

การออกแบบกำลังขับเคลื่อนและการทดสอบระบบบังคับหยุดการเคลื่อนที่ของ รถไฟฟ้าต้นแบบ

นพพร เปรมใจ¹ มานพ แยมแพง^{1*} มนพร คุปตาศา¹ ปณิตธร ศลิขภูธรวัฒน์¹ อภิสัทธี เหมือนเมือง¹
และศราวุฒิ วิมลวชิรเมธี¹
nopporn_p@rmutt.ac.th¹, manop.y@en.rmutt.ac.th^{1*}, manaporn_g@rmutt.ac.th¹,
punnathorn_s@rmutt.ac.th¹, apisit_m@mail.rmutt.ac.th¹, klasarawut221140@gmail.com¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

(Received: 5-Oct-2023 Revised: 8-Nov-2023 Accepted: 10-Nov-2023)

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระบบขับเคลื่อนและระบบบังคับหยุดการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าต้นแบบโดยการใช้มอเตอร์แกนซึก ควบคุมการทำงานด้วยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูโน วิ่งบนทางรถไฟขนาดความกว้าง 0.459 เมตร โดยมีสถานีจำลองทั้งหมด 3 สถานี ระยะทางรวม 100 เมตร แต่ละสถานีมีระยะห่าง 50 เมตร การทดสอบระบบบังคับหยุดการเคลื่อนที่ของรถไฟ ออกเป็น 2 ส่วน คือ 1.การเปลี่ยนแปลงความเร็วรถไฟ 3 ค่า คือ ความเร็วที่ 2.7 3.9 และ 4.5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง 2.การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักรถไฟมี 3 ค่า คือ 360 420 และ 480 กิโลกรัม ผลการทดลอง พบว่า ความเร็วและน้ำหนักรถไฟจำลองที่เหมาะสมที่ส่งผลให้รถไฟหยุดใกล้สถานีมากที่สุด คือ 3.9 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และน้ำหนักรถไฟ 480 กิโลกรัม โดยมีระยะหยุดเฉลี่ยขาไป และขากลับ -3.0 และ -3.2 เซนติเมตร (หยุดก่อนถึงสถานี) ตามลำดับ

คำสำคัญ: รถไฟ ระบบเบรก สถานี การขับเคลื่อน

Design of Propulsion Power and Test of Stopping Systems of a Prototype Train

Nopporn Preamjai¹, Manop Yamfang^{1*}, Manaporn Guptasa¹, Punnathorn Salidthanawat¹,
Apisit Muanmuang¹ and Sarawut Vimolvachirametee¹
nopporn_p@rmutt.ac.th¹, manop.y@en.rmutt.ac.th^{1*}, manaporn_g@rmutt.ac.th¹,
punnathorn_s@rmutt.ac.th¹, apisit_m@mail.rmutt.ac.th¹, klasarawut221140@gmail.com¹

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

(Received: 5-Oct-2023 Revised: 8-Nov-2023 Accepted: 10-Nov-2023)

Abstracts

The purpose of this article is to study the propulsion power and stopping systems of a prototype train using a push-pull motor linear actuator. The prototype train is controlled by an Arduino microcontroller board and runs on a 0.459-meter-wide track with a total of 3 simulated stations totaling a distance of 100 meters. Each station has a distance of 50 meters. The test of the stopping systems of the train is divided into 2 parts: 1. Changing the train speed: There are three speeds, including 2.7, 3.9, and 4.5 kilometers per hour. 2. The change in weight of the train has three values: 360, 420, and 480 kilograms. The experimental results found that the appropriate speed and weight of the prototype train that causes the train to stop closest to the station is 3.9 kilometers per hour and the train's weight is 480 kilograms. Furthermore, there is an average stopping distance for the outbound and return trips of -3.0 and -3.2 centimeters (stopping before reaching the station), respectively.

Keywords: train, brake system, station, propulsion power

1. บทนำ

ในการพัฒนาประเทศที่ผ่านมามุ่งเน้นการพัฒนาเศรษฐกิจเป็นหลักทำให้มีการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้กรุงเทพมหานครกลายเป็นเมืองใหญ่เพียงเมืองเดียวของประเทศที่เป็นศูนย์กลางความเจริญในทุก ๆ ด้าน ทำให้เกิดการอพยพย้ายถิ่นเข้ามาอาศัยในกรุงเทพมหานครมากขึ้น โดยมีประชากรโดยรวมประมาณ 9 ล้านคน การเพิ่มขึ้นของประชากรอย่างมากทำให้เกิดปัญหาในอีกหลายด้าน ซึ่งหนึ่งในปัญหาที่มีความสำคัญและรุนแรงมากขึ้นในปัจจุบันนี้คือปัญหาด้านการจราจร ส่งผลให้เกิดความสูญเสียทางเศรษฐกิจและสังคมอย่างมหาศาล [1] ปัจจุบันการแก้ไขปัญหาการจราจรทางถนนและสาธารณูปโภคภายในประเทศนั้นรัฐบาลได้มีการนำระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมาใช้ นอกเหนือจากระบบขนส่งมวลชนเดิมที่มีอยู่ในปัจจุบันเพื่อช่วยบรรเทาปัญหาการจราจรที่เป็นอยู่ เพื่อลดระยะเวลาในการเดินทางและลดการเดินทางโดยรถยนต์ส่วนบุคคล ช่วยในการเชื่อมโครงข่ายการคมนาคมขนส่งในเมืองกับการขนส่งชานเมืองให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น [2] โดยองค์ประกอบสำคัญของการเดินทางคือ ทางรถไฟ รถจักร รถพ่วง ระบบอาณัติสัญญาณรถไฟ และสถานีรถไฟ [3] รถไฟเป็นยานพาหนะขนส่งทางบกขนาดใหญ่ที่มีกำลังสูงและมีน้ำหนักมาก การเคลื่อนที่ของรถไฟนั้นถูกจำกัดอยู่บนเส้นทางเฉพาะคือรางรถไฟ จึงทำให้รถไฟมีความไหลลื่นค่อนข้างสูง เนื่องด้วยขนาดของรถไฟแล้วหากรถไฟต้องการเบรกเพื่อหยุดอาจต้องใช้ระยะในการเบรก และด้วยน้ำหนักของรถไฟที่ค่อนข้างมากทำให้มีแรงเฉื่อยที่สูง [4] การเบรคนั้นจึงมีความสำคัญอย่างมากในเรื่องความปลอดภัย ซึ่งหลักการเบรกของรถไฟนั้นมีวัตถุประสงค์เดียวกันกับรถยนต์ทั่วไปคือ เพื่อจะทำการหยุดรถที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว ในการเบรกของรถยนต์นั้นจะใช้ผ้าเบรกกดลงที่จานเบรกจึงเกิดแรงเบรกขึ้นที่ล้อรถ โดยแรงเบรกที่เกิดขึ้นนี้จะพยายามหยุดล้อที่กำลังหมุน โดยอาศัยแรงเสียดทานระหว่างหน้ายางกับผิวถนน ส่วนการเบรกของรถไฟนั้นก็อาศัยหลักการเดียวกันเพียงแต่รถไฟจะประกอบไปด้วยรถพ่วงหลายคันต่อกัน จึงทำให้

