

การวิเคราะห์และจำลองระบบจัดตารางเดินรถไฟ

SIMULATION ANALYSIS OF TRAIN TIMETABLE SCHEDULING SYSTEM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-230-193

# การวิเคราะห์และจำลองระบบจัดตารางเดินรถไฟ

## SIMULATION ANALYSIS OF TRAIN TIMETABLE SCHEDULING SYSTEM



ทปกร เหมือนเตย

TAPAKORN MUANTOEI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-230-193

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# SIMULATION ANALYSIS OF TRAIN TIMETABLE SCHEDULING SYSTEM



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL 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-230-193

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

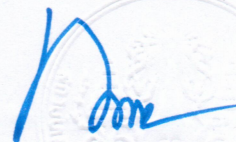
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์และจำลองระบบจัดตารางเดินรถไฟ  
Thesis Title Simulation Analysis of Train Timetable Scheduling System  
นักศึกษา นายทปกร เหมือนเตย  
รหัสประจำตัว 57601301  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมสารสนเทศ  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.วันวิสา ชัชวงษ์  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-230-193

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.กนก	เจนจิระพงศ์เวช	
รศ.ดร.ชาลิต	เบญจางคประเสริฐ	
รศ.ดร.ปิติเขต	สุรักษา	
รศ.ดร.อรรถสิทธิ์	เหล่าสกุล	
ผศ.ดร.วันวิสา	ชัชวงษ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 7 ธันวาคม พ.ศ. 2560 เวลา 13.00-15.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 7 ธันวาคม พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์และจำลองระบบจัดตารางเดินรถไฟ
นักศึกษา	นายทปกร เหมือนเตย
รหัสประจำตัว	57601301
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.วันวิสา ชัชวงษ์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการวิเคราะห์และจำลองระบบจัดตารางเดินรถไฟ โดยใช้วิธีคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการเดินรถของรถไฟสายตะวันออก การรถไฟแห่งประเทศไทย โดยคำนวณด้วยทฤษฎีการประมาณระยะเวลาเดินรถ ประกอบด้วยข้อมูลรายละเอียดเส้นทางเดินรถ รวมถึงความลาดชัน ความโค้งของเส้นทาง ข้อมูลคุณลักษณะเฉพาะของขบวนรถ ตู้รถไฟ ข้อมูลการปฏิบัติการเดินรถ จุดหยุดจุดปล่อยขบวนรถ และตารางเดินรถไฟ โดยนำข้อมูลเหล่านี้มาคำนวณหาเวลาที่ใช้ในการเดินรถ ซึ่งได้ผลลัพธ์คือได้ตารางการเดินรถที่มีความถูกต้องตามทฤษฎีการประมาณระยะเวลาการเดินรถ และแตกต่างออกไปจากตารางเวลาเดินรถที่ใช้วิธีหาค่าเฉลี่ยเดิมของการรถไฟแห่งประเทศไทย นอกจากนี้ได้พัฒนาซอฟต์แวร์ในการจำลองการจัดทำตารางเวลาการเดินรถ

Thesis Title	Simulation Analysis of Train Timetable Scheduling System
Student	Mr.Tapakorn Muantoei
Student ID.	57601301
Degree	Master of Engineering
Program	Information Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Vanvisa Chutchavong

## ABSTRACT

This thesis presents simulation analysis of train timetable scheduling system. The theory of running time estimation used to estimate a running time of the State Railway of Thailand East Line. Running time estimation theory consists of many parameters and factors including routing information, rolling stock data and operation data. These parameters use to estimate a train timetable and running time. The results show the correcting train timetable that different from the average time calculation from previous method. And show a graph of time-distance and train timetable without conflicting train operation. Finally, The software for simulation of train timetable scheduling has developed.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ!อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี โดยความอนุเคราะห์ของอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.วันวิสา ชัชวงษ์ อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้ซึ่งเป็นที่ปรึกษาให้คำแนะนำ และชี้แนะแนวทางในการศึกษามาตั้งแต่สมัยปริญญาตรี จนถึงการศึกษต่อในระดับปริญญาโท และในการทำการศึกษาวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงการให้กำลังใจที่ดีเสมอมา

ขอขอบคุณ คณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ที่เป็นประโยชน์ สำหรับการศึกษาวิจัย

ขอขอบคุณ นายธนวิษณุ อนุวงศ์พิณีจ เพื่อนร่วมรุ่นในการศึกษาที่สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ ที่เป็นผู้ให้คำแนะนำ ผู้ช่วยเหลือในด้านกรเรียน การทำการศึกษาวิจัย ตั้งแต่การสอบวิชาสัมมนา การตีพิมพ์บทความทางวิชาการ และการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ น้องณัฐชา โตศิลา นนท์ รุ่นน้องสาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ ที่ได้ช่วยทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ถูกต้อง

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่การรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) ที่ได้เอื้อเฟื้อข้อมูลสำหรับการทำการศึกษาวิจัย

ขอขอบคุณ โครงการจัดตั้งสถาบันพัฒนาเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ได้มอบความรู้ประสบการณ์ และโอกาสที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณบิดามารดา และครอบครัวของข้าพเจ้าที่คอยให้กำลังใจ คำแนะนำ และสนับสนุน จนทำให้ข้าพเจ้าสามารถจัดทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วง สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา และครอบครัว ที่เป็นที่รักและเคารพยิ่งตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า รวมถึงผู้มีพระคุณต่อข้าพเจ้าทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวไว้ ณ ที่นี้

ทปกร เหมือนนเตย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อ!!!อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 วิธีการวิจัย.....	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้.....	3
1.7 ประโยชน์ของการวิจัย.....	4
1.8 ส่วนประกอบการศึกษา.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับการจัดตารางเวลาการเดินรถ (Train Timetable Scheduling).....	5
2.2.1 การวางแผนการจัดตารางเวลาการเดินรถ.....	5
2.2.2 กราฟของตารางเวลาการเดินรถ (Traffic Diagram).....	6
2.2.3 ตารางเวลาการเดินรถ (Scheduled Running Time).....	7
2.2.4 Blocking Time and Headway Theory.....	9
2.2.5 กระบวนการจัดตารางการเดินรถ (Scheduling Method).....	12
2.2.5.1 การจัดการตารางเดินรถด้วยมือ (Manual Scheduling).....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.5.2 การจัดการตารางเดินรถด้วยคอมพิวเตอร์.....	13
2.2.6 การประเมินคุณภาพของการจัดการตารางการเดินรถ.....	14
2.3 แนวเส้นทางรถไฟ (Track Alignment).....	16
2.3.1 ทางโค้งและทางชัน (Curve and Gradient).....	16
2.3.2 ผลกระทบเมื่อรถไฟวิ่งในทางโค้ง.....	17
2.3.3 โค้งปรับเปลี่ยน (Transition Curve).....	25
2.3.4 Cant Gradient.....	26
2.3.5 การกำหนด Cant/Cant Deficiency/Cant Gradient สำหรับทางโค้ง.....	26
2.3.6 การพิจารณาระยะทางของ Transition Curve ในแนวระดับ.....	30
2.3.7 โค้งในแนวตั้ง.....	31
2.3.8 End Throw and Centre Throw.....	32
2.4 ฤทธิการประมาณระยะเวลาเดินรถ (Running Time Estimation).....	32
2.4.1 ข้อมูลโครงสร้างพื้นฐานและขบวนรถ.....	33
2.4.1.1 แรงขับเคลื่อน (Tractive Effort, $F_T$ ).....	34
2.4.1.2 แรงต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของรถไฟ (Resistance to Motion).....	36
2.4.1.3 แรงต้านทานของเส้นทางรถไฟ (Line Resistances).....	39
2.4.2 ผลรวมของแรงทั้งหมดที่เกี่ยวข้องในการเคลื่อนที่ของรถไฟ.....	40
2.4.3 โมเดลรถไฟกับมวล.....	41
2.4.4 Speed Profile.....	41
2.4.4.1 การแบ่งส่วนการเคลื่อนที่ของรถไฟ.....	42
2.4.4.2 ลักษณะเฉพาะของเส้นทางรถไฟ.....	42
2.4.4.3 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของรถไฟ.....	43
2.4.5 การคำนวณระยะเวลาเดินรถไฟ.....	45
2.4.5.1 การพิจารณาการเบรก.....	45
2.4.5.2 การพิจารณาการเพิ่มความเร็.....	47
2.4.5.3 การคำนวณโดยการจำลองให้รถเป็น Homogeneous Strip.....	48
2.4.6 การพิสูจน์สมการเชิงอนุพันธ์โดยวิธีการ Difference Equation.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 ผลการทดลองซอฟต์แวร์การจัดตารางเวลาการเดินทาง.....	83
4.4.1 ผลการทดลองอินเทอร์เน็ตเฟสที่ติดต่อกับผู้ใช้.....	83
4.4.1.1 Login Form.....	83
4.4.2 ผลการทดลองอินเทอร์เน็ตเฟสส่วนหน้าจอหลัก (Main Planning).....	84
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	92
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	92
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	93
เอกสารอ้างอิง.....	94
ภาคผนวก.....	96
ภาคผนวก ก ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์.....	97
ประวัติผู้เขียน.....	98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การขยาย Gauge ของทางรถไฟในทางโค้งแคบ.....	28
ตารางที่ 3.1 ข้อมูลเส้นทางสถานีฉะเชิงเทรา-สถานีบางพระ.....	54
ตารางที่ 3.2 ข้อมูลการเดินทางของการรถไฟแห่งประเทศไทย ตั้งแต่สถานีชุมทางฉะเชิงเทรา-สถานีบางพระ.....	57
ตารางที่ 3.3 เวลาการเดินทางของการรถไฟแห่งประเทศไทย ตั้งแต่สถานีชุมทางฉะเชิงเทรา-สถานีบางพระ.....	57
ตารางที่ 3.4 ข้อมูลสำหรับเข้าสู่ระบบ (User).....	65
ตารางที่ 3.5 ข้อมูลการจัดตารางการเดินทาง (TrainID).....	65
ตารางที่ 3.6 ข้อมูลสำหรับรางรถไฟ (Track).....	66
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลลักษณะเฉพาะของขบวนรถไฟ.....	68
ตารางที่ 4.2 ค่า $F_{RL}$ ที่รวมเข้ากับข้อมูลเส้นทางรถไฟสายตะวันออก.....	71
ตารางที่ 4.3 ค่าแรงต้านทาน $F_R(V)$ .....	72
ตารางที่ 4.4 ผลรวมของแรงทั้งหมดที่เกี่ยวข้องในการเคลื่อนที่ของรถไฟ.....	73
ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $v$ , $t$ และ $s$ ที่ความเร็วช่วง 8.3 m/s ถึง 15.2 m/s.....	76
ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง $v$ , $t$ และ $s$ ที่ความเร็วช่วง 16.7 m/s ถึง 19.4 m/s.....	78
ตารางที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง $v$ , $t$ และ $s$ ที่ความเร็วช่วง 22.2 m/s ถึง 25 m/s.....	80
ตารางที่ 4.8 เวลาที่ใช้ตามระยะทางของเส้นทางรถไฟสายตะวันออก.....	81
ตารางที่ 5.1 เวลาการมาถึงของรถไฟโดยคำนวณจากทฤษฎีการประมาณ ระยะเวลาเดินทาง (Running Time Estimation).....	92
ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบระหว่างเวลาจากทฤษฎีกับเวลาจาก รฟท. ....	93

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 หลักการของไดอะแกรมจราจร (กรณีทางคู่).....	6
รูปที่ 2.2 Station Traffic Diagram.....	7
รูปที่ 2.3 Combined Traffic Diagram that Shows the Occupation of Line and Station.....	7
รูปที่ 2.4 Principles of Adding Recovery Time to a Schedule.....	8
รูปที่ 2.5 Blocking Time of a Block Section.....	9
รูปที่ 2.6 Blocking Time Stairway.....	10
รูปที่ 2.7 Signal Headway and Line Headway.....	10
รูปที่ 2.8 Minimum Line Headway on a Mass Transit Railway.....	11
รูปที่ 2.9 การเปรียบเทียบ Blocking Time Stairway สัญญาณคงที่.....	11
รูปที่ 2.10 Principle of Manual Scheduling.....	13
รูปที่ 2.11 Visualization of a Scheduling Conflict.....	13
รูปที่ 2.12 Principle of an Integrated Clock Face Timetable.....	14
รูปที่ 2.13 Criteria for the Recoverability of the Timetable.....	15
รูปที่ 2.14 รถไฟและการถ่ายเทน้ำหนักกับราง.....	17
รูปที่ 2.15 ทางโค้งปรับเปลี่ยนเชื่อมระหว่างทางตรงกับทางโค้ง.....	25
รูปที่ 2.16 End and Centre Throw ของรถไฟบนทางโค้ง.....	32
รูปที่ 2.17 ตัวอย่างของเส้นโค้ง แรงขับเคลื่อน กับความเร็ว.....	35
รูปที่ 2.18 กราฟ Resistance และ Tractive Effort กับ Speed.....	37
รูปที่ 2.19 Grade หรือความชัน.....	39
รูปที่ 2.20 ตัวอย่าง Grade Resistance.....	39
รูปที่ 2.21 ตัวอย่างการแบ่งส่วน Moving Sections of Trains.....	42
รูปที่ 2.22 Typical Train Movement Behavior.....	43
รูปที่ 2.23 Braking Curves ที่เป็นผลมาจากช่วงของการจำกัดความเร็วแบบ A.....	45
รูปที่ 2.24 Braking Curves ที่เป็นผลมาจากช่วงของการจำกัดความเร็วแบบ B.....	46
รูปที่ 2.25 Braking Curves ที่เป็นผลมาจากช่วงของการจำกัดความเร็วแบบ C.....	46

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.26 Braking Curves ที่เป็นผลมาจากช่วงของการจำกัดความเร็วแบบ D.....	46
รูปที่ 2.27 Acceleration Phase Type 1.....	47
รูปที่ 2.28 Acceleration Phase Type 2.....	48
รูปที่ 2.29 Acceleration Phase Type 3.....	48
รูปที่ 2.30 การเคลื่อนที่ของรถไฟ.....	49
รูปที่ 3.1 แผนที่เส้นทางรถไฟ (ฉะเชิงเทรา-บางพระ).....	54
รูปที่ 3.2 หัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า อัลสตอม (ALD.) รุ่นเลขที่ 4301-4309.....	56
รูปที่ 3.3 ภาพรวมการทำงานและการออกแบบระบบซอฟต์แวร์จัดตารางเวลาการเดินรถ.....	58
รูปที่ 3.4 ตารางเก็บข้อมูลการเดินรถ.....	58
รูปที่ 3.5 การทำงานของระบบการจัดตารางเวลาการเดินรถ.....	59
รูปที่ 3.6 Use Case Diagram สำหรับการทำงานของระบบจัดตารางการเดินรถ.....	61
รูปที่ 3.7 แผนผังการทำงานของอินเตอร์เฟซการยืนยันตัวตน (Login).....	62
รูปที่ 3.8 แผนผังการทำงานของหน้า Main Planning.....	63
รูปที่ 3.9 แผนผังการทำงานของการออกแบบอินเตอร์เฟซแสดงกราฟ.....	64
รูปที่ 4.1 การเพิ่มความเร็ว ที่ความเร็วสูงสุดที่ 15.2 m/s หรือ 55 km/h.....	77
รูปที่ 4.2 การเพิ่มความเร็ว ที่ความเร็วสูงสุดที่ 19.4 m/s หรือ 70 km/h .....	79
รูปที่ 4.3 การเพิ่มความเร็ว ที่ความเร็วสูงสุดที่ 25 m/s หรือ 90 km/h.....	81
รูปที่ 4.4 การแบ่งส่วนการเคลื่อนที่ของรถไฟ.....	82
รูปที่ 4.5 อินเตอร์เฟซ Login Form.....	83
รูปที่ 4.6 Login Form จะแจ้ง Error เมื่อกรอกข้อมูลเข้าสู่ระบบไม่ถูกต้อง.....	83
รูปที่ 4.7 Login Form จะแจ้ง Correct Login เมื่อกรอกข้อมูลเข้าสู่ระบบถูกต้อง.....	84
รูปที่ 4.8 อินเตอร์เฟซหลัก.....	84
รูปที่ 4.9 อินเตอร์เฟซติดต่อผู้ดูแลระบบ.....	85
รูปที่ 4.10 อินเตอร์เฟซแสดง กดปุ่ม Graph เมื่อใส่ข้อมูลไม่ครบ.....	85
รูปที่ 4.11 อินเตอร์เฟซแสดงกราฟและข้อมูลเวลาการเดินรถ.....	86
รูปที่ 4.12 อินเตอร์เฟซแสดงกราฟเมื่อเวลาการเดินรถเกิดปัญหาทับซ้อนกัน.....	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.13 หน้าโปรแกรม Microsoft Excel ที่ทำการ Export มาจาก Datagridview.....	87
รูปที่ 4.14 อินเตอร์เฟส Edit Data สำหรับการสร้างกราฟกำหนดโดยผู้ใช้.....	88
รูปที่ 4.15 อินเตอร์เฟสแจ้งเตือนเมื่อใส่ค่าครบและถูกต้อง.....	88
รูปที่ 4.16 อินเตอร์เฟสแจ้งเตือนเมื่อไม่ได้ใส่ค่าข้อมูล.....	89
รูปที่ 4.17 อินเตอร์เฟสแจ้งเตือนเมื่อทำการลบข้อมูล.....	89
รูปที่ 4.18 ข้อความแจ้งเตือนให้ทราบเมื่อทำการแก้ไขข้อมูลสมบูรณ์.....	90
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงเวลาการเดินทางไฟ (Manual Graph).....	90
รูปที่ 4.20 อินเตอร์เฟสตารางเวลาการเดินทางในรูปแบบของ Microsoft Excel ที่ส่งออกมาจากโปรแกรม..	91

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการคมนาคมระบบขนส่งทางราง ถือว่าเป็นระบบการคมนาคมที่มีส่วนสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ ไม่ว่าจะเป็นการขนส่งผู้โดยสาร หรือขนส่งสินค้า และมีแนวโน้มความต้องการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น สำหรับประเทศไทยในปัจจุบันรัฐบาลได้ให้ความสนใจในการลงทุนพัฒนาระบบขนส่งทางรางของประเทศ โดยการรถไฟแห่งประเทศไทยถือเป็นผู้ให้บริการเดินรถองค์กรหลักที่อยู่คู่กับประเทศไทยมาเป็นเวลานาน ทำหน้าที่ให้บริการเดินรถแก่ประชาชนในการเดินทางทั้งภายในจังหวัดและระหว่างจังหวัด แต่บ่อยครั้งผู้โดยสารต้องพบกับปัญหาการรถไฟมาถึงไม่ตรงกับเวลาที่ได้กำหนดไว้ในตารางเวลาการเดินรถ ซึ่งปัญหานี้เกิดได้จากหลายปัจจัย ส่งผลให้ตารางเวลาการเดินรถที่ได้กำหนดไว้มีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง

การจัดตารางเวลาการเดินรถนั้นเป็นส่วนที่สำคัญและน่าสนใจอย่างหนึ่ง เพราะเปรียบเสมือนส่วนหลักของการวางแผนการให้บริการเดินรถ การจัดตารางเวลาการเดินรถ การคำนวณเวลาในการเดินรถ และการมีตารางเวลาเดินรถที่เหมาะสม จะทำให้เกิดประโยชน์อย่างมากแก่ผู้ให้บริการเดินรถและผู้โดยสาร

ในอดีตการจัดตารางเวลาการเดินรถจะทำด้วยมือเปล่า (Manual Scheduling) แต่เมื่อระบบรถไฟมีการพัฒนาทำให้ทั้งเส้นทางและขบวนรถไฟมีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น การจัดตารางเวลาการเดินรถด้วยมือจึงทำได้ลำบาก ภายหลังหน่วยงานที่เป็นผู้ให้บริการเดินรถจึงได้มีการนำคอมพิวเตอร์มาใช้เพื่อช่วยในการจัดตารางเวลาการเดินรถให้สะดวกและแม่นยำมากขึ้น โดยได้มีการพัฒนาระบบจัดตารางเวลาการเดินรถโดยใช้ Microsoft Excel และได้พัฒนาเป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับงานวิจัยเฉพาะ เช่น SimaRail ยกตัวอย่างซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับจัดตารางเวลาการเดินรถ เช่น OpenTimetable สำหรับประเทศไทยนั้นยังคงต้องอาศัยซอฟต์แวร์การจัดตารางเวลาการเดินรถของต่างประเทศ โดยยังไม่มีการพัฒนาซอฟต์แวร์การจัดตารางเวลาการเดินรถด้วยตนเอง ซึ่งการพัฒนา ระบบขนส่งทางรางของประเทศจะต้องอาศัยให้เกิดการพัฒนาองค์ความรู้ และการพัฒนาเทคโนโลยี เพื่อใช้งานภายในประเทศไทย เพื่อเป็นการลดการพึ่งพาจากต่างประเทศ ผู้วิจัยจึงได้ทำการพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับจัดตารางเวลาการเดินรถขึ้น โดยจำลองจากเส้นทางตัวอย่างระหว่างสถานีรถไฟ 5 สถานี ในเส้นทางรถไฟสายตะวันออก โดยใช้ข้อมูลคุณลักษณะเฉพาะของหัวรถจักรที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน และแผนการให้บริการเดินรถ ของการรถไฟแห่งประเทศไทย ซึ่งจะนำข้อมูลต่าง ๆ เหล่านี้มาประกอบกันเพื่อเป็นข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณเวลาในการเดินรถ เพื่อให้ได้ตารางเวลาการเดินรถที่ถูกต้อง และเหมาะสมในการให้บริการ จากนั้นทำการจำลองการเดินรถผ่านซอฟต์แวร์การจัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางเวลาการเดินทางที่ได้พัฒนาขึ้น โดยจะได้ผลลัพธ์เป็นกราฟของการเดินทางในรูปแบบของกราฟระหว่างเวลา-สถานี นำมาจัดเป็นแผนตารางเวลาการเดินทางที่เกิดมาจากการคำนวณด้วยซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นมาเอง แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับตารางเวลาการเดินทางเดิม เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงตารางเวลาการเดินทางที่มีอยู่เดิมให้ตรงเวลาและเหมาะสมมากยิ่งขึ้น จากการใช้ข้อมูลที่น่ามาคำนวณมากกว่าเดิม ทั้งยังเป็นการพัฒนาปรับปรุงที่เกิดจากการพัฒนาเทคโนโลยีจากภายในประเทศ และเมื่อได้ทำการต่อยอดไปใช้งานจริงแล้วก็จะเป็นการลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศอีกด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์ที่สามารถระบุได้ดังนี้

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการจัดตารางการเดินทาง ทั้งที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เพื่อรู้รายละเอียดวิธีการ ขั้นตอนต่างๆ และปัญหาที่เกิดขึ้นจากการจัดตารางการเดินทางในปัจจุบัน
- 1.2.2 เพื่อหาวิธีการและแนวทางในการพัฒนาระบบจัดตารางการเดินทาง โดยวิธีที่ใช้มาจากทฤษฎีการประมาณระยะเวลาเดินทาง (Running Time Estimation)
- 1.2.3 เพื่อทดลองคำนวณหาเวลาการเดินทางโดยใช้ข้อมูลจริง โดยนำข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากการรถไฟแห่งประเทศไทยมาทดลองคำนวณ
- 1.2.4 เพื่อศึกษาและออกแบบซอฟต์แวร์สำหรับช่วยจัดตารางการเดินทาง ซึ่งต้องเป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถใส่ข้อมูลที่มาจากการคำนวณได้ ทดแทนการใช้ซอฟต์แวร์จากต่างประเทศที่มีราคาค่อนข้างสูง
- 1.2.5 เพื่อจัดทำตารางเวลาการเดินทางจากข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ สรุปออกมาเป็นตารางเวลาการเดินทาง ที่มีเวลาเข้า-ออก สถานีต่างๆ และเวลาจอดตามแต่ละสถานี

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาข้อมูลเส้นทาง ขบวนรถไฟที่ใช้งานจริงในเส้นทางรถไฟสายตะวันออก
- 1.3.2 ศึกษาข้อมูลการจัดตารางเวลาการเดินทางที่มีใช้ในปัจจุบันของการรถไฟแห่งประเทศไทย
- 1.3.3 ศึกษาการคำนวณหาเวลาในการเดินทางโดยใช้ทฤษฎีการประมาณระยะเวลาเดินทาง (Running Time Estimation)
- 1.3.4 ออกแบบซอฟต์แวร์ที่สามารถนำเข้าข้อมูลเส้นทาง ข้อมูลขบวนรถไฟ เพื่อคำนวณออกมาเป็นกราฟระหว่างเวลา-สถานี เพื่อใช้ในการจัดตารางเวลาการเดินทาง
- 1.3.5 จัดทำตารางเวลาการเดินทางที่อาศัยการคำนวณจากซอฟต์แวร์ที่ได้ออกแบบขึ้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 วิธีการวิจัย

1.4.1 คำนคว้า วิจัย ศึกษาเกี่ยวกับการจัดตารางเวลาการเดินทางที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันของการรถไฟแห่งประเทศไทย

1.4.2 คำนคว้า วิจัย ศึกษาเกี่ยวกับการจัดตารางเวลาการเดินทางโดยใช้ทฤษฎีการประมาณระยะเวลาเดินทาง (Running Time Estimation)

1.4.3 คำนคว้า วิจัย ศึกษา การออกแบบซอฟต์แวร์การจัดตารางเวลาการเดินทาง

1.4.4 คำนวนหาเวลาในการเดินทางโดยใช้ทฤษฎีการประมาณระยะเวลาเดินทาง (Running Time Estimation)

1.4.5 ออกแบบซอฟต์แวร์การจัดตารางเวลาการเดินทาง

1.4.6 ทดสอบปรับปรุง และประเมินความสามารถของระบบที่ได้ออกแบบ

1.4.7 วิเคราะห์ผลการทดลอง และสรุปผลการทดลอง

## 1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 มีความรู้ความเข้าใจในการจัดตารางเวลาการเดินทาง

1.5.2 มีความรู้ความเข้าใจในทฤษฎีการประมาณระยะเวลาเดินทาง (Running Time Estimation)

1.5.3 มีความรู้ความเข้าใจในการใช้ซอฟต์แวร์เพื่อนำมาใช้ในการจัดตารางเวลาการเดินทาง

1.5.4 การคำนวณหาเวลาในการเดินทางโดยใช้ทฤษฎีการประมาณระยะเวลาเดินทาง (Running Time Estimation) และซอฟต์แวร์ช่วยในการจัดตารางเวลาการเดินทางที่สามารถแสดงผลออกมาเป็นรูปแบบกราฟระหว่างเวลา-ระยะทาง และตารางการเดินทาง

## 1.6 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

1.6.1 ฮาร์ดแวร์

- เครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับพัฒนาโปรแกรมและแสดงข้อมูล จำนวน 1 เครื่อง

1.6.2 ซอฟต์แวร์

- Microsoft visual C#
- Scarm
- Microsoft excel
- Xampp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.7 ประโยชน์ของการวิจัย

งานวิจัยนี้เกิดจากความต้องการของผู้วิจัยที่ต้องการศึกษาหาวิธีการคิดคำนวณระยะเวลาการมาถึงของรถไฟที่มีความแม่นยำหรือใกล้เคียงกับความเป็นจริงที่มากขึ้น ซึ่งประโยชน์ของงานวิจัยนี้คือ ได้วิธีการคำนวณระยะเวลาการมาถึงของรถไฟที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงและความแม่นยำที่มากขึ้น จากการใช้ทฤษฎีการประมาณระยะเวลาเดินทางเข้ามาเกี่ยวข้อง ทั้งยังพัฒนาออกแบบซอฟต์แวร์ สำหรับช่วยในการจัดตารางเวลาการเดินทาง โดยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการวางแผนการจัด ตารางเวลาการเดินทางไฟของหน่วยงานผู้ให้บริการเดินทางได้ นำไปสู่การใช้ซอฟต์แวร์ที่มาจาก ภายในประเทศเพื่อลดต้นทุนการใช้ซอฟต์แวร์จากต่างประเทศ

## 1.8 ส่วนประกอบของการวิจัย

เนื้อหาที่จะกล่าวถึงต่อมาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วย 5 บท ได้แก่

บทที่ 1 บทนำ

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 การวิเคราะห์และออกแบบระบบ

บทที่ 4 ผลการทดลอง

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 บทนำ

ระบบจัดตารางเวลาการเดินรถ จะอำนวยความสะดวกให้กับผู้วางแผนการให้บริการเดินรถไฟ ในการจัดตารางเวลาการเดินรถ โดยในการนำไปพัฒนาเพื่อเป็นซอฟต์แวร์สำหรับจัดตารางเวลาการเดินรถจริงนั้น จะต้องสามารถตรวจสอบความถูกต้องของตารางเวลาได้ โดยการออกแบบตารางเวลานี้ ผู้ใช้จะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่จะส่งผลต่อตารางเวลาการเดินรถไฟและประสิทธิภาพในการให้บริการของตารางเวลาการเดินรถแต่ละตาราง นอกจากนี้ระบบจัดตารางเวลายังสามารถนำไปใช้ในการจัดตารางเวลาการเดินรถจริงในอนาคตได้อีกด้วย

### 2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับการจัดตารางเวลาการเดินรถ (Train Timetable Scheduling)

#### 2.2.1 การวางแผนการจัดตารางเวลาการเดินรถ

ในการวางแผนการจัดตารางเวลาการเดินรถนั้นเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในขั้นตอนการให้บริการเดินรถแก่ผู้โดยสารและการขนส่งสินค้า โดยจะต้องพิจารณาจากปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่

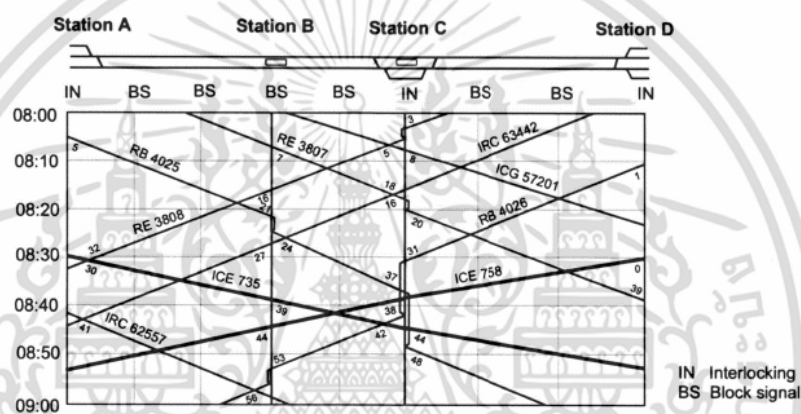
- วันที่รถไฟวิ่ง
- เส้นทางที่รถไฟวิ่งในโครงข่าย
- โหลดสูงสุดที่ได้รับการรองรับ (Approved Maximum Loads)
- แผนการหยุดรถ เวลาที่มาถึงและเวลาที่เดินทางออก (Planned Stop Locations)
- แรงต้านการเคลื่อนที่ของรถ และการปรับความลาดชัน (Running Resistance and Adjusted Slope)
- สัมประสิทธิ์ความเฉื่อยของการหมุนของล้อ (Inertia Coefficients of Rotating Masses)
- ความเร็วสูงสุดของเส้นทางที่สามารถรับได้ (Speed Limits Due to The Track)
- ความเร็วสูงสุดของตัวรถ (Speed Limits to The Rolling Stock)
- ความเร่ง เมื่อขบวนรถออกตัว (Acceleration on Starting)
- ความหน่วง เมื่อทำการเบรก (Deceleration on Braking)
- ระยะเบรก (Braking Distance)
- เวลาที่ใช้ในการเดินรถ (Running Times)
- จุดตัดทางแยกต่าง ๆ หรือตามประแจ (Train Crossing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.2 กราฟของตารางเวลาการเดินทาง (Traffic Diagram)

กราฟของตารางเวลาการเดินทางมีเพื่อใช้วางแผนการจราจรของขบวนรถไฟและใช้เป็นเอกสารอ้างอิงในการควบคุมการเดินทาง ยกเว้นทางอเมริกาเหนือจะใช้กราฟเพียงแคในช่วงวางแผนการเดินทางหรือวิเคราะห์ความจุแต่ในการเดินทางจริงจะใช้ Tabular Sheet แทน

ปริมาณจราจรบนเส้นทางจะถูกแสดงในรูปของกราฟระหว่างเวลาและระยะทาง (Time-distance Diagram) ที่มีแกนเวลาและแกนสถานี (หรือระยะทาง) ที่ทุกสถานีจะมีเส้นลากผ่านในแนวนอนกับแกนเวลา การเคลื่อนที่ของขบวนรถไฟจะถูกแสดงด้วยเส้น เรียกว่า เส้นรถไฟ (Train Paths หรือ Time-distance Graphs) ที่มีหมายเลขขบวนรถกำกับที่เส้น ที่จุดตัดของเส้นสถานีกับเส้นรถไฟจะมีเวลาจริงกำกับไว้แสดงตัวเลขนาฬิกา

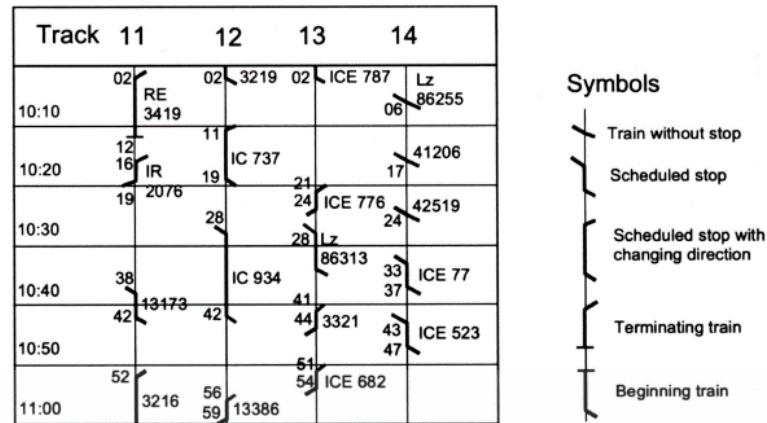


รูปที่ 2.1 หลักการของไดอะแกรมจราจร (กรณีทางคู่), [12]

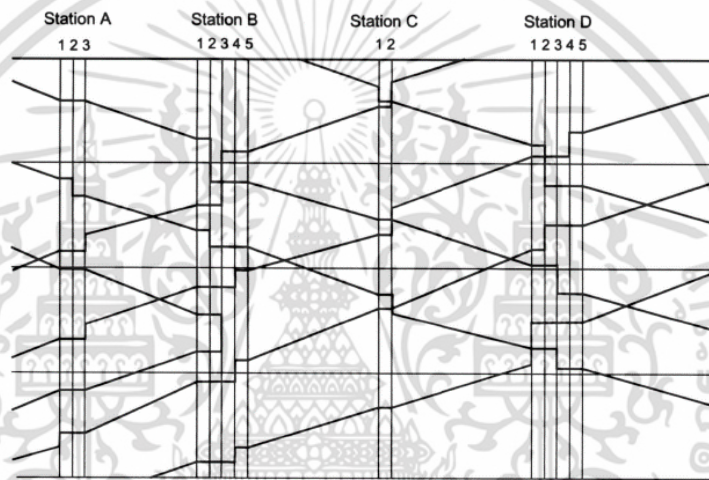
กราฟตารางเวลาการเดินทางอาจแสดงในรูปที่แกนสถานีอยู่ในแนวตั้งหรือแนวนอนก็ได้ ขึ้นอยู่กับแบบแผนของหน่วยงานรถไฟว่าใช้แบบใด และในไดอะแกรมจะแสดงกราฟการเดินทางของสถานี (Station Traffic Diagram) เพิ่มเติม ซึ่งแสดงผังการจัดวางทางที่สถานีและที่เขตบังคับสัมพันธ์ (Interlocking) โดยเส้นกราฟ 1 เส้นใช้แทนหนึ่งเส้นทาง โดยแนวเส้นทางนี้จะขนานกับเส้นเวลาในไดอะแกรมจราจร

สถานะของการใช้ทางที่สถานีจะถูกมาร์กด้วยแถบที่มีหมายเลขขบวน เวลาเข้าและออกกำกับเอาไว้ โดยแสดงดังรูปที่ 2.2 เส้นเฉียงสั้น ๆ ที่ปลายแถบคือแนวเส้นกราฟ Time-distance เพื่อแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของรถ ในผังขนาดย่อมมักจะแสดงเพียงแคตารางเวลาที่สถานีแทนการแสดงด้วย Station-traffic Diagram ขนาดเต็ม แสดงดังรูปที่ 2.3 ข้อมูลระดับนี้ก็เพียงพอในการแสดงปริมาณจราจรสำหรับสถานีขนาดกลางและขนาดเล็ก ส่วนสถานีขนาดใหญ่ควรแสดง Station Traffic Diagram เพิ่มขึ้นมาด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 Station Traffic Diagram, [12]



รูปที่ 2.3 Combined Traffic Diagram that Shows the Occupation of Line and Station tracks, [12]

### 2.2.3 ตารางเวลาการเดินทาง (Scheduled Running Time)

ในการจัดตารางเวลาการเดินทางไฟหนึ่งขบวน มีองค์ประกอบที่ใช้เป็นปัจจัยสำคัญในการจัดตารางเวลาการเดินทางได้แก่

- เวลาที่ใช้ในการเดินทางระหว่างจุดจอดที่กำหนดไว้ (Pure Running Time)
- เวลาจอดที่จุดจอด (Dwell Time)
- เวลาฟื้นคืน (Recovery Time)
- เวลาหยุดรอที่กำหนดไว้ (Scheduled Waiting Time)

Pure Running Time ระหว่างจุดจอดคือระยะเวลาที่สั้นที่สุดที่รถไฟใช้วิ่งจากการคำนวณเวลาที่ใช้เดินทาง ส่วน Recovery Time มีไว้เพื่อให้รถไฟอาจจะล่าช้าได้บ้าง โดยจะเพิ่ม Recovery Time เข้าไปใน Pure Running Time โดย Recovery Time นั้นมี 2 แบบ คือ

