การศึกษาและการจำลองระบบควบคุมรถไฟและระบบอาณัติสัญญาณสำหรับรถไฟจำลอง

STUDY AND SIMULATION OF TRAIN AND SIGNALING SIMULATION FOR TRAIN MODELS

พุธิตา สมุทรรัตน์
PUTHITA SAMOOTRUT

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560
KMITL-2017-EN-M-230-074

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาและการจำลองระบบควบคุมรถไฟและระบบอาณัติสัญญาณสำหรับรถไฟจำลอง

STUDY AND SIMULATION OF TRAIN AND SIGNALING SIMULATION FOR TRAIN MODELS

T148760

พุธิตา สมุทรรัตน์
PUTHITA SAMOOTRUT

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ตรวจหมู่.....
เลขทะเบียน 148760
วัน,เดือน,ปี 23 มิ.ย. 2560

b.00267057
l.....

วิทยานิพนธ์นี้สำหรับการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2560
KMITL-2017-EN-M-230-074

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY AND SIMULATION OF TRAIN AND SIGNALING SIMULATION FOR TRAIN MODELS

PUTHITA SAMOOTRUT

A THESIS SUBMITTED IN FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN INFORMATION ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2017

KMITL-2017-EN-M-230-074

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาและการจำลองระบบควบคุมรถไฟและระบบอาณัติสัญญาณสำหรับรถไฟจำลอง
Thesis Title Study and Simulation of Train and Signaling Simulation for Train Models
นักศึกษา นางสาวพุธิตา สมุทรรัตน์
รหัสประจำตัว 58601210
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมสารสนเทศ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.วันวิสา ชัชวงษ์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-230-074

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.กนก	เจนจิระพงศ์เวช	
รศ.ดร.ชวลิต	เบญจางคประเสริฐ	
รศ.ดร.ปิติเขต	สู้รักษา	
รศ.ดร.อรรถสิทธิ์	หล่าสกุล	
ผศ.ดร.วันวิสา	ชัชวงษ์	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)
คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาและจำลองระบบควบคุมรถไฟและระบบอาณัติสัญญาณสำหรับรถไฟจำลอง
นักศึกษา	นางสาวพุธิตา สมุทรรัตน์
รหัสประจำตัว	58601210
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.วันวิสา ชัชวงษ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษา ออกแบบและจำลองระบบควบคุมรถไฟและระบบอาณัติสัญญาณสำหรับรถไฟจำลอง ด้วยมีความประสงค์ให้ระบบจำลองนี้มีความเสมือนหรือคล้ายคลึงกับระบบควบคุมรถไฟและอาณัติสัญญาณที่ใช้อยู่ในชีวิตจริง เพื่อที่จะสามารถนำระบบนี้ไปใช้ในการพัฒนาความรู้ความเข้าใจทางด้านระบบขนส่งทางรางได้ หรืออาจนำระบบจำลองต้นแบบนี้ไปพัฒนาความสามารถเพิ่มเติมสำหรับงานเฉพาะด้านที่มีความเกี่ยวข้องกับเรื่องของเงื่อนไขความปลอดภัยในการเดินรถได้ โดยระบบจำลองนี้ได้นำโมเดลรถไฟจำลองมาใช้ และมีการรับค่าตำแหน่งรถไฟด้วย RFID ส่งกลับมาให้ซอฟต์แวร์หลักที่ทำหน้าที่เสมือนศูนย์ควบคุมกลาง นอกจากนี้ยังได้ทำการใช้แอลอีดีเพื่อเลียนแบบสัญญาณไฟห้าม และสัญญาณไฟอนุญาต โดยสัญญาณไฟต้องได้รับการสั่งการมาจากซอฟต์แวร์หลักที่พัฒนาขึ้นเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Study and Simulation of Train and Signaling Simulation for Train Models
Student	Miss Puthita Samootrut
Student ID.	58601210
Degree	Master of Engineering
Program	Information Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Vanvisa Chutchavong

ABSTRACT

This thesis proposes the study, design, and development of train control and signaling simulation for train model. The main objective of this simulation system is to imitate the real train control and signaling system. Therefore, this system can be used to improve the knowledge in this field, or this system can be additionally developed for another specific railway field that needs to implement with the safety rules in train control system. To be realistic, this simulation system is implemented with train models. The positions of train models are detected by RFID technology and are then sent to the main software, functioning as the central control unit. The LEDs are used and acted as the light signals in the railway system, which signal commands are sent by the main software.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยความกรุณาจากท่านอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.วันวิสา ชัชวงษ์ ร่วมถึง ผศ.มยุรี เลิศเวชกุล และพี่อลงกรณ์ วิจิตรธนสาร (พี่บอย) ที่คอยให้คำปรึกษาทั้งด้านการเขียนผลงานตีพิมพ์ และองค์ความรู้เกี่ยวกับด้านระบบขนส่งทางราง รวมถึงในทุก ๆ ด้านที่เกี่ยวข้อง

ขอขอบคุณรุ่นพี่ และเพื่อน ๆ ทุกท่านในรุ่นเดียวกัน ไม่ว่าจะเป็นพี่เหน่ง พี่พี โอ และเวบ ที่ทำงานวิจัยร่วมกันมา อีกทั้งยังคอยให้คำแนะนำ และคำปรึกษาในทุก ๆ เรื่องอย่างไม่มีข้อบกพร่อง และต้องขอขอบคุณน้อง ๆ ในห้องวิจัยทุกคนที่พร้อมให้ความช่วยเหลือเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ สวทช. ที่ให้ทุนสนับสนุนเริ่มต้นให้กำเนิดโครงการจนสามารถนำมาพัฒนาต่อยอดและเกิดเป็นผลงานในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ขึ้นมาได้สำเร็จ

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดาซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

พุธิตา สมุทรรัตน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง VIII

สารบัญรูป IX

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 3

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 3

1.4 สมมติฐานและระเบียบวิธีการวิจัย 4

1.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ 5

1.5.1 ฮาร์ดแวร์ 5

1.5.2 ซอฟต์แวร์ 5

1.6 ประโยชน์ของการวิจัย 5

1.7 ส่วนประกอบของการวิจัย 6

บทที่ 2 ทฤษฎีระบบควบคุมรถไฟและอาณัติสัญญาณ 7

2.1 บทนำ 7

2.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับระบบขนส่งทางราง 7

2.2.1 ประเภทของรถไฟ 7

2.2.2 ความกว้างของทางรถไฟ 8

2.2.3 ระบบควบคุมรถไฟและอาณัติสัญญาณ 9

2.3 หลักการเกี่ยวกับระยะห่างระหว่างขบวนรถไฟ 9

2.3.1 การรักษาระยะห่างโดยใช้ Relative Braking Distance 10

2.3.2 การรักษาระยะห่างโดยใช้ Fixed Block 10

2.3.3 การรักษาระยะห่างโดยใช้ Absolute Braking Distance 11

2.3.4 การคำนวณระยะห่างระหว่างรถไฟ 11

2.4 วิธีการส่งสัญญาณถึงคนขับรถไฟ 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.1 สัญญาณไฟสี 14
2.5 ระบบป้องกันรถไฟ 16
2.5.1 ระบบทางกลสำหรับหยุดรถไฟ 16
2.5.2 ระบบสัญญาณเตือนอัตโนมัติ 17
2.5.3 ระบบสัญญาณเตือนและป้องกันรถไฟ 18
2.5.4 ตอนสัญญาณ 18
2.6 การตรวจจับตำแหน่งรถไฟ 19
2.6.1 จุดประสงค์ในการตรวจจับตำแหน่งของรถไฟ 19
2.6.2 องค์ประกอบในการตรวจจับตำแหน่งรถไฟ 19
2.7 ระบบบังคับสัมพันธ์ 20
2.7.1 ภาพรวมและตัวอย่างของการบังคับสัมพันธ์ 21
2.7.2 หลักการเดินรถเป็นช่วงหรือตอน 22
2.8 การแสดงสถานะของทางในหอสัญญาณหรือศูนย์ควบคุมการเดินรถ 24
2.9 ระบบอาณัติสัญญาณสมัยใหม่ 30
2.9.1 Automatic Train Control 30
2.9.2 European Rail Traffic Management System 31
2.9.3 European Train Control System 32
2.10 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับการพัฒนาซอฟต์แวร์ในการจำลองระบบควบคุม 34
2.10.1 Linked List 34
2.10.2 Queue 37
2.10.3 Object-Oriented Programming 38

บทที่ 3 การออกแบบระบบ 40
3.1 บทนำ 40
3.2 โครงสร้างภายรวมการทำงานของระบบ 40
3.3 การออกแบบการติดต่อระหว่างอุปกรณ์และซอฟต์แวร์ 41
3.3.1 การควบคุมรถไฟจำลอง 41
3.3.2 การควบคุมประแจในรางรถไฟจำลอง 46
3.3.3 การควบคุมสัญญาณไฟ 47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.3.4 การอ่านค่าจาก RFID Tag เข้าสู่ระบบเพื่อระบุตำแหน่งของรถไฟ 50
3.4 การออกแบบซอฟต์แวร์ 52
3.4.1 รูปแบบของตารางการเดินรถ 52
3.4.2 ตรรกะการของเส้นทางการเดินรถ 53
3.4.3 ตรรกะการออกเดินรถ 54
3.4.4 ตรรกะการคำนวณหาอัตราเร็วในการเดินรถให้เหมาะสม 55
3.4.5 ตรรกะการแสดงสถานะเข้าใช้ตอนทางและการคืนตอนทาง 58

บทที่ 4 ผลการทดลอง 61
4.1 ข้อมูลภายในตารางเดินรถต้นแบบ 61
4.2 ส่วนติดต่อผู้ใช้ของซอฟต์แวร์ 62
4.2.1 หน้าต่างเวลาและเลือกโหมดการทำงาน 62
4.2.2 หน้าต่างตารางการเดินรถ 63
4.2.3 หน้าต่างแสดงผลหลัก 63
4.2.4 หน้าต่างรายละเอียดของขบวนรถ 64
4.3 ผลทดลองในการเดินรถตามตารางต้นแบบ 65
4.3.1 ผลการบันทึกการเดินรถขบวนที่ 1 65
4.3.2 ผลการบันทึกการเดินรถขบวนที่ 2 69
4.4 ทดสอบการจองเส้นทาง การเข้าใช้ตอนทางและการคืนตอนทาง 73
4.4.1 การจองเส้นทาง 73
4.4.2 การเข้าใช้และการคืนตอนทาง 75

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย 77
5.1 สรุปผลการวิจัย 77
5.2 ข้อเสนอแนะ 78

เอกสารอ้างอิง 79
ภาคผนวก 83
ภาคผนวก ก. การควบคุมรถไฟจำลอง Roco 84
ภาคผนวก ข. การสั่งงานสัญญาณไฟจำลอง 96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ค. การระบุตำแหน่งรถไฟจำลอง 100
ภาคผนวก ง. วารสารทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ในการประชุมทางวิชาการ 108
ประวัติผู้เขียน 109

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ตัวอย่าง Gauge ของทางรถไฟประเทศต่าง ๆ 9

3.1 เวลาที่ใช้ในการวิ่งของรถไฟขบวนที่ 1 พร้อมชุดตัวพ่วง ในระยะทาง 100 เซนติเมตร 43

3.2 เวลาที่ใช้ในการวิ่งของรถไฟขบวนที่ 2 พร้อมชุดตัวพ่วง ในระยะทาง 100 เซนติเมตร 44

3.3 ตัวอย่างข้อมูลภายในตารางการเดินรถที่ใช้ในระบบ 52

4.1 ตัวอย่างข้อมูลภายในตารางเดินรถต้นแบบของรถไฟขบวนที่ 1 61

4.2 ตัวอย่างข้อมูลภายในตารางเดินรถต้นแบบของรถไฟขบวนที่ 2 62

4.3 ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็กของรถขบวนที่ 1 ในเส้นทาง st11 -> st21 65

4.4 ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็กของรถขบวนที่ 1 ในเส้นทาง st21 -> st31 66

4.5 ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็กของรถขบวนที่ 1 ในเส้นทาง st31 -> st41 66

4.6 ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็กของรถขบวนที่ 1 ในเส้นทาง st41 -> st32 67

4.7 ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็กของรถขบวนที่ 1 ในเส้นทาง st32 -> st23 67

4.8 ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็กของรถขบวนที่ 1 ในเส้นทาง st23 -> st11 68

4.9 ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการเข้าจอดที่สถานีของรถขบวนที่ 1 68

4.10 ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็กของรถขบวนที่ 2 ในเส้นทาง st12 -> st22 69

4.11 ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็กของรถขบวนที่ 2 ในเส้นทาง st22 -> st31 70

4.12 ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็กของรถขบวนที่ 2 ในเส้นทาง st31 -> st43 70

4.13 ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็กของรถขบวนที่ 2 ในเส้นทาง st43 -> st32 71

4.14 ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็กของรถขบวนที่ 2 ในเส้นทาง st32 -> st24 71

4.15 ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็กของรถขบวนที่ 2 ในเส้นทาง st24 -> st12 72

4.16 ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการเข้าจอดที่สถานีของรถขบวนที่ 2 72

ก.1 LAN_X_SET_LOCO_DRIVE 94

ก.2 LAN_X_SET_LOCO_FUNCTION 94

ก.3 LAN_X_SET_TURNOUT 95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	โครงข่ายรถไฟฟ้า ณ ปัจจุบัน	2
1.2	โครงข่ายรถไฟฟ้าที่ได้มีแผนการก่อสร้าง	2
2.1	ระยะห่างระหว่างขบวนรถโดยใช้ Relative Braking Distance	10
2.2	ระยะห่างระหว่างขบวนรถโดยใช้ Fixed Block	11
2.3	ระยะห่างระหว่างขบวนรถโดยใช้ Absolute Braking Distance (Moving Block)	11
2.4	Headways & Deceleration Curve of Trains	12
2.5	ตัวอย่าง Ball Signal, Semaphore Signal, and Color Light Signal	14
2.6	สัญญาณเตือนของระบบไฟสี ติดตั้งอยู่หน้าสัญญาณเข้ามากกว่าระยะเบรก	15
2.7	เสาสัญญาณที่ติดตั้งระบบทางกลสำหรับหยุดรถ	17
2.8	ระบบสัญญาณเตือนอัตโนมัติที่ติดตั้งระหว่างรางรถไฟ	17
2.9	ระบบสัญญาณเตือนและป้องกันรถไฟที่ติดตั้งอยู่ระหว่างรางรถไฟ	18
2.10	การทำงานของตอนสัญญาณ	18
2.11	สัญญาณที่ทางหลีก	21
2.12	การบังคับการให้ทางและลิ้นประแจ	21
2.13	การให้สัญญาณที่ทางแยก	22
2.14	การบังคับสัมพันธ์	22
2.15	เครื่องล็อกเส้นทาง	23
2.16	ตัวอย่างภาพจำลองแสดงสถานะของทางรถไฟบางส่วน	25
2.17	ตัวอย่างการให้ทาง	25
2.18	ตัวอย่างเมื่อขบวนรถเคลื่อนไปภาพที่ 1	26
2.19	ตัวอย่างเมื่อขบวนรถเคลื่อนไปภาพที่ 2	26
2.20	ตัวอย่างเมื่อขบวนรถเคลื่อนไปภาพที่ 3	27
2.21	ตัวอย่างเมื่อขบวนรถเคลื่อนไปภาพที่ 4	27
2.22	ตัวอย่างเมื่อขบวนรถเคลื่อนไปภาพที่ 5	28
2.23	ตัวอย่างเมื่อขบวนรถเคลื่อนไปภาพที่ 6	28
2.24	ตัวอย่างเมื่อขบวนรถเคลื่อนไปภาพที่ 7	29
2.25	ตัวอย่างเมื่อขบวนรถเคลื่อนไปภาพที่ 8	29
2.26	ตัวอย่างเมื่อขบวนรถเคลื่อนไปภาพที่ 9	30
2.27	ภาพรวมการทำงานของระบบ ATS ในการเดินรถแบบตอนสัญญาณคงที่	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.28	ETCS Level 1	32
2.29	ETCS Level 2	33
2.30	ETCS Level 3	34
2.31	ตัวอย่าง Linked List แบบพื้นฐาน	34
2.32	Linked List ที่ใช้โหนด Dummy ที่มีหนึ่งพอยน์เตอร์	35
2.33	Linked List ที่ใช้โหนด Dummy ที่มีสองพอยน์เตอร์	35
2.34	ตัวอย่าง Singly Linked List	36
2.35	ตัวอย่าง Doubly Linked List	36
2.36	ตัวอย่าง Singly Circular Linked List	36
2.37	ตัวอย่าง Doubly Circular Linked List	37
2.38	การเพิ่มโหนดลงใน Linked List	37
2.39	การลบโหนดออกจาก Linked List	37
2.40	การกระทำแบบ FIFO ของ Queue	38
3.1	ภาพรวมการทำงานของระบบ	40
3.2	การควบคุมโมเดลรถไฟจำลอง	41
3.3	ตัวถอดรหัสภายในหัวขบวนรถไฟ (RC 10884)	42
3.4	ตัวอย่างโค้ดสำหรับควบคุมทิศทางและความเร็วของรถไฟ	42
3.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว (cm/sec) ต่อ DCC Speed	44
3.6	ตัวอย่างโค้ดในการแปลงอัตราเร็ว (cm/sec) เป็น DCC Speed Step	45
3.7	ตัวอย่างโค้ดสำหรับควบคุมไฟส่องสว่างหน้าและหลังหัวขบวนรถไฟ	46
3.8	ตัวอย่างโค้ดสำหรับควบคุมทิศทางประแจ	46
3.9	ตัวถอดรหัสและกล่องถอดรหัส	47
3.10	การควบคุมเสาสัญญาณไฟจำลอง	47
3.11	วงจรภายในเสาสัญญาณไฟจำลอง	48
3.12	แผนผังการเชื่อมต่ออาดูอิโนกับเสาสัญญาณไฟจำลอง	49
3.13	การรับค่าตำแหน่งของรถไฟจำลอง	50
3.14	อุปกรณ์ในตู้พ่วงจำลอง	50
3.15	บล็อกไดอะแกรมของการรับค่าตำแหน่งรถไฟ	51
3.16	ตัวอย่างโค้ดในการเปรียบเทียบแอดเดรสและค่าแท็กเป็นหมายเลขรถและรหัสตอนราง	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.17	แผนผังแสดงการจองเส้นทางของโหมดการทำงานอัตโนมัติและโหมดการทำงานโดยผู้ใช้	53
3.18	แผนผังแสดงตรรกะการออกเดินรถ	54
3.19	องค์ประกอบของเส้นทางการเดินรถ	56
3.20	แผนผังการคำนวณหาอัตราเร็วที่เหมาะสมในการเดินรถ	57
3.21	องค์ประกอบของการเข้าใช้และการคืนตอนทาง	58
3.22	แผนผังแสดงการเข้าใช้ตอนทางของขบวนรถไฟ	59
3.23	แผนผังแสดงการคืนตอนทาง	60
4.1	หน้าต่างเวลาและเลือกโหมดการทำงาน	62
4.2	หน้าต่างตารางการเดินรถ	63
4.3	หน้าต่างแสดงผลหลัก	64
4.4	หน้าต่างรายละเอียดของขบวนรถ	64
4.5	ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการเข้าจอดที่สถานีของขบวนรถที่ 1	69
4.6	ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการเข้าจอดที่สถานีของขบวนรถที่ 2	73
4.7	ทดสอบการจองเส้นทางภาพที่ 1	74
4.8	ทดสอบการจองเส้นทางภาพที่ 2	74
4.9	ทดสอบการจองเส้นทางภาพที่ 3	74
4.10	ทดสอบการจองเส้นทางภาพที่ 4	75
4.11	ทดสอบการจองเส้นทางภาพที่ 5	75
4.12	การเข้าใช้และคืนตอนทางภาพที่ 1	76
4.13	การเข้าใช้และคืนตอนทางภาพที่ 2	76
4.14	การเข้าใช้และคืนตอนทางภาพที่ 3	76
ก.1	โครงสร้างของระบบ DCC	85
ก.2	ตัวอย่างลักษณะการเข้าสัญญาณ DCC	86
ก.3	IP Datagram Format (IPv4)	87
ก.4	การสื่อสารในการเชื่อมต่อแบบจุดต่อจุด	89
ก.5	การสื่อสารในเน็ตเวิร์กที่ต่อร่วมกัน	90
ก.6	การสื่อสารระหว่าง 2 เน็ตเวิร์ก	90
ก.7	การเชื่อมต่อกันของหลายเน็ตเวิร์ก	91
ก.8	User Datagram Format	92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
ก.9	ฟิลด์ที่ใช้ในการคำนวณหา UDP Checksum	93
ข.1	การสื่อสารแบบขนาน และอนุกรม	97
ข.2	บอร์ดอาดูอิโนต่อกับ LED	99
ข.3	บอร์ดอาดูอิโนต่อกับ Mega Sensor Shield V2	99
ค.1	โครงสร้างพื้นฐานของระบบ RFID	101
ค.2	ตัวอย่าง Passive RFID Tag แบบพวกกุญแจ แคปซูล และบัตร	102
ค.3	ตัวอย่าง Active RFID Tag	102
ค.4	ตัวอย่าง Semi-Passive RFID Tag	103
ค.5	XBee Series 2	103
ค.6	ภาพรวมการสื่อสารของ XBee	104
ค.7	การสื่อสารระหว่าง XBee ด้วย Transparent Mode	104
ค.8	การตั้งค่าแอดเดรสปลายทางให้ XBee สามารถสื่อสารกันได้ใน Transparent Mode	105
ค.9	การสื่อสารระหว่าง XBee ด้วย API Mode	106
ค.10	โครงสร้างของเฟรมที่ใช้ภายใต้ XBee API Mode	106
ค.11	API Frame สำหรับส่งข้อมูลด้วยแอดเดรส 64-bit	107
ค.12	API Frame ที่จะได้รับ เมื่อต้นทางส่งข้อมูลมาให้ด้วยแอดเดรส 64-bit	107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

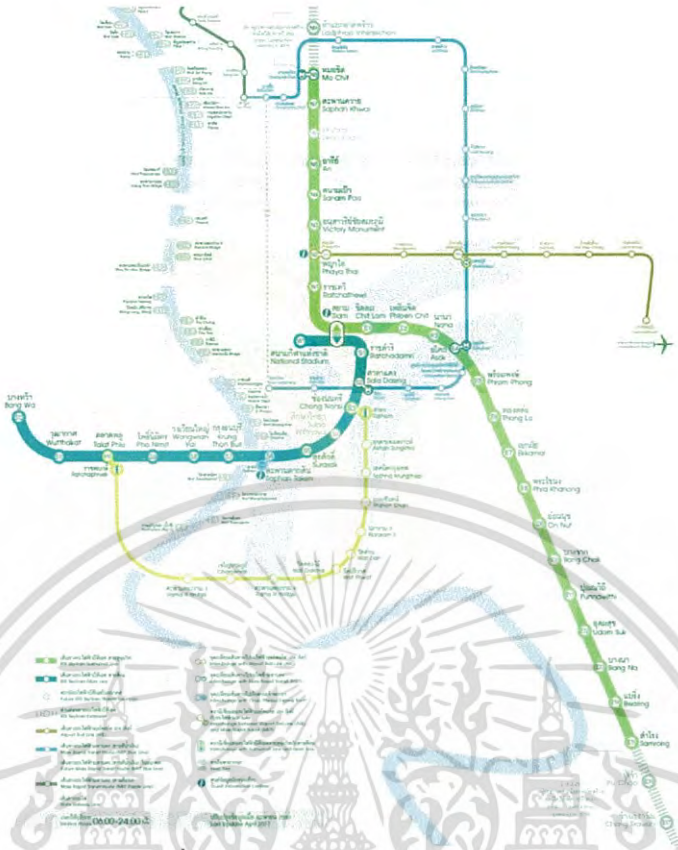
บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

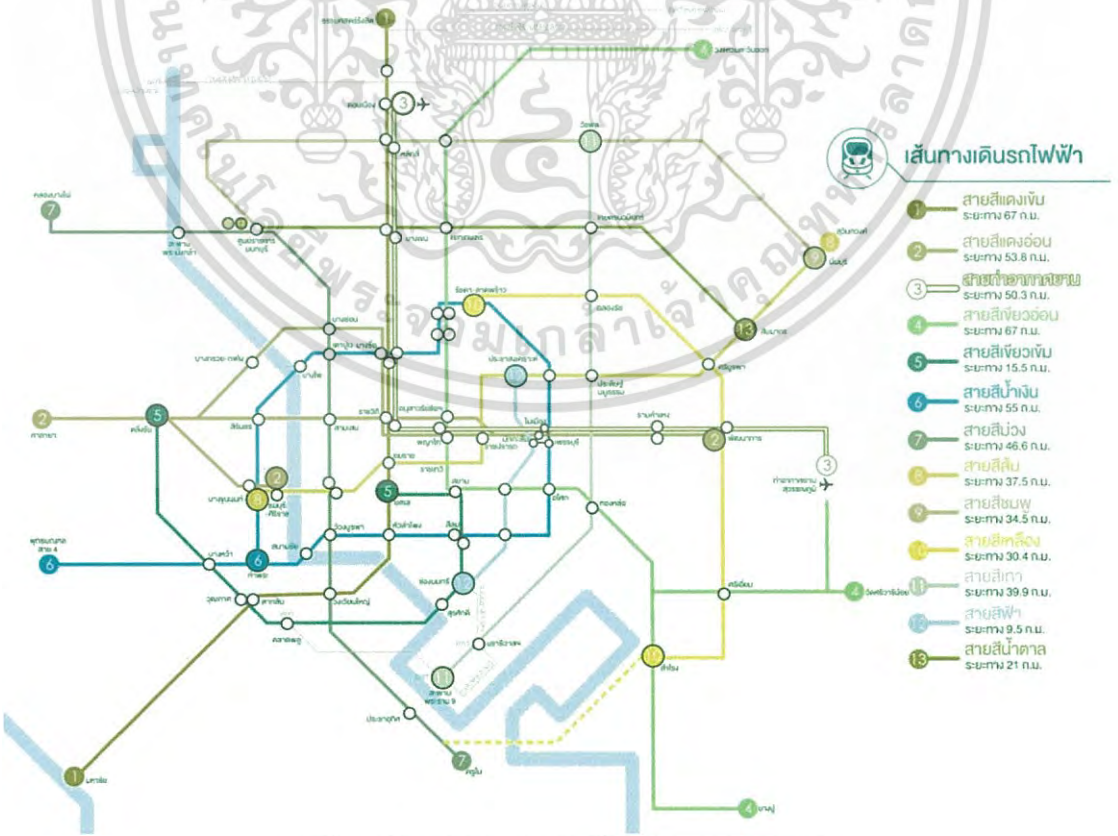
ประเทศไทยเริ่มมีการพัฒนาระบบขนส่งทางรางเป็นครั้งในรัชสมัยของพระบาทสมเด็จพระจุลจอมเกล้าเจ้าอยู่หัว (รัชกาลที่ 5) เนื่องจากพระองค์ทรงเล็งเห็นถึงความสำคัญของการคมนาคมซึ่งจะเป็นรากฐานที่สำคัญในการพัฒนาประเทศ แต่ต่อมา ระบบขนส่งทางรางกลับไม่เป็นที่นิยมจากประชาชนทั่วไป เนื่องจากการเดินรถนั้นยังมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอต่อความต้องการ เช่น การเดินรถไม่ตรงเวลา หรือเกิดอุบัติเหตุบ่อยครั้ง เป็นต้น เนื่องจากขาดการดูแลและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จนมาถึงปัจจุบัน การกำเนิดของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำกัด มหาชน (บีทีเอส) ในปี พ.ศ.2543 ทำให้สังคมไทยเห็นถึงประโยชน์ของระบบขนส่งทางรางในรูปแบบที่ทันสมัยและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น รัฐบาลจึงได้กลับมาเล็งเห็นความสำคัญของระบบขนส่งทางรางขึ้นมาอีกครั้งหนึ่ง ว่าจะเป็นก้าวสำคัญที่ทำให้เศรษฐกิจของประเทศพัฒนายิ่งขึ้น จึงทำให้เกิดโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าสายต่าง ๆ ในประเทศเป็นจำนวนมากดังแสดงเปรียบเทียบในเฉพาะส่วนของรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนในเมือง หรือที่เรียกว่า Mass Transit ได้ในรูปที่ 1.1 และรูปที่ 1.2 ซึ่งจากภาพจะทำให้เห็นว่าโครงข่ายระบบขนส่งทางรางในประเทศนั้นมีการขยายอย่างรวดเร็ว และนอกจากนั้นรถไฟระหว่างเมือง หรือรถไฟทางไกลก็มีแนวโน้มจะพัฒนาตามเช่นกัน ทำให้เกิดความต้องการบุคลากรจากหลากหลายสาขาเพื่อป้อนเข้าสู่ระบบขนส่งทางรางเป็นจำนวนมากตามมาด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นจะต้องมีการเพิ่มขีดความสามารถของบุคลากรในประเทศทางด้านระบบขนส่งทางรางนี้เพื่อนำไปสู่หนทางการพัฒนาอย่างยั่งยืน และหนึ่งในเรื่องสำคัญที่บุคลากรควรมีความรู้ความเข้าใจนั่นก็คือ เรื่องของระบบอาณัติสัญญาณและระบบควบคุมรถไฟนั่นเอง

ระบบอาณัติสัญญาณ (Signaling System) เป็นระบบกลไก สัญญาณไฟ หรือคอมพิวเตอร์ ที่เข้ามาช่วยจัดการการเดินรถไฟให้มีความปลอดภัย รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพ การเรียนรู้ระบบอาณัติสัญญาณจึงเป็นสิ่งหนึ่งที่สำคัญในระบบขนส่งทางราง บุคลากรต้องมีความรู้ความชำนาญอย่างแท้จริงเพื่อป้องกันความเสียหายทั้งชีวิตและทรัพย์สินที่อาจเกิดขึ้นได้ ดังนั้น การจะสร้างความรู้ความเข้าใจให้กับบุคลากรเพื่อส่งเข้าสู่การทำงานจริงในด้านระบบควบคุมรถไฟและอาณัติสัญญาณได้ ผู้นั้นจะต้องศึกษาและมีประสบการณ์ลงมือปฏิบัติจริง แต่เนื่องจากการลงมือปฏิบัติกับระบบจริงนั้นไม่สามารถทำได้ เพราะอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินของทั้งผู้โดยสาร และผู้บริหารจึงจำเป็นต้องมีการจำลองระบบควบคุมรถไฟและอาณัติสัญญาณขึ้นเพื่อใช้ในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับระบบให้ลึกซึ้ง และสามารถทดลองปฏิบัติจริงได้โดยไม่เกิดความสูญเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 โครงข่ายรถไฟฟ้า ณ ปัจจุบัน



รูปที่ 1.2 โครงข่ายรถไฟฟ้าที่ได้มีแผนการก่อสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ผ่านมาการทำซอฟต์แวร์จำลองเช่นนี้มักจะเป็นระบบปิดที่เอาไว้ใช้ฝึกพนักงานในการทำงานเกี่ยวกับการเดินรถ โดยตัวซอฟต์แวร์นั้นมีราคาสูงมาก แต่ก็มีซอฟต์แวร์ที่ให้ใช้งานโดยไม่เสียเงินเช่นกัน ซึ่งบางตัวจะไม่มีส่วนติดต่อกับอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ และตารางเดินรถที่นำเข้ามาเป็นนามสกุลเฉพาะซอฟต์แวร์ตัวนั้น ๆ โดยไม่สามารถอ่านออกด้วยระบบตัวอักษรธรรมดา (Text) คือเป็นซอฟต์แวร์จำลองล้วน ๆ หรือบางตัวจะเป็นซอฟต์แวร์สำหรับเน้นควบคุมรถไฟไปเลย และรูปแบบไม่มีความคล้ายคลึงกับหน้าจอภายในห้องควบคุม ไม่มีการนำเข้าตารางการเดินรถ หรือไม่มีการกระทำการเกี่ยวกับความปลอยภัยภายใต้เงื่อนไขของระบบอาณัติสัญญาณรถไฟ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงขอนำเสนอระบบจำลองที่มีทั้งซอฟต์แวร์ที่มีหน้าตาคล้ายคลึงกับซอฟต์แวร์ในห้องควบคุมจริง เพื่อให้ผู้ใช้คุ้นชินกับลักษณะและการทำงาน รวมถึงมีการเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์เพื่อให้เห็นภาพการเดินรถของจริง นอกจากจะเห็นเพียงการจำลองภายในซอฟต์แวร์เท่านั้น โดยผู้ใช้สามารถนำตารางการเดินรถที่มีรูปแบบเรียบง่ายและสร้างขึ้นเองได้มาใช้ ซึ่งการสร้างตารางการเดินรถนี้ไม่จำเป็นต้องมีซอฟต์แวร์อื่นเพิ่มเติมหรือมีวิธีการสร้างที่ซับซ้อนแต่อย่างใด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์เพื่อจำลองระบบควบคุมรถไฟและอาณัติสัญญาณสำหรับไว้ใช้ศึกษาเกี่ยวกับงานด้านอาณัติสัญญาณรถไฟ

1.2.2 ออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์ให้สามารถรองรับการทำงานร่วมกับตารางเดินรถในเบื้องต้นได้

1.2.3 ออกแบบและพัฒนาซอฟต์แวร์ให้มีลักษณะเหมาะสมแก่การศึกษาและมีหน้าตาคล้ายคลึงซอฟต์แวร์ที่ใช้งานจริงในห้องควบคุม

1.2.4 จัดประกอบชุดรถไฟจำลองเส้นทางเพื่อใช้ควบคู่กับซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาและค้นคว้าระบบควบคุมรถไฟและระบบอาณัติสัญญาณรถไฟที่ใช้กันมาในอดีตและปัจจุบัน

1.3.2 วางแผนและจัดประกอบชุดรถไฟจำลองเส้นทางการเดินรถ

1.3.3 ออกแบบการสื่อสารกันระหว่างฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ให้ครอบคลุมความต้องการ

1.3.4 พัฒนาต้นแบบระบบควบคุมรถไฟและอาณัติสัญญาณด้วยรถไฟจำลอง โดยใช้ภาษา Visual Basic ในการพัฒนาซอฟต์แวร์

1.3.5 ทดสอบ และปรับปรุงระบบต้นแบบให้การเดินรถมีความสอดคล้องกับความเป็นจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 สมมติฐานและระเบียบวิธีการวิจัย

ในการวิจัย ศึกษาและจำลอง หรือพัฒนาเกี่ยวกับทางด้านระบบควบคุมรถไฟและอาณัติสัญญาณนั้น ได้มีผลงานวิจัยได้ถูกตีพิมพ์มาอย่างแพร่หลาย ไม่ว่าจะเป็นประเทศจีน เกาหลี และในประเทศทางฝั่งยุโรป หรือในประเทศญี่ปุ่นที่ถือได้ว่าเป็นประเทศแรก ๆ เลยที่ให้ความสนใจด้านระบบขนส่งทางรางและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเช่นกัน โดยที่ทางประเทศจีนนั้น ในช่วงสิบกว่าปีมานี้มีผลงานวิจัยทางด้านระบบขนส่งทางรางมากขึ้นและโดดเด่นอย่างก้าวกระโดด เช่น ผลงานของ Wang Zhongkai ในปี 2012 เรื่องโมเดลและอัลกอริทึมสำหรับผนวกรวมจัดการวางแผนการใช้ขบวนรถและแผนการบำรุงรักษา [1] ผลงานของ Hu Hui ในปี 2013 เรื่องโมเดลการเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดตารางเวลาการใช้รถแบบหลายวัตถุประสงค์โดยพิจารณาจากการใช้งานขบวนรถและการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่าในแต่ละภาคส่วนการเดินรถ [2] และผลงานของ Zhenhuan He ในปี 2014 เรื่องการวางแผนบริการเดินรถไฟสำหรับโครงข่ายรถไฟความเร็วสูงขนาดใหญ่ [3] เป็นต้น และเหตุที่ทำให้ประเทศจีนมีการวิจัยในเรื่องนี้มากมาย ก็เนื่องมาจากมีความต้องการที่จะผลิตรถไฟ รวมถึงจัดการเกี่ยวกับระบบการเดินรถและความปลอดภัยได้ด้วยบุคลากรภายในประเทศเอง ประเทศเกาหลีก็มีการตีพิมพ์ผลงานมาให้เห็น เนื่องจากมีการผลิตและดำเนินงานการเดินรถไฟด้วยตนเองด้วยเช่นกัน ดังตัวอย่างในผลงานของ Rag-Gyo Jeong ในปี 2008 เรื่องการจำลองการสั่งงานควบคุมโดยใช้การสื่อสารตามมาตรฐานของระบบการเดินรถ [4] ตัวอย่างการวิจัยในประเทศแถบยุโรปเช่นในปี 2006 ผลงานของ Goossens เรื่องการแก้ปัญหาการวางแผนการเดินรถในโครงข่ายทางรถไฟหลายประเภท [5] และตัวอย่างผลงานของ C. Hirai จากประเทศญี่ปุ่น ในปี 1998 เรื่องการจำลองการควบคุมการจราจรรถไฟโดยคำนึงถึงการไหลเวียนของผู้โดยสาร [6]

ซึ่งจากการวิจัยเหล่านี้ จะเล็งเห็นได้ว่าแต่ละประเทศต้องการพัฒนาบุคลากรภายในประเทศ ไม่ว่าจะเป็นตัวผู้วิจัยเอง หรือตัวผู้อ่านผลงานก็ตาม และ ณ ขณะนี้ประเทศไทยเองก็ได้มีความต้องการในการพัฒนาบุคลากรทางด้านนี้เช่นกัน ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงขอเสนอการศึกษาและจำลองระบบควบคุมรถไฟและระบบอาณัติสัญญาณสำหรับรถไฟจำลองเพื่อตอบสนองความต้องการในเบื้องต้น รวมถึงเพื่อที่จะสามารถนำไปต่อยอดเพิ่มรายละเอียดปลีกย่อยของงานวิจัยเพื่อให้งานวิจัยชิ้นนี้ หรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีความสมบูรณ์เสมือนจริงเพิ่มยิ่งขึ้น โดยในงานวิจัยนี้ก็จะทำการศึกษาค้นคว้าในเรื่องของระบบควบคุมรถไฟและระบบอาณัติสัญญาณ ทำการออกแบบโครงสร้างระบบรางจำลอง ติดตั้งอุปกรณ์อาณัติสัญญาณจำลองขึ้นมา รวมถึงทำการเขียนซอฟต์แวร์เพื่อควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบจำลอง โดยที่ตัวซอฟต์แวร์ต้นแบบจะถูกพัฒนาขึ้นภายใต้เงื่อนไขความปลอดภัยในการเดินรถของระบบอาณัติสัญญาณรถไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

1.5.1 ฮาร์ดแวร์

- คอมพิวเตอร์สำหรับพัฒนาโปรแกรมและแสดงข้อมูล จำนวน 1 เครื่อง
- บอร์ด Arduino สำหรับควบคุมสัญญาณไฟ จำนวน 1 ชุด
- ชุด LED สีแดงและสีเขียว สำหรับแสดงสัญญาณไฟ จำนวน 24 ชุด
- บอร์ด RFID reader จำนวน 2 ชุด
- XBee Series 2 จำนวน 3 ชุด
- RFID Tag จำนวน 70 ชิ้น
- ชุดรถไฟจำลอง Roco ประกอบด้วย
  - หัวรถไฟจำลองพร้อมรถพ่วง จำนวน 2 ขบวน
  - รางรถไฟตรง G185 (#61111) จำนวน 15 ชิ้น
  - รางรถไฟตรง G200 (#61110) จำนวน 53 ชิ้น
  - รางรถไฟโค้ง RGB22.5 (#61128) จำนวน 5 ชิ้น
  - รางรถไฟโค้ง R3 (#61123) จำนวน 6 ชิ้น
  - รางรถไฟโค้ง R4 (#61124) จำนวน 3 ชิ้น
  - ประแจเข้าซ้าย WL22.5 (#61140) จำนวน 7 ชิ้น
  - ประแจเข้าขวา WR22.5 (#61141) จำนวน 7 ชิ้น
  - กล่อง z21 พร้อม Router จำนวน 1 ชุด

1.5.2 ซอฟต์แวร์

- Visual Studio สำหรับพัฒนาโปรแกรมด้วยภาษา Visual Basic .NET (VB.NET)
- Arduino IDE สำหรับเขียนโปรแกรมการทำงานของบอร์ด Arduino
- Z21 mobile สำหรับตั้งค่ารายละเอียดเฉพาะ (CV: Configuration Values) รวมถึงค่าแอดเดรส (Address) ของขบวนรถไฟ
- XCTU สำหรับตั้งค่าและทดสอบการรับส่งของ XBee

1.6 ประโยชน์ของการวิจัย

สามารถนำระบบควบคุมรถไฟและอาณัติสัญญาณจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ ไปใช้ในการเรียนการสอนในเรื่องของระบบอาณัติสัญญาณและวิชาที่เกี่ยวข้องได้ โดยระบบที่พัฒนาขึ้นต้องมีความสอดคล้องกับการควบคุมการเดินรถภายใต้เงื่อนไขของระบบอาณัติสัญญาณของจริง เพื่อให้ผู้ที่มาศึกษาเกิดความรู้ความเข้าใจที่สอดคล้องกับความเป็นจริง และเห็นภาพได้ชัดเจนจากระบบจำลองนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวมถึงสามารถนำการวิจัยนี้ไปพัฒนาต่อยอดให้มีความสมจริงมากยิ่งขึ้น เพื่อให้เกิดประโยชน์ต่อการพัฒนาบุคลากร และความรู้ทางด้านกิจการขนส่งทางรางมากยิ่งขึ้น

1.7 ส่วนประกอบของการวิจัย

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วย 5 บท ได้แก่

บทที่ 1 บทนำ

บทที่ 2 ทฤษฎีระบบควบคุมรถไฟและอาณัติสัญญาณ

บทที่ 3 การออกแบบระบบ

บทที่ 4 ผลการทดลอง

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีระบบควบคุมรถไฟและอาณัติสัญญาณ

2.1 บทนำ

ในการทำระบบจำลองนี้ขึ้นมานั้น เพื่อความเสมือนจริง จึงต้องศึกษาทำความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับความรู้พื้นฐานทางด้านระบบขนส่งทางราง และมุ่งเน้นไปยังเรื่องของระบบควบคุมรถไฟและอาณัติสัญญาณ ไม่ว่าจะเป็นหลักการในการเดินรถพื้นฐาน วิธีการที่ใช้ในการส่งสัญญาณจากศูนย์ควบคุมให้พนักงานขับรถทราบ และกฎต่าง ๆ ที่นำมาประยุกต์ให้เกิดการเดินรถอย่างปลอดภัย ตลอดจนโมเดลแนวความคิดที่ส่งผลต่อการทำงานของระบบควบคุมรถไฟ และเรื่องของมาตรฐานระบบอาณัติสัญญาณสมัยใหม่

2.2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับระบบขนส่งทางราง

ระบบขนส่งทางราง (Railway System) เป็นการขนส่งผู้โดยสารหรือสินค้าด้วยยานพาหนะที่วิ่งไปตามราง และเป็นส่วนหนึ่งของห่วงโซ่โลจิสติก (Logistic) ซึ่งจะเป็นการเพิ่มความสะดวกให้กับการค้าระหว่างประเทศและการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจในหลาย ๆ ประเทศ โดยทั่วไปรางรถไฟจะประกอบไปด้วยรางสองรางคู่ขนานกันไป ปกติแล้วจะทำมาจากเหล็กกล้าแล้วหนุนด้วยไม้หมอน ซึ่งจะช่วยรักษาระยะห่างหรือความกว้างระหว่างราวทั้งสองข้าง โดยจะมีความกว้างแตกต่างกันไปในแต่ละประเทศ และตัวขบวนรถไฟเองก็มีหลายลักษณะ ซึ่งผลิตขึ้นมาเพื่อตอบสนองความต้องการที่แตกต่างกันไป ไม่ว่าจะเพื่อการขนส่งสินค้าหนัก เช่น ปูนซีเมนต์ และผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม เป็นต้น หรือจะเป็นการใช้งานสำหรับขนส่งมวลชน ก็จะมีรถไฟที่ออกแบบมาเฉพาะทาง ซึ่งก็จะมีความแตกต่างทางด้านความทนทาน กำลังในการขับเคลื่อน เป็นต้น รวมถึงระยะการวิ่งหรือหยุดรถ ความถี่ในการจอดของรถไฟก็ส่งผลต่อการเลือกใช้ชนิดของรถไฟเช่นกัน

2.2.1 ประเภทของรถไฟ

ประเภทของรถไฟที่นำมาใช้ในการดำเนินการรถไฟนั้นมีให้เลือกอย่างหลากหลาย ซึ่งมีแต่ละประเภทก็จะมีคุณสมบัติทางด้านความจุและความเร็วที่แตกต่างกันออกไป จึงต้องนำมาประยุกต์ใช้ให้เข้ากับแผนการบริการที่ได้ออกแบบไว้ ทั้งนี้แผนบริการที่ออกแบบมาก็จะต้องมีการสำรวจ วิจัยหรือศึกษาข้อมูลมาประกอบการพิจารณาด้วย เพื่อทำให้ทราบความต้องการของผู้ใช้งาน โดยประเภทของรถไฟสามารถแบ่งออกเป็นหลัก ๆ ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- รถราง รถไฟขนาดเบา (Light Rail Transit) เป็นระบบที่จะพบได้ในเมืองเหมือนระบบเมโทร แต่ทำหน้าที่เป็นตัวป้อนผู้โดยสารเข้าไปยังพื้นที่ต่าง ๆ ที่เมโทรเข้าไม่ถึง เนื่องจากมีความจุน้อยกว่า ใช้เวลาเดินทางมากกว่า แต่บางครั้งคล่องตัวกว่าและใช้เงินลงทุนต่ำกว่า อีกทั้งการก่อสร้างยังสามารถทำได้อย่างรวดเร็วด้วย
- รถไฟเมโทร (Urban Transport or Mass Rapid Transit) เหมาะสำหรับเมืองใหญ่หรือเมืองชั้นในที่มีประชากรหนาแน่น โดยจะมีความเร็วสูงสุดที่ประมาณ 80-100 กม./ชม. และมีความเร็วเฉลี่ยนที่ประมาณ 30-40 กม./ชม. ซึ่งแต่ละสถานีจะห่างกันไม่เกิน 1,000-1,200 เมตร ระบบนี้จะมีความสามารถในการขนส่งผู้โดยสารได้กว่า 50,000-60,000 คนต่อทิศทางต่อชั่วโมง (Passenger per Hour per Direction: PPHPD) โดยทั่วไปจะถูกออกแบบให้มีรถเมล์หรือรถรางขนาดเบาคอยขนส่งป้อนผู้โดยสารเข้าระบบเมโทรนี้
- รถไฟ Sub-urban Transport or Rail Rapid Transit นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อขนส่งคนจากเขตชานเมืองเข้าและออกจากใจกลางเมืองซึ่งอาจมีความเร็วเฉลี่ยที่มากกว่าเมโทร อยู่ที่ประมาณ 50-70 กม./ชม. แล้วแต่ความเหมาะสมของระยะห่างระหว่างสถานี
- รถไฟท้องถิ่น (Regional Transport or Regional Rail) ใช้เชื่อมต่อกับเมืองที่อยู่ไกลกว่าระบบก่อนหน้า ซึ่งก็จะต้องสามารถทำความเร็วได้ดีขึ้น แต่ควรมีความเร็วเฉลี่ยอยู่ที่ 100 กม./ชม. และไม่ควรมีความเร็วเกิน 160 กม./ชม. แล้วแต่ความเหมาะสม และแต่ละสถานีเฉลี่ยควรจะห่างกันไม่เกิน 5-20 กม. โดยอาจใช้รางวิ่งร่วมกันกับ Sub-urban Transport ได้
- รถไฟระหว่างเมือง (Intercity Transport) เป็นรถไฟที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อหัวเมืองที่อยู่ไกลกัน แต่เป็นจุดยุทธศาสตร์สำคัญ ดังนั้นรถไฟควรมีความเร็วไม่ต่ำกว่า 160 กม./ชม. เพื่อความสะดวกรวดเร็วในการเดินทาง ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับปริมาณผู้โดยสารและความเหมาะสมของระยะทางด้วย และรถไฟประเภทนี้ควรมีระยะห่างระหว่าสถานีไม่น้อยกว่า 20-50 กม. หรือเลือกจอดเฉพาะสถานีหลัก ๆ ที่สำคัญ

