



การออกแบบและสร้างต้นแบบระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ

บันนริ เข้มกลัดมุกด์ และ ธนัตชัย กุลวรวานิชพงษ์*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สุรชัย วงษ์ฟูเกียรติ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 8583 7207 อีเมล: thanatchai@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.11.006

รับเมื่อ 5 มิถุนายน 2563 แก้ไขเมื่อ 3 สิงหาคม 2563 ตอรับเมื่อ 9 กันยายน 2563 เผยแพร่ออนไลน์ 10 พฤศจิกายน 2564

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้กล่าวถึงการพัฒนาด้านแบบระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ (Automated People Mover; APM) ด้วยการนำโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (Programmable Logic Control; PLC) และอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ มาประยุกต์ใช้สำหรับควบคุมรูปแบบการเคลื่อนที่ของรถแบบโวลต์/เฮิร์ตซ์ (V/F Control) ให้มีลักษณะที่สอดคล้องกับรูปแบบการทำงานที่กำหนดเอาไว้ 3 รูปแบบ ได้แก่ การเร่งความเร็วขณะที่รถเริ่มเคลื่อนออกจากสถานีต้นทาง การรักษาความเร็วให้คงที่ในขณะที่รถกำลังเคลื่อนที่อยู่ระหว่างสถานีต้นทางและปลายทาง และการลดความเร็วในขณะที่รถเข้าจอดที่สถานีปลายทาง โดยในที่นี้ได้นำเสนอระบบให้อยู่ในรูปแบบของชุดจำลองขนาดเล็กที่ประกอบด้วยระบบควบคุมย่อยทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ ระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ (ส่วนที่ใช้เป็นทางวิ่ง) ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ (ส่วนที่ใช้เป็นรถ) และศูนย์กลางควบคุมระบบ (ส่วนที่ใช้เป็นห้องควบคุม) เพื่อทดสอบสมรรถนะการทำงานของระบบว่าสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของรถให้มีลักษณะที่สอดคล้องกับรูปแบบที่กำหนดเอาไว้หรือไม่ จากการทดสอบชุดจำลองพบว่า รถสามารถเคลื่อนที่ในโหมดควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติ และโหมดควบคุมการเคลื่อนที่แบบลูกเดินบนทางวิ่งที่สร้างขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยความเร็วสูงสุดอยู่ที่ 5.86 เมตรต่อวินาที ซึ่งเกิดความผิดพลาดในการทำงานอันเกิดมาจากอุปกรณ์ที่นำมาประกอบขึ้นเป็นระบบทั้งหมดเพียง 0.75-10% ของการทดสอบควบคุมระบบทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าหากทำการเปลี่ยนอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ที่นำมาประกอบเป็นต้นแบบระบบควบคุมการเดินรถนี้ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น จะทำให้ในอนาคตสามารถออกแบบและสร้างระบบ APM ขึ้นเองในประเทศได้

คำสำคัญ: ระบบควบคุมการเดินรถ ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์

การอ้างอิงบทความ: บันนริ เข้มกลัดมุกด์, ธนัตชัย กุลวรวานิชพงษ์ และ สุรชัย วงษ์ฟูเกียรติ, “การออกแบบและสร้างต้นแบบระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 32, ฉบับที่ 3, หน้า 609-622, ก.ค.-ก.ย. 2565.



Design and Implementation of an Automated People Mover Control System Prototype

Banri Khemkladmuk and Thanatchai Kulworawanichpong*

School of Electrical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand
Surachai Wingfookeat

Subject Industrial Electrical Engineering Faculty of Industrial Technology Nakhonratchasima University, Nakhon Ratchasima, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 8583 7207, E-mail: thanatchai@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2021.11.006

Received 5 June 2020; Revised 3 August 2020; Accepted 9 September 2020; Published online: 10 November 2021

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

This article develops a control system prototype of an Automated People Mover (APM) by using the Programmable Logic Controller (PLC) and applying V/F control in APM's drive control according to three driving modes: 1) accelerating at the first station, 2) maintaining a constant velocity, and 3) reducing a velocity or braking during approaching the final station. The APM scale-downed control system prototype created in this study consists of the vehicle positioning system (a running track with positioning sensors), vehicle control system (a small testing vehicle), and system control center. This system prototype is used to test the effectiveness of the proposed APM's automatic control system. The test results showed that the testing vehicle could move automatically as controlled in both automatic control mode and emergency mode with the highest speed at 5.86 meters per second. The error caused by the system prototype during the test was only 0.75–10% of all system control tests. In addition, the small-scale prototype of the control system effectively worked in the test, thus it can be adopted in a real APM control system and Thailand could potentially develop its own APM automated system in the future.

Keywords: APM Control System, Automated People Mover, Programmable Logic Control

Please cite this article as: B. Khemkladmuk; T. Kulworawanichpong, and S. Wingfookeat, "Design and implementation of an automated people mover control system prototype," *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 3, pp. 609–622, Jul.–Sep. 2022 (in Thai).

1. บทนำ

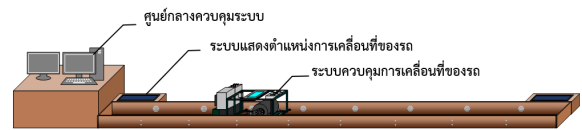
ตั้งแต่อดีตการเดินทางเป็นกิจกรรมหนึ่งที่มนุษย์ทุกคนไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ในชีวิตประจำวัน ซึ่งในแต่ละครั้งที่มีการเดินทางจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งนั้น ผลที่ตามมาคือปัญหาการจราจรที่ติดขัด และมลพิษทางอากาศที่เกิดขึ้นจากการใช้ยานพาหนะต่างๆ ทำให้หลายองค์กรทั้งภาครัฐและเอกชนได้หันมาศึกษาและเสนอแนวทางในการแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการนำเทคโนโลยีระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน (Mass Rapid Transit System) มาให้บริการในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑล เช่น รถไฟฟ้าบีทีเอส รถไฟฟ้าใต้ดินเอ็มอาร์ที แอร์พอร์ต เรล ลิงก์ [1] และเตรียมแผนที่จะขยายเส้นทางให้บริการไปยังเมืองสำคัญทางด้านเศรษฐกิจอื่นๆ ในอนาคต [2] อย่างไรก็ตาม การขยายเส้นทางให้บริการนี้ยังเป็นประเด็นที่ถูกนำมาถกเถียงกันอย่างเข้มข้นในด้านความคุ้มค่าและความเหมาะสมในการนำระบบมาใช้ เนื่องจากระบบนี้ใช้พื้นที่ในการติดตั้งมาก มีต้นทุนในการก่อสร้างที่สูง และไม่สามารถออกแบบ และสร้างตัวระบบขึ้นเองภายในประเทศได้ ดังนั้นในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา นักวิชาการและนักวิจัยหลายท่านจึงได้นำเรื่องนี้ไปศึกษา และเสาะหาระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนประเภทอื่นๆ มาทดแทนระบบเดิมที่มีอยู่แล้ว [3]-[5]

ในช่วงไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมา ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ (รูปที่ 1) (Automated People Mover; APM) เป็นระบบหนึ่งที่ประเทศต่างๆ ทั่วโลกต่างได้หันมาให้ความสนใจในการศึกษาและพัฒนา เพื่อนำระบบนี้มาใช้สำหรับรับ/ส่งผู้โดยสารในเขตพื้นที่ขนาดเล็ก เช่น ใจกลางเมือง สนามบิน [6] แสดงดังรูปที่ 2 ด้วยจุดเด่นที่ว่าระบบมีขนาดเล็ก สามารถติดตั้งในเขตพื้นที่ที่มีขนาดจำกัดได้ มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน และมีรูปแบบการทำงานที่สามารถดำเนินขับเคลื่อนรถแบบอัตโนมัติโดยไม่จำเป็นต้องอาศัยเจ้าหน้าที่หรือคนขับคอยควบคุมระบบอยู่บนรถ [7] ทำให้การใช้งานระบบนี้สามารถลดต้นทุนในส่วนค่าแรงของเจ้าหน้าที่ควบคุมระบบที่ต้องคอยประจำการอยู่บนรถและยังสามารถยกระดับความเป็นมาตรฐานในการให้บริการระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนภายในประเทศได้อีกด้วย

