



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การพัฒนาต้นแบบระบบรถไฟฟ้ารางเดี่ยวอัตโนมัติสำหรับการขนส่งเอกสารระหว่างอาคาร Prototype development of an autonomous monorail system for document transportation between buildings

นนทพัทธ์ สุทธิมณ* กิรติ สุลักษณ์

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมืองนครราชสีมา จังหวัดนครราชสีมา 30000

Nonthaphat Sutthimon* Keerati Suluksna

Department of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000

* Corresponding author.

E-mail: nonthaphatsutthimon@gmail.com ; Telephone: 094 012 8757

วันที่รับบทความ 8 กรกฎาคม 2567; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 10 ตุลาคม 2567; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 9 มกราคม 2568

วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 3 20 มิถุนายน 2568; วันที่ตอบรับบทความ 16 กรกฎาคม 2568

บทคัดย่อ

การขนส่งเอกสารระหว่างอาคารมักใช้รถยนต์ขนส่ง ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองพลังงานและก่อให้เกิดมลพิษ นอกจากนี้หากมีเอกสารเร่งด่วนที่อยู่นอกกรอบการขนส่งปกติ จะต้องใช้เจ้าหน้าที่ของแต่ละหน่วยงานดำเนินการส่งเอง ทำให้เกิดการหยุดชะงักในการทำงาน ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นพัฒนาต้นแบบระบบรางขนส่งเอกสารระหว่างอาคาร โดยออกแบบระบบรางเดี่ยวที่ติดตั้งได้ง่ายในพื้นที่จำกัด รถไฟฟ้าถูกควบคุมโดยอัลกอริทึมที่เขียนขึ้นด้วยภาษาคอมพิวเตอร์ที่สามารถสั่งการและติดตามตำแหน่งของรถไฟในเวลาจริง การสื่อสารระหว่างระบบควบคุมและรถไฟใช้เทคโนโลยีไร้สายเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น การแสดงผลและการใช้งานบนแอปพลิเคชัน ระบบขับเคลื่อนควบคุมด้วยตัวควบคุมพีไอแบบวงปิด ออกแบบโปรไฟล์ความเร็วของการเคลื่อนที่ของรถเพื่อให้สามารถทำงานได้ค่าความเร็วที่กำหนด ผลการทดลองพบว่ารถสามารถสั่งการผ่านระบบไร้สายได้และทำงานตามโปรไฟล์ความเร็วที่กำหนดด้วยตัวควบคุม PI ทั้งในกรณีที่มีโหลดและไม่มีโหลด

คำสำคัญ

ระบบอัตโนมัติ การขนส่งเอกสาร อัลกอริทึมควบคุม เทคโนโลยีไร้สาย

Abstract

Transporting documents between buildings is traditionally accomplished using vehicles, which results in energy waste and pollution. Moreover, the delivery of urgent documents outside the regular schedule necessitates staff involvement, thereby disrupting their regular duties. This research presents the development of a prototype tram system specifically designed for document transport between buildings. The system features a single-track design, facilitating easy installation in confined spaces. The electric trams are governed by algorithms that allow for real-time commands and tracking through wireless technology. The drive system employs a closed-loop Proportional-Integral (PI) controller to maintain the desired speed profile. Experimental results demonstrate that the vehicle can be effectively controlled wirelessly and adheres to the prescribed speed profile, both with and without a load.

Keywords

automation; document transportation; control algorithm; wireless technology

1. คำนำ

การขนส่งเอกสารระหว่างอาคารเป็นกิจกรรมที่เกิดขึ้นเป็นประจำในองค์กรทั้งภาครัฐและเอกชน ตัวอย่างเช่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีใช้รถยนต์ 2 คันในการส่งเอกสารวันละ 2 รอบระหว่างอาคารหลัก 20 แห่ง คิดเป็นระยะทางรวมกว่า 20 กิโลเมตร อย่างไรก็ตาม ระบบขนส่งเอกสารแบบดั้งเดิมก่อให้เกิดปัญหาหลายประการ ได้แก่ (1) มลภาวะจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงและเสียงรบกวน (2) ความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุบนท้องถนน (3) การเพิ่มความแออัดของพื้นที่จอดรถ และ (4) กรณีเอกสารด่วนที่ต้องส่งนอกรอบจำเป็นต้องใช้บุคลากรดำเนินการเอง ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานหลักของเจ้าหน้าที่ หากมีระบบขนส่งอัตโนมัติเข้ามาช่วย อาจช่วยลดข้อจำกัดเหล่านี้ได้

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาาระบบขนส่งเอกสารโดยใช้รถไฟฟ้ารางเดี่ยวขับเคลื่อนอัตโนมัติ ซึ่งประกอบด้วยการออกแบบ (1) ตัวรถ (2) โปรไฟล์ความเร็วการเคลื่อนที่ (3) ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์แบบวงปิดเพื่อรักษาเสถียรภาพการทำงาน โดยมีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ เพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองและปรับแต่งพารามิเตอร์ของตัวควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์ (PI) ให้เหมาะสม และ (4) อัลกอริทึมการทำงานของระบบ ซึ่งสามารถสั่งงานและแสดงสถานะผ่านหน้าจอ โดยใช้โปรโตคอลสื่อสารแบบ Internet of Things (IoT) เพื่อให้สามารถควบคุมและติดตามการทำงานของรถได้แบบเรียลไทม์

การออกแบบตัวรถใช้หลักการวิเคราะห์แรงที่กระทำต่อรถขณะเคลื่อนที่ เพื่อกำหนดค่าแรงต้านสูงสุดซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญในการกำหนดพิกัดกำลังของมอเตอร์ [3, 4] ระบบโปรไฟล์ความเร็วถูกออกแบบโดยอ้างอิงแนวคิดการวางแผนการเคลื่อนที่ของระบบขนส่งมวลชน โดยแบ่งการขับเคลื่อนออกเป็น 4 โหมด ได้แก่ (1) โหมดการเร่ง (2) โหมดความเร็วคงที่ (3) โหมดการแล่น และ (4) โหมดการเบรก โดยใช้แนวคิดการออกแบบโปรไฟล์ความเร็วแบบสี่เหลี่ยมคางหมูและแบบโค้ง S-curve เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของรถ [2, 8, 25, 26]

ระบบควบคุมความเร็วมอเตอร์ใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเนื่องจากมีการตอบสนองทางไดนามิกที่รวดเร็วและ

ประสิทธิภาพสูง อย่างไรก็ตาม การออกแบบตัวขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการที่ซับซ้อน เช่น การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การจำลองด้วยฮาร์ดแวร์ และการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง การสร้างแบบจำลองช่วยลดระยะเวลาในการออกแบบตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ แต่ต้องใช้เวลาในการหาแบบจำลองที่เหมาะสม [11, 23]

เพื่อป้องกันข้อผิดพลาดที่อาจทำให้ฮาร์ดแวร์เสียหาย มีการสร้างแบบจำลองระบบเพื่อทดสอบตัวควบคุมในสภาพแวดล้อมจำลองก่อนนำไปใช้จริง [24] ปกติแล้ว การพัฒนาตัวขับเคลื่อนต้องใช้ต้นทุนสูงและใช้เวลานาน อย่างไรก็ตาม สามารถใช้เทคนิคการจำลองแบบ เช่น การใช้ MATLAB/Simulink เพื่อช่วยในการวิเคราะห์และพัฒนาระบบจำลองของมอเตอร์กระแสตรง ซึ่งสามารถใช้งานร่วมกับ Arduino Mega 2560 เพื่อการควบคุมที่แม่นยำยิ่งขึ้น

แนวทางการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมมอเตอร์สามารถทำได้ 2 วิธีหลัก ได้แก่ วิธีแบบกล่องขาว (White-box modeling) ซึ่งใช้หลักฟิสิกส์และพารามิเตอร์ของระบบเพื่อสร้างสมการแบบจำลอง และ วิธีแบบกล่องดำ (Black-box modeling) ซึ่งใช้ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตของระบบจริงมาสร้างแบบจำลองโดยไม่ต้องทราบพารามิเตอร์ภายในของระบบ ในงานวิจัยนี้ เลือกใช้การจำลองแบบกล่องดำร่วมกับตัวควบคุม PID (Proportional-Integral-Derivative Controller) [22] เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยตัวควบคุมที่ได้รับ การ ปรับ แต่ง แล้ว จะ ถูก อัป โหลด ไป ยัง ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 [12, 13, 19]

ระบบอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นสามารถทำงานได้ด้วยตนเองผ่านการตั้งค่าจากผู้ควบคุม โดยใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับวัตถุและระบบควบคุมสัญญาณ Pulse Width Modulation (PWM) [7, 20] เพื่อปรับความเร็วของรถเมื่อเข้าใกล้สิ่งกีดขวาง และหยุดที่ตำแหน่งที่กำหนด นอกจากนี้ ระบบยังรองรับการควบคุมผ่านเครือข่ายไร้สาย IoT โดยใช้ Blynk Cloud Platform เพื่อสื่อสารข้อมูลสถานะของรถไฟฟ้าแบบเรียลไทม์ ซึ่งสามารถสั่งงานและตรวจสอบสถานะผ่านโทรศัพท์มือถือ [5, 10, 21]

ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาต้นแบบระบบรถไฟฟ้ารางเดี่ยวอัตโนมัติสำหรับขนส่งเอกสารระหว่างอาคาร โดยออกแบบให้สามารถติดตั้งได้ง่ายในพื้นที่

จำกัด ใช้เทคโนโลยีไร้สายในการควบคุมและติดตามตำแหน่งของรถแบบเรียลไทม์ รวมถึงพัฒนาอัลกอริทึมการควบคุมที่ช่วยให้รถไฟฟ้าเคลื่อนที่ได้อย่างราบรื่นและปลอดภัย

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 แนวคิดการออกแบบ

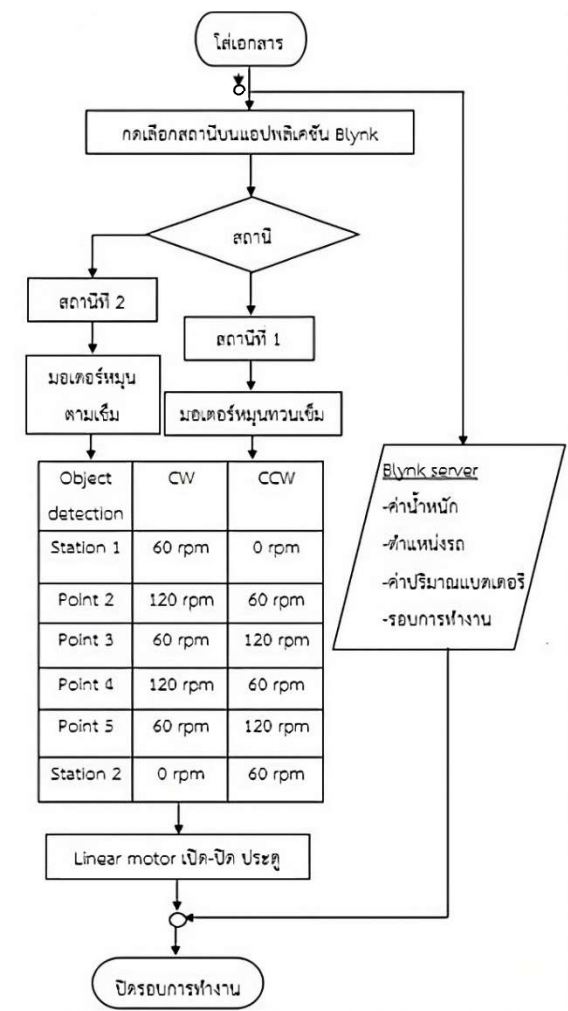
การพัฒนาาระบบขนส่งเอกสารระหว่างอาคารใช้รถไฟฟ้าวิ่งบนรางเดี่ยว เนื่องจากมีความแม่นยำในการเดินรถระหว่างสถานี ติดตั้งรางได้ง่าย ผู้ใช้สามารถตรวจสอบสถานะการทำงานของรถได้โดยไม่ต้องรอที่สถานี สามารถส่งงานระยะไกลได้ผ่านแอปพลิเคชันบนมือถือ เมื่อรถจอดที่สถานีผู้ใช้งานสามารถนำเอกสารใส่กล่องในตัวรถ จากนั้นเลือกสถานีปลายทางโดยสั่งผ่านหน้าจอมือถือ รถจะเริ่มเคลื่อนที่จากสถานีต้นทางไปสถานีปลายทาง มีการแสดงตำแหน่งรถเป็นระยะ ๆ ด้วยการตรวจจับจากเซนเซอร์ เมื่อถึงสถานีปลายทางจะปล่อยเอกสารลงกล่อง จากนั้นจอแสดงผลจะแสดงสถานะว่างและสามารถเรียกใช้งานต่อได้ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะการเดินรถไฟฟ้ารางเดี่ยวสำหรับขนส่งเอกสาร

2.2 อัลกอริทึมการทำงานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร

จากเงื่อนไขการทำงานของระบบนำมาสู่การสร้างอัลกอริทึมควบคุมการทำงานของระบบรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร งานวิจัยนี้การออกแบบอัลกอริทึมการทำงานของระบบตามที่แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนผังอัลกอริทึมการทำงานของระบบ

จากรูปที่ 2 เริ่มต้นระบบ: ผู้ใช้นำเอกสารใส่ในรถขนส่งอัตโนมัติ จากนั้นระบบจะตรวจสอบน้ำหนักเอกสารโดยใช้เซนเซอร์โหลดเซลล์ (Load Cell Sensor) หากน้ำหนักเกินขีดจำกัด ระบบจะส่งสัญญาณแจ้งเตือนด้วยเสียง แต่หากน้ำหนักอยู่ในเกณฑ์ปกติ ระบบจะส่งข้อมูลน้ำหนักเอกสาร ปริมาณแบตเตอรี่ และตำแหน่งปัจจุบันของรถไปยัง Blynk Server ซึ่งผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบข้อมูลดังกล่าวผ่านแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟน

การเลือกปลายทาง: ผู้ใช้เลือกสถานีปลายทางผ่านแอปพลิเคชันมือถือ โดยสามารถกำหนดปลายทางเป็น สถานีที่ 1 หรือ สถานีที่ 2 หลังจากนั้นระบบจะประมวลผลเส้นทางและกำหนดทิศทางการหมุนของมอเตอร์ดังนี้ CW (Clockwise): ใช้สำหรับหมุนเดินหน้า CCW (Counterclockwise): ใช้สำหรับหมุนถอยหลัง

การเคลื่อนที่ตามโปรไฟล์ความเร็ว: ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถโดยใช้ข้อมูลจาก RFID ที่ติดตั้งตามตำแหน่งบนราง ระบบจะกำหนดค่าความเร็วรอบของมอเตอร์ (CW และ CCW) ในแต่ละตำแหน่งตามลักษณะการเคลื่อนที่ดังนี้

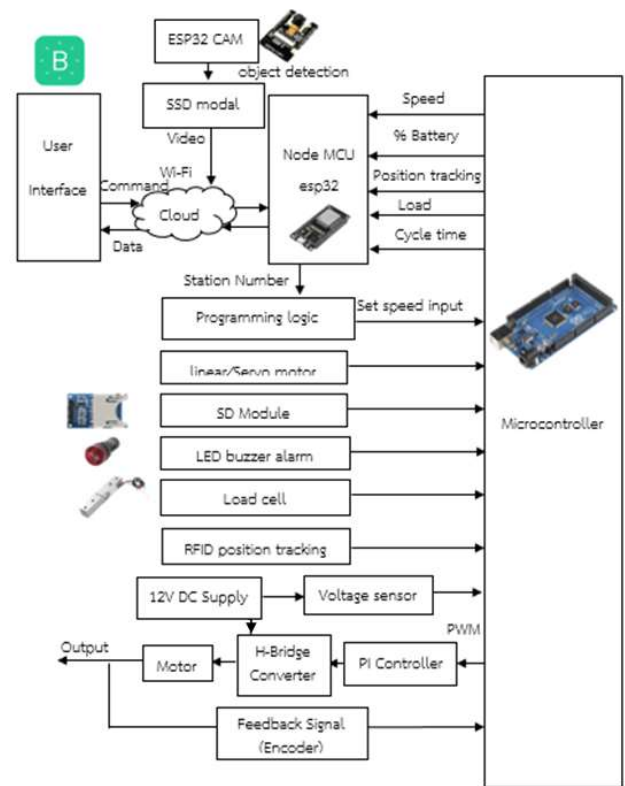
60 rpm: ใช้ในช่วงเริ่มต้นและช่วงชะลอความเร็ว เพื่อเพิ่มความปลอดภัยและลดแรงกระแทก

120 rpm: ใช้ในช่วงที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการขนส่ง

การออกแบบค่าความเร็วนี้ได้จากการคำนวณตามหัวข้อที่ 2.5 ซึ่งผู้ออกแบบสามารถปรับเปลี่ยนค่าความเร็วได้ตามความเหมาะสม

การทำงานที่สถานีปลายทาง: เมื่อรถถึงสถานีปลายทางที่กำหนด ระบบจะหยุดรถที่ตำแหน่งของ RFID ที่ติดตั้งไว้ จากนั้น Linear Motor จะเปิดประตูเพื่อปล่อยเอกสารลงในกล่องรับ หลังจากปล่อยเอกสารเรียบร้อยแล้ว ระบบจะปิดประตูและรีเซตรถให้อยู่ในสถานะพร้อมใช้งานสำหรับรอบถัดไป

การประมวลผลและควบคุม: ระบบควบคุมทั้งหมดใช้การเขียนโปรแกรมผ่าน Arduino IDE และการปรับจูนตัวควบคุมมอเตอร์ด้วย MATLAB เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานและลดข้อผิดพลาดในการขับเคลื่อน จากการออกแบบระบบการทำงานทำให้สามารถทราบอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างระบบควบคุม ดังรูปที่ 3