2.2.2 ความกว้างของทางรถไฟ

ความกว้างของทางรถไฟ (Track Gauge) นั้นมีหลายขนาด แต่ที่เป็นที่นิยมและเป็นสากลที่สุดคือระยะ 1435 มม. หรือที่เรียกว่า Standard Gauge ซึ่งสามารถนำมาใช้ได้กับรถไฟฟ้าได้ทุกขีดความเร็วที่มีอยู่ในปัจจุบัน โดยความกว้างของทางที่แคบลงนั้นจะส่งผลต่อความเร็วของรถไฟนั่นเอง ในความเป็นจริง การพัฒนาระบบขนส่งทางรางได้เกิดขึ้นมาจากหลายต้นกำเนิด ทำให้แต่ละแห่งก็ต่างพัฒนาให้เหมาะกับสภาพพื้นที่และความต้องการแต่ละประเทศ โดยความกว้างของทางรถไฟในแต่ละประเทศนั้นสามารถแสดงได้ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่าง Gauge ของทางรถไฟประเทศต่าง ๆ

Gauge (mm)	ประเทศ
Broad gauge	
a) 1676	India, Pakistan, Ceylon, Brazil, Argentina
b) 1670	Spain, Portugal
c) 1600	Ireland, South Australia
d) 1524	Russia, Finland
Standard gauge 1435	USA, Canada, Turkey, Persia, China, Egypt, Australia, many parts of Europe, Thailand
Meter gauge	
a) 1067	South Africa, Japan, Australia, New Zealand
b) 1000	India, France, Switzerland, Argentina, Thailand
c) 915	Ireland
Other	
a) 762	India, Britain
b) 610	India, South Africa

2.2.3 ระบบควบคุมรถไฟและอาณัติสัญญาณ

ระบบอาณัติสัญญาณ [7-10] เป็นระบบกลไก สัญญาณไฟ หรือระบบคอมพิวเตอร์ ในการเดินขบวนรถไฟเพื่อแจ้งให้พนักงานขับรถไฟทราบสภาพเส้นทางข้างหน้า กำหนดทิศทางการเคลื่อนที่และระยะเวลาในการเดินรถของขบวนรถที่อยู่บนทางร่วมเดียวกัน รวมทั้งการสับหลีกบริเวณสถานีรถไฟ หรือจุดสับหลีก โดยการทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในระบบจะถูกออกแบบให้ทำงานสัมพันธ์กันเพื่อให้พนักงานขับรถไฟสามารถตัดสินใจได้อย่างมั่นใจ ส่งผลให้การเดินรถดำเนินไปได้อย่างปลอดภัย รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะขอกล่าวถึงทฤษฎีที่นำมาประกอบกันเป็นระบบอาณัติสัญญาณในหัวข้อย่อยต่อ ๆ ไป

2.3 หลักการเกี่ยวกับระยะห่างระหว่างขบวนรถไฟ

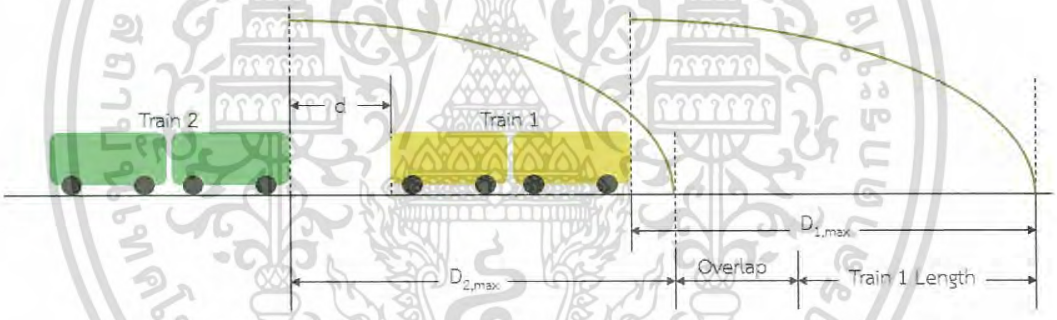
ในบรรดารถที่วิ่งบนรางทั้งหลาย มีเพียง Tramway เท่านั้น ที่วิ่งปะปนกับระบบอื่น ๆ โดยวิ่งร่วมไปบนท้องถนน ซึ่งจำกัดความเร็วสูงสุดไม่เกิน 70 กม./ชม. โดยในเขตเมืองจะใช้ความเร็วต่ำไม่เกิน 25 กม./ชม. เท่านั้น ส่วนที่เหลือไม่ว่าจะเป็น Light Rail, Metro, Sub-Urban Rail, Regional Rail, High Speed Rail เป็นต้น ล้วนต้องการเขตทางเฉพาะ (Right of Way) ของตนเองทั้งสิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะล้วนวิ่งด้วยความเร็วสูงเกินกว่าจะหยุดรถได้ในระยะสายตา ทำให้เกิดโอกาสที่จะชนกับสิ่งอื่นได้ ในทางทฤษฎี ก็มีเพียงชนกับรถขบวนอื่นเท่านั้น ประเด็นที่น่าสนใจจึงมุ่งไปที่ระยะห่างระหว่างขบวนรถไฟ (Headway) จริงอยู่ว่ายิ่งห่างยิ่งดี ยิ่งช้ากว่ายิ่งดี ในแง่ของความปลอดภัย แต่ในแง่ของการให้บริการแล้วยิ่งแย่ เพราะทำให้เสียเวลารอนาน ปัญหาที่ตามมาก็คือ แล้วระยะห่างที่น้อยที่สุดควรจะเป็นเท่าไหร่

2.10.1 การรักษาระยะห่างโดยใช้ Relative Braking Distance

ระยะห่างระหว่างขบวนรถไฟ (Headway) เท่ากับความแตกต่างของระยะเบรกของขบวนรถไฟที่วิ่งตามกันรวมกับระยะเผื่อความปลอดภัย (Overlap) โดยระยะเบรกเป็นสัดส่วนกับความเร็วของขบวนรถไฟในขณะนั้น ด้วยรูปแบบนี้ ทำให้สามารถเดินรถไฟขนส่งผู้โดยสารด้วยความถี่มากที่สุด แต่ไม่ปลอดภัย เพราะหากรถขบวนหน้าเกิดหยุดกะทันหันเนื่องจากการชน ทำให้รถไฟขบวนหน้าหยุดก่อนไปถึงระยะเบรกของตนเอง ($D_{1,max}$) ส่งผลให้รถขบวนที่ตามมามีระยะเบรกเหลือไม่พอ อาจทำให้ชนกับขบวนรถข้างหน้าได้ จึงไม่เหมาะสมในการที่จะนำมาใช้จริง



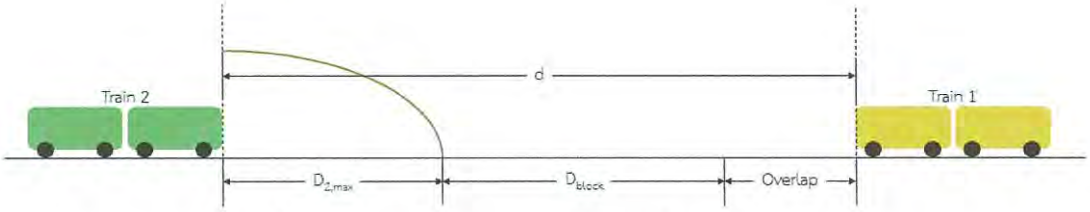
รูปที่ 2.1 ระยะห่างระหว่างขบวนรถโดยใช้ Relative Braking Distance

2.10.2 การรักษาระยะห่างโดยใช้ Fixed Block

เป็นการแบ่งเส้นทางเดินรถให้เป็นส่วน ๆ หรือเป็นตอน (Block) โดยในแต่ละตอน จะมีรถไฟอยู่ได้เพียงขบวนเดียว ระยะห่างของรถไฟสองขบวนใด ๆ ที่วิ่งตามกัน (d) จะเท่ากับระยะเบรกสูงสุด ($D_{2,max}$) ของรถขบวนหลังรวมกับความยาวของตอน (D_{block}) ซึ่งอยู่ด้านหลังของรถไฟขบวนหน้ารวมกับระยะเผื่อความปลอดภัย (Overlap) โดยไม่เกี่ยวกับระยะเบรกของรถขบวนหน้า หรือตำแหน่งที่แท้จริงของรถขบวนหน้าแต่อย่างใด ขอเพียงแค่ทราบว่า ตอนใดที่รถขบวนหน้าครอบครองอยู่เท่านั้น โดยแต่ละตอนอาจยาวได้หลายร้อยเมตร รถขบวนหลังที่ความเร็วขณะนั้นจะต้องสามารถเบรกให้หยุดได้ก่อนที่จะเข้าเขตของตอนทางที่รถขบวนหน้าครอบครองอยู่ ในการใช้ Fixed Block นี้ หากต้องการให้รถวิ่งเข้าใกล้กันได้มากขึ้น (กล่าวคือ Headway น้อยลง) โดยยังคงมีความปลอดภัย ก็ต้องทอนตอนทางให้ถี่มากขึ้น หรือติดตั้งวงจรบนรางให้มากขึ้น ซึ่งนั่นก็หมายถึงการลงทุนที่มากขึ้นด้วย แต่ถ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

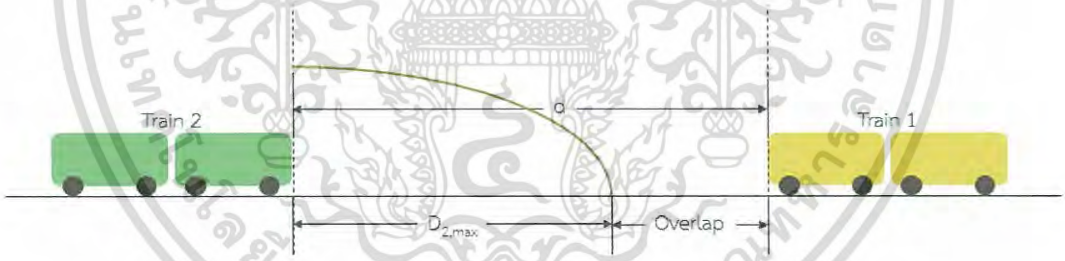
เกิดทอนตอนทางถี่มากเกินไป รถไฟที่วิ่งก็จำเป็นต้องลดความเร็วลงด้วย เนื่องจากต้องใช้เวลาช่วงหนึ่งในการรับส่งข้อมูลระหว่างระบบสั่งการกับรถไฟ



รูปที่ 2.2 ระยะห่างระหว่างขบวนรถโดยใช้ Fixed Block

2.10.3 การรักษาระยะห่างโดยใช้ Absolute Braking Distance

ในระบบนี้ ระยะห่างระหว่างขบวนรถไฟจะเท่ากับระยะเบรกของรถขบวนที่วิ่งตามหลังรวมกับระยะ Overlap เสมือนหนึ่งว่ารถขบวนหน้าอาจหยุด ณ ตำแหน่งปัจจุบันได้ทันที วิธีนี้เป็นวิธีที่ดีที่สุดในแง่ของการรักษาระยะห่างของรถไฟให้น้อยที่สุด และยังคงความปลอดภัยไว้ โดยอาศัยความทันสมัยของเทคโนโลยีการทำงาของระบบสัญญาณวิทยุ (Radio-Based Train Control) ในปัจจุบันทำให้ระบบนี้น่าจะกลายมาเป็นมาตรฐานของระบบอาณัติสัญญาณสำหรับรถไฟในเมืองต่อไป

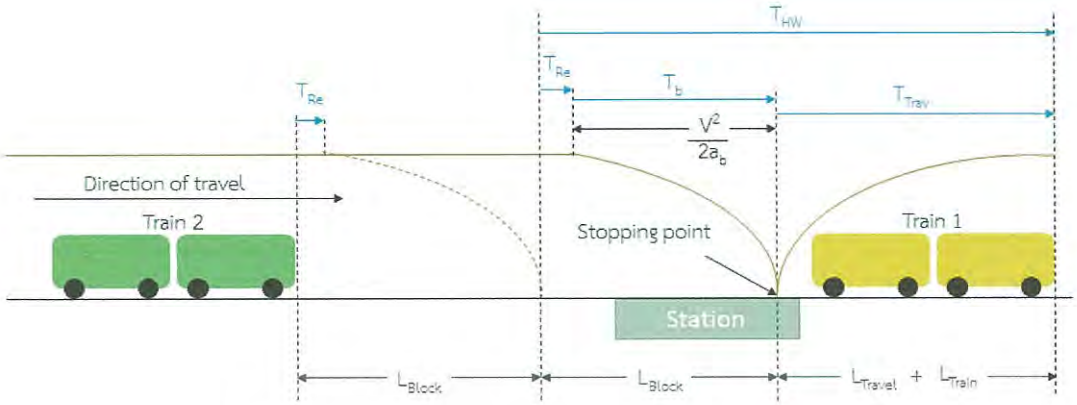


รูปที่ 2.3 ระยะห่างระหว่างขบวนรถโดยใช้ Absolute Braking Distance (Moving Block)

2.10.4 การคำนวณระยะห่างระหว่างรถไฟ

ในหัวข้อนี้จะของกล่าวถึงหลักการในการคำนวณระยะทางวิ่งของรถไฟที่วิ่งตามกันบนรางเดียวกันในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากในระบบรางคู่ รถไฟในทิศทางเดียวกันจะวิ่งตามกันไป จึงต้องทำให้รถวิ่งเข้าใกล้กันได้ในระดับที่เมื่อรถขบวนหน้าเกิดเหตุที่ทำให้ต้องหยุดฉุกเฉิน รถขบวนหลังจะต้องหยุดได้ก่อนที่จะชนท้ายรถขบวนหน้า ซึ่งถ้าคำนึงถึงระยะห่างสัมบูรณ์ระหว่างขบวนรถไฟ จะหมายถึงระยะวัดจากหัวขบวนรถขบวนที่วิ่งตามหลัง ถึงท้ายขบวนรถขบวนที่วิ่งนำหน้าในขณะที่กำลังเคลื่อนที่ การที่จะวิเคราะห์หาระยะห่างระหว่างขบวนที่น้อยที่สุด จำเป็นต้องทราบเวลาในการตอบสนองของพนักงานขับรถไฟและของอุปกรณ์ และระยะเวลาที่ใช้สำหรับเบรกของขบวนรถไฟที่วิ่งตามหลังจากความเร็วใด ๆ จนรถหยุด ซึ่งสามารถแสดงองค์ประกอบได้ดังรูปที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 Headways & Deceleration Curve of Trains

โดย

S_{BR} คือ ระยะทางเบรกของรถไฟที่ความเร็วสูงสุด (m)

L_{Train} คือ ความยาวของขบวนรถไฟ (m)

L_{Trav} คือ ระยะทางที่รถไฟขบวนหน้าเคลื่อนที่ไปได้หลังจากจอดที่สถานี (m)

L_{Block} คือ ความยาวของ Block (m)

V คือ ความเร็วสูงสุดของขบวนรถไฟ (m/sec)

a_a คือ ความเร่งของรถไฟ (m/sec^2)

a_b คือ ความหน่วงของรถไฟ (m/sec^2)

T_b คือ เวลาในการเบรกรถไฟจนหยุด (sec)

T_{Re} คือ เวลาในการตอบสนองของพนักงานขับรถและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง (sec)

T_{DW} คือ เวลาจอดรถที่สถานี (sec)

T_{HW} คือ เวลาระหว่างขบวนรถ (headway) (sec)

จากรูปด้านบน ดูที่รถไฟขบวนข้างหน้าก่อน ถ้าในขณะที่พิจารณานับตั้งแต่รถไฟขบวนหน้าเคลื่อนที่ไปได้จากสถานีรวมความยาวของขบวนรถจะเท่ากับ ($L_{Trav} + L_{Train}$) จะสามารถคำนวณเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ดังกล่าวได้ โดยอาศัยความรู้จากสมการฟิสิกส์ง่าย ๆ คือ

$$s = u + at$$

$$v^2 = u^2 + 2as$$

$$s = ut + \frac{1}{2}at$$

เมื่อระยะทางในการเคลื่อนที่ที่พิจารณาคือ ($L_{Trav} + L_{Train}$) ดังนั้น

$$T_{Trav} = \sqrt{\frac{2(L_{Trav}+L_{Train})}{a_a}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณระยะทางเบรกได้โดย

$$0 = u - at$$
$$t = \frac{u}{a}$$
$$s = u\left(\frac{u}{a}\right) - \frac{1}{2}a\left(\frac{u}{a}\right)^2$$
$$s = \left(\frac{u^2}{a}\right) - \frac{1}{2}\left(\frac{u^2}{a}\right)$$

จะได้

$$s = \frac{u^2}{2a} \quad \text{เมตร}$$

หรือถ้าใช้ตัวเลขความเร็วเป็น กม./ชม. จะได้

$$1\,m/s = \left(\frac{u}{3.6}\right)\,km/hr$$

ดังนั้นระยะทางเบรก คือ

$$s = \frac{\left(\frac{u}{3.6}\right)^2}{2a} \quad \text{กิโลเมตร}$$

เวลาเบรก คือ

$$T_b = \frac{v}{a_b} \quad \text{วินาที}$$

ดังนั้นระยะเวลาระหว่างขบวนรถที่น้อยที่สุด (Minimum Headway) คือ

$$T_{HW_min} = T_{Re} + T_b + T_{DW} + T_{Trav}$$
$$T_{HW_min} = T_{Re} + \frac{v}{a_b} + T_{DW} + \sqrt{\frac{2(L_{Trav} + L_{Train})}{a_a}}$$

2.4 วิธีการส่งสัญญาณถึงคนขับรถไฟ

สัญญาณรถไฟที่พัฒนาขึ้นในระยะแรกสุดจะมี 2 ความหมายเท่านั้น คืออนุญาตให้คนขับนำขบวนรถผ่านไปข้างหน้า หรือห้ามคนขับนำขบวนรถผ่านไปข้างหน้า วิธีการส่งสัญญาณที่นำมาใช้ควบคุมรถไฟในสหรัฐอเมริกาในยุคเริ่มแรกคือใช้ลูกบอล (Ball Signal) ทาสีตามความหมายที่ตกลงกันไว้ แล้วผูกเชือกชักขึ้นไว้ในที่สูงเพื่อให้คนขับรถไฟสามารถมองเห็นได้แต่ไกล และสามารถควบคุมขบวนรถไปตามสีของลูกบอลตามที่ตกลงความหมายกันไว้ แต่หากคนขับนำขบวนรถไฟมาถึงจุดที่ควรจะมองเห็นลูกบอลแล้วไม่มีลูกบอล จะต้องหยุดขบวนรถเพราะโดยนัยของความหมายที่ตกลงกันคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณเป็นท่าห้าม การส่งสัญญาณด้วยลูกบอลทาสีผูกเชือกโยงขึ้นไว้ในที่สูง จึงแฝงนัยสำคัญในการออกแบบสัญญาณรถไฟไว้ด้วยตั้งแต่แรก นั่นคือมีคุณสมบัติปลอดภัยเมื่อบกพร่อง หมายความว่า หากบังเอิญเชือกที่ผูกลูกบอลขาด คนขับรถไฟผ่านมาแล้วมองไม่เห็นจึงต้องหยุดขบวนรถ ปรัชญาการออกแบบสัญญาณรถไฟให้ปลอดภัยเมื่อบกพร่องเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการออกแบบระบบอาณัติสัญญาณรถไฟสำหรับควบคุมการเดินขบวนรถไฟสมัยใหม่ด้วย วิธีการส่งสัญญาณไปให้ถึงคนขับรถไฟได้รับการพัฒนาให้ทันสมัยมาโดยตามลำดับจากลูกบอลทาสีมาเป็นสัญญาณหางปลาหรือสัญญาณใบธง (Semaphore Signal) เป็นสัญญาณไฟสี (Color Light Signal) จนกระทั่งถึงระบบที่ทันสมัยที่สุดคือไม่มีสัญญาณข้างทาง จึงต้องคำนึงถึงความปลอดภัยเมื่อเกิดความบกพร่อง ไม่ว่าจะเป็นบกพร่องจากอุปกรณ์เองหรือเกิดจากมนุษย์ ดังนั้นระบบปลอดภัยเมื่อบกพร่องจึงเป็นพื้นฐานของระบบอาณัติสัญญาณของการรถไฟซึ่งเป็นต้นเหตุของความซับซ้อนและทำให้ระบบทั้งหมดมีราคาแพง

รูปที่ 2.5 ตัวอย่าง Ball Signal, Semaphore Signal, and Color Light Signal
ที่มา: Ran Zammit, wikipedia, and railroadsignals.us

2.4.1 สัญญาณไฟสี

การใช้สัญญาณใบธงหรือสัญญาณหางปลา มีข้อจำกัดกล่าวคือ ตามปกติจะติดตั้งสัญญาณเตือนไว้หน้าสัญญาณกำกับตอนได้ไม่เกิน 350 เมตร ถ้าติดตั้งสัญญาณเตือนห่างจากสัญญาณเข้ามากจะทำให้จุดติดตั้งสัญญาณเตือนอยู่ห่างจากหอสัญญาณและสายลวดที่ใช้ดึงสัญญาณอาจมีความยาวกว่า 1,500 เมตร ทำให้สายลวดที่ใช้ดึงหางปลามีความสูญเสียเนื่องจากการหย่อนตามธรรมชาติ จึงทำให้หางปลายกไม่เต็มที่ ซึ่งในความหมายที่ตกลงกันคือเป็นสัญญาณคลุมเครือ ห้ามนำขบวนรถผ่านทำให้ไม่สะดวกในการเดินขบวนรถดังกล่าว การติดตั้งสัญญาณหางปลาโดยทั่วไป จึงไม่เหมาะสมสำหรับใช้ในกรณีที่ขบวนรถที่ยาวและมีความเร็วสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากขาดการพัฒนาระบบสัญญาณที่ใช้ควบคุมการเดินรถมาเป็นเวลานานการรถไฟจึงยังคงใช้สัญญาณหางปลาอยู่เป็นจำนวนมาก ในขณะที่ความเร็วสูงสุดของการรถไฟในปัจจุบันอยู่ที่ 90-120 กม./ชม. มีระยะเบรกอยู่ระหว่าง 700-1,000 เมตร ซึ่งถือว่าไม่ปลอดภัย แต่ยังนับว่าโชคดี ที่ภูมิประเทศและภูมิอากาศในประเทศไทยเป็นใจ กล่าวคือ ทางรถไฟส่วนใหญ่อยู่บนพื้นที่ราบเป็นทางตรงโล่งประกอบกับทัศนวิสัยของประเทศกว่า 60-70% อยู่ในสภาพที่ระยะการมองเห็น สัญญาณไกลกว่าในยุโรปหรือญี่ปุ่น

ดังนั้น สัญญาณไฟสีจึงเข้ามาแทนที่สัญญาณใบธงด้วยเหตุผลเรื่องข้อจำกัดนี้ สัญญาณไฟสีซึ่งส่งสัญญาณผ่านสายไฟฟ้า มีข้อดีที่สามารถจัดวางระบบสัญญาณได้สอดคล้องกับความยาวของขบวนรถและระยะเบรกของขบวนรถ นอกจากนั้นสัญญาณไฟสียังมีข้อดีอื่น ๆ ในเรื่องของความปลอดภัย การจัดเตรียมทางเข้าออกสถานีของขบวนรถ และมีส่วนขจัดความบกพร่องของคน เพราะอุปกรณ์ในระบบสัญญาณไฟสีมีการตรวจสอบอัตโนมัติ จึงมีความปลอดภัยสูงกว่าระบบสัญญาณใบธงซึ่งเป็นระบบทางเครื่องกล ช่วยให้การเดินขบวนรถไฟมีประสิทธิภาพขึ้น สัญญาณไฟสีใช้เลนส์บีบแสงจากหลอดสัญญาณกำลังสูงทำให้คนขับรถไฟมองเห็นสัญญาณชัดเจน สัญญาณไฟสีสามารถเพิ่มการสื่อความหมายได้มากตามความต้องการของวิศวกรผู้ออกแบบ

ระบบสัญญาณไฟสีของการรถไฟ ติดตั้งสัญญาณเตือนในทางประธานห่างจากสัญญาณเข้า 1,000 เมตร ในขณะที่การออกแบบรถไฟ (ทางเดี่ยว) กำหนดให้ระยะเบรกที่ความเร็ว 120 กม./ชม. ไม่เกิน 700 เมตร ส่วนระยะเบรกขบวนรถที่ความเร็วเดียวกันไม่เกิน 1,000 เมตร การวางสัญญาณเตือนไว้หน้าสัญญาณเข้าโดยมีระยะห่างเท่ากับระยะเบรกขบวนรถทำให้การเดินรถไฟปลอดภัยแม้ในกรณีที่ทัศนวิสัยการมองเห็นสัญญาณเลวร้ายที่สุด (ระยะการมองเห็นเป็นศูนย์) ซึ่งคนขับรถไฟสามารถควบคุมขบวนรถได้อย่างปลอดภัย กล่าวคือ เมื่อวิ่งผ่านสัญญาณเตือนแล้วเห็นเป็นท่าเตือน (เหลือง) ก็รู้ว่าสัญญาณเข้าเป็นท่าห้าม (แดง) และสามารถหยุดขบวนรถได้ทัน

รูปที่ 2.6 สัญญาณเตือนของระบบไฟสี ติดตั้งอยู่หน้าสัญญาณเข้ามากกว่าระยะเบรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ดี การติดตั้งสัญญาณเตือนไว้หน้าสัญญาณเข้าเป็นระยะทางไกลก็จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสัญญาณมีราคาแพง นอกจากนั้น ในกรณีที่ตอนสัญญาณสั้นอาจทำให้สัญญาณเข้ามาเกยทับกัน สร้างความสับสนให้กับคนขับรถไฟ ในกรณีที่ไม่มีระบบการสื่อสารระหว่างภาคพื้นดินกับขบวนรถ อาจเกิดการหลงสัญญาณคือมองเห็นสัญญาณของตอนสัญญาณอื่นเป็นตอนสัญญาณที่กำลังควบคุมขบวนรถอยู่ เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดอุบัติเหตุขบวนรถไฟชนกันหลายครั้งแม้ว่าจะติดตั้งระบบไฟสีแล้ว ดังนั้นในเขตเมืองซึ่งขบวนรถวิ่งช้าเพราะติดข้อจำกัดอื่นก็ไม่จำเป็นต้องติดตั้งสัญญาณเตือนห่างจากสัญญาณกำกับตอนถึง 1,000 เมตร

สัญญาณไฟสียังเพิ่มขีดความสามารถในการสื่อสัญญาณเพื่อรองรับเส้นทางที่มีขบวนรถเดินหนาแน่นและวางเร็ว (ระยะเบรกยาว) โดยการเพิ่มท่าในการสื่อความหมายของสัญญาณให้มากขึ้น การรถไฟใช้ไฟสีแบบ 3-Aspect ซึ่งนิยมใช้อยู่โดยทั่วไปตามลักษณะการเดินขบวนรถที่เป็นอยู่

สัญญาณไฟสียังสามารถแสดงเส้นทางที่คนขับจะต้องนำขบวนรถเข้าไปโดยการติดตั้งแถบดวงไฟไว้เหนือสัญญาณ เรียกว่าสัญญาณบอกทาง ถ้าสัญญาณสว่างขึ้นแสดงว่าให้คนขับนำขบวนรถเข้าทางแยก (เหมือนกับสัญญาณปลาที่ใช้ใบธง 2 ใบ) คนขับรถไฟจะต้องนำขบวนรถเข้าทางแยกด้วยความเร็วเท่ากับที่ออกแบบประแจไว้ การส่งสัญญาณแบบนี้มีต้นแบบมาจากประเทศในยุโรปเรียกว่าเป็น Route Signaling ซึ่งในยุโรปบางประเภท เช่น สวีเดน นอร์เวย์ และในสหรัฐอเมริกาจะพัฒนาวิธีการส่งสัญญาณอีกแบบหนึ่งขึ้นโดยใช้บังคับความเร็ว เรียกว่า Speed Signaling โดยคนขับรถไฟไม่จำเป็นต้องรู้ว่าต้องนำรถเข้าทางแยกหรือทางประธาน ระบบการส่งสัญญาณแบบนี้ได้มีวิวัฒนาการไปเป็นระบบสัญญาณของรถไฟความเร็วสูงและรถไฟขนส่งมวลชนในปัจจุบัน

2.5 ระบบป้องกันรถไฟ

รถไฟเป็นวัตถุที่มีน้ำหนักมาก มีความยาวกว่ารถยนต์มาก เคลื่อนที่บนรางเหล็กที่มีแรงเสียดทานต่ำด้วยความเร็วสูง บรรทุกผู้โดยสาร หรือสินค้าจำนวนมาก ทำให้การเกิดอุบัติเหตุแต่ละครั้งมีความรุนแรงมาก การป้องกันรถไฟจึงมีความจำเป็นอย่างมาก

ในสมัยก่อน การเดินรถไฟได้รับการป้องกันด้วยระบบที่ไม่ซับซ้อน เป็นไปตามเทคโนโลยีในยุคนั้น ๆ และได้มีการพัฒนาปรับปรุงมาอย่างต่อเนื่อง สอดคล้องกับความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี และยิ่งทำให้เพิ่มความสะดวกสบายในการใช้งานมากยิ่งขึ้น

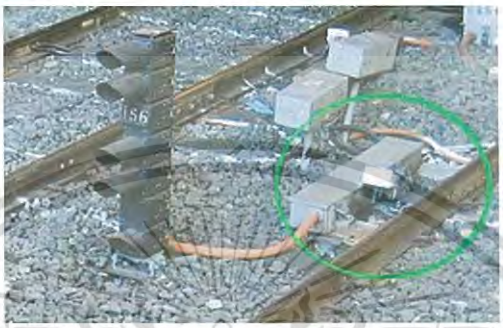
2.5.1 ระบบทางกลสำหรับหยุดรถไฟ

ระบบทางกลสำหรับหยุดรถไฟ (Mechanical Train Stop) เป็นระบบที่ใช้การทำงานเชิงกลในการหยุดรถไฟเมื่อมีการผ่าไฟแดงเท่านั้น (Signal Pass At Danger: SPAD) ซึ่งเป็นระบบป้องกันการเดินรถในรุ่นแรก ๆ ด้วยการทำงานง่าย ๆ โดยติดตั้งอุปกรณ์ที่สัญญาณไฟริมทางวิ่งที่ต้องการซึ่งต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เชื่อมต่อสัมพันธ์กับสถานะของไปสัญญาณนั้น โดยเมื่อสัญญาณเป็นสีแดง จะมีแขนยื่นออกมาเพื่อไปแตะระบบเบรกของรถไฟทำให้เกิดการเบรกฉุกเฉินขึ้น โดยระบบนี้มีจุดอ่อนอยู่หลายประการ เช่น ต้องใช้การเคลื่อนที่ทางกลของอุปกรณ์ซึ่งต้องการการบำรุงรักษาค่อนข้างมาก และต้องระวังรักษาระยะของก้านที่ยกขึ้นไม่ให้เข้าไปจนกระทบกับส่วนโครงสร้างอื่นของรถไฟซึ่งจะทำให้เกิดความเสียหายได้



รูปที่ 2.7 เสาสัญญาณที่ติดตั้งระบบทางกลสำหรับหยุดรถ ที่มา: wikipedia

2.5.2 ระบบสัญญาณเตือนอัตโนมัติ

นอกจากการใช้สัญญาณไฟ ที่ความรับผิดชอบในการหยุดรถหรือชะลอความเร็วขึ้นอยู่กับคนขับแต่เพียงผู้เดียวนั้น ยังได้มีความพยายามที่จะพัฒนาระบบการเตือนรูปแบบอื่น เพื่อให้ได้ผลที่ดียิ่งขึ้น และช่วยลดความผิดพลาดของคนขับลงได้ โดยระบบแรก ๆ นั้นเรียกว่า ระบบสัญญาณเตือนอัตโนมัติ (Automatic Warning System: AWS) ซึ่งเป็นระบบที่ใช้อยู่ในอังกฤษ และยังคงมีใช้มาจนถึงปัจจุบัน โดยอุปกรณ์จะถูกติดตั้งก่อนถึงเสาสัญญาณไฟและเชื่อมต่อกับสถานะของสัญญาณนั้น ตัวอุปกรณ์ประกอบด้วยแม่เหล็กชนิดถาวรหนึ่งชุด และแม่เหล็กไฟฟ้าอีกหนึ่งชุดโดยอุปกรณ์นี้จะทำให้เกิดสัญญาณเตือนขึ้นในห้องคนขับรถ เพื่อแสดงถึงสถานะของไฟข้างหน้า โดยถ้าด้านหน้าเป็นไฟสีเหลืองหรือสีแดงสัญญาณเตือนจะดังขึ้น และคนขับต้องกดปุ่มรับทราบการเตือนของสัญญาณ ซึ่งถ้าคนขับไม่ทำการกดปุ่มรับรู้จะทำให้รถไฟถูกเบรกโดยอัตโนมัติ ซึ่งก็มีข้อด้อยคือถ้าคนขับกดปุ่มรับรู้เพื่อปลดการทำงานของสัญญาณแล้ว แต่ไม่สามารถหยุดรถได้ก่อนเสาสัญญาณก็อาจทำให้ชนกับรถขบวนหน้าได้

รูปที่ 2.8 ระบบสัญญาณเตือนอัตโนมัติที่ติดตั้งระหว่างรางรถไฟ ที่มา: vortok.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
148760

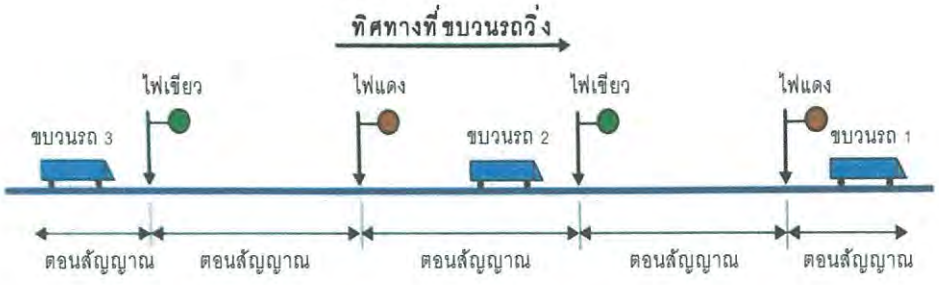
2.5.3 ระบบสัญญาณเตือนและป้องกันรถไฟ

ต่อจากนั้นจึงมีการพัฒนาอุปกรณ์เพื่อที่จะทราบความเร็วของรถไฟที่วิ่งเข้าสู่สัญญาณไฟว่าความเร็วสูงเกินกำหนดหรือไม่ โดยใช้วงจรเพิ่มเติมที่ซับซ้อมมากยิ่งขึ้น เรียกว่า ระบบสัญญาณเตือนและป้องกันรถไฟ (Train Protection and Warning System: TPWS) โดยหลักการคือ ถ้าตรวจพบว่ารถไฟที่กำลังวิ่งเข้าหาสัญญาณไฟแดงนั้นมีความเร็วสูงเกินกว่าจะทำให้รถหยุดหน้าสัญญาณไฟได้ รถไฟจะถูกบังคับให้เกิดการเบรกฉุกเฉินขึ้นโดยไม่รอการกระทำของคนขับรถ ซึ่งอุปกรณ์นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในช่วงที่ต้องการจำกัดความเร็วได้ด้วยเช่นกัน

รูปที่ 2.9 ระบบสัญญาณเตือนและป้องกันรถไฟที่ติดตั้งอยู่ระหว่างรางรถไฟ ที่มา: wikipedia

2.5.4 ตอนสัญญาณ

ระบบการเดินขบวนรถไฟโดยพื้นฐานแล้ว จะแบ่งทางออกเป็นเป็นตอน (Block) โดยแต่ละตอนมีความยาวอย่างน้อยเท่ากับความยาวของขบวนรถแต่ต้องไม่น้อยกว่าระยะเบรกของขบวนรถ ทางรถไฟแต่ละตอนจะมีสัญญาณกำกับเพื่อป้องกันไม่ให้มีรถไฟมากกว่า 1 ขบวน วิ่งอยู่ภายในตอนสัญญาณเดียวกัน ถ้าตอนข้างหน้ามีรถวิ่ง อยู่แล้ว สัญญาณกำกับตอนนั้นจะอยู่ในท่าห้าม (ไฟแดง) ขบวนรถที่วิ่งตามหลังมาจะต้องหยุดก่อนถึงสัญญาณนี้ ถ้าในตอนไม่มีขบวนรถไฟอยู่ สัญญาณเข้ากำกับในตอนสัญญาณนั้นจะเป็นท่าอนุญาต (ไฟเขียว) โดยกฎการเดินรถไฟในการออกแบบระบบอาณัติสัญญาณคือ ต้องมีขบวนรถในตอนสัญญาณเพียงขบวนเดียวเท่านั้นตลอดเวลา



รูปที่ 2.10 การทำงานของตอนสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การตรวจจับตำแหน่งรถไฟ

สิ่งสำคัญประการหนึ่งในการเดินรถไฟ คือต้องสามารถทราบตำแหน่งของรถไฟขบวนต่าง ๆ รวมถึงวัตถุต่าง ๆ ที่เคลื่อนที่บนราง หรือเกี่ยวข้องกับระบบโครงข่ายเส้นทางรถไฟที่พิจารณาอยู่ตลอดเวลา เพื่อประโยชน์ในการรับส่งข้อมูลและการประเมินผล

2.6.1 จุดประสงค์ในการตรวจจับตำแหน่งของรถไฟ

จุดประสงค์ในการตรวจจับตำแหน่งของรถไฟในส่วนหัวสุดและท้ายสุดของพาหนะนั้นแตกต่างกันไป โดยจะต้องนำตำแหน่งการจับนี้มากระทำการเกี่ยวเนื่องกับอุปกรณ์อื่นดังจำแนกต่อไปนี้

- การตรวจจับส่วนหัวสุดของพาหนะ (Front End) มีวัตถุประสงค์ที่สำคัญได้แก่ การสั่งงานปิดเครื่องกั้นห้ามผ่านข้ามรางรถไฟ การเปลี่ยนสัญญาณเป็นไฟแดงหลังจากรถแล่นผ่านสัญญาณไฟ การล็อกเส้นทางห้ามเดินรถสวนทาง (Irreversible Route Locking) การตรวจสอบสถานะของประตูกั้นชานชาลา การควบคุมการให้ข้อมูลผู้โดยสาร การสนับสนุนการตัดสินใจดำเนินการเกี่ยวกับการเดินรถ เช่น ในกรณีที่เกิดความล่าช้าขึ้น และการประกาศขบวนรถไฟที่กำลังแล่นเข้ามาไปยังเจ้าหน้าที่ควบคุมสัญญาณเพื่อเตรียมตัวกำหนดเส้นทางเดินรถ
- การตรวจจับส่วนท้ายสุดของพาหนะ (Rear End) มีวัตถุประสงค์ที่สำคัญได้แก่ การเปิดเครื่องกั้นหน้าผ่านข้ามรางรถไฟ การปล่อยให้สามารถกำหนดเส้นทางได้ หรือการ Clear เส้นทางนั้นนั่นเอง

2.6.2 องค์ประกอบในการตรวจจับตำแหน่งรถไฟ

ระบบการตรวจจับตำแหน่ง (Detection System) สามารถแบ่งได้ขึ้นอยู่กับหลักเกณฑ์ที่ใช้แตกต่างกัน สำหรับรถที่วิ่งบนราง หลักเกณฑ์สำคัญคือวัตถุจำเพาะที่ต้องการตรวจพบ โดยวัตถุดังกล่าวอาจเป็น

- เพลารถ หรือล้อรถ (Axles or Wheels)
- ตัวรถ (Body)
- ส่วนอื่น ๆ ของรถที่เป็น Passive Parts คือไม่ตอบสนองต่อสัญญาณต่าง ๆ เช่น แพนโทกราฟ (Pantograph)
- อุปกรณ์สื่อสารในรถไฟ โดยระบบที่ใช้สิ่งนี้สามารถแยกออกเป็นระบบที่ทราบหมายเลขประจำตัว หรือสิ่งที่บ่งบอกลักษณะเฉพาะของขบวนนั้นได้ กับระบบที่รถไฟเคลื่อนที่อยู่ในโครงข่ายโดยไม่มีการจำเพาะเจาะจง

โดยต้องมีการใช้อุปกรณ์ทางเทคนิคที่แตกต่างกันไป ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ตัวตรวจจับที่ติดตั้งอยู่ในทางวิ่ง ซึ่งอาจจะอยู่ระหว่างกลางทางวิ่งระหว่างราง หรืออยู่ใกล้ ๆ รางและทำหน้าที่ตอบสนองต่อสัญญาณ (Active Devices) ซึ่งตัวตรวจจับลักษณะนี้เป็นรูปแบบส่วนใหญ่ของระบบการตรวจจับตำแหน่งรถไฟ
- ตัวตรวจจับอยู่บนรถไฟ และทำหน้าที่ตอบสนองต่อสัญญาณ เช่น การตรวจจับตำแหน่งด้วยดาวเทียม ซึ่งการตรวจจับรูปแบบนี้มีอยู่ไม่มากนัก

นอกจากนี้ ระบบตรวจจับตำแหน่งยังสามารถแบ่งประเภทได้อีกเป็น

- การตรวจจับเฉพาะจุด (Spot Detection) เช่น การตรวจจับที่ล้อรถไฟ โดยใช้วงจรแม่เหล็ก หรือใช้การเหนี่ยวนำ เป็นต้น
- การตรวจจับเชิงเส้น หรือการตรวจจับเป็นช่วง บางแบบเป็นการตรวจจับแบบจุดหลาย ๆ ตำแหน่ง (Linear Detection or Quasi Spot) เช่น วงจรไฟตอน (Track Circuit) เป็นต้น
- การตรวจเป็นพื้นที่ เช่น การใช้คลื่นแม่เหล็ก (Electromagnetic Wave Length) ซึ่งแบบนี้ไม่เพียงจับรถไฟได้ แต่จะสามารถตรวจจับวัตถุอื่นที่เข้ามาในพื้นที่ได้ด้วย
- การตรวจจับแบบสามมิติ เช่น การติดตั้งกล้องที่ทางข้ามต่าง ๆ หรือเทคนิคใหม่ ๆ อย่างกล้องตรวจจับวัตถุอัตโนมัติ (Automatic Image Procession) โดยกล้องจะสามารถหมุนไปจับภาพวัตถุที่นอกเหนือจากที่มีอยู่โดยปกติได้

2.7 ระบบบังคับสัมพันธ์

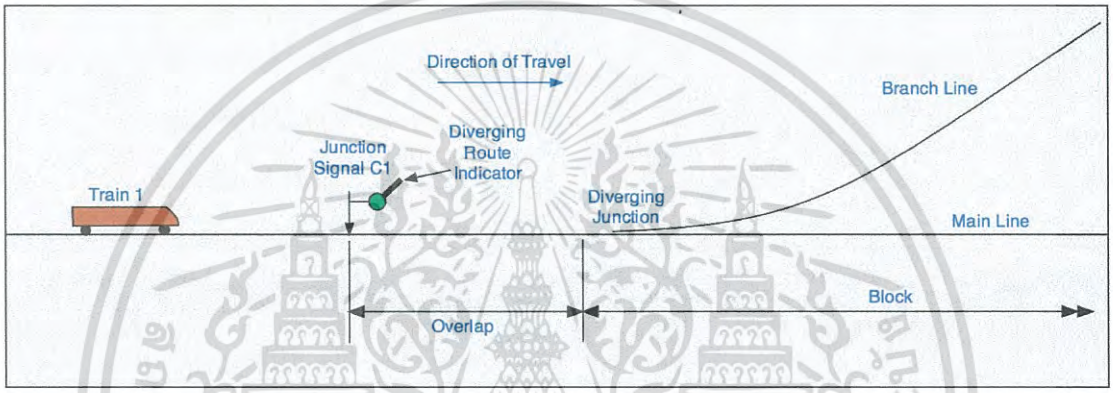
การบังคับสัมพันธ์ หมายถึง การบังคับทางด้วยท่าของประแจในทาง และสัญญาณประจำที่ในตอนให้สอดคล้องกันประการหนึ่ง และอีกประการหนึ่ง คือการบังคับป้องกันมิให้เกิดการเตรียมทางผิดพลาด (Conflicting Route Set-up) หมายถึง เมื่อได้จัดเตรียมทางให้แก่ขบวนรถขบวนหนึ่งโดยการเปิดประแจและท่าสัญญาณถูกต้องแล้ว จะไม่สามารถให้สัญญาณนำขบวนรถอื่นเข้ามาในทางที่จัดเตรียมไว้ได้ การบังคับสัมพันธ์ที่นำมาใช้ระยะแรก (ประมาณกลางศตวรรษที่ 19) เป็นแบบบังคับสัมพันธ์ด้วยการกล (Mechanical Interlocking) ในหอสัญญาณขนาดใหญ่จึงเต็มไปด้วยกลไกล็อกบังคับ หรือกลอนบังคับหลังมือคันกลับเต็มไปหมด เมื่อเทคโนโลยีทันสมัยขึ้น การบังคับสัมพันธ์ระบบการกลถูกแทนที่ด้วยระบบบังคับสัมพันธ์แบบรีเลย์ (Relay Interlocking) ซึ่งใช้พื้นที่น้อย ทำให้หอสัญญาณมีขนาดเล็กลงมาก พนักงานควบคุมเพียงแต่กดปุ่มหรือกระเดื่องเล็ก ๆ นอกจากนั้น ในหอควบคุมก็จะมีผังวงจรควบคุมที่จำลองจากย่านจริงเพื่ออำนวยความสะดวก ความปลอดภัย และเพิ่มความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ในการควบคุมการให้ทางขบวนรถแก่พนักงาน หอสัญญาณระบบบังคับสัมพันธ์ยังได้รับการพัฒนาขึ้นไปถึงขั้นควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ (Computer-Based

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Interlocking: CBI) ซึ่งเป็นระบบที่ไม่ซับซ้อนเท่าระบบรีเลย์ ติดตั้งง่ายกว่า มีขนาดเล็กลง และราคาถูกลง แต่จำเป็นต้องใช้บุคลากรที่มีความรู้ในเทคโนโลยีนี้สูงขึ้นมาปฏิบัติหน้าที่ควบคุมการให้สัญญาณ

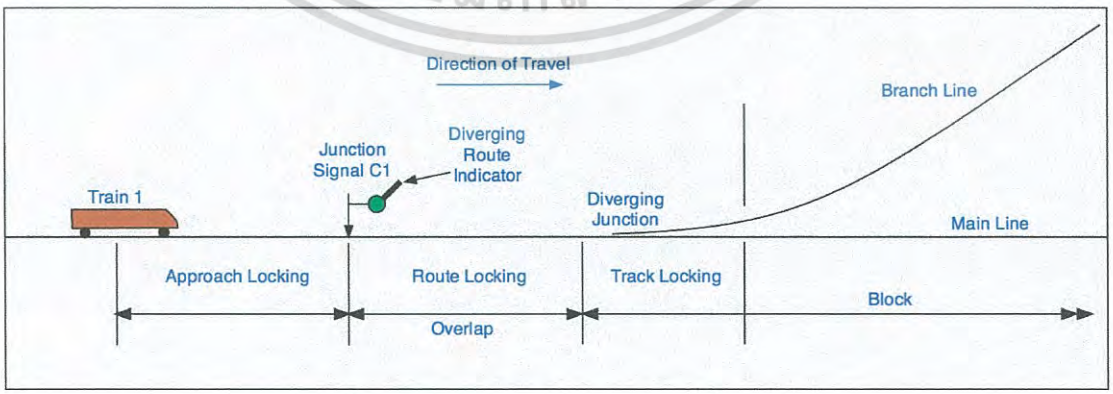
2.7.1 ภาพรวมและตัวอย่างของการบังคับสัมพันธ์