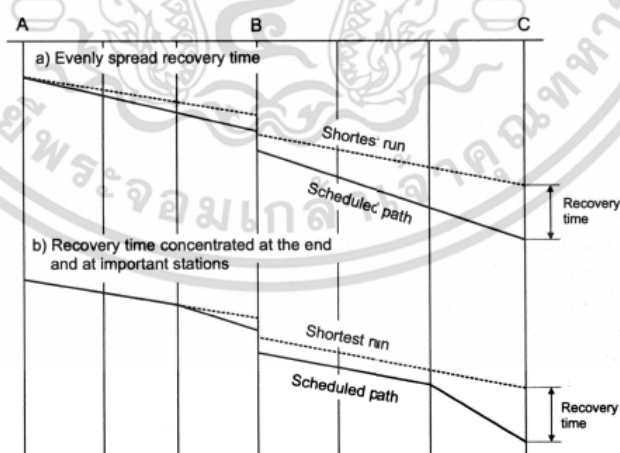
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Regular Recovery Time เป็นเวลาที่เพิ่มไปในทุกเส้นทางรถไฟ (Train Path) เป็นเปอร์เซ็นต์ของ Pure Running Time โดยในยุโรปจะมีค่าเพิ่มขึ้น 3-7% และในอเมริกา 6-8% ในรถโดยสาร ในบางหน่วยงานจะกระจาย Regular Recovery Time เท่า ๆ กันตลอดเส้นทางรถไฟ แต่บางหน่วยงานก็เน้นที่สถานีใหญ่ระหว่างทางและที่สถานีปลายทาง โดยแสดงดังรูปที่ 2.4 แต่ในกรณีของสถานีใหญ่ บางครั้งจะไม่เพิ่ม Recovery Time เข้าไปใน Running Time ในช่วงที่ประชิดเข้าสู่สถานี แต่จะกลับไปเพิ่มใน Dwell Time ที่สถานีแทน

- Special Recovery Time ใช้เพื่อชดเชยความล่าช้าที่เกิดจากงานก่อสร้างและซ่อมบำรุงทางที่อยู่ในสภาพชำรุด โดยจะเพิ่มเป็นเวลาที่สำรองคงที่เข้าไปใน Running Time ในช่วงเส้นทางที่มีความล่าช้า

Scheduled Waiting Time หรือการจัดตารางเวลาที่ใช้สำหรับหยุดรถขบวนรถ จะต้องทำการกำหนดไว้และเพิ่มเวลานี้เข้าไป เพื่อเหตุผลในการจัดการเดินรถ เช่น เพื่อจัดให้ขบวนรถโดยสาร 2 ขบวนมาจอดที่สถานีให้ผู้โดยสารเปลี่ยนต่อขบวนรถหรือเปลี่ยนเส้นทางได้ หรือเพื่อรอขบวนรถหลักหรือหรือสวนทาง เวลาหยุดรถขบวนรถนี้จะถูกเพิ่มเข้าไปใน Dwell Time ของจุดจอดตามตารางเดินรถ แต่บางครั้งจะเพิ่มเข้าไปใน Running Time

เวลากลับรถ (Reversing Time) คือเวลาที่ต้องการในการจัดเตรียมขบวนรถที่มาถึงเพื่อออกเดินทางต่อ รวมเวลาในการเปลี่ยนตู้ควบคุมและเปลี่ยนขานขาลา โดยวัดจากเวลาระหว่างที่ผู้โดยสารทั้งหมดออกจากขบวนรถจนกระทั่งขบวนรถพร้อมสำหรับออกเดินทาง ในกรณีที่การมาถึงและออกจากขานขาลาเป็นเวลาเดียวกัน (ขานขาลาตรงกันข้าม) ระยะเวลาหยุดรับส่งผู้โดยสารจะคาบเกี่ยวกับระยะเวลากลับรถ



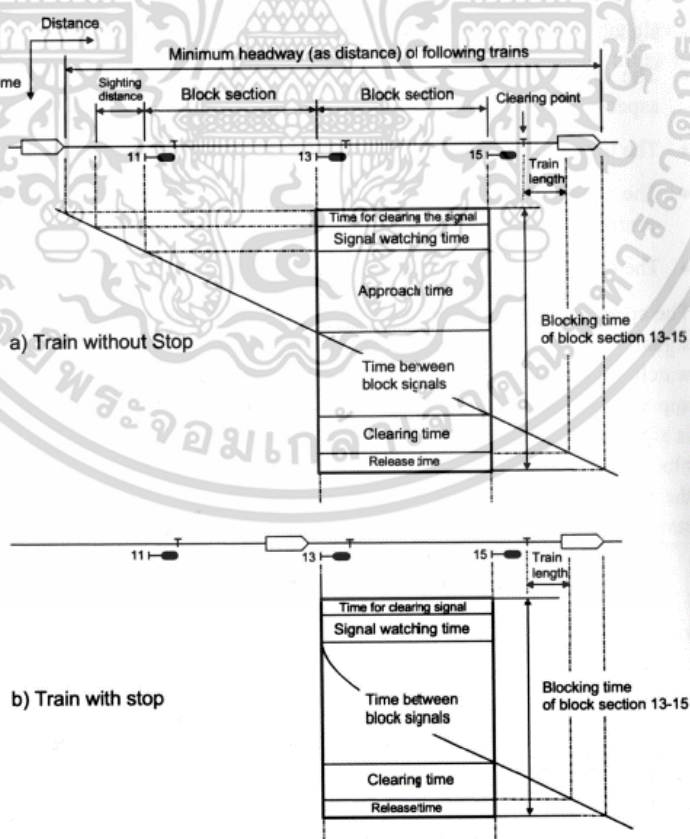
รูปที่ 2.4 Principles of Adding Recovery Time to a Schedule, [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.4 Blocking Time and Headway Theory

Headway คือระยะเวลาระหว่างรถไฟ 2 ขบวน โดย Headway สั้นที่สุดบนเส้นทางในระบบตอนคงที่ขึ้นอยู่กับ Blocking Time โดย Blocking Time คือระยะเวลานับตั้งแต่ที่เริ่มอนุญาตให้รถไฟเคลื่อนขบวนเข้ามาในตอนจนถึงการเริ่มอนุญาตให้ขบวนต่อไปเข้ามาในตอนใหม่หลังจากที่รถไฟขบวนเดิมได้ออกจากตอนและเคลียร์สัญญาณแล้ว โดยแสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่ง Blocking Time จะกินระยะเวลายาวนานกว่าระยะเวลาที่รถไฟวิ่งอยู่ในตอน ในเส้นทางที่ติดตั้งสัญญาณประจำที่ Blocking Time ของตอนสัญญาณหนึ่งในกรณีที่รถไฟไม่หยุดจอดประกอบด้วย

- ระยะเวลาที่ใช้เคลียร์สัญญาณ
- ระยะเวลาที่พนักงานขับรถใช้มองสัญญาณไฟเขียว (Clear Signal) ที่เสาสัญญาณในตอนข้างหน้า
- ระยะเวลาเดินทาง (Approach Time) ระหว่างเสาสัญญาณที่แสดงสัญญาณประชิด (Approach Signal) กับเสาสัญญาณที่ทางเข้าของตอนสัญญาณ
- ระยะเวลาระหว่างเสาสัญญาณของตอนถึงเสาสัญญาณของตอนต่อไป
- ระยะเวลาในการเคลียร์ตอนซึ่งรวมถึงระยะ Overlap ด้วย (ถ้าใช้ Overlap)
- ระยะเวลาในการปลดล็อกสัญญาณของตอน



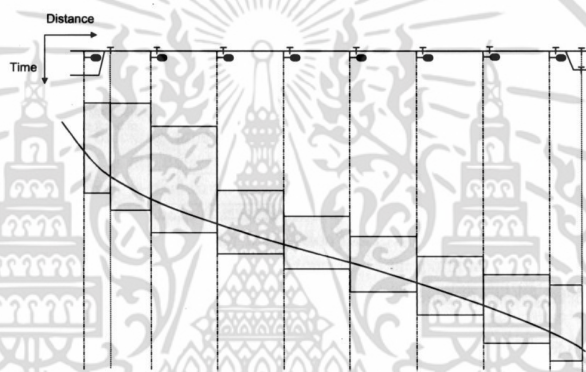
รูปที่ 2.5 Blocking Time of a Block Section, [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

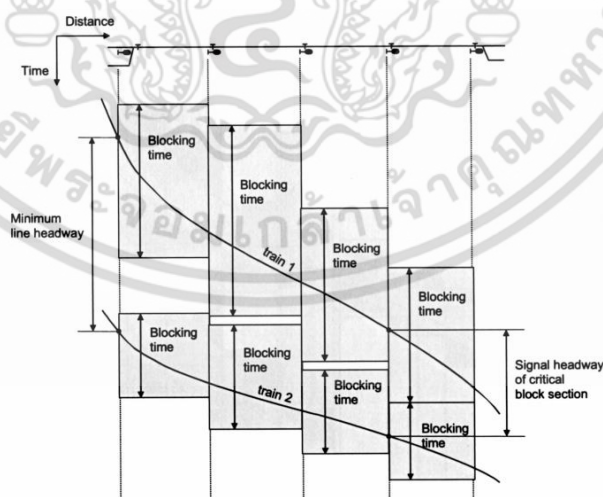
กรณีที่รถไฟต้องหยุดจอดที่ทางเข้าตอนสัญญาณนั้น จะไม่มีระยะเวลาเดินทาง (Approach Time) และระยะเวลาที่พนักงานขับรถใช้มองสัญญาณไฟเขียวคือเสาสัญญาณที่อยู่ตรงทางเข้าตอน

เมื่อทำการวาด Blocking Time ของทุกตอนสัญญาณที่ขบวนรถแล่นผ่านในรูปของ Time-distance Diagram จะได้ Blocking Time Stairway ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งสามารถใช้หาค่า Minimum Headway ระหว่างรถไฟ 2 ขบวนได้ โดยตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2.7

ในการหา Minimum Headway ไม่สามารถพิจารณาเพียงแค่ 1 ตอนสัญญาณเท่านั้น แต่ต้องพิจารณาโดยใช้ทุกตอนสัญญาณที่รถไฟ 2 ขบวนแล่นตามกัน โดย Minimum Headway เกิดขึ้นเมื่อ Blocking Time Stairway ของรถไฟ 2 ขบวนมาสัมผัสกันที่ 1 ตอนสัญญาณเป็นอย่างน้อยและตำแหน่งตอนที่สัมผัสกันนี้ คือ Critical Block Section และที่สำคัญคือ Blocking Time Stairway ของรถไฟ 2 ขบวนไม่สามารถทับกันได้



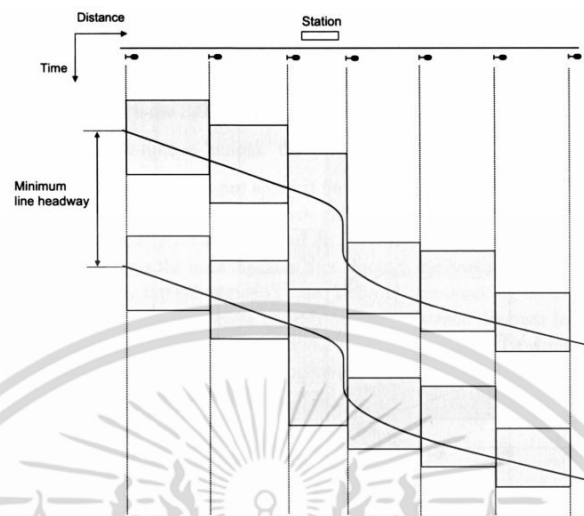
รูปที่ 2.6 Blocking Time Stairway, [12]



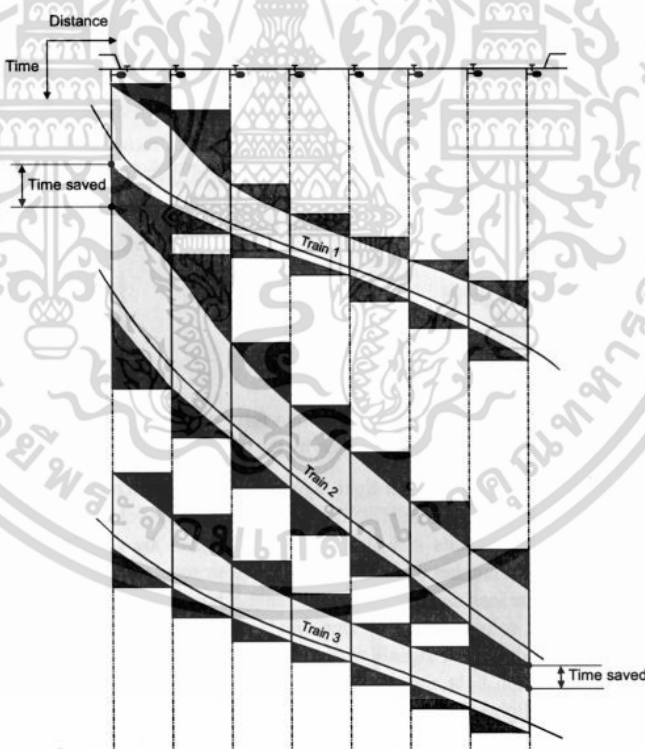
รูปที่ 2.7 Signal Headway and Line Headway, [12]

บนเส้นทางที่มีขบวนรถความเร็วที่ต่างกัน ทำการเดินรถร่วมกันนั้น ค่า Minimum Headway จะขึ้นกับความแตกต่างระหว่างความเร็วของขบวนรถ ส่วนเส้นทางที่รถไฟวิ่งด้วยความเร็ว เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากันในตำแหน่งตอนที่วิกฤต (Critical Block Section) คือตอนที่รถจอดรอที่สถานี ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.8 ซึ่งควรวางแผนสัญญาณและแบ่งตอนเพื่อให้ Blocking Time ที่สถานีนั้นจะสั้นที่สุด



รูปที่ 2.8 Minimum Line Headway on a Mass Transit Railway, [12]



รูปที่ 2.9 การเปรียบเทียบ Blocking Time Stairway ตอนสัญญาณคงที่, [12]

สำหรับเส้นทางที่ใช้ระบบตอนสัญญาณไม่คงที่ หรือ Moving Block ความยาวของตอนสัญญาณจะถูกลดลงจนเท่ากับศูนย์ แปลว่าระยะเวลาที่รถวิ่งจากจุดเริ่มต้นจนถึงออกจากตอนสัญญาณจะเป็นศูนย์ด้วย ส่วนประกอบอื่นในการคำนวณ ส่วนของ Blocking Time ยังคงมีอยู่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่นเดิม เมื่อเปรียบเทียบกับ Blocking Time Stairway ของตอนสัญญาณคงที่ (Fixed Block) ส่วนของขั้นบันไดจะหายไปและ Blocking Time Diagram จะกลายเป็นช่องเวลาที่ต่อเนื่องกันแทน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.9 ความจุของเส้นทางที่เพิ่มขึ้นจากการใช้ระบบตอนสัญญาณไม่คงที่นั้น ขึ้นอยู่กับความแตกต่างในด้านของความเร็วระหว่างรถไฟ 2 ขบวนที่แล่นตามกัน ระบบตอนสัญญาณไม่คงที่จะมีประสิทธิภาพสูงที่สุดเมื่อใช้ในรถไฟในเมือง (Mass Transit) ซึ่งรถทุกขบวนมีข้อมูลความเร็วของขบวนรถที่เหมือนกันหมด ส่วนเส้นทางที่มีความเร็วของรถต่างกัน (Mixed Traffic) หากใช้ระบบตอนสัญญาณไม่คงที่จะเพิ่มความจุของทางได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

### 2.2.5 กระบวนการจัดตารางการเดินรถ (Scheduling Method)

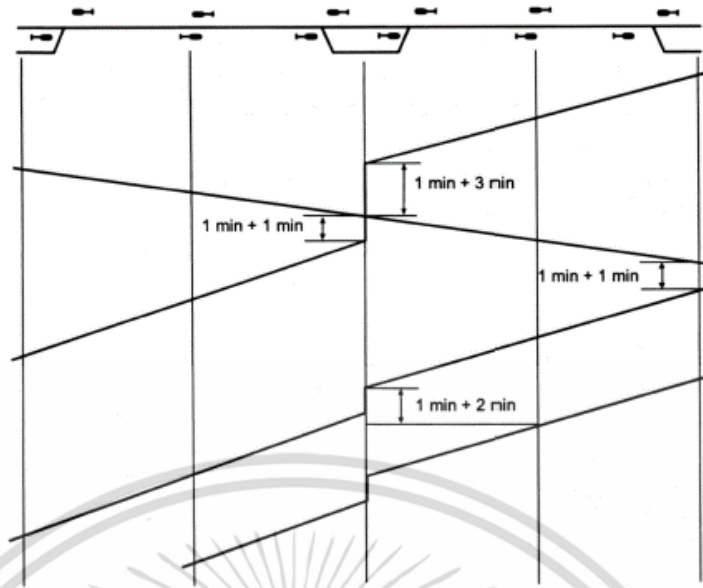
กระบวนการจัดตารางการเดินรถสามารถทำได้ 2 วิธี คือ ทำด้วยมือ (Manual Scheduling) กับ ทำด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer-based Scheduling) ในหน่วยงานรถไฟหลายหน่วยงานนั้น ใช้การจัดตารางเดินรถด้วยมือมาเป็นเวลานานมากกว่า 150 ปี หลังจากช่วงทศวรรษที่ 1990s จึงมีคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพมาทำหน้าที่จัดตารางการเดินรถ

#### 2.2.5.1 การจัดการตารางเดินรถด้วยมือ (Manual Scheduling)

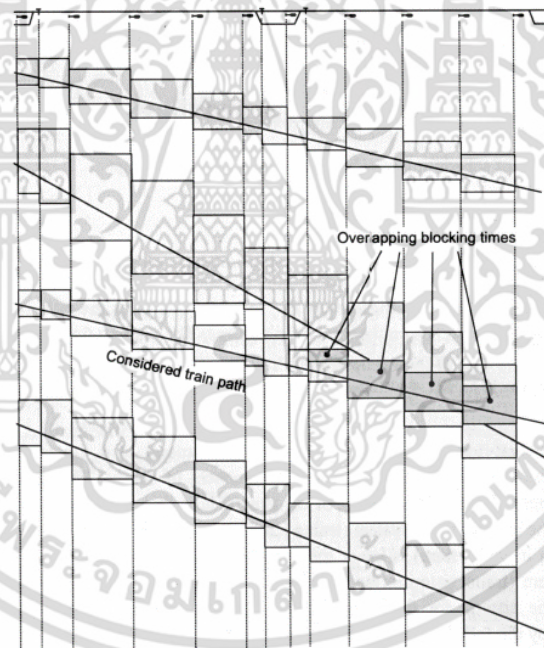
ในการจัดตารางเดินรถด้วยมือ นั้น เริ่มจากการสร้างเส้นทางไฟจากสถานีหนึ่งไปอีกสถานีหนึ่ง อ่านค่า Running Time จากตารางที่เตรียมไว้ก่อนซึ่งมีค่า Running Time ระหว่างทุกสถานีและเวลาที่ใช้เพิ่มในการเร่งและเบรกสำหรับการจอดที่สถานี โดย Running Times เหล่านี้จะรวมถึง Regular Recovery Time เอาไว้ด้วย ส่วน Special Recovery Time ในกรณีการซ่อมบำรุงทางจะต้องทำการเพิ่มต่างหาก ตาราง Running Time นี้มักมีความยุ่งยากในการคำนวณ จึงมักใช้คอมพิวเตอร์ช่วยคำนวณให้ ส่วนในขั้นต่อไปนั้นคือการหา Minimum Line Headways ซึ่งมักไม่ใช้การหากราฟ Blocking Times แบบเต็มรูปแบบ แต่จะใช้วิธีง่ายกว่านั้นคือ Blocking Time ของตอนบล็อก โดยทำการคำนวณโดยการเพิ่มเวลาเข้าไปใน Running Time ที่ใช้ในตอนบล็อคนั้น เช่นรถไฟในยุโรปมักเพิ่มเวลา 1 นาทีเข้าไป (แสดงดังรูปที่ 2.10) นอกจากนี้แล้วยังเพิ่ม Buffer Time เข้าไปอีก ซึ่งมักจะอยู่ในช่วง 1-3 นาที

ตัวอย่างรถไฟในเยอรมันมักจะเพิ่ม Minimum Buffer Time ตามนี้

- 1 นาที เมื่อรถขบวนแรกมีศักดิ์ (Priority) สูงกว่ารถขบวนที่สอง
- 2 นาที เมื่อรถทั้งสองขบวนมีศักดิ์เท่ากัน
- 3 นาที เมื่อรถขบวนที่สองมีศักดิ์ (Priority) สูงกว่ารถขบวนแรก



รูปที่ 2.10 Principle of Manual Scheduling, [12]



รูปที่ 2.11 Visualization of a Scheduling Conflict, [12]

#### 2.2.5.2 การจัดการตารางการเดินรถด้วยคอมพิวเตอร์

โปรแกรมจัดการตารางเดินรถบางระบบใช้หลักการเหมือนกับการจัดการตารางด้วยมือ ข้อดีของการใช้คอมพิวเตอร์คือการคำนวณ Blocking Time Stairway บางหน่วยงานรถไฟใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองระบบที่พัฒนามาสำหรับการวิเคราะห์ความจุมาใช้ในการจัดการตารางการเดินรถด้วย แต่การที่มีรากฐานมาจากการจำลองระบบจึงทำให้บางครั้งก็ยากในการตรวจหาตำแหน่งที่เกิดการขัดแย้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเส้นทางไฟซึ่งต้องมีการเพิ่ม Buffer Time เข้าไป หลายบริษัทที่พัฒนาซอฟต์แวร์จำลองระบบรางได้เพิ่มโมดูลการจัดตารางเดินรถเข้าไปในซอฟต์แวร์เพื่อตอบสนองความต้องการของหน่วยงานรถไฟซึ่งโมดูลสามารถคำนวณและแสดง Blocking Time Stairways ให้กับเส้นทางไฟที่จำลองขึ้นในลักษณะที่คล้ายกับโปรแกรมที่ใช้จัดตารางเดินรถ ความขัดแย้งในการจัดตารางจึงสามารถมองเห็นได้จากบนจอคอมพิวเตอร์จากการซ้อนทับกันของ Blocking Time Stairways แสดงดังรูปที่ 2.11

การจัดตารางเดินรถด้วยคอมพิวเตอร์แบบนี้ต้องการฐานข้อมูลโครงสร้างพื้นฐานที่ซับซ้อนซึ่งไม่ใช่แค่ Track Layout ความเร็วสูงสุด ความต้านทานของเส้นทาง แต่ต้องมีข้อมูลสัญญาณทั้งหมดด้วยเพื่อใช้คำนวณ Blocking Times ผู้จัดตารางการเดินรถสามารถแก้จุดที่เกิดความขัดแย้งได้ด้วยการเลื่อนหรือปรับเส้น Time-distance Curves



รูปที่ 2.12 Principle of an Integrated Clock Face Timetable, [12]

### 2.2.6 การประเมินคุณภาพของการจัดตารางการเดินรถ

คุณภาพในการจัดตารางเดินรถขึ้นอยู่กับ 2 ประการ คือ คุณภาพของตารางเดินรถ (Schedule Quality) และ ความสามารถในการกลับคืนของตารางเวลา (Recoverability of Timetable)

คุณภาพของตารางเดินรถ (Schedule Quality) คือการจัดตารางเดินรถสอดคล้องกับความต้องการของผู้โดยสาร (ลูกค้า) ได้แก่ หน่ว วัตได้จาก Waiting Time Ratio ซึ่งหมายถึง อัตราส่วนระหว่าง Scheduled Waiting Times กับ Total Running Time

Waiting Time Ratio ที่บอกว่าคุณภาพดีขึ้นกับรูปแบบของการเดินรถด้วย เช่น การให้บริการรถสินค้าสามารถยอมรับ Waiting Time Ratio ได้สูงมากกว่าการให้บริการรถโดยสาร

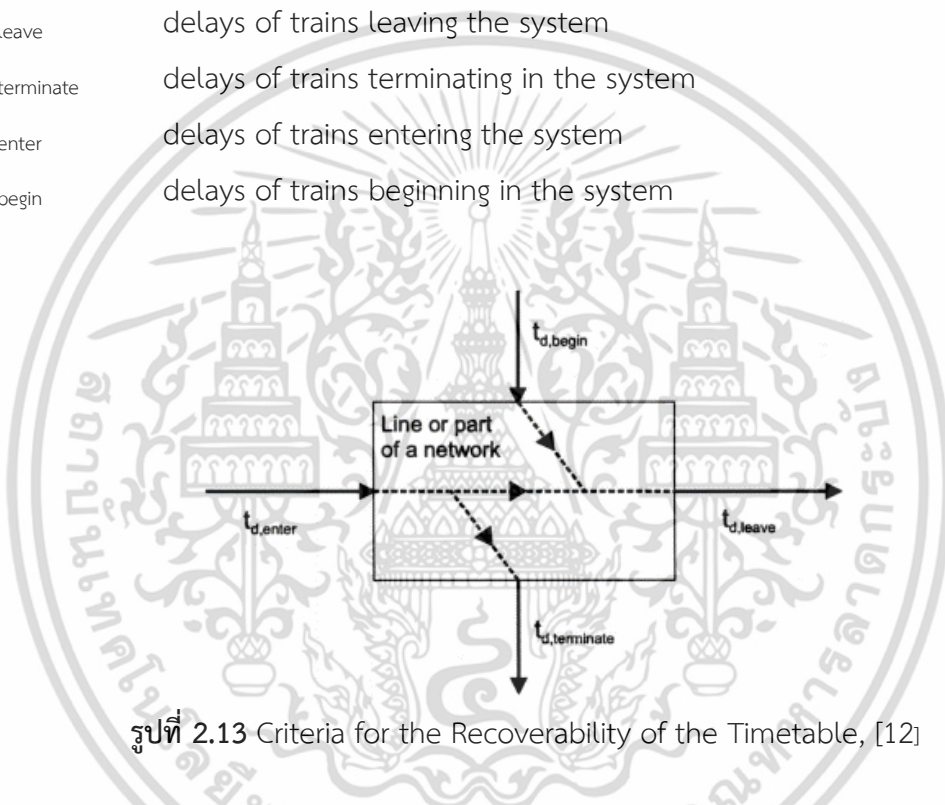
ความสามารถในการกลับคืนของตารางเวลา (Recoverability of Timetable) หรือเรียกว่า เสถียรภาพของตารางเวลา (Stability of Timetable, Robustness of Timetable) เป็นผลที่ได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถในการลดผลกระทบจากความล่าช้าที่เกิดขึ้น ข้อกำหนดพื้นฐานของ Recoverability of Timetable คือ ผลรวมของความล่าช้าที่เอาต์พุตของระบบ หรือรถไฟที่ออกไปจากระบบและรถไฟที่สิ้นสุดในระบบ น้อยกว่าผลรวมของความล่าช้าที่อินพุตของระบบ หรือรถไฟที่เข้ามาในระบบ และรถไฟที่เริ่มต้นเส้นทางในระบบ หลักเกณฑ์ของ Recoverability of Timetable สามารถอธิบายด้วยสมการที่ (2.1) และรูปที่ 2.13

$$t_{d,leave} + t_{d,terminate} \leq t_{d,enter} + t_{d,begin} \quad (2.1)$$

$t_{d,leave}$	delays of trains leaving the system
$t_{d,terminate}$	delays of trains terminating in the system
$t_{d,enter}$	delays of trains entering the system
$t_{d,begin}$	delays of trains beginning in the system



รูปที่ 2.13 Criteria for the Recoverability of the Timetable, [12]

โดยทั่วไปนั้นจะทำการจำลองในการตรวจสอบ Recoverability ส่วนในทางเดียวที่มีการเดินรถไม่ซับซ้อนก็สามารถตรวจสอบได้ด้วยมือโดยการสร้างการส่งต่อความล่าช้าที่เป็นผลมาจากการกำหนดค่าความล่าช้าที่อินพุตในกราฟตารางการเดินรถ และในเส้นทางที่ใช้ Clock Face Timetable ก็สามารรถคำนวณค่า Recoverability Quotient ซึ่งใช้เป็นตัววัดประเมินความสามารถในการกลับคืนได้ โดยแสดงดังสมการที่ (2.2)

$$Q_{recov} = \frac{t_{d,enter}}{\sum t_{b,cycle} + \sum t_{res,cycle}} \quad (2.2)$$

$Q_{recov}$                       recoverability quotient

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$t_{d,enter}$	delays of a train entering the section
$\sum t_{b,cycle}$	sum of buffer Time of one cycle between two meeting points
$\sum t_{res,cycle}$	sum of recovery and other reserve Time to reduce delays of one cycle between two meeting points

ค่า Stability Quotient เท่ากับจำนวนรอบที่ต้องการเพื่อชดเชยความล่าช้าได้จนครบทั้งหมด โดยค่านี้จะคำนวณที่แต่ละช่วงที่อยู่ระหว่างจุดนัดพบสองจุด ช่วงที่มีค่า Recoverability Quotient สูงที่สุดคือจุดวิกฤติ (Critical Section) ของเสถียรภาพของตารางเวลา โดยข้อบังคับการเดินรถของเยอรมันแนะนำว่าค่า Recovery Quotient ควรต่ำกว่า 2.0 สำหรับความล่าช้าในช่วงเริ่มต้น 10 นาที หมายความว่าความล่าช้า 10 นาที ในตอนเริ่มควรจะถูกลดชดเชยจนครบภายในสองรอบของ Clock Faces

ความสามารถในการกลับคืนของตารางเวลา (Recoverability of Timetable) ไม่ใช่เพียงแต่คำถามในการจัดตารางเส้นทางไฟ ความล่าช้ายังสามารถถูกส่งต่อได้ที่สถานีเชื่อมต่อ (Connection) ระหว่างขบวนรถโดยสารหลายเส้นทาง โดยมีกฎว่าจะสูญเสียการเชื่อมต่อเมื่อเกิดความล่าช้าเกินกว่าค่าที่ระบุซึ่งจำทำให้เกิดปัญหาร้ายแรงในโครงข่ายราง ที่สถานีเชื่อมต่อ (Connection Station) ต้องมีการแลกเปลี่ยนพนักงานบนรถและอุปกรณ์ที่จำเป็น สถานการณ์แบบนี้ก็จะยุ่งยากมากขึ้นไปอีก เพราะไม่สามารถยกเลิกการแลกเปลี่ยนระหว่างขบวนรถได้ เนื่องจากไม่มีพนักงานและอุปกรณ์สำรอง ดังนั้นการวางแผนการหมุนเวียนสับเปลี่ยนพนักงานและอุปกรณ์ประจำรถจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการรักษาการกลับคืนของตารางเวลาให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้

## 2.3 แนวเส้นทางรถไฟ (Track Alignment)

รถไฟจะเคลื่อนที่ไปตามแนวเส้นทางที่กำหนดไว้ จึงต้องมีการกำหนดแนวเส้นทางทั้งในแนวระดับและแนวตั้งอย่างเหมาะสม เพื่อให้สามารถเดินรถได้อย่างนุ่มนวล ปลอดภัย ประหยัดพลังงาน และเกิดความสึกหรอต่ำส่วนประกอบแนวเส้นทางเดินรถ มีดังนี้

### 2.3.1 ทางโค้งและทางชัน (Curve and Gradient)

แนวเส้นทางรถไฟส่วนใหญ่มีแนวโน้มในการออกแบบให้ลัดเลาะไปตามภูมิประเทศ หรือแม่น้ำเพื่อหลบเลี่ยงอุปสรรคต่าง ๆ และสะดวกในการก่อสร้าง โดยเส้นทางแบ่งออกเป็น

- เส้นทางตรงในแนวระดับ (Straight Flat Track) สร้างได้ง่ายที่สุดและมีความต้านทานต่ำที่สุด
- เส้นทางในแนวระดับ (Horizontal Direction) เส้นทางโค้งรัศมีคงที่ (Circular Curve) และเส้นทางโค้งที่รัศมีค่อย ๆ เปลี่ยนไปอย่างคงตัว คือเป็นโค้งชุตเดียวกันที่เกิดจากหลาย ๆ โค้งที่มีรัศมี



$$FD = S$$

$$DE = h_a$$

ดังนั้น

$$EF = \sqrt{S^2 - (h_a)^2} \quad (2.4)$$

เนื่องจากสามเหลี่ยม ABC และสามเหลี่ยม DEF เป็นสามเหลี่ยมคล้าย

ดังนั้น  $DF / AC = DE / AB = EF / BC$  จะได้

$$\frac{S}{m \times g} = \frac{h_a}{T_{in}} = \frac{\sqrt{S^2 - (h_a)^2}}{P_m} \quad (2.5)$$

เมื่อพิจารณาแรงในแนวระนาบเดียวกับราง จะได้

$$T_{in} = \frac{m \times g \times h_a}{S} \quad (2.6)$$

และ

$$P_m = (m \times g) \times \frac{\sqrt{S^2 - (h_a)^2}}{S} \quad (2.7)$$

และเมื่อรางอยู่ในแนวโค้ง จะมีแรงสู่ศูนย์เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ถ้ารถไฟยังคงวิ่งเข้าโค้งโดยไม่มี การยก Cant ทางฝั่งของรางด้านนอก ถ้ามีวัตถุอยู่ที่พื้นรถ จะถูกแรงกระทำดันให้ออกมาด้านนอก ถ้า แรงหนีศูนย์กลางดังกล่าวเอาชนะแรงเสียดทานของวัตถุกับพื้นได้ วัตถุก็จะถูกเหวี่ยงออกไป ถ้าเป็น ผู้โดยสารก็จะรู้สึกถึงแรงดังกล่าวได้ และจะรู้สึกไม่สบายนัก (Discomfort) ขณะรถไฟวิ่งเข้าโค้ง แต่ถ้า มีการยก Cant ทางด้านนอก จะเกิดแรงหนีศูนย์กลางเข้าด้านใน โดยสามารถแตกแรงได้ดังรูปด้านบน สามเหลี่ยม ABC เหมือนกับ DEF ทุกประการ ดังนั้น

$$\frac{S}{m \times V^2} = \frac{h_a}{P_i} = \frac{EF}{T_{ex}} \quad (2.8)$$

จะได้

$$\frac{S}{m \times V^2} = \frac{EF}{T_{ex}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_{ex} = \frac{m \times V^2}{R} \times \frac{EF}{S}$$

$$T_{ex} = \frac{m \times V^2}{R} \times \frac{\sqrt{S^2 - (h_a)^2}}{S} \quad (2.9)$$

และ

$$P_i = \frac{m \times V^2}{R} \times \frac{h_a}{S} \quad (2.10)$$

โดยแรง  $T_{in}$ ,  $T_{ex}$ ,  $P_m$  และ  $P_i$  กระทำที่วัตถุที่จุด A เมื่อพิจารณาตามกฎของ Newton จะได้แรง  $P_m$  และ  $P_i$  มีทิศเดียวกัน โดยจะรวมกันเป็นน้ำหนักจริงทั้งหมดที่พื้นรถไฟ ในขณะที่แรง  $T_{in}$  และ  $T_{ex}$  มีทิศทางตรงกันข้ามและพยายามหักล้างซึ่งกันและกัน จะได้แรงลัพธ์ในแนวขนานกับพื้นรถไฟ คือ

$$T = T_{ex} - T_{in} = \left[ \frac{m \times V^2}{R} \times \frac{\sqrt{S^2 - (h_a)^2}}{S} \right] - \left[ \frac{m \times g \times h_a}{S} \right] \quad (2.11)$$

เมื่อพิจารณา Cant  $h_a$  นั้นเล็กมากเมื่อเทียบกับ  $S$  ดังนั้น

$$T = m \times \left[ \frac{V^2}{R} \times \frac{g \times h_a}{S} \right] \quad (2.12)$$

จะเห็นได้ว่าค่าที่ทำให้  $T=0$  ได้คือเมื่อ  $V^2/R = (g \times h_a)/S$  ซึ่งจะทำให้วัตถุใด ๆ บนพื้นรถไฟไม่มีแรงหนีศูนย์กลางมากระทำคือแรงเหวี่ยงจากการเข้าโค้งหายไป ค่าที่เราสามารถกำหนดได้และเป็นตัวแปรสำคัญคือ  $h_a$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของ  $V$ ,  $R$  และ  $S$  คือ

$$[h_a]_{T=0} = \frac{V^2 \times S}{R \times g} \quad (2.13)$$

โดยค่านี้นำทำให้เกิดสถานะสมดุลที่เรียกว่า Equilibrium Cant ( $h_e$ ) ดังนั้น

$$h_e = \frac{V^2 \times S}{R \times g} \quad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องเข้าใจว่าแม้ที่สภาวะดังกล่าว ผู้โดยสารบนรถไฟจะไม่รู้สึกถึงแรงเหวี่ยงดังกล่าว แต่ในข้อเท็จจริงแล้วแรงดังกล่าวก็ยังมีอยู่ไม่ได้หายไปไหน โดยระบบรองรับรางรถไฟ (Trackbed) ไม่ว่าจะ เป็นหินโรยทางหรือ Slab ก็จะต้องสามารถต้านแรงดังกล่าวให้ได้ ไม่เช่นนั้น ตัวรางรถไฟและหมอนรองรับก็จะถูกแรงกระทำให้เคลื่อนออกทางด้านนอกไปตามแรงดังกล่าว

เนื่องจาก Cant มีค่าน้อยมาก และนิยมใช้หน่วยเป็น mm

โดย  $S = 1.500 \text{ m}$  โดยประมาณ

$$g = 99.81 \text{ m/sec}^2$$

$$V = V/3.6 \text{ กม./ชม.}$$

$$h = h_e / 1000 \text{ mm} \quad \text{ดังนั้น}$$

$$h_e = 11.82 \times \left[ \frac{V^2}{R} \right] \quad (2.15)$$

แต่ทั้งนี้ ค่า Cant หนึ่งค่าที่ทำให้เกิดความสมดุลดังกล่าวจะเกิดขึ้นที่ความเร็วและรัศมีมีความโค้งค่าเดียวเท่านั้น ซึ่งในหลาย ๆ กรณีความเร็วบางครั้งอาจจะมากกว่าบ้างน้อยกว่าบ้าง จึงเกิดลักษณะขาด ๆ เกิน ๆ ที่เรียกว่า deficiency ขึ้น จากสมการ

$$T = m \times \left[ \frac{V^2}{R} - \frac{g \times h_a}{S} \right] \quad \text{หรือ} \quad a = \left[ \frac{V^2}{R} - \frac{g \times h_a}{S} \right] \quad (2.16)$$