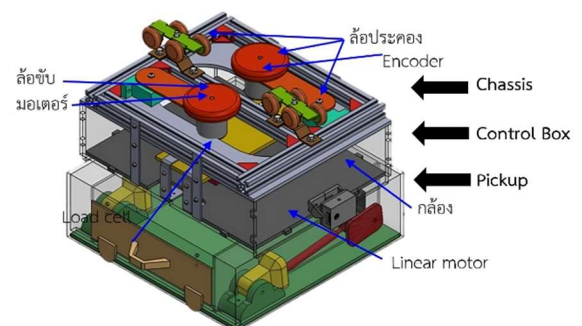


รูปที่ 3 อุปกรณ์ระบบหลักและทิศทางการแลกเปลี่ยนสัญญาณ

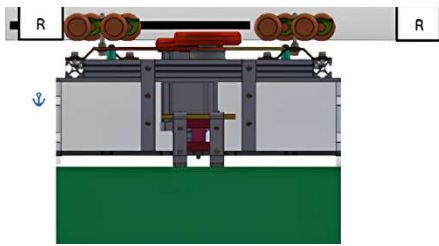
2.3 การออกแบบและสร้างต้นแบบตัวรถ

2.3.1 การออกแบบตัวรถ

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Solidworks 2021 ออกแบบตัวรถ แบ่งการออกแบบเป็น 3 ส่วน ดังนี้ (1) Chassis เป็นโครงสร้างรับน้ำหนักตัวรถ ทำจากอะลูมิเนียมโปรไฟล์ ถอดหรือติดตั้งได้ง่าย (2) Control box ใช้ติดตั้งอุปกรณ์ควบคุมรวมถึงเซนเซอร์ต่าง ๆ ทำจากอะคริลิกใสหนา 5 mm และ (3) Pickup ใช้บรรจุทุก ทำจากอะคริลิกใสหนา 5 mm ลักษณะการติดตั้งใช้งานแสดงดังรูปที่ 4 และ 5



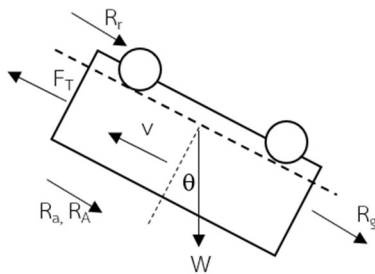
รูปที่ 4 โครงสร้างของโมเดลรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร



รูปที่ 5 การติดตั้งตัวรถสำหรับใช้งาน

2.3.2 การคำนวณหาพิกัดกำลังการขับเคลื่อน

งานวิจัยนี้พิจารณาแรงที่กระทำกับตัวรถตามหลักพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของยานพาหนะ ในขณะที่รถเคลื่อนที่ด้วยความเร่งขึ้นทางชัน (รูปที่ 6) เนื่องจากเกิดแรงต้านการเคลื่อนที่สูงสุด [5] จึงเหมาะนำมาวิเคราะห์หาแรงขับเคลื่อนรถ (สมการที่ 1) เมื่อแรงต้านทานการเคลื่อนที่ทั้งหมดมีค่าเท่ากับแรงขับเคลื่อน และสมการแรงต้านอากาศมีค่าขึ้นกับพื้นที่ผิวหน้ารถของตัวรถ ซึ่งรองรับการปะทะของอากาศทำให้เกิดแรงต้าน (สมการที่ 2)



รูปที่ 6 แผนภาพแรงที่กระทำบนตัวรถขณะรถเคลื่อนที่

$$F_T - R_g - R_A - R_r = R_a \quad (1)$$

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

เมื่อ F_T คือแรงขับเคลื่อนของตัวรถ R_g คือแรงต้านทานจากน้ำหนักขณะขึ้นทางชัน R_A คือแรงต้านอากาศ R_r คือแรงต้านการหมุนของล้อ R_a คือแรงต้านเนื่องจากการเร่ง C_d คือสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ ρ คือความหนาแน่นของอากาศ A_a คือพื้นที่ด้านหน้าของรถ และ v คือความเร็วสัมพัทธ์ของการไหลของอากาศ

สมการแรงต้านที่เกิดจากแรงเสียดทานการหมุนของล้อที่กระทำระหว่างล้อและพื้นรางเขียนได้ดังสมการที่ 3 โดย k_r คือค่าสัมประสิทธิ์ของการเสียดทานการหมุน W คือค่าน้ำหนักของตัวรถที่รวมน้ำหนักบรรทุกทุก และ θ คือค่ามุมความชันของราง

$$R_r = k_r W \cos \theta \quad (3)$$

เนื่องจากพื้นรางวิ่งมีระดับไม่คงที่ ทำให้แรงโน้มถ่วงที่กระทำกับตัวรถมีการเปลี่ยนแปลงตามมุมเอียง แรงนี้อาจเสริมการเคลื่อนที่หรือต้านการเคลื่อนที่ก็ได้ ดังสมการที่ 4 ในกรณีที่รถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่คงที่ ทำให้เกิดแรงต้านจากการเร่งของตัวรถ ซึ่งต้องนำไปคิดรวมกับแรงต้านอื่นด้วย ดังนั้นความสัมพันธ์ของแรงต้านจากความเร่งเป็นดังสมการที่ 5 โดย a คือค่าความเร่งขณะรถเคลื่อนที่ และ g คือค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

$$R_g = \pm W \sin \theta \quad (4)$$

$$R_a = \frac{Wa}{g} \quad (5)$$

จากสมการข้างต้นนำมาหาค่าแรงขับเคลื่อนของตัวรถได้เมื่อได้ค่าแรงขับเคลื่อนสูงสุดของตัวรถ นำค่าแรงไปใช้ในการคำนวณหาพิกัดกำลังของมอเตอร์

2.3.3 ค่าพิกัดกำลังมอเตอร์

การสร้างรถเลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในการขับเคลื่อน ดังนั้นจึงต้องคำนวณหาพิกัดกำลังมอเตอร์ให้เหมาะสมกับแรงบิดใช้งาน ได้ดังสมการที่ 6 จากนั้นนำค่าที่ได้จากสมการที่ 6 แทนในสมการที่ 7 เพื่อหาแรงบิดของตัวมอเตอร์ โดยทั่วไปค่าประสิทธิภาพการส่งกำลังของตัวมอเตอร์อยู่ที่ 85 เปอร์เซ็นต์ [1,3] ดังนี้

$$T_w = R \times r \quad (6)$$

$$T_m = \frac{T_w}{i_g \times \eta} \quad (7)$$

โดย T_w คือแรงบิดที่ล้อของระบบ R คือแรงต้านทั้งหมด ซึ่งมีค่าเท่ากับ $F_T r$ คือรัศมีของล้อขับ T_m คือแรงบิดมอเตอร์ i_g คืออัตราทดของเกียร์ และ η_i คือประสิทธิภาพการส่งกำลัง

ในการออกแบบระบบขับเคลื่อน จำเป็นต้องพิจารณาการแปลงแรงบิดเชิงมุมจากมอเตอร์ให้เป็นแรงเชิงเส้นที่ล้อ โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 8

$$F_L = \frac{T_m}{r} \quad (8)$$

ซึ่งแรงเชิงเส้น F_L นี้จะถูกส่งผ่านล้อไปยังราง โดยอาศัยแรงเสียดทานระหว่างล้อกับพื้นผิวราง หากแรงเสียดทานไม่เพียงพอ เช่น พื้นลื่นหรือแรงปกติน้อย จะเกิดการลื่นไถล (Slip) ทำให้แรงบิดไม่สามารถถ่ายเทเป็นแรงขับเคลื่อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ แรงเสียดทานสามารถคำนวณได้จาก

$$F_{friction} = k_r \cdot N_n \quad (9)$$

โดยที่ N_n คือแรงปกติที่กระทำตั้งฉากกับพื้นราง

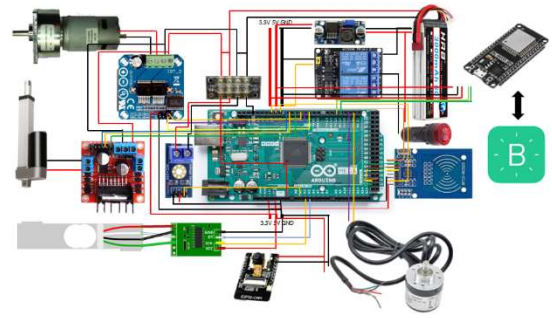
ดังนั้น ในการกำหนดพิกัดกำลังของมอเตอร์จึงต้องมั่นใจว่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นเพียงพอที่จะถ่ายแรงขับเคลื่อนจากล้อไปยังรางได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เพื่อให้การออกแบบได้ประสิทธิภาพสูงสุดและมั่นใจว่าระบบทำงานได้ภายใต้แรงบิดตามสมการที่ 7 ดังนั้น จึงนำค่าจากสมการที่ 7 คำนวณหาค่าความปลอดภัยในการออกแบบ Factor of Safety (F.S) ดังสมการที่ 10 โดย T คือแรงบิดมอเตอร์ที่ต้องการใช้งาน

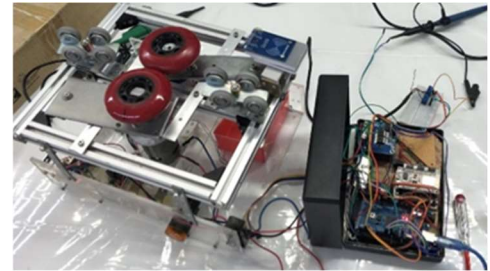
$$F.S = \frac{T}{T_m} \quad (10)$$

2.3.4 การติดตั้งอุปกรณ์

การต่อวงจรอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 7 และ 10 การติดตั้งรถบนรางดังรูปที่ 9 และสร้างรางทดสอบจริงดังรูปที่ 10



รูปที่ 7 ผังการต่อวงจรของระบบรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร



รูปที่ 8 การติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดบนรถ



รูปที่ 9 การติดตั้งรถบนราง



รูปที่ 10 รางทดสอบแนวระนาบ แนวลาดชัน 10° และทางโค้ง 90°

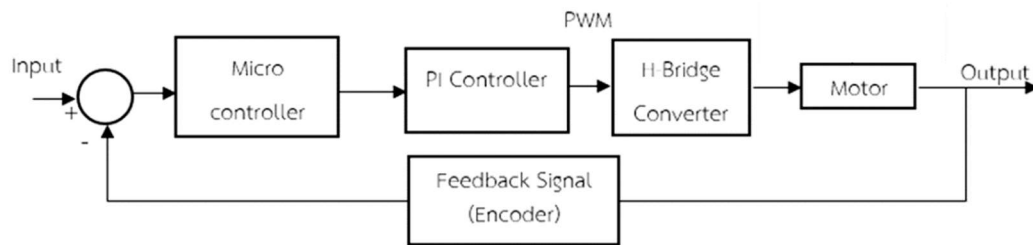
2.4 การออกแบบระบบควบคุมการขับเคลื่อน

รถที่พัฒนาในงานวิจัยนี้ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อให้สามารถควบคุมความเร็วรอบได้จึงเลือกใช้อัลกอริทึมการควบคุมแบบวงปิด ด้วยตัวควบคุมชนิดพีไอในการชดเชยสัญญาณที่ผิดพลาด เพื่อควบคุมแรงดันขาออกที่ส่งให้มอเตอร์ ผลตอบสนองของระบบเป็นแบบ Second order

โดยใช้ตัวตรวจวัดความเร็วรอบ Encoder ส่งค่าให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 แผนภาพการทำงานของระบบ ดังรูปที่ 11

ในส่วนระบบควบคุมความเร็วโปรไฟล์การเคลื่อน ใช้การควบคุมแบบป้อนกลับด้วยตัวควบคุมแบบ Proportional-Integral-derivative (PID-Controller) ซึ่งเป็นตัวควบคุมที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย การควบคุมใช้พารามิเตอร์ร่วมกันได้ เช่น

P, PI, PD และ PID ซึ่งค่าพารามิเตอร์ P, I และ D มีสมบัติเฉพาะที่มีผลต่อระบบควบคุม คือ ช่วงเวลาที่ระบบทำงานในช่วงเริ่มต้น (Rise time) เวลาเข้าสู่สภาวะสมดุล (Settling time) ค่าการแกว่งของระบบ (Overshoot) ค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัว (Steady state error) และเสถียรภาพ (Stability) ของระบบ ดังตารางที่ 1

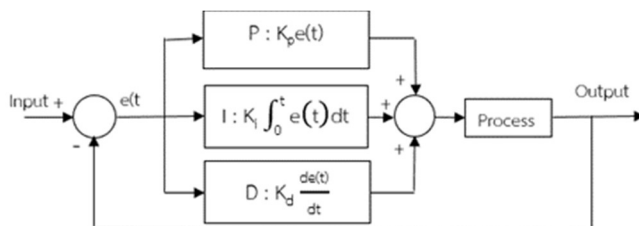


รูปที่ 11 แผนภาพระบบขับเคลื่อนของรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร

ตารางที่ 1 ผลกระทบของระบบจากคุณสมบัติของพารามิเตอร์ควบ

พารามิเตอร์การควบคุม	Rise Time	Settling 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

ดังนั้น การออกแบบระบบควบคุม PID จึงต้องตั้งค่าพารามิเตอร์ของ P, I หรือ D เพื่อให้ระบบสามารถตอบสนองต่อสัญญาณเอาต์พุตที่เป็นไปตามค่าอินพุตที่ต้องการ ดังรูปที่ 12 สามารถนำมาเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์การควบคุมระหว่างเอาต์พุตและอินพุตแสดงดังสมการที่ 11 โดยที่ K_p คือค่าคงที่ของตัวควบคุมแบบสัดส่วน K_i คือค่าคงที่ของตัวควบคุมแบบปริพันธ์ K_d คือค่าคงที่ของตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ $e(t)$ คือค่าความผิดพลาดของระบบ และ t คือเวลาหน่วยวินาที



รูปที่ 12 โครงสร้างของระบบควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบปริพันธ์และอนุพันธ์ (PID-Controller) [1]

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (11)$$

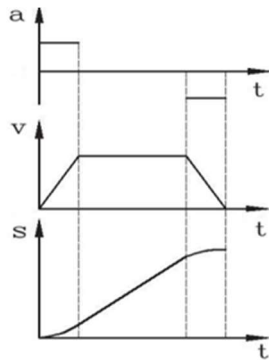
จากสมการที่ 11 สามารถเขียนสมการ PID อัลกอริทึมสำหรับการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมความเร็วของตัวรถได้ดังสมการที่ 12 [6]

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \left(\sum_{t=0}^{t-1} \frac{1}{2} (e(t) + e(t-1)) \Delta t \right) + K_d \left(\frac{e(t) - e(t-1)}{\Delta t} \right) \quad (12)$$

สมการที่ (12) ใช้ Trapezoidal rule of Integration ในการหาค่า Integral Controller (I-Controller) และใช้ Backward difference method หาค่าของพารามิเตอร์การควบคุม Derivative Controller (D-Controller) สำหรับการใช้งานสามารถให้ค่าเทอมที่ไม่ได้ใช้มีค่าเท่ากับศูนย์

2.5 การออกแบบแผนการควบคุมโปรไฟล์ความเร็ว

งานวิจัยนี้ออกแบบโปรไฟล์ความเร็วแบบสี่เหลี่ยมคางหมู โดยมีโหมดการขับเคลื่อนสี่โหมด คือ โหมดการเร่ง โหมดความเร็วคงที่ โหมดชะลอความเร็วและการเบรกดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 โปรไฟล์ความเร็วแบบสี่เหลี่ยมคางหมู

จากรูปที่ 13 จะเห็นพฤติกรรม การปรับเปลี่ยนความเร็วของรถ โดยในช่วงเริ่มต้นรถแล่นด้วยความเร่งทำให้ความเร็วเพิ่มขึ้นจนถึงตำแหน่งเปลี่ยนโหมดเป็นแบบความเร็วคงที่ทำให้ความเร่งเป็นศูนย์ จากนั้นรถแล่นที่ความเร็วคงที่จนถึงจุดเปลี่ยนโหมดเป็นแบบชะลอความเร็วเพื่อเข้าจอด ทำให้ความเร็วมีค่าลดลงจนเป็นศูนย์ ซึ่งมีการทำคำนวณเพื่อออกแบบโปรไฟล์นี้ได้จากสมการที่ 13 [26] โดย v คือค่าความเร็วเชิงเส้น และ A คือค่าความเร่งเชิงเส้น

$$v(t) = \begin{cases} At & 0 \leq t \leq t_1 \\ At_1 & t_1 < t \leq t_2 \\ At_1 - A(t - t_2) & t_2 < t \leq t_3 \end{cases} \quad (13)$$

การควบคุมความเร็วการเคลื่อนที่ของรถต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นของตัวรถและความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์เพื่อให้สามารถควบคุมมอเตอร์ให้ขับเคลื่อนรถด้วยความเร็วที่ต้องการได้ เนื่องจากมอเตอร์เป็นอุปกรณ์ต้นกำลังหลักในระบบขับเคลื่อน ความสัมพันธ์เชิงเส้นและเชิงมุมเป็นดังสมการที่ 14 โดย ω คือความเร็วเชิงมุม และ r คือรัศมีของล้อ อย่างไรก็ตาม ในการส่งกำลังจากมอเตอร์ไปยังล้อจะมีการใช้ระบบเกียร์เพื่อลดหรือเพิ่มความเร็วรอบของล้อ

ดังนั้นจึงต้องพิจารณา อัตราทดเกียร์ (Gear Ratio) ซึ่งมีผลต่อความเร็วเชิงเส้นของรถโดยตรง

$$v = \frac{\omega r}{i_g} \quad (14)$$

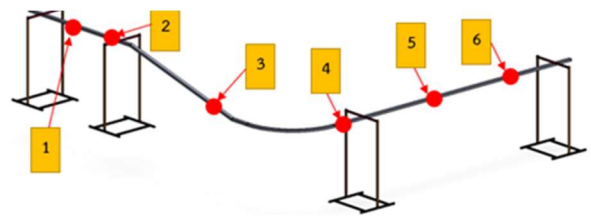
เนื่องจากมอเตอร์จะควบคุมด้วยความเร็วเชิงมุมในหน่วยรอบต่อนาที (RPM) ดังนั้น จึงได้สมการความสัมพันธ์ดังสมการที่ 15 โดย N คือค่าความเร็วรอบมอเตอร์ (RPM)