สัญญาณที่ทางหลีก ดังรูปที่ 2.11 จะอยู่หน้าประแจเท่ากับระยะเบรก มีหน้าที่บอกคนขับรถไฟว่าตอนข้างหน้าว่างหรือไม่ และบอกว่าจะต้องนำรถเข้าทางแยกหรือทางประธาน เมื่อเตรียมททางเสร็จเรียบร้อย โดยตั้งท่าประแจถูกต้อง และส่งสัญญาณออกไปแล้ว ลิ้นประแจจะถูกบังคับอยู่กับที่ (Lock) อุปกรณ์สอบลิ้น (Detector) จะส่งสัญญาณไปที่ระบบควบคุมเพื่อป้องกันการใช้ทางซ้ำซ้อน



รูปที่ 2.11 สัญญาณที่ทางหลีก

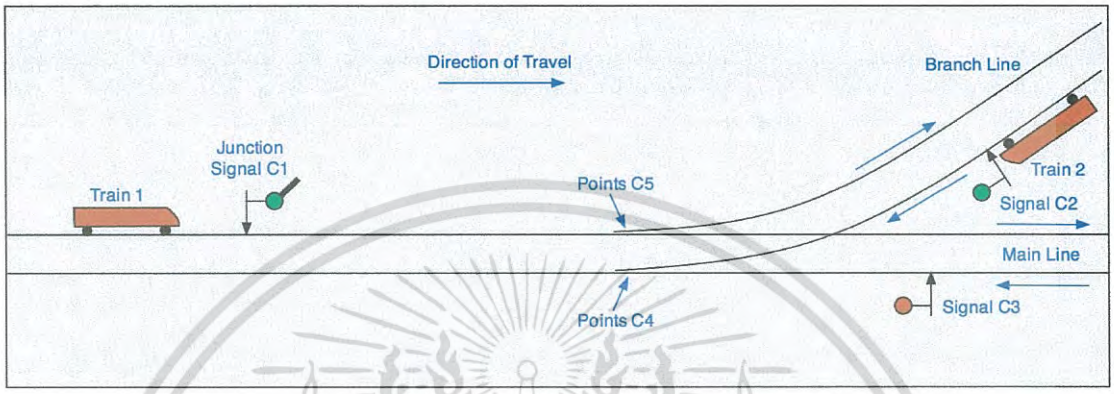
การบังคับการให้ทาง (Route Locking) ดังรูปที่ 2.12 ระหว่างสัญญาณเข้ากับประแจ เมื่อตั้งท่าประแจถูกต้อง และส่งสัญญาณถึงคนขับแล้ว จะคืนทางไม่ได้ จนกว่าขบวนรถจะผ่านวงจรไปตอนในทางไปแล้ว การบังคับลิ้นประแจ (Track Locking) ก็เช่นกัน วงจรไฟตอนที่ประแจจะบังคับอุปกรณ์กับประแจไม่ให้เปลี่ยนท่าได้จนกว่าขบวนรถจะผ่านไปแล้ว



รูปที่ 2.12 การบังคับการให้ทางและลิ้นประแจ

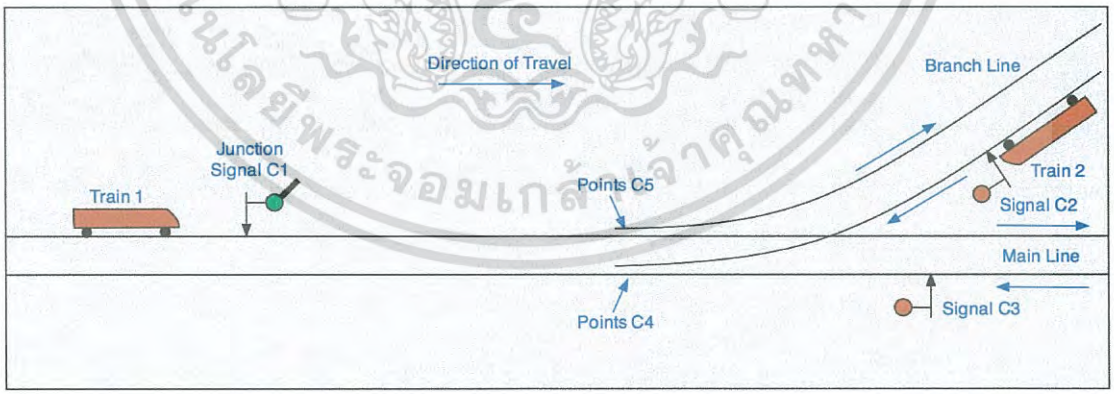
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การให้สัญญาณที่ทางแยก ตัวอย่างกรณีรางแยกที่เป็นคู่ ดังรูปที่ 2.13 ประแจ C5 และ C4 อยู่ในท่าเปิดทางให้รถขบวนที่ 1 เข้ารางแยก และรถขบวนที่ 2 วิ่งจากรางแยกเข้ารางประธาน สัญญาณ C1 แสดงท่าอนุญาต (เขียว) แถบไฟบอกทางสว่างขึ้น และสัญญาณ C2 แสดงท่าอนุญาต (เขียว) เช่นกัน ส่วนสัญญาณ C3 ต้องแสดงท่าห้าม (แดง) เท่านั้น



รูปที่ 2.13 การให้สัญญาณที่ทางแยก

ตัวอย่างการบังคับสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ประแจ C5 และ C4 เปิดให้รถขบวนที่ 1 วิ่งเข้ารางประธาน ประแจ C4 ต้องอยู่ในท่าเปิด ซึ่งสอบลิ้นก็จะส่งสัญญาณกลับไปที่แผงควบคุมให้สัญญาณ C2 เป็นท่าห้ามเท่านั้น รถขบวนที่ 2 ต้องรอ ในขณะเดียวกัน ก็ยอมให้ทำการให้ทางโดยเปิดสัญญาณ C3 เป็นท่าอนุญาตได้ถ้าต้องการ



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างการบังคับสัมพันธ์

2.7.2 หลักการเดินรถเป็นช่วงหรือตอน

ระบบการเดินรถเป็นช่วงระยะแบบสัมบูรณ์ (Absolute Block Distance) ในที่นี้หมายความว่า หลังจากที่รถไฟเคลื่อนที่เข้า Block แรก ท่าสัญญาณขาเข้าของ Block แรกที่รถเพิ่งผ่านไปนั้นจะทำการล็อก (Positive Locked) อยู่โดยแสดงสถานะให้รถหยุดเพื่อป้องกันไม่ให้มีรถหรือพาหนะอื่นใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เข้ามา จนกว่ารถไฟขบวนแรกจะเคลื่อนผ่านท่าสัญญาณตัวที่สองไป และท่าสัญญาณที่สองนี้เปลี่ยนเป็นแสดงสถานะให้หยุดรถแล้ว ท่าสัญญาณตัวแรกจึงจะสามารถกลับมาแสดงสถานะทางสะดวก หรือพร้อมให้ใช้งานได้ (Clear) นั่นหมายความว่า กระบวนการดังกล่าวเป็นทั้งการ Block & Lock เส้นทางในเวลาเดียวกัน ซึ่งการทำงานของ Block แบ่งได้เป็น 3 ลักษณะ คือ

- การทำงานของ Block โดยไม่อาศัยระบบการ Block เส้นทาง (Line Block System) ซึ่งเป็นการที่เส้นทางเดินรถไม่มีการติดตั้งระบบการ Block เส้นทางเพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ของรถไฟบนเส้นทาง ดังนั้นจึงต้องอาศัยการสื่อสารแลกเปลี่ยนข้อมูลด้วยโทรศัพท์ระหว่างเจ้าหน้าที่ประจำการที่เกี่ยวข้องในการดำเนินการ (Local Operators) ทำให้ต้องมีเจ้าหน้าที่ประจำการทุก ๆ สถานีที่กำหนดของเขตของ Block โดยก่อนที่ท่าสัญญาณขาออก (Exit Signal) จะแสดงสถานะว่าง เจ้าหน้าที่อำนวยการเดินรถของสถานีต้นทางจะต้องแจ้งเจ้าหน้าที่อำนวยการเดินรถที่สถานีเป้าหมาย และระบุรายละเอียดของรถไฟที่ประสงค์จะเคลื่อนไปยังปลายทาง
- การทำงานของ Block โดยอาศัยเจ้าหน้าที่ในการกำหนดระบบการ Block เส้นทาง (Manual Block) ระบบนี้อาศัยอุปกรณ์เพื่อความปลอดภัยอย่างแท้จริง โดยเพิ่มการล็อกท่าสัญญาณที่ให้ผลแน่นอนเข้าไปเสริมการทำงานของ Block โดยเครื่องหรืออุปกรณ์ล็อกเส้นทาง (Block Instrument) ดังรูปที่ 2.15

รูปที่ 2.15 เครื่องล็อกเส้นทาง ภาพโดย: David Ingham

แต่ละอุปกรณ์ทำหน้าที่เป็นเครื่องล็อกทางไฟฟ้าโดยเจ้าหน้าที่สามารถทำการล็อกได้โดยใช้ก้านล็อก (Lock lever) ซึ่งเมื่อทำการล็อกแล้วจะไม่สามารถปลดล็อกได้ด้วยอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เดียวกันนี้ได้ แต่จะปลดล็อกได้จากอุปกรณ์ที่ทำงานคู่กันที่ถูกติดตั้งไว้ในหอสัญญาณอีกแห่งหนึ่ง หรือสามารถปลดล็อกด้วยการที่มีรถไฟเคลื่อนผ่านอุปกรณ์ตรวจจับเฉพาะ

- การทำงานของ Block โดยอัตโนมัติ (Automatic Block) นั้น หลังจากที่รถไฟครอบครองเส้นทาง (Block Section) แล้ว ท่าสัญญาณจะ Reset ไปยังตำแหน่งหยุดรถอัตโนมัติและถูกล็อกในตำแหน่งนั้น โดยไม่ต้องอาศัยเจ้าหน้าที่ดำเนินการเหมือนหัวข้อที่ผ่านมา รวมถึงสามารถปลดล็อกท่าสัญญาณให้ไปอยู่ในตำแหน่งให้ผ่านได้อีกครั้งสำหรับรถไฟขบวนถัดไป

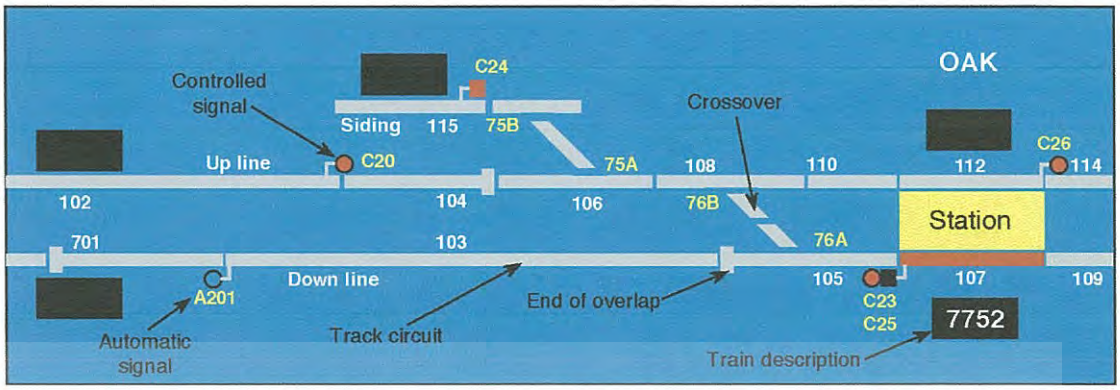
2.8 การแสดงสถานะของทางในหอสัญญาณหรือศูนย์ควบคุมการเดินรถ

ในสมัยก่อนเมื่อระบบการเดินรถไฟยังไม่ซับซ้อน หอสัญญาณควบคุมการเดินรถมีขนาดเล็ก พนักงานจำสภาพทางรถไฟภายใต้การควบคุมของคนเองได้ จึงยังไม่มีความจำเป็นต้องมีผังแสดงสถานะของทางและอุปกรณ์ที่อยู่ภายใต้การดูแล แต่ระบบการเดินรถไฟสมัยใหม่มีความซับซ้อนมากขึ้น มีขบวนรถเดินหนาแน่นและอยู่ใกล้ชิดกันมากกว่าแต่ก่อน ความผิดพลาดเพียงเล็กน้อยอาจนำไปสู่อุบัติเหตุที่ร้ายแรงได้ ประกอบกับระบบควบคุมการเดินรถไฟได้รับการพัฒนาให้มีวิวัฒนาการไปตามเทคโนโลยีสมัยใหม่ อาทิ การใช้ระบบคอมพิวเตอร์มาควบคุมการให้ทางที่เรียกว่า Computer-Based Interlocking เป็นต้น ดังนั้นรูปแบบของผังแสดงสถานะของทางรถไฟ (Route Layout and Indication) จึงได้รับการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงเพื่อช่วยให้การควบคุมขบวนรถไฟมีความสะดวกรวดเร็วและปลอดภัย

หอสัญญาณสำหรับควบคุมการเดินรถไฟสมัยใหม่ จะมีภาพจำลองของระบบการเดินรถที่กว้างขึ้น เช่น อาจจะจำลองระบบการเดินรถตลอดเส้นทางไว้ที่ศูนย์ควบคุมการเดินรถแห่งเดียว ที่เรียกว่า Centralized Traffic Control หรือ CTC ทั้งนี้ก็เพื่อช่วยให้สามารถมองเห็นภาพรวมของระบบการเดินรถทั้งหมด นอกจากนั้นเมื่อก้าวเข้าสู่ยุคของการใช้ระบบคอมพิวเตอร์ควบคุมการเดินรถแล้ว การติดตั้งรูปจำลองของระบบการเดินรถไว้ในศูนย์ควบคุมการเดินรถก็อาจจะไม่จำเป็น เจ้าหน้าที่ผู้ควบคุมการเดินรถสามารถเรียกดูภาพจำลองของระบบการเดินรถบางส่วนขึ้นมาดูทางหน้าจอมอนิเตอร์ และสั่งการควบคุมขบวนรถได้เลย ทั้งนี้ หากมีความจำเป็นต้องเรียกดูภาพรวมทั้งหมดก็สามารถทำได้ โดยใช้เครื่องฉายภาพข้างศีรษะ (Overhead Projector) วิธีการนี้ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งอุปกรณ์ที่ศูนย์ควบคุมการเดินรถลงได้เป็นจำนวนมาก ศูนย์ควบคุมการเดินรถของรถไฟฟ้า BTS และรถไฟใต้ดิน BMCL รวมทั้งศูนย์ควบคุมการเดินรถจากระยะไกลของการรถไฟแห่งประเทศไทย ที่ติดตั้งระบบ CTC แล้ว ก็ใช้วิธีการเดียวกันนี้

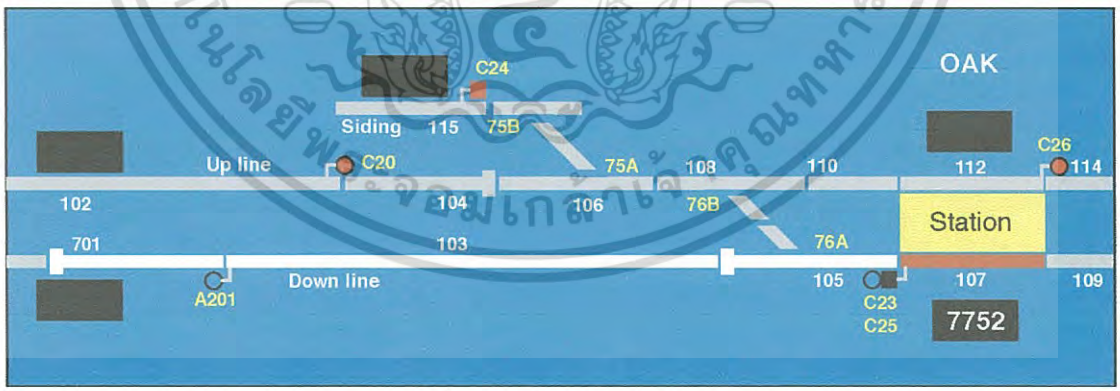
แผนภาพที่แสดงต่อไปนี้ เป็นตัวอย่างรูปจำลองของระบบการเดินที่ศูนย์ควบคุมการเดินรถ ซึ่งติดตั้งแสดงด้วยแผนภูมิหรือบนหน้าจอมอนิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างภาพจำลองแสดงสถานะของทางรถไฟบางส่วน

จากรูปที่ 2.16 แสดงตัวอย่างภาพจำลองแสดงสถานะของทางรถไฟบางส่วนที่เรียกมาดูทางหน้าจอมอนิเตอร์ ตัวเลขบนทางหมายถึงเลขที่ของวงจรไฟตอน เลขที่เป็นคู่หมายถึง ประแจรางแยกที่ทำงานสัมพันธ์กัน อักษณกำกับ A หมายถึงประแจต้นทาง B หมายถึงประแจปลายทาง เช่น 76A/76B อักษณกำกับสัญญาณ A หมายถึงสัญญาณที่ทำงานด้วยวงจรไฟตอนเท่านั้น C หมายถึงสัญญาณที่คนควบคุมได้ มีไว้เพื่อการให้ทางขบวนรถ สัญญาณกำกับตอน C23 เป็นสัญญาณสับเปลี่ยน ส่วน C25 เป็นสัญญาณกำกับรางแยก 76A/76B สัญญาณ A201 เป็นสัญญาณอัตโนมัติของตอน 701 โดยจากรูปจะเห็นว่า ขบวนรถที่ 7752 อยู่บนวงจรไฟตอนที่ 107 สัญญาณไฟของตอนสัญญาณถัดไป (C23) เป็นท่าห้าม วงจรไปตอนอื่นแสดงสีเทาเพราะยังไม่ได้ให้ทางแก่ขบวน 7752

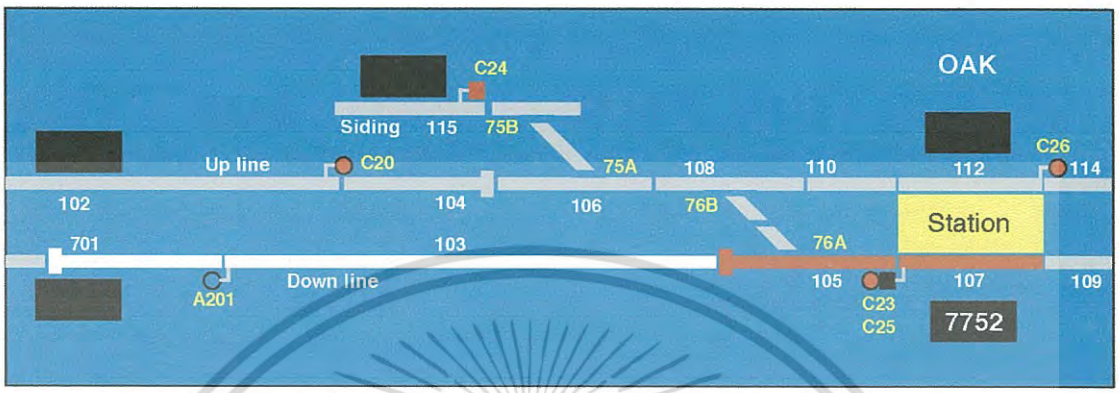


รูปที่ 2.17 ตัวอย่างการให้ทาง

จากรูปที่ 2.17 พนักงานควบคุมต้องการให้ รถไฟหมายเลข 7752 (ข.7752) เดินไปข้างหน้าบนทางล่อง เมื่อวงจรไฟตอน 107 มีขบวนรถจอดอยู่นานกว่า 30 วินาที พนักงานจะสามารถกำหนดให้สัญญาณ C23 เป็นท่าอนุญาตได้ ซึ่งหมายความว่าทางวิ่งสำหรับ ข.7752 ถูกกำหนดไปบนตอนสัญญาณ 105 – 103 และ 701 (สัญญาณ A201 เป็นท่าอนุญาตอัตโนมัติหากข้างหน้าไม่มีรถ) เมื่อให้

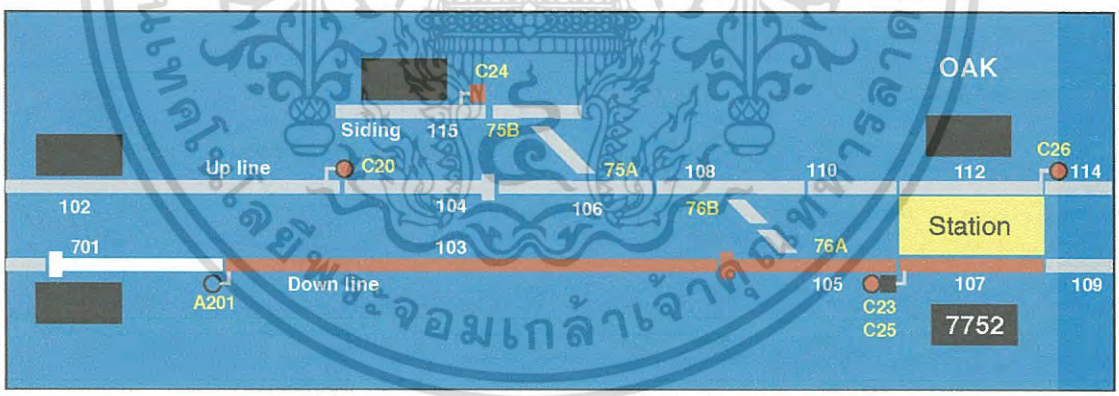
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางไปแล้ว สัญญาณและประแจจะถูกบังคับนิ่ง (Locked) จะปล่อยขบวนรถอื่นเข้ามาในเส้นทางที่ขัดกับทางที่ให้ไปแล้วไม่ได้ (No Conflict Movement Allowed) และภาพจำลองเส้นทางที่ให้ไปแล้วในศูนย์ควบคุมจะแสดงเป็นสีขาวเพื่อให้พนักงานสังเกตได้ง่าย



รูปที่ 2.18 ตัวอย่างเมื่อขบวนรถเคลื่อนไปภาพที่ 1

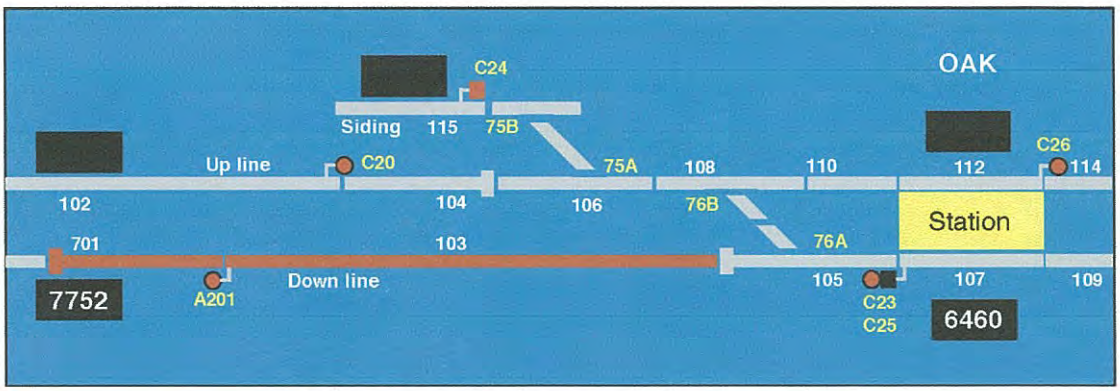
จากรูปที่ 2.18 ล้อของ ข.7752 เหยียบวงจรไฟตอน 105 สัญญาณ C23 แสดงท่าห้าม แถบสีของไฟตอน 105 แสดงสีแดง ประแจ 76A และ 76B สามารถเคลื่อนไหวเป็นอิสระจากกัน เพื่อเปิดโอกาสให้พนักงานทำการให้ทางและปล่อยขบวนรถเข้ามาในทางขึ้นตรงข้ามได้



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างเมื่อขบวนรถเคลื่อนไปภาพที่ 2

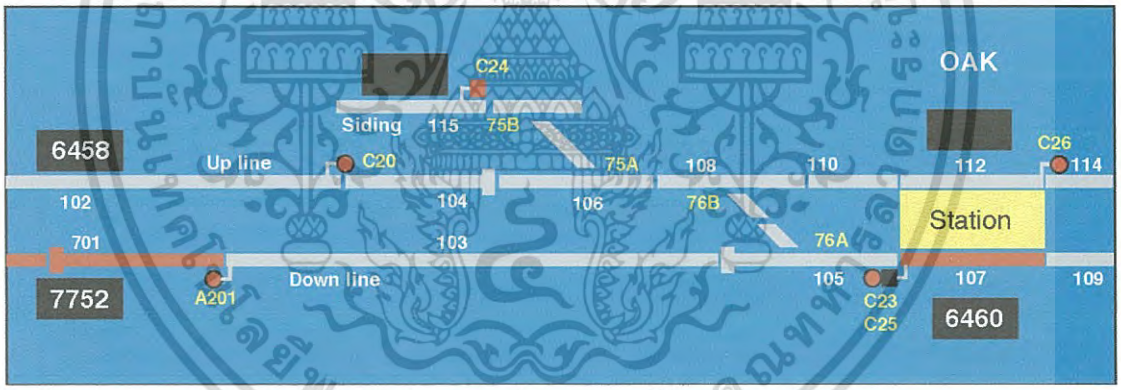
จากรูปที่ 2.19 ข.7752 ได้วิ่งถึงไฟตอน 103 โดยล้อข้อ ข.7752 เหยียบวงจรไฟตอน 103 แต่เนื่องจากขบวนรถยาว ล้อจึงไม่พ้นไฟตอน 105 และ 107 สัญญาณ C23 แสดงท่าห้าม แถบสีของไฟตอน 105 และ 103 แสดงสีแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 ตัวอย่างเมื่อขบวนรถเคลื่อนไปภาพที่ 3

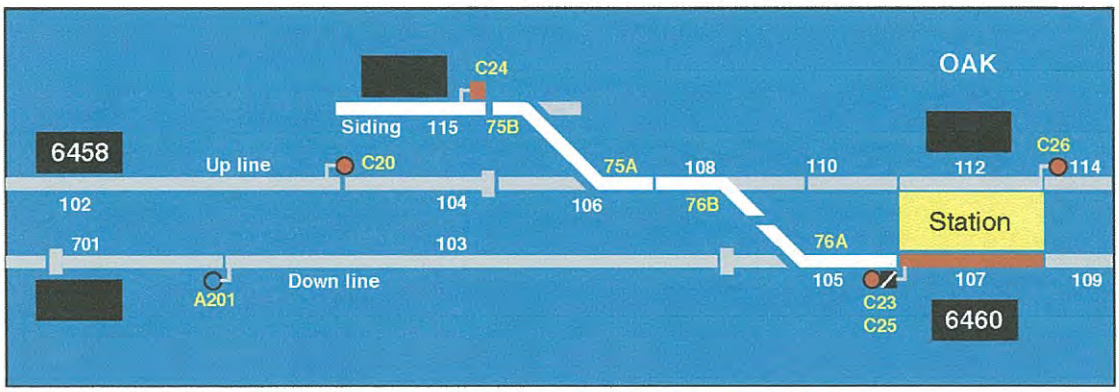
จากรูป 2.20 ล้อของ ข.7752 พ้นจากไฟตอน 105 และเหยียบวงจรไฟตอน 701 สัญญาณ A201 ซึ่งเป็นสัญญาณอัตโนมัติ แสดงท่าห้าม ป้ายบอกว่า ข.7752 เข้ามาแล้วแสดงแถบสีของไฟตอน 103 และ 701 เป็นสีแดง และไฟตอน 105 และ 107 เป็นสีเทา (ทางว่าง) แต่สัญญาณ C23 ยังแสดงท่าห้าม เพราะยังไม่ได้ให้ทางกับขบวนที่วิ่งตามมา แต่ป้ายบอกว่า ข.6460 ซึ่งได้รับอนุญาตให้ใช้ทางข้างหลังแล้วแสดงขึ้น



รูปที่ 2.21 ตัวอย่างเมื่อขบวนรถเคลื่อนไปภาพที่ 4

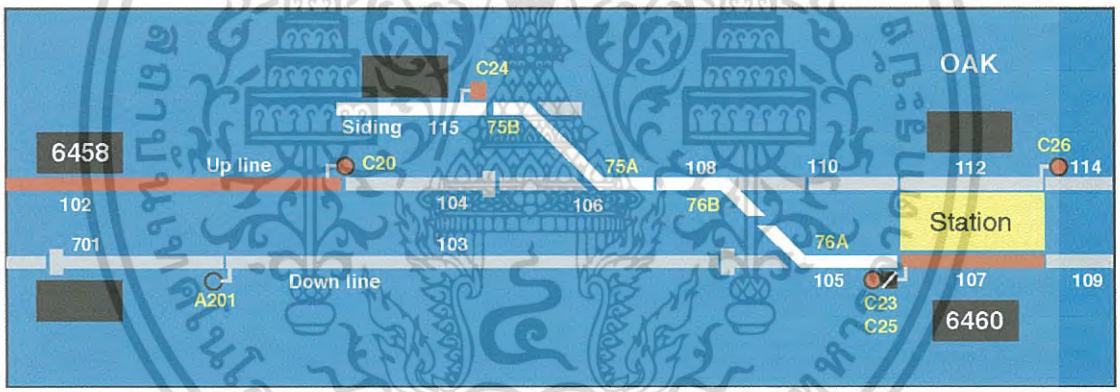
จากรูปที่ 2.21 ข.7752 พ้นไฟตอน 103 ไปแล้ว แถบสีของ 103 เปลี่ยนเป็นสีเทา ข.6460 ซึ่งสุดปลายทางที่ ส.โอค เข้ามาอยู่บนไฟตอน 107 และจะต้องเข้ารางแยกเมื่อส่งผู้โดยสารแล้ว ในขณะที่ ข.6458 ในทางขึ้น ซึ่งมาสายและกำลังจะเข้าสถานีโอค พนักงานสัญญาณต้องตัดสินใจว่าจะกัก ข.6458 ไว้ก่อน ซึ่งจะทำให้ขบวนรถช้าเพิ่ม หรือจะรีบนำ ข.6460 เข้ารางหลีกเพื่อเตรียมตั้งขบวนใหม่ มิฉะนั้นขบวนรถต่อไปที่ใช้รถของ ข.6460 อาจจะเป็นรถช้าขึ้นอีกขบวนหนึ่งตั้งแต่ออกจากต้นทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 ตัวอย่างเมื่อขบวนรถเคลื่อนไปภาพที่ 5

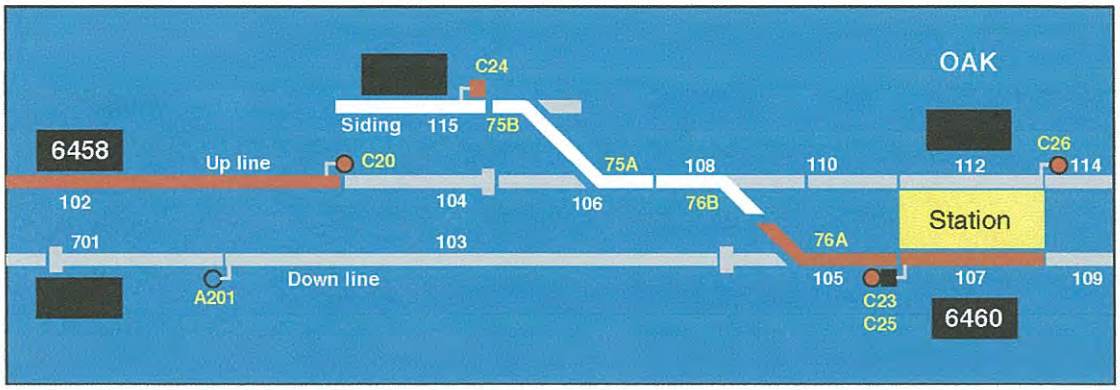
จากรูปที่ 2.22 พนักงานควบคุมการเดินรถตัดสินใจนำ ข.6460 เข้าทางแยกก่อนที่จะปล่อย ข. 6458 เข้ามายังสถานี ซึ่งสามารถทำได้โดยเตรียมทางเข้าทางแยก ตั้งท่าประแจทุกตัวให้ถูก และบังคับนิ่ง ตั้งสัญญาณ C25 เป็นท่าสับเปลี่ยน ซึ่งคนขับ ข.6460 จะสังเกตได้จากสีขาวทแยงมุมใต้ C23 ทางที่ให้กับ ข.6460 คือแถบสีขาว



รูปที่ 2.23 ตัวอย่างเมื่อขบวนรถเคลื่อนไปภาพที่ 6

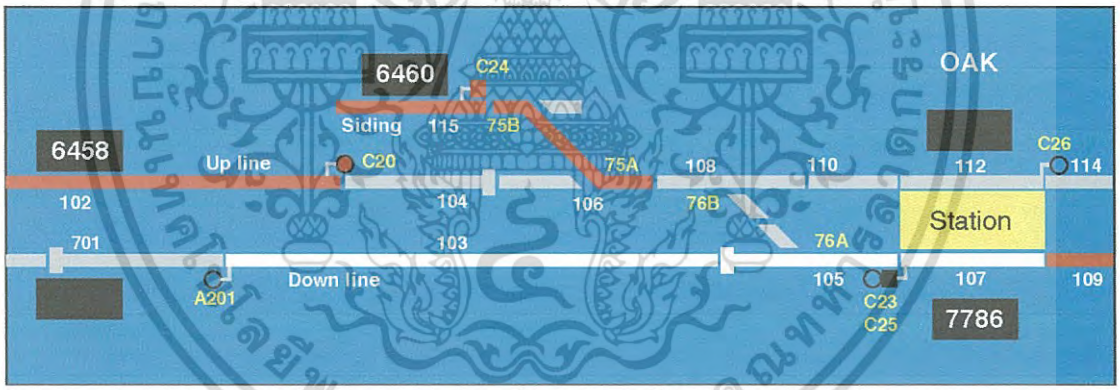
จากรูปที่ 2.23 เมื่อให้ทางไปแล้วหลายนาที ข.6460 ก็ยังไม่เคลื่อน ในขณะที่ ข.6458 ซึ่งช้ามาเดิม มารออยู่ที่สัญญาณ C20 และการ ข.6460 ยังไม่เคลื่อนจากชานชาลา ข.6458 ก็อาจช้าเพิ่ม ในกรณีนี้ พนักงานสัญญาณอาจจะยกเลิกการให้ทางแก่ ข.6460 แต่ถ้าตัดสินใจยกเลิกการให้ทางจะต้องรออีกประมาณ 2 นาที จึงจะสามารถให้ทาง ข.6458 ได้ เวลา 2 นาทีถูกกำหนดโดยอุปกรณ์จับเวลา เพื่อป้องกันคนขับของ ข.6460 ฝ่าสัญญาณเขียวที่เปลี่ยนเป็นแดงอย่างกระทันหันออกไปเหยียบไฟตอนข้างหน้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 ตัวอย่างเมื่อขบวนรถเคลื่อนไปภาพที่ 7

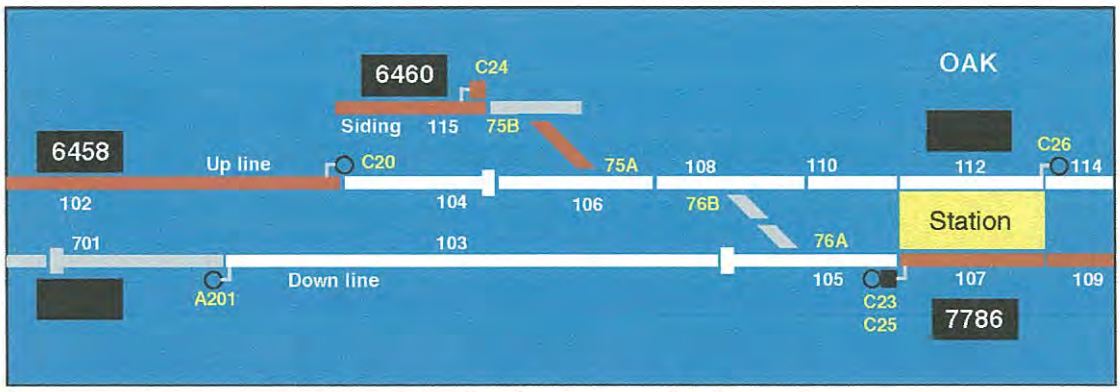
จากรูป 2.24 พนักงานสัญญาณไม่เปลี่ยนใจ และ ข.6460 ได้เคลื่อนออกจากชานชาลาและเหยียบไฟตอน 105 จะเห็นว่าวงจรไฟตอนถูกบังคับโดยท่าของลิ้นประแจไม่ให้แสดงท่าวิ่งตรงไปข้างหน้า (Track Locked) ดังกล่าวแล้วว่า แม้ลิ้นประแจ 76A จะมีวงจรไฟตอนแยกกัน แต่ลิ้นประแจจะทำงานไปด้วยกัน วงจรไฟตอนที่แยกเป็นอิสระก็เพื่ออนุญาตให้ พนักงานสัญญาณให้ทางแก่ขบวนรถขึ้นและล่องพร้อมกันได้



รูปที่ 2.25 ตัวอย่างเมื่อขบวนรถเคลื่อนไปภาพที่ 8

จากรูป 2.25 ข.6460 วิ่งพ้นไฟตอน 105 และ 108 พนักงานสัญญาณสามารถให้ทางแก่ ข.7786 ซึ่งแสดงโดยแถบสีขาว สัญญาณ C23 แสดงท่าอนุญาต ในขณะที่ ข.7786 เหยียบไฟตอน 109 และได้รับทางสะดวกตลอดไปจนถึง 701 แต่เลยจากนั้นไปจะเป็นสีเทา เพราะทางอยู่นอกเขตรับผิดชอบ พนักงานสัญญาณของสถานีโอค เมื่อ ข.6460 พ้นประแจ 75 แล้ว พนักงานสัญญาณก็สามารถให้ทางแก่ ข.6458 ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 ตัวอย่างเมื่อขบวนรถเคลื่อนไปภาพที่ 9

จากรูป 2.26 หลังจาก ข.6460 พ้นประแจแล้ว พนักงานสัญญาณจะให้ทางแก่ ข.6458 โดยเปลี่ยนสัญญาณ C20 และ C26 เป็นท่าอนุญาต ซึ่งจะทำให้ ข.6458 ได้ทางตลอดโดยไม่ต้องหยุดที่สถานี ในขณะที่ ข.7786 เหยียบไฟตอน 107 และเข้ามาอยู่ที่ชานชาลาขาล่อง และพนักงานสัญญาณก็ได้ทำการให้ทางแก่ ข.7786 แล้ว

2.9 ระบบอาณัติสัญญาณสมัยใหม่

2.9.1 Automatic Train Control (ATC)

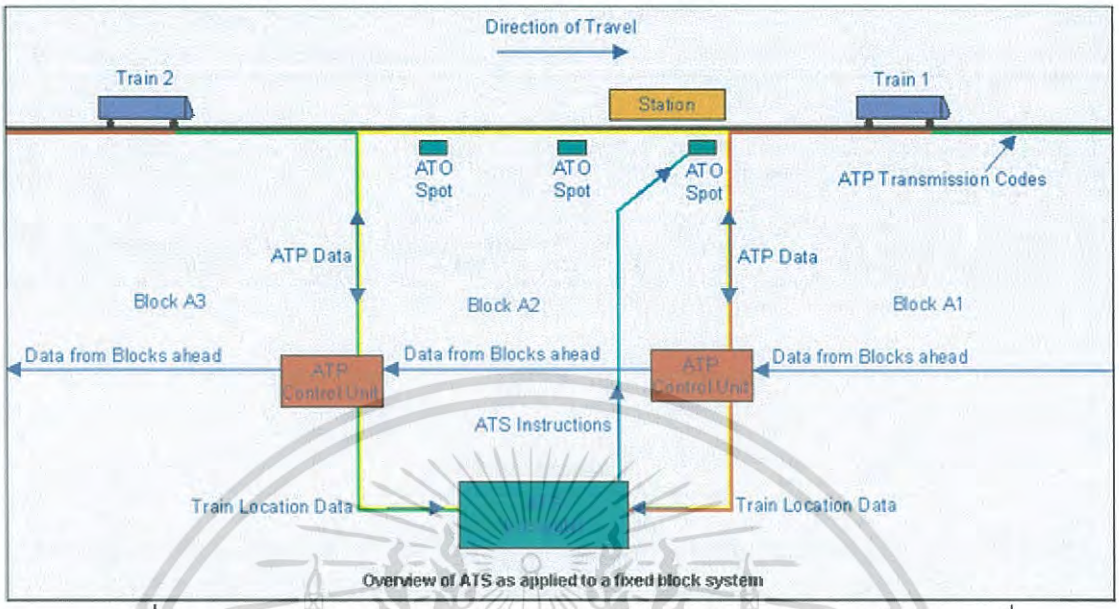
เมื่อเทคโนโลยีควบคุมการเดินรถในหน้างานพัฒนาถึงขั้นที่สามารถป้องกันขบวนรถชนท้ายกันได้แล้ว วิวัฒนาการของระบบควบคุมการเดินรถจึงพัฒนาสูงขึ้นอีกขั้นหนึ่ง นั่นก็คือระบบควบคุมขบวนรถอัตโนมัติ (Automatic Train Control: ATC) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีสำหรับควบคุมการเดินขบวนรถไฟขนส่งมวลชนและรถไฟความเร็วสูงสมัยใหม่ อันที่จริง คำว่า ATC นั้นได้มีการใช้งานมานานแล้วแต่ในความหมายที่แตกต่างกัน เช่น ในประเทศอังกฤษ หมายถึง ระบบควบคุมการเดินขบวนรถอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นเพื่อใช้เตือนคนขับรถไฟ แต่ในอเมริกาจะหมายถึงแนวคิดในการควบคุมการเดินขบวนรถไฟสมัยใหม่ (ส่วนมากใช้กับระบบขนส่งมวลชน) ซึ่งจะหมายความรวมถึงกลุ่มอุปกรณ์สามกลุ่ม คือ

- กลุ่มระบบป้องกันขบวนรถอัตโนมัติ (Automatic Train Protection: ATP)
- กลุ่มระบบการเดินขบวนรถอัตโนมัติ (Automatic Train Operation: ATO)
- กลุ่มระบบบริหารการเดินรถอัตโนมัติ (Automatic Train Supervision: ATS)

จากรูปที่ 2.27 จะสังเกตได้ว่า ATP เป็นตัวที่ทำหน้าที่ควบคุมความปลอดภัยการเดินรถในเบื้องต้น คือทำการจัดระยะห่างที่ปลอดภัยระหว่างรถที่เดินอยู่บนทางรถไฟเดียวกัน โดยจะมีมีศูนย์ควบคุมการเดินรถประจำในแต่ละพื้นที่ซึ่งคอยควบคุมแต่ละตอนสัญญาณในพื้นที่ควบคุม ศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมการเดินรถจะได้รับข้อมูลจากตอนสัญญาณข้างหน้ามาคำนวณพิกัดความเร็วของขบวนรถที่อยู่บนตอนสัญญาณที่ควบคุม แล้วส่งรหัสพิกัดความเร็วให้กับขบวนรถที่วิ่งผ่าน



รูปที่ 2.27 ภาพรวมการทำงานของระบบ ATS ในการเดินรถแบบตอนสัญญาณคงที่

ศูนย์ควบคุมในระบบ ATP โดยปกติจะรับรู้แค่มีรถเดินอยู่ในตอนสัญญาณด้วยพิกัดความเร็วใด ๆ เท่านั้น แต่ศูนย์ควบคุม ATP ในระบบ ATC จะทำหน้าที่ส่งข้อมูลให้กับคอมพิวเตอร์ในระบบ ATS เพื่อเปรียบเทียบว่าขบวนรถวิ่งช้ากว่าหรือเร็วกว่ากำหนดเวลาด้วย ซึ่งในกรณีนี้ ATS จะส่งคำสั่งไปยัง ATO ตามรายทางเพื่อปรับแต่งการเดินรถให้เป็นไปตามตารางเวลา โดยจุดรับส่งสัญญาณของระบบ ATO จะรับคำสั่งจากระบบ ATS เพื่อกำหนดว่าขบวนรถควรจะใช้เวลาหยุดที่สถานีข้างหน้านานเท่าใดและควรจะใช้ความเร็วเท่าใดเดินทางไปยังสถานีต่อไปจึงจะสามารถรักษากำหนดเวลาเดินรถได้ ตัวระบบ ATO นั้น จะทำงานโดยอัตโนมัติเพื่อควบคุมให้การเดินรถตรงเวลา (เพิ่มความเร็วกรณีรถช้า ลดความเร็วกรณีก่อนเวลา) โดยจะมีระบบ ATP ควบคุมอยู่อีกชั้นหนึ่ง เพื่อรักษาระดับความปลอดภัย ในการเดินรถ ATP จะรับข้อมูลจากระบบ ATS และส่งข้อมูลไปยังระบบการส่งรหัสพิกัดความเร็วบนทางรถไฟเพื่อจำกัดความเร็วหรือหยุดขบวนรถหากจำเป็น ขบวนรถจะรับคาสั่งจากระบบ ATP และระบบ ATO โดยเสาอากาศรับสัญญาณบนขบวนรถ แล้วแปลงคำสั่งเพื่อส่งต่อไปยังระบบขับเคลื่อนและระบบเบรก ในกรณีที่ขบวนรถถูกเปลี่ยนมาควบคุมโดยใช้คนขับ ระบบ ATP จะยังคงทางานอยู่ตามปกติเพื่อรักษาระดับความปลอดภัยในการเดินรถ แต่ระบบ ATO จะไม่ทำงาน พนักงานขับรถจะต้องหยุดขบวนรถโดยการควบคุมจากห้องคนขับด้วยตนเอง

2.9.2 European Rail Traffic Management System (ERTMS)

ERTMS เป็นหลักการของระบบอาณัติสัญญาณและการควบคุมการเดินรถยุคใหม่ ซึ่งรวมถึงระบบป้องกันรถไฟขั้นสูง ด้วยการใช้การตรวจติดตามความเร็วและการเบรกของรถไฟ โดยรถไฟจะใช้ข้อมูลจำพวกค่าความชันของเส้นทาง ท่าสัญญาณ สมรรถนะกำลังเบรก เป็นต้น ในการคำนวณกรอบ