เมื่อมีการปรับใหม่เล็กน้อยจะได้

$$T = \frac{m}{S} \times \left[ \frac{V^2 \times S}{R} - g \times h_a \right]$$

$$T = \frac{m \times g}{S} \times \left[ \frac{V^2 \times S}{R \times g} - h_a \right]$$

$$T = \frac{m \times g}{S} \times [h_e - h_a]$$

$$T = \frac{m \times g}{S} \times [h_e - h_a]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T = \frac{m \times g \times D}{S} \text{ เมื่อ } D \text{ แทน } [h_e - h_a] \quad (2.17)$$

และหาความเร่งได้โดย

$$T = ma = \frac{m \times g \times D}{S}$$

$$a = \frac{g \times D}{S} \quad (2.18)$$

จากสมการที่ (2.17) ถ้า Cant ที่กำหนดเข้าไปในระบบ ( $h_a$  = Applied Cant) สำหรับรางด้านนอกมีความสูงมากกว่า cant สมดุล ( $h_e$  = Equilibrium Cant) อยู่เท่ากับ D (Deficiency of Cant) กล่าวคือ แรงหนีศูนย์กลางที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนของความแตกต่างระหว่าง  $h_a$  กับ  $h_e$  โดย

$$D + h_a = h_e = 11.82 \times \left[ \frac{V^2}{R} \right] \quad (2.19)$$

เพื่อความปลอดภัยและความสะดวกในการโดยสาร จึงต้องกำหนดขอบเขตความสูงของ  $h_a$  เท่ากับ D ซึ่งจากด้านขวาสมการ โดยนัยจึงเป็นการกำหนดขอบเขตของความเร็ว V นั้นเอง และถ้ากำหนดค่าสูงสุดของ D เป็น  $D_{\max}$  (Maximum Deficiency of Cant) ก็จะได้ค่าความเร็วสูงสุดของรถไฟที่ยอมให้ขณะวิ่งอยู่ในโค้งนั้นเป็น  $V_{\max}$  (Maximum Train Speed) และถ้ากำหนดค่าความสูง Cant เป็นค่าสูงสุดที่ยอมรับได้  $h_{\max}$  (Maximum Cant Permitted to be Applied) จะได้สมการเป็น

$$D + h_a = h_e = 11.82 \times \left[ \frac{V^2}{R} \right]$$

$$V_{\max} = 0.29 \times \sqrt{R \times [h_{\max} + D_{\max}]} \quad (2.20)$$

หรือจาก

$$D + h_a = 11.82 \times \left[ \frac{V^2}{R} \right]$$

$$h_a = 11.82 \times \left[ \frac{V^2}{R} \right] - D \quad (2.21)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากเราไม่สามารถสร้างเส้นทางรถไฟให้ตรงทั้งหมด และด้วยข้อจำกัดหลายประการเราก็ยังไม่สามารถเส้นทางรถไฟให้มีรัศมีความโค้งมาก ๆ ได้ โค้งแคบนั้นลดค่าก่อสร้างได้มาก แต่ต้องยก Cant ที่รางด้านนอกเพื่อชดเชยแรงดังกล่าว โดยที่รางด้านในอยู่ที่ระดับเดิม ดังที่ได้อธิบายด้วยสมการถึงแรงหนีศูนย์กลางมาแล้ว การทำเช่นนี้จะช่วยให้ผู้โดยสาร (ซึ่งถือว่าเป็นภาระที่รถไฟบรรทุกที่มีความอ่อนไหวต่อแรงกระทำใด ๆ มากที่สุดเมื่อเทียบกับสัมภาระชนิดอื่น) รู้สึกสบายขึ้นเมื่อรถวิ่งเข้าโค้ง และช่วยชดเชยแรงกดในแนวระดับของรถไฟด้วย

ในสภาวะสมดุล ค่า Cant ค่าหนึ่งใช้ได้กับความเร็วค่าเดียวตามสมการ เรียกค่านี้ว่า (Equilibrium Cant) คือไม่ทำให้ผู้โดยสารรู้สึกถึงแรงหนีศูนย์กลาง เพราะแรงในแนวระดับที่ขนานกับพื้นรถไฟหักล้างกันเป็นศูนย์ดังสมการของ  $h_e$  ด้านบน ดังนั้นในหลักการแล้วสามารถใช้ได้กับระบบการเดินรถที่เป็นรูปแบบเดียวกันตลอด คือมีความเร็วเหมือนเดิม รถแบบเดิมในทุก ๆ รอบการเดินรถ แต่ในความจริงแล้ว รางรถเดียวกันอาจมีทั้งรถไฟโดยสาร รถไฟขนส่งวิ่งปนกันอยู่ที่มีความเร็วไม่เท่ากัน ดังนั้น ระดับความสูงของ Cant ที่เหมาะสมที่ให้ความเร็วสูงสุดตอนรถเข้าโค้งสำหรับรถแบบหนึ่ง อาจมากเกินไปสำหรับรถไฟที่มีความเร็วต่ำกว่าในโค้งเดียวกัน ทำให้เกิดล้อรถไปกดที่รางด้านในมากจากน้ำหนักของรถเพราะแรงหนีศูนย์กลางที่ค่าน้อย ลองนึกภาพรถไฟที่วิ่งช้า ๆ หรือจอดเอียงบนโค้ง แรงที่เกิดจากน้ำหนักที่กดลงที่ล้อที่เรียกว่า Lateral Force จะดันล้อให้กดลงบนรางโดยเฉพาะอย่างยิ่งรางด้านใน (รางที่อยู่ต่ำกว่า) ทำให้เกิดการสึกหรอขึ้นอย่างมาก ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดค่า Cant Deficiency ที่เหมาะสมและยอมรับได้สำหรับรถไฟที่ต้องการแล่นเข้าโค้งที่ความเร็วมากกว่า (แต่ก็ต้องจำกัดไว้ให้เหมาะสม ไม่มากเกินไปจนเกิดผลเสียตามมา) โดยยอมให้ครีบบของล้อรถไปกดหัวของรางที่อยู่ด้านนอกและเกิดการสึกหรอที่ยอมรับได้

ตามหลักกลศาสตร์ ถ้ารถไฟวิ่งเข้าโค้งด้วยความเร็วสูงเกินไป อาจทำให้รถพลิกคว่ำได้ (overturn) แต่ในสถานการณ์จริงนั้น สิ่งที่จะเกิดก่อนหน้าที่จะถึงจุดที่รถพลิกคว่ำนั้นนานพอสมควรเลยทีเดียวก็คือผู้โดยสารหรือคนขับรถเองจะรู้สึกถึงแรงเหวี่ยงที่มากจนไม่สามารถทรงตัวอยู่ได้ ถ้าเป็นสัมภาระก็คงเลื่อนหล่นลงมาเสียหายก่อนแล้ว ด้วยเหตุนี้ จึงต้องมีการกำหนดความเร็วสูงสุดที่สามารถยอมรับได้สำหรับโค้งหนึ่ง ๆ ไว้เพื่อความสะดวกในการโดยสารของผู้โดยสารและการขนส่ง ค่าที่ยอมรับโดยทั่วไปคือการยก Cant สำหรับรางที่เชื่อมต่อนี้ทั้งระบบ (Continuous Weld Rail, CWR) บนทางในแนวระดับที่มีรัศมีความโค้งคงที่ (Circular Curve) โดยสำหรับรัศมีความโค้งหนึ่งกับ Cant ค่าหนึ่ง จะสามารถใช้ความเร็วได้จำกัดค่าหนึ่งด้วยเช่นกัน

ยกตัวอย่างเช่น การออกแบบเส้นทางรถไฟแห่งหนึ่งกำหนดให้มีความเร็วสูงสุดในการเดินรถ 250 กม./ชม. โดยมีช่วงหนึ่งมีรัศมีความโค้ง 1,000 เมตร ลองมาดูว่า Equilibrium Cant ที่ทำให้รถไฟไม่ต้องลดความเร็วเป็นเท่าไร จากสมการที่ (2.15)

$$h_e = 11.82 \times \left[ \frac{V^2}{R} \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้ค่า Equilibrium Cant ที่ทำให้รถไฟไม่ต้องลดความเร็วเท่ากับ 739 mm หรือ 0.739 m

ค่านี้สูงเกินไปมาก รถไฟจะเอียงเข้าด้านในมากจนล้มกลิ้งตกลงได้ จริง ๆ คงหลุดโค้งตั้งแต่เริ่มไต่ระดับก่อนเข้าโค้งจริง ๆ แล้ว แสดงว่าโค้งนี้จะเป็นตัวจำกัดความเร็วในการเข้าโค้ง สมมติว่าต้องการให้ได้ความเร็วมากที่สุดที่เป็นไปได้ ก็ต้องกำหนดค่า Cant และ Cant Deficiency ให้มีค่ามากที่สุดเท่าที่ทำได้โดยยังคงมีความปลอดภัย ดังนี้

จากสมการที่ (2.20)

$$V_{\max} = 0.29 \times \sqrt{R \times [h_{\max} + D_{\max}]}$$

จะได้ค่า Cant มีค่าเท่ากับ 156 มม./ชม.

อย่างไรก็ดี ค่าที่เหมาะสมจะต้องมีการพิจารณาองค์ประกอบทางกายภาพ คุณภาพของเส้นทาง ลักษณะ รูปแบบของการเดินรถ และความต้องการของแต่ละเส้นทางเป็นกรณี ๆ ไป

สมมติว่า โค้ง 2,000 เมตร มีความเร็วสูงสุดในการเดินรถ 160 กม./ชม. ก็อาจมีทางเลือกที่มากกว่า เพราะโค้งกว้างขนาดนี้ทำให้รถไฟเข้าโค้งโดยไม่ต้องลดความเร็วได้อย่างสบาย โดยหาได้จากสมการที่ (2.15) เช่นเดิม

$$h_e = 11.82 \times \left[ \frac{V^2}{R} \right]$$

$$h_e = 11.82 \times \left[ \frac{160^2}{2500} \right]$$

จะได้ค่า  $h_e$  เท่ากับ 121 มิลลิเมตร

จากผลดังกล่าวจะได้ Equilibrium Cant ของเส้นทางนี้ คือ 121 มม. เป็นตัวเลขที่ทำให้สามารถเข้าโค้งที่ความเร็ว 160 กม./ชม. ได้โดยไม่มีแรง Centrifugal Force เกิดขึ้นที่รถไฟ กล่าวคือ Cant Deficiency เป็นศูนย์ แต่เดิวก่อน การยก Cant ที่ค่านี้อาจไม่ใช่ทางเลือกที่ควรตัดสินใจโดยทันที ลองพิจารณาเงื่อนไขต่อไปนี้

- ถ้ากำหนดค่าโดยไม่ให้ Cant Deficiency เป็นศูนย์ แต่แบ่งเป็น Cant ( $h_a$ ) และ Cant Deficiency (D) เท่า ๆ กัน อย่าเพิ่งลืมนะ จากสมการ 3.3  $D + h_a = h_e$

ตัวเลขนี้จะทำให้ Transition Curve (ในหัวข้อถัดไป) มีระยะทางสั้นที่สุด และระดับการยก Cant มีค่าน้อยลง ซึ่งเป็นผลดีในแง่ของการใช้พื้นที่ในการก่อสร้าง

- การยก Cant สูง ๆ นี้ไม่ได้ช่วยลดความสึกหรอของรางด้านสูงแต่อย่างใด เพราะขณะเข้าโค้ง ถ้าพิจารณาโบกักรถไฟชนิด 2 เพลา ล้อคู่หน้าของแต่ละโบกักรถไฟจะมีมุมสัมผัสที่กว้างกว่าล้อคู่หลัง ล้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านนอกจะถูกดันให้บังใบไปสัมผัสกับหัวรางเพื่อสร้าง Reaction Force ตัวโบกี้เองก็จะถูกแรงดึงออกด้านนอกโค้งทำให้น้ำหนักของโบกี้จะเพิ่มมากขึ้นทำให้แรงกดของล้อด้านนอกบนรางมากขึ้นด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของรถไฟ และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างล้อกับรางรถไฟ

- และถ้าในเส้นทางเดียวกัน มีการเดินรถไฟใด ๆ ที่มีความเร็วต่ำกว่าในโค้งนี้อยู่บ่อย ๆ รถไฟที่ความเร็วต่ำจะทำให้ล้อรถไฟเข้ามาทางรางตัวที่อยู่ด้านในที่ต่ำกว่า ทำให้เกิดการสึกหรอมากกว่าปกติ

อีกส่วนหนึ่งเกี่ยวกับความรู้สึกของผู้โดยสารคือ ความเร่งที่เกิดขึ้นตอนที่รถเคลื่อนที่ในทางโค้งนั้น พิจารณาได้โดยอาศัยสมการที่ (2.21) ในทำนองเดียวกัน จะได้

$$D = 11.82 \times \left[ \frac{V^2}{R} \right] - h_a$$

นำสมการที่ (2.21) แทนค่าตามสมการที่ (2.18) จะได้ความเร่งในแนวระดับ (Non-compensated Lateral Acceleration in the Track Plane,  $a_D$ ) เท่ากับ

$$a_D = \frac{g \times D}{S} = 11.82 \times \left[ \left( \frac{V_{\max}^2}{R} \right) \times \frac{g}{S} \right] - \left[ \frac{g \times h_a}{S} \right]$$

$$a_D = 11.82 \times \left[ \left( \frac{V_{\max}^2}{R} \right) \times \frac{9.87}{1500} \right] - \left[ \frac{g \times h_a}{1500} \right]$$

$$a_D = \left[ \left( \frac{V_{\max}^2}{R} \right) \times \frac{1}{12.95} \right] - \left[ \frac{h_a}{152.9} \right] = \frac{D}{152.9} \quad (2.22)$$

ด้วยความเร่งในแนวระดับ (Non-compensated Lateral Acceleration in the Track Plane,  $a_D$ ) ดังกล่าวทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลางที่กระทำที่จุดศูนย์กลางมวลซึ่งจะทำให้เกิด Overtuning Moment ไปก่อดระบบสปริงของตู้รถไฟอย่างไม่สม่ำเสมอ และทำให้ตู้รถไฟเอียงออกไปทางด้านรางฝั่งนอก ดังนั้นผู้โดยสารและสิ่งของที่บรรทุกจะถูกกระทำด้วยความเร่ง Quasi-Lateral Acceleration,  $a_Q$  ดังสมการ

$$a_Q = (1 + S_r) \times a_D \quad (2.23)$$

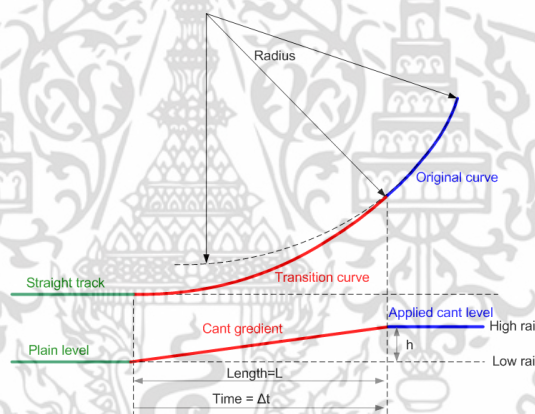
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$S_r$  คือ Roll Flexibility Coefficient มีค่าเป็นบวกสำหรับรถไฟที่ไม่มีระบบ Tilting System โดย Quasi-Lateral Acceleration  $a_Q$  เป็นความเร่งที่ขนานกับพื้นรถไฟ วัดความเร่งดังกล่าวด้วยความรู้สึกของผู้โดยสารบนรถ โดยค่า  $a_Q$  มีค่าสูงสุดอยู่ในช่วง 1.0 - 1.5 m/sec<sup>2</sup>

รถไฟสมัยใหม่ส่วนใหญ่ ที่บรรทุกเต็มพิกัดต้องปรับปรุง Suspension Factor หรือค่า Roll Flexibility Coefficient ให้อยู่ที่ 0.4 และอาจลดลงได้เป็นพิเศษที่ 0.20-0.25 เพื่อจำกัดค่าความเร่งดังกล่าว

### 2.3.3 โค้งปรับเปลี่ยน (Transition Curve)

เส้นทางรถไฟที่ดีที่สุดคือตรง ไม่มีความชันและไม่มีทางโค้ง แต่เป็นไปได้ในความเป็นจริง ดังนั้น การที่เส้นทางรถไฟจะเปลี่ยนแปลงจากรูปแบบหนึ่งไปเป็นอีกแบบหนึ่ง จำเป็นต้องมีส่วนส่งผ่านหรือปรับเปลี่ยนอย่างค่อยเป็นค่อยไป ด้วยเหตุผลที่ว่าระบบล้อรถไฟและแคร่รถไฟเป็นโครงสร้างที่ไม่มีความยืดหยุ่นคือทั้งล้อหน้าและหลังของแคร่ไม่สามารถหมุนหรือเปลี่ยนมุมได้เหมือนล้อหน้ารถยนต์ ลักษณะโค้งปรับเปลี่ยนแสดงได้ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ทางโค้งปรับเปลี่ยนเชื่อมระหว่างทางตรงกับทางโค้ง, [2]

ทางโค้งปรับเปลี่ยน (Transition Curve บางครั้งเรียกว่า Spiral) หมายถึง เส้นสีแดงที่อยู่ในรูป เป็นเส้นเชื่อมต่อระหว่างทางโค้ง (Original Curve) เส้นสีน้ำเงิน กับทางตรง (Straight Track) เส้นสีเขียว โดยจะมีทั้งก่อนและหลังทางโค้ง หรือระหว่างทางโค้งสองโค้งที่อยู่ติดกัน ไม่ว่าจะโค้งที่อยู่ในทิศทางเดียวกัน (Compound Curves) หรือต่างทิศทางกัน (Reverse Curves) และนอกจากการปรับเปลี่ยนจากเส้นตรงไปเป็นเส้นโค้งแล้ว ในโค้งหนึ่ง ๆ (Original Curve) จะมี Cant ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อนหน้าเพื่อชดเชยแรงหนีศูนย์กลางของรถไฟขณะเข้าโค้ง จึงทำให้เส้นทางรถไฟจากแนวตรงที่อยู่ในแนวระดับต้องเปลี่ยนเป็นยกระดับสูงขึ้น การเปลี่ยนนั้นเกิดขึ้นโดยทันทีทันใดไม่ได้ เช่นเดียวกับการเปลี่ยนจากเส้นตรงเป็นโค้ง ดังนั้นโค้งปรับเปลี่ยนจึงเป็นการปรับไม่เฉพาะในแนวระดับ แต่เป็นการค่อย ๆ ยกระดับขึ้นทีละน้อยจนกระทั่งถึงระดับความสูงของโค้งนั้น ๆ ด้วย เรียกว่า Cant Gradient ทั้งนี้เพื่อปรับการเข้าโค้งและอัตราการยกโค้งให้มีความเหมาะสมและปลอดภัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.4 การยกเอียง (Cant Gradient)

เพื่อเป็นการลดความเสี่ยงของรถไฟตกราง เช่น รถชนส่งสินค้าที่มีระบบช่วงล่าง (Suspension) ที่ไม่ซับซ้อน จึงอาจกำหนดขีดจำกัดของการยกเอียง (Cant Gradient) ในรูปของอัตราการเปลี่ยนแปลงเพิ่มหรือลดของ Cant เทียบต่อหน่วยระยะทาง (Rate of Change of Cant as a Function of Length) และอัตราการเปลี่ยนแปลงของ Cant เทียบกับเวลา (Rate of Change of Cant as a Function of Time) ตามความยาวของทางรถไฟช่วงที่เป็น Transition Curve ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขบวนรถไฟและความเร็วที่ใช้

### 2.3.5 การกำหนด Cant/Cant Deficiency/Cant Gradient สำหรับทางโค้ง

รางรถไฟระบบหนึ่งมีทั้งแบบที่ใช้กับรถไฟชนิดเดียว เช่น ระบบเมโทร หรือระบบรถไฟความเร็วสูงที่เป็นระบบปิด ไม่ปะปนกับรถไฟอื่น วิ่งด้วยรูปแบบเดิม ๆ ตามตารางเดินรถที่ค่อนข้างตายตัว ซึ่งถ้าเป็นเช่นนี้ การกำหนดค่าต่าง ๆ ดังกล่าวจะทำได้ง่าย เพราะรถจะเข้าโค้งเดิมด้วยความเร็วเหมือนเดิม โดยมีรูปแบบเดิม ๆ เป็นส่วนใหญ่ แต่ในความเป็นจริงแล้วมีโอกาสที่รางรถไฟระบบหนึ่งๆ จะมีทั้งรถไฟโดยสารที่มีความเร็วต่าง ๆ กันวิ่งอยู่และอาจมีรถไฟขนส่งสินค้าวิ่งรวมอยู่ด้วย ทำให้การกำหนด Cant สำหรับความเร็วค่าหนึ่งอาจไม่เหมาะสม โดยก่อให้เกิดความรู้สึกหรือสูงกับรางรถไฟบริเวณทางโค้งนั้น ๆ หรือทำให้เกิดความไม่สะดวกกับผู้โดยสารเวลารถเข้าโค้ง หรือส่งผลต่อผู้ขบวนรถสินค้า อาจถึงกับก่อให้เกิดความเสียหายหรืออันตรายได้

สำหรับระบบรางระบบหนึ่งนั้น มีการจำกัดค่าในสองลักษณะคือ

- ค่าจำกัดโดยปกติ (Normal Limit)
- ค่าจำกัดในกรณีพิเศษ (Exceptional Limit) โดยมีสองนัยในการกำหนด คือ

เมื่อค่านั้นมีผลต่อความปลอดภัย (Safety-Related Parameters) ซึ่งอาจขึ้นอยู่กับสภาพทางกลจริง ๆ ของรางและลักษณะทางเรขาคณิตของเส้นทาง ค่านี้อาจไปลดความสะดวกในการโดยสาร การกำหนดค่านี้จึงควรกระทำในกรณีพิเศษ หรือเมื่อมีการวิเคราะห์ถึงความปลอดภัย โดยเฉพาะแล้วเท่านั้น โดยค่านี้กำหนดสำหรับการเดินรถรูปแบบปกติ อย่่างไรก็ดี ในการทดสอบการเดินรถก่อนให้บริการ เช่น การทดสอบให้แน่ใจด้วยการเฝ้าติดตามอย่างต่อเนื่องเกี่ยวกับการตอบสนองของรถไฟในสภาวะดังกล่าว และตัดสินใจดำเนินการตามความเหมาะสมโดยผู้เชี่ยวชาญ และหน่วยงานที่มีหน้าที่รับผิดชอบ

เมื่อค่านั้นไม่ส่งผลต่อความปลอดภัย (Non-Safety Related Parameters) การกำหนดค่าจึงต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อความสะดวกในการโดยสาร และความต้องการการบำรุงรักษารางรถไฟที่มากขึ้นจากความสึกหรอที่แน่นอนว่าจะเกิดขึ้นมากกว่าปกติ อย่่างไรก็ดี การกำหนดค่าก็ยังคงต้องไม่เกินขอบเขตของความปลอดภัย

ให้คิดเสมอว่าสำหรับ Cant Deficiency นั้น ไม่ใช่ช่วงรถไฟทั้งหมดสามารถใช้ได้กับค่าจำกัดโดยปกติและค่าจำกัดในกรณีพิเศษที่กำหนด สำหรับรถไฟระบบหนึ่ง ๆ ต้องมีการกำหนดให้สอดคล้องกันกับค่าจำกัดในการเดินรถ (Operational Limit) ที่กำหนดค่าสูงสุดของ Cant Deficiency ที่ยอมรับได้ด้วยเสมอ

รัศมีของทางรถไฟ (Radius)

- ค่าจำกัดโดยปกติ (Normal Limit) ของรัศมีอยู่ที่ 190 เมตร
- ค่าจำกัดในกรณีพิเศษ (Exceptional Limit) อยู่ที่ 150 เมตร

แน่นอนว่าถ้าเป็นไปได้ ควรกำหนดให้โค้งมีขนาดใหญ่และกำหนด Transition Curve ให้มีความชันได้ตามข้อจำกัดของการออกแบบ ซึ่งค่าจำกัดด้านบนส่งผลให้ความเร็วสูงสุดที่เป็นไปได้ในทางโค้งอยู่ที่ไม่เกิน 80 กม./ชม.

ตัวแปรที่ต้องพิจารณาในการที่จะกำหนดค่ารัศมีที่น้อยที่สุด มีดังนี้

- ความเร็วสูงสุดและต่ำสุด
- ค่าการยกเอียง ( $h_a$ )
- ค่า Cant Deficiency (D) และ Cant Excess (C)

โดยปกติ ค่ารัศมีน้อยที่สุดสามารถคำนวณได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$R_{\min} = \frac{11.8 \times V_{\max}^2}{h_a + D_{\text{limit}}}$$

และเมื่อค่า  $D > C_{\text{limit}}$  จะสามารถคำนวณค่ารัศมีได้โดย

$$R_{\min} = \frac{11.8 \times V_{\min}^2}{h_a - C}$$

สำหรับทางรถไฟตลอดแนวขานขาลาของสถานีไม่ควรเป็นทางโค้ง หากจำเป็นต้องเป็นทางโค้งก็ควรมีรัศมีไม่น้อยจนเกินไป เพื่อจำกัดช่องว่างระหว่างขบวนรถไฟกับขานขาลาเวลาที่ผู้โดยสารจะก้าวขึ้นและลงรถไฟไม่ให้ห่างจนเกินไป (เวลาขึ้นรถไฟลองสังเกตดูได้ว่าขบวนรถไฟจะประกอบด้วยหลายตู้ รอยต่อของตู้จะโค้งงอเป็นมุมได้เล็กน้อยเพื่อความยืดหยุ่นในการเคลื่อนที่โดยเฉพาะในทางโค้ง แต่ว่าในแต่ละตู้จะเป็นแนวตรงไม่สามารถงอได้ เช่นเดียวกับรถยนต์นั่นเอง)

โค้งแคบอาจต้องการเพิ่มระยะห่างระหว่างรางแต่ละข้างให้กว้างขึ้น (Gauge Widening) โดยใช้ความกว้างมาตรฐาน (Standard Gauge) ขนาด 1435 มิลลิเมตร โดยการวัดระยะระหว่างขอบในของรางทั้งสองที่ตำแหน่งต่ำลงมาจากสันราง 14 มิลลิเมตร ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

การเพิ่มความกว้างขนาดทางรถไฟ ตามมาตรฐานของการรถไฟของเยอรมัน DS 820.2110 Basic Regulation for Permanent Way-Track Gauge and Rail Inclination ความกว้างขนาดทางรถไฟจะถูกขยายเพิ่มขึ้นตามที่แสดงในตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 การขยาย Gauge ของทางรถไฟในทางโค้งแคบ

รัศมี (R in m)	ความกว้างของทางรถไฟ (Track Gauge in mm)
$175 > R \geq 150$	1440
$150 > R \geq 125$	1445
$125 > R \geq 100$	1450

ค่าความกว้างของทางรถไฟจะลดค่าลงในช่วงของการเปลี่ยนโค้ง (Transition Curve) และกรณีที่ไม่มีช่วงของการเปลี่ยนโค้งค่าจะลดลงอย่างคงที่ ในทางตรงซึ่งค่าที่ลดลงจะมีค่าประมาณ 0.5 มม./ม. ของความยาวทางรถไฟ

สำหรับในพื้นที่ประแจสี่บรรทัด ทั้งในส่วนทางโค้งประแจและทางวิ่งตรงจะต้องออกแบบไม่มีการขยายความกว้างขนาดทางรถไฟ

ก่อนอื่นต้องพิจารณา Cant โดยสัมพันธ์กับสิ่งต่อไปนี้

- Cant ที่มีค่ามากที่ทางโค้งแคบ ๆ จะไปเพิ่มความเสี่ยงให้กับรถไฟชนส่งสินค้าให้ตกลงได้ โดยในสภาวะดังกล่าว แรงกดจากน้ำหนักรถไฟในแนวตั้ง (แรง Q) ที่กระทำกับรางด้านนอกโค้งจะลดลงอย่างมาก

- Cant ที่มากกว่า 160 มม. อาจทำให้สิ่งของที่บรรทุกอยู่บนรถไฟดังกล่าวเลื่อนหล่นและทำให้ผู้โดยสารรู้สึกไม่สบายจากแรงหนีศูนย์กลางที่มีค่าไม่คงตัวอันเกิดจากรถไฟหยุดหรือวิ่งช้า ๆ บนทางโค้ง (มีค่า Cant Excess สูง)

- Cant ที่มีค่ามากจะไปเพิ่มค่า Cant Excess บนทางโค้งนั้นเมื่อมีความแตกต่างอย่างมากระหว่างความเร็วของรถไฟกับความเร็วยุทธ์กับรถไฟที่วิ่งด้วยความเร็วต่ำบนโค้งเดียวกัน

โดยอาจกำหนดค่าของ Cant ได้ดังนี้

- ค่าจำกัดโดยปกติ (Normal Limit) ของ Cant อยู่ที่ 160 มม. แต่ก็แนะนำว่าควรกำหนดค่า Cant ไว้ที่ 110 มม. สำหรับบริเวณชานชาลา บริเวณที่ไม่ใช่รางปกติ บริเวณทางข้าม (Level Crossings) ส่วนที่เป็นสะพาน อุโมงค์ และในส่วนอื่นที่กำหนดไว้ เป็นต้น

- ค่าจำกัดในกรณีพิเศษ (Exceptional Limit) อยู่ที่ 180 มม.

เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงความเสี่ยงที่จะตกลงของตู้สินค้าที่โค้งแคบกว่า 320 เมตร ควรจำกัดค่า Cant ตามสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h_{a(\text{limit})} = \frac{R - 50}{1.5}$$

ผลที่ตามมาในกรณีนี้คือทางรถไฟอาจต้องการอัตราการซ่อมบำรุงสูงกว่าปกติ  
ต่อไปนี้เป็น Cant Deficiency ที่กำหนดไว้ในมาตรฐานผ่านการทดสอบตามระเบียบวิธีที่  
กำหนดอยู่ใน EN 14363, EN 15686 และ/ หรือ EN 15687 สำหรับรถไฟความเร็วต่าง ๆ

1. ค่าจำกัดโดยปกติ (Normal Limit) สำหรับ

- ความเร็ว 80 กม./ชม. <math> < V \leq 250 </math> กม./ชม. คือ 130 มม.
- ความเร็ว 250 กม./ชม. <math> < V \leq 300 </math> กม./ชม. คือ 100 มม.

2. ค่าจำกัดในกรณีพิเศษ (Exceptional Limit) สำหรับ

- ความเร็ว 80 กม./ชม. <math> < V \leq 200 </math> กม./ชม. คือ 183 มม.
- ความเร็ว 200 กม./ชม. <math> < V \leq 230 </math> กม./ชม. คือ 168 มม.
- ความเร็ว 230 กม./ชม. <math> < V \leq 250 </math> กม./ชม. คือ 153 มม.
- ความเร็ว 250 กม./ชม. <math> < V \leq 300 </math> กม./ชม. คือ 130 มม.

สำหรับรถไฟที่ติดตั้งระบบ Tilting Trains จะสามารถชดเชยค่า Cant Deficiency ได้  
มากกว่ารถไฟปกติ โดยที่ความเร็ว 80 กม./ชม. <math> < V \leq 260 </math> กม./ชม.

1. ค่าจำกัดโดยปกติ คือ 275 มม.
2. ค่าจำกัดในกรณีพิเศษ คือ 306 มม.

Rate of Change of Cant as a Function of Length (dL/dt)

1. ค่าจำกัดโดยปกติ คือ 2.25 มม./ม.
2. ค่าจำกัดในกรณีพิเศษ คือ 2.50 มม./ม.

Rate of Change of Cant as a Function of Time (dh<sub>a</sub>/ds)

1. ค่าจำกัดโดยปกติสำหรับ Constant Cant Gradient

- ที่ความเร็ว <math> \leq 200 </math> กม./ชม. และ Cant Deficiency, - ที่ความเร็ว <math> \leq 200 </math> กม./ชม. และ - ที่ความเร็ว

2. ค่าจำกัดในกรณีพิเศษสำหรับ Constant Cant Gradient

- ที่ความเร็ว <math> \leq 200 </math> กม./ชม. และ   
มม. และ

- ที่ความเร็ว <math> \leq 200 </math> กม./ชม. และ - ที่ความเร็ว

1. ค่าจำกัดโดยปกติ สำหรับ Variable Cant Gradient คือ 55 มม./วินาที

2. ค่าจำกัดในกรณีพิเศษ สำหรับ Variable Can Gradient คือ 76 มม./วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Rate of Change of Cant Deficiency as a Function of Time (dD/dt)

## 1. ค่าจำกัดโดยปกติ

- ที่ความเร็ว  $\leq 200$  กม./ชม. และ  $D \leq 168$  มม. คือ 55 มม./วินาที
- ที่ความเร็ว  $\leq 200$  กม./ชม. และ  $168 < D \leq 183$  มม. คือ 55 มม./วินาที
- ที่ความเร็ว  $200 < V \leq 300$  กม./ชม. คือ 55 มม./วินาที

## 2. ค่าจำกัดในกรณีพิเศษ

- ที่ความเร็ว  $\leq 200$  กม./ชม. และ  $D \leq 168$  มม. คือ 100 มม./วินาที
- ที่ความเร็ว  $\leq 200$  กม./ชม. และ  $168 < D \leq 183$  มม. คือ 90 มม./วินาที
- ที่ความเร็ว  $200 < V \leq 300$  กม./ชม. คือ 75 มม./วินาที

Rate of Change of Quasi-Lateral Acceleration as a Function of Time ( $da_Q/dt$ )

## 1. ค่าจำกัดโดยปกติ

- ความเร็ว 80 กม./ชม.  $< V \leq 120$  กม./ชม. คือ 0.16 มม./วินาที<sup>3</sup>
- ความเร็ว 120 กม./ชม.  $< V \leq 200$  กม./ชม. คือ 0.16 มม./วินาที<sup>3</sup>
- ความเร็ว 250 กม./ชม.  $< V \leq 300$  กม./ชม. คือ 0.20 มม./วินาที<sup>3</sup>

## 2. ค่าจำกัดในกรณีพิเศษ

- ความเร็ว 80 กม./ชม.  $< V \leq 120$  กม./ชม. คือ 0.46 มม./วินาที<sup>3</sup>
- ความเร็ว 120 กม./ชม.  $< V \leq 200$  กม./ชม. คือ 0.46 มม./วินาที<sup>3</sup>
- ความเร็ว 250 กม./ชม.  $< V \leq 300$  กม./ชม. คือ 0.20 มม./วินาที<sup>3</sup>

**2.3.6 การพิจารณาระยะทางของ Transition Curve ในแนวระดับ**

ในการพิจารณาความยาวของ Transition Curve (L) ต้องมีการพิจารณาอัตราความเปลี่ยนแปลงทั้งของ Cant และ Cant Deficiency ซึ่งเป็นเรื่องหลักในการออกแบบ Transition curve จากรูปที่ 2.15 และจากสมการความเร็ว ระยะทางและเวลา จะได้

$$V = \frac{\Delta S}{\Delta t}$$

จะได้

$$\Delta t = \frac{\Delta S}{V} = \frac{3.6L}{V} \quad \text{วินาที}$$

Rate of Change of Cant ( $dh_c/dt$ ) ที่เป็นฟังก์ชันของเวลา โดยหาได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{dh_a}{dt} = \frac{\Delta h_a}{\Delta t}$$

จะได้

$$L_a = \frac{v \times \Delta h_a}{3.6 \times \frac{dh_a}{dt}} \quad (2.24)$$

ในทำนองเดียวกัน Rate of Change of Cant Deficiency (dD/dt)

จะได้

$$L_D = \frac{v \times \Delta D}{3.6 \times \frac{dD}{dt}} \quad (2.25)$$

### 2.3.7 โคน้ในแนวตั้ง

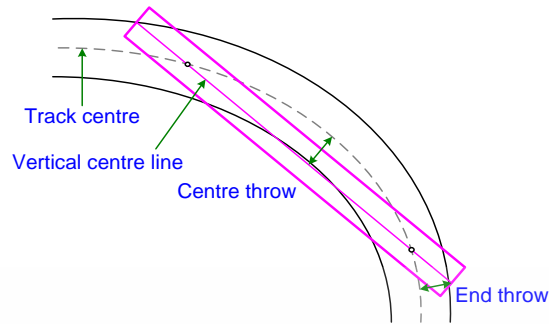
โคน้ตั้ง (Vertical Curve) ควรมีความยาวไม่น้อยกว่า 20 เมตร และอาจออกแบบโคน้ตั้งใด ๆ โดยไม่ต้องมีระยะ Transition Curve ก็ได้ สำหรับช่วงหนึ่ง ๆ ของทางรถไฟจะต้องทำการใส่โคน้ตั้งก็ต่อเมื่อค่า Slope ของ Gradients ตัวที่อยู่ถัดกันมีความแตกต่างกันมากกว่าค่าต่อไปนี้

- 2 มม./ม. สำหรับความเร็วไม่เกิน 230 กม./ชม.
- 1 มม./ม. สำหรับความเร็วมากกว่า 230 กม./ชม.