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \quad (15)$$

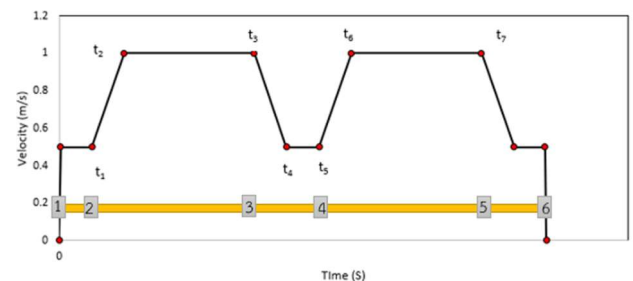
แทนค่า ω จากสมการที่ 15 ลงในสมการที่ 14 จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบมอเตอร์และความเร็วเชิงเส้นของรถดังสมการที่ 16 [16]

$$N = \frac{60vi_g}{2\pi r} \quad (16)$$

สำหรับโปรไฟล์ความเร็วได้ใช้วิธีการออกแบบโปรไฟล์แบบสี่เหลี่ยมคางหมูโดยติดตั้งตำแหน่ง RFID เพื่อปรับโหมดความเร็ว (รูปที่ 14) จึงสามารถออกแบบความเร็วการเคลื่อนที่ได้ดังรูปที่ 15

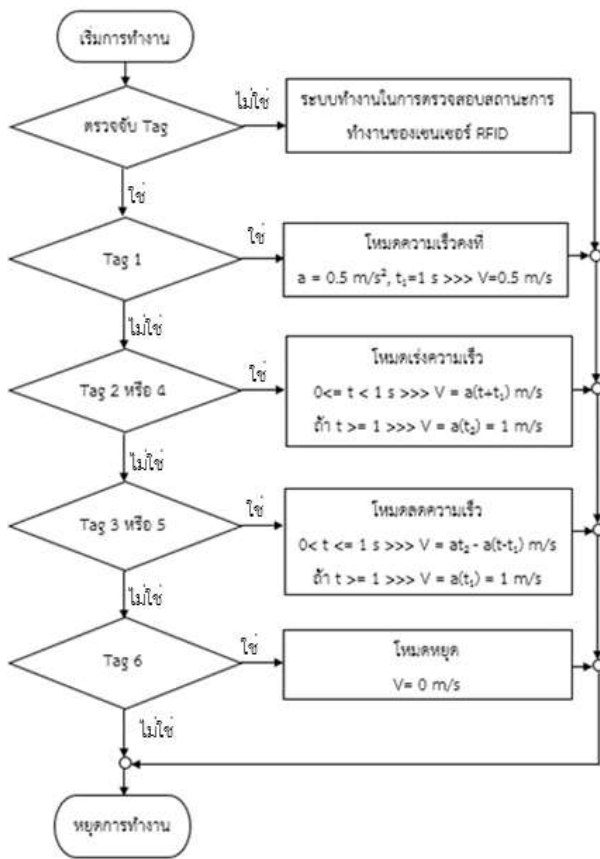


รูปที่ 14 ตำแหน่งติดตั้ง RFID Tag บนราง



รูปที่ 15 การออกแบบโปรไฟล์ความเร็วของระบบจากสถานี 1 ไป 2

จากรูปที่ 15 ช่วงเวลา t_3 ถึง t_4 คือช่วงที่รถชะลอเข้าโค้ง และช่วงเวลา t_5 ถึง t_6 คือช่วงที่รถออกจากโค้ง แผนผังอธิบายการออกแบบดังรูปที่ 16 ในส่วนพารามิเตอร์ทั้งหมดสามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ตามต้องการ

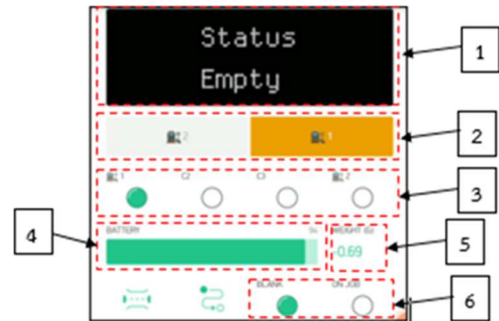


รูปที่ 16 แผนผังโปรแกรมการเคลื่อนที่จากสถานีที่ 1 ไปสถานีที่ 2

โดยรูปที่ 16 เป็นการเคลื่อนที่จากสถานี 1 ไปยังสถานี 2 เมื่อระบบเริ่มทำงานเซนเซอร์ RFID จะตรวจจับ Tag ที่ติดบนราง หากพบ Tag ข้อมูลจะถูกอ่านด้วย Arduino Mega 2560 และส่งค่าเข้าสู่โหมดการทำงานตามอัลกอริทึมที่เขียนขึ้นด้วยภาษาซีพลัสพลัส ตามสมการการเคลื่อนที่เชิงเส้นที่ประยุกต์ใช้ โดยเมื่อระบบเคลื่อนที่ถึงสถานี 2 รถจะหยุดและเริ่มระบบใหม่ หากผู้ใช้งานสั่งให้รถเคลื่อนที่ไปสถานี 2 ข้าง รถจะไม่เคลื่อนที่ แต่หากสั่งให้ไปสถานีที่ 1 รถจะแล่นโดยทำงานร่วมกับระบบตรวจจับ Tag เพื่อปรับโหมดการเคลื่อนที่ โดยสถานี 2 ไปสถานี 1 โหมดเลข Tag6 จะทำงานสลับกับ Tag1 และ Tag2 ส่วน Tag4 จะสลับการทำงานกับเลข Tag3 และ Tag5

2.6 การออกแบบอินเทอร์เฟซสำหรับสื่อสารกับผู้ใช้งาน

ระบบอินเทอร์เฟซกับผู้ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้ระบบ Blynk cloud platform ซึ่งเป็นแอปพลิเคชันสำเร็จรูปที่ออกแบบมารองรับระบบ IoT ดังแสดงในรูปที่ 17



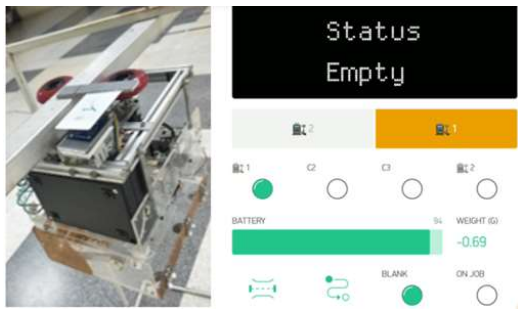
รูปที่ 17 อินเทอร์เฟซสำหรับผู้ใช้งาน

การแสดงผลบนหน้าจอประกอบด้วยการแสดง (1) สถานะการทำงาน (2) ปุ่มสั่งการ (3) ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ (4) ปริมาณแบตเตอรี่ (5) ขนาดน้ำหนักเอกสาร และ (6) สถานะตัวรถ

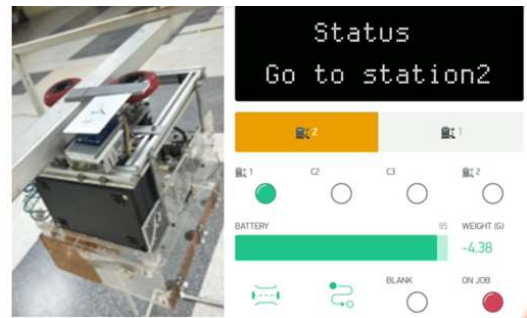
3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 การทดสอบระบบควบคุมการเดินรถไฟฟ้า

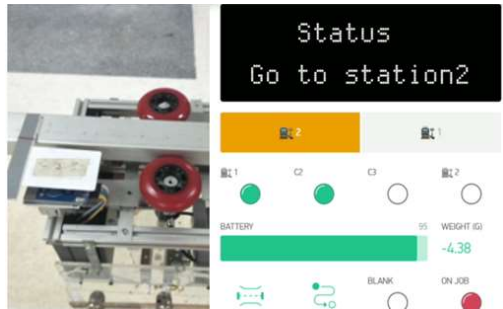
ระบบควบคุมการเดินรถไฟฟ้าถูกออกแบบให้รองรับการทำงาน 4 โหมดหลัก ได้แก่ การเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง การเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ การเคลื่อนที่ด้วยความหน่วง และการหยุดเคลื่อนที่ ขณะที่รถเริ่มเคลื่อนที่ ระบบจะเปลี่ยนโหมดการขับเคลื่อนโดยอัตโนมัติตามตำแหน่งที่กำหนด ซึ่งตรวจจับได้โดย RFID Reader ที่ติดตั้งบนตัวรถ เมื่อรถเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งที่มีการติดตั้ง RFID Tag สัญญาณจะถูกส่งไปยัง Arduino Mega 2560 ซึ่งควบคุมการทำงานของระบบให้รถสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่กำหนดได้อย่างถูกต้อง ในการทดสอบการทำงานของระบบ รถไฟฟ้าถูกใช้สำหรับการขนส่งเอกสารระหว่างสถานีเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของตำแหน่งรถขณะเคลื่อนที่ ดังแสดงในรูปที่ 18 ซึ่งแสดงตำแหน่งของรถขณะเคลื่อนที่ผ่านสถานี



(ก) ตำแหน่งของรถขณะอยู่ที่สถานีที่ 1 สถานะว่าง



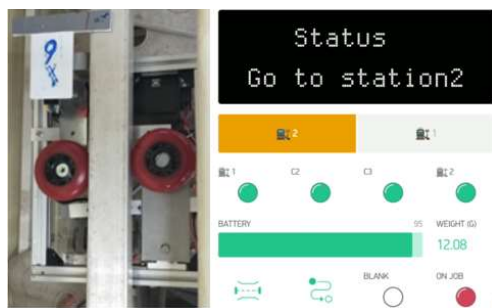
(ข) ตำแหน่งของรถขณะอยู่ที่สถานีที่ 1 สถานะกำลังทำงาน