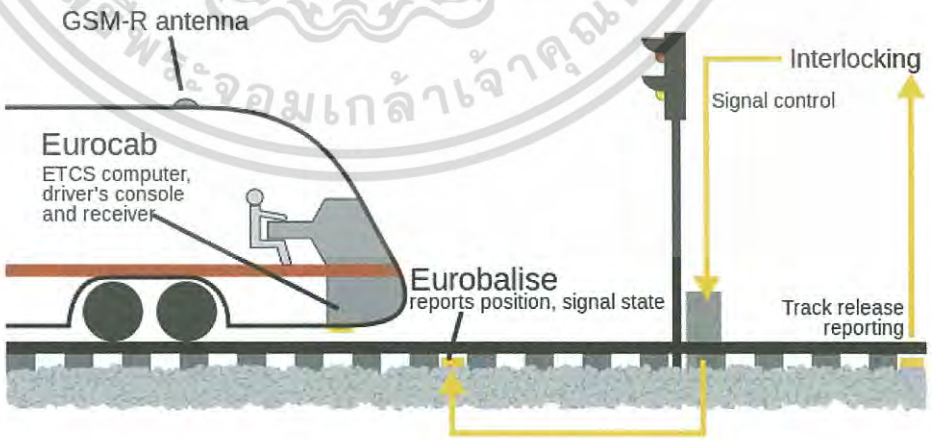
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิกัดความเร็วที่สามารถเดินรถได้อย่างปลอดภัยสำหรับช่วงของเส้นทางที่กำลังพิจารณา โดยระบบจะแทรกแซงการทำงานถ้าพบว่ารถไฟมีความเร็วเกินขีดจำกัด เพื่อทำให้รถไฟลดความเร็วลงให้อยู่ภายในกรอบที่กำหนด และระบบจะสั่งหยุดรถไฟอย่างปลอดภัย ถ้าพบท่าสัญญาณเป็นท่าห้าม (Signal at Danger/ Red Aspect) นอกจากนี้ ERTMS ยังกำเนิดขึ้นมาจากความต้องการที่จะทำให้ระบบนี้เป็นระบบควบคุมรถไฟที่เป็นมาตรฐานกลางสำหรับใช้ร่วมกัน (Common Train Control Standard) ทั่วทั้งยุโรป เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการเดินรถ ตลอดจนเสริมสร้างอรรถประโยชน์ด้านความปลอดภัย และเกิดการบูรณาการการใช้งานระบบร่วมกัน (Interoperability)

2.9.3 European Train Control System (ETCS)

ETCS เป็นโครงการย่อยในกรอบของ ERTMS ซึ่ง ETCS นี้เป็นฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่ถูกออกแบบและพัฒนาเพื่อให้เป็นตัวกลางการแปลสัญญาณและกลายมาเป็นระบบปฏิบัติการเดินรถ โดย ETCS นั้นสามารถแบ่งโดยสังเขปได้เป็น 4 ระดับ ซึ่งจะส่งผลต่อความจุและประสิทธิภาพในการเดินรถของเส้นทาง คือ

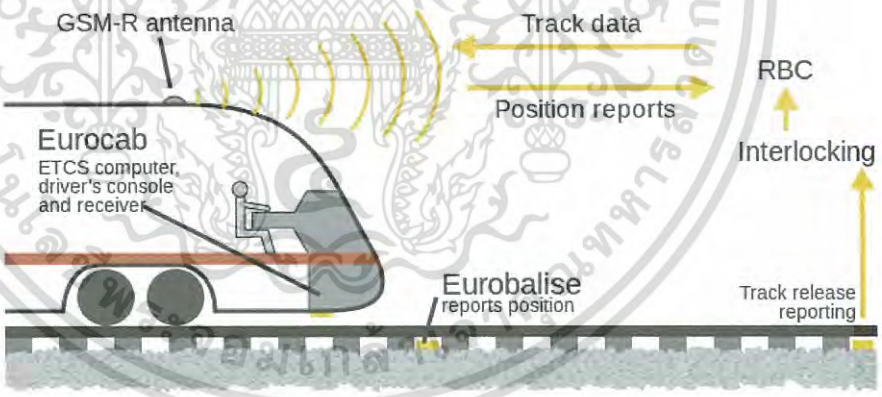
- ETCS Level 0 คือระดับที่ยังมีการควบคุมรถด้วยสัญญาณประจำที่ข้างทาง แต่มีการนำสัญญาณประจำทางขึ้นไปแสดงที่ห้องคนขับ (Cab Signal)
- ETCS Level 1 เป็นระบบที่ใช้สัญญาณประจำที่ร่วมกับสัญญาณแสดงที่ห้องขับเพื่อทำงานร่วมกับระบบควบคุมความเร็วและหยุดขบวนรถโดยอัตโนมัติ (ATP) และการควบคุมถูกยกระดับขึ้นอีกระดับหนึ่ง โดยมีสัญญาณควบคุมความเร็วแสดงที่ห้องขับ และพนักงานจะต้องปฏิบัติตามสัญญาณและพิกัดความเร็ว หากพนักงานขับรถฝ่าฝืนสัญญาณ เช่น ขับรถด้วยความเร็วเกินพิกัด หรือฝ่าสัญญาณในท่าห้าม ระบบจะทำการเบรกให้ขบวนรถลดความเร็วและหยุดโดยอัตโนมัติ ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 ETCS Level 1 ที่มา: wikipedia

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ETCS Level 2 มีการใช้ระบบวิทยุในการควบคุมการเดินรถ (Communication Based Train Control: CBTC) อย่างสมบูรณ์ทั้งระบบ ระบบสัญญาณและคำสั่งควบคุมการเดินรถจะปรากฏบนหน้าจอในห้องขับ ไม่มีสัญญาณประจำที่ข้างทาง สัญญาณแสดงตอนทางสะดวกถูกส่งจาก Clearing Control Register (CCR) บนทางรถไฟ ส่วนตำแหน่งและทิศทางการวิ่งของขบวนรถจะถูกส่งจาก Radio Block Control (RBC) ผ่าน GSM-R ขึ้นไปบนขบวนรถ การตรวจสอบขบวนรถแต่ละขบวนและการบอกตำแหน่งขบวนรถดาเนินการโดยใช้เซนเซอร์ (Sensor) อ่านรหัส จากบาลีสชนิด Inductance Loop จับตำแหน่งของขบวนรถและกำหนดทิศทางเมื่อวิ่งผ่านบาลีส 2 ตัว หรืออาจใช้วิธีอื่นซึ่งทำหน้าที่ด้วยวัตถุประสงค์เดียวกัน เช่น ใช้เครื่องนับเพลา หรือเรดาร์หรือเครื่องมืออื่นใด สำหรับยูโรบาลีสที่ยังติดตั้งไว้บนรางก็เพื่อใช้เป็นหลักไมล์ (Milestones) เพื่อใช้ปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนจากการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์บนขบวนรถ และระบบสัญญาณบนห้องขับจะทำงานร่วมกับ ATP ในการรับส่งข้อมูลคำสั่งควบคุม ซึ่งเกิดจากการสื่อสารระหว่างยูโรบาลีสกับระบบควบคุมบนรถจักร (Track and Train) โดยมีระบบ GSM-R เป็นอุปกรณ์สื่อสารเสริมด้วย ข้อมูลและพิกัดความเร็วสูงสุดที่ขบวนรถได้รับอนุญาตให้วิ่งได้ จะถูกตรวจสอบตลอดเวลาด้วยคอมพิวเตอร์บนขบวนรถ ดังรูปที่ 2.29

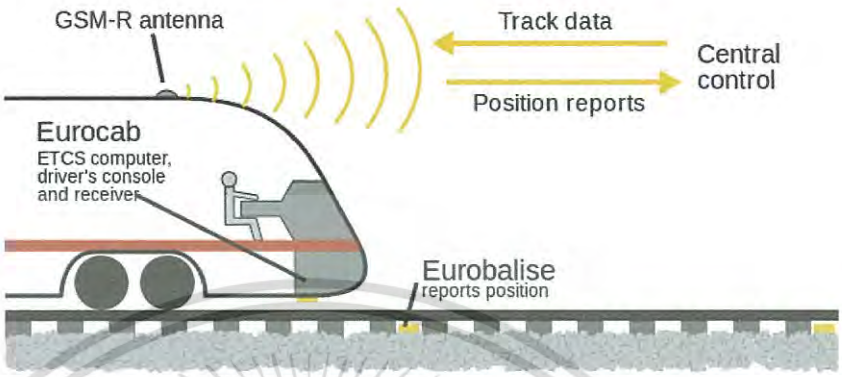


รูปที่ 2.29 ETCS Level 2 ที่มา: wikipedia

- ETCS Level 3 มีการใช้งานการสื่อสารวิทยุแบบเต็มรูปแบบเหมือน Level 2 แต่จะต่างกันที่ Level 3 นี้ ใช้ยูโรบาลีสเป็นตัวกำหนดตำแหน่งไม่มีการส่งสัญญาณควบคุมระหว่างทางกับขบวนรถ ไม่มีอุปกรณ์แบ่งช่วงสัญญาณบนทางรถไฟ รถแต่ละขบวนระบุตำแหน่งและปรับแก้ความคลาดเคลื่อนโดยอาศัยยูโรบาลีส แล้วส่งข้อมูลตำแหน่งของตนเองไปที่ RCC ตลอดเวลาซึ่ง RCC ก็จะทราบจุดที่ขบวนรถข้างหน้าผ่านไปแล้วและจะอนุญาตให้ขบวนรถที่ตามมาได้ทางสะดวกตามเงื่อนไขของระบบได้ ด้วยวิธีการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนี้ ตอนสัญญาณก็จะแปรเปลี่ยนไปตลอดเวลา ดังนั้น Level 3 ก็คือระบบตอนสัญญาณไม่คงที่ (Movable block) นั่นเอง อย่างไรก็ดี ระบบนี้ยังเป็นแนวคิดที่อยู่ระหว่างการวิจัยและพัฒนาเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.30



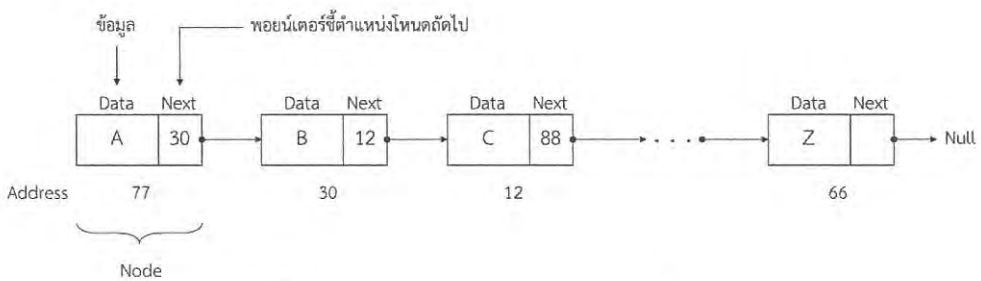
รูปที่ 2.30 ETCS Level 3 ที่มา: wikipedia

2.10 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับการพัฒนาซอฟต์แวร์ในการจำลองระบบควบคุม

ในการพัฒนาซอฟต์แวร์หลักที่ทำหน้าที่เสมอศูนย์ควบคุมกลางของระบบจำลองการเดินรถนี้ ได้นำโครงสร้างข้อมูลแบบลิงค์ลิสต์ (Linked List) มาใช้สำหรับเก็บข้อมูลภายในเส้นทางการเดินรถ และมีการนำคิว (Queue) มาใช้สำหรับจัดการข้อมูลตอนทางที่รถไฟได้ใช้งานอยู่ ซึ่งจะอธิบายการออกแบบในบทที่ 3 นอกจากนี้มีการนำการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุมาประยุกต์ใช้ เพื่อให้โปรแกรมสามารถพัฒนาต่อยอดได้ง่ายยิ่งขึ้น

2.10.1 Linked List

Linked List เป็นโครงสร้างข้อมูลที่จัดเก็บข้อมูลด้วยโหนด (Node) ต่อเนื่องกัน โดยแต่ละโหนดจะถูกระบุตำแหน่งบนหน่วยความจำ (Address) เพื่อใช้อ้างอิงหรือเข้าถึงได้ ภายในโหนดจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือส่วนที่จัดเก็บข้อมูล (Data) และส่วนที่จัดเก็บพอยน์เตอร์ (Pointer) เพื่อใช้เก็บค่าอ้างอิงไปยังแอดเดรสของโหนดถัดไป และถ้าไม่มีโหนดต่อไปให้อ้างอิง ค่าของพอยน์เตอร์นี้จะเป็นค่า Null นั่นเอง ดังตัวอย่างรูปที่ 2.31

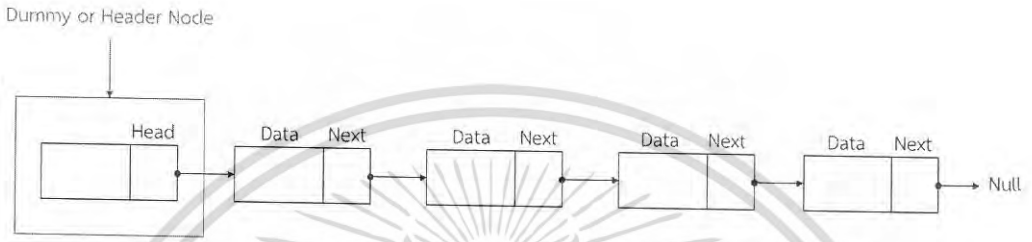


รูปที่ 2.31 ตัวอย่าง Linked List แบบพื้นฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

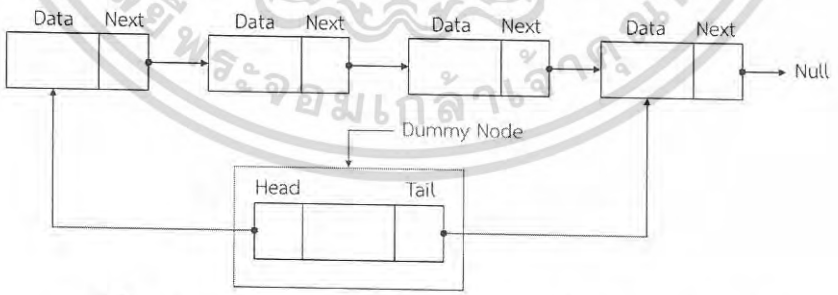
โดยทั่วไป ภายในโครงสร้างของ Linked List จะมีโหนด Dummy (หรือโหนด Sentinel) เป็นโหนดพิเศษที่ไม่ได้ทำหน้าที่เก็บข้อมูล แต่จะทำหน้าที่ชี้ตำแหน่งโหนดแรก (และโหนดสุดท้าย) ของ Linked List โดยโหนด Dummy แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. โหนด Dummy ที่มีหนึ่งพอยน์เตอร์ ซึ่งจะทำหน้าที่เก็บพอยน์เตอร์ Head เพียงตัวเดียว สำหรับชี้ไปยังโหนดแรกของ Linked List ดังรูปที่ 2.32 จึงทำให้บางครั้งเรียกโหนดดังกล่าวว่า Header Node



รูปที่ 2.32 Linked List ที่ใช้โหนด Dummy ที่มีหนึ่งพอยน์เตอร์

2. โหนด Dummy ที่มีสองพอยน์เตอร์ จะเก็บพอยน์เตอร์ Head และ Tail โดยพอยน์เตอร์ Head ทำหน้าที่ชี้ไปยังโหนดแรกของ Linked List และพอยน์เตอร์ Tail ทำหน้าที่ชี้ไปยังโหนดสุดท้ายของ Linked List ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.33 ข้อดีของโหนด Dummy รูปแบบนี้ คือ สามารถทราบโหนดสุดท้ายของ Linked List ได้ทันที โดยไม่ต้องเสียเวลาค้นหาโหนดภายในโครงสร้าง Linked List ทั้งหมด เนื่องจากมีพอยน์เตอร์ Tail ชี้อยู่ จึงทำให้นำมาช่วยดำเนินการกับข้อมูลภายใน Linked List เช่น การเพิ่มและการลบโหนดสุดท้ายสามารถทำได้ง่ายขึ้น

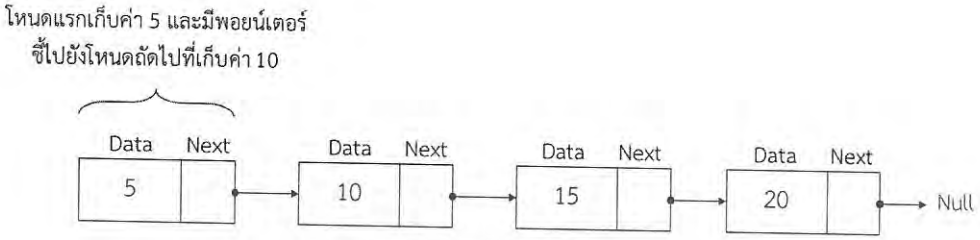


รูปที่ 2.33 Linked List ที่ใช้โหนด Dummy ที่มีสองพอยน์เตอร์

โดย Linked List สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

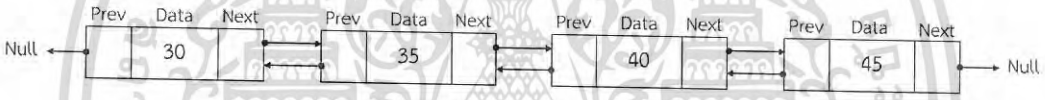
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. Singly Linked List เป็น Linked List ที่มีทิศทางเดียว โดยแต่ละโหนดจะมีพอยน์เตอร์เพียงตัวเดียว ซึ่งใช้สำหรับชี้ไปยังโหนดต่อไป สามารถชี้ตำแหน่งของข้อมูลตัวถัดไปได้เพียงตัวเดียวเท่านั้น ดังโครงสร้างในรูปที่ 2.34



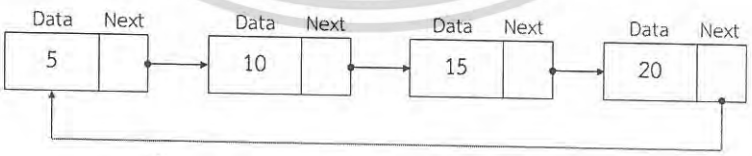
รูปที่ 2.34 ตัวอย่าง Singly Linked List

2. Doubly Linked List เป็น Linked List ที่มีสองทิศทาง เนื่องจากแต่ละโหนดจะมีพอยน์เตอร์สองตัว สำหรับชี้ตำแหน่งโหนดถัดไปหนึ่งตัว และชี้ตำแหน่งโหนดก่อนหน้าอีกหนึ่งตัว ดังรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.35 ตัวอย่าง Doubly Linked List

3. Circular Linked List เป็น Linked List ที่มีการเชื่อมโยงเป็นวงกลม ซึ่งแบ่งย่อยได้อีกเป็น 2 ประเภท คือ Singly Circular Linked List และ Doubly Circular Linked List โดย Singly Circular Linked List นั้น จะมีลักษณะคล้ายกับ Singly Linked List แต่จะยอมให้พอยน์เตอร์ของโหนดตัวสุดท้าย ที่ปกติจะเก็บค่าเป็น Null นี้ โยงไปยังโหนดแรกแทน ดังรูปที่ 2.36

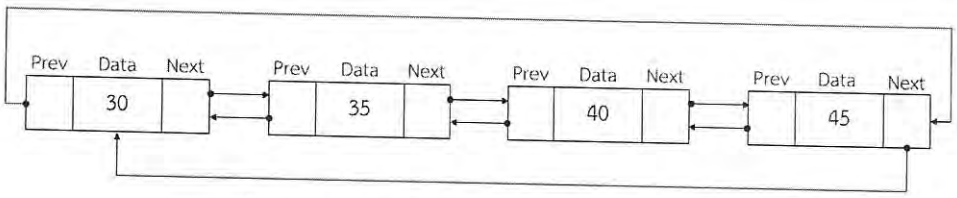


รูปที่ 2.36 ตัวอย่าง Singly Circular Linked List

ส่วน Doubly Circular Linked List จะมีลักษณะคล้าย Doubly Linked List แต่จะยอมให้พอยน์เตอร์ที่ชี้ไปโหนดถัดไปของตัวสุดท้าย ชี้วนกลับมาจะโหนดแรกสุด และพอยน์เตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

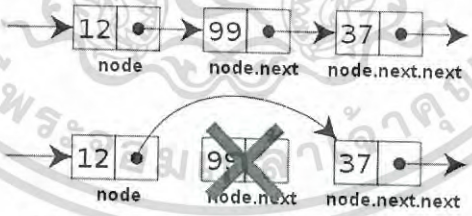
ที่ชี้โหนดก่อนหน้าของโหนดแรกสุด ก็ชี้ไปโหนดสุดท้าย แทนที่จะเป็น Null ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.37 ตัวอย่าง Doubly Circular Linked List

ซึ่งข้อดีในการใช้ Linked List ก็คือ ไม่ต้องจองพื้นที่ในหน่วยความจำก่อนการทำงาน จึงทำให้สามารถจัดเก็บข้อมูลได้ยืดหยุ่นกว่า ง่ายต่อการจัดเก็บข้อมูล เช่น การเพิ่มและลบโหนดใน Linked List ก็เพียงแค่สร้างโหนดขึ้นใหม่ หรือลบโหนดนั้นทิ้ง และเปลี่ยนตำแหน่งชี้ของโหนดก่อนหน้า (และโหนดที่เพิ่มใหม่) ให้ถูกต้องเท่านั้น ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.38 และ 2.39 แต่ Linked List ก็มีข้อเสียเช่นกัน คือ การค้นหาและการเข้าถึงข้อมูล อาจใช้เวลามากกว่าการเข้าถึงกับข้อมูลแบบ Array เนื่องจากจะต้องท่องตามโหนดไปเรื่อย ๆ ไม่สามารถระบุเป็น Index และเข้าถึงตัวข้อมูลได้โดยตรง

รูปที่ 2.38 การเพิ่มโหนดลงใน Linked List

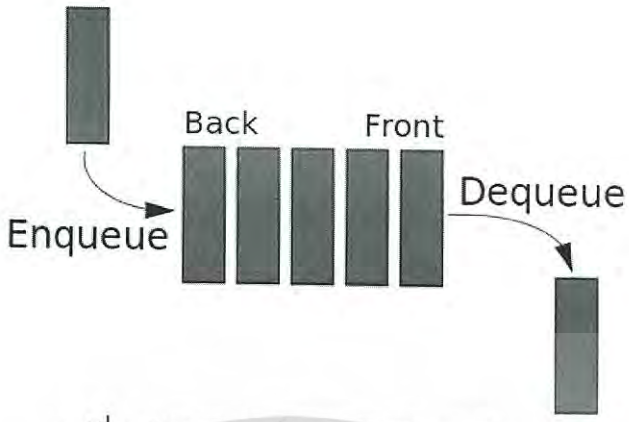


รูปที่ 2.39 การลบโหนดออกจาก Linked List

2.10.2 Queue

Queue [15] เป็นโครงสร้างที่จัดเก็บข้อมูลต่อเนื่องกัน ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการเข้าแถวเพื่อรอรับบริการต่าง ๆ ดังนั้นการนำข้อมูลเข้าคิว หรือที่เรียกว่า Enqueue จะกระทำที่ท้ายคิว และการนำข้อมูลออกจากคิว หรือเรียกว่า Dequeue จะกระทำที่หน้าคิว โดยการกระทำแบบนี้จะเรียกว่ามีลักษณะเป็น First In, First Out (FIFO) ดังรูปที่ 2.40 โดยส่วนมากจะมีคำสั่ง Peek หรือ Front ให้ใช้งานด้วย เพื่อเป็นการขอดูข้อมูลตัวแรกสุดโดยที่ไม่ต้องทำการ Dequeue ออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.40 การกระทำแบบ FIFO ของ Queue

โดยการที่จะนำ FIFO คิวมาประยุกต์ใช้นั้น สามารถทำได้หลายแบบ ซึ่งโดยปกติก็จะใช้กับโครงสร้างที่สามารถทำ Enqueue หรือ Dequeue ได้ด้วย O(1) เช่น การใช้ Linked List ประเภทที่สามารถเข้าถึงหัวและท้ายของลิสต์ได้ด้วย O(1) หรือก็คือเข้าถึงหัวและท้ายได้โดยตรง โดยไม่ต้องทำการวนลูปหาจุดท้ายสุดของลิสต์นั่นเอง หรือใช้เป็นโครงสร้างเฉพาะที่ชื่อ deque (Double-Ended Queue) [9] ที่ทำการปรับปรุงมาจากอาร์เรย์แบบไดนามิก (Dynamic Array) ซึ่งถูกสร้างขึ้นมาเพื่อกระทำการแบบคิวโดยเฉพาะ โดย deque นี้จะสามารถเพิ่มหรือลบอิลิเมนท์ (Element) ที่หัวหรือท้ายของคิวก็ได้ ซึ่ง deque นี้มักจะถูกเรียกว่า Head-Tail Linked List

2.10.3 Object-Oriented Programming

OOP (Object-Oriented Programming) เป็นวิธีการเขียนโปรแกรม โดยอาศัยแนวคิดของวัตถุชิ้นหนึ่ง มีความสามารถในการปกป้องข้อมูล และการสืบทอดคุณสมบัติ ซึ่งทำให้แนวโน้มของ OOP ได้รับการยอมรับและพัฒนามาใช้ในระบบต่าง ๆ มากมาย

แนวความคิดดั้งเดิมของการเขียนโปรแกรมก็คือ การแก้ปัญหาโดยใช้คอมพิวเตอร์เป็นเครื่องมือคล้ายกับการใช้เครื่องคิดเลขในการแก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ แต่แนวความคิดแบบใหม่ในการเขียนโปรแกรม กลับเน้นถึงปัญหาและองค์ประกอบของปัญหาเพื่อจะนำมาสู่การแก้ปัญหา โดยการเน้นที่ปัญหาและองค์ประกอบของปัญหา (Problem Space) จะคล้ายกับแก้ไขปัญหาและชีวิตความเป็นอยู่ของมนุษย์ที่จะต้องมี คน สัตว์ สิ่งของ เพื่อแก้ปัญหา (มีหน้าที่แก้ปัญหา) มากกว่าจะมองที่วิธีการแก้ปัญหานั้น ๆ หรือขั้นตอนในการแก้ปัญหา (Solution Space) ซึ่งเป็นวิธีการเขียนโปรแกรมแบบเก่านั่นเอง

อาลัน เคย์ (Alan Kay) ได้เสนอกฎ 5 ข้อ ที่เป็นแนวทางของภาษาคอมพิวเตอร์เชิงวัตถุ หรือที่เรียกว่า Object-Oriented Programming (OOP) ไว้ดังนี้

1. ทุก ๆ สิ่ง เป็นวัตถุ (Everything is an Object)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. โปรแกรมก็คือ กลุ่มของวัตถุที่ส่งข่าวสารบอกกันและกันให้ทำงาน (A Program is a Bunch of Object Telling Each Other What to do by Sending Messages)
3. ในวัตถุแต่ละวัตถุจะต้องมีหน่วยความจำและประกอบไปด้วยวัตถุอื่น ๆ (Each Object has Its Own Memory Made Up of Other Objects)
4. วัตถุทุกชนิดจะต้องจัดอยู่ในประเภทใดประเภทหนึ่ง (Every Object has a Type)
5. วัตถุที่จัดอยู่ในประเภทเดียวกันย่อมได้รับข่าวสารเสมือนกัน (All Object of a Particular Type Can Receive the Same Messages)

ซึ่งแนวคิดแบบ OOP ก็คือ "ธรรมชาติของวัตถุ" หมายความว่า OOP จะมองสิ่งแต่ละสิ่งเป็นเป็น "วัตถุชิ้นหนึ่ง" (Object) ไม่ว่าวัตถุนั้นจะมีสีต่างกัน จะมีขนาดต่างกัน มันก็คือวัตถุชิ้นหนึ่งเหมือนกัน และเราสามารถกำหนดประเภทหรือคลาส (Class) ให้กลับวัตถุเหล่านั้นได้

นอกจากนี้ เมื่อ OOP มองทุกสิ่งถือเป็นวัตถุชิ้นหนึ่งแล้ว ยังสามารถคิดต่อไปอีกว่า "วัตถุแต่ละอย่างนั้น ต่างก็มีลักษณะและวิธีการใช้งานเป็นของตัวเอง" หมายความว่า วัตถุแต่ละชิ้นต่างก็มีรูปร่างลักษณะ และการใช้งานหรือการกระทำ ที่แตกต่างกันออกไป โดยจะเรียกคุณลักษณะของวัตถุว่า แอตทริบิวต์ (Attribute: Object Data) และจะเรียกการใช้งานวัตถุว่า เมธทอด (Method: Object Behavior)

โดยหลักการสำคัญของ OOP ก็คือ

- Data Hiding คือ ปกปิด Source Code ส่วนหนึ่งไว้ ไม่อนุญาตให้ผู้ที่ไม่เกี่ยวข้องเข้าถึงได้หรือเข้ามาแก้ไขข้อมูลได้โดยตรง
- Encapsulation หมายถึง การที่แอตทริบิวต์ต่าง ๆ ภายในคลาส จะไม่สามารถเข้าถึงได้จากภายนอกคลาส โดยการเปลี่ยนแปลงหรืออ่านค่าแอตทริบิวต์จะสามารถทำได้โดยผ่านเมธทอดภายในคลาสอีกทีหนึ่ง
- Inheritance & Reusable คือ การนำ Source Code ส่วนที่มีการใช้ซ้ำ ๆ กันกลับมาใช้ใหม่ โดยการนำกลับมาใช้ใหม่นั้น แบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ
    1. การสืบทอดจากคลาสหลัก (Inheritance) โดยจะมี คลาสแม่ (Superclass) และคลาสลูก (Subclass) ซึ่งคลาสลูกนั้นจะมีแอตทริบิวต์หรือเมท็อดเพิ่มเติมมากกว่าคลาสแม่ โดยสามารถเป็นได้ทั้ง Single Inheritance คือ คลาสลูกมีคลาสแม่เพียงคลาสเดียว และ Multiple Inheritance คือ คลาสลูกมีคลาสแม่หลายคลาส
    2. Composition คือ การนำคลาสที่มีอยู่เดิมมาเป็นแอตทริบิวต์ของคลาสใหม่
- Polymorphism [19] คือ การที่คลาสแม่มีเมท็อดที่ภายในว่างเปล่า (Abstract Class) และเมื่อคลาสลูกสืบทอดคุณสมบัติไป คลาสลูกได้มีการเพิ่มในส่วนของการกระทำการภายในเมท็อด โดยคลาสลูกสามารถมีได้หลายคลาส ซึ่งมีเมท็อดชื่อเดียวกัน แต่กระทำการต่างกันตามแต่คลาสลูกที่สร้างขึ้นใหม่เขียนไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

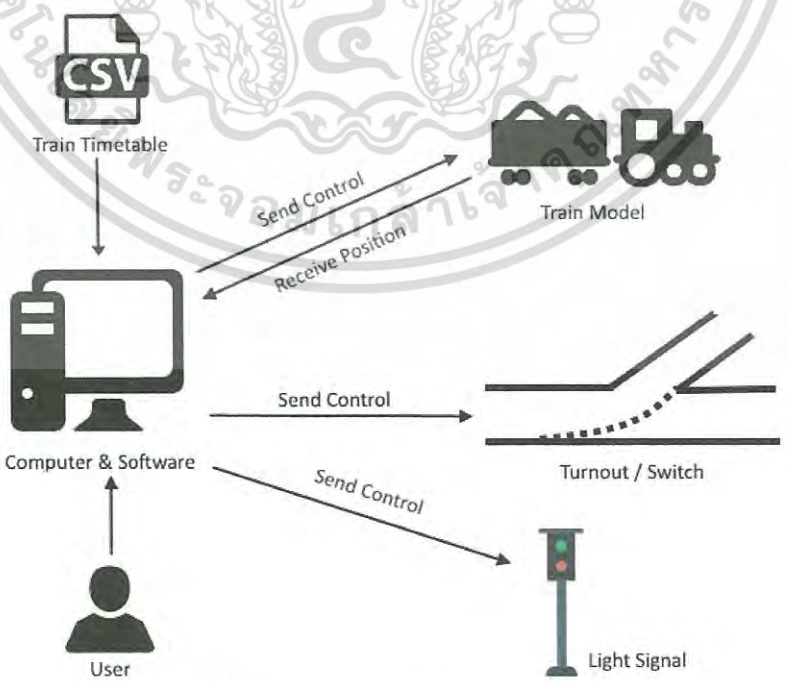
บทที่ 3
การออกแบบระบบ

3.1 บทนำ

ในหัวข้อการออกแบบระบบนี้ จะขอกล่าวถึงโครงสร้างภาพรวมของระบบ และรายละเอียดแต่ละส่วนของระบบที่ได้สร้างขึ้น ซึ่งประกอบด้วยหลักการทำงานของซอฟต์แวร์ประมวลผลหลักของระบบ รวมถึงการติดต่อสื่อสารระหว่างซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ เพื่อควบคุมรถไฟจำลอง ควบคุมทิศทางของประแจ ควบคุมท่าสัญญาณไฟสี และการรับค่าตำแหน่งรถไฟของระบบ

3.2 โครงสร้างภาพรวมการทำงานของระบบ

ภาพรวมของระบบจะประกอบไปด้วยส่วนของซอฟต์แวร์หลักทำรันบนเครื่องคอมพิวเตอร์ ไว้ใช้เป็นเหมือนศูนย์กลางการควบคุมหลัก คอยสั่งงานการเคลื่อนที่ของรถไฟจำลอง ทิศทางประแจในเส้นทาง ควบคุมสัญญาณไฟเขียวและแดงของเสาสัญญาณทุกต้น โดยจะต้องมีการรับข้อมูลตำแหน่งรถไฟเข้ามา รวมถึงข้อมูลเส้นทางการเดินรถของแต่ละขบวน และนำข้อมูลเหล่านั้นมาประมวลผลเพื่อทำการจองเส้นทางการเดินรถ เพื่อให้การเดินรถไฟจำลองนี้มีความปลอดภัยตามหลักการของระบบอาณัติสัญญาณรถไฟ ดังแสดงภาพรวมการทำงานของระบบได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ภาพรวมการทำงานของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

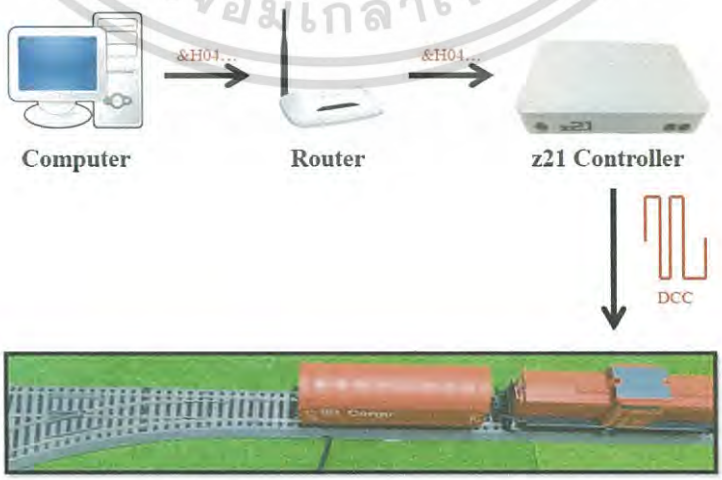
โดยรายละเอียดของแต่ละส่วนของระบบ ไม่ว่าจะเป็นการทำงานของซอฟต์แวร์ การสั่งงานอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในโมเดล และการรับค่าตำแหน่งรถไฟจำลองนั้น จะอธิบายรายละเอียดไว้ในหัวข้อย่อยถัดไป

3.3 การออกแบบการติดต่อระหว่างอุปกรณ์และซอฟต์แวร์

การทำระบบจำลองนี้จำเป็นจะต้องมีการติดต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ และตัวซอฟต์แวร์ที่ได้พัฒนาขึ้นมา โดยการเชื่อต่อนี้ หลัก ๆ แล้วจะแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะด้วยกัน คือการส่งคำสั่งให้กับ z21 Controller ซึ่งจะต้องใช้คำสั่งเฉพาะของ z21 หรือก็คือ Z21 LAN Protocol (ภาคผนวก ก.) การติดต่อรูปแบบที่สอง คือการส่งคำสั่งผ่าน Arduino (ภาคผนวก ข.) และรูปแบบสุดท้ายคือการรับค่าข้อมูลผ่าน XBee (ภาคผนวก ค.)

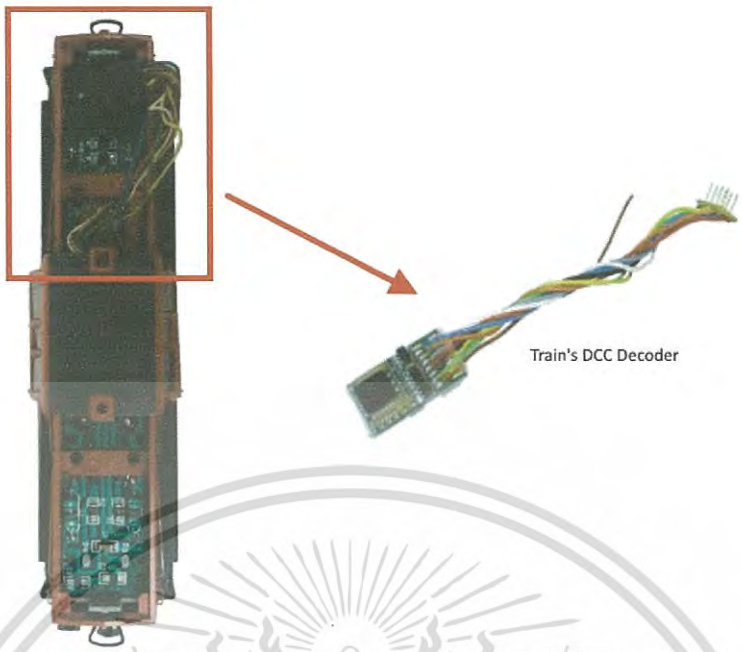
3.3.1 การควบคุมรถไฟจำลอง

ในการทำระบบจำลองนี้ ได้เลือกใช้ชุดโมเดลรถไฟจำลองของ Roco มาใช้ ซึ่งจะทำให้เราสามารถควบคุมการทำงานของรถไฟ ซึ่งก็คือการควบคุมทิศทางการเดินรถ การควบคุมความเร็วรถไฟ และการควบคุมไฟส่องสว่างของหัวขบวนรถไฟผ่านซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นได้ โดยคำสั่งควบคุมนั้น จะถูกส่งไปในรูปแบบของ UDP Packets ผ่านการเชื่อมต่อไร้สายเข้าสู่ Wifi Router ชุดคำสั่งนั้นจะถูกส่งผ่านไปยัง z21 Controller และสุดท้ายกล่องคอนโทรลเลอร์จะแปลงชุดคำสั่งให้เป็นสัญญาณไฟ DCC (Digital Command Control) ส่งผ่านสายเข้าสู่รางรถไฟจำลอง และสัญญาณไฟจากรางนี้จะผ่านเข้าสู่รถไฟทางล้อรถไฟซึ่งมีคุณสมบัตินำไฟฟ้า จากนั้นจะเข้าสู่แผงวงจรภายในขบวนรถ โดยที่ในหัวขบวนรถไฟนั้นจะมีตัวถอดรหัสสัญญาณ DCC อยู่ (DCC Decoder) เพื่อทำให้ตัวหัวขบวนรถไฟจำลองนี้รับรู้และทำตามคำสั่งที่ถูกส่งมา โดยการควบคุมโมเดลรถไฟนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 และตัวถอดรหัสภายในหัวขบวนรถสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 การควบคุมโมเดลรถไฟจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ตัวถอดรหัสภายในหัวขบวนรถไฟ (RC 10884)

โดยในส่วนของการส่งชุดคำสั่งภายในซอฟต์แวร์นั้น จะต้องเข้ารหัสคำสั่งในรูปแบบของ Z21 LAN Protocol ด้วยคำสั่ง LAN_X_SET_LOCO_DRIVE ดังเช่นฟังก์ชันควบคุมความเร็วในตัวอย่างโค้ดรูปที่ 3.4

```
Sub setLocoSpeed(ByVal speed As Integer, ByVal statusString As String, ByVal addr As Byte)
    Dim status As Byte
    If statusString = "forward" Then
        status = &H80
    Else
        status = &H0
    End If

    Dim statSp As Byte = status Or speed
    Dim checkBit As Byte = &HF7 Xor addr Xor statSp
    Dim getLocoDrive As Byte() = New Byte() {&HA, &H0, &H40, &H0, &HE4, &H13, &H0, addr, statSp, checkBit}

    Try
        source.Send(getLocoDrive, getLocoDrive.Length)
    Catch ex As Exception
        MessageBox.Show(ex.ToString())
    End Try
End Sub
```

รูปที่ 3.4 ตัวอย่างโค้ดสำหรับควบคุมทิศทางและความเร็วของรถไฟ

โดยค่าของ speed ในโค้ดนั้น จะเป็นค่า DCC Speed ซึ่งเป็นเพียงเลขจำนวนเต็มบวกเท่านั้น และการทำระบบจำลองนี้ ได้ใช้ DCC 128 steps หมายความว่าเราจะสามารถปรับความเร็ว DCC ได้ทั้งหมด 128 ขั้นความเร็ว กล่าวคือ ความเร็วเดินรถไปข้างหน้า 0 – 127 steps และความเร็วเดินรถถอยหลังอีก 0 – 127 steps โดยเมื่อทำการทดลองกับหัวขบวนรถไฟทั้งสองขบวนที่นำมาใช้ในการทดสอบระบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ เมื่อเราทำการปรับ DCC Speed ให้มีค่าเท่ากัน จะพบว่า

เอกสารนี้สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วจริง ๆ ที่รถแต่ละขบวนวิ่งได้นั้นไม่เท่ากัน แต่ยังคงมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงไปในทำนองเดียวกัน คือ เมื่อค่า DCC Step สูงขึ้นจะทำให้รถไฟวิ่งเร็วขึ้น ซึ่งอาจมีผลมาจากความแตกต่างกันของมอเตอร์ภายในหัวขบวนรถไฟ และน้ำหนักของขบวนรถไฟนั่นเอง

ดังนั้นเพื่อความสมบูรณ์ของระบบจำลองมากยิ่งขึ้น จึงได้ทำการทดสอบความเร็วของ DCC Speed ที่ Step 20, 30, 40, 50, 60, 70 และ 80 เนื่องจากที่ความเร็วต่ำกว่า 20 DCC Step นั้น รถไฟจะวิ่งช้าจนเกินไป ทำให้บางครั้งไม่สามารถวิ่งผ่านพื้นที่ที่ไม่สม่ำเสมอ หรือบริเวรที่มีประแจได้ และที่ความเร็วสูงกว่า 80 DCC Step รถไฟจะวิ่งเร็วเกินไปจนอาจทำให้ตกรางได้ในบางตำแหน่ง โดยเฉพาะตำแหน่งที่มีประแจ หรือตำแหน่งทางโค้ง จึงขอทำการทดสอบความเร็วในช่วงความเร็วที่ 20 – 80 DCC Step เท่านั้น

ผลการทดสอบความเร็วของรถไฟทั้งสองขบวนที่ใช้ทดลอง สามารถแสดงผลการใช้เวลาในการวิ่ง (วินาที) ต่อระยะทาง 100 เซนติเมตร ได้ดังตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2

ซึ่งสามารถหาเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่เฉลี่ยได้จากสมการที่ (3.1)

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + \ldots + t_n}{n} \tag{3.1}$$

โดยที่ t คือชุดข้อมูลผลการทดลอง $t = \{t_1, t_2, t_3, \ldots, t_n\}$ และสามารถนำค่าเวลาที่ใช้เฉลี่ยมาหาอัตราเร็วเฉลี่ยได้จากสมการ (3.2)

$$v = \frac{s}{t} \tag{3.2}$$

ตารางที่ 3.1 เวลาที่ใช้ในการวิ่งของรถไฟขบวนที่ 1 พร้อมชุดตัวพ่วง ในระยะทาง 100 เซนติเมตร

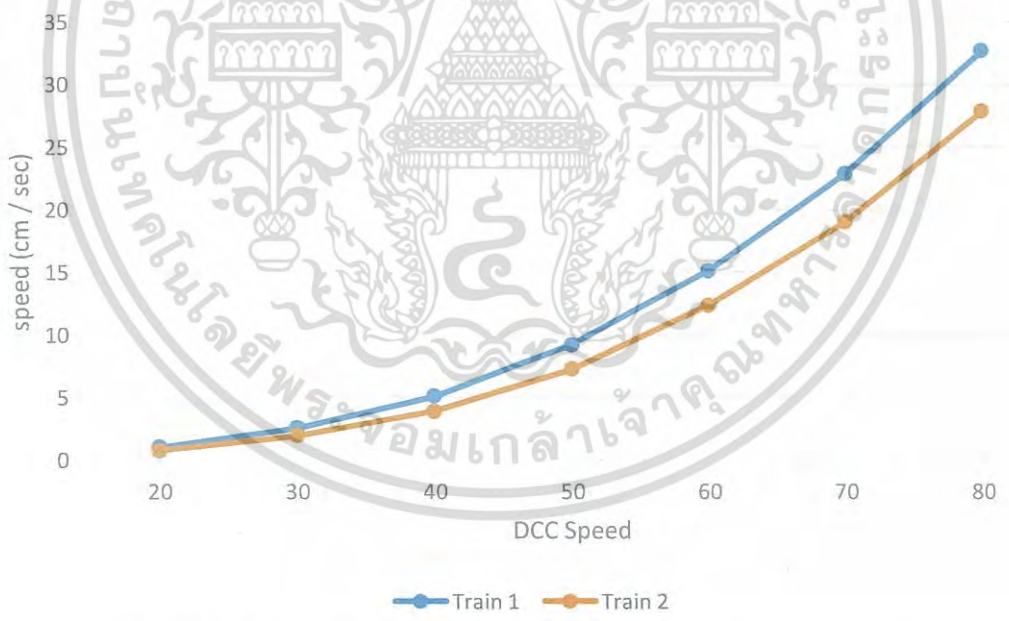
DCC Speed	เวลาที่ใช้ในการวิ่งระยะทาง 100 cm (sec)					อัตราเร็วเฉลี่ย: $\bar{v}$ (cm / sec)
	t_1	t_2	t_3	t_4	เฉลี่ย: $\bar{t}$	
20	99.89	95.77	99.03	94.42	97.42	1.03
30	40.06	38.33	40.02	38.03	39.11	2.56
40	20.29	18.95	20.13	19.00	19.59	5.10
50	11.25	10.48	11.06	10.55	10.84	9.23
60	6.66	6.63	6.70	6.50	6.62	15.11
70	4.63	4.28	4.37	4.22	4.38	22.83
80	3.11	3.02	3.11	2.99	3.06	32.68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 เวลาที่ใช้ในการวิ่งของรถไฟขบวนที่ 2 พร้อมชุดตัวพ่วง ในระยะทาง 100 เซนติเมตร

DCC Speed	เวลาที่ใช้ในการวิ่งระยะทาง 100 cm (sec)					อัตราเร็วเฉลี่ย: $\bar{v}$ (cm / sec)
	1	2	3	4	เฉลี่ย	
20	127.61	128.46	129.34	125.92	127.83	0.78
30	51.52	50.78	51.41	50.73	51.11	1.96
40	25.65	25.26	25.59	25.46	25.49	3.92
50	13.75	13.70	13.85	13.79	13.77	7.26
60	8.09	7.96	8.20	8.06	8.08	12.38
70	5.42	5.14	5.22	5.27	5.26	19.01
80	3.69	3.49	3.65	3.54	3.59	27.86

และจากตารางการทดลองหาความเร็วของรถไฟทั้งสองขบวนทางด้านบน สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง DCC Speed และอัตราเร็วเฉลี่ยของรถไฟทั้งสองขบวนที่นำมาทดลองกับระบบจำลองนี้ได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว (cm / sec) ต่อ DCC Speed

จากกราฟในรูปที่ 3.5 แสดงให้เห็นว่าค่า DCC Speed ที่เพิ่มขึ้นนั้น ส่งผลให้อัตราเร็วเพิ่มขึ้นแบบไม่เป็นสม่ำเสมอหรือไม่เป็นเส้นตรงนั่นเอง ซึ่งถ้านิยามให้

$$DCC(v_a) = \text{DCC Speed ณ อัตราเร็ว } v_a$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะสามารถหา DCC Speed ณ อัตราเร็วใด ๆ ได้ โดยอ้างอิงจากจุดสองจุดใกล้เคียงกันที่ได้ทำการบันทึกค่าทดลองไว้แล้ว

จุดอ้างอิง $A = \{v_a, v_b\}$

$$B = \{\{v_{DCC20}, v_{DCC30}\}, \{v_{DCC30}, v_{DCC40}\}, \{v_{DCC40}, v_{DCC50}\}, \ldots, \{v_{DCC70}, v_{DCC80}\}\}$$