จากจุดเด่นของระบบ APM ดังที่กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 1 ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ [8]



รูปที่ 2 ภาพรวมชุดจำลองระบบควบคุมการเดินทางรถสำหรับระบบ APM

ประกอบกับการผลักดันนโยบาย “ไทยแลนด์ 4.0” ของคณะรัฐบาลในยุคนี้ ที่ส่งเสริมให้นำเทคโนโลยีการควบคุมแบบอัตโนมัติเข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์ในทุกๆ ด้านไม่ว่าจะเป็นด้านอุตสาหกรรม ด้านความปลอดภัย ด้านเกษตรกรรม ด้านธุรกิจ เป็นต้น [9] ทำให้ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการตัดสินใจที่จะจัดซื้อจัดจ้างระบบ APM รุ่น “Cityval and Airval” ของบริษัท Siemens มาติดตั้งในเขตพื้นที่สนามบินสุวรรณภูมิที่ให้บริการระหว่างอาคารผู้โดยสารปัจจุบันกับอาคารผู้โดยสารหลังใหม่ [10] และก่อสร้างเป็นระบบรถไฟฟ้าสายสีทอง รุ่น “Innovia APM 300” ของบริษัท Bombardier ที่ให้บริการระหว่างสถานีกรุงธนบุรีและสถานีคลองสาน [11] ซึ่งถือเป็นก้าวแรกที่สำคัญสำหรับการพัฒนาบริการระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนรูปแบบใหม่ภายในประเทศ แต่อย่างไรก็ตาม ระบบเหล่านี้ที่เลือกนำมาติดตั้งใช้งานก็ยังเป็นระบบที่สั่งซื้อมาจากบริษัทต่างชาติอีกที ซึ่งหากวันใดที่ระบบเกิดเหตุขัดข้องไม่สามารถแก้ไขซ่อมบำรุงเองได้จากเจ้าหน้าที่ที่คอยดูแลระบบ หนทางเดียวในการแก้ปัญหาคือการจ้างวิศวกรและซื้ออะไหล่จากบริษัท

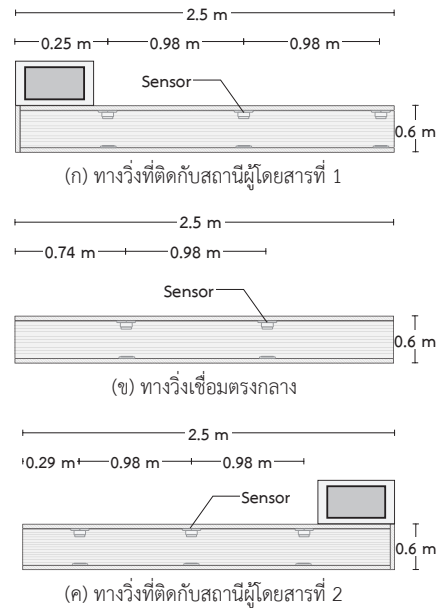
เจ้าของเทคโนโลยีของระบบเหล่านี้เป็นการซ่อมแซม ส่งผลให้เงินลงทุนบางส่วนที่ควรไหลเวียนอยู่ภายในประเทศต้องสูญเสียออกไปนอกประเทศแทน

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบ และสร้างชุดจำลองระบบ APM ที่นำรูปแบบการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบโวลต์/เฮิร์ตซ์ด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอลโทรลเลอร์หรือพีแอลซี (Programmable Logic Control; PLC) และการตรวจจับวัตถุด้วยโฟโตอิเล็กทริกเซนเซอร์ (Photoelectric Sensor) ที่มักใช้งานในระบบสายพานลำเลียงทั่วไปมาประยุกต์ใช้ เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของรถให้มีความเร็ว ณ จุดต่างๆ บนทางวิ่งตามรูปแบบที่กำหนดไว้ แสดงดังรูปที่ 2 ด้วยการประมวลผลของ PLC ที่รับสัญญาณจากเซนเซอร์ตรวจจับที่ติดตั้งตามทางวิ่งแบบอัตโนมัติ โดยแนวคิดการควบคุมในลักษณะนี้สามารถทำได้จากการนำอุปกรณ์ไฟฟ้าในภาคอุตสาหกรรมทั่วไปมาประกอบเข้าด้วยกัน ทำให้การสร้าง ซ่อมบำรุง และพัฒนาระบบ APM สามารถดำเนินการด้วยฝีมือช่างเฉพาะทางที่มีความรู้ความเชี่ยวชาญในด้านระบบไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมภายในประเทศ โดยที่ไม่จำเป็นต้องอาศัยเทคโนโลยีระบบ APM สำเร็จรูปที่รับมาจากต่างประเทศอีกต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 ภาพรวมระบบ

ในส่วนนี้ได้กล่าวถึงชุดจำลองระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ที่สร้างขึ้น เพื่อทดสอบผลการทำงานของระบบว่าสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของรถได้ตามที่ออกแบบไว้หรือไม่ ซึ่งภายในชุดจำลองนี้ประกอบด้วยระบบควบคุมย่อยทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ ระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ และศูนย์กลางควบคุมระบบ แสดงดังรูปที่ 3 เนื่องจากระบบ APM เป็นระบบที่ดำเนินการควบคุมรถด้วยคำสั่งอัตโนมัติเต็มรูปแบบ จึงต้องมีการกระจายหน้าที่ในการประมวลผล และตรวจสอบการทำงานของระบบให้กับส่วนต่างๆ เพื่อป้องกันไม่ให้ระบบส่วนใดส่วนหนึ่งทำงานหนักเกินไปและช่วยให้ง่ายต่อการตรวจสอบหรือซ่อมแซมระบบในกรณีที่ระบบ



รูปที่ 3 การออกแบบระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ

เกิดความผิดปกติขึ้นอีกด้วย โดยระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM จะมีระบบย่อยที่สำคัญทั้งหมด 3 ส่วน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1.1 ระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ

ระบบนี้ออกแบบขึ้นมาสำหรับตรวจจับตำแหน่งของรถตามชื่อของระบบ ซึ่งถือเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยให้เจ้าหน้าที่ผู้ควบคุมระบบหรือผู้โดยสารที่มาใช้บริการระบบสามารถเข้าถึงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถว่า ณ ขณะนั้นรถเคลื่อนที่อยู่จุดใดของทางวิ่งและใกล้มาถึงสถานีผู้โดยสารที่ต้นรถหรือไม่ นอกจากนี้ผลการตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถยังถูกส่งต่อ และนำไปใช้ในการประมวลผลของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ เพื่อปรับความเร็วในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสของรถให้มีลักษณะที่สอดคล้องกับความเร็วในแต่ละจุดที่ได้ออกแบบไว้ในโครงร่างความเร็วสำหรับการทำงานของระบบจะใช้โฟโตอิเล็กทริกเซนเซอร์ที่ติดตั้งตามทางวิ่งในการตรวจสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ แล้วนำตำแหน่งที่จับได้ไปประมวลผลและแสดงบนจอ

