

การออกแบบและสร้างระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบขนส่งผู้โดยสาร
อัตโนมัติ



นายบัณฑิต เข้มกล้าดมุกต์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2562

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN AUTOMATED
PEOPLE MOVER CONTROL SYSTEM**



Banri Khemkladmuk

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2019

การออกแบบและสร้างระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานำฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ผศ. ดร.กตติยา สมสัย)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.นัตถชัย กุลสุวรรณิชพงษ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(อ. ดร.ทศพล รัตน์นิยมชัย)

กรรมการ



(รศ. ร.อ. ดร.กนดัธร ชำนิประศาสน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

บัณฺริ เข้มกัถคํมุกต์ : การออกแบบและสร้างระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบขนส่ง
ผู้โดยสารอัตโนมัติ (DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN AUTOMATED PEOPLE
MOVER CONTROL SYSTEM) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.ธนัถชัย
กุลวรวานิชพงษ์, 214 หน้า.

จากการผลัถคัถนให้ม่มีการศึกษาและพัฒนาาระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนขึ้นภายในประเทศ
ส่งผลให้ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ (Automated People Mover: APM) เป็นระบบหนึ่งที่ได้รับ
ความสนใจจากนักวิจัย นักวิชาการ และผู้ลงทุนที่เกี่ยวข้อง เนื่องด้วยจุดเด่นในด้านขนาดรถที่เล็ก
ต้นทุนที่ใช้ในการสร้างต่ำ และความสามารถของระบบที่มีการขับเคลื่อนรถให้วิ่งตามแนวเส้นทาง
ที่กำหนดไว้แบบอัตโนมัติโดยไม่จำเป็นต้องมีเจ้าหน้าที่คอยควบคุมระบบอยู่บนรถ ซึ่งเป็นลักษณะ
การทำงานที่เหมาะสมกับวิถีชีวิตของมนุษย์ในยุคปัจจุบันที่ได้นำเอาเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ
เข้ามาปรับใช้ในชีวิตประจำวันในทุก ๆ ด้าน อาทิเช่น ด้านอุตสาหกรรม ด้านความปลอดภัย ด้าน
เกษตรกรรม ด้านธุรกิจ เป็นต้น โดยผู้วิจัยในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้สังเกตเห็นถึงความเป็นไปได้ที่
จะพัฒนาระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ที่จะป็นต้นแบบในการต่อขยายให้เกิดระบบ
APM ขนาดจริงที่ผลิตขึ้นส่วนและประกอบขึ้นเองภายในประเทศต่อไป

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบและสร้างระบบควบคุมการเดินรถสำหรับ
ระบบ APM ในรูปของชุดจำลองขนาดเล็กที่ประกอบด้วยระบบควบคุมย่อยทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่
ระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ (ทางวิ่ง) ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ (รถ) และ
ศูนย์กลางควบคุมระบบ (ห้องควบคุม) ซึ่งมีอุปกรณ์โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์
(Programmable logic Control: PLC) เป็นส่วนทำงานหลักสำหรับควบคุมรูปแบบการเคลื่อนที่ของ
รถด้วยวิธีโวลต์/เฮิรตซ์ (V/F control) เพื่อให้การวิ่งของรถมีความสอดคล้องกับลักษณะของทางวิ่ง
ของรถที่ได้กำหนดไว้ จากการทดสอบสมรรถนะการทำงานของระบบในโหมดการเคลื่อนที่ต่าง ๆ
พบว่ารถสามารถเคลื่อนที่ไป-กลับระหว่างสถานีผู้โดยสาร 2 สถานีที่อยู่ห่างกัน 7.5 เมตร ได้อย่างมี
ประสิทธิภาพ แต่มีโอกาสประมาณ 0.75-10% ของการทดสอบที่ระบบจะเกิดเหตุขัดข้องเนื่องด้วย
ความบกพร่องในการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่นำมาประกอบภายในระบบ ซึ่งสามารถ
แก้ไขปัญหานี้ โดยการเปลี่ยนอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีปัญหาและปรับปรุงโครงสร้างรถให้ดีขึ้น

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2562

ลายมือชื่อนักศึกษา ปณฐ วัฒนธรร

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ดร.ธนัถชัย

BANRI KHEMKLADMUK : DESIGN AND IMPLEMENTION OF AN
AUTOMATED PEOPLE MOVER CONTROL SYSTEM. ADVISOR : ASSOC.
PROF. THANATCHAI KULWORAWANICHPONG, Ph.D., 214 PP.

AUTOMATED PEOPLE MOVER/AUTOMATIC DRIVE CONTROL SYSTEM/
PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER

The recent encouragement to study and develop mass rapid transit systems in Thailand has made an Automated People Mover (APM) more feasible and received more interest from researchers, academics, and other parties involved. The advantages of the APM system include having compact vehicles, relatively low investment cost, and automatic drive system along the designed route without human control inside the vehicle. This feature is suitable for people's current and modern lifestyle which adopts automation in all aspects such as industries, safety, agriculture, and administration etc. This study sees the opportunity and feasibility of developing the APM's automatic control system prototype, which can be applied in the actual APM made in Thailand in the future.

This research proposes the design and development of the APM's automatic drive control system in the small model. The model consists of the vehicle's positioning display system (track), the drive system (vehicle), and the central control system (control room). The central control system is the main control system using a Programmable Logic Controller (PLC) to automatically drive the vehicle, using V/F control. The performance test shows that the vehicle could automatically and effectively travel between two passenger stations, which has a distance of 7.5 meters

between both stations. However, the rate of failure occurrence was around 0.75-10 percent of the conducted tests because the electrical sub-components of the system did not function normally. This problem could be solved by replacing the problematic parts and improving the vehicle structure.



School of Electrical Engineering

Academic Year 2019

Student's Signature วิเศษ วัฒนกุล

Advisor's Signature [Signature]

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รองศาสตราจารย์ ดร.ชนัดชัช กุลวรวานิชพงษ์ หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสในการศึกษา ให้คำปรึกษา เกี่ยวกับวิธีการดำเนินการต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมถึงเป็นกำลังใจในการ ดำเนินชีวิตหลาย ๆ ด้าน และตรวจทานแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ดร.ชัยยุทธ์ สัมภาวะคุปต์ ดร.สุรชัย วงษ์ฟูเกียรติ ดร.ธวัช ชูจิต ดร.วัยอาจ สายคง คุณจิระพงศ์ ศรีวิชัย และคุณกฤษฎดา มงคลดี ที่ช่วยไขข้อสงสัยในการดำเนินงานและให้ความรู้ที่ เกี่ยวข้องกับงานวิจัย รวมทั้งให้คำปรึกษา แนะนำวิธีการเผยแพร่ผลงานวิจัย และเป็นแบบอย่างที่ดี ในการดำเนินชีวิตในหลายด้าน

ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤตยา สมสัย และอาจารย์ ดร.ทศพล รัตนนิมชัย ที่ให้ เกียรติเป็นคณะกรรมการในสอบ และตรวจทานแก้ไขรายงานวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ให้ความรู้ทางด้านวิชาการทั้งในอดีต และปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้กำเนิด ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดู และส่งเสริมทางด้านการศึกษาอย่างดีมาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บัณริ เข้มกัถมุกต์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ด
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	3
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	4
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.3 สรุป.....	15
3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	16
3.1 บทนำ.....	16
3.2 ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ.....	16
3.2.1 รถ.....	19
3.2.2 รางนำทาง.....	20

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2.3	ระบบไฟฟ้ากำลังและการขับเคลื่อน.....	20
3.2.4	หน่วยควบคุมและสื่อสาร.....	21
3.2.5	สถานีผู้โดยสาร.....	22
3.2.6	โรงซ่อมบำรุงและจัดเก็บรถ.....	22
3.3	การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยอินเวอร์เตอร์ในระบบรถไฟฟ้า.....	22
3.3.1	การควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบโวลต์/เฮิรตซ์.....	23
3.3.2	การควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบฟลักซ์เวกเตอร์.....	24
3.3.3	การควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบเวกเตอร์.....	24
3.3.4	การควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบแรงบิดโดยตรง.....	25
3.3.5	การควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์.....	26
3.4	การตรวจสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ในระบบรถไฟฟ้า.....	26
3.4.1	การตรวจสอบตำแหน่งด้วยเอ็นโค้ดเดอร์.....	26
3.4.2	การตรวจสอบตำแหน่งด้วยระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก.....	27
3.4.3	การตรวจสอบตำแหน่งด้วยระบบอาณัติสัญญาณรถไฟ.....	28
3.4.4	การตรวจสอบตำแหน่งด้วยเซนเซอร์แสง.....	29
3.5	ลักษณะสมบัติการเคลื่อนที่ของระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ.....	30
3.6	สรุป.....	34
4	ชุดจำลองระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ.....	35
4.1	บทนำ.....	35
4.2	ระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ.....	35
4.2.1	ภาพรวมระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ.....	36
4.2.2	รูปแบบการทำงานของระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ.....	37
4.2.3	โครงสร้างระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ.....	40
4.2.4	การออกแบบระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ.....	42
4.2.5	ชุดจำลองระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ.....	46
4.3	ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ.....	48
4.3.1	ภาพรวมระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ.....	48

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2 รูปแบบการทำงานของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ.....	50
4.3.3 โครงสร้างระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ.....	57
4.3.4 การออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ.....	59
4.3.5 ชุดจำลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ.....	66
4.4 ศูนย์กลางควบคุมระบบ.....	67
4.4.1 ภาพรวมศูนย์กลางควบคุมระบบ.....	67
4.4.2 รูปแบบการทำงานของศูนย์กลางควบคุมระบบ.....	68
4.4.3 โครงสร้างศูนย์กลางควบคุมระบบ.....	68
4.4.4 การออกแบบศูนย์กลางควบคุมระบบ.....	69
4.4.5 ชุดจำลองศูนย์กลางควบคุมระบบ.....	76
4.5 การทำงานของระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบขนส่งผู้โดยสาร อัตโนมัติ.....	76
4.6 สรุป.....	80
5 การทดสอบระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ.....	81
5.1 บทนำ.....	81
5.2 การทดสอบชุดจำลองระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่สำหรับ ระบบ APM.....	81
5.2.1 การทดสอบตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ.....	81
5.2.2 การทดสอบระบบแจ้งเตือนสถานการณ์ทำงานของเซนเซอร์ ตรวจจับ.....	86
5.2.3 การทดสอบระบบแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบ ณ สถานีผู้โดยสาร.....	91
5.3 การทดสอบชุดจำลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถสำหรับ ระบบ APM.....	96
5.3.1 การทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ที่ความเร็วอ้างอิง.....	97
5.3.2 การทดสอบโหมดการควบคุมการเดินรถ.....	99

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.3.3 การทดสอบจอแสดงผลบนรถ.....	112
5.4 การทดสอบชุดจำลองศูนย์กลางควบคุมระบบสำหรับระบบ APM.....	122
5.4.1 การทดสอบหน้าจอควบคุมโหมดการทำงานระบบ.....	123
5.4.2 การทดสอบหน้าจอแสดงผลการทำงานระบบ.....	125
5.5 สรุป.....	137
6 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	138
6.1 สรุปผลการดำเนินงาน.....	138
6.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต.....	138
รายการอ้างอิง.....	140
ภาคผนวก.....	143
ภาคผนวก ก. ข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้สร้างชุดจำลองระบบ ควบคุมการเดินรถสำหรับระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ.....	143
ภาคผนวก ข. ประมวลผลการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์.....	163
ภาคผนวก ค. โปรแกรมแลตเตอร์สำหรับควบคุมการทำงานของ PLC.....	173
ภาคผนวก ง. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	185
ประวัติผู้เขียน.....	214

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาระบบการทำงานของระบบ APM.....6
2.2	ข้อมูลจำเพาะของระบบ APM ที่ใช้ PLC สำหรับควบคุมการทำงานของระบบ.....11
3.1	ความเร่งมาตรฐานของงานบริการเดินรถไฟประเภทต่าง ๆ.....33
4.1	รายการอุปกรณ์ภายในระบบแสดงผลการเคลื่อนที่ของรถสำหรับระบบ APM..... 41
4.2	รายการอุปกรณ์สำหรับระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ.....58
4.3	รายการอุปกรณ์สำหรับศูนย์กลางควบคุมระบบ.....69
5.1	การทำงานของเซนเซอร์ตรวจจับ ณ ขณะที่รถเคลื่อนที่ในตำแหน่งต่าง ๆ.....82
5.2	ผลการทดสอบตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ.....84
5.3	การแจ้งเตือนสถานะการทำงานของเซนเซอร์.....87
5.4	ผลการทดสอบระบบแจ้งเตือนสถานะการทำงานของเซนเซอร์ตรวจจับ.....88
5.5	ผลการทดสอบระบบแจ้งเตือนโหมดการควบคุมแบบทดสอบการขับเคลื่อน.....92
5.6	ผลการทดสอบระบบแจ้งเตือนโหมดการควบคุมการเดินรถแบบฉุกเฉินป้องกันการชนสิ่งกีดขวาง.....94
5.7	เงื่อนไขของระบบทดสอบสำหรับการจำลองผล.....96
5.8	ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด.....97
5.9	ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าขณะมีโหลด.....98
5.10	ผลการทดสอบควบคุมรถที่ความเร็วบริการสูงสุดต่าง ๆ.....99
5.11	ผลการทดสอบโหมดการควบคุมการเดินรถแบบอัตโนมัติ.....101
5.12	ผลการทดสอบโหมดการควบคุมการเดินรถแบบปุ่มคำสั่งที่สถานีผู้โดยสาร.....104
5.13	ผลการทดสอบโหมดการควบคุมการเดินรถแบบทดสอบการขับเคลื่อน.....106
5.14	ผลการทดสอบโหมดการควบคุมการเดินรถแบบฉุกเฉินป้องกันการชนสิ่งกีดขวาง.....108
5.15	ผลการทดสอบโหมดการหยุดรถแบบฉุกเฉิน.....110
5.16	ผลการทดสอบหน้าจอแสดงการเคลื่อนที่ของรถระหว่างสถานีผู้โดยสาร.....112
5.17	ผลการทดสอบหน้าจอแสดงการเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสารแต่ละสถานี.....115

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.18 ผลการทดสอบหน้าจอแสดงปุ่มคำสั่งควบคุมรถให้เคลื่อนที่ระหว่าง สถานีผู้โดยสาร.....	117
5.19 ผลการทดสอบหน้าจอแสดงสถานะที่รถเคลื่อนที่ด้วยคำสั่งจาก ศูนย์กลางควบคุมระบบ.....	119
5.20 ผลการทดสอบหน้าจอแสดงการแจ้งเบรกฉุกเฉิน.....	120
5.21 ผลการทดสอบปุ่มคำสั่งที่อยู่บนหน้าจอควบคุมโหมดการเคลื่อนที่ของรถ.....	123
5.22 ผลการตอบสนองของส่วนแสดงผลการทำงานระบบ.....	126
5.23 ผลการแสดงความเร็ว ณ ความเร็วการควบคุมต่าง ๆ.....	127
5.24 ผลการตอบสนองของส่วนตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ.....	129
5.25 ผลการตอบสนองของส่วนแสดงค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าภายในระบบ.....	130
5.26 ผลการตอบสนองของส่วนแสดงกราฟการทำงานของระบบ.....	132
5.27 ผลการทดสอบของส่วนแสดงการแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบ.....	135
ก.1 ข้อมูลจำเพาะของ TM221CE16R.....	144
ก.2 รายการองค์ประกอบของ TM221CE16R.....	145
ก.3 รายการพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเขียน โปรแกรม.....	149
ก.4 รายละเอียดโดยย่อของจอ Wecon PI Series.....	150
ก.5 ข้อมูลจำเพาะของจอ Wecon PI Series.....	152
ก.6 รายละเอียดโดยย่อของอินเวอร์เตอร์ FRN0.75C1S-4A.....	155
ก.7 รายละเอียดการตั้งค่าอินเวอร์เตอร์ FRN0.75C1S-4A.....	157
ก.8 ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่วัดด้วยตัววัด PM2230 สามารถวัดได้.....	161
ค.1 รายการอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในการโปรแกรม.....	174
ค.2 การตั้งค่าพารามิเตอร์ Digital Inputs ของ TM221CE16R.....	174
ค.3 การตั้งค่าพารามิเตอร์ Digital Outputs ของ TM221CE16R.....	175
ค.4 การตั้งค่าพารามิเตอร์ High Speed Counters ของ TM221CE16R.....	175
ค.5 การตั้งค่าพารามิเตอร์ Ethernet ของ TM221CE16R.....	175
ค.6 การใช้ไฟฟ้าของ I/O Bus ภายใน TM221CE16R.....	176
ค.7 การตั้งค่าพารามิเตอร์ Timers ของ TM221CE16R.....	176

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่

หน้า

ค.8 การตั้งค่าพารามิเตอร์ Analog Outputs ของ TM3AQ4/G.....177



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ.....	2
1.2 ภาพรวมงานวิจัยระบบควบคุมการเดินทางสำหรับระบบ APM.....	2
2.1 ระบบ Air-Rail Link.....	11
2.2 เส้นทางบริการระบบ Air-Rail Link.....	11
2.3 ระบบ Express Tram.....	12
2.4 เส้นทางบริการระบบ Express Tram.....	12
2.5 ระบบ Inter-Terminal Train.....	13
2.6 เส้นทางบริการระบบ Inter-Terminal Train.....	13
2.7 ระบบ Concourse Tram.....	14
2.8 เส้นทางบริการระบบ Concourse Tram.....	14
3.1 ระบบรถบัสอัตโนมัติ.....	17
3.2 ระบบขนส่งผู้โดยสารนำทางอัตโนมัติ.....	18
3.3 องค์ประกอบระบบ APM.....	19
3.4 รางนำทางแบบด้านข้าง.....	20
3.5 รางนำทางแบบกึ่งกลาง.....	20
3.6 การขับเคลื่อนด้วยสายเคเบิล.....	21
3.7 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้ากับความถี่ทำงานของการควบคุมความเร็ว แบบโวลต์/เฮิตซ์.....	23
3.8 ช่วงการทำงานของการควบคุมความเร็วแบบปรับแหล่งจ่ายด้วยความถี่.....	23
3.9 การควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบฟลักซ์เวกเตอร์.....	24
3.10 การควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบเวกเตอร์.....	25
3.11 การควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบแรงบิดโดยตรง.....	25
3.12 สัญญาณลูกคลื่นพัลส์ที่ได้จากการทำงานของเอ็นโค้ดเดอร์.....	27
3.13 ชุดกำเนิดแรงกระตุ้นอิเล็กทรอนิกส์.....	27
3.14 การตรวจสอบตำแหน่งด้วย GPS.....	27

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
3.15 วงจรไฟตอน.....	28
3.16 ระบบอาณัติสัญญาณ.....	29
3.17 ระบบอาณัติสัญญาณแบบ CBTC.....	29
3.18 แผนภาพวัตถุอิสระการเคลื่อนที่ของรถใน APM.....	30
3.19 ลักษณะ โครงร่างความเร็วของรถ.....	33
4.1 ชุดจำลองระบบควบคุมการเดินรถสำหรับ APM.....	35
4.2 การเปรียบเทียบระบบสายพานลำเลียงกับระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ ของรถ.....	36
4.3 ต้นแบบระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถสำหรับ APM.....	37
4.4 ชุดจำลองระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถสำหรับ APM.....	37
4.5 ฟังก์ชันการทำงานของชุดจำลองระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ.....	38
4.6 ฟังก์ชันการทำงานของชุดจำลองระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ ส่วนตรวจสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ.....	39
4.7 ฟังก์ชันการทำงานของชุดจำลองระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ ส่วนตรวจสอบสถานะการทำงานของเซนเซอร์ตรวจจับ.....	40
4.8 ภาพรวมชุดจำลองระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่สำหรับระบบ APM.....	42
4.9 ทางวิ่งส่วนที่ติดกับสถานีผู้โดยสารที่ 1 ที่ออกแบบ.....	42
4.10 การเชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายในระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ.....	42
4.11 การวางอุปกรณ์ของกล่องวงจรสถานีผู้โดยสารที่ 1.....	43
4.12 ทางวิ่งส่วนทางเชื่อมตรงกลาง.....	43
4.13 ทางวิ่งส่วนที่ติดกับสถานีผู้โดยสารที่ 2.....	44
4.14 หน้าจอแสดงเมนู.....	44
4.15 หน้าจอแสดงผลการเคลื่อนที่ของสถานีผู้โดยสารที่ 1 และ 2.....	45
4.16 หน้าจอแสดงผลการตรวจสอบเซนเซอร์.....	45
4.17 หน้าจอแสดงการแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบที่สถานีผู้โดยสาร.....	46
4.18 ทางวิ่งส่วนที่ติดกับสถานีผู้โดยสารที่ 1 ที่สร้างจริง.....	47
4.19 ชุดจำลองทางวิ่งส่วนตรงกลางที่สร้างจริง.....	47

สารบัญญรูป (ต่อ)

หน้า

4.20	ชุดจำลองทางวิ่งส่วนที่ติดกับสถานีผู้โดยสารที่ 2 ที่สร้างจริง.....	47
4.21	ชุดจำลองระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่สำหรับระบบ APM ที่สร้างจริง.....	47
4.22	ต้นแบบระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถสำหรับระบบ APM.....	48
4.23	ชุดจำลองระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถสำหรับ APM.....	49
4.24	ผังการทำงานของชุดจำลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ.....	50
4.25	ผังการทำงานของโหมดการควบคุมการเดินรถแบบอัตโนมัติ.....	52
4.26	ผังการทำงานของโหมดการควบคุมการเดินรถแบบปุ่มคำสั่งที่สถานีผู้โดยสาร.....	53
4.27	ผังการทำงานของโหมดการควบคุมการเดินรถแบบทดสอบการขับเคลื่อน.....	54
4.28	ผังการทำงานของโหมดการควบคุมการเดินรถแบบฉุกเฉินป้องกันการชน สิ่งกีดขวาง.....	55
4.29	ผังการทำงานของโหมดการหยุดรถแบบฉุกเฉิน.....	56
4.30	ผังการทำงานของหน้าจอแสดงผลในระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ.....	57
4.31	ภาพรวมชุดจำลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถสำหรับระบบ APM.....	59
4.32	โครงสร้างส่วนรถในชุดจำลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ.....	60
4.33	การติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในชุดจำลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ.....	61
4.34	ส่วนประกอบภายในกล่องแหล่งจ่ายไฟฟ้า 220Vac และ 12/24Vdc.....	61
4.35	ส่วนประกอบภายในกล่องตัวตัดมิเตอร์.....	62
4.36	การวางอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในชุดจำลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ.....	62
4.37	การเชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าของระบบควบคุมการเดินรถ.....	63
4.38	หน้าจอแสดงผลการเคลื่อนที่ของรถระหว่างสถานีผู้โดยสาร.....	64
4.39	หน้าจอแสดงการเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสารแต่ละสถานี.....	64
4.40	หน้าจอแสดงปุ่มคำสั่งควบคุมรถให้เคลื่อนที่ระหว่างสถานีผู้โดยสารแต่ละสถานี.....	65
4.41	หน้าจอแสดงการขับเคลื่อนรถด้วยคำสั่ง ณ ศูนย์กลางควบคุมระบบ.....	65
4.42	หน้าจอแสดงการแจ้งเบรกฉุกเฉิน.....	66
4.43	ชุดจำลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถสำหรับระบบ APM ที่สร้างขึ้น.....	66
4.44	ชุดจำลองศูนย์กลางควบคุมระบบสำหรับ APM.....	67
4.45	ผังการทำงานของชุดจำลองศูนย์กลางควบคุมระบบ.....	68

สารบัญญรูป (ต่อ)

	หน้า
4.46 ภาพรวมชุดจำลองศูนย์กลางควบคุมระบบสำหรับระบบ APM.....	69
4.47 หน้าจอควบคุมโหมดการเคลื่อนที่ของรถ.....	70
4.48 หน้าจอปุ่มบังคับทางรถในโหมดการควบคุมการเดินรถแบบทดสอบ การขับเคลื่อน.....	71
4.49 หน้าจอแจ้งเตือนระบบทำงานผิดพลาด.....	72
4.50 หน้าจอเมนู.....	72
4.51 หน้าจอแสดงการทำงานของรถ.....	73
4.52 หน้าจอแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ.....	74
4.53 หน้าจอแสดงค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของระบบ.....	74
4.54 หน้าจอแสดงกราฟการทำงานของระบบ.....	75
4.55 หน้าจอแสดงการแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบ.....	75
4.56 ชุดจำลองศูนย์กลางควบคุมระบบสำหรับระบบ APM ที่สร้างขึ้น.....	76
4.57 ชุดจำลองระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ที่สร้างขึ้น.....	76
4.58 โครงข่ายแลนภายในระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM.....	77
4.59 บล็อกไดอะแกรมการทำงานระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM.....	78
4.60 ลักษณะโครงร่างความเร็วสำหรับควบคุมการเดินรถภายในระบบ.....	78
4.61 ฟังก์ชันการทำงานของระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM.....	79
5.1 ผลการแสดงผลตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ ณ สถานีผู้โดยสาร.....	82
5.2 สรุปผลการทดสอบระบบตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ.....	86
5.3 ผลการแสดงผลสถานะการแจ้งเตือนการทำงานของเซนเซอร์.....	87
5.4 สรุปผลการทดสอบระบบแจ้งเตือนสถานะการทำงานของเซนเซอร์ตรวจจับ.....	91
5.5 การแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบ ณ สถานีผู้โดยสาร.....	92
5.6 สรุปผลการทดสอบระบบแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบ ณ สถานีผู้โดยสาร.....	95
5.7 โครงร่างความเร็ว ณ ความเร็วบริการสูงสุดที่ 1.0-3.0 m/s.....	100
5.8 โครงร่างความเร็วที่ได้จากการทดสอบโหมดการควบคุมการเดินรถแบบอัตโนมัติ.....	102
5.9 ปุ่มคำสั่งสำหรับควบคุมการเดินรถจากสถานีผู้โดยสารและรถ.....	103
5.10 ปุ่มคำสั่งสำหรับควบคุมการเดินรถสำหรับโหมดทดสอบการขับเคลื่อน.....	105

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

5.11 ผลการทดสอบโหมคการควบคุมการเดินรถของชุดจำลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ.....	111
5.12 การทดสอบหน้าจอแสดงการเคลื่อนที่ของรถระหว่างสถานีผู้โดยสาร.....	112
5.13 สรุปผลการทดสอบจอแสดงผลบนรถของชุดจำลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ.....	122
5.14 สรุปผลการทดสอบหน้าจอบควบคุมโหมคการทำงานระบบ ณ ศูนย์กลางควบคุมระบบ.....	125
5.15 ผลการแสดงความเร็ว v-t ที่ 1.0 m/s.....	127
5.16 ผลการแสดงความเร็ว v-t ที่ 1.5 m/s.....	127
5.17 ผลการแสดงความเร็ว v-t ที่ 2.0 m/s.....	128
5.18 ผลการแสดงความเร็ว v-t ที่ 2.5 m/s.....	128
5.19 ผลการแสดงความเร็ว v-t ที่ 3.0 m/s.....	128
5.20 การแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าแบบปัจจุบันและแบบบันทึกค่า.....	134
5.21 การแสดงค่ากระแสไฟฟ้าแบบปัจจุบันและแบบบันทึกค่า.....	134
5.22 การแสดงค่ากำลังไฟฟ้าแบบปัจจุบันและแบบบันทึกค่า.....	135
5.23 การแสดงค่าพลังงานไฟฟ้าแบบปัจจุบันและแบบบันทึกค่า.....	135
5.24 สรุปผลการทดสอบหน้าจอแสดงผลการทำงานระบบ ณ ศูนย์กลางควบคุมระบบ.....	137
ก.1 TM221CE16R.....	144
ก.2 องค์ประกอบของ TM221CE16R.....	145
ก.3 ขนาดของ TM221CE16R.....	146
ก.4 หน้าต่างเริ่มต้นของโปรแกรม SoMachine Basic.....	147
ก.5 หน้าต่างแถบ Configuration เลือกุ่น PLC.....	147
ก.6 การเลือก module ที่ใช้งานร่วมกับ PLC.....	148
ก.7 การตั้งค่ารูปแบบการทำงานของ PLC.....	148
ก.8 การเขียน โปรแกรมและดาวน์โหลด PLC.....	149
ก.9 จอ Wecon PI Series.....	150
ก.10 ข้อมูลจากจอ Wecon PI Series.....	150

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

ก.11 ตัวอย่างการทำงานต่าง ๆ ของจอ Wecon PI Series.....	151
ก.12 หน้าต่างเริ่มต้นของ โปรแกรม PIStudio.....	153
ก.13 การเขียนจอ Wecon PI Series ใน โปรแกรม PIStudio.....	154
ก.14 การ Compile และ Download โปรแกรมลงในจอ Wecon PI Series.....	154
ก.15 อินเวอร์เตอร์ FRN0.75C1S-4A.....	155
ก.16 ปุ่มควบคุมอุปกรณ์ของอินเวอร์เตอร์ FRN0.75C1S-4A.....	155
ก.17 ขนาดอินเวอร์เตอร์ FRN0.75C1S-4A.....	156
ก.18 การเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์ FRN0.75C1S-4A.....	159
ก.19 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ FRN0.75C1S-4A.....	159
ก.20 เอกสารที่ระบุข้อมูลเบื้องต้นของอินเวอร์เตอร์ FRN0.75C1S-4A.....	160
ก.21 วัดต์มิเตอร์ PM2230.....	161
ก.22 ขนาดของวัดต์มิเตอร์ PM2230.....	162
ข.1 ภาพรวมชุดจำลองระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถสำหรับ APM ที่สร้างขึ้น.....	164
ข.2 การติดตั้งลื่อนำทางแบบด้านข้างของรถ.....	165
ข.3 การติดตั้งเซ็น โคลด์เตอร์สำหรับวัดความเร็วของรถ.....	165
ข.4 การติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถ.....	165
ข.5 ภาพรวมชุดจำลองระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่สำหรับระบบ APM ที่สร้างจริง.....	166
ข.6 กล่องวงจรและจอแสดงผลที่ใช้จำลองสถานีผู้โดยสาร.....	166
ข.7 การติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในกล่องวงจรจำลองสถานีผู้โดยสาร.....	166
ข.8 ลักษณะการติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งตามทางวิ่งของรถ.....	167
ข.9 ลักษณะการติดตั้งแผ่นสะท้อนสัญญาณเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่ง.....	167
ข.10 ภาพรวมชุดจำลองศูนย์กลางควบคุมระบบสำหรับระบบ APM ที่สร้างจริง.....	167
ข.11 การเลือกโหมดการควบคุมการเดินรถแบบอัตโนมัติ.....	168
ข.12 การเคลื่อนที่ของรถด้วยโหมดการควบคุมการเดินรถแบบอัตโนมัติ.....	168
ข.13 การเข้าจอดของรถ ณ สถานีผู้โดยสารแต่ละสถานี.....	168

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

ข.14	การเลือกโหมดการควบคุมการเดินรถแบบปุ่มคำสั่งที่สถานีผู้โดยสาร.....	169
ข.15	การควบคุมรถด้วยการกดปุ่มคำสั่งบนรถและสถานีผู้โดยสาร.....	169
ข.16	การเคลื่อนที่ของรถด้วยโหมดการควบคุมการเดินรถแบบปุ่มคำสั่ง ที่สถานีผู้โดยสาร.....	169
ข.17	การเลือกโหมดการควบคุมการเดินรถแบบทดสอบการขับเคลื่อน.....	170
ข.18	การควบคุมรถด้วยการกดปุ่มคำสั่งบนหน้าจอควบคุมโหมดการทำงานของระบบ.....	170
ข.19	การเคลื่อนที่ของรถด้วยโหมดการควบคุมการเดินรถแบบทดสอบการขับเคลื่อน.....	170
ข.20	การจำลองสิ่งกีดขวางบนทางวิ่งของรถ.....	171
ข.21	กรณีสิ่งกีดขวางบนทางวิ่งนานเกิน 10 วินาที รถจะเคลื่อนที่กลับสถานี ผู้โดยสารต้นทาง.....	171
ข.22	กรณีสิ่งกีดขวางบนทางวิ่งไม่ถึง 10 วินาที รถจะเคลื่อนที่ต่อไปสถานีผู้โดยสาร ปลายทาง.....	171
ข.23	จอแสดงผลตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ เมื่อรถวิ่งผลเซนเซอร์ตรวจจับ ณ จุดต่าง ๆ.....	172
ข.24	จอแสดงการแจ้งเตือน เมื่อมีวัตถุใด ๆ มาบังการรับ/ส่งสัญญาณระหว่างเซนเซอร์ ตรวจจับกับแผ่นสะท้อน.....	172

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

APM	=	Automated People Mover
PLC	=	Programmable Logic Controllers
RAMI 4.0	=	Reference Architectural Model Industry 4.0
AGT	=	Automated Guideway Transit
DLM	=	Driverless Metro
PRT	=	Personal Rapid Transit
GRT	=	Group Rapid Transit
GAO	=	General Accounting Office
ATC	=	Automatic Train Control
ATO	=	Automatic Train Operation
ATP	=	Automatic Train Protection
ATS	=	Automatic Train Supervision
CCF	=	Central Control Facility
CBTC	=	Communications-based train control
V/f ratio	=	Volt-per-hertz ratio
FOC	=	Field Oriented Control
DTC	=	Direct Torque Control
GPS	=	Global positioning system
M_{eff}	=	Effective vehicle mass
TE	=	Tractive effort
MR	=	Movement resistance
F_{grad}	=	Gravitational or gradient force
F_{drag}	=	Aerodynamic drag force
F_{RR}	=	Frictional force or rolling resistance
M_{tare}	=	Tare mass
M_{psg}	=	Passenger mass
M_{frgt}	=	Freight mass

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

M_{rat} = Rotational inertia equivalent mass

P_{aux} = Auxiliary power



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

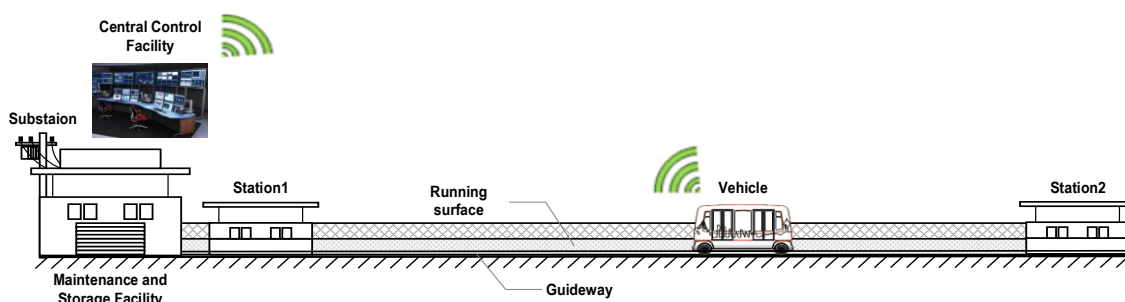
ปัญหาการจราจรที่ติดขัดถือเป็นปัญหาเรื้อรังสำหรับประเทศไทยที่ยังทวีความรุนแรงมากขึ้นในช่วงหลายปีที่ผ่านมา รัฐบาลจึงหาทางออกของปัญหาโดยประกาศเดินหน้านำสนับสนุนโครงการต่าง ๆ ที่มีความเกี่ยวข้องกับระบบขนส่งสาธารณะ (Public Transportation) ประเภทรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน (Mass Rapid Transit) หวังเพื่อช่วยบรรเทาปัญหาการจราจรที่หนาแน่นในเขตพื้นที่กรุงเทพฯและปริมณฑล สร้างเสริมประสิทธิภาพและความปลอดภัยในการให้บริการระบบขนส่งสาธารณะ ลดมลภาวะทางอากาศที่เกิดจากการใช้รถยนต์ส่วนตัวบนท้องถนน ยกยกระดับมาตรฐานอุตสาหกรรมชิ้นส่วนและผลิตภัณฑ์ที่มีความเกี่ยวข้องกับรถไฟฟ้า และเกิดการพัฒนาเทคโนโลยีระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่สามารถทดแทนการนำเข้ามาจากต่างประเทศ ตลอดจนเสริมสร้างภาพรวมทางด้านเศรษฐกิจทุก ๆ ด้านของประเทศให้มีการเจริญเติบโตอย่างเข้มแข็งและยั่งยืนต่อไปในอนาคต (ธนัชชัย กุลวรวณิชพงษ์, 2560)

จากนโยบายสนับสนุนการพัฒนาาระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนภายในประเทศที่เกิดขึ้น ทำให้หลายหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชนต่างหันมาให้ความสำคัญในการศึกษาและพัฒนาาระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนประเภทต่าง ๆ อาทิเช่น รถไฟฟ้าความเร็วสูง รถไฟฟ้าใต้ดิน รถรางเบา เป็นต้น (สวทช., 2563) รวมถึงระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ (Automated People Mover : APM) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจในหมู่นักวิจัยและผู้ลงทุนที่เกี่ยวข้อง (ไทยรัฐฉบับพิมพ์, 2561) ด้วยจุดเด่นที่ว่าระบบนี้มีขนาดเล็ก ใช้ต้นทุนในการสร้างที่ต่ำ และสามารถเคลื่อนที่ตามแนวเส้นทางที่กำหนดไว้แบบอัตโนมัติโดยไม่จำเป็นต้องมีเจ้าหน้าที่คอยควบคุมระบบอยู่บนรถ ในขณะที่ระบบก็ยังคงรักษาประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือในการให้บริการอย่างมีมาตรฐานเหมือนระบบรถไฟฟ้าทั่วไป ดังรูปที่ 1.1 ซึ่งเป็นลักษณะการทำงานที่เหมาะสมกับวิถีชีวิตของมนุษย์ในยุคปัจจุบันที่เทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติค่อย ๆ เข้ามามีบทบาทสำคัญในการดำรงชีวิตในทุก ๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นด้านอุตสาหกรรม ด้านความปลอดภัย ด้านเกษตรกรรม ด้านธุรการ เป็นต้น (เนืองวงศ์ ทวยเจริญ, 2559) ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเสนอการออกแบบและสร้างต้นแบบระบบควบคุมการเดินทางสำหรับระบบ APM เพื่อใช้ระบบนี้สำหรับการพัฒนาและต่อยอดเป็นระบบ APM ขนาดจริงสามารถผลิตในประเทศไทยต่อไป



รูปที่ 1.1 ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ

การออกแบบและสร้างระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ที่ออกแบบจะอาศัยการควบคุมการทำงานของระบบให้รถเคลื่อนที่ระหว่างสถานีผู้โดยสาร 2 สถานีที่อยู่ห่างกัน 7.5 เมตร ด้วยอุปกรณ์โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (Programmable logic Control : PLC) ซึ่งแบ่งการทำงานของระบบออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบ ส่วนแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ และส่วนศูนย์กลางควบคุมระบบ แสดงดังรูปที่ 1.2 เพื่อใช้เป็นต้นแบบสำหรับพัฒนาเทคโนโลยี APM และระบบอื่น ๆ ที่มีความเกี่ยวข้องเองภายในประเทศต่อไป โดยการควบคุมโหมดการเคลื่อนที่ของรถให้เป็นไปตามลักษณะการวิ่งที่กำหนดเอาไว้ ซึ่งจะอ้างอิงโครงสร้างความเร็วที่ออกแบบให้มี 3 โหมด ได้แก่ โหมดการเร่ง โหมดความเร็วคงที่ และโหมดการเบรก สำหรับการปรับโหมดการเคลื่อนที่ของรถจะใช้เซ็นเซอร์ที่ติดตั้งตามทางวิ่งเป็นตัวกระตุ้น สำหรับสั่งการระบบ นอกจากนี้ภายในระบบยังมีส่วนสนับสนุนความปลอดภัยขณะให้บริการของระบบเพื่อความเป็นมาตรฐานและความปลอดภัยของผู้โดยสารที่ใช้บริการระบบ



รูปที่ 1.2 ภาพรวมงานวิจัยระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการทำงานของระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ
- 1.2.2 เพื่อออกแบบและสร้างระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ
- 1.2.3 เพื่อออกแบบและสร้างระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่สำหรับระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ
- 1.2.4 เพื่อพัฒนาต้นแบบระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

ระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติที่ออกแบบและสร้างขึ้นจะสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของรถตามเส้นทางวิ่งที่กำหนดไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถนำไปเป็นต้นแบบสำหรับพัฒนาระบบ APM และระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนประเภทอื่น ๆ ในอนาคต

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1.4.1 ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติที่สร้างเป็นรถผู้โดยสารเดี่ยวที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส
- 1.4.2 ระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติพัฒนาโดยอาศัย PLC และ Photoelectric sensor ในการทำงานของระบบ

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.5.1 พัฒนาชุดจำลองการเคลื่อนที่สำหรับระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติที่ให้บริการระหว่างสถานีผู้โดยสาร 2 สถานี
- 1.5.2 ออกแบบและสร้างระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติด้วย PLC
- 1.5.3 ออกแบบและสร้างระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่สำหรับระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติด้วย PLC
- 1.5.4 ทดสอบและวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของแบบจำลองระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้น

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 ได้ระบบควบคุมการเดินรถของระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติที่ใช้ควบคุมการทำงานขอรถในเส้นทางทำให้บริการระหว่างสถานีผู้โดยสาร 2 สถานี

1.6.2 ได้ต้นแบบชุดควบคุมการทำงานขอรถของระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ

1.6.3 สามารถนำหลักการ แนวคิดที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ไปพัฒนาต่อสำหรับใช้งานในระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติจริงที่จะมีการสร้างขึ้นในอนาคต

1.6.4 ได้เผยแพร่ความรู้จากงานวิจัยในที่ประชุมทางวิชาการหรือในวารสารวิชาการ

1.7 การจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 6 บท และ 4 ภาคผนวก ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อดังนี้

บทที่ 1 จะกล่าวถึงปัญหาความเป็นมา วัตถุประสงค์ ข้อตกลงเบื้องต้น และขอบเขตของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ตลอดจนประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการดำเนินการงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของระบบ APM โดยทำการสำรวจสืบค้นเกี่ยวกับวิธีการและแนวทางการพัฒนาระบบที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน เพื่อนำข้อมูลเหล่านี้มาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ต่อไป

บทที่ 3 นำเสนอข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ โดยสรุปเน้นแต่ส่วนที่เป็นเนื้อหาสำคัญทั้งหมด 4 หัวข้อ ได้แก่ ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยอินเวอร์เตอร์ในระบบรถไฟฟ้า การตรวจสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ในระบบรถไฟฟ้า และลักษณะสมบัติการเคลื่อนที่ของระบบขนส่งผู้โดยสาร

บทที่ 4 นำเสนอการออกแบบและสร้างชุดจำลองระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ซึ่งถือเป็นหัวใจหลักของการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ ประกอบด้วยระบบย่อย 3 ระบบ ได้แก่ ระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ขอรถ ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ขอรถ และศูนย์กลางควบคุมระบบ เพื่อนำชุดจำลองนี้ไปทดสอบสมรรถนะการทำงานของระบบต่อไปในบทถัดไป

บทที่ 5 กล่าวถึงการทดสอบสมรรถนะการทำงานของควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM โดยแบ่งการทดสอบระบบออกเป็น ส่วน ๆ ตามระบบย่อยที่ได้กล่าวถึงก่อนหน้านี้ เพื่อตรวจสอบการทำงาน การใช้พลังงานไฟฟ้า และประมวลผลสำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์ระบบที่พัฒนาขึ้นต่อไป

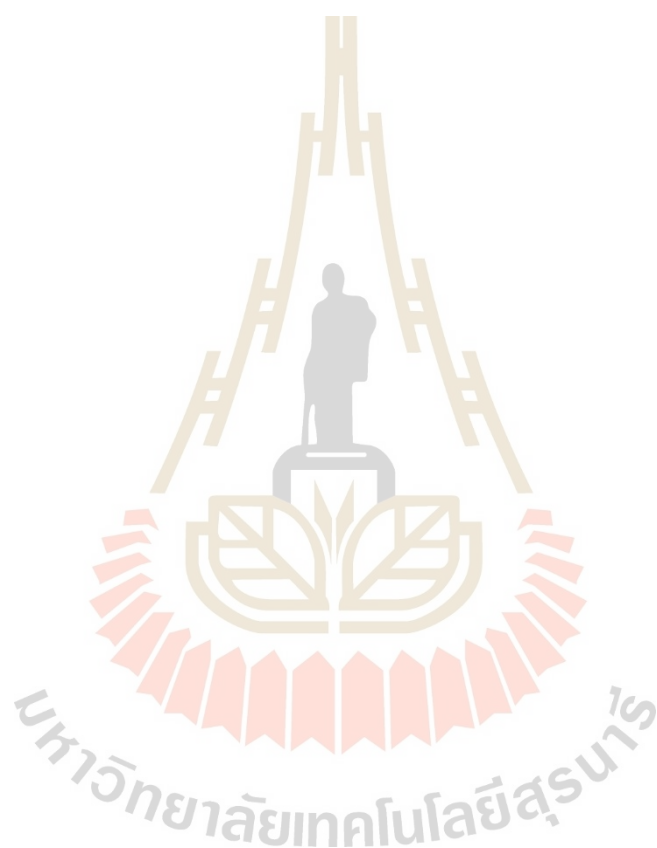
บทที่ 6 เป็นบทสรุป ประมวลผล และข้อเสนอแนะพร้อมงานวิจัยที่จะดำเนินการต่อ

ภาคผนวก ก. กล่าวถึงข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ไฟฟ้าบางส่วนที่ใช้ในการสร้างชุดจำลองระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

ภาคผนวก ข. แสดงภาพระหว่างดำเนินการสร้างชุดจำลองระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

ภาคผนวก ค. แสดงรายละเอียดการเขียนโปรแกรมแลคเตอร์สำหรับการทำงานของ PLC ที่ใช้ในการควบคุมชุดจำลองระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้

ภาคผนวก ง. เสนอบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษาทั้งหมด



บทที่ 2

ปริทัศน์ปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์หลัก เพื่อการศึกษาและพัฒนาระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ซึ่งประกอบด้วยส่วนควบคุมการเดินรถและส่วนแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ การศึกษาและพัฒนานี้ได้ดำเนินการสร้างแบบจำลองระบบที่มี PLC เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของระบบให้มีความสอดคล้องกับโครงสร้างความเร็วที่ได้ออกแบบไว้ โดยในการดำเนินการงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัยและวรรณกรรมทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่มีมาตรฐาน เช่น ฐานข้อมูลจาก IEEE เป็นต้น เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการเป็นแนวทางสำหรับการประยุกต์และพัฒนาเข้ากับงานวิจัยวิทยานิพนธ์

2.2 ปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันระบบ APM ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในหลาย ๆ ประเทศทั่วโลก เช่น อังกฤษ ญี่ปุ่น มาเลเซีย จีน สิงคโปร์ เกาหลีใต้ อเมริกา เป็นต้น ทำให้มีนักวิจัยจากหลากหลายสถาบันหันมาให้ความสนใจในการศึกษาและพัฒนาระบบ APM ในทุก ๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นด้านระบบขับเคลื่อน ด้านความปลอดภัย ด้านโครงสร้าง เป็นต้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้และสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของ APM ด้วย PLC ได้ ผู้วิจัยจึงได้ทำการทบทวนวรรณกรรม และสารสนเทศจากงานวิจัยในอดีตที่เกี่ยวข้อง เพื่อสรุปทฤษฎีหลักการ และวิธีการดำเนินการจากงานวิจัยเหล่านั้น โดยสรุปย่อได้ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาระบบการทำงานของระบบ APM

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
2004	Ioannides, M.G.	เสนอระบบควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟสที่สามารถควบคุมความเร็วมอเตอร์ด้วยการปรับด้วยมือหรือปรับแบบอัตโนมัติด้วยการทำงานของ PLC โดยการควบคุมมอเตอร์แบบอัตโนมัติจะมีโหมดการทำงานอยู่ 3 โหมด ได้แก่ โหมด

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาระบบการทำงานของระบบ APM (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
		มอเตอร์วงเปิดแบบ V/f และ โหมคควบคุมความเร็วมอเตอร์ ด้วยแรงดันคงที่ที่ความถี่มาตรฐาน จากการทำงานของระบบที่ออกแบบพบว่าการควบคุมมอเตอร์ด้วย PLC มีสมรรถนะที่ดีกว่าการควบคุมมอเตอร์แบบ V/f ทั่วไป
2009	Butdee, S. and Suebsomran, A.	เสนอการพัฒนาระบบควบคุม Automatic Guided Vehicle (AGV) ด้วยการประมวลผลภาพจากเซ็นเซอร์ Charge Coupled Device (CCD) ในกรณีที่ใช้เซ็นเซอร์ ไลน์ขาดหายบางส่วน ระบบนี้ใช้ AGV เป็นชุดจำลองที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสตรง มี CCD ตรวจสอบไคด์ไลน์บนพื้นดินที่เป็นเส้นทางการเดินรถ และที่ล้อหลังจะมีเอ็นโค้ดเดอร์คอยวัดตำแหน่งที่เคลื่อนที่ของรถ การควบคุมและประมวลผลการเคลื่อนที่ในระบบนี้จะใช้ PLC จากการทดสอบพบว่า PLC และระบบการประมวลผลภาพจาก CCD ที่ใช้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบ AGV ที่ทดลองได้อย่างดีเยี่ยม นอกจากนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบ Automatic transport อื่น ๆ ได้ในอนาคต
2009	Darshil, Sagar, Rajiv, Pangaokar, S.A., and Sharma, V.K.	เสนอการควบคุมลิฟต์สำหรับลำเลียงชิ้นส่วนในกระบวนการผลิตที่มีหลายชิ้นส่วน ระบบจะแยกชิ้นส่วนจากสีของถาดที่บรรจุชิ้นส่วนแต่ละชนิดอยู่ด้วยเซ็นเซอร์ที่คอยตรวจจับแต่ละสี แล้วส่งข้อมูลไปยัง PLC ที่ถูกเขียน โปรแกรมให้ทำงานแบบอัตโนมัติ โดยระบบนี้สามารถประยุกต์ใช้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น การแยกชิ้นส่วนยานยนต์ การแยกชิ้นส่วนอุปกรณ์ทางการแพทย์ การแยกสีของไม้ การตรวจจับในอุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น
2014	Gopinathan, R. and Sivashankar, B.	เสนอระบบที่กั้นทางรถไฟควบคุมอัตโนมัติ ซึ่งช่วยลดเวลาที่ใช้ในการเปิด-ปิดที่กั้นและเพิ่มความปลอดภัยของผู้ใช้รถไฟใช้ถนนให้สูงขึ้น จากแบบเดิมของประเทศอินเดียที่ใช้คนเป็นส่วนหนึ่งในการเปิด-ปิดที่กั้นทางรถไฟ โดยในระบบนี้ใช้ตัว

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาระบบการทำงานของระบบ APM (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
		<p>เซ็นเซอร์ที่ติดตั้งอยู่ด้านข้างของรางรถไฟส่งสัญญาณการตรวจจับการมาถึงของรถไฟไปยัง PLC เพื่อควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ที่ทำหน้าที่เปิด-ปิดที่กั้นทางรถไฟ ผลที่ได้จากการทดลองคือเวลาที่ใช้ในการเปิด-ปิดที่กั้นด้วยการดำเนินการแบบอัตโนมัติจึงน้อยกว่าแบบแรงงานคน และมีข้อผิดพลาดในการดำเนินการน้อยกว่า</p>
2014	<p>Anandhan, P., Logeswaran, V., Lakshmakumar, P.S., Rajkumar, G. and Kalpanadevi, S.</p>	<p>เสนอระบบป้องกันรถไฟฟ้าด้วยการควบคุมและการตรวจสอบอัตโนมัติผ่านการทำงานของ PLC และ SCADA เนื่องจากระบบส่วนต่าง ๆ ของรถไฟ เช่น ระบบประตู ระบบตรวจสอบสถานะการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้า ระบบสับราง ระบบป้องกันการชน ระบบไฟอาณัติสัญญาณ เป็นต้น มีการควบคุมเป็นระบบย่อยหลายระบบด้วยมือหรือกึ่งอัตโนมัติ ซึ่งไม่สามารถรับรองความปลอดภัยในการทำงานของรถไฟฟ้าได้ ดังนั้นระบบนี้จึงใช้ PLC ร่วมกับเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งในรถไฟฟ้าป้องกันความปลอดภัยของระบบโดยรวม แล้วใช้ SCADA ฝ้าติดตามการทำงานของระบบ จากการทดลองพบว่าระบบนี้สามารถป้องกันความปลอดภัยของระบบรถไฟฟ้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ</p>
2015	<p>Vardhan, S. and Narayan, S.</p>	<p>ศึกษาระบบควบคุมและตรวจสอบการทำงานของสายพานลำเลียงอัตโนมัติที่ใช้ลำเลียงขวดและถาดบนสายพานชุดเดียวกัน การทำงานของระบบจะมีการตรวจจับและแยกภาชนะแต่ละชนิด โดยอาศัยความสูงและความกว้างของภาชนะที่ถูกลำเลียงด้วยเซ็นเซอร์ 1 ตัวที่ติดตั้งในระดับที่สูงกว่าความสูงของถาดและตรวจจับถาดด้วยเซ็นเซอร์ 2 ตัวที่ติดตั้งให้มีความห่างกว่าความกว้างของขวด เมื่อเซ็นเซอร์ชุดใดชุดหนึ่งในระบบตรวจพบภาชนะได้ ระบบจะส่งสัญญาณไปยัง PLC เพื่อควบคุมมอเตอร์ของระบบสายพานให้หยุดและบรรจุผลิตภัณฑ์เข้าไปยังภาชนะแต่ละ</p>

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาระบบการทำงานของระบบ APM (ต่อ)

ก.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
		ชนิด จากนั้นก็เริ่มการเคลื่อนที่บนสายพานลำเลียงเพื่อดำเนินการในขั้นต่อ ๆ ไปแบบอัตโนมัติ
2016	Langman, R. and Rojas-Peña, L.F.	อธิบายถึงการใช้งานของ PLC ตามหลักการสร้างกรอบและมาตรฐานอุตสาหกรรม 4.0 (Reference Architectural Model Industry 4.0 : RAMI 4.0) ที่ในระบบต้องประกอบมี 3 ส่วน ได้แก่ ฮาร์ดแวร์หรือซอฟต์แวร์ที่ใช้ทำงานจริง แหล่งเก็บข้อมูลออนไลน์ และช่องทางการสื่อสาร โดย PLC จะทำงานได้อย่างดีในสภาพแวดล้อมแบบนี้ เนื่องจากการส่งข้อมูลต่าง ๆ ที่ใช้ในการประมวลผลของ PLC สามารถส่งผ่านเครือข่าย IP ได้โดยตรงจึงทำให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่เกิดการหน่วงเวลาขึ้นระหว่างที่ระบบทำงาน
2016	Sivanandam, S.N.	พัฒนาระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติสำหรับควบคุมรถไฟใต้ดินด้วย PLC และ SCADA ซึ่งช่วยในการรับ/ส่งข้อมูลในการสั่งงานของเครือข่ายระบบให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น เนื่องจากการควบคุมแบบเดิมที่ถูกใช้งานในอดีตจะมีข้อบกพร่องหลายอย่าง เช่น ระบบสั่งการทำงานไม่มีประสิทธิภาพ ระบบใช้เวลาในการรับ/ส่งข้อมูลมากเกินไป เป็นต้น ปัญหาเหล่านี้จะนำไปสู่ความเสียหายต่าง ๆ ไม่ว่าจะทั้งในชีวิตคนหรือทรัพย์สิน จากการทดลองพบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมาช่วยให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ใช้เวลาในการสั่งการน้อยลง และลดปริมาณพลังงานที่จะต้องใช้ในระบบให้น้อยลงอีกด้วย
2017	Vasile, L. and Ramona, D.	เสนอการออกแบบระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าสามเฟสแบบอะซิงโครนัสด้วย PLC ซึ่งมีรูปแบบการควบคุมทั้งหมด 3 วิธี ได้แก่ วิธีการควบคุมอัตโนมัติจะตามโครงร่างความเร็วที่กำหนดไว้ วิธีการควบคุมมือด้วยการโพเทนชิโอมิเตอร์ที่หน้าจอ HMI และวิธีการควบคุม GSM จาก

ตารางที่ 2.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาระบบการทำงานของระบบ APM (ต่อ)


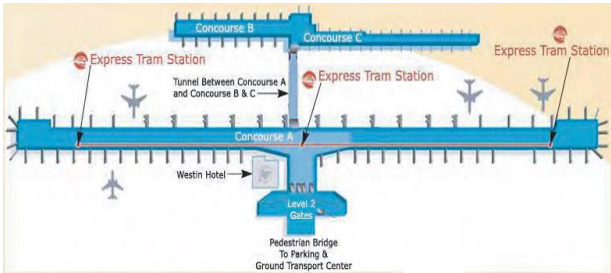
ค.ศ.	คณะผู้ทำวิจัย	การดำเนินงานวิจัย
		คำสั่ง SMS ที่ส่งไปยังโมดูล GPRS ที่เชื่อมอุปกรณ์ควบคุม
2017	Umbarkar, D.A., Talele, K., Salunke, S. and Salunke, G.	เสนอการควบคุมระบบป้องกันและการตรวจสอบการเคลื่อนไหวของรถไฟด้วย PLC กับ SCADA แบบอัตโนมัติ เนื่องปัจจุบันระบบการป้องกันเครือข่ายรถไฟแต่ละระบบจะถูกควบคุมด้วยมือคนหรือกึ่งอัตโนมัติเป็นหลัก ทำให้ในกรณีที่เกิดอะไรขึ้นกับระบบอาจจะไม่สามารถป้องกันปัญหาได้ทันการณ์ จากการนำระบบมาใช้จริงพบว่าระบบสามารถป้องกันเหตุอันตรายที่เกิดขึ้นกับรถไฟได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2017	Devi, T.B., Gupta, N. and Sharma, J.	เสนอการนำ PLC และ SCADA มาประยุกต์ใช้เพื่อสร้างระบบการจัดการระบบรางวิ่งรถไฟอัตโนมัติเพื่อป้องกันปัญหาการชนกันของรถไฟ เนื่องจากระบบรถไฟของประเทศอินเดียมีรางวิ่งที่เป็นเส้นทางทับซ้อนที่มีรถไฟใช้ร่วมกันหลายขบวน ระบบนี้จะใช้ PLC เป็นอุปกรณ์ควบคุมหลักและมี SCADA ในการดูแลการดำเนินงานของระบบทั้งหมด ซึ่งใช้การรับ/ส่งข้อมูลด้วยการสื่อสารแบบ RS-232 จากการทดลองพบว่าระบบที่เสนอมีการทำงานที่มีประสิทธิภาพมากกว่าระบบที่ควบคุมด้วยวิธีที่มีการใช้ในปัจจุบัน นอกจากนี้ระบบนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการจัดการรางวิ่งของรถไฟเส้นทางอื่นทั่วโลกเช่นกัน

จากปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่ศึกษาข้างต้น พบว่ามีงานวิจัยของหลายที่ที่ได้ นำเสนอเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ PLC ในงานควบคุมอัตโนมัติสำหรับระบบรถไฟต่าง ๆ ทั่วโลก แต่ไม่พบงานวิจัยใดที่กล่าวถึงการนำ PLC มาควบคุมการทำงานของระบบ APM โดยตรงอย่างชัดเจน ข้อมูลส่วนใหญ่ที่ทำได้จึงเป็นข้อมูลจำเพาะของระบบ APM ที่มีการใช้งานจริงในปัจจุบัน ดังนั้นการศึกษาข้อมูลในลำดับถัดไปจะเรียบเรียงและยกตัวอย่างข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับระบบ APM ที่ใช้ PLC สำหรับควบคุมการทำงานของระบบ สามารถอธิบายรายละเอียดของระบบได้ดังตารางต่อไปนี้


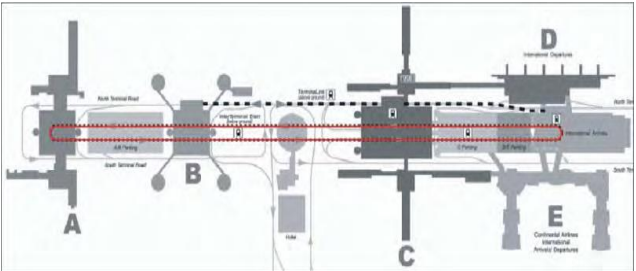
ตารางที่ 2.2 ข้อมูลจำเพาะของระบบ APM ที่ใช้ PLC สำหรับควบคุมการทำงานของระบบ

ลำดับ	ระบบ	ข้อมูลจำเพาะ
1	Air-Rail Link	<div data-bbox="828 443 1254 712" data-label="Image"> </div> <div data-bbox="874 779 1209 819" data-label="Caption">รูปที่ 2.1 ระบบ Air-Rail Link</div> <div data-bbox="695 891 1390 943" data-label="Text"> <p>ประเทศ/เมือง : อังกฤษ/เบอร์มิงแฮม</p> </div> <div data-bbox="695 949 1390 1001" data-label="Text"> <p>ปีที่เริ่มให้บริการ : ค.ศ.2003</p> </div> <div data-bbox="695 1008 1390 1059" data-label="Text"> <p>ผู้ผลิต : DCC Doppelmayr</p> </div> <div data-bbox="695 1066 1390 1182" data-label="Text"> <p>ระบบควบคุม : ควบคุมอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยี PLC แบบนิรภัย</p> </div> <div data-bbox="695 1189 1390 1294" data-label="Text"> <p>ระบบขับเคลื่อน : ขับเคลื่อนแบบสายเคเบิลด้วยมอเตอร์ขนาด 415 V, 50 Hz</p> </div> <div data-bbox="695 1301 1390 1473" data-label="Text"> <p>สมรรถนะของรถ : - แบบรถ 2 คัน/ขบวน - ความเร็วสูงสุด 36 km/h - ความจุ 54 คน/ขบวน (27 คน/คัน)</p> </div> <div data-bbox="695 1480 1390 1532" data-label="Text"> <p>เส้นทางบริการ :</p> </div> <div data-bbox="810 1592 1273 1861" data-label="Image"> </div> <div data-bbox="786 1921 1294 1962" data-label="Caption">รูปที่ 2.2 เส้นทางบริการระบบ Air-Rail Link</div>

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลจำเพาะของระบบ APM ที่ใช้ PLC สำหรับควบคุมการทำงานของระบบ (ต่อ)

ลำดับ	ระบบ	ข้อมูลจำเพาะ
2	Express Tram	 <p data-bbox="871 779 1211 819">รูปที่ 2.3 ระบบ Express Tram</p>
		ประเทศ/เมือง : สหรัฐอเมริกา/ดีทรอยต์
		ปีที่เริ่มให้บริการ : ค.ศ.2002
		ผู้ผลิต : Poma-Otis
		ระบบควบคุม : ควบคุมอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยี PLC แบบนิรภัย
		ระบบขับเคลื่อน : ขับเคลื่อนแบบสายเคเบิลด้วยมอเตอร์กระแสตรง
		สมรรถนะของรถ : <ul style="list-style-type: none"> - แบบรถ 2 คัน/ขบวน - ความเร็วสูงสุด 42-50 km/h - ความจุ 208 คน/ขบวน (104 คน/คัน)
		<p data-bbox="699 1487 884 1527">เส้นทางบริการ :</p>  <p data-bbox="786 1921 1294 1962">รูปที่ 2.4 เส้นทางบริการระบบ Express Tram</p>

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลจำเพาะของระบบ APM ที่ใช้ PLC สำหรับควบคุมการทำงานของระบบ (ต่อ)

ลำดับ	ระบบ	ข้อมูลจำเพาะ
3	Inter-Terminal Train	 <p data-bbox="831 775 1251 819">รูปที่ 2.5 ระบบ Inter-Terminal Train</p>
		ประเทศ/เมือง : สหรัฐอเมริกา/ฮิวสตัน
		ปีที่เริ่มให้บริการ : ค.ศ.1981
		ผู้ผลิต : Bombardier (formerly TGI)
		ระบบควบคุม : ควบคุมอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยี PLC แบบบล็อกคงที่
		ระบบขับเคลื่อน : ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์เหนี่ยวนำเชิงเส้นที่ติดตั้งบนรถ
		สมรรถนะของรถ : <ul style="list-style-type: none"> - แบบรถ 3 คัน/ขบวน - ความเร็วสูงสุด 64 km/h - ความจุ 36 คน/ขบวน (12 คน/คัน)
		<p data-bbox="703 1480 887 1525">เส้นทางบริการ :</p>  <p data-bbox="743 1917 1334 1962">รูปที่ 2.6 เส้นทางบริการระบบ Inter-Terminal Train</p>

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลจำเพาะของระบบ APM ที่ใช้ PLC สำหรับควบคุมการทำงานของระบบ (ต่อ)

ลำดับ	ระบบ	ข้อมูลจำเพาะ
4	Concourse Tram	 <p data-bbox="855 824 1227 869">รูปที่ 2.7 ระบบ Concourse Tram</p>
		ประเทศ/เมือง : สหรัฐอเมริกา/มินนีแอโพลิส
		ปีที่เริ่มให้บริการ : ค.ศ.2004
		ผู้ผลิต : Poma-Otis
		ระบบควบคุม : ควบคุมอัตโนมัติด้วยเทคโนโลยี PLC
		ระบบขับเคลื่อน : ขับเคลื่อนแบบสายเกเบิลด้วยมอเตอร์
		สมรรถนะของรถ : <ul style="list-style-type: none"> - แบบรถ 2 คัน/ขบวน - ความเร็วสูงสุด 42 km/h - ความจุ 32 คน/ขบวน (16 คน/คัน)
		เส้นทางบริการ :  <p data-bbox="770 1899 1310 1944">รูปที่ 2.8 เส้นทางบริการระบบ Concourse Tram</p>

2.3 สรุป

บทที่ 2 เสนอการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรม งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และตัวอย่างระบบ APM ที่ใช้ PLC ในการควบคุมการเดินรถ จากฐานข้อมูลที่เป็นแหล่งสะสมรายงานวิจัยและวรรณกรรมทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่มีความเป็นมาตรฐาน เช่น ฐานข้อมูลจาก IEEE เป็นต้น ทำให้ทราบถึงแนวทางการวิจัย ระเบียบวิธีดำเนินการ และผลที่ได้จากการนำ PLC มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมระบบรถไฟฟ้าอัตโนมัติของนักวิจัยจากสถาบันต่าง ๆ ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน แต่ไม่พบงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับการนำ PLC มาพัฒนาระบบควบคุมการเคลื่อนที่สำหรับระบบ APM โดยตรง มีก็เพียงแต่งานวิจัยที่คล้ายคลึงหรือสอดคล้องกับระบบที่ทำการพัฒนา เช่น การควบคุมความเร็วมอเตอร์ผ่านอุปกรณ์ PLC การพัฒนาระบบตรวจจับอัตโนมัติด้วย PLC การใช้ PLC สำหรับควบคุมรถไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งสามารถนำไปต่อยอดและประยุกต์ใช้ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ต่อไป



บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

การศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์มีความสำคัญในการดำเนินงานให้บรรลุตามเป้าหมายที่ได้วางเอาไว้ เพื่อสร้างองค์ความรู้และความเข้าใจพื้นฐานที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยวิทยานิพนธ์ทั้งหมด 4 หัวข้อ ได้แก่ ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยอินเวอร์เตอร์ในระบบรถไฟฟ้า การตรวจสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ในระบบรถไฟฟ้า และลักษณะสมบัติการเคลื่อนที่ของระบบขนส่งผู้โดยสาร ซึ่งจะกล่าวโดยสรุปสำหรับส่วนที่เป็นประโยชน์ต่อการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้เพื่อความกระชับและชัดเจนในเนื้อหา

3.2 ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ

ในยุคที่เทคโนโลยีมีความก้าวหน้าถึงขีดสุด ระบบอัตโนมัติเข้ามามีบทบาทสำคัญในการดำเนินชีวิตของมนุษย์ทุก ๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นด้านอุตสาหกรรม ด้านการแพทย์ ด้านการศึกษา ด้านธุรกิจ ด้านความปลอดภัย หรือด้านเกษตรกรรม รวมไปถึงด้านการบริการขนส่งสาธารณะที่มีให้เห็นมากมายในปัจจุบัน โดยระบบขนส่งอัตโนมัติ (Automated Transit) ถูกออกแบบและพัฒนาขึ้นเพื่อใช้สำหรับรับ/ส่งผู้โดยสารด้วยระบบขับเคลื่อนอัตโนมัติแบบไม่มีเจ้าหน้าที่หรือพนักงานขับอยู่บนรถ การให้บริการระบบนี้ถูกแยกหมวดหมู่ตามขนาดและรูปแบบการทำงาน ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ระบบรถบัสอัตโนมัติ (Automated bus) เป็นยานพาหนะที่มีลักษณะคล้ายรถบัสสามารถขนส่งผู้โดยสารตั้งแต่ 15 คนขึ้นไปในระยะทางสั้น ๆ ด้วยการทำงานแบบอัตโนมัติ แสดงดังรูปที่ 3.1 และระบบขนส่งผู้โดยสารนำทางอัตโนมัติ (Automated Guideway Transit : AGT) เป็นรถไฟฟ้ารูปแบบหนึ่งที่เคลื่อนที่แบบอัตโนมัติตามแนวของรางนำทาง (Guideway) ระยะสั้นที่กำหนดไว้ โดยระบบ AGT ถูกออกแบบขึ้นมาเพื่อขนส่งผู้โดยสารตั้งแต่ 3 ถึง 100 คนด้วยความเร็ว 20 ถึง 90 กิโลเมตรต่อชั่วโมงขึ้นอยู่กับประเภทของระบบ AGT ที่ใช้งาน โดยระบบนี้ยังสามารถแยกเป็นประเภทย่อยได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่ ระบบรถไฟฟ้าไร้คนขับอัตโนมัติ (Driverless Metro: DLM) ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ (Automated People Mover: APM) ระบบขนส่งสาธารณะอัตโนมัติแบบส่วนบุคคล (Personal Rapid Transit: PRT) และระบบขนส่งสาธารณะอัตโนมัติแบบกลุ่ม (Group Rapid Transit: GRT) ซึ่งแต่ละประเภทถูกจำแนกออกตามลักษณะของ

ขบวนรถโดยสารและความสามารถในการจุผู้โดยสารของระบบ (Liu, 2017)