และ $A \in B$

ค่า DCC Speed จากอัตราเร็วใด ๆ (v_x) สามารถหาได้โดยเริ่มจากการหาค่าความเร็วที่เปลี่ยนไปในแต่ละ DCC Speed Step ของช่วง $[v_a, v_b]$

$$stepLength = \frac{v_b - v_a}{DCC(v_b) - DCC(v_a)}$$

และสามารถหาค่าอัตราเร็วที่เพิ่มขึ้นจากจุดอ้างอิงเริ่มต้น v_a ได้โดย

$$v_{difference} = v_x - v_a$$

ดังนั้นสามารถหาค่า $DCC(v_x)$ ได้จากสมการ (3.3)

$$DCC(v_x) = DCC(v_a) + \frac{v_{difference}}{stepLength}$$

$$DCC(v_x) = DCC(v_a) + \frac{(DCC(v_b) - DCC(v_a))(v_x - v_a)}{v_b - v_a} \quad (3.3)$$

และสามารถนำมาเขียนเพื่อเปลี่ยนค่าอัตราเร็วที่คำนวณได้ในตรรกะของซอฟต์แวร์เป็น DCC Speed Step ได้ดังตัวอย่างโค้ดในรูปที่ 3.6

```
Private Function speed2DCCStep(ByVal speed As Double) As Integer
    Dim originStep As Integer = 0
    Dim minimum As Double = 0
    Dim maximum As Double = 0

    'cm per sec
    Select Case speed
        Case DCC_20 To DCC_30
            originStep = 20
            minimum = DCC_20
            maximum = DCC_30

        Case DCC_30 To DCC_40
            originStep = 30
            minimum = DCC_30
            maximum = DCC_40
```

รูปที่ 3.6 ตัวอย่างโค้ดในการแปลงอัตราเร็ว (cm/sec) เป็น DCC Speed Step

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนของการควบคุมการเปิดหรือปิดของไฟส่องสว่างหน้าและหลังหัวขบวนรถ ก็สามารถทำได้โดยผ่านชุดคำสั่ง Z21 LAN Protocol – LAN_X_SET_LOCO_FUCTION ดังแสดงในตัวอย่างโค้ดรูปที่ 3.7

```
Sub setTrainLight(ByVal addr As Byte, ByVal command As String)
    Dim lightControl As Byte()
    Dim lightCommand As Byte
    If command = "on" Then
        lightCommand = &H40
    Else
        lightCommand = &H0
    End If

    Dim checkByte = &H1C Xor addr Xor lightCommand
    lightControl = {&HA, &H0, &H40, &H0, &HE4, &HF8, &H0, addr, lightCommand, checkByte}

    Try
        source.Send(lightControl, lightControl.Length)
    Catch ex As Exception
        MessageBox.Show(ex.ToString())
    End Try
End Sub
```

รูปที่ 3.7 ตัวอย่างโค้ดสำหรับควบคุมไฟส่องสว่างหน้าและหลังหัวขบวนรถไฟ

3.3.2 การควบคุมทิศทางประแจในรางรถไฟจำลอง

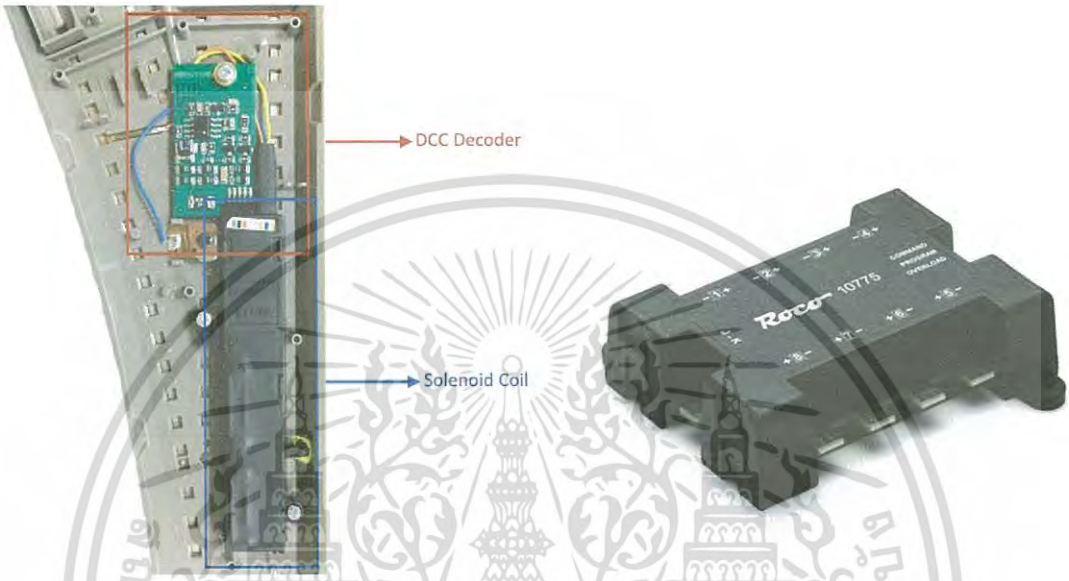
ในลักษณะเดียวกันกับการควรคุมขบวนรถไฟจำลอง ประแจภายในรางรถไฟจำลองก็สามารถควบคุมได้โดยคำสั่ง Z21 LAN Protocol – LAN_X_SET_TURNOUT ดังเช่นโค้ดควบคุมตัวอย่างดังรูปที่ 3.8

```
Sub setTurnout(ByVal addr As Byte, ByVal command As String) 'command = reverse / normal
    If command = "reverse" Then
        Dim bypassSwitch As Byte()
        Try
            bypassSwitch = {&H7, &H0, &H71, &H0, &H0, addr, &H0}
            source.Send(bypassSwitch, bypassSwitch.Length)

            Dim checkBit As Byte = &HDB Xor addr
            bypassSwitch = {&H9, &H0, &H40, &H0, &H53, &H0, addr, &H88, checkBit} 'Active reverse
            source.Send(bypassSwitch, bypassSwitch.Length)

            Delay(0.2)
            checkBit = &HD3 Xor addr
            bypassSwitch = {&H9, &H0, &H40, &H0, &H53, &H0, addr, &H80, checkBit} 'Inactive reverse
            source.Send(bypassSwitch, bypassSwitch.Length)
        Catch ex As Exception
            MessageBox.Show(ex.ToString)
        End Try

    Else
```

รูปที่ 3.8 ตัวอย่างโค้ดสำหรับควบคุมทิศทางประแจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยประแจแต่ละตัวนั้นจะมีขดลวดโซลินอยด์ และมีตัวถอดรหัสติดอยู่กับตัวประแจ หรืออาจจะใช้เป็นกล่องถอดรหัสแทนก็ได้ เพื่อที่จะเป็นตัวถอดรหัสคำสั่งจากรางมาสั่งการทิศทางของประแจอีกทีหนึ่ง โดยขดลวดโซลินอยด์ ตัวถอดรหัสชนิดเดี่ยว และกล่องถอดรหัสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ตัวถอดรหัสและกล่องถอดรหัส

3.3.3 การควบคุมสัญญาณไฟ

ในการออกแบบระบบอาณัติสัญญาณสำหรับรถไฟจำลองนี้ จำเป็นจะต้องมีเสาไฟสัญญาณเพื่อบ่งบองสัญลักษณ์การอนุญาตหรือไม่อนุญาตให้ออกเดินรถ ซึ่งได้เลือกใช้เสาสัญญาณแบบสองท่า คือ เสาสัญญาณที่มีเฉพาะไฟเขียวและไฟแดง โดยเสาสัญญาณสำหรับระบบจำลองนี้ จะถูกควบคุมผ่านซอฟต์แวร์ ไปยังบอร์ดอาดูอิโนเมกา (Arduino Mega) ซึ่งเชื่อมต่อกันผ่าน USB Serial Port และสามารถแสดงวิธีการควบคุมเสาสัญญาณโดยซอฟต์แวร์ได้จากรูปที่ 3.10

รูปที่ 3.10 การควบคุมเสาสัญญาณไฟจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.10 จะพบว่าคอมพิวเตอร์หรือซอฟต์แวร์ ได้ทำการส่งข้อความ “0st11R” ไปยังบอร์ดอาดูอิโน และอาดูอิโนก็ทำการเปลี่ยนข้อความคำสั่งนั้นส่งไปยังขาที่เชื่อมไปสู่เสาที่ต้องการออกคำสั่ง ซึ่งตัวบอร์ดอาดูอิโนก็จะถูกเขียนโค้ดด้วยภาษาซี เพื่อรองรับข้อความคำสั่งนี้ไว้ด้วยเช่นกัน โดยตัวบอร์ดจะทำการแปลงข้อความคำสั่งนั้นให้เป็นการส่งกระแสไฟให้กับ PIN ที่เชื่อมกับ GREEN LED ให้ขานั้นเป็น HIGH/LOW และ PIN ที่เชื่อมต่อกับ RED LED ให้เป็น HIGH/LOW ตามที่ซอฟต์แวร์หลักต้องการ

ข้อความคำสั่งที่ออกแบบขึ้นจะประกอบด้วยอักขระ 6 ตัวด้วยกัน คือ

อักขระที่ 1 คำสั่งว่าให้แสดงสัญญาณสีแดง หรือสีเขียว โดยถ้าเป็น

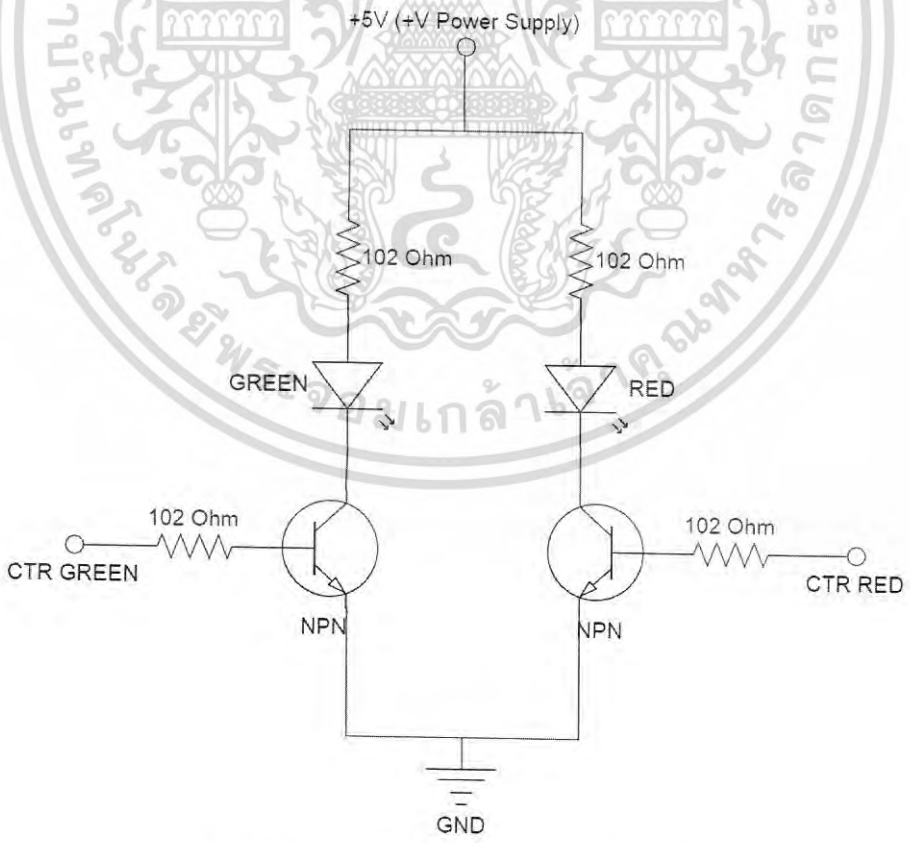
0 หมายถึง แสดงสีแดง

1 หมายถึง แสดงสีเขียว

อักขระที่ 2-6 บ่งบองถึงรหัสของเสาสัญญาณที่ต้องการสั่ง

ดังเช่นตัวอย่างจะเห็นว่าสั่งให้เสาต้นที่ st11R เป็นสีแดง หรือก็คือสั่งให้เสาสัญญาณที่อยู่ทางด้านขวา (Right: R) ของสถานี 1 ชานชาลา 1 เป็นสีแดงนั่นเอง

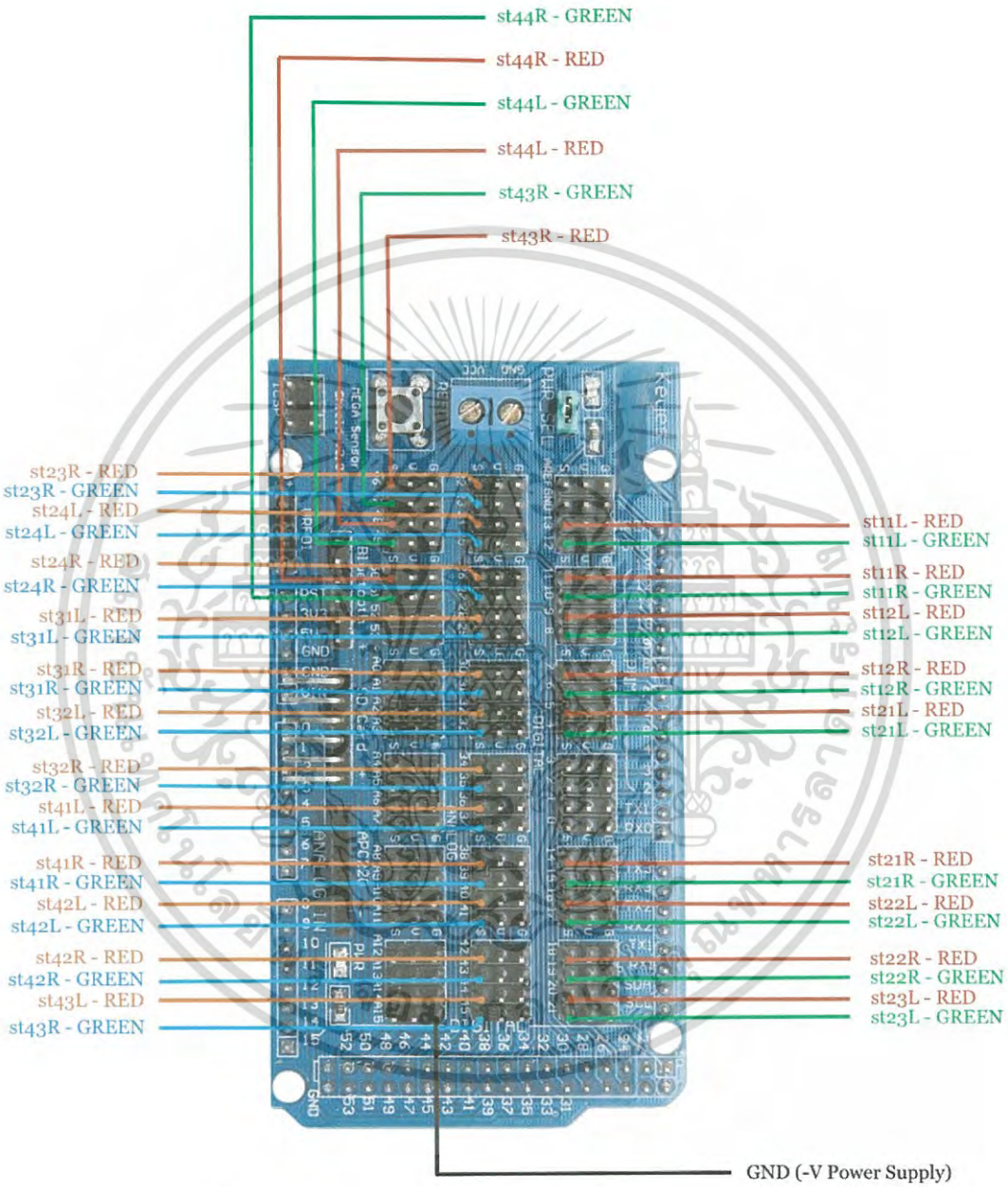
และตัวบอร์ดของเสาไฟสัญญาณเอง ก็ถูกออกแบบมาให้รับค่า HIGH/LOW จากบอร์ดอาดูอิโนเพื่อมาสั่งการเปิดหรือปิด ไฟเขียวและไฟแดง โดยสามารถแสดงวงจรได้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วงจรภายในเสาสัญญาณไฟจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนบอร์ดอาดูอิโนที่นำมาคุมเสาสัญญาณไฟจำลองนั้น ได้นำ Mega Sensor Shield V2.0 มาติดเพิ่มเพื่อความสะดวกในการใช้งาน และสามารถแสดงแผนผังการเชื่อมต่อระหว่าง Shield กับเสาสัญญาณไฟจำลอง และ แหล่งจ่ายไฟ (Power Supply) ได้ดังรูปที่ 3.12



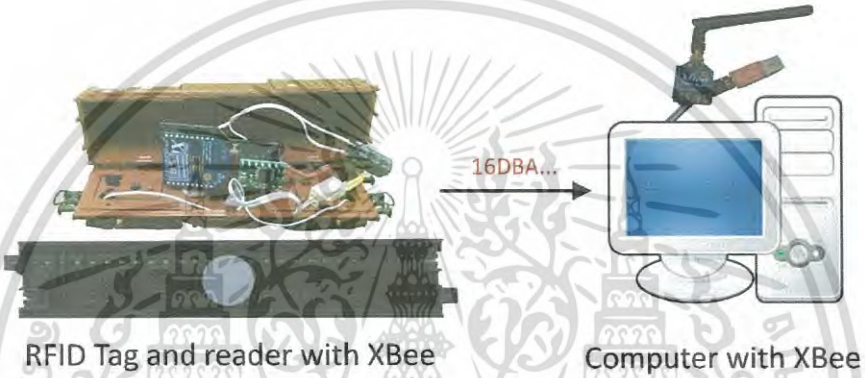
รูปที่ 3.12 แผนผังการเชื่อมต่ออาดูอิโนกับเสาสัญญาณไฟจำลอง

จากรูปที่ 3.12 แสดงให้เห็นการเชื่อมต่ออาดูอิโนกับเสาสัญญาณไฟจำลอง โดยทำการต่อขาสัญญาณ (Signal PIN) เข้ากับสายควบคุมไฟเขียว (CTR GREEN) และสายควบคุมไฟแดง (CTR RED) ของแต่ละเสาไฟสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การอ่านค่าจาก RFID Tag เข้าสู่ระบบเพื่อระบุตำแหน่งของรถไฟจำลอง

ในระบบจำลองนี้ได้นำเทคโนโลยี RFID รวมเข้ากับเทคโนโลยี XBee เพื่อใช้ในการระบุตำแหน่งของรถไฟจำลอง โดยหลักการในการรับตำแหน่งรถไฟคือ นำตัวอ่าน (RFID Reader) พร้อมกับ XBee ติดตั้งเข้าไปในตู้พ่วงของขบวนรถ เนื่องจากตู้พ่วงนั้นมีพื้นที่เพียงพอที่จะบรรจุอุปกรณ์ได้ และนำ RFID Tag ติดไว้ใต้ราง ส่วนในภาครับหรือเครื่องคอมพิวเตอร์นั้นก็จะมี XBee อยู่เช่นเดียวกัน เมื่อรถไฟวิ่งมาถึงตำแหน่งที่มี Tag ติดตั้งอยู่ด้านล่าง ตัวอุปกรณ์อ่านก็จะอ่านค่าของ Tag นั้น และส่งข้อมูลมายังซอฟต์แวร์ผ่านโครงข่าย XBee ดังอธิบายได้ดังรูปที่ 3.13 และอุปกรณ์ภายในตู้พ่วงจำลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.14

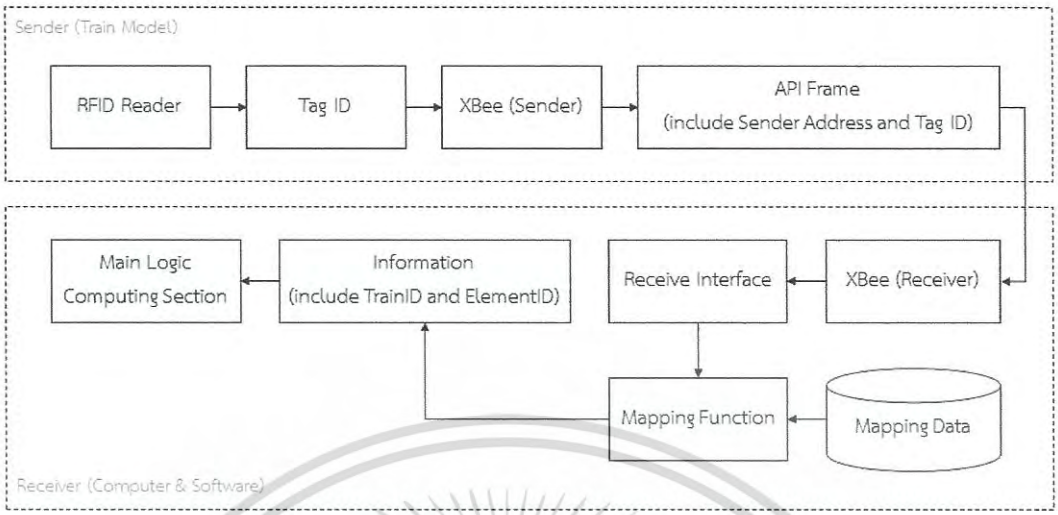


รูปที่ 3.13 การรับค่าตำแหน่งของรถไฟจำลอง

รูปที่ 3.14 อุปกรณ์ในตู้พ่วงจำลอง

ข้อมูลที่ส่งมาจาก XBee จะประกอบด้วยส่วนสำคัญที่นำมาใช้สองส่วนด้วยกัน คือส่วนของแอดเดรสผู้ส่ง และส่วนของรหัสที่อ่านได้จากแท็ก (RFID Tag) โดยข้อมูลทั้งสองส่วนนี้จะถูกนำมาเปรียบเทียบแปลงเป็นหมายเลขขบวนรถ และรหัสของแทร็ก (Track) รหัสประแจ (Switch or Turnout) หรือรหัสสถานี (Station) ทำให้สามารถระบุได้ว่า รถหมายเลขใดอยู่ที่ตำแหน่งไหนของเส้นทาง ซึ่งข้อมูลเปรียบเทียบนี้ได้ถูกจัดเก็บอยู่ในซอฟต์แวร์ตั้งแต่ตอนเริ่มต้น และเมื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลกันเรียบร้อยแล้ว ข้อมูลจะถูกจัดให้เป็นรูปแบบอีกครั้งเพื่อสะดวกต่อการคิดคำนวณใช้งานต่อไปภายในตรรกะของซอฟต์แวร์หลัก และสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรม (Block Diagram) การรับค่าตำแหน่งรถไฟได้ในรูปที่ 3.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.15 บล็อกไดอะแกรมของการรับค่าตำแหน่งรถไฟ

รูปแบบข้อมูลชุด (Information) นี้จะถูกกำหนดในรูปของ หมายเลขขบวนรถ:รหัสตอนเดินรถ (TrainID:ElementID) เช่น 1:T1001 คือ พบขบวนรถหมายเลข 1 อยู่ ณ ตำแหน่ง T1001 โดยรหัสทางด้านหลังเครื่องหมายทวิภาค (Colon: ":") จะถูกแบ่งออกเป็นสามรูปแบบ คือส่วนที่เป็น ส่วนแทร็ก หรือเส้นทางเดินรถปกติ ใช้รหัส "T" ตามด้วยชุดเลขตำแหน่ง ส่วนประแจ ใช้รหัส "SW" ตามด้วยชุดเลขตำแหน่ง และส่วนสถานี ใช้รหัส "st" ตามด้วยชุดเลขตำแหน่งเช่นกัน โดยสามารถแสดงตัวอย่างโค้ดที่นำมาใช้เปรียบเทียบค่าที่รับมาในระบบกับรหัสอุปกรณ์ได้ในรูปที่ 3.16

```
Function XBee2TrainID(ByVal code As String) As String
    'change for ex
    Select Case code
        Case "0013A20040F16E77" : Return "1" 'red cargo
        Case "0013A20040F16DC4" : Return "2"
    End Select
    Return Nothing
End Function

Function XBee2ElementID(ByVal code As String) As String
    Select Case code
        '====================== STATION ======================
        Case "0004E698" : Return "st11"
        Case "00050980" : Return "st12"

        Case "000537EE" : Return "st21"
        Case "000526BB" : Return "st22"
        Case "000563C3" : Return "st23"
        Case "0004B7EE" : Return "st24"
```

รูปที่ 3.16 ตัวอย่างโค้ดในการเปรียบเทียบแอดเดรสและค่าแท็กเป็นหมายเลขรถและรหัสตอนราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การออกแบบซอฟต์แวร์

ซอฟต์แวร์หลักของระบบถูกออกแบบมาให้ทำงานได้สองโหมด คือ โหมดการทำงานอัตโนมัติ (Auto-Operation Mode) และโหมดการทำงานโดยผู้ใช้ (Manual-Operation Mode) เพื่อตอบสนองต่อลักษณะความต้องการของผู้ใช้ทั้งสองแบบ โดยการทำงานทั้งสองโหมดนั้นมีความแตกต่างกันคือ

โหมดการทำงานอัตโนมัติ เมื่อทำการโหลดตารางการเดินรถมาเรียบร้อยแล้ว และปล่อยให้เวลาดำเนินไป ซอฟต์แวร์จะทำการจองเส้นทางและสั่งการปล่อยขบวนรถ รวมถึงเดินรถเองอัตโนมัติทั้งหมด ซึ่งจะเหมาะแก่การตรวจดูตารางการเดินรถที่สร้างขึ้น ว่าตารางเดินรถนั้นมีความเหมาะสมนำมาเดินรถหรือไม่ มีความขัดแย้งของเส้นทางมากน้อยเพียงใด ส่วนโหมดการทำงานโดยผู้ใช้ ถูกออกแบบมาเพื่อให้ผู้ใช้เรียนรู้กฎข้อบังคับในการเดินรถ โดยผู้ใช้จะต้องทำการจองเส้นทางการเดินรถเอง ให้สอดคล้องกับข้อมูลในตารางการเดินรถ และในระบบนี้ตารางการเดินรถสามารถสร้างขึ้นมาเองได้โดยใช้รูปแบบเฉพาะที่ซอฟต์แวร์เข้าใจ

3.4.1 รูปแบบของตารางการเดินรถ

ในระบบนี้ได้ทำการกำหนดรูปแบบการทำตารางการเดินรถขึ้นมา โดยแยกเป็นตารางของแต่ละขบวน และบันทึกไว้ในลักษณะไฟล์ .csv (Comma-Separate Values) โดยข้อมูลภายในไฟล์จะต้องมีรูปแบบดังตัวอย่างในตารางที่ 3.3

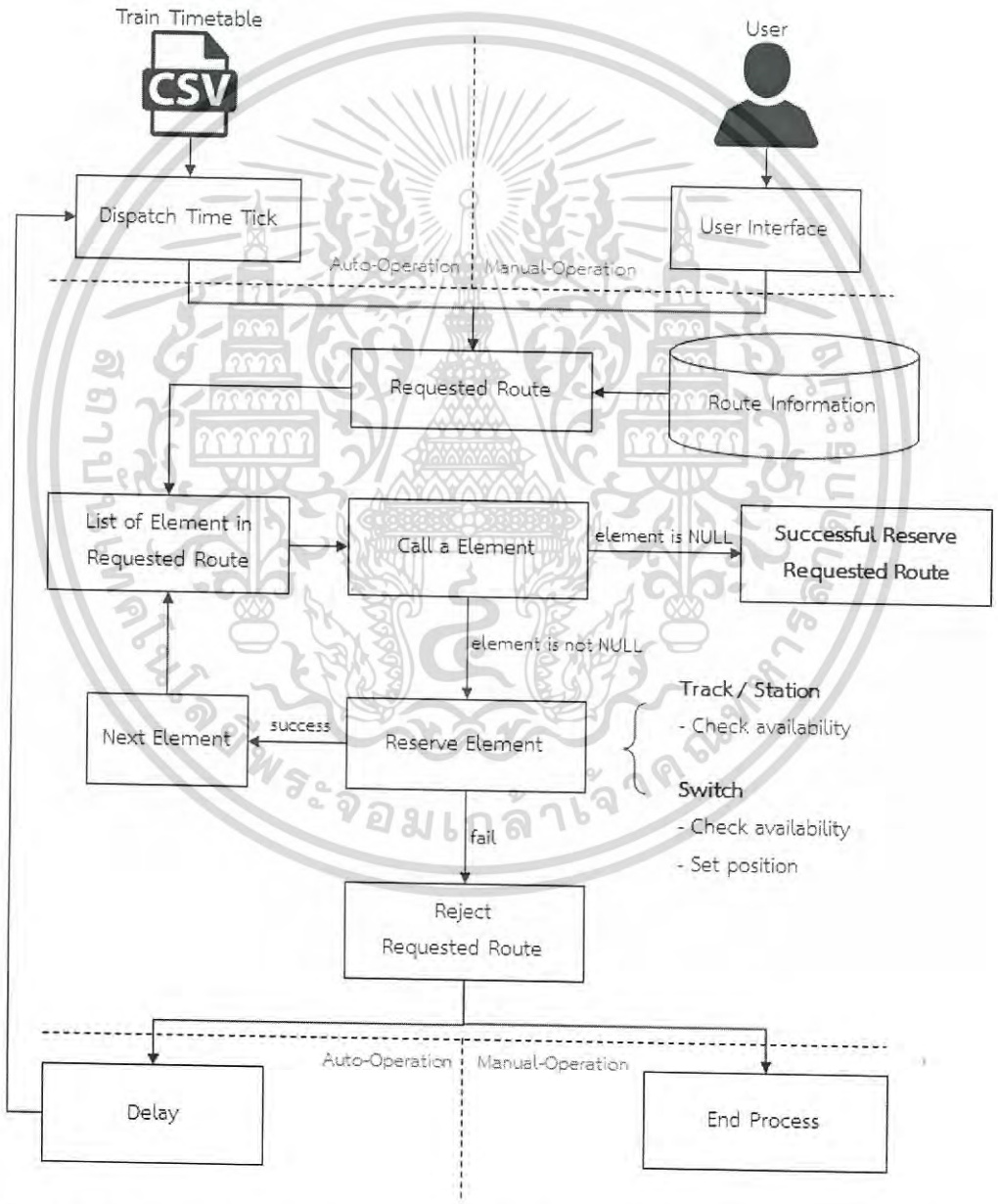
ตารางที่ 3.3 ตัวอย่างข้อมูลภายในตารางการเดินรถที่ใช้ในระบบ

Station	Arrive	Dwell	Depart
st11 (PHAYATHAI)	-	-	5:02
st21 (HUAMARK)	5:15	0:02	5:17
st31 (LADKRABANG)	5:30	0:02	5:32
st41 (SUVARNABHUMI)	5:45	-	-
st41 (SUVARNABHUMI)	-	-	6:02
st32 (LADKRABANG)	6:15	0:02	6:17
...	...	...	...
st23 (HUAMARK)	22:30	0:02	22:32
st11 (PHAYATHAI)	22:45	-	-
END	OF	THE	DAY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 ตรรกะการจองเส้นทางการเดินรถ

อย่างที่ได้กล่าวไปแล้วว่าการทำงานของซอฟต์แวร์ชุดนี้มีอยู่สองโหมดการทำงาน คือโหมดการทำงานอัตโนมัติ และโหมดการทำงานโดยผู้ใช้ ซึ่งส่วนของตรรกะที่แตกต่างกันของทั้งสองโหมดการทำงานก็คือตรรกะการจองเส้นทางการเดินรถนั่นเอง โดยในโหมดอัตโนมัตินั้นระบบจะทำการจองเส้นทางอัตโนมัติเมื่อถึงเวลาออกรถโดยอ้างอิงจากตารางการเดินรถ ส่วนโหมดการทำงานโดยผู้ใช้ผู้ใช้ต้องเป็นผู้จองเส้นทางเองผ่านส่วนติดต่อผู้ใช้งาน (User Interface) โดยสามารถแสดงแผนผังการจองเส้นทางของทั้งสองโหมดได้ดังรูปที่ 3.17

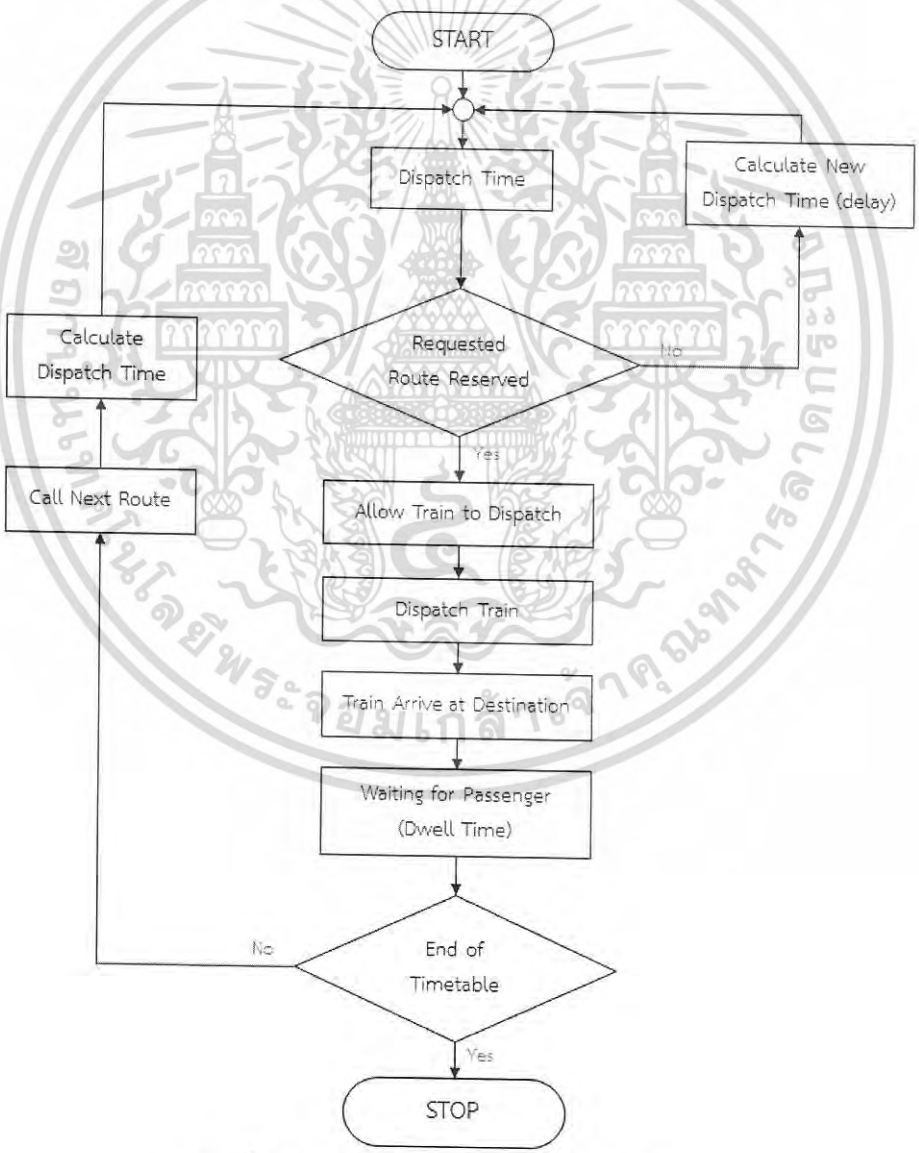


รูปที่ 3.17 แผนผังแสดงการจองเส้นทางของโหมดการทำงานอัตโนมัติและโหมดการทำงานโดยผู้ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากแผนผังในรูปที่ 3.17 สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อผู้ใช้ทำการร้องขอเส้นทางที่ต้องการ หรือระบบอัตโนมัติทำการร้องขอเส้นทางที่ต้องการ ข้อมูลเส้นทางจะถูกเก็บอยู่ในรูปของชุดรหัสตอนเส้นทางที่เรียงต่อกัน (List of Element) จากนั้นระบบจะทำการร้องขอตอนเส้นทางแต่ละตอนภายในชุดเส้นทางนั้นไปเรื่อย ๆ จนจบชุดเส้นทาง ถ้าเกิดตอนเส้นทางภายในชุดเส้นทางนั้นไม่สามารถให้บริการได้ ระบบจะทำการยกเลิกการจองเส้นทาง (Reject) แต่ถ้าทุกตอนทางภายในชุดเส้นทางนั้นว่างและพร้อมให้บริการ ระบบจะทำการจองเส้นทางเพื่อป้องการขบวนรถคันอื่นมาใช้เส้นทางซ้ำซ้อน รวมถึงประแจทุกตัวในเส้นทางที่ร้องขอต้องอยู่ในทิศทางที่ถูกต้องด้วย จากนั้นจึงตอบสนองว่าการจองเส้นทางนี้สำเร็จเรียบร้อย

3.4.3 ตรรกะการออกเดินรถ



รูปที่ 3.18 แผนผังแสดงตรรกะการออกเดินรถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การอนุญาตให้ออกเดินรถจำเป็นต้องมีความปลอยภัยภายใต้เงื่อนไขของการจองเส้นทางดังหัวข้อที่ผ่านมา และกระบวนการรวมของตรรกะการออกเดินรถภายในระบบนี้จะสามารถเขียนได้ดังแผนผังในรูปที่ 3.18 โดยสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อระบบเริ่มการทำงาน และทำการป้อนข้อมูลเส้นทางการเดินรถเรียบร้อยแล้ว เมื่อเวลาจำลองภายในระบบได้ผ่านมาถึงเวลาออกเดินรถที่ตารางเวลาการเดินรถกำหนดไว้ ระบบจะตรวจสอบว่าเส้นทางที่ร้องขอนั้นถูกจองไว้เรียบร้อยแล้วหรือไม่ ซึ่งการจองเส้นทางนี้ก็เป็นหน้าที่ของตรรกะการจองเส้นทางการเดินรถในหัวข้อที่ผ่านมา ถ้าเกิดเส้นทางที่ร้องขอยังไม่ได้ถูกจองเส้นทาง ระบบจะทำการคำนวณเวลาการออกเดินรถใหม่อีกครั้งหนึ่ง เนื่องจากเวลาการออกเดินรถนั้นมีผลต่อการคำนวณความเร็วที่ใช้ในการเดินรถภายในเส้นทางและมีผลต่อการคาดเดาเวลาภายในระบบ แต่ถ้าเกิดเส้นทางที่ร้องขอนั้นถูกจองสำเร็จเรียบร้อยแล้ว ระบบจะส่งสัญญาณอนุญาตให้ออกรถจากสถานีได้ หรือก็คือเปลี่ยนสัญญาณไฟจากแดงเป็นเขียวนั่นเอง และจากนั้นจะทำการปล่อยรถออกจากสถานี เมื่อรถไฟวิ่งเข้าสู่เส้นทางและมาถึงจุดหมายปลายทาง ก็สั่งให้รถไฟหยุดเพื่อรอผู้โดยสารเป็นเวลาตามที่กำหนดไว้ในตารางการเดินรถเช่นกัน จากนั้นต้องทำการตรวจสอบตารางการเดิน ถ้าเกิดพบว่าสิ้นสุดตารางการเดินรถ ก็ให้จบการทำงาน แต่ถ้ายังคงมีการเดินรถต่อ ก็เรียกขอเส้นทางถัดไป และคำนวณหาเวลาออกเดินรถใหม่อีกรอบหนึ่งในกรณีที่รถไฟถึงที่หมายช้ากว่ากำหนด (Late) และกระทำการซ้ำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะสิ้นสุดตารางการเดินรถ

3.4.4 ตรรกะการคำนวณหาอัตราเร็วในการเดินรถให้เหมาะสม

ในการเดินรถภายในระบบนี้ ได้มีการควบคุมอัตราเร็วในการเดินรถ ให้รถไฟถึงสถานีปลายทางตรงตามเวลาที่ตารางการเดินรถ โดยยังคงมีปัจจัยของอัตราเร็วสูงสุดที่อนุญาตให้เดินรถได้กำหนดอยู่ ดังนั้นในบางกรณีอาจเป็นไปไม่ได้ที่จะเดินรถให้ตรงตามตารางเวลา แต่ตัวควบคุมอัตราเร็วนี้จะพยายามทำให้รถเดินให้ตรงตามตารางมากที่สุด

โดยขั้นตอนแรกต้องทำการหาอัตราเร็วเฉลี่ยที่ต้องใช้ในเส้นทางที่ร้องขอ โดยแต่ละเส้นทางจะมีข้อมูลของชุดตอนเส้นทางที่ต้องใช้ (Route: R) และแต่ละตอนเส้นทางจะถูกเก็บบันทึกความยาวของตอนเส้นทาง (Element: E) นั้นไว้ด้วย ซึ่งลักษณะของเส้นทางมีด้วยกันสองแบบ คือแบบการเดินรถไฟไปทางด้านขวา หรือเดินรถไปข้างหน้า (Forward: F) และการเดินรถไปทางด้านซ้าย หรือเดินรถถอยหลัง (Backward: B)

สามารถหาระยะทางทั้งหมดที่ต้องเดินรถในเส้นทางเดินรถไปด้านหน้า (Forward Route: R_f) ได้จากสมการ (3.4) และสามารถหาระยะทางทั้งหมดที่รถในเส้นทางเดินรถถอยหลัง (Backward Route: R_b) ได้จากสมการ (3.5)

$$length(R_f) = length_R(E_1) + length_L(E_2) + length_R(E_2) + length_L(E_3) + ... + length_L(E_n)$$
$$length(R_f) = length_R(E_1) + length(E_2) + length(E_3) + ... + length_L(E_n) \quad (3.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$length(R_b) = length_L(E_1) + length_R(E_2) + length_L(E_2) + length_R(E_3) + ... + length_R(E_n)$$
$$length(R_b) = length_L(E_1) + length(E_2) + length(E_3) + ... + length_R(E_n) \quad (3.5)$$

โดยที่ $R = \{E_1, E_2, E_3, ..., E_n\}$

R คือ เส้นทางการเดินรถ (Route)

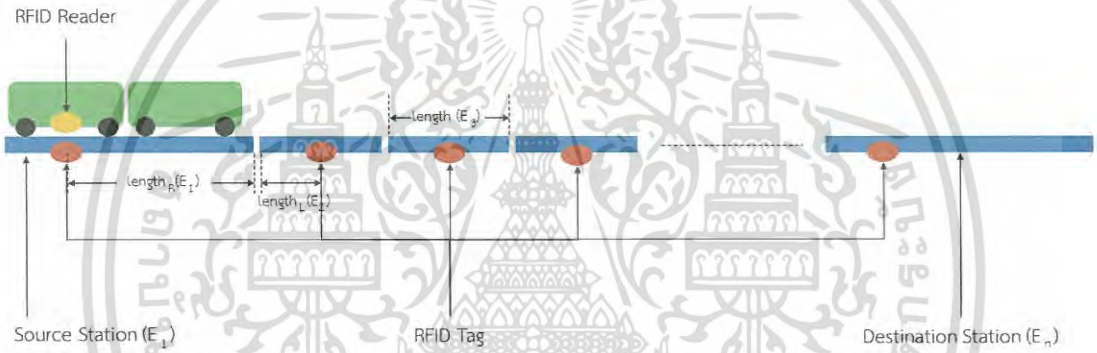
E คือ ตอนเส้นทาง โดยจะแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ แทร็ก ประแจ และสถานี

$length(X)$ คือ ระยะทางทั้งหมดในเส้นทางการเดินรถ X

หรือ ระยะทางของตอนเส้นทาง X (cm)

$length_L(X)$ คือ ระยะทางทางด้านซ้ายของตอนเส้นทาง X (cm)

$length_R(X)$ คือ ระยะทางทางด้านขวาของตอนเส้นทาง X (cm)



รูปที่ 3.19 องค์ประกอบของเส้นทางการเดินรถ

เมื่อสามารถหาระยะทางรวมของเส้นทางการเดินรถที่ต้องการได้ และทราบเวลาที่ต้องใช้ในการเดินรถจากตารางเวลา ดังนั้นจึงสามารถหาอัตราเร็วเฉลี่ยตลอดเส้นทางได้

$$v = \frac{s}{t}$$

แต่การที่เดินรถด้วยอัตราเร็วเฉลี่ยที่หามาเพียงอย่างเดียวอาจไม่ทำให้รถเดินได้ตรงตามเวลาจริง เนื่องจากมีความเป็นไปได้ที่รถไฟอาจวิ่งเร็วหรือช้ากว่าที่ได้คำนวณไว้ ระบบจึงถูกออกแบบให้คำนวณอัตราเร็วใหม่ทุกครั้งที่มีความคลาดเคลื่อนของเวลาที่คาดว่าจะไปถึงแท็กใด ๆ โดยการคาดเดาเวลาที่รถควรมาถึงแท็ก $Time_{reachTag}(E_p)$ (นาที:วินาที – MM:SS) สามารถหาได้จากสมการที่ (3.6)

$$Time_{reachTag}(E_p) = Time_{reachTag}(E_{p-1}) + T_{(p-1)to(p)} \quad (3.6)$$

โดยที่ $Time_{reachTag}(E_1)$ คือ เวลาที่เริ่มออกรถ (Dispatch Time)

$T_{(p-1)to(p)}$ คือ เวลาที่ใช้ในระยะจาก ตำแหน่งแท็กของ E_{p-1} ไปถึง ตำแหน่งแท็กของ E_p

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

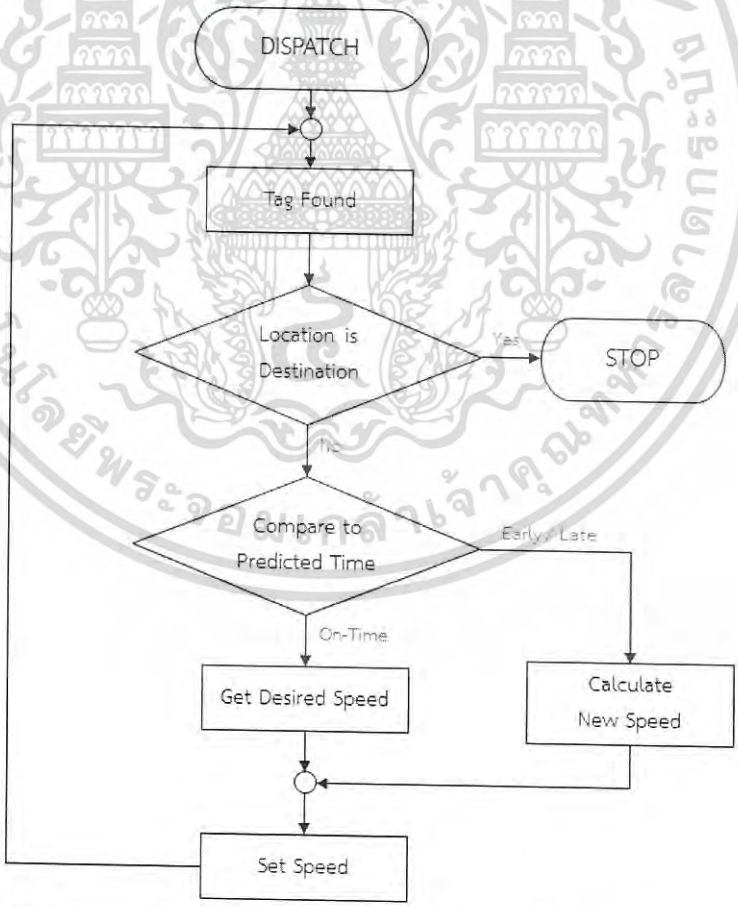
และสามารถหา $T_{(p-1)to(p)}$ (sec) โดยสมการที่ (3.7) ในกรณีที่เป็นเส้นทางเดินรถไปด้านหน้า (Forward Route) และใช้สมการที่ (3.8) ในกรณีที่เป็นเส้นทางเดินรถถอยหลัง (Backward Route)

$$T_{(p-1)to(p)} = \frac{length_R(E_{p-1}) + length_L(E_p)}{v_{desired}} \quad (3.7)$$

$$T_{(p-1)to(p)} = \frac{length_L(E_{p-1}) + length_R(E_p)}{v_{desired}} \quad (3.8)$$