การออกแบบควรหลีกเลี่ยงการออกแบบให้โคน้ราบและโคน้ตั้งอยู่ในบริเวณเดียวกัน รัศมีของโคน้ตั้งมีข้อกำหนดดังนี้

1. ค่าจำกัดโดยปกติ รัศมีของโคน้ตั้ง  $R_{VC} = 0.35 \times V^2$  โดยต้องไม่ต่ำกว่า 2,000 เมตร แต่ถ้รถไฟเป็นรถโดยสารที่มีผู้โดยสารยืนเป็นส่วนใหญ่  $R_{VC} = 0.77 \times V^2$
2. ค่าจำกัดในกรณีพิเศษ  $R_{VC} = 0.16 \times V^2$

### 2.3.8 End Throw and Centre Throw



รูปที่ 2.16 End and Centre Throw ของรถไฟบนทางโค้ง, [2]

ตัวรถไฟจะมีการขยายขอบเขตโครงสร้างรถไฟเมื่อเข้าโค้ง ที่หัวและท้ายของตู้รถไฟ (End Throw) และกลางตู้รถไฟ (Centre Throw) ดังรูปที่ 2.16 ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

- End Throw

$$E_T = \frac{L^2 - R^2}{8R}$$

- Centre Throw

$$C_T = \frac{B^2}{8R}$$

เมื่อ  $L$  = ความยาวทั้งหมดของตู้รถไฟ

$B$  = ระยะระหว่างฐานล้อรถไฟ หรือระยะระหว่าง Bogie Centres

ในการออกแบบต้องคำนึงถึงพิกัดโครงสร้างของตำแหน่งดังกล่าวด้วย เพื่อให้เวลารถไฟเคลื่อนที่จะไม่ไปชนกับโครงสร้างอุโมงค์หรืออุปกรณ์หรือผนังของสิ่งก่อสร้างใด ๆ

## 2.4 ทฤษฎีการประมาณระยะเวลาเดินรถ (Running Time Estimation)

เพื่อให้ระบบตอบสนองต่อการใช้งานตามวัตถุประสงค์ของการให้บริการเดินทางโดยรถไฟ รถไฟจะต้องเดินรถให้สัมพันธ์กับเวลาที่ระบุในตารางเวลาการเดินรถ (Timetable) ระหว่างที่รถไฟวิ่งอยู่บนเส้นทาง รถไฟอาจจะต้องเร่งเครื่อง รักษาระดับความเร็ว ปล่อยไชล และเบรก หรือจอด เพื่อไปถึงเป้าหมาย ตามเวลาที่กำหนดในตารางเวลาการเดินรถ ระยะเวลาตามตารางเดินรถ แม้ว่าจะนำมาเฉลี่ยตามระยะทางที่รถวิ่งไป (Linear Interpolation) ก็ไม่ได้ค่าที่เที่ยงตรง จึงมีความจำเป็นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะต้องคำนวณระยะเวลาเดินทางสำหรับระยะทางช่วงสั้น ๆ ซึ่งอยู่ในรูปของ ความเร็ว กับเวลา (Speed-Time Intervals) ที่รถไฟวิ่งเข้าสู่ และเคลียร์ช่วงไฟสัญญาณ (Block Signals) และส่วนของเส้นทาง (Track Sections) การคำนวณจะคำนึงถึงการเพิ่มความเร็ว การรักษาความเร็วและการลดความเร็วเพื่อให้ได้ระยะเวลาเคลื่อนที่ของรถไฟที่เที่ยงตรง และสามารถใช้ระยะเวลานี้เป็นระยะเวลาเผื่อเหลือเผื่อขาด (Margins) ให้กับระยะเวลาตามตารางเดินรถได้ด้วย

การคำนวณพื้นฐานจะทำโดยอาศัยค่ามาตรฐานที่บ่งชี้ถึงตัวแปรต่าง ๆ อยู่ในสภาพที่ดี อีกประการหนึ่งคือการใช้กระบวนการด้านความน่าจะเป็นมาสนับสนุนการคำนวณ ข้อมูลพื้นฐานสำหรับการคำนวณเวลาการเดินทาง ประกอบด้วย

1. รายละเอียดของเส้นทาง การเดินทาง ประกอบด้วย ระยะทาง ความเร็วที่ทางรองรับได้สูงสุด (Speed Limits) ทางลาดชัน (Gradient) ทางโค้ง และอุโมงค์
2. ลักษณะเฉพาะของหน่วยขับเคลื่อน (Traction Unit) ประกอบด้วย แรงจุด แรงดึง และแรงต้านทาน
3. ลักษณะเฉพาะของตัวรถไฟ (Rolling Stock) ประกอบด้วย น้ำหนัก ความยาว ความต้านทาน โดยขึ้นอยู่กับชนิดของขบวนรถไฟ
4. ข้อมูลเกี่ยวกับการบริการเดินรถ ได้แก่ จุดเข้า-ออก จุดหยุดรถ ตารางเวลาการเดินทาง
5. อุปกรณ์ด้านความปลอดภัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.4.1 ข้อมูลโครงสร้างพื้นฐานและขบวนรถ

การคำนวณเวลาการเดินทางจำเป็นต้องดูว่าอะไรจะเกิดผลกระทบที่สร้างอิทธิพลต่อโครงสร้างพื้นฐานและขบวนรถไฟ อย่างไรก็ดีสำหรับการคำนวณอัตราเร่งของความเร็วรถไฟ มีด้วยกัน 4 องค์ประกอบ ดังนี้

1. แรงขับเคลื่อน (Tractive Effort) ( $F_T$ )
2. แรงเฉพาะของหน่วยขับเคลื่อน (Traction Unit) ( $F_{RT}$ )
3. แรงต้านทานของขบวนรถไฟ หรือ ส่วนที่บรรทุก (Rail Vehicle or Wagon Resistances) ( $F_{RW}$ )
4. ข้อมูลในส่วนโครงสร้างพื้นฐาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งแรงต้านทานบนเส้นทางรถไฟ ( $F_R$ )

ความต่างระหว่างแรงขับเคลื่อนและผลรวมของแรงต้านทานนั้นก็คือ ความเร่งของขบวนรถไฟ โดยทฤษฎีที่จะใช้ต่อไปนี้จะใช้ปริมาณทางกายภาพที่ใช้กับหน่วย SI ที่ประกอบด้วย ความเร็ว ( $v$ ) มีหน่วยเป็น (m/s) โดย 3.6 m/s เท่ากับ 1 km/h และมวล ( $m$ ) มีหน่วยเป็น kg โดยมีค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ( $g$ ) เท่ากับ 9.81 m/s<sup>2</sup>

#### 2.4.1.1 แรงขับเคลื่อน (Tractive Effort, $F_{Tr}$ )

หัวรถจักรหรือส่วนอุปกรณ์ขับเคลื่อนจะสร้างแรงขับเคลื่อนเพื่อที่จะไปฉุดลากรถไฟให้เคลื่อนที่ไปได้ เรียกแรงชนิดนี้ว่า Induce Tractive Effort,  $F_{Ti}$  มีหน่วยเป็นนิวตัน (N)

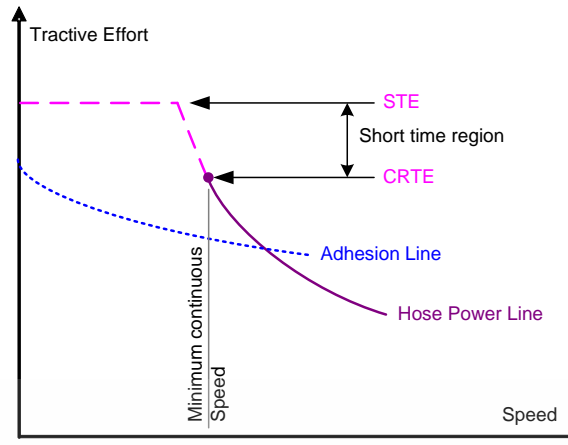
Tractive Effort เกี่ยวข้องกับหลายปัจจัย โดย Tractive Effort ส่วนมากจะพิจารณาลักษณะของแรงขับเคลื่อนแยกส่วนเป็น แรงขับเคลื่อนเริ่มต้น (Starting Tractive Effort) แรงขับเคลื่อนต่อเนื่อง (Continuous Running Tractive Effort) และแรงขับเคลื่อนสูงสุด (Maximum Tractive Effort) โดยเงื่อนไขเหล่านี้ถูกกำหนดในสภาวะการเดินรถที่ต่างกัน แต่จะมีปัจจัยทางกลที่สอดคล้องกัน คือ แรงบิดที่ส่งให้กับล้อรถไฟ (Input Torque) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของล้อรถไฟ (Wheel Diameter) สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างล้อและราง (Coefficient of Friction) และน้ำหนักที่กดลงบนล้อรถไฟ โดยผลลัพธ์ของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกับน้ำหนักที่กดลงบนล้อรถไฟ เรียกว่า Adhesion ซึ่งพิจารณาที่ค่าแรงบิดสูงสุดที่สามารถใช้ได้ก่อนที่ล้อหนึ่งล้อใดของรถจะหมุนฟรี (Spin) หรือลื่นไถล (Slip) โดย Tractive Effort (TE) ทำงานใน 3 ลักษณะ ได้แก่

1. แรงขับเคลื่อนเริ่มต้น (Starting Tractive Effort, STE) เป็นค่า Tractive Force ที่สามารถสร้างขึ้นด้วยกำลังขับเคลื่อน (Motive Power) ในขณะที่รถไฟยังจอดนิ่งอยู่กับที่โดยไม่ก่อให้เกิดการลื่นไถลของล้อ มองอีกมุมหนึ่งคือเป็นแรงที่จะไปกำหนดน้ำหนักของขบวนรถทั้งขบวนที่ระบบต้นกำลังขับเคลื่อนที่มีอยู่จะสามารถทำให้ขบวนรถสามารถเคลื่อนที่ไปได้ เช่น หัวรถจักร (Locomotive) จะมีแรงสูงสุดค่าหนึ่งที่จะสามารถลากตู้โดยสารหรือตู้สินค้าให้เคลื่อนที่ไปได้

2. แรงขับเคลื่อนสูงสุด (Maximum Tractive Effort, MTE) เป็น Tractive Force สูงสุดที่สามารถสร้างขึ้นได้ในทุกสภาวะการเดินโดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อรถไฟ ส่วนใหญ่ Tractive Force สูงสุดจะสร้างขึ้นในขณะที่รถไฟเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำ บางครั้งอาจเหมือนกับ STE โดยสร้างขึ้นในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ เพื่อไต่ขึ้นทางชันหรือเคลื่อนผ่านทางโค้งแคบ ๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวต้นกำลัง (Motive Power) ที่ใช้ และชนิดของมอเตอร์ขับเคลื่อน (Traction Motor) ซึ่งจำกัดด้วยระดับความร้อนเกินขีดจำกัด (Overheating) ของ Traction Motor, Alternator/Generator, และ/หรือ เครื่องยนต์ของหัวจักรรถไฟ

3. แรงขับเคลื่อนต่อเนื่อง (Continuous Running Tractive Effort, CRTE) เป็น Tractive Effort ที่ต้องการในการที่จะรักษาการเคลื่อนที่ของรถไฟอย่างต่อเนื่อง โดยไม่เกิดการลื่นไถลหรือทำให้ตัวต้นกำลังหรือเครื่องกำเนิดไฟ (Traction Motor or Generator) มีความร้อนเกินขีดจำกัด

Tractive Effort เป็นสัดส่วนผกผันระหว่างความเร็วที่เปลี่ยนแปลงกับระดับของแรงขับเคลื่อนที่ป้อนให้ ความต่อเนื่องของ Tractive Effort ส่วนมากแสดงในรูปกราฟที่ย่านความเร็วที่เป็นส่วนหนึ่งของเส้นโค้ง Tractive Effort นั้น ๆ ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างของเส้นโค้ง แรงขับเคลื่อน กับ ความเร็ว, [17]

แรงขับเคลื่อนดังกล่าวอธิบายได้ด้วยสมการที่ (2.26)

$$F_{Tr}(V) = C_0 + (C_1 \times V) + (C_2 \times V^2) \quad (2.26)$$

โดยสัมประสิทธิ์  $C_0$ ,  $C_1$  และ  $C_2$  ขึ้นอยู่กับรถไฟแต่ละชนิด

อย่างไรก็ดี ไม่ใช่ว่าแรงทั้งหมดที่สร้างขึ้นมานี้จะสามารถนำไปใช้ได้ ด้วยสาเหตุมาจาก

- กระบวนการส่งกำลังขับเคลื่อนภายในของหัวรถจักร (Locomotive) หรือขบวนรถไฟ (Distributed Traction Train) คาดว่า ต้องเสียแรงขับเคลื่อนส่วนนี้ไปประมาณ 2-3%

- แรงขับเคลื่อนจะถูกจำกัดอยู่ที่ค่าสูงสุดค่าหนึ่งอย่างคงตัว เพื่อหลีกเลี่ยงมิให้อุปกรณ์ต้นกำลังจากสภาวะความร้อนเกินขีดจำกัด (Overheating)

- ล้อรถจะหมุนฟรี (Spin) ถ้าแรงขับเคลื่อนมีค่าเกินกว่าค่าแรงยึดเกาะ (Adhesion) สูงสุดระหว่างหน้าสัมผัสของล้อรถไฟกับผิวสัมผัสของราง

เมื่อกล่าวถึง Adhesion Coefficient เมื่อพิจารณาค่าจำเพาะของมัน ค่าแรงเบรกจะถูกจำกัดอยู่ที่ค่าแรงเบรกสูงสุดที่สามารถส่งผ่านไปได้โดยไม่เกิดการลื่นไถล ดังสมการที่ (2.27)

$$F_{B, \max, a} = m_{st} \times \mu \times g \quad (2.27)$$

โดย  $F_{B, \max, a}$  เป็นค่าแรงเบรกสูงสุดต่อเพลา (KN)

$m_{st}$  เป็นมวลสถิตต่อเพลา (Ton)

$\mu$  เป็น Adhesion Coefficient

$g$  เป็นความเร่งจากโน้มถ่วงของโลก ( $m/sec^2$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาจสามารถอธิบายโดย Adhesion Value,  $\mu$  (ซึ่งเป็นค่าที่ไม่ขึ้นกับมิติ แต่สัมพันธ์กับความเร็วขับเคลื่อน) และ Wheel Load,  $F_L$  ของล้อที่ถูกขับเคลื่อน โดยค่า  $\mu$  อาจพิจารณาด้วยสมการของ Curtius and Kniffler ดังนี้

$$\mu(V) = \frac{7.5}{(3.6V + 44) + 0.161}$$

#### 2.4.1.2 แรงต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของรถไฟ (Resistance to Motion)

เมื่อก้าวถึงแรงที่ใช้ในการฉุดให้รถไฟเคลื่อนที่ไปแล้ว องค์ประกอบอีกส่วนที่สำคัญที่ใช้พิจารณาการเคลื่อนที่คือความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ (Resistance to Motion) บ้างก็เรียกว่า Aerodynamic Resistance ( $F_R$ ) หรือ Rolling Resistance ดังสมการที่ (2.28)

$$F_R(V) = R_0 + (R_1 \times V) + (R_2 \times V^2) \quad (2.28)$$

โดยสัมประสิทธิ์ความเสียหายที่เกิดกับขบวนรถไฟ ( $R_0$ ,  $R_1$  และ  $R_2$ ) มีหน่วยเป็น N, N/(m/s), N/(m/s<sup>2</sup>) ตามลำดับ ไม่ว่าจะอยู่ในรูปของหัวรถจักรเป็นตัวฉุดลาก ตู้ประกอบ รถโดยสาร หรือรถสินค้า ก็ล้วนเกิดจากองค์ประกอบต่อไปนี้

1. แรงต้านทานที่เกิดจากการหมุนของล้อ (Rolling Mechanical Resistance) เช่น เกิดจากฝาประกบเพลลา (Journal Bearing) กับเพลารถ แรงยึดเกาะ การเสียรูปของราง (Deformation of Track) ที่เกิดจากแรงกดของล้อ เป็นต้น เป็นแรงต้านที่เกิดจากการหมุนของล้อ
2. ความเสียหายที่แปรผันตามความเร็ว เช่น การเกิด Friction จากการวิ่งบนทางโค้ง การเคลื่อนที่ด้านข้าง (Lateral Movement) ระหว่างล้อ (Wheel Tread) กับหัวราง (Rail Head) และการแกว่งตัวจากการเคลื่อนที่ของรถบนราง (Oscillation)
3. แรงต้านทานจากอากาศ (Air resistance) ขึ้นกับรูปทรงทางเรขาคณิตของรถที่สัมพันธ์กับความเร็วรถ เช่น รูปทรงของรถที่มีลักษณะเพรียวลม (Streamlining) ช่วยลดแรงต้านอากาศได้ดีขึ้น พื้นที่หน้าตัดด้านหน้าและด้านหลังของรถ พื้นที่ว่างระหว่างตู้รถทำให้เกิดกระแสอากาศไหลวน (Turbulence) ทั้งนี้เมื่อพิจารณาลักษณะ Aerodynamics ของรถไฟทั้งขบวนอาจมีผลมากกว่าผลรวมของแต่ละตู้ขบวน

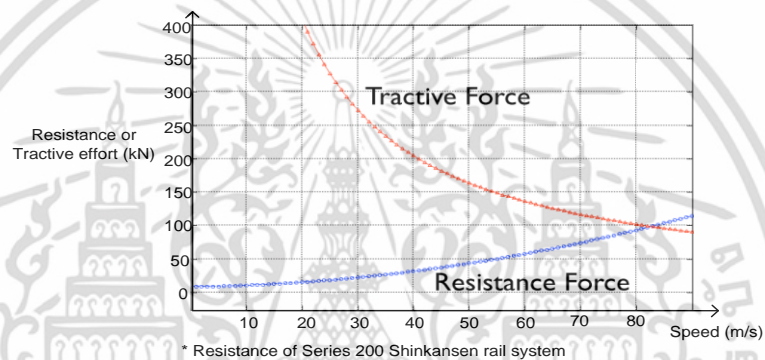
สัมประสิทธิ์ดังกล่าว อาจหาได้จากการทดสอบโดยดูจากมาตรฐาน EN 14067-2, -3 สมการที่ (2.28) เป็นการคำนวณแรงต้านทานที่เกิดขึ้น ณ ขณะใดขณะหนึ่งที่เป็นฟังก์ชันของความเร็ว แต่ถ้าเป็นแรงต้านทานเฉลี่ยที่เป็นฟังก์ชันของแรงต้านทานเริ่มต้น ในกรณีที่เกิดขึ้นจนกระทั่งเบรกจนหยุดรถ จะได้สมการที่ (2.29)

$$F_R(V) = R_0 + \left(\frac{2}{3} R_1 \times V_0\right) + \left(\frac{1}{2} R_2 \times V_0^2\right) \quad (2.29)$$

และถ้าในกรณีที่ค่าแรงเบรกเริ่มต้นกับแรงเบรกสุดท้ายที่ค่าไม่เท่ากัน คือเป็นแบบผสม จะได้สมการที่ (2.30)

$$F_R(V) = R_0 + \frac{2}{3} R_1 \times \left[ \frac{V_0^2 + (V_0 \times V_e) + V_e^2}{V_0 + V_e} \right] + \frac{1}{2} R_2 \times (V_0^2 + V_e^2) \quad (2.30)$$

ตัวอย่างกราฟของแรงเสียดทานกับความเร็วแสดงดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 กราฟ Resistance และ Tractive Effort กับ Speed (Source: Virginia Tech)

\*Assumed Efficiency = 70%, [16]

ขบวนรถไฟหนึ่ง ๆ ประกอบด้วยตู้ขบวนที่ต่างชนิดกัน ทำให้สัมประสิทธิ์ต้องถูกคำนวณหรือวัดจากข้อมูลที่ทราบแน่นอนสำหรับรถไฟที่ต้องการพิจารณา โดยสูตรที่ได้รับการศึกษามาแล้วสำหรับรถไฟลักษณะต่าง ๆ จะได้กล่าวต่อไป หนึ่ง พึงระลึกว่าสูตรเหล่านี้เป็นสูตรที่ใช้กันมาก สำหรับพื้นที่ตอนกลางของยุโรปภายใต้สภาวะการณ์ที่จำเพาะเจาะจง ระบบรถไฟหลายแห่งอาจใช้รูปแบบการประมาณการณ์ที่แตกต่างกันไปขึ้นกับสภาพจริงทางกายภาพหรือภายใต้สภาวะการณ์ที่แตกต่างกัน ดังนั้น สูตรต่อไปนี้จึงเป็นเพียงการยกตัวอย่างให้เข้าใจกระบวนการเท่านั้น โดยแรงต้านทานของรถไฟ  $F_R$  แบ่งได้เป็น 3 ลักษณะ ดังนี้

#### 1. Traction Unit Resistance

สำหรับ Traction Unit รวมถึง Multiple Units ความต้านทานโดยปกติอธิบายด้วยตัวแปรที่กำหนด  $a_0, a_1, a_2, a_{2r}$  ดังสมการที่ (2.31)

$$F_{Rt}(V) = [g \times m_T \times (a_0 + (a_1 \times V))] + (a_1 \times V^2) + (a_{2r} \times V_r^2) \quad (2.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

$m_T$  = มวลของ Traction Unit (kg)

$V$  = ความเร็วของรถไฟ (m/sec)

$V_r$  = ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างอากาศกับรถไฟ ปกติจะใช้ค่าประมาณ  $V+4.17$  m/s ที่

ความเร็ว Headwind 15 กม./ชม.

## 2. Vehicle Resistance Passenger Trains, $F_{Rwp}$

สำหรับ Passenger Trains ตัวแปรของสมการ Vehicle Resistances อธิบายด้วยสมการของ Sauthoff เป็นตัวอย่างในการประมาณค่า ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรถ และความต้านทานรถโดยสาร  $F_{Rwp}$  โดยการพิจารณาจากทฤษฎีและการทดลอง ดังนี้

$$F_{Rwp}(V) = [1000 \times m_w \times g \times (1.9 + (C_b \times 3.6V))] + [0.0471 \times (n_w + 2.7) \times A_f] + 0.0471 \times (n_w + 2.7) + (a_{2r} \times V^2) \quad (2.32)$$

โดย

$m_w$  = มวลของ Vehicle (kg)

$V$  = ความเร็วของรถไฟ (m/sec)

$C_b$  = ขึ้นกับจำนวนของเพลลา (Axles) ถ้าเป็นรถแบบ 4 เพลลา = 0.0025, ถ้าเป็นรถแบบ 3 เพลลา = 0.004, ถ้าเป็นรถแบบ 2 เพลลา = 0.007

$n_w$  = จำนวนของรถ (Vehicle) ที่นำมาพ่วงกัน

$A_f$  = พื้นที่หน้าตัดของรถไฟ ปกติใช้ค่าประมาณ  $1.45 \text{ m}^2$

## 3. Vehicle Resistance for Freight Trains, $F_{Rwf}$

สำหรับรถไฟขนส่งสินค้า อาจใช้สมการของ Strahl เพื่อประมาณค่าความต้านทานของรถไฟ (Vehicle Resistances) ดังนี้

$$F_{Rwf}(V) = 1000 \times m_w \times g \times \left[ \frac{C_a + ((0.007 + C_m) \times 3.6V^2)}{100} \right] \quad (2.33)$$

โดย

$m_w$  = มวลของ Wagons (kg)

$V$  = ความเร็วของรถไฟ (m/sec)

$C_a$  = สัมประสิทธิ์แรงยึดเกาะ (Adhesion) ของเพลลา ใช้ค่า 1.4 สำหรับ Roller bearing และ 2.0 สำหรับกล่อง Plained-Bearing รุ่นเก่า

$C_M$  = ค่าความเสียดทานของอากาศขึ้นกับชนิดของ Wagons:

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$C_M = 0.05$  สำหรับขบวนรถไฟแบบผสม

$C_M = 0.032$  สำหรับรถบรรทุกแร่หรือถ่านหิน

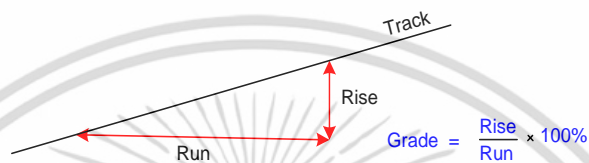
$C_M = 0.04$  สำหรับตู้สินค้าแบบปิดมิดชิด

$C_M = 0.1$  สำหรับตู้สินค้าแบบเปิดโล่ง

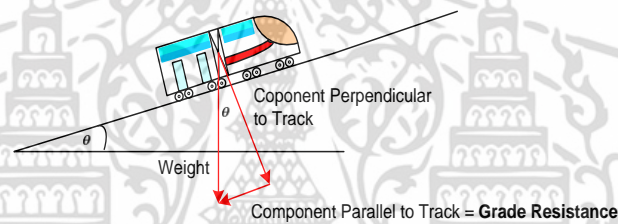
### 2.4.1.3 แรงต้านทานของเส้นทางรถไฟ (Line Resistances)

ลองมาดูรายละเอียดปัจจัยสำคัญที่ส่งผล นั่นคือความชันของเส้นทาง (Gradient)

ดังรูปที่ 2.19 และ 2.20



รูปที่ 2.19 Grade หรือความชัน, [2]



รูปที่ 2.20 ตัวอย่าง Grade Resistance, [2]

แรงที่เกิดจากน้ำหนักบนทางชันที่ทำมุม  $\theta$  คือ

$$F = m_{st} \times g \times \sin \theta$$

เพราะว่าความชันของเส้นทางรถไฟนั้นมีค่าน้อยมาก ทำให้มุมมีค่าน้อย  $\sin \theta$  จึงมีค่าใกล้เคียงกับ  $\tan \theta$  จะได้แรงต้านทานจากค่าความชันเฉลี่ยของทางรถไฟของเส้นทางดังกล่าว เช่นเดียวกับในมาตรฐาน คือ

$$F_g = m_{st} \times g \times \frac{i}{1000} \quad (2.34)$$

โดย  $F_g$  คือแรงที่รถไฟกระทำบนทางชัน (KN)  
 $m_{st}$  คือมวลสถิติของขบวนรถ (Ton)  
 $g$  คือความเร่งจากแรงโน้มถ่วง ( $m/sec^2$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$i$  คือความชัน เป็น (mm/m)

โดยพิจารณาว่าแรงเบรกและความหน่วงมีค่าเป็นบวก ทำให้ค่าความชันในทิศทางเดินรถ  $i > 0$  เมื่อทางชันเป็นแบบขาขึ้น และ  $i < 0$  เมื่อเป็นทางชันขาลง

## 2.4.2 ผลรวมของแรงทั้งหมดที่เกี่ยวข้องในการเคลื่อนที่ของรถไฟ

แรงความต้านทานสามารถรวมกันได้ในรูปแบบของสมการพาราโบลา โดยขึ้นอยู่กับความเร็วดังสมการ  $F_{Tr}(V) = C_0 + (C_1 \times V) + (C_2 \times V^2)$  กับการแปลงรูปแบบทวินาม (Binomial Transformation) ถ้าได้ทราบถึงข้อมูลลักษณะเฉพาะของขบวนรถไฟและเส้นทาง ความต่างระหว่างแรงขับเคลื่อนที่ขบล้อ ( $F_{Tr}$ ) กับ ความต้านทาน ( $F_R$ ) ก็จะเป็นความเร่งที่จุดให้รถไฟสามารถเคลื่อนที่ได้

อย่างไรก็ตามรถไฟประกอบด้วยส่วนที่เคลื่อนที่แบบหมุนได้ (Rotating) ในทางปกติแรงที่มีผลคือค่าสัมประสิทธิ์มวล  $f_p$  (Mass Factor) สำหรับแต่ละส่วนของขบวนรถ โดยส่วนที่เป็น Traction Unit ก็กำหนดเป็น  $f_{PT}$  ให้กับข้อมูลด้านเครื่องยนต์หรือชุดขับเคลื่อน ควรจะได้รับข้อมูลจากเครื่องยนต์ แต่ถ้าไม่มี ให้แทนค่าที่ 1.09 สำหรับขบวนรถตู้โดยสาร และตู้บรรทุกสินค้า  $f_{PW}$  มีค่าประมาณ 1.06 สำหรับรถไฟทั้งขบวน ซึ่งจะได้สมการคือ

$$f_p = \frac{(f_{PT} \times m_T) + (f_{PW} \times m_W)}{m_T + m_W} \quad (2.35)$$

สุดท้ายการคำนวณอัตราความเร่งของขบวนรถจะเป็นในรูปแบบสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equation) จะได้สมการดังนี้

$$F_{Tr}(V) - F_R(V) = f_p \times m \times \frac{dV}{dt} \quad (2.36)$$

โดยมวลของขบวนรถ ( $m$ ) มีหน่วยเป็น kg และความเร็ว ( $v$ ) มีหน่วยเป็น m/s (t คือ เวลาเป็นวินาที)

และต้องคำนึงว่า  $F_{Tr}$  คือ สมการกำลังสอง และเป็นเชิงเส้นหรือขึ้นอยู่กับฟังก์ชันไฮเพอร์โบลิก ซึ่ง  $v_i$  และ  $F_R$  คือ สมการกำลังสอง และเป็นเชิงเส้นของ  $v$

การคำนวณเวลาการเดินทาง ประกอบด้วย 3 ปัจจัยหลักที่สำคัญ คือ

- จะต้องมีการพิจารณาในส่วนของข้อมูลขบวนรถ และโครงสร้างพื้นฐาน
- จะต้องมีการแบ่งเส้นทางออกเป็นส่วนๆ ในเรื่องของความเท่าเทียมกันของเส้นทางกับ พฤติกรรมของทาง
- แก้มสมการที่ (2.36) สำหรับสถานที่เหล่านั้นที่ซึ่งขบวนรถมีความเร่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.3 โมเดลรถไฟกับมวล

ถ้ากล่าวถึงสมการที่ (2.36) ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความเร็วระหว่างช่วงของความเร่ง โดยแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$F_{Tr}(V) - F_R(V) = f_p \times m_T \times \frac{dV}{dt} \quad (2.37)$$

โดย มวลของขบวนรถไฟ (m) มีหน่วยเป็น kg และความเร็ว (v) มีหน่วยเป็น m/s แรงดึงที่กระทำ  $F_{Tr}$  และแรงต้านทาน  $F_R$  เป็นฟังก์ชันของ v (m/s) โดยจะสนใจที่ความสัมพันธ์ของ ความเร็ว (v) และความยาว s ของในแต่ละส่วนของความเร่ง ตั้งแต่  $v = ds/dt$  ตามมาด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ที่มีความสัมพันธ์ระหว่าง v กับ s ได้ดังนี้

$$\frac{F_{Tr}(V) - F_R(V)}{V} = f_p \times m \times \frac{dV}{dt} \times \frac{dt}{dS} = f_p \times m \times \frac{dV}{dS} \quad (2.38)$$

และถ้าต้องการจะหาว่าจากผลของการเพิ่มความเร็วรถไฟ จากที่วิ่งด้วยความเร็วค่าหนึ่งไปจนมีความเร็วอีกค่าหนึ่ง สมมติว่าเป็นจาก  $V' - V''$  รถไฟนั้นจะใช้เวลา และระยะทางเท่าใด สามารถหาได้โดยการแก้สมการ โดยการแปลงรูปแบบสมการด้านบน จะได้

$$\frac{dt}{dV} = \frac{f_p \times m}{F_{Tr}(V) - F_R(V)} \quad \text{และ} \quad \frac{dS}{dV} = \frac{V \times f_p \times m}{F_{Tr}(V) - F_R(V)}$$

หาเวลา และระยะทางโดยการอินทิเกรต จะได้

$$t = \int \frac{m \times f_p}{F_{Tr}(V) - F_R(V)} dv \quad \text{และ} \quad S = \int \frac{V \times m \times f_p}{F_{Tr}(V) - F_R(V)} dv \quad (2.39)$$

โดย อินทิเกรตจาก  $V' - V''$

### 2.4.4 Speed Profile

Speed Profile คือลักษณะการเคลื่อนที่ของรถไฟสำหรับเส้นทางช่วงหนึ่ง ๆ ได้แก่ เพิ่มความเร็ว (Acceleration) เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ (Constant movement/Cruising) ปลดปล่อย (Coasting) หรือเบรกเพื่อลดความเร็ว (Braking) ลำดับดังกล่าวจะต่อเนื่องสลับกันไปตามเส้นทางรถไฟ การเคลื่อนที่ที่จะพิจารณาจากแรงขับเคลื่อน แรงต้านทาน และขีดจำกัดความเร็วของเส้นทาง จากตารางเดินรถซึ่งรถไฟต้องปฏิบัติตาม Speed Profile มี 2 ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพล ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ลักษณะเฉพาะของเส้นทางเดินรถ มีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงด้านโครงสร้างพื้นฐาน หรือโดยข้อจำกัดตามตารางเวลาเดินรถ เช่น จุดที่ต้องหยุดรถ เป็นต้น

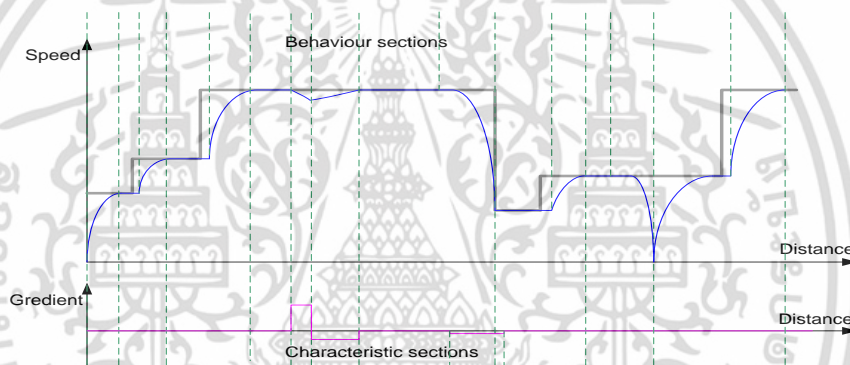
2. พฤติกรรมของรถไฟที่แสดงออกในระหว่างการเคลื่อนที่ไปในแนวเส้นทาง

#### 2.4.4.1 การแบ่งส่วนการเคลื่อนที่ของรถไฟ

เมื่อทำการแบ่งเส้นทางออกเป็นส่วนๆ ตามลักษณะเฉพาะและพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ จะต้องพิจารณาทั้งความเร็วและระยะทาง โดยขั้นตอนวิธี (Algorithm) จะต้องสามารถคำนวณการเคลื่อนที่ของแต่ละส่วนที่ประกอบด้วยความเร็วและระยะทางได้ โดย

- แรงขับเคลื่อนที่ใช้นั้นมาจากหลายสมการ แต่ละอันใช้ได้เฉพาะช่วงของการเพิ่มความเร็ว และแน่นอนว่าความเร่งจะสิ้นสุดลงเมื่อมีความเร็วสูงถึงที่กำหนด

- ในอีกด้านหนึ่ง การเปลี่ยนแปลงความชันเส้นทางและการจำกัดความเร็วสำหรับแต่ละช่วงของเส้นทางก็มีผลต่อการเคลื่อนที่ แสดงดังรูปที่ 2.21 เส้นโค้งการวิ่งของรถไฟ



รูปที่ 2.21 ตัวอย่างการแบ่งส่วน Moving Sections of Trains, [10]

#### 2.4.4.2 ลักษณะเฉพาะของเส้นทางรถไฟ

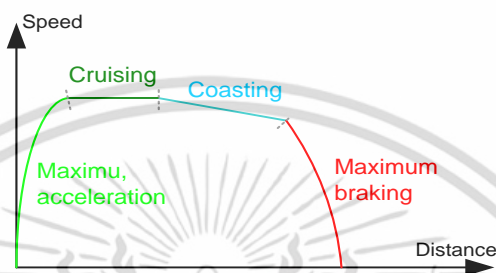
ถ้าเป็นไปได้จะต้องมีการให้รายละเอียดของเส้นทางรวมถึงการเลือกทางรถไฟที่ต้องใช้ ตำแหน่งและชนิดของประแจในบริเวณสถานีรถไฟ เพราะสิ่งเหล่านี้ทำให้ความเร็วในการเข้าและออกจากสถานีนั้น ๆ ต่างกัน เมื่อทำการเก็บรวบรวมข้อมูลด้านขีดจำกัดความเร็ว จะต้องทำการตรวจสอบค่าขีดจำกัดความเร็วที่ออกแบบสำหรับเส้นทางและสำหรับรถไฟ นอกจากนี้ ในบางกรณีจะต้องพิจารณาถึงการควบคุมความเร็วเกินขีดจำกัดโดยระบบอัตโนมัติสัญญาณ และผลกระทบอื่น ๆ ที่ทำให้แรงเบรมมีค่าต่ำลง ระยะเบรกยาวขึ้น เช่น ขณะรถไฟแล่นลงทางชัน เป็นต้นด้วย ดูสาเหตุและรายละเอียดเพิ่มเติมในหัวข้อ ระยะปลอดภัยจากการเบรกของรถไฟ ก่อนหน้านี้

การออกแบบแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ต้องคำนึงถึงการเคลื่อนที่แบบไดนามิกของขบวนรถไฟ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ โดยหลักเบื้องต้น การจำกัดความเร็ว ณ จุดใดจุดหนึ่ง ถ้าส่วนหัวของขบวนรถไฟจะเป็นตัวแทนของรถไฟทั้งขบวน ก็จะต้องพิจารณาความยาวของขบวนรถไฟด้วย โดย

- การเปลี่ยนความชันและโค้งจะมีผลกระทบต่อรถไฟทั้งขบวน ดังนั้น รถไฟจะต้องกำหนดให้มีตำแหน่งเลื่อนออกไปทางด้านหน้าประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวของทั้งขบวน
- จะต้องพิจารณาขีดจำกัดความเร็วของทั้งขบวนรถ โดยเพื่อความยาวของทั้งขบวนรถที่บริเวณขอบเขตจำกัดความเร็วที่ต้องการในทิศทางเดินรถด้วย

### 2.4.4.3 พฤติกรรมการเคลื่อนที่ของรถไฟ

พิจารณาเป็นช่วง ตามพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจากการเดินรถจริง ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 Typical Train Movement Behavior, [10]

1. ช่วงการเพิ่มความเร็ว (Acceleration Section) ในส่วนนี้ แรงขับเคลื่อนที่มีทั้งหมดจะถูกใช้เพื่อให้ได้ระยะเวลาสั้นที่สุด โดยมีแรงต้านคือแรงเสียดทานทั้งหลาย ผลต่างของแรงและความเร่งนั้นไม่คงตัว ดังนั้นการเพิ่มความเร็วอย่างสม่ำเสมอด้วยอัตราคงที่นั้น ไม่สามารถคำนวณง่ายๆ โดยใช้สมการของนิวตัน (Newton Formula) ได้ ต้องใช้การแก้ปัญหาด้วยสมการ Differential Equation ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว

2. ช่วงความเร็วคงที่ (Cruising section) เมื่อรถไฟเพิ่มความเร็วจนถึงขีดจำกัดความเร็วแล้ว หลังจากนั้นจะเปลี่ยนไปใช้ความเร็วคงที่ในการเคลื่อนที่ต่อไป ส่วนนี้สามารถใช้สมการของนิวตันได้ ตราบเท่าที่แรงขับเคลื่อนที่กลับด้วยแรงต้านทานยังให้ผลเป็นบวก โดย

$$S = V \times t \quad (2.40)$$

พึงระลึกว่าถ้าการเคลื่อนที่เข้าสู่ส่วนของเส้นทางที่เป็นทางชัน อาจทำให้แรงต้านทานมีค่าเพิ่มขึ้น จึงอาจมีความจำเป็นจะต้องเปลี่ยนการคำนวณไปเป็นแบบที่มีการเพิ่มความเร็วเข้ามาเกี่ยวข้อง ในที่นี้ความเร่งจะติดลบ เรียกว่าความหน่วง ในกรณีที่ทางชันเป็นทางลงเนิน มีค่าเป็นลบ ซึ่งรถไฟอาจต้องใช้เบรกเพื่อรักษาความเร็วไม่ให้เกินขีดจำกัด ตราบเท่าที่แรงเบรกรังมีค่าเพียงพอในการควบคุมความเร็วก็จะมีผลต่อระยะเวลาเดินรถ

3. ช่วงการปล่อยไหล (Coasting Section) ในส่วนนี้การคำนวณจะคล้ายกับช่วงการเพิ่มความเร็วโดยไม่มีแรงขับเคลื่อนที่ อย่างไรก็ตาม ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการคำนวณว่าต้องการการปล่อยไหลหรือไม่ และจะกำหนดจุดเริ่มต้นอย่างไร โดยปกติแล้ว จะไม่ใช้การเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปล่อยไหลในการสร้างตารางเวลาเดินรถ เนื่องจากมีต้องการระยะเวลาเดินรถที่สั้นที่สุดโดยมีเวลาเผื่อไว้ให้อยู่แล้ว

4. ช่วงการเบรก (Braking Section) การประมาณเวลาเดินรถในช่วงของการเบรกก่อให้เกิดข้อโต้แย้งได้อย่างมาก ในทางทฤษฎีสามารถพิจารณาเป็นช่วงการเพิ่มความเร็วโดยแทนที่แรงขับเคลื่อนของรถไฟด้วยแรงเบรก อย่างไรก็ตามข้อโต้แย้งที่ควรคำนึงถึง คือ

- ภายใต้สภาวะการณปกติ รถไฟจะไม่ใช้แรงเบรกเต็มกำลัง เจ้าหน้าที่ขับรถจะเบรกรถด้วยแรงเบรกปกติ (Service Brake) โดยเผื่อไว้กรณีที่ต้องทำการเบรกฉุกเฉิน (Emergency Brake)

- เมื่อทำการสร้างตารางเวลาเดินรถ อาจทราบชนิดของหัวรถจักรหรือตัวขับเคลื่อนรถก่อนแล้ว อย่างไรก็ตาม ในขั้นนี้อาจยังไม่ทราบข้อมูลเกี่ยวกับรถทั้งขบวนรวมถึงกำลังเบรก

- ระบบเพื่อความปลอดภัยบางระบบจะคำนวณด้วยค่าแรงเบรกคงที่เป็นส่วน ๆ เช่น ระบบ ETCS มาตรฐานยุโรป หรือระบบ LZB ของเยอรมนี

เมื่อพิจารณาทางเลือกในการใช้แรงเบรกแบบคงที่สำหรับการประมาณระยะเวลาเดินรถ สมการสำหรับความเร่งคงที่เหมือนสูตรฟิสิกส์มัธยมปลาย คือ

$$S = \frac{1}{2} a_b \times t^2 \quad (2.41)$$

ปกติแล้ว ค่าความเร่งคงที่ต่อไปนี้อาจสามารถนำไปใช้ได้ถ้าไม่มีข้อมูลในรายละเอียดอื่นเพิ่มเติม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการคำนวณ หากต้องการตอบสนองความต้องการด้านความปลอดภัย ก็จำเป็นต้องมีข้อมูลในรายละเอียดมากกว่านี้

- $a_b = 0.525 \text{ M/Sec}^2$  สำหรับรถไฟชนิด Sub-Urban (Service Braking)
- $a_b = 0.375 \text{ M/Sec}^2$  สำหรับรถไฟโดยสาร (Service or Comfort Braking)
- $a_b = 0.225 \text{ M/Sec}^2$  สำหรับรถไฟขนส่งสินค้า (Service Braking)
- $a_b = 0.7 \text{ M/Sec}^2$  สำหรับรถไฟชนิด Sub-Urban (Shape Braking)
- $a_b = 0.5 \text{ m/sec}^2$  สำหรับรถไฟโดยสาร (Shape Braking)
- $a_b = 0.3 \text{ m/sec}^2$  สำหรับรถไฟขนส่งสินค้า (Shape Braking)

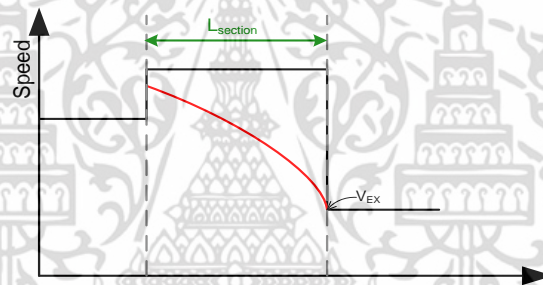
ถ้ารถไฟติดตั้งรถระบบอาณัติสัญญาณเช่น ระบบ LZB ค่า Service Braking จะอยู่ที่ 0.75 เท่าของ Shape Braking

### 2.4.5 การคำนวณระยะเวลาเดินรถไฟ

วัตถุประสงค์เพียงเพื่อต้องการหาระยะเวลาเดินรถที่น้อยที่สุดสำหรับเส้นทางพิจารณา ดังนั้นจึงไม่นำกรณีการปล่อยไหลมาร่วมพิจารณา ในส่วนนี้สมมติให้ความชันและความเร็วสูงสุดมีค่าคงตัว แบ่งเป็นกรณีต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

#### 2.4.5.1 การพิจารณาการเบรก

ขั้นแรกจะต้องเริ่มจากการพิจารณาการเบรกเสียก่อน เพราะเราไม่สามารถเปลี่ยนแปลงความเร็วรถไฟได้อย่างฉับพลัน อนึ่งกำลังเบรกสูงสุดของรถไฟนั้นมีขีดจำกัด นั่นหมายถึงระยะทางเบรกจากความเร็วสูงสุดไปที่ความเร็วที่น้อยกว่าค่าหนึ่งจึงมีค่าจำกัดด้วย โดยการพิจารณาความเร็วเป็นช่วง ๆ ถ้าความเร็วสูงสุดของช่วงถัดไปน้อยกว่าของช่วงที่กำลังพิจารณา ก็ต้องมีการลดความเร็วให้อยู่ในระดับเสียก่อนเมื่อรถไฟเริ่มมาถึงช่วงถัดไปดังกล่าว โดยจะมีการกำหนดความเร็วขาออกสูงสุด ( $V_{EX}$ ) เอาไว้ที่ปลายช่วงที่กำลังพิจารณานั้น ส่วนใหญ่ความเร็วขาออกจะเป็นความเร็วสูงสุดของช่วงถัดไป ดูรูปที่ 2.23

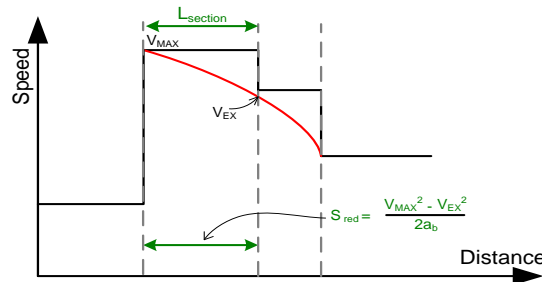


รูปที่ 2.23 Braking Curves ที่เป็นผลมาจากช่วงของการจำกัดความเร็วแบบ A, [10]

แต่ถ้าความเร็วขาออกสูงสุดต่ำกว่าความเร็วสูงสุดของช่วงถัดไป จะต้องมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

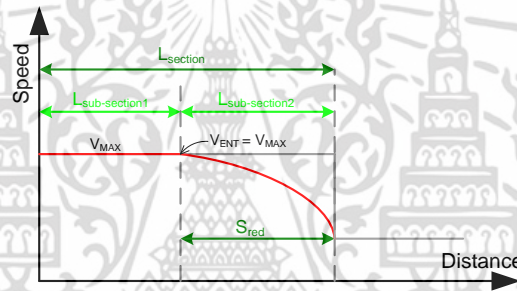
1. อันดับแรก ต้องพิจารณาระยะทางเบรก  $S_{red}$  เพื่อลดความเร็วจากความเร็วสูงสุด  $V_{MAX}$  ของช่วงก่อนหน้าให้เหลือเท่ากับความเร็วขาออก  $V_{EX}$  เมื่อการลดความเร็วแทนด้วย  $a_b$  ระยะทางเบรกจะหาได้ด้วยสมการต่อไปนี้ ดูรูปที่ 2.24

$$S_{red} = \frac{V_{max}^2 - V_{EX}^2}{2a_b} \quad (2.42)$$



รูปที่ 2.24 Braking curves ที่เป็นผลมาจากช่วงของการจำกัดความเร็วแบบ B, [10]

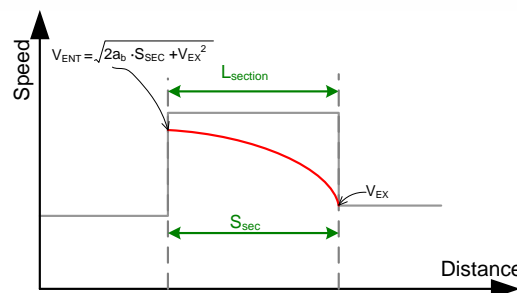
ถ้าระยะทางเบรก  $S_{red}$  น้อยกว่าความยาวของช่วง ช่วงดังกล่าวจะเหมือน ถูกแบ่งออกเป็นสองช่วงย่อย โดยช่วงย่อยแรกเป็นช่วงความเร็วสูงสุดคงที่ ( $V_{MAX}$ ) และช่วงหลังเป็น ช่วงการเบรกซึ่งความเร็วเข้าสูงสุดจากช่วงย่อยแรกไปช่วงย่อยหลัง ( $V_{ENT}$ ) จะยังคงเป็น  $V_{MAX}$  และ ความเร็วขาออกสูงสุด  $V_{EX}$  เป็นความเร็วขาออกสูงสุดของทั้งช่วง ดูรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 Braking Curves ที่เป็นผลมาจากช่วงของการจำกัดความเร็วแบบ C, [10]

2. ถ้าระยะทางเบรก  $S_{red}$  อย่างน้อยเท่ากับความยาวของช่วง จะต้อง พิจารณาความเร็วเข้าสูงสุด  $V_{ENT}$  ของทั้งช่วง ความเร็วสูงสุดที่อนุญาตที่จุดเริ่มต้นของช่วงเพื่อที่จะ สามารถลดความเร็วไปเป็น  $V_{EX}$  ที่จุดสิ้นสุดของช่วงได้เนื่องจากกำลังเบรกของรถไฟนั้นมีค่าจำกัด ถ้า ให้ความยาวของช่วงเป็น  $S_{SEC}$  ความเร็วเข้าสูงสุดจะเป็นดังสมการ ดูรูปที่ 2.26

$$V_{ENT} = \sqrt{2a_b \times (S_{SEC} + V_{EX}^2)} \tag{2.43}$$



รูปที่ 2.26 Braking Curves ที่เป็นผลมาจากช่วงของการจำกัดความเร็วแบบ D, [10]

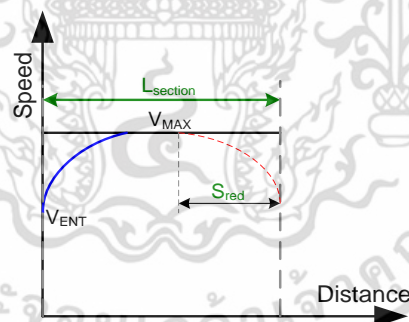
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นโค้งการเบรกและระยะทาง ตลอดจนความเร็วสูงสุด ณ จุดใด ๆ โดยเฉพาะที่ขาเข้า และขาออกของช่วงต่าง ๆ จะสัมพันธ์กำลังเบรกของรถไฟ และการจำกัดความเร็วช่วงต่าง ๆ ประกอบกัน จะพบว่า หากความเร็วสูงสุดของช่วงก่อนหน้ามากกว่าความเร็วขาเข้าสูงสุดของช่วงถัดไปที่กำลังพิจารณา ค่าความเร็วขาเข้าสูงสุดของช่วงที่พิจารณาจะเป็นตัวกำหนด โดยจะกลายเป็นความเร็วขาออกสูงสุดของช่วงก่อนหน้านั้นไป โปรดจำไว้ว่า ชีตจำกัดความเร็วแต่ละช่วงเป็นสิ่งสำคัญในด้านความปลอดภัย เพราะเป็นค่าที่ได้มาจากสภาวะโครงสร้างพื้นฐานจริง เช่น ความโค้งทางชัน ความสมบูรณ์ของราง เป็นต้น ดังนั้น ในการพิจารณาการเบรก ความเร็วขาออก หรือความเร็วเป้าหมายที่ต้องทำให้ได้ ณ ขอบเขตของช่วงเป็นสิ่งสำคัญ ก่อนที่จะก้าวข้ามไปยังอีกช่วงหนึ่งที่มีขีดจำกัดความเร็วไม่เท่ากัน รถไฟอาจไม่สามารถมีความเร็วไปถึงความเร็วสูงสุดของช่วงที่กำลังแล่นอยู่ได้ แต่คงแล่นอยู่ภายใต้กราฟความเร็วที่เหมาะสม ถึงแม้มีกำลังที่จะทำได้ก็ตาม เนื่องจากอาจไม่มีระยะทางเหลือพอเพียง (วัดจากกำลังเบรกที่มีอยู่) ในการที่จะชะลอชะลอความเร็วให้ทันเวลาเพื่อเข้าสู่ช่วงของเส้นทางข้างหน้าด้วยความเร็วที่ปลอดภัย

#### 2.4.5.2 การพิจารณาการเพิ่มความเร็ว

ส่วนนี้จะพิจารณาการเพิ่มความเร็วเมื่อรถไฟแล่นเข้าสู่ช่วงที่พิจารณาด้วยความเร็วขาเข้า  $V_{ENT}$  ความเร็วที่น้อยกว่าความเร็วสูงสุดของช่วง แบ่งเป็น 3 ลักษณะดังนี้

1. ช่วงมีความเร็วสูงสุด  $V_{MAX}$  มากกว่าความเร็วขาเข้า  $V_{ENT}$  และมีระยะทางมากพอในกรณีที่ต้องการเบรกในการเข้าสู่ช่วงถัดไป ดังรูปที่ 2.27

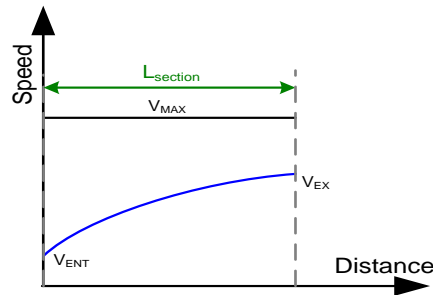


รูปที่ 2.27 Acceleration Phase Type 1, [10]

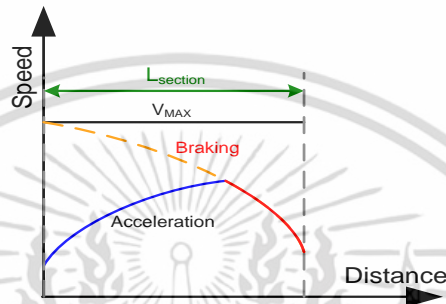
เพราะถ้าระยะทางที่เหลือไม่มากพอที่จะเบรกให้มีความเร็วลดลงเท่ากับความเร็วขาเข้าของช่วงถัดไปได้ทัน รถไฟก็จะไม่สามารถเพิ่มความเร็วขึ้นไปได้สูงสุด ดูตัวอย่างกรณีนี้เพิ่มเติมได้ในรูปที่ 2.27

2. ความเร็วขาเข้า  $V_{ENT}$  มีค่าน้อยกว่าความเร็วขาออก  $V_{EX}$  ของช่วงเดียวกันและมีค่าน้อยกว่าความเร็วสูงสุดของช่วง รถไฟก็จะสามารถเพิ่มความเร็วโดยมีเป้าหมายที่ความเร็วขาออกของช่วงถัดไปนั้นโดยขึ้นอยู่กับสมรรถนะการเร่งของรถไฟ ดังรูปที่ 2.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.28 Acceleration Phase Type 2, [10]



รูปที่ 2.29 Acceleration Phase Type3, [10]

3. ช่วงที่พิจารณาเป็นช่วงการเบรก เส้นโค้งการเบรกจะเป็นตัวบังคับให้ช่วงเพิ่มความเร็วหยุดลง เนื่องจากระบบต้องรับประกันได้ว่า ไม่ว่าในกรณีใด ๆ ก็ตาม รถไฟจะต้องมีความเร็วเท่ากับความเร็วขาเข้าของช่วงถัดไปเมื่อรถเดินทางไปถึงจุดนั้น ดังนั้นเมื่อระยะทางเบรกเหลือไม่พอกับความเร็วสูงสุด ก็ต้องลดความเร็วลง แม้ว่าตัวรถไฟเองจะสามารถเร่งเครื่องขึ้นไปได้ก็ตาม ดังรูปที่ 2.29

#### 2.4.5.3 การคำนวณโดยการจำลองให้รถไฟเป็น Homogeneous Strip

ก่อนหน้านี้ ได้จำลองโดยสมมติให้รถไฟเป็นจุดมวล (Mass Point) และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับระยะทางในรูปสมการไปบ้างแล้ว เพราะขบวนรถไฟนั้นมีความยาวค่าหนึ่ง หากจะสมมติให้รถไฟเป็นรูปแบบแผ่นยาว ๆ เนื้อเดียวกันตลอดทั้งขบวน เหมือนลักษณะของขบวนรถไฟคงไกลเคียงความเป็นจริงมากขึ้นโดยมีน้ำหนักกระจายเท่า ๆ กันตลอดทั้งขบวนด้วย สิ่งต่างจากการสมมติให้รถไฟเป็นจุดมวลคือ การพิจารณาความต้านทานเมื่อรถไฟเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อของเส้นทางระหว่างช่วงสองช่วงที่อยู่ติดกัน โดยมีความชันไม่เท่ากัน เช่น สมมติให้รถไฟนี้ครอบคลุมช่วงความยาวจำนวน  $k$  ช่วง ด้วยระยะของแต่ละช่วงแทนด้วย  $S_1, \dots, S_k$  ความยาวขบวนรถไฟเป็น  $L$  และในช่วงย่อย  $S_i$  ให้มีความชันเป็น  $n_i$  มวลของรถไฟกระจายเท่า ๆ กันตลอดช่วงระยะ  $S_1, \dots, S_k$  โดยระยะทางในช่วงแรกคือ  $S_1$  และช่วงสุดท้ายคือ  $S_k$

ความยาวของส่วนของรถไฟเทียบกับช่วง  $S_1$  แทนด้วย  $L_1$  และ  $L_k$  เป็นความยาวของส่วนของรถไฟเทียบกับช่วง  $S_k$  ดังนั้นความยาวของส่วนของรถไฟใด ๆ คือ  $L_i$  แทนด้วยช่วงความยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใด ๆ คือ  $S_i$  โดยผลรวมของ  $L_1 + \dots + L_k$  จะได้เท่ากับความยาว  $L$  ของทั้งขบวนรถไฟเสมอ ความต้านทานจะเป็นดังสมการที่ (2.44)

$$F_R = F_{RT}(V) + F_{RW}(V) + F_{Rlg} \quad (2.44)$$

โดย  $F_{RT}$ ,  $F_{RW}$ ,  $F_{Rlg}$  = Traction Unit Resistance, Vehicle Resistance & Line Resistance ตามลำดับ (N) และ  $V$  = ความเร็วของรถไฟ (m/sec) และหาความต้านทานเนื่องจากความชันของเส้นทาง ได้ดังสมการที่ (2.45)

$$F_{Rlg} = (g \times m_1 \times n_1) + (g \times m_2 \times n_2) + (g \times m_k \times n_k) \quad (2.45)$$

และ  $m_i$  เป็นมวลของส่วนของขบวนรถไฟที่ครอบคลุมระยะทาง  $S_i$  เพราะว่าเนื่องจากพิจารณารถไฟเป็น Homogeneous strip ดังกล่าว โดย  $i = 1, \dots, k$  จะได้

$$m_i = \frac{m \times L_i}{L} \quad (2.46)$$

หากพิจารณาในแง่ของการเคลื่อนที่ของรถ เมื่อรถไฟเคลื่อนที่ไปด้วยระยะทาง  $S$  เมื่อพิจารณาความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ที่พบว่า  $L_1$  มีค่าน้อยลงในขณะที่  $L_k$  มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในอัตราส่วนที่เหมือนกัน (ทำให้ผลรวมของ  $L_1 + \dots + L_k$  ยังคงเท่ากับ  $L$  เช่นเดิม) จะได้ระยะ  $L_1$  และ  $L_k$  ดังสมการ รูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 การเคลื่อนที่ของรถไฟ, [2]

$$L_1 = S_1 - s \quad (2.47)$$

และ

$$L_k = S_k - s \quad (2.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเขียนสมการของ  $F_{Rlg}$  ได้ใหม่ โดย

$$\begin{aligned}
 F_{Rlg} &= \frac{g \times m}{L} \times [(n_1 \times L_1) + (n_2 \times L_2) + \dots + (n_k \times L_k)] \\
 &= \frac{g \times m}{L} \times [(n_1 \times (S_1 - s)) + (n_2 \times (S_2 - s)) + \dots + (n_k \times (S_k - s))] \\
 &= \frac{g \times m}{L} \times [(n_1 \times S_1) + (n_2 \times S_2) + \dots + (n_k \times S_k)] \times s
 \end{aligned} \tag{2.49}$$

โดยการแทนที่สมการแรงต้านทาน เป็นผลรวมของแรงและมวล จะได้ส่วนของการเพิ่มความเร็ว แสดงด้วยสมการ Differential Equation ต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 m \times f_p \times \frac{dV}{dt} &= F_{Tr}(V) - F_{RW}(V) - F_{Rlg}(S) \\
 m \times f_p \times \frac{dV}{dS} &= \frac{F_{Tr}(V) - F_{RW}(V) - F_{Rlg}(S)}{V}
 \end{aligned} \tag{2.50}$$

แม้การจำลองแบบ Homogeneous Strip จะสะท้อนรูปร่างของรถไฟที่สมจริงกว่า แต่ในส่วนก่อนหน้านี้ ที่กล่าวถึงการจำลองรถไฟเป็นจุดมวล (Mass Point) จะเป็นวิธีที่ง่ายกว่าในการพิจารณาการเคลื่อนที่ได้ในทุก ๆ กรณี ซึ่งก็มีความแม่นยำมากเพียงพอแล้ว

#### 2.4.6 การพิสูจน์สมการเชิงอนุพันธ์โดยวิธีการ Difference Equation

จุดประสงค์ของบทนี้ คือการหาค่าเวลากับความเร็ว และ เวลาที่ระยะทางที่ครอบคลุมช่วงของความเร็วนั้น ๆ ที่ง่าย ๆ คือ  $F_{Tr}$  และ  $F_R$  คือพิจารณาจากฟังก์ชัน  $v$  ในหน่วย  $m/s$

จุดมุ่งหมายคือการกำหนดเวลาและระยะทางในส่วนอัตราเร่งที่ความเร็วเพิ่มขึ้นจากความเร็วเริ่มต้น  $V_0$  จนถึงความเร็วสูงสุด  $V_{max}$  นี้สามารถตรวจสอบโดยการแบ่งช่วงเวลา ( $V_0, V_{max}$ ) ลงในบางตัวเลขของช่วงเวลาย่อยของระยะทางที่มีการกำหนดไว้แล้ว  $\Delta v$  สำหรับแต่ละส่วนย่อย มันถูกกำหนดว่า  $dV/dt$  และ  $dV/dS$  เป็นค่าคงที่ และตั้งเป็นค่าเริ่มต้นสำหรับ  $S_0 = 0$  และ  $t_0 = 0$  และความเร็วเริ่มต้นคือ  $V_0$  แล้วกำหนดให้  $S_1, \dots, S_n$ ,  $t_1, \dots, t_n$  และ  $V_1, \dots, V_n$  ดังต่อไปนี้

1.  $V_i$  เป็น  $V_0 + i \times \Delta V$
2.  $t_{i+1}$  สามารถกำหนดจาก  $t_i$  โดยแปลงจากสมการที่ (2.37) ลงใน difference equation

$$m \times f_p \times \frac{\Delta V}{t_{i+1} - t_i} = F_{Tr}(V_i) - F_R(V_i) \tag{2.51}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แปลงได้เป็น

$$t_{i+1} = \left( \frac{m \times f_p \times \Delta V}{F_{Tr}(V_i) - F_R(V_i)} \right) + t_i \quad (2.52)$$

3.  $S_{i+1}$  ถูกกำหนดจาก  $S_i$  โดยแปลงจากสมการที่ (2.38) ลงใน difference equation

$$m \times f_p \times \frac{\Delta V}{S_{i+1} - S_i} = F_{Tr}(V_i) - F_R(V_i) \quad (2.53)$$

แปลงได้เป็น

$$S_{i+1} = \left( \frac{m \times f_p \times \Delta V}{F_{Tr}(V_i) - F_R(V_i)} \right) + S_i \quad (2.54)$$

สมมติว่า  $V_n$  คือ  $V_{\max}$   $t_n$  คือ เวลาที่ถูกคำนวณแล้ว และ  $S_n$  คือ ระยะทางที่ถูกคำนวณจาก ส่วนของอัตราเร่งจาก  $V_0$  จนถึง  $V_{\max}$

ในกรณีความเร็วสูงสุด จะแบ่งระยะทาง  $S_{\text{sec}}$  ลงในบางตัวเลขของระยะทางที่มีการกำหนดไว้ แล้ว  $\Delta S$  กำหนดให้  $S_1, \dots, S_n$ ,  $t_1, \dots, t_n$  และ  $V_1, \dots, V_n$  เป็นดังต่อไปนี้

1.  $S_i$  เป็น  $V_0 + i \times \Delta S$
2. แทน  $\Delta V$  โดย  $V_{i+1}$  จากสมการที่ (2.53) ได้สมการ  $V_i$

$$V_{i+1} = \left( \frac{(F_{Tr}(V_i) - F_R(V_i)) \times \Delta V}{V_i \times m \times f_p} \right) + V_i \quad (2.55)$$

3. นำสมการ  $t_i$  แทนลงในสมการที่ (2.52)

$$t_{i+1} = \frac{\Delta S}{V_i + t_i} \quad (2.56)$$

สมมติว่า  $S_n = S_{\text{sec}}$  ความเร็วที่ออกมาคือ  $V_n$  และเวลาที่ผ่านในส่วนนี้ คือ  $t_n$

ซึ่งไม่สามารถแสดงได้ชัดเจนในเรื่องของความเร็วสูงสุด ในกรณีดำเนินการในลักษณะเดียวกัน ครั้งแรกเป็นกรณีที่มีความเร็วสูงสุด ถ้า  $S_{i+1}$  ยาวกว่า  $S_{\text{sec}}$  และ  $\Delta S$  ถูกกำหนดให้เท่ากับ  $S_{\text{sec}} - S_i$  และ  $t_{i+1}$  และ  $V_{i+1}$  ถูกคำนวณจากสมการที่ (2.55) และสมการที่ (2.56)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุดท้ายคำนวณในส่วนของการเบรก โดยโค้งเบรกจัดให้เป็นสมการดังต่อไปนี้

$$S = \frac{S_{SEC} - V^2}{2a_b} - \frac{V_{EX}^2}{2a_b} \quad (2.57)$$

กำหนดให้  $S_i$ ,  $V_i$  และ  $t_i$  ในกรณีนี้เป็น  $\Delta S$  ได้รับการแก้ไขจนโค้งเบรกที่ถูกตัด ดังสมการนี้ ... หากความเร็วที่เปลี่ยนจากส่วนของความเร่ง ถึงส่วนของเบรก กำหนดให้จุดตัดของเบรกและเส้นที่เชื่อม  $(S_i, V_i)$  และ  $(S_{i+1}, V_{i+1})$  พิสูจน์ได้ดังสมการที่ (2.58)

$$\frac{S_{SEC} - V^2}{2a_b} - \frac{V_{EX}^2}{2a_b} = \frac{(V - V_i)(S_{i+1} - S_i)}{V_{i+1} - V_i} \quad (2.58)$$

และสำหรับ  $v$

$$V = \frac{-a_b(S_{i+1} - S_i) \pm \sqrt{a_b^2(S_{i+1} - S_i)^2 + V_{EX}^2 + 2a_b S_{SEC} + \frac{2a_b V_i(S_{i+1} - S_i)}{(V_{i+1} - V) - 2a_b S_i}}}{V_{i+1} - V_i} \quad (2.59)$$

โดยค่าของ  $v$  ถูกกำหนดในสมการที่ (2.57)

## บทที่ 3

# การวิเคราะห์และออกแบบระบบ

### 3.1 บทนำ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์เพื่อนำมาใช้หาเวลาการเดินทาง โดยข้อมูลที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ประกอบไปด้วย ข้อมูลเส้นทางรถไฟที่ผู้วิจัยได้เลือกมาเป็นตัวอย่าง ข้อมูลจำเพาะของรถจักรลากเลื่อนที่เดินรถให้บริการจริงในเส้นทางรถไฟดังกล่าว โดยผู้วิจัยจะนำข้อมูลเหล่านี้ไปคำนวณเพื่อหาเวลาในการเดินทางโดยใช้ทฤษฎี การประมาณระยะเวลาเดินทาง (Running Time Estimation) ที่ได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 โดยจะแสดงไว้ในบทผลการทดลอง นอกจากข้อมูลที่ใช้สำหรับการคำนวณแล้ว ในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงข้อมูลการเดินทางจริงที่ใช้อยู่ ณ ปัจจุบันในเส้นทางดังกล่าว และการแสดงการออกแบบซอฟต์แวร์เพื่อใช้ในการจัดตารางเวลาการเดินทาง ซึ่งซอฟต์แวร์ดังกล่าวจะได้ใช้เวลาการเดินทางที่ได้จากการคำนวณ แสดงผลออกมาเป็นตารางเวลาการเดินทาง และนำมาเทียบเคียงกับตารางเวลาการเดินทางจริงในบทสรุปผลการทดลอง

### 3.2 ข้อมูลเส้นทางรถไฟ

เส้นทางรถไฟที่ผู้วิจัยได้เลือกใช้ในการวิเคราะห์เพื่อนำไปใช้คำนวณหาเวลาการเดินทางตามทฤษฎี การประมาณระยะเวลาเดินทาง (Running Time Estimation) ผู้วิจัยได้เลือกเส้นทางรถไฟสายตะวันออกเฉียงเหนือ ของการรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) มาใช้ โดยเส้นทางรถไฟสายตะวันออกเฉียงเหนือมีเส้นทางที่แยกออกจากเส้นทางสายเหนือ ช่วงระหว่างสถานีกรุงเทพ - สถานีสามเสน บริเวณยมราช เลี้ยวผ่านไปยังสถานีมักกะสัน คลองตัน ลาดกระบัง หัวตะเข้ จนถึงสถานีชุมทางฉะเชิงเทรา จากนั้นจะแยกเป็น 2 เส้นทาง โดยเส้นทางแรกจะมุ่งหน้าไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ ผ่านสถานีชุมทางคลองสิบเก้า ปราจีนบุรี กบินทร์บุรี สระแก้ว วัฒนานคร แล้วไปสุดทางที่สถานีรัฐประศาสน์ และเชื่อมต่อกับทางรถไฟของประเทศกัมพูชา (ระยะทางถึงสถานีรัฐประศาสน์ ประมาณ 254.5 กิโลเมตร)

ส่วนเส้นทางที่สองจะมุ่งลงไปทางทิศใต้ ผ่านสถานีชลบุรี บางพระ ชุมทางศรีราชา ชุมทางเขาชีจรรย์ บางละมุง พัทยา วัดญาณสังวราราม สวนนงนุช แล้วสุดสายที่สถานีบ้านพลูดาวหลวง และท่าเรือสัตหีบ โดยที่สถานีชุมทางศรีราชา นั้น มีทางแยกไปยังท่าเรือแหลมฉบัง และที่สถานีชุมทางเขาชีจรรย์ จะมีทางแยกไปยังนิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง

ในส่วนของการวิเคราะห์ข้อมูลเส้นทางรถไฟ ผู้วิจัยได้เลือกใช้เส้นทางเริ่มต้นจากสถานีชุมทางฉะเชิงเทรา (กม.ที่ 61) โดยเป็นเส้นทางสายตะวันออกเฉียงใต้ ผ่านสถานีดอนสีนนท์ (กม.ที่

76) สถานีพานทอง (กม.ที่ 91) สถานีชลบุรี (กม.ที่ 108) ไปจนถึงสถานีบางพระ (กม.ที่ 121) ระยะทาง 60 กิโลเมตร แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนที่เส้นทางรถไฟ (ฉะเชิงเทรา-บางพระ)

โดยจากทฤษฎีการประมาณระยะเวลาเดินทาง (Running Time Estimation) ข้อมูลที่ต้องทราบที่จะนำไปใช้ในการคำนวณในส่วนของเส้นทางรถไฟนั้น จะต้องประกอบไปด้วย ระยะทาง ความเร็วที่ทางรองรับได้สูงสุด ทางลาดชัน ทางโค้ง ดังรายละเอียดตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลเส้นทาง สถานีฉะเชิงเทรา-สถานีบางพระ, [6], [7]

No.	สถานี	ระยะทาง (กม.)	รัศมีโค้ง/ม. (ม.)	ทางลาดชัน ขึ้น(+) ลง(-)	ความเร็วสูงสุด (km/h)
S1	ฉะเชิงเทรา	0			90
N1		11			90
N2		0.7	2000	+0.15%	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลเส้นทาง สถานีฉะเชิงเทรา-สถานีบางพระ (ต่อ), [6], [7]

No.	สถานี	ระยะทาง (กม.)	รัศมีโค้ง/ม. (ม.)	ทางลาดชัน ขึ้น(+) ลง(-)	ความเร็วสูงสุด (km/h)
S2	ดอนสีนนท์	3			90
S3	พานทอง	15			90
N3		1			90
N4		0.82	2000		70
N5		10			90
N6		0.33	2000	+6.30%	70
S4	ชลบุรี	4			90
N7		1			90
N8		1.30		+3.00%	90
N9		0.92		-3.00%	90
N10		3.18		-1.50%	90
N11		0.76	1000	-0.11%	55
N12		1			90
N13		1		-1.00%	90
N14		2			90
N15		0.81		+8.00%	90
S5	บางพระ	1			90

จากตารางที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าการแบ่งช่วงของระยะทางออกเป็นช่วง ๆ เพื่อแบ่งส่วนที่เป็นทางตรง ทางโค้ง ทางลาดชันออกจากกัน เพื่อใช้ค่าที่แสดงในตารางไปคำนวณตามทฤษฎีการประมาณระยะเวลาเดินทาง (Running Time Estimation)

### 3.3 ข้อมูลขบวนรถไฟของการรถไฟแห่งประเทศไทย

จากการพิจารณาเลือกเส้นทางรถไฟของการรถไฟแห่งประเทศไทย เป็นเส้นทางสายตะวันออกเฉียงใต้ ในกระบวนการวิเคราะห์จำเป็นที่จะต้องทราบข้อมูลจำเพาะของขบวนรถไฟด้วย และจากเส้นทางดังกล่าวมีรถโดยสารที่วิ่งให้บริการเป็นส่วนมาก คือ รถจักรดีเซลไฟฟ้า อัลสตอม (ALD.) รุ่นเลขที่ 4301-4309 ของการรถไฟแห่งประเทศไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



<http://www.railway.co.th>

รูปที่ 3.2 หัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า อัลสตอม (ALD.) รุ่นเลขที่ 4301-4309, [4]

ข้อมูลจำเพาะหัวรถจักรดีเซลไฟฟ้า อัลสตอม (ALD.) รุ่นเลขที่ 4301-4309

ชนิดรถจักร :	Diesel Electric Locomotives
แรงม้า :	2,400 HP @ 1,500 rpm.
น้ำหนักรถจักร :	77.50 ตัน (Empty) , 82.50 (In Working Order)
น้ำหนักกดเพลลา :	13.75 ตัน
พิกัดตัวรถ :	กว้าง 2,800 มม. ยาว 16,258 มม. สูง 3,880 มม.
ระบบห้ามล้อ :	Combined Air & Vacuum Brake
ความเร็วสูงสุด :	100 กม./ชม.
บริษัทผู้สร้าง :	Alsthom Atlantique , France

ข้อมูลจำเพาะของหัวรถจักรนี้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการคำนวณเวลาการเดินทางตาม  
ทฤษฎีการประมาณระยะเวลาเดินทาง (Running Time Estimation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 ข้อมูลการเดินทางของการรถไฟแห่งประเทศไทยในสายตะวันออก

ในส่วนของคุณข้อมูลการเดินทางของการรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) ในเส้นทางรถไฟสายตะวันออก ที่ให้บริการเดินรถในปี พ.ศ. 2560 ได้จัดขบวนรถโดยสารเพื่อให้บริการแก่ประชาชนเป็นประเภทขบวนรถธรรมดา ต้นทาง กรุงเทพฯ-บ้านพลูตาหลวง หมายเลขขบวนรถ เลขที่ 283 บ้านพลูตาหลวง-กรุงเทพฯ หมายเลขขบวนรถ เลขที่ 284 ซึ่งเป็นขบวนรถที่ผ่านในจุดที่ผู้วิจัยได้นำมาวิเคราะห์ นั่นคือต้นทาง สถานีชุมทางฉะเชิงเทรา ถึง สถานีบางพระ

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลการเดินทางของการรถไฟแห่งประเทศไทย, [9]

ตั้งแต่สถานีชุมทางฉะเชิงเทรา-สถานีบางพระ

ขบวนรถเลขที่	283	ประเภททาง : กม.
ประเภทขบวนรถ	ธรรมดา	
สถานีต้นทาง - สถานีปลายทาง	ชุมทางฉะเชิงเทรา-บางพระ	60

ตารางที่ 3.3 เวลาการเดินทางของการรถไฟแห่งประเทศไทย, [9]