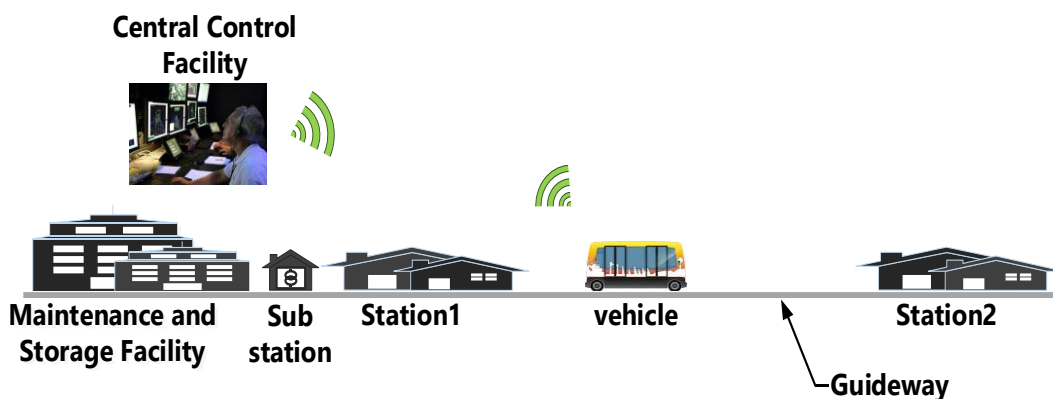
รูปที่ 3.1 ระบบรถบัสอัตโนมัติ

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา การพัฒนาระบบขนส่งอัตโนมัติเป็นไปอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบ APM ที่ได้รับการพัฒนาและนำไปใช้สำหรับขนส่งผู้โดยสารในบริเวณพื้นที่ที่มีขนาดจำกัดต่าง ๆ เช่น ท่าอากาศยาน ย่านธุรกิจ เขตใจกลางเมือง เป็นต้น ด้วยจุดเด่นที่ว่าระบบนี้สามารถจุผู้โดยสารได้มากเทียบเท่าระบบ DLM และระบบรถไฟฟ้ารูปแบบอื่น ๆ นอกจากนี้ยังสามารถลดการส่งเสียงดังรบกวนขณะที่รถกำลังเคลื่อนที่ เนื่องจากระบบ APM มีการใช้ล้อยางในการเคลื่อนที่ ทำให้ขณะที่รถวิ่งไม่เกิดเสียงกระทบกับระหว่างล้อกับรางเหมือนระบบรถไฟฟ้าทั่วไปที่ใช้ล้อเหล็กในการเคลื่อนที่ (Gerland and Zemlin, 1980) โดยสำนักงานบัญชีทั่วไป (General Accounting Office : GAO) ได้ให้คำจำกัดความเกี่ยวกับระบบ APM ว่า “ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ (Automated People Mover : APM) เป็นยานพาหนะที่เคลื่อนที่ตามรางนำทาง (Guideway) ที่กำหนดไว้แบบอัตโนมัติ” แต่คำจำกัดความนี้ยังมีความคลุมเครือและครอบคลุมไปถึงระบบขนส่งอัตโนมัติรูปแบบอื่น ๆ ไม่สามารถเจาะจงหรือสื่อความหมายถึงระบบ APM ได้โดยตรง เนื่องจากระบบ APM และระบบย่อยทุกระบบในระบบ AGT จะมีลักษณะการทำงานคล้ายคลึงกัน ดังนั้นจึงต้องมีการจำแนกประเภทระหว่างระบบ APM และระบบอื่น ๆ ด้วยความสามารถในการจุผู้โดยสาร (Liu, 2017) ซึ่งในระบบ AGT สามารถแบ่งประเภทของระบบย่อย ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ระบบขนส่งผู้โดยสารนำทางอัตโนมัติ

ระบบ APM ที่มีการใช้งานในปัจจุบันสามารถขนส่งผู้โดยสารได้ตั้งแต่ 30 ถึง 100 คนต่อตู้โดยสาร มีรูปแบบการเคลื่อนที่ทั้งแบบความเร็วคงที่ตลอดการให้บริการและแบบความเร็วเปลี่ยนแปลงตามโหมดการเคลื่อนที่ตามลักษณะ โครงร่างความเร็วที่ได้ออกแบบไว้ (Liu, 2017) สำหรับการทำงานของระบบจะดำเนินการแบบอัตโนมัติตามสั่งการที่ได้รับมาจากศูนย์กลางควบคุมระบบ (Central Control Facility) โดยที่ไม่ต้องมีคนขับหรือเจ้าหน้าที่ควบคุมระบบคอยประจำการอยู่บนรถขณะที่ระบบบริการรับ/ส่งผู้โดยสาร จึงช่วยให้การนำระบบนี้มาใช้สามารถลดต้นทุนในการจ้างเจ้าหน้าที่ดูแลระบบ ลดเวลาในการดำเนินการต่าง ๆ และเพิ่มประสิทธิภาพความน่าเชื่อถือในการให้บริการระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนให้มากขึ้น (ณ กาฬ เลหาะวิไลย, 2556: ออนไลน์) ระบบ APM จะมีการแบ่งหน้าที่การดำเนินการของระบบให้กับส่วนประกอบย่อยของระบบที่อาศัยองค์ความรู้ทางด้านวิศวกรรมทุกแขนงมาประยุกต์ให้เข้ากัน ไม่ว่าจะเป็นด้านไฟฟ้ากำลังและอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องกลและยานยนต์ โยธาและโครงสร้างพื้นฐาน คอมพิวเตอร์และสื่อสาร เป็นต้น เพื่อระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด องค์ประกอบของระบบ APM ถูกแบ่งออกเป็น 6 ส่วน (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine [NASEM], 2012) แสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 องค์ประกอบระบบ APM

3.2.1 รถ

รถ (Vehicle) หรือตู้โดยสารที่ใช้ในระบบ APM มีขนาดความยาวอยู่ที่ประมาณ 10-12 เมตรและกว้าง 3 เมตร ซึ่งสามารถจุผู้โดยสารได้ถึง 30-100 คน รถที่มีการใช้งานจะมีทั้งแบบคันเดี่ยวและแบบขบวนที่เชื่อมต่อรถตั้งแต่ 4-6 คัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานและเทคโนโลยีระบบ APM ที่เลือกใช้ โดยภายในตัวรถจะมีการติดตั้งสิ่งอำนวยความสะดวกหลายอย่าง เช่น ระบบปรับอากาศ ระบบประตูควบคุมอัตโนมัติ ระบบสื่อสารภายใน ระบบเครื่องเสียงและภาพวิดีโอ ระบบตรวจจับและป้องกัน ไฟไหม้ ที่นั่งผู้โดยสารและราวจับยืน เป็นต้น นอกจากนี้รถบางคันยังมีการออกแบบให้สามารถรองรับการบรรทุกรถเข็นสัมภาระหรือรถเข็นผู้พิการ รถของระบบ APM รองรับรูปแบบการวิ่งทั้งหมด 4 แบบ ได้แก่ แบบล้อยาง (Rubber tires) เป็นรูปแบบที่ใช้ล้อยางร่วมกับทางวิ่งที่เป็นคอนกรีตหรือเหล็กทำให้เวลาวิ่งไม่ก่อให้เกิดเสียงรบกวนและมีราคาถูกจึงมักถูกนำมาใช้ในขนส่งระหว่างอาคารหรือเขตเมือง แบบล้อเหล็ก (Steel wheels) เป็นรูปแบบที่ใช้ล้อและทางวิ่งที่เป็นเหล็กทั้งคู่ทำให้วิ่งได้ด้วยความเร็วที่สูงกว่าแบบล้อยางเนื่องจากมีแรงเสียดทานระหว่างล้อกับทางวิ่งน้อย แต่จะมีเสียงรบกวนจากการกระทบกันระหว่างล้อกับทางวิ่งจึงไม่เหมาะสำหรับการนำมาใช้ในเขตที่มีคนพลุกพล่าน แบบแรงยกอากาศ (Air levitation) เป็นรูปแบบที่ใช้หลักของแรงดันอากาศที่เกิดจากการเป่าลมของพัดลมที่ติดตั้งใต้แชสซีของรถไปยังพื้นผิวพิเศษของทางวิ่งเพื่อยกขบวนให้ลอยขึ้นจากทางวิ่งเล็กน้อยขณะเคลื่อนที่ทำให้รถสามารถวิ่งได้อย่างรวดเร็วและเงียบเนื่องจากไม่มีแรงเสียดทานระหว่างล้อกับพื้น และแบบแรงยกแม่เหล็กไฟฟ้าหรือแม่เหล็ก (Magnetic levitation or Maglev) เป็นรูปแบบการวิ่งที่มีลักษณะการทำงานคล้ายกับระบบแบบแรงยกอากาศ แต่รูปแบบนี้จะอาศัยหลักของคลื่นสนามแม่เหล็กและมอเตอร์เชิงเส้นในการขับเคลื่อนด้วยคลื่นแม่เหล็กที่ผลิตจากแม่เหล็กถาวรหรือแม่เหล็กไฟฟ้าที่ติดตั้งบนรถ ความเร็วของการวิ่งแบบแรงยกแม่เหล็กไฟฟ้าจะอยู่ช่วง 50-320 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

3.2.2 รังนำทาง

รังนำทาง (Guideway) ถูกออกแบบและติดตั้งตามทางวิ่งของระบบ APM เพื่อบังคับทิศทางการวิ่งของรถให้สามารถเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่ได้วางเอาไว้โดยมีประสิทธิภาพ ทางวิ่งของระบบนี้จะมีลักษณะการก่อสร้างอยู่ทั้งหมด 3 แบบ คือ แบบทางวิ่งระดับพื้นดิน แบบทางวิ่งระดับยกสูงจากพื้น และแบบทางวิ่งระดับใต้ดิน โดยทางวิ่งแบบระดับสูงจากพื้นมักถูกนำไปใช้ในระบบ APM เนื่องจากรูปแบบนี้สามารถลดปัญหาการจราจรติดขัดในภาคพื้นดินได้ต่างจากระดับพื้นดินที่อาจจะต้องสร้างทางวิ่งให้ตัดผ่านถนนที่รถทั่วไปสัญจรอยู่และใช้ต้นทุนในการก่อสร้างที่ค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับการขุดอุโมงค์ของทางวิ่งแบบระดับใต้ดิน รังนำทางที่ติดตั้งตามทางวิ่งอาจสร้างด้วยเหล็กหรือคอนกรีตเสริมเหล็กตามความเหมาะสมในการใช้งาน การติดตั้งรางนี้จะสามารถทำได้ 2 ลักษณะ ได้แก่ การนำทางแบบด้านข้าง (Side guidance) ใช้โครงสร้างที่เป็นเหล็กหรือคอนกรีตยึดรางนำทางที่ติดตั้งไว้ด้านข้างทางวิ่งของ APM ชูตรงหรือแนวนำทางอาจจะตั้งอยู่ในระดับเดียวกันหรือสูงกว่าพื้นผิวเส้นทางหลักที่ล้อรถวิ่งผ่าน โดยทั่วไปชูตรงนี้ต้องใช้กลไกพิเศษและการติดตามรักษาทิศทางการทำงานของระบบผ่านวงจรรออัตโนมัติ แสดงดังรูปที่ 3.4 และการนำทางแบบกึ่งกลาง (Center guidance) โดยทั่วไปใช้โครงสร้างที่เป็นเหล็กยึดรางนำทางแล้วใช้ล้อนำทาง (Guide wheel) สองตัววางในลักษณะที่หนีบรางจากทั้งสองข้างให้อยู่ในแนวกึ่งกลางของเส้นทางวิ่ง การนำทางในลักษณะนี้สามารถวางรางนำทางให้มีความสูงได้หลายระดับขึ้นอยู่กับความเหมาะสมแต่ละจุดของทางวิ่ง แสดงดังรูปที่ 3.5 นอกจากนี้ระบบนี้ยังสามารถนำรางแบบสลับเปลี่ยนมาประยุกต์ใช้กับรางนำทางในกรณีที่ทางวิ่งมีส่วนแยกเป็นสองเส้นทางขึ้นไป



รูปที่ 3.4 รางนำทางแบบด้านข้าง

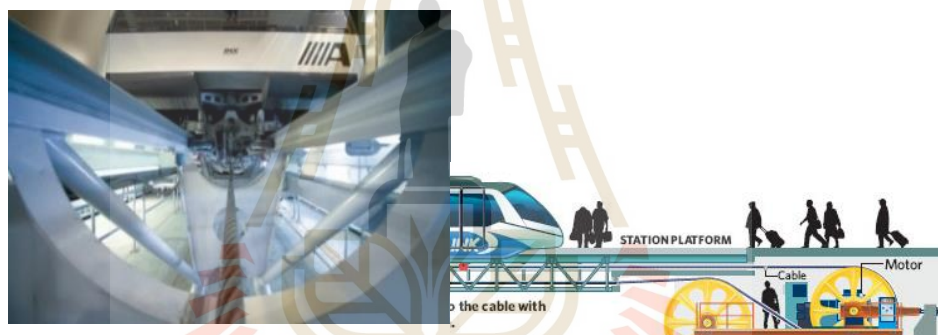


รูปที่ 3.5 รางนำทางแบบกึ่งกลาง

3.2.3 ระบบไฟฟ้ากำลังและการขับเคลื่อน

ระบบไฟฟ้ากำลังและการขับเคลื่อน (System power and Propulsion) ของระบบ APM ถูกออกแบบให้มีการทำงานที่สัมพันธ์กัน โดยรูปแบบการขับเคลื่อนถูกกำหนดจากสถานี

ไฟฟ้าที่ติดตั้งตามแนวทางวิ่งของระบบ ซึ่งสามารถแบ่งรูปแบบการขับเคลื่อนได้ 2 แบบ ได้แก่ แบบขับเคลื่อนด้วยตัวเอง (Self-propelled) เป็นรูปแบบการขับเคลื่อน APM ด้วยมอเตอร์กระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ (AC Induction motor) พิกัด 480-600 V หรือมอเตอร์กระแสตรง (DC motor) พิกัด 750-1,300 V ที่รับกระแสไฟฟ้าที่จำเป็นในการขับเคลื่อนจากสถานีไฟฟ้าของระบบ โดยการขับเคลื่อนแบบนี้จะไม่มีภาระจำกัดระยะการวิ่งตามเท่าที่มีสถานีไฟฟ้าย่อยตามเส้นทางที่รถวิ่ง เหมาะสำหรับระบบที่มีเส้นทางแบบวิ่งรอบสถานีที่ต่าง ๆ หรือวิ่งเป็นเครือข่ายหลายคัน และแบบขับเคลื่อนด้วยสายเคเบิล (Cable-propelled) เป็นรูปแบบการขับเคลื่อน APM ที่ใช้สายเคเบิลเหล็กที่ถูกดึงในแนวเดียวกับรางนำทาง โดยสายเคเบิลนี้จะถูกม้วนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าที่ติดตั้งอยู่ที่สถานีผู้โดยสาร โดยรูปแบบนี้จะใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับพิกัด 480 V ซึ่งมีระยะขับเคลื่อนได้ไม่เกิน 4000 ฟุต เหมาะสำหรับใช้งานในพื้นที่ระหว่างอาคารหรือพื้นที่ขนาดเล็กอื่น ๆ แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 การขับเคลื่อนด้วยสายเคเบิล

3.2.4 หน่วยควบคุมและสื่อสาร

เนื่องจากการจัดซื้อจัดจ้างระบบ APM จะมอบหน้าที่การออกแบบ สร้าง ดำเนินการ และซ่อมบำรุงระบบให้แก่บริษัทเอกชนผู้รับผิดชอบเพียงรายเดียวเท่านั้น ทำให้ระบบควบคุมที่ใช้ในระบบนี้มีลักษณะเป็นเทคโนโลยีระบบควบคุมรถอัตโนมัติ (Automatic Train Control: ATC) ที่ทางบริษัทผู้รับเหมาจัดหา โดยระบบ ATC ที่ใช้ส่วนใหญ่มีองค์ประกอบย่อยทั้งหมด 3 ระบบ ได้แก่ ระบบควบคุมการเดินรถอัตโนมัติ (Automatic Train Operation: ATO) ระบบป้องกันอัตโนมัติ (Automatic Train Protection: ATP) และระบบกำกับการเดินรถอัตโนมัติ (Automatic Train Supervision: ATS) โดย ATP มีหน้าที่ในการกำหนดรูปแบบการป้องกันด้านความปลอดภัย แล้ว ATO ทำหน้าที่ในการควบคุมการทำงานของรถให้อยู่ในเงื่อนไขที่สั่งมาจาก ATP และสุดท้าย ATS ทำหน้าที่เป็นส่วนควบคุมระบบในกรณีที่ระบบเกิดความขัดข้องจากคำสั่ง

คอมพิวเตอร์ที่ควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์เฟสที่ตั้งอยู่ในศูนย์กลางควบคุมระบบ (Central Control Facility: CCF) ในอดีตระบบ APM รุ่นแรก ๆ ใช้รีเลย์เป็นอุปกรณ์หลักในการควบคุมลักษณะการทำงานของระบบ ต่อมาได้มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการควบคุมระบบเป็นแบบไมโครโปรเซสเซอร์ และตั้งแต่ช่วงปี ค.ศ. 1980 ได้มีการพัฒนาระบบควบคุมแบบใหม่ที่เรียกว่าระบบ Communications-based train control (CBTC) ซึ่งใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบให้มีลักษณะใกล้เคียงกับระบบขนส่งสาธารณะที่มีการใช้งาน ซึ่งปัจจุบันนี้ระบบ CBTC ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายและส่วนใหญ่จะนำมาใช้แทนที่เทคโนโลยีควบคุมระบบ APM แบบเก่า

3.2.5 สถานีผู้โดยสาร

สถานีผู้โดยสาร (Station) มีลักษณะเป็นอาคารสำหรับรับ/ส่งผู้โดยสารที่ใช้บริการระบบและให้รถสามารถจอดพักได้ในกรณีที่ต้องการถ่ายเทผู้โดยสารที่จะเปลี่ยนคัน สถานีนี้มักถูกออกแบบและสร้างขึ้นตามเส้นทางการวิ่งของระบบ APM เพื่อให้ผู้โดยสารสามารถเข้าถึงการให้บริการของระบบได้ โดยปกติสถานีผู้โดยสารจะประกอบด้วยสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ได้แก่ ประตูชานชาลา จอแสดงสถานะ กล้องวงจรปิด บันไดเลื่อน เป็นต้น

3.2.6 โรงซ่อมบำรุงและจัดเก็บรถ

โรงซ่อมบำรุงและจัดเก็บรถ (Maintenance and Storage Facility) เป็นสถานที่สำหรับการบำรุงรักษาและการเก็บรักษารถตลอดจนเป็นที่ตั้งสำนักงานบริหารและศูนย์กลางควบคุมระบบ โรงซ่อมบำรุงจะหน้าที่ต่าง ๆ ได้แก่ การบำรุงรักษาและทำความสะอาดตัวรถ การจัดเก็บชิ้นส่วนอะไหล่และเครื่องมือที่ใช้ในการซ่อมบำรุง เป็นต้น โรงนี้จะได้ใช้งานก็ต่อเมื่อหมดเวลาให้บริการระบบในแต่ละวันหรือเกิดเหตุขัดข้องใด ๆ ขึ้นกับระบบ โดยการตั้งโรงซ่อมบำรุงและจัดเก็บรถมักจะเลือกตำแหน่งที่มีสถานีผู้โดยสารใดสถานีหนึ่งตั้งอยู่เพื่อความสะดวกและประหยัดต้นทุนในการก่อสร้าง

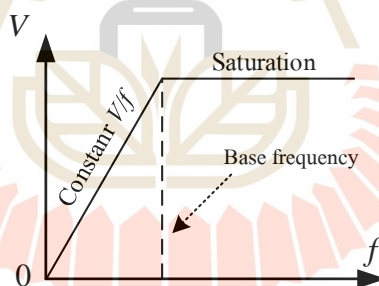
3.3 การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยอินเวอร์เตอร์ในระบบรถไฟฟ้า

ระบบขับเคลื่อนถือเป็นหัวใจหลักในการทำงานของรถไฟฟ้าทุกประเภท ซึ่งจะมีหน้าที่สำคัญในการผลิตต้นกำลังจากอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น เครื่องยนต์ดีเซล เครื่องจักรไอน้ำ เครื่องจักรไฮดรอลิก มอเตอร์ไฟฟ้า เป็นต้น ไปเป็นพลังงานทางกลสำหรับขับเคลื่อนให้ล้อเกิดการเคลื่อนที่ อย่างไรก็ตามที่ทราบกันดีว่าปัจจุบันการขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้านั้นเป็นทางเลือกที่ได้รับความนิยมมากที่สุดด้วยจุดเด่นการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมและมีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีเยี่ยม โดยในอดีตการขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าจะเลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง เนื่องจากการควบคุมที่สามารถทำได้ง่าย มีประสิทธิภาพสูง และมีต้นทุนในการติดตั้งที่ถูก แต่ต่อมาได้มีการหันมาพัฒนาระบบขับเคลื่อนที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ควบคุมด้วย

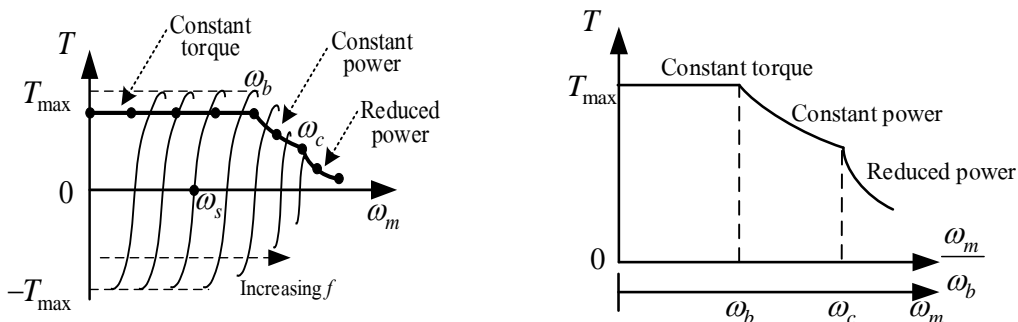
อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เช่น ไทริสเตอร์ ทรานซิสเตอร์กำลัง เป็นต้น และอุปกรณ์อินเวอร์เตอร์ทดแทนในส่วนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ต้องมีการซ่อมบำรุงจากการสึกกร่อนของคอมมิวเตเตอร์และแปรงถ่านที่เกิดขึ้นอยู่บ่อยครั้ง ทำให้การขับเคลื่อนรถไฟฟ้าส่วนใหญ่ในปัจจุบันจะมีการใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำที่ควบคุมด้วยอินเวอร์เตอร์ โดยการขับเคลื่อนนี้ได้มีการวิจัยและพัฒนาเรื่อยมาจนก่อให้เกิดลักษณะการควบคุมหลากหลายรูปแบบที่มีข้อดีข้อด้อยแตกต่างกัน (ชนัดชัย กุลรวานิชพงษ์, 2560) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.3.1 การควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบโวลต์/เฮิรตซ์ (V/F control)

การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าด้วยวิธีนี้จะอาศัยการปรับอัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าต่อความถี่ทำงานของระบบ (volt-per-hertz ratio: V/f ratio) เพื่อรักษาค่าแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ไฟฟ้าให้มีค่าคงที่ในขณะที่ความถี่ทำงานของระบบมีค่าเปลี่ยนแปลง จนกระทั่งฟลักซ์ในแกนเหล็กภายในมอเตอร์ไฟฟ้าเกิดการอิ่มตัวจะทำให้ไม่สามารถรักษาอัตราส่วนดังกล่าวได้ แรงบิดในย่านทำงานนี้จึงมีค่าลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 3.7 และ 3.8 ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าวิธีนี้มีความเด่นในเรื่องการควบคุมที่สามารถทำได้ง่ายโดยที่ไม่ต้องคำนึงถึงพารามิเตอร์ภายใน แต่ด้วยความที่ควบคุมแบบง่ายจึงไม่สามารถควบคุมคุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วได้อย่างแม่นยำ



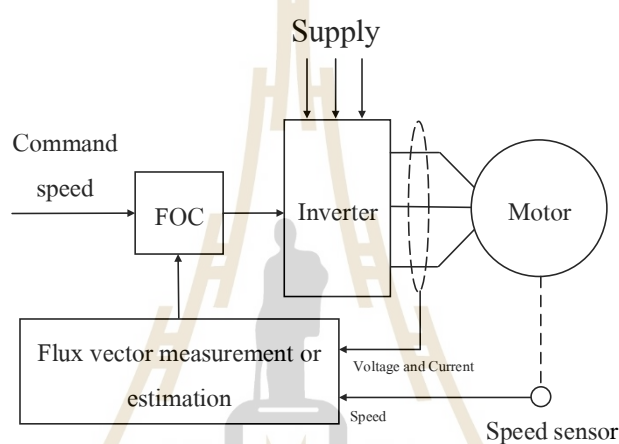
รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์แรงดันไฟฟ้ากับความถี่ทำงานของการควบคุมความเร็วแบบโวลต์/เฮิรตซ์



รูปที่ 3.8 ช่วงการทำงานของการควบคุมความเร็วแบบปรับแหล่งจ่ายด้วยความถี่

3.3.2 การควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบฟลักซ์เวกเตอร์ (Flux Vector control)

การควบคุมด้วยวิธีนี้จะอาศัยการควบคุมฟลักซ์แม่เหล็กภายในมอเตอร์ไฟฟ้าให้มีค่าคงที่ด้วยการป้อนกลับของกระแส เพื่อแก้ปัญหาเรื่องคุณสมบัติแรงบิด-ความเร็วที่วิธีควบคุมแบบ V/f ไม่สามารถควบคุมได้ให้ดีขึ้น แสดงดังรูปที่ 3.9 โดยในการควบคุมจะต้องทราบข้อมูลพารามิเตอร์ของมอเตอร์ด้วยจึงจะสามารถควบคุมฟลักซ์แม่เหล็กได้อย่างถูกต้อง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมอเตอร์ไฟฟ้ามีความเร็วรอบที่ต่ำมาก ๆ ระบบจะมีประสิทธิภาพในการควบคุมที่ต่ำ เนื่องจากไม่เป็นอุดมคติของสวิตช์กำลังและค่าความผิดพลาดของพารามิเตอร์ภายในมอเตอร์ไฟฟ้า



รูปที่ 3.9 การควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบฟลักซ์เวกเตอร์

3.3.3 การควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบเวกเตอร์ (Vector control)

การควบคุมแบบเวกเตอร์หรือแบบฟิลด์ออเรียนเต็ดคอนโทรล (Field Oriented Control: FOC) เป็นวิธีการควบคุมที่อัปเดตมาจากการควบคุมแบบ โวลต์/เฮิร์ตซ์ให้มีการทำงานที่คล้ายคลึงกับมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสแบบกระตุ้นแยก (Separated Exciting) แสดงดังรูปที่ 3.10 โดยทั่วไปการควบคุมนี้จะจ่ายกระแสเดเตอร์ทั้งหมด 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ไว้สร้างฟลักซ์แม่เหล็กและส่วนที่สร้างแรงบิด เพื่อให้การควบคุมทั้งหมดกระทำอยู่บนแกนอ้างอิงที่หมุนไปพร้อมกับฟลักซ์เวกเตอร์ทางด้าน โรเตอร์ ดังนั้นหัวใจสำคัญของวิธีนี้จึงอยู่ที่ว่าระบบจะหาตำแหน่งของฟลักซ์เวกเตอร์ด้วยการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้าได้แม่นยำเพียงใด เนื่องจากในทางปฏิบัติจะไม่สามารถหาค่าฟลักซ์แม่เหล็กได้โดยตรง การควบคุมในลักษณะนี้จึงต้องทราบพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับมอเตอร์ไฟฟ้าทั้งหมดและยังต้องทราบข้อมูลตำแหน่งของแกนมอเตอร์ไฟฟ้าอย่างละเอียดจึงจะสามารถควบคุมมอเตอร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้การควบคุมด้วยวิธีนี้ไม่สามารถนำไปใช้กับระบบที่ไม่มีเซนเซอร์ได้

3.3.5 การควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์ (Sensorless vector control)

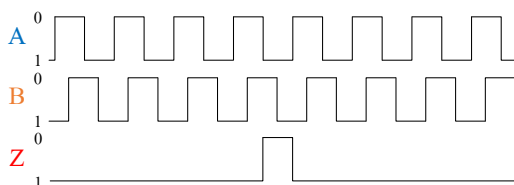
การควบคุมแบบเวกเตอร์ไร้เซนเซอร์จะมีรูปแบบคุณสมบัติของความเร็วและแรงบิดที่ใกล้เคียงกับการควบคุมแบบเวกเตอร์ ซึ่งจะมีจุดเด่นที่เหนือกว่าวงจรควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าชนิดอื่น ๆ คือการที่ไม่จำเป็นต้องติดตั้งเซนเซอร์วัดความเร็วภายในวงจร ทำให้เกิดความสะดวกสบายในการใช้งานเหมือนกับการควบคุมแบบ V/f และประหยัดต้นทุนอีกด้วย อย่างไรก็ตามการควบคุมแบบนี้ก็ยังมีปัญหาในการใช้งานอยู่บ้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมอเตอร์ไฟฟ้ามีการทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะเป็นย่านที่ระบบจะมีค่าแรงบิดเป็นติดลบ ความเร็วต่ำ และมีแรงดันที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้ามีค่าน้อยมากจนเกิดความไม่เป็นอุดมคติในการทำงานของสวิตช์กำลัง จึงอาจจะทำให้การควบคุมขาดความเสถียรได้

3.4 การตรวจสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ในระบบรถไฟฟ้า

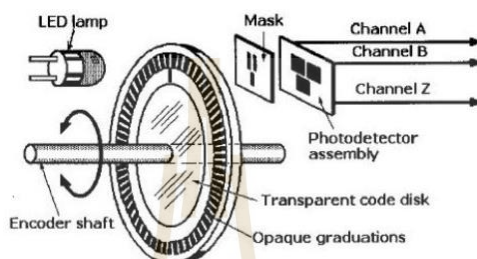
การตรวจสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถเป็นอีกหนึ่งระบบการทำงานหลักที่มีความสำคัญต่อการให้บริการของรถไฟฟ้าที่จะช่วยให้เจ้าหน้าที่ผู้ควบคุมระบบหรือผู้โดยสารสามารถติดตามการตำแหน่งการเคลื่อนที่และผลการทำงานของรถที่กำลังวิ่งให้บริการอยู่ ณ ช่วงเวลานั้นได้อย่างทันทีทันใด ซึ่งปัจจุบันได้มีพัฒนารูปแบบการตรวจสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถให้สามารถนำประยุกต์ใช้กับงานในส่วนอื่น ๆ เช่น ตรวจสอบจำนวนรถที่เข้า/ออกภายในโรงจอดรถ ควบคุมการทำงานของระบบตามเงื่อนไขการตรวจจบริดในตำแหน่งที่กำหนด เป็นต้น ทั้งนี้ขอบเขตการประยุกต์ที่สามารถทำได้จะขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีระบบการตรวจสอบตำแหน่งที่เลือกใช้ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.4.1 การตรวจสอบตำแหน่งด้วยเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder)

การตรวจสอบตำแหน่งหรือวัฏระยะวิ่งของรถไฟฟ้าด้วยวิธีนี้จะอาศัยการเปลี่ยนสัญญาณเชิงกลในรูปของการหมุนให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าที่มีลักษณะเป็นลูกคลื่นพัลส์ แสดงดังรูปที่ 3.12 ซึ่งเกิดจากการที่ตัวรับสัญญาณได้รับแสงวาบ (Optical) หรือคลื่นแม่เหล็ก (Magnetic) ที่ถูกยิงผ่านช่องของจานหมุนที่อยู่ภายในเอ็นโค้ดเดอร์ เรียกว่า ชุดกำเนิดแรงกระตุ้นอิเล็กทรอนิกส์ แสดงดังรูปที่ 3.13 จากนั้นก็นำจำนวนลูกคลื่นพัลส์ที่เกิดขึ้นในแต่ละรอบของการหมุนไปคำนวณหามุมองศาของการหมุน ความเร็วรอบ และระยะทางที่รถวิ่งได้ เพื่อนำค่าที่ได้ไปใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลหรือแสดงผลที่หน้าจอต่อไป อย่างที่กล่าวมาข้างต้นเอ็นโค้ดเดอร์จะมีอยู่ 2 ชนิดตามสัญญาณที่ใช้ภายในเอ็นโค้ดเดอร์ ได้แก่ เอ็นโค้ดเดอร์ชนิดแม่เหล็ก (Magnetic Type Rotary Encoder) และ เอ็นโค้ดเดอร์ ชนิดออปติคัล (Optical Type Rotary Encoder) ตามการเลือกใช้ (Primusthai, 2019)



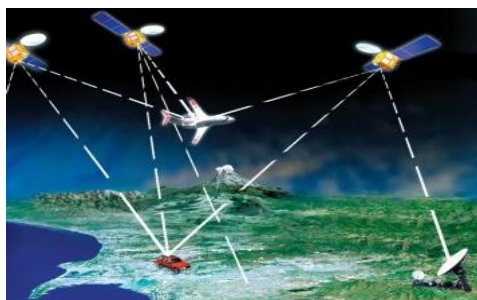
รูปที่ 3.12 สัญญาณลูกคลื่นพัลส์ที่ได้จากการทำงานของเอ็นโค้ดเดอร์



รูปที่ 3.13 ชุดกำเนิดแรงกระตุ้นอิเล็กทรอนิกส์

3.4.2 การตรวจสอบตำแหน่งด้วยระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก (Global positioning system: GPS)

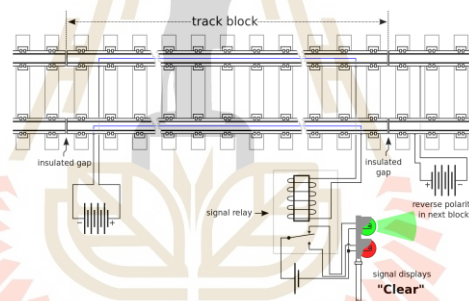
ระบบกำหนดตำแหน่งบนโลกหรือจีพีเอสเป็นระบบดาวเทียมนำร่องโลกที่ช่วยในการระบุตำแหน่งบนภาคพื้นโลกในทุกสภาพอากาศ รวมถึงความเร็วและทิศทางของวัตถุเป้าหมายที่กำลังเคลื่อนที่ เพื่อนำข้อมูลมาใช้ร่วมกับระบบการนำทางแผนที่และระบบติดตามตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถได้ ปัจจุบันได้มีการนำการตรวจสอบตำแหน่งด้วยวิธีนี้มาประยุกต์ใช้กับระบบขนส่งต่าง ๆ เช่น รถยนต์ส่วนบุคคล เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 3.14 โดยที่จะมีการบันทึกประวัติการเดินทางพร้อมกับแสดงตำแหน่งปัจจุบันของอุปกรณ์ GPS ที่ติดตั้งบนระบบขนส่งนั้น ๆ อีกด้วย



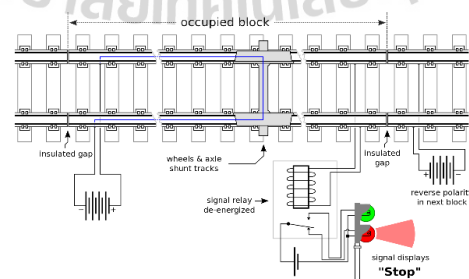
รูปที่ 3.14 การตรวจสอบตำแหน่งด้วย GPS

3.4.3 การตรวจสอบตำแหน่งด้วยระบบอาณัติสัญญาณรถไฟ (Railway signaling system)

ระบบนี้เป็นระบบตรวจจับตำแหน่งของขบวนรถผ่านกลไกสัญญาณไฟหรือระบบคอมพิวเตอร์เพื่อแจ้งให้พนักงานขับทราบถึงสภาพเส้นทางวิ่งข้างหน้าและตัดสินใจว่าจะให้รถทำงานต่อไป ให้หยุด หรือกลับทางวิ่ง ซึ่งช่วยให้การเดินรถมีความปลอดภัยและมีประสิทธิภาพที่สุดในช่วงเวลาที่ไม่มีรถไฟหลายขบวนวิ่งบนเส้นทางทำให้บริการ สำหรับการตรวจสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถแต่ละขบวนจะอาศัยวงจรไฟตอน (Track circuit) แสดงดังรูปที่ 3.15 ที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปบนรางวิ่งที่เชื่อมต่อกับรีเลย์แสดงสถานะของรางที่จะการทำงานเมื่อมีรถไฟบนราง เนื่องจากเมื่อรถอยู่บนรางจะทำให้วงจรไฟตอนเกิดการลัดวงจรและเปลี่ยนสถานะของรีเลย์ เพื่อแสดงตำแหน่งรถที่เคลื่อนที่บนทางวิ่งในขณะนั้น แสดงดังรูปที่ 3.16(ก) ซึ่งปัจจุบันได้มีการพัฒนาระบบนี้โดยอาศัยการจับตำแหน่งรถด้วยคลื่นวิทยุ เรียกว่า ระบบอาณัติสัญญาณแบบ CBTC (Communication Based Train) แสดงดังรูปที่ 3.16(ข) (General instrument, 2016)

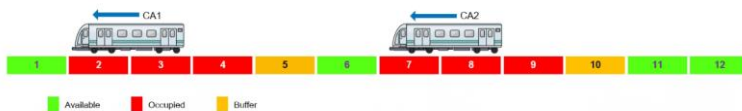


(ก) สถานะขณะที่มีรถไฟบนราง

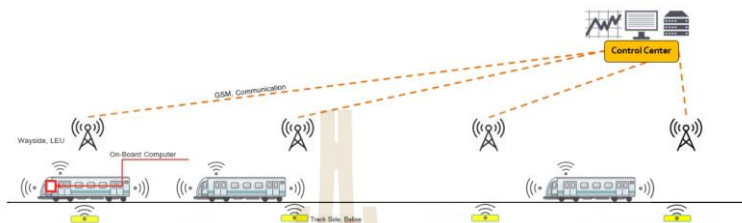


(ข) สถานะขณะที่ไม่มีรถไฟบนราง

รูปที่ 3.15 วงจรไฟตอน



(ก) การตรวจสอบตำแหน่งด้วยระบบอัตโนมัติสัญญาณรถไฟ



(ข) ระบบอัตโนมัติสัญญาณแบบ CBTC

รูปที่ 3.16 ระบบอัตโนมัติสัญญาณ

3.4.4 การตรวจสอบตำแหน่งด้วยเซนเซอร์แสง (Photoelectric sensor)

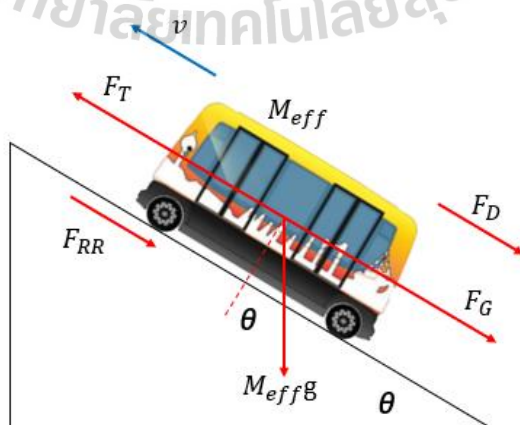
การตรวจสอบตำแหน่งด้วยเซนเซอร์แสงเป็นวิธีการตรวจจับการเคลื่อนที่อย่างง่ายที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในระบบสายพานลำเลียงของโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ การตรวจจับนี้จะใช้หลักการสะท้อนสัญญาณแสงของเซนเซอร์ที่ติดตั้งตามแนวการเคลื่อนที่ของสายพานลำเลียงไปกระทบกับตัววัตถุโดยตรง แสดงดังรูปที่ 3.17 แล้วจึงนำค่าสัญญาณที่ได้ไปยังอุปกรณ์ประมวลผลที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของระบบหรือแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ต่อไป ด้วยจุดเด่นด้านความสะดวกในการติดตั้ง ราคาถูก และสามารถตรวจจับวัตถุได้เกือบทุกชนิด ทำให้ระบบนี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลาย ๆ งาน เช่น ระบบตรวจนับจำนวนรถที่เข้าจอดในโรงจอดรถ ระบบตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ เป็นต้น (นวกัทราน หนูนาถ และพิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, 2555)



รูปที่ 3.17 ระบบอัตโนมัติสัญญาณแบบ CBTC

3.5 ลักษณะสมบัติการเคลื่อนที่ของระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ

การเคลื่อนที่ของ APM จะมีความแตกต่างกันออกไปตามเทคโนโลยีการขับเคลื่อนและการจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่นำมาติดตั้งภายในระบบ แต่โดยพื้นฐานลักษณะการเคลื่อนที่ของระบบนี้จะมีความคล้ายคลึงกับรูปแบบการเคลื่อนที่ของระบบรถไฟฟ้าทั่วไป จะมีความต่างก็เพียงแต่ลักษณะการควบคุมและรายละเอียดย่อยของระบบเท่านั้น ดังนั้นการพิจารณาผลการเคลื่อนที่ของระบบ APM จะเป็นการคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับสร้างแรงบิดขับเคลื่อนที่มากพอที่จะเอาชนะแรงต้านการเคลื่อนที่ในรูปแบบต่าง ๆ ด้วยการคำนวณทางพลวัตของรถไฟฟ้า (train vehicle dynamic) โดยการคำนวณนี้จะเริ่มต้นด้วยการสร้างสมการแรงคู่ที่เกิดขึ้นกับรถรับ/ส่งผู้โดยสารขณะที่กำลังเคลื่อนที่ ดังสมการที่ 3.1 จากแผนภาพวัตถุอิสระแสดงการเคลื่อนที่ของรถ ที่มีค่าประสิทธิผลของน้ำหนัก (effective vehicle mass: M_{eff}) บนทางวิ่งยกระดับให้เอียงทำมุม θ กับแนวราบ ด้วยความเร่ง a ตามกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน (ชนิดซ้าย กุลวรวานิชพงษ์, 2560) แสดงดังรูปที่ 3.18 นอกจากนี้ในแผนภาพยังแสดงแรงกระทำที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของรถ ได้แก่ แรงคู่ของรถ (tractive effort: TE) และแรงต้านการเคลื่อนที่ (movement resistance: MR) ดังสมการที่ 3.2 โดยที่แรงต้านการเคลื่อนที่นี้จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ แรงโน้มถ่วง (gravitational or gradient force: F_{grad}) แรงต้านอากาศ (aerodynamic drag force: F_{drag}) และแรงเสียดทานที่ล้อรถ (frictional force or rolling resistance: F_{RR}) ที่สามารถแยกย่อยออกได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ แรงเสียดทานจากแบร์ริง แรงเสียดทานจากเฟืองทด และแรงเสียดทานจากระบบเบรก โดย F_{RR} จะสามารถเขียนเป็นสมการมาตรฐาน ดังสมการที่ 3.3 ซึ่งทั่วไปสัมประสิทธิ์ f_1 สามารถละทิ้งได้ ในขณะที่สัมประสิทธิ์ f_0 มีค่าประมาณ 0.006–0.01 สำหรับล้อยางกับพื้นถนนคอนกรีต



รูปที่ 3.18 แผนภาพวัตถุอิสระการเคลื่อนที่ของรถใน APM

$$TE - MR = M_{eff} a \quad (3.1)$$

$$MR = F_{RR} + F_{drag} + F_{grad} \quad (3.2)$$

$$F_{RR} = f_{RR} W_{axle} = (f_0 + f_1 v) W_{axle} \quad (3.3)$$

โดย f_{RR} f_0 และ f_1 แทนค่าสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทาน
 W_{axle} แทนค่าน้ำหนักโหลดของแกนขับเคลื่อน

สมการของแรงต้านอากาศมีลักษณะแปรผันตาม โครงสร้างพื้นที่ด้านหน้ารถที่รองรับการไหลของอากาศผ่านขณะที่รถกำลังเคลื่อนที่ ดังสมการที่ 3.4

$$F_{drag} = \frac{1}{2} \rho_{air} C_d A_F v_{air}^2 \quad (3.4)$$

โดย ρ_{air} แทนค่าความหนาแน่นของอากาศ
 C_d แทนค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ
 v_{air} แทนค่าความเร็วสัมพัทธ์ของการไหลของอากาศเทียบกับความเร็วของขบวนรถไฟ
 A_F แทนค่าพื้นที่ด้านหน้าของรถจักรไฟฟ้าที่ฉายให้ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของอากาศ

เนื่องจากทางวิ่งที่รถเคลื่อนที่รับ/ส่งผู้โดยสารส่วนมากจะเป็นพื้นที่มีระดับเกรเดียนต์หรือความชันที่เปลี่ยนแปลงระดับความชันเกือบตลอดเส้นทาง ดังนั้นการคำนวณแรงโน้มถ่วงจึงอาศัยแรงที่มีผลมาจากมวลของรถที่วิ่งไปบนทางลาดเอียงทำมุมกับพื้น โดยแรงนี้อาจจะมีทิศทางเสริมการเคลื่อนที่หรือต้านทานการเคลื่อนที่ก็ได้ ดังสมการที่ 3.5

$$F_{grad} = \pm M_{eff} g \sin \theta \quad (3.5)$$

มวลที่ใช้คำนวณการเคลื่อนที่ของรถมักใช้เป็น M_{eff} เพื่อลดความยุ่งยากในการคำนวณ มวลนี้จะแทนผลรวมมวลรถเปล่า (tare mass: M_{tare}) กับน้ำหนักบรรทุก ได้แก่ มวลของผู้โดยสาร (passenger mass: M_{psg}) หรือมวลของสินค้า (freight mass: M_{frgt}) และมวลสมมูลจากโมเมนต์ความเฉื่อยทางการหมุน (rotational inertia equivalent mass: M_{rat}) ดังสมการต่อไปนี้

$$M_{eff} = M_{tare} (1 + \lambda_{eff}) \quad (3.6)$$

$$\lambda_{eff} = \frac{M_{psg} + M_{frgt} + M_{rot}}{M_{tare}} \quad (3.7)$$

การปรับปรุงความเร็วและตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถจะคำนวณ ดังสมการที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ โดยที่ v_{i+1} และ v_i คือ ความเร็วรถหลังและก่อนปรับปรุง Δt คือ ช่วงเวลา และ s_{i+1} และ s_i คือ ตำแหน่งรถหลังและก่อนปรับปรุง

$$v_{i+1} = v_i + a\Delta t \quad (3.8)$$

$$s_{i+1} = s_i + v_i\Delta t + \frac{1}{2}a\Delta t^2 \quad (3.9)$$

สำหรับการเคลื่อนที่ของรถจะต้องมีการคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้ามาใช้งาน เพื่อพิจารณาการใช้ไฟฟ้าของระบบว่าเป็นไปในทิศทางใดและคุ้มค่าหรือไม่ นอกจากนี้ยังสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปอ้างอิงประกอบการออกแบบชุดอุปกรณ์ที่จำเป็นในระบบอีกด้วย การคำนวณกำลังไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้าที่รถใช้ในการเคลื่อนที่ของรถจะสามารถหาได้จากสมการที่ 3.10 และ 3.11 ตามลำดับ โดยที่ กำลังไฟฟ้าที่คำนวณจะประกอบด้วยกำลังไฟฟ้าจากการเคลื่อนที่ของรถ และกำลังไฟฟ้าเสริม (auxiliary power: P_{aux}) ที่จำเป็นต้องจ่ายให้กับ โหลดต่าง ๆ ที่ติดตั้งภายในตัวรถ

$$pe(k+1) = \frac{TE(k+1)v(k+1)}{eff} + P_{aux} \quad (3.10)$$

$$E(k+1) = E(k) + pe(k+1)\Delta t \quad (3.11)$$

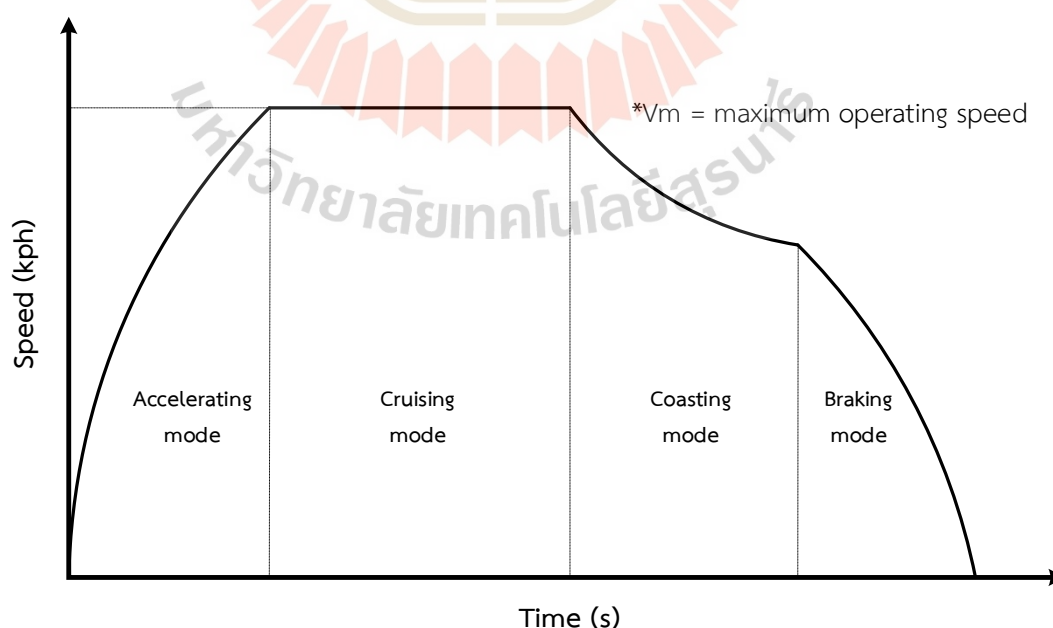
โดย eff แทนค่าประสิทธิภาพการส่งพลังงานไฟฟ้าของระบบ

ค่าความเร่งของรถสำหรับงานบริการในแต่ละประเภทจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับสภาพการใช้งานจริง โดยค่าความเร่งมาตรฐานที่ใช้ในระบบต่าง ๆ สรุปไว้ในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 ความเร่งมาตรฐานของงานบริการเดินรถไฟประเภทต่าง ๆ

Service type	Acceleration rate (m/s ²)
Heavy goods train	0.02 – 0.1
Normal goods train	0.1 – 0.2
Passenger train	0.3 – 0.4
Express long-distance train	0.4 – 0.7
Suburban train	0.8 – 1.2
Metro and light rail train	1.0 – 3.0

จากการคำนวณลักษณะสมบัติการเคลื่อนที่ของระบบ APM ข้างต้น สามารถออกแบบลักษณะโครงร่างความเร็วของรถ (speed profile) สำหรับการเคลื่อนที่ระหว่างสถานีผู้โดยสารได้ดังรูปที่ 3.19 ซึ่งจะมีการเคลื่อนที่ภายใต้โหมดการทำงานทั้งหมด 4 โหมด ได้แก่ โหมดการเร่งความเร็ว (accelerating mode) โหมดความเร็วคงที่ (cruising or constant speed mode) โหมดการแล่นด้วยความเฉื่อย (coasting mode) และโหมดการเบรก (braking mode) (Kulworawanichpong, T., 2003) อย่างไรก็ตามการออกแบบลักษณะโครงร่างความเร็วนี้จะสามารถสลับโหมดทำงานได้ตามความเหมาะสมและวัตถุประสงค์การใช้งานระบบที่ต้องการ



รูปที่ 3.19 ลักษณะโครงร่างความเร็วของรถ

3.6 สรุป

ในบทนี้ได้ศึกษาทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาระบบ APM การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำด้วยอินเวอร์เตอร์ในระบบรถไฟ การตรวจสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ในระบบรถไฟ และลักษณะสมบัติการเคลื่อนที่ของระบบ APM ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาต้นแบบระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ในบทถัดไป เนื่องจากทำงานของระบบนี้ได้เลือกให้มีรูปแบบการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสด้วยอุปกรณ์ควบคุม PLC



บทที่ 4

ระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ

4.1 บทนำ

ในบทนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างชุดจำลองระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ซึ่งประกอบด้วยรถที่ใช้ในการเคลื่อนที่ ทางวิ่งเชื่อมระหว่างสถานีผู้โดยสาร 2 สถานี และหน้าจอแสดงผลสำหรับควบคุมการทำงานของระบบ เพื่อทดสอบสมรรถนะการทำงานของระบบควบคุมการเดินรถที่พัฒนาขึ้น โดยการควบคุมนี้ต้องอาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างระบบย่อย 3 ระบบ ได้แก่ ระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ และศูนย์กลางควบคุมระบบ แสดงดังรูปที่ 4.1 เนื่องจากการทำงานของระบบ APM ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการรับ/ส่งผู้โดยสารด้วยคำสั่งอัตโนมัติเต็มรูปแบบ ซึ่งเป็นเรื่องยากที่จะให้ระบบใดระบบหนึ่งทำหน้าที่ในการควบคุมและตรวจสอบการทำงานของระบบ APM ทั้งหมด ดังนั้นการควบคุมระบบ APM จึงต้องอาศัยระบบย่อยทั้ง 3 ส่วน ซึ่งมีรายละเอียดในการพัฒนาแต่ละระบบดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.1 ชุดจำลองระบบควบคุมการเดินรถสำหรับ APM

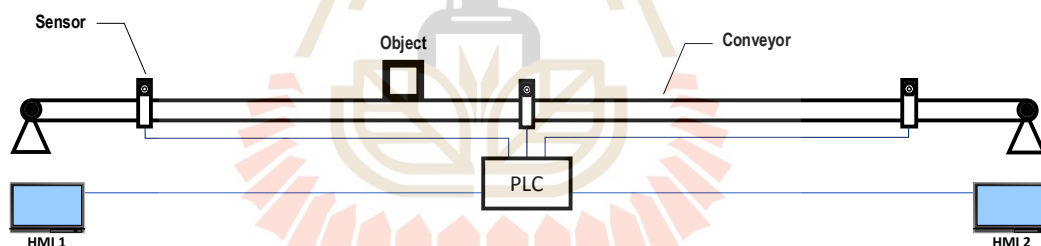
4.2 ระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ

ชุดจำลองในส่วนนี้ออกแบบขึ้นมาสำหรับตรวจับการเคลื่อนที่ของรถแล้วนำผลที่ได้ไปแสดงบนจอที่ติดตั้งไว้ที่ศูนย์กลางควบคุมระบบและสถานีผู้โดยสาร เพื่อแจ้งตำแหน่ง ณ ขณะนั้นของรถ ให้เจ้าหน้าที่และผู้ให้บริการระบบ APM ได้รับทราบ นอกจากนี้ผลที่ได้จากการตรวจับตำแหน่งการเคลื่อนที่จะถูกนำไปประมวลผลในระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ เพื่อปรับรูปแบบการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าของรถให้มีลักษณะที่สอดคล้องกับโครงร่างความเร็ว เมื่อรถเคลื่อนที่ไปถึงตำแหน่งสำหรับปรับความเร็วที่ได้ออกแบบไว้ โดยการทำงานในส่วนนี้จะกล่าวอย่างละเอียด

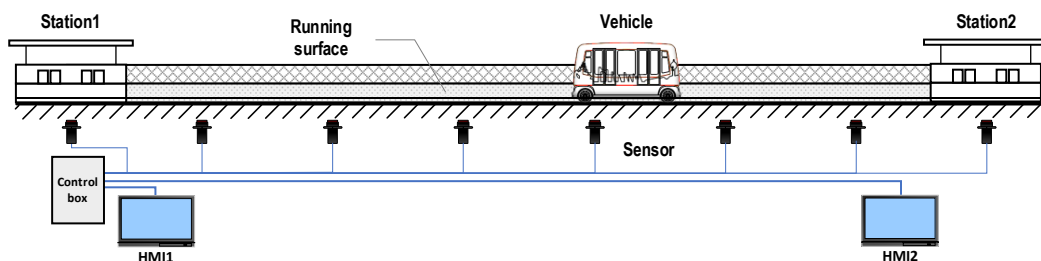
อีกทีในหัวข้อที่ 4.3 ต่อไป สำหรับเนื้อหาในหัวข้อนี้ได้กล่าวถึงรายละเอียดภาพรวมของระบบ อุปกรณ์ที่นำมาใช้งาน และการพัฒนาระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ ดังต่อไปนี้

4.2.1 ภาพรวมระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำรูปแบบการทำงานพื้นฐานของระบบตรวจสอบตำแหน่งชิ้นงานบนสายพานลำเลียงมาใช้เป็นต้นแบบในการพัฒนาชุดจำลองระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถสำหรับระบบ APM ซึ่งในที่นี้ได้อาศัยการเทียบอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ประกอบชุดจำลองกับองค์ประกอบต่าง ๆ ใช้งานในระบบสายพานลำเลียง เช่น รถแทนวัตถุบนสายพานลำเลียง ทางวิ่งของระบบแทนเป็นสายพานลำเลียง โฟโตอิเล็กทริกเซนเซอร์แทนเซนเซอร์ตรวจจับ เป็นต้น เพื่อให้การออกแบบชุดจำลองนี้สามารถทำได้โดยง่าย แสดงดังรูปที่ 4.2 สำหรับการออกแบบระบบ ได้กำหนดค่าให้ทางวิ่งของรถมีลักษณะเป็นเส้นตรงที่ปลายทั้งสองด้านมีสถานีผู้โดยสารอยู่ โดยการสร้างชุดจำลองนี้ได้ทำการติดตั้งโฟโตอิเล็กทริกเซนเซอร์ทั้งหมด 8 จุด ห่างกัน 0.3 เมตร บนทางวิ่ง กล่องไม้้อัดที่ดีขึ้นขนาด กว้าง×ยาว×สูง ประมาณ 0.6×7.5×0.13 เมตร และที่ปลายทั้งสองด้านได้ติดตั้งกล่องวงจรสำหรับแทนสถานีผู้โดยสารไว้ เพื่อให้การจำลองระบบมีความสอดคล้องกับการทำงานของระบบ APM ที่ออกแบบเอาไว้ให้มากที่สุด แสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4

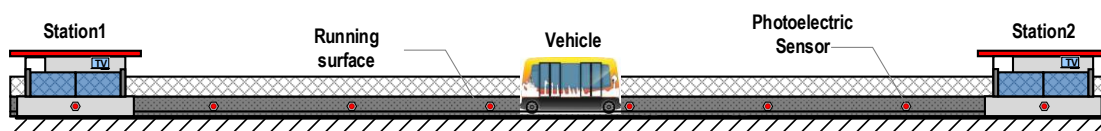


(ก) ระบบสายพานลำเลียง

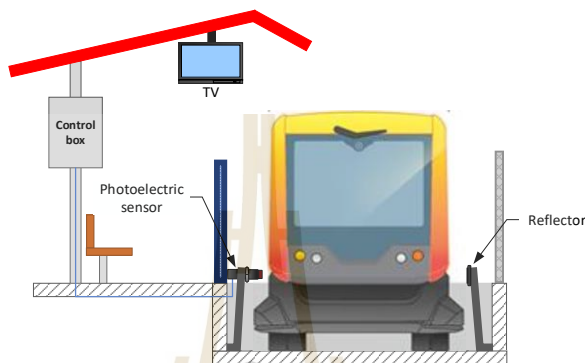


(ข) ระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถสำหรับระบบ APM

รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบระบบสายพานลำเลียงกับระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ

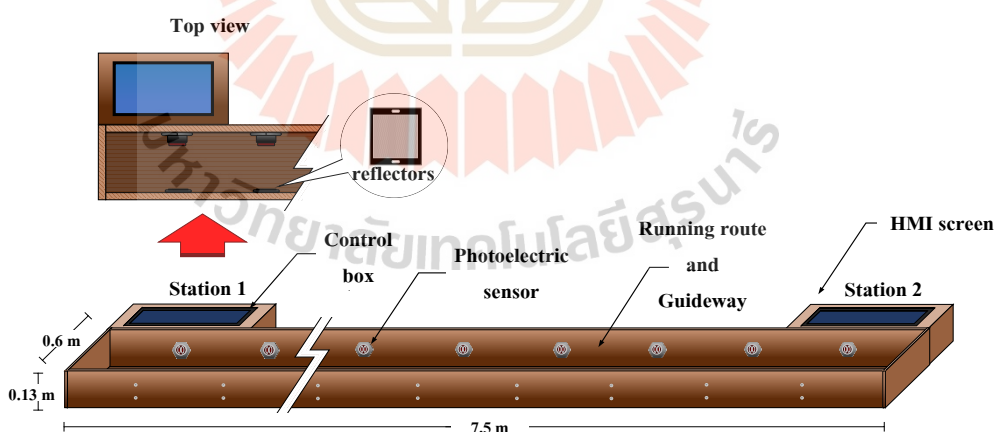


(ก) มุมมองในแนวนาว



(ข) มุมมองในแนวขวาง

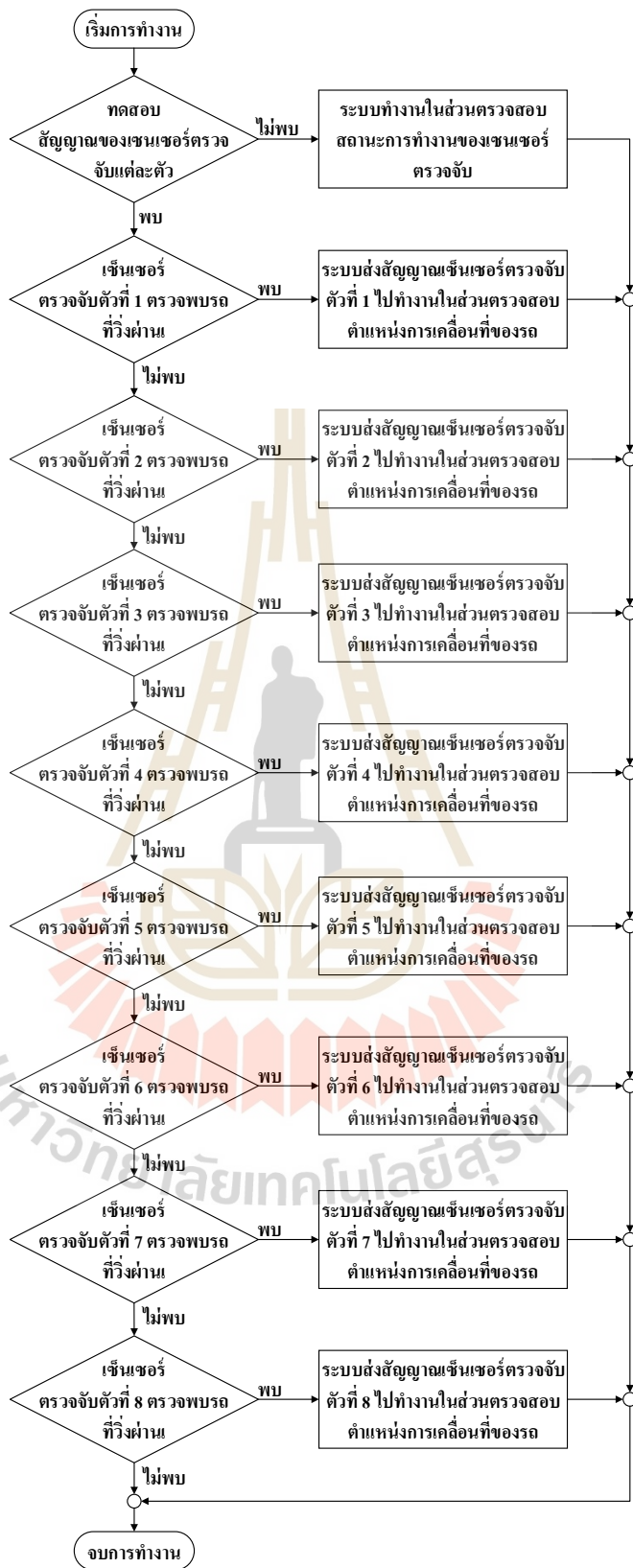
รูปที่ 4.3 ต้นแบบระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถสำหรับ APM



รูปที่ 4.4 ชุดจำลองระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถสำหรับ APM

4.2.2 รูปแบบการทำงานของระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ

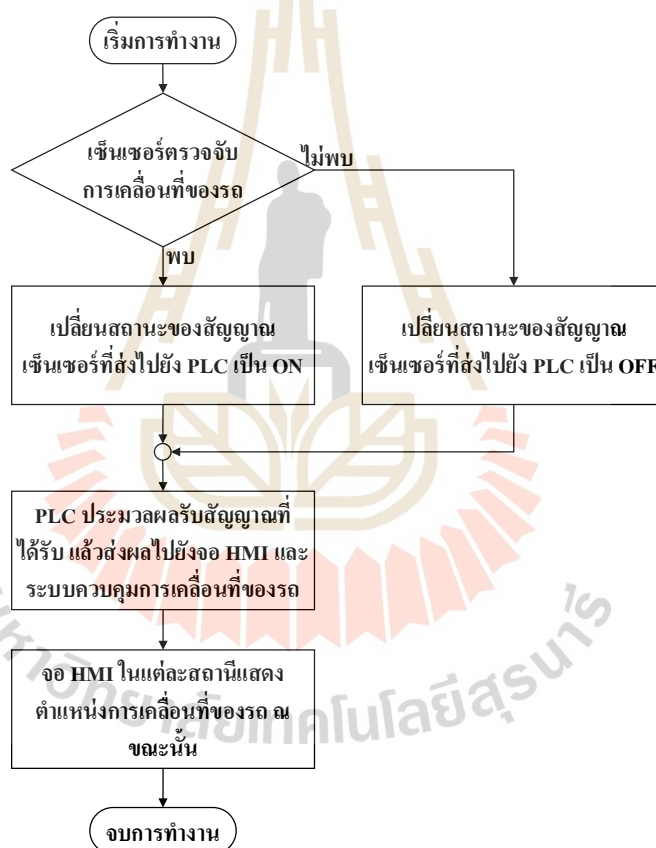
การทำงานของระบบถูกออกแบบขึ้นมาสำหรับการตรวจสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถดังที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดการทำงานได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ผังการทำงานของชุดจำลองระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ

โดยการทำงานของระบบนี้มีการแบ่งรูปแบบย่อยของระบบออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนตรวจสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถและส่วนตรวจสอบสถานะการทำงานของเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่ง เพื่อให้ระบบสามารถดำเนินการตามรูปแบบการทำงานที่ออกแบบไว้ได้อย่างครบถ้วนสมบูรณ์ ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดการทำงานของแต่ละส่วนได้ดังต่อไปนี้

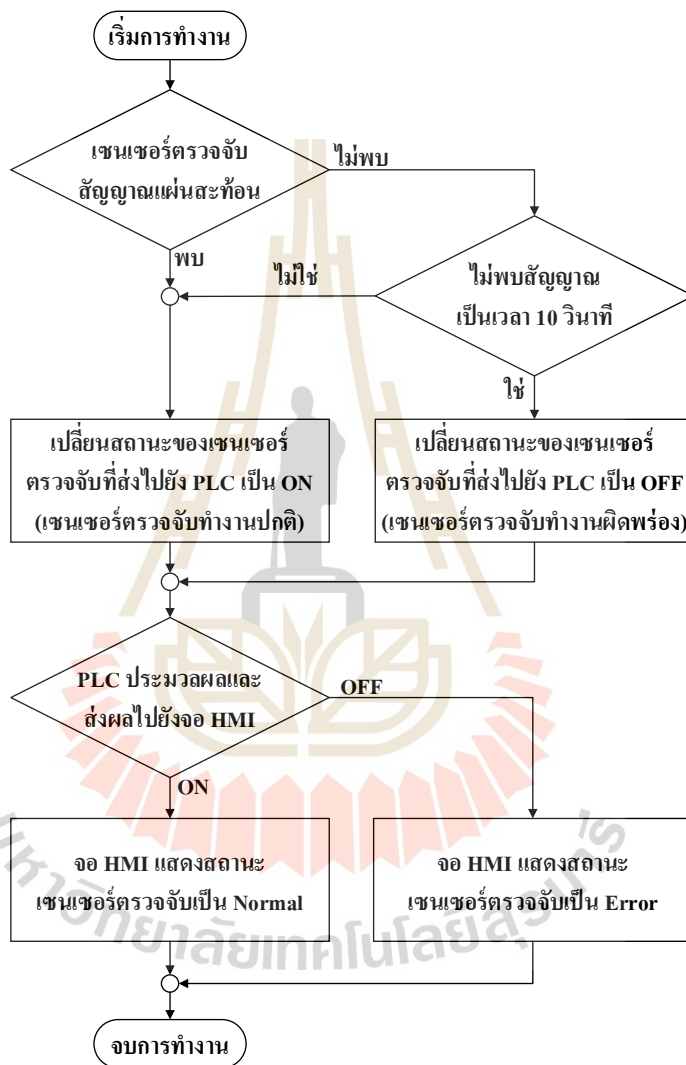
1) ส่วนตรวจสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ เป็นส่วนที่ใช้ในการตรวจจับการเคลื่อนที่ของรถที่วิ่งระหว่างสถานีผู้โดยสาร โดยเฉพาะ เพื่อแสดงตำแหน่งรถ ณ ขณะนั้นบนจอแสดงผลที่ติดตั้งในที่ต่าง ๆ และส่งข้อมูลไปยังระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ เพื่อใช้อ้างอิงในการปรับรูปแบบการเคลื่อนที่ของรถต่อไป โดยสามารถแสดงแผนผังการทำงานได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แผนผังการทำงานของชุดจำลองระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ ส่วนตรวจสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ

2) ส่วนตรวจสอบสถานะการทำงานของเซนเซอร์ตรวจจับ เป็นส่วนการทำงานที่มีความสำคัญอย่างมากในการตรวจสอบสภาพการทำงานของเซนเซอร์ตรวจจับแต่ละตัวที่ติดตั้งบนทางวิ่งของระบบ APM เนื่องจากการทำงานผิดพลาดของเซนเซอร์ตรวจจับตัวใดตัวหนึ่งนั้นอาจ

นำไปสู่ความล้มเหลวของการดำเนินระบบควบคุมการเดินรถทั้งระบบด้วยเช่นกัน สำหรับการตรวจสอบนี้ใช้การจับเวลาการขาดหายของสัญญาณที่รับ/ส่งระหว่างเซนเซอร์ตรวจจับกับแผ่นสะท้อน เพื่อเป็นเงื่อนไขในการระบุว่าเซนเซอร์ตรวจจับนั้นทำงานผิดปกติหรือไม่ โดยการทำงานของส่วนนี้สามารถแสดงแผนผังได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แผนผังการทำงานของชุดจำลองระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ ส่วนตรวจสอบสถานะการทำงานของเซนเซอร์ตรวจจับ

4.2.3 โครงสร้างระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ

โครงสร้างของระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถที่ออกแบบและสร้างขึ้น ประกอบด้วยการทำงานของอุปกรณ์ย่อยหลายส่วน เพื่อให้ระบบสามารถทำการตรวจจับตำแหน่ง

ของรถที่กำลังเคลื่อนที่บนทางวิ่งได้อย่างแม่นยำตามคุณสมบัติที่กล่าวมาข้างต้น โดยในที่นี้ได้กล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบ โดยแบ่งกลุ่มอุปกรณ์ตามตำแหน่งการติดตั้งทั้งหมด 2 ส่วน ได้แก่ โครงสร้างส่วนที่ทำงานอยู่ในกล่องวงจร (Control box) และ โครงสร้างส่วนที่ทำงานอยู่นอกกล่องวงจร แสดงดังตารางที่ 4.1

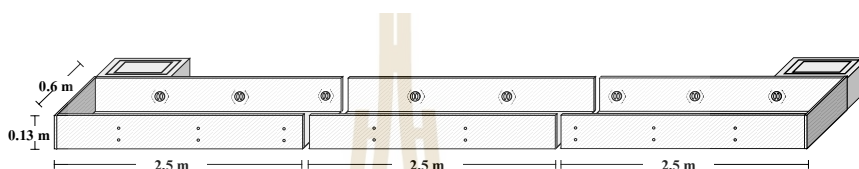
ตารางที่ 4.1 รายการอุปกรณ์ภายในระบบแสดงผลการเคลื่อนที่ของรถสำหรับระบบ APM