โดยที่ $v_{desired}$ คือ อัตราเร็วเฉลี่ยตลอดเส้นทาง

และระบบจะทำการตรวจสอบทุกครั้งที่พบแท็กว่าเวลาที่คาดคะเนไว้ กับเวลาจริง ๆ ที่อ่านแท็กได้แตกต่างกันหรือไม่ ถ้าไม่เวลาทั้งสองไม่แตกต่างกันให้ใช้อัตราเร็วเฉลี่ยตลอดเส้นทางที่ได้คำนวณไว้เริ่มแรก ($v_{desired}$) แต่ถ้าเกิดการล่าช้า (Delay) หรือรถวิ่งเร็วกว่ากำหนด (Early) ระบบจะทำการคำนวณหาอัตราเร็วที่วิ่งในช่วงตอนนั้นใหม่ โดยใช้สมการที่ (3.7) หรือ (3.8) คำนวณหาเช่นกัน และการคำนวณหาอัตราเร็วที่เหมาะสมในการเดินรถนี้สามารถเขียนเป็นแผนผังได้ดังรูปที่ 3.20



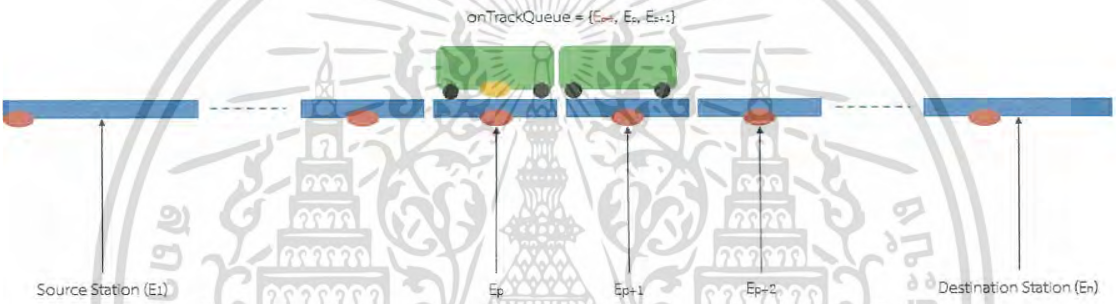
รูปที่ 3.20 แผนผังการคำนวณหาอัตราเร็วที่เหมาะสมในการเดินรถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.5 ตรรกะการแสดงสถานะเข้าใช้ตอนทางและการคืนตอนทาง

ในระบบอาณัติสัญญาณนั้นจะแสดงตอนเส้นทางเป็น 3 ลักษณะด้วยกัน คือ ตอนทางว่าง (Clear) ตอนทางถูกจอง (Reserved) และตอนทางกำลังถูกใช้งาน (Occupied) ซึ่งการตรวจสอบเช่นนี้จะมีผลต่อการจองเส้นทางและการเดินรถ โดยเส้นทางจะถูกจองได้ก็ต่อเมื่อตอนทางภายในเส้นทางมีสถานะเป็นว่างทั้งหมด และรถจะสามารถเคลื่อนสู่เส้นทางได้ก็ต่อเมื่อตอนทางในเส้นทางนั้นเป็นสถานะถูกจองทั้งหมด และเมื่อขบวนรถเข้ามาใช้ตอนทางใด ๆ ตอนทางนั้นต้องเปลี่ยนจากสถานะถูกจองเป็นสถานะกำลังถูกใช้งาน ดังนั้นเมื่อรถไฟผ่านออกจากตอนทางนั้นแล้ว สถานะที่เป็นกำลังถูกใช้งานก็จะต้องปล่อยคืนให้เป็นตอนทางว่างเพื่อให้รถขบวนอื่นใช้งานต่อไปด้วย

โดยในระบบนี้จะพิจารณาการเข้าใช้ตอนทางและการคืนตอนทางทุกครั้งที่พบแท็กใหม่ ซึ่งมีองค์ประกอบเป็นไปดังรูปที่ 3.21 และสามารถวาดแผนผังการทำงานได้ในรูปที่ 3.22 และรูปที่ 3.23

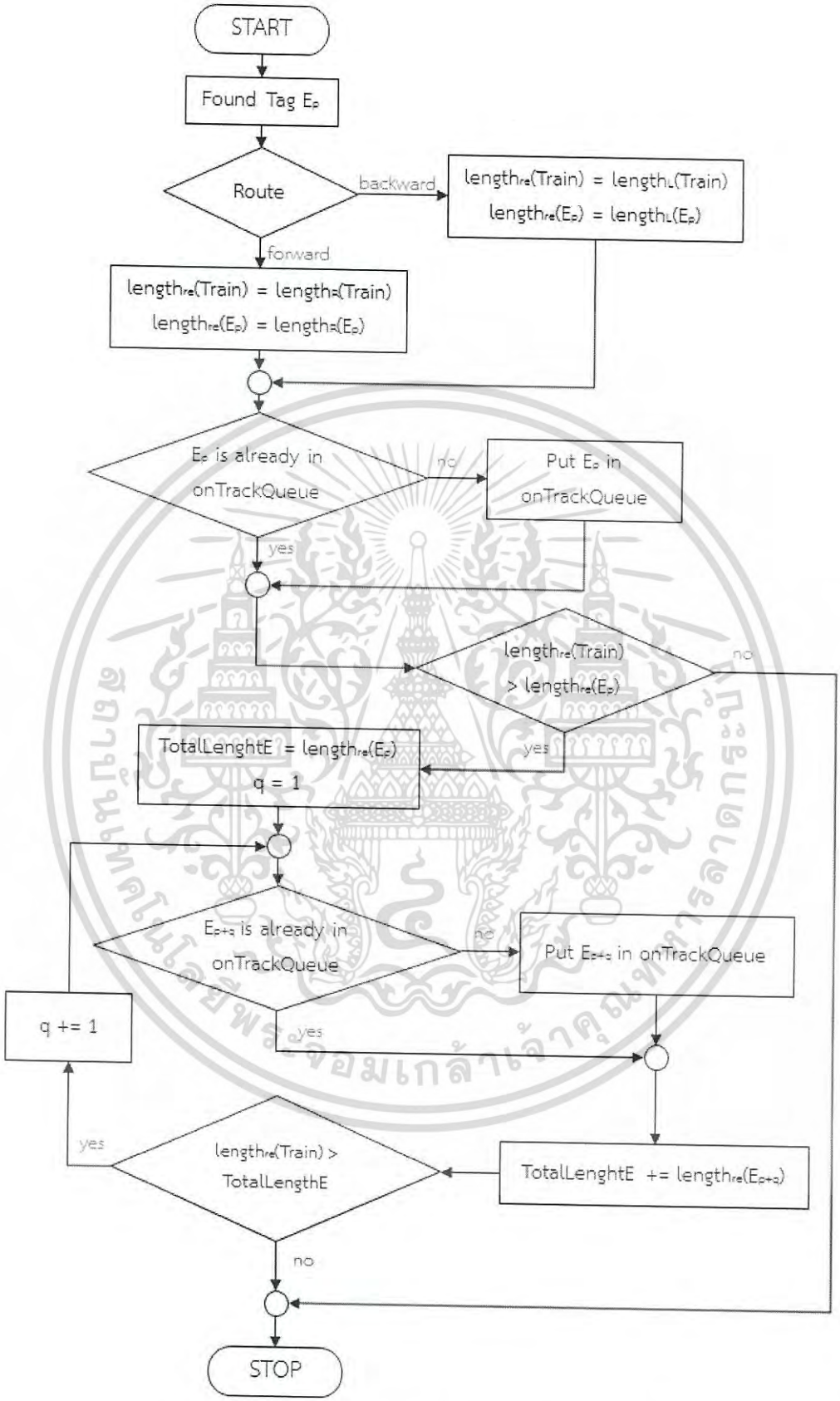


รูปที่ 3.21 องค์ประกอบของการเข้าใช้และการคืนตอนทาง

จากรูป 3.21 ได้นิยามให้แท็กที่พบล่าสุดนั้นคือแท็กของตอนทาง E_p ดังภาพ โดยที่ขบวนรถไฟนั้นจะมีตัวแปรหนึ่งที่ไว้ใช้คอยเก็บว่าตอนนี้รถไฟได้เหยียบอยู่บนตอนทางใดบ้าง โดยใช้ตัวแปรที่ชื่อ onTrackQueue ซึ่งจะเก็บข้อมูลไว้เป็นคิว (Queue) ทำการเพิ่มข้อมูลตอนทางที่เข้าใช้ เพิ่มเข้ามาทางด้านท้ายของสายข้อมูล และทำการลบตอนทางที่ออกมา หรือคืนตอนทาง ทางด้านหน้าของสายข้อมูล ซึ่งจากรูปตัวอย่างองค์ประกอบ รถไฟได้ทำการคืนตอนทางที่ใช้เรียบร้อยแล้วกลับคืนสู่ทรัพยากรหลัก ซึ่งก็คือตอนทางที่ E_{p-1} นั่นเอง

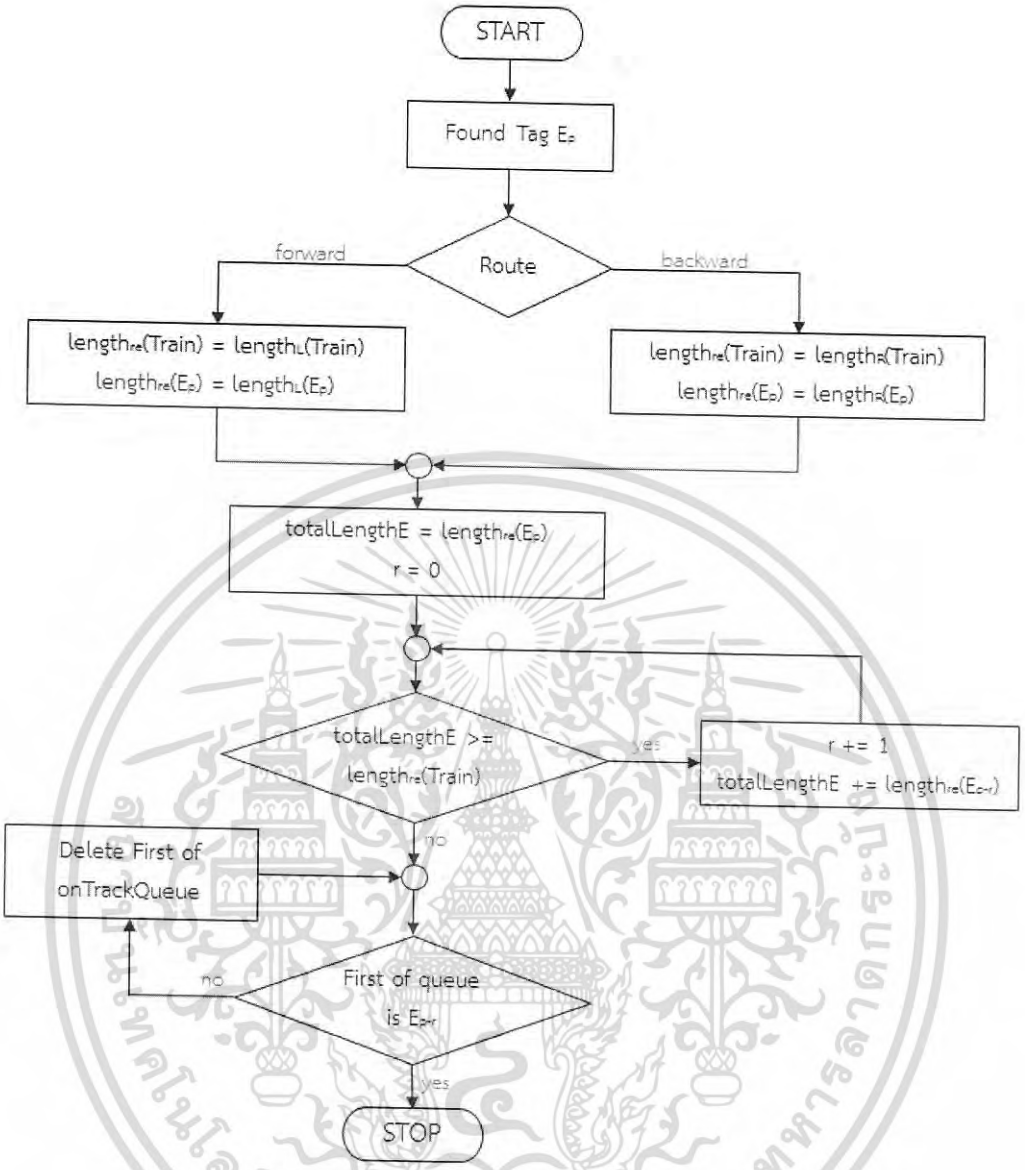
จากรูปที่ 3.22 ด้านล่าง สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อรถไฟพบแท็กของตอนทาง E_p จะพิจารณาว่าเส้นทางเดินรถที่กำลังวิ่งเป็นเส้นทางเดินรถไปข้างหน้าหรือถอยหลัง แล้วทำการเก็บบันทึกค่าส่วนที่เกินออกไปจากตำแหน่งตัวอ่านของรถไฟ และค่าระยะทางที่เกินจากตำแหน่งติดแท็กของตอนทาง E_p จากนั้นทำการเปรียบเทียบว่าส่วนของรถไฟได้ยื่นเกินไปจากตอนทางหรือไม่ ถ้ายื่นเกินก็ให้บวกค่าของระยะทางตอนทางถัดไปจนกระทั่งส่วนของรถไปอยู่ภายในตอนทางที่นำมาพิจารณาทั้งหมด โดยตอนทางที่นำมาพิจารณาก็จะถูกเก็บค่าลงไปในคิวด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 แผนผังแสดงการเข้าใช้ตอนทางของขบวนรถไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.23 แผนผังแสดงการคืนตอนทาง

จากแผนผังในรูป 3.23 การคืนตอนทางก็มีลักษณะคล้ายคลึงกับการเข้าใช้ตอนทางเช่นกัน โดยจากแผนภาพอธิบายได้ว่า เมื่อรถไฟพบแท็กของตอนทาง E_p จะทำการตรวจสอบว่ารถไฟส่วนที่เหลือหลังจากตัวอ่านได้ผ่านเข้ามาในตอนทางนี้ทั้งหมดหรือไม่ ถ้าไม่ใช่ก็ทำการวนตรวจสอบต่อไปโดยตรวจสอบจากระยะทางของตอนทางที่อยู่ในคิว เรียงจากท้ายคิวไปเรื่อย ๆ และเมื่อพบตอนทางสุดท้ายที่รถไฟอยู่แล้ว ก็ให้ทำการลบตอนทางที่เหลือในคิวออกไป และคืนตอนทางนั้นให้แก่ระบบเป็นสถานะว่างเพื่อให้ตอนทางนั้นสามารถใช้ได้ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลอง โดยใช้ตารางเดินรถต้นแบบซึ่งจะเขียนข้อมูลภายในตารางเดินรถในหัวข้อที่ 4.1 ซึ่งส่วนติดต่อผู้ใช้ของซอฟต์แวร์ (Graphic User Interface: GUI) จะแสดงในหัวข้อที่ 4.2 และให้ทำการเดินรถจากตารางการเดินรถต้นแบบ จากนั้นบันทึกผลว่ารถไฟสามารถวิ่งได้ตรงตามตารางเวลาที่กำหนดไว้หรือไม่ในหัวข้อที่ 4.3 รวมถึงทำการทดสอบการจองเส้นทางซ้ำว่าระบบมีตรรกะการจองเส้นทาง การเข้าใช้ตอนทาง และการคืนตอนทางได้ถูกต้องในหัวข้อที่ 4.4

4.1 ข้อมูลภายในตารางเดินรถต้นแบบ

ตารางการเดินรถต้นแบบออกแบบมาให้รถไฟขบวนที่ 1 เริ่มต้นจากสถานี st11 -> st21 -> st31 -> st41 โดยใช้เวลาวิ่งภายในเส้นทางเท่ากันที่ 13 วินาที และ จอดรอผู้โดยสารภายในสถานี 2 วินาที และเมื่อถึงสถานีสุดท้าย st41 ให้ทำการพักรถแล้วเริ่มเดินรถรอบใหม่เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง จากการเดินรถครั้งแรก แล้วจึงทำการเดินรถย้อนกลับจาก st41 -> st32 -> st23 -> st11 และทำการใส่ข้อมูลซ้ำเช่นนี้ไปจนสิ้นสุดวัน ดังตัวอย่างข้อมูลภายในตารางเดินรถต้นแบบในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างข้อมูลภายในตารางเดินรถต้นแบบของรถไฟขบวนที่ 1

st11 (PHAYATHAI)	-	-	5:02
st21 (HUAMARK)	5:15	0:02	5:17
st31 (LADKRABANG)	5:30	0:02	5:32
st41 (SUVARNABHUMI)	5:45	-	-
st41 (SUVARNABHUMI)	-	-	6:02
st32 (LADKRABANG)	6:15	0:02	6:17
st23 (HUAMARK)	6:30	0:02	6:32
st11 (PHAYATHAI)	6:45	-	-
...	...	...	...
END	OF	THE	DAY

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในลักษณะคล้ายคลึงกันกับข้างต้น ตารางการเดินรถต้นแบบของรถไฟขบวนที่ 2 ถูกกำหนดให้วนลูปกระทำซ้ำเช่นกัน โดยเริ่มเดินรถจากสถานี st12 -> st22 -> st31 -> st43 และเดินรถย้อนกลับจากสถานี st43 -> st32 -> st24 -> st12 ดังตารางที่ 4.2

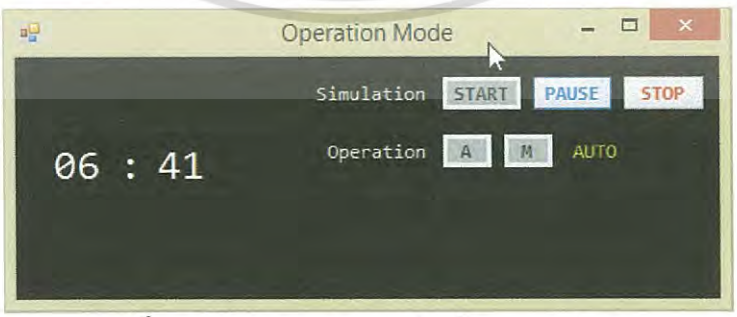
ตารางที่ 4.2 ตัวอย่างข้อมูลภายในตารางเดินรถต้นแบบของรถไฟขบวนที่ 2

st12 (PHAYATHAI)	-	-	6:02
st22 (HUAMARK)	6:15	0:02	6:17
st31 (LADKRABANG)	6:30	0:02	6:32
st43 (SUVARNABHUMI)	6:45	-	-
st43 (SUVARNABHUMI)	-	-	7:02
st32 (LADKRABANG)	7:15	0:02	7:17
st24 (HUAMARK)	7:30	0:02	7:32
st12 (PHAYATHAI)	7:45	-	-
...	...	...	...
END	OF	THE	DAY

4.2 ส่วนติดต่อผู้ใช้ของซอฟต์แวร์

หน้าต่างส่วนติดต่อผู้ใช้แบ่งเป็น 4 หน้าต่างด้วยกัน คือ หน้าต่างเวลาและเลือกโหมดการทำงาน หน้าต่างตารางการเดินรถ หน้าต่างหน้าต่างแสดงผลหลัก และหน้าต่างรายละเอียดของรถแต่ละขบวน

4.2.1 หน้าต่างเวลาและเลือกโหมดการทำงาน



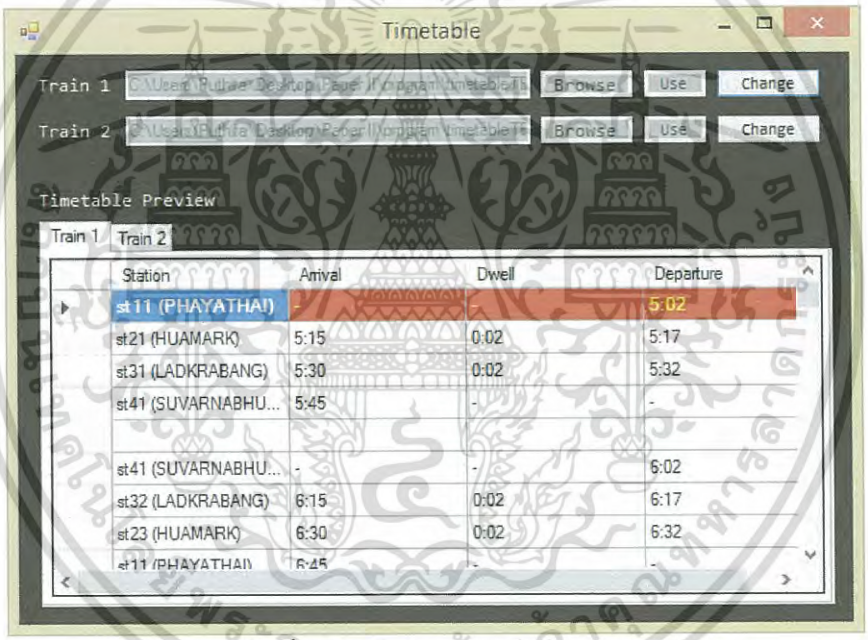
รูปที่ 4.1 หน้าต่างเวลาและเลือกโหมดการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 หน้าต่างเวลาและเลือกโหมดการทำงานหน้าต่างนี้ไว้ใช้สำหรับเป็นนาฬิกาเวลาจำลอง โดยเป็นนาฬิกาที่ยังคงไม่ได้แปลงหน่วย โดยระบบได้ใช้หน่วย นาที:วินาที (MM:SS) ซึ่งมีปุ่ม เริ่ม (Start) พัก (Pause) และหยุด (Stop) ควบคุมการเดินของเวลา และการจำลองของระบบจำลองนี้อยู่ รวมถึงผู้ใช้สามารถเลือกโหมดการทำงานเป็นโหมดการทำงานอัตโนมัติ และโหมดการทำงานโดยผู้ใช้ได้จากหน้าต่างนี้ โดยการเลือกโหมดการทำงาน จะไม่สามารถทำได้ถ้าการจำลองทำงานอยู่ หรือนาฬิกาเดินอยู่นั่นเอง

4.2.2 หน้าต่างตารางการเดินรถ

หน้าต่างนี้ไว้ใช้สำหรับใส่ไฟล์ .csv ที่เป็นไฟล์ตารางการเดินรถเข้าสู่ระบบ และแสดงเส้นทางที่อ่านได้จากไฟล์ในรูปแบบของตาราง รวมถึงเน้น (Highlight) บรรทัดของตารางที่กำลังประมวลผลอยู่ให้ผู้ใช้ได้ทราบ ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 หน้าต่างตารางการเดินรถ

4.2.3 หน้าต่างแสดงผลหลัก

หน้าต่างนี้ใช้สำหรับแสดงตำแหน่งของรถไฟทั้งสองขบวน สถานะของตอนทาง หมายเลขตอนทาง ชื่อและชานชาลาของสถานี สถานะของไฟสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยที่

ตอนทางสีขาว คือ ตอนทางว่าง

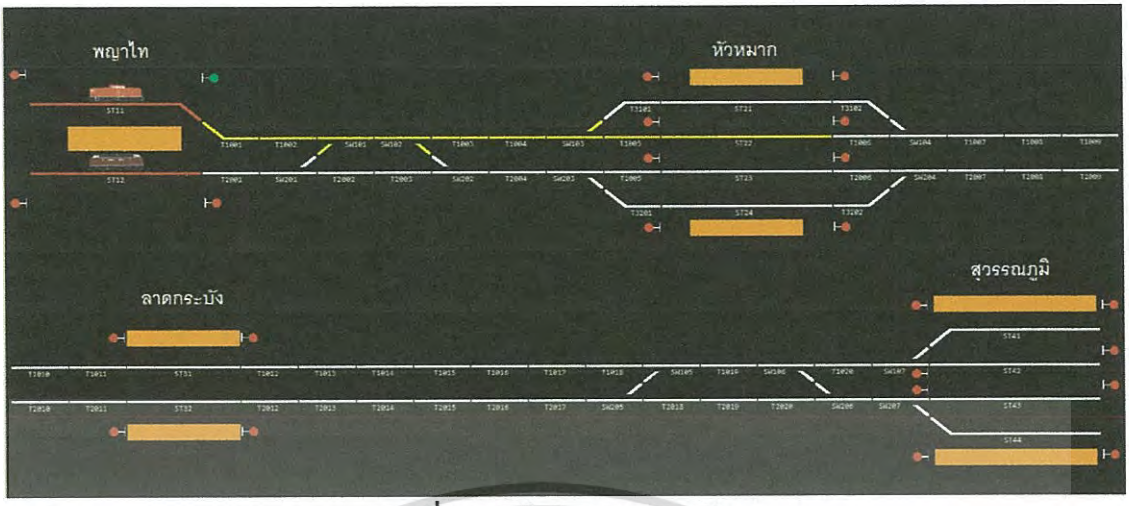
ตอนทางสีเหลือง คือ ตอนทางที่ถูกจอง

ตอนทางสีแดง คือ ตอนทางที่กำลังใช้งานอยู่

สัญญาณไฟสีเขียว คือ อนุญาตให้รถไฟออกจากสถานีได้

สัญญาณไฟสีแดง คือ ไม่อนุญาตให้รถไฟออกจากสถานี

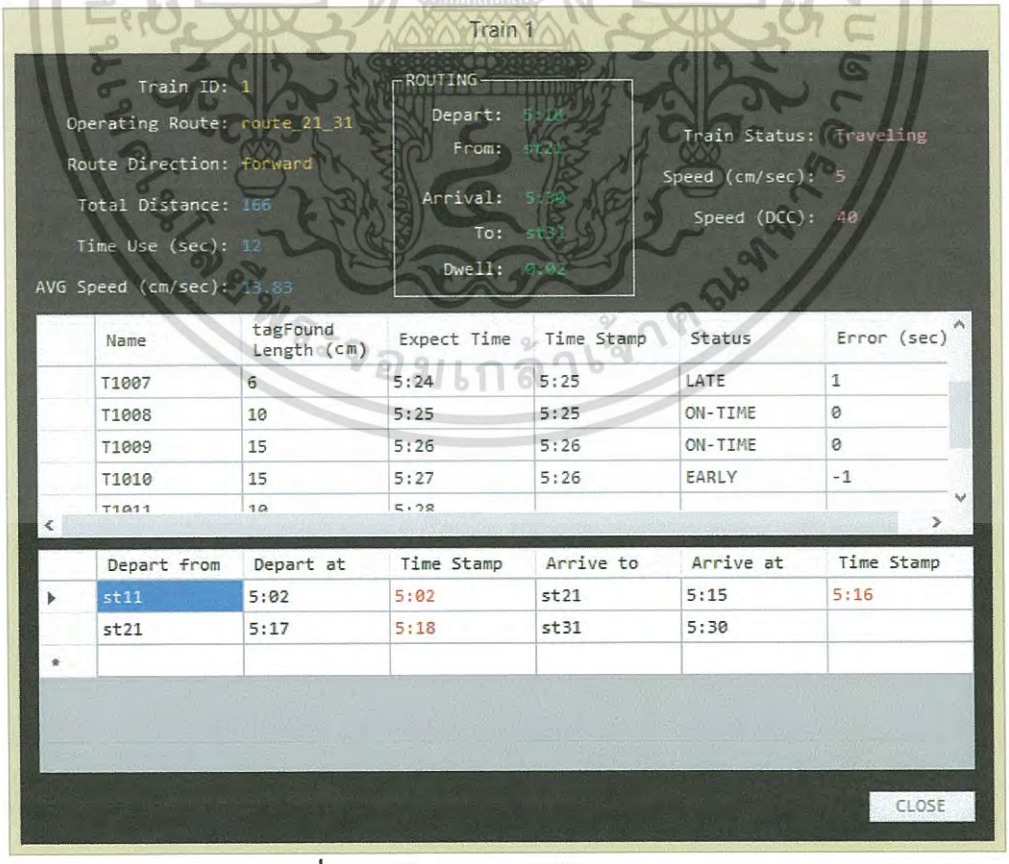
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 หน้าต่างแสดงผลหลัก

4.2.4 หน้าต่างรายละเอียดของขบวนรถ

เมื่อทำการคลิกที่ขบวนรถไฟ จะปรากฏหน้าต่างรายละเอียดของขบวนรถ โดยจะมีข้อมูลเกี่ยวกับขบวนรถ เช่น หมายเลขขบวนรถ เส้นทางที่กำลังใช้งานอยู่ ลักษณะของเส้นทาง ระยะทางรวมของเส้นทาง เวลาที่ต้องใช้ในเส้นทาง อัตราเร็วเฉลี่ยที่ต้องวิ่ง ความเร็วที่รถกำลังวิ่งอยู่ ตารางข้อมูลทำนายและผลบันทึกข้อมูลในการพบแท็ก เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 หน้าต่างรายละเอียดของขบวนรถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลทดลองในการเดินรถตามตารางต้นแบบ

ทำการบันทึกผลความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็กแต่ละแท็กในการเดินรถ และบันทึกลงในตาราง โดยจะแบ่งเป็นผลการบันทึกการเดินรถขบวนที่ 1 และผลการเดินรถขบวนที่ 2

4.3.1 ผลการบันทึกการเดินรถขบวนที่ 1

ผลการบันทึกความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็กของขบวนรถที่ 1 โดยอิงเส้นทางตามตารางเวลาต้นแบบ สามารถแสดงเป็นเส้นทางไปข้างหน้าในตารางที่ 4.3 – 4.5 และเส้นทางถอยกลับในตารางที่ 4.6 – 4.8 โดยจากตารางค่าเวลาเป็นบวก คือ การมาถึงแท็กช้ากว่ากำหนด และค่าเป็นลบ คือ การมาถึงแท็กเร็วกว่ากำหนด และสามารถเขียนสรุปความคลาดเคลื่อนของเวลาในการเข้าจอดที่สถานีของรถขบวนที่ 1 ได้ในตารางที่ 4.9 และกราฟรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.3 ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็กของรถขบวนที่ 1 ในเส้นทาง st11 -> st21

ตอนทาง	ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็ก (sec)					
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
st11	-	-	-	-	-	-
T1001	2	3	3	2	2	2.4
T1002	2	3	3	2	2	2.4
SW101	1	2	2	1	1	1.4
SW102	1	2	2	2	1	1.6
T1003	1	N/A	N/A	1	1	1.0
T1004	1	2	2	1	1	1.4
SW103	0	1	1	N/A	0	0.5
T3101	0	1	1	0	0	0.4
st21	1	1	1	0	1	0.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็กของรถขบวนที่ 1 ในเส้นทาง st21 -> st31

ตอนทาง	ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็ก (sec)					
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
st21	-	-	-	-	-	-
T3102	-1	0	0	1	1	0.2
SW104	0	1	1	1	1	0.8
T1007	0	1	1	1	1	0.8
T1008	0	1	1	1	1	0.8
T1009	0	1	1	1	1	0.8
T1010	1	0	0	0	1	0.4
T1011	0	0	0	0	0	0.0
st31	-1	0	0	1	1	0.2

ตารางที่ 4.5 ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็กของรถขบวนที่ 1 ในเส้นทาง st31 -> st41

ตอนทาง	ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็ก (sec)					
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
st31	-	-	-	-	-	-
T1012	2	3	3	3	3	2.8
T1013	3	3	3	3	3	3
T1014	3	3	3	3	3	3
T1015	3	4	4	4	4	3.8
T1016	4	4	4	4	4	4.0
T1017	4	4	4	4	4	4.0
T1018	3	4	4	3	3	3.4
SW105	N/A	4	4	N/A	N/A	4.0
T1019	3	3	3	3	4	3.2
SW106	3	N/A	N/A	3	3	3.0
T1020	7	N/A	N/A	N/A	N/A	7.0
SW107	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
st41	5	5	5	5	6	5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็กของรถขบวนที่ 1 ในเส้นทาง st41 -> st32

ตอนทาง	ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็ก (sec)					
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
st41	-	-	-	-	-	-
SW107	N/A	N/A	N/A	0	N/A	0.0
T1020	N/A	N/A	N/A	0	3	0.6
SW106	4	0	3	0	N/A	1.8
T1019	4	0	3	0	N/A	1.8
SW105	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
SW205	3	-1	N/A	-1	2	0.6
T2017	3	0	2	0	3	1.6
T2016	3	-1	2	N/A	3	1.4
T2015	3	0	2	N/A	3	1.6
T2014	3	N/A	N/A	N/A	N/A	3.0
T2013	N/A	N/A	N/A	N/A	3	3.0
T2012	4	1	3	N/A	3	2.2
st32	3	1	3	1	2	2.0

ตารางที่ 4.7 ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็กของรถขบวนที่ 1 ในเส้นทาง st32 -> st23

ตอนทาง	ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็ก (sec)					
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
st32	-	-	-	-	-	-
T2011	N/A	0	1	N/A	1	0.7
T2010	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
T2009	2	-1	N/A	N/A	1	0.7
T2008	1	0	0	N/A	0	0.3
T2007	1	0	0	-1	N/A	0.0
SW204	N/A	0	0	N/A	N/A	0.0
T2006	1	0	1	3	1	1.2
st23	1	1	1	3	0	1.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็กของรถขบวนที่ 1 ในเส้นทาง st23 -> st11

ตอนทาง	ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็ก (sec)					
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
st23	-	-	-	-	-	-
T2005	2	1	1	2	2	1.6
SW203	N/A	1	1	2	2	1.5
T2004	1	1	1	2	2	1.4
SW202	N/A	0	N/A	1	1	0.7
SW102	1	0	0	1	1	0.6
SW101	1	0	0	1	1	0.6
T1002	1	1	0	1	1	0.8
T1001	1	1	0	1	1	0.8
st11	1	1	1	1	1	1.0

ตารางที่ 4.9 ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการเข้าจอดที่สถานีของรถขบวนที่ 1

สถานี	ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการเข้าจอดสถานี (sec)					
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
st11	-	-	-	-	-	-
st21	1	1	1	0	1	0.8
st31	-1	0	0	1	1	0.2
st41	5	5	5	5	6	5.2
st32	3	1	3	1	2	2.0
st23	1	1	1	3	0	1.2
st11	1	1	1	1	1	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.5 ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการเข้าจอดที่สถานีของขบวนรถที่ 1

4.3.2 ผลการบันทึกการเดินรถขบวนที่ 2

ผลการบันทึกความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็กของขบวนรถที่ 2 โดยอิงเส้นทางตามตารางเวลาต้นแบบ สามารถแสดงเป็นเส้นทางไปข้างหน้าในตารางที่ 4.10 – 4.12 และเส้นทางถอยกลับในตารางที่ 4.13 – 4.15 และสามารถเขียนสรุปความคลาดเคลื่อนของเวลาในการเข้าจอดที่สถานีของรถขบวนที่ 2 ได้ในตารางที่ 4.16 และเป็นกราฟในรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.10 ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็กของรถขบวนที่ 2 ในเส้นทาง st12 -> st22

ตอนทาง	ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็ก (sec)					
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
st12	-	-	-	-	-	-
T2001	2	1	2	2	2	1.8
SW201	2	1	2	2	2	1.8
SW101	1	1	2	2	2	1.8
SW102	2	1	2	2	2	1.8
T1003	1	1	1	1	1	1.0
T1004	1	1	1	1	1	1.0
SW103	0	0	1	1	N/A	0.5
T1005	0	0	0	0	0	0.0
st22	1	0	1	0	1	0.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็กของรถขบวนที่ 2 ในเส้นทาง st22 -> st31

ตอนทาง	ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็ก (sec)					
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
st22	-	-	-	-	-	-
T1006	1	1	0	1	1	0.8
SW104	0	0	1	0	0	0.2
T1007	0	1	0	1	1	0.6
T1008	0	0	1	0	0	0.2
T1009	0	0	0	0	0	0.0
T1010	0	0	0	0	0	0.0
T1011	0	0	0	0	0	0.0
st31	0	0	0	0	0	0.0

ตารางที่ 4.12 ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็กของรถขบวนที่ 2 ในเส้นทาง st31 -> st43

ตอนทาง	ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็ก (sec)					
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
st31	-	-	-	-	-	-
T1012	3	3	3	3	3	3.0
T1013	3	3	4	3	3	3.2
T1014	4	4	4	3	3	3.6
T1015	4	4	4	4	4	4.0
T1016	4	4	4	4	4	4.0
T1017	4	4	4	4	4	4.0
T1018	4	4	4	4	4	4.0
SW105	N/A	4	4	N/A	4	4.0
T1019	N/A	4	4	4	3	3.8
SW106	3	7	N/A	3	6	4.8
SW206	N/A	5	N/A	N/A	N/A	5.0
SW207	5	5	4	4	N/A	4.5
st43	5	5	4	6	5	5.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็กของรถขบวนที่ 2 ในเส้นทาง st43 -> st32

ตอนทาง	ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็ก (sec)					
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
st43	-	-	-	-	-	-
SW207	N/A	4	N/A	N/A	N/A	4.0
SW206	3	N/A	N/A	N/A	N/A	3.0
T2020	N/A	4	N/A	3	N/A	3.5
T2019	4	4	N/A	3	N/A	3.7
T2018	4	4	N/A	3	3	3.5
SW205	N/A	4	N/A	N/A	3	3.5
T2017	5	5	4	4	4	4.4
T2016	4	N/A	N/A	3	3	3.3
T2015	N/A	5	4	N/A	3	4.0
T2014	N/A	5	N/A	N/A	4	4.5
T2013	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
T2012	5	N/A	4	4	4	4.3
st32	5	5	5	5	4	4.8

ตารางที่ 4.14 ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็กของรถขบวนที่ 2 ในเส้นทาง st32 -> st24

ตอนทาง	ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็ก (sec)					
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
st32	-	-	-	-	-	-
T2011	1	1	1	1	1	1.0
T2010	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
T2009	1	1	1	1	N/A	1.0
T2008	0	0	0	0	N/A	0.0
T2007	0	N/A	0	N/A	0	0.0
SW204	N/A	N/A	0	0	N/A	0.0
T3202	1	1	1	0	0	0.6
st24	1	1	1	1	1	1.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็กของรถขบวนที่ 2 ในเส้นทาง st24 -> st12

ตอนทาง	ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการพบแท็ก (sec)					
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
st24	-	-	-	-	-	-
T3201	N/A	1	N/A	-1	1	0.3
SW203	4	1	N/A	0	1	1.5
T2004	4	0	N/A	0	0	1.0
SW202	3	1	0	N/A	0	1.0
T2003	2	-1	0	-1	0	0.0
T2002	2	0	0	0	-1	0.2
SW201	2	0	-1	0	0	0.2
T2001	1	0	-1	0	0	0.0
st12	3	0	3	3	3	2.4

ตารางที่ 4.16 ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการเข้าจอดที่สถานีของรถขบวนที่ 2

สถานี	ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการเข้าจอดที่สถานี (sec)					
	1	2	3	4	5	เฉลี่ย
st12	-	-	-	-	-	-
st22	1	0	1	0	1	0.6
st31	0	0	0	0	0	0.0
st43	5	5	4	6	5	5.0
st32	5	5	5	5	4	4.8
st24	1	1	1	1	1	1.0
st12	3	0	3	3	3	2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.6 ความคลาดเคลื่อนของเวลาในการเข้าจอดที่สถานีของขบวนรถที่ 2

4.4 ทดสอบการจองเส้นทาง การเข้าใช้ตอนทางและการคืนตอนทาง

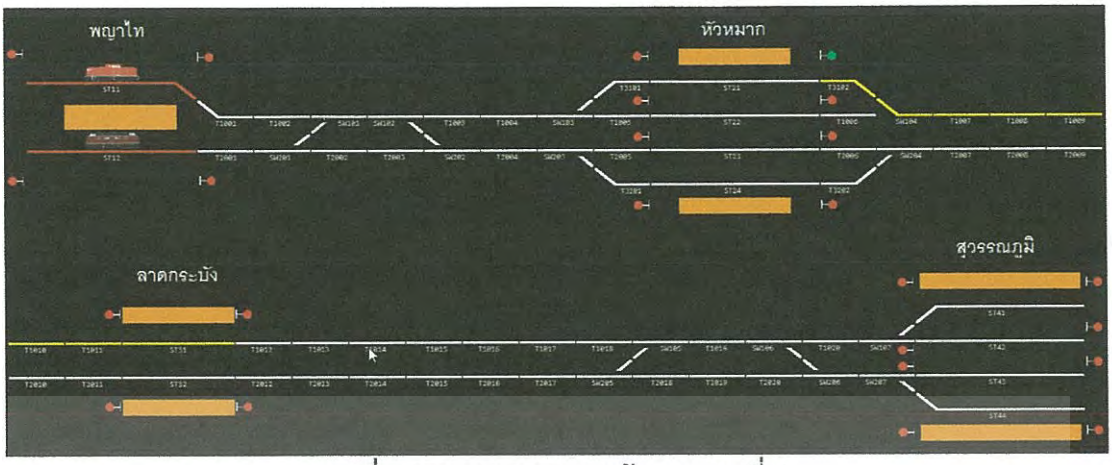
ทำการทดสอบการจองเส้นทาง การเข้าใช้และการคืนตอนทางจากผลการออกแบบตรรกะซอฟต์แวร์ในหัวข้อที่ 3 ว่าหลักการที่ได้ออกแบบมานั้นสามารถทำงานได้ตรงตามต้องการหรือไม่

4.4.1 การจองเส้นทาง

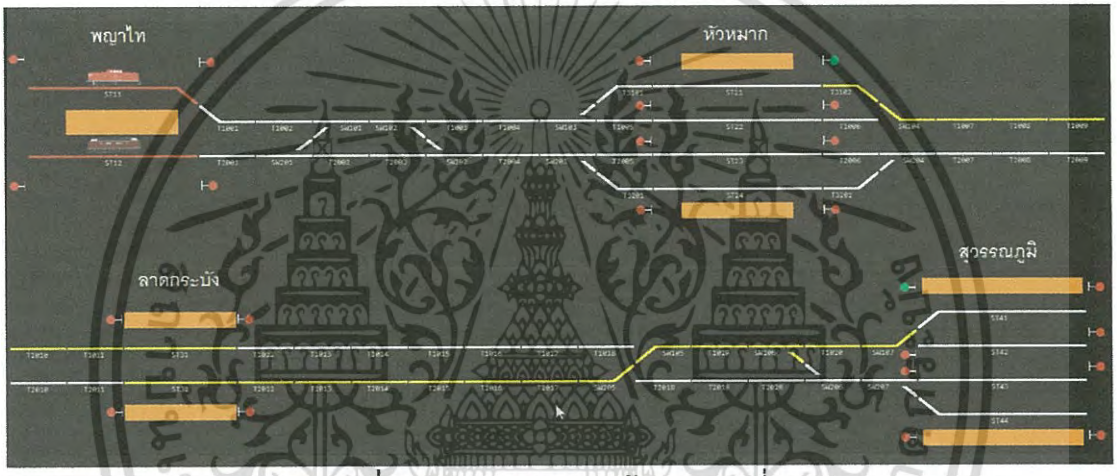
ทำการทดสอบการจองเส้นทาง โดยการจองเส้นทางโดยผู้ใช้ สามารถทำได้โดยคลิกซ้ายที่เสาสัญญาณที่ต้องการจะปล่อยรถออก จากนั้นเลือกเสาสัญญาณที่สถานีถัดไปที่เส้นทางสอดคล้องกัน เมื่อการจองสำเร็จแล้ว ทั้งเส้นทางที่ผู้ใช้ทำการจองจะแปรเปลี่ยนเป็นสีเหลือง รวมถึงเสาสัญญาณไฟสถานีต้นทางก็จะเปลี่ยนเป็นสีเขียวด้วย และผู้ใช้สามารถยกเลิกเส้นทางที่ถูกจองไปได้ โดยคลิกขวาที่เสาสัญญาณแล้วเลือก “Cancel” เพื่อทำการยกเลิกการจองเส้นทาง โดยรายละเอียดการทดสอบจะแสดงประกอบรูปที่ 4.7-4.11

จากรูปที่ 4.7 ทำการจองเส้นทางโดยคลิกที่เสาสัญญาณ st21R หรือเสาสัญญาณทางด้านขวาของสถานีที่ 2 ชานชาลาที่ 1 สัญลักษณ์สัญญาณไฟจะเปลี่ยนจากไฟแดงเป็นไฟแดงกะพริบ จากนั้นคลิกที่เสาสัญญาณ st31R เพื่อจองเส้นทางจาก st21 -> st31 จะพบว่าตอนทางภายในเส้นทางนั้นได้เปลี่ยนจากสีขาว หรือสถานะว่าง เป็นสีเหลือง คือสถานะถูกจอง และเมื่อทุกตอนทางในเส้นทางถูกจองเรียบร้อย จะเห็นได้ว่าไฟที่เสาสัญญาณ st21R เปลี่ยนจากสีแดง เป็นสีเขียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

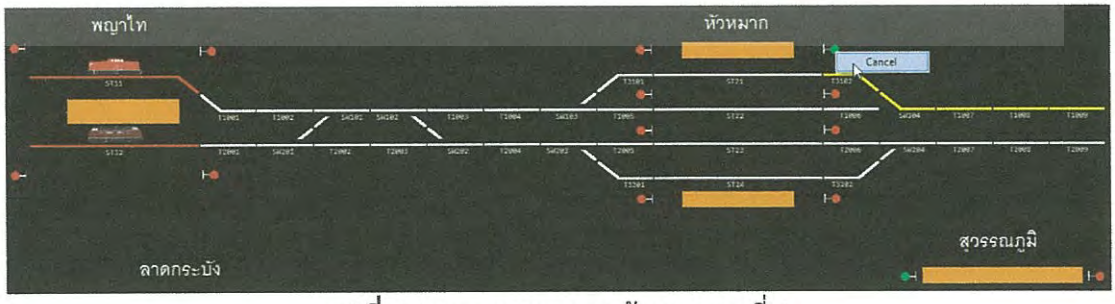


รูปที่ 4.7 ทดสอบการจองเส้นทางภาพที่ 1



รูปที่ 4.8 ทดสอบการจองเส้นทางภาพที่ 2

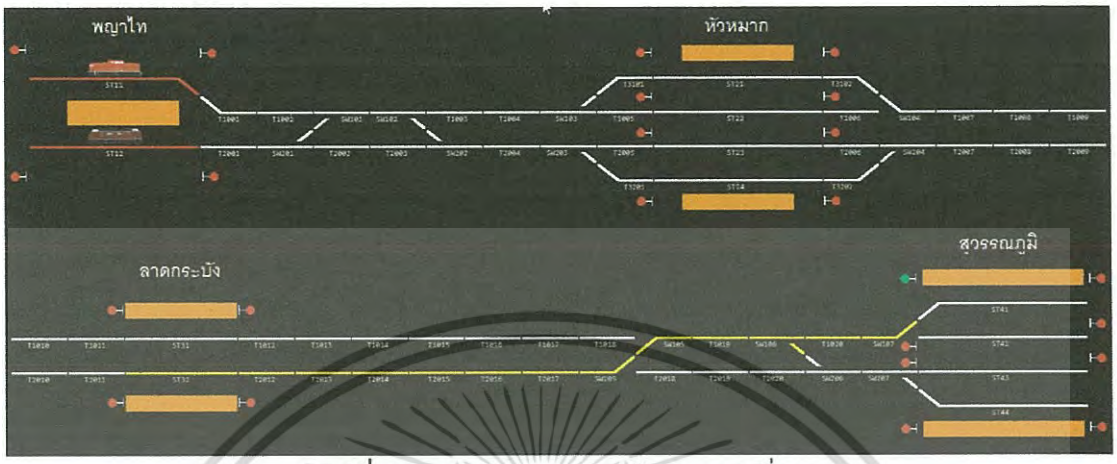
จากรูป 4.8 ทำการจองเส้นทางอีกหนึ่งเส้นทาง โดยจองเส้นทางจาก st41 -> st32 การจองเส้นทางสำเร็จ เนื่องจากทุกตอนทางในเส้นทางนี้ว่างอยู่ รวมถึงจะสังเกตเห็นประแจว่าได้ถูกเปลี่ยนทิศทางไปในทางที่ถูกต้องทั้งหมดด้วย จากนั้นทำการจองเส้นทางจาก st22 -> st31 พบว่าเส้นทางไม่สามารถจองได้เนื่องจากตอนทางได้ทับซ้อนกันอยู่



