยตัวส่งสัญญาณไร้สายผ่านเครือข่ายมือถือ ไวไฟ หรือบลูทูธ ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของงาน ซึ่งการสื่อสารกันระหว่างอุปกรณ์เพื่อให้ระบบการทำงานของรถไฟฟ้ารางเดี่ยวอัตโนมัติมีการทำงานตามคำสั่งของผู้ใช้งาน จะต้องประยุกต์ใช้ระบบการสื่อสารไร้สายที่ประกอบด้วยส่วนที่เป็นฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ (Adriansyah, A., et al. 2016) จากการส่งคำสั่งผ่านระบบไร้สาย เรียกกระบวนการสื่อสารแบบนี้ว่า Internet of think (IOT) มาใช้ในการกำหนดรหัสของอุปกรณ์เพื่อให้การสื่อสารระหว่างอุปกรณ์มีความแม่นยำและมีลำดับความสำคัญของคำสั่งซึ่งการสื่อสารนี้ใช้ TCP/IP ในการกำหนดเงื่อนไขการสื่อสารของระบบ (Ding, Y., et al. 2020) โดยระบบจะต้องมีการเขียนโค้ดภาษา C หรือ C++ ใช้ในการกำหนดเงื่อนไขการทำงานทั้งหมดของระบบรถไฟฟ้าเพื่ออัปโหลดโปรแกรมเงื่อนไขลงบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ต่อมามีการใช้ระบบ IOT ในการตรวจจับความเร็ว การสั่นสะเทือน และอุณหภูมิของมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส โดยใช้ไดร์เวอร์ความถี่และบอร์ด ESP8266 เป็นตัวเชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เน็ตทำให้ผู้ใช้สามารถตรวจสอบข้อมูลของค่าที่วัดจากเซนเซอร์บนมือถือแบบตามเวลาจริง รวมถึงสามารถควบคุมความเร็วของมอเตอร์ได้โดยการป้อนค่ากระแสผ่านระบบอินเทอร์เน็ตซึ่งทำให้วิธีการใช้งานการควบคุมระยะไกลเป็นเรื่องง่าย มีความน่าเชื่อถือ และยืดหยุ่น (Sung, 2019)

ในส่วน of ระบบตรวจจับวัตถุในปัจจุบันได้รับอิทธิพลอย่างมาก จากการที่โลกกำลังปรับตัวเข้ากับปัญญาประดิษฐ์ ทำให้เกิดอัลกอริทึมการตรวจจับวัตถุขึ้นหลายโมเดล โมเดลที่นิยมกันในปัจจุบัน เช่น โมเดล Convolutional Neural Network RCNN, Faster-RCNN, Single shot Detector (SSD) และ You Only Look Once (YOLO) เมื่อนำมาใช้งานพบว่าโมเดล Faster-RCNN และ SSD มีความแม่นยำที่ดีกว่า ในขณะที่ YOLO ทำงานได้ดีกว่าเมื่อให้ความสำคัญกับความเร็วมากกว่าความแม่นยำ (Chandan, 2018) ต่อมา ระบบ Computer Vision (CV) เป็นวิชาปัญญาประดิษฐ์ที่ฝึกให้คอมพิวเตอร์สามารถตีความหมายและเข้าใจงาน เช่น ระบบรถยนต์ไร้คนขับ เมืองอัจฉริยะ การตรวจหาหามะเร็ง และอื่นๆมากมาย ซึ่งระบบจะใช้ซอฟต์แวร์ Jupyter Notebook ที่

สามารถเขียน Python การเรียกใช้ไลบรารี OpenCV, Keras และ Tensorflow เพื่อใช้ในการตรวจจับวัตถุจากกล้องและวิดีโอ (Shanahan, 2020) ระบบตรวจจับวัตถุจะจดจำและค้นหาวัตถุจากภาพดิจิทัลหรือวิดีโอ ซึ่งวัตถุที่อยู่ในรูปหรือวิดีโอจะต้องมีการจัดประเภทหรือหมวดหมู่ให้กับตัวโมเดลก่อน เช่น มนุษย์ รถยนต์ ยานพาหนะ จากนั้นจึงใช้งานจริงได้ ในขั้นตอนการสร้างโมเดลจะใช้ไลบรารี OpenCV ร่วมกับโมเดล Convolution Neural Network (CNN) ในการทำ Classifier และ Evaluation Protocol Map เพื่อให้การตรวจจับวัตถุในรูปภาพและวิดีโอนั้นเสถียรยิ่งขึ้น (Satpute, 2020)

2.10 สรุป

จากเนื้อหาที่กล่าวมาในบทที่ 2 จะเห็นได้ว่าในการสร้างระบบอัตโนมัติขึ้นมาจะต้องอาศัยความรู้ในหลายๆ ด้าน เพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นการสร้างรถไฟฟ้ารางเดี่ยวอัตโนมัติสำหรับขนส่งเอกสารระหว่างอาคาร จึงจำเป็นต้องนำหลักการออกแบบตัวรถเพื่อหาค่าพิกัดกำลังมอเตอร์ที่เหมาะสม การออกแบบโปรไฟล์ความเร็วในการขับเคลื่อนเพื่อให้รถมีการทำงานที่แน่นอนในทุกๆ รอบการเคลื่อนที่ การออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพในการขับเคลื่อน กล่าวคือ เมื่อรถมีการบรรทุกโหลดความเร็วโปรไฟล์การขับเคลื่อนจะยังคงเดิม และการออกแบบอัลกอริทึมขั้นตอนการทำงาน ให้สามารถสั่งการและแสดงสถานะการทำงานบนหน้าจอ มอนิเตอร์ หรือหน้าจอมือถือ โดยจะต้องนำระบบ IOT มาใช้เพื่อให้อุปกรณ์สามารถสื่อสารกันผ่านระบบอินเทอร์เน็ตได้ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการทำให้ระบบติดต่อกับผู้ใช้งานได้ง่าย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 บทนำ

ในบทนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างต้นแบบรถไฟฟ้ารางเดี่ยวอัตโนมัติสำหรับขนส่งเอกสาร ซึ่งประกอบด้วยรถที่ใช้ในการเคลื่อนที่ รวงวิ่งสำหรับเชื่อมระหว่างสถานีขนส่งเอกสาร 2 สถานี และหน้าจอแสดงผลสำหรับการควบคุมการทำงานของระบบ เพื่อทดสอบสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมการเดินรถที่สร้างขึ้น โดยการควบคุมการทำงานต้องอาศัยการทำงานร่วมกันของ 2 ระบบ ได้แก่ ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ และระบบควบคุมส่วนกลาง เพื่อให้รถสามารถทำงานแบบอัตโนมัติเต็มรูปแบบ

ระบบควบคุมในตัวรถประกอบด้วย ชุดควบคุมความเร็วการเคลื่อนที่ ชุดเซนเซอร์ในการตรวจสอบเงื่อนไขการทำงานในตัวรถ เช่น เซนเซอร์ไหลดเซลล์สำหรับวัดค่าน้ำหนักบรรทุก เซนเซอร์วัดค่าแรงดันสำหรับตรวจวัดปริมาณแบตเตอรี่ และกล้องใช้ในการตรวจจับผู้สัญจรบริเวณหน้ารถ ชุดแสดงตำแหน่ง รวมถึงชุดโมดูลสื่อสารไร้สายสำหรับติดต่อกับผู้ใช้

ระบบควบคุมส่วนกลาง คือ ระบบที่ทำหน้าที่ในการสั่งการทำงานในตัวรถ เช่น การเลือกสถานี การรับส่งข้อมูลเพื่อแสดงผลผ่านหน้าจออินเตอร์เฟซของแอปพลิเคชัน โดยสั่งการแบบไร้สายไปยังตัวบอร์ดโมดูลการสื่อสารเพื่อสั่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่อยู่บนรถทำการสั่งงานให้ระบบทำงานตามที่ต้องการ

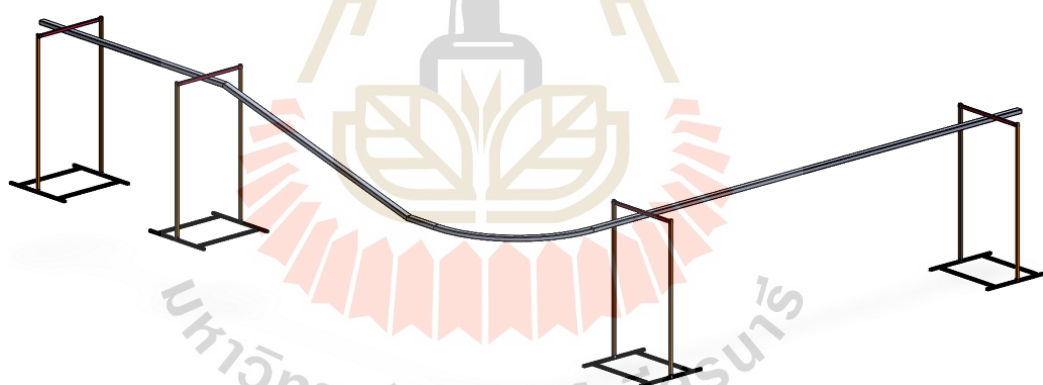
3.1.1 แนวคิดการออกแบบ

รถไฟฟ้าในงานวิจัยนี้มีระบบขับเคลื่อนด้วยล้อยางและวิ่งบนราง ซึ่งลักษณะรางเป็นแบบรางเดี่ยวทำจากอะลูมิเนียมขนาด 1.6 นิ้ว ยาวทั้งหมด 10.3 เมตร ใช้สำหรับวิ่งทดสอบจริง 8.3 เมตร เนื่องจากเว้นระยะปลายรางทั้งสองสถานีข้างละ 1 เมตร เพื่อป้องกันรถตกราง ลักษณะการเดินรถแสดงดังรูปที่ 3.1 และลักษณะของรางแสดงดังรูปที่ 3.2 สำหรับแนวคิดการออกแบบผู้วิจัยต้องการสร้างระบบขนส่งเอกสารระหว่างอาคารด้วยการใช้รถที่วิ่งบนรางเนื่องจากมีความแม่นยำในการเดินรถระหว่างสถานี การใช้งานผู้ใช้งานจะต้องสามารถตรวจสอบสถานะการทำงานของรถได้โดยไม่จำเป็นต้องไปรอรถที่สถานี และสามารถส่งงานระยะไกลได้โดยจอมอนิเตอร์ ผู้วิจัยประยุกต์ใช้โทรศัพท์มือถือเป็นมอนิเตอร์ในการสั่งการและตรวจสอบสถานะทำงานของรถผ่านแอปพลิเคชัน

Blynk เพื่อให้ผู้ใช้มีความสะดวกสบาย เมื่อรถจอดที่สถานีผู้ใช้สามารถนำเอกสารใส่เข้าไปในตัวรถ จากนั้นเลือกสถานีโดยสั่งผ่านหน้าจอมอนิเตอร์บนแอปพลิเคชันมือถือ รถจะเริ่มเคลื่อนที่จากสถานีต้นทางเพื่อไปที่สถานีปลายทาง โดยระหว่างการทำงานตัวรถจะมีการแสดงตำแหน่งที่ขับผ่านด้วยการตรวจจับจากเซนเซอร์ และตรวจจับผู้สัญจรด้านหน้ารถเพื่อลดความเร็วของรถ เมื่อถึงสถานีปลายทางและทิ้งเอกสารเรียบร้อยแล้วจอมอนิเตอร์จะแสดงสถานะว่าง และสามารถเรียกใช้งานได้



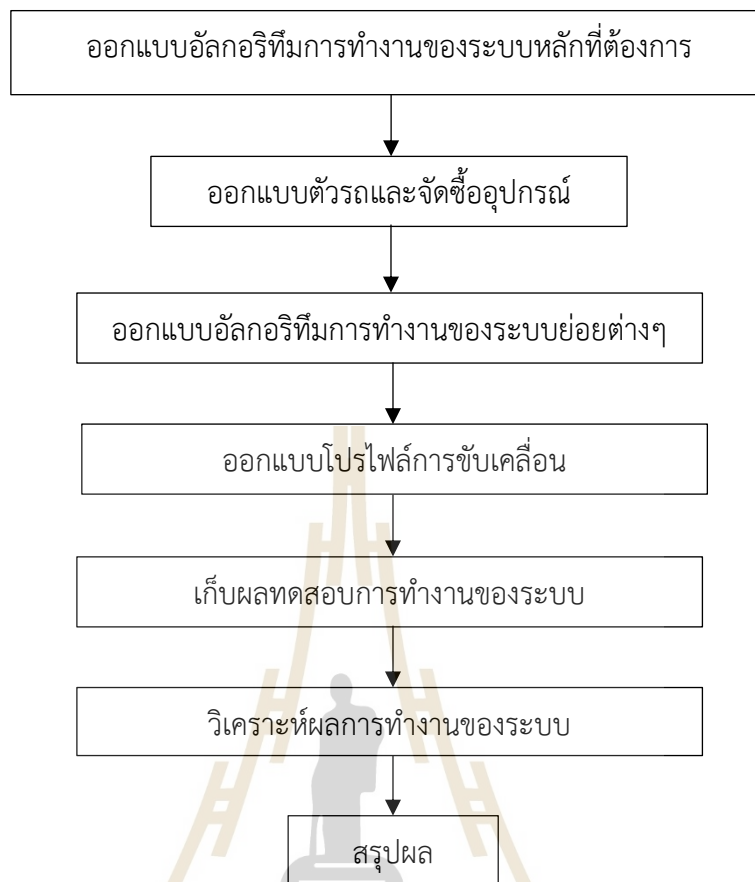
รูปที่ 3.1 ลักษณะการเดินรถไฟฟ้ารางเดียวสำหรับขนส่งเอกสาร



รูปที่ 3.2 ลักษณะของรางในงานวิจัย

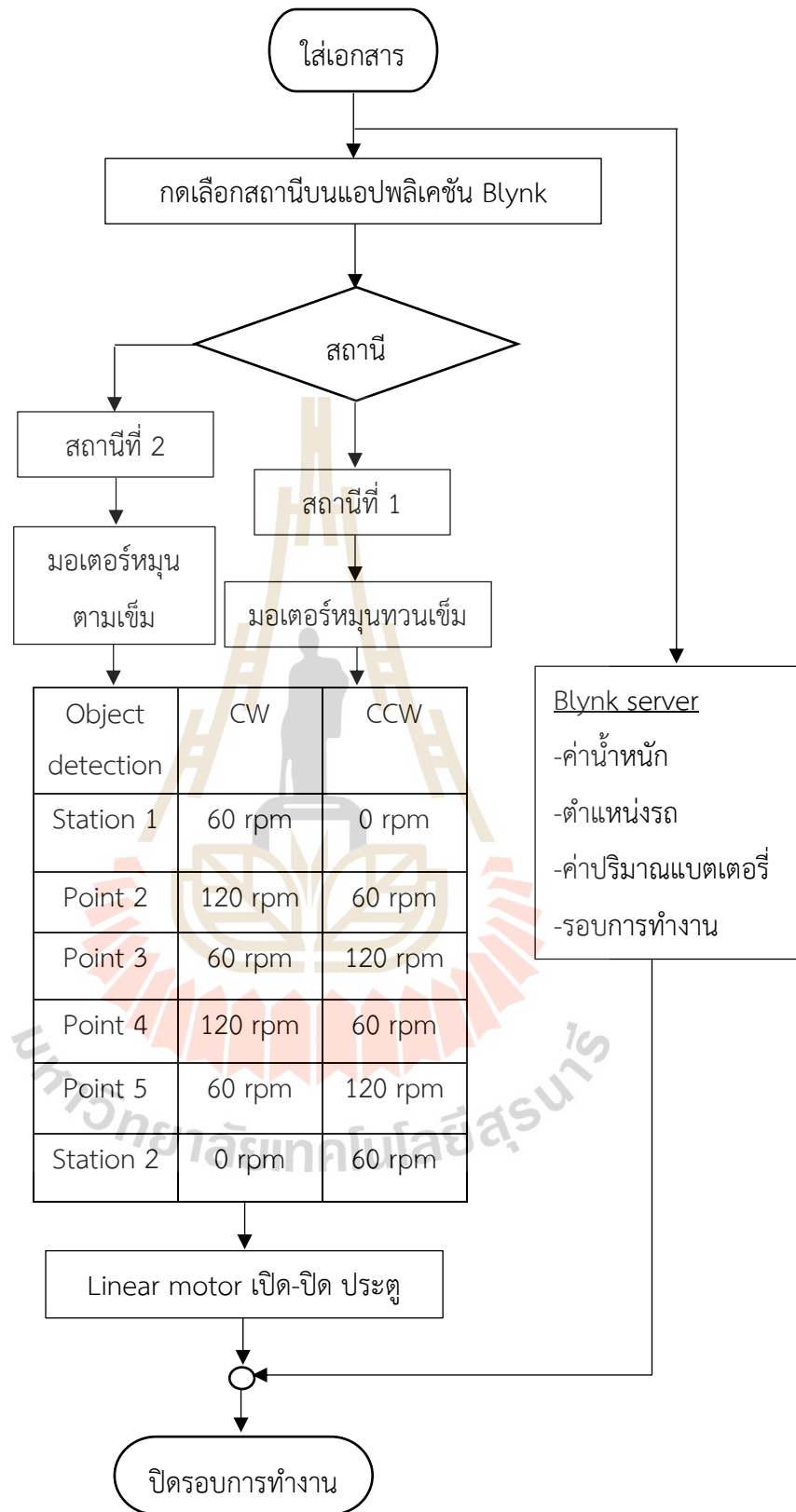
3.1.2 แผนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาและสร้างรถรางต้นแบบสำหรับขนส่งเอกสารระหว่างอาคาร รวมถึงการออกแบบอัลกอริทึมการทำงานของระบบ เพื่อให้รถสามารถทำงานได้ตามวัตถุประสงค์ โดยการทดสอบอัลกอริทึมการทำงานการเดินรถ ระบบควบคุมการขับเคลื่อนตามความเร็วโปรไฟล์ที่ออกแบบ 2 กรณี คือ มีโหนดจากเอกสาร และไม่มีโหนด และการทดสอบอัตราการใช้พลังงาน โดยผู้วิจัยวางแผนการดำเนินงานดังนี้



3.2 อัลกอริทึมการทำงานหลักของระบบรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร

จากวัตถุประสงค์ที่กำหนดขึ้นเพื่อสร้างอัลกอริทึมการควบคุมการทำงานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร เพื่อให้รถสามารถขนส่งเอกสารถึงปลายทางได้อย่างปลอดภัย ดังนั้นการที่จะเลือกซื้ออุปกรณ์ในการสร้างตัวรถและระบบควบคุม จึงจำเป็นที่ผู้สร้างจะต้องออกแบบและกำหนดเงื่อนไขการทำงานที่ต้องการ เพื่อให้สามารถซื้ออุปกรณ์สำหรับการสร้างได้อย่างถูกต้อง และไม่เกินความจำเป็น ดังนั้นในงานวิจัยนี้ออกแบบอัลกอริทึมการทำงานของระบบหลักดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แผนผังอัลกอริทึมการทำงานหลักของระบบ

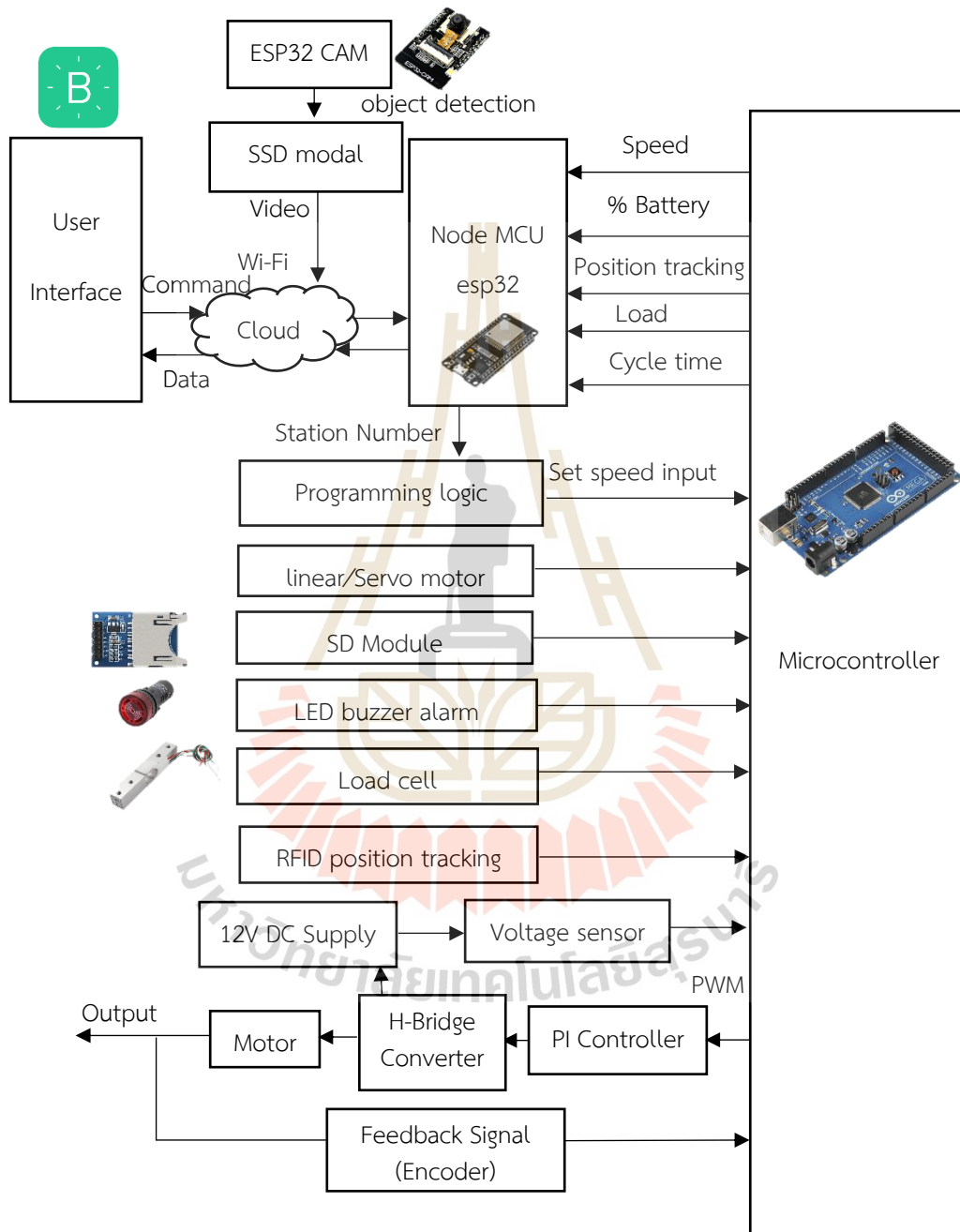
จากรูปที่ 3.3 การทำงานของระบบเริ่มต้นจากผู้นำเอกสารใส่รถ จากนั้นระบบจะอ่านค่าน้ำหนักด้วยเซนเซอร์โหลดเซลล์ เพื่อตรวจวัดปริมาณน้ำหนักเอกสาร ถ้าหากน้ำหนักเกิน รัถจะแจ้งเตือนด้วยเสียง บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ภายในรถจะส่งค่าน้ำหนัก ปริมาณแบตเตอรี่ จำนวนรอบการทำงาน และตำแหน่งของตัวรถไปที่ Blynk server เพื่อแสดงค่าบนหน้าจอคอมพิวเตอร์มือถือ จากนั้นผู้ใช้งานจะต้องเลือกสถานีการส่ง เมื่อเลือกสถานีเรียบร้อยแล้วระบบจะประมวลผลเพื่อเข้าสู่การควบคุมระบบขับเคลื่อนของตัวรถ ให้เคลื่อนที่ไปตามทิศทางและโปรไฟล์ความเร็ว ในระหว่างการเคลื่อนที่โปรไฟล์ความเร็วจะปรับเปลี่ยนตามตำแหน่งของ RFID ที่ติดตั้งอยู่บนราง นอกจากนี้ยังมีการตรวจจับผู้สัญจรด้วยกล้องเพื่อลดความเร็ว เมื่อถึงสถานีปลายทางรถจะจอดตรงตำแหน่ง RFID หมายเลขสถานีพอดี จากนั้นระบบจะเข้าสู่การเปิดประตูเพื่อทิ้งเอกสารลงกล่องรับด้านล่างและปิดประตู ในขั้นตอนสุดท้ายระบบจะทำการรีเซ็ตเพื่อให้กลับสู่สถานะเริ่มต้น จากการออกแบบระบบการทำงานหลักทำให้ผู้วิจัยสามารถทราบอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างระบบควบคุมดังรูปที่ 3.4 ในการสร้างอัลกอริทึมการควบคุมให้สามารถทำงานได้จะต้องประกอบด้วย 2 ส่วนคือ อุปกรณ์หรือ Hardware และโปรแกรม หรือ Software ซึ่งผู้วิจัยเลือกใช้โปรแกรมในการเขียนระบบควบคุมทั้งหมดด้วย Arduino IDE ซึ่งเป็นโปรแกรมที่รองรับภาษา C และ C++ ในการเขียนระบบการทำงาน รวมถึงโปรแกรม MATLAB โดยนำโปรแกรมมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมเบื้องต้นในการปรับจูนระบบควบคุมมอเตอร์ และตัว Software ที่นำมาใช้คือ แอปพลิเคชัน Blynk เป็น Platform IOT ที่สร้างขึ้นให้อุปกรณ์สามารถติดต่อสื่อสารกันผ่านระบบอินเทอร์เน็ตได้ สรุปส่วนโปรแกรมดังนี้

Arduino IDE คือ โปรแกรมที่ใช้ในการเขียนคำสั่งเงื่อนไขการทำงานด้วยภาษา C หรือ C++ สำหรับบอร์ดตระกูล Arduino หรือบอร์ดตัวอื่นที่คล้ายกัน โดยตัวโปรแกรมสามารถคอมไพล์หรือแปลภาษาโปรแกรมให้เป็นภาษาของไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อให้สามารถอัปโหลดโปรแกรมเงื่อนไขการทำงานลงบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ ผ่าน USB

แอปพลิเคชัน Blynk คือ Application สำเร็จรูปสำหรับงาน IOT ไม่ต้องเขียนแอปพลิเคชันเองสามารถใช้งานได้อย่าง Real time สามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่างๆ เข้ากับอินเทอร์เน็ต นำข้อมูลมาแสดงบนแอปพลิเคชันได้ ใช้งานได้ฟรี ผู้ใช้สามารถสร้างหน้าจออินเตอร์เฟซ (UI) แสดงผลได้ตามต้องการ เพียงแต่หากเป็นระบบที่ใหญ่ขึ้นจำเป็นจะต้องมีค่าใช้จ่ายในการซื้อเครื่องมือในแอปเพิ่มเติม