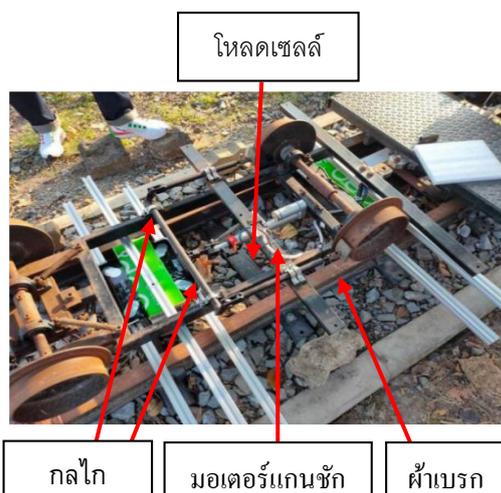
มีน้ำหนักมากกว่ามากและจะต้องทำการเบรกพร้อม ๆ กัน เพื่อไม่ให้เกิดการกระชากซึ่งอาจทำให้ผู้โดยสารรู้สึกไม่สบายและไม่ปลอดภัย โดยระบบเบรกรถไฟในปัจจุบันนิยมใช้กันอยู่ 2 ระบบ คือ 1.ระบบเบรกแบบไฟฟ้า (Electro Dynamics Brake) หลักการทำงานคือ เมื่อมอเตอร์ทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้าพลังงานที่เกิดจากการขับเคลื่อนก็จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ไดนามิคเบรก (Dynamic Brake) ส่วนที่ 2 รีเจนเนอเรทีฟ (Regenerative Brake) 2.ระบบเบรกแบบลม (Electro Pneumatic Brake) หลักการทำงานระบบเบรกแบบลมเป็นการเบรกต่อจากการเบรกแบบไฟฟ้าเมื่อความเร็วของรถไฟลดลงเหลือ 8 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เบรกแบบไฟฟ้าจะถูกแทนที่ด้วยระบบเบรกโดยใช้ลม เบรกแบบลมจะทำงานโดยจะเปลี่ยนลมที่สะสมอยู่ในรูปของแรงกดอากาศให้กลายเป็นแรงเสียดทานไปยังเบรกดีสก์ที่อยู่ทีล้อและส่งจากล้อลงสู่ราง เพื่อให้ล้อรถไฟที่เคลื่อนที่หยุดตามระยะที่กำหนดไว้ ซึ่งระบบเบรกที่นำมาศึกษาเป็นระบบเบรกผ่านแรงเสียดทานระหว่างล้อกับราง (Adhesion Brake) เป็นระบบเบรกกลโดยใช้ผ้าเบรกกดจานเบรกที่ล้อ [5], [6] ระบบเบรกเป็นระบบที่มีความสำคัญอย่างมากในรถไฟ เนื่องจากมีผลกระทบโดยตรงเรื่องความปลอดภัยต่อผู้โดยสาร โดยมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบเบรกของรถไฟ เช่น การทดสอบระบบควบคุมการเบรกแบบคืนพลังงานของรถไฟที่ขับเคลื่อนโดยเครื่องจักรกลไฟฟ้าชนิดสวิตซ์รีลักแตนซ์โดยใช้มอเตอร์สวิตซ์รีลักแตนซ์ ในการควบคุมการเบรกแบบคืนพลังงาน ซึ่งระบบควบคุมใช้ความเร็วตัวมอเตอร์ลากจูงและกระแสมาเป็นตัวบ่อนกลับเพื่อควบคุมให้โหมดการทำงานเปลี่ยนแปลงไปตามความเร็วของรถไฟแบบจำลอง ผลที่ได้จากชุดทดลองมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 5% [7] การเพิ่มพลังงานที่ได้จากการเบรกแบบคืนพลังงานในรถไฟ [8] การหาขนาดของตัวสะสมพลังงานให้เหมาะสมสำหรับการเบรกคืนพลังงานในระบบรถไฟใต้ดิน [9] ระบบเบรกรีเจนเนอเรทีฟ (regenerative braking) โดยใช้มอเตอร์เป็นเจนเนอเรเตอร์ชะลอรถ [10]