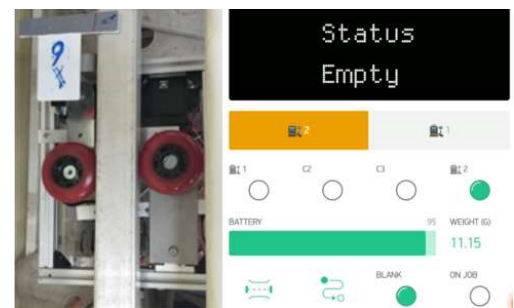
(ค) ตำแหน่งของรถขณะอยู่ที่จุดที่ 2 สถานะกำลังทำงาน



(ง) ตำแหน่งของรถขณะอยู่ที่จุดที่ 5 สถานะกำลังทำงาน



(จ) ตำแหน่งของรถขณะอยู่ที่สถานีที่ 2 สถานะกำลังทำงาน



(ฉ) ตำแหน่งของรถขณะอยู่ที่สถานีที่ 2 สถานะว่าง

รูปที่ 18 ตำแหน่งของรถขณะเคลื่อนที่ผ่านสถานี

จากผลการทดลองผู้ใช้งานสามารถควบคุมรถผ่านระบบ IoT ด้วยแอปพลิเคชัน Blynk ที่ติดตั้งบนอุปกรณ์มือถือ เมื่อเลือกสถานีปลายทาง รถสามารถเคลื่อนที่จากสถานีต้นทางไปยังสถานีปลายทางได้โดยอัตโนมัติ ขณะรถแล่นระหว่างสถานี ระบบสามารถแจ้งเตือนสถานะด้วยแสงและเสียง ระบบส่งข้อมูลการทำงาน (เช่น ตำแหน่งปัจจุบันและสถานะการทำงาน) ขึ้นไปยังเซิร์ฟเวอร์ของแอปพลิเคชัน Blynk เพื่อแสดงผลบนหน้าจอของผู้ใช้งาน ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมและติดตามการทำงานของรถไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพและตอบสนองความต้องการ

สำหรับการขนส่งเอกสารระหว่างสถานีได้ดี ผลการทดสอบระยะอ่านค่าของ RFID เพื่อใช้ในการติดตั้ง แสดงในตารางที่ 2

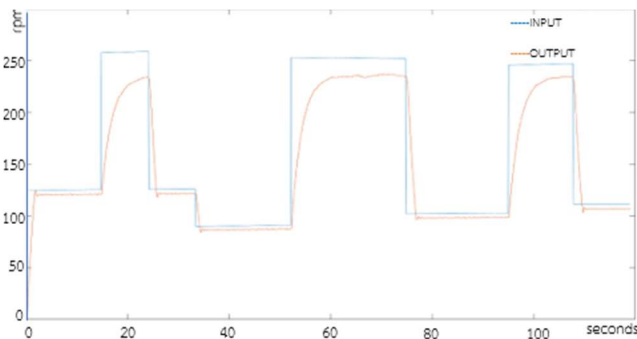
ตารางที่ 2 ระยะการอ่านค่าของ RFID

ระยะการทดสอบ (cm)	ผลการทดสอบ	
	อ่านค่าสัญญาณ	ส่งสัญญาณ
1	พบ	ส่ง
2	พบ	ส่ง
3	พบ	ส่ง
4	พบ	ส่ง
5	ไม่พบ	ไม่ส่ง
6	ไม่พบ	ไม่ส่ง

จากตารางที่ 2 พบว่าควรติดตั้ง RFID Tag ห่างจาก RFID Reader ไม่เกิน 4 เซนติเมตร เนื่องจากเป็นช่วงในการอ่านค่าของเซนเซอร์ RFID

3.2 การทดสอบระบบขับเคลื่อนรถไฟฟ้าขนส่งเอกสาร

จากการออกแบบโปรไฟล์ความเร็วการเคลื่อนที่ของรถที่พัฒนาขึ้นงานวิจัยนี้ ใช้การออกแบบโปรไฟล์สี่เหลี่ยมคางหมูเพื่อกำหนดค่าความเร็ว ดังนั้นค่าความเร็วถูกกำหนดในช่วง 0.25 ถึง 1 m/s หรือ 60 ถึง 250 rpm ซึ่งเป็นช่วงความเร็วการใช้งาน ผลการออกแบบดังรูปที่ 19 (เส้นสีน้ำฟ้า) เพื่อทดสอบการควบคุมความเร็วแบบติดตาม เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบโดยการทดลองจะออกแบบให้เป็นระบบเปิด (Open loop) และทดสอบเสถียรภาพของระบบควบคุม PI หลังจากการปรับจูนรูปที่ 21 สำหรับการควบคุมความเร็วรอบผลดังรูปที่ 19 (เส้นสีแดง) เมื่อมีการใส่ค่านำหนักเข้าไปในระบบ

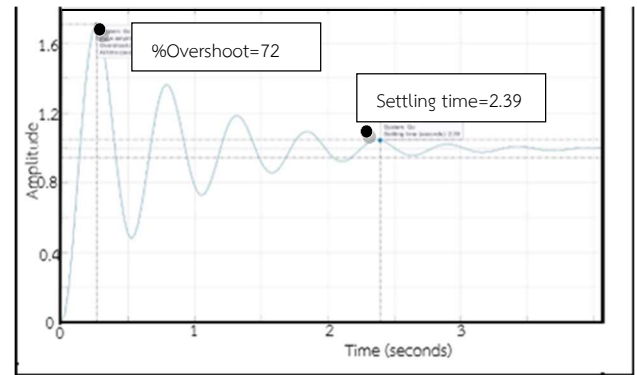


รูปที่ 19 ผลการติดตามความเร็วของระบบจากการทดสอบด้วย MATLAB

จากนั้นสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบนี้ได้มาจากการระบุเอกลักษณ์ (System Identification) โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างอินพุต (แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับมอเตอร์) และเอาต์พุต (ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์) การดำเนินการประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้ การรวบรวมข้อมูลการระบุเอกลักษณ์ ได้สอดคล้องดังสมการที่ 17 ทำการเปรียบเทียบระหว่างผลการตอบสนองของระบบจริงและผลจากแบบจำลอง โดยใช้เกณฑ์ Mean Square Error (MSE) เพื่อประเมินข้อผิดพลาด ผลการประเมินพบว่าแบบจำลองที่ได้

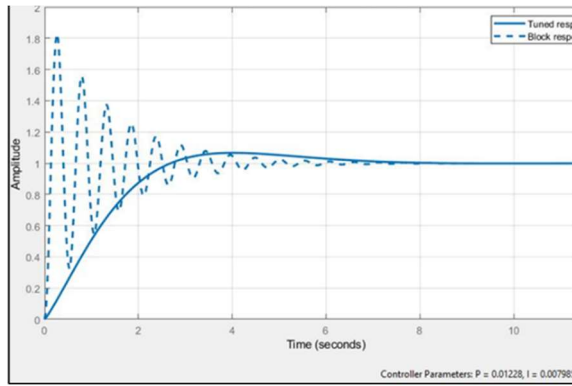
มีความแม่นยำ 86.24% ในการแสดงพฤติกรรมของระบบจริง ผลการตอบสนองของระบบจริงดังรูปที่ 20

$$G(s) = \frac{1265}{s^2 + 94.14s + 1383} \quad (17)$$



รูปที่ 20 ผลการตอบสนองของระบบจริง

จากรูปที่ 20 คือผลการตอบสนองจริงของระบบที่ออกแบบค่า Input จากค่าแรงดันไฟฟ้า และค่า Output เป็นค่าความเร็วรอบ พบว่าระบบมีค่าการพุ่งเกินของระบบเท่ากับ 72% และค่า Settling time เท่ากับ 2.39 sec ที่ 5% error ดังนั้น จึงได้ปรับผลการตอบสนองใหม่เพื่อให้ระบบทำงานได้ราบเรียบขึ้น โดยนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเขียนลงใน Block Simulink ของระบบควบคุมแบบปิด โดยเลือกใช้ตัวควบคุมแบบพีไอเนื่องจากมอเตอร์เป็นระบบที่มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แบบ Second order และระบบเป็นประเภทศูนย์ รวมถึงตัวค่าของพารามิเตอร์การควบคุม Derivative Controller (D-Controller) เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบที่รุนแรงกับระบบทำให้ปรับจูนให้เหมาะสมได้ยาก ดังนั้นค่าเหมาะสมของตัวควบคุม PI มีค่า 0.0123 และ 0.008 ตามลำดับ ผลการตอบสนองใหม่แสดงดังรูปที่ 21 พบว่าการพุ่งเกินมีค่าลดลงเหลือ 8%



รูปที่ 21 การปรับค่าตัวควบคุมพีโอด้วย MATLAB

การทดสอบการติดตามความเร็วโปรไฟล์สองกรณี คือ (1) กรณีวิ่งจากสถานี 1 ไปสถานี 2 และ (2) กรณีที่วิ่งจากสถานี 2 กลับไปที่สถานี 1 เพื่อจำลองสถานการณ์การใช้งานจริง รวมถึงทดลองกรณีที่ไม่มีโหลด และกรณีมีโหลดจากการบรรทุกทุกเอกสาร ก่อนการทดสอบได้ติด RFID Tag บนราง โดยลักษณะรางจากมุมมองด้านบนและมุมมองด้านข้างแสดงในรูปที่ 22 และ 23 ตามลำดับ