MATLAB คือ โปรแกรมที่สามารถใช้งานได้หลากหลายสาขา เช่น การประมวลผลสัญญาณ การสื่อสารการประมวลผลภาพหรือวิดีโอ ระบบควบคุม การวัด การคำนวณทางเศรษฐศาสตร์ การคำนวณทางชีววิทยา และอื่นๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะนำโปรแกรมมาใช้ในการทำระบบควบคุม โดยการ

หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบด้วยวิธีการแบบกล่องดำ จากการเขียนบล็อก Simulink จากนั้นทำการออกแบบตัวควบคุมให้เหมาะสมกับระบบ



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์สำหรับระบบการทำงานหลักและทิศทางการแลกเปลี่ยนสัญญาณ

จากรูปที่ 3.4 อุปกรณ์หลักที่ใช้สำหรับสร้างระบบควบคุมการทำงานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งเอกสารระหว่างอาคาร มีดังนี้

1. ไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด Arduino Mega 2560

Arduino Mega 2560 เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ชิป ATmega 2560 ซึ่งมี 54 ดิจิทัล อินพุต/เอาต์พุต โดยเราสามารถใช้งานเป็น PWM ได้ 15 ขา, แอนะล็อกอินพุต 16 ขา, UART 4 ชุด โดยความถี่คริสตัลบนบอร์ดคือ 16 MHz เชื่อมต่อข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ต USB บนบอร์ดได้โดยตรง มีการออกแบบให้รองรับการสวมกับ Shield ต่างๆได้โดยตรง ทำให้สามารถพัฒนาระบบได้อย่างรวดเร็ว และมีระเบียบสวยงาม โดยรองรับการพัฒนาโปรแกรมบนแพลตฟอร์ม Arduino IDE อย่างเต็มรูปแบบ ในงานวิจัยนำมาใช้เป็นบอร์ดประมวลผลหลักที่ติดตั้งบนตัวรถ

2. Node MCU ESP-WROOM-32

โมดูล Wi-Fi ESP-32 รุ่น ESP-WROOM-32 เป็นโมดูลที่ประกอบด้วย ตัวเชื่อมต่อ Wi-Fi , Bluetooth 4.2 และ Touch/Temp Sensor ทำงานแบบ Dual Core ที่ความเร็ว 160 MHz มี SRAM 512 KB หน่วยความจำ Flash สำหรับอัปโหลดโปรแกรมขนาด 16 MB มีขา GPIO 36 ขา ความละเอียดในการอ่านค่า ADC 12 Bit สามารถเขียนโปรแกรมผ่าน Arduino IDE ได้ ในงานวิจัยนำมาใช้เป็นบอร์ดสำหรับสื่อสารกับ Arduino Mega 2560 ผ่านระบบสาย และรับ-ส่งข้อมูลผ่านระบบอินเทอร์เน็ตสำหรับสื่อสารกับผู้ใช้งานด้วย Blynk server ตัวบอร์ดจะติดตั้งคู่กับ Arduino Mega 2560 บนตัวรถ

3. แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน

งานวิจัยนี้ใช้แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนชนิดพอลิเมอร์ (Lithium-ion polymer battery หรือบางครั้งเรียก lithium-polymer หรือ LiPo/Li-Po หรือ Li-Poly battery) จัดเป็นแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนประเภทหนึ่ง โดยส่วนใหญ่มีวัสดุขั้วเป็น LCO (ขั้วบวก) และแกรไฟต์ (ขั้วลบ) อย่างไรก็ตาม วัสดุขั้วบวกอาจเป็นสารชนิดอื่นได้ตามการออกแบบของผู้ผลิต สำหรับแรงดันแบตเตอรี่ชนิด Li-Po แรงดันต่อ 1 เซลล์มีค่าความจุเท่ากับ 3.7 V สูงสุด 4.2 V ดังนั้นหากใช้กับมอเตอร์กระแสตรง 12 V จึงต้องนำเซลล์แบตเตอรี่จำนวน 3 เซลล์ต่อแบบอนุกรม

4. Radio frequency identification (RFID)

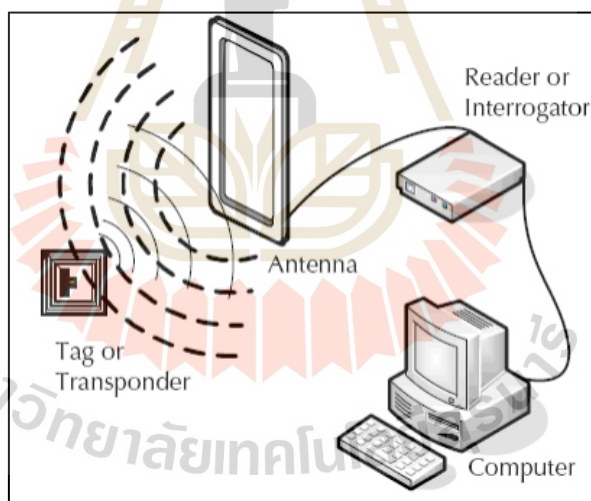
RFID คือ การใช้คลื่นวิทยุในการอ่านและบันทึกข้อมูลที่เก็บไว้ในแท็ก (tag) ซึ่งติดอยู่กับวัตถุหรือบรรจุภัณฑ์ แท็กสามารถอ่านได้จากระยะห่างหลายฟุตและเมื่อเทียบกับบาร์โค้ดไม่จำเป็นต้องให้อยู่ในสายของสายตาของผู้อ่านโดยตรง ดังนั้นจึงอาจจะฝังตัวอยู่ในวัตถุติดตาม โดย RFID เป็นหนึ่งในวิธีการระบุและเก็บข้อมูลอัตโนมัติ ดังนั้นในงานวิจัยจึงนำระบบมาใช้ในการเก็บค่าตำแหน่งของตัวรถ

เมื่อมีการวิ่งผ่านจุดที่มีการติดตั้ง RFID tag ซึ่งระบบ RFID ถูกสร้างขึ้นมาจาก 3 ส่วน องค์ประกอบ ดังนี้

1. ป้าย (Tag) แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ 1) ป้าย RFID ชนิด passive : ป้ายที่ทำงานโดยไม่ต้องใช้แหล่งพลังงานจากภายนอก เพราะภายในมีแหล่งกำเนิดวงจรไฟฟ้าเหนี่ยวนำเป็นแหล่งพลังงานในตัว ตัวอย่างเช่น กุญแจรถ บัตร Master Card 2) ป้าย RFID ชนิด active : ป้ายที่ทำงานโดยต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟจากภายนอก ในงานวิจัยจะใช้ป้ายแบบ passive ซึ่งเป็นบัตร

2. เครื่องอ่านป้าย (Reader) คือส่วนที่เชื่อมต่อกับป้ายเพื่ออ่านข้อมูลลงไปป้ายโดยใช้สัญญาณวิทยุ ในงานวิจัยใช้เป็นโมดูล RFID reader

3. ระบบที่ใช้ประมวลผล (Hardware) คือ ส่วนที่จะทำการประมวลผลข้อมูลที่ได้มาจากป้าย (Tag) หรือจะสร้างข้อมูลเพื่อส่งไปยังป้าย (Tag) หรือว่า จะเป็นที่เก็บระบบฐานข้อมูล เช่น ระบบการจัดการฟาร์มปศุสัตว์, ระบบคลังสินค้า, ระบบขนส่ง, ระบบการบริหารจัดการทรัพยากรต่างๆ เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้ใช้บอร์ด Arduino Mega 2560 เป็นระบบประมวลผลในการเก็บข้อมูลหมายเลขป้าย



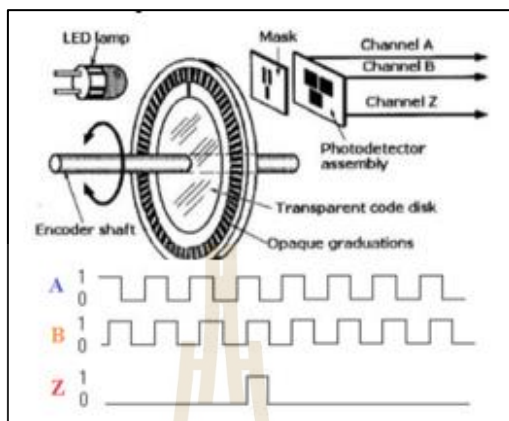
รูปที่ 3.5 องค์ประกอบระบบอ่านค่าของ RFID

(ที่มา : <https://blog.thaieasyelec.com>)

5. เซนเซอร์วัดค่าความเร็ว

Encoder แบบ Increment หรือที่เรียกว่า Increment Encoder/Rotary Encoder ชนิดนี้ จะมีโครงสร้างงานหมุนอยู่ภายใน โดยงานหมุนจะมีช่องเล็กๆ เมื่อมอเตอร์หมุนจะทำให้ช่องว่างนี้ไป

ตัดกับลำแสงของเซนเซอร์ ทำให้ชุดรับแสงได้รับสัญญาณเป็นช่วงๆ ดังนั้นจะได้สัญญาณเอาต์พุตออกมาในรูปแบบของพัลส์ต่อรอบ (PPR) ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงส่วนประกอบของ Incremental Encoder และสัญญาณพัลส์ออก

(ที่มา : <https://www.primusthai.com>)

6. เซนเซอร์วัดค่าน้ำหนัก

งานวิจัยนี้เลือกใช้เซนเซอร์โหลดเซลล์ ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดอย่างหนึ่งที่นิยมใช้กันในอุตสาหกรรมในปัจจุบัน โดยมีหน้าที่ในการวัดค่าน้ำหนักของวัตถุและวัดค่าแรง จะพบในอุตสาหกรรมก่อสร้างในการชั่งส่วนผสมวัสดุดิบ ชั่งน้ำหนักรถบรรทุก และชั่งน้ำหนักชิ้นส่วนในอุตสาหกรรมยานยนต์ เป็นต้น ซึ่งการต่อใช้โหลดเซลล์จะมีสองแบบคือ 4 สาย และแบบ 6 สาย หลักการทำงานอาศัยการเปลี่ยนแปลงของแรงทางกล เช่น แรงกด และแรงดึง ให้เปลี่ยนแปลงออกมาในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้าที่อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งภายในโหลดเซลล์ประมาณ 80% จะติดตั้งตัว Strain-gauge จำนวน 4 ตัว ซึ่งเป็นตัวต้านทานที่จะเปลี่ยนแปลงค่าไปตามแรงกดหรือแรงดึง

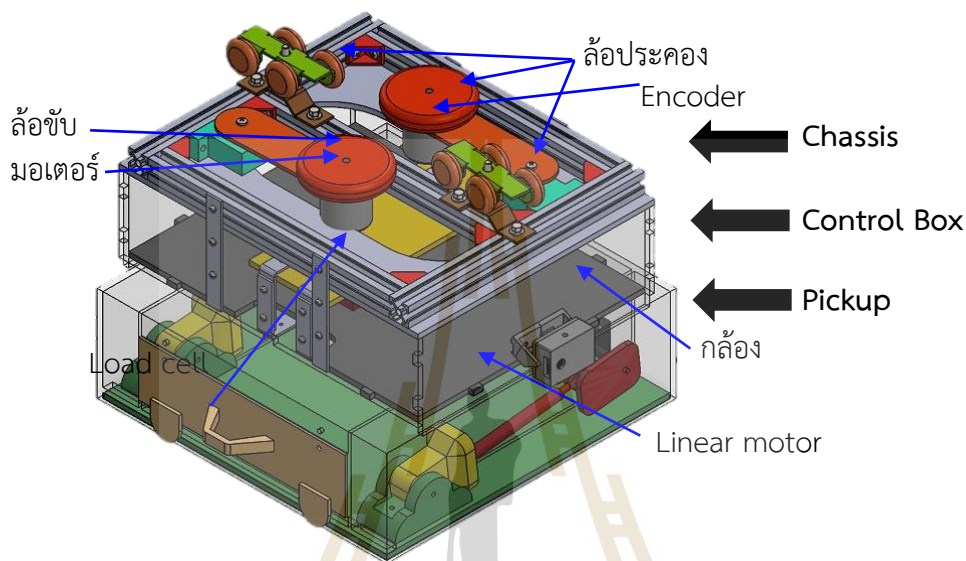
7. ESP32 CAM

คือ โมดูลที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์ในตัวทำให้สามารถทำงานได้อย่างอิสระ เช่น การเชื่อมต่อ WiFi Bluetooth สามารถถ่ายวิดีโอและมีช่องเสียบ micro SD สำหรับจัดเก็บข้อมูล โดยโมดูลนี้ราคาไม่แพง สามารถนำไปใช้ในงาน IOT ธรรมดาไปจนถึงขั้นสูงคือการตรวจสอบและจดจำภาพโดยใช้ AI รวมถึงสามารถใช้เป็นกล้องวงจรปิดที่สามารถเปิดดูที่ไหนก็ได้ ในงานวิจัยนำมาใช้ในการตรวจจับผู้สัญจร

3.3 การออกแบบและสร้างต้นแบบรถไฟไฟฟ้าสำหรับขนส่งเอกสาร

3.3.1 การออกแบบตัวรถ

สำหรับการออกแบบโครงสร้างของตัวรถในงานวิจัยนี้ ใช้โปรแกรมออกแบบ Solidworks 2021 ขึ้นรูปตัวโมเดลรถไฟฟ้ารางเดียวสำหรับขนส่งเอกสารดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 โครงสร้างของโมเดลรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร

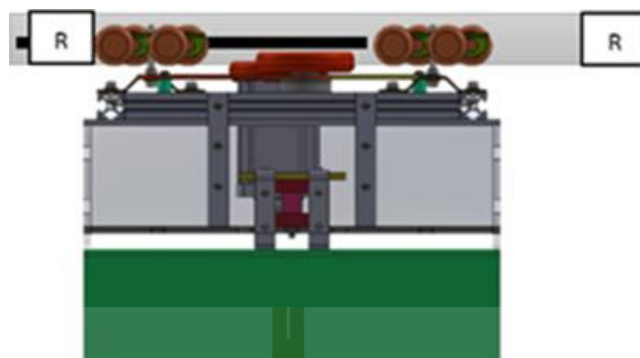
จากรูปที่ 3.7 ตัวโมเดลรถขนส่งเอกสารสำหรับทดสอบได้ออกแบบโดยแบ่งเป็น 3 ส่วน ดังนี้

1. Chassis คือ ส่วนโครงสร้างในการรับน้ำหนักทั้งหมดของตัวรถมีขนาดความกว้างเท่ากับ 0.25 m และความยาวเท่ากับ 0.3 m ทำจากวัสดุชนิดอะลูมิเนียมโปรไฟล์ แบบ XA – 2020T ขนาด 20X20 mm รับแรงกระจายได้สูงสุด 180 N และแรงกระทำแบบจุดได้สูงสุด 112 N ซึ่งเป็นวัสดุโครงสร้างที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเนื่องจากมีความแข็งแรง น้ำหนักเบา และสามารถถอดหรือติดตั้งได้ง่ายด้วย Bolt และ Nut ที่ออกแบบมาเฉพาะยึดกับอะลูมิเนียมโปรไฟล์

2. Control box คือ ส่วนที่ใช้สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมรวมถึงเซนเซอร์ต่างๆ และแหล่งจ่ายพลังงานแบตเตอรี่ มีขนาดความกว้างเท่ากับ 0.25 m ความยาวเท่ากับ 0.3 m และความสูงเท่ากับ 0.15 m ในส่วนนี้ทำจากวัสดุชนิดอะคริลิก ความหนา 5 mm

3. Pickup คือ ส่วนที่ใช้สำหรับการบรรทุกเอกสาร มีขนาดความกว้างเท่ากับ 0.3 m ความยาวเท่ากับ 0.32 m และความสูงเท่ากับ 0.15 m ส่วนนี้ทำจากวัสดุชนิดอะคริลิก ความหนา 5 mm

ลักษณะการติดตั้งใช้งานดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การติดตั้งตัวรถสำหรับใช้งาน

3.3.2 การคำนวณหาพิกัดกำลังการขับเคลื่อนรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร

พลศาสตร์การเคลื่อนที่ของยานพาหนะ จะพิจารณาแรงที่กระทำกับตัวรถในขณะที่รถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วขึ้นทางชัน เนื่องจากเป็นกรณีที่ทำให้เกิดแรงต้านการเคลื่อนที่สูงสุด จึงเหมาะสำหรับการนำมาพิจารณาเพื่อหาแรงขับเคลื่อนรวมถึงแรงต้านการเคลื่อนที่จากวัตถุหมุนที่เกิดจากค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของเพลลาและล้อดังสมการที่ 3.1

$$I = \frac{m}{8} d^2 \quad (3.1)$$

กำหนดให้

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อย หน่วย ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)

m คือ มวลของวัตถุหมุน หน่วย (kg)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง (m)

จากสมการข้างต้นแทนค่าน้ำหนักของล้อ (0.1 kg) เส้นผ่านศูนย์กลางล้อ (0.04 m) และน้ำหนักของเพลลา (0.015 kg) เส้นผ่านศูนย์กลางเพลลา (0.008 m) ดังนี้

$$I = \frac{0.1}{8} 0.04^2$$

$$I = \frac{0.015}{8} 0.008^2$$

ดังนั้นค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่ล้อและเพลามีค่าเท่ากับ 0.00002 และ 0.00000012 kg·m² จากนั้นคำนวณค่าความเร่งเชิงมุมของล้อและเพลา โดยกำหนดให้ค่าเวลาจากรถหยุดนิ่งจนกระทั่งรถเริ่มเคลื่อนที่มีค่าเท่ากับ 1 วินาที ดังสมการที่ 3.2

$$\alpha = \frac{v}{rt} \quad (3.2)$$

กำหนดให้

α คือ ค่าความเร่งเชิงมุม (rad/s²)

ดังนั้นเมื่อแทนค่าความเร็วสูงสุด 1 m/s และค่ารัศมีล้อเท่ากับ 0.04 m จะได้ค่าความเร่งเชิงมุมล้อเท่ากับ 25 rad/s² ซึ่งเป็นค่าความเร่งเชิงมุมของเพลาด้วย เนื่องจากมีจุดหมุนเดียวกัน คำนวณหาค่าแรงบิดที่เพลาล้อจากโมเมนต์ความเฉื่อยที่เกิดขึ้น ดังสมการที่ 3.3

$$T = I\alpha \quad (3.3)$$

เมื่อแทนค่าสมการที่ 3.3 จะได้ค่าแรงบิดที่ล้อ และเพลามีค่าเท่ากับ 0.0005 และ 0.000003 kg·m²/s² ตามลำดับ ดังนั้นจากค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นจากวัตถุหมุนมีค่าน้อยมากจึงไม่นำไปพิจารณาเป็นแรงต้านการเคลื่อนที่สำหรับการขับเคลื่อน

ดังนั้นแรงขับเคลื่อนของรถสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.4 เมื่อแรงต้านทานการเคลื่อนที่ทั้งหมดมีค่าเท่ากับแรงขับเคลื่อน

$$T_e = R_g + R_A + R_r + R_a \quad (3.4)$$

โดยที่แรงขับเคลื่อนหาได้จากผลรวมแรงต้านที่กระทำกับตัวรถ ได้แก่ แรงต้านอากาศดังสมการที่ 2.4 แรงต้านการหมุนของล้อดังสมการที่ 2.5 แรงต้านจากน้ำหนักรถขณะขึ้นทางชันหาได้

จากสมการที่ 2.6 และแรงต้านเนื่องจากการเร่งดังสมการที่ 2.7 เมื่อแทนในสมการที่ 3.1 จะได้สมการใหม่ดังสมการที่ 3.5

$$T_e = C_D \frac{\rho}{2} A v_r^2 + k_r W \cos \theta \pm W \sin \theta + \frac{W \times a}{g} \quad (3.5)$$

โดยกำหนดค่าดังตารางที่ 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานการหมุน มีค่าเท่ากับ 0.04 (Lippert D. and P. Spektor, 2013 ; Çetinarslan C. S., et al., 2010)

ตารางที่ 3.1 กำหนดค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณแรงขับเคลื่อนรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร

ตัวแปร	นิยาม	ค่า
A	พื้นที่หน้าตัดรถ	0.09 m ²
V	ความเร็วการเคลื่อนที่สูงสุด	1 m/s
W	น้ำหนักตัวรถ	100 N
θ	ความชันสูงสุด	10 degree
k _r	สัมประสิทธิ์ความเสียดทานการหมุน	0.04
C _D	สัมประสิทธิ์แรงต้านทานอากาศ	1.95
η _t	ประสิทธิภาพการส่งกำลัง	85 %
a	ความเร่ง	0.5 m/s ²
r	รัศมีล้อ	0.04 m
ρ	ความหนาแน่นของอากาศ	1.225 kg/m ³

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดในตารางที่ 3.1 ลงในสมการที่ 3.5 จะได้เทอมค่าแรงต้านต่างๆ ดังนี้

$$T_e = 0.11 + 3.94 + 17.36 + 5.1 \quad \text{kg} \cdot \text{m/s}^2$$

$$T_e = 26.51 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$$

ดังนั้น จะได้ค่าแรงขับเคลื่อนสูงสุดต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ $26.51 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$

ค่าแรงขับเคลื่อนสูงสุดจะเกิดขึ้นที่ล้อของรถขณะเริ่มเคลื่อนที่ สามารถคำนวณหาค่าแรงบิดที่ล้อดังสมการที่ 2.8 ได้ดังนี้

$$T_w = 26.51 \times 0.04 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$$

$$T_w = 1.06 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$$

เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าที่มีชุดเกียร์ทด มีอัตราทดเฟืองเกียร์เท่ากับ 1 : 7.8 ดังนั้น หาค่าแรงบิดจากมอเตอร์ดังสมการที่ 2.9 มีค่าเท่ากับ

$$T_m = \frac{1.06}{7.8 \times 0.85} \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$$

$$T_m = 0.16 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$$

ดังนั้นรถไฟฟ้าขนส่งเอกสารจะต้องเลือกใช้มอเตอร์ที่มีขนาดแรงบิดเท่ากับหรือมากกว่า $0.16 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$

เมื่อพิจารณาค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ โดยใช้ค่าความเร็วเชิงเส้นสูงสุดที่ใช้งานคือ $1 \text{ m}/\text{s}$ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องคำนวณให้อยู่ในรูปความเร็วเชิงมุม เพื่อใช้ในการบ่อนค่าให้กับมอเตอร์ที่หมุนด้วยความเร็วเชิงมุม สามารถคำนวณค่าได้ตามสมการที่ 2.24 ได้ดังนี้

$$N = \frac{60 \times 1}{2\pi \times 0.04} \text{ rpm}$$

$$N = 238.73 \text{ rpm}$$

การเลือกมอเตอร์ทำได้ 2 แบบ คือ เลือกจากค่าแรงบิดที่ใช้ และเลือกจากค่ากำลังมอเตอร์ ซึ่งทั้งสองกรณีต้องพิจารณาความเร็วรอบด้วย สามารถคำนวณหาค่ากำลังได้ดังสมการที่ 3.6 ดังนี้

$$P = T \times \omega \quad (3.6)$$

กำหนดให้

P คือ ค่ากำลังมอเตอร์ หน่วยวัตต์ (W)

$$P = 1.06 \times \left(\frac{1}{0.04}\right) W$$

$$P = 26.5 W$$

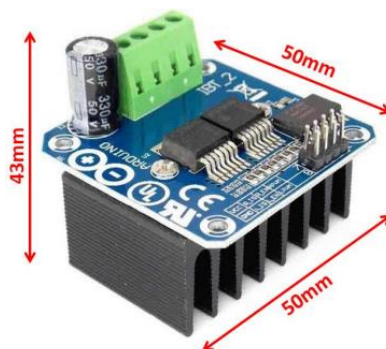
ดังนั้น พิกัดกำลังมอเตอร์ในงานวิจัยนี้จะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 26.5 W

พิกัดกำลังมอเตอร์และโมดูลขับมอเตอร์ (Motor Driver)

ผู้วิจัยได้เลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC motor) พิกัดกำลัง 30 W แรงดัน 12 V กินกระแสสูงสุดที่ 3 A แรงบิด 1.96 Nm ความเร็วรอบ 250 rpm เนื่องจากเป็นมอเตอร์ที่หาซื้อตามท้องตลาดได้ง่าย มีน้ำหนักเบา และราคาถูก ควบคุมความเร็วด้วยโมดูลขับมอเตอร์ BTS7960 เป็นโมดูลขนาดเล็กสำหรับควบคุมมอเตอร์กำลังสูง สามารถจ่ายกระแสได้สูงสุด 43 A โมดูลขับมอเตอร์เป็นแบบควบคุมสัญญาณพีดับบลิวเอ็มด้วยวงจรสับสวิตช์ (H – Bridge circuit) โดยใช้หลักการควบคุมแรงดันและความถี่ขาออกแบบแรงดัน-ความถี่ (V/F Control)



รูปที่ 3.9 มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงพร้อมชุดเฟืองเกียร์ทด



รูปที่ 3.10 โมดูลขับเคลื่อนมอเตอร์

จากสเปกของมอเตอร์ที่ซื้อได้ตามท้องตลาด สามารถนำค่าแรงบิดสูงสุดมาคำนวณหาค่าความปลอดภัยในการใช้งานได้ดังสมการที่ 2.10

$$F.s = \frac{1.96}{1.06}$$

$$F.s = 1.85$$

ดังนั้นความปลอดภัยในการเลือกซื้อมอเตอร์มีค่าเท่ากับ 1.85 เท่าของค่าแรงบิดที่ต้องการสำหรับการติดตั้งใช้งานบนราง ตัวรถจะใช้แรงจากสปริงในการจับยึดรางของล้อขับเคลื่อน เนื่องจากช่วยให้รถเกิดสลิปน้อยลงรวมถึงพื้นที่การติดตั้งล้อขับเคลื่อนมีน้อย โดยสามารถคำนวณค่าได้จากสมการที่ 3.7

$$F = k \times s \quad (3.7)$$

กำหนดให้

k คือ ค่าคงที่ของสปริง (kg/s^2)

s คือ ระยะยืดตัวของสปริง (m)

งานวิจัยนี้ใช้สปริงมีค่าคงที่ เท่ากับ 1000 kg/s^2 ดังนั้นเพื่อให้ระบบขับเคลื่อนได้จะต้องคำนวณระยะยืดของสปริงให้มีค่าแรงมากกว่าแรงขับเคลื่อนทั้งหมด ดังนี้