2.1.2 ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ

ระบบนี้สามารถพูดได้ว่าเป็นส่วนที่มีความสำคัญที่สุด

ในระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ที่ได้สร้างขึ้นซึ่งจะมีหน้าที่ในการควบคุมรูปแบบการเคลื่อนที่ของรถด้วยการนำเอาสัญญาณตรวจจับตำแหน่งรถที่รับมาจากระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถมาใช้เป็นตัวให้สัญญาณในการสั่งปรับความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถให้มีลักษณะที่สอดคล้องโครงสร้างความเร็วที่ออกแบบเอาไว้ สำหรับระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถในชุดจำลองนี้จะออกแบบให้มีฟังก์ชันการทำงานทั้งหมด 2 โหมด ได้แก่ โหมดควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติ ใช้ในการควบคุมรถให้เคลื่อนที่ไปกลับระหว่างสถานีผู้โดยสารแบบอัตโนมัติในสภาพการทำงานปกติ และโหมดควบคุมการเคลื่อนที่แบบฉุกเฉิน ใช้ในการควบคุมรถให้เคลื่อนที่กลับไปตั้งหลักที่สถานีผู้โดยสารต้นทางในกรณีที่เกิดความผิดปกติ โดยการทำงานทั้งสองโหมดนี้จะช่วยให้การเคลื่อนที่ของรถนั้นมีความยืดหยุ่นสามารถทำงานในสถานะต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

2.1.3 ศูนย์กลางควบคุมระบบ

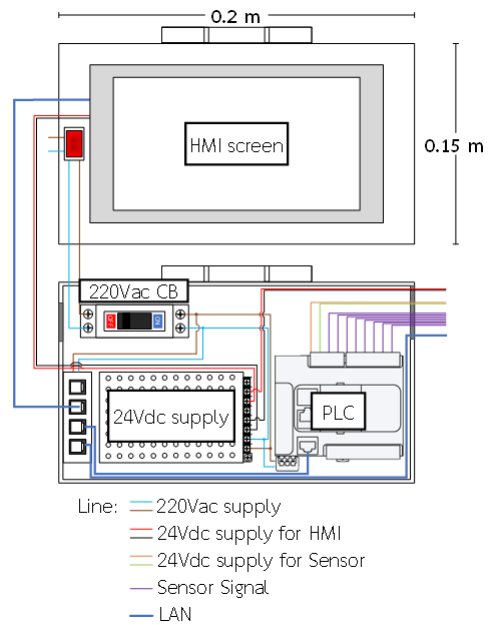
ส่วนนี้ถูกออกแบบขึ้นมาสำหรับใช้ในการสั่งควบคุมตรวจสอบการทำงาน และเฝ้าระวังสถานการณ์อันไม่คาดฝันที่อาจจะเกิดขึ้นกับระบบในขณะที่รถกำลังให้บริการอยู่ เพื่อความปลอดภัยต่อคนและระบบ APM ที่ใช้งาน เนื่องจากการทำงานของระบบนี้จะดำเนินการแบบอัตโนมัติเต็มรูปแบบโดยไม่มีเจ้าหน้าที่คอยประจำการอยู่ ณ ตำแหน่งมีการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ดังนั้นการสั่งงานและตรวจสอบการทำงานของระบบทุกส่วนในระบบนี้จึงตกเป็นของศูนย์กลางควบคุมระบบเพียงจุดเดียวเท่านั้น

2.2 การออกแบบระบบ

ในการออกแบบชุดจำลองระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ในส่วนนี้ได้กล่าวถึงแต่ละระบบโดยแบ่งออกเป็นส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.2.1 ระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ

ระบบนี้ได้ทำการออกแบบส่วนทางวิ่งที่ขึ้นรูปด้วยไม้อัดหนา 13 มิลลิเมตร ให้มีลักษณะคล้ายกล่องรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด กว้าง × ยาว × สูง ประมาณ $0.6 \times 2.5 \times 0.13$ เมตร โดยทางวิ่งนี้จะสามารถแยกชิ้นส่วนออกจากกันได้ทั้งหมด

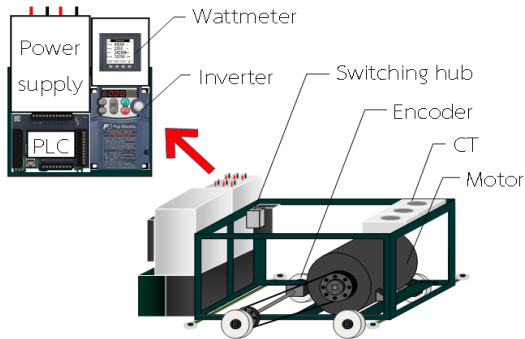


รูปที่ 4 อุปกรณ์ภายในกล่องวงจรสถานีผู้โดยสารที่ 1

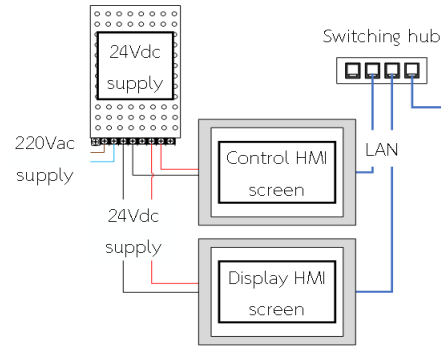
3 ส่วน ได้แก่ ทางวิ่งที่ติดกับสถานีผู้โดยสารที่ 1 ทางวิ่งเชื่อมต่อตรงกลาง และทางวิ่งที่ติดกับสถานีผู้โดยสารที่ 2 ซึ่งในแต่ละส่วนจะมีการเจาะรูวงกลมรัศมีขนาด 1 เซนติเมตร ห่างกัน 0.98 เมตร ทั้งหมด 8 รู สำหรับติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับที่ใช้ในการตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ แสดงดังรูปที่ 3 นอกจากนี้ที่ปลายด้านหนึ่งของทางวิ่งที่ติดกับสถานีผู้โดยสารที่ 1 ได้ทำการติดตั้งกล่องวงจรสำหรับวางจอแสดงผลและบรรจุอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ ที่จำเป็นในการดำเนินงานของระบบไว้ แสดงดังรูปที่ 4 ส่วนปลายทางวิ่งที่ติดกับสถานีผู้โดยสารที่ 2 จะเป็นกล่องวงจรเปล่าที่ใช้สำหรับวางจอแสดงผลอีกจอเท่านั้น

2.2.2 ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ

รถที่ใช้ในชุดจำลองนี้ได้นำเหล็กฉากมายึดเข้ากันให้มีลักษณะคล้ายกล่องทรงสี่เหลี่ยมที่มีขนาด กว้าง × ยาว × สูง เท่ากับ $0.58 \times 0.34 \times 0.40$ เมตร เพื่อใช้ในการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จำเป็นในการทำงานของระบบ เช่น PLC อินเวอร์เตอร์มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส และยังมีกรติดตั้งล้อขนาดรัศมี 4 เซนติเมตร ทั้งหมด 4 เส้น ที่เชื่อมต่อกับแกนเพลลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนรถ



รูปที่ 5 การออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ



รูปที่ 6 การออกแบบศูนย์กลางควบคุมระบบ



(ก) ชุดจำลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ



(ข) ชุดจำลองศูนย์กลางควบคุมระบบ



(ค) ชุดจำลองระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ

รูปที่ 7 ชุดจำลองระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM จริงที่สร้างขึ้น

ให้สามารถวิ่งได้ตามคำสั่งการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส นอกจากนี้ภายในระบบยังมีการติดตั้งล้อนำทาง (Guide Wheel) ซึ่งใช้ในการบังคับทิศทางรถให้สามารถประกอบรักษาเส้นทางการวิ่งให้มีลักษณะตามรูปแบบที่ได้ออกแบบเอาไว้ แสดงดังรูปที่ 5

2.2.3 ศูนย์กลางควบคุมระบบ

ส่วนนี้ได้ออกแบบให้ระบบมีจอ HMI 2 จอ ที่มีหน้าที่ที่แตกต่างกัน ได้แก่ จอแรกเป็นส่วนที่ใช้สำหรับควบคุมการทำงานของระบบและจอที่สองเป็นส่วนที่ใช้สำหรับแสดงผล