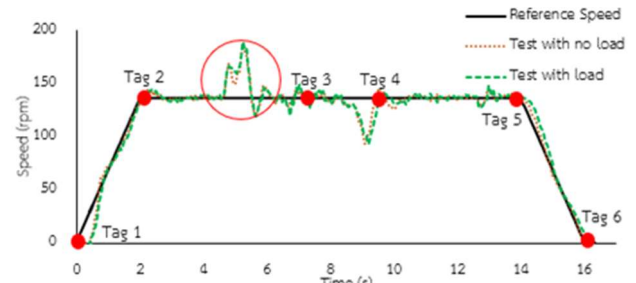


รูปที่ 22 ลักษณะรางจากมุมมองด้านบน



รูปที่ 23 ลักษณะรางจากมุมมองด้านหน้า

จากรูปที่ 22 และ 23 แสดงค่าตำแหน่งด้วยหมายเลข RFID Tag ตั้งแต่เลข 1 (Tag1) ถึงเลข 6 (Tag6) โดยที่สถานี 1 เป็น Tag1 และสถานีที่ 2 เป็น Tag6 ในรูปที่ 23 แสดงระยะทางที่ติดตั้งไว้ด้านบนของเส้นกราฟด้วย ดังนั้น ในการทดสอบการติดตามความเร็วโปรไฟล์โดยติดตั้ง Tag3A ที่ตำแหน่งก่อนเข้าทางโค้งดังรูปที่ 22 และ 23 ทำการทดสอบซ้ำ 3 รอบ ด้วยโปรไฟล์ความเร็วแบบสี่เหลี่ยมคางหมูที่ไม่ได้ใช้ RFID ปรับโหมดความเร็ว โดยโปรไฟล์ความเร็วสูงสุดที่ 0.5 เมตรต่อวินาที หรือ 120 rpm ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 24



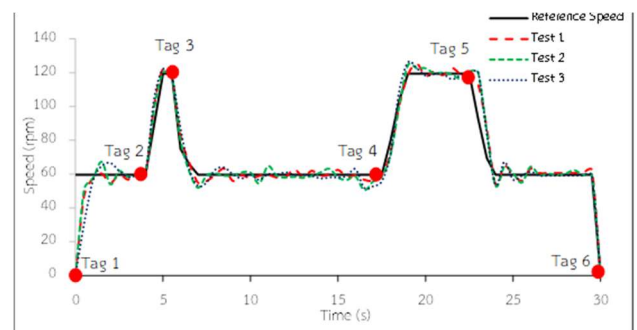
รูปที่ 24 ผลการทดสอบความเร็วโปรไฟล์สี่เหลี่ยมคางหมู

จากรูปที่ 24 พบว่าระบบมีค่าพุ่งเกินเกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 20% ในจังหวะรลดทางขึ้น เมื่อเทียบกับกราฟความสูงของรางดังรูปที่ 23 ดังนั้น จึงได้ออกแบบโปรไฟล์ความเร็วใหม่โดยการนำ Tag3A ติดที่ตำแหน่ง 3B ดังรูปที่ 25 และใช้ RFID ปรับโหมดความเร็วเพื่อให้รลดความเร็วก่อนลงทางขึ้น ทำการทดสอบซ้ำ 3 รอบ ได้ผลดังรูปที่ 26 พบว่าเมื่อลดความเร็วก่อนลงทางขึ้น ระบบมีผลการตอบสนองดีขึ้น โดยค่าพุ่งเกินลดลงเหลือเพียง 8%

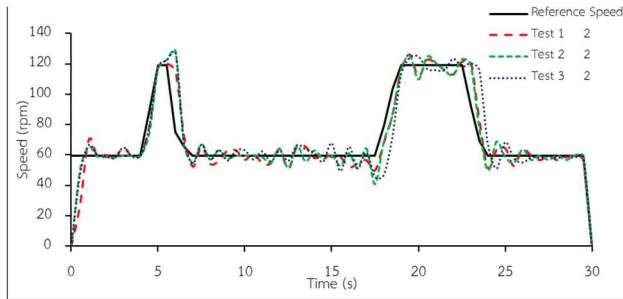


รูปที่ 25 ตำแหน่งการติดตั้ง RFID หมายเลข 3

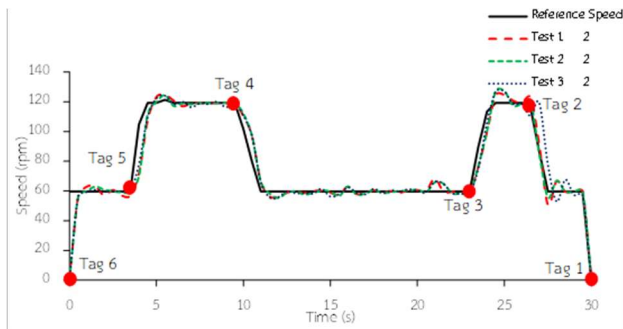
เมื่อได้ตำแหน่งการติดตั้ง RFID ที่เหมาะสมที่ทำให้รลดความเร็วได้ราบเรียบขึ้น จึงได้ทดลองติดตามความเร็วโปรไฟล์ของรถ โดยความเร็วสูงสุดเท่ากับ 0.5 m/s และต่ำสุดเท่ากับ 0.25 m/s ทดสอบเล่นทั้งกรณีมีโหลดและไม่มีโหลด ได้ผลดังรูปที่ 26 ถึง 29



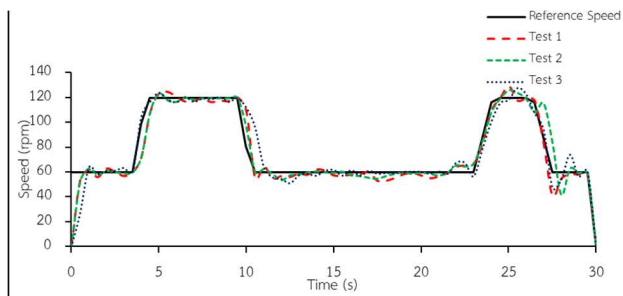
รูปที่ 26 โปรไฟล์ความเร็วจากสถานี 1 ไป 2 กรณีไม่มีโหลด



รูปที่ 27 โปรไฟล์ความเร็วจากสถานี 1 ไป 2 กรณีมีโหลด 2.5 kg



รูปที่ 28 โปรไฟล์ความเร็วจากสถานี 2 ไป 1 กรณีไม่มีโหลด



รูปที่ 29 โปรไฟล์ความเร็วจากสถานี 2 ไป 1 กรณีมีโหลด 2.5 kg

ผลการทดสอบการติดตามความเร็วในช่วง 0.25 ถึง 0.5 m/s พบว่า ระบบสามารถขับเคลื่อนรถได้สอดคล้องกับโปรไฟล์ความเร็วที่กำหนด ทั้งในกรณีที่มีโหลดและไม่มีโหลดจากการบรรทุกเอกสาร อย่างไรก็ตาม, ในการทดสอบพบว่าการสั่นสะเทือนของกราฟการเคลื่อนที่ ซึ่งสาเหตุหลักเกิดจากการรบกวนทางกล เช่น การติดตั้งรางที่ไม่มั่นคงเพียงพอ ส่งผลให้เกิดการสั่นสะเทือนของรางขณะการเคลื่อนที่ของรถ นอกจากนี้, การใช้รางอลูมิเนียมที่ติดตั้งด้วยการเชื่อมยังส่งผลต่อผิวสัมผัสระหว่างรางและล้อทำให้เกิดความขรุขระ ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนดังกล่าว

4 สรุปและวิจารณ์

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาระบบควบคุมและขับเคลื่อนรถไฟฟ้าสำหรับขนส่งเอกสารระหว่างอาคาร โดยมุ่งเน้นการออกแบบที่มีความแม่นยำ เสถียรภาพ และใช้งานได้ในบริบทของ IoT โดยมีการดำเนินงานและผลลัพธ์ดังนี้