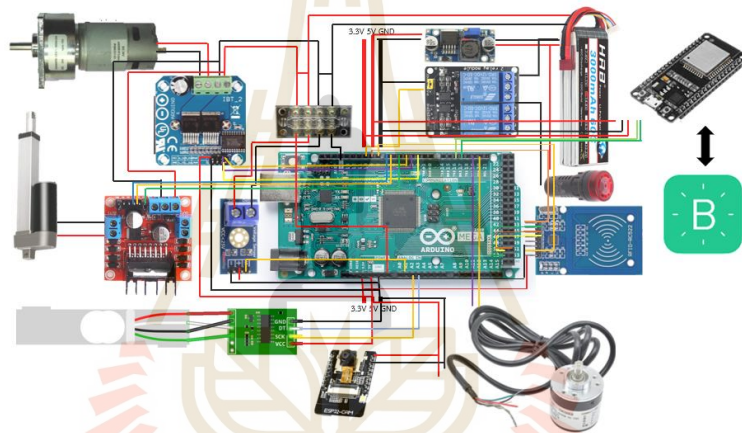
$$26.51 < 1000 \times s$$

$$s > 0.0265 \text{ m}$$

ดังนั้น งานวิจัยนี้ต้องยืดระยะสปริงมากกว่า 0.0265 m หรือ 2.65 cm

3.3.3 การติดตั้งอุปกรณ์

อุปกรณ์การทำงานระบบรถไฟฟ้างานเดี่ยวอัตโนมัติสำหรับขนส่งเอกสารสามารถต่อวงจรได้ดังรูปที่ 3.11 และต่ออุปกรณ์ใช้งานจริงดังรูปที่ 3.12

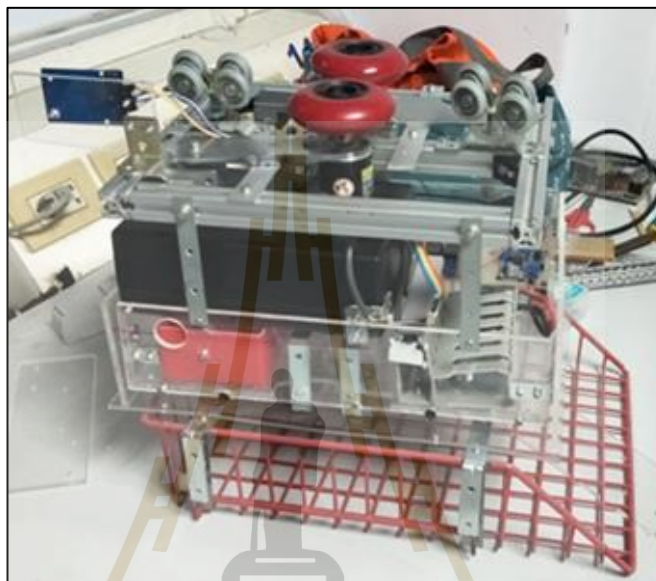


รูปที่ 3.11 แผงการต่อวงจรของระบบรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร



รูปที่ 3.12 การติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดบนรถ

จากรูปที่ 3.12 คือการติดตั้งและต่ออุปกรณ์ให้สามารถทำงานร่วมกันได้ โดยเขียนโปรแกรมของแต่ละอุปกรณ์ก่อนเพื่อทดสอบอุปกรณ์ว่าสามารถใช้งานได้ จากนั้นให้เขียนโปรแกรมทดสอบทั้งระบบ เมื่อทดสอบเขียนโปรแกรมทดลองอุปกรณ์ในเบื้องต้นแล้ว พบว่าอุปกรณ์สามารถทำงานได้ จากนั้นให้นำอุปกรณ์ติดตั้งบนตัวรถให้เรียบร้อย ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 โมเดลรถที่สร้างขึ้นสำหรับทดสอบ



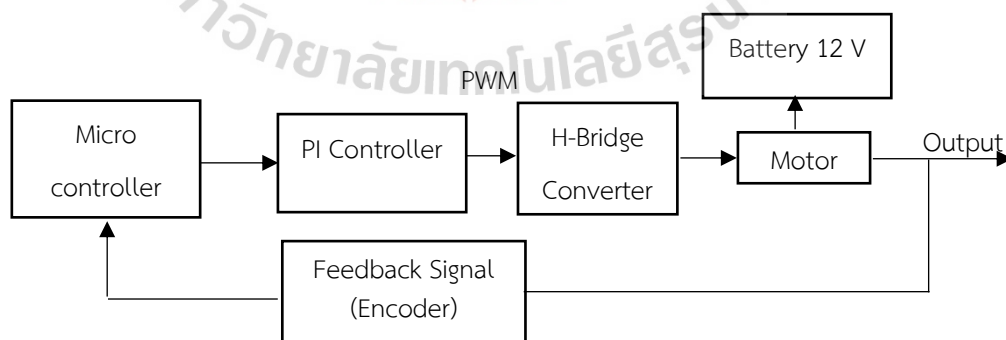
รูปที่ 3.14 การติดตั้งรถบนราง



รูปที่ 3.15 ลักษณะของรางทดสอบแนวระนาบ แนวลาดชัน 10 องศา และทางโค้ง 90 องศา

3.4 การออกแบบระบบควบคุมการขับเคลื่อน

รถไฟฟ้าขนส่งเอกสารในงานวิจัยนี้ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ระบบการควบคุมแบบเปิดสำหรับการหมุนของมอเตอร์ ความเร็วรอบจะขึ้นกับการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ ผลการตอบสนองของระบบจะมีลักษณะเป็นแบบ First order ดังนั้นเพื่อให้สามารถควบคุมความเร็วรอบได้ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้อัลกอริทึมการควบคุมแบบวงปิดด้วยตัวควบคุมชนิดพีไอในการชดเชยสัญญาณที่ผิดพลาดเพื่อควบคุมแรงดันขาออกไปเลี้ยงมอเตอร์ ผลตอบสนองของระบบเป็นแบบ Second order โดยใช้ตัวตรวจวัดความเร็วรอบชนิด Encoder ส่งค่าให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด Arduino Mega 2560 แผนภาพการทำงานของระบบควบคุมการขับเคลื่อนเป็นดังรูปที่ 3.16



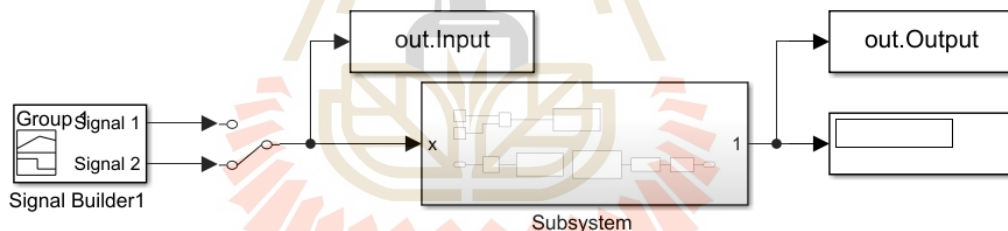
รูปที่ 3.16 แผนภาพระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร

3.4.1 การระบุเอกลักษณ์ของระบบขับเคลื่อน

ในการออกแบบผลการตอบสนองของระบบจำเป็นต้องทราบลักษณะทางกายภาพของอุปกรณ์ของระบบ ดังนั้นจึงเป็นเรื่องยากสำหรับการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในระบบที่มีความซับซ้อน และไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ของระบบเลย ผู้วิจัยจึงนำระบบการระบุเอกลักษณ์ด้วยวิธีการทดลองกล่องดำ จากการทดลองระบบจริงด้วยโปรแกรม MATLAB เริ่มจากการเขียน Block Simulink ดังรูปที่ 3.17 และ 3.18 จากนั้นใส่ค่าอินพุตในรูปแบบของแรงดัน (0-12V) ในระบบเปิด (Open loop) เพื่อให้ทราบช่วงความเร็วรอบที่ต้องการ จากการกระทำดังกล่าวทำให้ทราบว่าค่าแรงดันช่วง 5.5 – 12 V มอเตอร์จะมีความเร็ว 60 - 250 rpm ซึ่งเป็นช่วงความเร็วใช้งาน

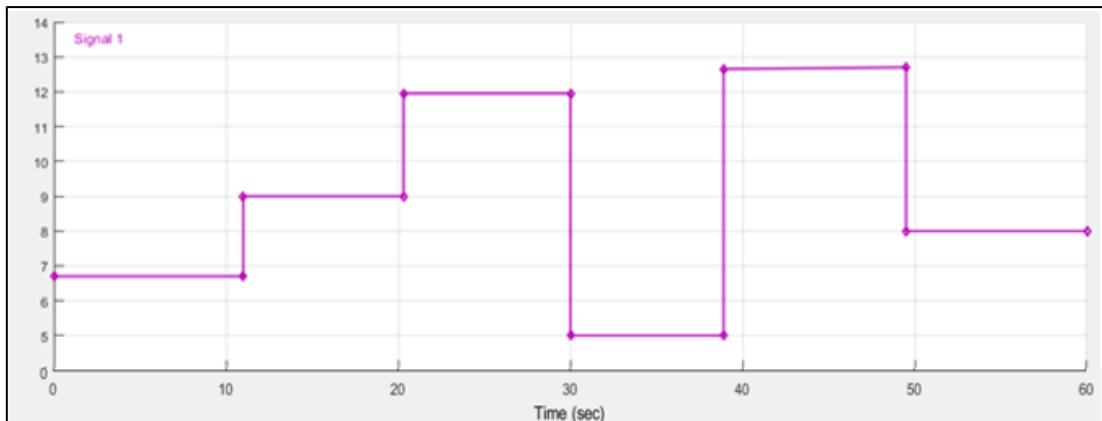


รูปที่ 3.17 ระบบย่อย



รูปที่ 3.18 ระบบควบคุมเปิด

การออกแบบค่าอินพุต ถือเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบการควบคุม เนื่องจากหากค่าอินพุตที่ให้กับระบบไม่อยู่ในช่วงความเร็วที่ใช้งานจะทำให้ได้ข้อมูลในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบไม่ถูกต้อง ส่งผลให้ได้ค่าอัตราขยายตัวควบคุมพีไอที่ไม่เหมาะสม ดังนั้นการออกแบบค่าอินพุตสำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ช่วงความเร็ว 0.25 - 1 m/s โดยในการใส่ค่าอินพุตจะมีหน่วยเป็นแรงดันดังนั้นผู้วิจัยได้ทดลองและเก็บค่าช่วงแรงดันที่ความเร็วใช้งาน ซึ่งมีค่าในช่วง 5.5 – 11.8V จากนั้นสร้างสัญญาณอินพุตได้ดังรูปที่ 3.19 ผู้วิจัยออกแบบสัญญาณอินพุตโดยกำหนดให้กราฟสัญญาณ 1 โดยแกน X คือค่าเวลามีค่า 60 s แกน Y คือ ค่าแรงดันซึ่งผู้วิจัยกำหนดให้มีค่าต่ำสุด 5 V และสูงสุด 12.8 V แรงดันดังกล่าวจะครอบคลุมช่วงความเร็วใช้งานทั้งหมด



รูปที่ 3.19 สัญญาณอินพุต

นำค่าอินพุตรูปที่ 3.19 เข้าไปในระบบ จากนั้นรันระบบจริงโดยให้มอเตอร์ทำงานตามโปรแกรมไฟล์แรงดัน เพื่อเก็บข้อมูลในส่วนของอินพุตและเอาต์พุตของระบบจริง นำข้อมูลที่ได้ทำการระบุแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ ซึ่งอยู่ในรูปของโดเมนเอส พร้อมค่าความแม่นยำของแบบจำลองของระบบ ดังรูปที่ 3.20

```

From input "u1" to output "y1":
    1265
-----
s^2 + 94.14 s + 1383
Name: tf6
Continuous-time identified transfer function.

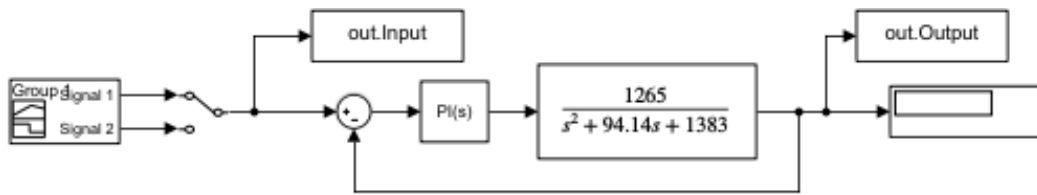
Parameterization:
  Number of poles: 2   Number of zeros: 0
  Number of free coefficients: 3
  Use "tfdata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
  Estimated using TFEST on time domain data "mydata".
  Fit to estimation data: 86.24% (stability enforced)
  
```

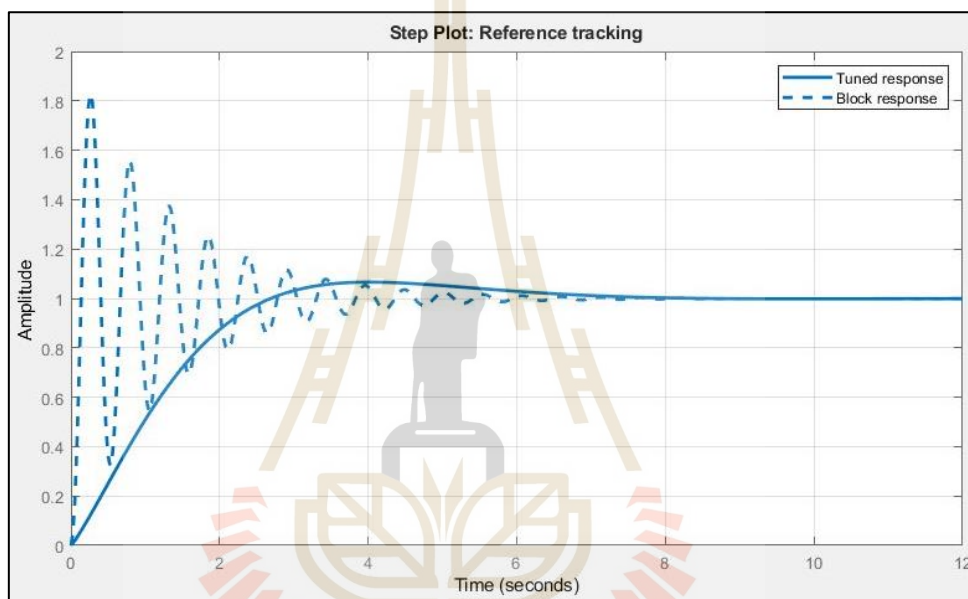
รูปที่ 3.20 การระบุเอกลักษณ์ของระบบ

3.4.2 การใช้ MATLAB ในการหาค่าที่เหมาะสมสำหรับตัวควบคุมพีโอ

นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ เขียนลงใน Block Simulink ของระบบควบคุมแบบปิด โดยมีตัวควบคุมแบบพีโอ ดังรูปที่ 3.21 จากนั้นทำการรันระบบอีกครั้งจากค่าอินพุตเดิม กวดูผลตอบสนองของระบบจากบล็อกตัวควบคุมพีโอ ดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.21 ระบบควบคุมแบบปิด

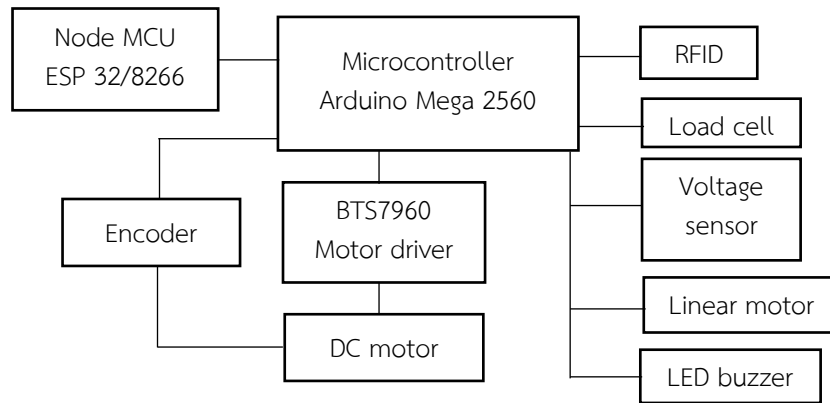


รูปที่ 3.22 การปรับค่าตัวควบคุมพีไอ

เมื่อได้ค่าประมาณในการปรับค่าตัวควบคุม ผู้วิจัยจะนำค่าไปใช้ในการปรับปรุงผลตอบสนองของระบบด้วยการเขียนอัลกอริทึมการควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอในภาษาซี

3.5 การออกแบบอัลกอริทึมควบคุมการเดินรถ

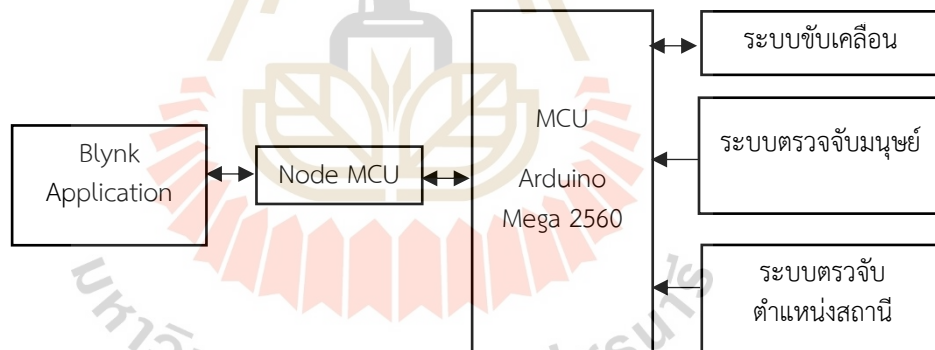
ไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นอุปกรณ์หลักในการควบคุมการทำงานของตัวรถ มีหน้าที่รับส่งข้อมูลจากตัวเซนเซอร์ทุกตัวในตัวรถ ดังนั้นทำให้ขณะรถเคลื่อนที่จะมีเซนเซอร์ในการตรวจจับสัญญาณ เช่น ตรวจจับสิ่งกีดขวาง ตรวจวัดน้ำหนัก ตรวจวัดเปอร์เซ็นต์แบตเตอรี่ มีการแจ้งเตือนการเคลื่อนที่ด้วยแสง และเสียง เพื่อให้เกิดความปลอดภัยในการทำงานของระบบ ซึ่งตัวบอร์ดจะติดตั้งกับเซนเซอร์ และอุปกรณ์ต่างๆ ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ผังการเชื่อมต่ออุปกรณ์และเซนเซอร์บนบอร์ด Arduino Mega 2560

3.5.1 อัลกอริทึมการทำงานของระบบขับเคลื่อน

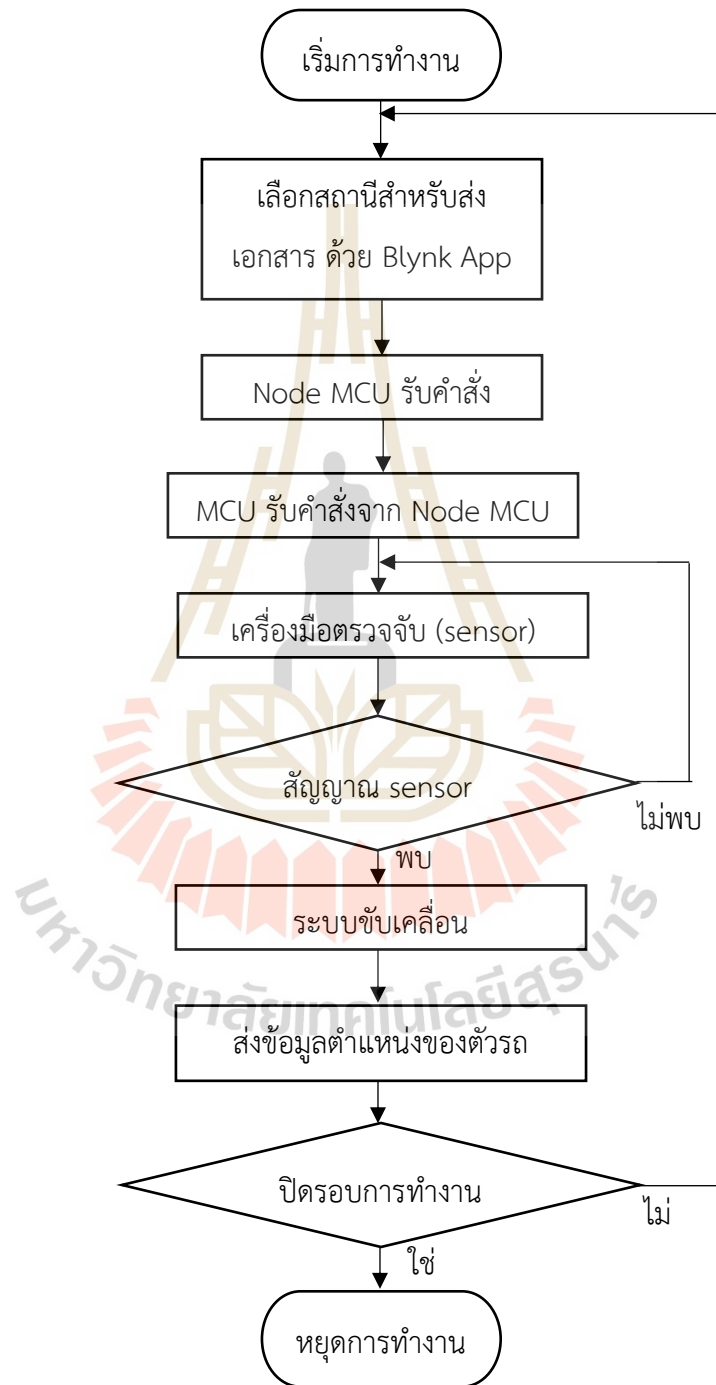
ในการออกแบบอัลกอริทึมการทำงานของระบบขับเคลื่อน ผู้วิจัยต้องทราบการทำงานในภาพรวมของระบบรถไฟฟ้า และอุปกรณ์ที่ใช้ ดังแผนผังการควบคุมระบบขับเคลื่อนดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 ผังภาพรวมการควบคุมระบบขับเคลื่อน

จากรูปที่ 3.24 พบว่าระบบขับเคลื่อน เป็นระบบหนึ่งของรถไฟฟ้า โดยจะทำงานภายใต้การควบคุมด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด Arduino Mega 2560 ซึ่งจะต้องทำงานร่วมกับระบบการตรวจจับมนุษย์ด้วยกล้องและระบบการตรวจจับสถานีด้วย RFID ในการสั่งการทำงานของระบบขับเคลื่อนจะสั่งโดยผู้ใช้งานแอปพลิเคชัน Blynk ด้วยการสื่อสารระยะไกลด้วยอินเทอร์เน็ต จากนั้นคำสั่งจะถูกส่งไปที่ บอร์ด ESP32/8266 ซึ่งเป็นบอร์ดที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เน็ตที่ตั้งอยู่บนรถเพื่อทำหน้าที่ในการรับคำสั่งจากผู้ใช้ให้สามารถส่งถึงบอร์ดควบคุมกลางบนตัวรถได้ และ

รับส่งข้อมูลการตรวจจับของเซนเซอร์ในระบบต่างๆ บนรถไปแสดงบนหน้าจออินเทอร์เน็ตเฟสของแอปพลิเคชันได้ อัลกอริทึมการทำงานของระบบขับเคลื่อนดังรูปที่ 3.25



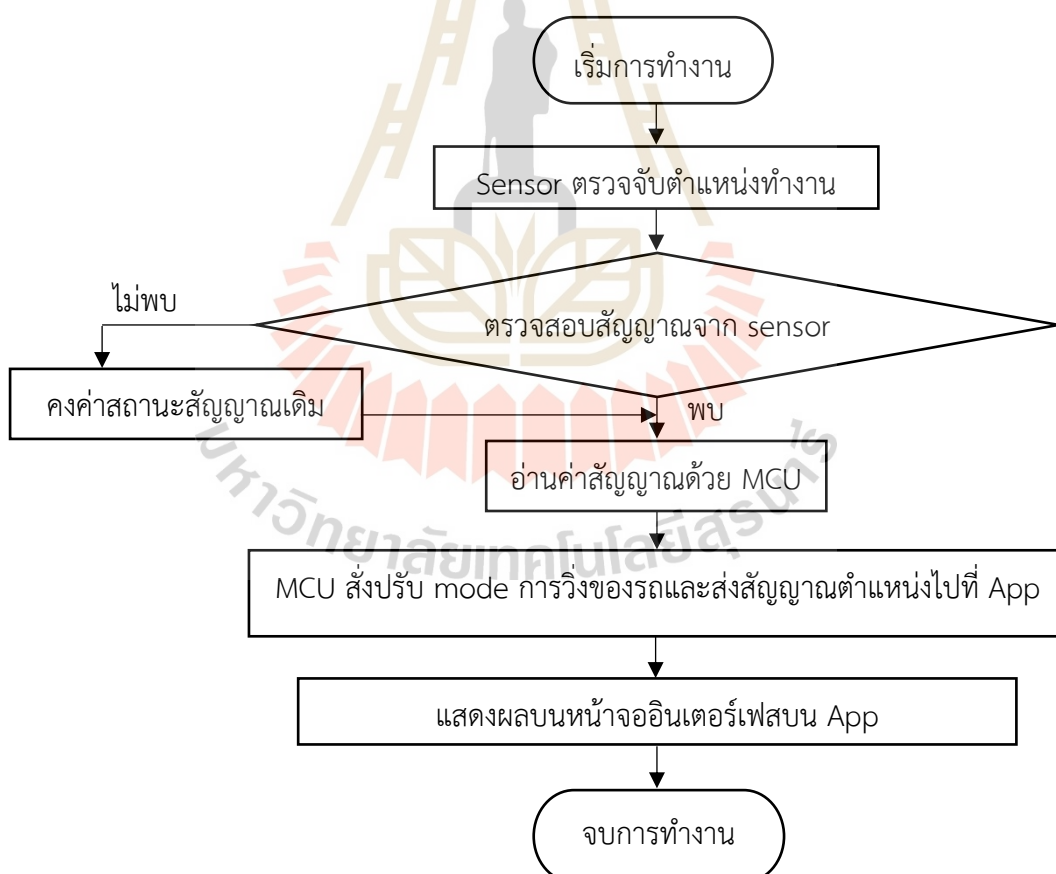
รูปที่ 3.25 ผังการทำงานของระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร

3.5.2 อัลกอริทึมระบบตรวจจับสัญญาณสำหรับการควบคุมการเดินรถ

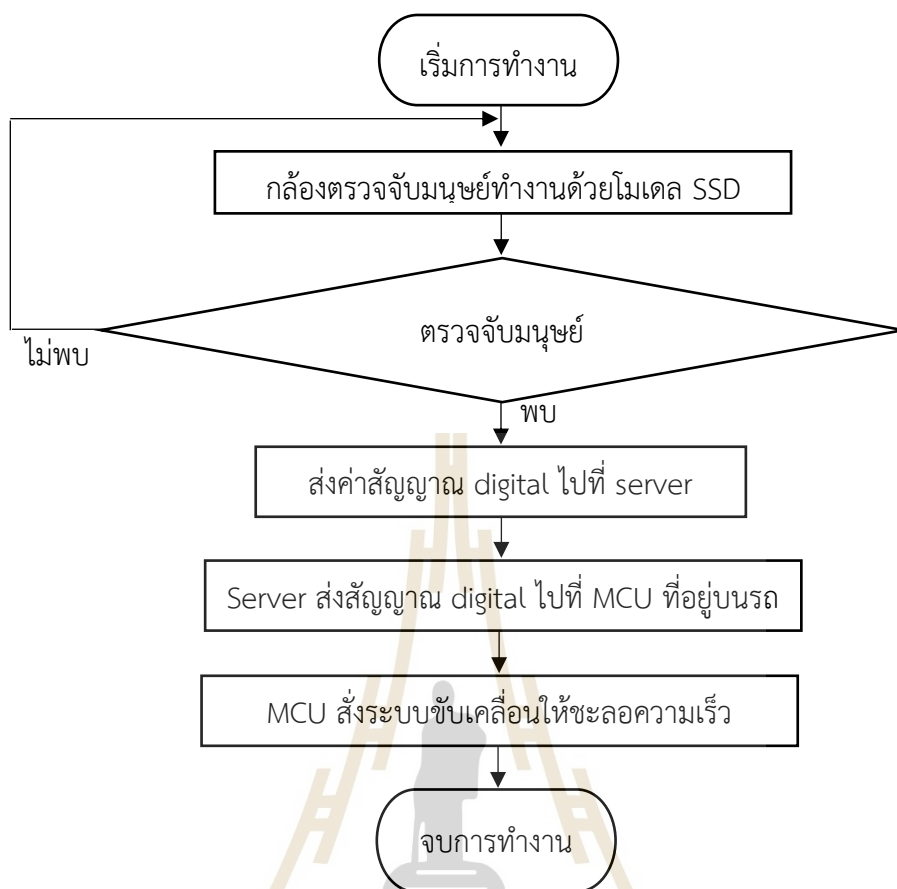
สำหรับการเดินรถจำเป็นจะต้องมีการตรวจสอบสถานะการทำงานขณะรถเคลื่อนที่ เพื่อที่จะนำค่าสัญญาณกลับมาประมวลผลควบคุมระบบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ติดตั้งระบบตรวจจับสัญญาณขณะรถเคลื่อนที่ดังนี้

1. เซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่ง (RFID tacking) ติดตั้งเพื่อปรับเปลี่ยนสถานะการวิ่ง เช่น เร่งความเร็ว ลดความเร็ว ความเร็วคงที่ และหยุดรถ รวมถึงยังสามารถแจ้งตำแหน่งของสถานีที่รถวิ่งผ่านหรือเข้าจอดได้ อัลกอริทึมการทำงานของเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งเป็นดังรูปที่ 3.26

2. กล้อง ESP32 CAM สำหรับตรวจจับมนุษย์ที่เดินอยู่เบื้องหน้าของตัวรถ เพื่อให้เกิดความปลอดภัยกับผู้คนที่อยู่บริเวณรอบๆตัวรถ โดยการชะลอความเร็วตัวรถลง ดังนั้นในส่วนของอัลกอริทึมการทำงานของกล้องตรวจจับผู้สัญจรเป็นดังรูปที่ 3.27



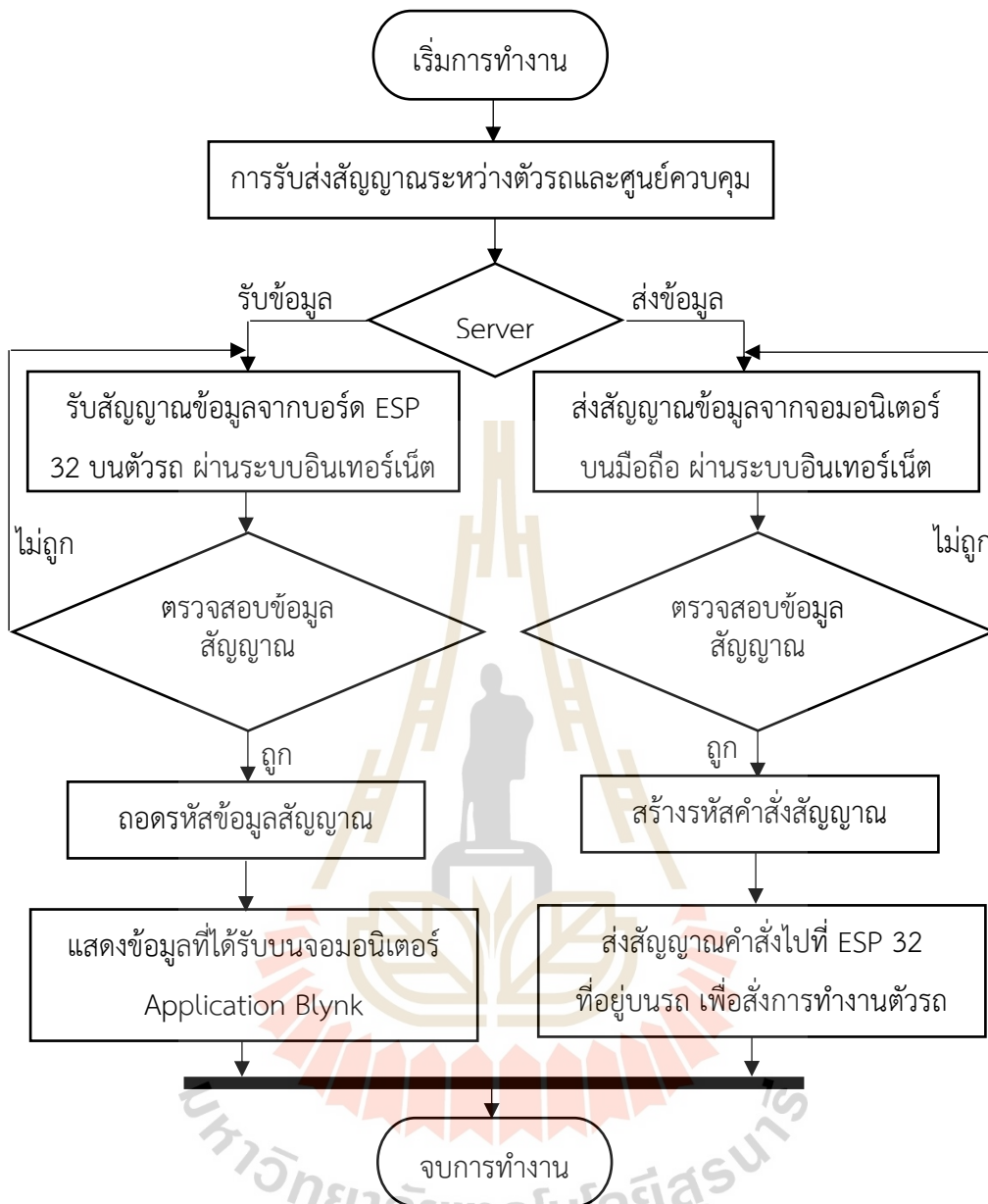
รูปที่ 3.26 แผนผังการทำงานของเซนเซอร์ RFID tacking



รูปที่ 3.27 แผนผังการทำงานของ ESP32 CAM

3.5.3 อัลกอริทึมระบบการสื่อสาร

ระบบสื่อสารระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์กับศูนย์ควบคุมด้วยระบบไร้สาย เนื่องด้วยงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบระบบขนส่งอัตโนมัติที่มีความสะดวกสบายในการเรียกใช้ของผู้ใช้งาน ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกระบบการสื่อสารไร้สายด้วยอินเทอร์เน็ตทุกสรรพสิ่งเป็นระบบที่สามารถรับส่งข้อมูลหรือสั่งการผ่านระบบอินเทอร์เน็ต ซึ่งมีกฎในการสื่อสารด้วยโปรโตคอล MQTT ทำให้ระบบทำงานด้วยความน่าเชื่อถือ ลดปัญหาด้านการบดบังสัญญาณจากตัวอาคารในระหว่างเคลื่อนที่ ผังการทำงานของระบบสื่อสารไร้สายเป็นดังรูปที่ 3.28



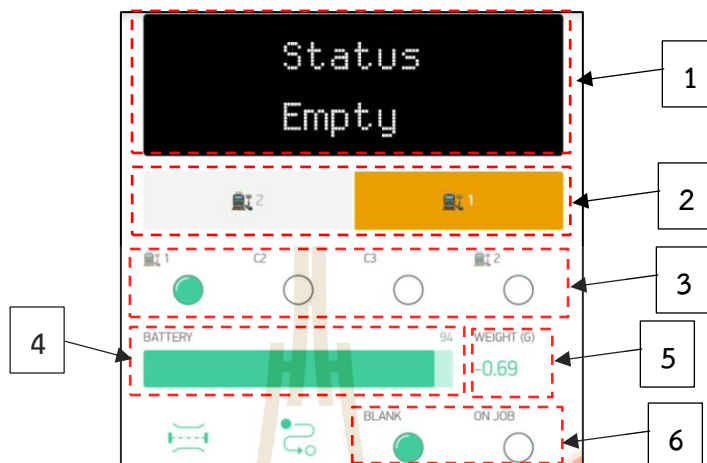
รูปที่ 3.28 แผนผังระบบสื่อสารไร้สาย

3.6 การออกแบบระบบอินเทอร์เน็ตเฟสสำหรับสื่อสารกับผู้ใช้งาน

3.6.1 การออกแบบหน้าจอนิเตอร์เฟส

เป็นส่วนที่สำคัญเนื่องจากจะต้องติดต่อสื่อสารกับผู้ใช้งาน ผู้วิจัยได้นำระบบ Blynk cloud platform ซึ่งเป็นแอปพลิเคชันสำเร็จรูปที่ออกแบบมาเพื่อรองรับระบบ IOT ที่ผู้ใช้งาน

สามารถหยาบอุปกรณ์การตกแต่งหน้าจออินเทอร์เน็ตเฟสได้ตามต้องการ เพียงแต่หากระบบมีขนาดใหญ่ จะต้องมีการใช้จ่ายเพิ่มเติม ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบหน้าจออินเทอร์เน็ตเฟสเบื้องต้น ดังรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 อินเทอร์เน็ตเฟสสำหรับผู้ใช้งาน

การแสดงผลบนหน้าจอประกอบด้วย 1.ส่วนแจ้งการทำงาน 2.ปุ่มสั่งการ 3.ส่วนแจ้งตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ 4.ส่วนแจ้งปริมาณแบตเตอรี่ 5.ส่วนแจ้งปริมาณน้ำหนัก และ 6.ส่วนแจ้งสถานะตัวรถ

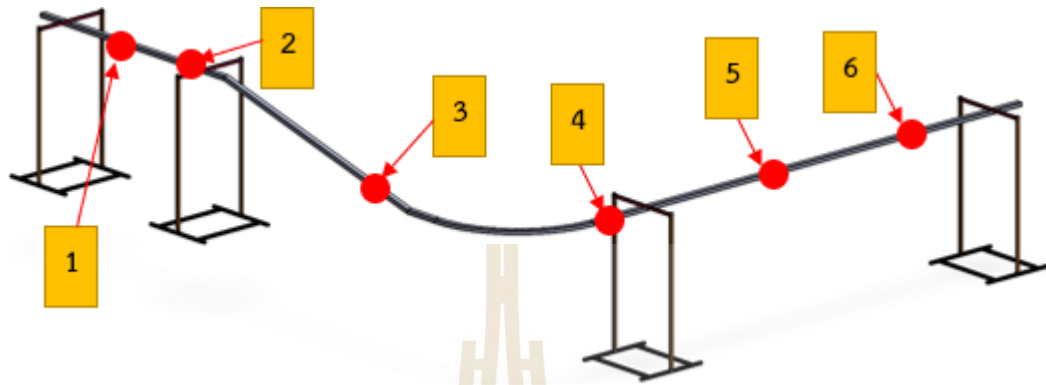
3.6.2 วิธีการใช้งานสำหรับผู้ใช้งาน

สำหรับการใช้งาน ผู้ใช้จะต้องดำเนินการโหลดแอปพลิเคชัน Blynk ที่รองรับทั้งระบบมือถือ IOS และ Android จากนั้นเปิดแอปพลิเคชันขึ้นมา แล้วดำเนินการสแกน QR Code ของระบบที่สร้างขึ้นโดยเจ้าหน้าที่ส่วนกลาง เมื่อสแกนผู้ใช้จะได้หน้าจออินเทอร์เน็ตเฟสดังรูปที่ 3.29 สามารถสั่งการระบบและดูการแจ้งเตือนได้ แต่ไม่สามารถแก้ไขหน้าจอได้

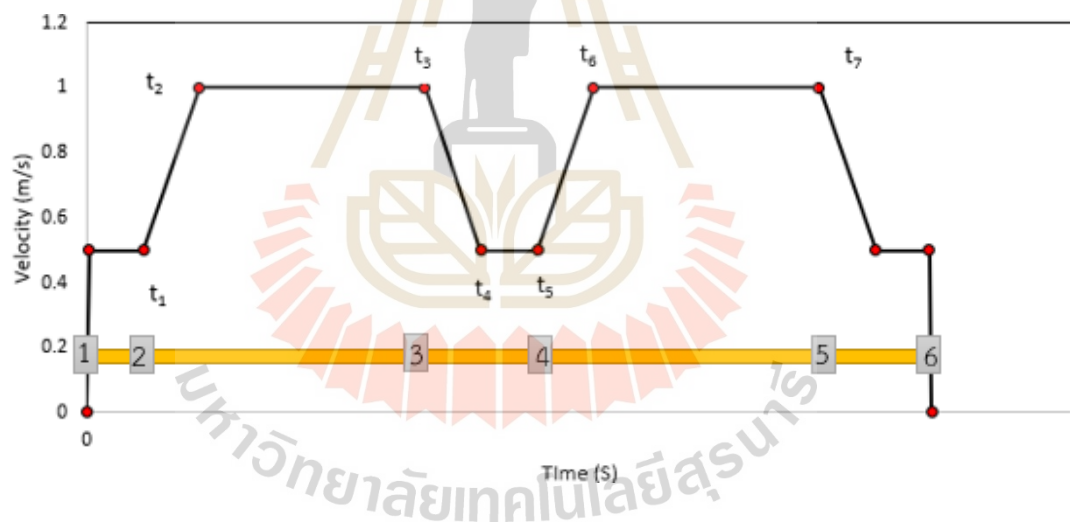
3.7 การออกแบบโปรไฟล์ความเร็วการเคลื่อนที่

สำหรับความเร็วในการเคลื่อนที่ของตัวรถในงานวิจัย ดำเนินการโดยการออกแบบโปรไฟล์ความเร็วด้วยสมการความสัมพันธ์ความเร็วเชิงเส้น และความเร็วเชิงมุมเพื่อให้สามารถกำหนดค่าความเร็วรอบมอเตอร์ เนื่องจากรถมีระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมความเร็วด้วยความเร็วรอบของมอเตอร์ สำหรับโปรไฟล์ความเร็วทางผู้วิจัยได้ใช้วิธีการ

ออกแบบโปรไฟล์แบบสี่เหลี่ยมคางหมูโดยติดตั้งตำแหน่ง RFID tag เพื่อปรับโหมดความเร็ว ดังรูปที่ 3.30 ดังนั้นจึงสามารถออกแบบความเร็วการเคลื่อนที่ได้ดังรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.30 ตำแหน่งติดตั้ง RFID tag บนราง



รูปที่ 3.31 การออกแบบโปรไฟล์ความเร็วของระบบ

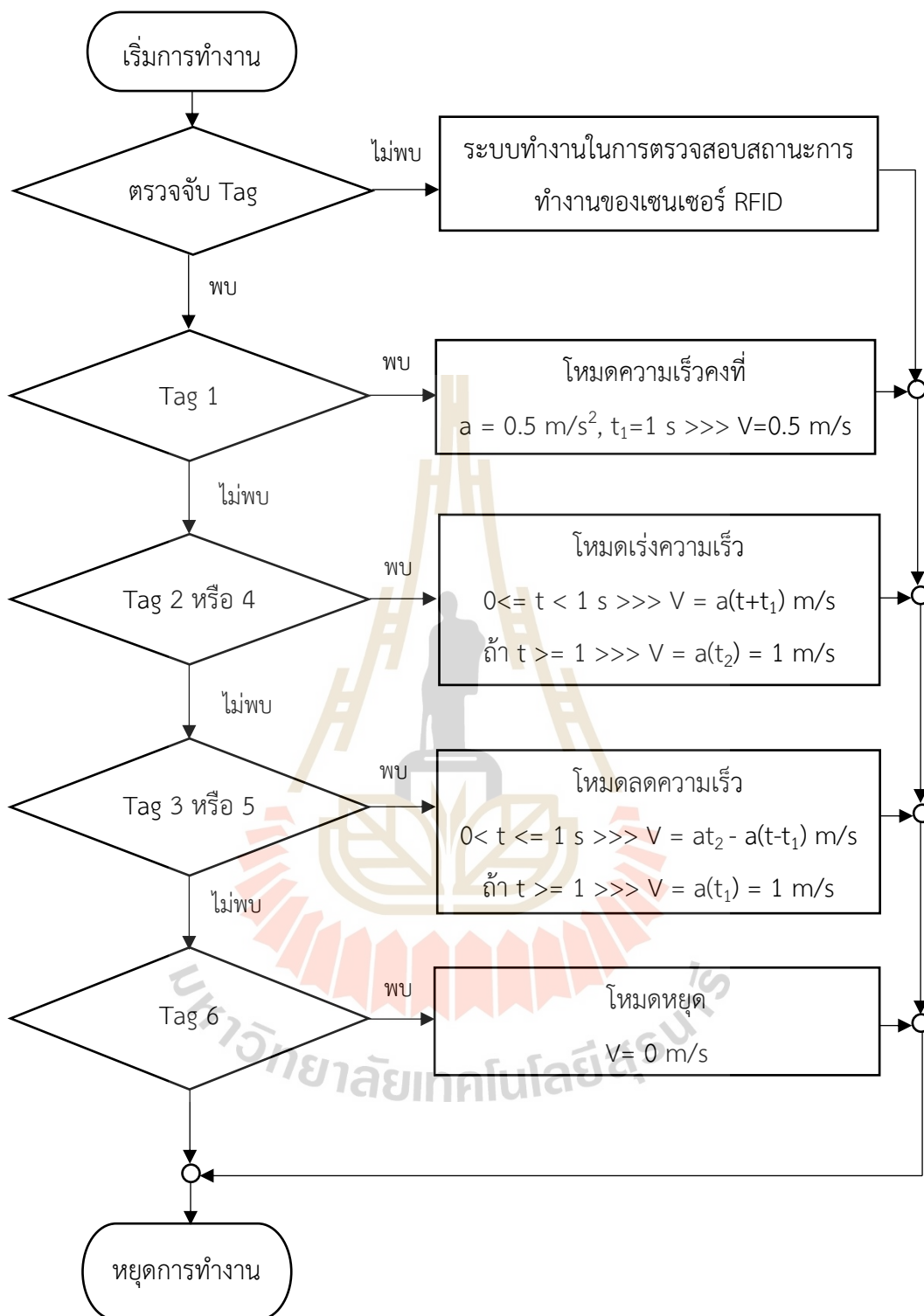
สี่เหลี่ยมสีเทาแทนตำแหน่งการติดตั้ง RFID tag เมื่อรถวิ่งผ่านจะทำให้สามารถระบุตำแหน่งรถบนรางเพื่อป้องกันค่าความเร็วของมอเตอร์ในการควบคุมช่วงนั้นได้ งานวิจัยนี้มีขอบเขตความเร็วสูงสุดในการใช้งานอยู่ที่ 1 เมตรต่อวินาที ดังนั้นผู้ออกแบบสามารถกำหนดระยะเวลาการเคลื่อนที่ได้ดังสมการ โปรไฟล์สี่เหลี่ยมคางหมู

$$v(t) = \begin{cases} at & t_1 \leq t \leq t_2 \\ at_1 & t_2 < t \leq t_3 \\ at_1 - a(t - t_2) & t_3 < t \leq t_4 \end{cases}$$

หาความสัมพันธ์ความเร็วเชิงมุมด้วยการแทนค่าสมการที่ 2.21 ในสมการที่ 2.24 จะได้ดังนี้

$$N = \frac{60v(t)}{2\pi r}$$

ดังนั้นในการควบคุมความเร็วจะสามารถหาค่าความเร็วรอบมอเตอร์ที่เหมาะสมกับการเคลื่อนที่บนช่วงต่างๆ ตามที่ออกแบบไว้ได้ จากรูปที่ 3.31 ช่วงเวลา t_3 ถึง t_4 คือช่วงที่รถมีการชะลอเข้าโค้งหรือตัวรถตรวจจับพบผู้สัญจร และช่วงเวลา t_5 ถึง t_6 คือช่วงที่รถออกจากโค้งหรือไม่มีสัญญาณตรวจเจอผู้สัญจร เพื่อให้ผู้อ่านเข้าใจง่ายขึ้น ผู้วิจัยจึงเขียน Flow chart การออกแบบดังรูปที่ 3.32 ในส่วนของค่าพารามิเตอร์ทั้งหมด ผู้ออกแบบสามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ตามความต้องการ โดยในรูปที่ 3.32 เป็นการเคลื่อนที่จากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 เมื่อระบบเริ่มทำงานตัวเซนเซอร์ RFID จะดำเนินการตรวจจับตัว Tag ที่ติดตั้งอยู่บนราง และหากพบหมายเลข tag จะดำเนินการอ่านค่าข้อมูลด้วย Arduino Mega 2560 และส่งค่าเข้าสู่โหมดการทำงานตามอัลกอริทึมที่เขียนขึ้นด้วยภาษาซีตามสมการการเคลื่อนที่เชิงเส้นที่ประยุกต์ใช้ โดยเมื่อระบบเคลื่อนที่จนถึงสถานีที่ 2 รถจะหยุดเคลื่อนที่และเริ่มระบบใหม่ หากผู้ใช้งานสั่งให้รถเคลื่อนที่ไปสถานีที่ 2 ซ้ำ ตัวรถจะหยุดนิ่งไม่เคลื่อนที่ แต่ถ้าหากสั่งไปสถานีที่ 1 รถจะทำการวิ่งโดยทำงานร่วมกับระบบตรวจจับ Tag เพื่อปรับโหมดการเคลื่อนที่ โดยสถานี 2 ไปสถานี 1 โหมดเลข Tag 6 จะทำงานสลับกับ Tag 1 และ Tag 2 และ 4 จะสลับการทำงานกับเลข Tag 3 และ 5 ของแผนผังรูปที่ 3.32



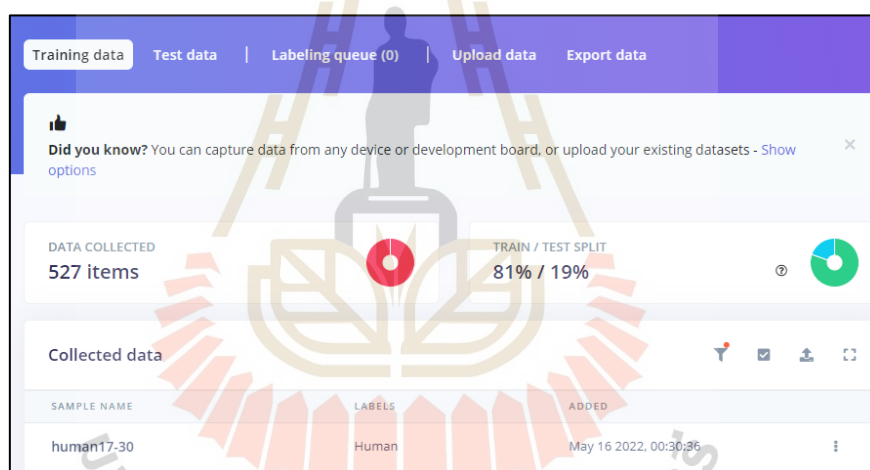
รูปที่ 3.32 แผนผังโปรไฟล์การเคลื่อนที่จากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2

3.8 การออกแบบระบบตรวจจับผู้สัญจรด้วยกล้อง

ในงานวิจัยมีการประยุกต์ใช้กล้องสำหรับตรวจจับวัตถุด้วยปัญญาประดิษฐ์ ซึ่งผู้วิจัยได้นำวิธีสร้างโมเดลในการตรวจจับด้วยหลักการของโมเดล CNN ในปัจจุบันมีการพัฒนาต่อจากโมเดล CNN แบบเดิมมากมายหลายโมเดล เนื่องจากโมเดล CNN แบบเดิมตรวจจับวัตถุได้ช้า ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้โมเดล SSD เป็นโมเดลที่สามารถตรวจจับวัตถุได้อย่างรวดเร็วและนิยมใช้ในปัจจุบัน ในการสร้างโมเดลผู้วิจัยใช้วิธีการสร้างจาก Website Edge Impulse สามารถสร้างโมเดลได้ตามขั้นตอนดังนี้

3.8.1 การเก็บข้อมูล

สำหรับข้อมูลในการสร้างโมเดลผู้วิจัยได้โหลดรูปภาพมนุษย์จาก Website Kaggle จำนวน 655 ภาพ แบ่งเป็น Training data 81% และ Test data 19% ดังรูปที่ 3.33



รูปที่ 3.33 การเก็บข้อมูล

3.8.2 การเตรียมข้อมูล

เมื่อนำเข้ารูปภาพแล้ว จะต้องดำเนินการกำหนดขนาดของรูปภาพที่ต้องการ เพื่อให้ระบบทำการ Resize ให้มีขนาดเท่ากันทุกรูป จากนั้นตั้งชื่อรูปภาพ และสร้างกรอบวัตถุที่ต้องการตรวจจับในรูปภาพทั้งหมดที่นำเข้า พร้อมระบุ classes ซึ่งในงานวิจัยระบุเพียง 1 classes คือ Human ดังรูปที่ 3.34

Training set	
Data in training set	527 items
Classes	1 (Human)
<input type="button" value="Generate features"/>	
Feature explorer	
<ul style="list-style-type: none"> Human 	

รูปที่ 3.34 การเตรียมข้อมูล

3.8.3 การเลือกโมเดล

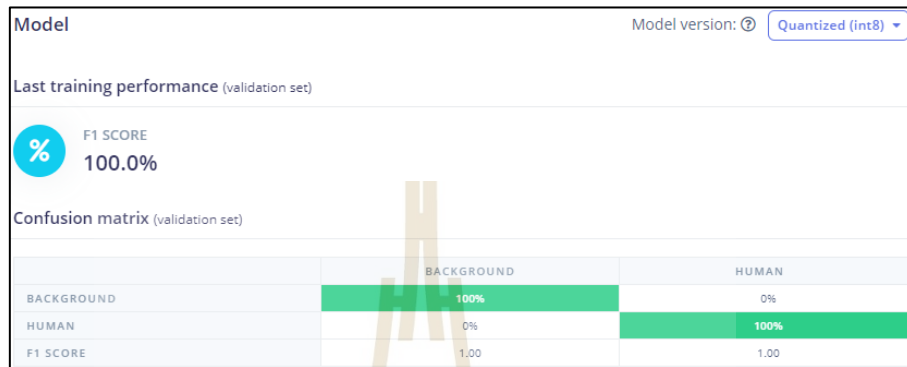
ในการเลือกโมเดลจะต้องมีการกำหนดค่า รอบการฝึก (training cycle), อัตราการเรียนรู้ (Learning rate), ชุดข้อมูลสำหรับตรวจสอบความถูกต้องของโมเดล (Validation set size) และเลือกโมเดล SSD ดังรูปที่ 3.35