การทำงานของระบบ โดยในการทำงานของระบบนี้จะมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลกันระหว่างระบบย่อยทั้งสามผ่านระบบสื่อสารแบบอีเทอร์เน็ต (Ethernet) เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลแล้วใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบหรือแสดงผลการทำงานต่อไป แสดงดังรูปที่ 6

2.3 รูปแบบการทำงานของระบบ

ระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ที่ได้ออกแบบขึ้น แสดงดังรูปที่ 7 มีกระบวนการทำงานโดยเริ่มต้น

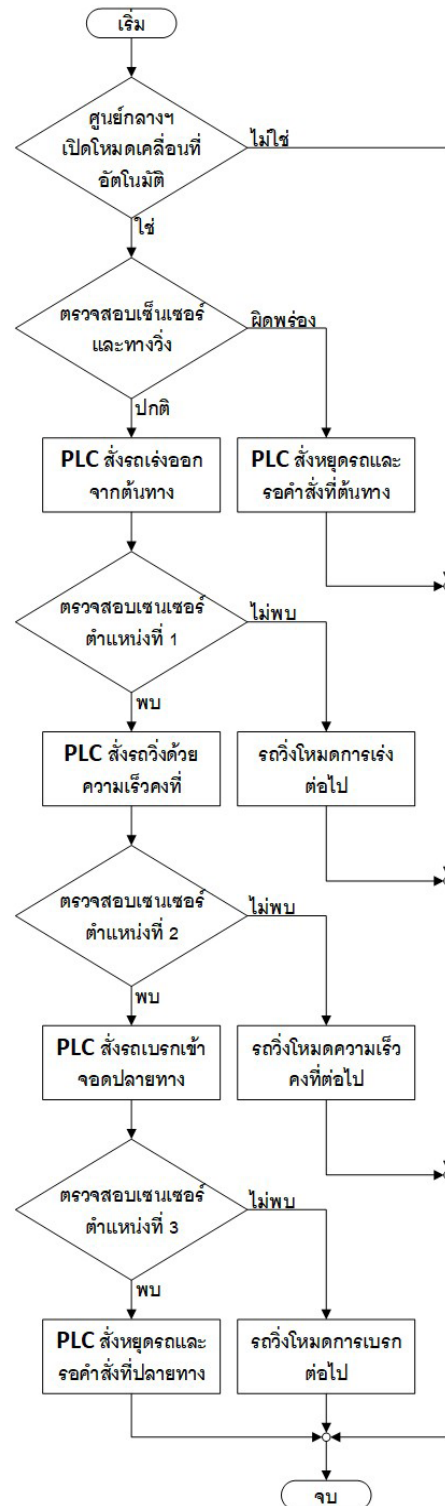
ด้วยการสั่งควบคุมรถจากศูนย์กลางควบคุมระบบ ซึ่งเมื่อระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถได้รับคำสั่ง PLC จะทำการตั้งสัญญาณจากไฟโตอิเล็กทรอนิกส์เซนเซอร์ (เซนเซอร์ตรวจจับ) ในระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถที่ติดตั้งไว้ ณ สถานีผู้โดยสารต้นทาง แล้วส่งคำสั่งต่อไปยังอินเวอร์เตอร์ให้ทำการปรับความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสด้วยวิธีการควบคุมแบบโวลต์/เฮิร์ตซ์แบบวงเปิด (Open-loop V/f Control) เพื่อให้รถเคลื่อนที่ออกจากสถานีผู้โดยสารต้นทางไปยังสถานีผู้โดยสารปลายทาง โดยการเคลื่อนที่นี้จะมีการปรับความเร็วในแต่ละจุดบนทางวิ่งให้มีรูปแบบที่สอดคล้องกับโครงร่างความเร็วที่กำหนดเอาไว้ด้วยการอาศัยสัญญาณจากเซนเซอร์ตรวจจับที่ติดตั้งไว้ในแต่ละจุดที่ต้องการปรับความเร็ว และเมื่อรถเคลื่อนที่เข้าใกล้สถานีผู้โดยสารปลายทางแล้ว PLC จะสั่งการให้อินเวอร์เตอร์ชะลอความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส เพื่อให้รถหยุดการเคลื่อนที่ ณ จุดที่ติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับไว้ที่สถานีผู้โดยสารปลายทางสำหรับการเคลื่อนที่ของระบบนี้มีการดำเนินไป-กลับระหว่างสถานีผู้โดยสาร 2 สถานี แบบอัตโนมัติอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งมีคำสั่งหยุดการเคลื่อนที่ของรถจากศูนย์กลางควบคุมระบบอีกทีหรือระบบเกิดเหตุขัดข้องขึ้นแล้วเข้าสู่การทำงานในโหมดควบคุมการเคลื่อนที่แบบฉุกเฉิน สรุปเป็นแผนภาพการทำงาน (Flowchart) แสดงดังรูปที่ 8

จากรูปแบบการทำงานของระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ที่กล่าวมาข้างต้น จะสามารถสรุปฟังก์ชันการทำงานของระบบย่อยทั้งสามส่วนโดยสังเขปได้ดังตารางที่ 1

สำหรับการพิจารณารูปแบบการเคลื่อนที่ของรถในระบบ APM สามารถคำนวณได้ในลักษณะเดียวกับกับการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าทั่วไป เนื่องจากทั้งสองระบบมีรูปแบบการทำงานที่มีความคล้ายคลึงกัน ต่างกันก็เพียงระบบ APM ใช้ล้อในการขับเคลื่อนรถให้เคลื่อนที่บนทางวิ่งแบบคอนกรีต ส่วนรถไฟฟ้าทั่วไปใช้ล้อกับรางวิ่งที่สร้างขึ้นมาจากเหล็กในการเคลื่อนที่ [12] ซึ่งมีรายละเอียดการพิจารณารูปแบบการเคลื่อนที่ของรถดังต่อไปนี้

2.3.1 หลักพลวัตของรถ (Vehicle Dynamic)

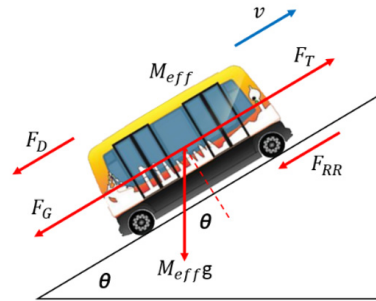
การพิจารณารูปแบบการเคลื่อนที่ของรถในระบบ APM



รูปที่ 8 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบ

ตารางที่ 1 สรุปรูปแบบการทำงานของระบบ

ระบบ	การทำงาน
ระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ	ตรวจสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถเพื่อนำผลที่ได้ไปแสดงให้เจ้าหน้าที่หรือผู้โดยสารรับรู้
เซ็นเซอร์ตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ	ใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ แล้วส่งสัญญาณนั้นไปยังระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ เพื่อให้ระบบรู้ว่าปรับความเร็วของรถให้สอดคล้องกับโครงร่างความเร็วที่กำหนดเอาไว้
เซ็นเซอร์ตรวจสอบสถานะการทำงาน	ตรวจสอบสถานะการทำงานของเซ็นเซอร์ตรวจจับ เพื่อป้องกันความผิดพลาดที่อาจเกิดจากการที่ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไม่สามารถเปลี่ยนรูปแบบการทำงานของรถ ณ จุดต่างๆ ของทางวิ่งได้
ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ	ควบคุมการเดินรถระหว่างสถานีผู้โดยสารแบบอัตโนมัติ กรณีที่ระบบทำงานปกติ
ควบคุมการเดินรถ	ควบคุมการเดินรถขณะที่เกิดเหตุขัดข้องหรือมีวัตถุขวางทางวิ่งแบบฉุกเฉิน เพื่อนำรถเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสารใดสถานีหนึ่ง และรอคำสั่งสำหรับการทำงานต่อไป
ตรวจสอบความเร็ว และรูปแบบการเคลื่อนที่ของรถ	ตรวจสอบความเร็ว และรูปแบบการเคลื่อนที่ของรถ
ตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่างๆ	ตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่างๆ ที่ใช้ในการดำเนินงานของระบบ เช่น ค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้า
ศูนย์กลางควบคุมระบบ	ควบคุมคำสั่งเริ่มหรือหยุดการทำงานของระบบ APM ด้วยจอส่วนที่ใช้สำหรับควบคุมการทำงานของระบบ
แสดงผลการตรวจสอบต่างๆ	แสดงผลการตรวจสอบต่างๆ ที่ได้จากระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถและระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถด้วยจอส่วนที่ใช้สำหรับแสดงผลการทำงานของระบบ