บทความนี้จึงได้นำเสนอการออกแบบระบบขับเคลื่อนจำลองการเคลื่อนที่ของรถไฟและระบบเบรกโดยการใช้อุปกรณ์แกนชัก (Linear Actuator) เป็นตัวต้นกำลังต้นกลไกเบรกพร้อมกับโพลดเซลล์ในการหยุดการทำงานเบรก ใช้เซนเซอร์ตรวจจับวัตถุโฟโตอิเล็กทริกแบบอินฟราเรดตรวจหาระยะที่เปลี่ยนไปรถไฟที่สถานีรถไฟมีบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมการทำงาน ระบบเบรกมอเตอร์แกนชักมีลักษณะการทำงานคล้ายกับระบบเบรกที่ใช้จริงของรถไฟเพียงแต่ใช้ระบบกลไกมาใช้ในการเบรกโดยไม่มีสารทำงานเช่น ลมหรือน้ำมันมาใช้ในการเบรกเหมือนกับระบบเบรกของรถไฟที่ใช้งานอยู่

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 การออกแบบ

เพื่อศึกษาระบบการหยุดการเคลื่อนที่ของรถไฟจำลองซึ่งมีขนาดความกว้างรางรถไฟอยู่ที่ 0.459 เมตร ณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยการออกแบบโครงสร้างระบบเบรกเป็นกลไกระบบดรัมเบรก ใช้อุปกรณ์แกนชักควบคุมกลไกการทำงานผ่านบอร์ดควบคุม ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ระบบเบรกรถไฟจำลอง

2.2 การคำนวณหาขนาดมอเตอร์

ในการเลือกขนาดมอเตอร์ของงานวิจัยนี้ ได้กำหนดภาระงานที่รถไฟจำลองต้องรับดังนี้

1. รถไฟจำลองรับน้ำหนักถ่วงและอุปกรณ์ต่างๆ รวมน้ำหนักทั้งสิ้น 480 กิโลกรัม
2. ทางรถไฟจำลองที่ใช้ทดลองเป็นทางวิ่งในแนวราบ (ไม่มีทางชัน)
3. รถไฟจำลองสามารถวิ่งได้ความเร็วสูงสุดไม่เกิน 2 เมตรต่อวินาที

2.2.1 คำนวณหาแรงต้านทานการ

หมุนของล้อเหล็กกับรางเหล็ก [11]

$$F_r = Wk_R \quad (1)$$

2.2.2 คำนวณหาแรงต้านทานจาก

อากาศ [12]

$$R_a = k_a \times A \times v^2 \quad (2)$$

2.2.3 คำนวณหาแรงบิดของภาระ

งาน [12]

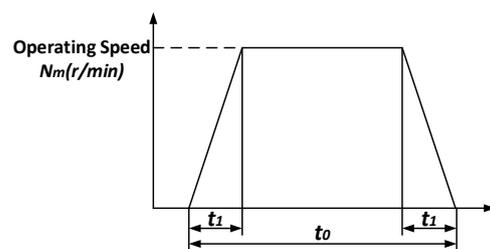
$$T_L = (F_r + R_a) \times r \quad (3)$$

2.2.4 คำนวณหาแรงบิดรวมเพื่อ

นำไปใช้เลือกมอเตอร์ดังนี้

การคำนวณหาทอร์กในการเร่งของรถไฟ[13]

$$T_a = \frac{J_L}{9.55} \times \frac{N_m}{t_1} \quad (4)$$



รูปที่ 2 กราฟโปรไฟล์ความเร็ว

การคำนวณหาโมเมนต์ความเฉื่อย [13]

$$J_L = m \left(\frac{N}{2\pi} \right)^2 \quad (5)$$

การคำนวณหาความเร็วเชิงมุมมอเตอร์ [13]

$$N_m = \frac{v}{N} \quad (6)$$

การคำนวณหาแรงบิดรวม [13]

$$T_{total} = (T_a + T_L) \times Safetyfactor \quad (7)$$

การหาแรงบิดที่ผ่านเกียร์ทดรอบ 1:10.5 [13]

$$T_R = T_{total} \times \left(\frac{1}{10.5} \right) \quad (8)$$

การคำนวณหาความเร็วมอเตอร์ผ่านเกียร์ทดรอบ 1:10.5 [13]

$$N_{M,R} = N_m \times 10.5 \quad (9)$$

จากการคำนวณหาขนาดมอเตอร์จะได้แรงบิดรวม 37.79 นิวตัน-เมตร เมื่อผ่านเกียร์ทดรอบ 1:10.5 จะได้แรงบิด เท่ากับ 3.60 นิวตัน-เมตร และความเร็วรอบที่ต้องการอย่างน้อย 2,000 รอบต่อนาที

ค่าพารามิเตอร์ (parameter) ที่ใช้คำนวณ

F_r คือ แรงต้านทานการหมุนของล้อเหล็กกับรางเหล็ก, $F_r = 9.42$ นิวตัน

W คือ แรงจากน้ำหนักของตัวรถและน้ำหนักคนที่กระทำมายังล้อทั้งหมด, $W = 4709$ นิวตัน

k_r คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านทานการกลิ้งระหว่างล้อรถกับรางเหล็ก, $k_r = 0.002$ [14]

R_a คือ แรงต้านทานอากาศ, $R_a = 2.27$ นิวตัน

k_a คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ, $k_a = 0.66$ กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [15]