Neural Network settings	
Training settings	
Number of training cycles	<input type="text" value="25"/>
Learning rate	<input type="text" value="0.15"/>
Validation set size	<input type="text" value="20"/> %
Neural network architecture	
Input layer (27,648 features)	
<input type="button" value="MobileNetV2 SSD FPN-Lite 320x320"/>	

รูปที่ 3.35 การเลือกโมเดล

3.8.4 การฝึกโมเดล

ขั้นตอนนี้ผู้วิจัยเพียงทำการกดให้ระบบเริ่มฝึก ซึ่งจะใช้เวลาเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับจำนวนข้อมูลและคอมพิวเตอร์ จากนั้นจะทราบผลการฝึกของโมเดลด้วยค่าแสดงประสิทธิภาพ (F1 score)



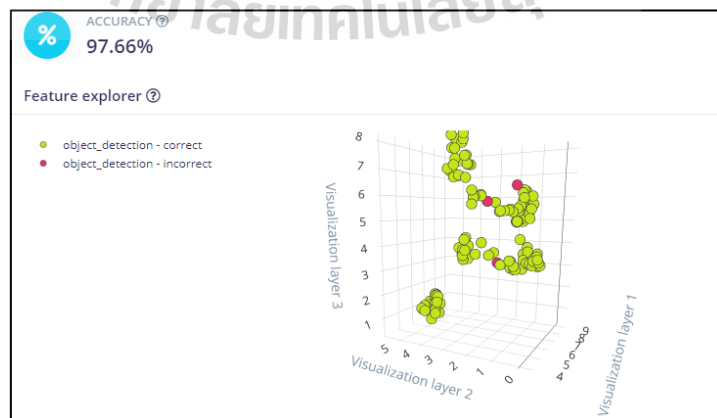
รูปที่ 3.36 ผลการฝึกโมเดล

3.8.5 การประเมินโมเดล

สามารถประเมินความถูกต้องของโมเดลได้จากค่าตัวชี้วัด เช่น ค่าความถูกต้องของโมเดล (Accuracy)

3.8.6 การทดสอบโมเดล

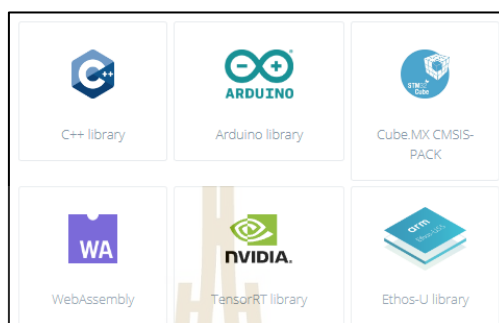
ดำเนินการนำชุดข้อมูลสำหรับทดสอบโมเดล มาทำการทดสอบโมเดล ได้ผลดังรูปที่ 3.37 ค่าความแม่นยำในการทำนายรูปจำนวน 128 รูป มีค่าเท่ากับ 97.66%



รูปที่ 3.37 การทดสอบโมเดล

3.8.7 การนำโมเดลไปใช้งาน

สามารถดำเนินการสร้างเป็น Library ในภาษาที่ต้องการได้ ดังรูปที่ 3.38 เพื่อให้สามารถนำโมเดลไปใช้งานในระบบปฏิบัติการอื่นๆ ได้



รูปที่ 3.38 การสร้าง library

3.9 สรุป

จากวัตถุประสงค์ที่กำหนดขึ้นและการศึกษาข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำให้สามารถออกแบบระบบการทำงานของตัวรถไฟฟ้าขนส่งเอกสารแบบอัตโนมัติได้ ซึ่งตัวรถมีระบบการควบคุมหลักอยู่ 2 ส่วน คือ ระบบควบคุมการขับเคลื่อนบนตัวรถ และระบบควบคุมส่วนกลางโดยผู้ใช้งาน ซึ่งสามารถสื่อสารกับผู้ใช้งานผ่านระบบสื่อสารไร้สายด้วยอินเทอร์เน็ต โดยตัวรถไฟฟ้าสามารถทำงานตามโปรไฟล์ความเร็วที่ออกแบบด้วยระบบควบคุมแบบวงปิด รวมถึงระบบการตรวจจับผู้สัญจรด้วยกล้อง และการตรวจจับตำแหน่งด้วย RFID ดังนั้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ดำเนินการสร้างต้นแบบรถไฟฟ้ารางเดียวสำหรับขนส่งเอกสารระหว่างอาคารและจำลองสถานการณ์ทำงานของระบบควบคุมการขับเคลื่อนของตัวรถ ทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าขนส่งเอกสารแบบอัตโนมัติในสภาวะการทำงานที่เสมือนจริง ดังนี้ ทำการทดสอบอัลกอริทึมการควบคุมการเดินรถ ทดสอบเสถียรภาพของระบบในขณะที่รถไม่มีภาระโหลด และขณะรถมีภาระโหลด และการทดสอบการติดตามความเร็วด้วยการวิ่งตามโปรไฟล์ที่ออกแบบ รวมถึงอัตราการใช้พลังงานที่ความเร็วรอบ 60, 119.5, 179 และ 238 rpm

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 บทนำ

การทดสอบโมเดลรถไฟฟ้าขนส่งเอกสารในวิทยานิพนธ์นี้ แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1. การทดสอบระบบควบคุมการเดินรถไฟฟ้า
2. การทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้า
3. การทดสอบการใช้พลังงาน

4.2 อุปกรณ์และเครื่องมือวัดพื้นฐานที่ใช้ในการทดสอบ

ลักษณะโมเดลต้นแบบของตัวรถไฟฟ้าขนส่งเอกสารในวิทยานิพนธ์นี้ แสดงดังภาพที่ 4.1 สร้างขึ้นเพื่อใช้ทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่และอัลกอริทึมการทำงาน

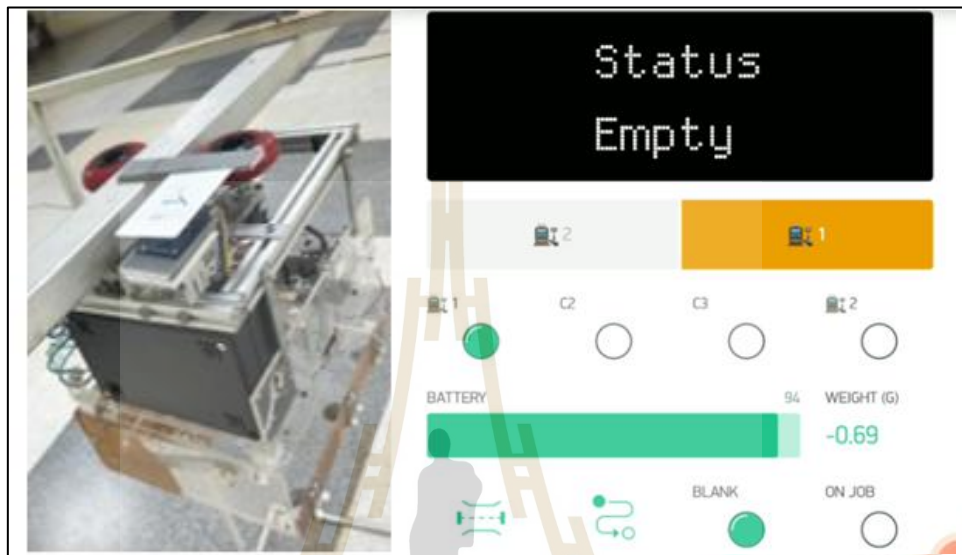
อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบระบบควบคุมรถไฟฟ้าขนส่งเอกสารในวิทยานิพนธ์ประกอบด้วย

1. Multimeters
2. เครื่องมือวัดความเร็วรอบชนิด Rotary Encoder
3. ต้นแบบรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร
4. โทรศัพท์มือถือที่ติดตั้งแอปพลิเคชัน Blynk
5. โมดูลบันทึกข้อมูล Micro SD Card

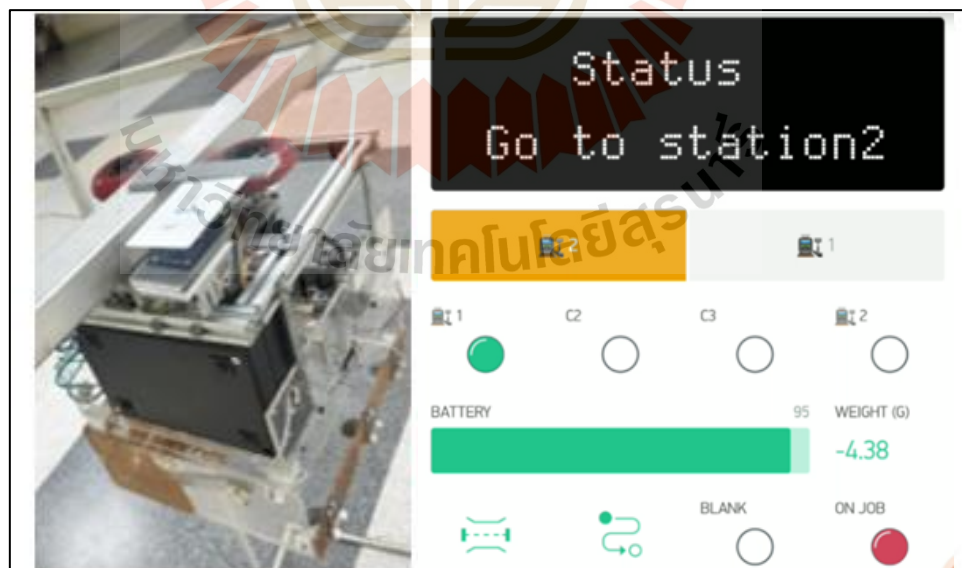
4.3 การทดสอบระบบควบคุมการเดินรถไฟฟ้า

การเดินรถมีโหมดการเคลื่อนที่หลักอยู่ 4 โหมด คือ โหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง โหมดการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ โหมดการเคลื่อนที่ด้วยความหน่วง และโหมดการหยุดเคลื่อนที่ ซึ่งในขณะที่รถเริ่มเคลื่อนที่ ระบบจะถูกควบคุมโหมดการขับเคลื่อนด้วยเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งด้วย RFID Reader ซึ่งจะติดตั้งไว้บนตัวรถ ทำให้เมื่อรถเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งที่ติดตั้งตัว RFID tag จะส่งสัญญาณกลับไปให้ Arduino Mega 2560 เพื่อควบคุมการทำงานให้รถสามารถเคลื่อนที่ไปในตำแหน่ง

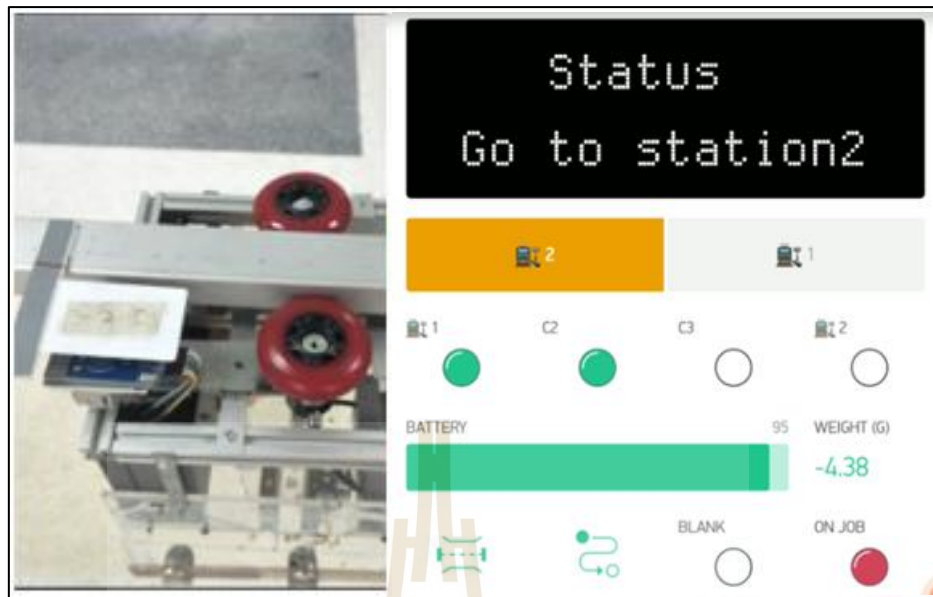
ที่กำหนดได้อย่างถูกต้อง ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าขนส่งเอกสารไปยังสถานีปลายทาง
ทางผู้วิจัยได้ทำการทดลองกับต้นแบบรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร และแสดงตำแหน่งตัวรถเมื่อวิ่งผ่านจุด
สถานีบนหน้าจอดีเทอร์เฟซของผู้ใช้งาน ดังรูปที่ 4.1 (ก) ถึงภาพที่ 4.1 (ฉ)



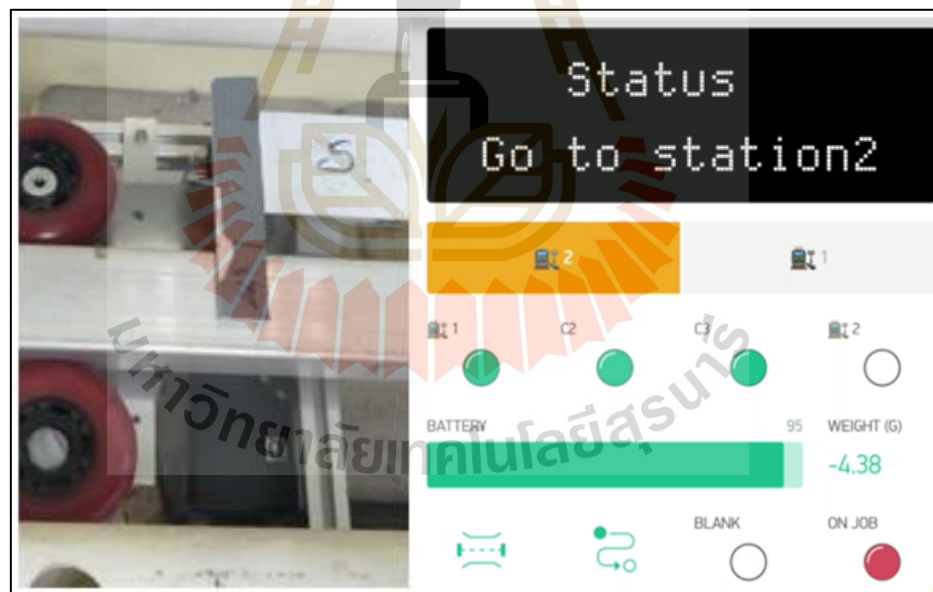
(ก) ตำแหน่งของรถขณะอยู่ที่สถานีที่ 1 สถานะว่าง



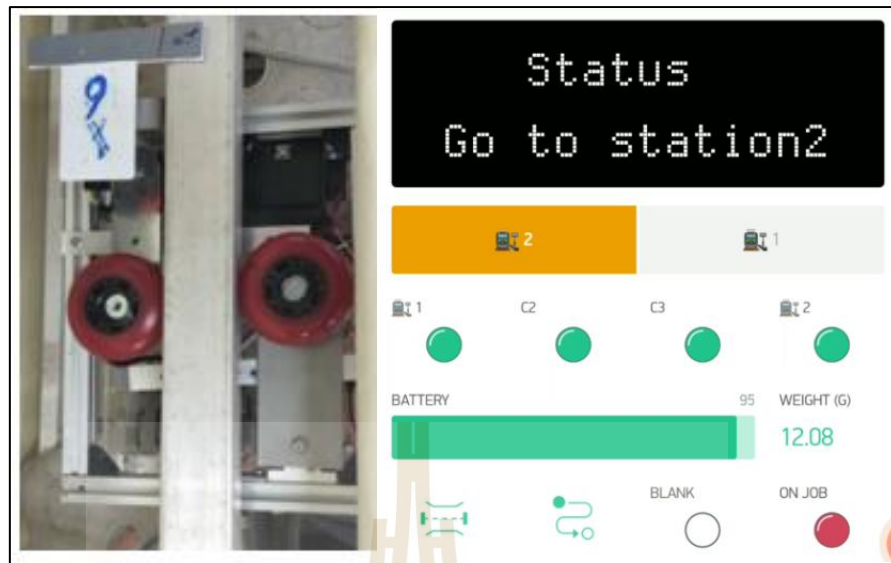
(ข) ตำแหน่งของรถขณะอยู่ที่สถานีที่ 1 สถานะกำลังทำงาน



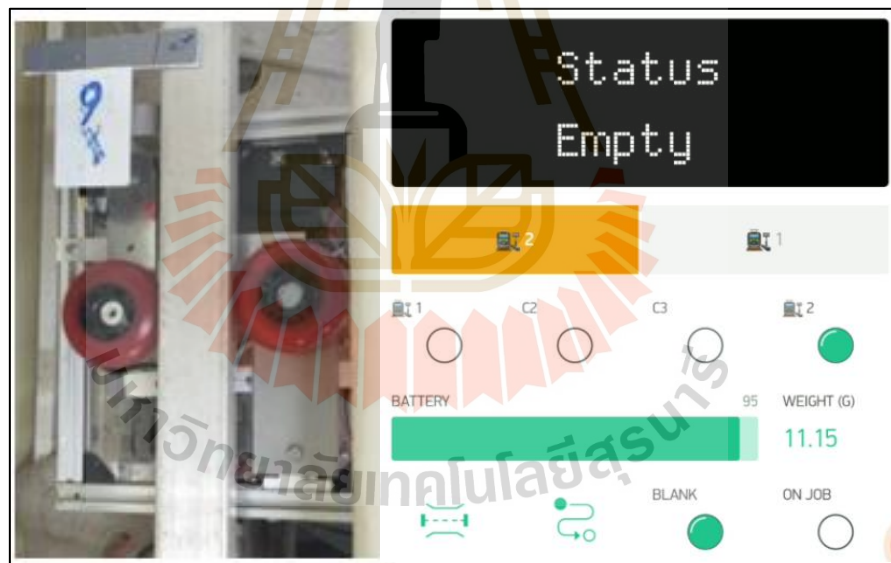
(ค) ตำแหน่งของรถขณะอยู่ที่จุดที่ 2 สถานะกำลังทำงาน



(ง) ตำแหน่งของรถขณะอยู่ที่จุดที่ 5 สถานะกำลังทำงาน



(จ) ตำแหน่งของรถขณะอยู่ที่สถานีที่ 2 สถานะกำลังทำงาน



(ข) ตำแหน่งของรถขณะอยู่ที่สถานีที่ 2 สถานะว่าง

รูปที่ 4.1 ตำแหน่งของรถขณะเคลื่อนที่ผ่านสถานี

จากผลการทดลองรูปที่ 4.1 พบว่ารถสามารถสั่งงานผ่านระบบสื่อสารไร้สายผ่านหน้าจอ อินเทอร์เน็ตบนแอปพลิเคชัน Blynk ที่ติดตั้งบนมือถือของผู้ใช้งาน เมื่อผู้ใช้ทำการเลือกสถานีบน

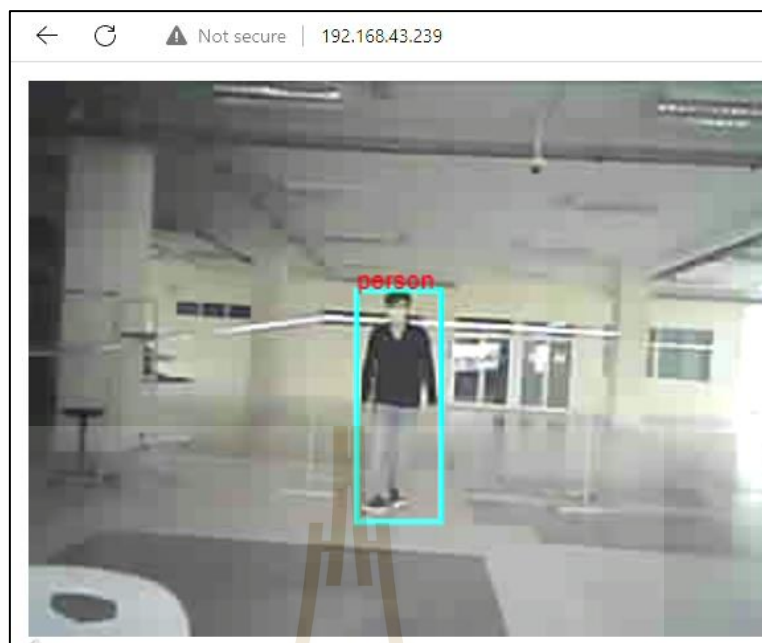
หน้าจออินเทอร์เน็ตเฟส รถจะเริ่มเคลื่อนที่จากสถานีต้นทางสู่สถานีปลายทาง ขณะเริ่มเดินรถ จะมีการแจ้งเตือนด้วยแสงและเสียง ความเร็วการขับเคลื่อนรถจะทำงานตามสัญญาณการตรวจจับตำแหน่ง และตรวจจับผู้สัญจร ในระหว่างการเดินรถจะส่งข้อมูลขึ้น server ของแอปพลิเคชัน Blynk เพื่อแสดงสถานะบนหน้าจออินเทอร์เน็ตเฟสให้ผู้ใช้งานทราบ อย่างไรก็ตามเซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจจับตำแหน่งจะต้องมีการทดสอบระยะเวลาการตรวจจับก่อนจะนำไปติดตั้งใช้งานจริง ผลการทดสอบดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ระยะเวลาอ่านค่าของ RFID

ครั้งที่	ระยะการทดสอบ (cm)	ผลการทดสอบ	
		การอ่านค่าสัญญาณ	การส่งสัญญาณ
1	1	พบ	ส่ง
2	2	พบ	ส่ง
3	3	พบ	ส่ง
4	4	พบ	ส่ง
5	5	ไม่พบ	ไม่ส่ง
6	6	ไม่พบ	ไม่ส่ง

จากตารางที่ 4.1 พบว่าในการตรวจจับตำแหน่งด้วย RFID Reader จะต้องติดตั้งเซนเซอร์ในระยะห่างจาก RFID tag ไม่เกิน 4 cm เนื่องจากเป็นช่วงในการอ่านค่าของเซนเซอร์ RFID

ในขณะที่เดินรถนอกจากการตรวจจับตำแหน่งด้วย RFID แล้ว ยังมีการตรวจจับผู้สัญจรด้วยกล้องโดยใช้โมเดล SSD สำหรับการตรวจจับมนุษย์ที่เดินอยู่ด้านหน้าของตัวรถ เพื่อชะลอความเร็วของรถ ทำให้เกิดความปลอดภัยกับผู้ใช้ทางเดิน ดังนั้นก่อนการติดตั้งใช้งาน ผู้วิจัยต้องดำเนินการทดสอบระยะเวลาการตรวจจับของกล้องดังรูปที่ 4.2 ได้ผลดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ลักษณะการใช้งานตรวจจับมนุษย์

ตารางที่ 4.2 ระยะเวลาตรวจจับของกล้อง

ครั้งที่	ระยะเวลาทดสอบ (m)	ผลการทดสอบ	
		การตรวจจับ	การส่งสัญญาณ
1	1	พบ	ส่ง
2	2	พบ	ส่ง
3	3	พบ	ส่ง
4	4	พบ	ส่ง
5	5	พบ	ส่ง
6	6	พบ	ส่ง
7	7	ไม่พบ	ไม่ส่ง

จากผลการทดสอบตารางที่ 4.2 พบว่ากล้องสามารถตรวจจับผู้สัญจรที่เดินผ่านด้านหน้าได้ มีระยะเวลาตรวจจับมากที่สุดเท่ากับ 6 เมตร ในการทดสอบการส่งสัญญาณผู้วิจัยได้ทดสอบด้วยการส่งค่าเป็นสัญญาณดิจิทัล 0 และ 1 เมื่อตรวจพบผู้สัญจร จะส่งสัญญาณเลข 1 กลับมาที่ Blynk server เพื่อสั่งให้ตัวรถลดความเร็วต่อไป หากไม่พบจะส่งสัญญาณเลข 0 กลับมาที่ระบบ จากนั้น

Blynk server จะดำเนินการส่งสัญญาณต่อไปที่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์บนตัวรถเพื่อสั่งงานระบบขับเคลื่อนให้ลดความเร็ว

4.4 การทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร

การทดสอบระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าขนส่งเอกสารในวิทยานิพนธ์ แบ่งออกได้ดังนี้

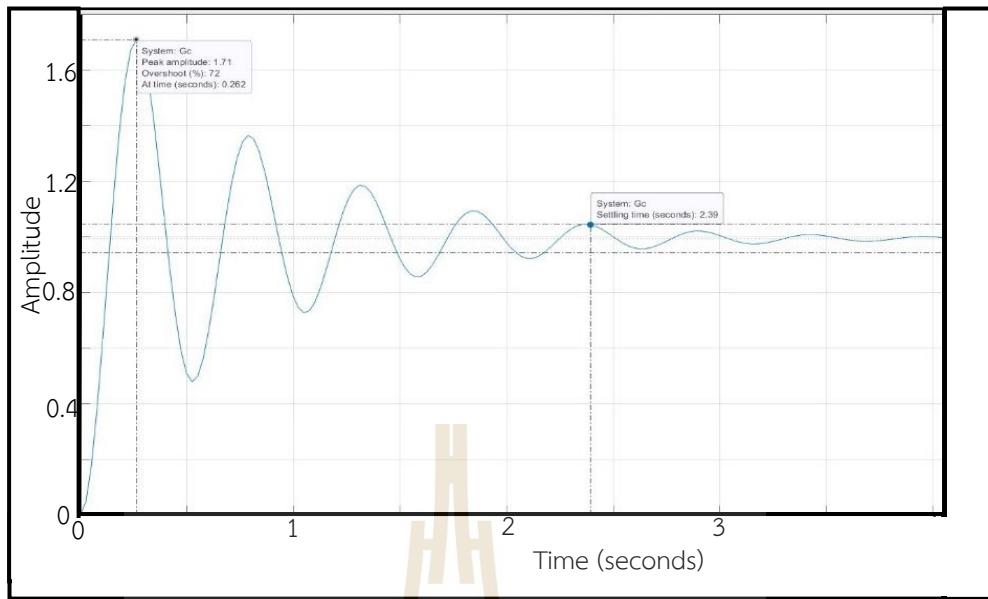
1. การทดสอบการติดตามความเร็วตามโปรไฟล์การออกแบบ
2. การทดสอบเสถียรภาพการเคลื่อน