รูปที่ 9 แผนภาพวัตถุอิสระการเคลื่อนที่ของรถ

แรงต้านการเคลื่อนที่จะสามารถจำแนกออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ แรงต้านอากาศ (Aerodynamic Drag Force; F_D) แรงโน้มถ่วง (Gravitational or Gradient Force; F_G) และแรงเสียดทานที่ล้อรถ (Frictional Force or Rolling Resistance; F_{RR}) ดังสมการที่ (2) [13]

$$TE - F_R = M_{eff} \alpha \tag{1}$$

$$F_R = F_D + F_G + F_{RR} \tag{2}$$

ค่า TE ของรถในระบบ APM ที่ได้จากสมการข้างต้นสามารถนำมาคำนวณค่ากำลังไฟฟ้า (P) และพลังงานไฟฟ้า (E) ที่จำเป็นในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าประสิทธิภาพ (η) ที่ติดตั้งบนรถให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว (v) ในช่วงเวลา (t) ดังสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ [14]

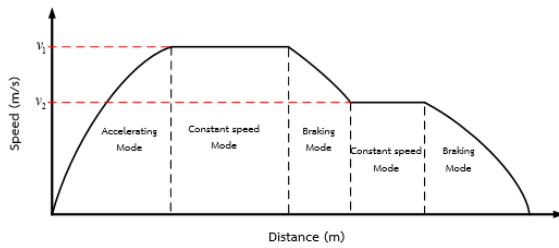
$$P = \frac{TE \times v}{\eta} \tag{3}$$

$$E = P \times t \tag{4}$$

อาศัยกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน ดังสมการที่ (1) สร้างแผนภาพวัตถุอิสระการเคลื่อนที่ของรถที่มีแรงฉุดลาก (Traction Force: TE) และแรงต้านการเคลื่อนที่ (Resistance Forces: F_R) กระทำกับรถขนาดประสิทธิผลของน้ำหนัก (Effective Vehicle Mass: M_{eff}) ที่เคลื่อนที่บนทางวิ่งเอียงทำมุม θ กับแนวราบด้วยความเร่ง α แสดงดังรูปที่ 9 โดยที่

นอกจากนี้การคำนวณในส่วนของหลักพลวัตของรถไฟฟ้าต้องมีการปรับปรุงความเร็วก่อน-หลัง ($v_i - v_f$) และตำแหน่งก่อน-หลัง ($s_i - s_f$) ของรถขณะเคลื่อนที่ระหว่างสถานี ดังสมการที่ (5) และ (6)

$$v_f = v_i + \alpha \Delta t \tag{5}$$



รูปที่ 10 โครงร่างความเร็วของรถ

$$s_i = s_i + v_i \Delta t + \frac{1}{2} \alpha \Delta t^2 \quad (6)$$

2.3.2 ลักษณะโครงร่างความเร็วของรถ (Vehicle Speed Profile)

จากหลักพลวัตของรถในหัวข้อที่ 2.3.1 จะสามารถ ออกแบบลักษณะการเคลื่อนที่ของรถให้มีความสอดคล้องกับ โครงร่างความเร็วของรถไฟฟ้าทั่วไป ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 โหมด ประกอบด้วย โหมดการเร่ง (Accelerating Mode) โหมด ความเร็วคงที่ (Constant Speed Mode) โหมดการแล่น (Coasting Mode) และโหมดการเบรก (Breaking Mode) [15] โดยในบทความนี้ได้ออกแบบโครงร่างความเร็วของรถให้ มีช่วงทำงานในโหมดความเร็วคงที่ทั้งหมด 2 ความเร็ว แสดง ดังรูปที่ 10 เพื่อกำหนดให้รถวิ่งในช่วงออกตัวด้วยความเร็ว สูงสุด แล้วจึงลดความเร็วลงเมื่อรถเข้าใกล้สถานีผู้โดยสาร ปลายทางสำหรับเตรียมเข้าจอด

2.4 วิธีการทดสอบการทำงานของระบบ

การทดสอบระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ส่วน ดังต่อไปนี้

2.4.1 การทดสอบควบคุมความเร็วของรถ คือ ทำการ ควบคุมรถให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วบริการสูงสุดค่าต่างๆ เพื่อ ทดสอบการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถ และทดสอบ ผลตอบสนองการปรับความเร็วในแต่ละโหมด

2.4.2 การทดสอบโหมดควบคุมการเคลื่อนที่แบบ อัตโนมัติ คือ ทำการควบคุมรถในโหมดควบคุมการเคลื่อนที่ แบบอัตโนมัติ เพื่อดูผลการตอบสนองของระบบ

2.4.3 การทดสอบโหมดควบคุมการเคลื่อนที่แบบ

ฉุกเฉิน คือ ทำการนำสิ่งกีดขวางไปวางบนทางวิ่งขณะที่รถ กำลังทำงาน เพื่อดูผลการตอบสนองของระบบในโหมด ควบคุมการเคลื่อนที่แบบฉุกเฉิน ซึ่งแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณี ที่มีสิ่งกีดขวางบนทางวิ่ง และกรณีเซนเซอร์ตรวจจับบางส่วน เกิดความขัดข้อง

โดยการทดสอบระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้เป็นเงื่อนไขในการ ทำงานของระบบ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของชุดจำลองระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM

พารามิเตอร์	ข้อมูล
1. พารามิเตอร์ทางกล	
1. จำนวนผู้โดยสาร	1 คู่
2. รูปแบบการขับเคลื่อน	ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขับเคลื่อนล้ออย่าง 4 เส้น
3. ขนาดของโครงสร้าง	0.58 (ก.) × 0.34 (ย.) × 0.4 (ส.) เมตร
4. น้ำหนักรถ	
- รถเปล่า	10 กิโลกรัม
- โหลด	0 2.5 และ 5 กิโลกรัม
2. พารามิเตอร์ทางไฟฟ้า	
1. พิกัดของอินเวอร์เตอร์	
- แรงดันไฟฟ้า	3 เฟส 200–240 โวลต์ 50/60 เฮิร์ตซ์
- กระแสไฟฟ้า	0.1–4 แอมป์
- กำลังไฟฟ้า	0.1–3.7 กิโลวัตต์
- ความถี่ทำงาน	0.1–400 เฮิร์ตซ์
2. พิกัดของมอเตอร์	
- แรงดันไฟฟ้า	3 เฟส 220/380–440 โวลต์
	4 โพล
	50/60 เฮิร์ตซ์
- กระแสไฟฟ้า	3.14 แอมป์
- กำลังไฟฟ้า	0.75 กิโลวัตต์
3. พารามิเตอร์การเคลื่อนที่	
1. ความเร็วบริการสูงสุด	5.86 เมตร/วินาที
2. อัตราเร่ง/หน่วง	1.0 เมตร/วินาที ²
3. อัตราหน่วง	1.0 เมตร/วินาที ²
4. ระยะการเคลื่อนที่	7.5 เมตร
5. ความลาดเอียงทางวิ่ง	0 องศา