ที่	รายการ	การทำงาน
1	โครงสร้างส่วนที่ทำงานอยู่ในกล่องวงจร	
1.1	พีแอลซี (PLC using Ethernet communications)	ใช้สำหรับประมวลผลจากสัญญาณที่ได้รับมาจากเซนเซอร์ตรวจจับ เพื่อหาตำแหน่งที่รถกำลังเคลื่อนที่แล้ว ส่งข้อมูลไปยังจอ HMI ที่จะทำการแสดงผล
1.2	สวิตช์ชิงฮับ (Switching hub)	ใช้ในการเชื่อมต่ออุปกรณ์เพื่อกระจายข้อมูลที่มีจำเป็นในการทำงานของระบบผ่านเครือข่าย LAN ไปยังอุปกรณ์ต่าง ๆ นอกจากนี้ยังใช้ในการรับ/ส่งข้อมูลไปยัง control box ที่ติดตั้งในสถานีผู้โดยสารอีกด้วย
1.3	เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit breaker)	ใช้ป้องกันอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ไฟ 220V จากโอกาสการเกิดการแรงดันเกินในระบบ
1.4	สวิตช์ (Switch)	ใช้เปิด/ปิดวงจรสำหรับจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบ
1.5	แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (Switching supply)	ใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 24 V ให้อุปกรณ์ภายในระบบ เช่น เซนเซอร์โฟโตอิเล็กทริก สวิตช์ชิงฮับ เป็นต้น
2	โครงสร้างส่วนที่ทำงานอยู่นอกกล่องวงจร	
2.1	อินเตอร์เฟซระหว่างมนุษย์และเครื่องจักร (Human Machine Interface: HMI)	ใช้สำหรับนำเสนอข้อมูลการทำงานของอุปกรณ์ภายในระบบ เช่น การทำงานของเซนเซอร์ตรวจจับ เป็นต้น เพื่อนำข้อมูลเหล่านี้ไปประกอบการพิจารณาและควบคุมกระบวนการทำงานของระบบ
2.2	เซนเซอร์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric sensor)	ใช้สำหรับตรวจจับการเคลื่อนที่ของรถ แล้วส่งสัญญาณที่ได้ไปยัง PLC เพื่อประมวลผลหาตำแหน่งของรถต่อไป

หมายเหตุ: รายการอุปกรณ์จะไม่ได้กล่าวถึงสายไฟหรือสายแลนที่นำมาใช้ในระบบด้วย

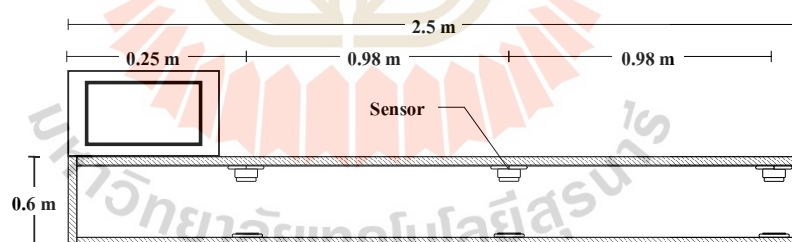
4.2.4 การออกแบบระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ

การออกแบบระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถสำหรับระบบ APM ในที่นี้ได้นำอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่กล่าวไว้ในตารางที่ 4.1 มาประกอบเป็นชุดจำลองทางวิ่งที่ติดตั้งจากไม้อัดหนา โดยทางวิ่งนี้ได้ออกแบบให้มีลักษณะเป็นกล่องไม้ที่สามารถแยกชิ้นออกจากกันได้ทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ ทางวิ่งส่วนที่ติดกับสถานีผู้โดยสารที่ 1 ทางวิ่งส่วนทางเชื่อมตรงกลาง และทางวิ่งส่วนที่ติดกับสถานีผู้โดยสารที่ 2 แสดงดังรูปที่ 4.8 แต่ละส่วนจะมีขนาด กว้าง × ยาว × สูง ประมาณ $0.6 \times 2.5 \times 0.13$ เมตร ซึ่งแต่ละส่วนจะมีรายละเอียดการออกแบบดังต่อไปนี้

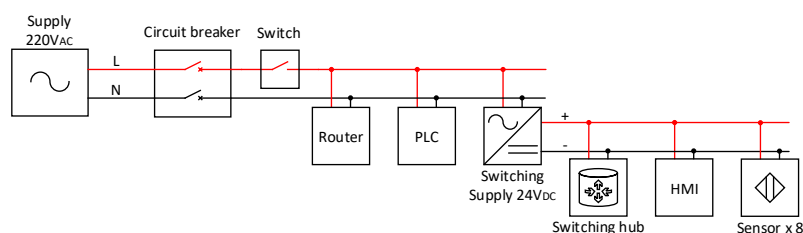


รูปที่ 4.8 ภาพรวมชุดจำลองระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่สำหรับระบบ APM

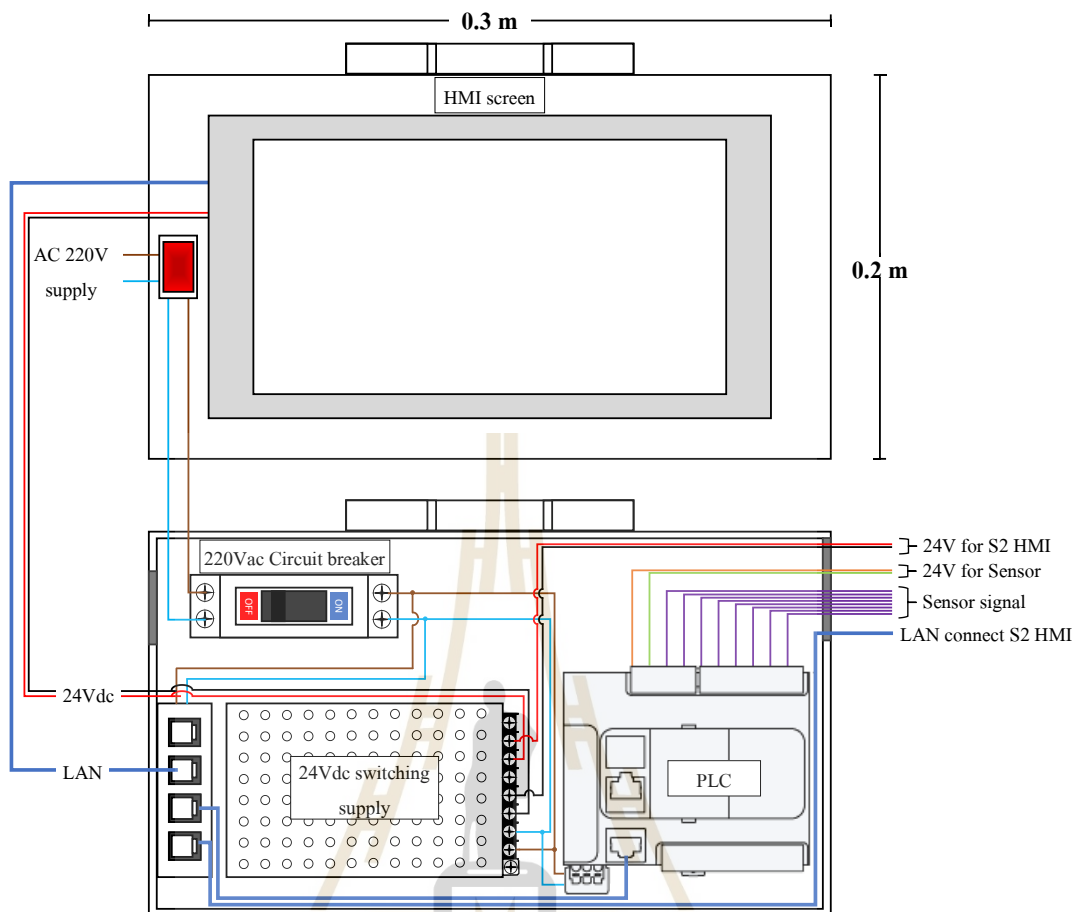
1) ทางวิ่งส่วนที่ติดกับสถานีผู้โดยสารที่ 1 ส่วนนี้ใช้จำลองทางวิ่งที่อยู่ใกล้กับสถานีผู้โดยสารที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยทางวิ่งที่ติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับสำหรับระบุตำแหน่งรถที่วิ่งผ่านทั้งหมด 3 จุด และกล่องวงจรที่ใช้แทนสถานีผู้โดยสารที่ 1 แสดงดังรูปที่ 4.9-4.11



รูปที่ 4.9 ทางวิ่งส่วนที่ติดกับสถานีผู้โดยสารที่ 1 ที่ออกแบบ

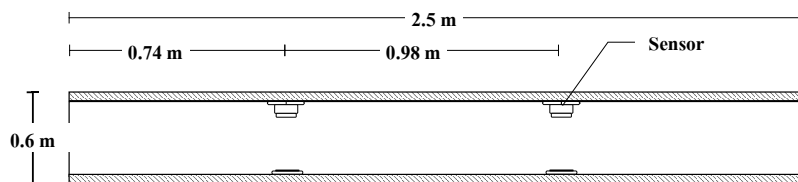


รูปที่ 4.10 การเชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าภายในระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ



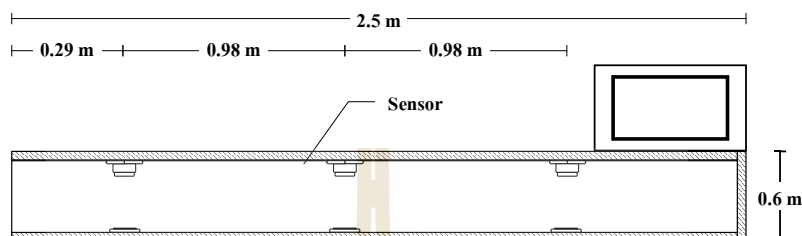
รูปที่ 4.11 การวางอุปกรณ์ของกล่องวงจรสถานีผู้โดยสารที่ 1

2) ทางวิ่งส่วนทางเชื่อมตรงกลาง ส่วนนี้ใช้จำลองทางวิ่งที่เชื่อมต่อระหว่างทางวิ่งฝั่งสถานีผู้โดยสารที่ 1 กับทางวิ่งฝั่งสถานีผู้โดยสารที่ 2 ในระบบ APM มีองค์ประกอบหลักเป็น เซนเซอร์ตรวจจับ 2 ตัว และทางวิ่งที่สร้างขึ้นจากไม้อัดหนา แสดงดังรูปที่ 4.12 เซนเซอร์ตรวจจับเหล่านี้จะมีการเชื่อมต่อกับ PLC ที่อยู่ในสถานีผู้โดยสารที่ 1 เพื่อส่งสัญญาณระบุตำแหน่งรถไปยังจอ HMI



รูปที่ 4.12 ทางวิ่งส่วนทางเชื่อมตรงกลาง

3) ทางวิ่งส่วนที่ติดกับสถานีผู้โดยสารที่ 2 ส่วนนี้ใช้จำลองทางวิ่งที่อยู่ฝั่งสถานีผู้โดยสารที่ 2 ในระบบ APM ประกอบด้วยทางวิ่งที่ติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งรถ 3 จุด กับกล่องวงจรที่บรรจุจอ HMI สำหรับใช้แทนสถานีผู้โดยสาร แสดงดังรูปที่ 4.12 โดยกล่องวงจรนี้บรรจุเพียงจอ HMI สำหรับแสดงผลเท่านั้น



รูปที่ 4.13 ทางวิ่งส่วนที่ติดกับสถานีผู้โดยสารที่ 2

จอ HMI สำหรับแสดงตำแหน่งรถให้ผู้โดยสารที่มาใช้บริการในแต่ละสถานีจะมีลักษณะการทำงานที่ใกล้เคียงกับจอแสดงผลการเคลื่อนที่ของระบบรถไฟฟ้าทั่วไป คือการแสดงตำแหน่งที่รถวิ่งอยู่ในช่วงเวลานั้น บอกเวลาที่รถจะมาถึงที่สถานี เป็นต้น โดยจอ HMI ที่ใช้ในระบบนี้จะออกแบบให้มีรายละเอียดการแสดงผลของหน้าจอและการทำงานดังต่อไปนี้

หน้าจอแสดงเมนู: เป็นหน้าต่างหลักสำหรับเรียกใช้หน้าต่างอื่น ๆ ที่ต้องการ เช่น หน้าจอแสดงผลการเคลื่อนที่ของแต่ละสถานี เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 หน้าจอแสดงเมนู

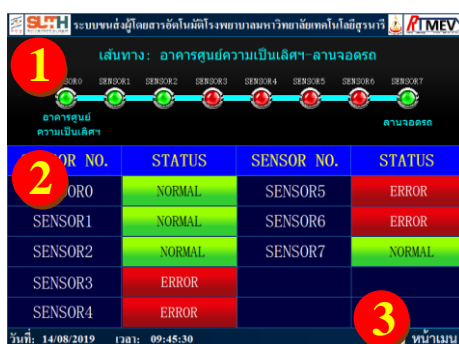
- หมายเลข 1: ปุ่มเมนูเปิดหน้าจอสถานะจอร์จ (สถานีผู้โดยสารที่1)
- หมายเลข 2: ปุ่มเมนูเปิดหน้าจออาคารศูนย์ความเป็นเลิศฯ (สถานีผู้โดยสารที่2)

- หมายเลข 3: ปุ่มเมนูเปิดหน้าจอตรวจสอบสถานะการทำงานของเซนเซอร์
 หน้าจอแสดงผลการเคลื่อนที่ของสถานีผู้โดยสารที่ 1 และ 2: เป็นหน้าต่างที่ใช้
 สำหรับแสดงการเคลื่อนที่ของรถที่ติดตั้งไว้ในแต่ละสถานี เพื่อให้ผู้ใช้บริการในสถานีนั้น ๆ ทราบ
 ถึงตำแหน่งของรถและเวลาที่รถจะมาถึงสถานี แสดงดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 หน้าจอแสดงผลการเคลื่อนที่ของสถานีผู้โดยสารที่ 1 และ 2

- หมายเลข 1: ส่วนแสดงรายละเอียดของจอ ทำหน้าที่แสดงชื่อสถานี วัน-เวลา
 เส้นทางการเคลื่อนที่ และทำการนับถอยหลังเวลาที่รถรอบถัดไปจะเคลื่อนที่เข้าสถานี
 - หมายเลข 2: ปุ่มคำสั่งสำหรับโหมดการควบคุมการเดินรถแบบปุ่มคำสั่งที่สถานี
 - หมายเลข 3: ส่วนแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ
 - หมายเลข 4: ปุ่มเมนูหน้าเมนูหลัก ใช้เพื่อกลับไปยังหน้าจอเมนูหลัก
 หน้าจอแสดงผลการตรวจสอบการทำงานของเซนเซอร์: เป็นหน้าต่างแสดง
 สถานะการทำงานของเซนเซอร์ตรวจจับแต่ละตัวที่ติดตั้งตามทางวิ่ง แสดงดังรูปที่ 4.16



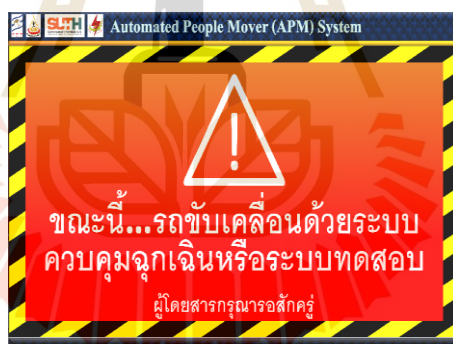
รูปที่ 4.16 หน้าจอแสดงผลการตรวจสอบเซนเซอร์

- หมายเลข 1: ส่วนแสดงสถานะเซนเซอร์ตรวจจับแบบไฟสัญญาณ สำหรับการแสดงผลเมื่อเซนเซอร์ตรวจจับตัวใดตัวหนึ่งมีการทำงานปกติหน้าจอจะแสดงสถานะเป็นไฟสัญญาณสีเขียว แต่เมื่อเซนเซอร์เกิดความผิดปกติหน้าจอจะแสดงสถานะเป็นไฟสัญญาณสีแดง

- หมายเลข 2: ส่วนแสดงสถานะเซนเซอร์ตรวจจับแบบตัวอักษร มีการทำงานในลักษณะเดียวกับ หมายเลข 1 แต่ในส่วนนี้จะใช้การแสดงคำว่า Normal แทนไฟสัญญาณสีเขียวเมื่อเซนเซอร์ทำงานปกติ และ Error แทนไฟสัญญาณสีแดงเมื่อเซนเซอร์ทำงานผิดปกติ

- หมายเลข 3: ปุ่มเมนูหน้าเมนูหลัก ใช้เพื่อกลับไปยังหน้าจอเมนูหลัก

หน้าจอแสดงการแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบที่สถานีผู้โดยสาร: เป็นหน้าต่างสำหรับแสดงการแจ้งเตือนที่สถานีผู้โดยสารเมื่อระบบทำงานในโหมดการควบคุมแบบทดสอบการขับเคลื่อนและโหมดการควบคุมการเดินรถแบบฉุกเฉินป้องกันการชนสิ่งกีดขวางแสดงดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 หน้าจอแสดงการแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบที่สถานีผู้โดยสาร

4.2.5 ชุดจำลองระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ

การสร้างชุดจำลองระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ ซึ่งประกอบด้วยรางทางวิ่งทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ ทางวิ่งส่วนที่ติดกับสถานีผู้โดยสารที่ 1 ทางวิ่งส่วนทางเชื่อมตรงกลาง และทางวิ่งส่วนที่ติดกับสถานีผู้โดยสารที่ 2 ได้เลือกใช้วัสดุไม้อัดปาร์ติเกิลบอร์ดที่มีความหนาอยู่ที่ 13 มิลลิเมตร ในการขึ้นโครงและประกอบเป็นทางวิ่งและกล่องวงจรสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น จากการดำเนินการทำให้ได้ขึ้นงานชุดจำลองระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถสำหรับ APM แสดงดังรูปที่ 4.18-4.21



รูปที่ 4.18 ทางวิ่งส่วนที่ติดกับสถานีผู้โดยสารที่ 1 ที่สร้างจริง



รูปที่ 4.19 ชุดจำลองทางวิ่งส่วนตรงกลางที่สร้างจริง



รูปที่ 4.20 ชุดจำลองทางวิ่งส่วนที่ติดกับสถานีผู้โดยสารที่ 2 ที่สร้างจริง



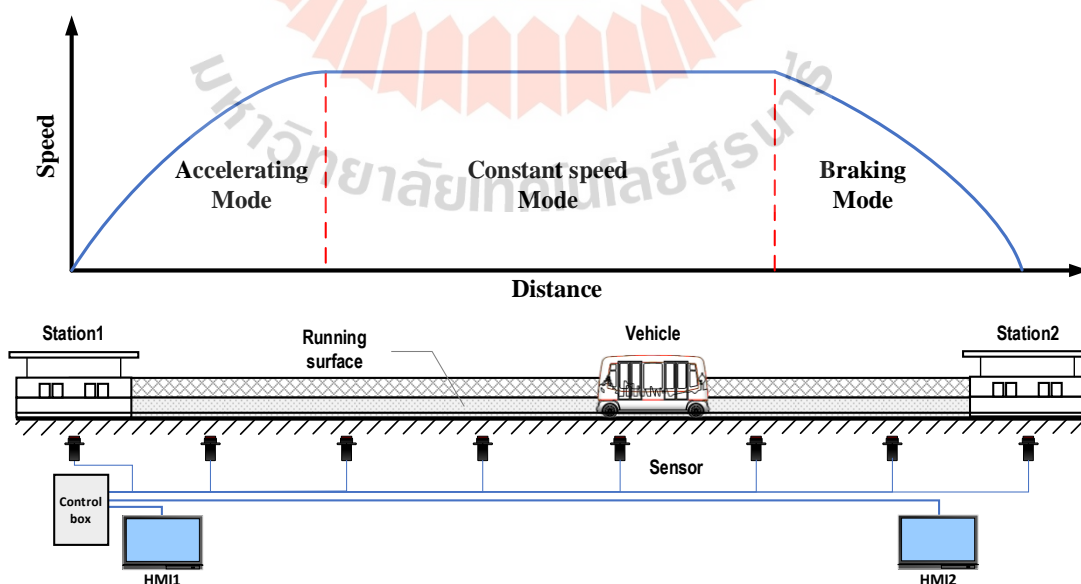
รูปที่ 4.21 ชุดจำลองระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่สำหรับระบบ APM ที่สร้างจริง

4.3 ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ

ระบบนี้ถือเป็นส่วนที่มีความสำคัญที่สุดในการดำเนินงานของระบบควบคุมการเดินรถ สำหรับระบบ APM ซึ่งทำหน้าที่ในการควบคุมลักษณะการเคลื่อนที่ของรถให้มีความสอดคล้องกับ โหมดการเดินรถที่สั่งการมาจากศูนย์กลางควบคุมระบบและตรวจสอบผลการทำงานของระบบ ณ ขณะที่รถกำลังเคลื่อนที่อยู่ เพื่อให้รถสามารถวิ่งรับ/ส่งผู้โดยสารบนเส้นทางตามรูปแบบการเคลื่อนที่ที่ได้ออกแบบเอาไว้ ซึ่งจะมีรายละเอียดการทำงานและออกแบบดังต่อไปนี้

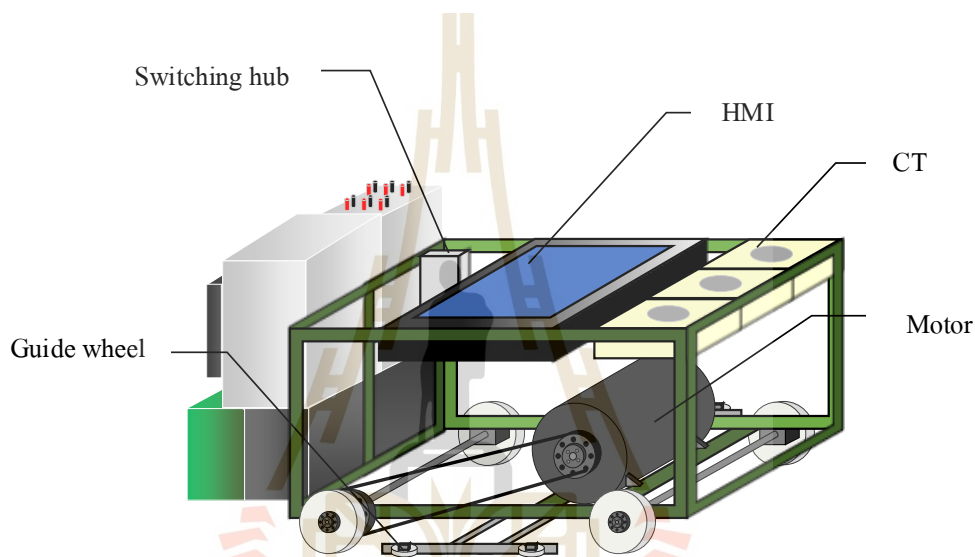
4.3.1 ภาพรวมระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ

ชุดจำลองในส่วนนี้ถูกออกแบบขึ้นมาให้มีลักษณะคล้ายกับรถที่ใช้สำหรับ ให้บริการรับ/ส่งผู้โดยสารระหว่างสถานีผู้โดยสาร 2 สถานี ในระบบ APM ของจริง แสดงดังรูปที่ 4.22 โดยการควบคุมรูปแบบการทำงานของระบบนี้ได้อาศัยสัญญาณคำสั่งเลือกโหมดที่ถูกส่งมาจากศูนย์กลางควบคุมระบบเป็นสัญญาณตรีกให้ระบบเริ่มทำงานในโหมดต่าง ๆ ที่ได้ออกแบบไว้ เช่น โหมดการควบคุมการเดินรถแบบอัตโนมัติ โหมดการควบคุมการเดินรถแบบปุ่มคำสั่งที่สถานีผู้โดยสาร เป็นต้น และสัญญาณเซนเซอร์ตรวจจับที่ติดตั้งในตำแหน่งต่าง ๆ บนทางวิ่งของระบบ แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถเป็นสัญญาณตรีกให้ PLC นำข้อมูลที่ได้ไปประมวลผลและสั่งควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสด้วยวิธี โวลต์/เฮิร์ตซ์แบบวงเปิด (Open-loop V/f control) ให้มีความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถในแต่ละจุดที่สอดคล้องกับรูปแบบที่ได้ออกแบบเอาไว้

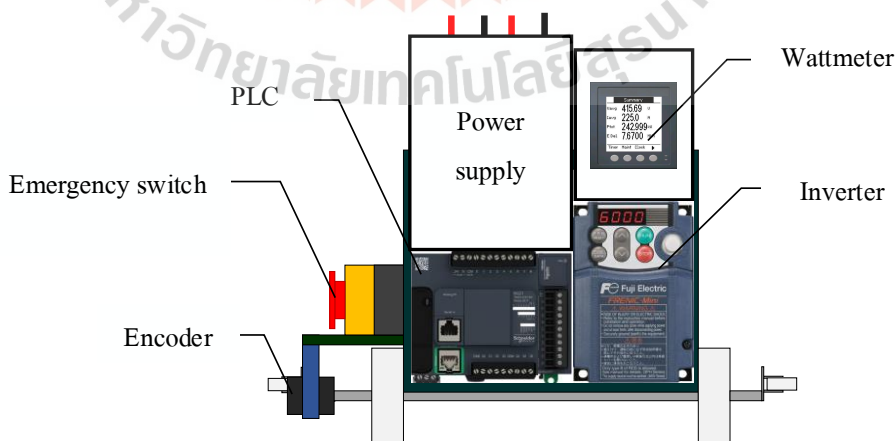


รูปที่ 4.22 ต้นแบบระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถสำหรับระบบ APM

สำหรับรถที่ออกแบบในชุดจำลองนี้ได้นำเอาเหล็กฉากมายึดเข้ากันเป็นกล่องทรงสี่เหลี่ยมขนาด กว้าง×ยาว×สูง ประมาณ 0.58×0.34×0.40 เมตร ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่จำเป็นในการทำงานของระบบ เช่น PLC อินเวอร์เตอร์ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการติดตั้งล้อสำหรับขับเคลื่อนรถขนาดรัศมี 4 เซนติเมตร ทั้งหมด 4 ล้อ ที่เชื่อมต่อกับแกนเพลลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส และมีล้อนำทาง (Guide wheel) ที่ใช้สำหรับบังคับทิศทางการเคลื่อนที่ของรถให้สามารถประกอบรักษาเส้นทางการวิ่งไว้ได้ด้วย แสดงดังรูปที่ 4.23



(ก) ด้านข้าง

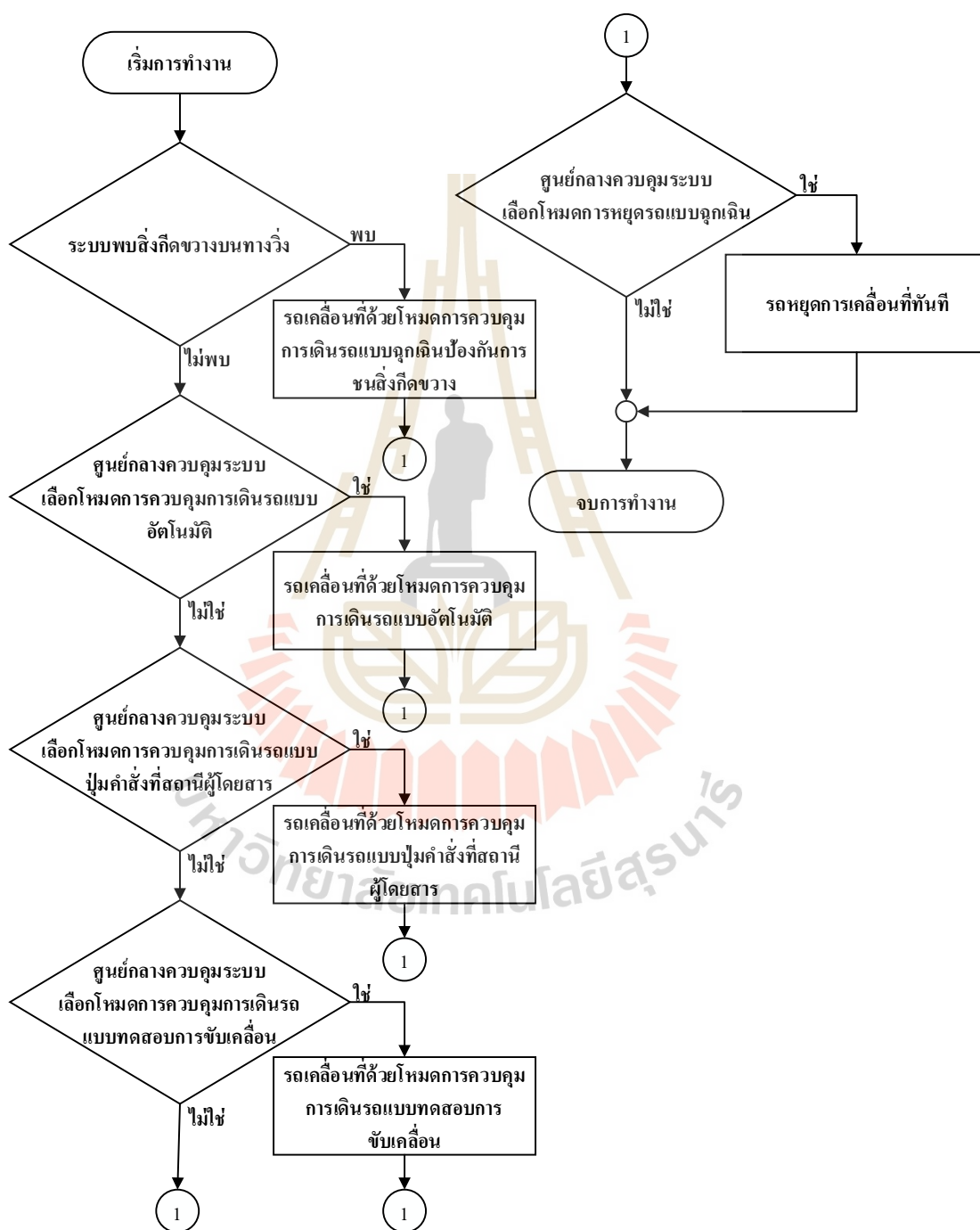


(ข) ด้านหน้า

รูปที่ 4.23 ชุดจำลองระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถสำหรับ APM

4.3.2 รูปแบบการทำงานของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ

การทำงานของระบบนี้ถูกออกแบบขึ้นมาสำหรับควบคุมการทำงานของรถดังกล่าวมาข้างต้น ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดการทำงาน แสดงดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ผังการทำงานของชุดจำลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ

การทำงานในระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถสามารถแบ่งโครงสร้างย่อยหรือ
โมดการทำงานย่อยออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่

- โหมดการควบคุมการเดินรถแบบอัตโนมัติ: เป็นโหมดที่กล่าวได้ว่าเป็นหัวใจ
หลักที่ทำให้ระบบ APM สามารถเคลื่อนที่รับ/ส่งผู้ให้บริการระหว่างสถานีแบบอัตโนมัติโดยไม่
ต้องอาศัยการควบคุมจากเจ้าหน้าที่ที่คอยให้บริการอยู่บนรถตามวัตถุประสงค์ที่ได้ออกแบบเอาไว้
โดยโหมดนี้จะถูกสั่งใช้งานในช่วงเวลาปกติหรือช่วงที่มีผู้โดยสารใช้บริการหนาแน่น

- โหมดการควบคุมการเดินรถแบบปุ่มคำสั่งที่สถานีผู้โดยสาร: เป็นโหมดที่ถูก
ออกแบบขึ้นมาสำหรับสั่งใช้งานระบบ APM ในช่วงเวลาที่มีผู้โดยสารใช้บริการน้อยหรือไม่มีเลย
เช่น ช่วงนอกเวลาราชการที่คนส่วนใหญ่ได้กลับไปพักผ่อนที่บ้านแล้ว เป็นต้น เพื่อลดการสูญเสีย
พลังงานจากการวิ่งเปล่าของรถโดยใช้เหตุ โดยการทำงานของโหมดนี้จะดำเนินการเมื่อผู้โดยสาร
ที่อยู่บนรถหรือสถานีผู้โดยสารกดปุ่มคำสั่งให้รถเคลื่อนที่

- โหมดการควบคุมการเดินรถแบบทดสอบการขับเคลื่อน: เป็นโหมดที่ออกแบบ
ขึ้นมาสำหรับให้เจ้าหน้าที่ควบคุมระบบสามารถสั่งการทำงานของระบบ APM จากปุ่มคำสั่งที่ใน
ศูนย์กลางควบคุมระบบได้โดยตรง กรณีที่ต้องการทดสอบหรือควบคุมการทำงานของระบบในยาม
ฉุกเฉิน

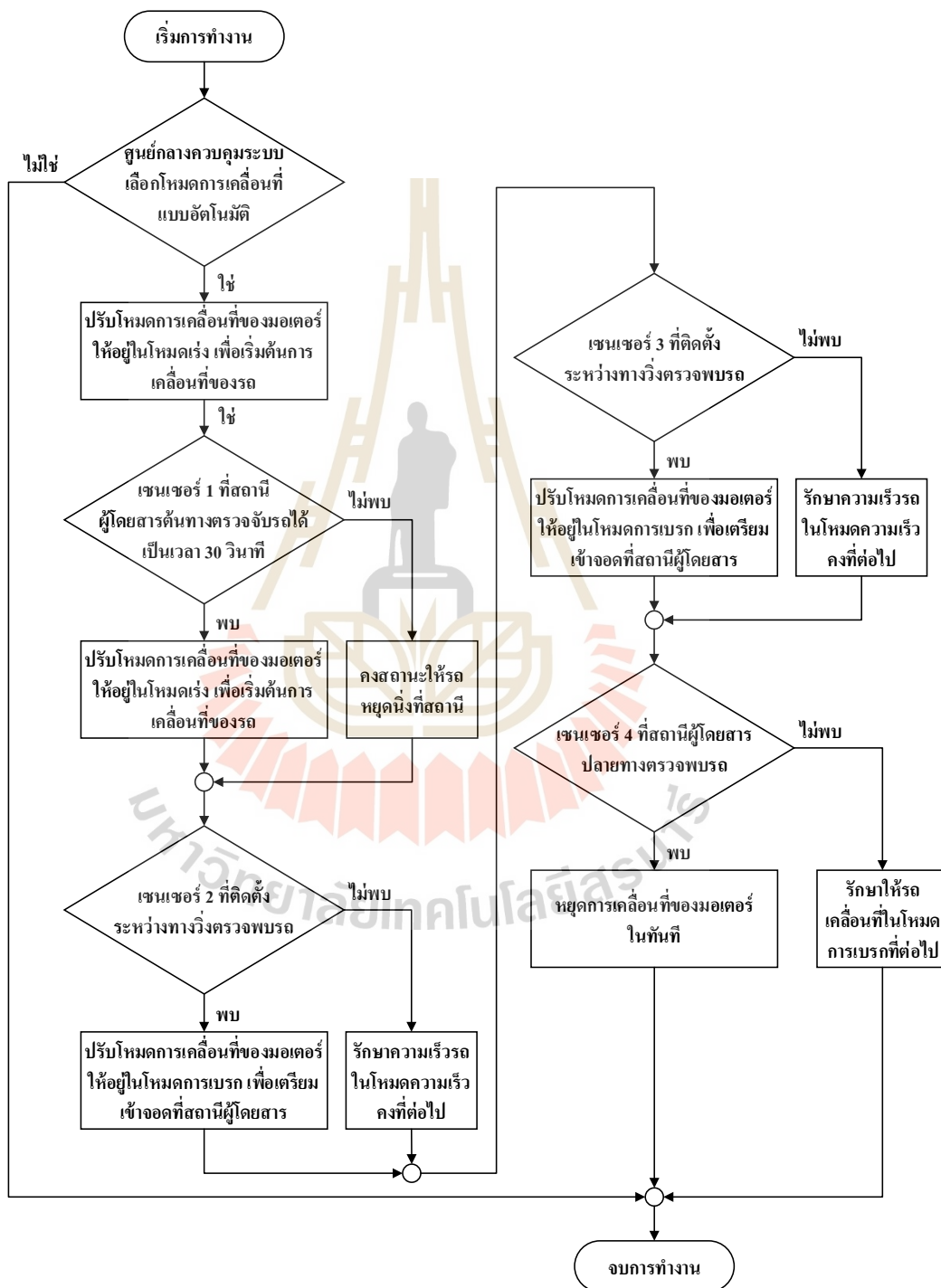
- โหมดการควบคุมการเดินรถแบบฉุกเฉินป้องกันการชนสิ่งกีดขวาง: เป็นโหมดที่
ออกแบบขึ้นมาสำหรับหยุดการเคลื่อนที่ของรถในกรณีที่ตรวจพบสิ่งกีดขวางอยู่บนทางวิ่งที่รถ
กำลังเคลื่อนที่ เนื่องจากระบบ APM เป็นระบบที่ทำงานแบบอัตโนมัติ การป้องกันปัญหาด้านความ
ปลอดภัยในการดำเนินการของระบบถือเป็นส่วนสำคัญที่ขาดไม่ได้

- โหมดการหยุดรถแบบฉุกเฉิน: โหมดนี้ออกแบบมาสำหรับหยุดการทำงานของ
ระบบ APM ในขณะที่รถกำลังเคลื่อนที่ในโหมดใด ๆ ด้วยการกดปุ่มคำสั่งที่อยู่ในศูนย์กลางควบคุม
ระบบ เพื่อป้องกันความผิดพลาดที่อาจจะส่งผลกระทบต่อระบบในส่วนต่าง ๆ และกรณีอื่นที่เกิด
เจ้าหน้าที่คุมระบบเห็นควรที่จะต้องหยุดการทำงานของระบบแบบเร่งด่วน

โดยแต่ละโหมดการควบคุมจะสามารถสรุปขั้นตอนการทำงานของระบบในรูปแบบ
ของผังแสดงการทำงาน ดังต่อไปนี้

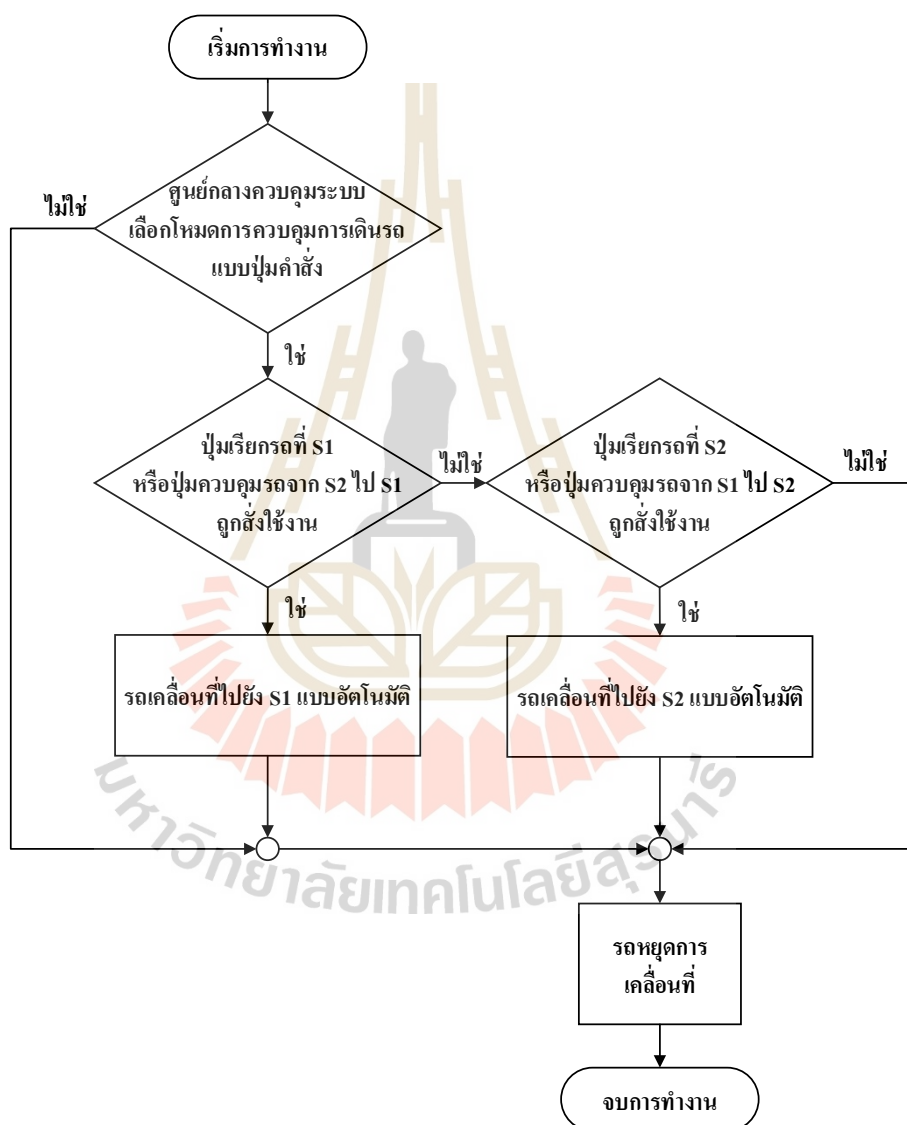
1) โหมดการควบคุมการเดินรถแบบอัตโนมัติ สำหรับโหมดนี้ได้นำอุปกรณ์ เช่น
PLC อินเวอร์เตอร์ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส เซนเซอร์ตรวจจับวัตถุ เป็นต้น มาประกอบเข้า
ด้วยกัน เพื่อใช้ในการควบคุมความเร็วของรถที่เคลื่อนที่ ณ จุดต่าง ๆ บนทางวิ่งอย่างเป็นขั้นเป็น
ตอน ซึ่งในกระบวนการนี้รถจะสามารถทราบว่าจะจุดใดเป็นจุดที่ควรเร่งความเร็ว จุดใดเป็นจุดที่ควร
คงค่าความเร็ว จุดใดเป็นจุดที่ควรลดความเร็ว และจุดใดเป็นจุดที่ควรเบรก ได้จากการประมวลผล

ของ PLC ภายในชุดจำลองนี้ที่ทำการรับสัญญาณของเซนเซอร์ตรวจจับ การทำงานของชุดจำลอง ระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ในส่วนควบคุมการวิ่งของรถแบบอัตโนมัติสามารถสรุปการทำงาน แสดงดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.25 ฟังก์ชันการทำงานของโหมดการควบคุมการเดินรถแบบอัตโนมัติ

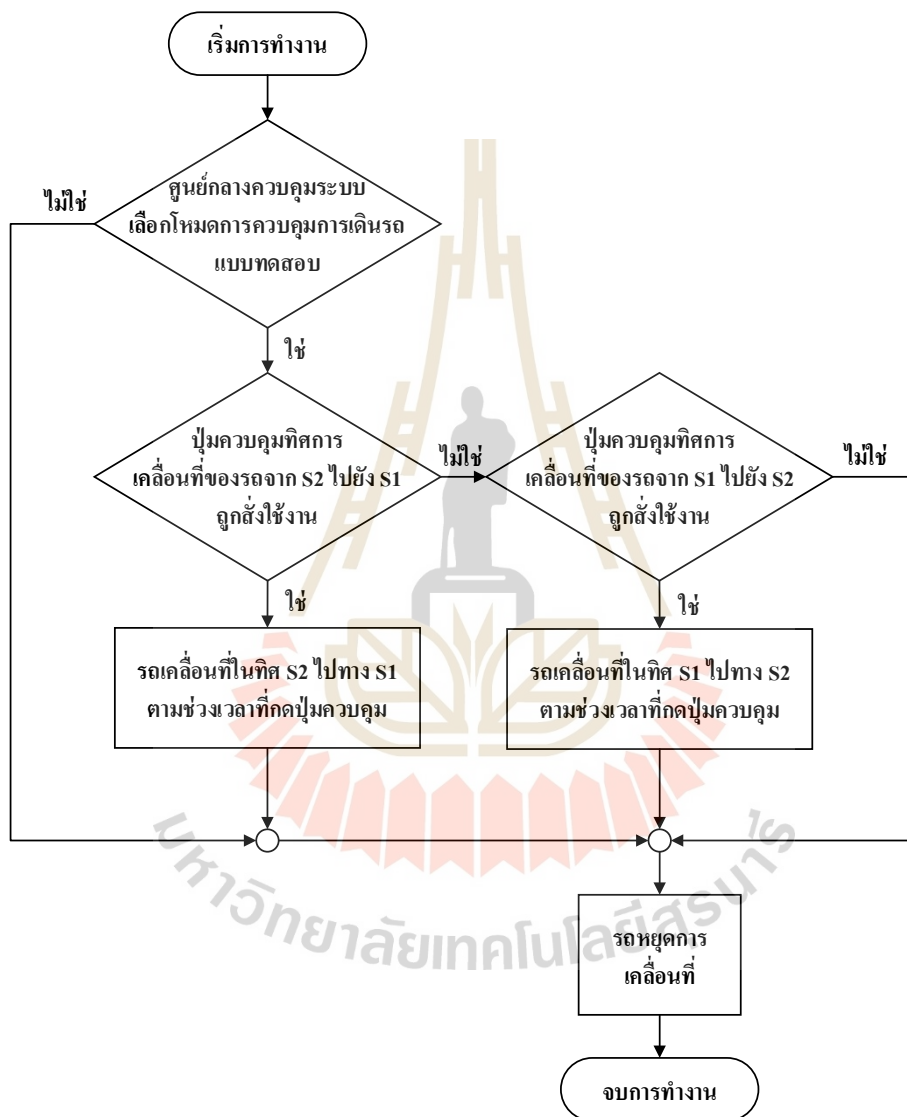
2) โหมตการควบคุมการเดินรถแบบปุ่มคำสั่งที่สถานีผู้โดยสาร การควบคุมการทำงานของระบบ APM ในโหมตนี้จะอาศัยการทำงานที่ผสมผสานกันระหว่างการควบคุมการวิ่งของรถแบบอัตโนมัติและแบบควบคุมด้วยมือ ซึ่งมีลักษณะการทำงานที่คล้ายกับลิฟต์ที่มีการเคลื่อนที่ที่ต่อเนื่องเมื่อมีการกดปุ่มสั่งใช้งานจากผู้โดยสารที่ต้องการใช้บริการ โดยสามารถสรุปการทำงานของโหมตการควบคุมการเดินรถแบบปุ่มคำสั่งที่สถานีผู้โดยสาร แสดงดังรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.26 ผังการทำงานของโหมตการควบคุมการเดินรถแบบปุ่มคำสั่งที่สถานีผู้โดยสาร

3) โหมตการควบคุมการเดินรถแบบทดสอบการขับเคลื่อน การควบคุมรถในโหมตนี้จะอาศัยการกดปุ่มควบคุมที่จอ HMI เพื่อสั่งการให้ PLC ควบคุมอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ขับ

มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสให้รถเคลื่อนที่ไปข้างหน้าหรือข้างหลังตามการกดปุ่ม โดยการ ทำงานของรถจะดำเนินไปเรื่อย ๆ จนกว่าเลิกกดปุ่มคำสั่งหรือรถจอดอยู่ ณ ตำแหน่งที่ตั้งสถานี ผู้โดยสารด้านใดด้านหนึ่ง สามารถสรุปการทำงานของส่วนควบคุมการวิ่งของรถแบบควบคุมมือ แสดงดังรูปที่ 4.27

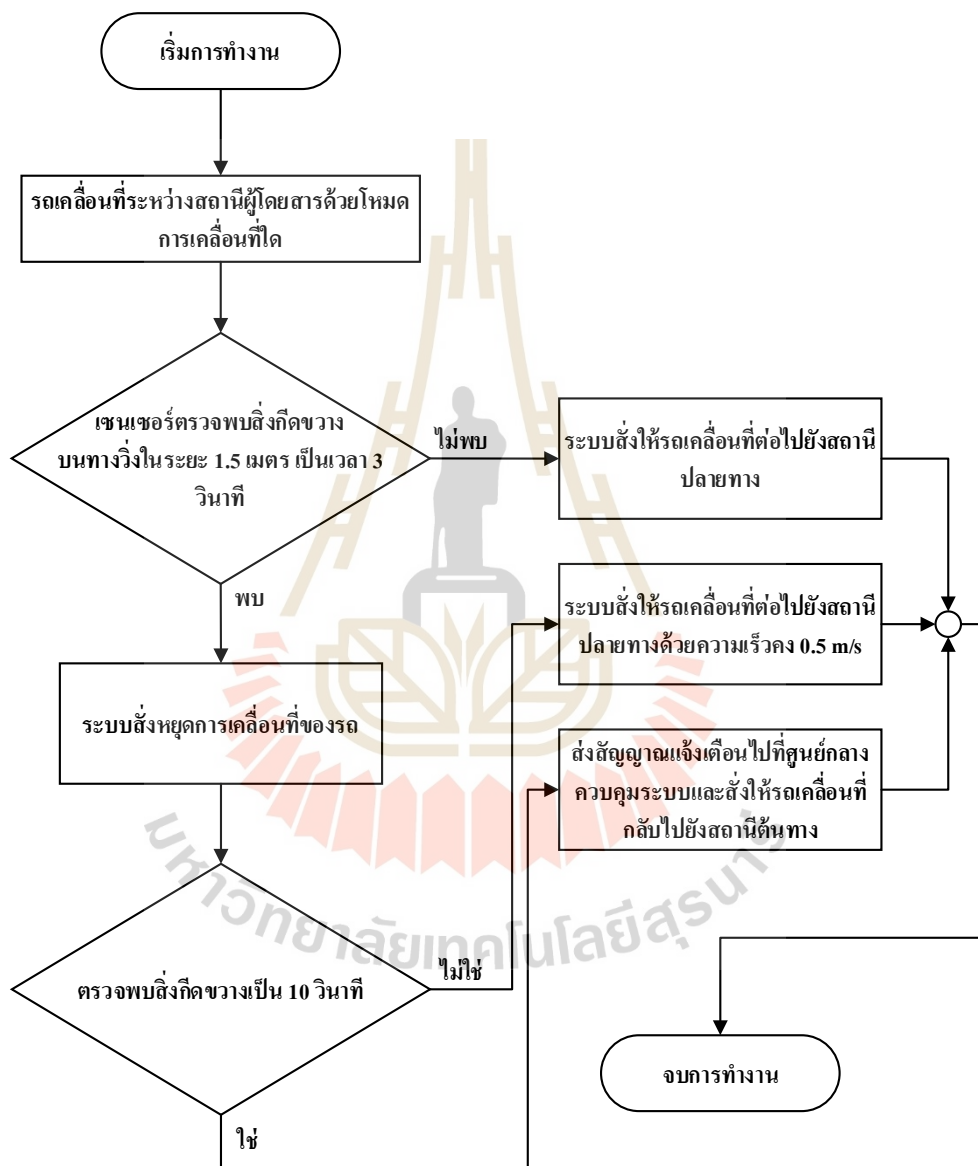


รูปที่ 4.27 ฟังก์ชันการทำงานของ โหมดการควบคุมการเดินทางแบบทดสอบการขับเคลื่อน

4) โหมดการควบคุมการเดินทางแบบฉุกเฉินป้องกันการชนสิ่งกีดขวาง ในการ ตรวจจับสิ่งกีดขวางที่อยู่บนทางวิ่งจะอาศัยเซนเซอร์ตรวจจับที่ติดตั้งไว้ที่บริเวณด้านหน้าและ ด้านหลังของรถทำการตรวจจับวัตถุที่ห่างจากคันรถในระยะทาง 1 เมตร เพื่อส่งสัญญาณแจ้งเตือน

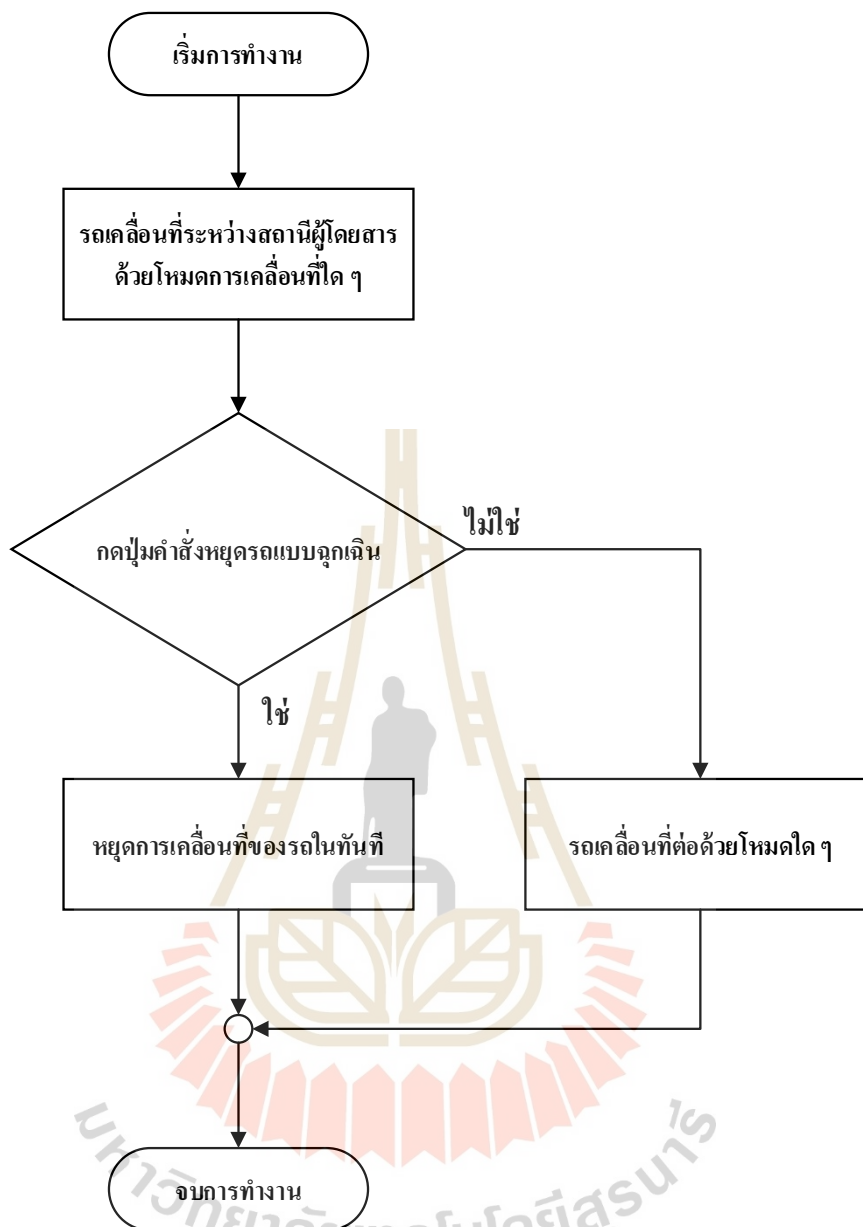
ไปยังระบบและสั่งหยุดการทำงานของระบบก่อนที่จะเกิดการชนกันระหว่างรถกับสิ่งกีดขวางขึ้น จากนั้นจึงสั่งการให้รถเคลื่อนที่กลับไปยังสถานีผู้โดยสารด้วยโหมดการเคลื่อนที่ใด

เจ้าหน้าที่ได้ทำการเคลื่อนย้ายสิ่งกีดขวางดังกล่าวออกจากทางวิ่งแล้ว การทำงานของระบบนี้สามารถสรุปเป็นแผนผัง แสดงดังรูปที่ 4.28



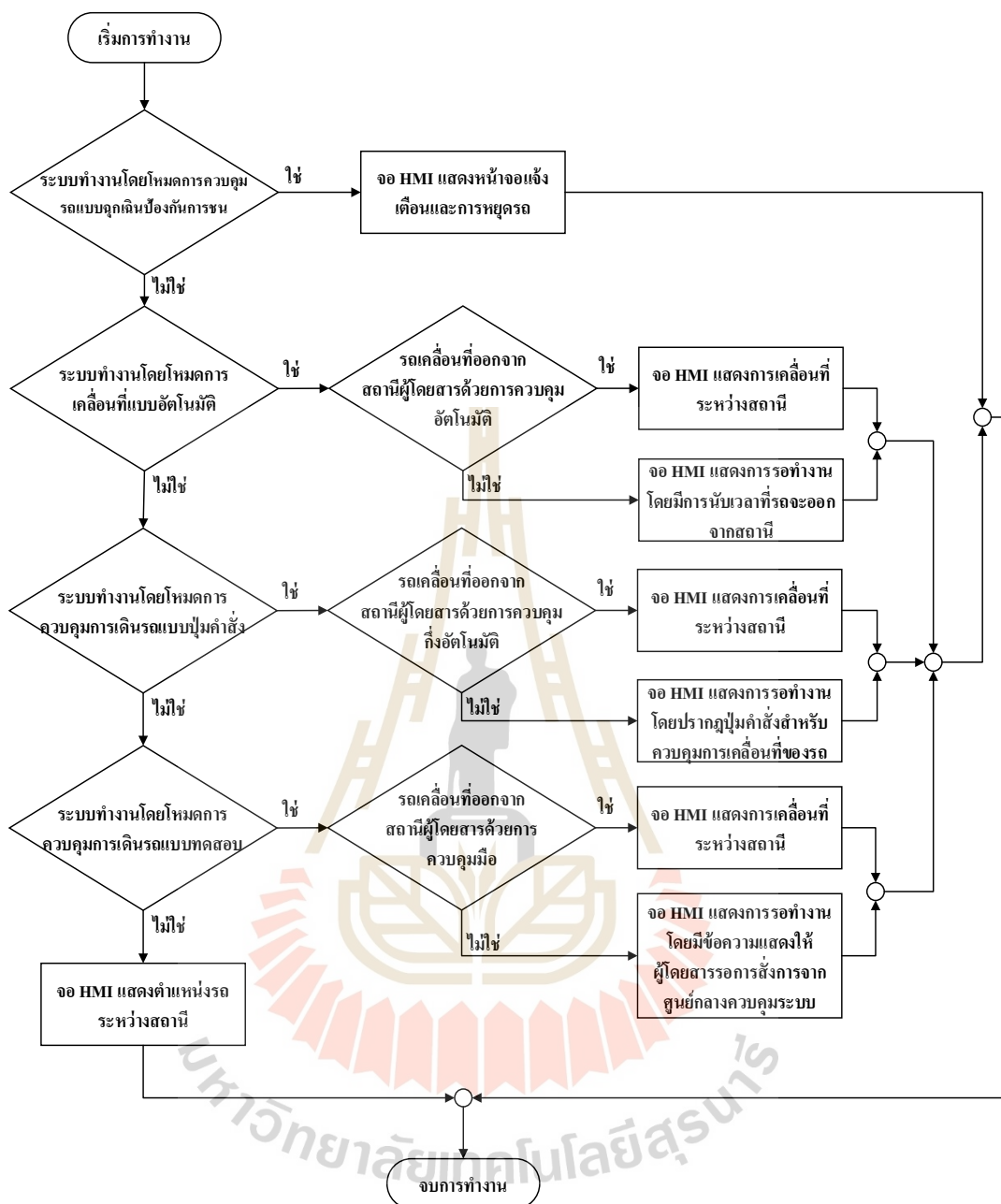
รูปที่ 4.28 แผนผังการทำงานของโหมดการควบคุมการเดินรถแบบฉุกเฉินป้องกันการชนสิ่งกีดขวาง

5) โหมดการหยุดรถแบบฉุกเฉิน สำหรับการทำงานของโหมดการหยุดรถแบบฉุกเฉินสามารถสรุปเป็นแผนผังการทำงาน แสดงดังรูปที่ 4.29



รูปที่ 4.29 ผังการทำงานของโหมดการหยุดรถแบบฉุกเฉิน

นอกจากการทำงานของระบบควบคุมรูปแบบการเคลื่อนที่แล้ว ระบบนี้ยังประกอบด้วยส่วนของจอแสดงที่ถูกรอกแบบขึ้นมาสำหรับแสดงผลการทำงานของระบบ เช่น ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า ตำแหน่งที่รถกำลังเคลื่อนที่ ความเร็วของรถ เป็นต้น โดยการแสดงผลนี้ได้ติดตั้งจอ HMI ที่เชื่อมต่อกับ PLC ด้วยการสื่อสารแบบ Ethernet เพื่อรับข้อมูลทางกายภาพทั่วไป และเชื่อมต่อกับวัดตั้งมิเตอร์ด้วยการสื่อสารแบบ Modbus RS-485 เพื่อรับค่าทางไฟฟ้าต่าง ๆ ซึ่งสามารถสรุปการทำงานของส่วนจอแสดงผลบนรถ แสดงดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 ฟังก์ชันการทำงานของหน้าจอแสดงผลในระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ

4.3.3 โครงสร้างระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ

โครงสร้างของชุดจำลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถที่ออกแบบจะประกอบด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้าหลายส่วนรวมกันเหมือนกับระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ เพื่อให้ระบบสามารถควบคุมการวิ่งของรถและแสดงการทำงานของระบบบนจอ ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดโครงสร้างของระบบนี้ ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 รายการอุปกรณ์สำหรับระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ

ลำดับที่	รายการ	การทำงาน
1	พีแอลซี (PLC using Ethernet)	ใช้สำหรับประมวลผลจากสัญญาณที่ได้รับมา เช่น เซอร์ตรวจจับ เพื่อควบคุมการวิ่งของรถให้มีความสอดคล้องกับลักษณะ โครงร่างความเร็วที่ออกแบบ โดยจะมีการส่งสัญญาณไปยังวงจร อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการควบคุมระบบ
2	สวิตช์ชิงฮับ (Switching hub)	ใช้ในการเชื่อมต่ออุปกรณ์เพื่อกระจายข้อมูลที่มีจำเป็นในการทำงานของระบบผ่านเครือข่าย LAN ไปยังอุปกรณ์ต่าง ๆ นอกจากนี้ยังใช้ในการรับ/ส่งข้อมูลไปยัง control box ที่ติดตั้งในสถานีผู้โดยสารอีกด้วย
3	เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit breaker)	ใช้ป้องกันอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ไฟ 220V จากโอกาสการเกิดการแรงดันเกินในระบบ
4	สวิตช์ (Switch)	ใช้เปิด/ปิดวงจรสำหรับจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบ
5	แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (Switching supply)	ใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 24 V ให้ อุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบ เช่น photoelectric sensor จอ HMI เป็นต้น
6	เทอร์มินอลบล็อก (Terminal block)	ใช้เป็นจุดพักสายไฟสำหรับการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อให้สะดวกและรวดเร็วต่อการซ่อมบำรุงอุปกรณ์ หรือเพื่อเก็บสายไฟให้เป็นระเบียบ สามารถตรวจสอบจุดที่มีปัญหาได้ง่าย
7	อินเตอร์เฟซระหว่างมนุษย์และเครื่องจักร (Human Machine Interface: HMI)	ใช้สำหรับนำเสนอข้อมูลการทำงานของอุปกรณ์ภายในระบบ เช่น การทำงานของเซนเซอร์ตรวจจับ เป็นต้น เพื่อนำข้อมูลเหล่านี้ไปประกอบการพิจารณาและควบคุมกระบวนการทำงานของระบบ
8	อินเวอร์เตอร์ (Inverter drive)	ใช้ในการควบคุมความเร็วรอบหรือแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าตามคำสั่งที่รับมาจาก PLC อีกทอดหนึ่งซึ่งมีการปรับความถี่กับแรงดันเพื่อให้เหมาะสมกับภาระโหลดของมอเตอร์

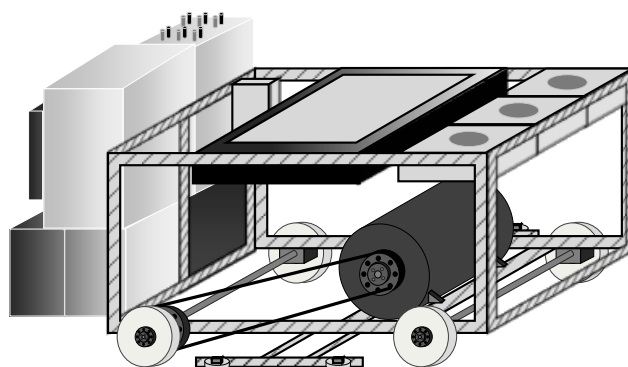
ตารางที่ 4.2 รายการอุปกรณ์สำหรับระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ (ต่อ)

ลำดับที่	รายการ	การทำงาน
9	สวิตช์ปุ่มกดฉุกเฉิน (Emergency switch)	ใช้กดหยุดรถเมื่อระบบเกิดเหตุขัดข้องขึ้นกับการทำงานของระบบ
10	เซนเซอร์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric sensor)	ใช้ตรวจสอบเส้นทางขณะที่รถกำลังเคลื่อนที่ไปทิศทางใดทิศทางหนึ่ง เมื่อเซนเซอร์ตรวจจับตรวจพบสิ่งกีดขวางที่อยู่บนทางวิ่งในระยะเวลาที่กำหนด รถจะทำการเบรกเพื่อป้องกันการชนที่อาจจะเกิดขึ้น
11	มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส (3 phase induction motor)	ใช้ขับเคลื่อนรถให้สามารถวิ่งไปข้างหน้าตามการควบคุมของระบบ
12	วัตต์มิเตอร์ (Wattmeter)	ใช้สำหรับวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าภายในระบบ เช่น แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า เป็นต้น
13	เซ็นเซอร์วัดกระแส (Current sensor)	ใช้วัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสายไฟ แล้วส่งค่าที่วัดได้ไปยังวัตต์มิเตอร์เพื่อแสดงผลที่ได้

หมายเหตุ: รายการอุปกรณ์จะไม่ได้กล่าวถึงสายไฟหรือสายแลนที่นำมาใช้ในระบบด้วย

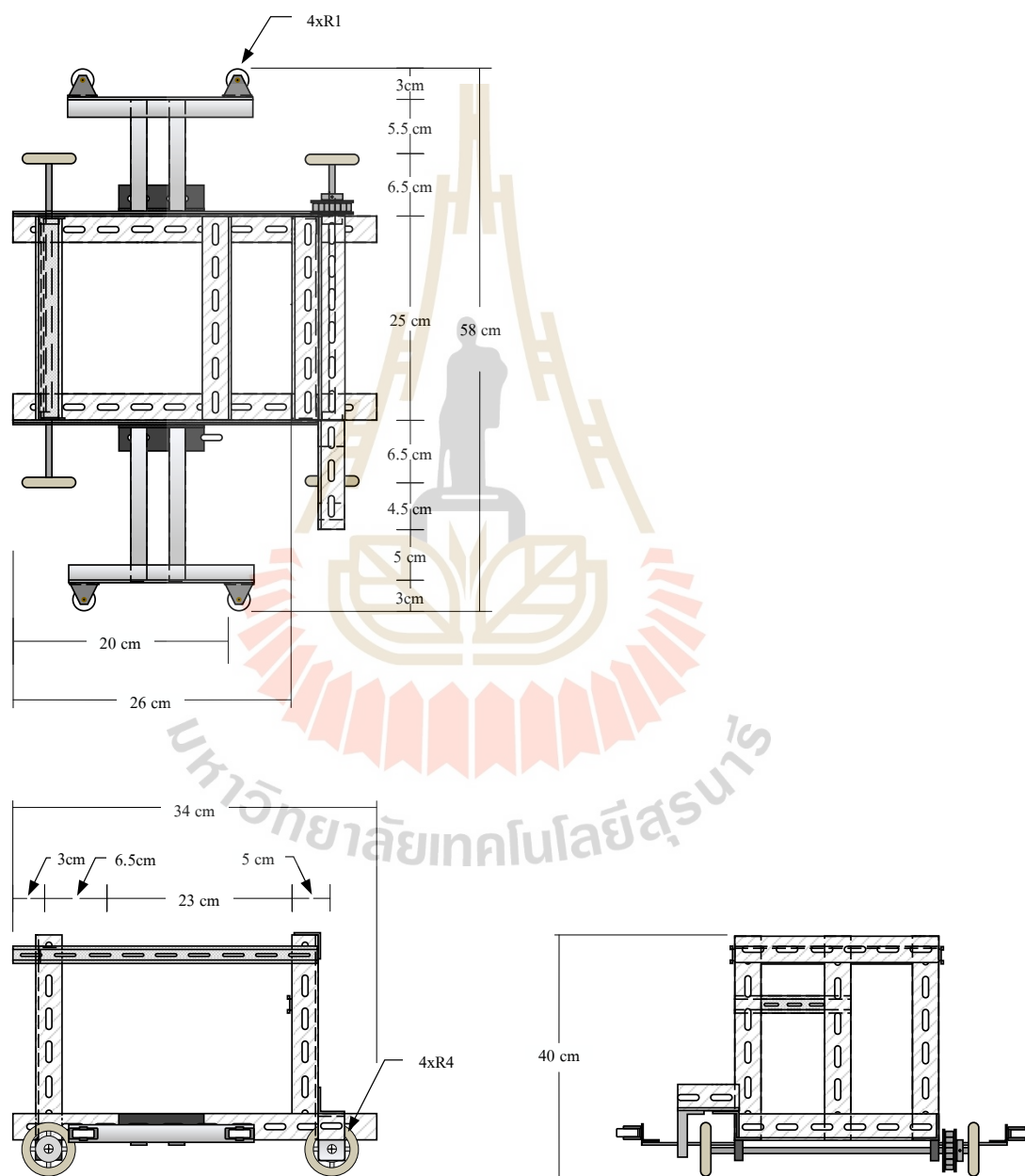
4.3.4 การออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ

ชุดจำลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถสำหรับระบบ APM ได้นำอุปกรณ์ที่กล่าวไว้ในตารางที่ 4.2 มาติดตั้งบนรถที่สร้างจากเหล็กฉาก แสดงดังรูปที่ 4.31

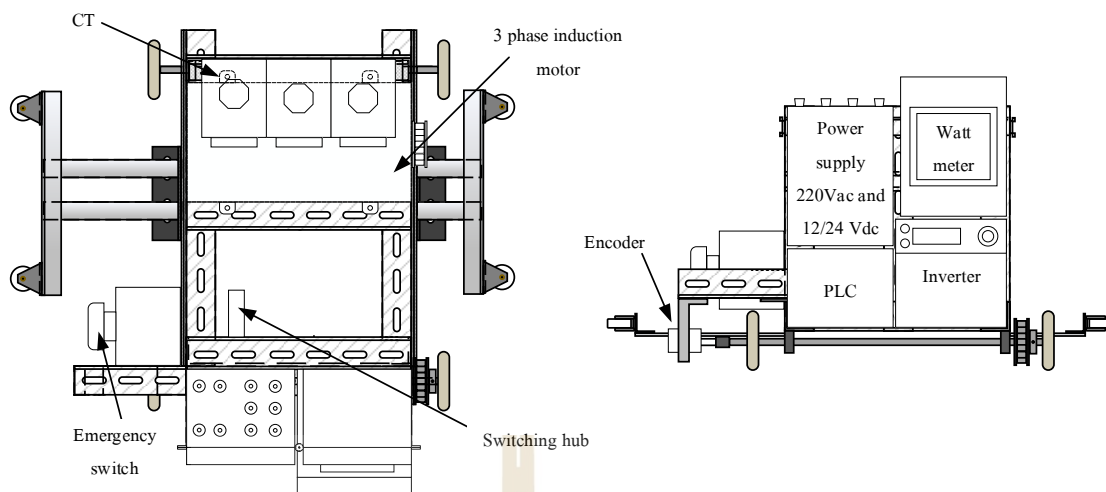


รูปที่ 4.31 ภาพรวมชุดจำลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถสำหรับระบบ APM