4.4.1 ผลการทดสอบการระบุเอกลักษณ์ของระบบขับเคลื่อน

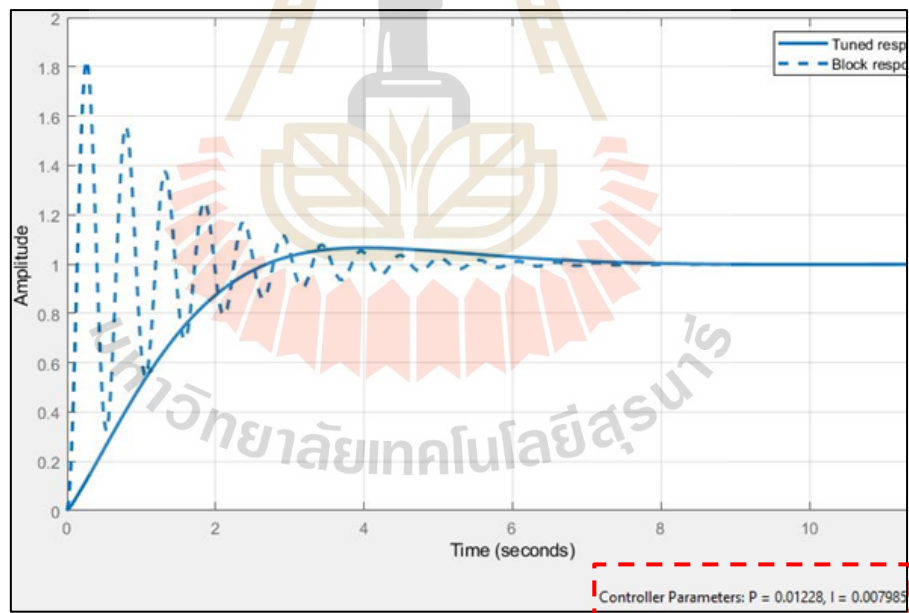
เนื่องจากระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร ใช้โมดูลขับเคลื่อนมอเตอร์รุ่น BTS7960 เป็นตัวควบคุมความเร็วมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ขนาดพิกัดกำลัง 30 W แรงดัน 12 V โดยมีอัลกอริทึมการควบคุมแบบวงปิดด้วยตัวควบคุมพีไอ ในการชดเชยสัญญาณความผิดพลาดค่าความเร็วของระบบ ซึ่งประมวลผลด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด Arduino Mega 2560 ดังนั้นการทดลองการติดตามความเร็วจำเป็นต้องทำการปรับจูนตัวควบคุมของระบบขับเคลื่อนให้ดีขึ้นก่อนนำไปใช้งานจริง เพื่อป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวอุปกรณ์ในระบบ โดยการหาผลตอบสนองของระบบด้วยการใส่ค่าอินพุตช่วงความเร็วที่มีค่าความเร็วเท่ากับ 0.25 m/s ถึง 1 m/s ดังรูปที่ 3.19 ซึ่งเป็นช่วงค่าความเร็วการใช้งาน จากการทดสอบสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังสมการที่ 4.1 โดยมีค่าประมาณความถูกต้องของโมเดลเท่ากับ 86.24% แสดงว่าแบบจำลองมีความคล้ายคลึงกับระบบจริง ผลการตอบสนองของระบบดังรูปที่ 4.3

$$G(s) = \frac{1265}{s^2 + 94.14s + 1383} \quad (4.1)$$

จากรูปที่ 4.3 พบว่าระบบมีค่าการพุ่งเกินของระบบเท่ากับ 72% และค่า setting time เท่ากับ 2.39 sec ที่ 5% error ดังนั้นดำเนินการปรับผลการตอบสนองเพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างราบเรียบมากขึ้นได้ผลการตอบสนองใหม่ดังรูปที่ 4.4 โดยค่าตัวควบคุม PI มีค่า $P = 0.0123$ และ $I = 0.008$ และพบว่าค่าการพุ่งเกิน มีค่าลดลงเหลือ 8%

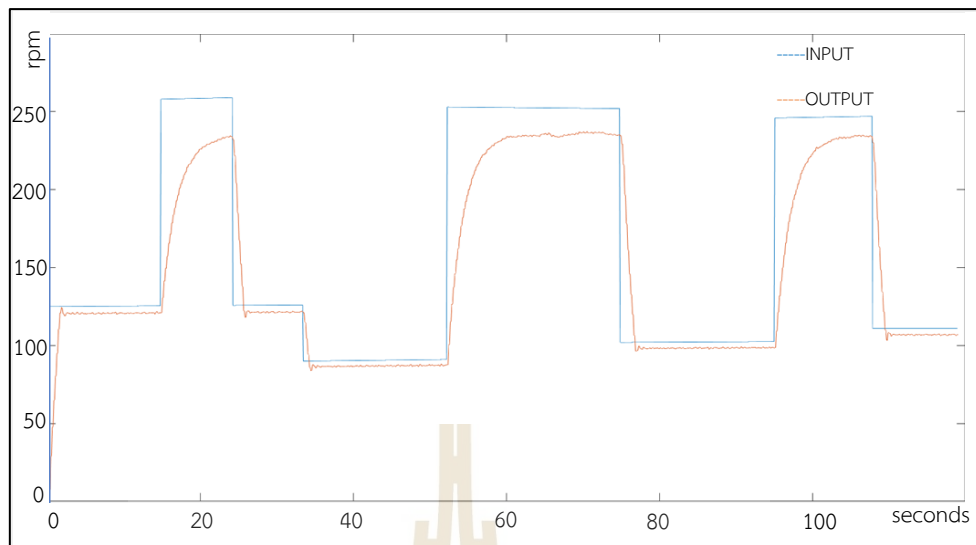


รูปที่ 4.3 ผลการตอบสนองของระบบ



รูปที่ 4.4 การปรับค่าตัวควบคุมพีไอดีด้วย MATLAB

จากค่าตัวควบคุมแบบพีไอดี ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผู้วิจัยได้นำค่าตัวควบคุม มาใช้ในระบบควบคุมจริงของงานวิจัยด้วยโปรแกรม MATLAB ได้ผลการทดสอบดังกราฟรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ผลการติดตามความเร็วของระบบจากการทดสอบด้วย MATLAB

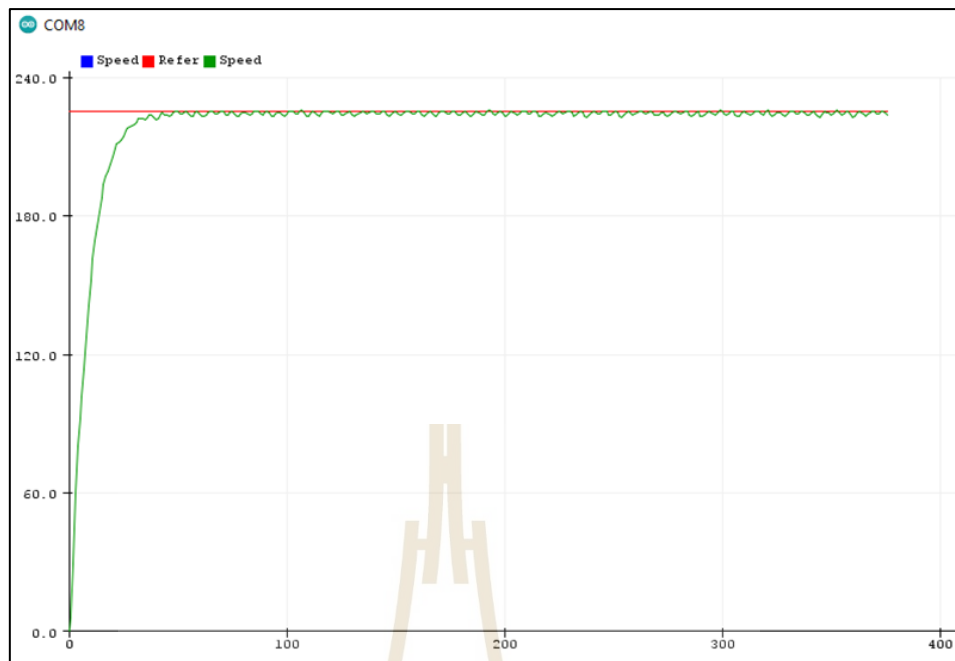
จากรูปที่ 4.5 พบว่าระบบสามารถติดตามความเร็วโพรไฟล์ได้ และเกิดค่า steady state error มีค่าเท่ากับ 5 % โดยจะเกิดในช่วงความเร็วคงที่ และในช่วงความเร็วสูงจะไม่สามารถวิ่งไปถึงจุดสูงสุดได้เนื่องจากผู้วิจัยให้ค่าสูงสุดของระบบเกินค่าความเร็วสูงสุดของมอเตอร์

4.4.2 ผลการทดสอบการปรับปรุงผลการตอบสนองของระบบขับเคลื่อนด้วยฟีด

ในการออกแบบตัวควบคุมพีไอของระบบขับเคลื่อน จะใช้วิธีการ Trial and error ด้วยการเริ่มปรับค่าอัตราการขยายพีไอ จากค่าเริ่มต้นที่ได้จากการทดสอบการระบุเอกลักษณ์ และค่อยๆ เพิ่มขึ้นโดยการดูผลการตอบสนอง อัลกอริทึมการควบคุมแบบปิดถูกเขียนด้วยภาษาซีบนโปรแกรม Arduino IDE เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบรองรับการใช้งานผ่าน Arduino จากการทำ Trial and error ได้ผลดังนี้

$$K_p = 0.06 \quad K_i = 0.0085$$

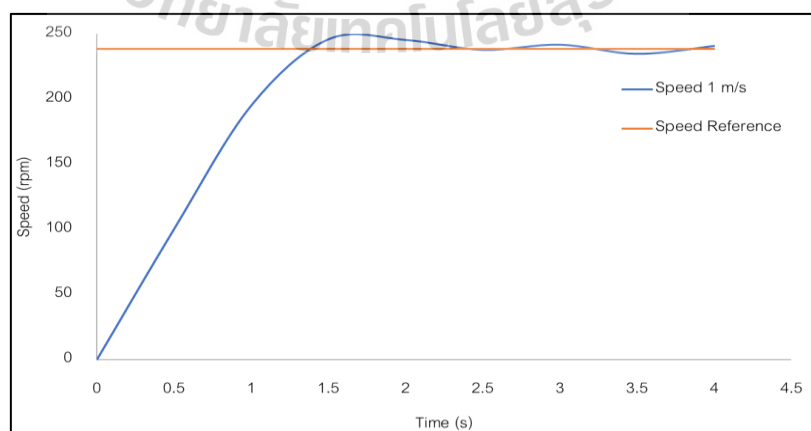
จากค่าตัวควบคุม PI ทำการทดสอบระบบที่ความเร็วรอบ 220 rpm ซึ่งเป็นค่าความเร็วในช่วงการใช้งาน ได้ผลการตอบสนองของระบบดังรูปที่ 4.6 ซึ่งพบว่าระบบไม่เกิดการฟุ้งเกินและการตอบสนองในช่วงขาขึ้นใช้เวลาลู่เข้าค่าความเร็วรอบที่ต้องการที่ 2 s โดยผู้วิจัยสามารถยอมรับค่าการฟุ้งเกินได้สูงสุดไม่เกิน 10%



รูปที่ 4.6 ผลการตอบสนองระบบปิดด้วยความเร็วรอบ 220 rpm

4.4.3 การทดสอบการติดตามความเร็วตามโปรไฟล์

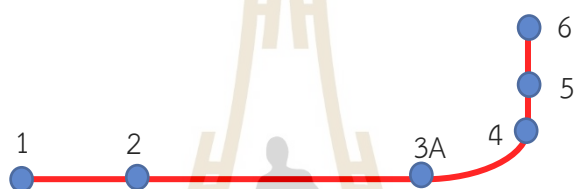
จากค่าของตัวควบคุมแบบพีไอ ผู้วิจัยได้นำค่าตัวควบคุมมาปรับใช้ในระบบควบคุมจริงของงานวิจัยที่ใช้อัลกอริทึมการควบคุมแบบพีไอ ด้วยการเขียนโค้ดภาษาซี จากนั้นทำการทดสอบการติดตามความเร็วการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุด 1 m/s บนทางราบระยะทาง 3 m ได้ผลการทดสอบดังกราฟรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 การติดตามโปรไฟล์ความเร็วที่ 238 rpm

จากผลการทดลองกราฟรูปที่ 4.7 พบว่า รถสามารถเคลื่อนที่ติดตามความเร็วสูงสุดบนราง ตรงที่ความเร็วเท่ากับ 1 m/s ได้โดยระบบมีผลการตอบสนองดังนี้ เกิดค่าการพุ่งเกินของระบบเท่ากับ 4% และค่า Setting time เท่ากับ 2.25 s

การทดสอบการติดตามความเร็วโปรไฟล์ โดยทำการทดสอบสองกรณีคือ กรณีวิ่งจากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2 และกรณีที่วิ่งจากสถานีที่ 2 กลับไปที่สถานีที่ 1 ซึ่งจะเหมือนการใช้งานจริง และทดลองในกรณีไม่มีโหลด และมีโหลดจากการบรรทุก ก่อนการทดสอบจะดำเนินการติด RFID tag บนราง ซึ่งผู้วิจัยจะอธิบายลักษณะของรางเมื่อมองจากด้านบนจะเห็นการโค้งของราง ดังรูปที่ 4.8 และเมื่อมองจากด้านข้างจะเห็นความสูงของราง ดังรูปที่ 4.9

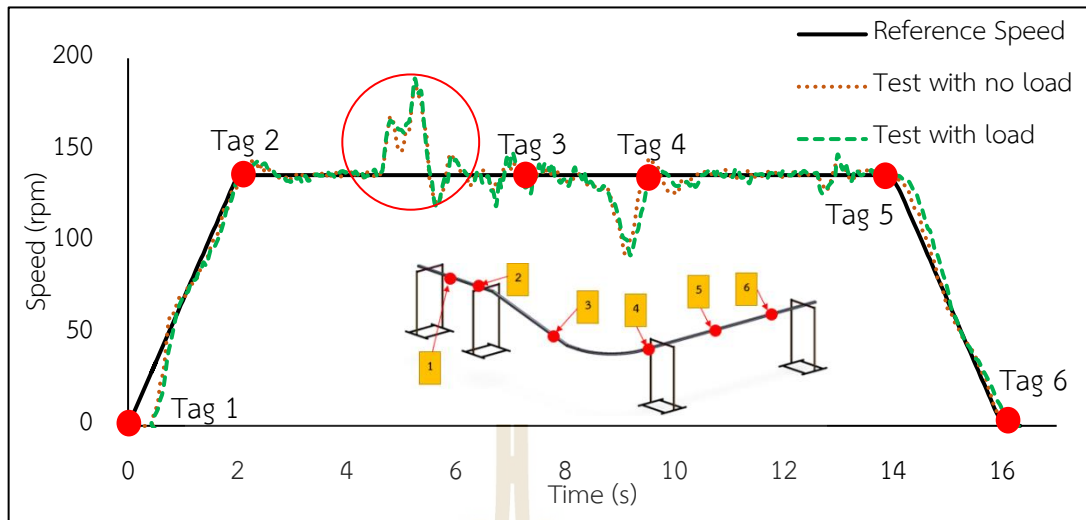


รูปที่ 4.8 มุมมองด้านบนของราง



รูปที่ 4.9 มุมมองด้านหน้าของราง

จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 จะแสดงค่าตำแหน่งด้วยหมายเลข RFID tag เลข 1 ถึงเลข 6 โดยสถานีที่ 1 คือ หมายเลข 1 และสถานีที่ 2 คือ หมายเลข 6 ในรูปที่ 4.9 จะแสดงค่าระยะทางไว้ด้านบนของเส้นกราฟด้วย ดังนั้นในการทดลองการติดตามความเร็วโปรไฟล์โดยการติดตั้ง RFID tag หมายเลข 3A ที่ตำแหน่งก่อนเข้าทางโค้งดังรูปที่ 4.8 และ 4.9 ทำการทดสอบสามซ้ำด้วยโปรไฟล์ความเร็วแบบสี่เหลี่ยมคางหมู ความเร็วสูงสุด 0.5 m/s หรือ 120 rpm ได้ผลดังรูปที่ 4.10



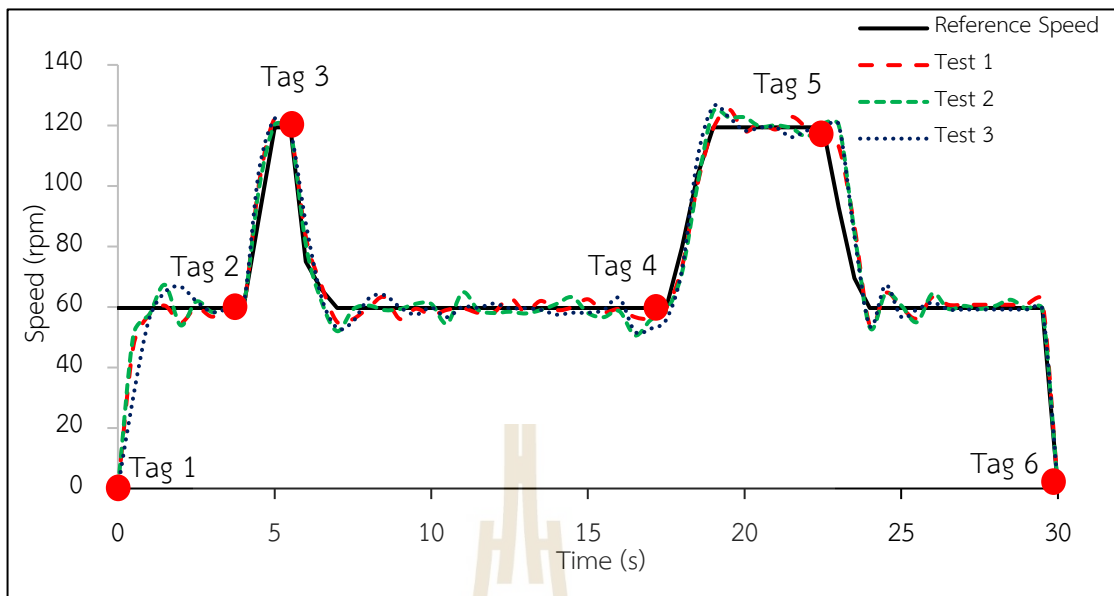
รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบความเร็วโปรไฟล์สี่เหลี่ยมคางหมู



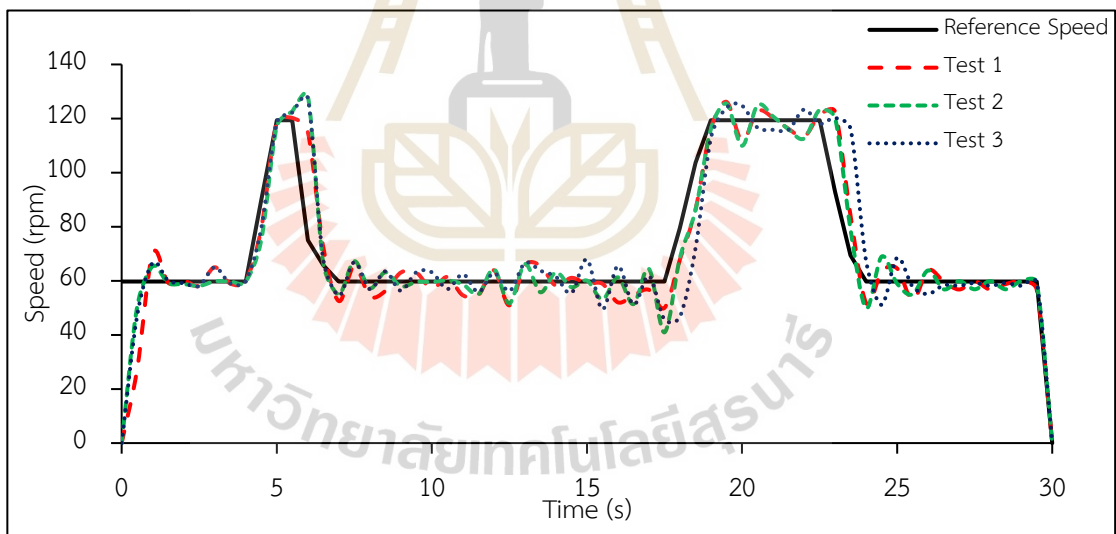
รูปที่ 4.11 ตำแหน่งการติดตั้ง RFID หมายเลข 3

จากรูปที่ 4.10 พบว่าระบบมีค่าพุ่งเกินเกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 20% ในจังหวะรถลงทางชัน เมื่อเทียบกับกราฟความสูงของรางดังรูปที่ 4.9 ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการออกแบบโปรไฟล์ความเร็วใหม่โดยการนำ RFID หมายเลข 3A ติดที่ตำแหน่ง 3B ดังรูปที่ 4.11 เพื่อให้รถลดความเร็วก่อนที่จะลงทางชัน ได้ผลการทดสอบสามซ้ำดังรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่อลดความเร็วก่อนลงทางชันทำให้ระบบมีผลการตอบสนองที่ดีขึ้นคือ เกิดการพุ่งเกินลดลงเหลือ 8% เมื่อเทียบกับกราฟรูปที่ 4.10

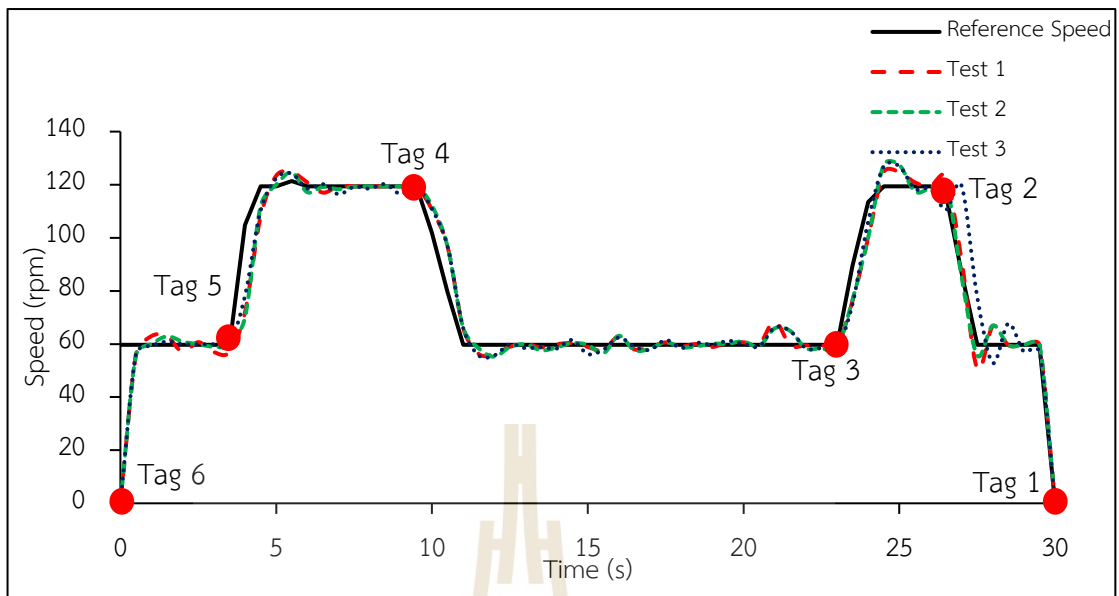
เมื่อทราบตำแหน่งการติดตั้ง RFID ที่เหมาะสมทำให้ระบบมีการเคลื่อนที่ราบเรียบขึ้น ผู้วิจัยจึงดำเนินการทดลองการติดตามความเร็วโปรไฟล์โดยความเร็วสูงสุดเท่ากับ 0.5 m/s และต่ำสุดเท่ากับ 0.25 m/s ทดสอบวิ่งทั้งสองกรณี มีโหลดและไม่มีโหลดจากการบรรทุกได้ผลดังรูปที่ 4.12, 4.13, 4.14 และ 4.15



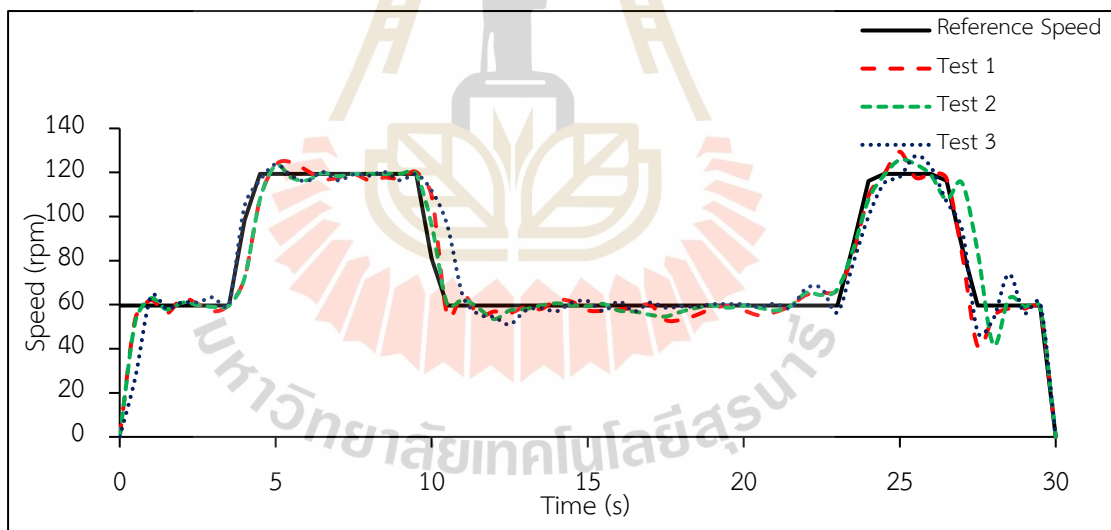
รูปที่ 4.12 การติดตามโปรไฟล์ความเร็วจากสถานี 1 ไป 2 กรณีไม่มีโหลดบรรทุก