3. ผลการทดลอง

จากการทดสอบการทำงานของชุดจำลองระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ทั้ง 3 กรณี ได้ผลการทดสอบในแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

3.1 การทดสอบควบคุมความเร็วของรถ

การทดสอบในส่วนนี้ได้ทำการสั่งรถให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วบริการสูงสุดที่ 1.0, 2.0 และ 3.0 เมตรต่อวินาที (m/s) โดยในแต่ละความเร็วได้ทำการปรับขนาดโหลดให้มีค่า 0 (ไม่มีโหลด) 2.5 และ 5 กิโลกรัม (kg) แล้วตรวจสอบผลการตอบสนองของระบบ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.1.1 การทดสอบการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถ

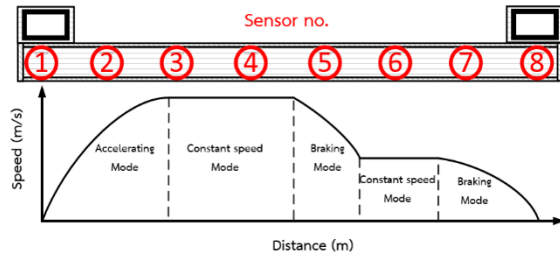
การทดสอบในส่วนนี้ได้ทำการควบคุมความเร็วบริการสูงสุดของรถตามเงื่อนไขที่กล่าวไว้ข้างต้นเป็นเวลา 15 วินาที เพื่อตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเมื่อทำการทดสอบจะได้ผลการใช้พลังงานไฟฟ้า แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถ

ความเร็วสูงสุด (m/s)	โหลด (kg)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (kW)	พลังงานไฟฟ้า (kWh)
1	0	142.87	2.99	0.0334	0.0013
	2.5	142.26	3.06	0.0342	0.0014
	5	142.62	3.08	0.0353	0.0015
2	0	207.14	2.54	0.0382	0.0016
	2.5	207.43	2.55	0.0393	0.0016
	5	208.96	2.59	0.0401	0.0017
3	0	264.82	2.23	0.0426	0.0018
	2.5	265.61	2.24	0.0438	0.0018
	5	265.81	2.25	0.0462	0.0019

3.1.2 การทดสอบผลการปรับความเร็วรถ ณ จุดต่างๆ บนทางวิ่ง

จากความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่ติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจบบนทางวิ่งกับลักษณะโครงสร้างความเร็วที่ออกแบบ



รูปที่ 11 จุดปรับเปลี่ยนความเร็วของรถ

ไว้ แสดงดังรูปที่ 11 เมื่อทำการทดสอบปรับความเร็วบริการสูงสุดที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถสามารถสรุปความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถในแต่ละตำแหน่งบนทางวิ่ง แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการปรับความเร็วรถ ณ จุดต่างๆ บนทางวิ่ง

เซนเซอร์ตรวจจับที่	ความเร็วรถ ณ จุดต่างๆ ที่ติดตั้งเซนเซอร์ (m/s) เมื่อกำหนดความเร็วบริการสูงสุดในช่วง 1.0-3.0 m/s		
	1.0 m/s	2.0 m/s	3.0 m/s
1	0.7035	0.7035	0.7035
2	1.0010	1.5492	1.5492
3	1.0350	2.0240	2.0976
4	1.0103	2.0017	2.5497
5	1.0002	2.0045	2.6458
6	1.0065	2.0208	2.2106
7	0.5026	0.5026	1.6733
8	0.0003	0.0012	0.3472

จากการทดสอบการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถและความเร็วรถ ณ จุดต่างๆ บนทางวิ่ง ทำให้ทราบแนวโน้มการใช้พลังงานไฟฟ้าในการเคลื่อนที่ของรถในช่วงความเร็วบริการสูงสุดต่างๆ และพบว่า ระบบ APM สามารถทำงานในรูปแบบที่กำหนดไว้เมื่อควบคุมความเร็วบริการสูงสุดของรถไว้ที่ 1.0 และ 2.0 เมตรต่อวินาที แต่เมื่อรถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วบริการสูงสุดที่ 3.0 เมตรต่อวินาที รถจะสามารถเร่งความเร็วสูงสุดได้เพียง 2.76 เมตรต่อวินาที เท่านั้น แล้วเข้าสู่โหมดเบรกเพื่อเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสารปลายทาง อย่างไรก็ตาม เบรกนี้ก็ยังไม่สามารถหยุดรถได้ ณ ตำแหน่งที่

รถถึงสถานีผู้โดยสารพอดี แต่จะมีการกระแทกกับขอบสุดของทางวิ่งจึงจะหยุดการเคลื่อนที่ของรถได้ ดังนั้นการทดสอบในหัวข้อถัดๆ ไปจะใช้ความเร็วบริการสูงสุดที่ 1.0 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ

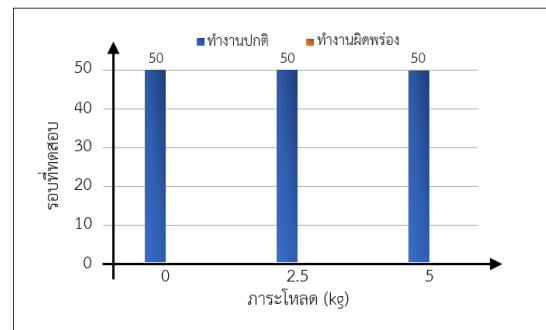
3.2 การทดสอบโหมดควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติ

สำหรับการทดสอบในโหมดนี้ได้ทำการตั้งค่าควบคุมรถให้วิ่งไป-กลับบนทางวิ่งที่สร้างขึ้นด้วยความเร็วบริการสูงสุดที่ 1.0 1.5 และ 2.0 เมตร/วินาที ตามลำดับ โดยที่ในแต่ละความเร็วจะมีการปรับขนาดโหลดทั้งหมด 3 ระดับ ได้แก่ 0 (ไม่มีโหลด) 2.5 และ 5 กิโลกรัม ตามลำดับ เพื่อตรวจสอบสมรรถนะการทำงานของระบบ พร้อมด้วยการตรวจสอบจอสถงผลที่ติดตั้งไว้ภายในศูนย์กลางควบคุมระบบว่ามีการทำงานที่สอดคล้องกันหรือไม่ แสดงดังรูปที่ 12

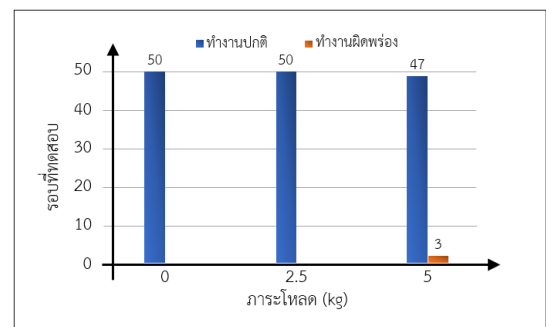
จากผลการทดสอบในรูปที่ 12 พบว่า การทำงานของโหมดนี้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของรถได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากภายในระบบใช้การควบคุมรถด้วยวิธีโวลต์/เฮิร์ตซ์แบบวงเปิด ที่ไม่มีการรับค่ากลับสำหรับปรับปรุงรูปแบบการทำงานของระบบ ดังนั้นเมื่อรถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงขึ้นและบรรทุกโหลดที่หนักขึ้นจึงทำให้มีบางครั้งที่รถทำงานที่ผิดพลาด ซึ่งสามารถสังเกตได้จากการเคลื่อนที่ของรถในช่วงความเร็ว 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาทีที่บรรทุกโหลด 2.5 ถึง 5 กิโลกรัม ระบบมีการทำงานผิดพลาดประมาณ 6-7 ครั้ง หรือประมาณ 1.56% ของการทดสอบทั้งหมด นอกจากนี้ความผิดพลาดในการทำงานที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากการที่รถเบรกเพื่อเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสารปลาย แต่เมื่อถึงจุดจอดรถไม่สามารถจอดได้สนิทแล้วไปกระแทกเข้ากับผนังด้านปลายของทางวิ่ง เนื่องจากระบบนี้ไม่ได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ช่วยเบรก รถจึงต้องอาศัยการเบรกด้วยการปล่อยรถวิ่งเปล่าจนกว่าแรงเฉื่อยจะหมดไป ทำให้รถจอดไม่ตรงกับจุดเริ่มต้นการเคลื่อนที่ในรอบถัดไป จึงเป็นที่มาของการที่รถไม่สามารถเคลื่อนที่ได้นั้นเอง