การออกแบบ โครงสร้างของชุดจำลองส่วนรถได้นำเนื้อมายึดเหล็กฉากเข้าด้วยกันสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 4.32 โดยด้านข้างทั้งสองฝั่งของรถได้ติดตั้งล้อขนาดรัศมี 1 เซนติเมตร เพื่อใช้ในการบังคับทิศทางการวิ่งของรถแทนส่วนล้อนำทางที่มีการติดตั้งจริงในระบบ APM นอกจากนี้ยังมีการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่จำเป็นในการทำงานของระบบ แสดงดังรูปที่ 4.33

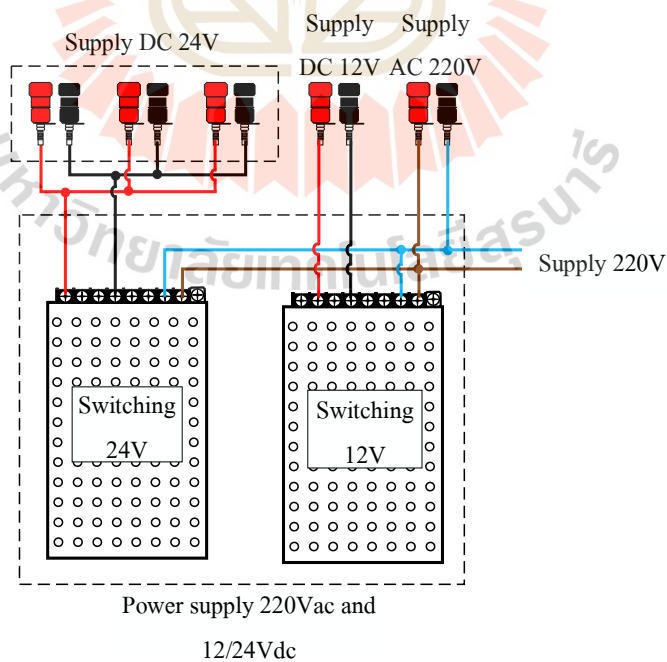


รูปที่ 4.32 โครงสร้างส่วนรถในชุดจำลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ

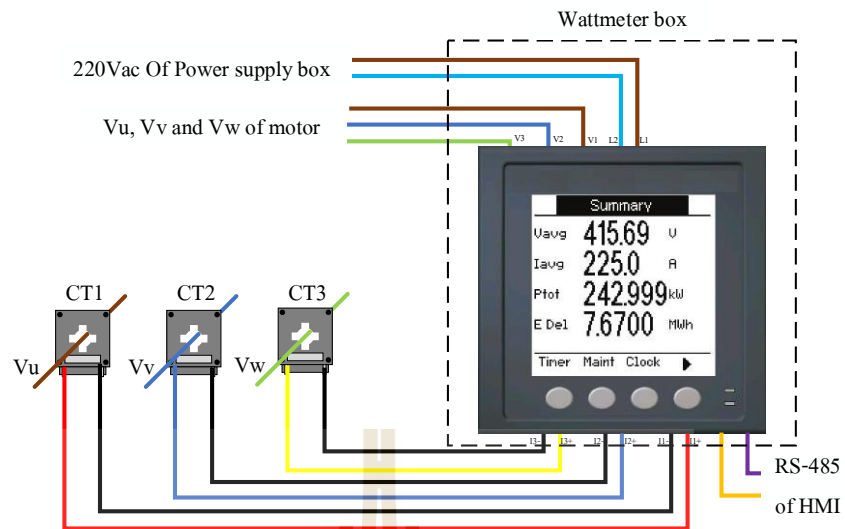


รูปที่ 4.33 การติดตั้งอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในชุดจำลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ

จากรูปที่ 4.33 พบว่าภายในชุดจำลองนี้จะมีการติดตั้งกล่องวงจรที่ใช้สำหรับเก็บอุปกรณ์ไฟฟ้าบางอย่างทั้งหมด 2 ส่วน ได้แก่ กล่องแหล่งจ่ายไฟฟ้า 220Vac และ 12/24Vdc และกล่องวัดวัตต์มิเตอร์ เพื่อให้การติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าในส่วนอื่น ๆ สามารถทำได้อย่างเป็นระเบียบและง่ายต่อการตรวจสอบอีกด้วย โดยกล่องวงจรแต่ละส่วนจะมีส่วนประกอบ แสดงดังรูปที่ 4.34-4.35

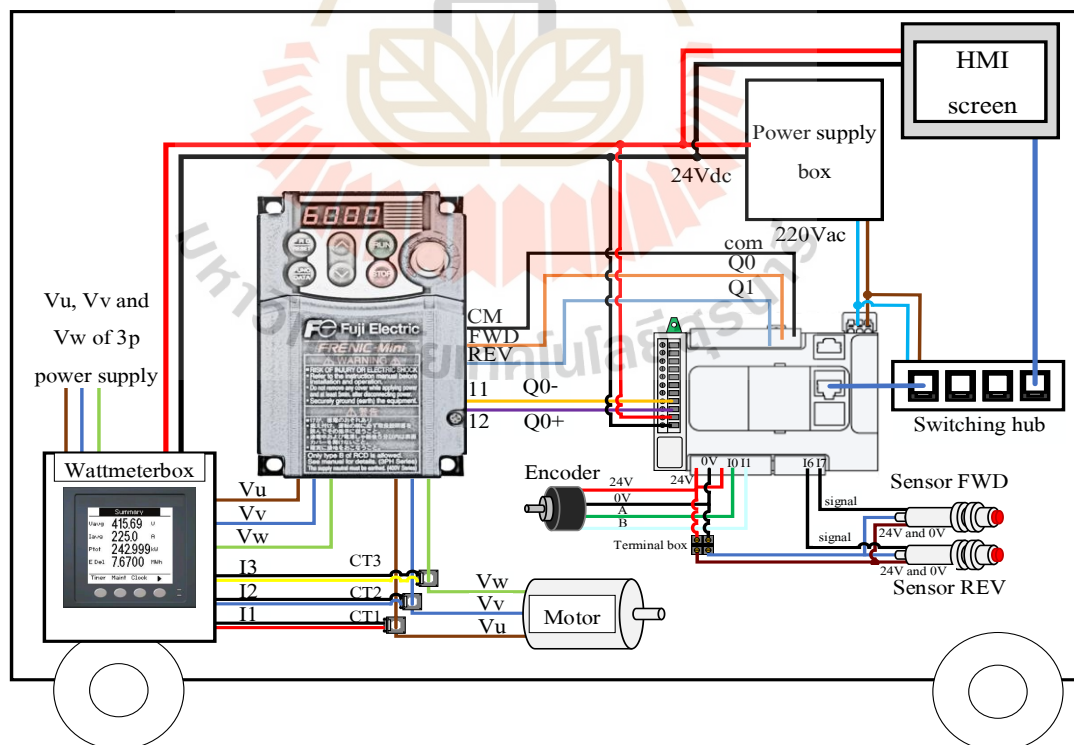


รูปที่ 4.34 ส่วนประกอบภายในกล่องแหล่งจ่ายไฟฟ้า 220Vac และ 12/24Vdc

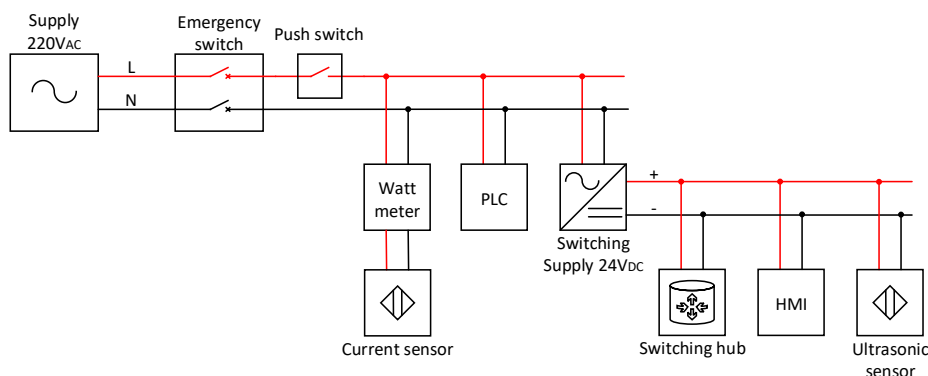


รูปที่ 4.35 ส่วนประกอบภายในกล่องวัตต์มิเตอร์

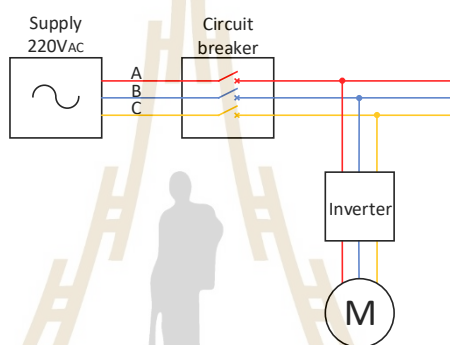
เมื่อนำกล่องวงจรทั้งสองและอุปกรณ์ไฟฟ้าในแต่ละส่วนมาเชื่อมต่อกันภายในชุดจำลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถจะมีรายละเอียดการเชื่อมต่อ แสดงดังรูปที่ 4.36-4.37



รูปที่ 4.36 การวางอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในชุดจำลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ



(ก) Single-phase supply



(ข) Three-phase supply

รูปที่ 4.37 การเชื่อมต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้าของระบบควบคุมการเดินรถ

จากรูปที่ 4.36 และ 4.37 พบว่าภายในรถมีการติดตั้งอุปกรณ์ที่ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับทั้งแบบเฟสเดียวและสามเฟส โดยทั่วไปการจ่ายไฟในลักษณะนี้มักจะติดตั้งอุปกรณ์แปลงไฟ เช่น วงจรเรกติไฟเออร์ วงจรอินเวอร์เตอร์ เป็นต้น เพื่อง่ายต่อการจ่ายไฟให้กับระบบ แต่สำหรับชุดจำลองระบบ APM ได้ทำการแยกระบบจ่ายไฟเป็นสองเส้น ได้แก่ แบบเฟสเดียวและสามเฟส เนื่องชุดจำลองนี้เป็นระบบขนาดเล็กทำให้การเชื่อมสายไฟแยกสามารถทำได้ง่ายกว่าการนำอุปกรณ์แปลงไฟมาติดตั้งเพิ่มเติม

จอ HMI ที่นำมาใช้แสดงผลการทำงานของรถในขณะที่กำลังเคลื่อนที่ให้บริการรับส่งผู้โดยสารอยู่นั้น ถูกออกแบบขึ้นมาสำหรับให้ข้อมูลการทำงานพื้นฐานของระบบ APM ที่ผู้โดยสารควรได้รับรู้ขณะที่รับบริการ เช่น แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถในช่วงเวลานั้น ระบุเส้นทางที่รถกำลังเคลื่อนที่ เป็นต้น ซึ่งแสดงรายละเอียดการทำงานของจอ HMI ที่ติดตั้งบนรถได้ดังต่อไปนี้

หน้าจอแสดงผลการเคลื่อนที่ของรถระหว่างสถานีผู้โดยสาร: เป็นหน้าต่างแสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของรถ ซึ่งจะปรากฏขึ้นเมื่อรถเริ่มวิ่งออกจากสถานีผู้โดยสารใดสถานีหนึ่ง เพื่อให้ผู้ใช้บริการทราบถึงปลายทางที่รถกำลังมุ่งหน้าไปในที่เวลานั้นได้ โดยจอนี้จะแสดงชื่อสถานีต้นทาง-ปลายทาง และลูกศรแสดงทิศทางที่รถกำลังมุ่งหน้าไป แสดงดังรูปที่ 4.38



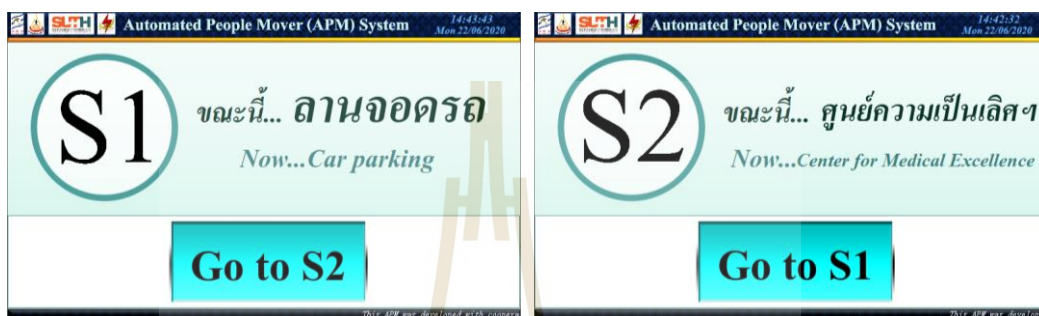
รูปที่ 4.38 หน้าจอแสดงผลการเคลื่อนที่ของรถระหว่างสถานีผู้โดยสาร

หน้าจอแสดงการเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสารแต่ละสถานี: เป็นหน้าต่างที่จะปรากฏขึ้นเมื่อระบบ APM ถูกควบคุมด้วยโหมดการควบคุมการเดินรถแบบอัตโนมัติ โหมดการควบคุมการเดินรถแบบฉุกเฉินป้องกันการชนสิ่งกีดขวาง หรือโหมดการควบคุมการเดินรถแบบทดสอบการขับเคลื่อนหรือ แล้วเคลื่อนที่เข้าจอดที่สถานีผู้โดยสารที่ 1 หรือ 2 ซึ่งจอนี้จะแสดงชื่อสถานีที่กำลังจอดกำลังจอดและนับเวลาถอยหลังก่อนที่รถจะเคลื่อนที่ไปยังสถานีอื่นในรอบถัดไป แสดงดังรูปที่ 4.39



รูปที่ 4.39 หน้าจอแสดงการเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสารแต่ละสถานี

หน้าจอแสดงปุ่มคำสั่งควบคุมรถให้เคลื่อนที่ระหว่างสถานีผู้โดยสาร: เป็นหน้าต่างที่จะปรากฏขึ้นเมื่อรถในระบบ APM ถูกควบคุมด้วยโหมดการควบคุมการเดินรถแบบปุ่มคำสั่งที่สถานีผู้โดยสารเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสารใดสถานีหนึ่ง ซึ่งจอนี้จะแสดงชื่อสถานีที่รถกำลังจอดและปุ่มควบคุมสำหรับให้ผู้โดยสารกดเพื่อสั่งการให้รถเคลื่อนที่ไปยังสถานีถัดไป แสดงดังรูปที่ 4.40



รูปที่ 4.40 หน้าจอแสดงปุ่มคำสั่งควบคุมรถให้เคลื่อนที่ระหว่างสถานีผู้โดยสารแต่ละสถานี

หน้าจอแสดงการขับเคลื่อนรถด้วยคำสั่ง ณ ศูนย์กลางควบคุมระบบ: เป็นหน้าต่างที่จะปรากฏขึ้นเมื่อรถในระบบ APM ถูกควบคุมด้วยโหมดการควบคุมการเดินรถแบบทดสอบการขับเคลื่อนจากศูนย์กลางควบคุมระบบ ซึ่งหน้าจอนี้จะแสดงข้อความว่า “ขณะนี้...รถขับเคลื่อนด้วยระบบทดสอบการเคลื่อนที่...ผู้โดยสารกรุณานั่งรอด้วยความสงบ” เพื่อแจ้งเตือนผู้โดยสารที่ใช้งานระบบ แสดงดังรูปที่ 4.41



รูปที่ 4.41 หน้าจอแสดงการขับเคลื่อนรถด้วยคำสั่ง ณ ศูนย์กลางควบคุมระบบ

หน้าจอแสดงการแจ้งเตือนรถฉุกเฉิน: เป็นหน้าต่างที่จะปรากฏขึ้นเมื่อระบบทำงานในโหมดการควบคุมการเดินรถแบบฉุกเฉินป้องกันการชนสิ่งกีดขวางและโหมดการหยุดรถแบบฉุกเฉิน ซึ่งจอนี้จะแสดงการแจ้งเตือนให้ผู้โดยสารทราบว่า “ขณะนี้...รถขับเคลื่อนด้วยระบบควบคุมฉุกเฉิน...ผู้โดยสารกรุณานั่งรอด้วยความสงบ” แสดงดังรูปที่ 4.42



รูปที่ 4.42 หน้าจอแสดงการแจ้งเตือนรถฉุกเฉิน

4.3.5 ชุดจำลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ

จากการออกแบบชุดจำลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถข้างต้น เมื่อนำวัสดุและอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ประกอบด้วยเป็นรถ จะได้ผลการดำเนินงานเป็นชิ้นงานชุดจำลองรถในระบบ APM แสดงดังรูปที่ 4.43



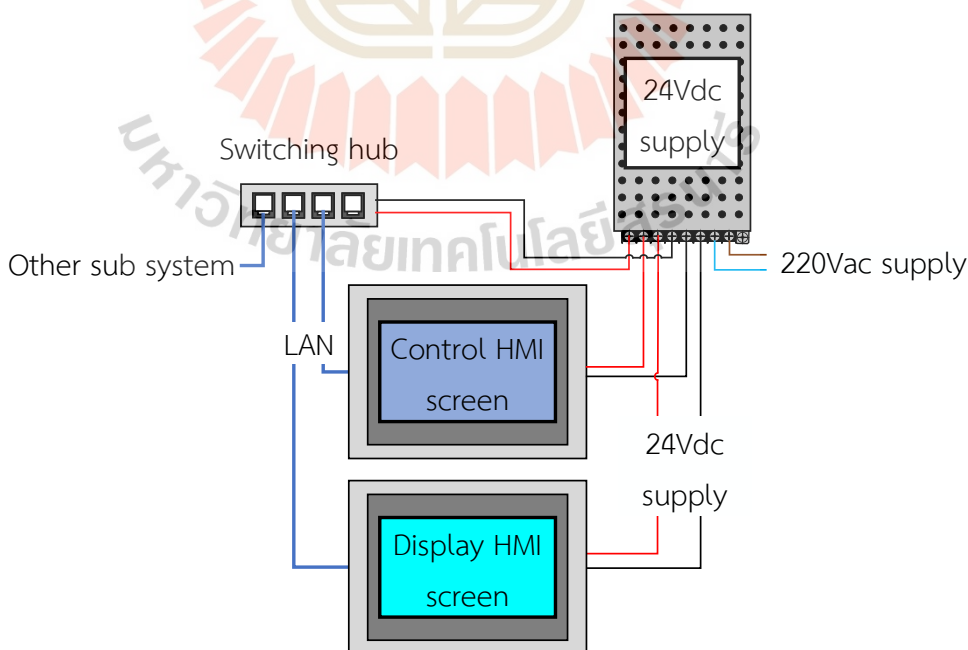
รูปที่ 4.43 ชุดจำลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถสำหรับระบบ APM ที่สร้างขึ้น

4.4 ศูนย์กลางควบคุมระบบ

การควบคุมระบบ APM ให้สามารถเคลื่อนที่รับ/ส่งผู้โดยสารแบบอัตโนมัติไร้คนขับบนเส้นทางที่กำหนดนั้น ปกติต้องอาศัยอุปกรณ์ควบคุม เช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์ PLC เป็นต้น ที่มีการเขียนโปรแกรมสำหรับสั่งการทำงานของระบบทั้งหมด อย่างไรก็ตามการดำเนินงานของระบบ APM ยังมีการทำงานส่วนอื่น ๆ ที่ไม่สามารถควบคุมด้วยอุปกรณ์ควบคุมเท่านั้น เช่น การสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบ การตรวจสอบผลการดำเนินงานของระบบ การสั่งการระบบในบางกรณี การประชาสัมพันธ์ที่สถานีผู้โดยสาร การติดต่อหน่วยงานที่เกี่ยวข้องยามเกิดเหตุฉุกเฉิน การตรวจสอบด้วยกล้องวงจรปิด เป็นต้น ดังนั้นระบบนี้จึงต้องมีศูนย์กลางควบคุมระบบ (central control facility: CCF) ที่ประกอบด้วย เจ้าหน้าที่ควบคุมระบบ จอแสดงผล และอุปกรณ์ประมวลผลอื่น ๆ เป็นส่วนช่วยในการดำเนินการของระบบด้วย โดยศูนย์กลางควบคุมระบบที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.4.1 ภาพรวมระบบศูนย์กลางควบคุมระบบ

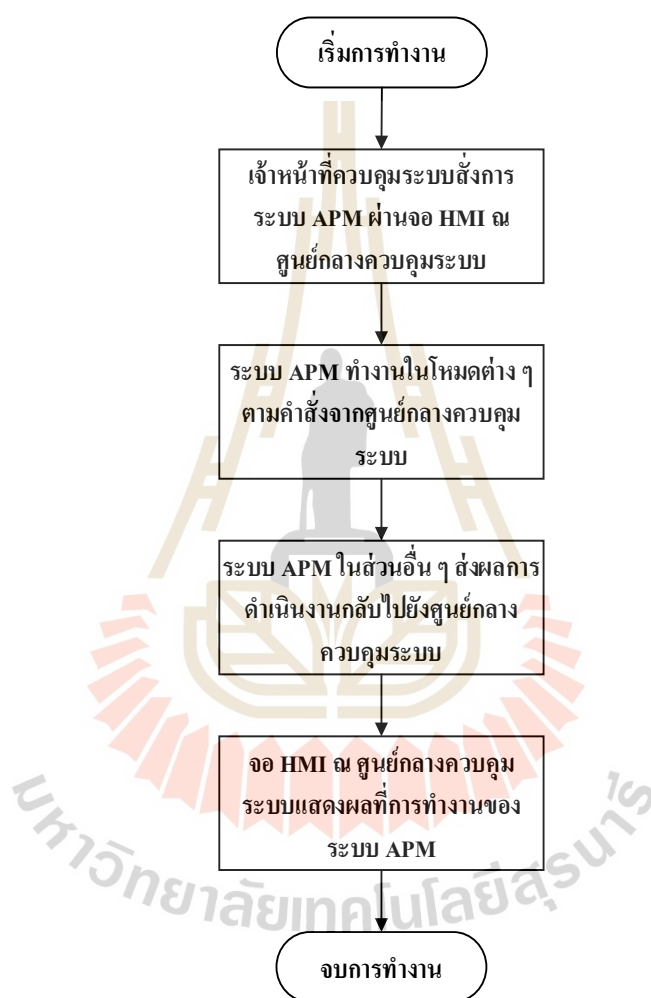
ชุดจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นในส่วนนี้ประกอบด้วยจอ HMI 2 จอ ที่ทำหน้าที่ควบคุมและแสดงผลการทำงานของระบบ โดยที่ทั้งสองจอจะมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลกับระบบย่อยอื่น ๆ ด้วยการสื่อสารผ่านระบบอีเทอร์เน็ต (Ethernet) แบบแลน (Local Area Network: LAN) เพื่อนำข้อมูลเหล่านั้นไปประกอบในการประมวลผลสำหรับควบคุมและแสดงผลต่อไป แสดงดังรูปที่ 4.44



รูปที่ 4.44 ชุดจำลองศูนย์กลางควบคุมระบบสำหรับ APM

4.4.2 รูปแบบการทำงานของศูนย์กลางควบคุมระบบ

การทำงานของระบบนี้ถูกออกแบบขึ้นมาสำหรับควบคุมและแสดงผลการทำงานของระบบ APM ผ่านจอควบคุมและแสดงผลที่ติดตั้ง ณ ห้องควบคุมหรือศูนย์กลางควบคุมระบบ ดังที่กล่าวมาข้างต้น ซึ่งสามารถสรุปรายละเอียดในการทำงานของระบบย่อยส่วนนี้ แสดงดังรูปที่ 4.45



รูปที่ 4.45 ผังการทำงานของชุดจำลองศูนย์กลางควบคุมระบบ

4.4.3 โครงสร้างศูนย์กลางควบคุมระบบ

โครงสร้างของชุดจำลองศูนย์กลางควบคุมระบบประกอบด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ซึ่งสามารถแจกแจงรายละเอียดการทำงานของโครงสร้างในแต่ละส่วนของระบบนี้ แสดงดังตารางที่ 4.3

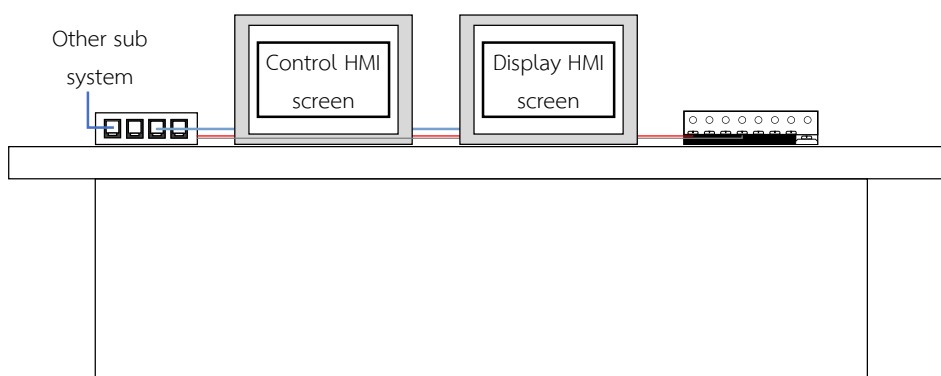
ตารางที่ 4.3 รายการอุปกรณ์สำหรับศูนย์กลางควบคุมระบบ

ลำดับที่	รายการ	การทำงาน
1	อินเตอร์เฟซระหว่างมนุษย์และเครื่องจักร (Human Machine Interface: HMI)	ใช้สำหรับนำเสนอข้อมูลการทำงานของระบบ APM ซึ่งประกอบด้วย จอควบคุมโหมดการทำงานของรถและจอแสดงผลการทำงานของระบบ เพื่อให้การทางของระบบ APM มีความสมบูรณ์
2	แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง (Switching supply)	ใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง 24 V ให้กับจอHMI ทั้งสองและสวิทซ์ซึ่งฮับที่ใช้ในแบบจำลอง
3	สวิทซ์ซึ่งฮับ (Switching hub)	ใช้ในการเชื่อมต่อจอHMI ทั้งสองและอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้งานในระบบ APM เพื่อกระจายข้อมูลที่มีจำเป็นในการทำงานของระบบผ่านเครือข่าย LAN

หมายเหตุ: รายการอุปกรณ์จะไม่ได้กล่าวถึงสายไฟหรือสายแลนที่นำมาใช้ในระบบด้วย

4.4.4 การออกแบบศูนย์กลางควบคุมระบบ

การทำงานของระบบ APM ได้กำหนดให้มีการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถด้วยอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ติดตั้งไว้บนรถเป็นหลัก แต่การควบคุมนี้ต้องอาศัยคำสั่งจากศูนย์กลางควบคุมระบบสำหรับเริ่มกระบวนการทำงานของระบบ ดังนั้นการออกแบบศูนย์กลางควบคุมระบบที่ใช้ในชุดจอลงนี้จึงได้แบ่งส่วนทำงานออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนควบคุมโหมดการทำงานของระบบและส่วนแสดงผลการทำงานของระบบ โดยการทำงานทั้งสองส่วนนี้ถูกดำเนินการด้วยจอ HMI ที่ถูกติดตั้งไว้ภายในระบบ แสดงดังรูปที่ 4.46



รูปที่ 4.46 ภาพรวมชุดจำลองศูนย์กลางควบคุมระบบสำหรับระบบ APM

โดยแต่ละส่วนในศูนย์กลางควบคุมระบบจะมีองค์ประกอบและรายละเอียดการออกแบบระบบดังต่อไปนี้

1) ส่วนควบคุมโหมดการทำงานของระบบ จอ HMI ในส่วนนี้ติดตั้งในศูนย์กลางควบคุมระบบเพื่อใช้ควบคุมการวิ่งของรถ ประกอบด้วย 3 หน้าจอ ได้แก่ หน้าจอควบคุมโหมดการเคลื่อนที่ของรถ หน้าจอปุ่มบังคับทิศทางรถในโหมดการควบคุมการเดินรถแบบทดสอบการขับเคลื่อน หน้าจอแจ้งเตือนระบบทำงานผิดพลาด ซึ่งมีรายละเอียดการออกแบบของแต่ละหน้าจอ ดังต่อไปนี้

หน้าจอควบคุมโหมดการเคลื่อนที่ของรถ เป็นหน้าต่างสำหรับเลือกโหมดและใช้ตรวจสอบผลตอบสนองของระบบ แสดงดังรูปที่ 4.47



รูปที่ 4.47 หน้าจอควบคุมโหมดการเคลื่อนที่ของรถ

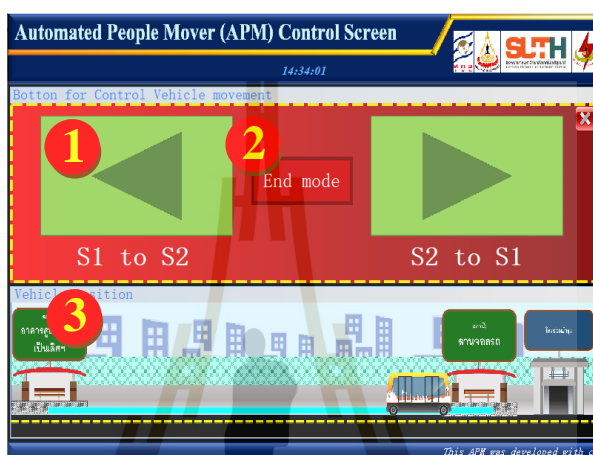
- หมายเลข 1: ส่วนแสดงความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถ ทำหน้าที่ในการรับค่าความเร็วจากเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งบนรถตรวจจับได้ แล้วส่งค่ามายังจอผ่านการสื่อสารแบบ LAN

- หมายเลข 2: ส่วนแสดงโหมดการทำงานของระบบ ทำหน้าที่แสดงสถานะการทำงานของระบบจากข้อมูลสัญญาณที่ตอบสนองมาจากระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถที่กำลังทำงาน ณ ขณะนั้น

- หมายเลข 3: ส่วนปุ่มเลือกโหมดการทำงานของรถ เป็นปุ่มสำหรับให้เจ้าหน้าที่ผู้ควบคุมระบบสามารถเลือกโหมดการทำงานให้รถในระบบ APM เคลื่อนที่ และสามารถสั่งหยุดระบบได้เช่นกัน

- หมายเลข 4: ส่วนแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ ทำหน้าที่แสดงตำแหน่งที่รถกำลังเคลื่อนที่อยู่ ณ ขณะนั้น

หน้าจอบัญชีปฏิบัติการทางรถในโหมดการควบคุมการเดินรถแบบทดสอบการขับเคลื่อน เป็นหน้าต่างสำหรับควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของรถใน โหมดการควบคุมการเดินรถแบบทดสอบการขับเคลื่อน แสดงดังรูปที่ 4.48



รูปที่ 4.48 หน้าจอบัญชีปฏิบัติการทางรถในโหมดการควบคุมการเดินรถแบบทดสอบการขับเคลื่อน

- หมายเลข 1: ส่วนปุ่มควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของรถ ทำหน้าที่สั่งรถให้เคลื่อนที่เมื่อมีการกดปุ่ม โดยปุ่ม S1 to S2 ใช้สั่งรถให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางนี้ผู้โดยสารที่ 1 ไปยังสถานีผู้โดยสารที่ 2 และปุ่ม S2 to S1 ใช้สั่งรถให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางนี้ผู้โดยสารที่ 2 ไปยังสถานีผู้โดยสารที่ 1 แต่หากเลือกกดปุ่มรถจะหยุดการเคลื่อนที่

- หมายเลข 2: ส่วนปุ่มจบการทำงานในโหมดการควบคุมการเดินรถแบบทดสอบการขับเคลื่อน ทำหน้าที่ยกเลิกการทำงานของระบบในโหมดนี้

- หมายเลข 3: ส่วนแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ ทำหน้าที่แสดงตำแหน่งที่รถกำลังเคลื่อนที่อยู่ ณ ขณะนั้น

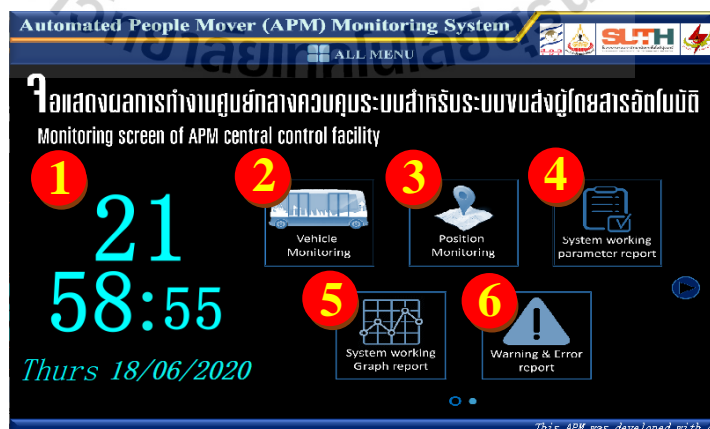
หน้าจอแจ้งเตือนระบบทำงานผิดพลาด เป็นหน้าต่างที่ออกแบบมาสำหรับการแจ้งเตือน เพื่อให้เจ้าหน้าที่ควบคุมระบบว่า “ขณะนี้...รถขับเคลื่อนที่ด้วยระบบควบคุมฉุกเฉิน ผู้โดยสารกรุณานั่งรอด้วยความสงบ” เมื่อระบบเกิดความผิดปกติและมีการหยุดการเคลื่อนที่ของรถแบบฉุกเฉิน แสดงดังรูปที่ 4.49



รูปที่ 4.49 หน้าจอแจ้งเตือนระบบทำงานผิดพลาด

2) ส่วนแสดงผลการทำงานของระบบ จอ HMI ที่ใช้สำหรับแสดงผลการทำงานในส่วนต่าง ๆ ของระบบ APM ประกอบด้วย 6 หน้าต่าง ได้แก่ หน้าจอเมนู หน้าจอแสดงการทำงานของรถ หน้าจอแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ หน้าจอแสดงค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าภายในระบบ หน้าจอแสดงกราฟการทำงานของระบบ และหน้าจอแสดงการแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบ โดยแต่ละหน้าต่างมีรายละเอียดการออกแบบ ดังต่อไปนี้

หน้าจอเมนู เป็นหน้าต่างสำหรับผู้ควบคุมระบบเลือกเปิดหน้าจอแสดงผลการทำงานต่าง ๆ ของระบบ APM จากการกดปุ่มคำสั่งที่อยู่บนจอ HMI ณ ศูนย์กลางควบคุมระบบ แสดงดังรูปที่ 4.50



รูปที่ 4.50 หน้าจอเมนู

- หมายเลข 1: ส่วนแสดงรายละเอียดของจอ ทำหน้าที่แสดงข้อมูลต่าง ๆ เช่น ชื่อจอแสดงผลที่กำลังใช้งาน วัน-เวลาที่ให้บริการระบบ เป็นต้น
 - หมายเลข 2: ปุ่มเมนูหน้าจอแสดงการทำงานของรถ ใช้เพื่อเลือกเปิดหน้าจอแสดงการทำงานของรถในศูนย์กลางควบคุมระบบ
 - หมายเลข 3: ปุ่มเมนูหน้าจอแสดงการเคลื่อนที่ของรถ ใช้เพื่อเลือกเปิดหน้าจอแสดงการเคลื่อนที่ของรถในศูนย์กลางควบคุมระบบ
 - หมายเลข 4: ปุ่มเมนูหน้าจอแสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในระบบ ใช้เพื่อเลือกเปิดหน้าจอแสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในระบบของศูนย์กลางควบคุมระบบ
 - หมายเลข 5: ปุ่มเมนูหน้าจอแสดงกราฟการทำงานของระบบ ใช้เพื่อเลือกเปิดหน้าจอแสดงกราฟการทำงานของระบบในศูนย์กลางควบคุมระบบ
 - หมายเลข 6: ปุ่มเมนูหน้าจอแสดงการแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบ ใช้เพื่อเลือกเปิดหน้าจอแสดงการแจ้งเตือนความผิดปกติภายในศูนย์กลางควบคุมระบบ
- หน้าจอแสดงการทำงานของรถ เป็นหน้าต่างสำหรับแสดงผลการทำงานด้านการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ เช่น ความเร็ว โหมดการเคลื่อนที่ เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 4.51



รูปที่ 4.51 หน้าจอแสดงการทำงานของรถ

- หมายเลข 1: ส่วนแสดงความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถ ทำหน้าที่ในการรับค่าความเร็วจากเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งบนรถตรวจจับได้ แล้วส่งค่ามายังจอผ่านการสื่อสารแบบ LAN เหมือนส่วนควบคุมโหมดการทำงานของระบบ
- หมายเลข 2: ส่วนแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของรถ
- หมายเลข 3: ส่วนแสดงโครงสร้างและการเชื่อมต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าภายในรถ

- หมายเลข 4: ส่วนแสดงโหมดการทำงานของระบบ ทำหน้าที่แสดงสถานะการทำงานของระบบที่ตอบสนองมาจากระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถใน ณ ขณะนั้น
 - หมายเลข 5: ส่วนแสดงความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถแบบกราฟ ทำหน้าที่คล้ายกับส่วนแสดงความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถ (หมายเลข 1) แต่จะแสดงผลในรูปของกราฟ
- หน้าจอแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ ใช้แสดงตำแหน่งที่รถเหมือนกับระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ แสดงดังรูปที่ 4.52



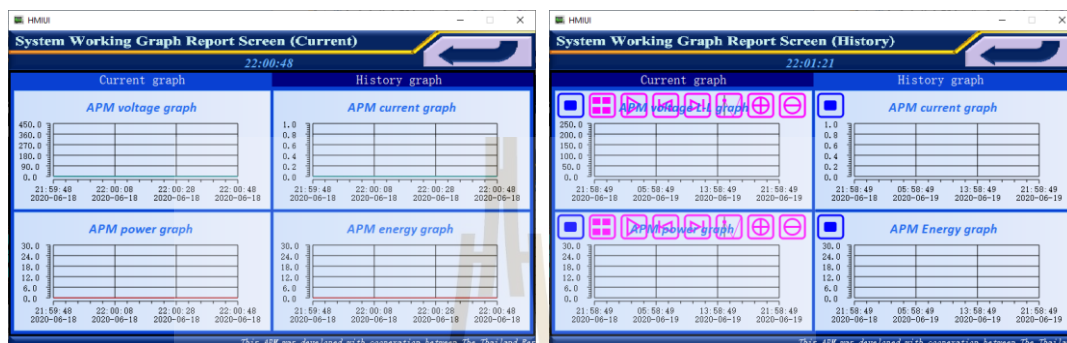
รูปที่ 4.52 หน้าจอแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ

หน้าจอแสดงค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของระบบ ใช้สำหรับแสดงค่าพารามิเตอร์ที่วัดมาจากส่วนต่างๆ ภายในระบบ APM แสดงดังรูปที่ 4.53

Parameter	Description	Value	Parameter	Description	Value
Voltage	Voltage U-I	0.00 V			
	Voltage I-B	0.00 V			
	Voltage W-U	0.00 V			
	Voltage L-L Avg.	0.00 V			
	Voltage L-L Unbal.	0.00 V			
Current	Current U	0.00 A			
	Current V	0.00 A			
	Current W	0.00 A			
	Current Avg.	0.00 A			
	Current Unbal.	0.00 A			
Power	Apparent Power	0.00 kVA			
	Active Power	0.00 kW			
	Reactive Power	0.00 kVar			
	Power Factor	0.00			
Frequency	Frequency	0.00 Hz			
Energy	Apparent Energy	0.00 kVAh			
	Active Energy	0.00 kWh			
	Reactive Energy	0.00 kVarh			

รูปที่ 4.53 หน้าจอแสดงค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของระบบ

หน้าจอแสดงกราฟการทำงานของระบบ ใช้สำหรับแสดงค่าพารามิเตอร์ที่วัดมา จากส่วนต่าง ๆ ภายในระบบ APM ในรูปของกราฟการทำงานของระบบ ณ ขณะนั้นและกราฟ แสดงประวัติการทำงานของระบบ โดยในที่นี้จะแสดงค่าแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และ พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนรถ แสดงดังรูปที่ 4.54



รูปที่ 4.54 หน้าจอแสดงกราฟการทำงานของระบบ

หน้าจอแสดงการแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบ ใช้สำหรับแจ้งเตือนความผิด พ้องของค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีค่าไม่อยู่ในช่วงการทำงานปกติ ในรูปของตารางแสดง ค่าพารามิเตอร์ของระบบ ณ ขณะนั้นและตารางประวัติค่าพารามิเตอร์ของระบบ แสดงดังรูปที่ 4.55

รูปที่ 4.55 หน้าจอแสดงการแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบ

ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่าง ๆ ที่แสดงบนจอ HMI ในส่วนแสดงผลการทำงานของ ระบบ ได้มีการกำหนดขอบเขตการแสดงผลและแจ้งเตือน โดยอ้างอิงจากเอกสารแสดงข้อมูล จำเพาะ (Data sheet) ของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่นำมาใช้งาน ซึ่งกล่าวไว้ในภาคผนวก ก

4.4.5 ชุดจำลองศูนย์กลางควบคุมระบบ

จากการออกแบบและสร้างชุดจำลองศูนย์กลางควบคุมระบบข้างต้น จะได้ผลการดำเนินงานเป็นชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 4.56



รูปที่ 4.56 ชุดจำลองศูนย์กลางควบคุมระบบสำหรับระบบ APM ที่สร้างขึ้น

4.5 การทำงานของระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ

เมื่อนำระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ และศูนย์กลางควบคุมระบบ มาประกอบเข้าด้วยกันดังที่กล่าวไว้ข้างต้น จะได้ระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM แสดงดังรูปที่ 4.57

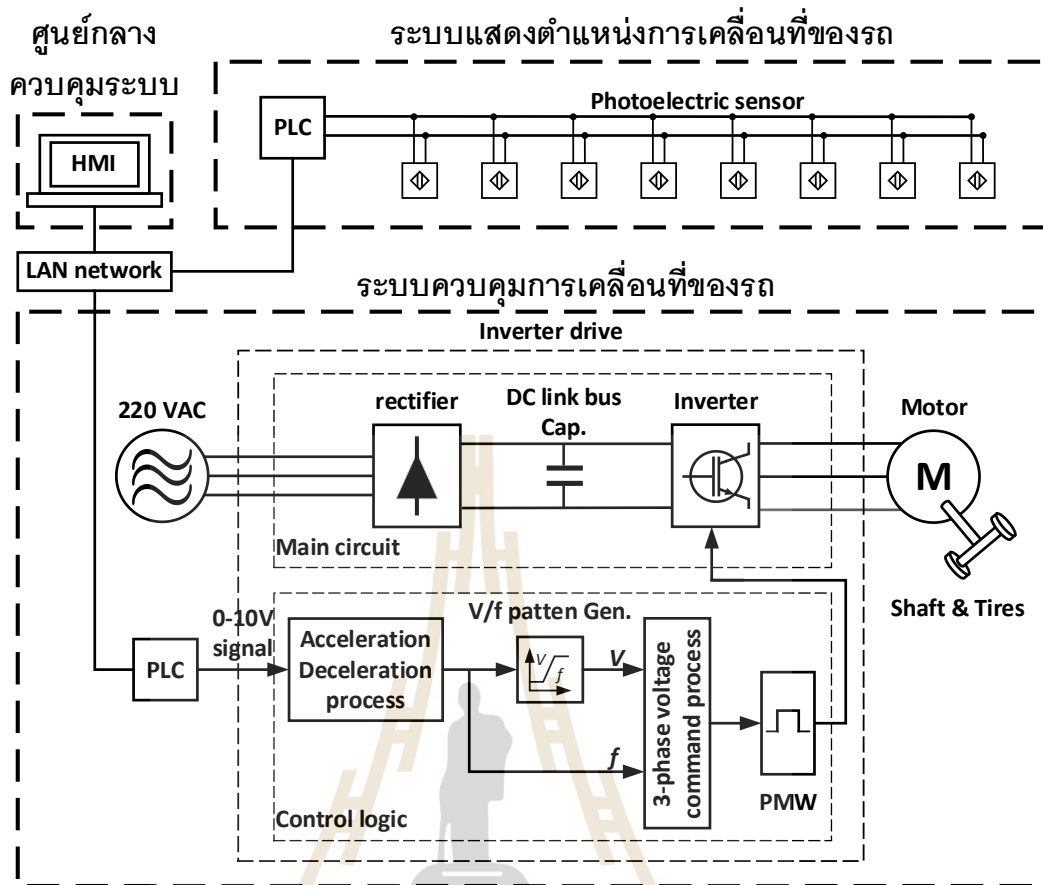


รูปที่ 4.57 ชุดจำลองระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ที่สร้างขึ้น

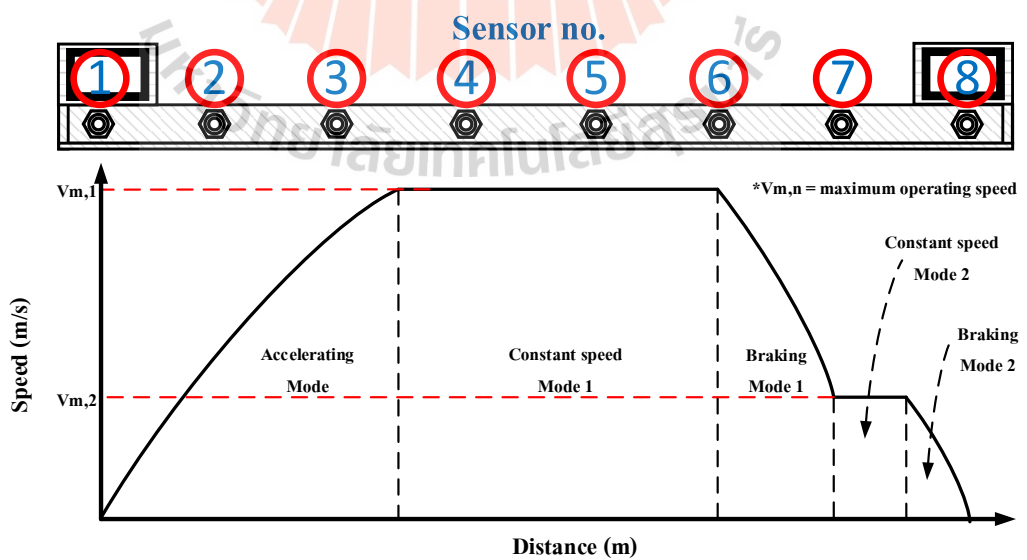
การทำงานของระบบควบคุมนี้ได้นำเอารูปแบบการทำงานของระบบย่อยแต่ละส่วนที่เป็นองค์ประกอบภายในระบบมาประยุกต์เข้าด้วยกัน โดยอาศัยการถ่ายโอนคำสั่งและข้อมูลต่าง ๆ ที่จำเป็นในการควบคุมการทำงานของระบบผ่านโครงข่ายแลน (Local Area Network: LAN) แสดงดังรูปที่ 4.58 ซึ่งปกติแล้วระบบจะเริ่มดำเนินการควบคุมระบบก็ต่อเมื่อเจ้าหน้าที่ผู้คุมระบบได้ทำการเปิดระบบและสั่งควบคุมโหมดการทำงานของรถจากส่วนควบคุมโหมดการทำงานของระบบ ศูนย์กลางควบคุมระบบ สัญญาณคำสั่งในส่วนนี้จึงถูกส่งไปยัง PLC ของระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ ทำให้มีการดึงสัญญาณแสดงตำแหน่งรถจากโฟโตอิเล็กทริกเซนเซอร์ (เซนเซอร์ตรวจจับ) ที่ติดตั้งตามทางวิ่ง แล้วส่งต่อไปยัง PLC อีกตัวของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถที่ทำหน้าที่ประมวลผลและสร้างสัญญาณอนาล็อก 0-10 โวลต์สำหรับควบคุมลักษณะการทำงานของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสของรถด้วยวิธีการควบคุมแบบโวลต์/เฮิร์ตซ์แบบวงเปิด (Open-loop V/f control) แสดงดังรูปที่ 4.59 โดยการขับเคลื่อนนี้จะมีการปรับความเร็วของรถในแต่ละจุดบนทางวิ่งให้มีรูปแบบที่สอดคล้องกับโครงร่างความเร็วที่กำหนดให้มีความเร็วบริการสูงสุดทั้งหมด 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงแรกเป็นความเร็วสูงสุดที่รถใช้ในการเคลื่อนที่ปกติ และช่วงที่สองเป็นความเร็วที่ชะลอสำหรับรอเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสารปลายทาง แสดงดังรูปที่ 4.60 เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของรถให้สามารถดำเนินการไป-กลับระหว่างสถานีผู้โดยสาร 2 สถานี แบบอัตโนมัติอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งมีคำสั่งหยุดการทำงานของระบบจากส่วนควบคุมโหมดการทำงานของระบบ ศูนย์กลางควบคุมระบบอีกครั้งหรือเกิดเหตุขัดข้องใด ๆ กับระบบ ซึ่งสรุปรูปแบบการทำงานของระบบเป็นแผนภาพการทำงาน (Flowchart) แสดงดังรูปที่ 4.61



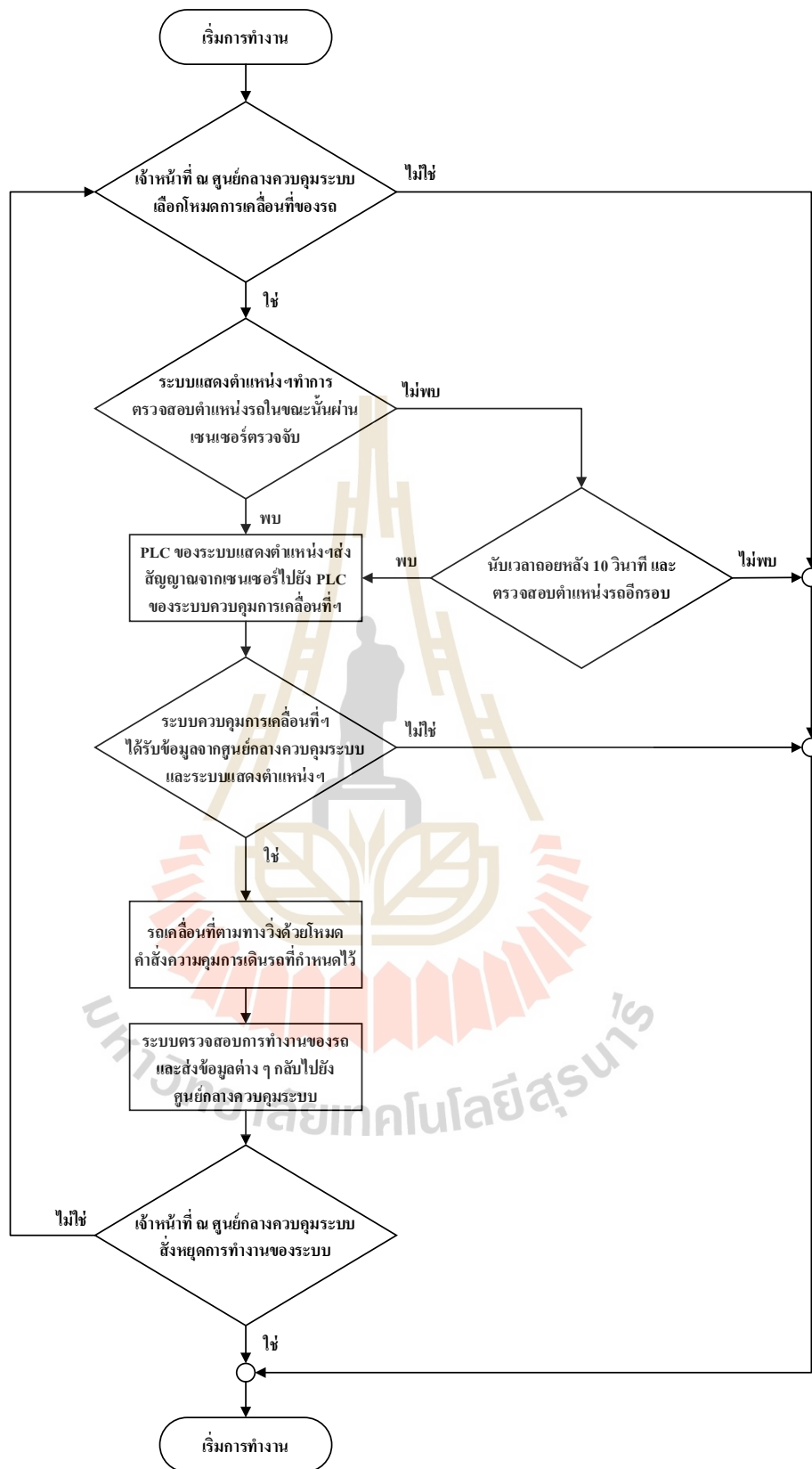
รูปที่ 4.58 โครงข่ายแลนภายในระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM



รูปที่ 4.59 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM



รูปที่ 4.60 ลักษณะ โครงร่างความเร็วสำหรับควบคุมการเดินรถภายในระบบ



รูปที่ 4.61 ฟังก์การทำงานของระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM

4.6 สรุป

จากการพัฒนาต้นแบบระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ทำให้ได้ชุดจำลองระบบ APM ขนาดเล็กที่ใช้ PLC ควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบ โวลต์/เอ็ดช่วงเปิดสำหรับสั่งรถให้เคลื่อนที่ระหว่างสถานีผู้โดยสาร 2 สถานีด้วยโหมดต่าง ๆ ได้แก่ โหมดการควบคุมการเดินรถแบบอัตโนมัติ โหมดการควบคุมการเดินรถแบบปุ่มคำสั่งที่สถานีผู้โดยสาร โหมดการควบคุมการเดินรถแบบทดสอบการขับเคลื่อน โหมดการควบคุมการเดินรถแบบฉุกเฉินป้องกันการชนสิ่งกีดขวาง และโหมดการหยุดรถแบบฉุกเฉิน ซึ่งออกแบบและสร้างขึ้นสำหรับรองรับสถานการณ์ต่าง ๆ ที่อาจจะพบเจอและสามารถพัฒนาต่อยอดได้ในอนาคต อย่างไรก็ตามการทดสอบสมรรถนะการทำงานของระบบจะกล่าวถึงในบทถัดไป

สำหรับการเลือกใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ติดตั้งภายในต้นแบบระบบควบคุมการเดินรถของระบบ APM ได้มาจากการสรรหาอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีฟังก์ชันและคุณสมบัติการทำงานให้สอดคล้องกับระบบที่ออกแบบ โดยสาเหตุที่เลือกใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าในแต่ละยี่ห้อ นั้นได้อ้างอิงจากความเชี่ยวชาญของผู้ดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์และความยากง่ายของการหาอุปกรณ์ไฟฟ้านั้น ๆ อย่างไรก็ตามหากมีอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีรูปแบบการทำงานที่ตอบโจทย์ต่อการทำงานของระบบมากกว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ได้เลือกใช้ในชุดจำลองนี้ ก็สามารถเปรียบเทียบอุปกรณ์ไฟฟ้าในส่วนต่าง ๆ ได้ตามความเหมาะสม



บทที่ 5

การทดสอบระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ

5.1 บทนำ

จากการพัฒนาชุดจำลองระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ที่ได้ดำเนินการสร้างในบทที่ผ่านมา ทำให้ได้ต้นแบบระบบ APM ที่สามารถควบคุมรถให้เคลื่อนที่ระหว่างสถานีผู้โดยสาร 2 สถานี ตามลักษณะ โครงร่างความเร็วที่กำหนด อย่างไรก็ตามเมื่อทำการสร้างชุดจำลองและทดสอบสมรรถนะของระบบ เพื่อตรวจสอบการทำงานของระบบว่าสามารถดำเนินการได้สอดคล้องกับรูปแบบที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่ บทนี้จึงกล่าวถึงการทดสอบชุดจำลองระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM โดยแบ่งการทดสอบออกเป็นระบบย่อย ดังรายละเอียดต่อไปนี้

5.2 การทดสอบชุดจำลองระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่สำหรับระบบ APM

การทดสอบชุดจำลองในส่วนนี้ได้ดำเนินการทดสอบการตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถว่ามีรูปแบบดังที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่ และทดสอบสมรรถนะการทำงานของอุปกรณ์ที่ใช้เป็นโครงสร้างภายในระบบว่าสามารถทำงานในสถานการณ์ที่ต้องทำงานแบบซ้ำ ๆ ได้หรือไม่ เช่น ตรวจจับตำแหน่งรถที่เคลื่อนที่กลับไปกลับมา เป็นต้น โดยการทดสอบนี้ได้แบ่งรูปแบบการทดสอบออกทั้งหมด 3 ส่วน ดังต่อไปนี้

- การทดสอบตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ
- การทดสอบแจ้งเตือนสถานการณ์ทำงานของเซนเซอร์
- การทดสอบแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบ ณ สถานีผู้โดยสาร

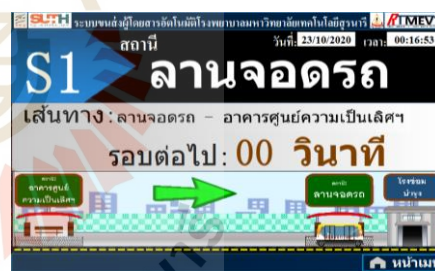
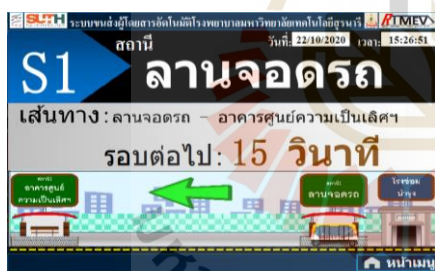
5.2.1 การทดสอบตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ

การทดสอบสมรรถนะการทำงานของระบบในส่วนตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถที่วิ่งด้วยความเร็วบริการสูงสุดค่าต่าง ๆ เป็นจำนวนหลาย ๆ รอบ ซึ่งเป็นการจำลองการทำงานจริงของระบบ APM ที่ปกติต้องมีลักษณะการวิ่งแบบตายตัวบนเส้นทางเดิมและในช่วงเวลาที่กำหนด ดังนั้นในการตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถนี้ได้กำหนดลำดับสำหรับระบุชื่อเซนเซอร์ตรวจจับแต่ละตัว โดยเริ่มจากเซนเซอร์ตรวจจับ ณ ตำแหน่งสถานีผู้โดยสารที่ 1 เป็นตัวที่ 1 และไล่ตามลำดับจนครบทั้งหมด 8 จุด เมื่อรถวิ่งผ่านเซนเซอร์ตรวจจับตัวใด ๆ แล้วระบบจะทำการแสดงผล แสดงดังตารางที่ 5.1 และรูปที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 การทำงานของเซนเซอร์ตรวจจับ ณ ขณะที่รถเคลื่อนที่ในตำแหน่งต่าง ๆ

ตำแหน่งที่รถกำลังเคลื่อนที่	การทำงานของเซนเซอร์ตรวจจับ							
	1	2	3	4	5	6	7	8
ตำแหน่ง ณ จุดที่ 1 (สถานีผู้โดยสารที่ 1)	○	●	●	●	●	●	●	●
ตำแหน่ง ณ จุดที่ 2	●	○	●	●	●	●	●	●
ตำแหน่ง ณ จุดที่ 3	●	●	○	●	●	●	●	●
ตำแหน่ง ณ จุดที่ 4	●	●	●	○	●	●	●	●
ตำแหน่ง ณ จุดที่ 5	●	●	●	●	○	●	●	●
ตำแหน่ง ณ จุดที่ 6	●	●	●	●	●	○	●	●
ตำแหน่ง ณ จุดที่ 7	●	●	●	●	●	●	○	●
ตำแหน่ง ณ จุดที่ 8 (สถานีผู้โดยสารที่ 2)	●	●	●	●	●	●	●	○

หมายเหตุ : ○ = เซนเซอร์ทำงานสถานะ ON
 ● = เซนเซอร์ทำงานสถานะ OFF



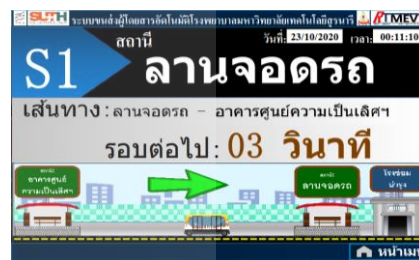
(ก) ตำแหน่ง ณ จุดที่ 1 (สถานีผู้โดยสารที่ 1)



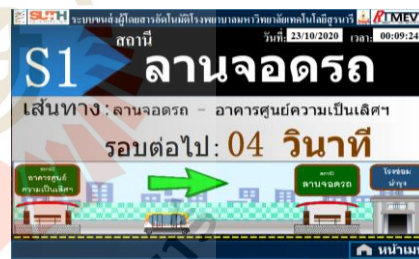
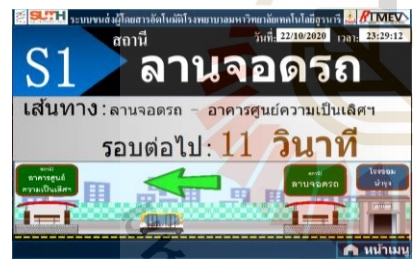
(ข) ตำแหน่ง ณ จุดที่ 2



(ค) ตำแหน่ง ณ จุดที่ 3



(ง) ตำแหน่ง ณ จุดที่ 4



(จ) ตำแหน่ง ณ จุดที่ 5



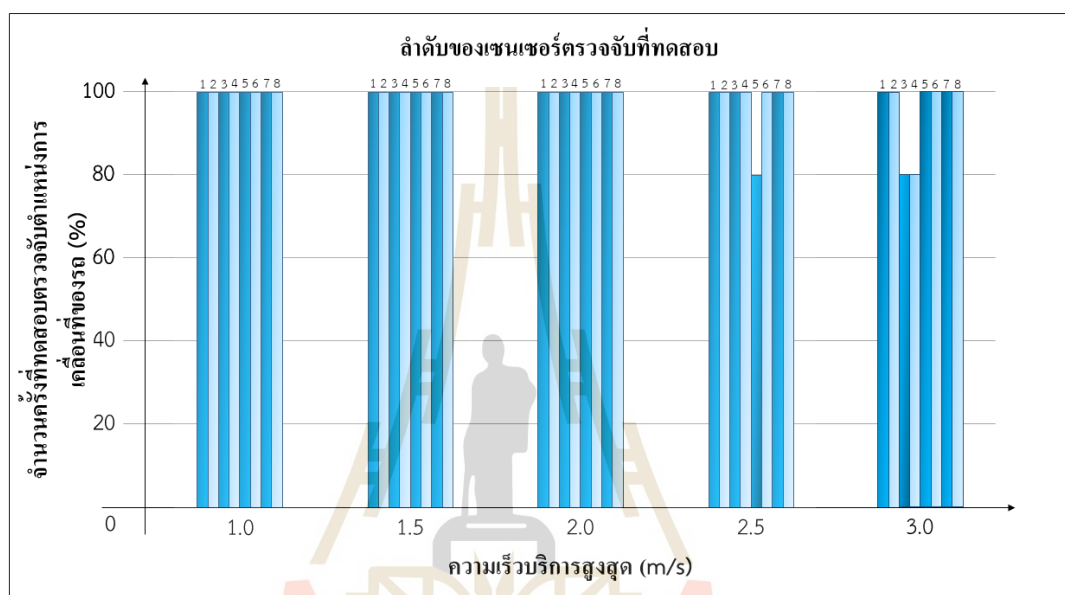
(ฉ) ตำแหน่ง ณ จุดที่ 6

ตารางที่ 5.2 ผลการทดสอบตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ (ต่อ)

ความเร็ว (m/s)	ครั้งที่	ผลการตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถในแต่ละเซนเซอร์ตรวจจับ							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1.5	1	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ
	2	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ
	3	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ
	4	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ
	5	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ
2.0	1	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ
	2	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ
	3	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ
	4	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ
	5	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ
2.5	1	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ
	2	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ
	3	พบ	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	พบ	พบ	พบ
	4	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ
	5	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ
3.0	1	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ
	2	พบ	พบ	พบ	ไม่พบ	พบ	พบ	พบ	พบ
	3	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ
	4	พบ	พบ	ไม่พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ
	5	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ

จากตารางที่ 5.2 พบว่าการปรับความเร็วบริการสูงสุดของรถแทบไม่มีผลต่อการตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ ซึ่งพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์ผลการตอบสนองที่ได้ 88% เนื่องจากปกติโฟโตอิเล็กทริกเซนเซอร์เป็นเซนเซอร์ที่สามารถตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว ประกอบกับรถที่วิ่งผ่านเซนเซอร์ตรวจจับนั้นมีขนาดใหญ่และรูปร่างที่ง่ายต่อการตรวจจับ จึงทำให้ระบบสามารถตอบสนองได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อรถวิ่งผ่านจุดที่เซนเซอร์ตรวจจับกับแผ่นสะท้อนมีการรับส่งสัญญาณ แต่ในการทดสอบนี้มีบางครั้งที่เซนเซอร์ตรวจจับไม่สามารถระบุตำแหน่งของรถได้

เนื่องจากโครงสร้างบางส่วนของรถไปชนเข้ากับแผ่นสะท้อนที่ติดตั้งในอีกฟากของเซนเซอร์ตรวจจับ จนแผ่นสะท้อนไม่อยู่ในแนวเดิมและเกิดการเปลี่ยนทิศสะท้อนสัญญาณที่ได้รับมาจากเซนเซอร์ตรวจจับได้ จึงเป็นเหตุให้ระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่สำหรับระบบ APM เกิดความบกพร่องในการทำงานนี้ไป ซึ่งสามารถสรุปผลการทดสอบเป็นกราฟอย่างง่ายสำหรับประกอบการพิจารณาระบบ แสดงดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 สรุปผลการทดสอบระบบตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ

5.2.2 การทดสอบระบบแจ้งเตือนสถานะการทำงานของเซนเซอร์ตรวจจับ

การแจ้งเตือนสถานะการทำงานของเซนเซอร์ตรวจจับแต่ละตัวในระบบ APM ถือเป็นอีกหนึ่งการทำงานที่มีความสำคัญ เนื่องจากการทำงานของระบบ APM นั้นต้องอาศัยสัญญาณจากเซนเซอร์ตรวจจับที่ติดตั้งบนแต่ละจุดของทางวิ่งสำหรับส่งสัญญาณระบุตำแหน่งรถไปยัง PLC เพื่อให้ระบบทราบว่า ณ ขณะนั้นมีรถเคลื่อนที่ผ่านจุดต่าง ๆ ที่กำหนดติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับเอาไว้ ซึ่ง PLC จะนำสัญญาณนี้ไปประมวลผลต่อและสั่งการให้จอ HMI แสดงผลการทำงานของระบบ และนำไปควบคุมการเคลื่อนที่ของรถในระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถแบบอัตโนมัติ ต่อไป แต่หากเซนเซอร์ตรวจจับตัวใดตัวหนึ่งเกิดความเสียหายไม่มีการส่งสัญญาณขณะที่รถวิ่งผ่าน นั้นอาจจะหมายถึงปัญหาความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับระบบ APM ทั้งระบบ ดังนั้นในส่วนนี้เสนอการทดสอบระบบแจ้งเตือนสถานะการทำงานของเซนเซอร์ตรวจจับที่ได้ออกแบบ โดยการแสดงผลการตรวจสอบสถานะการทำงานของเซนเซอร์ตรวจจับ แสดงดังตารางที่ 5.3 และรูปที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 การแจ้งเตือนสถานะการทำงานของเซนเซอร์

ตำแหน่งที่	เซนเซอร์เกิดความผิดปกติ							
	1	2	3	4	5	6	7	8
ตำแหน่ง ณ จุดที่ 1 (สถานีผู้โดยสารที่ 1)	●	○	○	○	○	○	○	○
ตำแหน่ง ณ จุดที่ 2	○	●	○	○	○	○	○	○
ตำแหน่ง ณ จุดที่ 3	○	○	●	○	○	○	○	○
ตำแหน่ง ณ จุดที่ 4	○	○	○	●	○	○	○	○
ตำแหน่ง ณ จุดที่ 5	○	○	○	○	●	○	○	○
ตำแหน่ง ณ จุดที่ 6	○	○	○	○	○	●	○	○
ตำแหน่ง ณ จุดที่ 7	○	○	○	○	○	○	●	○
ตำแหน่ง ณ จุดที่ 8 (สถานีผู้โดยสารที่ 2)	○	○	○	○	○	○	○	●

หมายเหตุ : ○ = เซนเซอร์ทำงานสถานะ Normal

● = เซนเซอร์ทำงานสถานะ Error



(ก) เซนเซอร์ ณ จุดที่ 1 เกิดความผิดพลาด



(ข) เซนเซอร์ ณ จุดที่ 2 เกิดความผิดพลาด



(ค) เซนเซอร์ ณ จุดที่ 3 เกิดความผิดพลาด

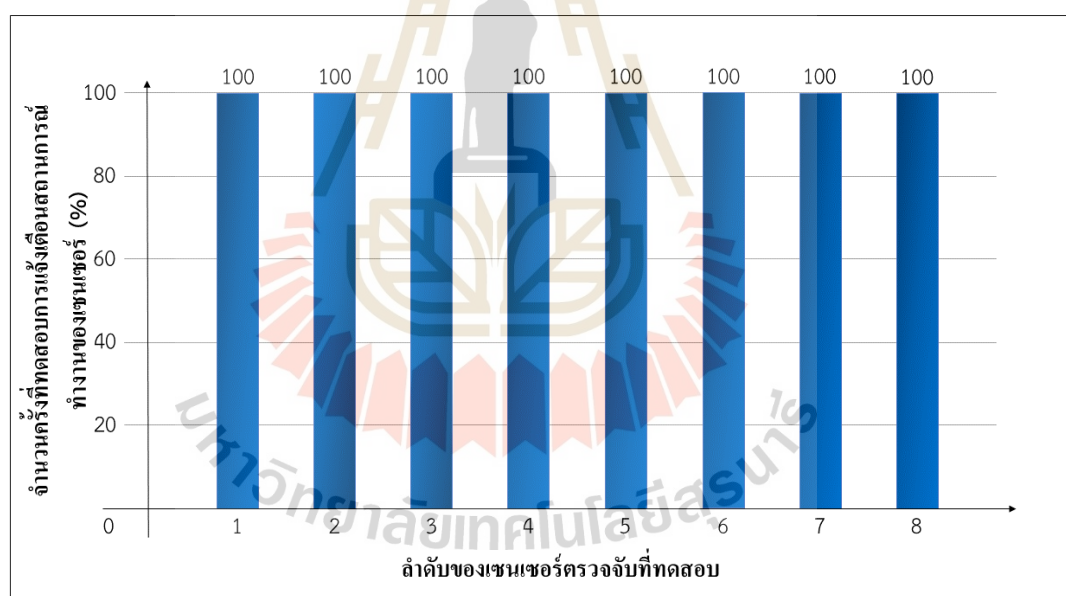


(ง) เซนเซอร์ ณ จุดที่ 4 เกิดความผิดพลาด

ตารางที่ 5.4 ผลการทดสอบระบบแจ้งเตือนสถานะการทำงานของเซนเซอร์ตรวจจับ (ต่อ)

ครั้งที่	ผลการแจ้งเตือนสถานะการทำงานของเซนเซอร์ตรวจจับ							
	1	2	3	4	5	6	7	8
29	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน
30	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน

จากตารางที่ 5.4 พบว่าระบบสามารถแจ้งเตือนความผิดปกติในการทำงานของเซนเซอร์ตรวจจับได้อย่างมีประสิทธิภาพ 100% และไม่มีความผิดพลาดเกิดระหว่างที่ระบบทำงาน ซึ่งสามารถสรุปผลการทดสอบระบบเป็นกราฟ แสดงดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 สรุปผลการทดสอบระบบแจ้งเตือนสถานะการทำงานของเซนเซอร์ตรวจจับ

5.2.3 การทดสอบระบบแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบ ณ สถานีผู้โดยสาร

การทดสอบในส่วนนี้ได้แบ่งการทดสอบย่อยออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ กรณีที่ระบบ APM ทำงานในโหมดการควบคุมแบบทดสอบการขับเคลื่อน และโหมดการควบคุมการเดินรถแบบฉุกเฉินป้องกันการชนสิ่งกีดขวาง ซึ่งเมื่อเกิดกรณีใดกรณีหนึ่งขึ้นจอ HMI จะเปลี่ยนการแสดงผลจากหน้าจอการทำงานใด ๆ เป็นหน้าจอแจ้งเตือน แสดงดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 การแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบ ณ สถานีผู้โดยสาร

1) กรณีที่ระบบ APM ทำงานในโหมดการควบคุมแบบทดสอบการขับเคลื่อน การทดสอบในกรณีที่ระบบ APM เข้าสู่โหมดทดสอบการขับเคลื่อนของรถได้ทำการจำลองการส่งสัญญาณสำหรับแจ้งเตือนการเข้าสู่โหมดนี้ไปยังระบบทั้งหมด 30 ครั้ง เพื่อทดสอบผลที่หน้าจอ HMI แสดงผลว่ามีลักษณะดังที่ออกแบบไว้หรือไม่ แสดงดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบระบบแจ้งเตือนโหมดการควบคุมแบบทดสอบการขับเคลื่อน

ครั้งที่	ผลการแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบ ณ สถานีผู้โดยสาร	
	สถานีผู้โดยสารที่ 1	สถานีผู้โดยสารที่ 2
1	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ
2	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ
3	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ
4	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ
5	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ
6	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ
7	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ
8	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ
9	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ
10	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ
11	แจ้งเตือนความผิดปกติ	ไม่แจ้งเตือนความผิดปกติ
12	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ
13	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ
14	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ

ตารางที่ 5.5 ผลการทดสอบระบบแจ้งเตือน โหมดการควบคุมแบบทดสอบการขับเคลื่อน (ต่อ)

ครั้งที่	ผลการแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบ ณ สถานีผู้โดยสาร	
	สถานีผู้โดยสารที่ 1	สถานีผู้โดยสารที่ 2
15	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ
16	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ
17	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ
18	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ
19	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ
20	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ
21	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ
22	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ
23	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ
24	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ
25	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ
26	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ
27	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ
28	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ
29	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ
30	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ

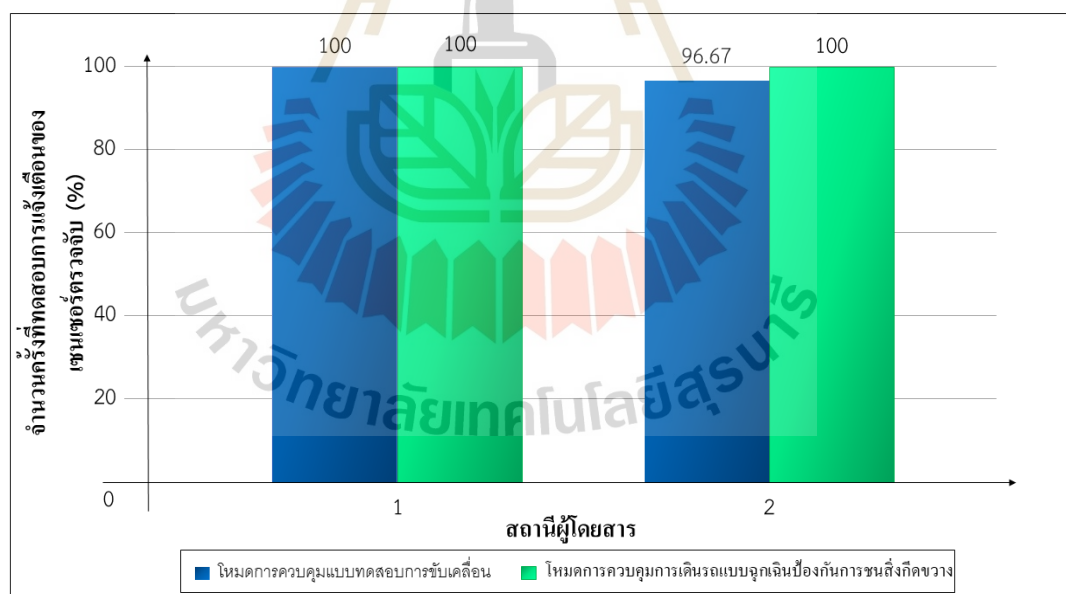
จากตารางที่ 5.5 พบว่าผลการแจ้งเตือนความผิดปกติในกรณีที่ระบบ APM ทำงานใน โหมดการควบคุมแบบทดสอบนั้นสามารถทำงานได้ 96.67% ของการทดสอบทั้งหมด ซึ่งมีบางครั้งที่ระบบไม่ตอบสนองต่อสัญญาณแจ้งเตือนที่ได้รับจากระบบ อย่างไรก็ตามการทำงานของระบบยังถือว่าได้ผลที่อยู่ในเกณฑ์น่าพอใจและสามารถนำการทำงานในส่วนนี้ไปต่อยอดสำหรับใช้งานจริงในอนาคตได้

2) กรณีที่ระบบ APM ทำงานในโหมดการควบคุมการเดินรถแบบฉุกเฉินป้องกันการชนสิ่งกีดขวาง การทดสอบระบบในกรณีนี้จะดำเนินการในลักษณะเดียวกับการทดสอบในโหมดทดสอบการขับเคลื่อนของรถ โดยในที่นี้ได้จำลองการส่งสัญญาณแจ้งเตือนการเข้าสู่โหมดการควบคุมการเดินรถแบบฉุกเฉินป้องกันการชนสิ่งกีดขวางทั้งหมด 30 ครั้ง เพื่อตรวจสอบผลการตอบสนองของหน้าจอแสดงผลที่ติดตั้ง ณ สถานีผู้โดยสารทั้งสองแห่ง แสดงดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 ผลการทดสอบระบบแจ้งเตือน โหมดการควบคุมการเดินทางแบบฉุกเฉินป้องกันการชน
สิ่งกีดขวาง (ต่อ)

27	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ
28	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ
29	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ
30	แจ้งเตือนความผิดปกติ	แจ้งเตือนความผิดปกติ

จากตารางที่ 5.6 พบว่าการทดสอบผลการแจ้งเตือนความผิดปกติในกรณีในระบบ APM ทำงานในโหมดการควบคุมการเดินทางแบบฉุกเฉินป้องกันการชนสิ่งกีดขวาง ระบบจะสามารถตรวจสอบและแจ้งเตือนปัญหาที่เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นเดียวกับการแจ้งเตือนในโหมดการควบคุมแบบทดสอบการขับเคลื่อนที่ได้ทดสอบไปก่อนหน้านี้ ซึ่งเมื่อนำผลการทดสอบระบบแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบ ณ สถานีผู้โดยสารทั้งสองกรณีมาสรุปเปรียบเทียบกันในรูปแบบของกราฟ แสดงดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 สรุปผลการทดสอบระบบแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบ ณ สถานีผู้โดยสาร

จากการทดสอบการทำงานพื้นฐานของระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถสำหรับระบบ APM ทั้ง 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ ส่วนแจ้งเตือนสถานะการทำงานของเซนเซอร์ และส่วนแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบ ณ สถานีผู้โดยสาร พบว่าระบบ

สามารถดำเนินงานในแต่ละส่วนการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยอัตราส่วน 96.17% ของการทดสอบทั้งหมดและสอดคล้องกับรูปแบบการทำงานที่ได้ออกแบบไว้ทุกประการ เพียงแต่จะมีบางครั้งที่ระบบเกิดความผิดพลาดจากการที่อุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบที่อาจจะยังไม่ได้มีการติดตั้งที่แข็งแรงมากนัก ประกอบกับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เลือกมีคุณสมบัติการทำงานที่สูงไม่เพียงพอต่อความต้องการการตอบสนองในขณะที่ระบบกำลังทำงาน อย่างไรก็ตามปัญหานี้สามารถแก้ไขโดยการเปลี่ยนอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้และปรับปรุงโครงสร้างบางส่วนจากระบบ

5.3 การทดสอบชุดจำลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถสำหรับระบบ APM

การทดสอบชุดจำลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถในส่วนนี้ได้แบ่งออกเป็น 3 การทดสอบ ได้แก่

- การทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่ความเร็วอ้างอิงต่าง ๆ
- การทดสอบโหมดการควบคุมการเดินรถ
- การทดสอบแสดงผลบนรถ

เพื่อตรวจสอบสมรรถนะภาพของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถในกรณีต่าง ๆ โดยการทดสอบนี้ได้กำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่จำเป็นในการควบคุมรถ ดังตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 เงื่อนไขของระบบทดสอบสำหรับการจำลองผล

หมวดหมู่	พารามิเตอร์	ข้อมูล
พารามิเตอร์ทางกล	1.จำนวนตู้โดยสาร 2.รูปแบบโครงสร้างการขับเคลื่อน 3.ขนาดโครงสร้างรถ (กว้าง × ยาว × สูง) 4.น้ำหนักรถ - รถเปล่า - โหลด 5.รูปแบบการเบรกรถ	1 ตู้ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส ขับเคลื่อนสี่ล้อ 4 เส้น 0.45 × 0.55 × 0.3 เมตร 10 กิโลกรัม 1 2.5 และ 5 กิโลกรัม เบรกด้วยโมเมนต์ความเฉื่อย
พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์	1.แรงดันไฟฟ้า 2.กระแสไฟฟ้า 3.กำลังไฟฟ้า 4.ความถี่ทำงาน	3 เฟส 200-240 โวลต์ 50/60 เฮิรตซ์ 0.1-4 แอมป์ 0.1-3.7 กิโลวัตต์ 0.1-400 เฮิรตซ์

ตารางที่ 5.7 เงื่อนไขของระบบทดสอบสำหรับการจำลองผล (ต่อ)

หมวดหมู่	พารามิเตอร์	ข้อมูล
พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้า	1.แรงดันไฟฟ้า 2.กระแสไฟฟ้า 3.กำลังไฟฟ้า 4.ความถี่ทำงาน	3 เฟส 4 โพล 220/380-440 โวลต์ 3.14 แอมป์ 0.75 กิโลวัตต์ 50/60 เฮิร์ตซ์
พารามิเตอร์การเคลื่อนที่	1.ความเร็วบริการสูงสุด 2.อัตราเร่ง 3.อัตราหน่วง 4.ระยะการเคลื่อนที่ 5.องศาความลาดชันของทางวิ่ง	5.86 เมตร/วินาที 1 เมตร/วินาที ² 1 เมตร/วินาที ² 7.5 เมตร 0 องศา

5.3.1 การทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่ความเร็วอ้างอิง

การควบคุมรถในแบบจำลองนี้ใช้รูปแบบการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสด้วยวิธีโวลต์/เฮิร์ตซ์แบบวงเปิด ในที่นี้ได้ทำการทดสอบการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเป็น 2 การทดสอบ ได้แก่ การทดสอบขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้าไม่มีโหลด และการทดสอบขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้ามีโหลด ซึ่งได้ผลการทดสอบดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) การทดสอบขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้าไม่มีโหลด การทดสอบกรณีนี้ได้ทำการยกตัวรถขึ้นสูงจากพื้นเล็กน้อยและตั้งควบคุมความเร็วบริการสูงสุดของมอเตอร์ไฟฟ้าให้มีค่าตั้งแต่ 1-5 เมตรต่อวินาที เป็นเวลา 15 วินาที เพื่อทดสอบการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าในสภาวะไร้โหลด แสดงดังตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.8 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าขณะไม่มีโหลด

ความเร็วอ้างอิง (m/s)	ความถี่ทำงาน (Hz)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (kW)	พลังงานไฟฟ้า (kWh)
1	8.79	148.25	3.03	0.3112	0.0013
2	22.16	254.81	2.26	0.3814	0.0016
3	34.31	327.79	2.21	0.4709	0.0019
4	40.56	367.13	2.21	0.5106	0.0021
5	42.45	379.91	2.21	0.5308	0.0021

จากตารางที่ 5.8 เมื่อนำมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้ขับเคลื่อนรถในระบบ APM มาทดสอบการควบคุมความเร็วในสถานะที่ไม่มีโหลดนั้น พบว่าการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าด้วยวิธีโวลต์/เฮิร์ตซ์สามารถควบคุมความเร็วรถได้อย่างแม่นยำ โดยที่ค่าแรงดันไฟฟ้ากับค่าความถี่ทำงาน (อัตราส่วนแรงดันต่อความถี่) และค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าจะมีค่าแปรผันดังทฤษฎีที่ได้กล่าวเอาไว้ในหัวข้อที่ 3.3.1

2) การทดสอบขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้ามีโหลด การทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าในสถานะที่มีโหลดภายนอกนี้ ได้ทำการนำวัตถุสำหรับถ่วงน้ำหนัก 3 ขนาด คือ 0 (ไม่มีโหลดภายนอก) 2.5 และ 5 กิโลกรัม มาจำลองการบรรทุกผู้โดยสาร จากนั้นจึงส่งควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าให้มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 3 เมตร/วินาที เป็นเวลาทั้งหมด 15 วินาที เพื่อทำการตรวจสอบประสิทธิภาพในการทำงานของระบบ และทำการวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่าง ๆ ขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้าทำงานภายใต้เงื่อนไขการทดสอบ แสดงดังตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.9 ผลการทดสอบมอเตอร์ไฟฟ้าขณะมีโหลด

โหลด (kg)	ความเร็ว (m/s)	ความถี่ทำงาน (Hz)	แรงดัน (V)	กระแส (A)	กำลัง (kW)	พลังงาน (kWh)
ไม่มีโหลด	1	7.94	142.87	2.99	0.5919	0.0024
	1.5	11.90	174.86	2.89	0.7002	0.0029
	2	15.83	207.14	2.53	0.7262	0.0030
	2.5	19.84	237.94	2.36	0.7781	0.0032
	3	23.81	264.82	2.26	0.8465	0.0035
2.5	1	7.87	142.26	3.06	0.6032	0.0025
	1.5	11.87	175.91	2.76	0.6727	0.0028
	2	15.82	208.43	2.55	0.7365	0.0031
	2.5	19.89	238.01	2.37	0.7816	0.0033
	3	23.82	265.61	2.24	0.8244	0.0034
5	1	7.85	142.62	3.07	0.6067	0.0025
	1.5	11.91	177.47	2.59	0.6369	0.0027
	2	15.84	208.96	2.48	0.7181	0.0030
	2.5	19.86	238.81	2.39	0.7909	0.0033
	3	23.80	265.81	2.21	0.8139	0.0034

จากตารางที่ 5.9 การควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าในกรณีที่มีภาระโหลดจะมีลักษณะการทำงานที่คล้ายคลึงกับการควบคุมความเร็วในกรณีที่ไม่มีภาระโหลดภายนอก ซึ่งการทดสอบจะสามารถควบคุมความเร็วของรถได้ในค่าที่คลาดเคลื่อนจากความเร็วที่ต้องการเล็กน้อย เนื่องจากระบบในส่วนนี้ใช้การควบคุมในลักษณะที่เป็นแบบวงเปิด ซึ่งไม่มีการป้อนค่าความเร็วกลับไปตรวจสอบและปรับปรุงการทำงานของระบบ จึงทำให้เมื่อมีโหลดหรือปัจจัยภายนอกเข้ามา ระบบนั้นก็อาจส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนต่าง ๆ ตามมาได้ อย่างไรก็ตามการทดสอบในส่วนนี้สนใจเพียงผลตอบสนองการทำงานของระบบว่าสามารถดำเนินการควบคุมความเร็วของรถให้มีรูปแบบดังที่ออกแบบไว้หรือไม่ ผลที่แสดงในตารางข้างต้นจึงมีเพียงค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบควบคุมการวิ่งของรถในแต่ละช่วงความเร็วเท่านั้น โดยผลของค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่ได้จะมีค่าแปรผันตรงกับค่าความเร็วรถและโหลดภายนอกที่มีขนาดเปลี่ยนแปลงไป

5.3.2 การทดสอบโหมดการควบคุมการเดินรถ

ในส่วนนี้ได้แบ่งการทดสอบระบบออกเป็น 5 ส่วน ตามโหมดควบคุมการเดินรถที่ได้ออกแบบไว้ ประกอบด้วย โหมดการควบคุมการเดินรถแบบอัตโนมัติ โหมดการควบคุมการเดินรถแบบปุ่มคำสั่งที่สถานีผู้โดยสาร โหมดการควบคุมการเดินรถแบบทดสอบการขับเคลื่อน โหมดการควบคุมการเดินรถแบบฉุกเฉินป้องกันการชนสิ่งกีดขวาง และโหมดการหยุดรถแบบฉุกเฉิน ซึ่งมีรายละเอียดผลการทดสอบดังต่อไปนี้

1) การทดสอบโหมดการควบคุมการเดินรถแบบอัตโนมัติ ส่วนควบคุมการวิ่งแบบอัตโนมัติเป็นระบบที่มีการทำงานร่วมกับระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถสำหรับระบบ APM ซึ่งมีเซนเซอร์ตรวจจับระยะตำแหน่งที่ระบบต้องมีการปรับควบคุมความเร็วของรถให้มีความสอดคล้องกับโครงร่างความเร็วที่ได้กำหนดไว้ว่าจุดใดควรเร่งความเร็ว ลดความเร็ว หรือหยุดการเคลื่อนที่ของรถ เพื่อให้รถสามารถรับ/ส่งผู้โดยสารระหว่างสถานีผู้โดยสารได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับระยะทางการวิ่งจริงของรถให้มากที่สุด โดยการทดสอบนี้ได้จำลองการควบคุมรถให้มีการเคลื่อนที่ไป-กลับระหว่างสถานีผู้โดยสาร 2 สถานี ด้วยความเร็วบริการสูงสุดตั้งแต่ 1-3 เมตร/วินาที เพื่อหาความเร็วบริการสูงสุดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดสอบโหมดการควบคุมการเดินรถแบบอัตโนมัติ แสดงดังตารางที่ 5.10

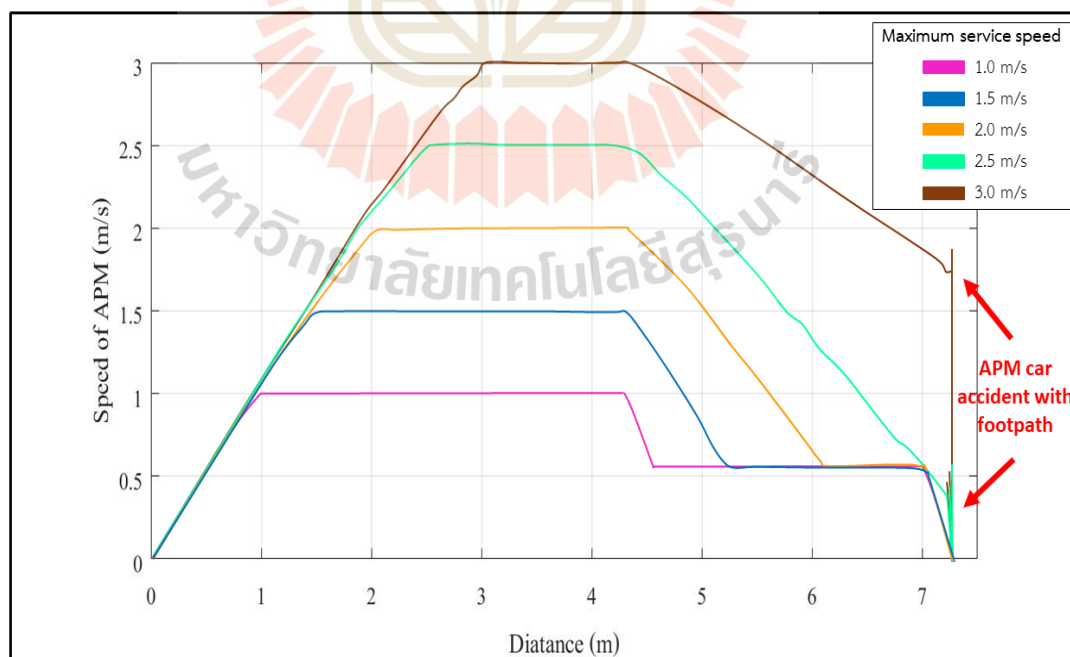
ตารางที่ 5.10 ผลการทดสอบควบคุมรถที่ความเร็วบริการสูงสุดต่าง ๆ

ความเร็วบริการสูงสุด	ตำแหน่งที่ระบบทำการเปลี่ยนรูปแบบการเคลื่อนที่ (m)				
	เร่งความเร็ว	คงความเร็ว 1	ลดความเร็ว	คงความเร็ว 2	เบรก
1.0	0.00	1.01	4.22	4.49	7.13
1.5	0.00	1.49	4.23	5.22	7.12

ตารางที่ 5.10 ผลการทดสอบควบคุมรถที่ความเร็วบริการสูงสุดต่าง ๆ (ต่อ)

ความเร็ว บริการสูงสุด	ตำแหน่งที่ระบบทำการเปลี่ยนรูปแบบการเคลื่อนที่ (m)				
	เร่งความเร็ว	คงความเร็ว 1	ลดความเร็ว	คงความเร็ว 2	เบรก
2.0	0.00	1.99	4.22	6.09	7.12
2.5	0.00	2.50	4.23	7.21	-
3.0	0.00	3.01	4.22	-	-

จากตารางที่ 5.10 เมื่อทำการควบคุมรถให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วบริการสูงสุดตั้งแต่ 1.0-3.0 เมตร/วินาที พบว่าที่ความเร็วบริการสูงสุด 2.0 เมตร/วินาที เป็นช่วงความเร็วที่เหมาะสมที่สุดสำหรับทดสอบการทำงานของชุดจำลองระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM เนื่องจากทางวิ่งที่สร้างขึ้นมีความยาวที่ไม่มากนัก หากรถวิ่งด้วยความเร็วที่เกินกว่า 2.0 เมตร/วินาที จะทำให้รถไม่สามารถคุมการทำงานได้อย่างเต็มที่และมีการวิ่งชนกับขอบทางวิ่งทุกครั้งที่มีการเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสาร แสดงดังรูปที่ 5.7 ดังนั้นการทดลองตั้งแต่นี้จะใช้ความเร็วบริการสูงสุดที่ 2.0 เมตร/วินาที โดยที่การทดสอบโหมดการควบคุมการเดินรถแบบอัตโนมัติก็เช่นเดียวกัน แสดงดังตารางที่ 5.11



รูปที่ 5.7 โครงร่างความเร็ว ณ ความเร็วบริการสูงสุดที่ 1.0-3.0 m/s

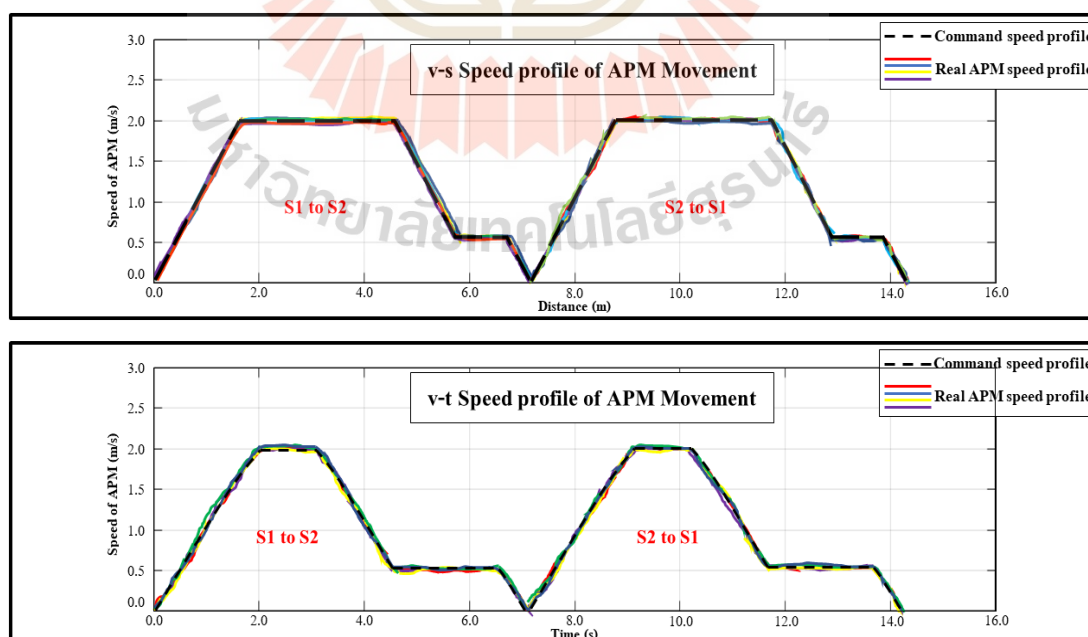
ตารางที่ 5.11 ผลการทดสอบ โหมตการควบคุมการเดินรถแบบอัตโนมัติ

รอบ ที่	ตำแหน่งที่ระบบทำการเปลี่ยนรูปแบบการเคลื่อนที่ (m)					สถานะการ ทำงาน
	เร่งความเร็ว	คงความเร็ว 1	ลดความเร็ว	คงความเร็ว 2	เบรก	
1	0	1.99	4.22	6.09	7.12	ทำงานปกติ
2	0	2.01	4.23	6.09	7.12	ทำงานปกติ
3	0	2.01	4.22	6.10	7.12	ทำงานปกติ
4	0	2.00	4.23	6.09	7.13	ทำงานปกติ
5	0	2.00	4.24	6.09	7.12	ทำงานปกติ
6	0	2.00	4.22	6.09	7.12	ทำงานปกติ
7	0	2.02	4.21	6.09	7.12	ทำงานปกติ
8	0	2.00	4.22	6.11	7.11	ทำงานปกติ
9	0	2.03	4.22	6.09	7.12	ทำงานปกติ
10	0	2.00	4.22	6.09	7.12	ทำงานปกติ
11	0	2.00	4.22	6.09	7.12	ทำงานปกติ
12	0	2.00	4.23	6.09	7.14	ทำงานปกติ
13	0	1.99	4.22	6.09	7.12	ทำงานปกติ
14	0	1.99	4.22	6.08	7.12	ทำงานปกติ
15	0	1.98	4.22	6.09	7.12	ทำงานปกติ
16	0	2.01	4.21	6.09	7.12	ทำงานปกติ
17	0	2.00	4.22	6.08	7.12	ทำงานปกติ
18	0	2.02	4.22	6.08	7.13	ทำงานปกติ
19	0	2.01	4.22	6.09	7.12	ทำงานปกติ
20	0	2.01	4.24	6.09	7.12	ทำงานปกติ
21	0	2.01	4.22	6.10	7.12	ทำงานปกติ
22	0	2.00	4.24	6.09	7.11	ทำงานปกติ
23	0	2.00	4.22	6.11	7.12	ทำงานปกติ
24	0	2.00	4.22	6.09	7.12	ทำงานปกติ
25	0	2.03	4.21	6.09	7.12	ทำงานปกติ
26	0	2.01	4.20	6.09	7.12	ทำงานปกติ
27	0	2.00	4.22	6.09	7.12	ทำงานปกติ

ตารางที่ 5.11 ผลการทดสอบ โหมดการควบคุมการเดินรถแบบอัตโนมัติ (ต่อ)

รอบ ที่	ตำแหน่งที่ระบบทำการเปลี่ยนรูปแบบการเคลื่อนที่ (m)					สถานะการ ทำงาน
	เร่งความเร็ว	คงความเร็ว 1	ลดความเร็ว	คงความเร็ว 2	เบรก	
28	0	2.02	4.22	6.08	7.14	ทำงานปกติ
29	0	2.00	4.22	6.09	7.12	ทำงานปกติ
30	0	2.01	4.22	6.07	7.10	ทำงานปกติ
ช่วงตำแหน่งเฉลี่ยที่ระบบทำการเปลี่ยนการรูปแบบการเคลื่อนที่				เร่งความเร็ว	0.00 m	
				คงค่าความเร็ว 1	2.01 m	
				ลดความเร็ว	4.22 m	
				คงค่าความเร็ว 2	6.09 m	
				เบรก	7.12 m	

จากตารางที่ 5.11 พบว่าการทำงานของชุดจำลองระบบ APM ในโหมดการควบคุมการเดินรถแบบอัตโนมัติขณะที่รถไม่ได้บรรทุกโหลดภายนอกใด ๆ เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ 100% โดยในแต่ละรอบที่รถมีการเคลื่อนจากสถานีผู้โดยสารต้นทางถึงปลายทางจะใช้เวลาอยู่ที่ประมาณ 7.16 วินาที ในลักษณะที่สอดคล้องกับโครงร่างความเร็วที่ออกแบบ แสดงดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 โครงร่างความเร็วที่ได้จากการทดสอบโหมดการควบคุมการเดินรถแบบอัตโนมัติ

ดังรูปที่ 5.8 เมื่อทำการเปรียบเทียบกราฟความเร็วระหว่างค่าความเร็วจริงที่ได้จากการทดสอบระบบ APM ในโหมดการควบคุมการเดินรถแบบอัตโนมัติ ณ ความเร็วบริการสูงสุด 2 เมตร/วินาที กับค่าความเร็วที่ได้จากการคำนวณ โครงร่างความเร็ว ณ ความเร็วบริการสูงสุดเดียวกัน พบว่าแนวโน้มกราฟความเร็วทั้งสองส่วนจะมีลักษณะที่มีความสอดคล้องหรือใกล้เคียงกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าการควบคุมการเดินรถในโหมดนี้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพตามการออกแบบ

2) การทดสอบโหมดการควบคุมการเดินรถแบบปุ่มคำสั่งที่สถานีผู้โดยสาร การทำงานใน โหมดนี้เป็นรูปแบบการควบคุมรถแบบกึ่งอัตโนมัติ สำหรับออกแบบขึ้นมาเพื่อควบคุมการเดินรถในลักษณะที่คล้ายกับการทำงานของระบบลิฟท์ในช่วงเวลาที่มีผู้ใช้บริการระบบ APM น้อย ซึ่งช่วยในการลดพลังงานที่ต้องสูญเสียไปจากการวิ่งรถเที่ยวเปล่า การทดสอบใน โหมดการควบคุมการเดินรถแบบปุ่มคำสั่งที่สถานีผู้โดยสารนี้ได้จำลองการสั่งควบคุมการเคลื่อนที่ของระบบด้วยปุ่มคำสั่งที่ติดตั้งไว้ ณ สถานีผู้โดยสารและรถ แสดงดังรูปที่ 5.9 โดยการกดปุ่มทดสอบการควบคุมของรถดำเนินตามลำดับ จากเริ่มต้นกดปุ่มเรียกรถมาที่สถานีผู้โดยสารที่ 1 (ปุ่มเรียกรถ S1) → จากนั้นกดปุ่มสั่งให้รถเคลื่อนที่จากสถานีผู้โดยสารที่ 1 ไปยังสถานีผู้โดยสารที่ 2 (ปุ่มสั่งรถจาก S1 ไป S2) → ต่อมากดปุ่มสั่งให้รถเคลื่อนที่จากสถานีผู้โดยสารที่ 2 ไปยังสถานีผู้โดยสารที่ 1 (ปุ่มสั่งรถจาก S2 ไป S1) → และสุดท้ายกดปุ่มเรียกรถมาที่สถานีผู้โดยสารที่ 2 (ปุ่มเรียกรถ S1) เป็นอันเสร็จกระบวนการ ซึ่งได้ผลการทดสอบจากการทำแบบนี้ซ้ำทั้งหมด 30 ครั้ง แสดงดังตารางที่ 5.12



(ก) ปุ่มคำสั่งที่สถานีผู้โดยสาร

(ข) ปุ่มคำสั่งบนรถ

รูปที่ 5.9 ปุ่มคำสั่งสำหรับควบคุมการเดินรถจากสถานีผู้โดยสารและรถ

ตารางที่ 5.12 ผลการทดสอบ โหมตการควบคุมการเดินรถแบบปุ่มคำสั่งที่สถานีผู้โดยสาร

ครั้งที่	สถานะการทำงานของปุ่มคำสั่งสำหรับควบคุมการเดินรถ			
	ปุ่มเรียกรถ S1	ปุ่มสั่งรถจาก S1 ไป S2	ปุ่มสั่งรถจาก S2 ไป S1	ปุ่มเรียกรถ S2
1	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
2	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
3	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
4	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
5	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ต้องกดปุ่ม 2 ครั้ง	ทำงานปกติ
6	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
7	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
8	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
9	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
10	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
11	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
12	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
13	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
14	ทำงานปกติ	ต้องกดปุ่ม 2 ครั้ง	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
15	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
16	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
17	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
18	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
19	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
20	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
21	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
22	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
23	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
24	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ต้องกดปุ่ม 3 ครั้ง	ทำงานปกติ
25	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
26	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ

ตารางที่ 5.12 ผลการทดสอบ โหมดการควบคุมการเดินรถแบบปุ่มคำสั่งที่สถานีผู้โดยสาร (ต่อ)

ครั้งที่	สถานะการทำงานของปุ่มคำสั่งสำหรับควบคุมการเดินรถ			
	ปุ่มเรียกรถ S1	ปุ่มสั่งรถจาก S1 ไป S2	ปุ่มสั่งรถจาก S2 ไป S1	ปุ่มเรียกรถ S2
27	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
28	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
29	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
30	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ

จากตารางที่ 5.12 พบว่าการควบคุมรถแบบปุ่มคำสั่งที่สถานีผู้โดยสารสามารถควบคุมรถได้ด้วยประสิทธิภาพ 90% จึงมีในบางครั้งต้องมีการกดปุ่มควบคุมที่จอแสดงผลหลายรอบ รถจึงสามารถทำงานตามคำสั่งที่ผู้ควบคุมต้องการ ซึ่งมีสาเหตุมาจากจอแสดงผลที่ใช้ในระบบมีคุณสมบัติจำเพาะของการทำงานที่ต่ำเกิน จึงไม่สามารถตอบสนองต่อคำสั่งที่ได้รับมาในบางครั้ง

3) การทดสอบโหมดการควบคุมการเดินรถแบบทดสอบการขับเคลื่อน โหมดควบคุมนี้เป็นรูปแบบการควบคุมที่ออกแบบขึ้นมาสำหรับควบคุมการเดินรถด้วยการกดปุ่มคำสั่งที่ติดตั้ง ณ ศูนย์กลางควบคุมระบบ เพื่อสั่งให้รถเคลื่อนที่ไปข้างหน้าหรือข้างหลังแบบง่าย ๆ ตามที่เจ้าหน้าที่ควบคุมระบบต้องการ แสดงดังรูปที่ 5.10 ซึ่งระบบจะสั่งรถให้เคลื่อนที่เมื่อมีการกดปุ่มคำสั่ง แต่หากเลิกกดปุ่มคำสั่งรถก็จะหยุดการเคลื่อนที่ลงทันที การควบคุมในลักษณะนี้จึงสามารถควบคุมรถได้อย่างอิสระโดยไม่ต้องมีความเกี่ยวข้องกับโครงร่างความเร็วใด ๆ การทดสอบในโหมดนี้ได้ดำเนินการทั้งหมด 30 ครั้ง แสดงดังตารางที่ 5.13



รูปที่ 5.10 ปุ่มคำสั่งสำหรับควบคุมการเดินรถสำหรับโหมดทดสอบการขับเคลื่อน

ตารางที่ 5.13 ผลการทดสอบโหม้คการควบคุมการเดินรถแบบทดสอบการขับเคลื่อน

ครั้งที่	สถานะการทำงานของปั้มน้ำสำหรับควบคุมการเดินรถ	
	ปั้มน้ำ S1 to S2	ปั้มน้ำ S2 to S1
1	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
2	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
3	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
4	ทำงานปกติ	ต้องกดปั้มน้ำ 2 ครั้ง
5	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
6	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
7	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
8	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
9	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
10	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
11	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
12	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
13	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
14	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
15	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
16	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
17	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
18	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
19	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
20	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
21	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
22	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
23	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
24	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
25	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
26	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
27	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ

ตารางที่ 5.13 ผลการทดสอบโหมดการควบคุมการเดินรถแบบทดสอบการขับเคลื่อน

ครั้งที่	สถานะการทำงานของปุ่มคำสั่งสำหรับควบคุมการเดินรถ	
	ปุ่ม S1 to S2	ปุ่ม S2 to S1
28	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
29	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
30	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ

จากตารางที่ 5.13 พบว่าผลการทดสอบในโหมดนี้มีประสิทธิภาพในการทำงานอยู่ที่ประมาณ 96.67% ของการทดสอบทั้งหมด ซึ่งมีผลที่ใกล้เคียงกับผลของการทดสอบ โหมดการควบคุมการเดินรถแบบปุ่มคำสั่งที่สถานีผู้โดยสาร เนื่องจากโหมดนี้ต้องใช้การควบคุมการเคลื่อนที่ของรถด้วยจอ HMI จึงทำให้มีปัญหาในด้านการตอบสนองของระบบที่สั่งควบคุมผ่านจอ HMI

4) การทดสอบโหมดการควบคุมการเดินรถแบบฉุกเฉินป้องกันการชนสิ่งกีดขวาง การทดสอบโหมดนี้ได้จำลองสถานการณ์ที่รถกำลังเคลื่อนที่แล้วไปตรวจพบสิ่งกีดขวางบนทางวิ่ง ซึ่ง ณ ขณะนั้นรถอาจจะทำงานด้วยโหมดการควบคุมการเดินรถใด ๆ ก็ตาม เพื่อตรวจสอบผลการตอบสนองของระบบว่าสามารถหยุดการเคลื่อนที่ของรถก่อนที่จะมีการชนเข้ากับสิ่งกีดขวางและทำงานต่อในลักษณะที่ออกแบบไว้ได้หรือไม่ โดยการทำงานในโหมดนี้จะแบ่งออกเป็นทั้งหมด 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่สิ่งกีดขวางอยู่บนทางวิ่งเป็นเวลาน้อยกว่า 10 วินาที เป็นสถานการณ์ที่สิ่งกีดขวางปรากฏบนทางวิ่งเพียงชั่วคราว เช่น สุนัขวิ่งตัดหน้ารถ เป็นต้น เมื่อสิ่งกีดขวางเหล่านั้นเคลื่อนที่ออกจากแนววิ่งของรถก่อนระบบจะจับเวลาครบ 10 วินาที รถจะเริ่มเคลื่อนที่ต่อไปยังสถานีผู้โดยสารปลายทางเดิมตามเป้าหมายอีกครั้งด้วยความเร็ว 2 เมตร/วินาที เพื่อเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสารนั้น จนกว่าจะมีคำสั่งถัดไปจากศูนย์กลางควบคุมระบบ และกรณีที่สิ่งกีดขวางอยู่บนทางวิ่งเป็นเวลามากกว่า 10 วินาที เป็นสถานการณ์ที่สิ่งกีดขวางไปปรากฏบนทางวิ่งในระยะเวลาที่นาน เช่น ต้นไม้หักโค่นใส่ทางวิ่งของรถ เป็นต้น เมื่อระบบจับเวลาการตรวจพบสิ่งกีดขวางครบ 10 วินาที รถจะเริ่มเคลื่อนที่กลับไปยังสถานีผู้โดยสารต้นทางด้วยความเร็ว 2 เมตร/วินาที แล้วจอดรอคำสั่งถัดไปจากศูนย์กลางควบคุมระบบ สำหรับการทดสอบการทำงานในโหมดนี้ได้กำหนดให้ในตอนต้นรถทำงานด้วยโหมดการควบคุมการเดินรถแบบอัตโนมัติและโหมดการควบคุมการเดินรถแบบปุ่มคำสั่งที่สถานีผู้โดยสารจากนั้นจึงนำสิ่งกีดขวางไปวางบนทางวิ่งที่รถกำลังเคลื่อนที่ในระยะห่าง 1 เมตร เพื่อทำการตรวจสอบผลการเปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นโหมดการควบคุมการเดินรถแบบฉุกเฉินป้องกันการชนสิ่งกีดขวาง ทั้งหมด 15 ครั้งต่อโหมด ซึ่งสามารถแสดงผลการทดสอบการทำงานของระบบ แสดงดังตารางที่ 5.14

ตารางที่ 5.14 ผลการทดสอบ โหมตการควบคุมการเดินรถแบบฉุกเฉินป้องกันการชนสิ่งกีดขวาง

ครั้งที่	โหมตทำงานก่อน เข้าสู่โหมตควบคุม ฉุกเฉินฯ	สถานะการตรวจจับวัตถุบนทางวิ่งขณะรถกำลังเคลื่อนที่			
		กรณีที่สิ่งกีดขวางอยู่บนทาง วิ่งเป็นเวลาน้อยกว่า 10 วินาที		กรณีที่สิ่งกีดขวางอยู่บนทาง วิ่งเป็นเวลามากกว่า 10 วินาที	
		เซนเซอร์ S1 to S2 (หน้า)	เซนเซอร์ S2 to S1 (หลัง)	เซนเซอร์ S1 to S2 (หน้า)	เซนเซอร์ S2 to S1 (หลัง)
1	โหมตการควบคุม การเดินรถแบบ อัตโนมัติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
2		ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
3		ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
4		ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
5		ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
6		ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
7		ทำงานปกติ	ไม่ทำงาน	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
8		ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
9		ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
10		ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
11		ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
12		ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
13		ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
14		ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
15		ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
16	โหมตการควบคุม การเดินรถแบบปุ่ม คำสั่งที่สถานี ผู้โดยสาร	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
17		ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
18		ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
19		ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
20		ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ไม่ทำงาน
21		ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
22		ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
23		ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
24		ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ

ตารางที่ 5.14 ผลการทดสอบ โหมตการควบคุมการเดินรถแบบฉุกเฉินป้องกันการชนสิ่งกีดขวาง
(ต่อ)

ครั้งที่	โหมตทำงานก่อน เข้าสู่โหมตควบคุม ฉุกเฉินฯ	สถานะการตรวจจับวัตถุบนทางวิ่งขณะรถกำลังเคลื่อนที่			
		กรณีที่สิ่งกีดขวางอยู่บนทาง วิ่งเป็นเวลาน้อยกว่า 10 วินาที		กรณีที่สิ่งกีดขวางอยู่บนทาง วิ่งเป็นเวลามากกว่า 10 วินาที	
		เซนเซอร์ S1 to S2 (หน้า)	เซนเซอร์ S2 to S1 (หลัง)	เซนเซอร์ S1 to S2 (หน้า)	เซนเซอร์ S2 to S1 (หลัง)
25	โหมตการควบคุม	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
26	การเดินรถแบบปุ่ม	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
27	คำสั่งที่สถานี	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
28	ผู้โดยสาร	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
29	(ต่อ)	ทำงานปกติ	ไม่ทำงาน	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
30		ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ

จากตารางที่ 5.14 พบว่าโหมตการควบคุมการเดินรถแบบฉุกเฉินป้องกันการชนสิ่งกีดขวางสามารถตอบสนองต่อสิ่งกีดขวางที่ตรวจพบได้ในทันที คิดเป็น 93.33% ของการทดสอบทั้งหมด โดยระบบจะส่งสัญญาณแจ้งเตือนและหยุดการทำงานของระบบตามเงื่อนไขการทำงานที่ได้ออกแบบเอาไว้ แต่ยังมีบางครั้งที่รถยังเคลื่อนที่ต่อด้วยโมเมนต์ความเฉื่อยที่สะสมอยู่ในรถเล็กน้อย จนทำให้เกิดการชนกันระหว่างสิ่งกีดขวางกับรถประมาณ 6.67% ของการทดสอบ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ระบบชุดจำลองระบบ APM ที่สร้างขึ้น ใช้รูปแบบการเบรกด้วยวิธีตัดไฟเลี้ยงที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสเท่านั้น สำหรับการแก้ปัญหานี้อาจจะต้องมีการติดตั้งระบบเบรกอื่น ๆ เช่น เบรกทางกล เบรกทางไฟฟ้า เป็นต้น เข้ามาช่วยในการหยุดการเคลื่อนที่ของรถให้อยู่ในระบะยะที่ต้องการ

5) การทดสอบโหมตการหยุดรถแบบฉุกเฉิน การทดสอบในโหมตนี้ได้ทำการสั่งหยุดการเคลื่อนที่ของรถที่กำลังวิ่งด้วยโหมตการควบคุมการเดินรถแบบอัตโนมัติ โหมตการควบคุมการเดินรถแบบปุ่มคำสั่งที่สถานีผู้โดยสาร และโหมตการควบคุมการเดินรถแบบทดสอบการจับเคลื่อน โดยโหมตนี้จะทำงานจากการกดปุ่มคำสั่ง “Stop APM Movement” ที่อยู่บนหน้าจอควบคุมโหมตการเคลื่อนที่ของรถ ณ ศูนย์กลางควบคุมระบบ ซึ่งเป็นการหยุดรถด้วยวิธีปลดปุ่มคำสั่งโหมตการควบคุมการเดินรถอื่น ๆ ทำให้ PLC ไม่สามารถสั่งควบคุมรถในเคลื่อนที่ได้ในช่วงขณะ แสดงดังตารางที่ 5.15

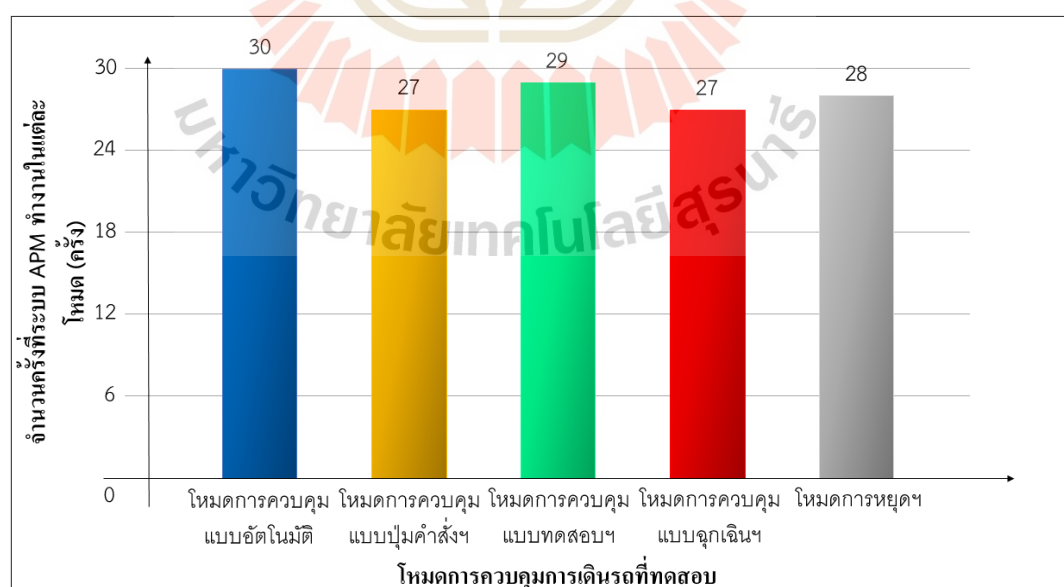
ตารางที่ 5.15 ผลการทดสอบ โหมตการหยุดรถแบบฉุกเฉิน

ครั้งที่	การทำงานของโหมตการหยุดรถแบบฉุกเฉินในการหยุดการโหมตต่าง ๆ		
	โหมตการควบคุมการเดินรถแบบอัตโนมัติ	โหมตการควบคุมการเดินรถแบบปุ่มคำสั่งที่สถานีผู้โดยสาร	โหมตการควบคุมการเดินรถแบบทดสอบการขับเคลื่อน
1	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
2	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
3	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
4	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
5	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
6	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
7	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
8	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
9	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
10	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
11	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
12	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
13	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
14	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
15	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
16	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ไม่ทำงาน
17	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
18	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
19	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
20	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
21	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
22	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
23	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
24	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
25	ทำงานปกติ	ไม่ทำงาน	ทำงานปกติ

ตารางที่ 5.15 ผลการทดสอบโหมตการหยุดรถแบบฉุกเฉิน (ต่อ)

ครั้งที่	การทำงานของโหมตการหยุดรถแบบฉุกเฉินในการหยุดการโหมตต่าง ๆ		
	โหมตการควบคุมการเดินรถแบบอัตโนมัติ	โหมตการควบคุมการเดินรถแบบปุ่มคำสั่งที่สถานีผู้โดยสาร	โหมตการควบคุมการเดินรถแบบทดสอบการขับเคลื่อน
26	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
27	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
28	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
29	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
30	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ

จากตารางที่ 5.15 พบว่าโหมตการหยุดรถแบบฉุกเฉินที่ได้ออกแบบขึ้นมาสามารถสั่งหยุดรถที่ทำงานในโหมตต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพในอัตราส่วน 96.67% แต่การหยุดของรถในลักษณะนี้ยังมีโมเมนต์ความเฉื่อยสะสมภายในรถเช่นกัน จึงควรมีการติดตั้งเบรกภายนอกเข้ามาช่วยในหยุดรถเพื่อให้การทำงานของโหมตนี้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น จากการทดสอบโหมตการควบคุมการเดินรถทั้ง 5 โหมต สามารถสรุปผลการทำงานเป็นกราฟ แสดงดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 สรุปผลการทดสอบโหมตการควบคุมการเดินรถของชุดจำลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ

ตารางที่ 5.16 ผลการทดสอบหน้าจอแสดงการเคลื่อนที่ของรถระหว่างสถานีผู้โดยสาร (ต่อ)

ครั้งที่	ระบบที่การทดสอบ	ผลการตรวจจับตำแหน่งรถในแต่ละจุด							
		1	2	3	4	5	6	7	8
28	จอแสดงผลบนรถ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ
	ระบบตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ
29	จอแสดงผลบนรถ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ
	ระบบตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ
30	จอแสดงผลบนรถ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ
	ระบบตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ	พบ

จากตารางที่ 5.16 พบว่าจอแสดงการเคลื่อนที่ของรถระหว่างสถานีผู้โดยสารที่ติดตั้งบนรถสามารถทำงานได้สอดคล้องกับระบบตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถที่ถูกออกแบบให้มีหน้าที่ในการทำงานที่ใกล้เคียงกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าหน้าจอแสดงการเคลื่อนที่ของรถระหว่างสถานีผู้โดยสารที่พัฒนาขึ้นมีสมรรถนะในการทำงานคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ 100% จากการทดสอบทั้งหมด 30 ครั้ง แต่ยังมีบางครั้งที่หน้าจอแสดงผลเกิดการกระพริบและสลับหน้าจอแสดงผลไปยังหน้าอื่นเป็นระยะ ๆ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการที่จอแสดงผลอาจจะได้รับสัญญาณรบกวนบางประการหรือความไม่ต่อเนื่องในการรับ/ส่งสัญญาณระหว่างอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในชุดจำลองระบบ APM ที่พัฒนาขึ้น

2) การทดสอบหน้าจอแสดงการเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสารแต่ละสถานีการทดสอบหน้าจอแสดงการเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสารแต่ละสถานีนี้ ได้ทำการจำลองส่งสัญญาณชนิดเดียวกับสัญญาณระบุตำแหน่งรถที่เข้าจอด ณ สถานีผู้โดยสารที่ 1 และ 2 ในขณะที่รถทำงานด้วยโหมดการควบคุมการเดินรถแบบอัตโนมัติ เพื่อตรวจสอบผลการตอบสนองของหน้าจอแสดงผลที่ติดตั้งบนรถว่าสามารถทำงานตามที่ออกแบบหรือไม่ แสดงดังตารางที่ 5.17

ตารางที่ 5.17 ผลการทดสอบหน้าจอแสดงการเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสารแต่ละสถานี

ครั้งที่	ผลการทดสอบหน้าจอแสดงการเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสารแต่ละสถานี	
	รถเข้าจอด ณ สถานีผู้โดยสารที่ 1	รถเข้าจอด ณ สถานีผู้โดยสารที่ 2
1	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
2	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
3	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ

ตารางที่ 5.17 ผลการทดสอบหน้าจอดีแสดงการเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสารแต่ละสถานี (ต่อ)

ครั้งที่	ผลการทดสอบหน้าจอดีแสดงการเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสารแต่ละสถานี	
	รถเข้าจอด ณ สถานีผู้โดยสารที่ 1	รถเข้าจอด ณ สถานีผู้โดยสารที่ 2
4	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
5	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
6	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
7	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
8	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
9	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
10	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
11	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
12	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
13	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
14	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
15	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
16	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
17	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
18	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
19	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
20	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
21	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
22	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
23	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
24	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
25	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
26	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
27	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
28	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
29	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
30	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ

จากตารางที่ 5.17 พบว่าหน้าจอบันทึกการเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสารแต่ละสถานีสามารถทำงานได้ 100% แต่จะพบปัญหาเกี่ยวกับการทดสอบหน้าจอบันทึกผลการเคลื่อนที่ของรถระหว่างสถานีผู้โดยสาร ซึ่งจะมีการกระพริบหรือสลับหน้าจอบันทึกผลของจอดแสดงผลบนรถ

3) การทดสอบหน้าจอบันทึกคำสั่งควบคุมรถให้เคลื่อนที่ระหว่างสถานีผู้โดยสาร การทดสอบหน้าจอบันทึกคำสั่งควบคุมรถให้เคลื่อนที่ระหว่างสถานีผู้โดยสารแต่ละสถานี เป็นหน้าจอบันทึกที่ปรากฏในกรณีที่รถทำงานในโหมดการควบคุมการเดินรถแบบปุ่มคำสั่งที่สถานีผู้โดยสาร โดยในที่นี่จะทดสอบจอดแสดงผลด้วยวิธีเดียวกันกับการทดสอบหน้าจอบันทึกการเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสารแต่ละสถานี แต่ใช้สัญญาณสำหรับการทดสอบที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 5.18

ตารางที่ 5.18 ผลการทดสอบหน้าจอบันทึกคำสั่งควบคุมรถให้เคลื่อนที่ระหว่างสถานีผู้โดยสาร

ครั้งที่	ผลการทดสอบหน้าจอบันทึกคำสั่งควบคุมรถให้เคลื่อนที่ระหว่างสถานีผู้โดยสาร	
	รถจอด ณ สถานีผู้โดยสารที่ 1	รถจอด ณ สถานีผู้โดยสารที่ 2
1	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
2	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
3	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
4	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
5	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
6	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
7	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
8	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
9	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
10	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
11	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
12	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
13	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
14	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
15	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
16	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
17	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ

ตารางที่ 5.18 ผลการทดสอบหน้าจอดแสดงปุ่มคำสั่งควบคุมรถให้เคลื่อนที่ระหว่างสถานีผู้โดยสาร
(ต่อ)

ครั้งที่	ผลการทดสอบหน้าจอดแสดงปุ่มคำสั่งควบคุมรถให้เคลื่อนที่ระหว่างสถานีผู้โดยสาร	
	รถจอด ณ สถานีผู้โดยสารที่ 1	รถจอด ณ สถานีผู้โดยสารที่ 2
18	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
19	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
20	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
21	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
22	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
23	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
24	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
25	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
26	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
27	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
28	ทำงานปกติ	ไม่ทำงาน
29	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
30	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ

จากตารางที่ 5.18 พบว่าหน้าจอดแสดงปุ่มคำสั่งควบคุมรถให้เคลื่อนที่ระหว่างสถานีผู้โดยสารจะปรากฏขึ้นมาเกือบทุกครั้งที่ได้รับสัญญาณคำสั่งจากระบบคิดเป็น 96.67% จากการทดสอบทั้งหมด 30 ครั้ง โดยที่หน้าจอดนี้จะเกิดการกระพริบหรือสลัดหน้าจอไปมาเพียงไม่กี่ครั้งเมื่อเทียบกับหน้าจออื่น ๆ ที่ได้ทดสอบมาก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตามการกระพริบหรือสลัดหน้าจอของจอแสดงผลในส่วนนี้แทบไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของรถในโหมดการควบคุมการเดินรถแบบปุ่มคำสั่งที่สถานีผู้โดยสาร

4) การทดสอบหน้าจอดแสดงการขับเคลื่อนรถด้วยคำสั่ง ณ ศูนย์กลางควบคุมระบบการทดสอบหน้าจอดแสดงสถานะขณะที่รถเคลื่อนที่ด้วยคำสั่ง ณ ศูนย์กลางควบคุมระบบนี้ได้จำลองการสั่งควบคุมการทำงานของรถด้วยโหมดการควบคุมการเดินรถแบบทดสอบการขับเคลื่อนจากการส่งสัญญาณที่มีลักษณะเดียวกับการทำงานจริงให้กับชุดจำลอง เพื่อตรวจสอบผลการตอบสนองของหน้าจอดว่าจะสามารถแสดงผลการตอบสนองตามที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่ แสดงดังตารางที่

ตารางที่ 5.19 ผลการทดสอบหน้าจอแสดงสถานะขณะที่รถเคลื่อนที่ด้วยคำสั่งจากศูนย์กลางควบคุมระบบ

ครั้งที่	ผลการทดสอบหน้าจอแสดงการขับเคลื่อนรถด้วยคำสั่ง ณ ศูนย์กลางควบคุมระบบ	
	รถเคลื่อนที่จาก S1 ไป S2	รถเคลื่อนที่จาก S2 ไป S1
1	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
2	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
3	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
4	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
5	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
6	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
7	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
8	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
9	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
10	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
11	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
12	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
13	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
14	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
15	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
16	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
17	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
18	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
19	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
20	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
21	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
22	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
23	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
24	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
25	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
26	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ

ตารางที่ 5.19 ผลการทดสอบหน้าจอแสดงสถานะขณะที่รถเคลื่อนที่ด้วยคำสั่งจากศูนย์กลางควบคุมระบบ (ต่อ)

ครั้งที่	ผลการทดสอบหน้าจอแสดงการขับเคลื่อนรถด้วยคำสั่ง ณ ศูนย์กลางควบคุมระบบ	
	รถเคลื่อนที่จาก S1 ไป S2	รถเคลื่อนที่จาก S2 ไป S1
27	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
28	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
29	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
30	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ

จากตารางที่ 5.19 การทดสอบหน้าจอแสดงสถานะขณะที่รถเคลื่อนที่ด้วยคำสั่งจากศูนย์กลางควบคุมระบบ พบว่าระบบสามารถแสดงผลการทำงานตามที่ออกแบบได้เป็นอย่างดี 100% เพียงแต่จะมีการกระพริบหรือสลับหน้าจอเช่นเดียวกับหน้าจออื่น ๆ ที่กล่าวมาก่อนหน้านี้

5) การทดสอบหน้าจอแสดงการแจ้งเตือนรถฉุกเฉิน การทดสอบหน้าจอแสดงการแจ้งเตือนรถฉุกเฉินได้จำลองการส่งสัญญาณคำสั่งควบคุมรถในโหมดการควบคุมการเดินรถแบบฉุกเฉิน ป้องกันการชนสิ่งกีดขวางและโหมดการหยุดรถแบบฉุกเฉิน เพื่อตรวจสอบผลการตอบสนองของหน้าจอนี้ว่าจะสามารถทำงานตามที่ออกแบบได้หรือไม่ แสดงดังตารางที่ 5.20

ตารางที่ 5.20 ผลการทดสอบหน้าจอแสดงการแจ้งเตือนรถฉุกเฉิน

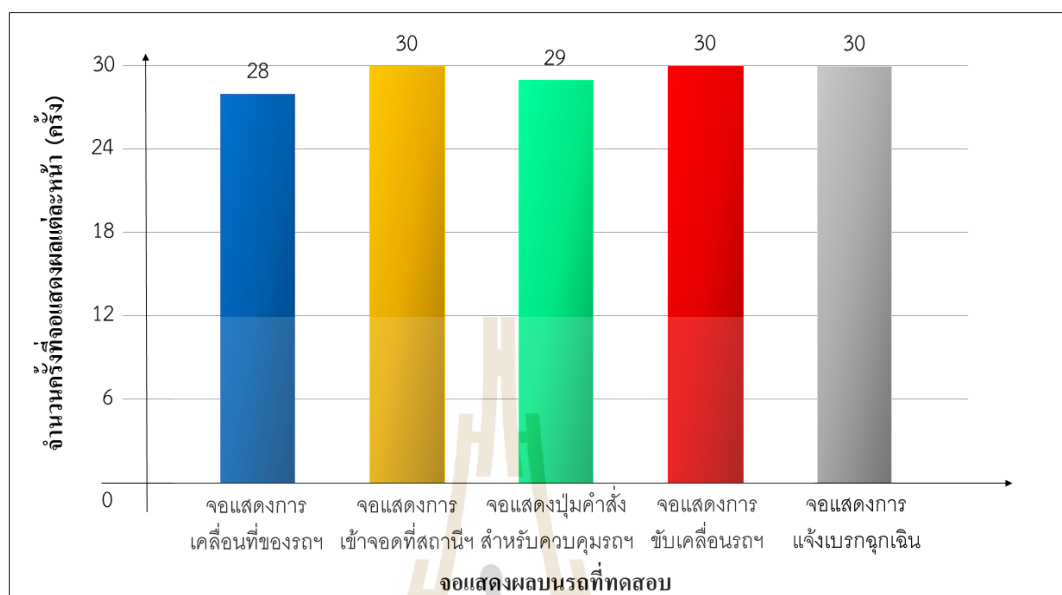
ครั้งที่	ผลการทดสอบหน้าจอแสดงการแจ้งเตือนรถฉุกเฉิน			
	โหมดการควบคุมการเดินรถแบบฉุกเฉิน ป้องกันการชนสิ่งกีดขวาง		โหมดการหยุดรถแบบฉุกเฉิน	
	เคลื่อน S1 ไป S2	เคลื่อน S2 ไป S1	เคลื่อน S1 ไป S2	เคลื่อน S2 ไป S1
1	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
2	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
3	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
4	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
5	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
6	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
7	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
8	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ

ตารางที่ 5.20 ผลการทดสอบหน้าจอดีแสดงการแจ้งเบรคฉุกเฉิน (ต่อ)

ครั้งที่	ผลการทดสอบหน้าจอดีแสดงการแจ้งเบรคฉุกเฉิน			
	โหมดการควบคุมการเดินรถแบบฉุกเฉิน ป้องกันการชนสิ่งกีดขวาง		โหมดการหยุดรถแบบฉุกเฉิน	
	เคลื่อน S1 ไป S2	เคลื่อน S2 ไป S1	เคลื่อน S1 ไป S2	เคลื่อน S2 ไป S1
9	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
10	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
11	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
12	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
13	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
14	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
15	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
16	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
17	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
18	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
19	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
20	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
21	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
22	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
23	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
24	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
25	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
26	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
27	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
28	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
29	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
30	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ

จากตารางที่ 5.20 พบว่าผลการทดสอบหน้าจอดีแสดงการแจ้งเบรคฉุกเฉินสามารถทำงานได้ 100% ไม่พบปัญหาใด ๆ ซึ่งสามารถสรุปผลการทดสอบจอดีแสดงผลบนรถของชุดจำลอง

ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถทั้ง 5 ส่วน แสดงดังรูปที่ 5.13



รูปที่ 5.13 สรุปผลการทดสอบจอแสดงผลบนรถของชุดจำลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ

จากการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถทั้ง 3 ส่วน ได้แก่ การทดสอบขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสที่ความเร็วอ้างอิงต่าง ๆ การทดสอบโหมดการควบคุมการเดินรถ และการทดสอบจอแสดงผลบนรถ พบว่าการทำงานของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถจะสามารถสั่งระบบให้ทำงานได้ 97.33 % ในลักษณะที่ออกแบบไว้ แต่การทำงานนี้มักจะเกิดปัญหาในบางส่วนของระบบ เช่น หน้าจอแสดงผลบนรถเกิดการกระพริบจากการรับ/ส่งสัญญาณหลาย ๆ สัญญาณภายในระบบ การที่รถเบรกไม่สนิทจนทำให้เกิดการชนกันระหว่างรถกับสิ่งกีดขวางในขณะที่ระบบ APM ทำงานในโหมดการควบคุมการเดินรถแบบฉุกเฉินป้องกันการชนสิ่งกีดขวางก็ตาม เป็นต้น อย่างไรก็ตามปัญหาเหล่านี้จะหมดไปหากมีการปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ไฟฟ้าบางส่วนของนำมาประกอบขึ้นเป็นรถในระบบนี้ ดังนั้นจากการทดสอบระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถจึงสามารถสรุปได้ว่าการออกแบบและพัฒนาระบบในส่วนนี้ประสบผลสำเร็จสามารถนำระบบไปต่อยอดสำหรับใช้งานในระบบ APM จริงที่อาจจะมีการพัฒนาขึ้น

5.4 การทดสอบชุดจำลองศูนย์กลางควบคุมระบบสำหรับระบบ APM

การทดสอบชุดจำลองศูนย์กลางควบคุมระบบสำหรับ APM ที่ได้พัฒนาขึ้น แบ่งการทดสอบการทำงานของระบบออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การทดสอบหน้าจอกควบคุมโหมดการทำงาน

ของระบบ และการทดสอบหน้าจอบ่งแสดงผลการทำงานของระบบ เพื่อตรวจสอบสมรรถนะการทำงานของระบบในส่วนต่าง ๆ ว่าสามารถทำงานได้ตามการออกแบบหรือไม่ สำหรับการทดสอบระบบนี้มีรายละเอียดการดำเนินการดังต่อไปนี้

5.4.1 การทดสอบหน้าจอบทความควบคุมโหมดการทำงานระบบ

การทดสอบในส่วนนี้เน้นไปที่การตรวจสอบการสั่งควบคุมโหมดการทำงานของรถจากปุ่มคำสั่งที่อยู่บนหน้าจอบทความโหมดการเคลื่อนที่ของรถ ซึ่งถือว่าเป็นส่วนประกอบหลักที่สำคัญอีกส่วนในการทำงานของระบบ APM ดังที่มีการออกแบบไว้ข้างต้น สำหรับการทดสอบนี้ได้ทำการสั่งควบคุมรถให้เคลื่อนที่ด้วยปุ่มคำสั่งโหมดการควบคุมการเดินรถแบบอัตโนมัติ โหมดการควบคุมการเดินรถแบบปุ่มคำสั่งที่สถานีผู้โดยสาร โหมดการควบคุมการเดินรถแบบทดสอบการขับเคลื่อน และโหมดการหยุดรถแบบฉุกเฉิน โหมดละ 30 ครั้ง โดยจากการทดสอบส่วนควบคุมโหมดการทำงานของระบบได้ผลการตอบสนองของรถที่เคลื่อนที่ระหว่างสถานีผู้โดยสาร แสดงดังตารางที่ 5.21

ตารางที่ 5.21 ผลการทดสอบปุ่มคำสั่งที่อยู่บนหน้าจอบทความโหมดการเคลื่อนที่ของรถ

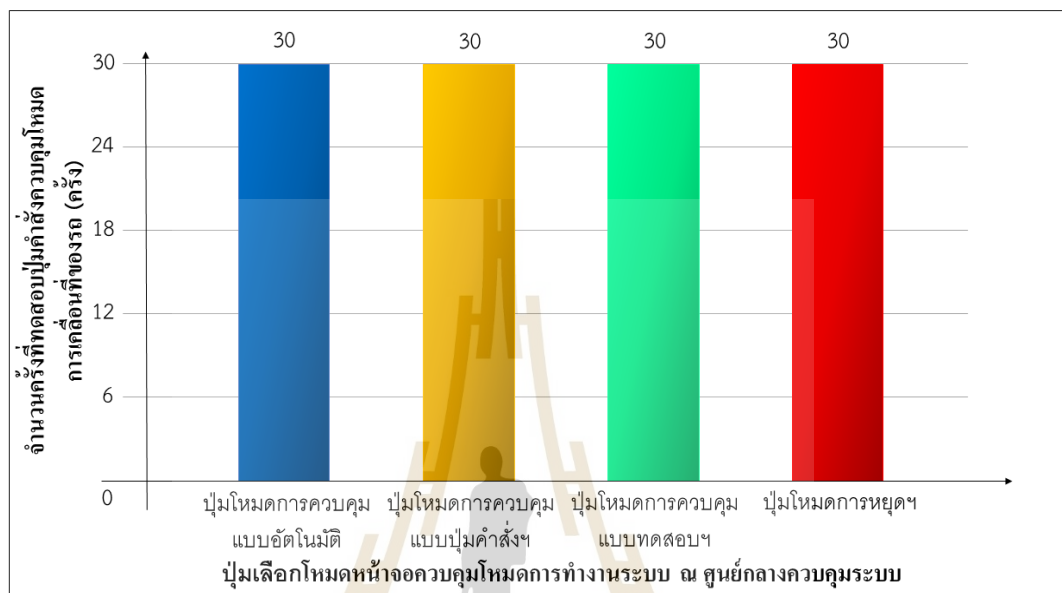
ครั้งที่	โหมดการทำงานของรถที่ควบคุมจากปุ่มคำสั่ง (ครั้ง)			
	โหมดการควบคุมการเดินรถแบบอัตโนมัติ	โหมดการควบคุมการเดินรถแบบปุ่มคำสั่งที่สถานีผู้โดยสาร	โหมดการควบคุมการเดินรถแบบทดสอบการขับเคลื่อน	โหมดการหยุดรถแบบฉุกเฉิน
1	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
2	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
3	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
4	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
5	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
6	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
7	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
8	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
9	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
10	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
11	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ

ตารางที่ 5.21 ผลการทดสอบปุ่มคำสั่งที่อยู่บนหน้าจอควบคุมโหมดการเคลื่อนที่ของรถ (ต่อ)

ครั้งที่	โหมดการทำงานของรถที่ควบคุมจากปุ่มคำสั่ง (ครั้ง)			
	โหมดการควบคุม การเดินรถแบบ อัตโนมัติ	โหมดการควบคุม การเดินรถแบบปุ่ม คำสั่งที่สถานี ผู้โดยสาร	โหมดการควบคุม การเดินรถ แบบทดสอบการ ขับเคลื่อน	โหมดการหยุดรถ แบบฉุกเฉิน
12	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
13	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
14	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
15	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
16	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
17	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
18	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
19	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
20	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
21	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
22	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
23	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
24	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
25	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
26	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
27	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
28	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
29	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
30	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ

จากตารางที่ 5.21 พบว่าปุ่มคำสั่งที่ออกแบบขึ้นมาสำหรับควบคุมโหมดการเคลื่อนที่ของรถสามารถสั่งควบคุมรูปแบบการเคลื่อนที่ของรถได้ 100% ซึ่งเมื่อสรุปผลการตอบสนองของระบบที่ถูกสั่งควบคุมการเคลื่อนที่ผ่านปุ่มคำสั่งของแต่ละโหมดที่ติดตั้งไว้ที่จอ HMI ของหน้าจอควบคุมโหมดการทำงานระบบ ณ ศูนย์กลางควบคุมระบบ แสดงดังรูปที่ 5.14 โดยการ

ทำงานอื่น ๆ ภายในหน้าจอควบคุมนี้จะไม่ดำเนินการที่นี้ แต่ได้กล่าวรวมอยู่ในการทดสอบ หน้าจอแสดงผลการทำงานของระบบ เนื่องจากการทำงานในบางส่วนของทั้งสองหน้าจอได้ออกแบบไว้ในรูปแบบที่คล้ายคลึงกัน