A คือ พื้นที่หน้าตัดรถ, $A = 0.86$ ตารางเมตร

v คือ ความเร็วสูงสุดที่ใช้, $v = 2$ เมตรต่อวินาที

T_L คือ แรงบิดของภาระงาน, $T_L = 1.17$ นิวตัน-เมตร

r คือ รัศมีล้อ, $r = 0.1$ เมตร

T_a คือ แรงบิดในการเร่งของรถไฟ, $T_a = 15.32$ นิวตัน-เมตร

J_L คือ โมเมนต์ความเฉื่อย, $J_L = 3.08$ กิโลกรัม-ตารางเมตร

t_1 คือ เวลา, กำหนดให้ $t_1 = 4$ วินาที

m คือ มวลของตัวรถ, $m = 300$ กิโลกรัม

N คือ ระยะการเคลื่อนที่เชิงเส้นของรถต่อการหมุนของมอเตอร์ 1 รอบ, $N = 0.63$ เมตรต่อรอบ

N_m คือ ความเร็วเชิงมุมมอเตอร์ $N_m = 190$ รอบต่อนาที

T_{total} คือ แรงบิดรวม $T_{total} = 24.74$ นิวตัน-เมตร

T_R คือ แรงบิดที่ผ่านเกียร์ทดรอบ $T_R = 2.36$ นิวตัน-เมตร

$N_{M,R}$ คือ ความเร็วรอบมอเตอร์ที่ผ่านเกียร์ทดรอบ

$N_{M,R} = 1995$ รอบต่อนาที

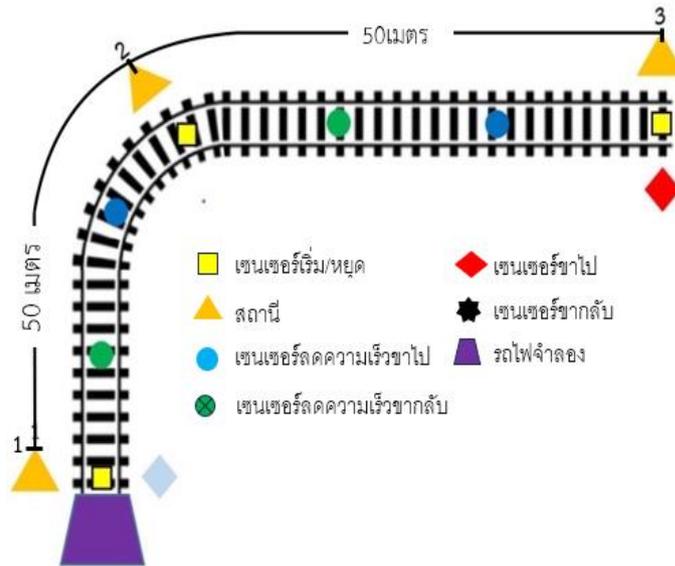
Safetyfactor คือ ค่าความปลอดภัยในการนำไปใช้ในการเลือกใช้มอเตอร์ เท่ากับ 1.5



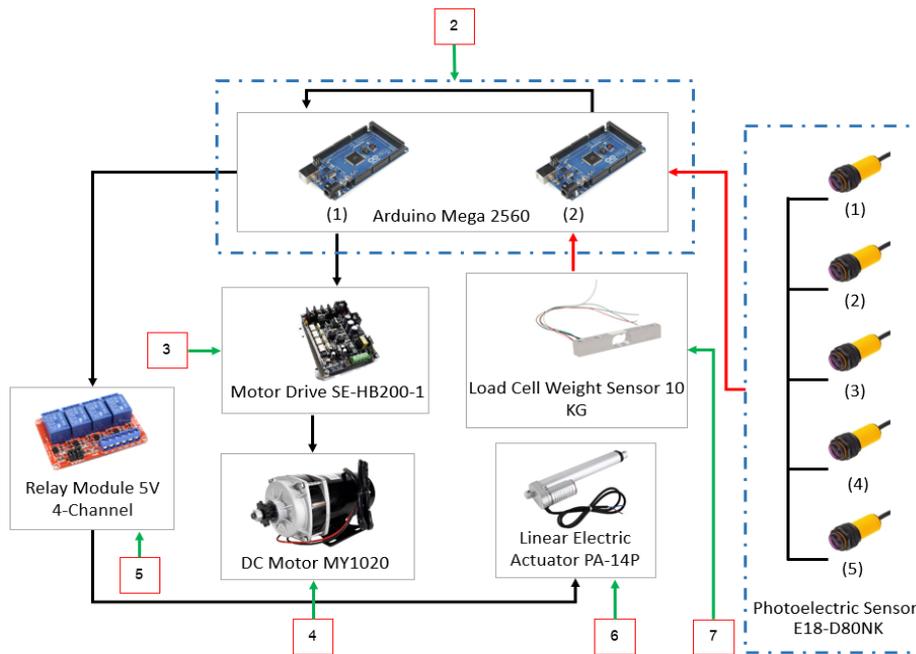
รูปที่ 3 รถไฟจำลอง

2.3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

รถไฟจำลอง ดังรูปที่ 3 สามารถรับน้ำหนักของผู้โดยสารไม่เกิน 180 กิโลกรัม ซึ่งรถไฟจำลองมีการติดตั้งตำแหน่งเซนเซอร์และเส้นทางการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 4 โดยเซนเซอร์ที่ใช้ในการเดินรถไฟจำลองประกอบด้วย เซนเซอร์เริ่มหรือหยุด เซนเซอร์ขาไป-ขากลับ เซนเซอร์ลดความเร็วขาไป-ขากลับ