3.3 การทดสอบโหมดควบคุมการเคลื่อนที่แบบฉุกเฉิน

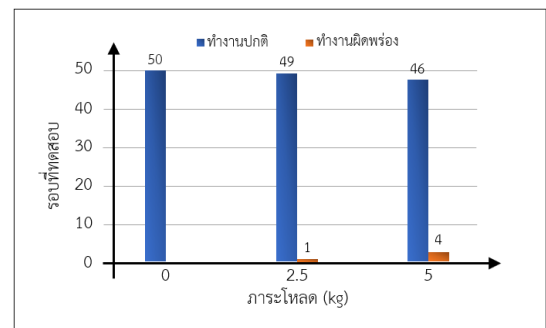
ในการทดสอบโหมดการทำงานแบบฉุกเฉินนี้ได้ทำการ



(ก) ความเร็วบริการสูงสุดที่ 1.0 m/s



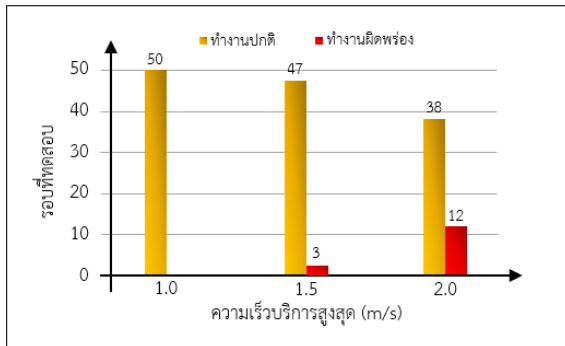
(ข) ความเร็วบริการสูงสุดที่ 1.5 m/s



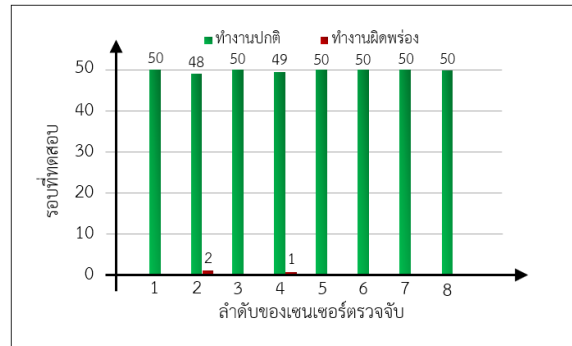
(ค) ความเร็วบริการสูงสุดที่ 2.0 m/s

รูปที่ 12 ผลการทดสอบโหมดควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติ

ทดสอบสั่งควบคุมให้รถเคลื่อนที่บนทางวิ่งด้วยความเร็วบริการสูงสุดที่ 1.0, 1.5 และ 2.0 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งในขณะที่รถกำลังเคลื่อนที่อยู่นั้นจะนำเหตุการณ์ทดสอบเข้าไปรบกวนการทำงานของระบบทั้งหมด 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่มีสิ่งกีดขวางบนทางวิ่งและกรณีเซนเซอร์ตรวจจับบางส่วนเกิดความขัดข้อง แล้วตรวจสอบผลการตอบสนอง



รูปที่ 13 ผลการทดสอบโหมตควบคุมการเคลื่อนแบบฉุกฉินกรณีเซนเซอร์ตรวจจับบางส่วนทำงานขัดข้อง



รูปที่ 14 ผลการทดสอบโหมตควบคุมการเคลื่อนแบบฉุกฉินกรณีที่มีสิ่งกีดขวางบนทางวิ่ง

ที่เกิดขึ้นภายในระบบว่าเป็นไปเช่นไร จากการทดสอบได้ผลดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.2.1 กรณีที่มีสิ่งกีดขวางบนทางวิ่ง

การทดสอบนี้ได้นำกล่องที่ติดตั้งแผ่นสะท้อนสัญญาณของโฟโตอิเล็กทริกเซนเซอร์ไปวางขวางบนทางวิ่ง ซึ่งเมื่อเซนเซอร์ตรวจจับพบวัตถุดังกล่าว ระบบจะทำการสั่งหยุดการเคลื่อนที่ของรถในทันทีเพื่อป้องกันการชนกันระหว่างรถนั้นกับรถ จากนั้นระบบจึงสั่งให้รถเคลื่อนที่กลับไปยังสถานีผู้โดยสารต้นทางเพื่อรอคำสั่งสำหรับการทำงานหลังจากที่มีการจัดการกับวัตถุที่มาขวางทางวิ่งต่อไป จากการทดสอบระบบ 50 รอบ ด้วยความเร็วบริการสูงสุดที่กำหนดไว้ทำให้ได้ผล แสดงดังรูปที่ 13

3.2.2 กรณีเซนเซอร์ตรวจจับบางส่วนทำงานขัดข้อง

การทดสอบนี้ทำการส่งควบคุมรถให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วบริการสูงสุดอยู่ที่ 1.5 เมตรต่อวินาที จากนั้นติดตั้งสัญญาณเซนเซอร์ตรวจจับที่ติดตั้งบนทางวิ่งทีละตัว เพื่อตรวจสอบว่าเมื่อสัญญาณเซนเซอร์ตรวจจับขาดหายไปรถจะสามารถหยุดการทำงานและเคลื่อนที่กลับไปยังสถานีผู้โดยสารต้นทางเพื่อจอดรอคำสั่งถัดไปได้หรือไม่ ซึ่งจากการทดสอบได้ผลการทดลอง แสดงดังรูปที่ 14

จากผลการทดสอบในรูปที่ 13 และ 14 พบว่า โหมตนี้สามารถส่งควบคุมการเคลื่อนที่ของรถในกรณีที่ตรวจพบสิ่งกีดขวางบนทางวิ่ง และกรณีที่เซนเซอร์ตรวจจับบนทางวิ่งเกิดความขัดข้องได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีเพียงปัญหาเดียวที่

เกิดขึ้นในการทำงานของโหมตนี้คือการที่รถไม่สามารถหยุดได้ในทันทีที่เกิดตรวจพบสิ่งกีดขวาง หรือตรวจพบเซนเซอร์ตรวจจับที่เกิดความขัดข้อง ทำให้เกิดการชนกันระหว่างรถกับวัตถุ และใช้เวลาในการเบรกที่ค่อนข้างนานอยู่บ่อยครั้ง ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์จากการทดสอบก็อยู่ที่ประมาณ 0.75–10% ของการทดสอบทั้งหมด ถ้าหากมองในมุมมองของการทดสอบแบบจำลองจะถือว่าไม่เยอะมาก แต่หากเป็นระบบจริงเปอร์เซ็นต์เหล่านี้ อาจจะหมายถึงชีวิตชีวิตหนึ่งก็ว่าได้ อย่างไรก็ตาม ปัญหาเหล่านี้ที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากการตอบสนองของเซนเซอร์ตรวจจับที่ช้าเกินไปและการที่ระบบขาดอุปกรณ์ช่วยเบรกที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งจะสามารถแก้ปัญหาเหล่านี้ได้จากการเปลี่ยนอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ทำงานในระบบนั่นเอง