รูปที่ 5.14 สรุปผลการทดสอบหน้าจอควบคุมโหมดการทำงานของระบบ ณ ศูนย์กลางควบคุมระบบ

5.4.2 การทดสอบหน้าจอแสดงผลการทำงานของระบบ

การทดสอบในส่วนนี้ได้ตรวจสอบการทำงานของหน้าจอต่าง ๆ ภายในหน้าจอแสดงผลการทำงานของระบบที่ได้ออกแบบไว้ทั้ง 5 ส่วน ได้แก่ ส่วนแสดงการทำงานของรถ ส่วนแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ ส่วนแสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในระบบ ส่วนแสดงกราฟการทำงานของระบบ และส่วนแสดงการแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบ โดยมีรายละเอียดการดำเนินการทดสอบดังต่อไปนี้

1) การทดสอบส่วนแสดงการทำงานของรถ การทดสอบนี้ได้ทำการตรวจสอบส่วนแสดงการทำงานของรถ ซึ่งทำหน้าที่ในการแสดงความเร็วของรถ ทิศทางการเคลื่อนที่ของรถ แสดงโหมดการทำงานของระบบ และกราฟความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถ แสดงดังตารางที่ 5.22 และในที่นี่ยังได้ทดสอบวัดค่าความเร็วของรถ ณ ความเร็วบริการสูงสุดต่าง เพื่อตรวจสอบผลตอบแทนของระบบที่มีต่อการทำงานในช่วงความเร็วบริการสูงสุดตั้งแต่ 1-3 เมตร/วินาที ความเร็วละ 6 ครั้ง รวมเป็นทั้งหมด 30 ครั้ง แสดงดังตารางที่ 5.23 โดยการทดสอบนี้จะมีรายละเอียดในการดำเนินการดังต่อไปนี้

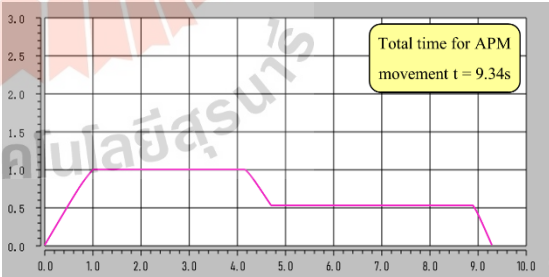
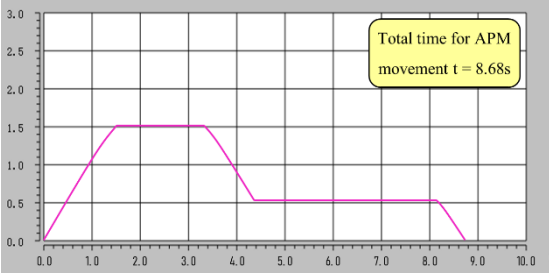
ตารางที่ 5.22 ผลการตอบสนองของส่วนแสดงผลการทำงานระบบ

ครั้งที่	ผลการตอบสนองของส่วนแสดงการทำงานของรถ (ครั้ง)			
	การแสดงความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถ	การแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของรถ	การแสดงผลของการทำงานของระบบ	กราฟแสดงความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถ
1	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
2	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
3	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ไม่ทำงาน
4	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
5	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
6	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
7	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
8	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
9	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
10	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
11	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
12	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ไม่ทำงาน
13	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
14	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
15	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
16	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
17	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
18	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
19	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
20	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
21	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
22	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
23	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ไม่ทำงาน
24	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
25	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ

ตารางที่ 5.22 ผลการตอบสนองของส่วนแสดงผลการทำงานของระบบ (ต่อ)

ครั้งที่	ผลการตอบสนองของส่วนแสดงผลการทำงานของรถ (ครั้ง)			
	การแสดงความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถ	การแสดงผลทิศทางการเคลื่อนที่ของรถ	การแสดงผลโหมดการทำงานของระบบ	กราฟแสดงความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถ
26	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
27	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
28	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
29	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
30	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ

ตารางที่ 5.23 ผลการแสดงความเร็ว ณ ความเร็วการควบคุมต่าง ๆ

ครั้งที่	ผลแสดงการทำงานของหน้าจอ ณ ความเร็วการควบคุมต่าง ๆ		
	ความเร็วบริการสูงสุดของรถทดสอบ (m/s)	ความเร็วบริการสูงสุดของรถวัดค่า (m/s)	กราฟความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถ
1	1.0	1.00	
2		1.01	
3		1.00	
4		1.00	
5		0.99	
6		1.00	
7	1.5	1.48	
8		1.49	
9		1.48	
10		1.51	
11		1.51	
12		1.50	

ตารางที่ 5.23 ผลการแสดงความเร็ว ณ ความเร็วการควบคุมต่าง ๆ (ต่อ)

ครั้งที่	ผลแสดงการทำงานของหน้าจอ ณ ความเร็วการควบคุมต่าง ๆ		กราฟความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถ
	ความเร็ว บริการสูงสุด ของรถ ทดสอบ (m/s)	ความเร็ว บริการสูงสุด ของรถ วัดค่า (m/s)	
13	2.0	2.02	
14		2.01	
15		1.99	
16		2.01	
17		2.00	
18		2.00	
19	2.5	2.50	
20		2.49	
21		2.50	
22		2.49	
23		2.50	
24		2.50	
25	3.0	3.01	
26		3.02	
27		2.99	
28		3.01	
29		3.01	
30		3.03	

จากตารางที่ 5.22 และ 5.23 พบว่าหน้าจอแสดงผลการทำงานของระบบในส่วนแสดงผลการทำงานของระบบที่ออกแบบขึ้น สามารถแสดงผลการทำงานของระบบในส่วนต่าง ๆ ได้ประมาณ 90% ของการทดสอบทั้งหมด ทำให้การแสดงผลกราฟความเร็วของรถ ณ ศูนย์กลางควบคุมระบบไม่มีความต่อเนื่อง ซึ่งอาจจะมีผลต่อการควบคุมระบบของเจ้าหน้าที่ผู้คุมระบบในอนาคต

2) การทดสอบส่วนแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ หน้าจอนี้เป็นส่วนที่นำเอาข้อมูลจากระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถมาแสดง ณ ศูนย์กลางควบคุมระบบ เพื่อแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถและสถานะการทำงานของเซนเซอร์ตรวจจับ ณ จุดต่าง ๆ บนทางวิ่งให้ผู้คุมระบบได้รับทราบ ซึ่งจากผลในส่วนนี้สามารถสรุปเป็นตารางการทำงาน แสดงดังตารางที่ 5.24

ตารางที่ 5.24 ผลการตอบสนองของส่วนตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ

ครั้งที่	ผลการตอบสนองของส่วนแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ (ครั้ง)	
	การแสดงผลตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ	การแสดงผลสถานะของเซนเซอร์ตรวจจับ
1	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
2	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
3	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
4	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
5	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
6	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
7	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
8	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
9	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
10	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
11	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
12	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
13	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
14	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
15	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
16	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
17	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
18	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
19	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
20	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
21	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
22	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ

ตารางที่ 5.24 ผลการตอบสนองของส่วนตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ (ต่อ)

ครั้งที่	ผลการตอบสนองของส่วนแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ (ครั้ง)	
	การแสดงผลตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ	การแสดงผลสถานะของเซนเซอร์ตรวจจับ
23	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
24	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
25	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
26	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
27	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
28	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
29	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ
30	ทำงานปกติ	ทำงานปกติ

จากตารางที่ 5.24 พบว่าหน้าจอแสดงผลการทำงานระบบในส่วนตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถสามารถแสดงผลการทำงานตามที่ออกแบบไว้ได้ 100% โดยผลที่ได้มีความสอดคล้องกับผลของระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถที่ได้ทดสอบไว้ข้างต้น

3) การทดสอบส่วนแสดงค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าภายในระบบ การทดสอบหน้าจอในส่วนนี้ได้ทำการวัดและเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าระหว่างค่าที่ได้จากวัดค่ามิเตอร์บนรถกับค่าที่แสดงบนหน้าจอแสดงผลการทำงานระบบในขณะที่รถทำงานด้วยโหมดการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติ ณ ความเร็วต่าง ๆ เป็นเวลา 15 วินาที เพื่อตรวจสอบความแม่นยำและเที่ยงตรงของหน้าจอแสดงค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าภายในระบบที่ได้ออกแบบขึ้น โดยการทดสอบนี้ได้ทำการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า 4 พารามิเตอร์ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และพลังงานไฟฟ้า แสดงดังตารางที่ 5.25

ตารางที่ 5.25 ผลการตอบสนองของส่วนแสดงค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าภายในระบบ

ครั้งที่	ผลการวัดค่าพารามิเตอร์ ณ ขณะรถเคลื่อนที่								
	ความเร็วรถ (m/s)	ค่าที่แสดงบนวัดค่ามิเตอร์				ค่าที่แสดงบนหน้าจอแสดงผล			
		แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (kW)	พลังงานไฟฟ้า (kWh)	แรงดันไฟฟ้า (V)	กระแสไฟฟ้า (A)	กำลังไฟฟ้า (kW)	พลังงานไฟฟ้า (kWh)
1	1.0	142.87	2.99	0.5919	0.0024	143.67	2.96	0.5923	0.0024

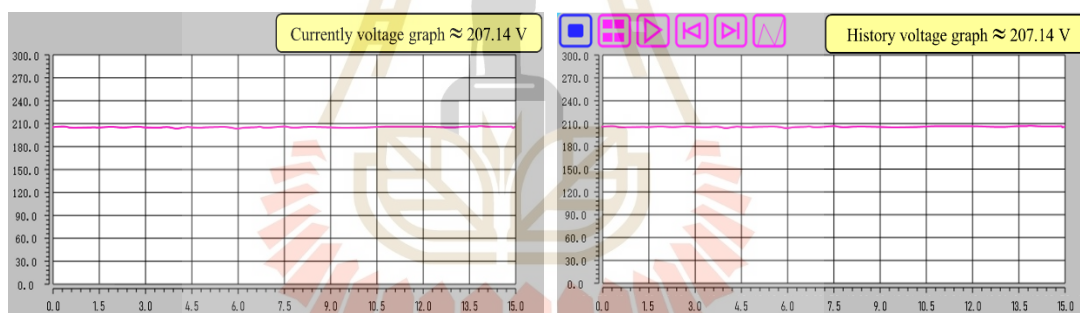
ตารางที่ 5.25 ผลการตอบสนองของส่วนแสดงค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าภายในระบบ (ต่อ)

ครั้งที่	ผลการวัดค่าพารามิเตอร์ ณ ณะรถเคลื่อนที่								
	ความเร็ว รถ (m/s)	ค่าที่แสดงบนวัตต์มิเตอร์				ค่าที่แสดงบนหน้าจอแสดงผล			
		แรงดัน ไฟฟ้า (V)	กระแส ไฟฟ้า (A)	กำลัง ไฟฟ้า (kW)	พลังงาน ไฟฟ้า (kWh)	แรงดัน ไฟฟ้า (V)	กระแส ไฟฟ้า (A)	กำลัง ไฟฟ้า (kW)	พลังงาน ไฟฟ้า (kWh)
2	1.0	142.32	3.01	0.5889	0.0023	142.44	2.99	0.5922	0.0023
3		143.45	3.02	0.5932	0.0025	141.96	3.02	0.5923	0.0024
4		141.98	3.00	0.5914	0.0024	143.38	3.00	0.5918	0.0024
5		142.56	2.98	0.5902	0.0024	142.91	2.96	0.5923	0.0024
6		142.94	2.98	0.5923	0.0024	143.90	2.86	0.5931	0.0025
7		1.5	174.86	2.85	0.7012	0.0030	174.84	2.86	0.7010
8	175.86		2.92	0.7004	0.0029	175.78	2.94	0.7005	0.0029
9	174.78		2.77	0.7009	0.0030	174.79	2.89	0.7009	0.0030
10	173.34		2.88	0.7002	0.0029	173.31	2.89	0.7002	0.0029
11	175.53		2.91	0.7007	0.0029	175.53	2.90	0.7011	0.0030
12	174.45		2.89	0.7002	0.0029	174.45	2.88	0.7003	0.0029
13	2.0	207.14	2.53	0.7263	0.0030	207.14	2.52	0.7259	0.0030
14		207.13	2.54	0.7264	0.0030	207.13	2.54	0.7265	0.0031
15		207.11	2.55	0.7261	0.0030	207.10	2.56	0.7261	0.0030
16		207.07	2.57	0.7265	0.0031	207.05	2.55	0.7263	0.0030
17		207.10	2.49	0.7262	0.0030	207.11	2.49	0.7262	0.0030
18		207.17	2.53	0.7262	0.0030	207.19	2.54	0.7260	0.0030
19	2.5	237.94	2.36	0.7781	0.0033	238.01	2.39	0.7784	0.0033
20		237.96	2.38	0.7783	0.0033	237.94	2.37	0.7782	0.0033
21		237.93	2.35	0.7780	0.0032	237.97	2.36	0.7780	0.0032
22		237.97	2.39	0.7784	0.0033	237.98	2.40	0.7787	0.0033
23		237.90	2.33	0.7778	0.0032	237.90	2.34	0.7780	0.0032
24		237.94	2.37	0.7782	0.0033	237.95	2.36	0.7781	0.0033
25	3.0	264.82	2.23	0.8466	0.0036	264.81	2.24	0.8466	0.0036

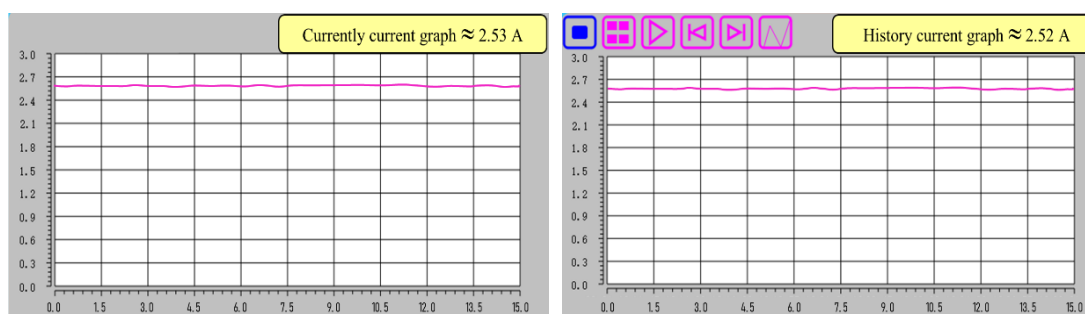
ตารางที่ 5.26 ผลการตอบสนองของส่วนแสดงกราฟการทำงานของระบบ (ต่อ)

ครั้งที่	ผลกราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า (ครั้ง)								
	ความเร็ว รถ (m/s)	แบบปัจจุบัน				แบบบันทึกค่า			
		แรงดัน ไฟฟ้า	กระแส ไฟฟ้า	กำลัง ไฟฟ้า	พลังงาน ไฟฟ้า	แรงดัน ไฟฟ้า	กระแส ไฟฟ้า	กำลัง ไฟฟ้า	พลังงาน ไฟฟ้า
29	3.0	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ
30		ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ	ปกติ

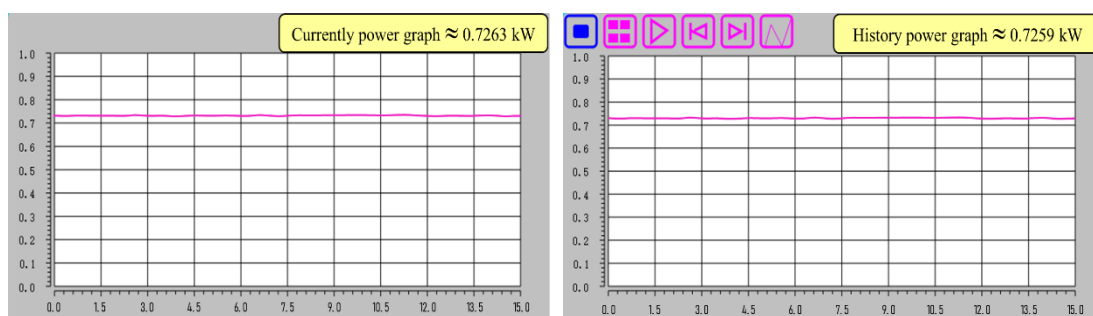
จากตารางที่ 5.26 พบว่าส่วนแสดงกราฟการทำงานของระบบที่ทดสอบสามารถแสดงค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่าง ๆ ที่วัดได้จากระบบในรูปของกราฟแบบปัจจุบันและกราฟแสดงพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าแบบบันทึกค่าได้อย่างมีประสิทธิภาพอยู่ที่ 96.67% จากการทดสอบสามารถเปรียบเทียบกราฟแสดงผลค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าทั้งทั้งสองแบบ แสดงดังรูปที่ 5.20-5.23



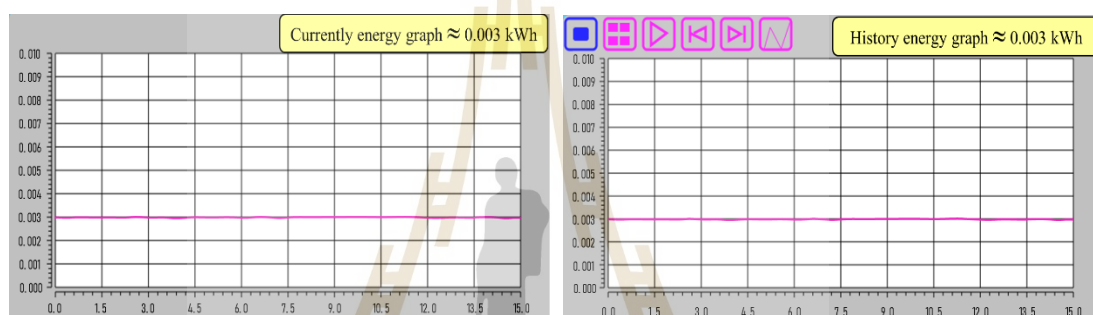
รูปที่ 5.20 การแสดงค่าแรงดันไฟฟ้าแบบปัจจุบันและแบบบันทึกค่า



รูปที่ 5.21 การแสดงค่ากระแสไฟฟ้าแบบปัจจุบันและแบบบันทึกค่า



รูปที่ 5.22 การแสดงค่ากำลังไฟฟ้าแบบปัจจุบันและแบบบันทึกค่า



รูปที่ 5.23 การแสดงค่าพลังงานไฟฟ้าแบบปัจจุบันและแบบบันทึกค่า

5) การทดสอบส่วนแสดงการแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบ การทดสอบนี้ได้จำลองการรับ/ส่งค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่าง ๆ ให้มีค่าที่มากหรือน้อยกว่าค่าทำงานปกติที่ระบบใช้งานภายในระบบไปยังส่วนแสดงการแจ้งเตือนของหน้าจอแสดงผลการทำงานของระบบ ณ ศูนย์กลางควบคุมระบบทั้งหมด 30 ครั้ง เพื่อตรวจสอบผลการตอบสนองของระบบว่าสามารถแจ้งเตือนรายละเอียดความผิดปกติของค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าตามที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่ แสดงดังตารางที่ 5.27

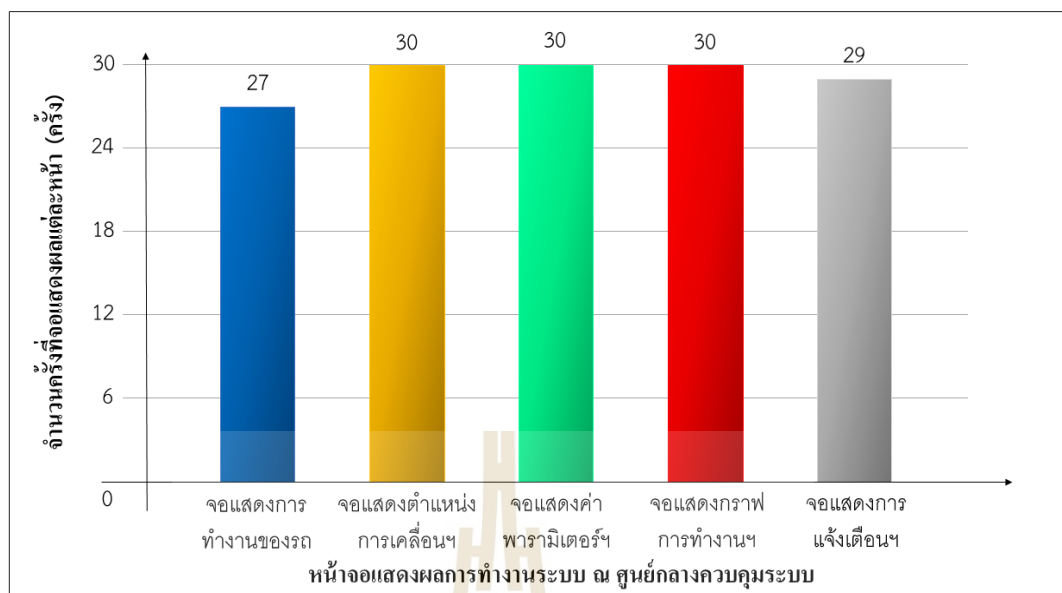
ตารางที่ 5.27 ผลการทดสอบของส่วนแสดงการแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบ

ลำดับ	พารามิเตอร์ทางไฟฟ้า	จำนวนครั้งที่มีการแจ้งเตือนความผิดปกติ (ครั้ง)			
		ค่ามากกว่าช่วงทำงานปกติ		ค่าน้อยกว่าช่วงทำงานปกติ	
		ทำงานปกติ	ไม่ทำงาน	ทำงานปกติ	ไม่ทำงาน
1	แรงดันไฟฟ้า $U-V$	30	0	30	0
2	แรงดันไฟฟ้า $V-W$	30	0	30	0

ตารางที่ 5.27 ผลการทดสอบของส่วนแสดงการแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบ (ต่อ)

ลำดับ	พารามิเตอร์ทางไฟฟ้า	จำนวนครั้งที่มีการแจ้งเตือนความผิดปกติ (ครั้ง)			
		ค่ามากกว่าช่วงทำงานปกติ		ค่าน้อยกว่าช่วงทำงานปกติ	
		ทำงานปกติ	ไม่ทำงาน	ทำงานปกติ	ไม่ทำงาน
3	แรงดันไฟฟ้า $W-U$	30	0	30	0
4	แรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย ไลน์กับไลน์เฉลี่ย	30	0	30	0
5	แรงดันไฟฟ้าระหว่างสาย ไลน์กับไลน์ไม่สมดุล	30	0	29	1
6	กระแสไฟฟ้า U	30	0	30	0
7	กระแสไฟฟ้า V	30	0	30	0
8	แรงดันไฟฟ้า W	30	0	30	0
9	กระแสไฟฟ้าในสายไลน์ เฉลี่ย	30	0	30	0
10	กระแสไฟฟ้าในสายไลน์ ไม่สมดุล	30	0	30	0
11	กำลังไฟฟ้า	30	0	30	0
12	ค่าตัวประกอบกำลัง	30	0	30	0
13	พลังงานไฟฟ้า	30	0	30	0
14	ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ	30	0	30	0
15	ความถี่ทำงานของระบบ ควบคุม	30	0	30	0

จากการทดสอบส่วนแสดงการแจ้งเตือนความผิดปกติของระบบในตารางที่ 5.27 พบว่าส่วนนี้สามารถทำงานแจ้งเตือนและแสดงความผิดปกติที่เกิดขึ้นกับพารามิเตอร์ไฟฟ้าต่าง ๆ ภายในระบบ APM ได้อย่างแม่นยำถึง 96.67% ซึ่งในอนาคตสามารถนำส่วนนี้ไปต่อยอดให้รณีระบบหยุดการทำงานของรถแบบอัตโนมัติในกรณีที่พารามิเตอร์ทางไฟฟ้าตัวใดตัวหนึ่งมีความผิดปกติเกิดขึ้นได้ การทดสอบหน้าจอแสดงผลการทำงานระบบในตารางที่ 5.22-5.27 สามารถสรุปผลทดสอบหน้าในแต่ส่วนของหน้าจอแสดงผลการทำงานระบบ ณ ศูนย์กลางควบคุมระบบเป็นกราฟ แสดงดังรูปที่ 5.24



รูปที่ 5.24 สรุปผลการทดสอบหน้าจอแสดงผลการทำงานระบบ ณ ศูนย์กลางควบคุมระบบ

จากการทดสอบการทำงานของระบบศูนย์กลางควบคุมระบบที่พัฒนาขึ้น 2 ส่วน ได้แก่ การทดสอบหน้าจอควบคุมโหมดการทำงานของระบบ และการทดสอบหน้าจอแสดงผลการทำงาน ของระบบ พบว่าระบบสามารถดำเนินงานในแต่ละส่วนตามรูปแบบการทำงานที่ออกแบบ 96.67% ของการทดสอบทั้งหมด จึงสรุปได้ว่าการพัฒนาระบบนี้ประสบความสำเร็จในเกณฑ์ที่น่าพอใจ

5.5 สรุป

จากการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ที่ออกแบบ และสร้างขึ้นในรูปของชุดจำลองระบบ พบว่าการทำงานในแต่ละส่วนประกอบย่อยของระบบซึ่ง ประกอบด้วย ระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ และระบบศูนย์กลางควบคุมระบบนั้น สามารถดำเนินการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถได้ตามรูปแบบที่กำหนดเอาไว้ด้วยประสิทธิภาพ 96.17% 97.33% และ 96.67% ตามลำดับ ซึ่งมีบางกรณีที่ระบบ ควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไม่สามารถดำเนินระบบในลักษณะที่ออกแบบเอาไว้ เนื่องจากชิ้นส่วน ต่าง ๆ ที่นำมาประกอบเป็นชุดจำลองระบบเกิดความขัดข้อง เช่น เซนเซอร์โฟโตอิเล็กทริกบางที่ใช้ ตรวจจับการเคลื่อนที่ของรถไม่ทำงาน จอควบคุมและแสดงผล ณ ศูนย์กลางควบคุมระบบ ตอบสนองช้า ล้อนำทางที่ประกอบองการเคลื่อนที่ของรถไม่มีความแข็งแรงจึงทำให้การวิ่งของรถเกิด ความผิดพลาด เป็นต้น อย่างไรก็ตามปัญหาเหล่านี้ถือเป็นปัญหาภายนอกที่สามารถแก้ไขโดยการ นำเอาอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือชิ้นส่วนที่มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นมาเปลี่ยนภายในระบบได้

บทที่ 6

สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการดำเนินงาน

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการศึกษาและพัฒนาต้นแบบระบบควบคุมการเดินรถของระบบ APM ที่ออกแบบขึ้นมาสำหรับบริการรับ/ส่งผู้โดยสารระหว่างสถานีผู้โดยสาร 2 สถานี โดยต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมีลักษณะเป็นชุดจำลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถที่ใช้ PLC เป็นอุปกรณ์หลักในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสด้วยวิธีโวลต์/เฮิร์ตซ์แบบวงเปิด การทำงานของชุดจำลองนี้ได้แบ่งหน้าที่ในการดำเนินงานภายในระบบเป็นทั้งหมด 3 ระบบย่อย ได้แก่ ระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ และศูนย์กลางควบคุมระบบ เพื่อให้การควบคุมและตรวจสอบการทำงานของระบบ APM ที่พัฒนาสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพตามรูปแบบที่กำหนด

จากการทดสอบการทำงานของระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM พบว่าระบบสามารถทำงานได้ด้วยประสิทธิภาพที่สูงถึง 96.72% ของการทดสอบทั้งหมด ซึ่งสามารถแยกย่อยเป็นผลจากการทดสอบระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ และระบบศูนย์กลางควบคุมระบบ ที่สามารถดำเนินการตามรูปแบบที่กำหนดเอาไว้ได้ 96.17% 97.33% และ 96.67% ตามลำดับ โดยจากผลที่ได้จะมีบางครั้งที่ระบบย่อยแต่ละส่วนไม่สามารถดำเนินระบบในลักษณะที่ออกแบบเอาไว้ จากการที่อุปกรณ์ไฟฟ้าและชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่นำมาประกอบเป็นชุดจำลองระบบเกิดความขัดข้อง ดังนั้นหากมีการเปลี่ยนอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือชิ้นส่วนที่มีคุณภาพสูงขึ้นมาใช้ในการประกอบระบบ APM จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของระบบได้

6.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต

6.2.1 นำต้นแบบระบบควบคุมการเดินรถของระบบ APM ที่พัฒนาขึ้นไปขยายขอบเขตให้มีขนาดที่ใหญ่ด้วยอัตราส่วนระหว่างชุดจำลองต่อระบบจริง 1:25 เพื่อติดตั้งและใช้งานจริงกับระบบ APM ที่กำลังดำเนินการสร้าง ณ โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งมีการออกแบบขึ้นมาสำหรับบริการรับ/ส่งผู้โดยสารและอุปกรณ์การแพทย์ระหว่างสถานีผู้โดยสาร 2 สถานี ในระยะทางตรง 200 เมตร

6.2.2 ปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของระบบควบคุมการเดินรถของระบบ APM โดย

เปลี่ยนอุปกรณ์ไฟฟ้าและชิ้นส่วนให้มีคุณภาพที่สูงขึ้น

6.2.3 เพิ่มจำนวนเซนเซอร์ตรวจจับที่ติดตั้งบนทางวิ่ง เพื่อยกระดับการตรวจจับและความคุมความปลอดภัยของระบบควบคุมการเดินรถของระบบ APM ให้มีความแม่นยำมากขึ้น

6.2.4 เพิ่มจำนวนเซนเซอร์ตรวจจับ ณ จุดตรวจสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถจาก 1 ตัว เป็น 2 หรือมากกว่านั้น เพื่อป้องกันกรณีที่เซนเซอร์ตรวจจับ ณ จุดตรวจสอบเกิดความเสียหายไม่สามารถระบุตำแหน่งที่รถกำลังเคลื่อนที่ได้

6.2.5 พัฒนาระบบควบคุมการทำงานของระบบ APM ให้มีรูปแบบและขอบเขตการทำงานที่กว้างขึ้น เพื่อรองรับการทำงานรูปแบบอื่น ๆ ของระบบที่อาจจะพบเจอในอนาคต เช่น เพิ่มระบบแจ้งเตือนการทำความเร็ว ณ จุดต่าง ๆ ขณะที่รถ เพื่อให้ระบบ APM มีการเคลื่อนที่ในช่วงเวลาที่กำหนด



รายการอ้างอิง

- ชนัดชัย กุลวรรณิขพงษ์. (2560). ระบบจ่ายไฟฟ้าสำหรับรถไฟ. ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: บริษัท จีร็ด สนิทวงศ์การพิมพ์ จำกัด.
- สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.). (2563). สวทช. ร่วมภาครัฐ-เอกชน ยกกระดับอุตสาหกรรมระบบรางไทย. สืบค้นจาก <https://www.nstda.or.th/th/news/13042-202002mou>
- ไทยรัฐฉบับพิมพ์. (2561). ทอท.เร่งทีโออาร์ 5 พันล้าน. สืบค้นจาก <https://www.thairath.co.th/content/1310696>
- เนืองวงศ์ ทวยเจริญ. (2559). Thailand 4.0 อะไร...อะไร...ก็ 4.0. สืบค้นจาก <https://www.9expert-training.com/articles/thailand-4.0>
- Wikipedia. (2015). Fichier:Busan Metro EMU Class 4000. Retrieved from https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Busan_Metro_EMU_Class_4000.jpg
- Ioannides, M.G. (2004). Design and implementation of PLC-based monitoring control system for induction motor. IEEE Transactions on Energy Conversion, 19 (3), 469 - 476. doi:10.1109/TEC.2003.822303
- Butdee, S. and Suebsomran, A. (2009). Automatic guided vehicle control by vision system. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 13p. doi:10.1109/IEEM.2009.5373238
- Darshil, Sagar, Rajiv, Pangaokar, S.A., and Sharma, V.K. (2009). Development of a PLC Based Elevator System with Colour Sensing Capabilities for Material Handling in Industrial Plant. Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference, 7p. doi:10.1109/ICPST.2008.4745169
- Gopinathan, R. and Sivashankar, B. (2014). Railway Gate Crossing Control Using PLC Automation. International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology, 5 (6), 11 – 13.
- Anandhan, P., Logeswaran, V., Lakshmakumar, P.S., Rajkumar, G. and Kalpanadevi, S. (2014). A Novel Approach in Railway System Protection Using PLC/SCADA. International Journal of Innovative Research in Technology, 1 (10), 248 - 251.

- Vardhan, S. and Narayan, S. (2015). Development of an Automatic Monitoring and Control System for the Objects on the Conveyor Belt. *International Conference on Man and Machine Interfacing*, 6p. doi: 10.1109/MAMI.2015.7456594
- Langman, R. and Rojas-Peña, L.F. (2016). PLCs as Industry 4.0 Components in Laboratory Applications. *International Journal of Online and Biomedical Engineering*, 12 (7), 37 - 44.
- Sivanandam, S.N. (2016). Metro Traction Control System Using PLC and SCADA Monitoring. *Gurukulam International Journal of Innovations in Science and Engineering*, 1 (1), 22 - 27.
- Umbarkar, D.A., Talele, K., Salunke, S. and Salunke, G. (2017). PLC Based Fully Automated Railway System. *International Journal of Advance Engineering and Research Development*, 4 (6), 487 - 494.
- Wikipedia. (2020). AirRail Link. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/AirRail_Link#/media/-File:Bham3.jpg
- Doppelmayr. (2017). Showing apm Birmingham Airport map. Retrieved from <http://www.metrotram.it/showmap.php?q=1&m=1&n=0>
- Wikipedia. (2020). ExpressTram. Retrieved from https://en.wikipedia.org/wiki/ExpressTram#/media/-File:DTW_Edward_H._McNamara_Terminal.jpg
- Ktransit. (2018). MSP Airport Tramlink. Retrieved from <http://ktransit.com/transit/NAmerica/uslakes/MSP/airport/photos/msp-pm-airport-110104-02001.jpg>
- Liu, R. (2017). AUTOMATED TRANSIT Planning, Operation, and Applications. new jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Transdevna. (2020). The Transdev Autonomous Transport System. Retrieved from <https://www.transdevna.com/services-and-modes/autonomous-mobility/>
- Gerland, H. and Zemlin, H. (1980). Development status of automated guideway transit (AGT) systems in Europe and Japan. *IEEE Vehicular Technology Conference*, 30 (1), 448 - 456. doi: 10.1109/VTC.1980.1622850
- Railwaygazette. (2020). M5 (Istanbul Metro). Retrieved from https://www.metro-report.com/uploads/pics/tn_tr-Istanbul_M5_train.jpg
- Yurikamome. (2019). Yurikamome. Retrieved from <https://www.yurikamome.co.jp/en/>

- Wood, C. (2013). Personal Rapid Transit Revival?. Retrieved from <https://www.govtech.com/transportation/Personal-Rapid-Transit-Revival.html>
- ณภาพ เลาหะวิไลย. (2556). รถไฟฟ้าอนาคต. สืบค้นจาก <https://www.posttoday.com/columnist/244876>
- National Academy of Sciences, Engineering, and Medicine. (2012). Guidebook for Planning and Implementing Automated People Mover Systems at Airports. Houston: Kimley-Horn and Associates Inc.
- JDP. (2015). AGT (Automated Guideway Transit) Vehicle. Retrieved from <http://www.gmark.org/award/describe/43916>
- Bombardier. (2017). Automated Monorails. Retrieved from <https://www.bombardier.com/en/media/multi-media-gallery/details.bombardier-transportation-automated-people-movers.html>
- Primusthai. (2019). Introduce Programmable Encoder. Retrieved from <https://www.primusthai.com/primus/Knowledge/info?ID=157>
- Railsystem. (2016). Track Circuit. Retrieved from <http://www.railsystem.net/track-circuit/>
- นวกัทรานุ นานาค และพิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์. (2555). Diffuse-reflective optical sensor / เซนเซอร์ชนิดใช้แสงประเภทตรวจจับโดยตรง. สืบค้นจาก <http://www.foodnetwork-solution.com/wiki/word/6805/diffuse-reflective-optical-sensor>



ภาคผนวก ก

ข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้สร้างชุดจำลองระบบควบคุมการเดินรถ

สำหรับระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ชุดจำลองระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่มีจำหน่ายบนท้องตลาดทั่วไปมาประกอบเข้าด้วยกันเป็นต้นแบบระบบ APM ที่สามารถเคลื่อนที่ไป-กลับระหว่างสถานีผู้โดยสาร 2 สถานี แบบอัตโนมัติดังที่กล่าวมาในบทที่ผ่าน ๆ มา โดยรายละเอียดของอุปกรณ์ไฟฟ้านำมาประกอบและใช้งานชุดจำลองนี้บางส่วนมีดังต่อไปนี้

ก.1 พีแอลซี TM221CE16R (TM221CE16R Schneider Controller M221 16 IO relay Ethernet PLC)

TM221CE16R เป็น PLC ตัวหนึ่งในตระกูล M221 ของแบรนด์ซีไนเดอร์อิเล็กทริก (Schneider Electric) ที่มีความสามารถครบครันด้านฟังก์ชันการทำงานที่หลากหลาย เช่น รูปการสื่อสารภายในระบบที่มีทั้ง Ethernet's Wi-fi Ethernet's LAN และ Modbus ขนาดของอุปกรณ์ที่กระทัดรัดน้ำหนักเบา เป็นต้น ซึ่งเหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ในระบบต่าง แสดงดังรูปที่ ก.1-ก.3



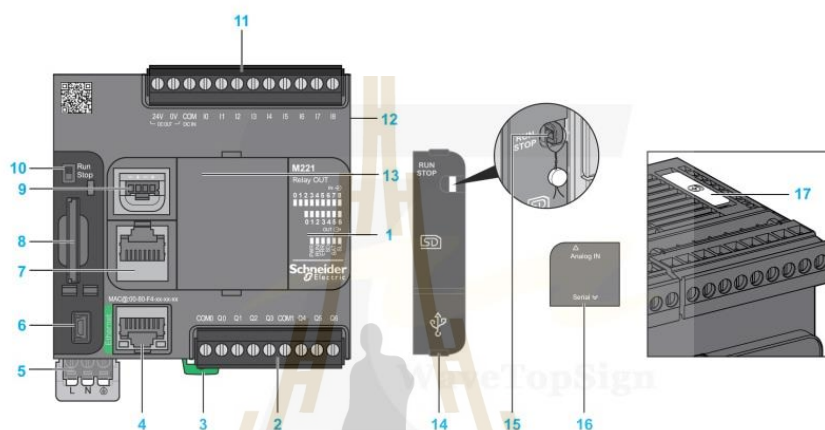
รูปที่ ก.1 TM221CE16R

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลจำเพาะของ TM221CE16R

Range of product	Modicon M221
Product or component type	Logic controller
[Us] rated supply voltage	100...240 V AC
Discrete input number	9, discrete input conforming to IEC 61131-2 Type 1
Analogue input number	2 at 0...10 V
Discrete output type	Relay normally open
Discrete output number	7 relay

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลจำเพาะของ TM221CE16R (ต่อ)

Discrete output voltage	5...125 V DC 5...250 V AC
Discrete output current	2 A
Discrete I/O number	16



รูปที่ ก.2 องค์ประกอบของ TM221CE16R

ตารางที่ ก.2 รายการองค์ประกอบของ TM221CE16R

No.	Description	Refer to
1	Status LEDs	-
2	Output removable terminal block	block Rules for Removable Screw Terminal Block
3	Clip-on lock for 35 mm (1.38 in.) top hat section rail (DIN-rail)	DIN Rail
4	100...240 Vac power supply	Power supply
5	USB mini-B programming port / For terminal connection to a programming PC (EcoStruxure Machine Expert - Basic)	USB mini-B programming port
6	Serial line port 1/ RJ45 connector (RS-232 or RS-485)	Serial line 1
7	SD Card Slot	SD Card Slot

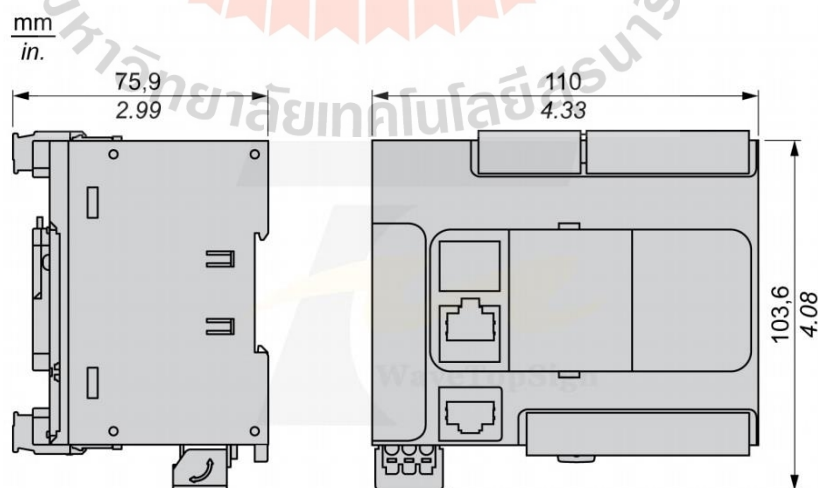
ตารางที่ ก.2 รายการองค์ประกอบของ TM221CE16R (ต่อ)

No.	Description	Refer to
8	2 analog inputs Analog Inputs	Analog Inputs
9	Run/Stop switch	Run/Stop switch
10	Input removable terminal block and embedded power supply used for connecting sensors to the inputs ⁽¹⁾	Rules for Removable Screw Terminal Block
11	I/O expansion connector	-
12	Cartridge slot	-
13	Protective cover (SD Card slot, Run/Stop switch and USB mini- B programming port)	-
14	Locking hook	-
15	Removable analog inputs cover	-
16	Battery holder	cover Installing and Replacing the Battery

(1) Embedded power supply characteristics :

- Voltage : 24 V -15%...+10% isolated
- I_{max} : 250 mA
- NO protection and no overload detection

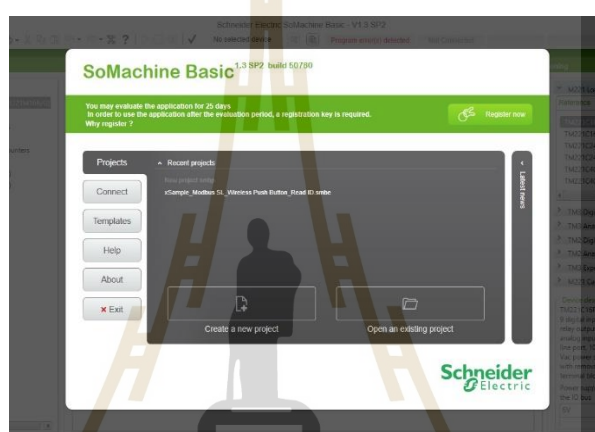
Refer to Embedded I/O Channels



รูปที่ ก.3 ขนาดของ TM221CE16R

การใช้งาน TM221CE16R ในการควบคุมการทำงานของระบบใด ๆ ต้องมีการเขียนโปรแกรมควบคุมเช่นเดียวกับ PLC ตัวอื่น ๆ ที่มีในปัจจุบัน สำหรับการตั้งค่าและเขียนโปรแกรมให้กับ TM221CE16R จะสามารถดำเนินการโดยใช้โปรแกรม SoMachine Basic ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่ถูกออกแบบขึ้นใช้กับ PLC Schneide โดยเฉพาะ การใช้งาน โปรแกรม SoMachine Basic มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำการเปิดโปรแกรมและเข้าสู่หน้าต่างเริ่มต้นเพื่อสร้างโปรเจกและเลือกสถานที่จัดเก็บข้อมูล แสดงดังรูปที่ ก.4



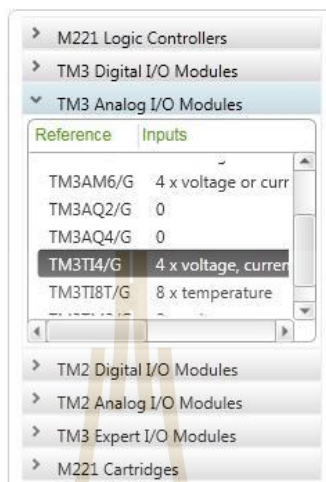
รูปที่ ก.4 หน้าต่างเริ่มต้นของโปรแกรม SoMachine Basic

2. เลือกแถบ Configuration เลือกกรุ่น PLC ที่ตรงกับการใช้งาน แสดงดังรูปที่ ก.5



รูปที่ ก.5 หน้าต่างแถบ Configuration เลือกกรุ่น PLC

3. เลือกรุ่น โมดูลที่ต้องการ (หากมี) แล้วลากวางที่ข้าง PLC เช่น TM3TI4 เป็นต้น เพื่อกำหนดการเชื่อมต่อระหว่าง PLC กับ โมดูล แสดงดังรูปที่ ก.6



รูปที่ ก.6 การเลือก module ที่ใช้งานร่วมกับ PLC

4. ตั้งค่ารูปแบบการใช้งานต่าง ๆ ของ PLC เช่น ไอพีแอดเดรส พารามิเตอร์ เป็นต้น เพื่อให้การทำงานของ PLC เหมาะกับระบบที่ออกแบบมากที่สุด แสดงดังรูปที่ ก.7



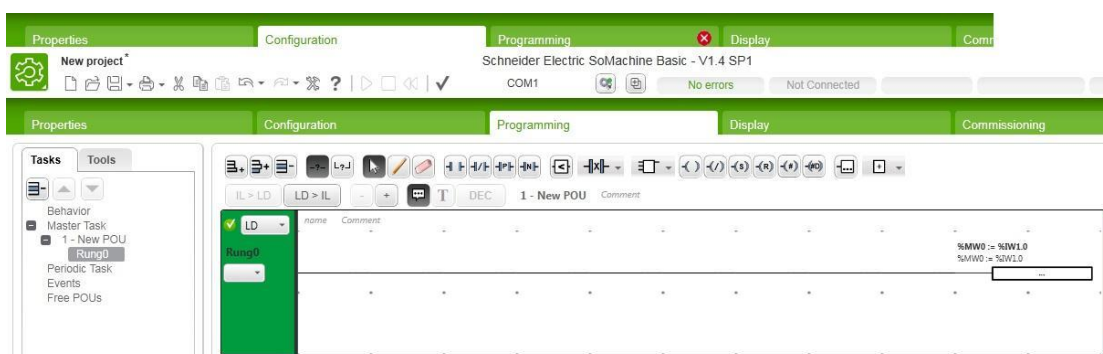
รูปที่ ก.7 การตั้งค่ารูปแบบการทำงานของ PLC

โดยพารามิเตอร์ที่ใช้นในการเขียน โปรแกรมสำหรับ PLC ในส่วนนี้ ได้ตัวแปรรูปแบบอักษรย่อที่ออกแบบขึ้นมาใช้กับ PLC ตระกูล M221 ของ Schneider Electric ดังตารางที่ ก.3

ตารางที่ ก.3 รายการพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเขียน โปรแกรม

Object Type	Object	Object Function	Description
Memory objects	%M	Memory bits (see EcoStruxure Machine Expert - Basic, Generic Functions Library Guide)	Stores memory bit.
	%MW	Memory words (see EcoStruxure Machine Expert - Basic, Generic Functions Library Guide)	Stores 16-bit memory word.
I/O objects	%I	Input bits	Stores value of the digital input.
	%Q	Output bits	Stores value of the digital output
	%IW	Input words	Stores value of the analog input
	%QW	Output words	Stores value of the analog output
Software objects	%TM	Timers (see EcoStruxure Machine Expert - Basic, Generic Functions Library Guide)	Specifies a time before triggering an action.

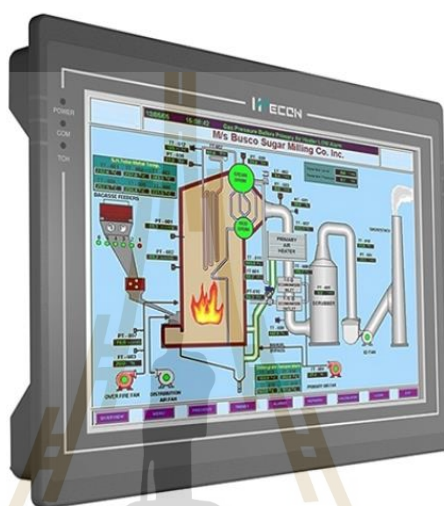
5. เลือกแถบ Programming เพื่อเขียนโปรแกรมแลคเตอร์หรือ โค้ดสำหรับสั่งควบคุมระบบ และดาวน์โหลดไปยัง PLC เป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการ แสดงดังรูปที่ ก.8



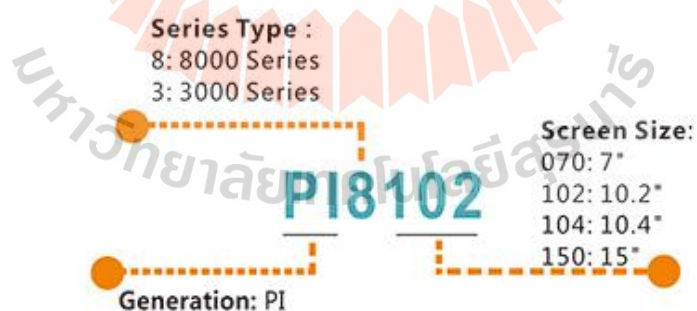
รูปที่ ก.8 การเขียนโปรแกรมและดาวน์โหลด PLC

ก.2 จอวีคอน เอชเอ็มไอ (Wecon PI Series High Resolution HMI)

จอ Wecon PI8070 PI8102 และ PI804 เป็นจอ HMI ในตระกูล PI Series ของแบรนด์วีคอน (WECON) ที่ถูกออกแบบให้สามารถทำงานในฟังก์ชันต่าง ๆ เช่น การแสดงปุ่มคำสั่ง แสดงกราฟ การทำงานของระบบ แสดงรูปภาพและวิดีโอ เป็นต้น เพื่อให้สามารถรองรับการทำงานต่าง ๆ ของระบบที่ใช้งาน แสดงดังรูปที่ ก.9-ก.10 และตารางที่ ก.4-ก.5



รูปที่ ก.9 จอ Wecon PI Series



รูปที่ ก.10 ข้อมูลจากจอ Wecon PI Series

ตารางที่ ก.4 รายละเอียดโดยย่อของจอ Wecon PI Series

ฮาร์ดแวร์	CPU 600MHz, 2GM FLASH, 128M DDII RAM
ซีพียู	Cortex A8 720 เมกะเฮิร์ตซ์
แพลตฟอร์ม	ลินุกซ์QT

ตารางที่ ก.4 รายละเอียดโดยย่อของจอ Wecon PI Series (ต่อ)

ขนาดจอแสดงผล	7 10.2 และ 10.4 นิ้ว
การแสดงผล	LCD, 16,000k colors
การสื่อสาร	RS232/RS485/RS422 (5 COM ports available)
หน่วยความจำ	Support Date Storage, SD Card, U Disk
การเข้าถึงการใช้งานจอ	Mobile Apps supported, Cloud monitor supported, Multiple users supported, communication encrypted.
คู่มือรอง	IP65 (ด้านหน้า)
ซอฟต์แวร์	PIStudio



การใช้รูปภาพ

มีคลังรูปภาพภายในจอมากถึง 1000
รูป สามารถใช้รูป 3D ได้ และใช้
ภาพเคลื่อนไหวได้



รองรับภาษามากถึง 8 ภาษา

เช่น ภาษาจีน อังกฤษ เป็นต้น



สามารถใช้การสื่อสารแบบต่าง ๆ
เช่น CAN-bus Ethernet Rs-232
USB เป็นต้น



สามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่าง ๆ
ได้

รูปที่ ก.11 ตัวอย่างการทำงานต่าง ๆ ของจอ Wecon PI Series

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลจำเพาะของจอ Wecon PI Series

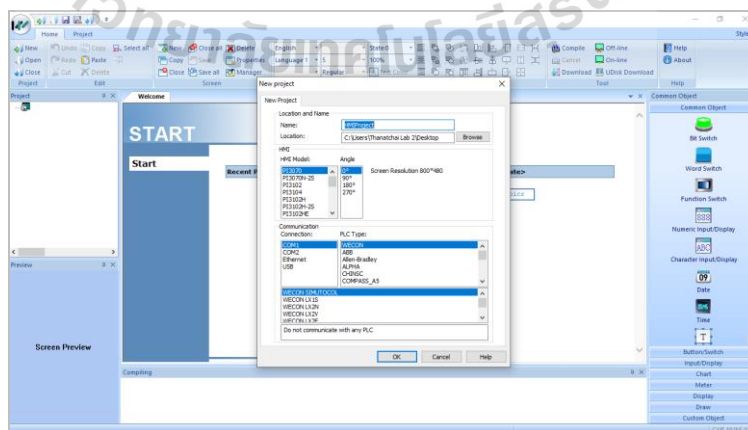
รายการ		PI8070	PI8102	PI8104
OS		ลินุกซ์		
CPU		Cortex A8 720เมกะเฮิร์ตซ์		
หน้าจอสัมผัส		ความแม่นยำสูงสี่สาย		
แสดง	ขนาดหน้าจอ	7นิ้ว	10.2นิ้ว	10.4นิ้ว
	ความละเอียด	800*480	800*480	800*600
	ความสว่าง	300 cd/m ²	300 cd/m ²	300 cd/m ²
	สัญญา	500:1		
	แสงไฟ	LED		
	Backlightชีวิต	50,000ชั่วโมง		
	สี	16,000พิกเซล(24bit)	260พิกเซล(18bit)	260พิกเซล(18bit)
การจัดเก็บข้อมูล	แฟลช	4กิกะไบต์EMMC		
	RAM	DDR III 512เมกะไบต์		
	การ์ดSD	เข้ากันได้		
พอร์ต	พอร์ตUSB	โฮสต์USB : USB 2.0x1; ลูกค้าUSB : USB 2.0x1		
	พอร์ตอนุกรม	COM1 : RS232, RS422/RS485		
		COM1 : RS232, RS422/RS485		
		COM3 : RS485		
อีเทอร์เน็ต	PI 8070N	PI 8102N	PI 8104N	
พลังงาน	แหล่งจ่ายไฟ	24โวลต์DC (12 ~ 28โวลต์DC)		
	พลังงาน	< 10วัตต์	< 10วัตต์	< 10วัตต์
	แยกอำนาจ	ในตัวแหล่งจ่ายไฟแยก		
	ทนต่อแรงดันไฟฟ้า	500โวลต์AC (< 1นาทีก)		
	ความต้านทานของฉนวน	> 20MΩ 500VDC		
	ต้านทานแผ่นดินไหว	10 ~ 25 เฮิร์ต (X, Y, Zทิศทาง2กรัม/30นาทีก)		

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลจำเพาะของจอ Wecon PI Series (ต่อ)

มิติ	เซลล์	ABS		
	ขนาด(มม)	201.0*146.6*36.5	272.0*190.5*41.4	299.0*222.0*54.0
	การติดตั้งขนาด (มม)	192.0*วัตต์* 138.0	260.0*วัตต์* 179.0	288.0*วัตต์* 212.0
	น้ำหนัก(กก.)	0.6	1.2	1.9
		H	H	H
สภาพแวดล้อม	คุ้มครอง	IP65 (ด้านหน้า)	IP65 (ด้านหน้า)	IP65 (ด้านหน้า)
	อุณหภูมิ	การจัดเก็บ : -30 & #8451; 70 ~ 8451 °C; การทำงาน : -10และ#8451; ~ 60 & #8451;		
	ความชื้น	10 ~ 90% RH		
การรับรองCE		EN61000-6-2: 2005, EN61000-6-4:2007มาตรฐาน		
การรับรองของFCC		FCCคลาส		

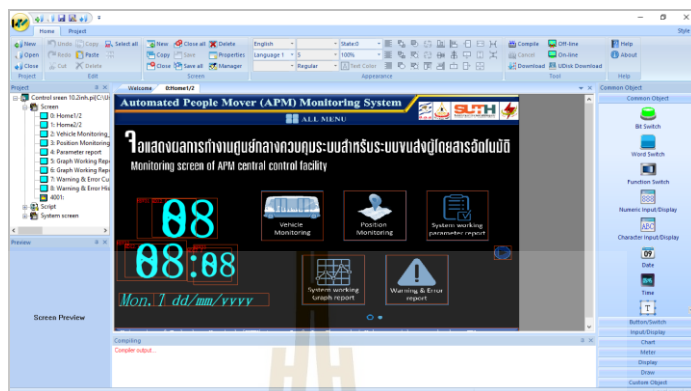
สำหรับการใช้งานจอ Wecon PI Series กับระบบใด ๆ ต้องมีการเขียนโปรแกรมควบคุมและกราฟฟิคตกแต่ง เพื่อให้ผู้ใช้งานระบบสามารถเข้าถึงการใช้งานได้ง่ายที่สุด ในการตั้งค่าและเขียนโปรแกรมให้กับ Wecon PI Series จะสามารถดำเนินการโดยใช้ PISudio ดังรายละเอียดขั้นตอนต่อไปนี้

1. เปิดโปรแกรม PISudio จากนั้นทำการสร้างโปรเจกต์และตั้งค่าการใช้งานจอในรูปแบบต่าง ๆ เช่น รุ่นจอ ไอพีแอดเดรส พารามิเตอร์ เป็นต้น แสดงดังรูปที่ ก.12



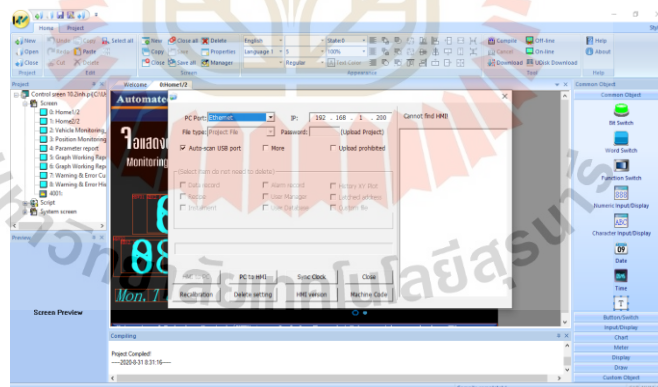
รูปที่ ก.12 หน้าต่างเริ่มต้นของโปรแกรม PISudio

2. ทำการเขียนโค้ดและวาดกราฟฟิคลงในโปรแกรมตามรูปแบบหน้าจอที่ออกแบบไว้ แสดงดังรูปที่ ก.13



รูปที่ ก.13 การเขียนจอ Wecon PI Series ในโปรแกรม PISudio

3. ทำการ Compile และ Download โปรเจกต์ทั้งหมดลงไปนจอ Wecon PI Series สำหรับนำไปใช้งาน แสดงดังรูปที่ ก.14



รูปที่ ก.14 การ Compile และ Download โปรเจกต์ลงในจอ Wecon PI Series

ก.3 อินเวอร์เตอร์ FRN0.75C1S-4A (FUJI INVERTER FRENIC MINI C1 SERIES FRN0.75C1S-4A)

อินเวอร์เตอร์ FRN0.75C1S-4A เป็นอินเวอร์เตอร์ ในตระกูล FRENIC-Mini ของแบรนด์ฟูจิ อิเล็กทริก (Fuji Electric) ถูกออกแบบขึ้นมาสำหรับการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า ใบบัด และ

อุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ ที่ต้องใช้ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแหล่งจ่าย ซึ่งสามารถควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าได้หลายรูปแบบ เช่น ควบคุมด้วยการปรับตัวโวลุ่ม ควบคุมด้วยการกรอกค่าผ่านคีย์แพท เป็นต้น แสดงดังรูปที่ ก.15-ก.16 และตารางที่ ก.6



รูปที่ ก.15 อินเวอร์เตอร์ FRN0.75C1S-4A



รูปที่ ก.16 ปุ่มควบคุมอุปกรณ์ของอินเวอร์เตอร์ FRN0.75C1S-4A

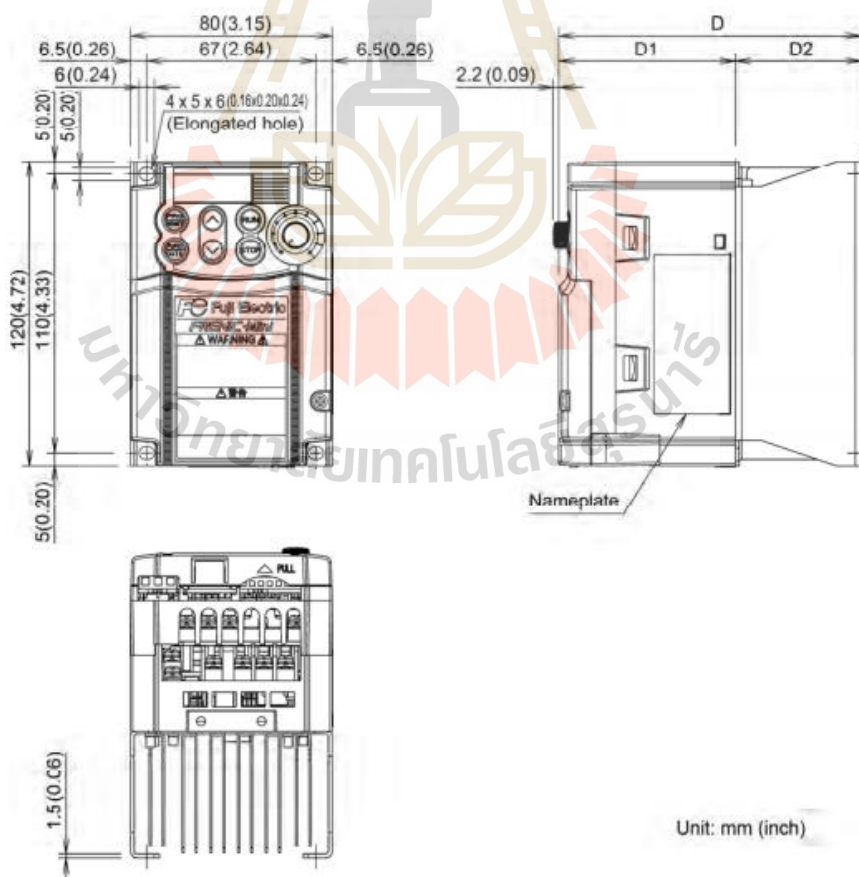
ตารางที่ ก.6 รายละเอียดโดยย่อของอินเวอร์เตอร์ FRN0.75C1S-4A

Design for system	0.75KW 380V 1แรง (งานเบา)
Source : 3PH	380-480V 50/60Hz 3.1A
Output frequency	1.9kVA 380-480V 0.1-400Hz 2.5A

ตารางที่ ก.6 รายละเอียดโดยย่อของอินเวอร์เตอร์ FRN0.75C1S-4A (ต่อ)

Capacity range	0.1-3.7kW
Frequency can be adjusted easily by setting potentiometer provided as standard.	
Built-in RS-485 communications ports (RJ-45) as standard.	
Overload capability : 150% – 1 min, 200% – 0.5 sec.	
Energy-saving function, PID function	
Enable to be applicable for various application.	
Synchronous motor control function.	
Easy operation and maintenance.	











โดยขนาดของอินเวอร์เตอร์ FRN0.75C1S-4A จะมีขนาดเล็เหมาะสำหรับนำไปติดตั้งใช้งานในระบบที่มีข้อจำกัดด้านพื้นที่ เช่น ภายในกล่องวงจร เป็นต้น แสดงดังรูปที่ ก.17



รูปที่ ก.17 ขนาดอินเวอร์เตอร์ FRN0.75C1S-4A

การใช้งานอินเวอร์เตอร์นี้ต้องมีการตั้งและเชื่อมอินเวอร์เตอร์เข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ ที่ติดตั้งในระบบสำหรับรอใช้งาน แสดงดังตารางที่ ก.7 และรูปที่ ก.18-ก.19

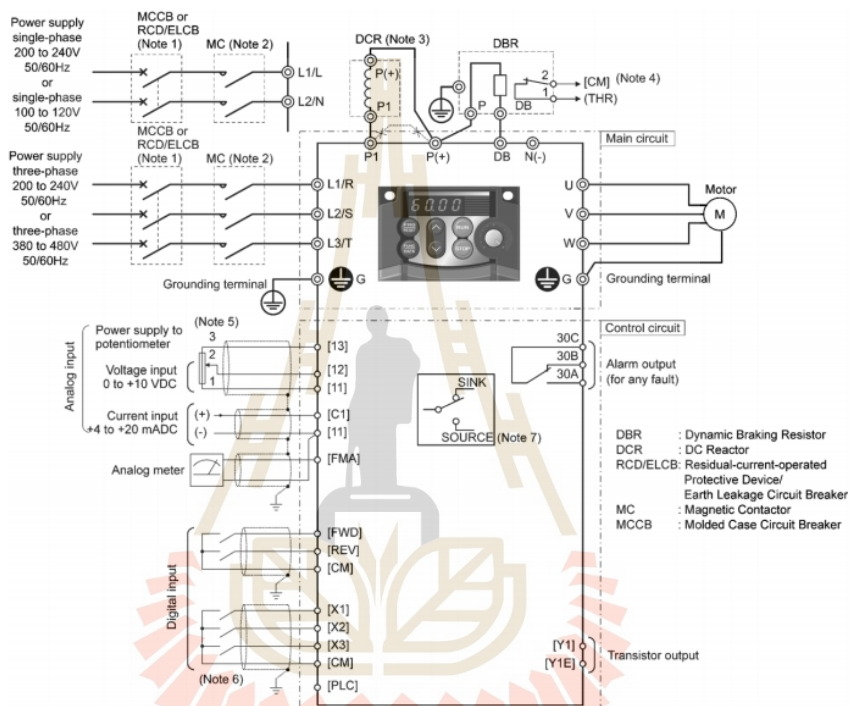
ตารางที่ ก.7 รายละเอียดการตั้งค่าอินเวอร์เตอร์ FRN0.75C1S-4A

Code	Name	Data setting	Incremental unit	Unit
F00	Data Protection	0: Disable data protect (Function code data can be edited) 1: Enable data protection (Function code data cannot be edited)	-	-
F01	Frequency Command 1	0: Enable the  and  keys on the keypad 1: Enable the voltage input to terminal [12] 2: Enable the current input to terminal [C1] 3: Enable the sum of voltage and current inputs to terminals [12] and [C1] 4: Enable the built-in potentiometer (POT)	-	-
F02	Running/ Stopping and Rotational Direction	0: Enable the  and  keys on the built-in keypad to run and stop motor (The (FWD) or (REV) command should be ON for forward or reverse rotation.)	-	-
F02	Running/ Stopping and Rotational Direction	0: Enable the  and  keys on the built-in keypad to run and stop motor (The (FWD) or (REV) command should be ON for forward or reverse rotation.) 1: Enable the external signal command (FWD) or (REV) command to run motor 2: Enable the  and  keys on the built-in keypad to run/stop motor forward 3: Enable the  and  keys on the built-in keypad to run/stop motor reverse	-	-

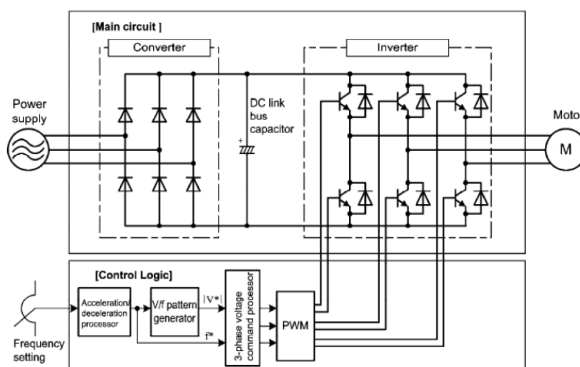
ตารางที่ ก.7 รายละเอียดการตั้งค่าอินเวอร์เตอร์ FRN0.75C1S-4A (ต่อ)

Code	Name	Data setting	Incremental unit	Unit
F03	Maximum Frequency	25.0 to 400.0	0.1	Hz
F04	Base Frequency	25.0 to 400.0	0.1	Hz
F05	Rated Voltage (base frequency)	0: Output voltage in line with variance in input voltage 80 to 240: Output voltage AVR-controlled 160 to 500: Output voltage AVR-controlled *3 (Note 2)	1	V
F07	Acceleration Time 1	0.00 to 3600 Note : Acceleration time is ignored at 0.00. (External gradual acceleration pattern)	0.01	S
F08	Deceleration Time 1	0.00 to 3600 Note : Deceleration time is ignored at 0.00. (External gradual deceleration pattern)	0.001	s
F09	Torque Boost	0.0 to 20.0 (The set voltage at base frequency for F05 is 100%) Note : This setting is effective for auto torque boost/auto energy saving operations specified by function code F37 (= 0, 1, 3, or 4).	0.1	%
F10	Electronic Thermal Overload for motor protection (Select the motor property)	1: For general-purpose motors with built-in self-cooled fans 2: For motors with forced-cooled fans	-	-

Code	Name	Data setting	Incremental unit	Unit
F11	(Overload detection level)	0.0 (Disabled) 1 to 135% of rated current (allowable continuous load current) of the inverter	0.01	A




รูปที่ ก.18 การเชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์ FRN0.75C1S-4A



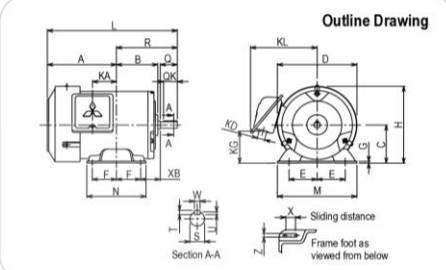
รูปที่ ก.19 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าของอินเวอร์เตอร์ FRN0.75C1S-4A



ก.4 มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส SF-JR 1HP 4P IP44 (MITSUBISHI SUPER LINE SERIES INDUCTION MOTOR Model Code : SF-JR 1HP 4P IP44)

Model Code : SF-JR 1HP 4P IP44
MITSUBISHI SUPER LINE SERIES INDUCTION MOTOR



Outline Drawing




Specifications		* The perpendicular variation of tolerance for the shaft center is ± 0.5	
Output Power HP (kW)	1 (0.75)		
Phase	3 Phase		
Pole	4 Pole		
Frame Number	80M		
Degrees of Protection	IP 44		
Enclosure Construction	Totally-enclosed Fan-cooled		
Thermal Class	Class B (130 °C)		
Alignment	Horizontal		
Frame Material	Steel plate		
Power Transmission	Direct-couple or Belt Driven		
Direction of Rotation	Counterclockwise (CCW) viewed from shaft-end side		
Connection Type	Lead Wire (6 Leads)		
Coating Colour	Munsell N5.5 (Gray)		
Conformed Standard	IEC 60034-1 & JEC-2137-2000		
Voltage & Frequency	LT Type 220/380~415V 50Hz 220/440V 60Hz		

Motor													
A	B	C*	D	E	F	G	H	L	M	N	X	XB	Z
122	95	80	166	62.5	50	3.2	166	262	160	125	15	50	9

Terminal Box				Shaft End						
KA	KG	KD	KL	Q	QK	R	S	T	U	W
39.5	63	27	145	40	32	140	19	6	6	3.5

Bearing No.		Approximated Weight (kg)	Approximated Packing Dimensions (LxWxH)	Gross Weight (kg)
Drive End	Opposite			
6204ZZ	6203ZZ	11	315 x 270 x 206	11.7

Connection & Connection Diagram

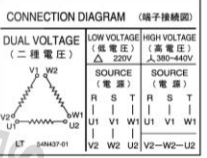


Lead wire

Connection

CONNECTION DIAGRAM (端子接続図)

DUAL VOLTAGE (二種電圧)
LOW VOLTAGE (低電圧) Δ 220V
HIGH VOLTAGE (高電圧) Δ 380-440V



SOURCE (電源) SOURCE (電源)
R S T R S T
U V W U V W
U1 V1 W1 U1 V1 W1
U2 V2 W2 U2 V2 W2

LT 248437-01

Connection Diagram

Circumstance Conditions	
Ambient Temperature	-20 ~ +40°C
Ambient Humidity	95% RH or less
Operating Altitude	Less than 1,000m above sea level
Environment	No bursting / erosive gas or vapor

Motor Characteristics

Type	Hz	V	50% Load			75% Load			100% Load			Torque(%)		Is (A)	Inertia GD ² (kg-m ²)	
			(A)	Eff(%)	PF(%)	(A)	Eff(%)	PF(%)	(A)	Eff(%)	PF(%)	Speed (r/min)	Torque (kg-m)			Ts
LT	50	220	2.19	0.74	0.61	2.61	0.77	0.73	3.14	0.78	0.80	1400	0.520	317	275	18.1
		380	1.26	0.74	0.61	1.51	0.78	0.73	1.81	0.78	0.80	1400	0.520	317	275	10.5
		415	1.44	0.70	0.52	1.62	0.75	0.65	1.86	0.76	0.74	1410	0.520	380	328	11.3
LT	60	220	1.84	0.77	0.69	2.32	0.80	0.80	2.91	0.80	0.85	1700	0.430	263	237	15.6
		440	1.20	0.70	0.58	1.40	0.75	0.70	1.65	0.76	0.78	1720	0.420	355	322	10.5

MITSUBISHI ELECTRIC AUTOMATION (THAILAND) CO., LTD.
Specifications subject to change without notice.