รูปที่ 4 เส้นทางการเดินทางรถไฟ และตำแหน่งติดตั้งเซนเซอร์



รูปที่ 5 โครงสร้างวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมรถไฟ

การเคลื่อนที่ของรถไฟต้นแบบระบบอัตโนมัติระยะทางการเคลื่อนที่รวม 100 เมตร มี 3 สถานี แต่ละสถานีมีระยะห่าง 50 เมตร การทดสอบแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1.การเปลี่ยนแปลงความเร็วรถไฟ 3 ค่า คือ ความเร็วที่ 2.7 3.9 และ 4.5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง 2. การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักรถไฟ 3 ค่าคือ 360 420 และ 480 กิโลกรัม ซึ่งน้ำหนักที่ใช้ทั้ง 3 ค่าเป็นน้ำหนักตัวรถ

ร่วมกับน้ำหนักคนที่โดยสารประมาณ 3 คน ส่วนความเร็วที่นำมาใช้ทดลองเป็นความเร็วของตัวรถที่สามารถเคลื่อนที่ได้และมีความปลอดภัย วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมรถไฟหมายเลข (1) จากรูปที่ 5 เซนเซอร์ตรวจจับวัตถุ โฟโตอิเล็กทริกแบบอินฟราเรดเป็นตัวตรวจจับระยะห่างจากตัวรถไฟกับพื้นรางส่งค่าให้กับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูโน่หมายเลข (2)

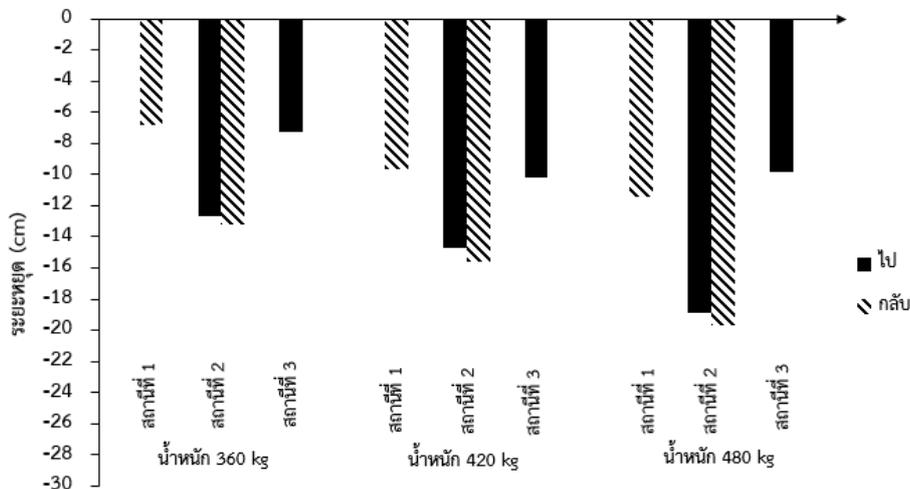
บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูโนประมวลผลควบคุมการทำงานของรถไฟ เมื่อเซนเซอร์ตรวจจับพบตำแหน่งพื้นที่เปลี่ยนไปของสถานีที่รถไฟจอดอยู่เมื่อสั่งทำงานรถไฟจะเริ่มการทำงานเคลื่อนที่ไป และในระหว่างสถานีหากเซนเซอร์ตรวจจับระยะตำแหน่งที่เปลี่ยนไปจากอุปกรณ์ที่ติดตั้งใต้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูโนจะสั่งให้อุปกรณ์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ทำให้รถไฟชะลอความเร็วลง เมื่อถึงสถานีเซนเซอร์ตรวจจับระยะที่เปลี่ยนไปได้จากตำแหน่งที่พื้นรางทำให้ระบบเบรกทำงานส่งผลให้รถไฟหยุดที่สถานี หมายเลข (3) เป็นอุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ สามารถควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์และควบคุมให้มอเตอร์หมุนกลับทางได้โดยสั่งผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูโนเป็นแบบสัญญาณพัลส์ หมายเลข (4) คือ มอเตอร์เป็นอุปกรณ์ต้นกำลังของรถไฟ หมายเลข (5) คือรีเลย์เป็นอุปกรณ์ทำหน้าที่เป็นตัวกลางระหว่างบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูโนกับมอเตอร์แกนชัก เพื่อสั่งให้มอเตอร์แกนชักเคลื่อนที่เข้า-ออก หมายเลข (6) คือ มอเตอร์แกนชักเป็นมอเตอร์เคลื่อนที่แบบเชิงเส้นขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้า DC 24 โวลต์ เพื่อนำไปใช้ในการเบรก หมายเลข (7) คือโพลเซลล์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเปลี่ยนแรงดันจากมอเตอร์แกนชักเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าแล้วส่งไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูโนเพื่อประมวลผลแล้วสั่งให้หน้าคอนแทกรีเลย์ เปิด-ปิดให้มอเตอร์แกนชักอยู่ในตำแหน่งกลับสุด

3. ผลการทดลอง

จากรูปที่ 6 ผลการทดลองการหยุดของรถไฟที่ความเร็ว 2.7 กิโลเมตรต่อชั่วโมง น้ำหนักที่ใช้คือ 360 420 และ 480 กิโลกรัม ตามลำดับ แบ่งออกเป็น 3 การทดลอง พบว่า