รูปที่ 4.13 การติดตามโปรไฟล์ความเร็วจากสถานี 1 ไป 2 กรณีมีโหลดบรรทุก 2.5 kg



รูปที่ 4.14 การติดตามโปรไฟล์ความเร็วจากสถานี 2 ไป 1 กรณีไม่มีโหลดบรรทุก



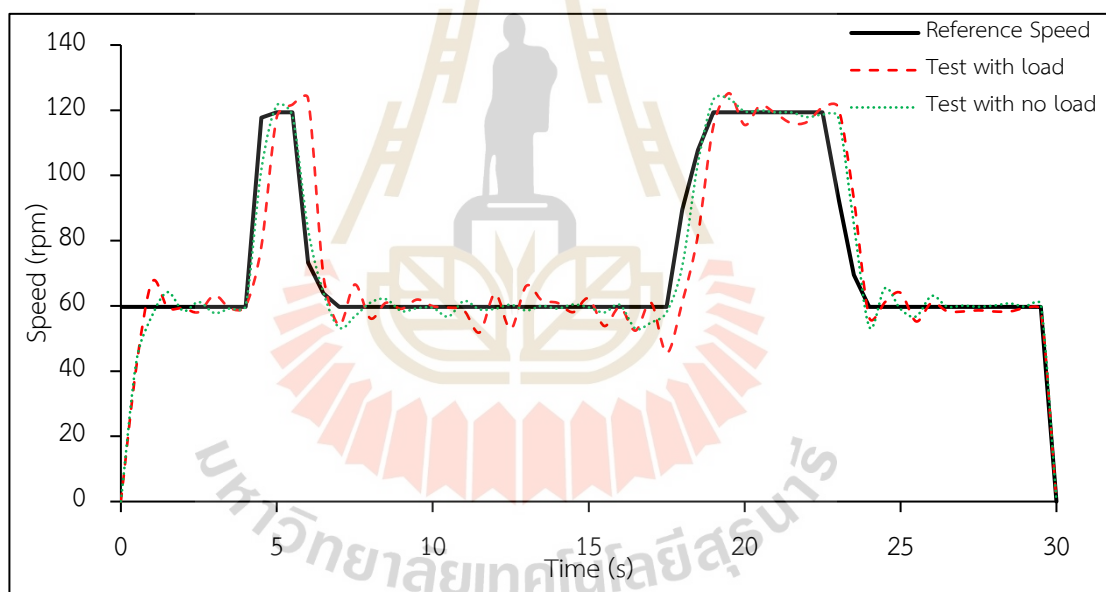
รูปที่ 4.15 การติดตามโปรไฟล์ความเร็วจากสถานี 2 ไป 1 กรณีมีโหลดบรรทุก 2.5 kg

เนื่องจากการเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1 m/s ในระยะทาง 8.3 m ความถี่การเก็บข้อมูล 0.5 วินาทีต่อข้อมูล ทำให้ผลการทดลองที่ได้มาเห็นพฤติกรรมการควบคุมไม่ชัดเจน ดังนั้นผู้วิจัยได้ดำเนินการทดลองด้วยความเร็วสูงสุด 0.5 m/s และความเร็วต่ำสุด 0.25 m/s ขณะเข้าโค้งและขึ้นลง

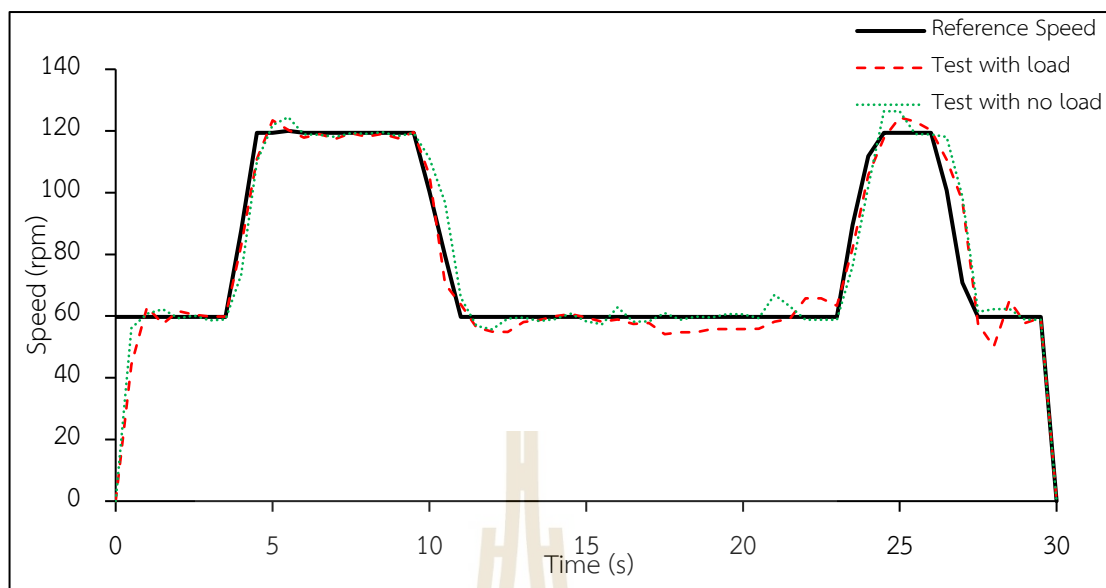
ทางชัน จากผลการทดสอบการติดตามความเร็วที่ 0.5 m/s พบว่ารถสามารถขับเคลื่อนตามโปรไฟล์ความเร็วของระบบได้ ทั้งกรณีมีโหลด และไม่มีโหลดจากการบรรทุก

4.4.4 การทดสอบเสถียรภาพการเคลื่อน

จากขอบเขตงานวิจัยที่กำหนดขึ้น เพื่อให้รถไฟฟ้าขนส่งเอกสารสามารถวิ่งตามความเร็วโปรไฟล์ สองกรณีคือ กรณีรถมีภาระโหลดจากน้ำหนักบรรทุก และกรณีไม่มีโหลด โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดน้ำหนักการบรรทุกสูงสุดมีค่าเท่ากับ 2.5 kg หรือกระดาษ A4 จำนวน 1 รีม ดังนั้นจึงทำการทดลองเสถียรภาพของระบบในการรักษาความเร็วที่ 0.5 m/s ขณะไม่มีภาระโหลด และมีภาระโหลด ผลการทดสอบดังกราฟรูปที่ 4.16 และ 4.17 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบจากกราฟรูปที่ 4.12, 4.13, 4.14 และ 4.15



รูปที่ 4.16 การทดสอบเสถียรภาพระบบควบคุมการเคลื่อนที่จากสถานี 1 ไป 2

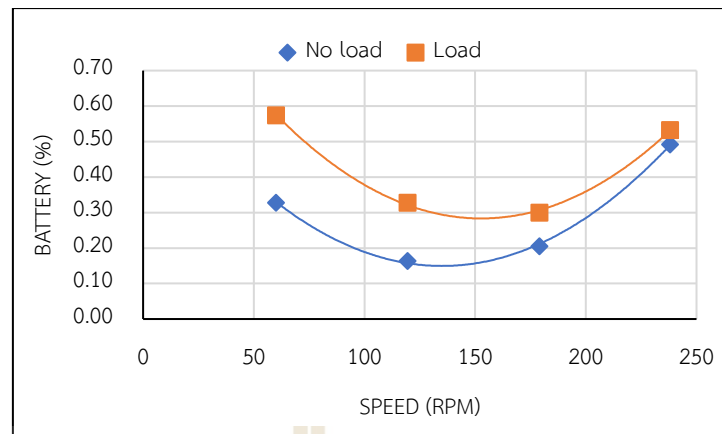


รูปที่ 4.17 การทดสอบเสถียรภาพระบบควบคุมการเคลื่อนที่จากสถานี 2 ไป 1

จากผลการทดลองรูปที่ 4.16 และ 4.17 พบว่า ในรอบการบรรทุกเอกสารระบบมีการแกว่งของค่าความเร็วขณะรวิงลงทางชันมากกว่ากรณีไม่มีโหลด ในจังหวะที่รถเคลื่อนด้วยโปรไฟล์แบบ Ramp คือ การเร่งและการหน่วงจะเกิด steady state error มีค่า 5% และขณะรวิงขึ้นทางชันพบว่าระบบมีผลตอบสนองจากโหลดอย่างชัดเจนคือ เส้นกราฟของระบบในช่วงดังกล่าวมีความเร็วลดลงชั่วขณะจึงกลับเข้าสู่สภาวะคงที่ จากกราฟรูปที่ 4.16 และ 4.17 การเคลื่อนที่ตามโปรไฟล์ความเร็วระบบทั้งสองกรณีมีแนวโน้มที่สามารถขับเคลื่อนตามโปรไฟล์ที่ผู้วิจัยออกแบบไว้ได้

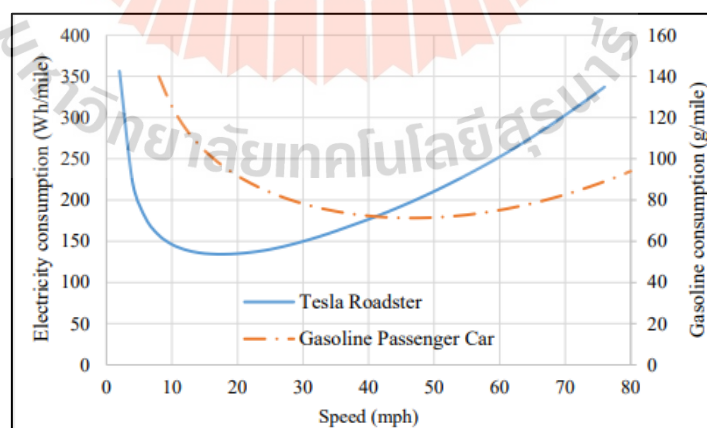
4.5 การทดสอบการใช้พลังงานของรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร

ในการทำงานของรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร จะใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ชนิด Li-Poly ซึ่งเป็นแบตเตอรี่ที่มีน้ำหนักเบา ขนาด 12 V ความจุแบตเตอรี่ 3 Ah ดังนั้นในการทดสอบจะดำเนินโดยการบันทึกการทำงานและปริมาณแบตเตอรี่ ขณะที่รถไม่มีภาระโหลด และรถบรรทุกโหลดสูงสุด ทดสอบจำนวน 10 รอบ ในระยะทาง 8.3 m ที่ 4 ความเร็วรอบ ดังนี้ 238, 179, 119.5 และ 60 rpm อัตราการใช้พลังงานวัดจากโมดูลวัดแรงดันของระบบที่ติดตั้งสำหรับอ่านค่าเปอร์เซ็นต์แบตเตอรี่ได้ผลดังรูปที่ 4.18 แบตเตอรี่มีแรงดันสูงสุดเมื่อชาร์จเต็ม เท่ากับ 12.30 V และแรงดันต่ำสุด 9.86 V



รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การใช้พลังงาน และความเร็ว

จากรูปที่ 4.18 พบว่า ค่าการใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ด้วยการบรรทุกโหลด ที่ค่าความเร็วรอบเดียวกันจะมีเปอร์เซ็นต์การใช้พลังงานแบตเตอรี่มากกว่ากรณีไม่มีโหลด และอัตราการใช้พลังงานของความเร็วรอบ 238, 179, 119.5 และ 60 rpm มีค่าเท่ากับ 0.49, 0.20, 0.16 และ 0.33% ตามลำดับ ดังนั้น ในการเคลื่อนที่รถไฟฟ้าสำหรับงานวิจัย หากต้องการลดการใช้พลังงานควรเลือกความเร็วการขับที่ 0.5 m/s หรือ 0.75 m/s ซึ่งเป็นค่าความเร็วที่ใช้พลังงานน้อย โดยแนวโน้มการใช้พลังงานของการทดลองเป็นไปตามผลการทดสอบการใช้พลังงานของรถไฟฟ้า Tesla และรถใช้น้ำมัน ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 Vehicle energy economy at different speeds (Sobrinho et al., 2016)

จากรูปที่ 4.19 พบว่าแนวโน้มของเส้นกราฟเป็นไปตามหลักการใช้พลังงานของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงดังสมการที่ 4.2

$$E = Pt = IVt \quad (4.2)$$

กำหนดให้

E คือ ค่าพลังงาน (Wh)

จากสมการที่ 4.2 สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อมอเตอร์กระแสตรงทำงานจะสามารถคำนวณค่ากำลังได้จากค่ากระแสคูณกับค่าแรงดันไฟฟ้า ซึ่งเมื่อมอเตอร์มีความเร็วเพิ่มขึ้นค่าแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นและเมื่อค่าความเร็วเพิ่มขึ้นค่าแรงบิดจะน้อยลงทำให้มอเตอร์ต้องใช้กระแสเพิ่มมากขึ้นในการรักษาค่ากำลัง ดังนั้นใช้งานจริงจะมีค่าเวลามาเกี่ยวข้องกับเมื่อใช้เป็นระบบขับเคลื่อนในตัวรถในระยะทางเท่ากันเมื่อรถมีความเร็วมากขึ้นทำให้ใช้ระยะเวลาในการทำงานน้อยลง แต่จะใช้พลังงานมากขึ้น และเมื่อรถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำทำให้ใช้ระยะเวลาในการเคลื่อนที่ถึงปลายทางมากขึ้นเช่นกัน ดังนั้นตัวกราฟการใช้พลังงานจึงเป็นดังรูปที่ 4.19

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

สำหรับการสร้างรถไฟฟ้ารางเดี่ยวอัตโนมัติสำหรับขนส่งเอกสารระหว่างอาคาร พบว่าระบบสามารถสั่งการด้วยระบบไร้สายผ่านแอปพลิเคชัน Blynk โดยหน้าจออินเทอร์เน็ตเฟสของระบบจะแจ้งสถานะการทำงานของตัวรถ ดังนี้ 1.แจ้งสถานะการทำงาน 2.แจ้งตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ 3.แจ้งปริมาณแบตเตอรี่ และ 4.แจ้งปริมาณน้ำหนัก นอกจากนี้ยังสามารถเก็บข้อมูลที่ต้องการเพิ่มเติมส่งไปเก็บไว้ใน server ของแอปพลิเคชันได้

สำหรับการเคลื่อนที่รถสามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1 m/s ในทางระนาบ และ 0.5 m/s ตามโปรไฟล์การเคลื่อนที่ที่ออกแบบไว้ หลักการควบคุมมอเตอร์ซึ่งเป็นอุปกรณ์หลักในการขับเคลื่อนตัวรถ จะใช้ระบบควบคุมแบบปิดด้วยตัวควบคุมแบบพีไอ หลักการออกแบบตัวควบคุม ดำเนินการด้วยวิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ พบว่าค่าความแม่นยำของแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 86.24 % ค่าอัตราการขยายของตัวควบคุมพีไอของระบบมีค่าเท่ากับ 0.0123 และ 0.008 ตามลำดับ ดำเนินการนำค่าอัตราการขยายของตัวควบคุมพีไอที่ได้ เพื่อใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการปรับปรุงผลตอบสนองของระบบสำหรับอัลกอริทึมการควบคุมแบบพีไอ บนโปรแกรม Arduino IDE จากนั้นออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการ Trial and error ทำให้ได้ค่าอัตราการขยายของตัวควบคุมพีไอเท่ากับ 0.06 และ 0.0085 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าระบบสามารถวิ่งด้วยความเร็วเต็มทั้งขณะมีโหลด และไม่มีโหลดจากการบรรทุก ดังนั้น สรุปได้ว่าตัวควบคุมทำให้ระบบมีเสถียรภาพ

การเดินรถจะอยู่ภายใต้โปรไฟล์ความเร็วของผู้ออกแบบ พบว่ารถสามารถเคลื่อนที่ด้วยโหมดการทำงาน 4 โหมด ดังนี้ การเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง การเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ การเคลื่อนที่ด้วยความหน่วง และการหยุด สำหรับโหมดการเคลื่อนที่ที่จะทำงานร่วมกับระบบตรวจจับตำแหน่งด้วย RFID มีระยะการตรวจจับ 4 cm รวมถึงมีระบบกล้องสำหรับการตรวจจับผู้สัญจรในการชะลอความเร็วรถ ซึ่งสามารถตรวจจับได้ในระยะ 6 m ซึ่งสามารถทำงานร่วมกับระบบขับเคลื่อนได้ด้วยการสื่อสารไร้สายผ่าน server Blynk

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ระบบการทำงานของรถประกอบด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จำนวน 2 บอร์ดคือ Arduino Mega 2560 และ ESP32 ซึ่งทำหน้าที่เป็นบอร์ดควบคุมหลัก และบอร์ดสำหรับการสื่อสารด้วยอินเทอร์เน็ต ดังนั้นในปัจจุบันสามารถใช้บอร์ดที่มีทั้งสองระบบอยู่ด้วยกัน จะสามารถลดปัญหาการส่งข้อมูลด้วยสายระหว่างบอร์ดที่อาจทำให้ข้อมูลคลาดเคลื่อนได้ รวมถึงสามารถลดพื้นที่ในการติดตั้ง

2. การต่อวงจรของอุปกรณ์ในระบบ จำเป็นต้องบัดกรีสายไฟให้เชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์และไมโครคอนโทรลเลอร์ เนื่องจากทำให้การอ่านสัญญาณหรือการสื่อสารไม่มีข้อผิดพลาด ดังนั้นหากระบบมีขนาดใหญ่จำเป็นต้องดำเนินการออกแบบวงจรสำเร็จรูป PCB เพื่อลดเวลาในการติดตั้งอุปกรณ์

3. ระบบควรมีการติดตั้ง CPU ขนาดเล็กจำนวนหนึ่งตัวเพื่อให้สามารถใช้ระบบรีโมตระยะไกลในการปรับแก้ไขอัลกอริทึมของตัวรถ

4. ระบบความปลอดภัยของการใช้งาน App สามารถดำเนินการสร้างระบบลงทะเบียนเพื่อใช้งานระบบ

รายการอ้างอิง

- กองพัน อารีรักษ์ (2555). แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบรถไฟฟ้า.โครงการวิจัยสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์ และธนัดชัย กุลวรรณพงษ์ (2557). การหาลักษณะสมบัติความเร็วรถไฟฟ้าที่เหมาะสมที่สุดของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนโดยใช้วิธีดิฟเฟอเรนเชียลอีโวลูชัน. *Research and Development Journal*, 25(4): 59-69.
- บันริ เข้มกลัดมุกต์ (2562). การออกแบบและสร้างระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ.ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- พนนทร์ สุขสิงห์ (2555). การออกแบบและสร้างระบบควบคุมรถไฟฟ้าแบบไร้คนขับขนาดเล็ก.ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- Adriansyah, A., et al. (2016). Design of Pet Feeder Using Web Server as Internet of Things Application. *International Conference on Electrical Engineering and Informatics*.
- Allam, T., et al. (2016). Design of PID Controller for DC Motor Speed Control using Arduino Microcontroller.
- Bing, G., et al. (2009). Speed adjustment braking of automatic train operation system based on fuzzy-PID switching control. 2009 Sixth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, IEEE
- Çetinarslan, C. S., et al. (2010). Determining the influence of surface roughness on materials flow of various materials using grid lines during cold forming. *62(1)*: 4-11.
- Chandan, G., et al. (2018). Real time object detection and tracking using Deep Learning and OpenCV. 2018 International Conference on inventive research in computing applications (ICIRCA), IEEE.
- Ding, Y., et al. (2020). Smart logistics based on the internet of things technology: an overview. 1-23.

- Faieghi, M.R. & Azimi, S.M., 2010. Design an optimized PID controller for brushless DC motor by using PSO and based on NARMAX identified model with ANFIS. In UKSim2010 - UKSim 12th International Conference on Computer Modelling and Simulation. pp. 16–21.
- Gowthaman, E., et al. 2017. Speed control of permanent magnet brushless DC motor using hybrid fuzzy proportional plus integral plus derivative controller. 117: 1101-1108.
- Hat, M., et al. 2015. "Model based design of PID controller for BLDC motor with implementation of embedded Arduino mega controller."
- Liu, G. F. and H. W. Li (2016). Design of stepper motor position control system based on DSP. 2017 2nd International Conference on Machinery, Electronics and Control Simulation (MECS 2017), Atlantis Press.
- Lippert, D. and P. Spektor (2013). Rolling resistance and industrial wheels. (11).
- Rushabhkumar&Chetan., 2020. Speed control of Permanent Magnet Brushless DC motor with Parameter optimization. IRJET International Research Journal of Engineering and Technology.
- Sangngern, S. J. E. T. A. R. P. o. M. U. o. T. (2019). Application of LabVIEW program for calibration of optical measuring instruments. 22(2): 121-129.
- Satpute, S., et al. (2020). Real Time Object Detection using Deep-Learning and OpenCV. 7(4): 3243-3246.
- Sung, G.-M., et al. (2019). Internet-of-Things based controller of a three-phase induction motor using a variable-frequency driver. 2019 IEEE Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE), IEEE.
- Shamseldin, M. A. and A. A. EL-Samahy (2014). Speed control of BLDC motor by using PID control and self-tuning fuzzy PID controller. 15th International Workshop on Research and Education in Mechatronics (REM), IEEE.
- Shanahan, J. G. and L. Dai (2020). Introduction to computer vision and real time deep learning-based object detection. Proceedings of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining.

- T.V.Mahendiran, K.T., 2013. A New Improved Algorithm for Speed Control Of Brushless DC Motor. IEEE International Conference on current Trends in Engineering and Technology, ICCTET'13
- Vinnakota,B.P.,Motor Control with Arduino.,2012:A Case Study in Data-Driven Modeling and Control Design.,(lc),pp.1-9.
- Wang, Y., et al. (2008). A novel automatic train operation algorithm based on iterative learning control theory. 2008 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics, IEEE.
- Zhang, L., et al. (2017). Research on stepper motor motion control based on MCU. 2017 Chinese Automation Congress (CAC), IEEE.





ภาคผนวก ก.

บทความวิชาการที่เผยแพร่ระหว่างการศึกษา

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่และได้รับการตอบรับการตีพิมพ์ในระหว่างการศึกษา

นนทพัทธ์ สุทธิมิลและกิริติ สุลักษณ์. (2565). การพัฒนารถไฟฟ้ารางเดี่ยวอัตโนมัติสำหรับขนส่งเอกสารระหว่างอาคาร. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36. ประจวบคีรีขันธ์: โรงแรมฮอติเคย์อินน์ วานา นาวา หัวหิน. ระหว่างวันที่ 19-22 กรกฎาคม พ.ศ. 2565.



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36
วันที่ 19-22 กรกฎาคม พ.ศ. 2565 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

DRC-0003



การพัฒนารถไฟฟ้ารางเดี่ยวอัตโนมัติสำหรับขนส่งเอกสารระหว่างอาคาร Development of Automated Monorail for Documents Transportation Between Buildings

นนทพัทธ์ สุทธิมงคล และ กิรติ สุลักษณะ

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111, ถนน มหาวิทยาลัย ตำบล สุรนารี อำเภอ เมืองนครราชสีมา นครราชสีมา 30000
ติดต่อ: nonsuttimong@gmail.com, keerat@gsut.ac.th

บทคัดย่อ

การขนส่งเอกสารระหว่างอาคารมักใช้รถยนต์ขนส่งทำให้สิ้นเปลืองพลังงานและเกิดมลพิษ หากมีเอกสารเร่งด่วนที่อยู่นอกขอบการขนส่งปกติต้องใช้เจ้าหน้าที่ของแต่ละหน่วยงานดำเนินการส่งเองทำให้เกิดการผลงงาน งานวิจัยนี้จึงสนใจพัฒนาค้นแบบระบบรถรางขนส่งเอกสารระหว่างอาคาร รถใช้กำลังมอเตอร์ในการขับเคลื่อนและควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมพีโอแบบวงปิดไปรหัสความเร็วการเคลื่อนที่ของรถถูกใช้ออกแบบสัญญาณอินพุตของระบบในการควบคุมช่วงความเร็ว การควบคุมประมวลผลผ่านหน้าจอเพื่อสั่งการและแสดงสถานะการทำงานเป็นระบบแบบไร้สายที่ทำงานร่วมกันระหว่าง Arduino Mega 2560 กับ Blynk Cloud Platform ที่มีบอร์ด ESP8266 ในการเชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เน็ตและรับ-ส่งข้อมูล แสดงค่าน้ำหนัก เปอร์เซ็นต์แบตเตอรี่ ตำแหน่งตัวรถ และจำนวนรอบ ใช้เซนเซอร์ในการตรวจวัดค่า ได้แก่ น้ำหนัก แรงดันไฟฟ้า ใช้ RFID ตรวจจับตำแหน่งของตัวรถ และจัดการข้อมูลด้วยระบบ Cloud และ SD card ผลการทดลองพบว่ารถสามารถสั่งการผ่านระบบไร้สายได้ ทำงานตามโปรไฟล์ความเร็วที่กำหนดด้วยตัวควบคุมแบบพีโอทั้งในกรณีโหลดและไม่มีโหลด

คำหลัก: รถไฟฟ้ารางเดี่ยวอัตโนมัติ, การขนส่งอัตโนมัติ, ระบบสื่อสารไร้สาย

Abstract

Transportation of documents between buildings often uses transport vehicles, resulting in energy consumption and generated pollution, if there are urgent documents that are outside the normal transportation cycle, the staff of each department must use the delivery process themselves, causing a pause main task. This study focused on the development monorail transporting document prototype between buildings. Train apply motor power for motion movement system, and controlled using a closed-loop PI controller, the vehicle travel speed profile is used to design the system input signal to control the speed range. Control processing through the screen to command and display the working status is a wireless system that works together between the Arduino Mega 2560 and the Blynk Cloud Platform that has an ESP8266 board to connect to the Internet and send and receive data, demonstrating values as weight, battery percent, train position and duty cycle. Use sensors to measure values such as weight, voltage, use RFID to detect the position of the train, and manage data with Cloud system and SD card. The results showed that the car can be commanded via wireless system. Operate according to the define speed profile with the PI controller both with and without load.