รูปที่ 4.9 ทดสอบการจองเส้นทางภาพที่ 3

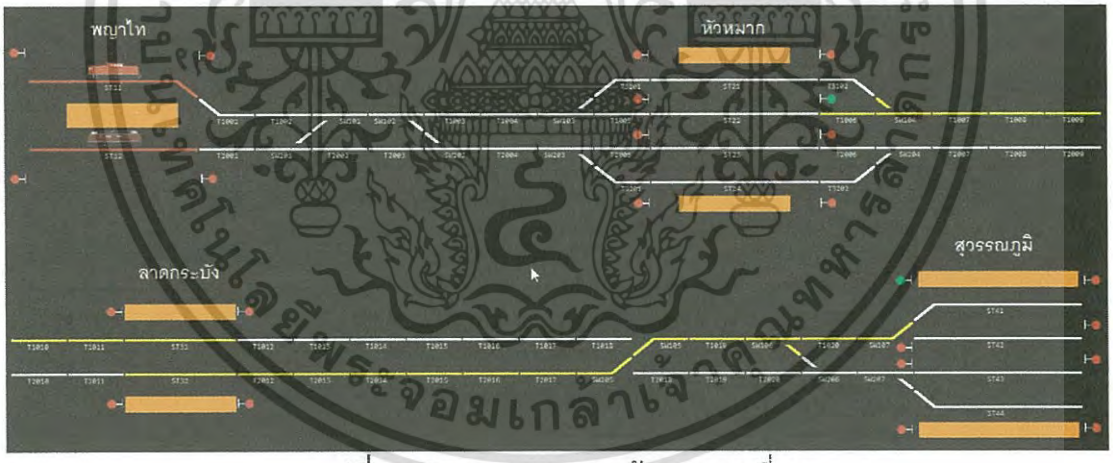
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 ทำการยกเลิกการจองเส้นทาง st21 -> st31 โดยคลิกขวาที่เสาสัญญาณ st21R แล้วเลือก “Cancel”



รูปที่ 4.10 ทดสอบการจองเส้นทางภาพที่ 4

จากรูปที่ 4.10 จะสังเกตเห็นได้ว่าตอนทางทั้งหมดในเส้นทาง st21 -> st31 ได้เปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีขาว หรือก็คือตอนทางได้ถูกคืนเป็นสถานะว่างสู่ระบบแล้ว



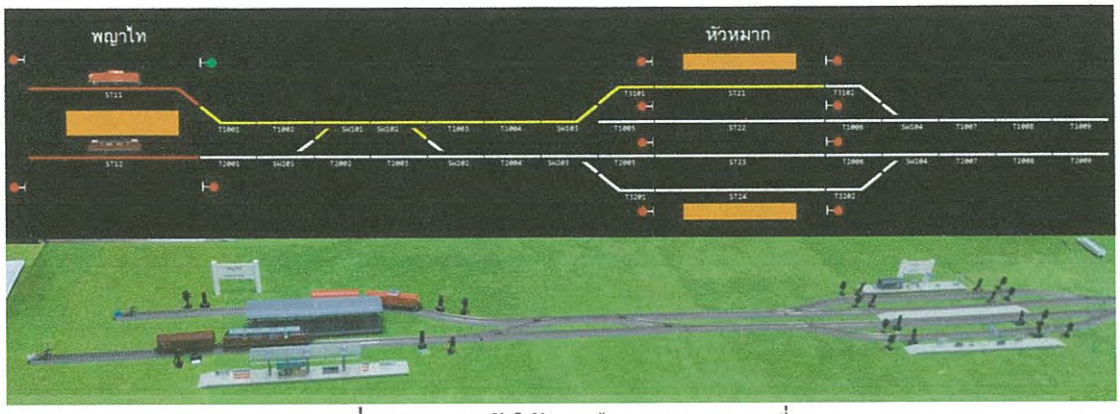
รูปที่ 4.11 ทดสอบการจองเส้นทางภาพที่ 5

จากรูปที่ 4.11 ทำการจองเส้นทาง st22 -> st31 อีกครั้งหนึ่งหลังจากยกเลิกเส้นทาง st21 -> st31 ที่ซ้ำซ้อนกันแล้ว และพบว่าเส้นทางสามารถจองได้สำเร็จ

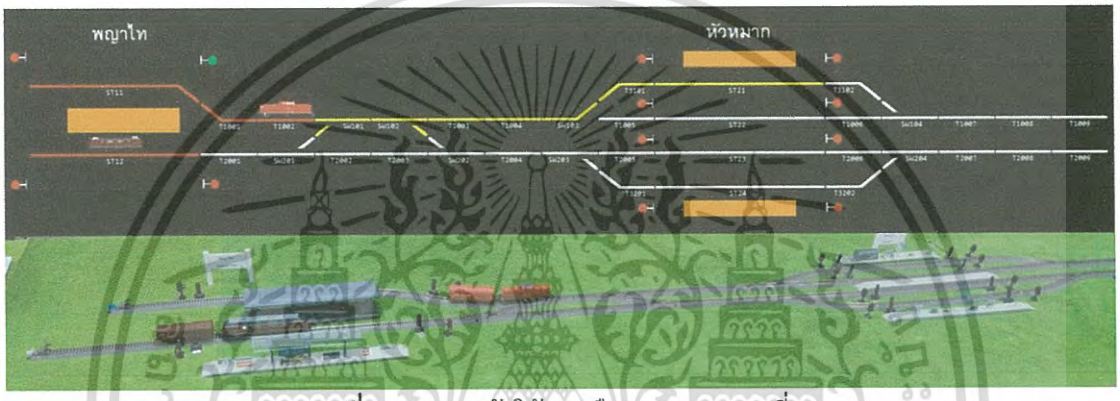
4.4.2 การเข้าใช้และคืนตอนทาง

ทดสอบการเข้าใช้และคืนตอนทางในระบบ โดยทำการเดินรถขบวนที่ 1 และสังเกตการเคลื่อนที่ของโมเดลรถไฟจริง และนำมาเทียบกับจอแสดงผล พบว่าซอฟต์แวร์สามารถแสดงผลตำแหน่งรถไฟและสถานะของตอนทางได้ถูกต้องตามต้องการ

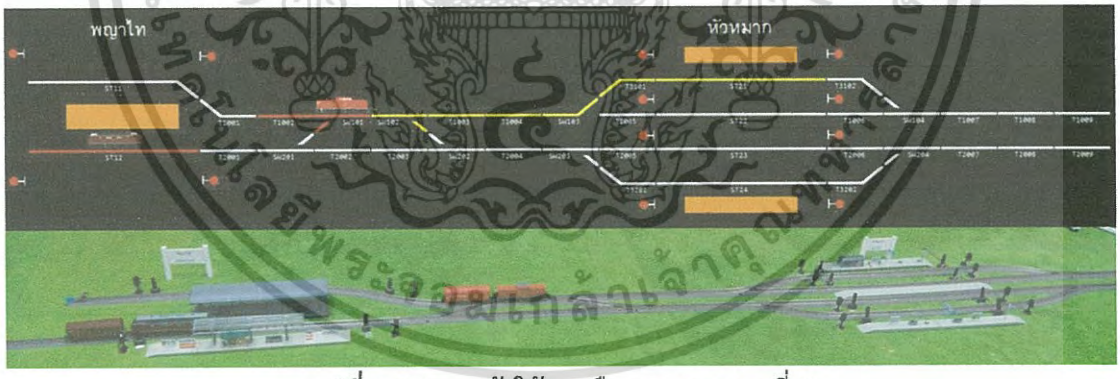
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 การเข้าใช้และคืนตอนทางภาพที่ 1



รูปที่ 4.13 การเข้าใช้และคืนตอนทางภาพที่ 2



รูปที่ 4.14 การเข้าใช้และคืนตอนทางภาพที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้กล่าวถึงการศึกษา ออกแบบ และพัฒนาระบบควบคุมรถไฟและอาณัติสัญญาณสำหรับรถไฟจำลอง โดยเริ่มจากศึกษาระบบควบคุมการเดินรถที่ใช้งานจริง ศึกษาเงื่อนไขของระบบอาณัติสัญญาณ จากนั้นทำการออกแบบระบบในส่วนต่าง ๆ เพื่อนำมาเลียนแบบระบบควบคุมการเดินรถจริงที่ได้ศึกษาไปแล้ว โดยการทำระบบนี้ถูกออกแบบขึ้นมาโดยมีทั้งส่วนของซอฟต์แวร์ ที่ทำหน้าที่เสมือนเป็นศูนย์ควบคุมกลางการเดินรถ คือทำหน้าที่อนุญาต หรือไม่อนุญาตให้รถเคลื่อนที่ ซึ่งการพิจารณาอนุญาตหรือไม่อนุญาตนี้ คือการพิจารณาตามหลักของระบบอาณัติสัญญาณที่ได้ศึกษามาเช่นกัน อีกทั้งเรายังได้ทำการออกแบบให้ซอฟต์แวร์สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของขบวนรถได้ โดยอาจมองว่าเป็นระบบการเดินรถแบบไร้คนขับก็ได้ หรือจะมองว่าเป็นระบบการเดินรถแบบมีคนขับ เพียงแต่ซอฟต์แวร์กลางนี้แฝงตัวทำหน้าที่เป็นคนขับไปในตัวด้วยเลย โดยตัวซอฟต์แวร์นั้นได้ออกแบบมาในเชิงของ OOP และใช้ภาษา VB.NET ในการพัฒนา

โดยการจำลองระบบอาณัติสัญญาณนั้น ก็จำเป็นจะต้องมีอุปกรณ์อาณัติสัญญาณ ที่เอาไว้ติดต่อระหว่างศูนย์ควบคุมกลางกับตัวรถไฟ ซึ่งในระบบที่ออกแบบนี้ มีด้วยกัน 2 อุปกรณ์ คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ให้สัญญาณแก่คนขับ หรือก็คือเสาไฟสัญญาณนั่นเอง โดยได้เลือกใช้หลอด LED สีแดงและเขียวมาเลียนแบบเป็นสัญญาณไฟสองท่า และอุปกรณ์อีกอย่างหนึ่งก็คือ อุปกรณ์บอกตำแหน่งรถไฟ โดยได้นำเทคโนโลยี RFID และ XBee มาใช้ โดยตัวอุปกรณ์นี้ถ้าให้เทียบกับระบบจริงก็อาจจะบอกได้ว่ามีความคล้ายคลึงกับอุปกรณ์ที่ชื่อบาลีสมากที่สุด แต่ว่าการทำงานของอุปกรณ์จำลองนี้ไม่ได้มีความสามารถเทียบเท่ากับบาลีสจริง ๆ เนื่องจากโมเดลที่ใช้ประยุกต์ทำกับระบบจำลองนั้นมีขนาดเล็ก ทำให้ขนาดของอุปกรณ์ที่ติดตั้งได้ต้องมีขนาดเล็กตามด้วย ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่ปัญหาสำคัญอีกปัจจัยหนึ่งของการพัฒนาระบบจำลอง

จากผลการทดลองที่ลองทดสอบดูผลการจำลองเดินรถในเส้นทางต้นแบบนั้น พบว่าสามารถควบคุมการเดินรถให้ตรงตามเวลาได้ในระดับหนึ่ง โดยมีความผิดพลาดของเวลาอยู่ที่ 0-3 วินาที ส่วนผลความผิดพลาดของเวลาในช่วงการเดินรถจาก st3x ไปยัง st4x ที่เห็นว่ามีค่ามากสูงสุดถึง 6 วินาทีนั้น เกิดขึ้นมาเนื่องจากเส้นทางระหว่างสถานี 3 กับสถานี 4 นั้นมีระยะห่างมากจนทำให้รถต้องวิ่งด้วยความเร็วสูงสุดที่ระบบกำหนด นั่นหมายความว่าถ้าเกิดการขัดข้องแม้เพียงเล็กน้อย เช่น ความเร็วลดลงระหว่างทางเนื่องจากตอนทางไม่เรียบเสมอและทำให้สัญญาณไฟจากรางขาดช่วงบางจังหวะ หรือรถออกตัวช้ากว่ากำหนด ซึ่งจากผลบันทึกในทุก ๆ ตารางทำให้ทราบว่าการขัดข้องเหล่านี้เกิดอยู่เป็นประจำ และในกรณีของการเดินรถระหว่างสถานีที่สถานี 3 และ 4 ด้วยความเร็วสูงสุดเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็วกลางที่คำนวณได้นี้ เมื่อเกิดการล่าช้าเนื่องด้วยปัญหาที่กล่าวมา จะทำให้ขบวนรถไม่สามารถกลับคืนมาวิ่งให้ตรงตามตารางได้อีกต่อไป เนื่องจากไม่สามารถเร่งความเร็วเกินข้อกำหนดของระบบได้ และนอกจากนั้น ยังทำการทดสอบการจองเส้นทาง ซึ่งเป็นหลักสำคัญอย่างหนึ่งในการเดินรถให้ปลอดภัยตามกฎของระบบอาณัติสัญญาณ และผลการทดสอบพบว่าซอฟต์แวร์สามารถทำงานได้ถูกต้องตามหลักจริง ไม่ว่าจะเป็นการจองเส้นทาง การสั่งงานเสาไฟอนุญาตหรือไม่อนุญาต รวมถึงการเข้าใช้และการคืนตอนทางด้วยเช่นกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

การพัฒนาระบบควบคุมรถไฟและระบบอาณัติสัญญาณสำหรับรถไฟจำลองในวิทยานิพนธ์นี้ ถึงแม้จะพยายามเลียนแบบการทำงานมาจากระบบจริงมากที่สุด แต่ก็มีข้อมูลรายละเอียดปลีกย่อยอีกมากมายที่ไม่ได้ถูกนำมาคำนวณ เช่น ระบบเบรกของรถไฟนั้น ไม่ใช่สั่งให้รถไฟหยุดจะสามารถหยุดได้เลย รถไฟแต่ละขบวนมีคุณลักษณะที่เรียกว่า Breaking Curve ที่แตกต่างกัน เนื่องด้วยความแตกต่างของทั้งอุปกรณ์ระบบเบรกภายในเอง หรือความแตกต่างกันของน้ำหนักที่ส่งผลให้ระยะในการหยุดรถต่างกัน ซึ่งนอกจากระยะหยุดรถแล้ว ระยะในการเร่งก็แตกต่างเช่นเดียวกัน เสาไฟสัญญาณในระบบจริงก็ไม่ได้มีเพียงชนิดเดียวเหมือนกับในระบบจำลองนี้ ดังนั้นถ้าต้องการให้ระบบเสมือนจริงมากกว่านี้ก็ควรจะมีการพัฒนาต่อยอดเพิ่มยิ่งขึ้นไป รวมถึงในระบบนี้ได้ปูทางการทำระบบจำลองขึ้นมา แต่หน่วยต่าง ๆ ในระบบยังไม่ถูกจัดให้เสมือนจริง กล่าวคือ ระบบยังคงใช้หน่วยระยะทางเป็น cm ตามโมเดลจริง และใช้หน่วยเวลาเป็นวินาทีตามเวลาจริง หากแต่ต้องการให้เป็นระบบจำลองเสมือนจริงก็ควรจะนำส่วนนี้ไปคิดทอนอัตราส่วนทำสเกลใหม่ โดยตัวโมเดลนั้นมีมาตรฐานสเกลอยู่แล้ว ที่ 1:87 หากแต่เป็นเวลาต่างหากที่ต้องคิดคำนวณความสัมพันธ์ให้ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] Wang Zhongkai, Shi Tianyun, Zhang Weijiao, Wang Hui. "Model and Algorithm for the Intergrative Scheduling of EMU Utilization Plan and Maintenance Plan." **China National Knowledge Infrastructure (CNKI).** Chaina Railway Science. 2012.

[2] Hu Hui, Keping Li, Xiaoming Xu. "A Multi-objective Train-scheduling Optimization Model Considering Locomotive Assignment and Segment Emission Constraints for Energy Saving." **Journal of Modern Transportation.** Academy Publisher. 2013 : 9-16.

[3] Zhenhuan He, Lei Nie, Huiling Fu. "Service Planning System for Large-scale High Speed Railway Network." **Journal of Software.** 2014 : 1121-1128.

[4] Rag-Gyo Jeong, Baek-Hyun Kim, Yong-Ki Yoon. "A Drive-less Operating by Communication Based Train Control." **Electrical Machines and Systems (ICEMS).** 2008.

[5] Goossens, Jan-Willem, Stan van Hoesel, Leo Kroon. "On Solving Multi-type Railway Line Planning Problems." **European Journal of Operational Research.** 2006 : 403-424.

[6] C Hirai, N Tomii. "A Train Traffic Control Simulation with Pasengers' Flowing Model." **International Conference on Development in Mass Transit Systems.** 1998 : 403-424.

[7] นคร จันทศร. 2559. **ช่างรถไฟ : ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ โครงการจัดตั้งสถาบันพัฒนาเทคโนโลยีระบบขนส่งทางรางแห่งชาติ.** พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.

[8] มานะชัย วัฒนหัตถกรรม และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. 2559. **ระบบควบคุมรถไฟและการอาณัติสัญญาณเบื้องต้น.** พิมพ์ครั้งที่ 1. ปทุมธานี : สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.

[9] Railway Technology Web pages Team. "Route Signalling." [online]. www.railway-technical.com/sigtxt5.shtml : สืบค้นเมื่อ พ.ศ. 2560.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[10] Joern Pachl. 2002. **Railway Operation and Control.** Rochester WA : Gorham Printing.

[11] Emre Dincel, Oytun Eris, Salman Kurtulan. "Automata-Based Railway Signaling and Interlocking System Design." **IEEE Antennas and Propagation Magazine.** 2013(55) : 308-319.

[12] Maurizio Palumbo. 2013. **Railway Signalling since the birth to ERTMS.** Italy : railwaysignaling.eu.

[13] ณัฐพงษ์ วารีประเสริฐ และสุธี พงศาสกุลชัย. 2552. **โครงสร้างข้อมูลและอังกอริทึม.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ เคทีพี.

[14] Wikipedia. "Linked List." [online]. en.wikipedia.org/wiki/Linked_list : สืบค้นเมื่อ พ.ศ. 2560.

[15] Wikipedia. "Queue." [online]. en.wikipedia.org/wiki/Queue_(abstract_data_type) : สืบค้นเมื่อ พ.ศ. 2560.

[16] Wikipedia. "Deque." [online]. en.wikipedia.org/wiki/Double-ended_queue : สืบค้นเมื่อ พ.ศ. 2560.

[17] อานนท์ หลงหัน. "การเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ OOP (OBJECT ORIENTED PROGRAMMING)." [online]. arit.rmutsv.ac.th/th/blogs/80-การเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ-oop-object-oriented-programming-537 : สืบค้นเมื่อ พ.ศ. 2560.

[18] Eknarong Nukaew. "มาทำความรู้จักกับคำว่า OOP หรือ Object Oriented Programming กันดีกว่า." [online]. oknation.nationtv.tv/blog/bonaachsolution/2007/11/20/entry-1 : สืบค้นเมื่อ พ.ศ. 2560.

[19] Wikipedia. "Polymorphism (computer science)." [online]. en.wikipedia.org/wiki/Polymorphism_(computer_science) : สืบค้นเมื่อ พ.ศ. 2560.

[20] Mark Gurries. "DCC." [online]. sites.google.com/site/markgurries/home : สืบค้นเมื่อ พ.ศ. 2560.

[21] DCC Wiki Team. "DCC." [online]. www.dccwiki.com/Main_Page : สืบค้นเมื่อ พ.ศ. 2560.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[22] Wikipedia. "Digital Command Control." [online]. en.wikipedia.org/wiki/Digital_Command_Control : สืบค้นเมื่อ พ.ศ. 2560.

[23] อรรณพ ขันธิกุล. 2553. **ออกแบบและติดตั้งระบบ Wireless LAN.** พิมพ์ครั้งที่ 2. นนทบุรี : ไอดีซีฯ.

[24] เรืองไกร รังสิพล. 2544. **เจาะระบบ TCP/IP จุดอ่อนของโปรโตคอลและวิธีป้องกัน.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพ : โปรวิชั่น.

[25] Behrouz A. Forouzan, BeAnza College, Sophia Chung Fegan. **Data Communications and Networking.** 4th ed. Singapore : McGrill-Hill Education (Asia).

[26] Wikipedia. "IPv4." [online]. en.wikipedia.org/wiki/IPv4 : สืบค้นเมื่อ พ.ศ. 2560.

[27] J. Postel. **User Datagram Protocol.** Internet Standard. RFC 768. 28 August 1980.

[28] Roco Model Railway. 2015. **Z21 LAN Protokoll Spezifikation.** [Documentation]. German.

[29] รศ.ณรงค์ บวบทอง. **การสื่อสารแบบอนุกรม.** [Slide]. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

[30] Wikipedia. "Serial communication." [online]. en.wikipedia.org/wiki/Serial_communication : สืบค้นเมื่อ พ.ศ. 2560.

[31] Arduino Founder Team. "Arduino." [online]. www.arduino.cc : สืบค้นเมื่อ พ.ศ. 2560.

[32] ThaiEasyElec Team. "Arduino คืออะไร." [online]. www.thaieasyelec.com/article-wiki/basic-electronics/บทความ-arduino-คืออะไร-เริ่มต้นใช้งาน-arduino.html : สืบค้นเมื่อ พ.ศ. 2560.

[33] V. Daniel Hunt, Albert Puglia, Mike Puglia. 2007. **A Guide to Radio Frequency Identification.** 1st ed. United State of America : Wiley-Interscience.

[34] ThaiEasyElec Team. "RFID พร้อมตัวอย่างการต่อใช้งาน." [online]. www.thaieasyelec.com/article-wiki/basic-electronics/rfid-basic.html : สืบค้นเมื่อ พ.ศ. 2560.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[35] Ray Floyd. "Passive vs. Semi-Passive vs. Active Tags in RFID." [online]. news.thomasnet.com/imt/2014/03/04/passive-vs-semi-passive-vs-active-tags-in-rfid : สืบค้นเมื่อ พ.ศ. 2560.

[36] Digi International Inc. "XBee." [online]. docs.digi.com/display/DIGI/Home : สืบค้นเมื่อ พ.ศ. 2560.

[37] ThaiEasyElec Team. "XBee API Mode Tutorial and LAB." [online]. www.thaieasyelec.com/article-wiki/embedded-electronics-application/xbee-api-mode-tutorial-and-lab.html : สืบค้นเมื่อ พ.ศ. 2560.

[38] Digi International Inc. 2009. **XBee/ XBee-PRO RF Modules.** [Documentation]. United States.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.
การควบคุมรถไฟจำลอง Roco

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

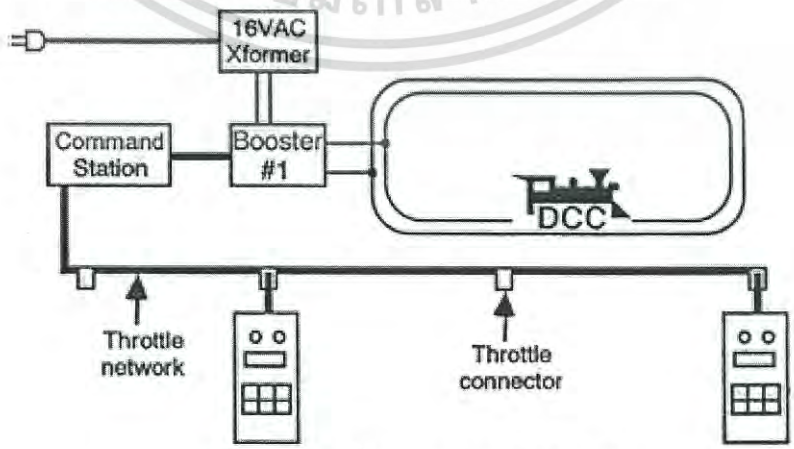
ในการวิจัยนี้ ได้นำชุดรถไฟจำลองของ Roco มาใช้ควบคู่ในการจำลองการทำระบบควบคุมรถไฟและอาณัติสัญญาณรถไฟ โดยชุดรถไฟจำลองนี้ ถูกจำลองด้วยอัตราส่วนเสมือนจริงที่อัตราส่วน 1:87 และใช้ระบบราง Standard Gauge (1.435 m) ซึ่งรถไฟจำลอง รวมถึงประแจรถไฟจำลองนี้จะสามารถสั่งการทำงานได้ด้วยระบบดิจิทัล ซึ่งมีมาตรฐานของระบบรถไฟจำลองโดยเฉพาะ เรียกว่า DCC (Digital Command Control) โดยรถไฟจำลองของ Roco นี้ ใช้กล่องควบคุม z21 เพื่อแปลงคำสั่งจาก UDP Packets ที่ส่งมาโดยคอมพิวเตอร์ผ่านเครือข่ายไร้สายและมีสาย ให้เป็นสัญญาณ DCC เข้าไปในรางรถไฟจำลองเพื่อควบคุมรถไฟและประแจจำลอง

1. Digital Command Control

DCC [20-22] เป็นมาตรฐานของระบบควบคุมรถไฟจำลองแบบดิจิทัลโดยเฉพาะ โดยภายในตอนไฟเดียวกันรถไฟแต่ละขบวนจะสามารถถูกควบคุมได้อย่างอิสระ ซึ่งโพรโทคอลนี้ถูกให้คำจำกัดความโดยกลุ่ม Digital Command Control Working Group ของ National Model Railroad Association (NMRA) และได้ให้ชื่อโพรโทคอลนี้ว่า DCC

ระบบ DCC ขั้นพื้นฐานนั้น จะประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลัก 5 ส่วน คือ ส่วนบังคับ (Throttle) สถานีสั่งการ (Command Station) ส่วนขยายสัญญาณ (Booster) ส่วนการถอดรหัส (Decoder) และส่วนจ่ายไฟ (Power Supply) ซึ่งระบบส่วนใหญ่มักจะมี Throttle Network เพิ่มเข้ามา เพื่อให้ Throttle หลายตัวสามารถคุยกับ Command Station ได้ โดยรูปแบบโครงสร้างการเชื่อมต่อสามารถแสดงได้ดังรูปที่ ก.1 และสามารถอธิบายการทำงานเป็นลำดับขั้นได้ดังต่อไปนี้

- ข้อมูลการสั่งการว่าอยากให้รถขบวนใดทำอะไรนั้นจะรับเข้ามาทางส่วน Throttle เข้าไปยังระบบ โดย Throttle จะส่งคำสั่งผ่าน Throttle Network เข้าไปยังสถานีสั่งการ
- สถานีสั่งการจะสร้าง Digital Packet และส่งต่อไปยังส่วนขยายสัญญาณ ซึ่งบางระบบอาจจะยุบส่วนของสถานีสั่งการและส่วนขยายไว้ด้วยกันได้

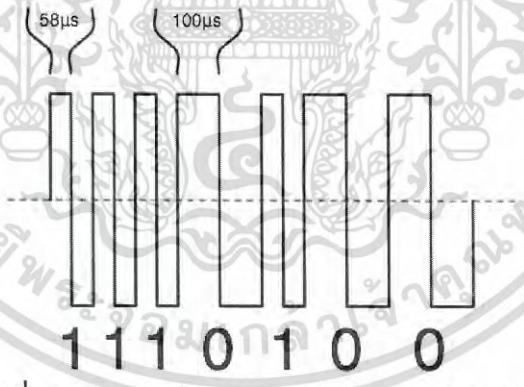


รูปที่ ก.1 โครงสร้างของระบบ DCC [21]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ส่วนขยายสัญญาณจะรวมไฟสัญญาณจากส่วนจ่ายไฟเข้ากับ Digital Packet ที่ได้รับมาและส่งเข้าไปยังรางรถไฟผ่านสายไฟซึ่งเชื่อมอยู่กับราง
- หัวรถไฟที่ติดตั้งตัวถอดรหัส DCC อยู่ จะถูกตั้งแอดเดรสที่แตกต่างกันสำหรับจำแนกการสั่งการของแต่ละขบวน เมื่อมีชุดคำสั่งส่งเข้ามา ตัวถอดรหัสจะทำการอ่านตรวจสอบดูว่าชุดคำสั่งมีความเสียหายหรือไม่ ถ้าไม่มีจะเข้าไปดูที่แอดเดรสว่าคำสั่งที่ส่งมานั้นส่งมาควบคุมยังแอดเดรสตัวเองหรือไม่ ถ้าใช่ตัวถอดรหัสก็จะทำตามคำสั่ง แต่ถ้าไม่ใช่ หรือชุดคำสั่งชำรุด ตัวถอดรหัสก็จะมองข้ามไปและทำการกระทำเดิมที่ตนทำอยู่ โดยที่สถานีสั่งการจะทำการส่งคำสั่งปัจจุบันซ้ำ ๆ เพื่อไม่ให้ตัวถอดรหัสพลาดคำสั่งไปในกรณีที่ข้อมูลเกิดความเสียหาย

สัญญาณ DCC ที่ส่งเข้าไปในรางจะมีลักษณะเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ แต่ไม่ได้เป็นลักษณะของคลื่นไซน์ (Sine Wave) โดยการสร้างไฟฟ้ากระแสสลับของสัญญาณ DCC นี้ ทำโดยสถานีสั่งการ (Command Station) ทำการสลับทิศทางของศักย์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Voltage) ทำให้เกิดเป็นคลื่นพัลส์ (Pulse Wave) ขึ้น โดยคาบเวลาของการสลับทิศทางของศักย์ไฟฟ้านั้นบ่งบอกถึงข้อมูลของสัญญาณ ซึ่งข้อมูลบิต 1 แทนด้วยคาบเวลาสั้น (อยู่ที่ประมาณ 58 µs ต่อครึ่งรอบลูกคลื่น) และข้อมูลบิต 0 แทนด้วยคาบเวลายาว (อยู่ที่เวลาอย่างต่ำประมาณ 100 µs ต่อครึ่งรอบลูกคลื่น) แสดงได้ดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 ตัวอย่างลักษณะการเข้าสัญญาณ DCC [22]

ในการควบคุมความเร็วรถไฟผ่านระบบ DCC นั้นมีโหมดให้เลือกควบคุมทั้งหมด 3 โหมด คือ DCC 14 Steps, DCC 28 Steps และ DCC 128 Steps โดยข้อแตกต่างคือจำนวนขั้นความเร็วจะมีความละเอียดแตกต่างกัน โดยที่ระบบนี้ใช้คือ DCC 128 Steps ซึ่งสามารถสั่งเดินหน้าได้ 0-128 Steps และสั่งถอยหลังได้ 0-128 Steps โดยที่ทั้งเดินหน้าและถอยหลังมีค่าเป็น 0 คือหยุดรถ แต่จะมีผลต่อตำแหน่งไฟหน้าและหลังของรถ เนื่องจากรถบางขบวนมีไฟหน้าและหลังต่างกัน โดยไฟจะเปลี่ยนอัตโนมัติกับคำสั่งเคลื่อนรถ และค่า DCC Steps ที่สูงขึ้นจะทำให้รถไฟเคลื่อนตัวได้เร็วขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. Internet Protocol

IP (Internet Protocol) เป็นโพรโทคอลที่ทำหน้าที่ในการนำข้อมูลไปส่งยังจุดหมายปลายทาง ไม่ว่าปลายทางจะอยู่ที่ใดในอินเทอร์เน็ต โพรโทคอลต่าง ๆ ใน TCP/IP Suite ทั้ง TCP, UDP, ICMP ต่างก็ต้องอาศัยระบบนี้ เนื่องจากโพรโทคอลนี้มีกลไกที่ค่อนข้างฉลาดในการหาเส้นทางขนส่งข้อมูล แต่ถึงแม้ว่า IP จะเชี่ยวชาญมากเพียงใด แต่ IP ก็เป็นโพรโทคอลที่ Unreliable คือไม่มีการตรวจสอบว่าปลายทางได้รับข้อมูลหรือไม่ และ Connectionless คือ จะไม่มีสถานะเหมือนการเชื่อมต่อกันระหว่างต้นทางกับปลายทาง ซึ่งปกติแล้วการรับส่งถึงนั้นก็จะต้องทำการต่อสาย หรือสร้างเส้นทางการส่งระหว่างต้นทางและปลายทาง โดยข้อมูลจะสามารถส่งถึงกันและกันได้ทุกเมื่อที่สายยังมีการเชื่อมต่อกันอยู่ แต่การรับส่งผ่าน IP จะต้องทำการต่อสายใหม่ทุกครั้งที่รับส่ง 1 IP Datagram และเมื่อส่งเสร็จก็จะทำการปลดสายออก ในระดับ IP ก็จะรู้จักข้อมูลเพียงแต่ใน Datagram เดียวเท่านั้น ไม่รู้จัก Datagram อื่นที่ส่งไปก่อนหน้าหรือตามมา และจะไม่รู้ว่า Datagram แต่ละอันมีความสัมพันธ์กันหรือไม่ ด้วยข้อเสียสองประการนี้ ทำให้โพรโทคอลในเลเยอร์อื่นที่ใช้ IP นี้ในการส่งข้อมูลต้องไปหาทางลดข้อด้อยเหล่านี้เอาเอง

รูปที่ ก.3 IP Datagram Format (IPv4) [24]

จากรูปที่ ก.3 Header ของ IP Datagram (IPv4) ประกอบด้วย

- Version คือ เวอร์ชันของ IP ซึ่งสำหรับ IPv4 [26] จะเท่ากับ 4 เสมอ
- Header Length คือ ความยาวของเฮดเดอร์ ซึ่งจะนับทุก 32 bits โดยค่าที่ต่ำที่จะถูกบรรจุในฟิลด์นี้ก็คือ 5 นั่นเอง เนื่องจาก 5 x 32 bits = 160 bits = 20 byte หรือก็คือความยาวเฮดเดอร์ที่ไม่มีออปชั่นนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Type of Service (ToS) ปัจจุบันนี้ใช้ Differentiated Services Code Point (DSCP) แทน โดย DSCP ถูกระบุใน RFC 2474 (ถูกปรับปรุงใน RFC 3168 และ RFC 3260) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีใหม่เพื่อรองรับการทำงานที่ต้องการการสตรีมข้อมูลแบบเรียลไทม์ (Real-Time) เช่นการทำ Voice over IP (VoIP) เป็นต้น โดย DSCP นี้มีขนาดอยู่ที่ 6-bit และอีก 2-bit ที่เหลือคือ Explicit Congestion Notification (ECN) ถูกระบุใน RFC 3168 ซึ่งจะอนุญาตให้ปลายทางทั้งคู่ทราบความแออัดบนเครือข่ายของกันและกันโดยที่ไม่ต้องมีการทิ้งเดต้าแกรม โดย ECN นี้จะสามารถเลือกใช้หรือไม่ใช้ก็ได้ ซึ่งถ้าจะเปิดการใช้งานนี้ต้องเปิดการใช้งานในอุปกรณ์ปลายทางทั้งคู่
- Total Length สำหรับบอกจำนวนไบต์ทั้งหมดภายในเดต้าแกรม ซึ่งรวมทั้งเฮดเดอร์และข้อมูลภายใน ซึ่งหมายความว่าจำนวนที่น้อยที่สุดก็คือ 20 bytes หรือก็คือมีเพียงเฮดเดอร์อย่างเดียวนั่นเอง
- Identification เป็นหมายเลขของเดต้าแกรมที่ส่งในกรณีที่มีการกระจายของเดต้าแกรมและเมื่อนำกลับมารวมกันใหม่จะรู้ได้ว่ามาจากเดต้าแกรมเดียวกัน
- Flags ใช้ในกรณีที่มีการทำแฟรกเมนต์ (Fragment) ของเดต้าแกรม โดยประกอบด้วยข้อมูล 3-bit ซึ่งใช้ควบคุมหรือระบุเกี่ยวกับแฟรกเมนต์
- Fragment Offset ใช้ในการกำหนดตำแหน่งของข้อมูลใน 1 เดต้าแกรมที่ถูกแฟรกเมนต์ให้กลับมาต่อเรียงกันในตำแหน่งที่ถูกต้อง
- Time To Live (TTL) เป็นฟิลด์ที่กำหนดจำนวนครั้งสูงสุดที่เดต้าแกรมนี้จะถูกเราท์ (Route) เพื่อป้องกันไม่ให้เดต้าแกรมถูกเราท์ไปโดยไม่มีที่สิ้นสุด ด้วยคุณสมบัติของ IP ที่จะถูกเราท์ไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะถึงปลายทาง ซึ่งในบางครั้งอาจจะยังหาเส้นทางไม่ได้ TTL จึงมีหน้าที่คอยบอกจำนวนเราท์สูงสุด โดยถ้าเกิดเดต้าแกรมถูกเราท์ไปจนค่าเท่ากับ TTL แล้วยังไม่ถึงปลายทาง ก็ให้ดรอป (Drop) เดต้าแกรมนั้นทิ้ง แล้วแจ้งกลับมายังต้นทางว่า Time Out โดยในการเราท์ผ่านเราเตอร์ (Router) 1 ครั้งค่า TTL จะลดลง 1 หากเมื่อ TTL ลดลงจนเป็น 0 แสดงว่าเดต้าแกรมนั้นไทม์เอาท์ไปแล้ว และจะไม่ถูกเราท์อีกต่อไป
- Protocol ฟิลด์นี้ระบุถึงโพรโทคอลของเดต้าที่อยู่ในไอพีเอต้าแกรมนี้ เช่น TCP, UDP, ICMP เป็นต้น
- Header Checksum เป็นส่วนที่ตรวจสอบความผิดพลาดของข้อมูลในเฮดเดอร์เพื่อป้องกันการผิดพลาดในการขนส่งข้อมูล
- Source IP Address คือ IP Address ของผู้ส่งข้อมูลเดต้าแกรม
- Destination IP Address คือ IP Address ของผู้รับข้อมูลเดต้าแกรม

การส่งข้อมูลจากต้นทางไปยังปลายทางของ IP นั้นต้องทำการค้นหาเส้นทางในการส่งข้อมูล ซึ่งเรียกกระบวนการค้นหาเส้นทางนี้ว่า IP Routing โดยการส่งผ่านข้อมูลจากต้นทางไปปลายทางนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องอาศัยอุปกรณ์ IP ที่อยู่ในเน็ตเวิร์ก (Network) โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในเน็ตเวิร์กนั้นจำแนกเป็น 2 ประเภท คือ

- Host โฮสต์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ให้กำเนิดข้อมูลในกรณีที่เป็นผู้ส่ง หรือทำหน้าที่รับข้อมูลไปใช้งานในกรณีที่เป็นผู้รับ การสื่อสารข้อมูลใด ๆ จะต้องเป็นการสื่อสารจากโฮสต์ไปยังโฮสต์เสมอ สำหรับ IP Packet แล้ว ข้อมูลในเฮดเดอร์ที่ปรากฏอยู่ในฟิลด์ Source IP Address และ Destination IP Address จะเป็นหมายเลขระบุตำแหน่งของโฮสต์ต้นทางและโฮสต์ปลายทางเท่านั้น
- Router เราเตอร์เป็นอุปกรณ์สำคัญอย่างยิ่งสำหรับ IP ที่จะทำให้การขนส่งข้อมูลเป็นไปอย่างสมบูรณ์ เราเตอร์ทำหน้าที่ในการส่งผ่านข้อมูลจากเน็ตเวิร์กหนึ่งไปยังอีกเน็ตเวิร์กหนึ่ง ตำแหน่งของเราเตอร์จะอยู่ในจุดที่เชื่อมต่อระหว่างสองเน็ตเวิร์กเข้าด้วยกัน ด้วยข้อกำหนดของไอพี ข้อมูลจะส่งถึงกันโดยตรงข้ามเน็ตเวิร์กไม่ได้ จะต้องอาศัยเราเตอร์เป็นผู้ส่งผ่านข้อมูลไปให้ ดังนั้นเน็ตเวิร์กของไอพี ถึงแม้ไม่ได้ต่อกันทางกายภาพ แต่ก็สามารถสื่อสารกันได้โดยอาศัยเราเตอร์เป็นตัวประสานเข้าด้วยกัน

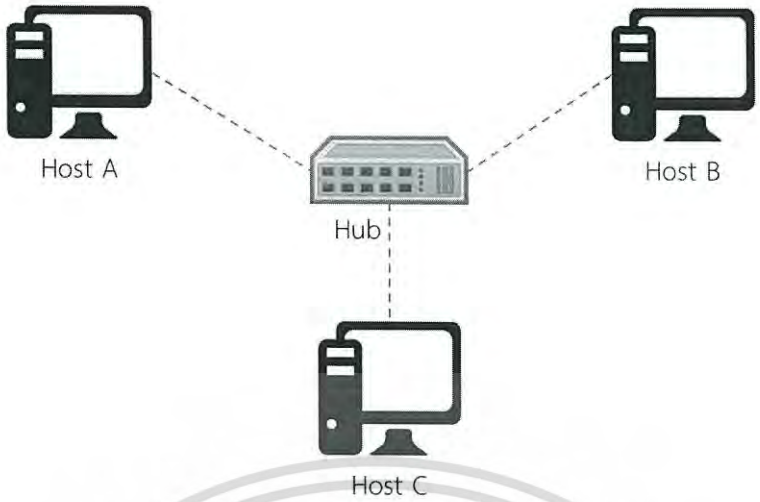
หลักการพื้นฐานของ IP Routing มีด้วยกัน 4 ข้อ โดยเริ่มต้นด้วยหลักการพื้นฐานที่ไม่สลับซับซ้อนและเข้าใจได้ไม่ยาก คือ

1. ถ้าโฮสต์ต้นทางและปลายทางต่อถึงกันโดยตรง เช่น การเชื่อมต่อแบบจุดต่อจุดดังรูปที่ ก.4 ไอพีเดต้าแกรมจะถูกส่งไปยังโฮสต์ปลายทางได้โดยตรง

รูปที่ ก.4 การสื่อสารในการเชื่อมต่อแบบจุดต่อจุด [24]

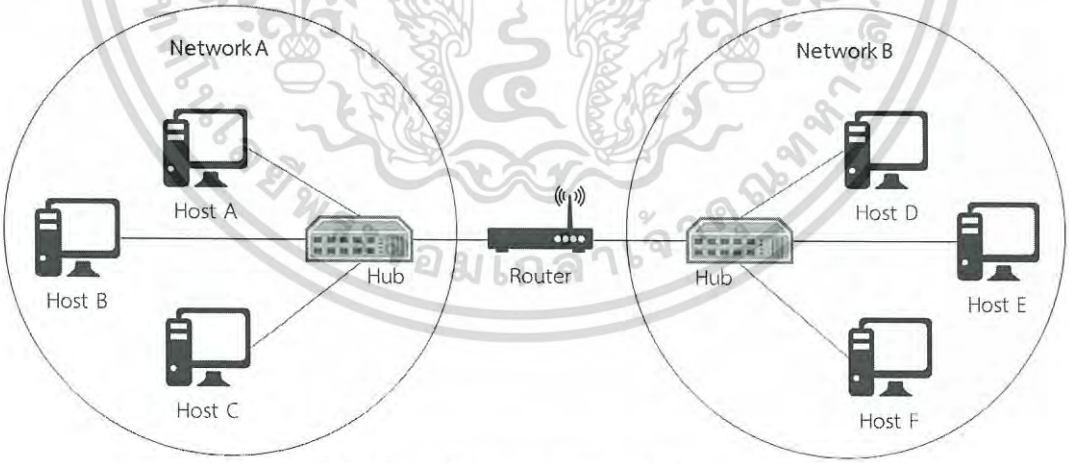
2. ถ้าโฮสต์ต้นทางและปลายทางต่อเชื่อมร่วมกันอยู่ในเน็ตเวิร์กเดียวกัน เช่นอีเธอร์เน็ต (Ethernet) หรือโทเคนริง (Token Ring) ดังรูปที่ ก.5 เดต้าแกรมก็จะถูกส่งไปยังโฮสต์ต้นทางโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.5 การสื่อสารในเน็ตเวิร์กที่ต่อร่วมกัน [24]

3. ถ้าไม่เป็นไปตามข้อที่ 1 และ 2 เดต้าแกรมจะถูกส่งไปยังดีฟอลต์เราเตอร์ เพื่อทำการส่งต่อข้อมูลไปยังปลายทางต่อไป
4. เมื่อเราเตอร์ได้รับไอพีเดต้าแกรมจากข้อ 3 แล้วตรวจสอบดู หากพบว่าโฮสต์ปลายทางต่อร่วมอยู่บนเน็ตเวิร์กเดียวกันกับเราเตอร์ ให้ทำการส่งเดต้าแกรมไปที่โฮสต์นั้น หากไม่ได้ต่อร่วมกัน ก็ให้ส่งเดต้าแกรมไปที่เราเตอร์ตัวต่อไป และกลับไปที่ขั้นตอนข้อ 2 ใหม่ จนกว่าไอพีเดต้าแกรมจะเดินทางถึงปลายทาง หรือหมดเวลาในการส่ง



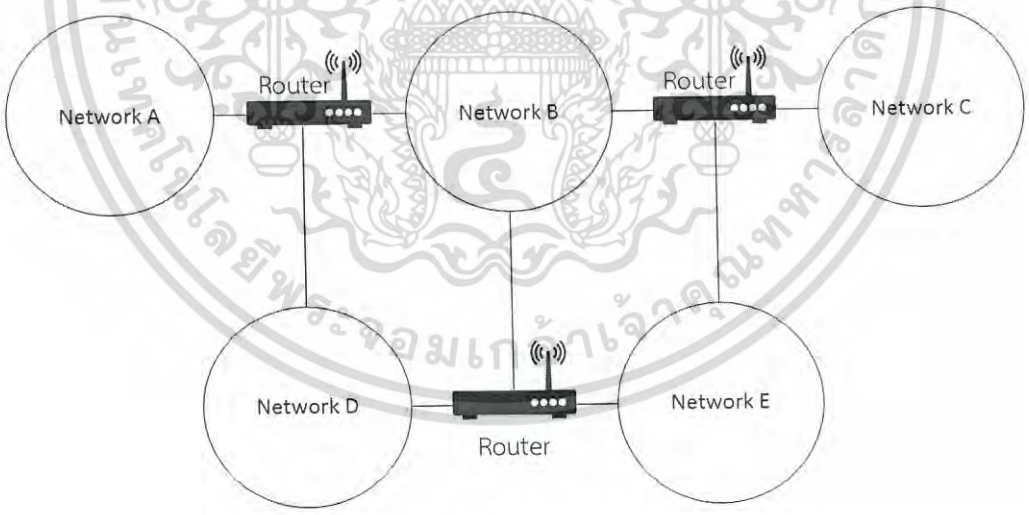
รูปที่ ก.6 การสื่อสารระหว่าง 2 เน็ตเวิร์ก [24]