4.1. การออกแบบระบบ

ประกอบด้วย **โปรไฟล์ความเร็ว**: ใช้โปรไฟล์แบบสี่เหลี่ยมคางหมูเพื่อควบคุมความเร็วในช่วง 0.25–0.5 m/s (60–120 rpm) โดยความเร็วสูงสุดที่เลือกใช้คือ 120 rpm ซึ่งเหมาะสมกับระยะทางระหว่างสถานีและลักษณะการใช้งานจริง โดยช่วยลดแรงกระแทกและเพิ่มความราบรื่นในการเคลื่อนที่ การกำหนดค่าความเร่งและช่วงเวลา t_1 – t_4 ได้จากการคำนวณความเร็วให้เหมาะสมกับเส้นทางการเคลื่อนที่เช่น การเข้าโค้ง การลงทางชัน เป็นต้น เพื่อให้การเปลี่ยนโหมดความเร็วเป็นไปอย่างเหมาะสม **การควบคุมตำแหน่งด้วย RFID**: ใช้ RFID Reader และ Tag เพื่อตรวจจับตำแหน่งของรถในแต่ละจุดสำคัญบนราง โดยข้อมูลจาก RFID ถูกนำไปใช้ในการปรับโหมดความเร็วแบบอัตโนมัติ ซึ่งช่วยเพิ่มความแม่นยำในการเคลื่อนที่และลดค่าพ่วงเกินในทางลาดชัน **ระบบ IoT**: ใช้ Blynk Cloud Platform ในการสื่อสารข้อมูลระหว่างรถและผู้ใช้ผ่านแอปพลิเคชันมือถือ โดยสามารถแสดงสถานะของรถ เช่น ตำแหน่ง น้ำหนักบรรทุก และระดับแบตเตอรี่ อย่างไรก็ตาม แม้ระบบจะแสดงข้อมูลแบบต่อเนื่อง แต่ยังไม่มีการยืนยันว่าการควบคุมเป็นแบบเรียลไทม์อย่างแท้จริง เช่น การสั่งหยุดรถขณะเคลื่อนที่ หรือการปรับความเร็วระหว่างทาง **ระบบควบคุม** ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบควบคุมมอเตอร์ โดยใช้วิธีการระบุเอกลักษณ์ของระบบ (System Identification) ซึ่งกำหนดให้แรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้ามอเตอร์เป็นสัญญาณอินพุต และความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์เป็นสัญญาณเอาต์พุต ข้อมูลจากการทดลองถูกนำไปวิเคราะห์ด้วย MATLAB เพื่อสร้างแบบจำลองของระบบ การออกแบบตัวควบคุม PI: กำหนดค่า Overshoot ไม่เกิน 10% และ Settling Time ไม่เกิน 3 วินาที เพื่อให้ระบบตอบสนองได้รวดเร็วและราบรื่น โดยเลือกใช้ตัวควบคุม PI เนื่องจากระบบมีลักษณะเป็น Second Order และต้องการหลีกเลี่ยงผลกระทบจากเทอมอนุพันธ์ (D) ที่อาจทำให้ระบบไม่เสถียร จากการปรับปรุงใน

MATLAB พบว่า $K_p = 0.0123$ และ $K_i = 0.008$ ให้ผลตอบสนองที่ดีที่สุด โดยลดค่าพุงเกินจาก 72% เหลือ 8% และ Settling Time อยู่ที่ 2.39 วินาที

4.2. ผลการทดลองและผลลัพธ์

การควบคุมตำแหน่ง: ระบบสามารถระบุตำแหน่งได้อย่างแม่นยำ โดยระยะอ่านค่าของ RFID เหมาะสมที่ไม่เกิน 4 เซนติเมตร *การติดตามโปรไฟล์ความเร็ว:* รถสามารถเคลื่อนที่ได้ตามโปรไฟล์ความเร็วที่กำหนด ทั้งกรณีมีและไม่มีน้ำหนักบรรทุก การปรับตำแหน่ง RFID ช่วยลดค่าพุงเกินในทางลาดชันจาก 20% เหลือ 8% *ความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์:* แบบจำลองมีความแม่นยำ 86.24% เมื่อเปรียบเทียบกับระบบจริง *การปรับปรุงเสถียรภาพ:* หลังปรับจูนค่าควบคุม PI ค่าพุงเกินลดลงจาก 72% เหลือ 8% และค่า Settling Time อยู่ที่ 2.39 วินาที

4.3. ความสอดคล้องและประโยชน์ของงานวิจัย

ระบบที่พัฒนาขึ้นมีความสอดคล้องกับเป้าหมายการออกแบบ โดยสามารถเพิ่มความแม่นยำ ความราบรื่น และเสถียรภาพของการขนส่งเอกสารได้สำเร็จ แม้ระบบ IoT ยังมีข้อจำกัดด้านการควบคุมแบบเรียลไทม์ แต่สามารถแสดงสถานะได้อย่างต่อเนื่องและมีศักยภาพในการพัฒนาเพิ่มเติมในอนาคต ระบบนี้จึงสามารถใช้งานจริงในสถานการณ์ขนส่งอัตโนมัติได้ และเป็นต้นแบบสำหรับการพัฒนาระบบขนส่งในอนาคต

Contribution หลัก

-การออกแบบและปรับปรุงโปรไฟล์ความเร็วเพื่อการเคลื่อนที่ที่ราบรื่น

-การประยุกต์ใช้ RFID และ IoT เพื่อเพิ่มความแม่นยำและการควบคุมแบบต่อเนื่อง

-การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการปรับจูนตัวควบคุม PI เพื่อเพิ่มเสถียรภาพในการขับเคลื่อน

งานวิจัยนี้จึงเป็นนวัตกรรมที่ผสมผสานเทคโนโลยี IoT และระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในงานขนส่งและระบบโลจิสติกส์อัตโนมัติได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กองพัน อารีรักษ์. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบรถไฟฟ้. โครงการวิจัยสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2555.
- [2] ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์, ธนัชชัย กุลรวานิชพงษ์. การหาลักษณะสมบัติความเร็วรถไฟฟ้ที่เหมาะสมที่สุดของระบบรถไฟฟ้ขนส่งมวลชนโดยใช้วิธีดิฟเฟอเรนเชียลอีโวลูชัน. *Research and Development Journal*. 2557;25(4): 59–69.
- [3] บัณริ เข้มกลัดมุกต์. การออกแบบและสร้างระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ. ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2562.
- [4] พเนตร สุขสิงห์. การออกแบบและสร้างระบบควบคุมรถไฟฟ้แบบไร้คนขับขนาดเล็ก. ปรินญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี; 2555.
- [5] เผด็จ แสนเกษม. การออกแบบเครื่องกล เครื่องยนต์. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ Top Publishing; 2558.
- [6] Adriansyah A, Wibowo M, Ihsanto E. Design of pet feeder using web server as Internet of Things application. In: *International Conference on Electrical Engineering and Informatics*. 2016.
- [7] Allam T, Raju M, Kumar SS. Design of PID Controller for DC Motor Speed Control using Arduino Microcontroller. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*.2016; 3(9):790-794.
- [8] Bing G, Hairong D, Yanxin Z. Speed adjustment braking of automatic train operation system based on fuzzy-PID switching control. In: *2009 Sixth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*. IEEE; 2009.
- [9] Çetinarslan CS, Sahin M. Determining the influence of surface roughness on materials flow of various materials using grid lines during cold forming. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2010;62(1):4–11.
- [10] Ding Y, Jin M, Li S, Feng D. Smart logistics based on the internet of things technology: an

- overview. *International Journal of Logistics-research and Applications*. 2020;24(4):1-23.
- [11] Faieghi MR, Azimi SM. Design an optimized PID controller for brushless DC motor by using PSO and based on NARMAX identified model with ANFIS. In: *UKSim 12th International Conference on Computer Modelling and Simulation*. 2010. p. 16-21.
- [12] Gowthaman E, Vinodhini V, Hussain MY, Dhinakaran SK, Sabarinathan T. Speed control of permanent magnet brushless DC motor using hybrid fuzzy proportional plus integral plus derivative controller. *Energy Procedia*. 2017; 117:1101-1108.
- [13] Hat MK, Ibrahim BSKK, Mohd TAT, Hassan MK. Model based design of PID controller for BLDC motor with implementation of embedded Arduino mega controller. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015;10(19): 8588-8594.
- [14] Kulworawanichpong T. Optimising AC *Electric Railway Power Flows with Power Electronic Control*. PhD Thesis, University of Birmingham, UK; 2003.
- [15] Kim K. Optimal Train Control on Various Track Alignments Considering Speed and Schedule Adherence Constraints. PhD Thesis, New Jersey Institute of Technology, USA; 2010.
- [16] Liu GF, Li HW. Design of stepper motor position control system based on DSP. In: *2017 2nd International Conference on Machinery, Electronics and Control Simulation (MECS 2017)*. Atlantis Press; 2016.
- [17] Lippert D, Spektor P. *Rolling Resistance and Industrial Wheels*. Hamilton White Paper. Hamilton, HamiltonCaster.com. 2013;(11).
- [18] Siegwart R, Nourbakhsh I, Scaramuzza D. *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. 2nd ed. MIT Press; 2011.
- [19] Patil RC, Bobade CM. Speed control of Permanent Magnet Brushless DC motor with Parameter optimization. *IRJET International Research Journal of Engineering and Technology*. 2020;7(6):1612-1619.
- [20] Sangngern SJ. Application of LabVIEW Program for Calibration of Optical Measuring Instruments. Engineering and Technology Applications Research Program of Mahasarakham University. 2019;22(2):121-129.
- [21] Sung GM, Shen YS, Keno T, Yu CP. Internet-of-Things based controller of a three-phase induction motor using a variable-frequency driver. In: *2019 IEEE Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE)*. IEEE; 2019.
- [22] Shamseldin MA, EL-Samahy AA. Speed control of BLDC motor by using PID control and self-tuning fuzzy PID controller. In: *15th International Workshop on Research and Education in Mechatronics (REM)*. IEEE; 2014.
- [23] Mahendiran TV, Thanushkodi K. A new improved algorithm for speed control of brushless DC motor. In: *IEEE International Conference on Current Trends in Engineering and Technology (ICCTET'13)*. 2013.
- [24] Vinnakota BP. Motor control with arduino: A case study in data-driven modeling and control design. 2012.
- [25] Wang Y, Hou Z, Li X. A novel automatic train operation algorithm based on iterative learning control theory. In: *2008 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics*. IEEE; 2008.
- [26] Zhang L, Liu L, Shen J, Lai J, Wu K, Zhang Z, et al. Research on stepper motor motion control based on MCU. In: *2017 Chinese Automation Congress (CAC)*. IEEE; 2017.