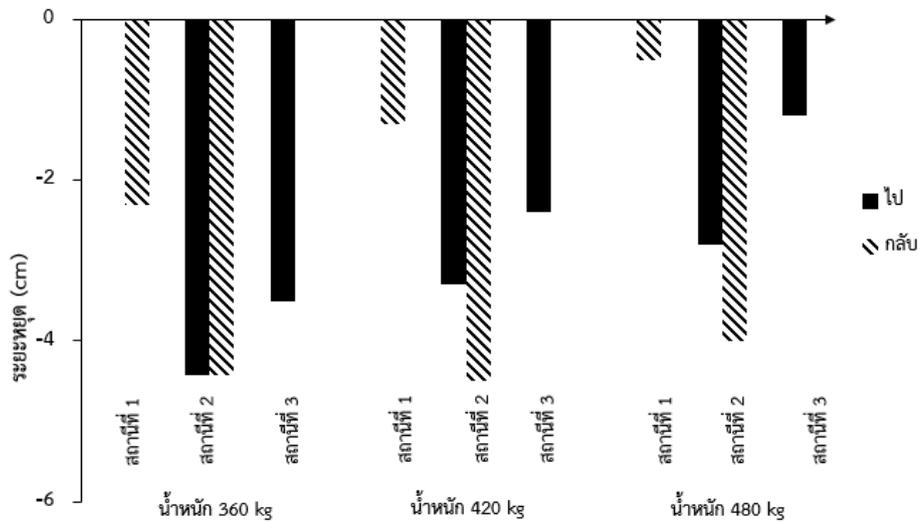
1. การหยุดของรถไฟ ที่น้ำหนัก 360 กิโลกรัม พบว่าในการเคลื่อนที่จากสถานี 1 ไปยังสถานี 2 และสถานี 3 มีระยะหยุดเฉลี่ย -12.7 และ -7.3 เซนติเมตร ตามลำดับ ในการเคลื่อนที่กลับจากสถานี 3 ไปยังสถานี 2 และสถานี 1 มีระยะหยุดเฉลี่ย -13.2 และ -6.8 เซนติเมตร ตามลำดับ
2. การหยุดของรถไฟที่น้ำหนัก 420 กิโลกรัม พบว่าในการเคลื่อนที่จากสถานี 1 ไปยังสถานี 2 และสถานี 3 มีระยะหยุดเฉลี่ย -14.7 และ -10.2 เซนติเมตร ตามลำดับ ในการเคลื่อนที่กลับจากสถานี 3 ไปยังสถานี 2 และสถานี 1 มีระยะหยุดเฉลี่ย -15.6 และ -11.4 เซนติเมตร ตามลำดับ
3. การหยุดของรถไฟที่น้ำหนัก 480 กิโลกรัม พบว่าในการเคลื่อนที่จากสถานี 1 ไปยังสถานี 2 และสถานี 3 มีระยะหยุดเฉลี่ย -5.5 และ 15.0 เซนติเมตร ตามลำดับ ในการเคลื่อนที่กลับจากสถานี 3 ไปยังสถานี 2 และสถานี 1 มีระยะหยุดเฉลี่ย -10.7 และ -17.0 เซนติเมตร ตามลำดับ

3.1 การทดสอบความเร็วของการศึกษาการเคลื่อนที่ของรถไฟความเร็วที่ 2.7 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 6 ระยะหยุดที่ความเร็ว 2.7 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

3.2 การทดสอบความเร็วของการศึกษาการเคลื่อนที่ของรถไฟความเร็วที่ 3.9 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 7 ระยะหยุดที่ความเร็ว 3.9 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

จากรูปที่ 7 ผลการทดลองการหยุดของรถไฟ ที่ความเร็ว 3.9 กิโลเมตรต่อชั่วโมง น้ำหนักที่ใช้คือ 360 420 และ 480 กิโลกรัม ตามลำดับ แบ่งออกเป็น 3 การทดลอง พบว่า

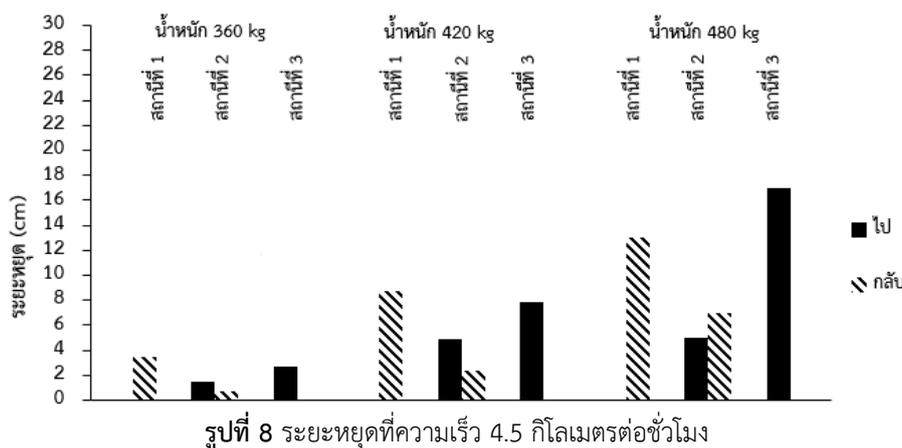
1. การหยุดของรถไฟ ที่น้ำหนัก 360 กิโลกรัม ในการเคลื่อนที่จากสถานี 1 ไปยังสถานี 2 และสถานี 3 มีค่าระยะหยุดเฉลี่ย -4.7 และ -3.5 เซนติเมตร ตามลำดับ ในการเคลื่อนที่กลับจากสถานี 3 ไปยังสถานี 2 และสถานี 1 มีค่าระยะหยุดเฉลี่ย -5.7 และ -2.3 เซนติเมตร ตามลำดับ

2. การหยุดของรถไฟ ที่น้ำหนัก 420 กิโลกรัม ในการเคลื่อนที่จากสถานีที่ 1 ไปยังสถานี 2 และสถานี 3 มีค่า