ตั้งแต่สถานีชุมทางฉะเชิงเทรา-สถานีบางพระ

ลำดับ	สถานีที่หยุด	เวลาถึง	เวลาออก
1	ชุมทางฉะเชิงเทรา	08:56	08:59
2	ดอนสีนนท์	09:15	09:16
3	พานทอง	09:30	09:31
4	ชลบุรี	09:48	09:49
5	บางพระ	09:59	10:00

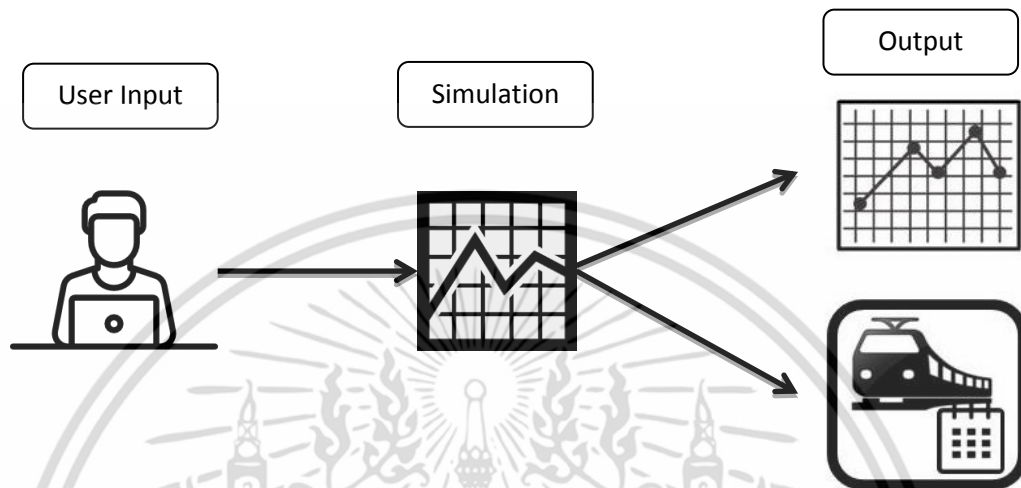
จากตารางเวลาการเดินทางของ รฟท. ที่ให้บริการในปี พ.ศ. 2560 ได้แสดงสถานีที่หยุดจอดเวลาที่ขบวนรถมาถึงและออกสถานี ข้อมูลในส่วนนี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับตารางเวลาการเดินทางที่ได้มาจากการคำนวณด้วยทฤษฎีการประมาณระยะเวลาเดินทาง (Running Time Estimation) ภายหลังจากที่นำค่าตัวเลขที่ได้ไปใช้ในซอฟต์แวร์การจัดตารางเวลาการเดินทางที่ได้ออกแบบขึ้นมา

### 3.5 การออกแบบซอฟต์แวร์จัดตารางเวลาการเดินทาง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงภาพรวมการทำงานของระบบซอฟต์แวร์จัดตารางเวลาการเดินทาง โดยในการวิเคราะห์และออกแบบระบบการจัดตารางเวลาการเดินทางนั้น จะประกอบไปด้วยการรับค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Input จากผู้ใช้งานเพื่อนำเข้าข้อมูลต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับการจัดตารางเวลาการเดินทาง จากนั้นนำข้อมูลไปทำการจำลองการทำงานของตารางเวลาการเดินทาง ซึ่งจะได้ Output ออกมาเป็นไดอะแกรม หรือกราฟของตารางเวลาการเดินทาง และการบันทึกการเก็บค่าหรือข้อมูลต่าง ๆ โดยการวิเคราะห์และออกแบบระบบซอฟต์แวร์จัดตารางเวลาการเดินทางแสดงเป็นภาพรวมการทำงานดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ภาพรวมการทำงานและการออกแบบระบบซอฟต์แวร์จัดตารางเวลาการเดินทาง

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	station 1	[6:00 น.	9:29 น.	12:59 น.	16:29 น.	19:59 น.							
2	station 2	[6:25 น.	9:55 น.	13:25 น.	16:54 น.	20:24 น.							
3	station 3	[6:49 น.	10:19 น.	13:49 น.	17:19 น.	20:48 น.							
4	station 4	[7:28 น.	10:58 น.	14:27 น.	17:57 น.	21:27 น.							
5	station 5	[7:56 น.	11:26 น.	14:56 น.	18:26 น.	21:55 น.							
6	station 5	[8:01 น.	11:31 น.	15:01 น.	18:31 น.	22:00 น.							
7	station 4	[8:20 น.	11:50 น.	15:20 น.	18:49 น.	22:19 น.							
8	station 3	[8:49 น.	12:19 น.	15:49 น.	19:18 น.	22:48 น.							
9	station 2	[9:04 น.	12:33 น.	16:03 น.	19:33 น.	23:03 น.							
10	station 1	[9:19 น.	12:49 น.	16:19 น.	19:49 น.	23:19 น.							
11													
12													
13													
14													
15													

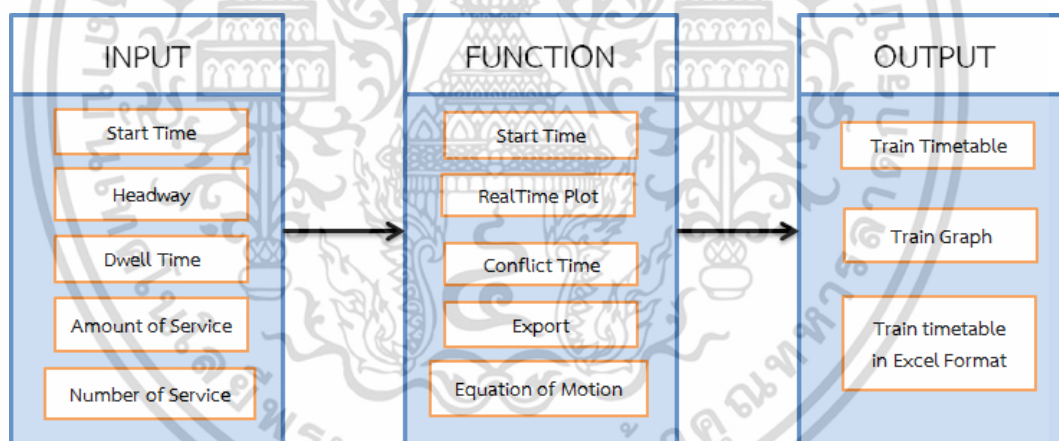
รูปที่ 3.4 ตารางเก็บข้อมูลการเดินทาง

การนำเข้าข้อมูลต่าง ๆ เพื่อใช้สำหรับจัดตารางเวลาการเดินทาง ประกอบด้วยประเภทหัวรถจักรที่ใช้งาน เวลาเริ่มต้น จำนวนขบวนรถไฟ จำนวนรอบที่ต้องการให้รถวิ่ง ช่วงระยะเวลาห่างระหว่างขบวน และเวลาที่ทำการจอดในสถานี โดยจะมีการนำข้อมูลจากที่ผู้ใช้ได้ใส่ค่าต่าง ๆ เข้ามาไปผ่านการคำนวณแล้วทำการจำลองการจัดตารางเวลาการเดินทางเพื่อให้ Output ออกมาเป็น กราฟเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางเวลาการเดินรถ (Train graph) และ ตารางเวลาการเดินรถในรูปแบบของตารางแสดงข้อมูล (DataGridView) และสามารถนำข้อมูลออกมาแสดงในรูปแบบของไฟล์ .xls (Microsoft excel) ดังแสดงในรูปที่ 3.4

### 3.5.1 การออกแบบระบบการจัดตารางเวลาการเดินรถ

ระบบการจัดตารางเวลาการเดินรถนั้น ประกอบไปด้วยการรับข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางเวลาการเดินรถ เข้ามาในระบบและนำข้อมูลเหล่านั้นไปทำการประมวลผลและทำการวาดกราฟตารางเวลาการเดินรถระหว่างสถานี และเวลา เพื่อที่จะให้ทราบถึงภาพรวมของการเดินรถทั้งหมดในเส้นทางที่กำหนด และเพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ของตารางเวลาการเดินรถจากทรัพยากรต่าง ๆ ที่มีอยู่ เช่น จำนวนขบวนรถ จำนวนเส้นทาง จำนวนสถานีที่จอด เป็นต้น รวมถึงเพื่อกำหนดค่าเฮดเวย์ (Headway) ที่น้อยที่สุดที่เป็นไปได้ และป้องกันการเดินรถไฟที่ขัดแย้งกัน ก่อนนำตารางการเดินรถไฟที่ได้นี้ไปบริหารจัดการขบวนรถไฟ (EMU Utilization) แล้วจึงทำการจำลองการเดินรถไฟหรือใช้เดินรถไฟจริง เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพตารางเวลาการเดินรถ และความคลาดเคลื่อน (Delay) ที่เกิดขึ้น สำหรับภาพรวมการทำงานของระบบการจัดตารางเวลาการเดินรถ จะแสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การทำงานของระบบการจัดตารางเวลาการเดินรถ

ข้อมูลนำเข้า (Input) ของระบบการจัดตารางเวลาการเดินรถไฟ ประกอบไปด้วย

1. เวลาที่เริ่มให้บริการ (Start Time) คือเวลาที่ต้องการให้รถไฟขบวนแรก รอบแรกเริ่มการให้บริการ
2. เวลาระหว่างขบวนรถ (Headway Time) ซึ่งเป็นเวลาที่กำหนดขึ้นโดยมาจากแผนการเดินรถหรือกำหนดขึ้นเอง หลังจากการจัดตารางการเดินรถเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะสามารถหาเฮดเวย์ที่สั้นที่สุดที่สามารถทำได้จากการจัดตารางการเดินรถเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เวลาที่จอดอยู่ที่สถานี (Station dwell Time)
4. จำนวนขบวนรถไฟที่ให้บริการ (Amount of service) คือจำนวนของขบวนรถไฟที่ผู้ใช้งานต้องการให้บริการ
5. จำนวนรอบรถไฟที่ให้บริการ (Number of service) คือจำนวนรอบของรถไฟที่ผู้ใช้งานต้องการให้บริการ

### 3.5.2 การทำงานและฟังก์ชันของระบบ

ระบบการจัดตารางการเดินรถจะมีฟังก์ชันและการทำงานได้แก่

- สามารถจัดตารางการเดินรถได้โดยมีการนำเข้าสู่ข้อมูลผ่านอินเทอร์เน็ตเฟสผู้ใช้งาน
- แสดงผลในรูปแบบของกราฟระหว่างสถานีและเวลาได้
- กราฟแต่ละเส้นจะไม่สามารถซ้อนทับกันได้ จะมีการแจ้งเตือนหากเกิดการซ้อนทับกันของกราฟ
- มีหมายเลขเวลา (Timestamp) บอกเวลาที่กราฟ รวมถึงบอกได้ว่าอยู่ในสถานีใด
- สามารถทำการขยายเข้า-ออก (Zoom in-out) เพื่อดูรายละเอียดของกราฟได้
- สามารถนำตารางการเดินรถออกมาในรูปแบบต่าง ๆ ได้ เช่น การนำออกเป็นไฟล์ .xls (Microsoft excel) เป็นต้น

### 3.5.3 การออกแบบยูสเคส (Use Case)

การออกแบบ Use case นั้นจะแบ่งผู้ใช้งานเป็นผู้ดูแลระบบ (Administrator) และผู้ใช้งาน (User) โดยภาพรวมของยูสเคสนั้นจะแสดงดังรูปที่ 3.6

#### 3.5.3.1 ส่วนที่เข้าถึงได้เฉพาะผู้ดูแลระบบ

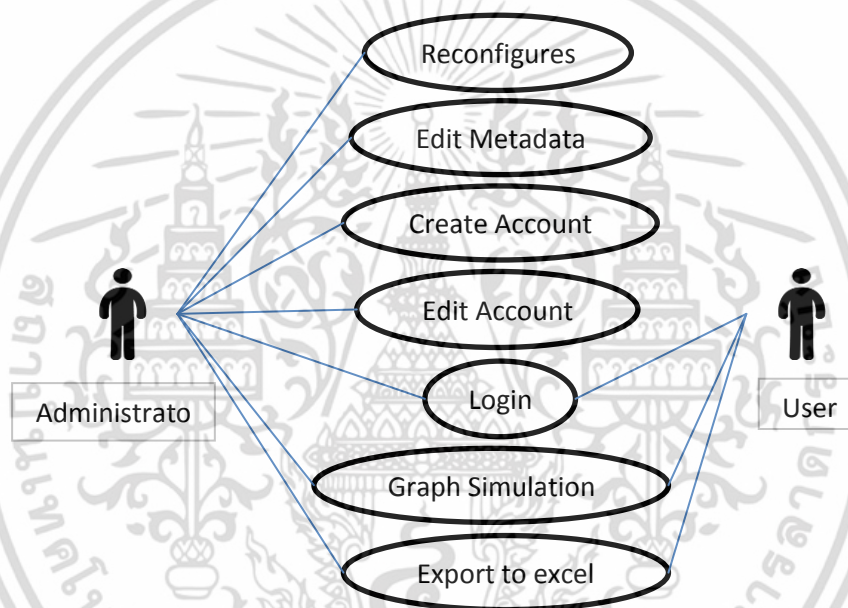
- ส่วนที่เข้าถึงได้เฉพาะผู้ดูแลระบบจะมีฟังก์ชันในการทำงาน 4 ฟังก์ชัน ได้แก่
1. ฟังก์ชันปรับปรุงระบบ เป็นส่วนที่ผู้ดูแลระบบต้องคอยปรับปรุงและแก้ข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบให้ระบบสามารถใช้งานได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ
  2. ฟังก์ชันแก้ไขข้อมูล (Metadata) เป็นส่วนที่ผู้ดูแลระบบสามารถแก้ไขข้อมูล Metadata หรือข้อมูลพื้นฐาน เพื่อให้การคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ นั้นเกิดการเปลี่ยนแปลง
  3. ฟังก์ชันสร้างบัญชี เป็นส่วนที่ผู้ดูแลระบบนั้นสามารถเพิ่มข้อมูลผู้ใช้ให้สามารถเข้าใช้งานระบบได้
  4. ฟังก์ชันแก้ไขบัญชี เป็นส่วนที่ผู้ดูแลระบบนั้นสามารถแก้ไขหรือปรับปรุงข้อมูลผู้ใช้งานระบบได้

#### 3.5.3.2 ส่วนที่เข้าถึงได้ทั้งผู้ดูแลระบบและผู้ใช้งาน

ส่วนที่เข้าถึงได้ทั้งผู้ดูแลระบบและผู้ใช้งานจะมีฟังก์ชันการทำงาน 4 ฟังก์ชัน ได้แก่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ฟังก์ชันเข้าสู่ระบบ เป็นส่วนที่ผู้ใช้งานต้องระบุชื่อผู้ใช้งานและพาสเวิร์ดให้ถูกต้องเพื่อเข้าสู่ระบบ
2. ฟังก์ชันการจัดการตารางการเดินรถ (Scheduling Train Timetable) เป็นส่วนที่ผู้ใช้งานสามารถกรอกข้อมูลที่ต้องการเข้าสู่โปรแกรมเพื่อทำการจัดการตารางการเดินรถ
3. ฟังก์ชันจำลองกราฟ (Graph Simulation) เป็นส่วนที่จะนำข้อมูลที่ผู้ใช้งานได้ทำการกรอกและแก้ไขสำเร็จแล้วมาจำลองให้เป็นกราฟได้
4. ฟังก์ชันนำออกตารางการเดินรถ (Export Timetable) เป็นส่วนที่สามารถนำตารางการเดินรถภายในโปรแกรมนำส่งออกมาเป็นไฟล์ .xls (Microsoft Excel) เพื่อนำมาพิมพ์หรือนำไปใช้งานต่อได้อย่างสะดวก



รูปที่ 3.6 Use Case Diagram สำหรับการทำงานของระบบจัดตารางการเดินรถ

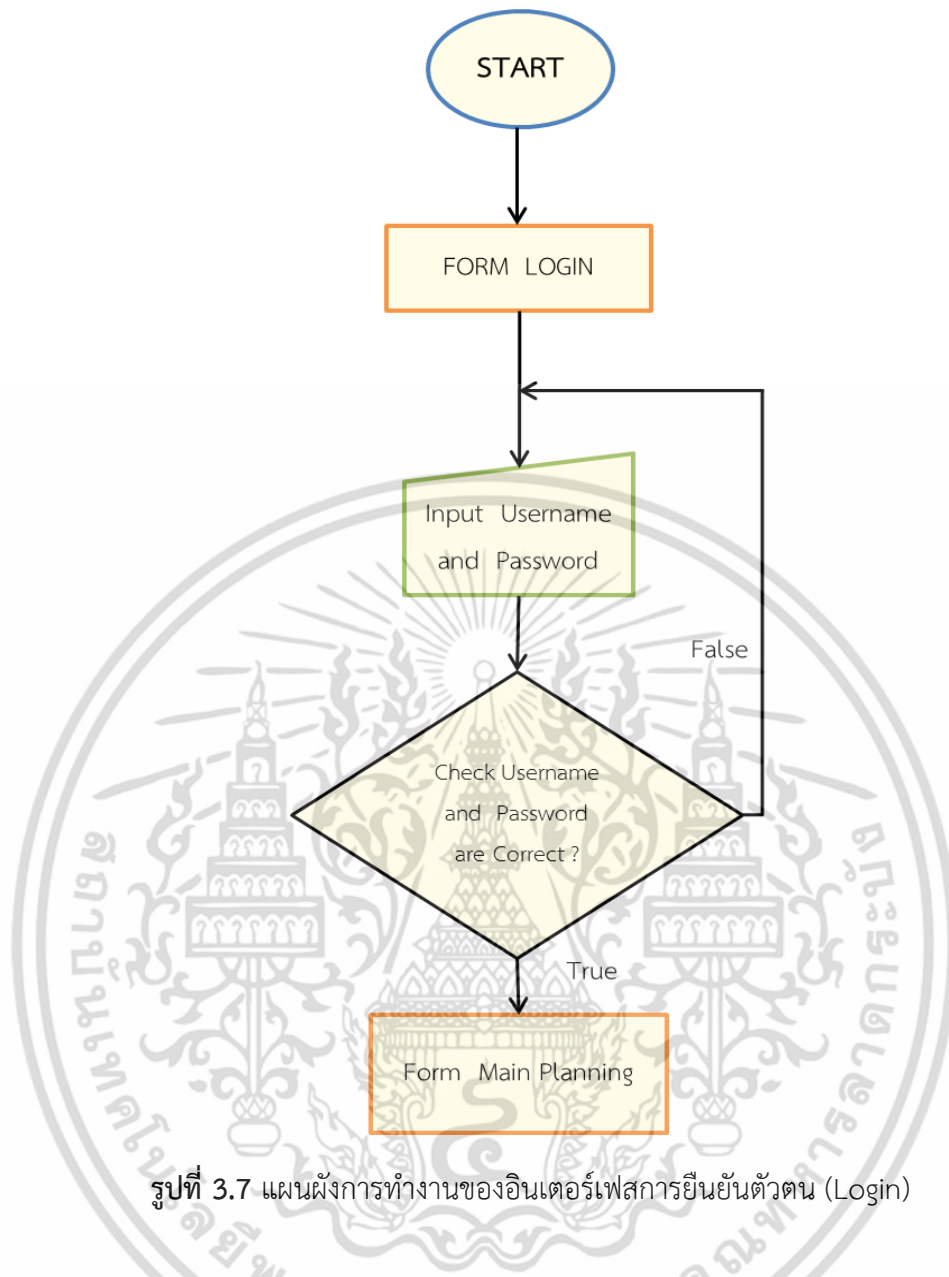
### 3.5.4 การออกแบบอินเทอร์เฟซผู้ใช้งานและการทำงานของระบบ

อินเทอร์เฟซผู้ใช้งานของระบบจัดตารางการเดินรถจะประกอบไปด้วยส่วน อินเทอร์เฟซการยืนยันตัวตน (Login) อินเทอร์เฟซผู้ใช้งานหลัก (Main Planning) และอินเทอร์เฟซการแสดงผลกราฟ (Graph Display)

#### 3.5.4.1 การออกแบบอินเทอร์เฟซการยืนยันตัวตน (Login Interface)

การทำงานของระบบจะเริ่มต้นที่ให้ผู้ใช้งานทำการยืนยันตัวตนหรือ Login ใช้งาน ระบบจะทำการตรวจสอบว่าสามารถเข้าใช้งานได้หรือไม่ โดยจะตรวจสอบกับข้อมูลในฐานข้อมูลที่เก็บข้อมูล Username และ Password ของผู้ใช้งานไว้โดยถ้าข้อมูลถูกต้องก็จะเข้าสู่หน้าอินเทอร์เฟซผู้ใช้งานหลัก (Main Planning) แต่ถ้าข้อมูลไม่ถูกต้องก็จะให้ทำการใส่ข้อมูลใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 แผนผังการทำงานของอินเทอร์เน็ตเพสการยืนยันตัวตน (Login)

#### 3.5.4.2 การออกแบบการทำงานของอินเทอร์เน็ตเพสผู้ใช้งานหลัก (Main Planning Interface)

อินเทอร์เน็ตเพสผู้ใช้งานหลักเป็นหน้าอินเทอร์เน็ตเพสหลักของโปรแกรม ซึ่งมีการแสดงภาพของสถานีที่ได้จำลองขึ้นมา อีกส่วนหนึ่งจะเป็นเครื่องมือสำหรับให้ผู้ใช้ทำการกรอกข้อมูลโดยมีการเลือกชนิดของหัวรถจักรที่ต้องการและมีข้อมูลที่ต้องนำเขาคือ

1. เวลาเริ่มต้นในการเดินรถ (Start Time)
2. ระยะเวลาห่างระหว่างขบวนรถ (Headway)
3. ระยะเวลาที่จอดภายในสถานี (Dwell Time)
4. จำนวนขบวนรถไฟที่ให้บริการ (Number of service)
5. จำนวนรอบรถไฟที่ให้บริการ (Amount of service)

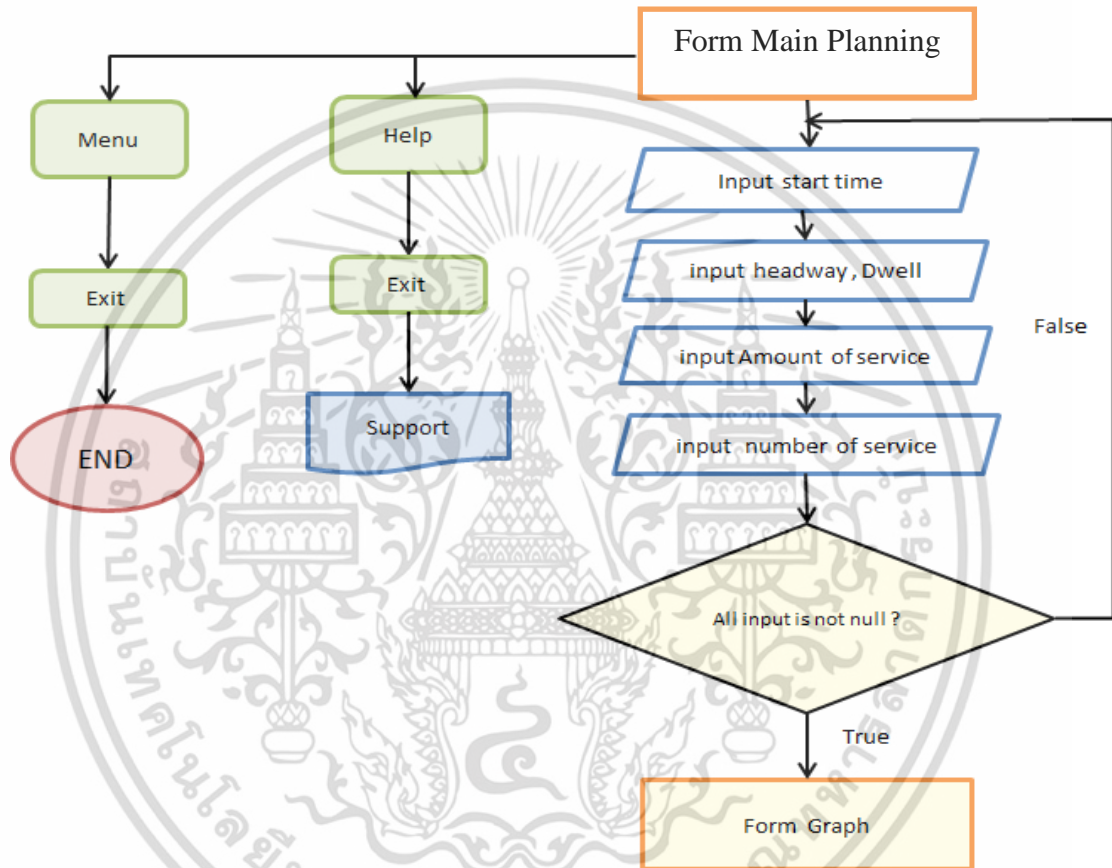
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.4.3 ส่วนเสริมหรือเมนูที่ช่วยในการทำงาน

ในส่วนเสริมก็จะมี Menu bar มีทั้งหมด 2 รายการ ได้แก่

- Menu เมื่อกดก็จะมีให้ปุ่ม Exit เมื่อกดก็จะทำการออกจากโปรแกรม
- Help เมื่อกดก็จะมีให้ปุ่ม Support เมื่อกดก็จะเป็นหน้าต่างบอกถึงการ

ติดต่อผู้จัดทำเพื่อว่าถ้าผู้ใช้สงสัยหรือโปรแกรมมีปัญหาจะได้ติดต่อผู้จัดทำได้โดย Flowchart การทำงานของหน้า Main Planning แสดงได้ดังรูปที่ 3.8

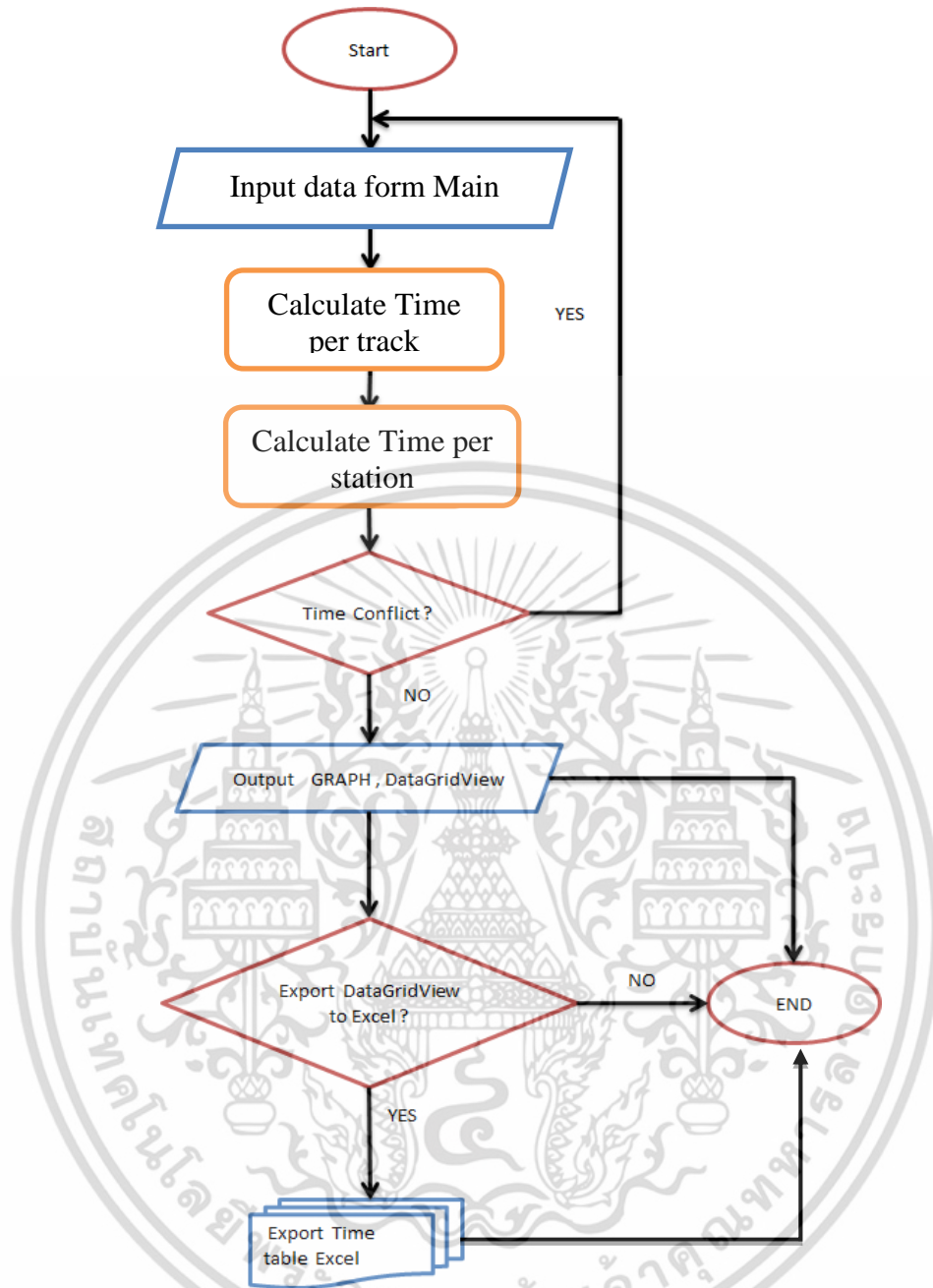


รูปที่ 3.8 แผนผังการทำงานของหน้า Main Planning

### 3.5.4.4 การออกแบบอินเตอร์เฟซการแสดงผลกราฟ (Graph Display Interface)

การออกแบบอินเตอร์เฟซการแสดงผลกราฟจะมีการแสดงข้อมูลการเดินทางไฟและให้ผู้ใช้งานทราบว่าข้อมูลที่ได้นำเข้าไปนั้นแต่ละสถานีมีรถไฟเดินทางมาถึงสถานีนั้นเป็นเวลากี่นาฬิกาบ้าง โดยจะนำข้อมูลมาแสดงผ่านเครื่องมือที่มีชื่อว่า Datagridview และยังสามารถแสดงผลกราฟและนำข้อมูลในฐานข้อมูล Export ออกมาเป็นไฟล์ .xls (Microsoft Excel) โดยแผนผังการทำงาน (Flowchart) ของการออกแบบอินเตอร์เฟซการแสดงผลกราฟแสดงดังรูปที่ 3.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แผนผังการทำงานของการทำงานของการออกแบบอินเตอร์เฟซแสดงกราฟ

### 3.5.5 การออกแบบฐานข้อมูล

สำหรับการออกแบบฐานข้อมูลจะรับข้อมูลจากที่ผู้ใช้งานใส่ข้อมูลมาจากระบบโดยข้อมูลทั้งหมดจะถูกบันทึกเก็บไว้ลงในฐานข้อมูลดังตารางที่ 3.4, 3.5 และ 3.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลสำหรับเข้าสู่ระบบ (User)

Name	Type	Key	Meaning	Example
Username	TEXT		ชื่อสำหรับเข้าสู่ระบบ	admin
Password	TEXT		รหัสผ่านสำหรับเข้าสู่ระบบ	123456

ตารางที่ 3.5 ข้อมูลการจัดตารางการเดินรถ (TrainID)

Name	Type	Key	Meaning	Example
TrainID	INT	Primary Key	หมายเลขประจำรถไฟซึ่งรถไฟแต่ละคันจะมีหมายเลขแตกต่างกัน	1098
TrainNumber	TEXT		หมายเลขขบวนรถไฟซึ่งรถไฟแต่ละรอบจะมีหมายเลขแตกต่างกัน	2537B
Station	TEXT		สถานีต้นทาง	Bangkok (BKK)
Destination	TEXT		สถานีปลายทาง	Saraburi (SRB)
Arrival_Time	TEXT		เวลาของรถไฟที่จะเข้าสถานี	06:00
Depart_Time	TEXT		คือเวลาของรถไฟที่จะออกจากสถานี	06:02
Dwell_Time	TEXT		เวลาของรถไฟช่วงที่อยู่ในสถานี	00:02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 ข้อมูลการจัดตารางการเดินรถ (Trainid) (ต่อ)

Name	Type	Key	Meaning	Example
Depart_Line	TEXT		แสดงทิศทางการวิ่งของรถไฟว่า Up (ขาขึ้น) คือรถไฟเดินทางออกจากสถานีกรุงเทพ, Down (ขาล่อง) คือรถไฟเดินทางเข้ากรุงเทพ	UP, DOWN
IndexArr	TEXT		ตำแหน่งของสถานีต้นทาง	0
IndexDes	TEXT		ตำแหน่งของสถานีปลายทาง	12
Arr_Min	TEXT		ค่าที่ใช้ในการพลอตกราฟ	2
Dpt_Min	TEXT		ค่าที่ใช้ในการพลอตกราฟ	10

ตารางที่ 3.6 ข้อมูลสำหรับรางรถไฟ (Track)

Name	Type	Key	Meaning	Example
Tracknum	INT	Primary key	หมายเลขชื่อของ Track นั้น ๆ	1, 2, 3
Station	TEXT		สถานีต้นทาง	Station A
Destination	TEXT		สถานีปลายทาง	Station B
Order	TEXT		เรียงลำดับ Track	1, 2, 3
length	TEXT		ความยาว Track	500, 600
slope	double		ความชันของรางรถไฟ	0.15, 0.01
curve	double		รัศมีความโค้งของรางรถไฟ	400, 600, 700

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 บทนำ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดผลการคำนวณหาแรงขับเคลื่อนขบวนรถ และการคำนวณหาเวลาในการเดินรถโดยใช้ทฤษฎีการประมาณระยะเวลาเดินรถ (Running Time Estimation) จากข้อมูลในบทที่ 3 จากนั้นจะแสดงการนำค่าที่คำนวณได้ไปใช้ในซอฟต์แวร์การจัดตารางเวลาการเดินรถ เพื่อจำลองตารางเวลาการเดินรถ ในเส้นทางรถไฟสายตะวันออกของการรถไฟแห่งประเทศไทย ช่วงสถานีชุมทางฉะเชิงเทรา ถึง สถานีบางพระ

#### 4.2 การคำนวณแรงที่เกี่ยวข้องในการเคลื่อนที่ของรถไฟ

การคำนวณหาแรงที่เกี่ยวข้องในการเคลื่อนที่ของรถไฟ เพื่อนำค่าที่ได้ไปใช้ในการคำนวณเวลาการเดินรถในทฤษฎีการประมาณระยะเวลาเดินรถ (Running Time Estimation) โดยเริ่มต้นจากการคำนวณอัตราความเร่งของขบวนรถที่จะเป็นในรูปแบบสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equation) จะเป็นสมการผลรวมของแรงทั้งหมดที่เกี่ยวข้องในการเคลื่อนที่ของรถไฟ ได้แก่สมการที่ (4.1)

$$F_{Tr}(V) - F_R(V) = f_p \times m \times \frac{dV}{dt} \quad (4.1)$$

โดย

$F_{Tr}(V)$  คือ แรงขับเคลื่อนขบวนรถ มีหน่วยเป็น N

$F_R(V)$  คือ แรงต้านทานที่เกิดจากลักษณะเฉพาะของขบวนรถไฟและเส้นทาง มีหน่วยเป็น N

$f_p$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์มวลสำหรับแต่ละส่วนของขบวนรถ แทนค่าที่ 1.09 สำหรับขบวนรถตู้โดยสาร

$m$  คือ มวลของขบวนรถไฟ มีหน่วยเป็น kg

$v$  คือ ความเร็ว มีหน่วยเป็น m/s

$t$  คือ เวลา มีหน่วยเป็น sec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1 การหาแรงขับเคลื่อนขบวนรถ $F_{Tr}(V)$

แรงขับเคลื่อนขบวนรถ  $F_{Tr}(V)$  สามารถรวมกันได้ในรูปแบบของสมการพาราโบลา โดยขึ้นอยู่กับความเร็วกับการแปลงรูปแบบทวินาม (Binomial Transformation) ดังสมการที่ (4.2)

$$F_{Tr}(V) = C_0 + (C_1 \times V) + (C_2 \times V^2) \quad (4.2)$$

การหาค่าแรงขับเคลื่อนขบวนรถ  $F_{Tr}(V)$  ต้องอาศัยข้อมูลลักษณะเฉพาะของขบวนรถไฟ โดยเทียบกับความเร็วที่กำหนดให้รถไฟวิ่งสำหรับใช้ในสมการที่ (4.2) ให้ใช้ข้อมูลตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลลักษณะเฉพาะของขบวนรถไฟ, [10]

Speed interval in m/s	$C_{0,k}$	$C_{1,k}$	$C_{2,k}$
8.333 – 16.667	132470.2	-7778.7	155.58
16.667 – 22.167	105595.9	-5422.9	84.32
22.167 – 27.500	20089.1	1087.0	-260.38

จากข้อมูลพิกัดทางในเส้นทางรถไฟสายตะวันออกของการรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) ที่ได้กำหนดไว้ คือ ความเร็วสูงสุด  $V_{Max}$  ในเส้นทางตรงเท่ากับ 90 km/h ความเร็วสูงสุด  $V_{Max}$  ในเส้นทางโค้งรัศมี 2000 เมตร เท่ากับ 70 km/h และความเร็วสูงสุด  $V_{Max}$  ในเส้นทางโค้งรัศมี 1000 เมตร เท่ากับ 55 km/h

การคำนวณจะต้องนำค่าความเร็วสูงสุดนี้แปลงหน่วยจาก km/h เป็น m/s เสียก่อน โดย 1 km/h = 1/3.6 m/s เพราะฉะนั้น 1 m/s = 3.6 km/h

โดยที่ 90 km/h = 25 m/s , 70 km/h = 19.4 m/s และ 55 km/h = 15.2 m/s

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่า ช่วงความเร็วที่ต้องนำมาใช้มีอยู่ 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 8.333–15.2 m/s ช่วงที่ 2 16.667–19.4 m/s และช่วงที่ 3 22.167–25 m/s

เมื่อนำข้อมูลในตารางที่ 4.1 แทนค่าในสมการที่ (4.2) จะได้

ที่ความเร็วสูงสุด  $V_{Max}$  เท่ากับ 90 km/h = 25 m/s

$$F_{Tr}(25) = 20089.1 + (1087.0 \times V) - (260.38 \times V^2)$$

ที่ความเร็วสูงสุด  $V_{Max}$  เท่ากับ 70 km/h = 19.4 m/s

$$F_{Tr}(19.4) = 105595.9 - (5422.9 \times V) + (84.32 \times V^2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ความเร็วสูงสุด  $V_{Max}$  เท่ากับ  $55 \text{ km/h} = 15.2 \text{ m/s}$

$$F_{Tr}(15.2) = 132470.2 - (7778.7 \times V) + (155.58 \times V^2)$$

#### 4.2.2 การหาแรงต้านทานที่เกิดจากลักษณะเฉพาะของขบวนรถไฟและเส้นทาง

แรงต้านทานที่เกิดจากลักษณะเฉพาะของขบวนรถไฟและเส้นทาง  $F_R(V)$  เป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่ใช้พิจารณาการเคลื่อนที่ หรืออีกอย่างหนึ่งก็คือความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ (Resistance to Motion) บ้างก็เรียกว่า Aerodynamic Resistance ( $F_R$ ) หรือ Rolling Resistance แสดงดังสมการที่ (4.3)

$$F_R(V) = F_{Rt} + F_{Rw} + F_{Rl} \quad (4.3)$$

โดยแรงต้านทานของรถไฟ  $F_R(V)$  ประกอบด้วยแรง 3 แรง ดังนี้

##### 1. Traction Unit Resistance, $F_{Rt}$

สำหรับ Traction Unit รวมถึง Multiple Units ความต้านทานโดยปกติอธิบายด้วยตัวแปรที่กำหนด  $a_0, a_1, a_2, a_{2r}$  ดังสมการที่ (4.4)

$$F_{Rt}(V) = [g \times m_T \times (a_0 + (a_1 \times V))] + (a_2 \times V^2) + (a_{2r} \times V_r^2) \quad (4.4)$$

โดย

$m_T$  = มวลของ Traction Unit (kg)

$V$  = ความเร็วของรถไฟ (m/sec)

$V_r$  = ความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างอากาศกับรถไฟ ปกติจะใช้ค่าประมาณ  $V+4.17 \text{ m/s}$  ที่ความเร็ว Headwind 15 กม./ชม.