รูปที่ ก.20 เอกสารที่ระบุข้อมูลเบื้องต้นของอินเวอร์เตอร์ FRN0.75C1S-4A

ก.5 เครื่องมือวัดพลังงานไฟฟ้า (Energy Meter EasyLogic รุ่น METSEPM2230 จาก Schneider Electric)

Energy Meter EasyLogic รุ่น METSEPM2230 หรือ PM2230 จากแบรนด์ชไนเดอร์ อิเล็กทริก (Schneider Electric) แสดงดังรูปที่ ก.21 เป็นเครื่องมือวัดพลังงานไฟฟ้าหรือวัดคัมมิเตอร์ตระกูล EasyLogic ที่สามารถวัดคุณภาพไฟฟ้าต่าง ๆ ได้ เช่น แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า ฮาร์โมนิกรวม THD เป็นต้น แสดงดังตารางที่ ก.8



รูปที่ ก.21 วัดคัมมิเตอร์ PM2230

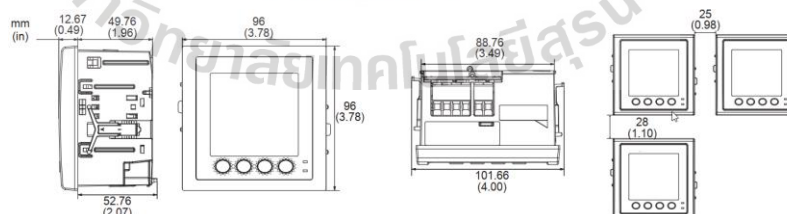
ตารางที่ ก.8 ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่วัดคัมมิเตอร์ PM2230 สามารถวัดได้

Current	1.Per-phase and 3 phase average 2.Calculated neutral current
Voltage	1.V L-N - per-phase and 3 phase average 2.V L-L - per-phase and 3 phase average
Power Factor	Per phase and 3 phase total
Frequency	-
Power	1.Active power (kW) - Phase wise and total 2.Apparent power (kVA) - Phase wise and total 3.Reactive power (kVAR) - Phase wise and total
3 Phase unbalance	-
Individual Harmonics	-

ตารางที่ ก.8 ค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าที่วัดด้วยมิเตอร์ PM2230 สามารถวัดได้ (ต่อ)

Demand parameters (kW, kVA, kVAR, I)	<ol style="list-style-type: none"> 1.Last demand 2.Present demand 3.Predictive demand 4.Peak demand : Timestamp for peak demand⁺¹
Energy : kWh, kVAh, kVARh (4 Quadrant)	<ol style="list-style-type: none"> 1.Delivered (Import / Forward) 2.Received (Export / Reverse)
THD	<ol style="list-style-type: none"> 1.Voltage L-N 2.Voltage L-L 3.Current per phase
Min / Max with timestamp	<ol style="list-style-type: none"> 1.V L-L average 2.V L-N average 3.Current average 4.Frequency 5.Active power, Total 6.Apparent power, Total 7.Reactive power, Total 8.Power factor, Total

ด้วยขนาดและความสามารถในการทำงานของวัดด้วยมิเตอร์ PM2230 ที่ครบครันในทุก ๆ ด้าน การดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เลือกอุปกรณ์หลักในการวัดค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ ก.22



รูปที่ ก.22 ขนาดของวัดด้วยมิเตอร์ PM2230

นอกจากตัวอย่างอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อ ก.1-ก.5 ข้างต้น ภายในระบบชุดจำลองระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ยังมีการใช้อุปกรณ์อื่น ๆ แต่ในที่นี้ได้หยิบยกข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ไฟฟ้าหลักที่มีความซับซ้อนหรือไม่มีการใช้ในงานทั่วไปเท่านั้น



ภาคผนวก ข

ประมวลภาพการดำเนินงานวิจัยวิทยานิพนธ์

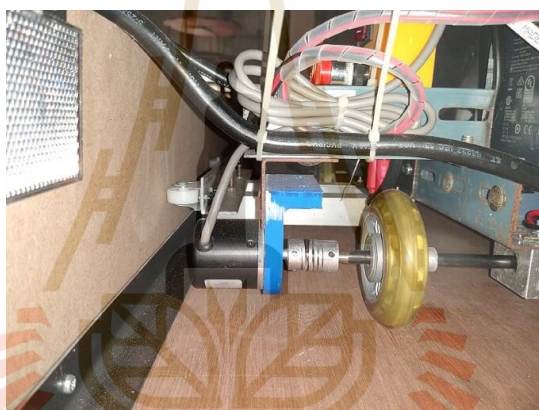
ข.1 การออกแบบและสร้างชุดจำลองระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบขนส่ง
ผู้โดยสารอัตโนมัติ



รูปที่ ข.1 ภาพรวมชุดจำลองระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถสำหรับ APM ที่สร้างขึ้น



รูปที่ ข.2 การติดตั้งลื่อนำทางแบบคานข้างของรถ



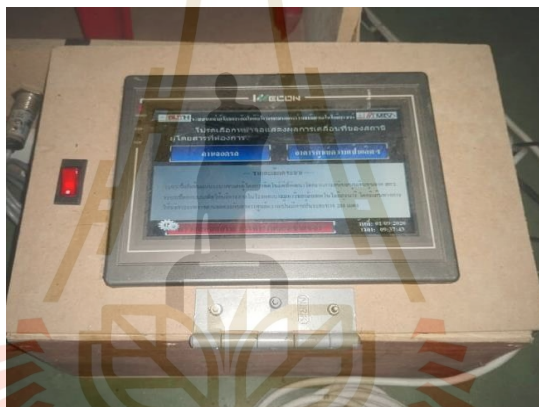
รูปที่ ข.3 การติดตั้งเอ็นโค้ดเดอร์สำหรับวัดความเร็วของรถ



รูปที่ ข.4 การติดตั้งมอเตอร์ไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถ



รูปที่ ข.5 ภาพรวมชุดจำลองระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่สำหรับระบบ APM ที่สร้างจริง



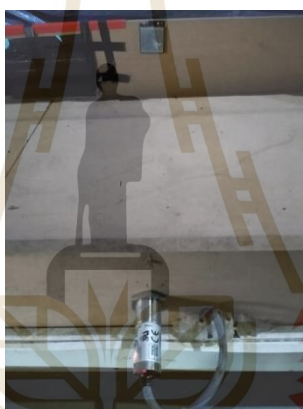
รูปที่ ข.6 กล้องวงจรและจอแสดงผลที่ใช้จำลองสถานีผู้โดยสาร



รูปที่ ข.7 การติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าภายในกล่องวงจรจำลองสถานีผู้โดยสาร



รูปที่ ข.8 ลักษณะการติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งตามทางวิ่งของรถ

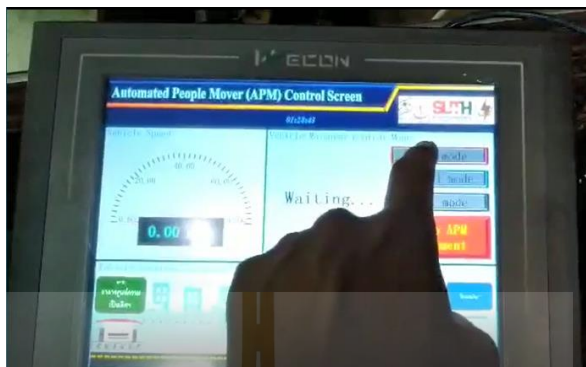


รูปที่ ข.9 ลักษณะการติดตั้งแผ่นสะท้อนสัญญาณเซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่ง

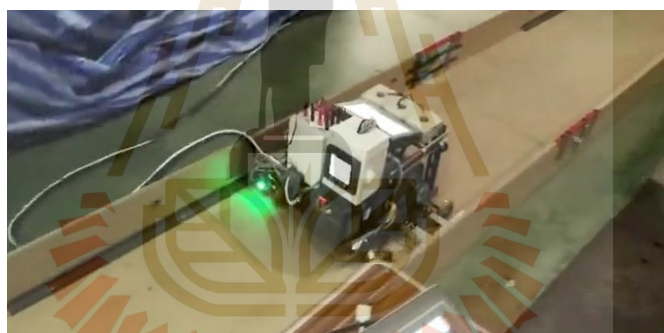


รูปที่ ข.10 ภาพรวมชุดจำลองศูนย์กลางควบคุมระบบสำหรับระบบ APM ที่สร้างจริง

ข.2 การทดสอบการทดสอบโหมดการควบคุมการเดินรถแบบอัตโนมัติ



รูปที่ ข.11 การเลือกโหมดการควบคุมการเดินรถแบบอัตโนมัติ

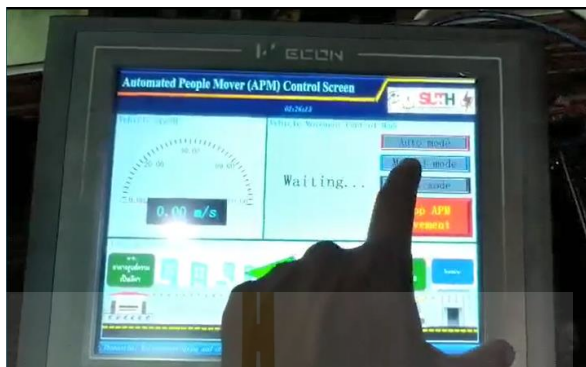


รูปที่ ข.12 การเคลื่อนที่ของรถด้วยโหมดการควบคุมการเดินรถแบบอัตโนมัติ

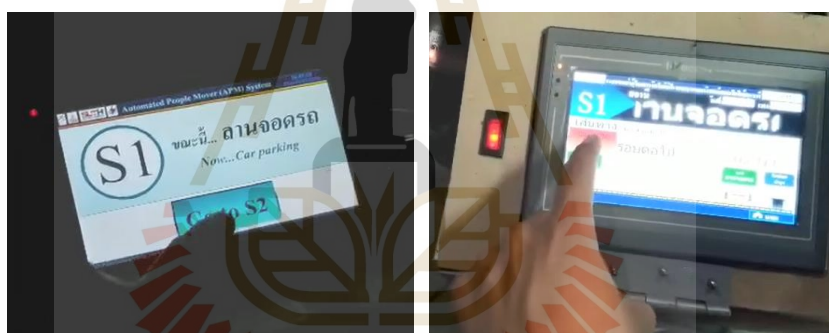


รูปที่ ข.13 การเข้าจอดของรถ ณ สถานีผู้โดยสารแต่ละสถานี

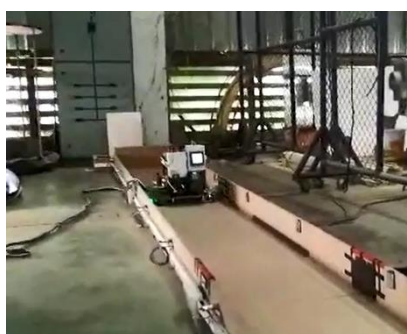
ข.3 การทดสอบโหมดการควบคุมการเดินรถแบบปุ่มคำสั่งที่สถานีผู้โดยสาร



รูปที่ ข.14 การเลือกโหมดการควบคุมการเดินรถแบบปุ่มคำสั่งที่สถานีผู้โดยสาร

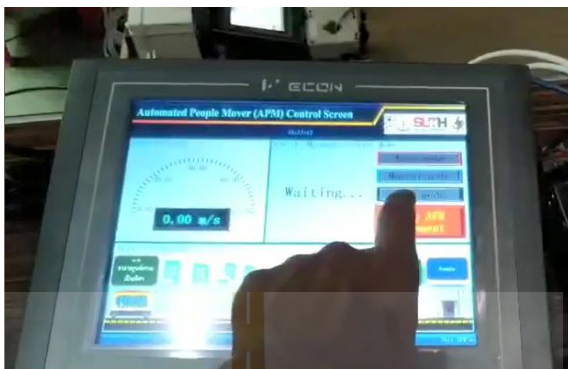


รูปที่ ข.15 การควบคุมรถด้วยการกดปุ่มคำสั่งบนรถและสถานีผู้โดยสาร



รูปที่ ข.16 การเคลื่อนที่ของรถด้วยโหมดการควบคุมการเดินรถแบบปุ่มคำสั่งที่สถานีผู้โดยสาร

ข.4 การทดสอบโหมดการควบคุมการเดินรถแบบทดสอบการขับเคลื่อน



รูปที่ ข.17 การเลือกโหมดการควบคุมการเดินรถแบบทดสอบการขับเคลื่อน

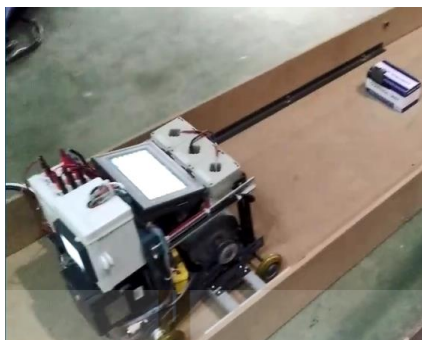


รูปที่ ข.18 การควบคุมรถด้วยการกดปุ่มคำสั่งบนหน้าจอควบคุมโหมดการทำงานของระบบ

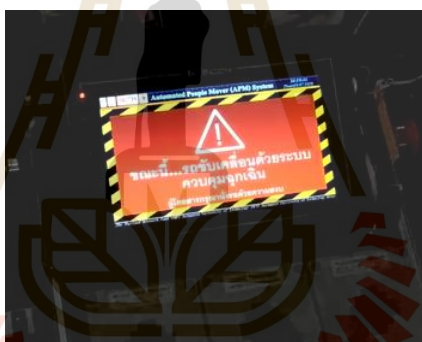


รูปที่ ข.19 การเคลื่อนที่ของรถด้วยโหมดการควบคุมการเดินรถแบบทดสอบการขับเคลื่อน

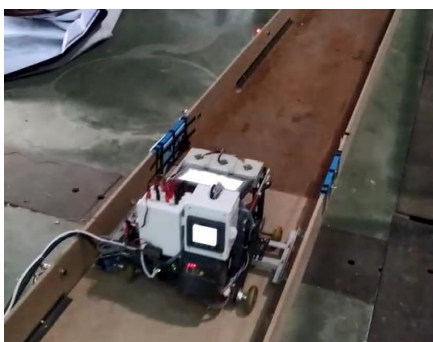
ข.5 การทดสอบโหมดการควบคุมการเดินรถแบบฉุกเฉินป้องกันการชนสิ่งกีดขวาง



รูปที่ ข.20 การจำลองสิ่งกีดขวางบนทางวิ่งของรถ



รูปที่ ข.21 กรณีสิ่งกีดขวางบนทางวิ่งนานเกิน 10 วินาที รถจะเคลื่อนที่กลับสถานีผู้โดยสารต้นทาง



รูปที่ ข.22 กรณีสิ่งกีดขวางบนทางวิ่งไม่ถึง 10 วินาที รถจะเคลื่อนที่ต่อไปสถานีผู้โดยสารปลายทาง

ข.6 การทดสอบชุดจำลองระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่สำหรับระบบ APM



รูปที่ ข.23 จอแสดงผลตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ เมื่อรูดวงผลเซนเซอร์ตรวจจับ ณ จุดต่าง ๆ



รูปที่ ข.24 จอแสดงการแจ้งเตือน เมื่อมีวัตถุใด ๆ มาบังการรับ/ส่งสัญญาณระหว่างเซนเซอร์ตรวจจับกับแผ่นสะท้อน





ภาคผนวก ค

โปรแกรมแลตเตอร์สำหรับควบคุมการทำงานของ PLC

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ค.1 รายการอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในการโปรแกรม

ตารางที่ ค.1 รายการอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในการโปรแกรม

No.	Object	Type	Reference	Description	Power supplied to the IO bus
1		Controller	TM221CE16R	<ul style="list-style-type: none"> - 9 digital inputs - 7 relay outputs (2A) - 2 analog inputs - 1 serial line port - 1 Ethernet port - 100-240 Vac power supply controller. - removable terminal blocks. 	5V:325 mA / 24V:120 mA
2		Module	TM3AQ4/G	<ul style="list-style-type: none"> - 4 analog outputs (+10 V, 0-10V, 0-20 mA, 4-20mA) - 12 bits - removable terminal blocks. 	5V:60 mA / 24V:0 mA

ค.2 การตั้งค่าพารามิเตอร์ภายในระบบของ TM221CE16R

ตารางที่ ค.2 การตั้งค่าพารามิเตอร์ Digital Inputs ของ TM221CE16R

Used	Address	Symbol	Used by
✓	%I0.0	-	%HSC0
	%I0.1	-	-
	%I0.2	-	-
	%I0.3	-	-
	%I0.4	-	-

ตารางที่ ค.2 การตั้งค่าพารามิเตอร์ Digital Inputs ของ TM221CE16R (ต่อ)

	%I0.5	-	-
✓	%I0.6	FWD_EMERGENCY_SENSOR	-
✓	%I0.7	BWD_EMERGENCY_SENSOR	-
	%I0.8	-	-

ตารางที่ ค.3 การตั้งค่าพารามิเตอร์ Digital Outputs ของ TM221CE16R

Used	Address	Symbol	Used by
✓	%Q0.0	FWD	%HSC0
✓	%Q0.1	BWD	-
	%Q0.2	-	-
	%Q0.3	-	-
	%Q0.4	-	-
✓	%Q0.5	-	-
	%Q0.6	-	-

ตารางที่ ค.4 การตั้งค่าพารามิเตอร์ High Speed Counters ของ TM221CE16R

Used	Address	Type	Time Window	Pulse Input
✓	%HSC0	Frequency Meter	1s	%I0.0
	%HSC1	-	-	-
	%HSC2	-	-	-
	%HSC3	-	-	-

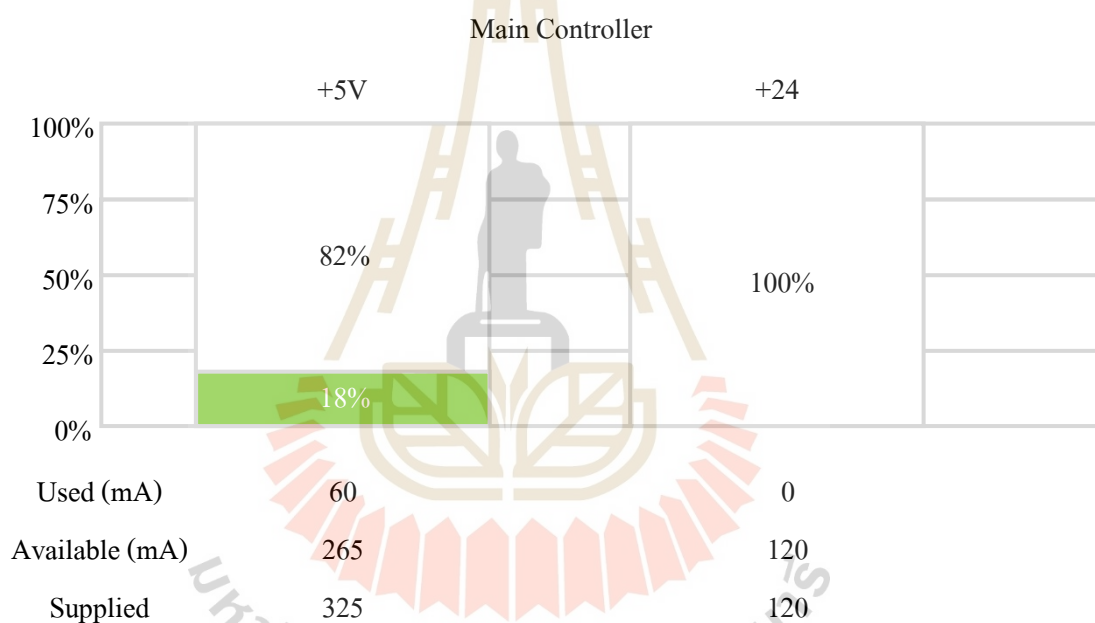
ตารางที่ ค.5 การตั้งค่าพารามิเตอร์ Ethernet ของ TM221CE16R

Title	Detail
Device name	M221
IP Mode	Fixed
IP address	192.168.100.12
Subnet mask	255.255.255.0

ตารางที่ ค.5 การตั้งค่าพารามิเตอร์ Ethernet ของ TM221CE16R (ต่อ)

Gateway address	0.0.0.0
Transfer Rate	Auto
Security Parameters	Programming protocol enabled Auto discovery protocol enabled Modbus server enabled EtherNet/IP protocol enabled

ตารางที่ ค.6 การใช้ไฟฟ้าของ I/O Bus ภายใน TM221CE16R



ตารางที่ ค.7 การตั้งค่าพารามิเตอร์ Timers ของ TM221CE16R

Used	Address	Symbol	Type	Time Base	Preset
✓	%TM0	STATION_S1_STOP_TIME	TON	1s	5
✓	%TM1	STATION_S2_STOP_TIME	TON	1s	5
✓	%TM2	FWD_EMERGENCY_STOP_TRICK	TP	1s	15
✓	%TM3	BWD_EMERGENCY_STOP_TRICK	TP	1s	15
✓	%TM4	FWD_EMERGENCY_STOP_TIME	TON	1s	10
✓	%TM5	BWD_EMERGENCY_STOP_TIME	TON	1s	10

ตารางที่ ค.8 การตั้งค่าพารามิเตอร์ Analog Outputs ของ TM3AQ4/G

Used	Address	Type	Scope	Range
✓	%QW1.0	0 - 10 V	Normal	0-10000
	%QW1.1	-	-	-
	%QW1.2	-	-	-

ค.3 โปรแกรมแลตเตอร์ไดอะแกรมของ TM221CE16R ที่ใช้ควบคุมชุดจำลอง

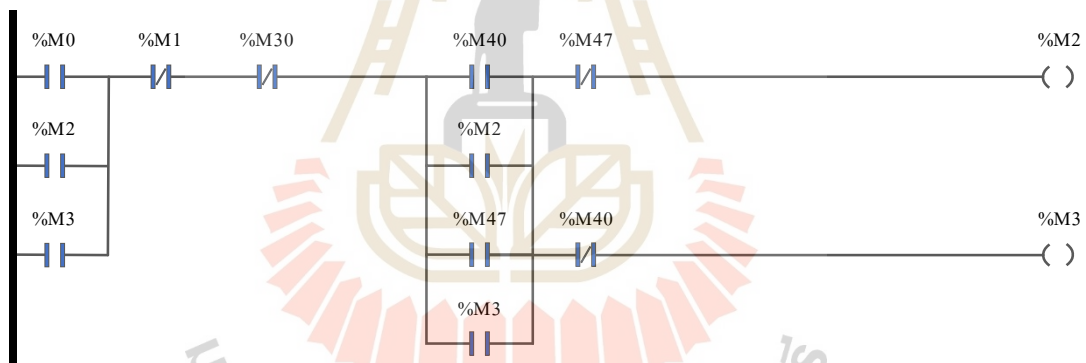
Rung0 - RESET_HZ_NO_MOVEMENT

Comment : Reset working frequency when car park at Station.



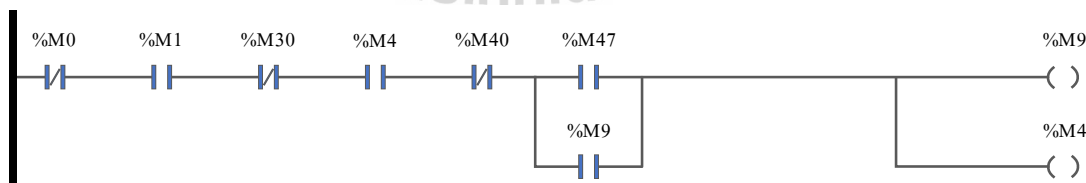
Rung1 - AUTO_MOVEMENT_S1_TO_S2_AND_S2_TO_S1

Comment : Auto control S1=>S2 and S2=>S1 drive.



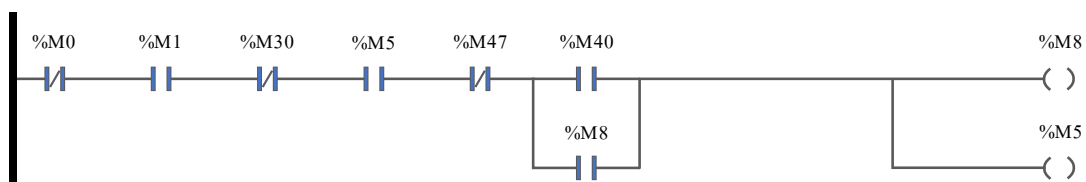
Rung2 - MANUAL_CALL_APM_TO_S1_SWITCH

Comment : Call APM to S1 (from S2=>S1).



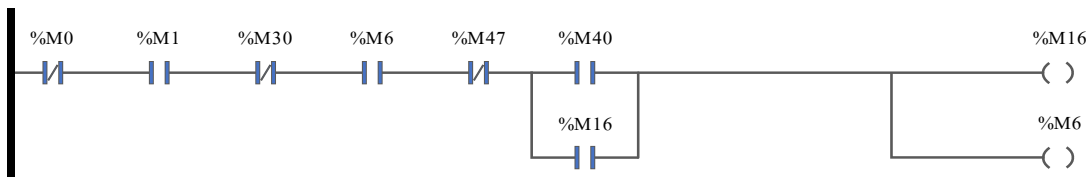
Rung3 - MANUAL_CALL_APM_TO_S2_SWITCH

Comment : Call APM to S1 (from S1=>S2).



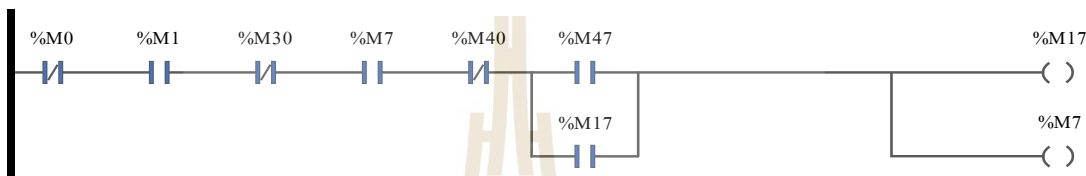
Rung4 - MANUAL_MOVEMENT_TO_S2

Comment : Command movement from S1=>S2.



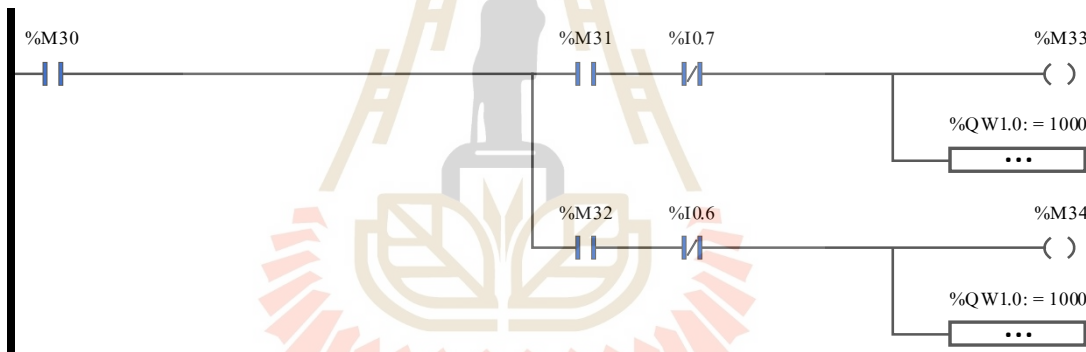
Rung5 - MANUAL_MOVEMENT_TO_S1

Comment : Command movement from S2=>S1.



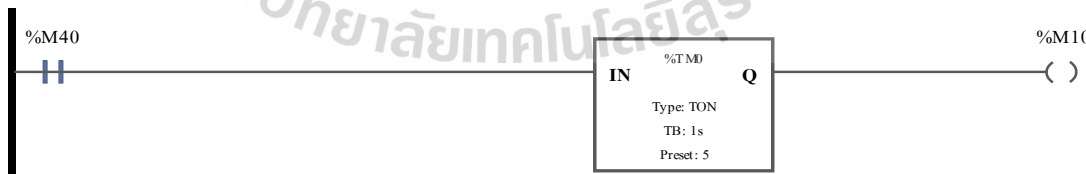
Rung6 - TEST_MOVEMENT_S1_TO_S2_AND_S2_TO_S1

Comment : Command movement from S2=>S1.



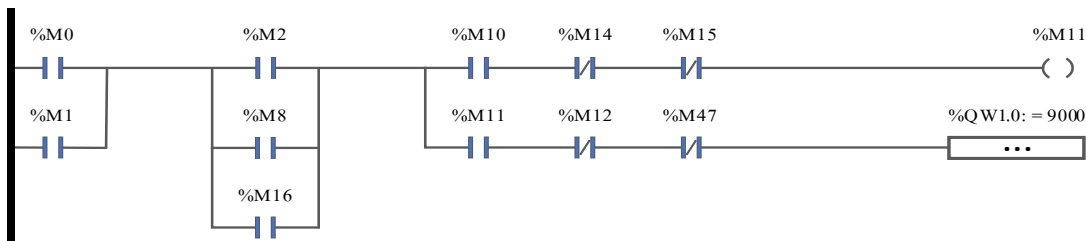
Rung7 - S1_TO_S2_MOVEMENT (1)

Comment : Control S1 to S2 movement (count S1 stop time).



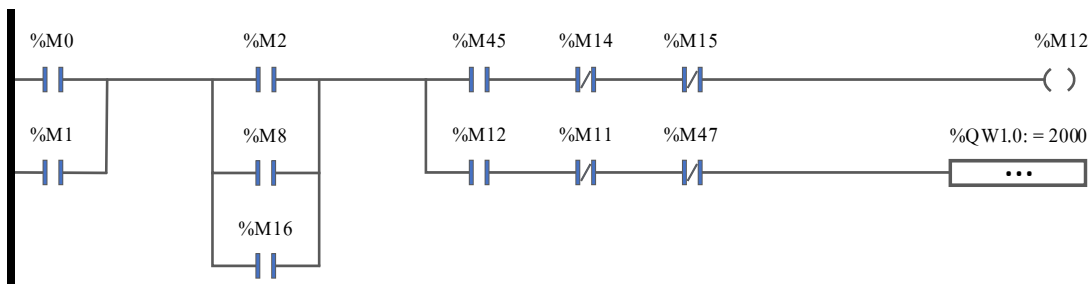
Rung8 - S1_TO_S2_MOVEMENT (2)

Comment : Control S1 to S2 movement (accelerate from 0 to max speed).



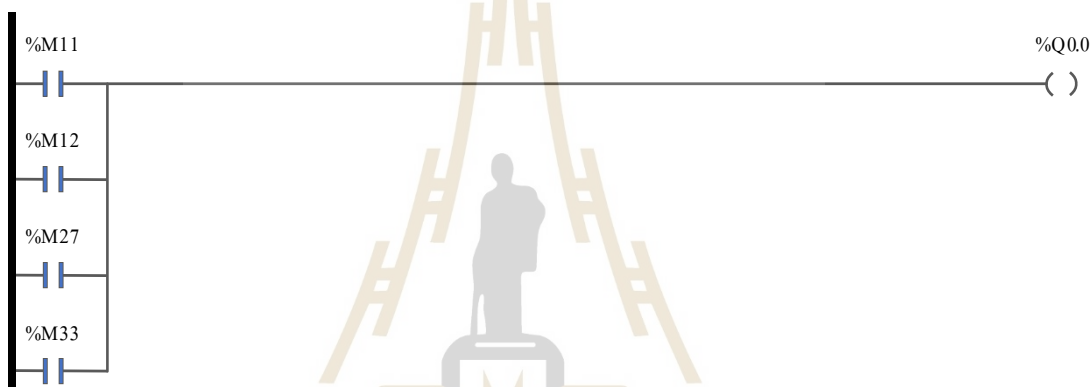
Rung9 - S1_TO_S2_MOVEMENT (3)

Comment : Control S1 to S2 movement (reduce from max to lower speed).



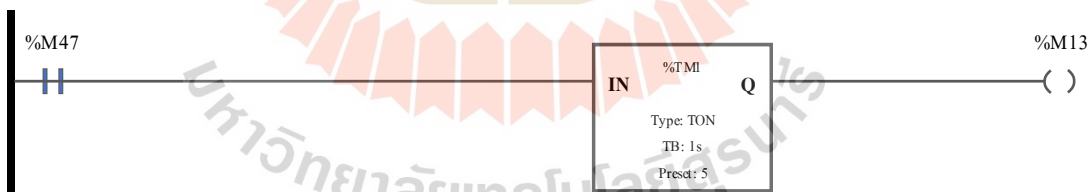
Rung10 - S1_TO_S2_MOVEMENT (4)

Comment : Control S1 to S2 movement (trick S1 to S2 drive).



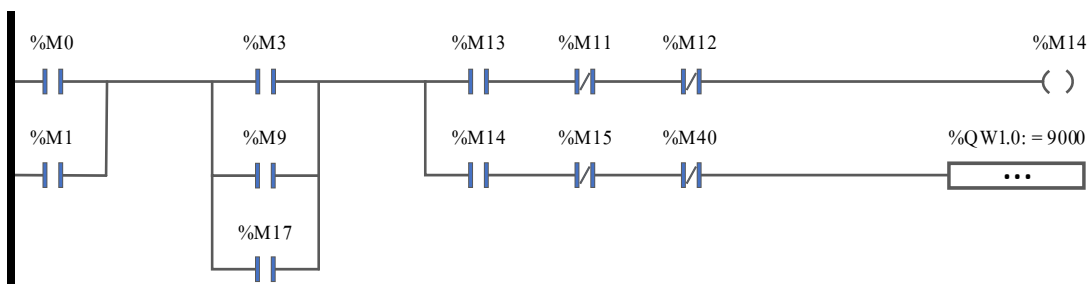
Rung11 - S2_TO_S1_MOVEMENT (1)

Comment : Control S2 to S1 movement (count S2 stop time).



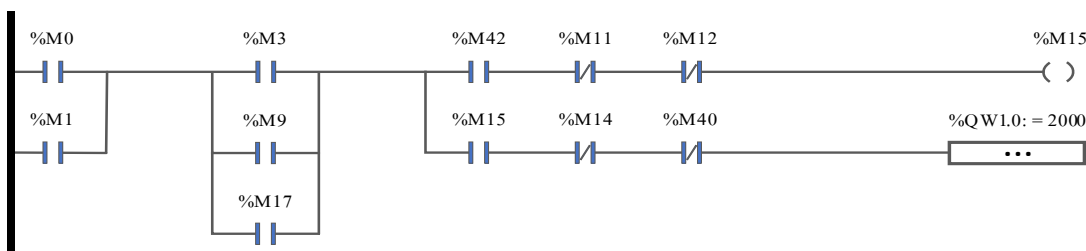
Rung12 - S2_TO_S1_MOVEMENT (2)

Comment : Control S2 to S1 movement (accelerate from 0 to max speed).



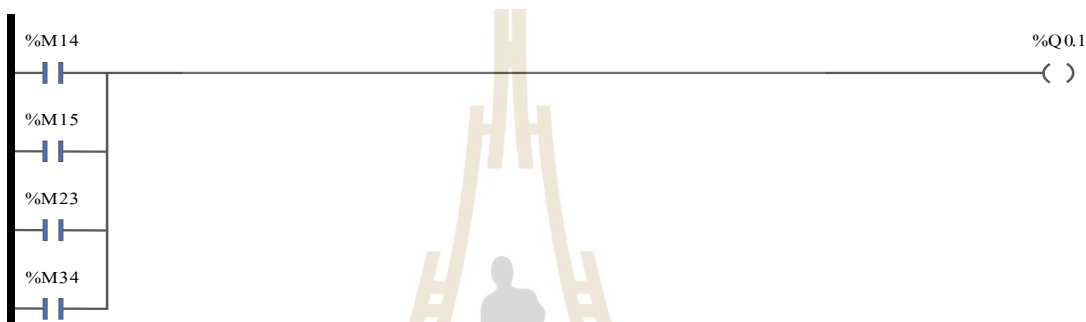
Rung13 - S2_TO_S1_MOVEMENT (3)

Comment : Control S1 to S2 movement (reduce from max to lower speed).



Rung14 – S2_TO_S1_MOVEMENT (4)

Comment : Control S2 to S1 movement (trick S2 to S1 drive).



Rung15 – CHECK_S1

Comment : Check S1 position for unlock S1 to S2 switch.



Rung16 – CHECK_S2

Comment : Check S2 position for unlock S2 to S1 switch.



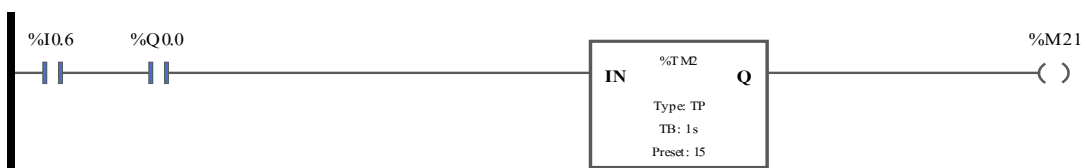
Rung17 – S1_TO_S2_EMERGENCY_STOP (1)

Comment : Check the object blocking S1 to S2 movement.



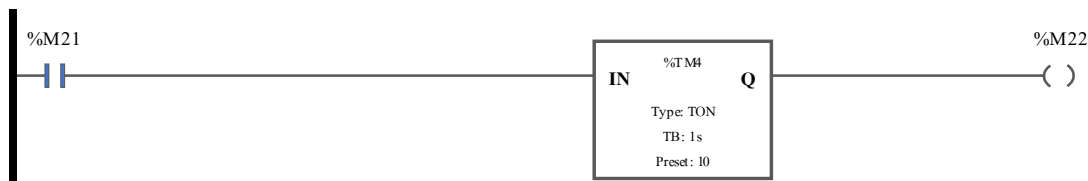
Rung18 – S1_TO_S2_EMERGENCY_STOP (2)

Comment : Check the object blocking S1 to S2 movement.



Rung19 – S1_TO_S2_EMERGENCY_STOP (3)

Comment : Check the object blocking S1 to S2 movement in time.



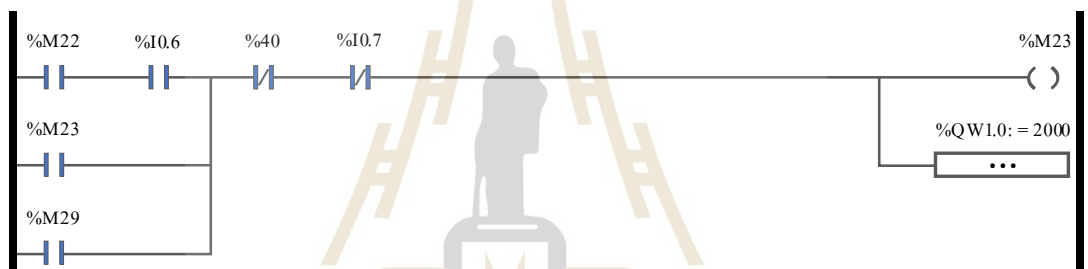
Rung20 – S1_TO_S2_EMERGENCY_STOP (4)

Comment : When the object remove before time, will continue S1 to S2 movement.



Rung21 – S1_TO_S2_EMERGENCY_STOP (5)

Comment : Control speed when back to S1 movement.



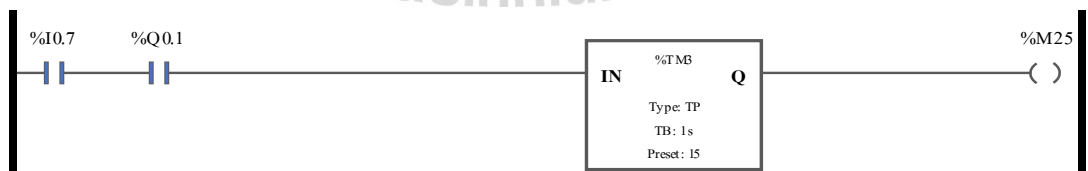
Rung22 – S2_TO_S1_EMERGENCY_STOP (1)

Comment : Check the object blocking S2 to S1 movement.



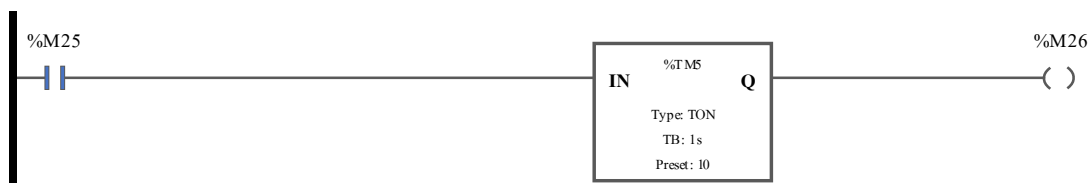
Rung23 – S2_TO_S1_EMERGENCY_STOP (2)

Comment : Check the object blocking S2 to S1 movement.



Rung24 – S2_TO_S1_EMERGENCY_STOP (3)

Comment : Check the object blocking S1 to S2 movement in time.



Rung25 – S2_TO_S1_EMERGENCY_STOP (4)

Comment : When the object remove before time, will continue S2 to S1 movement.



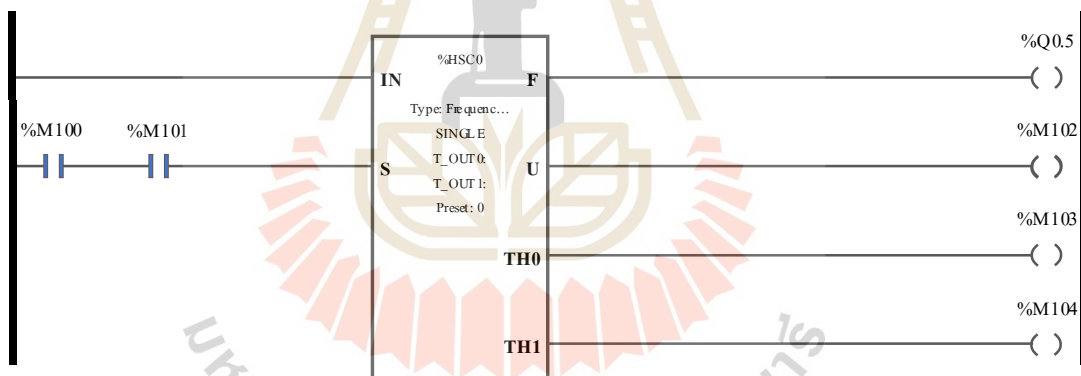
Rung26 – S2_TO_S1_EMERGENCY_STOP (5)

Comment : Control speed when back to S1 movement.



Rung27 – ENCODER_SPEED_READ (1)

Comment : HSC box for count signal from encoder (%M100, %M101, %M102, %M103 and %M104 are don't use full).



Rung28 – ENCODER_SPEED_READ (2)

Comment : Send speed to other.

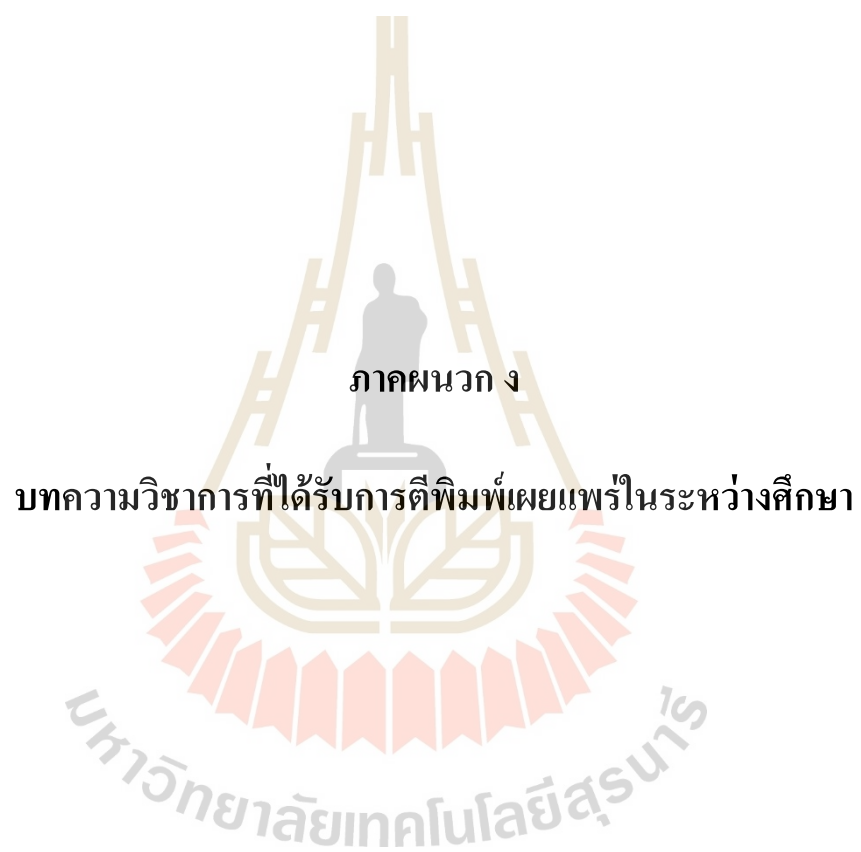


Variables used:

%HSC0	-	-
%HSC0.V	-	-
%I0.6	FWD_EMERGENCY_SENSOR	Sensor for check blocking object S1 to S2
%I0.7	BWD_EMERGENCY_SENSOR	Sensor for check blocking object S2 to S1

%M0	AUTO_MODE	Auto mode select switch
%M1	MANUAL_MODE	Manual mode select switch
%M2	AUTO_S1_TO_S2	Auto trick control movement S1 to S2
%M3	AUTO_S2_TO_S1	Auto trick control movement S2 to S1
%M4	SWITCH_CALL_S1	Switch trick for call to S1
%M5	SWITCH_CALL_S2	Switch trick for call to S2
%M6	SWITCH_TO_S2	Switch trick control movement S1 to S2
%M7	SWITCH_TO_S1	Switch trick control movement S2 to S1
%M8	MANUAL_CALL_S1_TO_S2	Manual trick control call S1 to S2
%M9	MANUAL_CALL_S2_TO_S1	Manual trick control call S2 to S1
%M10	S1_STOP_DELAY_TIME	trick for count S1 stop time 5s
%M11	S1_TO_S2_SPEED	Control S1 to S2 max speed
%M12	S1_TO_S2_BRAKE	Control S1 to S2 reduce speed
%M13	S2_STOP_DELAY_TIME	trick for count S2 stop time 5s
%M14	S2_TO_S1_SPEED	Control S2 to S1 max speed
%M15	S2_TO_S1_BRAKE	Control S2 to S1 reduce speed
%M16	MANUAL_S1_TO_S2	Manual trick control movement S1 to S2
%M17	MANUAL_S2_TO_S1	Manual trick control movement S2 to S1
%M18	CHECK_S1	Unlock S1 to S2 switch
%M19	CHECK_S2	Unlock S2 to S1 switch
%M20	FWD_EMER_STOP	Brake when find object blocking S1 to S2
%M21	FWD_EMER_TRICK	Trick for Emergency brake S1 to S2
%M22	FWD_EMER_TRICK2	Trick for Emergency brake S1 to S2 (2)
%M23	FWD_BACK_TO_S2	Find the object blocking S1 to S2
%M24	BWD_EMER_STOP	Brake when find object blocking S2 to S1
%M21	BWD_EMER_TRICK	Trick for Emergency brake S2 to S1
%M26	BWD_EMER_TRICK2	Trick for Emergency brake S2 to S1 (2)
%M27	BWD_BACK_TO_S1	Find the object blocking S2 to S1
%M28	EMER_CONTINUE_FWD	Trick for continue S1 to S2
%M29	EMER_CONTINUE_BWD	Trick for continue S2 to S1
%M30	TEST_MODE	Emergency mode select switch

%M31	TEST_SWITCH_TO_S2	Switch trick for emergency control S1 to S2
%M32	TEST_SWITCH_TO_S1	Switch trick for emergency control S2 to S1
%M33	TEST_S1_TO_S2	Trick for emergency control S1 to S2
%M34	TEST_S2_TO_S1	Trick for emergency control S2 to S1
%M40	SENSOR_AT_S1	Check sensor for start or stop point at S1
%M42	SENSOR_S2_TO_S1_BRAKE	Check sensor to reduce speed for braking at S1
%M45	SENSOR_S1_TO_S2_BRAKE	Check sensor to reduce speed for braking at S2
%M47	SENSOR_AT_S2	Check sensor for start or stop point at S2
%M100	-	-
%M101	-	-
%M102	-	-
%M103	-	-
%M104	-	-
%MW0	-	-
%TM0	STATION_S1_STOP_TIME	Delay stopping at S1
%TM1	STATION_S2_STOP_TIME	Delay stopping at S2
%TM2	FWD_EMER_TRICK_TIME	FWD emergency trick
%TM3	BWD_EMER_TRICK_TIME	BWD emergency trick
%TM4	FWD_EMER_STOP_TIME	FWD emergency stop
%TM5	BWD_EMER_STOP_TIME	BWD emergency stop
%Q0.0	FWD	trick FWD mode
%Q0.1	BWD	trick BWD mode
%Q0.5	-	-
%QW1.0	SPEED_CONTROL	Maximum speed at Accelerating to Constant



ภาคผนวก ง

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

บัณริ เข้มกลัดมุกต์ และธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์. (2560). การสำรวจวรรณกรรมเบื้องต้นในงานระบบขนส่งมวลชนอัตโนมัติ. การประชุมวิชาการด้านระบบขนส่งทางรางของประเทศ **ไทย ครั้งที่ 4 (TRAS 2017)**. จำนวน 6 หน้า

Khemkladmuk, B., Leeton, U., and Kulworawanichpong, T. (2018). A Study Control Speed Profile Optimization for Automated People Mover. **International Conference on Science, Engineering & Technology (ICSET)**. pp. 18–21.

บัณริ เข้มกลัดมุกต์ สุรัชชัย วงษ์ฟูเกียรติ และธนัชชัย กุลวรวานิชพงษ์. (2563). การออกแบบและสร้างต้นแบบระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ. **วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ**. (ตอบรับเมื่อวันที่ 9 กันยายน 2563)



TRAS 2017
THE 4TH THAILAND
RAIL ACADEMIC SYMPOSIUM



Certificate of Participation

This certificate is awarded to
**Preliminary Review for Automated
People Mover Systems**

authored by
Banri Khemkladmuk and Thanatchai Kulworawanichpong
for participation in
the 4TH Thailand Rail Academic Symposium
August 31 – September 1, 2017, Nakhon Ratchasima

(Associate prof. Ft Lt Dr. Kuntorn Chamniprasart)
Dean, Institute of Technology
Suranaree University of Technology

(Dr. Kitipong Promwong)
Secretary General
National Science Technology and Innovation Policy Office

การสำรวจวรรณกรรมเบื้องต้นในงานระบบขนส่งมวลชนอัตโนมัติ Preliminary review for automated people mover systems

บันรี เข้มกัฒมุกต์¹ และ ธนัตชัย กุลรวรานิชพงษ์^{1,*}

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

*ติดต่อ: thanatchai@gmail.com, เบอร์โทร 044224400

บทคัดย่อ

ตั้งแต่ช่วงปลายทศวรรษที่ 1960 เป็นต้นมา ประเทศต่าง ๆ ได้หันมาศึกษาและพัฒนาระบบรถรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ เพื่อลดต้นทุนในการจ้างบุคลากร เพิ่มความปลอดภัยในการให้บริการ และเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบรถรางไฟฟ้าขนส่งมวลชนให้มากขึ้น โดยบทความนี้นำเสนอเกี่ยวกับความรู้เบื้องต้นของระบบรถรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ ซึ่งนับว่าเป็นระบบใหม่ที่กำลังจะเข้ามามีบทบาทในระบบรถรางไฟฟ้าขนส่งมวลชนของประเทศไทย

คำสำคัญ: ระบบรถรางไฟฟ้าขนส่งมวลชน ระบบรถรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ ระบบขนส่งทางรางอัตโนมัติ

Abstract

Since the late 1960s, many countries have studied and developed the Automated People Mover system. To reduce the cost of personnel salary, increased security of service, and increased reliability of the Rail Transit system. This article introduces the basic knowledge of the Automated People Mover system. Which It is a new system that will come into have a role in rapid transit system of Thailand.

Keywords: Rail Transit System, Automated People Mover, Automated Guideway Transit

1. บทนำ

ระบบรถรางไฟฟ้าขนส่งมวลชน (Rail Transit System) ถูกนำมาใช้ในการขนส่งผู้โดยสารในเมืองต่าง ๆ ทั่วโลก เพื่อป้องกันปัญหาการจราจรติดขัดตามท้องถนน และลดปัญหามลพิษที่เกิดขึ้นในเขตเมือง [1] ระบบรถรางไฟฟ้าขนส่งมวลชนได้มีการพัฒนาเรื่อยมา ซึ่งปัจจุบันมีระบบต่าง ๆ ที่ช่วยสนับสนุนให้ระบบรถรางไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีบริการที่หลากหลายดึงดูดผู้โดยสารให้มาใช้บริการมากขึ้น หนึ่งในนั้นคือ ระบบรถรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ (Automated People Mover : APM) หรือเรียกอีกชื่อว่า ระบบขนส่งทางรางอัตโนมัติ (Automated Guideway

Transit : AGT) เป็นระบบที่สามารถขับเคลื่อนรถไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ โดยไม่ต้องมีคนขับบนรถไฟฟ้า [2]

บทความนี้นำเสนอความรู้พื้นฐานและการประยุกต์ใช้ระบบรถรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ ซึ่งเป็นระบบใหม่สำหรับระบบรถรางไฟฟ้าขนส่งมวลชนของประเทศไทยที่มีการใช้งานในระบบรถรางไฟฟ้าสายสีทอง [3] และระบบขนส่งผู้โดยสารระหว่างตึกของท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ [4]

2. พื้นฐานระบบรถรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ

ระบบรถรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นระบบรถรางไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่ขับเคลื่อนรถไฟฟ้าแบบอัตโนมัติ โดยไม่ต้องมีคนขับบนรถไฟฟ้า ซึ่ง

พัฒนาขึ้นมาเพื่อลดต้นทุนในการจ้างบุคลากร เพิ่มความปลอดภัยในการให้บริการ และเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน โดยมักจะใช้ในการขนส่งผู้โดยสารระหว่างพื้นที่ขนาดเล็ก เช่น ใจกลางเมือง สนามบิน เป็นต้น [5]



รูปที่ 1 ตัวอย่างรถไฟฟ้าที่ใช้ระบบรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ [6]

2.1 ประวัติความเป็นมาของระบบ [7]

ระบบรางไร้การหยุด (Never-Stop-Railway) ดังแสดงในรูปที่ 2 เป็นรถไฟฟ้าขบวนแรกทำงานด้วยระบบรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ ซึ่งถูกสร้างขึ้นและนำมาจัดแสดงในนิทรรศการที่จัดขึ้นในเวมบลีย์ เมืองลอนดอน ประเทศอังกฤษ ในปี ค.ศ.1924 โดยรถไฟฟ้าขบวนนี้ขับเคลื่อนด้วยรางแบบเกลียวสกรูที่หมุนอยู่ตลอดเวลา จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้รถไฟฟ้าไม่สามารถหยุดได้ แต่สามารถเพิ่ม-ลดความเร็วด้วยการปรับความบิดของเกลียวของสกรูที่จุดต่าง ๆ ได้



รูปที่ 2 ระบบรางไร้การหยุด [8]

ปี ค.ศ.1949 บริษัทสตีเฟนส์-อดัมสัน แมนูแฟกเจอร์ริง (Stephens-Adamson Manufacturing Company) และบริษัทกู๊ดเยียร์ (The Goodyear Tire & Rubber Company) ได้ร่วมกันพัฒนาระบบขนส่งอัตโนมัติ 3 ระบบ ได้แก่ ระบบทางเลื่อนแบบราบ (Speedwalk) ระบบทางเลื่อนแบบเอียง (Speedramp) และระบบคาร์เวเยอร์

(Carveyor) ดังแสดงในรูปที่ 3 มีลักษณะเป็นห้องขนาดเล็กที่บรรทุกคนได้ 8-10 ที่นั่ง จะเคลื่อนที่บนสายพานลำเลียงจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง



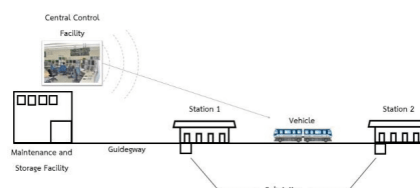
รูปที่ 3 ระบบคาร์เวเยอร์ [9]

ปี ค.ศ.1964 บริษัทเวสต์อิงเฮาส์อิเล็กทริก (Westinghouse Electric Corporation) ได้เงินสนับสนุนจากภาครัฐให้ทำการพัฒนา ระบบสกายบัส (Skybus South Park APM demonstration project) ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งเป็นรถไฟฟ้าที่ทำงานด้วยระบบรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ ที่เมืองฟิตส์เบิร์ก ประเทศอเมริกา และทำการทดลองขนส่งผู้โดยสาร หลังจากนั้น 7 ปี ระบบนี้ได้ถูกพัฒนาและติดตั้งที่ท่าอากาศยานนานาชาติแทมปา (Tampa International Airport) ซึ่งเป็นสนามบินแห่งแรกที่ใช้ระบบรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ



รูปที่ 4 ระบบสกายบัส [10]

ตั้งแต่ปลายทศวรรษที่ 1960 เป็นต้นมา ระบบรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติเป็นหัวข้อที่ได้รับความสนใจจากทั่วโลก เนื่องจากปัญหาการจราจรติดขัดตามท้องถนน และมลพิษที่เพิ่มขึ้นจากการใช้รถ จึงมีหลายประเทศโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ประเทศแถบยุโรป ประเทศญี่ปุ่น ประเทศแคนาดา และประเทศอเมริกา ได้เริ่มพัฒนาระบบรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติของแต่ละประเทศให้มีการทำงานที่มีประสิทธิภาพในขณะที่พยายามลดต้นทุนที่ใช้ในการสร้างให้ต่ำลง และต่อยอดเรื่อยมาจนถึงปัจจุบัน



รูปที่ 5 องค์ประกอบของระบบรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ

2.2 องค์ประกอบของระบบ [11]

ระบบรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ ประกอบด้วยองค์ประกอบหลักที่สำคัญอยู่ 6 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 5 เพื่อส่งเสริมการทำงานของระบบให้สามารถดำเนินการได้อย่างราบรื่น ดังนี้

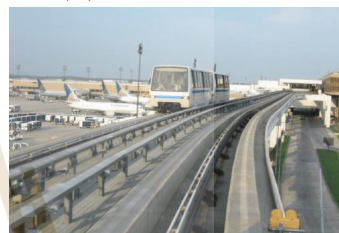
ก) รถไฟฟ้า (Vehicle)

รถไฟฟ้าในระบบนี้โดยทั่วไปจะมีความยาวของตู้โดยสารจะอยู่ที่ตู้ละ 10-12 เมตร และกว้าง 3 เมตร สามารถจุคนได้ประมาณ 50-80 คนต่อตู้โดยสาร ซึ่งมีรูปแบบการเคลื่อนที่ 4 แบบ ได้แก่ แบบล้อยาง (Rubber tires) เป็นรูปแบบที่ใช้ล้อยางร่วมกับรางวิ่งคอนกรีต ทำให้มีราคาถูกและไม่ก่อให้เกิดเสียงรบกวนจึงมักนำมาใช้ในเขตเมือง แบบล้อเหล็ก (Steel wheels) เป็นรูปแบบที่ใช้ล้อเหล็กร่วมกับรางวิ่งเหล็ก จะสามารถวิ่งได้ด้วยความเร็วสูงกว่าล้อยาง แต่เกิดเสียงดังจากการเสียดกันระหว่างล้อกับราง แบบแรงยกของอากาศ (Air levitation) เป็นรูปแบบที่ใช้หลักการแรงดันอากาศที่ปล่อยออกมาจากรถไฟฟ้า เพื่อยกรถไฟฟ้าให้ลอยขึ้นจากรางวิ่งเล็กน้อยขณะเคลื่อนที่ ทำให้สามารถวิ่งได้อย่างรวดเร็วและเงียบเนื่องจากไม่มีแรงเสียดทาน และแบบแรงยกของแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic levitation) ซึ่งจะมีการทำงานแบบเดียวกับแบบแรงยกของอากาศ แต่ใช้แม่เหล็กไฟฟ้าแทนอากาศ

ข) รางนำทาง (Guideway)

รางนำทาง ดังแสดงในรูปที่ 6 ทำหน้าที่สนับสนุนการวิ่งและควบคุมทิศทางของรถไฟฟ้า เพื่อเพิ่มความปลอดภัย และประสิทธิภาพในการขนส่งผู้โดยสาร โดยรางนำทางมีอยู่ 2 แบบ ได้แก่ รางนำทางด้านข้าง (Side guide rail) และรางนำทางตรงกลาง (Central guide rail)

ซึ่งในการใช้งานรางนำทางจะสามารถติดตั้งได้ 3 ระดับ ได้แก่ ระดับพื้นดิน ระดับยกสูงจากพื้น และระดับใต้ดิน แต่ที่มีการใช้มากที่สุด คือ แบบระดับสูงจากพื้น เนื่องจากไม่ต้องกังวลเกี่ยวกับปัญหาการจราจรติดขัด และมีต้นทุนน้อยกว่าการขุดอุโมงค์ใต้ดิน



รูปที่ 6 รางนำทาง [12]

ค) ระบบไฟฟ้ากำลังและการขับเคลื่อน (System power and Propulsion)

รถไฟฟ้ามีการรับกำลังไฟฟ้าจากสถานีไฟฟ้าย่อยที่ตั้งอยู่ตามเส้นทางของรางวิ่ง โดยการจ่ายกำลังไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับรูปแบบการขับเคลื่อนรถไฟฟ้า ซึ่งมีอยู่ 2 แบบ ได้แก่ แบบขับเคลื่อนด้วยตัวเอง (Self-propelled) เป็นการขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ที่ติดตั้งอยู่ในรถไฟฟ้า ซึ่งอาจจะเป็นมอเตอร์กระแสตรง (DC motor) ที่ต้องใช้แรงดัน 750-1,300 V_{DC} หรือมอเตอร์กระแสสลับ (AC motor) ที่ต้องใช้แรงดัน 480-600 V_{AC} โดยการขับเคลื่อนแบบนี้จะไม่มีการจำกัดระยะการวิ่ง คาบเท่าที่มีสถานีไฟฟ้าย่อยตามเส้นทางของรางวิ่งเป็นระยะ ๆ และแบบขับเคลื่อนด้วยสายเคเบิล (Cable-propelled) เป็นการขับเคลื่อนด้วยการม้วนสายเคเบิล ดังแสดงในรูปที่ 7 ด้วยมอเตอร์ที่อยู่สถานี เพื่อดึงรถไฟฟ้าให้เคลื่อนที่ตามรางนำ

ทาง ซึ่งรถไฟจะรับแรงดัน 480 V_{AC} เพื่อใช้งานระบบต่าง ๆ ที่อยู่บนขบวน โดยมีการขับเคลื่อนได้จำกัดระยะการวิ่งไม่เกิน 4000 ฟุต



รูปที่ 7 การขับเคลื่อนด้วยสายเคเบิล [13]

ง) การควบคุมและติดต่อสื่อสาร (Control and Communications)

ระบบรถรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติมีการใช้ระบบควบคุมรถอัตโนมัติ (Automatic Train Control: ATC) เข้ามาช่วยในการทำงานเหมือนรถไฟขบวนอื่น ๆ โดยทั่วไปในการควบคุมรถไฟจะมีเครือข่ายการสื่อสารเพื่อตรวจสอบและสั่งการรถไฟ ซึ่งมีส่วนควบคุมระบบ (Central Control Facility) เป็น ฝ่าย ดู แล ทั้ง ห ม ด นอกจากนี้ศูนย์ควบคุมระบบยังมีการดูแลเกี่ยวกับระบบรักษาความปลอดภัยภายในสถานีอื่น เช่น วิทยุสื่อสาร โทรศัพท์ฉุกเฉิน กล้องวงจรปิด ระบบเปิด-ปิดประตูขบวนรถอัตโนมัติ เป็นต้น โดยขนาดจำนวนเจ้าหน้าที่ควบคุมระบบและอุปกรณ์ควบคุมระบบจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของระบบรถรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติที่ใช้งาน

ง) สถานี (Stations)

สถานีที่ตั้งอยู่ตามเส้นทางวิ่งของรถไฟ เพื่อให้ผู้โดยสารสามารถใช้บริการอย่างสะดวกสบาย โดยสถานีจะมีการติดตั้งอุปกรณ์อำนวยความสะดวก เช่น ประตูขบวนรถอัตโนมัติ ป้ายข้อมูลต่าง ๆ เป็นต้น เพื่อความสะดวกสบาย และความปลอดภัยของผู้โดยสาร นอกจากนี้ที่สถานียังมีเครื่องมืออุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อสนับสนุนให้ระบบรถรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติให้สามารถทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ

ฉ) โรงจอดและซ่อมบำรุง (Maintenance and Storage Facility)

โรงจอดและซ่อมบำรุงเป็นสถานที่สำหรับการบำรุงรักษา เก็บเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการซ่อมบำรุง ทัศนัยความปลอดภัย และจัดเก็บรถไฟ นอกจากนี้ยังเป็นที่ตั้งของสำนักงานฝ่ายบริหาร

โดยทั่วไปแล้วองค์ประกอบของระบบรถรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติระบบหนึ่งจะมีผู้รับผิดชอบดูแลเพียงเจ้าของเทคโนโลยีรายเดียว ยกเว้นประเทศญี่ปุ่นที่สามารถใช้อุปกรณ์ประกอบ จากหลายหน่วยงานร่วมกันได้

2.3 รูปแบบการทำงานของระบบ

การทำงานของระบบรถรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติจะมีการควบคุมและสั่งการจากศูนย์ควบคุมระบบ ซึ่งมีการตรวจสอบและประเมินผลการทำงานผ่านระบบกล้องวงจรปิดอยู่ตลอดเวลา เพื่อให้การทำงานของระบบเป็นไปอย่างราบรื่นและปลอดภัย โดยหากเกิดปัญหาขึ้นที่ระบบ เจ้าหน้าที่ควบคุมระบบจะทำการแจ้งปัญหาที่เกิดขึ้นให้กับเจ้าหน้าที่ฝ่ายบำรุงได้รับทราบและเข้าไปยังสถานที่หากเกิดเหตุจำเป็น และในกรณีฉุกเฉินเจ้าหน้าที่ควบคุมจะประสานงานกับหน่วยงานอื่น ๆ เช่น ตำรวจ ฝ่ายดับเพลิง เป็นต้น เพื่อให้มั่นใจว่าความปลอดภัยของผู้โดยสารได้รับความสำคัญสูงสุด [14]

3. การใช้งานระบบรถรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ

ปัจจุบันระบบรถรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติได้ถูกนำไปใช้ในการขนส่งผู้โดยสารในพื้นที่ต่าง ๆ ในหลายประเทศทั่วโลก ซึ่งมีตัวอย่างดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวอย่างประเทศที่มีการใช้งานระบบรถรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ

เริ่มในปี	ประเทศ	ตัวอย่างระบบที่ใช้
1664	อเมริกา	Skybus
1975	เยอรมัน	SkyLine
1981	ญี่ปุ่น	Nanko Port Town Line

1983	อังกฤษ	Gatwick Airport Transit
1983	ฝรั่งเศส	Lille Metro
1985	แคนาดา	Line 3 Scarborough
1990	สิงคโปร์	Changi Airport Skytrain
1996	ไต้หวัน	Wenhu Line
1998	มาเลเซีย	Aerotrain
1998	ฮ่องกง	Hong Kong International Airport APM
1999	อิตาลี	SkyBridge
2002	เดนมาร์ก	Copenhagen Metro
2002	สวิสเซอร์แลนด์	Skymetro
2005	สเปน	Madrid Barajas APM
2007	เม็กซิโก	Aerotrén
2008	จีน	Terminal 3 People mover at Beijing Capital International Airport
2009	ดูไบ	Dubai Metro
2010	แอฟริกาใต้	Durban People Mover
2011	เกาหลีใต้	Shinbundang Line
2011	ฟิลิปปินส์	UP Diliman AGT
2011	อียิปต์	Cairo International Airport APM
2013	บราซิล	Aeromovel
2013	เวเนซุเอลา	Cabletren Bolivariano
2014	กาตาร์	Hamad International APM

ในปัจจุบันจะมีผู้ผลิตระบบรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติรายใหญ่ 2 ราย ได้แก่ บริษัทบอมบาร์ดิเออร์ ทรานสปอร์ตเทชัน (Bombardier Transportation) ซึ่งผลิตระบบ Innovia APM ที่ทำงานแบบ Central Guide Rail และบริษัทฮิตซูบิชิ เฮฟวีอินดัสตรีส์ จำกัด (Mitsubishi Heavy Industries) ซึ่งผลิตระบบ Crystal Mover ที่ทำงานแบบ Side Guide Rail โดยประเทศส่วนใหญ่ที่ใช้ระบบรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติจะมีการใช้ 2 ระบบนี้เป็นหลัก [15]

4. การประยุกต์ใช้ระบบรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ

การประยุกต์ใช้ระบบรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติสามารถทำได้หลายทาง เช่น Schuette, J., Sven S. และ Crawford, C. [16] ได้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองตรวจสอบสถานะภายในของรถไฟฟ้าที่ทำงานร่วมกับระบบรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ เพื่อใช้ในการตรวจสอบความปลอดภัยภายในรถไฟฟ้า Kunz, G., Perondi, E., และ Machado, J. [17] ได้นำเสนอหลักการประยุกต์ใช้ระบบรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติร่วมกับระบบนิวเมติกส์ เป็นต้น ซึ่งทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับว่าต้องการให้ระบบรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติที่มีรูปแบบการทำงานอย่างไร

5. สรุป

ปัจจุบันมีการใช้งานระบบรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติอย่างแพร่หลายในหลายประเทศทั่วโลกและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอีกในอนาคต ซึ่งประเทศไทยก็เป็นอีกประเทศที่จะนำระบบนี้มาใช้เช่นกัน ดังนั้นการศึกษาเกี่ยวกับระบบรางไฟฟ้าขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ จึงเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการต่อยอด เพื่อพัฒนาระบบรางไฟฟ้าขนส่งมวลชนของประเทศไทยต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Glover, J., A Railway for Operators, IET Professional Development Course on Railway Signalling and Control Systems (RSCS 2012), London, pp. 118-125, 2012.
- [2] Hansen, B., Latham, Jr. E., Gray, D., and Shogan, S. "The Detroit People Mover: technology upgrades and rehabilitation plans on a middle-aged urban AGT," IEEE/ASME Joint Railroad Conference, pp. 91-97, 2003.
- [3] บริษัท เรียลลิสท์ โซลูชัน จำกัด (2559). เรื่องรถไฟฟ้าสายสีทอง, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://www.realist.co.th>, เข้าดูเมื่อวันที่ 24/07/2560.