ระยะหยุดเฉลี่ย -3.3 และ -2.4 เซนติเมตร ตามลำดับ ในการเคลื่อนที่กลับจากสถานี 3 ไปยังสถานี 2 และสถานี 1 มีค่าระยะหยุดเฉลี่ย -5.2 และ -1.3 เซนติเมตร ตามลำดับ

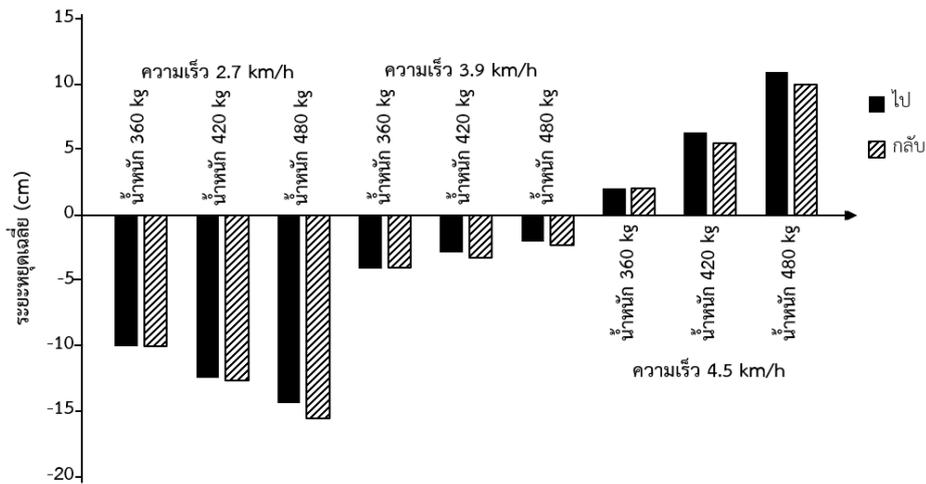
3. การหยุดของรถไฟ ที่น้ำหนัก 480 กิโลกรัม ในการเคลื่อนที่จากสถานี 1 ไปยังสถานี 2 และสถานี 3 มีค่าระยะหยุดเฉลี่ย -2.8 และ -1.2 เซนติเมตร ตามลำดับ ในการเคลื่อนที่กลับจากสถานี 3 ไปยังสถานี 2 และสถานี 1 มีค่าระยะหยุดเฉลี่ย -4.0 และ -0.5 เซนติเมตร ตามลำดับ

3.3 การทดสอบความเร็วของการศึกษาการเคลื่อนที่ของรถไฟความเร็วที่ 4.5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง



รูปที่ 8 ระยะหยุดที่ความเร็ว 4.5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

3.4 ผลการทดสอบระยะหยุดที่ความเร็วต่างๆ



รูปที่ 9 ระยะหยุดเฉลี่ยที่ความเร็วต่างๆ

จากรูปที่ 8 ผลการทดลองการหยุดของรถไฟ ที่ความเร็ว 4.5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง น้ำหนักที่ใช้คือ 360 420 และ 480 กิโลกรัม ตามลำดับ แบ่งออกเป็น 3 การทดลอง พบว่า

1. การหยุดของรถไฟ ที่น้ำหนัก 360 กิโลกรัม ในการเคลื่อนที่จากสถานี 1 ไปยังสถานี 2 และสถานี 3 มีค่าระยะหยุดเฉลี่ย 1.5 และ 2.7 เซนติเมตร ตามลำดับ ในการเคลื่อนที่กลับจากสถานี 3 ไปยังสถานี 2 และสถานี 1 มีค่าระยะหยุดเฉลี่ย 0.7 และ 3.5 เซนติเมตร ตามลำดับ
2. การหยุดของรถไฟ ที่น้ำหนัก 420 กิโลกรัม ในการเคลื่อนที่จากสถานี 1 ไปยังสถานี 2 และสถานี 3 มีค่าระยะหยุดเฉลี่ย 4.9 และ 7.8 เซนติเมตร ตามลำดับ ในการเคลื่อนที่กลับจากสถานี 3 ไปยังสถานี 2 และสถานี 1 มีค่าระยะหยุดเฉลี่ย 2.4 และ 8.7 เซนติเมตร ตามลำดับ
3. การหยุดของรถไฟ ที่น้ำหนัก 480 กิโลกรัม ในการเคลื่อนที่จากสถานี 1 ไปยังสถานี 2 และสถานี 3 มีค่าระยะหยุดเฉลี่ย 5.0 และ 17.0 เซนติเมตร ตามลำดับ ในการเคลื่อนที่กลับจากสถานี 3 ไปยังสถานี 2 และสถานี 1 มีค่าระยะหยุดเฉลี่ย 7.0 และ 13.0 เซนติเมตร ตามลำดับ

จากรูปที่ 9 ผลการทดสอบระยะหยุดเฉลี่ยที่ความเร็วต่างๆ พบว่า ที่ความเร็ว 2.7 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีระยะหยุดเฉลี่ยขาไป และขากลับ หยุดก่อนถึงสถานี -12.3 และ -12.7 เซนติเมตร ตามลำดับ ที่ความเร็ว 3.9 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีระยะหยุดเฉลี่ยขาไป และขากลับ หยุดก่อนถึงสถานี -3.0 และ -3.2 เซนติเมตร ตามลำดับ และความเร็ว 4.5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีระยะหยุดเฉลี่ยขาไป และขากลับ หยุดเลยสถานี 6.5 และ 5.9 เซนติเมตร ตามลำดับ มีความเร็วที่มีระยะหยุดเฉลี่ยใกล้สถานีที่สุด เมื่อพิจารณาน้ำหนักที่เหมาะสม ที่ส่งผลให้รถไฟหยุดใกล้สถานี คือ 480 กิโลกรัม ซึ่งเส้นทางโค้งของรางจะส่งผลต่อระยะเบรกเนื่องจากความเร็วของรถไฟต้นแบบลดลงเนื่องจากบังใบของล้อเสียดสีกับรางทำให้แรงเสียดทานเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความเร็วรถไฟลดลง ทำให้ความคลาดเคลื่อนของระยะเบรกเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับเส้นทางตรง