##### 2. Vehicle Resistance Passenger Trains, $F_{Rw}$

สำหรับ Passenger Trains ตัวแปรของสมการ Vehicle Resistances อธิบายด้วยสมการของ Sauthoff เป็นตัวอย่างในการประมาณค่า ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรถและความต้านทานรถโดยสาร  $F_{Rwp}$  โดยการพิจารณาจากทฤษฎีและการทดลอง ดังนี้

$$F_{Rwp}(V) = [1000 \times m_w \times g \times (1.9 + (C_b \times 3.6V))] + [0.0471 \times (n_w + 2.7) \times A_f] + 0.0471 \times (n_w + 2.7) + (a_{2r} \times V^2) \quad (4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย

$m_w$  = มวลของ Vehicle (kg)

$V$  = ความเร็วของรถไฟ (m/sec)

$C_b$  = ขึ้นกับจำนวนของเพลลา (Axles) ถ้าเป็นรถแบบ 4 เพลลา = 0.0025, ถ้าเป็นรถแบบ 3 เพลลา = 0.004, ถ้าเป็นรถแบบ 2 เพลลา = 0.007

$n_w$  = จำนวนของรถ (Vehicle) ที่นำมาพ่วงกัน

$A_f$  = พื้นที่หน้าตัดของรถไฟ ปกติใช้ค่าประมาณ  $1.45 \text{ m}^2$

### 3. Line Resistances, $F_{RL}$

รายละเอียดปัจจัยสำคัญที่ส่งผล นั่นคือความชันของเส้นทาง (Gradient) และความโค้ง โดยแรงที่เกิดจากน้ำหนักบนทางชันที่ทำมุม  $\theta$  แสดงดังสมการที่ (4.6)

$$F_{RLg} = m_{st} \times g \times \sin \theta \quad (4.6)$$

โดย

$F_{RLg}$  = แรงที่รถไฟกระทำบนทางชัน (KN)

$m_{st}$  = มวลสถิติของขบวนรถ (Ton)

$g$  = ความเร่งจากแรงโน้มถ่วง ( $\text{m/sec}^2$ ) เท่ากับ  $9.81 \text{ m/s}^2$

หรือถ้าข้อมูลเส้นทางให้ค่า Gradient มาเป็น % คำนี้นจะมีค่าเท่ากับ  $F_{RLg}$  โดยมีหน่วยเป็น kg/ton

และอีกหนึ่งแรงที่เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผล นั่นคือแรงที่เกิดจากรถไฟวิ่งผ่านทางโค้ง แสดงดังสมการที่ (4.7)

$$F_{RLc} = \frac{m_{st} \times g \times 700}{r} \quad (4.7)$$

โดย

$F_{RLc}$  = แรงที่รถไฟกระทำบนทางโค้ง (KN)

$m_{st}$  = มวลสถิติของขบวนรถ (Ton)

$g$  = ความเร่งจากแรงโน้มถ่วง ( $\text{m/sec}^2$ ) เท่ากับ  $9.81 \text{ m/s}^2$

$r$  = รัศมีความโค้ง (m)

โดยการคำนวณหา Line Resistances,  $F_{RL}$  จำเป็นที่ต้องทราบข้อมูลลักษณะเส้นทางรถไฟเสียก่อน โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะยกข้อมูลเส้นทางรถไฟสายตะวันออกของการรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) ตั้งแต่สถานีชุมทางฉะเชิงเทราถึงสถานีบางพระ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ในบทที่ 3 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยผู้วิจัยจะนำมาแสดงมารวมกับค่า  $F_{RL}$  ที่คำนวณได้จากสมการที่ (4.6) ในกรณีที่เป็นทางลาดชัน และจากสมการที่ (4.7) ในกรณีที่เป็นทางโค้ง โดยมวลสถิตของขบวนรถ  $m_{st}$  ที่ได้จากข้อมูลจำเพาะของรถจักรดีเซลไฟฟ้า อัลสตอม (ALD.) มีค่าเท่ากับ 82.5 ตัน และค่าสัมประสิทธิ์แรงดึงดูด ( $g$ ) มีค่าเท่ากับ  $9.81 \text{ m/s}^2$  ดังแสดงผลลัพธ์ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.2 ค่า  $F_{RL}$  ที่รวมเข้ากับข้อมูลเส้นทางรถไฟสายตะวันออก

No.	สถานี	ระยะทาง (กม.)	รัศมีโค้ง/ม. (ม.)	ทางลาดชัน ขึ้น(+) ลง(-)	$F_{RL}$ (N)
S1	ฉะเชิงเทรา	0			0
N1		11			0
N2		0.7	2000	+0.15%	283.413
S2	ดอนสีนนท์	3			0
S3	พานทอง	15			0
N3		1			0
N4		0.82	2000		283.263
N5		10			0
N6		0.33	2000	+6.30%	289.563
S4	ชลบุรี	4			0
N7		1			0
N8		1.30		+3.00%	3
N9		0.92		-3.00%	-3
N10		3.18		-1.50%	-1.5
N11		0.76	1000	-0.11%	566.42
N12		1			0
N13		1		-1.00%	-1
N14		2			0
N15		0.81		+8.00%	8
S5	บางพระ	1			0

แรงต้านทานที่เกิดจากลักษณะเฉพาะของขบวนรถไฟและเส้นทาง  $F_R (V)$  ในขบวนรถ โดยสารที่วิ่งในทางตรง และไม่มีทางลาดชัน ได้ประมาณค่าไว้ดังสมการที่ (4.8), [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$F_R(V) = 1580.7644 + 37.0754568V + 0.385208V^2 \quad (4.8)$$

และเมื่อนำ  $F_R$  จากสมการที่ (4.8) รวมเข้ากับค่า  $F_{Ri}$  จะได้ค่า  $F_R$  ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าแรงต้านทาน  $F_R(V)$

No.	สถานี	$F_{Ri}$ (kg/ton)	$F_R$ (N)
S1	ฉะเชิงเทรา	0	$1580.7644 + 37.0754568V + 0.385208V^2$
N1		0	$1580.7644 + 37.0754568V + 0.385208V^2$
N2		283.413	$1864.1774 + 37.0754568V + 0.385208V^2$
S2	ดอนสีนนท์	0	$1580.7644 + 37.0754568V + 0.385208V^2$
S3	พานทอง	0	$1580.7644 + 37.0754568V + 0.385208V^2$
N3		0	$1580.7644 + 37.0754568V + 0.385208V^2$
N4		283.263	$1864.0274 + 37.0754568V + 0.385208V^2$
N5		0	$1580.7644 + 37.0754568V + 0.385208V^2$
N6		289.563	$1870.3274 + 37.0754568V + 0.385208V^2$
S4	ชลบุรี	0	$1580.7644 + 37.0754568V + 0.385208V^2$
N7		0	$1580.7644 + 37.0754568V + 0.385208V^2$
N8		3	$1583.7644 + 37.0754568V + 0.385208V^2$
N9		-3	$1577.7644 + 37.0754568V + 0.385208V^2$
N10		-1.5	$1579.2644 + 37.0754568V + 0.385208V^2$
N11		566.42	$2147.1844 + 37.0754568V + 0.385208V^2$
N12		0	$1580.7644 + 37.0754568V + 0.385208V^2$
N13		-1	$1579.7644 + 37.0754568V + 0.385208V^2$
N14		0	$1580.7644 + 37.0754568V + 0.385208V^2$
N15		8	$1588.7644 + 37.0754568V + 0.385208V^2$
S5	บางพระ	0	$1580.7644 + 37.0754568V + 0.385208V^2$

#### 4.2.3 ผลรวมของแรงทั้งหมดที่เกี่ยวข้องในการเคลื่อนที่ของรถไฟ

จากที่ได้ทำการหาค่าแรงขับเคลื่อนขบวนรถ  $F_{Tr}(V)$  และแรงต้านทานที่เกิดจากลักษณะเฉพาะของขบวนรถไฟและเส้นทาง  $F_R(V)$  แล้ว สิ่งที่ต้องดำเนินการต่อไปคือ การนำแรงทั้งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 มารวมกัน ให้เป็นดังสมการที่ (4.1) โดยแทนค่า มวลของรถไฟ (m) เท่ากับ 82,500 kg และค่าสัมประสิทธิ์มวล  $f_p$  (Mass Factor) เท่ากับ 1.09 เป็นไปดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลรวมของแรงทั้งหมดที่เกี่ยวข้องในการเคลื่อนที่ของรถไฟ

No.	สถานี	$F_{Tr}(V) - F_R(V) = f_p \times m \times \frac{dV}{dt}$
S1	ฉะเชิงเทรา	$18508.3356 + 1049.925V - 260.765V^2 = 1.09 \times 82500 \times \frac{dV}{dt}$
N1		$18508.3356 + 1049.925V - 260.765V^2 = 1.09 \times 82500 \times \frac{dV}{dt}$
N2		$103731.723 - 5459.975V + 83.935V^2 = 1.09 \times 82500 \times \frac{dV}{dt}$
S2	ดอนสีนนท์	$18508.3356 + 1049.925V - 260.765V^2 = 1.09 \times 82500 \times \frac{dV}{dt}$
S3	พานทอง	$18508.3356 + 1049.925V - 260.765V^2 = 1.09 \times 82500 \times \frac{dV}{dt}$
N3		$18508.3356 + 1049.925V - 260.765V^2 = 1.09 \times 82500 \times \frac{dV}{dt}$
N4		$103731.873 - 5459.975V + 83.935V^2 = 1.09 \times 82500 \times \frac{dV}{dt}$
N5		$18508.3356 + 1049.925V - 260.765V^2 = 1.09 \times 82500 \times \frac{dV}{dt}$
N6		$103725.573 - 5459.975V + 83.935V^2 = 1.09 \times 82500 \times \frac{dV}{dt}$
S4	ชลบุรี	$18508.3356 + 1049.925V - 260.765V^2 = 1.09 \times 82500 \times \frac{dV}{dt}$
N7		$18508.3356 + 1049.925V - 260.765V^2 = 1.09 \times 82500 \times \frac{dV}{dt}$
N8		$18505.3356 + 1049.925V - 260.765V^2 = 1.09 \times 82500 \times \frac{dV}{dt}$
N9		$18512.3356 + 1049.925V - 260.765V^2 = 1.09 \times 82500 \times \frac{dV}{dt}$
N10		$18509.8356 + 1049.925V - 260.765V^2 = 1.09 \times 82500 \times \frac{dV}{dt}$
N11		$130323.016 - 7815.78V + 155.1948V^2 = 1.09 \times 82500 \times \frac{dV}{dt}$
N12		$18508.3356 + 1049.925V - 260.765V^2 = 1.09 \times 82500 \times \frac{dV}{dt}$
N13		$18509.3356 + 1049.925V - 260.765V^2 = 1.09 \times 82500 \times \frac{dV}{dt}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลรวมของแรงทั้งหมดที่เกี่ยวข้องในการเคลื่อนที่ของรถไฟ (ต่อ)

No.	สถานี	$F_{Tr}(V) - F_R(V) = f_P \times m \times \frac{dV}{dt}$
N14		$18508.3356 + 1049.925V - 260.765V^2 = 1.09 \times 82500 \times \frac{dV}{dt}$
N15		$18500.3356 + 1049.925V - 260.765V^2 = 1.09 \times 82500 \times \frac{dV}{dt}$
S5	บางพระ	$18508.3356 + 1049.925V - 260.765V^2 = 1.09 \times 82500 \times \frac{dV}{dt}$

### 4.3 การคำนวณเวลาในการเดินรถ

จุดประสงค์ของหัวข้อนี้คือการคำนวณเวลาการเดินรถโดยใช้ทฤษฎีการประมาณระยะเวลาเดินรถ (Running Time Estimation) โดยเป็นการหาค่าเวลากับความเร็ว และ เวลาที่ระยะทางที่ครอบคลุมช่วงของความเร่งนั้น ๆ โดยพิจารณาจากฟังก์ชัน  $v$  ในหน่วย m/s

จุดมุ่งหมายคือการกำหนดเวลาและระยะทางในส่วนอัตราเร่งที่ความเร็วเพิ่มขึ้นจากความเร็วเริ่มต้น  $V_0$  จนถึงความเร็วสูงสุด  $V_{max}$  ซึ่งสามารถทำได้โดยการแบ่งเป็นช่วงเวลา  $V_0$  ถึง  $V_{max}$  ลงในตารางของช่วงเวลาย่อยของระยะทางที่มีการกำหนดไว้แล้ว โดย  $\Delta v$  สำหรับแต่ละส่วนย่อย มักถูกกำหนดเป็นค่าคงที่ และตั้งเป็นค่าเริ่มต้นสำหรับ  $S_0 = 0$  และ  $t_0 = 0$  และความเร็วเริ่มต้นคือ  $V_0$  แล้วกำหนดให้  $S_1, \dots, S_n$ ,  $t_1, \dots, t_n$  และ  $V_1, \dots, V_n$  ดังต่อไปนี้

1.  $V_i$  เป็น  $V_0 + i \times \Delta V$
2.  $t_{i+1}$  สามารถกำหนดจาก  $t_i$  โดยแปลงจากสมการที่ (4.9) ลงใน difference equation

$$m \times f_P \times \frac{\Delta V}{t_{i+1} - t_i} = F_{Tr}(V_i) - F_R(V_i) \quad (4.9)$$

จะสามารถแปลงได้เป็น

$$t_{i+1} = \left( \frac{m \times f_P \times \Delta V}{F_{Tr}(V_i) - F_R(V_i)} \right) + t_i \quad (4.10)$$

3.  $S_{i+1}$  ถูกกำหนดจาก  $S_i$  โดยแปลงจากสมการที่ (4.9) ลงใน difference equation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$m \times f_p \times \frac{\Delta V}{S_{i+1} - S_i} = \frac{F_{Tr}(V_i) - F_R(V_i)}{V_i} \quad (4.11)$$

จะสามารถแปลงได้เป็น

$$S_{i+1} = \left( \frac{m \times f_p \times \Delta V \times V_i}{F_{Tr}(V_i) - F_R(V_i)} \right) + S_i \quad (4.12)$$

จากสมการที่ (4.10) ไว้หาค่าเวลา (t) และสมการที่ (4.12) ไว้หาค่าระยะทาง (s) ซึ่งจะใช้ข้อมูลจากตารางที่ 4.1 มาคำนวณ โดยจะแบ่งช่วงความเร็วที่นำมาคำนวณเป็น 3 ช่วง เริ่มจากความเร็วที่ช่วง 55 km/h หรือ 15.2 m/s ความเร็วที่ช่วง 70 km/h หรือ 19.4 m/s และความเร็วที่ช่วง 90 km/h หรือ 25 m/s

1. ความเร็วที่ช่วง 55 km/h หรือ 15.2 m/s

จากสมการที่ (4.10) จะแทนค่า  $\Delta V = 3.45$  m และ  $f_p = 1.09$  โดย v จะคิดจากค่าจำเพาะของรถจักร ที่ได้แสดงไว้ตารางที่ 4.1 คือที่ 8.3 m/s ถึง 15.2 m/s จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} t_{0+1} &= \frac{82500 \times 1.09 \times 3.45}{130323.016 - 7815.78V + 155.1948V^2} + t_i \\ &= \frac{310241.25}{130323.016 - 64870.974 + 10691.3698} \\ &= \frac{310241.25}{76143.4118} \\ &= 4.074 \end{aligned}$$

ในช่วงเวลาดังกล่าวจะนำมาคำนวณหาระยะทาง s จากสมการที่ (4.12) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} S_{0+1} &= \frac{82500 \times 1.09 \times 3.45 \times 8.3}{130323.016 - 7815.78V + 155.1948V^2} + S_i \\ &= \frac{2757002.38}{76143.4118} \\ &= 33.82 \end{aligned}$$

จากนั้นคำนวณต่อไปเรื่อย ๆ จนถึง v = 15.2 m/s โดยเพิ่มค่า v เป็น 11.75 m/s

$$\begin{aligned}
 t_2 &= \frac{310241.25}{130323.016 - 91835.415 + 21426.582} + t_1 \\
 &= \frac{310241.25}{59914.183} + 4.07 \\
 &= 5.18 + 4.07 \\
 &= 9.25
 \end{aligned}$$

การหาค่าระยะทางก็เช่นเดียวกัน

$$\begin{aligned}
 S_2 &= \frac{3645334.69}{59914.183} + s_1 \\
 &= 60.84 + 33.82 \\
 &= 94.66
 \end{aligned}$$

จากนั้นหาค่า  $v = 15.2 \text{ m/s}$

$$\begin{aligned}
 t_3 &= \frac{310241.25}{130323.016 - 118799.856 + 35856.20} + t_2 \\
 &= \frac{310241.25}{47379.36} + 9.25 \\
 &= 6.55 + 9.25 \\
 &= 15.80
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_3 &= \frac{4715667}{47379.36} + s_2 \\
 &= 99.53 + 94.66 \\
 &= 194.19
 \end{aligned}$$

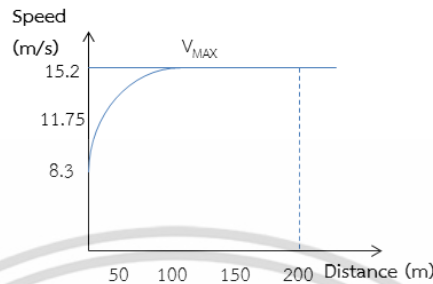
เมื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มาใส่ในตารางความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว เวลา และระยะทาง จะแสดงดังตารางที่ 4.5

**ตารางที่ 4.5** ความสัมพันธ์ระหว่าง  $v$ ,  $t$  และ  $s$  ที่ความเร็วช่วง  $8.3 \text{ m/s}$  ถึง  $15.2 \text{ m/s}$

$i$	$V_i$	$t_i$	$S_i$
0	8.3	0	0
1	11.75	4.07	33.82
2	15.2	9.25	94.66
3	15.2	15.80	194.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.5 หมายความว่า ถ้าวิ่งด้วยความเร็วสูงสุดที่ 15.2 m/s หรือ 55 km/h จะใช้เวลา 15.8 วินาที ในการแล่นไปได้ 194.19 เมตร โดยแสดงเป็นกราฟการเพิ่มความเร็วได้ ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การเพิ่มความเร็ว ที่ความเร็วสูงสุดที่ 15.2 m/s หรือ 55 km/h

2. ความเร็วที่ช่วง 70 km/h หรือ 19.4 m/s

จากสมการที่ (4.10) จะแทนค่า  $\Delta V = 1.35$  m = 82500 และ  $f_p = 1.09$  โดย  $v$  จะคิดจากค่าจำเพาะของรถจักร ที่ได้แสดงไว้ตารางที่ 4.1 คือที่ 16.7 m/s ถึง 19.4 m/s จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 t_{i+1} &= \frac{82500 \times 1.09 \times 1.35}{103731.723 - 5459.975V + 83.935V^2} + t_i \\
 &= \frac{121398.75}{103731.723 - 91181.5825 + 23408.6322} \\
 &= \frac{121398.75}{35958.7727} \\
 &= 3.38
 \end{aligned}$$

ในช่วงเวลาดังกล่าวจะนำมาคำนวณหาระยะทาง  $s$  จากสมการที่ (4.12) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 S_{i+1} &= \frac{82500 \times 1.09 \times 1.35 \times 16.7}{103731.723 - 5459.975V + 83.935V^2} + S_i \\
 &= \frac{2027359.12}{35958.7727} \\
 &= 56.38
 \end{aligned}$$

จากนั้นคำนวณต่อไปเรื่อย ๆ จนถึง  $v = 19.4$  m/s โดยเพิ่มค่า  $v$  เป็น 18.05 m/s

$$\begin{aligned}
 t_2 &= \frac{121398.75}{103731.723 - 98552.5488 + 27346.2328} + t_1 \\
 &= \frac{121398.75}{32525.407} + 3.38 \\
 &= 3.73 + 3.38 \\
 &= 7.11
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_2 &= \frac{2191247.44}{35958.7727} + s_1 \\
 &= 60.49 + 56.38 \\
 &= 117.32
 \end{aligned}$$

จากนั้นหาค่า  $v = 19.4 \text{ m/s}$

$$\begin{aligned}
 t_3 &= \frac{121398.75}{103731.723 - 98552.5488 + 27346.2328} + t_2 \\
 &= \frac{121398.75}{29397.9846} + 7.11 \\
 &= 4.13 + 7.11 \\
 &= 11.24
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_3 &= \frac{2355135.75}{29397.9846} + s_2 \\
 &= 80.11 + 117.32 \\
 &= 197.43
 \end{aligned}$$

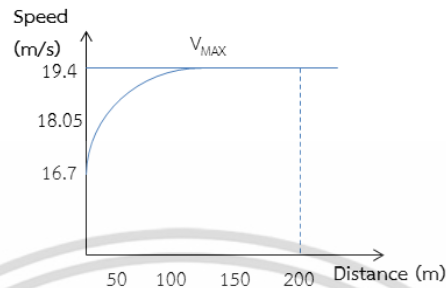
เมื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มาใส่ในตารางความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว เวลา และระยะทาง จะแสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $v$ ,  $t$  และ  $s$  ที่ความเร็วช่วง  $16.7 \text{ m/s}$  ถึง  $19.4 \text{ m/s}$

$i$	$V_i$	$t_i$	$S_i$
0	16.7	0	0
1	18.05	3.38	56.38
2	19.4	7.11	117.32
3	19.4	11.24	197.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.6 หมายความว่า ถ้าวิ่งด้วยความเร็วสูงสุดที่ 19.4 m/s หรือ 70 km/h จะใช้เวลา 11.24 วินาที ในการแล่นไปได้ 197.43 เมตร โดยแสดงเป็นกราฟการเพิ่มความเร็ว ได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การเพิ่มความเร็ว ที่ความเร็วสูงสุดที่ 19.4 m/s หรือ 70 km/h

3. ความเร็วที่ช่วง 90 km/h หรือ 25 m/s

จากสมการที่ (4.10) จะแทนค่า  $\Delta V = 1.4 \text{ m} = 82500$  และ  $f_p = 1.09$  โดย  $v$  จะคิดจากค่าจำเพาะของรถจักร ที่ได้แสดงไว้ตารางที่ 4.1 คือที่ 22.2 m/s ถึง 25 m/s จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} t_{i+1} &= \frac{82500 \times 1.09 \times 1.04}{18508.3356 + 1049.925V + 260.765V^2} + t_i \\ &= \frac{125895}{18508.3356 + 23308.335 - 128515.423} \\ &= \frac{125895}{86698.7524} \\ &= 1.45 \end{aligned}$$

ในช่วงเวลาดังกล่าวจะนำมาคำนวณหาระยะทาง  $s$  จากสมการที่ (4.12) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} S_{i+1} &= \frac{82500 \times 1.09 \times 1.04 \times 22.2}{18508.3356 + 1049.925V + 260.765V^2} + S_i \\ &= \frac{2794869}{86698.7524} \\ &= 32.24 \end{aligned}$$

จากนั้นคำนวณต่อไปเรื่อย ๆ จนถึง  $v = 25 \text{ m/s}$  โดยเพิ่มค่า  $v$  เป็น 23.6 m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 t_2 &= \frac{125895}{18508.3356 + 24778.23 - 145235.67} + t_1 \\
 &= \frac{125895}{101949.104} + 1.45 \\
 &= 1.23 + 1.45 \\
 &= 2.68
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_2 &= \frac{2971122}{101949.104} + s_1 \\
 &= 29.14 + 32.24 \\
 &= 61.38
 \end{aligned}$$

จากนั้นหาค่า  $v = 25 \text{ m/s}$

$$\begin{aligned}
 t_3 &= \frac{125895}{18508.3356 + 26248.125 - 162980} + t_2 \\
 &= \frac{125895}{118223.54} + 2.68 \\
 &= 1.06 + 2.68 \\
 &= 3.74
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 S_3 &= \frac{3147375}{118223.54} + s_2 \\
 &= 26.62 + 61.38 \\
 &= 88.00
 \end{aligned}$$

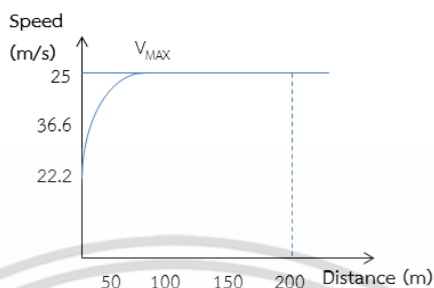
เมื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มาใส่ในตารางความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว เวลา และระยะทาง จะแสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $v$ ,  $t$  และ  $s$  ที่ความเร็วช่วง  $22.2 \text{ m/s}$  ถึง  $25 \text{ m/s}$

$i$	$V_i$	$t_i$	$S_i$
0	22.2	0	0
1	23.6	1.45	32.24
2	25	2.68	61.38
3	25	3.74	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.7 หมายความว่า ถ้าวิ่งด้วยความเร็วสูงสุดที่ 25 m/s หรือ 90 km/h จะใช้เวลา 3.74 วินาที ในการแล่นไปได้ 88 เมตร โดยแสดงเป็นกราฟการเพิ่มความเร็วได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การเพิ่มความเร็ว ที่ความเร็วสูงสุดที่ 25 m/s หรือ 90 km/h

จากผลการคำนวณที่แสดงดังตารางที่ 4.5 , 4.6 และ 4.7 จะสามารถนำไปหาเวลาตามระยะทางต่าง ๆ ตามข้อมูลเส้นทางรถไฟสายตะวันออก ของการรถไฟแห่งประเทศไทย และเมื่อคำนวณออกมาแล้ว เวลาที่ใช้ในเส้นทางรถไฟสายตะวันออก ช่วงสถานีชุมทางฉะเชิงเทรา ถึง สถานีบางพระ จะแสดงได้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 เวลาที่ใช้ตามระยะทางของเส้นทางรถไฟสายตะวันออก

No.	สถานี	ระยะทาง (km)	ความเร็วสูงสุด (km/h)	ช่วงเวลาที่รถไฟใช้ในจุดนั้น ๆ
S1	ฉะเชิงเทรา	0	90	
N1		11	90	ที่ i = 127 ใช้เวลา 7 นาที 48 วินาที
N2		0.7	70	ที่ i = 6 ใช้เวลา 45 วินาที
S2	ดอนสีนนท์	3	90	ที่ i = 36 ใช้เวลา 2 นาที 8 วินาที
S3	พานทอง	15	90	ที่ i = 173 ใช้เวลา 10 นาที 40 วินาที
N3		1	90	ที่ i = 13 ใช้เวลา 41 วินาที
N4		0.82	70	ที่ i = 6 ใช้เวลา 45 วินาที
N5		10	90	ที่ i = 116 ใช้เวลา 7 นาที 6 วินาที

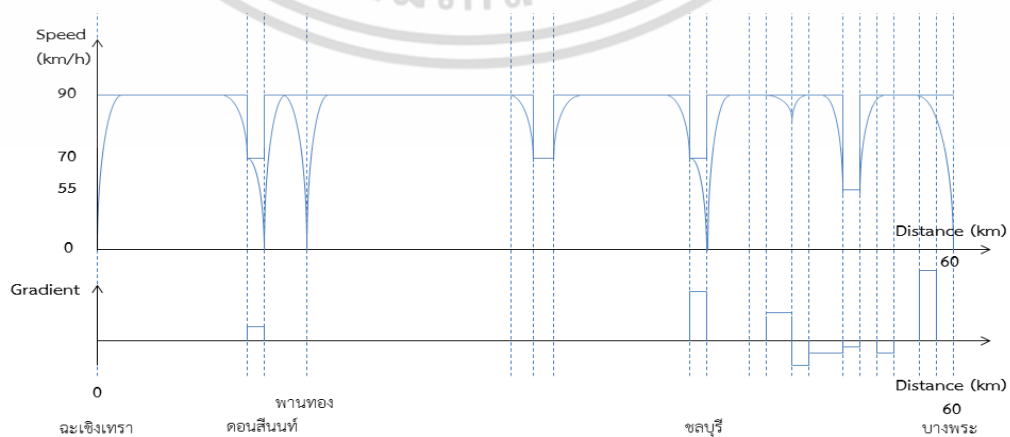
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 เวลาที่ใช้ตามระยะทางของเส้นทางรถไฟสายตะวันออก (ต่อ)

No.	สถานี	ระยะทาง (km)	ความเร็วสูงสุด (km/h)	ช่วงเวลาที่รถไฟใช้ในจุดนั้น ๆ
N6		0.33	70	ที่ $i = 4$ ใช้เวลา 22 วินาที
S4	ชลบุรี	4	90	ที่ $i = 47$ ใช้เวลา 2 นาที 48 วินาที
N7		1	90	ที่ $i = 13$ ใช้เวลา 41 วินาที
N8		1.30	90	ที่ $i = 17$ ใช้เวลา 56 วินาที
N9		0.92	90	ที่ $i = 12$ ใช้เวลา 37 วินาที
N10		3.18	90	ที่ $i = 38$ ใช้เวลา 2 นาที 14 วินาที
N11		0.76	55	ที่ $i = 6$ ใช้เวลา 1 นาที 3 วินาที
N12		1	90	ที่ $i = 13$ ใช้เวลา 41 วินาที
N13		1	90	ที่ $i = 13$ ใช้เวลา 41 วินาที
N14		2	90	ที่ $i = 25$ ใช้เวลา 1 นาที 26 วินาที
N15		0.81	90	ที่ $i = 11$ ใช้เวลา 34 วินาที
S5	บางพระ	1	90	ที่ $i = 13$ ใช้เวลา 41 วินาที

จากการใช้ทฤษฎีการประมาณระยะเวลาเดินทาง (Running Time Estimation) จะได้ระยะเวลาที่ใช้ทั้งหมดตั้งแต่สถานีฉะเชิงเทราถึงสถานีบางพระ เท่ากับ 42 นาที 37 วินาที โดยยังไม่ได้รวมช่วงเวลารถจอด

เมื่อทำการแบ่งเส้นทางรถไฟออกเป็นส่วนๆ ตามลักษณะเฉพาะของเส้นทางรถไฟ ที่มีการเปลี่ยนแปลงความลาดชัน และการจำกัดความเร็วสำหรับแต่ละช่วงของเส้นทางที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ เมื่อพิจารณาจากการคำนวณการเคลื่อนที่ในแต่ละส่วน สามารถแบ่งส่วนการเคลื่อนที่ของรถไฟได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การแบ่งส่วนการเคลื่อนที่ของรถไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.4 ผลการทดลองซอฟต์แวร์การจัดการตารางเวลาการเดินรถ

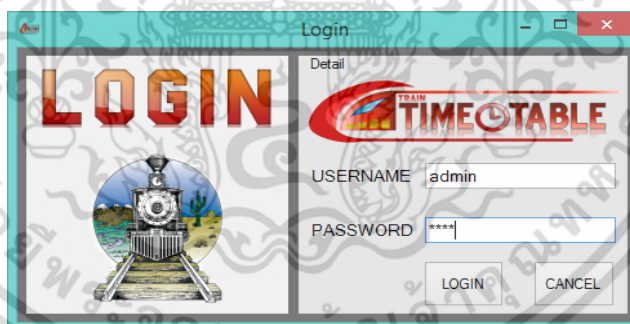
จากการที่ผู้วิจัยได้ออกแบบซอฟต์แวร์การจัดการตารางเวลาการเดินรถ ในหัวข้อนี้จะประกอบไปด้วยผลการทดลองของซอฟต์แวร์ที่อินเทอร์เน็ตเฟสติดต่อกับผู้ใช้งาน และการแสดงผลในส่วนของข้อมูลที่น่าเข้า เพื่อที่จะนำข้อมูลมาแสดงผลออกเป็นกราฟระหว่างสถานีและเวลา (Time-Distance Diagram)

### 4.4.1 ผลการทดลองอินเทอร์เน็ตเฟสที่ติดต่อกับผู้ใช้

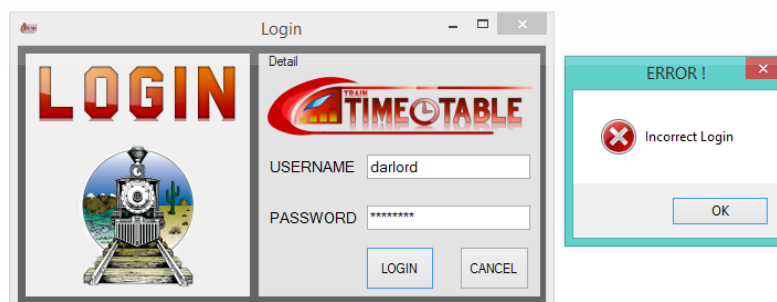
ในระบบมีหน้าจอที่ติดต่อกับผู้ใช้ได้แก่ Login, Main Planning, IT Support และหน้าจอแสดงข้อมูลสำหรับผู้ใช้งานได้เพิ่มข้อมูลเข้ามาโดยจะมีทั้งแสดงในรูปแบบตาราง (Datagridview) แล้วนำข้อมูลมาแสดงในรูปแบบ Time-Distance Diagram

#### 4.4.1.1 Login form

เป็นส่วนแรกที่จะเจอหลังจากการเปิดโปรแกรมขึ้นมา เพื่อให้ผู้เข้าใช้งานทำการยืนยันตัวตนก่อนเข้าสู่ในระบบ ซึ่งจะมีให้กรอกข้อมูล Username และ Password จากนั้นก็ทำการกดปุ่ม Login ถ้าหากกรอกข้อมูลผิดก็จะมีหน้าต่างแจ้งเตือน (Message Box) เพื่อบอกว่าข้อมูลไม่ถูกต้องและไม่สามารถเข้าสู่ระบบต่อไปได้ให้กรอกข้อมูลใหม่โดยจะตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลจากผู้ใช้งานเทียบกับฐานข้อมูลในระบบ ถ้าใส่ข้อมูลไปถูกต้องก็จะเข้าสู่หน้าอินเทอร์เน็ตเฟสผู้ใช้งานหลัก (Main Planning) ดังรูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ

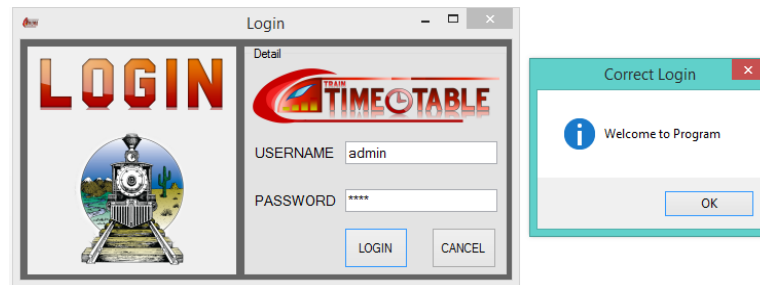


รูปที่ 4.5 อินเทอร์เน็ตเฟส Login Form



รูปที่ 4.6 Login Form จะแจ้ง Error เมื่อกรอกข้อมูลเข้าสู่ระบบไม่ถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 Login Form จะแจ้ง Correct Login เมื่อกรอกข้อมูลเข้าสู่ระบบถูกต้อง

#### 4.4.2 ผลการทดลองอินเตอร์เฟซส่วนหน้าจอหลัก (Main Planning)

เมื่อผู้ใช้งานเข้าสู่ระบบสำเร็จแล้ว ส่วนต่อมาเป็นอินเตอร์เฟซที่แสดงการใช้งานฟังก์ชันต่าง ๆ บนระบบโปรแกรมหลัก โดินจะมีส่วน Menu, Help สำหรับหน้าจอหลักนี้ก็จะมีการเลือกข้อมูลที่ต้องการ โดยจะประกอบไปด้วย

1. เวลาเริ่มต้นการเดินทางรถไฟ
2. ระยะเวลาห่างระหว่างรถไฟแต่ละขบวน
3. ระยะเวลาที่รถไฟจอดในแต่ละสถานี
4. จำนวนขบวนรถไฟที่ให้บริการ
5. จำนวนรอบที่รถไฟแต่ละขบวนให้บริการ
6. สามารถเลือกหัวรถจักรที่ต้องการได้