- [4] บริษัท ท่าอากาศยานไทย จำกัด (มหาชน) (2559). เรื่องโครงการพัฒนาท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ, [ระบบออนไลน์], แหล่งที่มา <http://suvarnabhumi.airport.com>, เข้าดูเมื่อวันที่ 24/07/2560.
- [5] Gerland, H. and Zemlin, H. "Development status of automated guideway transit (AGT) systems in Europe and Japan," IEEE Vehicular Technology Conference, Vol.30, pp. 448-456, 1980.
- [6] YURIKAMOME, Inc. (2017). Yurikamome, [picture], URL: <http://www.yurikamome.tokyo>, access on 25/07/2017.
- [7] Wikipedia (2017). People mover, [online], URL: <https://en.wikipedia.org>, access on 26/07/2017.
- [8] Getty Images (2017). Never-Stop Railway Pictures, [picture], URL: <http://www.gettyimages.co.uk>, access on 25/07/2017.
- [9] Topinfo s.r.o. (2017). Carveyor, [picture], URL: <http://http://www.tzb-info.cz>, access on 25/07/2017.
- [10] Pinterest (2017). A Skybus train, [picture], URL: <https://www.pinterest.com>, access on 25/07/2017.
- [11] Jenks W. C., et al. (2010). Guidebook for Planning and Implementing Automated People Mover Systems at Airports, ISBN 978-0-309-15498-7, National Academy of Sciences, US, URL: <http://nap.edu>, access on 27/07/2010.
- [12] Shutterstock, Inc. (2017). guideway, [picture], URL: www.shutterstock.com, access on 25/07/2017.
- [13] Doppelmayr Cable Car GmbH & Co KG (2017). Cable-propelled, [picture], URL: <https://www.dcc.at>, access on 25/07/2017.
- [14] Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. (2011). "Crystal Mover" Automated People Mover System in Operation at Miami International Airport's North Terminal., Mitsubishi Heavy Industries, Japan, URL: <https://www.mhi.com>, access on 29/07/2010.
- [15] Wikipedia (2017). List of airport people mover systems, [online], URL: <https://en.wikipedia.org>, access on 30/07/2017.
- [16] Schuette, J., Sven S. and Crawford, C. "An automatic Empty Vehicle Detection system for Airport People Movers applications," IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Vol.75, pp. 1-5, 2012.
- [17] Kunz, G., Perondi, E., and Machado, J. "Modeling and Simulating the controller behavior of an Automated People Mover using IEC 61850 Communication Requirements," IEEE International Conference on Industrial Informatics, Vol.9, pp. 603-608, 2011.

Paper ID: RF-ICSETLON-18048-1921**RESEARCHFORA**International Conference on
Science, Engineering & Technology

Certificate

This is to certify that *Banri Khemkladmuk* has presented a paper entitled "*A Study Control Speed Profile Optimization for Automated People Mover*" at the International Conference on Science, Engineering & Technology (ICSET) held in London, UK on 18th-19th April 2018.



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



Chairman
Chairman
Researchfora

A STUDY CONTROL SPEED PROFILE OPTIMIZATION FOR AUTOMATED PEOPLE MOVER

¹B. KHEMKLADMUK, ²U. LEETON, ³T. KULWORAWANICHPONG

^{1,2,3}School of Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand
E-mail: ¹banrikhem1937@gmail.com, ²uthen.leeton@gmail.com, ³thanatchai@gmail.com

Abstract - This article presents a study of energy saving for an Automated People Mover (APM) system using Genetic Algorithm (GA) and Particle Swarm Optimization (PSO) for searching the speed profile of the system. The variables controlling the speed profile are an acceleration rate, a deceleration rate, and a coasting point. The test system used in this article is a simple APM service with two passenger stopping stations and a service distance of 1 km. The result showed that the speed profile with a service speed of 40 km/h used the total energy of approximate 0.16 kWh for traction, which was less than that of other cases.

Index Terms - Automated People Mover, the speed profile of system, Genetic Algorithm, and Particle Swarm Optimization

I. INTRODUCTION

An automated people mover (APM) is a rapid transport system which automatically operates a vehicle without a driver onboard, it is controlled by a central control room [1]. This system is similar to a general train system [2], so we have several methods to save energy such as optimizing the speed profile of the vehicle [3], a regenerative braking method etc.

This article focuses on the study of energy saving for the APM by using the vehicle control based on the optimal speed profile using genetic algorithm and particle swarm optimization. The speed profile is controlled by 3 variables: an acceleration rate (α_{acc}), a deceleration rate (α_{dec}), and a coasting point (L_{coast}). The traction modes consist of an accelerating mode, a cruising mode, a coasting mode, and a breaking mode [4,5].

II. MOTION OF APM

The movement of the vehicle in the system resemble general trains running on the rail, but the APM is moving with rubber wheels on a concrete slab [4]. The model is assumed that the vehicle is an electric train, so the system will use the following principle.

A. The vehicle's movement calculation model

The vehicle's motion is governed by the Newton's second law of motion as shown in (1). Normally, the friction force is comprised of rolling resistance force, aerodynamic drag force, and gradient force in (2). Fig. 1 illustrates the free body diagram of the vehicle on the inclined path including the mentioned forces exerting on it [6].

$$TE - F_R = M_{eff} \alpha \quad (1)$$

$$F_R = F_{RR} + F_D + F_G \quad (2)$$

when TE is the tractive effort (N)
 F_R is the resistance force (N)
 F_{RR} is the rolling resistance force (N)
 F_D is the aerodynamic drag force (N)
 F_G is the gradient force (N)
 M_{eff} is the effective mass (ton)
 and α is the vehicle acceleration (m/s^2)

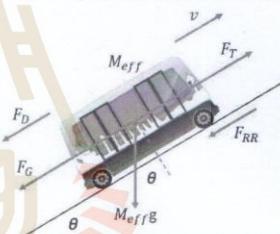


Figure 1. Free body diagram of the vehicle's motion

The required power and energy are given by (3) and (4) [5]:

$$P = \frac{TE \times v}{\eta} \quad (3)$$

$$E = P \times t \quad (4)$$

Where P is the required power (kW),
 v is the vehicle's speed (m/s),
 η is the overall transmission efficiency,
 E is the required energy (kJ),
 and t is the time of energy consumption (s).

The model updates the speed and position of the vehicle while moving between stations, which are calculated from (5) and (6).

$$v_t = v_i + \alpha \Delta t \quad (5)$$

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

where v_f is the vehicle's terminal speed (m/s),
 v_i is the vehicle's initial speed (m/s),
 s_f is the vehicle's position after updated (m),
 and s_i is the vehicle's position before updated (m).

B. The vehicle's motion control

The motion of the vehicle is controlled by the train's operating modes: an accelerating mode, a cruising mode, a coasting mode, and a breaking mode [7]. In Fig. 2, the operation in each mode is based on the techniques used to control.

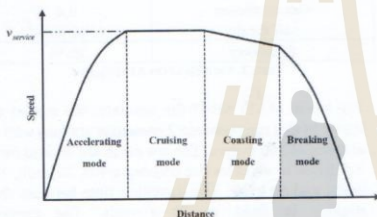


Figure 2. The vehicle's speed control modes

The movement of the vehicle starting from the accelerating mode to reach the cruising service speed ($v_{service}$) with an acceleration rate $\alpha_{acc} > 0$. When the vehicle's speed is equal to the cruising service speed, the vehicle will run in the cruising mode with an acceleration rate $\alpha_{acc} = 0$ until the vehicle reaches a predetermined point, then the vehicle will move by its own momentum with no tractive effort ($TE = 0$). Finally, the vehicle will move into the braking mode when approaching to the next station with an acceleration rate $\alpha_{acc} < 0$.

In the simulation program of the vehicle's movement, there are 3 operations [8]:

- i) **Running operation** - computing the speed of the vehicle while the vehicle is running on 3 modes of motion: the accelerating mode, cruising mode, and coasting mode.
- ii) **Breaking operation** - reducing the speed of the vehicle in order to approach and stop at the next station [9].
- iii) **Station stop operation** - waiting at a station until the dwelling time is reached.

IV. OPTIMIZATION METHOD

A. Genetic Algorithm

Genetic Algorithm (GA) is a method that relies on replication of gene-level evolution process and natural selection for solving optimal solutions to problems. GAs will create a population chromosome instead of variable solution and improve them until the value from the objective function is the most appropriate [10], according to the flowchart in Fig. 3.

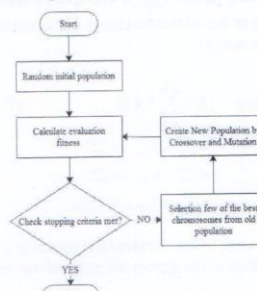


Figure 3. The flowchart of GAs

B. Particle Swarm Optimization

Particle Swarm Optimization (PSO) is a technique for searching optimal solutions to problems which developed by simulation of social behavior of bird flocking. During searching for the best (minimum or maximum) point, the potential solutions, called particles, fly through the problem space by following the current optimum particles [11], as shown flowchart in Fig. 4.

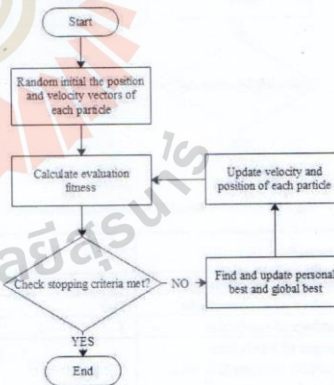


Figure 4. The flowchart of PSO

V. SIMULATION AND RESULTS

The simulation of the APM's motion and power supply system uses the train movement steering algorithm and current injection method, respectively. In GA and PSO algorithm, the objective function of the problem is the minimization of the total energy consumed by the vehicle (E), which is controlled by 3 control variables: the acceleration rate (α_{acc}), deceleration rate (α_{dec}), and coasting point (L_{coast}). The optimal speed profile resulting in the minimum energy consumption will be obtained, see (7).

$$\text{Minimize } E = \sum_{i=1}^N P_i \times \Delta t_i \quad (7)$$

Subject to

$$\alpha_{acc}^{\min} \leq \alpha_{acc} \leq \alpha_{acc}^{\max}$$

$$\alpha_{dec}^{\min} \leq \alpha_{dec} \leq \alpha_{dec}^{\max}$$

$$L_{coast}^{\min} \leq L_{coast} \leq L_{coast}^{\max}$$

The flowchart of the simulation is shown in Fig. 5 and the variables of the system are summarized in Table 1 and 2.

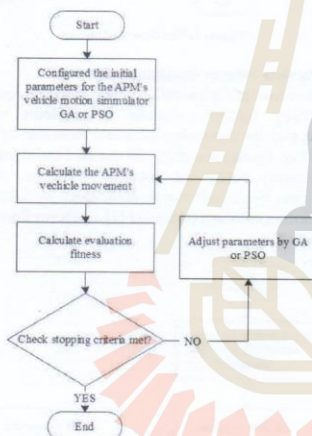


Fig 5 Flowchart of the APM's movement simulation

Parameter	Value
Number of populations	50
Number of Generations	100
Number of variables	3
Ranges of variables	
- Vehicle acceleration rate	0.2 to 1.0 m/s ²
- Vehicle deceleration rate	- 0.97 to -0.4 m/s ²
- Coasting mode position	150 to 500 m

Table 1. Variables Optimization method

Specific data	Information
Number of vehicle	1 vehicle
Type of vehicle	4-wheeled steering with rubber tires
Dimensions (m)	L6 × W2.5 × H2.5
Electricity	
- Nominal supply voltage	650 VDC
- Auxiliary power	1.6 kW
Weight conditions	
- tare weight	3 ton
- max. Payload	1 ton
Movement features	
- max. Speed	50 km/h
- max. Acceleration	1 m/s ²
- max. Deceleration	0.6 m/s ²
Friction	
- concrete coefficient	0.013
- air coefficient	0.6
- air density	1.292 kg/m ³
Efficiency	80 %

Table 2. Variable of the APM system

The test in MATLAB/M-file simulates the motion of the APM that runs between 2 passenger stations with a distance of 500 meters. The test cases are divided into 3 different levels of service cruising speed: 30 km/h, 40 km/h, and 50 km/h. The travelling time between the stations is fixed at 70 seconds. The energy consumption of the vehicle and comparison of the results from GA and PSO are shown in Table 3.

Cruising speed (km/h)	Method	Control parameters			E (kWh)
		α_{acc} (m/s ²)	α_{dec} (m/s ²)	L_{coast} (m)	
30	GA	0.9878	- 0.9672	379.7367	0.1669
	PSO	0.9820	- 0.9690	378.7325	0.1667
40	GA	0.9129	- 0.9597	165.9741	0.1603
	PSO	0.9198	- 0.9556	164.9739	0.1592
50	GA	- 0.8738	- 0.9698	150.0417	0.2003
	PSO	0.8712	- 0.9738	150.0010	0.2003

Table 3. Comparison of the solution GAs and PSO

In Table 3, it is found that the maximum service speed of 40 km/h results in the electrical energy consumption of about 0.16 kWh, which is the least amount of energy among other cases. The speed profile and energy consumption of the vehicle are graphically illustrated in Fig. 6 and 7.

Fig. 6 shows a comparison of the speed profiles between 3 cases; the vehicle speed obtained from each test case with GA and PSO seems to be changed in the same trend; however, the distance and time interval of

each mode are different. The overall travelling time is also different between 3 cases. The service speed of 50 km/h gives rise to the shortest travelling time about 56 seconds. The service speed of 30 km/h takes about 68 seconds and the service speed of 40 km/h takes the longest travelling time, about 69 seconds.

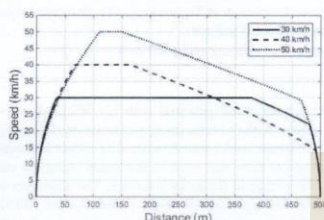


Figure 6. The speed profile of vehicles all 3 cases

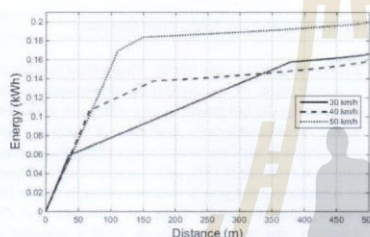


Figure 7 The total electricity used in the movement of vehicles in 3 cases

Fig. 7 shows a comparison of the cumulative energy in 3 cases. The purposes of the energy consumption are different according to three modes of motion. The energy is used for acceleration until the vehicle's speed reaches the service cruising speed. The cruising mode uses the energy to maintain constant speed. The coasting and braking mode (mechanical braking) does not consume electric energy for traction. Considering the total consumed energy, it can be seen that the case with the service speed of 40 km/h uses the least energy because its accelerating mode and cruising mode take shorter time than the time taken from the case with the service speed of 30 km/h, and it uses less energy for acceleration than that of the case with the service speed of 50 km/h.

CONCLUSION

This paper studies energy saving for the APM by optimizing the speed profile of the vehicle using GA and PSO. The vehicle travels between 2 passenger stations with a distance of 500 meters. Three simulation test cases are established with different levels of service speed. The results show that the speed profile in case of the service speed of 40 km/h results in the total energy of approximately 0.16 kWh, which is the minimum value among other cases. The model can be used to design the speed profile of the APM using a DC supply system to help save energy. Moreover, the model can be applied to the APM system using an AC supply system.

REFERENCES

- [1] Gerland, H. and Zemlin, H. "Development status of automated guideway transit (AGT) systems in Europe and Japan," IEEE Vehicular Technology Conference, Vol.30, pp. 448-456, 1980.
- [2] Hansen, B., Latham, Jr. E., Gray, D., and Shogan, S. "The Detroit People Mover: technology upgrades and rehabilitation plans on a middle-aged urban AGT," IEEE/ASME Joint Railroad Conference, pp. 91-97, 2003.
- [3] Bocharnikov, Y.V., Tpbias, A.M., Roberts, C., Hillmansen, S. and Goodman, C.J. (2007). "Optimal driving strategy for traction energy saving on DC suburban railways", IET Electric Power Applications, Vol. 1, No. 5, 675-682.
- [4] Goodman, C.J. "Train performance and simulation", Fourth Vocation School on Electric Traction System, IEE Power Division, April 1997.
- [5] M. Miyoshi, T. Takeba, and M. Miyatake, "Development of an Energy Efficient Train Traffic Control System for saving Electricity," Computers in Railways (COMPRAIL 2012), vol. XIII, pp. 499-510, Sept 2012.
- [6] T. Kulworawanichpong, "Multi-train modeling and simulation integrated with traction power supply solver using simplified Newton-Raphson method," Journal of Modern Transportation, pp 1-11. doi:10.1007/s40534-015-0086-y, September 2015.
- [7] Kulworawanichpong, T. "Optimising AC electric railway power flow with power electronic control", PhD Thesis, University of Birmingham, UK, November 2003.
- [8] L. Barnistelli, F. Ciccirelli, D. Lauria and D. Proto, "Optimal Design of DC Electrified Railway Stationary Storage System", in Proc. International Conference on Clean Electrical Power, Capri, 9-11 June 2009, pp. 739-745.
- [9] K. Mongkolkeha, "Single Train Movement Modelling and Simulation with Rail Potential Consideration", IEEE/SICE International Symposium on System Integration, Sapporo Convention Center, Sapporo, Japan, 13-15 December 2016.
- [10] K. F. Man, Member, IEEE, K. S. Tang, and S. Kwong, "Genetic Algorithms: Concepts and Applications", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 43, pp. 519-534, Oct 1996.
- [11] Zhang, Y. (2015). "A Comprehensive Survey on Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Applications". Mathematical Problems in Engineering, 2015: 931256.

ที่ ศธ ๐๕๒๕.๑(๑๙)/๔๔๖



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
๑๕๑๘ ถนนประชากรราษฎร์ ๑ แขวงวงศ์สว่าง
เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร ๑๐๘๐๐

๙ กันยายน ๒๕๖๓

เรื่อง รับผิดชอบต่อความผิดที่พิมพ์ในวารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรียน รองศาสตราจารย์ ดร.ธনীชัย กุลสุวรรณิชพงษ์

ตามที่ท่านได้ส่งบทความวิจัยเรื่อง การออกแบบและสร้างต้นแบบระบบควบคุมการเดินรถ สำหรับระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ เพื่อเสนอพิจารณาตีพิมพ์ลงในวารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ นั้น กองบรรณาธิการวารสารได้พิจารณาอนุมัติรับบทความดังกล่าวและให้จัดพิมพ์ลงในวารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ ๓๒ ฉบับที่ ๓ กรกฎาคม-กันยายน ๒๕๖๕

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะได้รับความร่วมมือจากท่านในการส่งบทความ เพื่อพิมพ์ลงในวารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือต่อไป

ขอแสดงความนับถือ

(รองศาสตราจารย์ ดร.มนตรี ศิริปรัชญานันท์)
ผู้ช่วยอธิการบดีฝ่ายส่งเสริมวิชาการและกิจการพิเศษ
รองหัวหน้ากองบรรณาธิการวารสาร

กองส่งเสริมวิชาการ

โทร. ๐ ๒๕๕๕ ๒๒๓๘

โทรสาร ๐ ๒๕๕๕ ๒๒๓๖

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

อัตลักษณ์ กองส่งเสริมวิชาการ : บริการอย่างเป็นมิตร ร่วมแรงคิดพัฒนาสู่สากล



การออกแบบและสร้างต้นแบบระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ

บันฉวี เข้มกลัดมุกด์ และธนต์ชัย กุลสุวรรณิชพงษ์*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา

สุรัชชัย วงษ์ฟูเกียรติ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา นครราชสีมา

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 8583 7207 อีเมล: thanatchai@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้กล่าวถึงการพัฒนาต้นแบบระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ (Automated People Mover: APM) ด้วยการนำโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (Programmable logic control: PLC) และอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ มาประยุกต์ใช้สำหรับควบคุมรูปแบบการเคลื่อนที่ของรถแบบโวลต์/เฮิร์ตซ์ (V/F control) ให้มีลักษณะที่สอดคล้องกับรูปแบบการทำงานที่กำหนดเอาไว้ 3 รูปแบบ ได้แก่ การเร่งความเร็วขณะที่รถเริ่มเคลื่อนออกจากสถานีต้นทาง การรักษาความเร็วให้คงที่ในขณะที่รถกำลังเคลื่อนที่อยู่ระหว่างสถานีต้นทางและปลายทาง และการลดความเร็วในขณะที่รถเข้าจอดที่สถานีปลายทาง โดยในที่นี้ได้นำเสนอระบบให้อยู่ในรูปแบบชุดจำลองขนาดเล็กที่ประกอบด้วยระบบควบคุมย่อยทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ ระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ (ส่วนที่ใช้เป็นทางวิ่ง) ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ (ส่วนที่ใช้เป็นรถ) และศูนย์กลางควบคุมระบบ (ส่วนที่ใช้เป็นห้องควบคุม) เพื่อทดสอบสมรรถนะการทำงานของระบบว่าสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของรถให้มีลักษณะที่สอดคล้องกับรูปแบบที่กำหนดเอาไว้หรือไม่ จากการทดสอบชุดจำลองพบว่ารถสามารถเคลื่อนที่ในโหมดควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติและโหมดควบคุมการเคลื่อนที่แบบฉุกเฉินบนทางวิ่งที่สร้างขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยความเร็วสูงสุดอยู่ที่ 5.86 เมตรต่อวินาที ซึ่งเกิดความผิดพลาดในการทำงานอันเกิดมาจากอุปกรณ์ที่นำมาประกอบขึ้นเป็นระบบทั้งหมดเพียง 0.75-10% ของการทดสอบควบคุมระบบทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าหากทำการเปลี่ยนอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่นำมาประกอบเป็นต้นแบบระบบควบคุมการเดินรถนี้ให้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นและมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นจะทำให้ในอนาคตเราสามารถออกแบบและสร้างระบบ APM ขึ้นเองในประเทศได้

คำสำคัญ: ระบบควบคุมการเดินรถ, ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ, โปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์



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, Nakhonratchasima, Thailand
Surachai Wingfookeat

Subject Industrial electrical engineering Faculty of industrial technology Nakhonratchasima university Nakhonratchasim

*Corresponding Author, Tel. 08 8583 7207, E-mail: thanatchai@gmail.com

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



1. บทนำ

ตั้งแต่อดีตการเดินทางเป็นกิจกรรมหนึ่งที่มีมนุษย์ทุกคนไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ในชีวิตประจำวัน ซึ่งในแต่ละครั้งที่มีการเดินทางจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งนั้น ผลที่ตามมาคือปัญหาการจราจรที่ติดขัดและมลพิษทางอากาศที่เกิดขึ้นจากการใช้ยานพาหนะต่าง ๆ ทำให้หลายองค์กรทั้งภาครัฐและเอกชนได้หันมาศึกษาและเสนอแนวทางการแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการนำเทคโนโลยีระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน (Mass Rapid Transit System) มาให้บริการในเขตกรุงเทพฯและปริมณฑล เช่น รถไฟฟ้าบีทีเอส รถไฟฟ้าใต้ดินเอ็มอาร์ที แอร์พอร์ต เรียวลิ่งค์ เป็นต้น [1] และเตรียมแผนที่จะขยายเส้นทางให้บริการไปยังเมืองสำคัญทางด้านเศรษฐกิจอื่น ๆ ในอนาคต [2] อย่างไรก็ตามการขยายเส้นทางให้บริการนี้ยังเป็นประเด็นที่ถูกนำมาถกเถียงกันอย่างเข้มข้นในด้านความคุ้มค่าและความเหมาะสมในการนำระบบมาใช้ เนื่องจากระบบนี้ใช้พื้นที่ในการติดตั้งมาก มีต้นทุนในการก่อสร้างที่สูง และไม่สามารถออกแบบและสร้างตัวระบบขึ้นเองภายในประเทศได้ ดังนั้นในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา นักวิชาการและนักวิจัยหลายท่านจึงได้นำเรื่องนี้ไปศึกษาและเสาะหาระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนประเภทอื่น ๆ มาทดแทนระบบเดิมที่มีอยู่แล้ว [3][4][5]

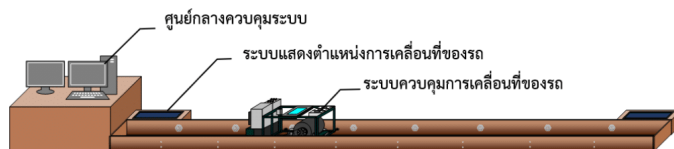
ในช่วงไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมา ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ (Automated People Mover : APM) เป็นระบบหนึ่งที่ประเทศต่าง ๆ ทั่วโลกต่างได้หันมาให้ความสนใจในการศึกษาและพัฒนา เพื่อนำระบบนี้มาใช้สำหรับรับ/ส่งผู้โดยสารในเขตพื้นที่ขนาดเล็ก เช่น ใจกลางเมือง สนามบิน เป็นต้น [6] แสดงดังรูปที่ 2 ด้วยจุดเด่นที่ว่าระบบมีขนาดเล็กสามารถติดตั้งในเขตพื้นที่ที่มีขนาดจำกัดได้ มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน และมีรูปแบบการทำงานที่สามารถดำเนินขับเคลื่อนระบบอัตโนมัติโดยไม่ต้องอาศัยเจ้าหน้าที่หรือคนขับคอยควบคุมระบบอยู่บนรถ [7] ทำให้การใช้งานระบบนี้สามารถลดต้นทุนในส่วนค่าแรงของเจ้าหน้าที่ควบคุมระบบที่ต้องคอยประจำการอยู่บนรถและยังสามารถยกระดับความเป็นมาตรฐานในการให้บริการระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนภายในประเทศได้อีกด้วย



รูปที่ 1 ระบบขนส่งผู้โดยสารอัตโนมัติ [8]

จากจุดเด่นของระบบ APM ดังที่กล่าวมาข้างต้นประกอบกับการผลักดันนโยบาย “ไทยแลนด์ 4.0” ของคณะรัฐบาลในยุคนี้ ที่ส่งเสริมให้นำเทคโนโลยีการควบคุมแบบอัตโนมัติเข้ามา มีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์ในทุก ๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็น ด้านอุตสาหกรรม ด้านความปลอดภัย ด้านเกษตรกรรม ด้านธุรกิจ เป็นต้น [9] ทำให้ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการตัดสินใจที่จะจัดซื้อจัดจ้างระบบ APM รุ่น “Cityval and Airval” ของบริษัท Siemens มาติดตั้งในเขตพื้นที่สนามบินสุวรรณภูมิให้บริการระหว่างอาคารผู้โดยสารปัจจุบันกับอาคารผู้โดยสารหลังใหม่ [10] และก่อสร้างเป็นระบบรถไฟฟ้าสายสีทอง รุ่น “Innovia APM 300” ของบริษัท Bombardier ที่ให้บริการระหว่างสถานีกรุงธนบุรีและสถานีคลองสาน [11] ซึ่งถือเป็นก้าวแรกที่สำคัญสำหรับการพัฒนาบริการระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนรูปแบบใหม่ภายในประเทศ แต่อย่างไรก็ตามระบบเหล่านี้ที่เลือกนำมาติดตั้งใช้งานก็ยังเป็นระบบที่สั่งซื้อมาจากบริษัทต่างชาติอีกที ซึ่งหากวันใดที่ระบบเกิดเหตุขัดข้องไม่สามารถแก้ไขซ่อมบำรุงเองได้จากเจ้าหน้าที่ที่คอยดูแลระบบ หนทางเดียวในการแก้ปัญหานี้คือการจ้างวิศวกรและช่างอะไหล่จากบริษัทเจ้าของเทคโนโลยีของระบบเหล่านี้ในการซ่อมแซม ส่งผลให้เงินลงทุนบางส่วนที่ควรไหลเวียนอยู่ภายในประเทศต้องสูญเสียออกไปนอกประเทศแทน

บทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างชุดจำลองระบบ APM ที่นำรูปแบบการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสแบบโวลต์/เฮิร์ตซ์ด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์หรือพีแอลซี (Programmable Logic Control :



รูปที่ 2 ภาพรวมชุดจำลองระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM

PLC) และการตรวจจับวัตถุด้วยไฟโตอิเล็กทริกเซนเซอร์ (Photoelectric sensor) ที่มีใช้งานในระบบสายพานลำเลียงทั่วไปมาประยุกต์ใช้ เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของรถให้มีความเร็ว ณ จุดต่าง ๆ บนทางวิ่งตามรูปแบบที่กำหนดไว้ แสดงดังรูปที่ 2 ด้วยการประมวลผลของ PLC ที่รับสัญญาณจากเซนเซอร์ตรวจจับที่ติดตั้งตามทางวิ่งแบบอัตโนมัติ โดยแนวคิดการควบคุมในลักษณะนี้สามารถทำได้จากการนำอุปกรณ์ไฟฟ้าในภาคอุตสาหกรรมทั่วไปมาประกอบเข้าด้วยกัน ทำให้การสร้าง ซ่อมบำรุง และพัฒนาระบบ APM สามารถดำเนินการด้วยมือช่างเฉพาะทางที่มีความรู้ความเชี่ยวชาญในด้านระบบไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมภายในประเทศ โดยที่ไม่จำเป็นต้องอาศัยเทคโนโลยีระบบ APM สำเร็จรูปที่รับมาจากต่างประเทศอีกต่อไป

2. ระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM

2.1 ภาพรวมระบบ

ในส่วนนี้ได้กล่าวถึงชุดจำลองระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ที่สร้างขึ้น เพื่อทดสอบผลการทำงานของระบบว่าสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของรถได้ตามที่ออกแบบไว้หรือไม่ ซึ่งภายในชุดจำลองนี้ประกอบด้วยระบบควบคุมย่อยทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ ระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ และศูนย์กลางควบคุมระบบ แสดงดังรูปที่ 3 เนื่องจากระบบ APM เป็นระบบที่ดำเนินการควบคุมรถด้วยคำสั่งอัตโนมัติเต็มรูปแบบ จึงต้องมีการกระจายหน้าที่ในการประมวลผล และตรวจสอบการทำงานของระบบให้กับส่วนต่าง ๆ เพื่อป้องกันไม่ให้อบบส่วนใดส่วนหนึ่งทำงานหนักเกินไปและช่วยให้ง่ายต่อการตรวจสอบหรือซ่อมแซมระบบในกรณีที่ระบบเกิดความผิดปกติขึ้นอีกด้วย โดยระบบควบคุมการเดิน

รถสำหรับระบบ APM จะมีระบบย่อยที่สำคัญทั้งหมด 3 ส่วน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1.1 ระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ: ระบบนี้ออกแบบขึ้นมาสำหรับตรวจจับตำแหน่งของรถตามชื่อของระบบ ซึ่งถือเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยให้เจ้าหน้าที่ผู้ควบคุมระบบหรือผู้โดยสารที่มาใช้บริการระบบสามารถเข้าถึงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถว่า ณ ขณะนั้นรถเคลื่อนที่อยู่จุดใดของทางวิ่งและใกล้มาถึงสถานีผู้โดยสารที่ตนรอหรือไม่ นอกจากนี้ผลการตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถยังถูกส่งต่อและนำไปใช้ในการประมวลผลของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ เพื่อปรับความเร็วในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสของรถให้มีลักษณะที่สอดคล้องกับความเร็วในแต่ละจุดที่ได้ออกแบบไว้ในโครงสร้างความเร็วสำหรับการทำงานของระบบจะใช้ไฟโตอิเล็กทริกเซนเซอร์ที่ติดตั้งตามทางวิ่งในการตรวจสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ แล้วนำตำแหน่งที่จับได้ไปประมวลผลและแสดงผลบนจอ

2.1.2 ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ: ระบบนี้สามารถพูดได้ว่าเป็นส่วนที่มีความสำคัญที่สุดในระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ที่ได้สร้างขึ้น ซึ่งจะมีหน้าที่ในการควบคุมรูปแบบการเคลื่อนที่ของรถด้วยการนำเอาสัญญาณตรวจจับตำแหน่งรถที่รับมาจากระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถมาใช้เป็นตัวให้สัญญาณในการสั่งปรับความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถให้มีลักษณะที่สอดคล้องโครงสร้างความเร็วที่ออกแบบเอาไว้ สำหรับระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถในชุดจำลองนี้จะออกแบบให้มีฟังก์ชันการทำงานทั้งหมด 2 โหมด ได้แก่ โหมดควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติ ใช้ในการควบคุมรถให้เคลื่อนที่ไปกลับระหว่างสถานีผู้โดยสารแบบอัตโนมัติในสภาพการทำงานปกติ และโหมดควบคุมการเคลื่อนที่แบบฉุกเฉิน ใช้ในการควบคุมรถให้



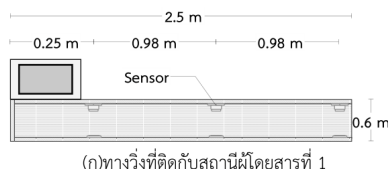
เคลื่อนกลับไปตั้งหลักที่สถานีผู้โดยสารต้นทางในกรณีที่มีระบบเกิดความผิดพลาด โดยการทำงานทั้งสองโหมดนี้จะช่วยให้การเคลื่อนที่ของรถนั้นมีความยืดหยุ่นสามารถทำงานในสภาวะต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

2.1.3 ศูนย์กลางควบคุมระบบ: ส่วนนี้ถูกออกแบบขึ้นมาสำหรับใช้ในการสั่งควบคุม ตรวจสอบการทำงาน และเฝ้าระวังสถานการณ์อันไม่คาดฝันที่อาจเกิดขึ้นกับระบบในขณะที่รถกำลังให้บริการอยู่ เพื่อความปลอดภัยต่อคนและระบบ APM ที่ใช้งาน เนื่องจากการทำงานของระบบนี้จะดำเนินการแบบอัตโนมัติเต็มรูปแบบโดยไม่มีเจ้าหน้าที่คอยประจำการอยู่ ณ ตำแหน่งมีการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ดังนั้นการสั่งงานและตรวจสอบการทำงานของระบบทุกส่วนในระบบนี้จึงตกเป็นของศูนย์กลางควบคุมระบบเพียงจุดเดียวเท่านั้น

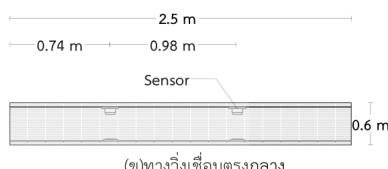
2.2 การออกแบบระบบ

ในการออกแบบชุดจำลองระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ในส่วนนี้ได้กล่าวถึงแต่ละระบบโดยแบ่งออกเป็นส่วนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

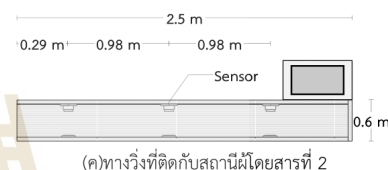
2.2.1 ระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ: ระบบนี้ได้ทำการออกแบบส่วนทางวิ่งที่ขึ้นรูปด้วยไม้อัดหนา 13 มิลลิเมตร ให้มีลักษณะคล้ายกล่องรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง×ยาว×สูง ประมาณ 0.6×2.5×0.13 เมตร โดยทางวิ่งนี้จะสามารถแยกชิ้นส่วนออกจากกันได้ทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ ทางวิ่งที่ติดกับสถานีผู้โดยสารที่ 1 ทางวิ่งเชื่อมต่อตรงกลาง และทางวิ่งที่ติดกับสถานีผู้โดยสารที่ 2 ซึ่งในแต่ละส่วนจะมีการเจาะรูวงกลมรัศมีขนาด 1 เซนติเมตร ห่างกัน 0.98 เมตร ทั้งหมด 8 รู สำหรับติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับที่ใช้ในการตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ แสดงดังรูปที่ 3 นอกจากนี้ที่ปลายด้านหนึ่งของทางวิ่งที่ติดกับสถานีผู้โดยสารที่ 1 ได้ทำการติดตั้งกล่องวงจรสำหรับวางจอแสดงผลและบรรจุอุปกรณ์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่จำเป็นในการดำเนินงานของระบบไว้ แสดงดังรูปที่ 4 ส่วนปลายทางวิ่งที่ติดกับสถานีผู้โดยสารที่ 2 จะเป็นกล่องวงจรเปล่าที่ใช้สำหรับวางจอแสดงผลอีกจอเท่านั้น



(ก) ทางวิ่งที่ติดกับสถานีผู้โดยสารที่ 1

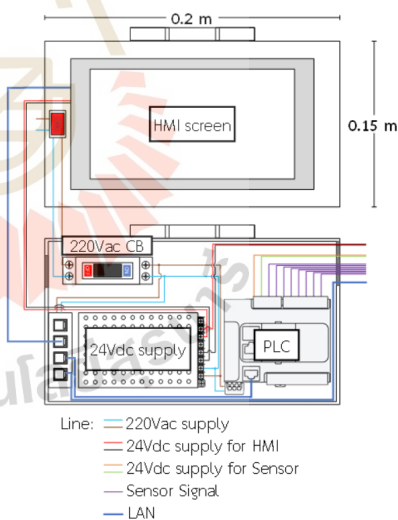


(ข) ทางวิ่งเชื่อมต่อตรงกลาง

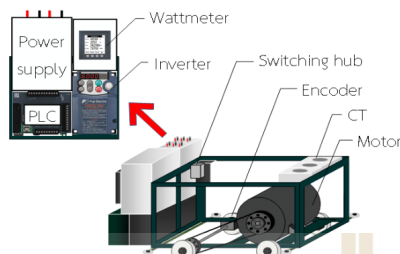


(ค) ทางวิ่งที่ติดกับสถานีผู้โดยสารที่ 2

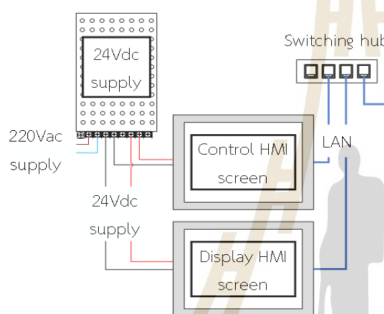
รูปที่ 3 การออกแบบระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ



รูปที่ 4 อุปกรณ์ภายในกล่องวงจรสถานีผู้โดยสารที่ 1



รูปที่ 5 การออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ



รูปที่ 6 การออกแบบศูนย์กลางควบคุมระบบ

2.2.2 ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ: รถที่ใช้ในชุดจำลองนี้ได้นำเหล็กฉากมายึดเข้ากันให้มีลักษณะคล้ายกล่องทรงสี่เหลี่ยมที่มีขนาด กว้าง×ยาว×สูง เท่ากับ 0.58×0.34×0.40 เมตร เพื่อใช้ในการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้าที่จำเป็นในการทำงานของระบบ เช่น PLC อินเวอร์เตอร์ มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส เป็นต้น และยังมีติดตั้งล้อขนาดรัศมี 4 เซนติเมตร ทั้งหมด 4 ล้อ ที่เชื่อมต่อกับแกนเพลลาของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนรถให้สามารถวิ่งได้ตามคำสั่งการควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส นอกจากนี้ภายในระบบยังมีการติดตั้งล้อนำทาง (Guide wheel) ซึ่งใช้ในการบังคับทิศทางรถให้สามารถประคองรักษาเส้นทางการวิ่งให้มีลักษณะตามรูปแบบที่ได้ออกแบบเอาไว้ แสดงดังรูปที่ 5

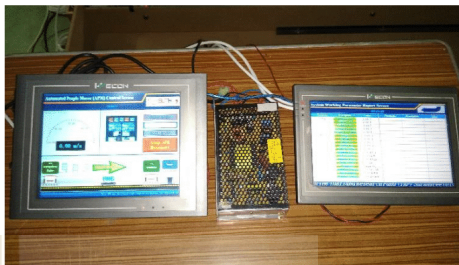
2.2.3 ศูนย์กลางควบคุมระบบ: ส่วนนี้ได้ออกแบบให้ระบบมีจอ HMI 2 จอ ที่มีหน้าที่ที่แตกต่างกัน ได้แก่ จอแรกเป็นส่วนที่ใช้สำหรับควบคุมการทำงานของระบบและจอที่สองเป็นส่วนที่ใช้สำหรับแสดงผลการทำงานของระบบ โดยในการทำงานของระบบนี้จะมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลกันระหว่างระบบย่อยทั้งสามผ่านระบบสื่อสารแบบอีเทอร์เน็ต (Ethernet) เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลแล้วใช้ในการควบคุมการทำงานของระบบหรือแสดงผลการทำงานต่อไป แสดงดังรูปที่ 6

2.3 รูปแบบการทำงานของระบบ

ระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ที่ได้ออกแบบขึ้น แสดงดังรูปที่ 7 มีกระบวนการทำงานโดยเริ่มต้นด้วยการสั่งควบคุมรถจากศูนย์กลางควบคุมระบบ ซึ่งเมื่อระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถได้รับคำสั่ง PLC จะทำการตั้งสัญญาณจากโฟโตอิเล็กทริกเซนเซอร์ (เซนเซอร์ตรวจจับ) ในระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถที่ติดตั้งไว้ ณ สถานีผู้โดยสารต้นทาง แล้วส่งคำสั่งไปยังอินเวอร์เตอร์ให้ทำการปรับความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสด้วยวิธีการควบคุมแบบโวลต์/เฮิร์ตซ์แบบวงเปิด (Open-loop V/f control) เพื่อให้รถเคลื่อนที่ออกจากสถานีผู้โดยสารต้นทางไปยังสถานีผู้โดยสารปลายทาง โดยการเคลื่อนที่นี้จะมีการปรับความเร็วในแต่ละจุดบนทางวิ่งให้มีรูปแบบที่สอดคล้องกับโครงร่างความเร็วที่กำหนดเอาไว้ด้วยการอาศัยสัญญาณจากเซนเซอร์ตรวจจับที่ติดตั้งไว้ในแต่ละจุดที่ต้องการปรับความเร็วและเมื่อรถเคลื่อนที่เข้าใกล้สถานีผู้โดยสารปลายทางแล้ว PLC จะสั่งการให้อินเวอร์เตอร์ชะลอความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟส เพื่อให้รถหยุดการเคลื่อนที่ ณ จุดที่ติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับไว้ที่สถานีผู้โดยสารปลายทาง สำหรับการเคลื่อนที่ของระบบนี้มีการดำเนินไปกลับระหว่างสถานีผู้โดยสาร 2 สถานี แบบอัตโนมัติอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งมีคำสั่งหยุดการเคลื่อนที่ของรถจากศูนย์กลางควบคุมระบบอีกทีหรือระบบเกิดเหตุขัดข้องขึ้นแล้วเข้าสู่การทำงานในโหมดควบคุมการเคลื่อนที่แบบฉุกเฉิน สรุปเป็นแผนภาพการทำงาน (Flowchart) แสดงดังรูปที่ 8



(ก) ชุดจำลองระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ



(ข) ชุดจำลองศูนย์กลางควบคุมระบบ



(ค) ชุดจำลองระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ

รูปที่ 7 ชุดจำลองระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM จักรังที่สร้างขึ้น

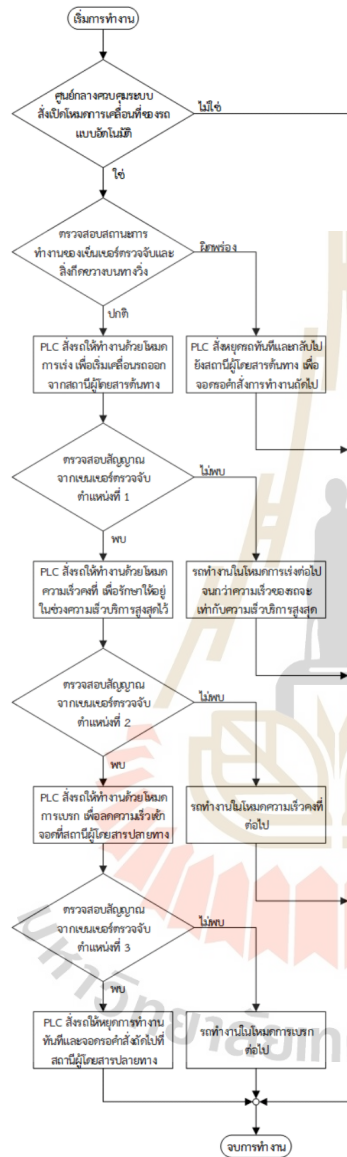
จากรูปแบบการทำงานของระบบควบคุมการเดินรถ สำหรับระบบ APM ที่กล่าวมาข้างต้น จะสามารถสรุปฟังก์ชันการทำงานของระบบย่อยทั้งสามส่วนโดยสังเขป ได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปรูปแบบการทำงานของระบบ

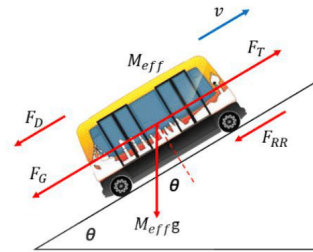
ระบบ	การทำงาน
ระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ	ตรวจสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ เพื่อนำผลที่ได้ไปแสดงให้เจ้าหน้าที่หรือผู้โดยสารรับรู้
	ใช้เซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ แล้วส่งสัญญาณนั้นไปยังระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ เพื่อให้ระบบรู้ว่าปรับความเร็วของรถให้สอดคล้องกับโครงสร้างความเร็วที่กำหนดเอาไว้
	ตรวจสอบสถานะการทำงานของเซนเซอร์ตรวจจับ เพื่อป้องกันความผิดพลาดที่อาจจะเกิดจากการที่ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถไม่สามารถเปลี่ยนรูปแบบการทำงานของรถ จุดต่าง ๆ ของทางวิ่งได้

ตารางที่ 1 สรุปรูปแบบการทำงานของระบบ (ต่อ)

ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ	ควบคุมการเดินรถระหว่างสถานีผู้โดยสารแบบอัตโนมัติ กรณีที่ระบบทำงานปกติ
	ควบคุมการเดินรถขณะที่เกิดเหตุขัดข้องหรือมีวัตถุขวางทางวิ่งแบบฉุกเฉิน เพื่อนำรถเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสารใดสถานีหนึ่งและรอคำสั่งสำหรับการทำงานต่อไป
	ตรวจสอบความเร็วและรูปแบบการเคลื่อนที่ของรถ
	ตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ทางไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ใช้ในการดำเนินงานของระบบ เช่น ค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้า เป็นต้น
ศูนย์กลางควบคุมระบบ	ควบคุมคำสั่งเริ่มหรือหยุดการทำงานของระบบ APM ด้วยจอส่วนที่ใช้สำหรับควบคุมการทำงานของระบบ
	แสดงผลการตรวจสอบต่างๆ ที่ได้จากระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถและระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถด้วยจอส่วนที่ใช้สำหรับแสดงผลการทำงานของระบบ



รูปที่ 8 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบ



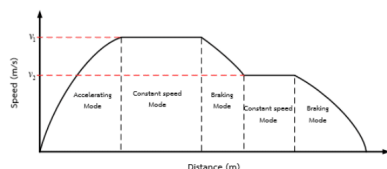
รูปที่ 9 แผนภาพวัตถุอิสระการเคลื่อนที่ของรถ

สำหรับการพิจารณารูปแบบการเคลื่อนที่ของรถในระบบ APM สามารถคำนวณได้ในลักษณะเดียวกับการเคลื่อนที่ของรถไฟทั่วไป เนื่องจากทั้งสองระบบมีรูปแบบการทำงานที่มีความคล้ายคลึงกัน ต่างกันก็เพียงระบบ APM ใช้ล้อภายในการขับเคลื่อนทำให้เคลื่อนที่บนทางวิ่งแบบคอนกรีต ส่วนรถไฟทั่วไปใช้ล้อกับรางวิ่งที่สร้างขึ้นมาจากเหล็กในการเคลื่อนที่ [12] ซึ่งมีรายละเอียดการพิจารณารูปแบบการเคลื่อนที่ของรถดังต่อไปนี้

2.3.1 หลักพลวัตของรถ (Vehicle dynamic): การพิจารณารูปแบบการเคลื่อนที่ของรถในระบบ APM อาศัยกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน ดังสมการที่ 1 สร้างแผนภาพวัตถุอิสระการเคลื่อนที่ของรถที่มีแรงดูดลาก (Traction force: T_E) และแรงต้านการเคลื่อนที่ (Resistance forces: F_R) กระทำกับรถขนาดประสิทธิผลของน้ำหนัก (effective vehicle mass: M_{eff}) ที่เคลื่อนที่บนทางวิ่งเอียงทำมุม θ กับแนวราบด้วยความเร่ง α แสดงดังรูปที่ 9 โดยที่แรงต้านการเคลื่อนที่จะสามารถจำแนกออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ประกอบด้วย แรงต้านอากาศ (Aerodynamic drag force: F_D) แรงโน้มถ่วง (Gravitational or gradient force: F_G) และแรงเสียดทานที่ล้อรถ (Frictional force or rolling resistance: F_{RR}) ดังสมการที่ 2 [13]

$$T_E - F_R = M_{eff} \alpha \quad (1)$$

$$F_R = F_D + F_G + F_{RR} \quad (2)$$



รูปที่ 10 โครงร่างความเร็วของรถ

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

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

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

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

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

$$s_f = s_i + v_i \Delta t + \frac{1}{2} \alpha \Delta t^2 \tag{6}$$

2.3.2 ลักษณะโครงร่างความเร็วของรถ (Vehicle speed profile): จากหลักพลวัตของรถในหัวข้อที่ 2.3.1 จะสามารถออกแบบลักษณะการเคลื่อนที่ของรถให้มีความสอดคล้องกับโครงร่างความเร็วของรถไฟทั่วไป ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 โหมด ประกอบด้วย โหมดการเร่ง (accelerating mode) โหมดความเร็วคงที่ (constant speed mode) โหมดการแล่น (coasting mode) และโหมดการเบรก (braking mode) [15] โดยในบทความนี้ได้ออกแบบโครงร่างความเร็ว

ของรถให้มีช่วงทำงานในโหมดความเร็วคงที่ทั้งหมด 2 ความเร็ว แสดงดังรูปที่ 10 เพื่อกำหนดให้รถวิ่งในช่วงออกตัวด้วยความเร็วสูงสุด แล้วจึงลดความเร็วลงเมื่อรถเข้าใกล้สถานี ผู้โดยสารปลายทางสำหรับเตรียมเข้าจอด

2.4 วิธีการทดสอบการทำงานของระบบ

การทดสอบระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ส่วน ดังต่อไปนี้

2.4.1 การทดสอบควบคุมความเร็วของรถ: ทำการควบคุมรถให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วบริการสูงสุดค่าต่าง ๆ เพื่อทดสอบการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถ และทดสอบผลตอบสนองการปรับความเร็วในแต่ละโหมด

2.4.2 การทดสอบโหมดควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติ: ทำการควบคุมรถในโหมดควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติ เพื่อดูผลการตอบสนองของระบบ

2.4.3 การทดสอบโหมดควบคุมการเคลื่อนที่แบบฉุกเฉิน: ทำการนำสิ่งกีดขวางไปวางบนทางวิ่งขณะที่รถกำลังทำงานเพื่อดูผลการตอบสนองของระบบในโหมดควบคุมการเคลื่อนที่แบบฉุกเฉิน ซึ่งแบ่งเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่มีสิ่งกีดขวางบนทางวิ่ง และกรณีเซนเซอร์ตรวจจับบางส่วนเกิดความขัดข้อง

โดยการทดสอบระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ใช้เป็นเงื่อนไขในการทำงานของระบบ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของชุดจำลองระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM

พารามิเตอร์	ข้อมูล
1. พารามิเตอร์ทางกล	
1.จำนวนผู้โดยสาร	1 คู่
2.รูปแบบการขับเคลื่อน	ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสขับเคลื่อนล้อต่าง 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



ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของชุดจำลองระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM (ต่อ)

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

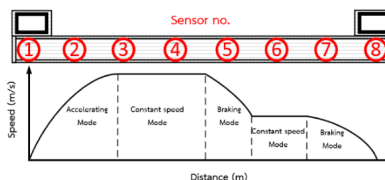
3. ผลการทดสอบระบบ

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



รูปที่ 11 จุดปรับเปลี่ยนความเร็วของรถ

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 จุดต่าง ๆ บนทางวิ่ง: จากความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่ตั้งเซ็นเซอร์ตรวจจับบนทางวิ่งกับลักษณะโครงสร้างความเร็วที่ออกแบบไว้ แสดงดังรูปที่ 11 เมื่อทำการทดสอบปรับความเร็วบริการสูงสุดที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของรถสามารถสรุปความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถในแต่ละตำแหน่งบนทางวิ่ง แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการปรับความเร็วรถ ณ จุดต่าง ๆ บนทางวิ่ง

เซ็นเซอร์ตรวจจับที่	ความเร็วรถ ณ จุดต่าง ๆ ที่ติดตั้งเซ็นเซอร์ (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



ตารางที่ 4 ผลการปรับความเร็วรถ ณ จุดต่าง ๆ บนทางวิ่ง (ต่อ)

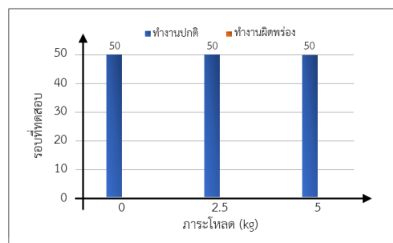
4	1.0103	2.0017	2.5497
5	1.0002	2.0045	2.6458
6	1.0065	2.0208	2.2106
7	0.5026	0.5026	1.6733
8	0.0003	0.0012	0.3472

จากการทดสอบการใช้พลังงานไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนรถและความเร็วรถ ณ จุดต่าง ๆ บนทางวิ่ง ทำให้ทราบแนวโน้มการใช้พลังงานไฟฟ้าในการเคลื่อนที่ของรถในช่วงความเร็วบริการสูงสุดต่าง ๆ และพบว่าระบบ APM สามารถทำงานในรูปแบบที่กำหนดไว้เมื่อควบคุมความเร็วบริการสูงสุดของรถไว้ที่ 1.0 และ 2.0 m/s แต่เมื่อรถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วบริการสูงสุดที่ 3.0 m/s รถจะสามารถเร่งความเร็วสูงสุดได้เพียง 2.76 m/s เท่านั้น แล้วเข้าสู่โหมดเบรกเพื่อเข้าจอดที่สถานีผู้โดยสารปลายทาง อย่างไรก็ตามก็เบรกนี้ก็ยังไม่สามารถหยุดรถได้ ณ ตำแหน่งที่รถถึงสถานีผู้โดยสารพอดี แต่จะมีการกระแทกกับขอบสุดของทางวิ่งจึงจะหยุดการเคลื่อนที่ของรถได้ ดังนั้นการทดสอบในหัวข้อถัด ๆ ไปจะใช้ความเร็วบริการสูงสุดที่ 1.0 1.5 และ 2.0 m/s ตามลำดับ

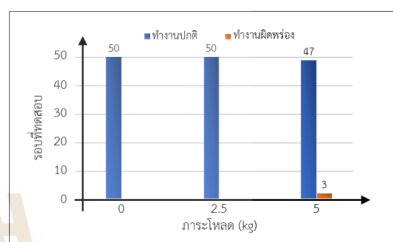
3.2 การทดสอบโหมดควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติ

สำหรับการทดสอบในโหมดนี้ได้ทำการตั้งค่าควบคุมรถให้วิ่งไปกลับบนทางวิ่งที่สร้างขึ้นด้วยความเร็วบริการสูงสุดที่ 1.0 1.5 และ 2.0 เมตร/วินาที (m/s) ตามลำดับ โดยในแต่ละความเร็วจะมีการปรับขนาดโหลดทั้งหมด 3 ระดับ ได้แก่ 0 (ไม่มีโหลด) 2.5 และ 5 กิโลกรัม (kg) ตามลำดับ เพื่อตรวจสอบสมรรถนะการทำงานของระบบ พร้อมด้วยการตรวจสอบจอแสดงผลที่ติดตั้งไว้ภายในศูนย์กลางควบคุมระบบว่ามีการทำงานที่สอดคล้องกันหรือไม่ แสดงดังรูปที่ 12

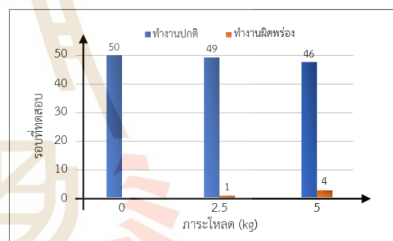
จากผลการทดสอบในรูปที่ 12 พบว่าการทำงานของโหมดนี้สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของรถได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากภายในระบบใช้การควบคุมด้วยวิธีโวลต์/เฮิร์ตซ์แบบวงเปิด ที่ไม่มีการรับค่ากลับสำหรับปรับปรุงรูปแบบการ



(ก) ความเร็วบริการสูงสุดที่ 1.0 m/s



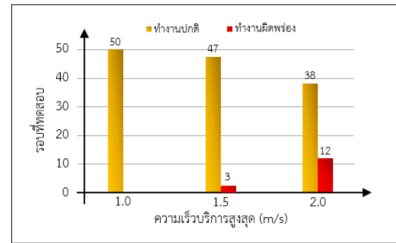
(ข) ความเร็วบริการสูงสุดที่ 1.5 m/s



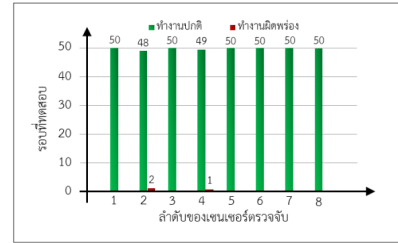
(ค) ความเร็วบริการสูงสุดที่ 2.0 m/s

รูปที่ 12 ผลการทดสอบโหมดควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติ

ทำงานของระบบ ดังนั้นเมื่อรถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงขึ้นและบรรทุกโหลดที่หนักขึ้นจึงทำให้บางครั้งที่รถทำงานที่ผิดพลาด ซึ่งสามารถสังเกตได้จากการทำงานของรถในช่วงความเร็ว 1.5 และ 2.0 m/s ที่บรรทุกทุกโหลด 2.5 ถึง 5 kg ระบบมีการทำงานผิดพลาดประมาณ 6-7 ครั้ง หรือประมาณ 1.56% ของการทดสอบทั้งหมด นอกจากนี้ความผิดพลาดในการทำงานที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากการที่รถเบรกเพื่อเข้าจอด



รูปที่ 13 ผลการทดสอบโหมดควบคุมการเคลื่อนแบบถูกเดิน กรณีเซ็นเซอร์ตรวจจับบางส่วนทำงานขัดข้อง



รูปที่ 14 ผลการทดสอบโหมดควบคุมการเคลื่อนแบบถูกเดิน กรณีที่มีสิ่งกีดขวางบนทางวิ่ง

ที่สถานีผู้โดยสารปลาย แต่เมื่อถึงจุดจอดรถไม่สามารถจอดได้สนิทแล้วไปกระแทกเข้ากับผนังด้านปลายของทางวิ่ง เนื่องจากระบบนี้ไม่ได้มีการติดตั้งอุปกรณ์ช่วยเบรก รถจึงต้องอาศัยการเบรกด้วยการปล่อยรถวิ่งเปล่าจนกว่าแรงเฉื่อยจะหมดไป ทำให้รถจอดไม่ตรงกับจุดเริ่มต้นการเคลื่อนที่ในรอบถัดไป จึงเป็นที่มาของการที่รถไม่สามารถเคลื่อนต่อได้นั้นเอง

3.3 การทดสอบโหมดควบคุมการเคลื่อนที่แบบถูกเดิน

ในการทดสอบโหมดการทำงานแบบถูกเดินนี้ได้ทำการทดสอบสั่งควบคุมให้รถเคลื่อนที่บนทางวิ่งด้วยความเร็วบริการสูงสุดที่ 1.0 1.5 และ 2.0 m/s ตามลำดับ ซึ่งในขณะที่รถกำลังเคลื่อนที่อยู่นั้นจะนำเหตุการณ์ทดสอบเข้าไปรบกวนการทำงานของระบบทั้งหมด 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่มีสิ่งกีดขวางบนทางวิ่งและกรณีเซ็นเซอร์ตรวจจับบางส่วนเกิดความขัดข้อง แล้วตรวจสอบผลการตอบสนองที่เกิดขึ้นภายในระบบว่าเป็นไปเช่นไร จากการทดสอบได้ผลดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.2.1 กรณีที่มีสิ่งกีดขวางบนทางวิ่ง

การทดสอบนี้ได้นำกล่องที่ติดตั้งแผ่นสะท้อนสัญญาณของโฟโตอิเล็กทริกเซ็นเซอร์ไปวางขวางบนทางวิ่ง ซึ่งเมื่อเซ็นเซอร์ตรวจจับพบวัตถุดังกล่าว ระบบจะทำการสั่งหยุดการเคลื่อนที่ของรถในทันทีเพื่อป้องกันการชนกันระหว่างวัตถุนั้นกับรถ จากนั้นระบบจึงสั่งให้รถเคลื่อนที่กลับไปยังสถานีผู้โดยสารต้นทางเพื่อรอคำสั่งสำหรับการทำงาน หลังจากที่มีการจัดการกับวัตถุที่มาขวางทางวิ่งต่อไป จาก

การทดสอบระบบ 50 รอบ ด้วยความเร็วบริการสูงสุดที่กำหนดไว้ทำให้ได้ผล แสดงดังรูปที่ 13

3.2.2 กรณีเซ็นเซอร์ตรวจจับบางส่วนทำงานขัดข้อง

การทดสอบนี้ทำการสั่งควบคุมรถให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วบริการสูงสุดอยู่ที่ 1.5 m/s จากนั้นตัดสัญญาณเซ็นเซอร์ตรวจจับที่ติดตั้งบนทางวิ่งที่ละตัว เพื่อตรวจสอบว่าเมื่อสัญญาณเซ็นเซอร์ตรวจจับขาดหายไป รถจะสามารถหยุดการทำงานและเคลื่อนที่กลับไปยังสถานีผู้โดยสารต้นทางเพื่อจอดรอคำสั่งถัดไปได้หรือไม่ ซึ่งจากการทดสอบได้ผลการทดลอง แสดงดังรูปที่ 14

จากผลการทดสอบในรูปที่ 13 และ 14 พบว่า โหมดนี้สามารถสั่งควบคุมการเคลื่อนที่ของรถในกรณีที่ตรวจพบสิ่งกีดขวางบนทางวิ่งและกรณีที่เซ็นเซอร์ตรวจจับบนทางวิ่งเกิดความขัดข้องได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีเพียงปัญหาเดียวที่เกิดขึ้นในการทำงานของโหมดนี้คือการที่รถไม่สามารถหยุดได้ในทันทีที่เกิดตรวจพบสิ่งกีดขวางหรือตรวจพบเซ็นเซอร์ตรวจจับที่เกิดความขัดข้อง ทำให้เกิดการชนกันระหว่างรถกับวัตถุและใช้เวลาในการเบรกที่ค่อนข้างนานอยู่บ่อยครั้ง ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์จากการทดสอบก็อยู่ที่ประมาณ 0.75-10% ของการทดสอบทั้งหมด ถ้าหากมองในมุมมองของการทดสอบแบบจำลองจะถือว่าไม่เยอะมาก แต่หากเป็นระบบจริงเปอร์เซ็นต์เหล่านี้ก็จะหมายถึงชีวิตชีวิตหนึ่งก็ว่าได้ อย่างไรก็ตามปัญหาเหล่านี้ที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากการตอบสนองของเซ็นเซอร์ตรวจจับที่ช้าเกินไปและการที่ระบบขาดอุปกรณ์ช่วยเบรกที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งจะสามารถ



แก้ปัญหาเหล่านี้ได้จากการเปลี่ยนอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ทำงานในระบบนั้นเอง

4. อภิปรายผลและสรุป

4.1 สรุปผล

จากการออกแบบและสร้างระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ที่ประกอบด้วยระบบแสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถ ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของรถ และระบบศูนย์กลางควบคุมระบบ พบว่าการทำงานของระบบสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของรถในโหมดควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติและโหมดควบคุมการเคลื่อนที่แบบฉุกเฉินได้อย่างมีประสิทธิภาพตามรูปแบบที่กำหนดเอาไว้ ซึ่งถือว่าการพัฒนาต้นแบบระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM นี้ประสบความสำเร็จตรงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ แต่อย่างไรก็ตามการทำงานของระบบนี้ยังมีความผิดพลาดเล็กน้อยจากอุปกรณ์ที่นำมาประกอบเป็นชุดจำลองอยู่ เช่น รถจอดไม่ตรงจุด ระบบไม่มีการส่งสัญญาณตรวจจับตำแหน่งรถ เป็นต้น ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

4.2 ปัญหาและการแก้ไข

ดังที่กล่าวไว้จากหัวข้อที่แล้วการที่ระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ทำงานผิดพลาดนั้น โดยส่วนใหญ่จะมีสาเหตุมาจากอุปกรณ์ที่เป็นองค์ประกอบภายในชุดจำลอง ซึ่งในที่นี่ได้ยกตัวอย่างความผิดพลาดที่เกิดขึ้นขณะที่ทำการทดสอบระบบ ดังต่อไปนี้

4.2.1 เซนเซอร์ตรวจจับไม่ส่งสัญญาณไปยัง PLC ถึงแม้รถจะวิ่งผ่านจุดที่ติดตั้งไปแล้ว ทำให้การควบคุมความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถอาจเกิดความผิดพลาดที่ไม่สามารถดำเนินการตามรูปแบบโครงสร้างความเร็วที่กำหนดเอาไว้ได้ ซึ่งมีสาเหตุมาจากการที่เซนเซอร์ตรวจจับไม่ตอบสนองในการทำงาน มักเกิดขึ้นกับเซนเซอร์ตรวจจับที่มีราคาถูกไม่ได้มาตรฐานหรือในบางครั้งที่มีการเลือกเซนเซอร์ตรวจจับที่ไม่เหมาะสมกับงาน

4.2.2 รถเข้าจอดไม่ตรงจุดจอดที่มีการติดตั้งเซนเซอร์ตรวจจับของสถานีผู้โดยสารปลายทาง ทำให้ระบบไม่สามารถส่งควบคุมให้รถเคลื่อนที่ตามคำสั่งในรอบถัด ๆ ไปได้ โดย

ปัญหานี้มีต้นเหตุมาจากการที่ระบบสั่งรถให้จอดด้วยวิธีตัดไฟเลี้ยงที่จ่ายให้กับมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำสามเฟสเท่านั้น ทำให้รถยังสามารถเคลื่อนที่ต่อเล็กน้อยจากโมเมนต์ความเฉื่อยที่สะสมภายในรถ

จากปัญหาต่าง ๆ ที่พบในขณะที่ทำการทดสอบระบบข้างต้น ล้วนแล้วแต่มีสาเหตุมาจากอุปกรณ์ที่นำมาประกอบเป็นระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ดังนั้นการแก้ปัญหาเหล่านี้จึงสามารถทำได้จากการเปลี่ยนหรือเพิ่มอุปกรณ์บางส่วนเข้าไปในระบบ

4.3 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานในบทความนี้ทำให้ได้ต้นแบบระบบควบคุมการเดินรถสำหรับระบบ APM ซึ่งเป็นเพียงชุดจำลองที่ต้องมีการพัฒนาต่อยอดให้สามารถนำไปใช้งานได้กับระบบขนาดใหญ่ในอนาคต โดยการนำชุดจำลองนี้ไปใช้จริงต้องทำการพัฒนาส่วนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

4.3.1 เปลี่ยนอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบให้เป็นอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติและประสิทธิภาพในการทำงานที่สูงขึ้น

4.3.2 พัฒนาระบบสื่อสารภายในระบบจากการใช้รูปแบบการสื่อสารด้วยระบบสายแลนให้เปลี่ยนเป็นการใช้รูปแบบการสื่อสารด้วยระบบไร้สายแทน เนื่องจากการนำระบบไปใช้งานจริงนั้นจะมีระยะทางที่ค่อนข้างไกล ดังนั้นจึงรูปแบบการสื่อสารนี้เข้ามาใช้งานด้วย

4.3.3 พัฒนารูปแบบคำสั่งสำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของรถจากที่มีเพียงโหมดควบคุมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติและโหมดควบคุมการเคลื่อนที่แบบฉุกเฉินให้มีรูปแบบการทำงานที่มีความหลากหลายและครอบคลุมต่อการนำไปใช้งานที่มากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Mass Rapid Transit Authority of Thailand. (2020, Apr.) . *About MRTA*. [Online]. Available: https://www.mrta.co.th/en/about_mrta/
- [2] POST REPORTERS. (2020, Apr.). *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, Jul.). *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," *IEEE/ASME Joint Railroad Conference*, pp. 91-97, 2003.
- [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*. pp 1-11. doi:10.1007/s40534-015-0086-y, 2015.
- [14] T. Kulworawanichpong, "Optimising AC electric railway power flow with power electronic control," PhD Thesis, University of Birmingham, UK, 2003.
- [15] L. Battistelli, F. Ciccarelli, D. Lauria and D. Proto, "Optimal Design of DC Electrified Railway Stationary Storage System," *Proc. International Conference on Clean Electrical Power*, Capri, pp. 739-745, 2009.

ประวัติผู้เขียน

นายบัณฑิต เข้มกล้าคมกต์ เกิดเมื่อวันที่ 19 กรกฎาคม พ.ศ.2537 เกิดที่เมืองอิเซฮาระ จังหวัดคานางาวะ ประเทศญี่ปุ่น ศึกษาในระดับชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนบ้านหนองม่วง ระดับชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนชัยภูมิภักดีชุมพล และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2560 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ. 2560 โดยขณะกำลังศึกษาระดับปริญญาโทได้เป็นผู้ช่วยสอนในวิชาปฏิบัติการต่าง ๆ ของสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาทิเช่น รายวิชาปฏิบัติการวิศวกรรมไฟฟ้ามูลฐาน (Fundamental of Electrical Engineering Laboratory) ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) ปฏิบัติการเครื่องจักรกลไฟฟ้า (Electrical Machines Laboratory) เป็นต้น และในระหว่างการทำงานวิจัยวิทยานิพนธ์ผู้วิจัยมีความสนใจในงานด้านระบบควบคุมอัตโนมัติ ระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน และการออกแบบลักษณะโครงสร้างความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้าที่ใช้สำหรับขับเคลื่อนรถ จึงมีผลงานตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องดังที่แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข.