หากเน็ตเวิร์กมีเพียง 2 เน็ตเวิร์กเหมือนในรูปที่ ก.6 มีเพียงแค่ดีฟอลต์เราเตอร์ก็คงจะเพียงพอ และการทำงานในการส่งไอพีเดต้าแกรมข้ามระหว่างเน็ตเวิร์กก็คงจะไม่ยุ่งยากนัก และคงเป็นไปตามขั้นตอนข้างต้น หากสังเกตจะเห็นว่าตัวเราเตอร์เองจะมีเน็ตเวิร์กที่ต้องติดต่อด้วยสองฝั่ง คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Network A และ Network B ซึ่งมีการเคลื่อนที่ของข้อมูลเพียงเส้นทางเดียว มีเราเตอร์ตัวเดียว ไม่ว่าปลายทางของข้อมูลจะไปที่ใด หากมิใช่อยู่ในเน็ตเวิร์กเดียวกันแล้ว เดต้าแกรมทั้งหมดก็ต้องส่งผ่านเราเตอร์อยู่ดี โดยไม่ต้องทำการวิเคราะห์ใด ๆ การที่เดต้าแกรมถูกส่งข้ามเน็ตเวิร์ก 1 ครั้ง เรียกว่า 1 ฮอป (Hop) เปรียบเสมือนระยะในการเดินทางของข้อมูล จากภาพตัวอย่างเดต้าแกรมเดินทางจากโฮสต์ต้นทางเพียง 1 ฮอปก็ถึงโฮสต์ปลายทาง การส่งต่อข้อมูลโดยเราเตอร์ก็มีเพียงส่งไปและส่งกลับระหว่าง Network A กับ Network B เท่านั้น แต่หากระยะทางถึงโฮสต์ปลายทางจะต้องเดินทางมากกว่า 1 ฮอปแล้ว เราเตอร์ก็จะทำงานยุ่งยากซับซ้อนขึ้น เพราะจะมีเน็ตเวิร์กอื่น ๆ ที่ไม่ได้เชื่อมต่อโดยตรง ทำให้ต้องส่งข้อมูลผ่านเราเตอร์หลายตัว และมีหลายเส้นทางที่เดต้าแกรมสามารถเดินทางไปได้ดังเช่นตัวอย่างในรูปที่ ก.7 ดังนั้นการส่งต่อเดต้าแกรมของเราเตอร์จึงเป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดประสิทธิภาพของ IP Routing

การเดินทางของเดต้าแกรมโดยกระบวนการ IP Routing นั้นทำงานอยู่บนพื้นฐานของการส่งข้อมูลทีละฮอป (hop-by-hop) คือเราเตอร์เองจะทำงานโดยรู้จักเฉพาะเน็ตเวิร์กที่ต่ออยู่กับตัวเองเท่านั้น หากโฮสต์ปลายทางไม่ได้อยู่ในเน็ตเวิร์กที่ต่อเชื่อมอยู่ก็จะทำการส่งข้อมูลต่อไปอีกฮอปให้แก่เราเตอร์ตัวต่อไปเพื่อส่งต่อไปอีกทอด และถือว่าหมดหน้าที่ต่อเดต้าแกรมนั้นแล้ว เพราะส่งต่อข้อมูลไปเรียบร้อยแล้ว ส่วนจะถึงปลายทางหรือไม่นั้นเป็นอีกเรื่องหนึ่ง และเราเตอร์ตัวอื่น ๆ ที่อยู่ระหว่างทางก็เช่นกัน ก็จะส่งต่อเดต้าแกรมไปเรื่อย ๆ เช่นนั้นทีละฮอปจนกว่าจะถึงปลายทางหรือหมดเวลา



รูปที่ ก.7 การเชื่อมต่อกันของหลายเน็ตเวิร์ก [24]

เพื่อให้กระบวนการ IP Routing ดำเนินไปอย่างมีประสิทธิภาพจึงมีการเพิ่มความสามารถของเราเตอร์ให้มากขึ้น กล่าวคือ ในกรณีที่โฮสต์ปลายทางไม่ได้อยู่ในเน็ตเวิร์กที่ต่ออยู่กับตัวเองนั้น แทนที่จะทำการส่งต่อข้อมูลไปยังดีฟอลต์เราเตอร์ทั้งหมด ก็ให้เราเตอร์ทำการพิจารณาเน็ตเวิร์กปลายทางว่า

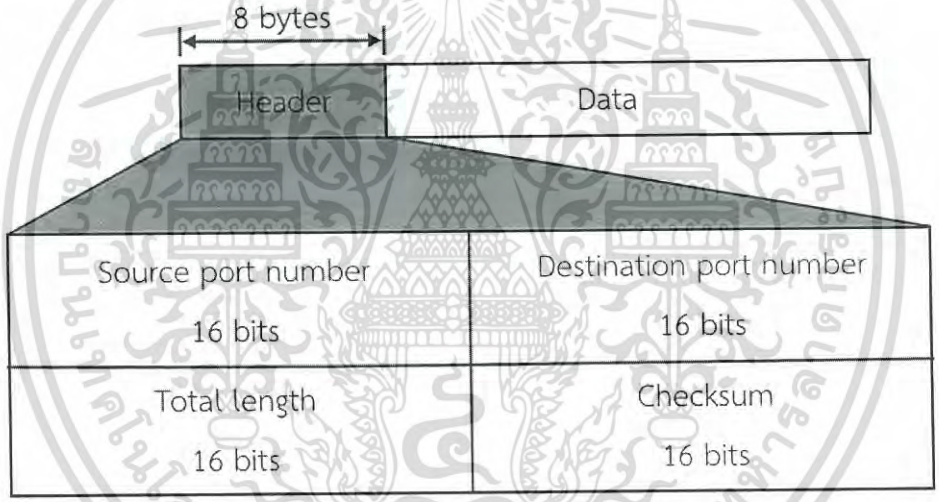
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ที่ใด แล้วจึงทำการส่งต่อเดต้าแกรมนั้นไปยังเราเตอร์ที่อยู่ใกล้กับเน็ตเวิร์กนั้นที่สุด เพื่อการนี้จึงจำเป็นต้องมีข้อมูลให้แก่ตัวเราเตอร์ว่าเน็ตเวิร์กใดควรจะส่งข้อมูลไปยังเราเตอร์ใด โดยข้อมูลเหล่านี้จะถูกเก็บอยู่ใน Routing Table

3. User Datagram Protocol

UDP (User Datagram Protocol) เป็นโพรโทคอลสำหรับส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายคอมพิวเตอร์ ซึ่งอยู่ภายในชั้น Transportation layer ของ OSI โมเดล ซึ่งเป็นโพรโทคอลพื้นฐานที่อาศัย IP เป็นพาหะในการส่งข้อมูล โดยเป็นโพรโทคอลที่ไม่ต้องการการเชื่อมต่อ (Connectionless) และ ไม่มีการรับรองการไปถึงของข้อมูล (Unreliable Transport Protocol) ซึ่งได้ถูกระบุไว้ในเอกสาร RFC 768

UDP Packets หรือมีชื่อเรียกว่า User Datagram โดยที่ User Datagram นั้น จะมีขนาดเฮด-เดอร์คงที่ เป็น 8 bytes และสามารถแสดงรูป User Datagram Format ได้ดังรูปที่ ก.8



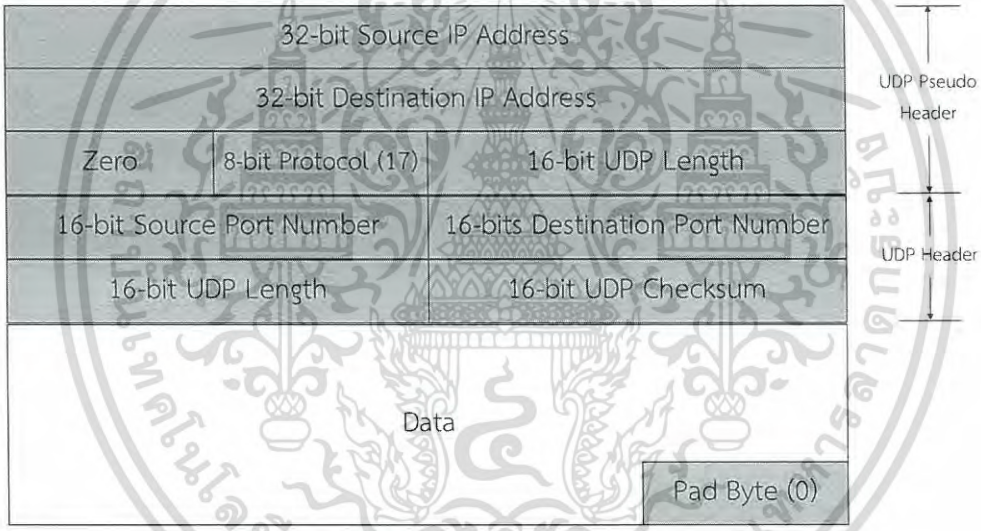
รูปที่ ก.8 User Datagram Format [25]

โดยเฮดเดอร์ของเดต้าแกรมนี้ ประกอบไปด้วยสี่ส่วนด้วยกัน คือ

- Source Port Number สามารถใช้หรือไม่ใช้ฟิลด์ (Field) นี้ก็ได้ โดยถ้าเกิดใช้ฟิลด์นี้ ข้อมูลภายในฟิลด์จะบ่งบอกถึงพอร์ต (Port) ของโพรเสส (Process) ที่ผู้ส่ง แต่ถ้าเกิดไม่ใช้ฟิลด์นี้ ข้อมูลภายในจะถูกระบุเป็น 0
- Destination Port Number เป็นหมายเลขพอร์ตของโพรเสสที่ผู้รับ
- Total Length บ่งบอกถึงความยาวข้อมูลของเดต้าแกรมนี้ซึ่งรวมทั้งเฮดเดอร์และตัวข้อมูล ซึ่งก็หมายความว่าค่าที่ต่ำที่สุดที่จะบรรจุอยู่ในฟิลด์นี้คือ 8 หรือก็คือขนาดของเฮดเดอร์นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Checksum สามารถเลือกใช้หรือไม่ใช้ก็ได้ โดยถ้าไม่ใช้ให้ใส่ข้อมูลภายในฟิลด์เป็น 0 แต่ถ้าผลของการทำ Checksum นั้นออกมาเป็น 0 ให้ส่งค่าเป็น 1 ทั้งหมดแทน โดย Checksum นี้ มีหน้าที่ตรวจสอบความถูกต้องของ UDP Datagram ทั้งหมด ถึงแม้ว่า UDP Datagram จะอยู่ภายใน IP Datagram อีกทีหนึ่ง ซึ่งมี IP Checksum อยู่แล้ว แต่ IP Checksum นั้นทำการตรวจสอบเพียงแต่ IP Header อย่างเดียว ดังนั้นจึงต้องมี UDP Checksum คอยตรวจสอบ UDP Datagram เองด้วย โดยการตรวจสอบของ UDP นั้น สามารถหาได้จากค่าผลรวมของข้อมูล 16-bit ทั้งหมด และแปลงเป็น One's Compliment โดยจะทำการนำค่าจาก UDP Header ข้อมูลภายใน Datagram และค่าบางส่วนจาก IP Header เรียกว่า UDP Pseudo Header มาคิดหา UDP Checksum ดังรูปที่ ก.9 ซึ่งถ้าหากปลายทางพบว่าข้อมูลไม่ถูกต้อง ก็จะทำการทิ้งข้อมูลนั้นไป โดยไม่มีการแจ้งกลับไปที่ผู้ส่งจึงทำให้ UDP เป็นโพรโทคอลที่ไม่มีเสถียรภาพและเชื่อถือไม่ได้



รูปที่ ก.9 ฟิลด์ที่ใช้ในการคำนวณหา UDP Checksum [25]

4. Z21 LAN Protocol

Z21 LAN Protocol [28] ใช้ในการควบคุมการทำงานของรถไฟ และประแจในรางรถไฟจำลอง สามารถควบคุมได้โดยผ่าน กล่อง z21 Controller ซึ่งจะทำหน้าที่แปลงคำสั่งจาก UDP Packet ที่ซอฟต์แวร์ส่งไปให้มาเป็นสัญญาณควบคุม DCC ส่งเข้าไปยังรางรถไฟจำลอง โดยมีโพรโทคอลสำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ และเปิด/ปิดฟังก์ชันต่าง ๆ ของรถไฟ เช่น ฟังก์ชันไฟหน้า/หลังของขบวนรถ หรือ ฟังก์ชันเสียงหลากหลายรูปแบบ เป็นต้น รวมถึงโพรโทคอลที่ส่งไปเพื่อควบคุมทิศทางประแจด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- LAN_X_SET_LOCO_DRIVE

ใช้สำหรับควบคุมความเร็วและทิศทางของรถไฟจำลองแต่ละขบวนอย่างอิสระกันโดยแบ่งแยกตามแอดเดรสของขบวนรถ

ตารางที่ ก.1 LAN_X_SET_LOCO_DRIVE

DataLen		Header		Data					
				X-Header	DB0	DB1	DB2	DB3	XOR-Byte
0x0A	0x00	0x40	0x00	0xE4	0x1S	Adr_MSB	Adr_LSB	RVVVVVV	XOR-Byte

0x1S ค่าของ S ขึ้นอยู่กับการเข้ารหัส DCC ที่ใช้ โดยที่

S = 0: DCC 14 steps

S = 2: DCC 28 steps

S = 3: DCC 128 steps

RVVVVVV เป็นค่าของทิศทางและความเร็วของรถไฟ (ฐานสอง) โดยที่

R = 1: สั่งขบวนรถเดินหน้า

R = 0: สั่งขบวนรถถอยหลัง

V คือค่าระดับความเร็วโดยค่าสูงสุดขึ้นอยู่กับการเข้ารหัส DCC ที่ใช้

- LAN_X_SET_LOCO_FUNCTION

ใช้สำหรับควบคุมฟังก์ชันต่าง ๆ ของรถไฟ เช่น เปิด/ปิด ไฟของขบวนรถ เสียงหวูดรถไฟ โดยควบคุมได้อย่างอิสระแบ่งแยกด้วยแอดเดรสของขบวนรถ

ตารางที่ ก.2 LAN_X_SET_LOCO_FUCNTION

DataLen		Header		Data					
				X-Header	DB0	DB1	DB2	DB3	XOR-Byte
0x0A	0x00	0x40	0x00	0xE4	0xF8	Adr_MSB	Adr_LSB	TTNNNNNN	XOR-Byte

TT เป็นคำสั่งการกระทำต่อฟังก์ชันของรถไฟ (ฐานสอง) โดยที่

TT = 00: ปิดการทำงาน

TT = 01: เปิดการทำงาน

TT = 10: สลับการทำงาน

TT = 11: ไม่อนุญาตให้ใช้งาน

NNNNNN เลขฟังก์ชัน เช่น 0 = F0 (Light) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- LAN_X_SET_TURNOUT

ใช้สำหรับควบคุมประแจแต่ละตัวอย่างอิสระแบ่งแยกด้วยแอดเดรสของประแจ

ตารางที่ ก.3 LAN_X_SET_TURNOUT

DataLen		Header		Data				
				X-Header	DB0	DB1	DB2	XOR-Byte
0x09	0x00	**0x40**	0x00	**0x53**	FAdr_MSB	FAdr_LSB	10Q0A00P	XOR-Byte

10Q0A00P เป็นคำสั่งบังคับท่าประแจ (ฐานสอง) โดยที่

Q = 0: ให้ประแจทำตามคำสั่งทันที

Q = 1: เก็บคำสั่งเข้าไว้ในคิวและทำเมื่อเป็นไปได้

A = 0: ปิดการทำงานของการตั้งค่าท่าประแจ

A = 1: เปิดการทำงานของการตั้งค่าท่าประแจ

P = 0: ตั้งค่าท่าประแจเป็นท่าที่ 1 (Reverse)

P = 1: ตั้งค่าท่าประแจเป็นท่าที่ 2 (Normal)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

การสั่งงานสัญญาณไฟจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

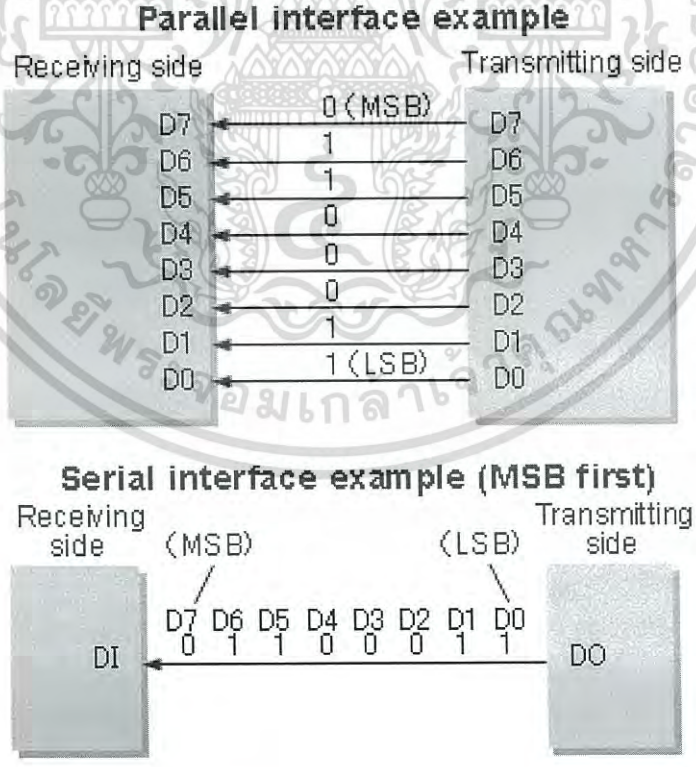
ภายในระบบนี้ได้นำหลอดไฟ LED ร่วมด้วยกับ Transistor ต่อเข้ากับขาควบคุมจากบอร์ดอาดูอิโน และจากบอร์ดอาดูอิโนก็ทำการต่อสาย USB Serial Port เชื่อมกับเครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อที่จะคอยรับค่าคำสั่งจากซอฟต์แวร์หลัก ส่งไปเปิดปิดการทำงานของหลอดไฟแต่ละดวง เพื่อให้หลอดไฟเหล่านั้นทำหน้าที่เป็นเสมือนเสาสัญญาณไฟสองท่าในการจำลองระบบอาณัติสัญญาณ

1. Serial Communication

การสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรม เป็นการรับส่งข้อมูลทีละบิตเป็นลำดับเรียงกันไปเรื่อย ๆ ผ่านช่องสัญญาณ หรือคอมพิวเตอร์บัส โดยจะต่างกับการสื่อสารข้อมูลแบบขนานที่ส่งข้อมูลไปทั้งชุดเลย โดยใช้ช่องสัญญาณหลายช่องดังรูปที่ ข.1

โดยรูปแบบของการสื่อสารนั้นแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ

- Simplex เป็นการสื่อสารทางเดียว
- Half-Duplex เป็นการสื่อสารสองทาง แต่จะต้องผลัดกันรับส่ง สื่อสารพร้อมกันในเวลาเดียวไม่ได้
- Full-Duplex เป็นการสื่อสารสองทางที่สามารถรับส่งได้ในเวลาเดียวกัน



รูปที่ ข.1 การสื่อสารแบบขนาน และอนุกรม [30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และการสื่อสารแบบอนุกรม สามารถแบ่งตามลักษณะของการส่งข้อมูลได้ 3 แบบ คือ

- Synchronous เป็นการส่งข้อมูลเป็นบล็อก ครั้งละหลาย ๆ ไบต์ โดยมีสัญญาณนาฬิกา (Clock) ช่วยให้ตัวรับและส่งทำงานสอดคล้องกัน
- Asynchronous เป็นการสื่อสารที่รับส่งข้อมูลครั้งละ 1 ไบต์ โดยผู้รับและผู้ส่งต้องกำหนดจำนวนบิตที่ใช้รับส่งข้อมูลต่อวินาที (Baud Rate) ให้เท่ากัน
- Isochronous ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อส่งผ่านข้อมูลความเร็วสูงในอัตราคงที่ และรับประกันเวลาในการส่ง สำหรับใช้งานข้อมูลแบบเรียลไทม์โดยเฉพาะ ซึ่งการส่วนข้อมูลแบบไอโซโครนัสนี้จะตั้งอยู่บนพื้นฐานของแพ็กเก็ต โดยแพ็กเก็ตจะส่งผ่านไปบนช่องสัญญาณที่ให้ไว้ และสามารถแปรผันจากเฟรมไปยังเฟรมได้ ส่วนขนาดของแพ็กเก็ตนั้นจะถูกจำกัดโดยแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของช่องสัญญาณ

2. Arduino

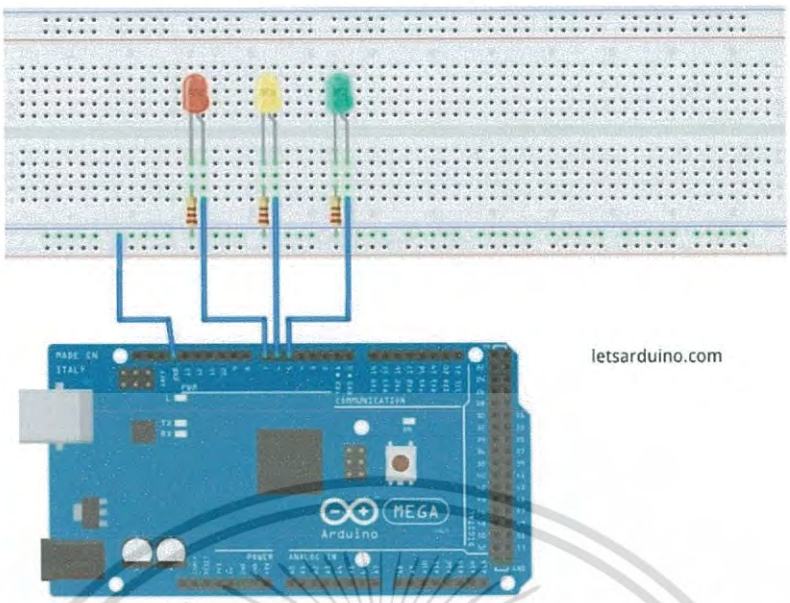
อาดูอิโนเป็นบอร์ดไมโครคอนโทรเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาแบบ Open Source คือมีการเปิดเผยข้อมูลทั้งด้าน Hardware และ Software ตัวบอร์ด Arduino ถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้นศึกษา ทั้งนี้ผู้ใช้งานยังสามารถดัดแปลงเพิ่มเติม พัฒนาต่อยอดทั้งตัวบอร์ด หรือโปรแกรมต่อได้อีกด้วย

ความง่ายของบอร์ด Arduino ในการต่ออุปกรณ์เสริมต่าง ๆ คือผู้ใช้งานสามารถต่อวงจรอิเล็กทรอนิกจากภายนอกแล้วเชื่อมต่อเข้ามาที่ขา I/O ของบอร์ดได้เลย ดังรูปที่ ข.2 หรือเพื่อความสะดวกผู้ใช้สามารถเลือกต่อกับบอร์ดเสริม (Arduino Shield) ประเภทต่าง ๆ ได้ ดังรูปที่ ข.3 เช่น Arduino XBee Shield, Arduino Music Shield, Arduino Relay Shield, Arduino Wireless Shield, Arduino GPRS Shield เป็นต้น เพียงนำบอร์ดเสริมมาเสียบกับบอร์ดบนบอร์ด Arduino แล้วเขียนโปรแกรมพัฒนาต่อได้เลย

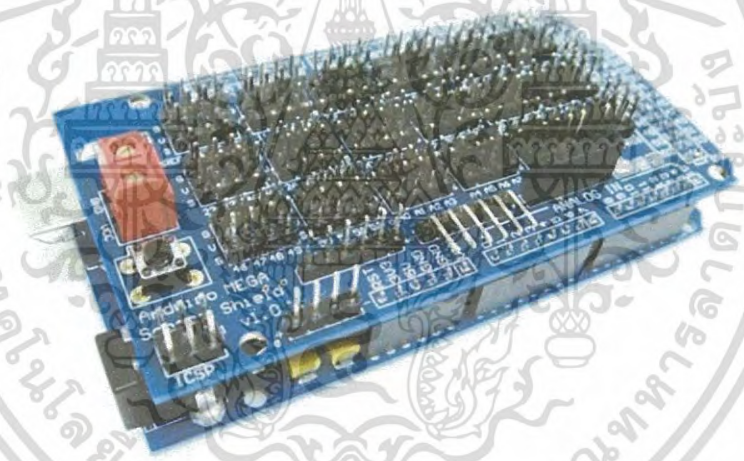
โดยตัวอาดูอิโนนั่นมีข้อดีอยู่หลายประการที่ทำให้เป็นที่นิยมใช้อย่างกว้างขวาง

- ง่ายต่อการพัฒนา มีรูปแบบคำสั่งพื้นฐาน ไม่ซับซ้อนและเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้น
- มี Arduino Community หรือกลุ่มคนที่ร่วมกันพัฒนา ที่แข็งแรง
- เป็น Open Hardware ทำให้ผู้ใช้สามารถนำบอร์ดไปต่อยอดใช้งานได้หลายด้าน
- ราคาไม่แพง
- มีคุณสมบัติ Cross Platform คือสามารถพัฒนาโปรแกรมบน OS ใดก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.2 บอร์ดอาดูอิโนต่อกับ LED ที่มา: letsarduino.com



รูปที่ ข.3 บอร์ดอาดูอิโนต่อกับ Mega Sensor Shield V2 ที่มา: emartee.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.

การระบุตำแหน่งรถไฟจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

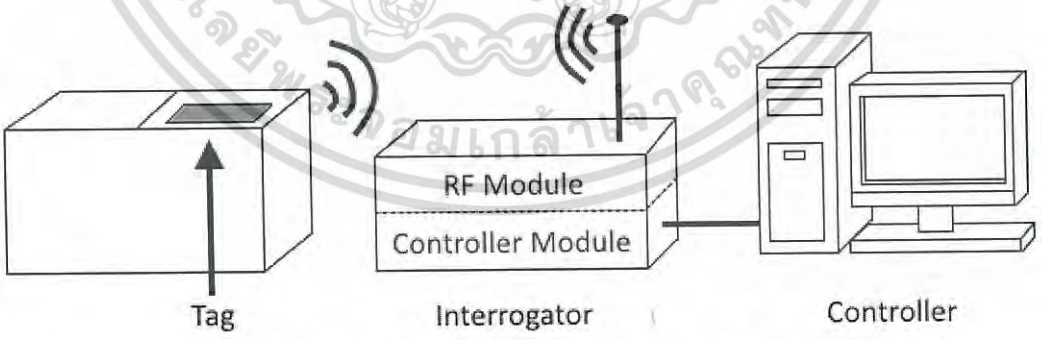
การรับค่าตำแหน่งของรถไฟภายในระบบนั้นทำได้โดยใช้เทคโนโลยี RFID ในการระบุตำแหน่ง และใช้เทคโนโลยี XBee หรือ Zigbee เพื่อส่งข้อมูลตำแหน่งนั้นมาให้กับศูนย์กลางควบคุม หรือก็คือซอฟต์แวร์หลักที่ถูกติดตั้งอยู่บนคอมพิวเตอร์นั่นเอง

1. Radio Frequency Identification

การระบุตัวตนด้วยคลื่นวิทยุ (RFID: Radio Frequency Identification) เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายชนิดหนึ่งที่นำมาใช้ระบุตัวตนโดยจำแนกจากอุปกรณ์ที่เรียกว่าแท็ก (Tag) ซึ่งแต่ละแท็กนั้นจะมีข้อมูลภายในที่แตกต่างกัน โดย RFID นั้นถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นระบบตรวจผ่านประตูในอาคารต่าง ๆ ระบบเก็บเงินอัตโนมัติ ระบบตรวจตามยานพาหนะ หรือตรวจตามสัตว์

ระบบ RFID จะประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก ๆ แสดงดังรูปที่ ค.1 คือ

- แท็ก (Tag) หรืออาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ทรานสปอนเดอร์ (Transponder) ซึ่งภายในจะมีชิปที่ทำมาจากสารกึ่งตัวนำ (Semi-conductor Chip) และเสาสัญญาณ (Antenna) รวมถึงแท็กบางชนิดก็จะมีแบตเตอรี่ (Battery) อยู่ด้วย
- ตัวอ่านซึ่งมีชื่อเรียกหลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็น Interrogator, Reader, or Read/Write Device ซึ่งภายในตัวอ่านนี้ประกอบด้วย เสาสัญญาณ ภาครับ-ส่งสัญญาณวิทยุ (RF Electronics Module) และส่วนควบคุม (Control Electronics Module)
- อุปกรณ์ควบคุมหลัก (Controller) หรือบางครั้งเรียกว่าโฮสท์ (Host) ส่วนมากมักจะเป็นเครื่องคอมพิวเตอร์ที่นำมาเก็บฐานข้อมูล (Database) และรันซอฟต์แวร์ควบคุม (Control Software) ซึ่งบางครั้งจะเรียกว่า Middleware



รูปที่ ค.1 โครงสร้างพื้นฐานของระบบ RFID ที่มา: LARAN RFID

โดยจากรูปโครงสร้างพื้นฐานของระบบ RFID ทำให้สามารถอธิบายการทำงานได้คือ แท็กและตัวอ่านจะสื่อสารข้อมูลกันผ่านทางคลื่นวิทยุ เมื่อแท็กเข้ามาใกล้ของเขตการทำงานของตัวอ่าน ตัวอ่านจะส่งสัญญาณให้แท็กส่งข้อมูลเฉพาะตัวของแท็กนั้นกลับมา ซึ่งข้อมูลเฉพาะตัวนี้อาจประกอบไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

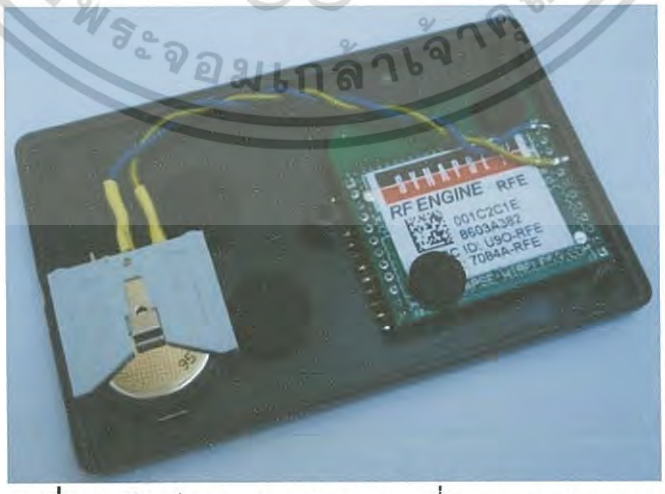
ด้วยข้อมูลหลายอย่างได้ เช่น รหัสสินค้า เวลาประทับ (Time Stamps) ข้อมูลการตั้งค่า และอื่น ๆ อีกตามความต้องการของผู้ออกแบบระบบ จากนั้นข้อมูลที่อ่านได้จากแท็กนั้นก็จะถูกส่งไปยังหน่วยควบคุมประมวลผล หน่วยประมวลผลก็จะนำข้อมูลนั้นมากระทำการจัดเก็บลงฐานข้อมูล หรือนำข้อมูลที่ได้นั้นไปทำอย่างอื่นต่อไปตามที่ได้ถูกออกแบบไว้

โดยลักษณะของ RFID Tag จะถูกจำแนกออกเป็น 3 ประเภทหลัก ๆ คือ

- Passive RFID Tag แท็กชนิดนี้ทำงานได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายไฟจากภายนอก เพราะภายในบัตรมีวงจรกำเนิดไฟฟ้าเหนี่ยวนำ เป็นแหล่งพลังงานในตัวอยู่แล้ว สามารถอ่านข้อมูลได้ในระยะสั้น ๆ เท่านั้น โดยจะไม่เกิน 1 เมตร ซึ่งขึ้นอยู่กับกำลังส่งของเครื่องอ่านและความถี่วิทยุที่ใช้ด้วย RFID ชนิดนี้มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา

รูปที่ ค.2 ตัวอย่าง Passive RFID Tag แบบพวกกุญแจ แคปซูล และบัตร [34]

- Active RFID Tag แท็กชนิดนี้ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟจากภายนอก เพื่อจ่ายไฟให้วงจรทำงาน ระยะการอ่านข้อมูลได้ประมาณ 100 เมตร แต่มีข้อเสียคือ ขนาดของป้ายหรือเครื่องอ่านมีขนาดใหญ่ และอายุแบตเตอรี่มีอายุการใช้งานประมาณ 3-7 ปี



รูปที่ ค.3 ตัวอย่าง Active RFID Tag ที่มา: ns-tech.co.uk

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Semi-Passive RFID Tag ทำงานคล้ายกับ Passive Tag นั่นก็คือ ใช้สัญญาณจากเครื่องอ่านมาเหนี่ยวนำให้ตัวแท็กตอบกลับไป แต่สิ่งที่แตกต่างกันคือ Semi-Passive Tag มีแบตเตอรี่ แต่ตัวแบตเตอรี่นี้ไม่ได้เอาไว้ใช้สำหรับตอบกลับตัวอ่าน แต่ไว้ใช้สำหรับจ่ายไฟแก่วงจรอิเล็กโทรนิกที่เชื่อมอยู่กับเซนเซอร์ เช่น เซนเซอร์ความร้อน และค่าที่ได้จากเซนเซอร์จะถูกผนวกรวมกันข้อมูลภายในแท็ก และส่งกลับไปให้แก่ตัวอ่านด้วย

รูปที่ ค.4 ตัวอย่าง Semi-Passive RFID Tag ที่มา: veryfields.net

โดยนอกจากนี้ RFID Tag ยังสามารถจำแนกออกตามรูปแบบการอ่านเขียนได้อีก 3 ประเภท คือ

- แท็กที่ใช้อ่านและเขียนข้อมูลลงไปได้หลาย ๆ ครั้ง (Read - Write)
- แท็กที่ใช้เขียนได้เพียงครั้งเดียวแต่อ่านได้หลายครั้ง (Write - Once Read - Many)
- แท็กที่ใช้อ่านได้เพียงอย่างเดียว (Read - Only)

2. XBee

XBee [36] เป็นอุปกรณ์ที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) และ RFIC (Radio Frequency Integrated Circuit) อยู่ภายใน ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ Transceiver (อุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณ) แบบ Half Duplex ย่านความถี่ 2.4 GHz มีการจัดการโดยใช้พลังงานต่ำ ใช้งานง่าย มีส่วนติดต่อ (Interface) ที่ใช้รับและส่งข้อมูลกับ XBee ที่เป็น UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) ซึ่งสำหรับทางด้านไมโครคอนโทรลเลอร์ เราสามารถนำขาที่ใช้ติดต่อสื่อสาร UART ของ XBee ต่อเข้ากับ UART ของไมโครคอนโทรลเลอร์ได้เลย

รูปที่ ค.5 XBee Series 2 ที่มา: sparkfun.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

XBee นั้นสามาถใช้งานตามมาตรฐานของ Zigbee ได้โดยที่ไม่ต้องเขียนโปรแกรมเครือข่าย Zigbee เลย เพราะว่าทางผู้ผลิตได้จัดทำ Firmware ที่จะโหลดเข้าไปในตัว XBee ทำให้สามารถตั้งค่าผ่าน Software Interface ที่ชื่อ X-CTU ได้ หรืออาจจะสามารถตั้งค่าผ่านช่องทางอื่นก็ได้เช่นเดียวกัน โดยเมื่อตั้งค่า XBee ให้ทำงานเป็นอุปกรณ์เครือข่าย Zigbee แล้ว ตัว XBee นี้จะถูกเรียกว่าโหนด (Node) โดยตัว XBee นั้น หลัก ๆ จะมีอยู่ 2 รุ่น คือรุ่น Series 1 และรุ่น Series 2 และยังมีขนาด Power ให้เลือกอีก 2 แบบ คือ แบบธรรมดา (1-2 mW) และ แบบ PRO (50-60mW) ซึ่งจะมีผลเรื่องระยะทางการรับส่งข้อมูล โดยแต่ละ Series นั้น สามารถสร้างเครือข่ายได้หลายแบบ คือ peer-to-peer, point-to-point, point-to-multipoint (Broadcast) แต่จะมีเพียง Series 2 เท่านั้นที่จะทำเครือข่ายแบบ Mesh ได้ ซึ่ง XBee สามารถตั้งค่าให้เป็น End Device, Router, Coordinator ได้ตามเงื่อนไขของ Zigbee

XBee จะทำการสื่อสารกับ XBee ด้วยกันเองผ่านทางการสื่อสารไร้สาย แต่ XBee เป็นเพียงตัวรับส่งข้อมูลเท่านั้น ไม่สามารถกระทำการใด ๆ กับข้อมูลได้ แต่อย่างไรก็ตาม ผู้ใช้สามารถนำ XBee ไปต่อเข้ากับอุปกรณ์อื่นที่สามารถจัดการการกระทำข้อมูลได้ ดังนั้น XBee จึงมีทั้งการสื่อสารแบบไร้สาย และการสื่อสารแบบมีสายรวมอยู่ในตัวเดียวกันดังรูปที่ ค.6

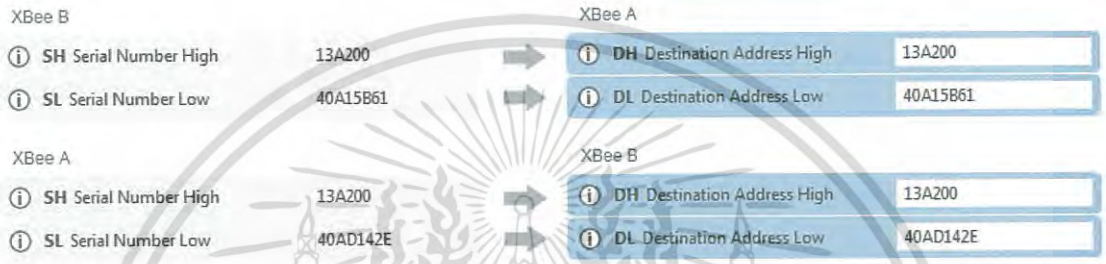
รูปที่ ค.6 ภาพรวมการสื่อสารของ XBee [36]

โดยโหมดการทำงานของส่วนส่งสัญญาณวิทยุ (Radio Module Operating Mode) ของ XBee นั้นแบ่งเป็น 2 แบบด้วยกัน คือ Application Transparent และ Application Programming Interface (API) โดยโหมดการทำงานทั้งสองนี้ จะแตกต่างกันที่การสื่อสารระหว่างโฮสต์กับอุปกรณ์ XBee ที่เชื่อมสายกันอยู่นั่นเอง โดย Application Transparent Operating Mode นั้น XBee จะทำการรับข้อมูลจากโฮสต์และส่งข้อมูลนั้นออกไปทันที เสมอกันโฮสต์สองตัวที่ต่ออยู่กับ XBee ที่คุยกันอยู่นั้นมีสายเชื่อมถึงกันอยู่ดังรูปที่ ค.7

รูปที่ ค.7 การสื่อสารระหว่าง XBee ด้วย Transparent Mode [36]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งลักษณะการทำงานเช่นนี้ ทำให้ตัว XBee ที่จะส่งข้อมูลจำเป็นต้องรู้แอดเดรส (Address) ของผู้รับด้วย ดังนั้นเมื่อใช้งานในโหมดนี้ จะต้องทำการตั้งค่าแอดเดรส XBee ที่ต้องการให้สื่อสารกันเอาไว้ โดยลักษณะของแอดเดรสปลายทางที่ XBee เก็บนั้นจะมีขนาด 64-bit โดยจะต้องทำการโปรแกรมเอดเดรสนี้ในพารามิเตอร์สองตัว คือ Destination Address High (DH) และ Destination Address Low (DL) ซึ่งถ้าต้องการให้อุปกรณ์ A และ B สื่อสารกันได้ ก็จะต้องตั้งค่าแอดเดรสปลายทางของ A ให้ตรงกับ MAC Address ของ B และตั้งแอดเดรสปลายทางของ B ให้ตรงกับ MAC Address ของ A เช่นกัน ดังตัวอย่างในรูปที่ ค.8



รูปที่ ค.8 การตั้งค่าแอดเดรสปลายทางให้ XBee สามารถสื่อสารกันได้ใน Transparent Mode [36]

ค่าเริ่มต้นการทำงานของ XBee นั้น ถูกกำหนดมาให้ทำงานใน Transparent Mode แต่การที่ XBee ทำงานที่โหมดนี้ก็ทำให้มีข้อเสียบางอย่าง เช่น การเขียนหรืออ่านค่าคอนฟิก (Configuration Data) ของ XBee จะต้องทำการเข้าสู่คอมมานโหมด (Command Mode) ซึ่งเมื่อเข้าสู่คอมมานโหมดแล้ว ข้อมูลทุกอย่างที่ผ่านขาอินพุท (Serial Input) เข้ามานั้นจะถือว่าเป็นคำสั่งสำหรับตั้งค่าอุปกรณ์ทั้งหมด หรือถ้าเกิดว่าอยากส่งข้อมูลไปให้กับ XBee ตัวอื่น ก็จะต้องทำการตั้งค่าปลายทางใหม่ และการทำงานใน Transparent Mode นี้ทำให้อุปกรณ์ตัวรับ ไม่สามารถทราบได้ว่าผู้ส่งมีแอดเดรสอะไร ถ้าเกิดต้องการทราบที่อยู่ผู้ส่งด้วย ผู้ใช้จำเป็นต้องสร้างโพรโทคอลใหม่ขึ้นมาเอง

เพื่อลดข้อเสียเหล่านั้น XBee จึงได้สร้างตัวเลือกการทำงานขึ้นมา ซึ่งก็คือ API Mode นั่นเอง โดย API Mode จะมีรูปแบบการรับส่งข้อมูลให้กับโฮสต์อย่างเป็นระเบียบ โดยโฮสต์ผู้รับหรือผู้ส่งสามารถจำแนกเดต้าเหล่านั้นมาใช้ได้ ซึ่งข้อมูลที่รับส่งสามารถมีความซับซ้อนได้โดยที่ไม่ต้องคิดโพรโทคอลขึ้นมาใหม่เองเหมือนใน Transparent Mode โดยเฟรมข้อมูลภายในโหมดนี้จะแบ่งเป็นหลายรูปแบบ เช่น เฟรมสำหรับตั้งค่าอุปกรณ์ เฟรมสำหรับสื่อสารข้อมูล เป็นต้น และการทำงานภายใต้โหมดนี้ทำให้สามารถส่งข้อมูลไปยังหลาย ๆ อุปกรณ์ได้ เนื่องจากข้อมูลปลายทางนั้นถูกจัดเก็บอยู่ในเฟรม ทำให้ไม่ต้องตั้งค่าแอดเดรสปลายทางที่ตัวอุปกรณ์ อีกทั้งภายในเฟรมยังระบุแอดเดรสผู้ส่งอีกด้วย ทำให้การทำงานบางอย่างที่ต้องการทราบตัวตนผู้ส่งนั้นทำได้อย่างง่ายดาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ค.9 การสื่อสารระหว่าง XBee ด้วย API Mode [36]

โดยที่โครงสร้างของเฟรม (Frame Structure) ที่ใช้ภายใต้ API Mode ของ XBee นั้นมีลักษณะดังรูปที่ ค.10

Start Delimiter	Length		Frame Data		Checksum
			Frame type	Data	
1	2	3	4	5 6 7 8 9 ... n	n + 1
0x7E	MSB	LSB	API frame type	Frame-type-specific data	Single byte

MSB: most-significant byte, LSB: least-significant byte

รูปที่ ค.10 โครงสร้างของเฟรมที่ใช้ภายใต้ XBee API Mode [36]

โดยที่

Start Delimiter คือ ส่วนเริ่มต้นของเฟรม ซึ่งจะใช้ 0x7E เสมอเพื่อบอกให้รู้ว่า Byte นี้คือจุดเริ่มต้นของเฟรม

Length คือ จำนวน Byte ของ Frame Data

Frame Data จะแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วน Byte แรก จะเป็น API Frame Type หรือ API Identifier ซึ่งจะมีค่าเฉพาะแล้วแต่การทำงาน และส่วนของเดต้าภายใน หรือ Frame-type-specific data ซึ่งมีค่าและความหมายแตกต่างกันตาม API Identifier ดังตัวอย่างในรูปที่ ค.11 และ ค.12

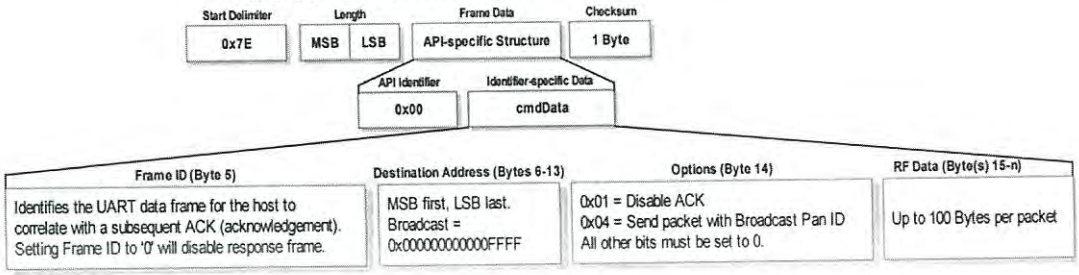
Checksum เป็นตัวที่เอาไว้ตรวจความถูกต้องของ Frame Data ที่ได้รับมาว่ามีค่าถูกหรือไม่ โดยค่าของ Checksum สามารถคำนวณได้โดยนำข้อมูลใน Frame Data มาบวกกัน และนำ 0xFF – LSB (ของผลบวก) ค่าที่ได้จากผลลบก็คือค่า Checksum นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TX (Transmit) Request: 64-bit address

API Identifier Value: 0x00
A TX Request message will cause the module to send RF Data as an RF Packet.

Figure 3-13. TX Packet (64-bit address) Frames

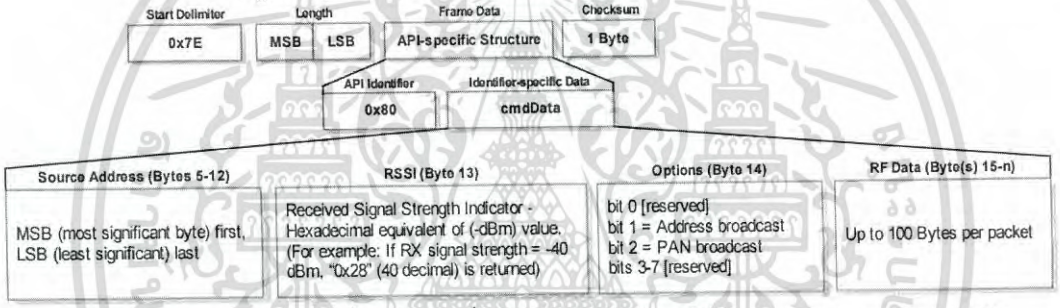


รูปที่ ค.11 API Frame สำหรับส่งข้อมูลด้วยแอดเดรส 64-bit [38]

RX (Receive) Packet: 64-bit Address

API Identifier Value: 0x80
When the module receives an RF packet, it is sent out the UART using this message type.

Figure 3-16. RX Packet (64-bit address) Frames



รูปที่ ค.12 API Frame ที่จะได้รับ เมื่อต้นทางส่งข้อมูลมาให้ด้วยแอดเดรส 64-bit [38]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

[1] A. Vijittanasan, S. Saeiao, T. Anuwongpinit, **P. Samootrut**, B. Purahong, and V. Chutchavong, "On Study of Railway Signaling in Thailand," 2015 International Congress on Engineering and Information (ICEAI 2015), Kyoto, Japan, May 7-9, 2015.

[2] **พุธิตา สมุทรรัตน์** สมสิน ทองไกรรัตน์ ธนวิชญ์ อนุวงศ์พินิจ อลงกรณ์ วิจิตรธนสาร และวันวิสา ชัชวงษ์, "การจำลองระบบควบคุมรถไฟและอาณัติสัญญาณ," 8th ECTI-CARD 2016, Hua Hin, Thailand, July 27-29, 2016.

[3] **Puthita Samootrut**, Mayuree Lertwatechakul, Somsin Tongkrairat, Thanavit Anuwongpinit, Alongkon Vijittanasan, and Vanvisa Chutchavong, "On Development of Train Control and Signaling Simulation," 2016 16th International Conference on Control, Automation and System (ICCAS 2016), Gyeongju, Korea, October 16-19, 2016.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นางสาวพุธิตา สมุทรรัตน์
วัน เดือน ปีเกิด	6 กรกฎาคม 2536
ที่อยู่	47 ซ.พงษ์เวชอนุสรณ์ ถ.สุขุมวิท 64 แขวงบางจาก เขตพระโขนง กทม. 10260
ประวัติการศึกษา	2548-2554 โรงเรียนพระโขนงพิทยาลัย 2557 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ (เกียรตินิยมอันดับ 2) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) ระบบสารสนเทศและการสื่อสาร 2.) การออกแบบอัลกอริทึมและการพัฒนาซอฟต์แวร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้