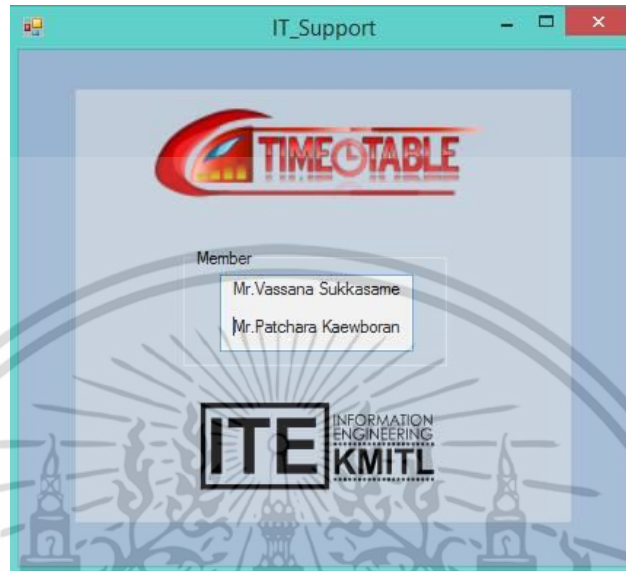
โดยการแสดงภาพเส้นทางรถไฟที่ได้สร้างขึ้น และเมื่อทำการกรอกข้อมูลครบถ้วนแล้วกดปุ่ม Graph เพื่อไปยังหน้าจออินเตอร์เฟซส่วนการแสดงผลของกราฟ จากข้อมูลที่เก็บอยู่ในฐานข้อมูล นอกจากนี้ยังสามารถโหลดข้อมูลใหม่ จากปุ่ม Refresh และสามารถไปหน้าจออินเตอร์เฟซ Edit Data ได้โดยกดปุ่ม Edit Data ดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 อินเตอร์เฟซหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 เมื่อกด Menu Bar จะมีเมนู Help ให้เลือก ซึ่งเมื่อกดก็จะมีหน้าต่างขึ้นมาเป็นช่องทางติดต่อกับผู้ดูแลระบบ เพื่อให้ผู้ใช้งานสอบถามหรือให้รายงานความผิดพลาดต่อผู้ดูแลระบบให้แก้ไขข้อผิดพลาดในระบบต่อไปดังรูปที่ 4.9



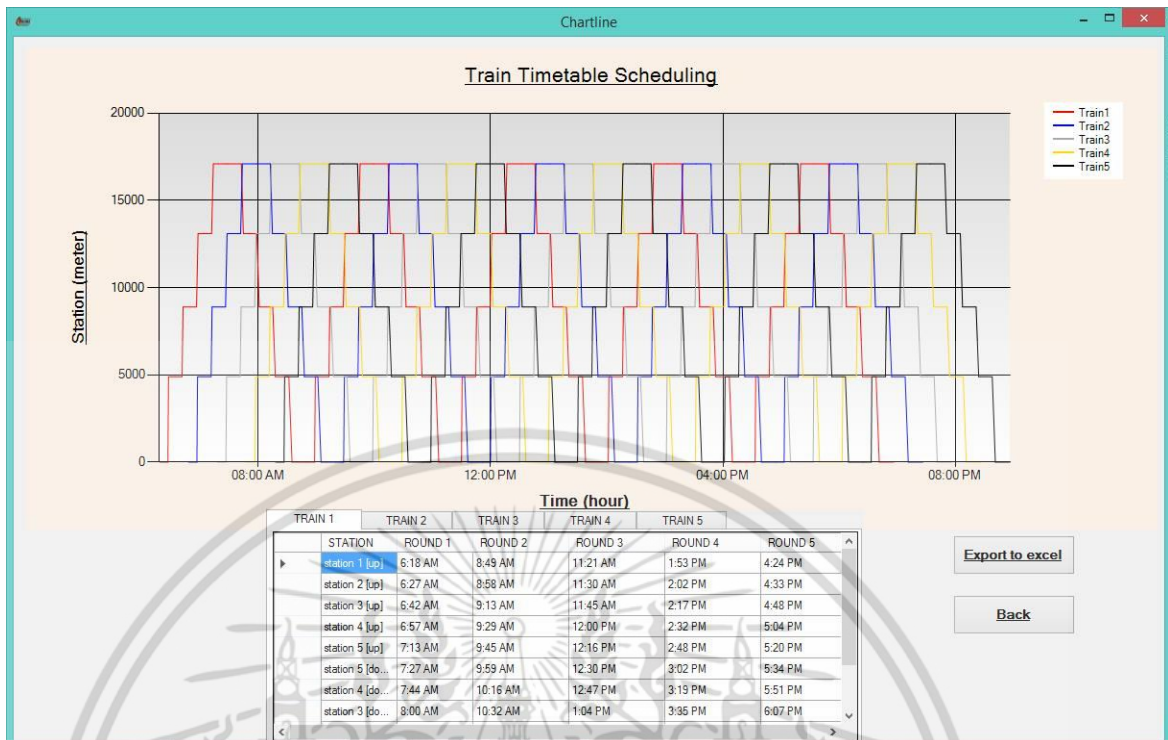
รูปที่ 4.9 อินเทอร์เน็ตติดต่อผู้ดูแลระบบ

เมื่อเพิ่มค่าทุกอย่างครบแล้วทำการกดปุ่ม Graph จะทำการส่งค่าข้อมูลเข้าสู่การคำนวณเพื่อให้ออกมาเป็นกราฟการเดินรถก็จะมีการตรวจสอบค่าทุกค่าที่ใส่มาว่ามีปัญหาหรือเปล่า เช่น ไม่ได้ใส่เวลาเริ่มต้น ไม่ได้ใส่ข้อมูล Headway หรือ Dwell Time ก็จะมี Message Box ขึ้นมาเตือนและให้เพิ่มข้อมูลให้ครบดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 อินเทอร์เน็ตแสดง กดปุ่ม Graph เมื่อใส่ข้อมูลไม่ครบ

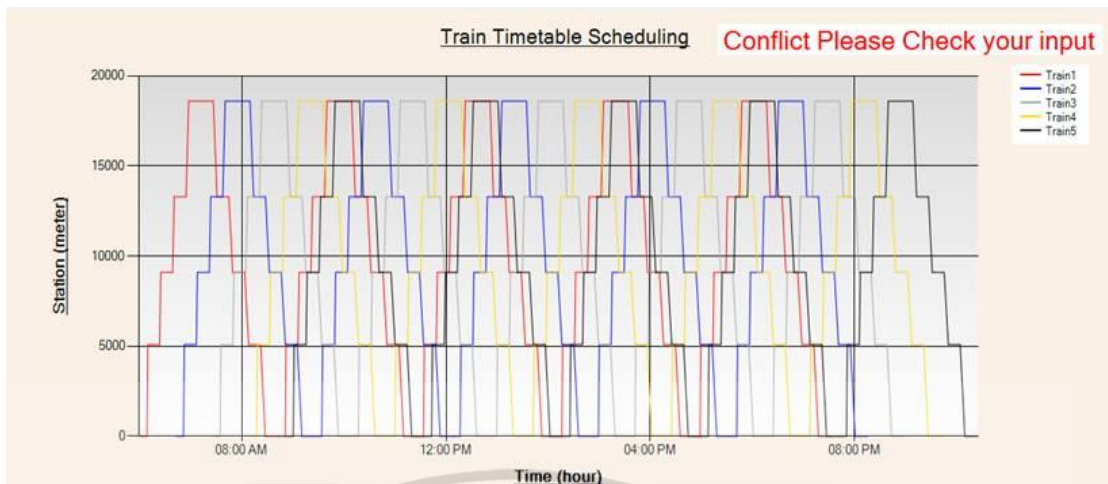
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 อินเทอร์เน็ตแสดงกราฟและข้อมูลเวลาการเดินทาง

จากรูปที่ 4.11 เป็นอินเทอร์เน็ตแสดงกราฟและข้อมูลเวลาที่เพิ่มข้อมูลจากหน้าหลักตั้งรูปที่ 4.8 เมื่อทำการกรอกครบแล้ว กดปุ่ม Graph โปรแกรมก็จะทำการคำนวณค่าที่ป้อนเข้ามาเพื่อหาเวลาในแต่ละแท็ค ซึ่งจะแบ่งช่วงการหาเวลาตามหลักการของ Running Time Calculation ซึ่งจะมี 4 ช่วงในการคำนวณคือ ช่วงมีความเร่ง (Acceleration) ความเร็วคงที่ (Constant Speed) ช่วงปล่อยให้รถไฟแล่นเอง (Run-out) และช่วงเบรค (Braking) ซึ่งเราจะคำนวณช่วงเบรคจากค่าของรถไฟแต่ละชนิดเพื่อไม่ให้ค่านั้นเกินจากค่าเหมาะสมที่เราคำนวณไว้ ในส่วนการคำนวณนั้นจะใช้ทฤษฎีพลศาสตร์ของรถไฟมาคำนวณเพื่อหาค่าเวลา จากนั้นนำค่าเวลามาแสดงค่าเป็นกราฟเวลาการเดินทางโดยใช้ Line Chart ในการแสดงกราฟและใช้เครื่องมือ Datagridview ในการแสดงข้อมูลเวลาที่รถไฟเข้าสถานี โดยถ้ามีหลาย ๆ ขบวนจะทำการแยกแต่ละขบวนออกเป็นแต่ละ Tab โดยใช้เครื่องมือ Tab Control

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 อินเทอร์เน็ตแสดงกราฟเมื่อเวลาการเดินทางเกิดปัญหาทับซ้อนกัน

จากรูปที่ 4.12 อินเทอร์เน็ตแสดงกราฟแจ้งเตือนผู้ใช้งานว่าข้อมูลที่ใส่เข้ามานั้นทำให้การเดินทางเกิดการขัดแย้งกัน (Conflict) โดยสังเกตได้จากเส้นกราฟของเวลารถไฟแต่ละขบวนที่เกิดการซ้อนทับกัน ซึ่งทำให้ผู้ใช้งานทราบว่าข้อมูลที่ผู้ใช้งานใส่เข้ามานั้นใช้งานไม่ได้ต้องกลับไปแก้ไขข้อมูลในอินเทอร์เน็ตหลัก (Main Planning)

เมื่อทำการกดปุ่ม Export to excel จากรูปที่ 4.11 ก็จะทำให้ทำการ Export ข้อมูลเวลาที่รถไฟเข้าสู่สถานีนั้น ๆ ออกมาเป็นข้อมูลตารางในโปรแกรม Microsoft Excel เพื่อให้ผู้ใช้ทำการพิมพ์ หรือนำข้อมูลตารางการเดินทางไปใช้ต่อได้สะดวกโดยหน้าอินเทอร์เน็ต Microsoft Excel ได้ดังรูปที่ 4.13

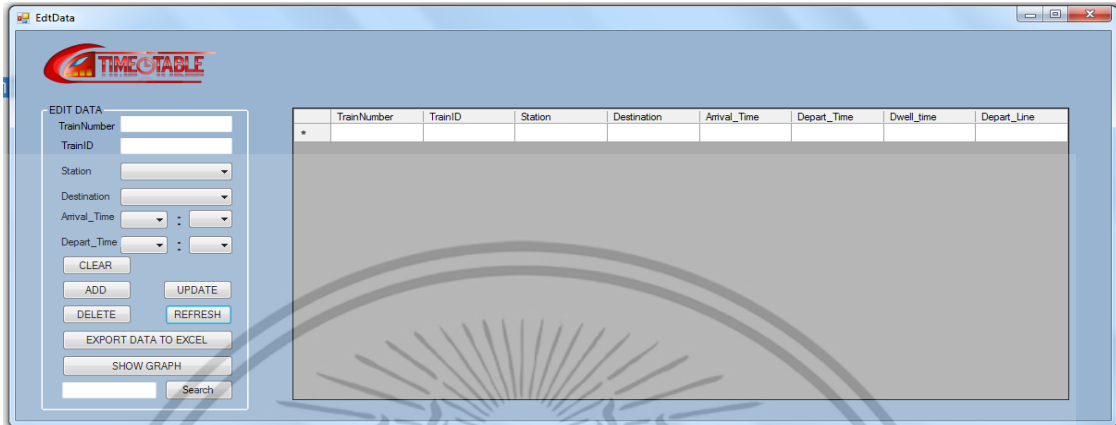
A1	STATION	ROUND 1	ROUND 2	ROUND 3	ROUND 4	ROUND 5
1	STATION	ROUND 1	ROUND 2	ROUND 3	ROUND 4	ROUND 5
2	station 1 [up]	6:30 น.	8:59 น.	11:28 น.	13:58 น.	16:27 น.
3	station 2 [up]	6:43 น.	9:13 น.	11:42 น.	14:12 น.	16:41 น.
4	station 3 [up]	6:56 น.	9:25 น.	11:55 น.	14:24 น.	16:54 น.
5	station 4 [up]	7:23 น.	9:52 น.	12:22 น.	14:51 น.	17:21 น.
6	station 5 [up]	7:40 น.	10:09 น.	12:39 น.	15:08 น.	17:37 น.
7	station 5 [down]	7:43 น.	10:12 น.	12:42 น.	15:11 น.	17:40 น.
8	station 4 [down]	8:00 น.	10:29 น.	12:58 น.	15:28 น.	17:57 น.
9	station 3 [down]	8:27 น.	10:56 น.	13:25 น.	15:55 น.	18:24 น.
10	station 2 [down]	8:39 น.	11:09 น.	13:38 น.	16:07 น.	18:37 น.
11	station 1 [down]	8:53 น.	11:22 น.	13:52 น.	16:21 น.	18:51 น.
12						
13						
14						
15						

รูปที่ 4.13 หน้าโปรแกรม Microsoft Excel ที่ทำการ Export มาจาก Datagridview

เมื่อทำการกดปุ่ม Manual Schedule จากรูปที่ 4.8 ก็จะทำให้การเปิดอินเทอร์เน็ตแก้ไขตารางรถไฟแบบจัดการเอง (Edit Data) เพื่อให้ผู้ใช้งานทำการใส่ข้อมูลการเดินทางด้วยตนเองโดยจะต้องใส่

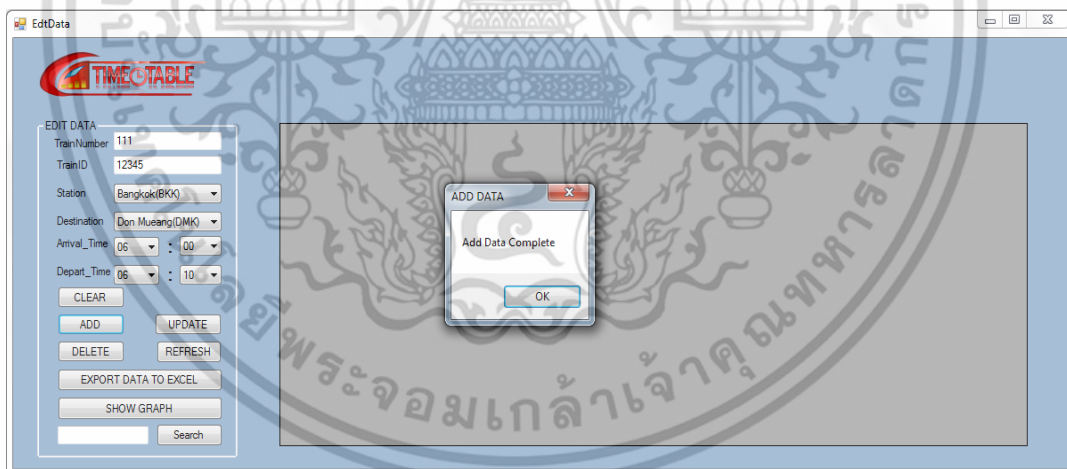
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเลขของรถไฟ (TrainNumber) เลขรถไฟ (TrainID) สถานีต้นทาง (Station) สถานีปลายทาง (Destination) เวลาที่เข้าสถานีต้นทาง (Arrival\_Time) เวลาที่ออกจากสถานีต้นทาง (Depart\_Time) ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 อินเทอร์เน็ต Edit Data สำหรับการสร้างกราฟกำหนดโดยผู้ใช้

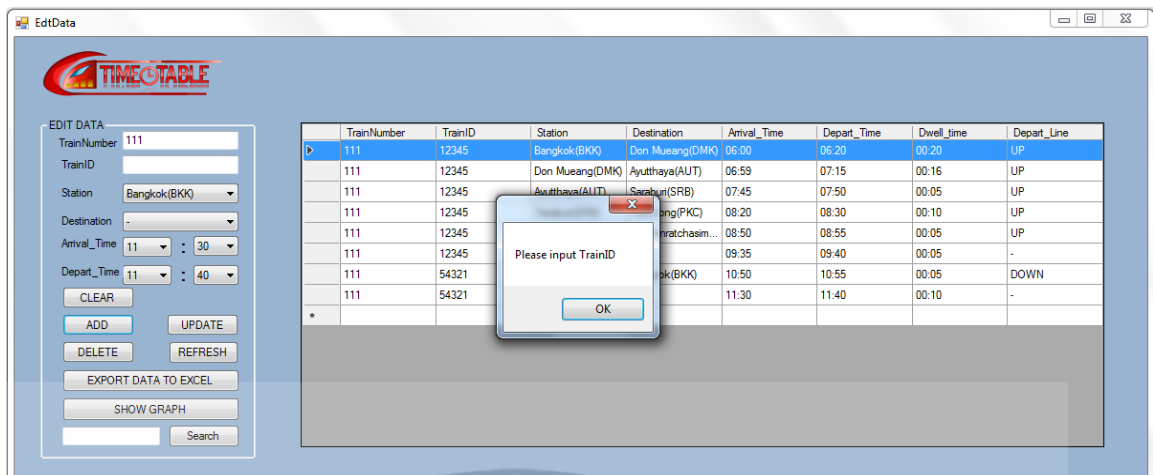
เมื่อทำการใส่ค่าข้อมูลครบแล้ว จากนั้นกดปุ่ม ADD จะมีข้อความแจ้งบอกว่าการใส่ค่าสำเร็จแล้วค่าที่ผู้ใช้กรอกเข้าไปก็จะแสดงใน DataGridView ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 อินเทอร์เน็ตแจ้งเตือนเมื่อใส่ค่าครบและถูกต้อง

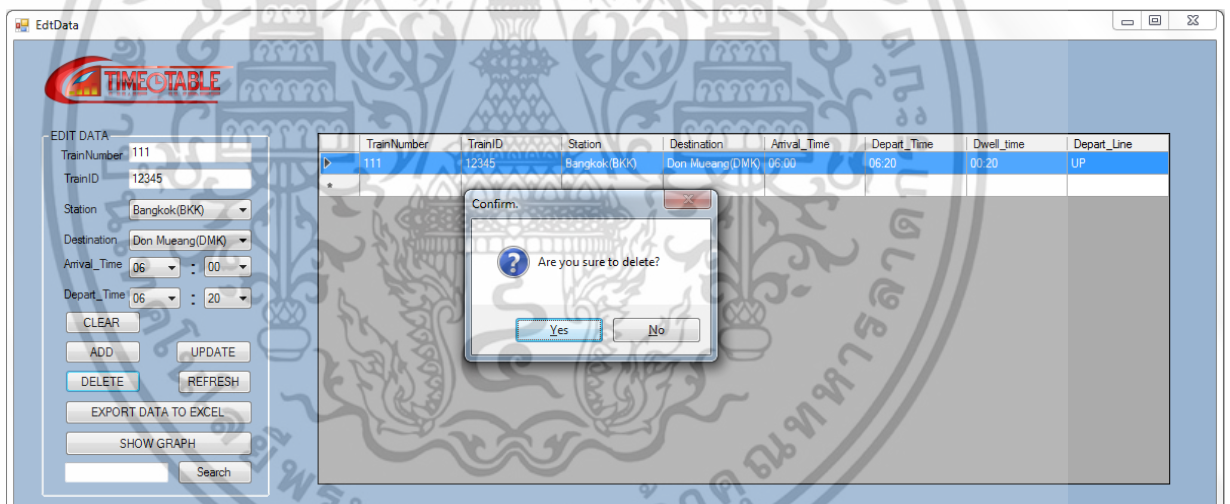
เมื่อผู้ใช้งานทำการกรอกค่าต่าง ๆ ไม่ครบหรือว่ากรอกเวลาแล้วทำให้เวลาคาบเกี่ยวกันแล้วทำการกดปุ่ม ADD จะมีข้อความแจ้งเตือนบอกผู้ใช้ไม่ได้กรอกค่าใด เพื่อให้ผู้ใช้งานทราบหรือแจ้งเตือนค่าดังกล่าวไม่สามารถใส่ได้เพราะทำให้การเดินรถผิดพลาด และให้ทำการกรอกค่าให้ถูกต้อง ดังอินเทอร์เน็ตรูปที่ 4.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



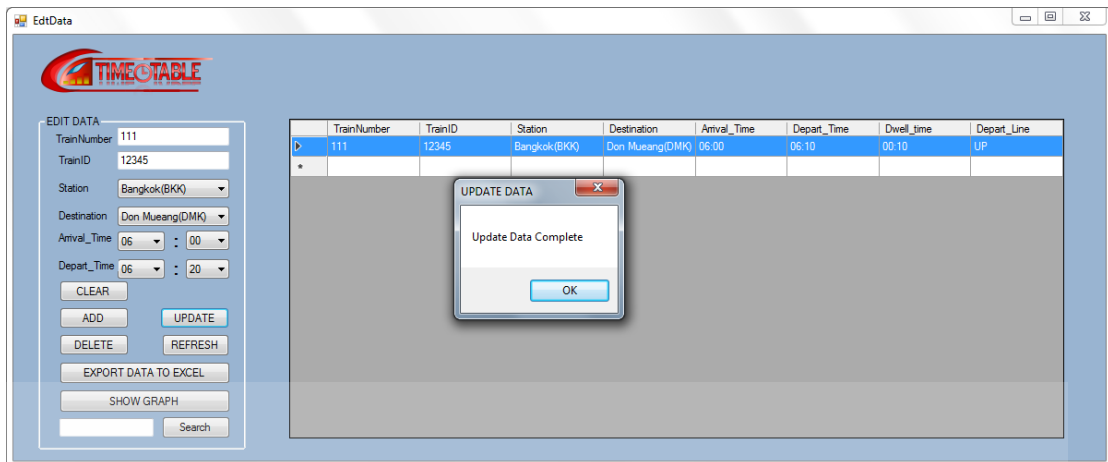
รูปที่ 4.16 อินเทอร์เน็ตแจ้งเตือนเมื่อไม่ได้ใส่ค่าข้อมูล

เมื่อผู้ใช้งานต้องการลบข้อมูลก็จะทำการกดที่ข้อมูลที่ต้องการลบและทำการกดปุ่ม DELETE จากนั้นระบบจะถามว่าต้องการลบใช่หรือไม่เพื่อเป็นการป้องกันผู้ใช้งานกดผิดถ้ากดใช่ก็จะทำการลบข้อมูลแถวนั้นออกจากข้อมูลโดยแสดงดังรูป 4.17



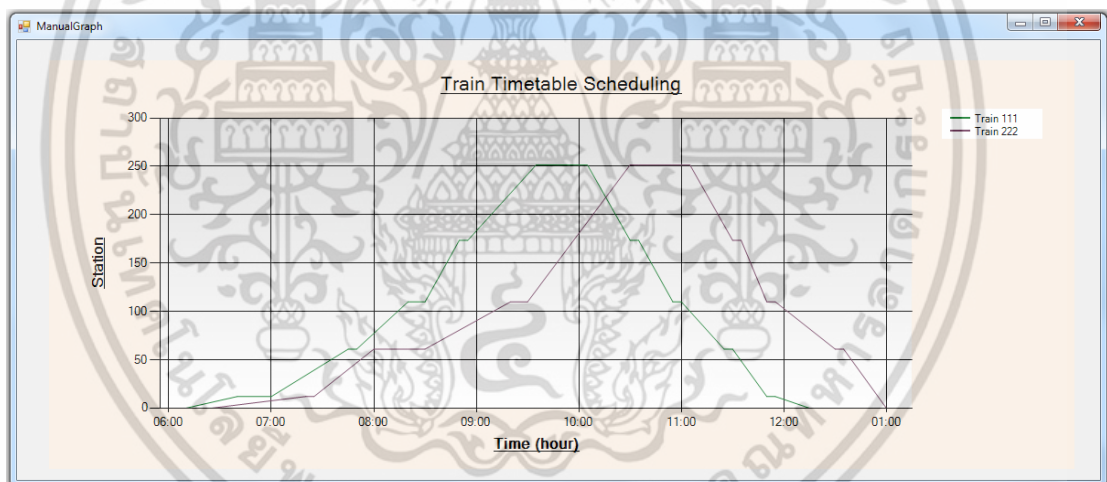
รูปที่ 4.17 อินเทอร์เน็ตแจ้งเตือนเมื่อทำการลบข้อมูล

เมื่อผู้ใช้ต้องการที่แก้ไขข้อมูลให้เลือกแถวของข้อมูลที่ต้องการแก้ไข จากนั้นก็จะไปแก้ไขที่ช่องกรอกข้อมูลด้านซ้ายจากนั้นให้ทำการกดปุ่ม UPDATE จากนั้นจะมีข้อความแจ้งให้ผู้ใช้ทราบว่าทำการแก้ไขข้อมูลเสร็จสมบูรณ์แล้ว ดังรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ข้อความแจ้งให้ทราบเมื่อทำการแก้ไขข้อมูลสมบูรณ์

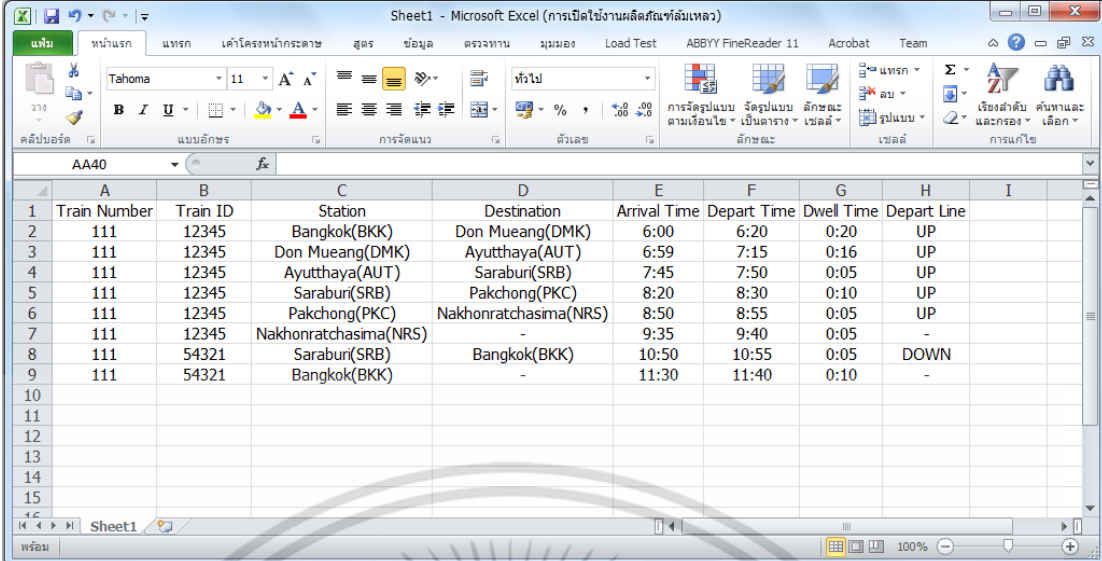
จากอินเตอร์เฟส Edit Data รูปที่ 4.14 เมื่อผู้ใช้ทำการกรอกข้อมูลทั้งหมดเสร็จแล้วให้กดปุ่ม SHOW GRAPH ก็จะได้หน้ากราฟตารางเวลาการเดินทางรถออกมาตามที่ผู้ใช้ทำการกรอกข้อมูล โดยจะแสดงว่ารถไฟหมายเลขใดได้เข้าสถานีที่ระยะเท่าไรและเข้า-ออกในเวลาใดดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงเวลาการเดินทางรถไฟ (Manual graph)

จากอินเตอร์เฟส Edit Data รูปที่ 4.14 เมื่อผู้ใช้ทำการกดปุ่ม Export Data to Excel จะเป็นการนำข้อมูลตารางการเดินทางรถออกมาเป็นไฟล์ xls. (Microsoft Excel) เพื่อจะนำข้อมูลไปใช้งานต่อหรือทำการพิมพ์เพื่อนำมาใช้งานอย่างได้สะดวกดังรูปที่ 4.20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Train Number	Train ID	Station	Destination	Arrival Time	Depart Time	Dwell Time	Depart Line	
2	111	12345	Bangkok(BKK)	Don Mueang(DMK)	6:00	6:20	0:20	UP	
3	111	12345	Don Mueang(DMK)	Ayutthaya(AUT)	6:59	7:15	0:16	UP	
4	111	12345	Ayutthaya(AUT)	Saraburi(SRB)	7:45	7:50	0:05	UP	
5	111	12345	Saraburi(SRB)	Pakchong(PKC)	8:20	8:30	0:10	UP	
6	111	12345	Pakchong(PKC)	Nakhonratchasima(NRS)	8:50	8:55	0:05	UP	
7	111	12345	Nakhonratchasima(NRS)	-	9:35	9:40	0:05	-	
8	111	54321	Saraburi(SRB)	Bangkok(BKK)	10:50	10:55	0:05	DOWN	
9	111	54321	Bangkok(BKK)	-	11:30	11:40	0:10	-	
10									
11									
12									
13									
14									
15									

รูปที่ 4.20 อินเทอร์เน็ตตารางเวลาการเดินทางในรูปของ Microsoft Excel ที่ส่งออกมาจากโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาและออกแบบระบบจัดตารางเวลาการเดินทางโดยใช้ทฤษฎีการประมาณระยะเวลาเดินทาง (Running Time Estimation) มาคำนวณเพื่อให้ได้เวลาการเดินทางที่ใกล้เคียงกับสภาพความเป็นจริง เพื่อนำมาสร้างตารางเวลาการเดินทางโดยใช้ซอฟต์แวร์ที่ออกแบบขึ้นมาเอง ซึ่งได้จำลองใช้เส้นทางรถไฟของการรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) เส้นทางสายตะวันออก ทิศทางมุ่งลงใต้ ตั้งแต่สถานีชุมทางฉะเชิงเทรา ถึง สถานีบางพระ เป็นระยะทาง 60 กิโลเมตร 5 สถานี

โดยวิทยานิพนธ์นี้มีอีกจุดประสงค์คือต้องการเปรียบเทียบข้อแตกต่างระหว่างตารางเวลาการเดินทางจริงที่ใช้ในปัจจุบัน เปรียบเทียบกับตารางเวลาการเดินทางที่ได้จากซอฟต์แวร์ที่ออกแบบ ซึ่งใช้ค่าจากการคำนวณด้วย ทฤษฎีการประมาณระยะเวลาเดินทาง (Running Time Estimation) โดยแสดงเวลาการมาถึงของรถไฟโดยคำนวณจากทฤษฎีการประมาณระยะเวลาเดินทาง (Running Time Estimation) ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 เวลาการมาถึงของรถไฟโดยคำนวณจากทฤษฎีการประมาณระยะเวลาเดินทาง (Running Time Estimation)

ลำดับ	สถานีที่หยุด	เวลาที่มาถึง	เวลาออก	เวลาจอดสถานี (นาที)
S1	ชุมทางฉะเชิงเทรา	08:56	08:59	3
S2	ดอนสีนนท์	09:10	09:11	1
S3	พานทอง	09:22	09:23	1
S4	ชลบุรี	09:35	09:36	1
S5	บางพระ	09:46	09:47	1

และเมื่อเปรียบเทียบกับตารางเวลาเดินทางจริงของการรถไฟแห่งประเทศไทย ซึ่งแสดงดังตารางที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.2 เปรียบเทียบระหว่างเวลาจากทฤษฎีกับเวลาจาก รถไฟ.

ลำดับ	สถานีที่หยุด	เวลาจากทฤษฎี		เวลาจาก รถไฟ.		เวลาจอด สถานี (นาที)
		เวลาที่มาถึง	เวลาออก	เวลาที่มาถึง	เวลาออก	
S1	ชุมทาง ฉะเชิงเทรา	08:56	08:59	08:56	08:59	3
S2	ดอนสีนันท	09:10	09:11	09:15	09:16	1
S3	พานทอง	09:22	09:23	09:30	09:31	1
S4	ชลบุรี	09:35	09:36	09:48	09:49	1
S5	บางพระ	09:46	09:47	09:59	10:00	1

จากตารางที่ 5.2 จะพบว่าตารางเวลาเดินทางจากการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีการประมาณระยะเวลาเดินทาง (Running Time Estimation) นั้นมีค่าแตกต่างเล็กน้อยจากตารางเวลาเดินทางจริงของการรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) ทั้งนี้เนื่องด้วยว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการเดินทางนั้นมีอีกหลายปัจจัยที่มีผลต่อตารางเวลาการเดินทาง ซึ่งทฤษฎีดังกล่าวอาจได้ผลลัพธ์ออกมาที่มีความแม่นยำมากขึ้น เพราะใช้หลายปัจจัยมาเป็นองค์ประกอบ แต่ก็ด้วยปัจจัยที่มากกว่านั้น เช่น การผ่านจุดตัดถนน ซึ่งรถไฟจะต้องหยุดหรือชะลอความเร็ว จึงทำให้เวลาการเดินทางจริงอาจไม่เป็นไปตามผลลัพธ์ที่คำนวณออกมาได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากที่ผู้วิจัยสรุปได้ว่าการจัดตารางเวลาการเดินทางโดยใช้ทฤษฎีการประมาณระยะเวลาเดินทาง (Running Time Estimation) นั้นได้ค่าความแม่นยำเป็นหน่วยวินาที ซึ่งสามารถใช้ได้ดีถ้าเป็นทางรถไฟระยะสั้น แต่ระยะทางยาวอาจต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่น ๆ เพิ่มเติมด้วย เพราะสิ่งที่เส้นทางที่รถไฟผ่านนั้น ประกอบไปด้วยจุดตัด จุดชะลอความเร็วอีกมาก การประมาณระยะเวลาที่แน่นอนจริง ๆ อาจทำได้ยาก ซึ่งอาจต้องหาทฤษฎีหรือซอฟต์แวร์อื่น ๆ เข้ามาเสริมเพื่อให้เกิดความแม่นยำที่มากยิ่งขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] นคร จันทศร. 2559. “ช่างรถไฟ : ความรู้ทั่วไปด้านวิศวกรรมรถไฟ”. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- [2] มานะชัย วัฒนหัตถกรรม และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. 2559. “ระบบควบคุมรถไฟและการอาณัติสัญญาณเบื้องต้น”. พิมพ์ครั้งที่ 1. ปทุมธานี : สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.
- [3] ทปกร เหมือนเตย ธนวิชญ์ อนุวงศ์พิณิช อลงกรณ์ วิจิตรธนสาร และวันวิสา ชัชวงษ์ “ระบบจัดตารางการเดินรถ (Train Timetable Scheduling System)” งานประชุมวิชาการระบบขนส่งทางรางแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3 (TRAS2016) 1-2 กันยายน 2559 กรุงเทพมหานคร.
- [4] ข้อมูลการเดินรถไฟ. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.railway.co.th>.
- [5] Stoivila, S. and Sidi, B. “CREATING a GRAPHIC TRAIN SCHEDULE in MS EXCEL”.
- [6] “รายละเอียดข้อมูลโค้งในแขวงบำรุงทางศรีราชา”. กองบำรุงทางเขตฉะเชิงเทรา ศูนย์บำรุงทางสายตะวันออก ฝ่ายการช่างโยธา การรถไฟแห่งประเทศไทย
- [7] “พิภคทางลาดของทางแขวงบำรุงทางศรีราชา”. กองบำรุงทางเขตฉะเชิงเทรา ศูนย์บำรุงทางสายตะวันออก ฝ่ายการช่างโยธา การรถไฟแห่งประเทศไทย
- [8] มานะชัย วัฒนหัตถกรรม. 2557. “การขับเคลื่อนขบวนรถไฟ”. [สไลด์]. กรุงเทพฯ : ศูนย์วิศวกรรมเครื่องกล การรถไฟแห่งประเทศไทย.
- [9] ตารางเวลาการเดินรถ. [Online]. เข้าถึงได้จาก : <http://www.railway.co.th/checktime/checktime.asp>
- [10] Ingo A. Hansen, JornPachl. “RAILWAY TIMETABLE & TRAFFIC Analysis, Modeling and Simulation”. Eurailpress. 2008.
- [11] Jimmy Judge. “How to make a timetable using Excel or any spreadsheet program”. 19 September 2009.
- [12] Jorn Pachl. “Railway Operation and Control, 2<sup>nd</sup> edition”. Gorham Printing. Centralia. 2009
- [13] Ingo A. Hansen. “Railway Network Timetabling and Dynamic Traffic Management”. 2<sup>nd</sup> International Conference on Recent Advances in Railway Engineering (ICRARE 2009). 27-28 September 2009.
- [14] Arman Sajedinejad, Soheil Mardani, Erfan Hasannayebi, S. Ahmad Reza Mir Mohammadi K., Alireze Kabirian. “SIMARAIL: Simulation based optimization software for scheduling railway network”. 9 February 2012.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [15] A. Nash and M.Ullius. “Optimizing railway timetable with OpenTimeTable”. WIT Press. 2004.
- [16] A.A Trani. “CEE 3604 Rail Transportation: Addendum Rail Resistance Equations”. Transportation Engineering. VirginiaTech. 2012.
- [17] ML Nicolussi. “A Brief Introduction to Locomotive Application”. Transportation System-Systems Integration Engineering. Worldwide<sup>TM</sup>. August 2000.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.  
ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

1. ทปกร เหมือนเตย ธนวิชญ์ อนุวงศ์พินิช อลงกรณ์ วิจิตรธนสาร และวันวิสา ชัชวงษ์ “ระบบจัดตารางการเดินทาง (Train Timetable Scheduling System)” งานประชุมวิชาการระบบขนส่งทางรางแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 3 (TRAS2016) 1-2 กันยายน 2559 กรุงเทพมหานคร.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ-นามสกุล นายทปกร เหมือนเตย
- วัน เดือน ปีเกิด 22 กรกฎาคม 2534
- ที่อยู่ 26/40 ซ. 3 ถ. พระยาสุเรนทร์ แขวง-เขตคันนายาว กรุงเทพฯ  
10230
- ประวัติการศึกษา 2547-2552 โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) ๒  
2556 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสารสนเทศ  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ความชำนาญเฉพาะด้าน
- 1) ระบบสารสนเทศและสื่อสาร
  - 2) ระบบอัตโนมัติสัญญาณรถไฟและการสื่อสาร
  - 3) ระบบควบคุมรถไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้