4. อภิปรายผลและสรุป

4.1 สรุปผล

จากการออกแบบและสร้างระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ที่ประกอบด้วยระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ และระบบศูนย์กลางควบคุมระบบ พบว่า การทำงานของระบบสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของรถในโหมตควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติ และโหมตควบคุมการเคลื่อนแบบฉุกฉินได้อย่างมีประสิทธิภาพตามรูปแบบที่กำหนดเอาไว้ ซึ่งถือว่าการพัฒนาต้นแบบระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM นี้ประสบความสำเร็จตรงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ

แต่อย่างไรก็ตาม การทำงานของระบบนี้ยังมีความผิดพลาดเล็กน้อยจากอุปกรณ์ที่นำมาประกอบเป็นชุดจำลองอยู่ เช่น รถจอดไม่ตรงจุด ระบบไม่มีการส่งสัญญาณตรวจจับตำแหน่งรถ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

4.2 ปัญหาและการแก้ไข

ดังที่กล่าวไว้จากหัวข้อที่แล้วการที่ระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ทำงานผิดพลาดนั้น โดยส่วนใหญ่จะมีสาเหตุมาจากอุปกรณ์ที่เป็นองค์ประกอบภายในชุดจำลอง ซึ่งในที่นี้ได้ยกตัวอย่างความผิดพลาดที่เกิดขึ้นขณะทำการทดสอบระบบ ดังต่อไปนี้

4.2.1 เซนเซอร์ตรวจจับไม่ส่งสัญญาณไปยัง PLC ถึงแม้ว่าจะวิ่งผ่านจุดที่ติดตั้งไปแล้ว ทำให้การควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถอาจจะเกิดความผิดพลาดที่ไม่สามารถดำเนินตามรูปแบบโครงสร้างความเร็วที่กำหนดเอาไว้ได้ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการที่เซนเซอร์ตรวจจับไม่ตอบสนองในการทำงาน มักเกิดขึ้นกับเซนเซอร์ตรวจจับที่มีราคาถูกไม่ได้มาตรฐานหรือในบางครั้งที่มีการเลือกเซนเซอร์ตรวจจับที่ไม่เหมาะกับงาน

4.2.2 รถเข้าจอดไม่ตรงจุดจุดที่มีการติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับของสถานีผู้โดยสารปลายทาง ทำให้ระบบไม่สามารถส่งควบคุมให้รถเคลื่อนที่ตามคำสั่งในรอบถัดๆ ไปได้ โดยปัญหานี้มีต้นเหตุมาจากการที่ระบบสั่งรถให้จอดด้วยวิธีตัดไฟเลี้ยงที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสเท่านั้น ทำให้รถยังสามารถเคลื่อนที่ต่อเล็กน้อยจากโมเมนตัมความเฉื่อยที่สะสมภายในรถ

จากปัญหาต่างๆ ที่พบในขณะที่ทำการทดสอบระบบข้างต้น ล้วนแล้วแต่มีสาเหตุมาจากอุปกรณ์ที่นำมาประกอบเป็นระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ดังนั้นการแก้ปัญหาเหล่านี้จึงสามารถทำได้จากการเปลี่ยนหรือเพิ่มอุปกรณ์บางส่วนเข้าไปในระบบ

จากการดำเนินงานในบทความนี้ทำให้ได้ต้นแบบระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ซึ่งเป็นเพียงชุดจำลองที่ต้องมีการพัฒนาต่อยอดให้สามารถนำไปใช้งานได้กับระบบขนาดใหญ่จริงในอนาคต โดยการนำชุดจำลองนี้ไปใช้จริงต้องทำการพัฒนาส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. เปลี่ยนอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบให้เป็นอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติ และประสิทธิภาพในการทำงานที่สูงขึ้น
2. พัฒนาระบบสื่อสารภายในระบบจากการใช้รูปแบบการสื่อสารด้วยระบบสายแลนให้เปลี่ยนเป็นการใช้รูปแบบการสื่อสารด้วยระบบไร้สายแทน เนื่องจากการนำระบบไปใช้งานจริงนั้นจะมีระยะทางที่ค่อนข้างไกล ดังนั้นจึงรูปแบบการสื่อสารนี้เข้ามาใช้งานด้วย
3. พัฒนารูปแบบคำสั่งสำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของรถจากที่มีเพียงโหมดควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติ และโหมดควบคุมการเคลื่อนที่แบบลูกเดินให้มีรูปแบบการทำงานที่มีความหลากหลายและครอบคลุมต่อการนำไปใช้งานที่มากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Mass Rapid Transit Authority of Thailand. (2020, April). *About MRTA*. [Online]. Available: https://www.mrta.co.th/en/about_mrta/
- [2] POST REPORTERS. (2020, April). *Light transit, tram plans 'make progress' in 5 centres*. [Online]. Available: <https://www.bangkokpost.com/thailand/general/1416634/light-transit-tram-plans-make-progress-in-5-centres>
- [3] P. Chiradeja and A. U-kaew. (2017). *The study and development of standards and manuals for design, construction, and maintenance of railway track*. Office of Transport and Traffic Policy and Planning. Bangkok, Thailand. [Online]. Available: http://www.otp.go.th/uploads/tiny_uploads/ProjectOTP/2560/Project06/ExsumEng.pdf
- [4] W. Wanwises. (2014, July). *The Path to Development of High Speed Rail Project in Thailand*. The Secretariat of The Senate. Bangkok, Thailand. [Online]. Available: <http://library.senate.go.th/document/>



- Ext6022/6022896_0002.PDF
- [5] P. Sirisoponsilp, W. Sanyalukluechai, and W. Hirun. (2011, Jan.-Jun.). *The development of Mass Rapid Transit in Thailand*. Journal of Transportation and Logistics. [Online]. 3(1), pp. 11–17. Available: <http://www.cuti.chula.ac.th/t-wwwroot/journals/old/translog6/p2.pdf>
- [6] H. Gerland and H. Zemlin, “Development status of automated guideway transit (AGT) systems in Europe and Japan,” *IEEE Vehicular Technology Conference*, vol. 30, pp. 448–456, 1980.
- [7] B. Hansen, Jr. E. Latham, D. Gray, and S. Shogan, “The Detroit People Mover: Technology upgrades and rehabilitation plans on a middle-aged urban AGT,” in *Proceedings IEEE/ASME Joint Railroad Conference*, 2003, pp. 91–97.
- [8] M. Kashiwa, H. Mochidome, and A. Yamamoto. (2020, May). *Automated People Mover “Crystal Mover” for Singapore Changi International Airport*. [Online]. Available: <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e442/e442010.pdf>
- [9] N. Tuaycharoen. (2020, May). *Thailand 4.0*. [Online]. Available: <https://www.9experttraining.com/articles/thailand-4.0>
- [10] T. Hongtong. (2020, May). *AoT gives airport expansion okay*. [Online]. Available: <https://www.bangkokpost.com/thailand/general/1798589>
- [11] D. Briginshaw. (2020, May). *Bangkok Gold Line peplemover to have Tetra system*. [Online]. Available: <https://www.railjournal.com/passenger/metros/bangkok-gold-line-peplemover-to-have-tetra-system>
- [12] C. J. Goodman, “Train performance and simulation,” Fourth Vocation School on Electric Traction System, IEE Power Division, 1997.
- [13] T. Kulworawanichpong, “Multi-train modeling and simulation integrated with traction power supply solver using simplified Newton-Raphson method,” *Journal of Modern Transportation*, vol. 23, pp. 241–251, 2015.
- [14] T. Kulworawanichpong, “Optimising AC electric railway power flow with power electronic control,” Ph.D. dissertation, University of Bimingham, UK, 2003.
- [15] L. Battistelli, F. Ciccarelli, D. Lauria, and D. Proto, “Optimal design of DC electrified railway stationary storage system,” in *Proceedings International Conference on Clean Electrical Power, Capri*, 2009, pp. 739–745.