4. อภิปรายและสรุปผล

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองระบบบังคับหยุดของรถไฟจำลองผ่านบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูโน โดยให้รถไฟเคลื่อนที่ไปยังสถานีที่กำหนดไว้จำนวน 3 สถานี ระยะทางรวม 100 เมตร แต่ละสถานีมีระยะห่าง 50 เมตร ที่ความเร็ว 2.7 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยใช้ น้ำหนัก 3 ค่า พบว่าค่าเฉลี่ยระยะหยุดไม่ตรงสถานี

เนื่องจากมีความเร็วรถไฟช้าทำให้รถไฟหยุดก่อนถึงสถานี ที่ความเร็ว 3.9 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยใช้ น้ำหนัก 3 ค่า พบว่าค่าเฉลี่ยระยะหยุดใกล้เคียงกับ ตำแหน่งสถานี จึงเป็นความเร็วที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นความเร็วของรถไฟต้นแบบที่สร้างขึ้น และที่ความเร็ว 4.5 กิโลเมตรต่อชั่วโมง โดยใช้ น้ำหนัก 3 ค่า พบว่าค่าเฉลี่ยระยะหยุดไม่ตรงสถานีเนื่องจากมีความเร็วรถไฟมากทำให้รถไฟหยุดเลยตำแหน่งสถานี เพราะน้ำหนักบรรทุกและความเร็วจะส่งผลกระทบต่อระยะทางหยุดรถ ซึ่งถ้าน้ำหนักมากและความเร็วน้อยจะทำให้รถหยุดก่อนถึงสถานีแต่ถ้าน้ำหนักน้อยและความเร็วมากจะทำให้รถหยุดเลยสถานีในกรณีแรงที่ใช้เบรกมีค่าคงที่ ดังนั้นผลของระยะหยุดที่ได้จึงสามารถนำไปปรับระยะการติดตั้งตำแหน่งเซนเซอร์เพื่อชดเชยความคลาดเคลื่อนดังกล่าว

5. เอกสารอ้างอิง

[1] Office of the National Economic and Social Development Council. Report on national development results in the past 5 years (2014–2018) [Internet]. 2019 [cited 2022 Dec 16] Available from: https://www.nesdc.go.th/Ewt_news.php?nid=8636&filename=index

[2] Office of the Secretariat of the House of Representatives Parliamentary Budget Office. Guidelines for developing the country's transportation system. Bangkok: Publishing House Office of the Secretariat of the House of Representatives [Internet]. 2019[cited 2022 Dec 19] Available from:https://www.parliament.go.th/ewtadmin/ewt/parbudget/ewt_dl_link.php?nid=680

[3] Wikipedia. Railway [Internet]. 2022. [cited 2022 Dec 16], Available from: <https://th.m.wikipedia.org/wiki/train>

[4] Paknam536. Driving through a railway intersection correctly [Internet]. 2022.[cited 2022 Dec 16], Available from: <https://www.autospinn.com/2020/10/driving-ips-drive-across-railway-80667>

[5] Saisanit T, Kotchaphong W. A case study of the BTS electric train braking system of bangkok mass transit system public company limited. Thesis of Engineering. Siam University. 2013. (In Thai)

[6] Chantson N. Railway mechanic. Pathumthani: NSTDA; 2017.

[7] Kerdkub P, Simma T, Kittiratsatcha S. Regenerative braking control system for trains driven by electric machines. Type of reluctance switch. The 3rd Conference on Thailand Rapid Transit System Academic, Bangkok, Thailand. Sep 1-2, 2015: TRAS2015. (In Thai)

[8] Lu, Shaofeng, Weston, Paul, Hillmansen, Stuart, Beng Gooi, Hoay, Roberts, Clive. Increasing the regenerative braking energy for railway vehicles. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2015; 15(6):2506-15.

[9] Foadelli F, Roscia M, Zaninelli D. Optimization of storage devices for regenerative braking energy in subway systems. IEEE Power Engineering Society General Meeting. 2006:1-6.

[10] Okada Yuruki, Koseki Takafumi, Sone Satoru. Energy management for regenerative brakes on a DC feeding system. In The Proceedings of International Symposium on Seed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems STECH. 2003.

[11] Nathaphan S. and Suwantaraj K. A study of useage influence affecting tyre rolling coefficient (research report) Bangkok: Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Phra Nakhon. (2020). (In Thai)

- [12] Suwanprathip T. Automotive Engineering. Bangkok: Wittayapat. 2009. (In Thai)
- [13] ORIENTAL MOTOR (THAILAND) CO., LTD. Calculation of motor selection. [Internet]. 2023. [cited 2022 Dec 16], Available from: <https://www.orientalmotor.co.th/om/technical/general/motor-sizing-calculations.html>.
- [14] Afrilcate.Coefficient of Rolling Friction (Fully Explained). [Internet]. 2022. [cited 2022 Dec 16], Available from: <http://afrilcate.com/coefficient-of-rolling-friction/>
- [15] The Engineering ToolBox. Drag Coefficient. [Internet]. 2022. [cited 2022 Dec 16], Available from: https://www.engineeringtoolbox.com/drag-coefficient-d_627.