Keywords: Automated monorail, Automated transport, Wireless communication systems

1 บทนำ

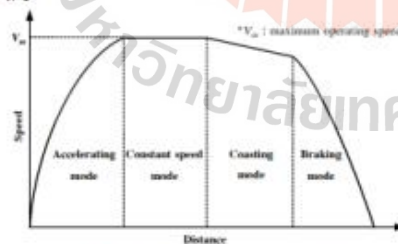
การขนส่งเอกสารระหว่างอาคารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดำเนินการโดยหน่วยงานสารบรรณและนิติการที่มีการขนส่งเอกสาร 2 รอบต่อวัน เวียนไปตามหน่วยงานต่างๆ นอกจากนี้การขนส่งเอกสารระหว่างหน่วยงานที่ต้อง

ดำเนินการเองอาจเกิดขึ้นโดยไม่มีอยู่ในรอบการขนส่งปกติ กรณีที่มีเอกสารเร่งด่วนที่ต้องจัดส่ง ที่ไม่สามารถรอรอบการขนส่งปกติได้ หน่วยงานต้องดำเนินการเอง การขนส่งมีทั้งใช้รถยนต์ รถจักรยานยนต์และการเดิน การใช้รถยนต์ทำให้สิ้นเปลืองน้ำมัน ทำให้ต้องผลงงาน ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดสร้าง

ระบบขนส่งพลังงานไฟฟ้ารางเดียวขับเคลื่อนอัตโนมัติ สามารถส่งเอกสารได้ทันที

ระบบขนส่งเอกสารด้วยรถไฟรางเดียวขับเคลื่อนอัตโนมัติ [1] ที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ซึ่งนิยมใช้ในปัจจุบันเนื่องจากเคลื่อนที่ได้ อย่างราบเรียบรวมถึงมีการตอบสนองแบบไดนามิกส์ที่รวดเร็ว และควบคุมได้ง่าย สามารถทำงานในระบบการควบคุมแบบเปิด (Open loop) และแบบปิด (Close loop) ได้ แต่เนื่องจากการควบคุมแบบวงเปิดมักประสบปัญหาด้านเสถียรภาพจึงนิยมทำการควบคุมแบบวงปิด มีการทำ Feedback ค่าสัญญาณ Output มาเปรียบเทียบกับค่า Input ที่ต้องการ นำค่าความผิดพลาดที่ได้ส่งต่อไปกับตัวควบคุม เช่น PID เพื่อทำหน้าที่ในการส่งสัญญาณควบคุมชุดเซตให้กับระบบ [2] นอกจากนี้ตัวรถมีระบบการสื่อสารแบบไร้สายโดยใช้ IOT ทำงานร่วมกับระบบ Web server Blynk ซึ่งเป็น IOT Cloud Platform ทำหน้าที่ติดต่อสื่อสารเพื่อรับ-ส่งข้อมูลในการทำงานของระบบรวมถึงการตั้งค่าข้อมูลของอุปกรณ์และเซนเซอร์แบบ Real-Time บนหน้าจอ [3,9,10] การเรียกใช้งานผ่านจอมอนิเตอร์หรือมือถือด้วยการสื่อสารผ่านระบบไวไฟทำให้ความสะดวก รวดสามารถขนส่งเอกสารถึงปลายทางได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้รถไฟยังสามารถขับเคลื่อนแบบอัตโนมัติจากการควบคุมด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ชนิด Arduino mega 2560 รวมถึงระบบความปลอดภัยจากการใช้ปัญญาประดิษฐ์ในการตรวจจับและบุชย์ที่เดินผ่านเพื่อลดความเร็วรถลงและแจ้งเตือนด้วยแสงเสียงขณะวิ่งเพื่อให้คนที่อยู่บริเวณนั้นทราบ [4]

ในการเคลื่อนที่ของรถรางในปัจจุบันมีการออกแบบโปรแกรมการเคลื่อนที่ชัดเจนสำหรับระบบการเดินทาง เนื่องจากรถไฟมีเวลารอบในการเดินทางที่แน่นอน โหมดในการขับเคลื่อนรถไฟแบ่งได้ 4 โหมด คือ โหมดการเร่ง โหมดความเร็วคงที่ โหมดการแล่น และโหมดการเบรก [5,8] ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 โหมดการทำงานของรถไฟ

2 การออกแบบระบบ

2.1 ระบุข้อกำหนดของระบบ

ระบบหลักจะออกแบบให้มีระบบบนรถเพื่อเป็นระบบควบคุมสั่งการผ่านแอปพลิเคชันมือถือและการสื่อสารผ่านระบบอินเทอร์เน็ต และโหมดอัตโนมัติในส่วนของระบบขับเคลื่อน ระบบตรวจจับสิ่งกีดขวาง ระบบติดตามตำแหน่ง และระบบจัดส่งข้อมูล

ในขั้นเริ่มต้นได้มีการกำหนดข้อมูลจำเพาะสำหรับต้นแบบรถไฟรางเดียวขับเคลื่อนอัตโนมัติขนาดเล็กตามแสดงในตารางที่ 1 ต้นแบบนี้ใช้ในการพัฒนาและทดสอบอัลกอริทึมต่างๆ สำหรับอัลกอริทึมการขนส่งอัตโนมัติ

ตารางที่ 1 Prototype Specifications

กำหนดสเปคของระบบ	
Dimension	25 x 30 x 25 เซนติเมตร (cm)
Overall Weight	10 กิโลกรัม (kg)
Operating Velocity	0.5 เมตรต่อวินาที (m/s)
Position accuracy	± 0.2 ถึง 1 เมตร (m)
Main power	12 VDC lithium batteries
Code language	C++
Wheel radius	3.5 เซนติเมตร (cm)

ตัวรถประกอบด้วยมอเตอร์กระแสตรงหนึ่งตัวสำหรับระบบขับเคลื่อน ใช้โพลีเซลล์ในการวัดค่าน้ำหนักของเอกสาร ใช้เอนโคเดอร์ในการวัดความเร็วรอบมอเตอร์ และใช้ RFID module ในการตรวจสอบตำแหน่งของตัวรถรวมถึงตำแหน่งที่ตั้งของรถเพื่อเข้าโค้ง ใช้แอปพลิเคชัน Blynk ในการเชื่อมต่อกับตัวรถผ่านระบบคลาวด์ โดยมีทิศทางแลกเปลี่ยนสัญญาณควบคุมตั้งแผนภาพบล็อกแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมการแลกเปลี่ยนสัญญาณ

2.2 การออกแบบฮาร์ดแวร์

เพื่อที่จะนำข้อกำหนดของระบบไปใช้นั้น จะใช้แพลตฟอร์มไมโครคอนโทรลเลอร์สองแพลตฟอร์มคือ บอร์ด ESP8266 และ Arduino Mega 2560 งานหลักของบอร์ดชนิด ESP8266 คือการเชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เน็ตและการถ่ายโอนข้อมูลระหว่างแอปพลิเคชัน Blynk และ ระบบ

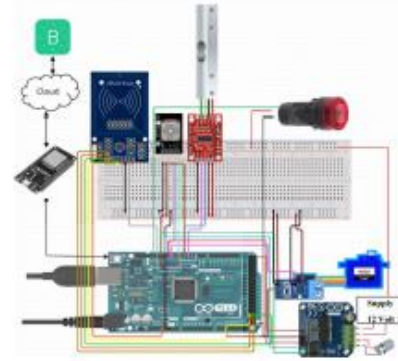
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36
วันที่ 19-22 กรกฎาคม พ.ศ. 2565 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

DRC-0003



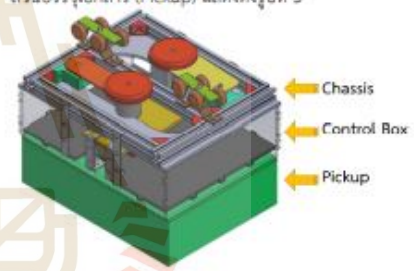
ควบคุมในตัวรถ ส่วนหน้าที่หลักของบอร์ด Arduino คือการให้สัญญาณควบคุมไปยังระบบขับเคลื่อนของตัวรถ โดยสัญญาณเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับคำสั่งของผู้ใช้งานที่ป้อนให้กับแอปพลิเคชันและโอนผ่านคำสั่งด้วย ESP8266 มายัง Arduino สัญญาณเหล่านี้ถูกกำหนดโดยอัลกอริทึมซึ่งอธิบายไว้ในส่วนโครงสร้างซอฟต์แวร์ ดังแผนภาพสื่อกรรมของระบบแสดงดังรูปที่ 3

ในส่วนของตัวรถมีมอเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นระบบขับเคลื่อน เช่น เซอร์โวลต์เซลล์ทำหน้าที่ในการตรวจวัดค่าน้ำหนักเอกสาร RFID ใช้ในการตรวจจับตำแหน่งของตัวรถ servo motor ใช้ในการจำลองการเปิดปิดประตูของตัวรถขณะส่งเอกสารที่ปลายทาง Buzzer LED ใช้ในการส่งสัญญาณเสียงและแสงไฟขณะรอสั่ง แผ่นฝังโคดอะแกรมและอินเทอร์เฟซส่วนประกอบแสดงในรูปที่ 4

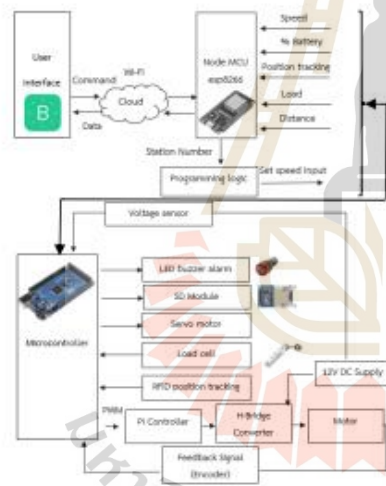


รูปที่ 4 System Interface and connections

ตัวรถได้มีการออกแบบด้วยโปรแกรม Solidworks2021 โดยแบ่งส่วนประกอบของรถออกเป็นสามส่วนคือ ส่วนโครงรถ (Chassis) ส่วนติดตั้งอุปกรณ์ควบคุม (Control Box) และส่วนบรรจุเอกสาร (Pickup) แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ดินแบบรถในงานวิจัย



รูปที่ 3 แผนสื่อกรรมของระบบ

2.3 การออกแบบระบบซอฟต์แวร์

การออกแบบซอฟต์แวร์เกี่ยวข้องกับการเขียนโปรแกรมของตัวบอร์ด ESP8266 และ Arduino Mega 2560 ซึ่งมีที่อยู่ IP ของรอกไฟฟ้าเป็นโปรเซสเซอร์หลัก การควบคุมที่ได้ด้วยการใช้ IOT ที่ทำงานสื่อสารระหว่าง ESP8266 และ Blynk แพลตฟอร์มที่อยู่บนมือถือสื่อสารผ่านโปรโตคอล Wi-Fi TCP โดยผู้ใช้ทำการเลือกสถานีที่ต้องการส่งเอกสารจากนั้นคำสั่งจะถูกส่งจากโทรศัพท์ไปยัง ESP8266 เพื่อส่งต่อคำสั่งไปยัง Arduino Mega 2560 เพื่อสั่งงานระบบภายในตัวรถให้สามารถเคลื่อนที่ตามโปรไฟล์การเคลื่อนที่ที่ออกแบบไว้ ในขณะที่บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะต้องทำงานร่วมกับระบบขับเคลื่อนที่ประกอบไปด้วยมอเตอร์โครฟี BTS7960 และเซนเซอร์ Encoder เพื่อวัดค่าสัญญาณความเร็วรอบของมอเตอร์ เพื่อส่งค่าสัญญาณความผิดพลาด (error) ไปยังตัว

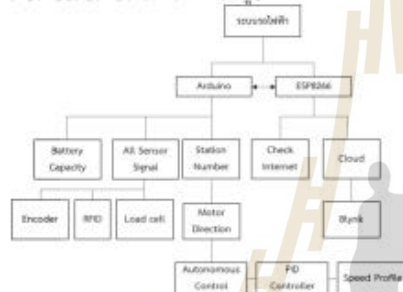
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36
วันที่ 19-22 กรกฎาคม พ.ศ. 2565 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

DRC-0003

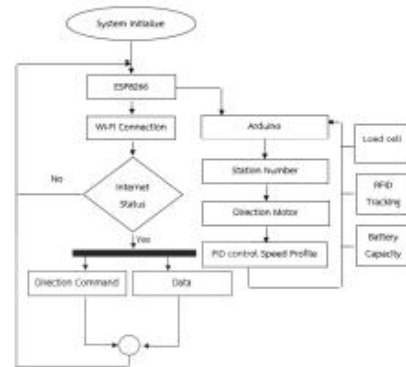


ควบคุมโอ (PI) เพื่อให้รถสามารถรักษาระดับความเร็วตามโปรไฟล์ได้ และขณะวิ่งจะมีการส่งเสียงและแสงแจ้งเตือนด้วยไฟ Buzzer หน้าที่ของส่วนซอฟต์แวร์ของระบบสามารถเขียนรายละเอียดโครงสร้างโดยรวมได้ดังรูปที่ 6

สถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์แบ่งออกเป็นหลายส่วนตามโปรแกรมหลักเรียกว่ารูทีนย่อย ในส่วนของการทำงานของรูทีนย่อยเช่น การติดตามตำแหน่งตัวรถ และการควบคุมความเร็วโปรไฟล์การเคลื่อนที่ โดยอัลกอริทึมทั้งสองจะทำงานขนานกันขณะรถเคลื่อนที่ จะส่งข้อมูลผ่านระบบคลาวด์ไปที่แพลตฟอร์ม Blynk เพื่อแสดงสถานะการทำงาน โดยระบบมีอัลกอริทึมการทำงานดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 Software Structure



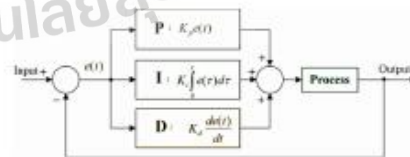
รูปที่ 7 Main Flowchart

ในส่วนของการควบคุมความเร็วโปรไฟล์การเคลื่อนที่จะใช้การควบคุมแบบป้อนกลับด้วยตัวควบคุมแบบ Proportional-Integral-derivative (PID- Controller) ซึ่งเป็นตัวควบคุมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในงานด้านวิศวกรรมและอุตสาหกรรม การดำเนินการควบคุมสามารถใช้พารามิเตอร์ร่วมกันได้ เช่น P, PI, PD และ PID ซึ่งค่าพารามิเตอร์ P, I และ D แต่ละตัวจะมีคุณสมบัติที่มีผลต่อระบบควบคุมเช่น ช่วงเวลาที่ระบบทำงานในช่วงเริ่มต้น (Rise time) เวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล (Setting time) ค่าการแกว่งของระบบ (Overshoot) ค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัว (Steady state error) และเสถียรภาพ (Stability) ของระบบแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลกระทบของระบบจากคุณสมบัติของพารามิเตอร์ควบคุม

พารามิเตอร์การควบคุม	Rise Time	Setting Time	Overshoot	Steady State Error	Stability
K_p	ลด	เพิ่มเล็กน้อย	เพิ่ม	ลด	ลด
K_i	ลดเล็กน้อย	เพิ่ม	เพิ่ม	ลด	ลด
K_d	ลดเล็กน้อย	ลด	ลด	ไม่เปลี่ยนแปลง	เพิ่ม

ดังนั้นในการออกแบบระบบควบคุม PID จำเป็นต้องตั้งค่าพารามิเตอร์ของ P, I หรือ D เพื่อให้ระบบสามารถตอบสนองต่อสัญญาณเอาต์พุตของระบบที่เป็นไปตามค่าอินพุตที่ต้องการ แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 โครงสร้างของระบบควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบปริพันธ์และอนุพันธ์ (PID-Controller)

จากรูปที่ 8 สามารถนำมาเขียนเป็นกฎสมการความสัมพันธ์การควบคุมระหว่างเอาต์พุตและอินพุตแสดงดังสมการที่ 1

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (1)$$

เมื่อ K_p คือ ค่าคงที่ของตัวควบคุมแบบสัดส่วน
 K_i คือ ค่าคงที่ของตัวควบคุมแบบปริพันธ์
 K_d คือ ค่าคงที่ของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์
 $e(t)$ คือ ค่าความผิดพลาดของระบบ
 t คือ ค่าเวลา หน่วยวินาที (s)

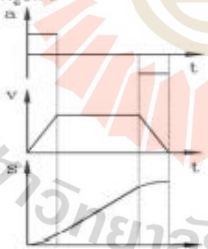
จากสมการที่ 1 นำมาสร้างเป็นสมการ PID อัลกอริทึมสำหรับเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมความเร็วของตัวมอเตอร์ดังสมการที่ 2 [5]

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \left(\sum_{i=0}^{t-1} e(i) + e(t) \right) \Delta t + K_d \left(\frac{e(t) - e(t-1)}{\Delta t} \right) \quad (2)$$

สมการที่ (2) ใช้วิธี Trapezoidal method ในการหาค่า Integral Controller (I-Controller) และใช้วิธี Backward difference method สำหรับหาราค่าของพารามิเตอร์การควบคุม Derivative Controller (D-Controller)

2.4 การออกแบบแผนการควบคุมโปรไฟล์ความเร็ว

จากรูปที่ 1 ผู้วิจัยได้ออกแบบโปรไฟล์ความเร็วของโรตารีฟาสต์จากหลักการออกแบบโปรไฟล์ความเร็วแบบสี่เหลี่ยมคางหมูโดยมีโหมดการขับเคลื่อนสามโหมด คือ โหมดการเร่ง โหมดความเร็วคงที่และโหมดชะลอความเร็วหรือการเบรกดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 โปรไฟล์ความเร็วแบบสี่เหลี่ยมคางหมู

จากรูปที่ 9 จะเห็นพฤติกรรมการปรับเปลี่ยนความเร็วของโรตารีฟาสต์โดยในช่วงเริ่มต้นรถจะวิ่งด้วยความเร่งทำให้ความเร็วของรถเพิ่มขึ้นจนถึงตำแหน่งที่รถเปลี่ยนโหมดการขับเคลื่อนเป็นแบบความเร็วคงที่ทำให้ความเร่งมีค่าเป็นศูนย์ จากนั้นจะวิ่งที่ความเร็วคงที่ถึงจุดที่มันจะต้องเปลี่ยนโหมดการขับเคลื่อนเป็นแบบชะลอความเร็วเพื่อเข้าจอดทำให้ความเร็วมิลค่าลดลง

จนเป็นศูนย์ ซึ่งมีการทำคำนวณเพื่อออกแบบโปรไฟล์นี้ได้จากสมการที่ 3 [8]

$$v(t) = \begin{cases} At & 0 \leq t \leq t_1 \\ At_1 - A(t-t_1) & t_1 < t \leq t_2 \end{cases} \quad (3)$$

เมื่อ v คือ ค่าความเร็วเชิงเส้น หน่วยเมตรต่อวินาที (m/s)
 A คือ ค่าความเร่งเชิงเส้น หน่วยเมตรต่อวินาทีกำลังสอง (m/s²)

ในการควบคุมความเร็วการเคลื่อนที่ของโรตารีฟาสต์จะต้องการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นของตัวรถและความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์เพื่อให้สามารถควบคุมมอเตอร์ให้ขับเคลื่อนด้วยความเร็วที่ต้องการได้ เนื่องจากมอเตอร์เป็นอุปกรณ์ต้นกำลังหลักในระบบขับเคลื่อนของรถ ดังนั้นหาความสัมพันธ์เชิงเส้นและเชิงมุมได้ดังสมการที่ 4

$$v = \omega r \quad (4)$$

เมื่อ ω คือความเร็วเชิงมุม หน่วยเรเดียนต่อวินาที (rad/s)
 r คือรัศมีของล้อ หน่วยเมตร (m)
มอเตอร์จะควบคุมด้วยความเร็วเชิงมุมในหน่วยรอบต่อนาที (RPM) ดังนั้นจะได้สมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ 5

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \quad (5)$$

เมื่อ N คือ ค่าความเร็วรอบมอเตอร์หน่วย หน่วยรอบต่อนาที (RPM)

แทนค่า ω จากสมการที่ 5 ลงในสมการที่ 4 จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบมอเตอร์และความเร็วเชิงเส้นของรถดังสมการที่ 6

$$N = \frac{60v}{2\pi r} \quad (6)$$

3 ผลการดำเนินการและวิเคราะห์

3.1 ผลการพัฒนาต้นแบบ
การติดตั้งตัวรถในงานวิจัยนี้ จะติดตั้งตัวรถบนรางอลูมิเนียมตัวขนาด 3x4.5 เซนติเมตร ดังรูปที่ 10

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36
วันที่ 19-22 กรกฎาคม พ.ศ. 2565 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

DRC-0003



รูปที่ 10 การติดตั้งตัวต้นแบบจริง

ในส่วนของหน้าจอกำหนดการใช้งานสำหรับผู้ใช้ ดำเนินโดยการออกแบบด้วยแอปพลิเคชัน Blynk และการเขียนโปรแกรมภาษาซีบนบอร์ด ESP8266 เพื่อกำหนดคณคาพินในการรับส่งข้อมูล คำสั่ง รวมถึงการจัดเก็บข้อมูลและแสดงผล ดังรูปที่ 11

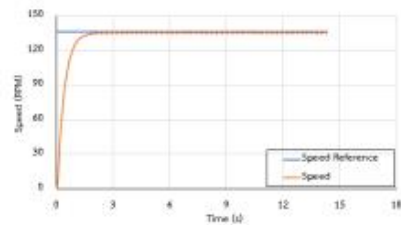


รูปที่ 11 Prototype User Interface

3.2 ผลการทดสอบ

จากการออกแบบโปรแกรมควบคุมความเร็วการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้ารางเดียวอัตโนมัติสำหรับการขนส่งเอกสารในงานวิจัยนี้ ด้วยหลักการออกแบบโปรแกรมที่เลือกค่าพารามิเตอร์ความเร็วใช้งาน (Operating speed) มีค่าเท่ากับ 136 RPM หรือ 0.5 เมตรต่อวินาที เพื่อทดสอบการควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่แบบ ติดตามความเร็วและการทดสอบเสถียรภาพของระบบควบคุม PI ในการควบคุมความเร็วรอบเมื่อมีการใส่ค่าน้ำหนักเข้าไปในระบบ

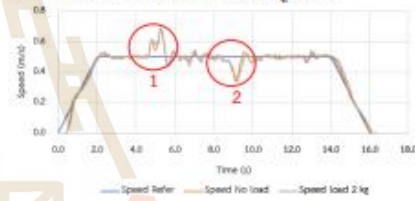
ในการทดลองได้ใช้วิธีการควบคุมแบบ PID โดยการตั้งค่าพารามิเตอร์ P และ I ด้วยหลักการ Trial and error test ที่ความเร็วรอบ 136 RPM จะได้ค่า K_p เท่ากับ 0.02 และ K_i เท่ากับ 0.00015 เก็บค่าการทดลองด้วย Data logger ที่มี Sampling time เท่ากับ 0.05 วินาที ได้ผลตอบสนองของระบบดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 ผลตอบสนองของระบบ

จากผลการทดลองพบว่าระบบมีการตอบสนองเพื่อเข้าสู่ค่าความเร็วที่ต้องการโดยไม่เกิดการพุ่งเกิน (Overshoot) และระบบใช้เวลาในการเข้าสู่ภาวะสมดุล (Setting Time) เท่ากับ 2 วินาที ที่ Steady State Error มีค่าเท่ากับ 1%

การทดสอบการติดตามความเร็วโปรไฟล์การเคลื่อนที่ของตัวรถ มีค่าความเร็วสูงสุดเท่ากับ 0.5 m/s และการทดลองใส่ค่าน้ำหนักขนาด 2 กิโลกรัมเข้าไปในระบบจากนั้นสั่งการให้รถเคลื่อนที่ตามโปรไฟล์เพื่อดูเสถียรภาพของระบบเมื่อมีโหลดภายนอก ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 ผลการติดตามความเร็ว

จากการทดลองพบว่ารถสามารถวิ่งตามโปรไฟล์ที่กำหนดได้ และเมื่อใส่โหลดภายนอกเข้าไปพบว่าโปรไฟล์การเคลื่อนที่ยังมีแนวโน้มเดิมดังนั้นระบบมีเสถียรภาพในการทำงาน ในส่วนของการพุ่งเกินในจุดที่ 1 เป็นผลมาจากตัวรถกำลังวิ่งลงทางชันทำให้ความเร็วพุ่งขึ้นชั่วขณะแล้วกลับสู่ภาวะสมดุลจากผลของตัวควบคุม PI และในจุดที่ 2 รถมีความเร็วพุ่งลงเนื่องจากเป็นบริเวณรอยต่อของรางที่ไม่แข็งแรงทำให้เกิดแรงต้านในช่วงตัวรถ

4 สรุปและวิจารณ์

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอต้นแบบรถไฟฟ้ารางเดียวอัตโนมัติสำหรับขนส่งเอกสารระหว่างอาคารซึ่งประกอบด้วย การออกแบบซอฟต์แวร์ การออกแบบฮาร์ดแวร์ รถต้นแบบ การออกแบบโปรแกรมการเคลื่อนที่ และอัลกอริทึมตัวควบคุมของระบบ เพื่อประกอบขึ้นใช้ในการทดสอบ โดยมีการควบคุมและติดตามการทำงานผ่านระบบอินเตอร์เน็ต มีการออกแบบ

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36
วันที่ 19-22 กรกฎาคม พ.ศ. 2565 จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

DRC-0003



หน้าจ้ออินเตอร์เฟซ เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถติดตามการทำงานของระบบได้อย่างสะดวกสบาย ในการทดสอบได้มีการออกแบบโปรแกรมการเคลื่อนที่แบบสี่เหลี่ยมคางหมูและใช้การควบคุมความเร็วด้วยอัลกอริทึมตัวควบคุมแบบ PI ทำให้รถสามารถเคลื่อนที่ได้ตามโปรแกรมไปพร้อมความเร็วที่มีเสถียรภาพ

ตัวควบคุมในปัจจุบันมีอยู่หลายประเภทขึ้นอยู่กับความซับซ้อนและความเหมาะสมของระบบควบคุมนั้นๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ตัวควบคุมแบบ PI เนื่องจากมอเตอร์เป็นระบบที่มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อันดับสอง และระบบเป็นประเภทศูนย์ รวมถึงตัวค่าของพารามิเตอร์การควบคุม Derivative Controller (D-Controller) เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อระบบทำให้ปรับจูนให้เหมาะสมได้ง่าย

[8] Zhang, L., et al. (2017). Research on stepper motor motion control based on MCU. 2017 Chinese Automation Congress (CAC), IEEE.

[9] Ding, Y., et al. (2020). Smart logistics based on the internet of things technology: an overview.1-23.

[10] Adriansyah, A., et al. (2016). Design of Pet Feeder Using Web Server as Internet of Things Application. International Conference on Electrical Engineering and Informatics.

5 เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Siegwart, I. Nourbakhsh and D. Scaramuzza, , "Introduction to Autonomous Mobile Robots" 2nd edition, MIT Press 2011
- [2] Hat, M., et al. 2015. "Model based design of PID controller for BLDC motor with implementation of embedded Arduino mega controller."
- [3] Sung, G.-M., et al. (2019). Internet-of-Things based controller of a three-phase induction motor using a variable-frequency driver. 2019 IEEE Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE), IEEE.
- [4] Satpute, S., et al. (2020). "Real Time Object Detection using Deep-Learning and OpenCV." 7(4): 3243-3246.
- [5] Liu, G. F. and H. W. Li (2016). Design of stepper motor position control system based on DSP. 2017 2nd International Conference on Machinery, Electronics and Control Simulation (MECS 2017), Atlantis Press.
- [6] Kulworawanichpong, T. "Optimising AC electric railway power flows with power electronic control", PhD Thesis, University of Birmingham, UK, November 2003.
- [7] Kim, K. "Optimal train control on various track alignments considering speed and schedule adherence constraints", PhD Thesis, New Jersey Institute of Technology, USA, January 2010.

ประวัติผู้เขียน

นายนทพัทธ์ สุทธิมล ภูมิลำเนาอยู่ที่ ต.ภูเขาทอง อ.หนองพอก จ.ร้อยเอ็ด สำเร็จการศึกษา ระดับประถมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนบ้านเหล่าโพนกาม ระดับมัธยมศึกษาชั้นปีที่ 1-6 ที่โรงเรียน เมยวดีพิทยาคม อ.เมยวดี จ.ร้อยเอ็ด ต่อมาได้รับทุนการศึกษาเฉลิมพระเกียรติ 84 พรรษา เพื่อเข้า ศึกษาต่อในระดับปริญญาตรีและสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์ เกียรตินิยมอันดับ 1 ในปีการศึกษา 2563 และได้รับทุนผู้มีศักยภาพเข้า ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมเครื่องกลและระบบกระบวนการ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีสุรนารี ในระหว่างการศึกษามีโอกาสเป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชา Engineering Graphic I และ Engineering Graphic II



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี