

การทำขิมมูละชั้นสำหรับระบบควบคุมการเดินรถไฟฟ้า

วิเชียร ชูติมาสกุล¹ และ พีรพล สมภพเจริญ²

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมการจราจรรถไฟฟ้า เพื่อให้ได้รูปแบบของตารางเวลาการเดินรถไฟฟ้า ที่สามารถควบคุมเวลาการเดินรถไฟฟ้าระหว่างสถานีตลอดทั้งโครงการ โดยอาศัยหลักการทางด้านการคำนวณสมการทางฟิสิกส์ในเรื่องของการเคลื่อนที่ของนิวตัน ให้ได้มาซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับค่าเวลาการเดินรถในแต่ละสถานี ผลลัพธ์ที่ได้นี้จะเป็นตัวแปรในการจำลองรูปแบบการเดินรถไฟฟ้าในรูปแบบตารางเวลาในการปล่อยรถไฟฟ้าออกจากสถานี การระบุเส้นทางการเดินรถ ระยะทางระหว่างสถานี เวลาระหว่างสถานี และเวลารวมในการจัดตารางเวลา เพื่อควบคุมการเดินรถไฟฟ้าให้เกิดประสิทธิภาพและความปลอดภัย

คำสำคัญ : การเดินรถ/รถไฟฟ้า/ขิมมูละชั้น/การวิเคราะห์ระบบ

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ

² นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ

The Simulation of Electric Train Traffic Controlling System

Wichian Chutimaskul ¹ and Peerapol Somphopharoen ²

King Mongkut's University of Technology Thonburi

Abstract

This paper is concerned with the analysis and design of electric train traffic controlling system in order to formulate the model and schedule of electric train travelling between each station of the whole system. The methodology is based on the movement theory of Newton's law. The physical equations involve with the distance and travelling time between each station. The results from these equations are employed as variables to define the travelling model for electric train. It is also used to calculate the operating schedule of electric train from each station. The study emphasises the travelling route, the distance and travelling time between each station, and the total time, which are applied to control the electric train traffic to make the system robust and secure.

Keywords : Traffic/Electric Train/Simulation/System Analysis

¹ Assistant

² Graduate Student, School of Information Technology

1. บทนำ

ประเทศที่พัฒนาแล้วนั้นนอกจากการติดต่อสื่อสารที่ดีแล้ว ยังมีระบบการขนส่งมวลชนภายในประเทศที่ดีด้วย เช่น ญี่ปุ่น เยอรมัน อังกฤษ และสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีระบบขนส่งมวลชนโดยเฉพาะระบบรถไฟฟ้าที่มีความทันสมัย รวดเร็ว ความปลอดภัย และตรงต่อเวลา ปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ระบบรถไฟฟ้ามีความสมบูรณ์ คือการมีระบบการควบคุมการจราจรที่ดี โดยมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ และคอมพิวเตอร์สำหรับงานวิศวกรรม การควบคุมระบบการเดินรถไฟฟ้าที่มีความสลับซับซ้อน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเส้นทางการติดต่อเชื่อมโยงเป็นเครือข่ายการเดินรถไฟฟ้า

ประเทศไทยได้ให้ความสำคัญระบบรถไฟฟ้าโดยเริ่มต้นการก่อสร้างแล้ว เพื่อให้เป็นระบบรถไฟฟ้าที่มีความทันสมัยทัดเทียมประเทศที่พัฒนาแล้ว โดยพิจารณาปัญหาที่เคยเกิดขึ้นจากต่างประเทศและนำมาปรับปรุงแก้ไขให้เข้ากับสภาพแวดล้อมของประเทศไทย ซึ่งจะทำให้เกิดข้อผิดพลาดน้อยลง นับว่าเป็นผลดีต่อระบบโดยเฉพาะอย่างยิ่งระบบควบคุมการจราจรของรถไฟฟ้าที่ต้องการความถูกต้องสูง บทความวิจัยนี้เน้นการอธิบายวิธีการคำนวณและผลลัพธ์ ที่เกี่ยวข้องกับ การควบคุมระบบการจราจรของรถไฟฟ้าเบื้องต้น เพื่อเป็นแนวคิดที่สามารถประยุกต์ใช้กับสภาพแวดล้อมต่างๆ ได้

2. การเดินรถไฟฟ้า

ระบบการเดินรถไฟฟ้า ได้ทำการศึกษาวิเคราะห์และออกแบบการเดินรถ เวลาที่ใช้เดินรถและ จอดรระหว่างสถานี ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบ คือ อัตราเร่งของรถไฟฟ้า (maximum acceptable acceleration rates) ระยะทางระหว่างสถานี (distance between the stations) ความเร็วของรถไฟฟ้า (limit of speed capability of train) ความเร็วเฉลี่ยตลอดเส้นทาง อัตราในการหยุดรถ (desired overall line-haul travel speeds, including stop) อัตราการชะลอของรถไฟฟ้า (maximum acceptable deceleration or braking rate) และ เวลาจอดที่สถานี รวมทั้งปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบการเดินรถไฟฟ้าคือ น้ำหนักของผู้โดยสาร [1-5]

การศึกษานี้วิเคราะห์ระบบการควบคุมการจราจรรถไฟฟ้าในประเทศไทยของโครงการรถไฟฟ้า มหานคร นอกจากคำนึงถึงปัจจัยดังกล่าวข้างต้นแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลกระทบต่อระบบดังนี้ คือ [6, 7]

- เวลาในการกลับรถไฟฟ้า (turnaround time at terminal)
- ระยะทางที่ใช้ในการเร่งและหยุดรถไฟฟ้า (distance used to accelerate and brake)
- เวลาที่ใช้เร่งและหยุดรถไฟฟ้า (time used to accelerate and brake)
- ระยะทางที่ใช้ความเร็วสูงสุด (distance to run at constant maximum speed)
- เวลาที่ใช้เมื่อความเร็วสูงสุด (time spend at constant maximum speed)

การศึกษาวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อระบบน้อยสามารถนำออกจากการคำนวณ เพราะมีนัยสำคัญหรือผลกระทบต่อระบบน้อย แต่อย่างไรก็ตามยังมีปัจจัยบางอย่างที่เกี่ยวข้องและมีผลต่อระบบคือ เวลาในการจอดรอรับผู้โดยสารระหว่างสถานี รวมทั้งการคำนวณยังไม่ครอบคลุมและละเอียดเพียงพอ จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาทั้งทางด้านทฤษฎีและการคำนวณโดยอาศัยหลักทางด้านคณิตศาสตร์สำหรับวิศวกรรม ผลการศึกษาวิเคราะห์สามารถคำนวณหาเวลาการเดินทางไฟฟ้าระหว่างสถานี ให้ครอบคลุมถึงปัญหาต่างๆ ได้

3. ปัจจัยที่มีผลต่อการควบคุมการจราจรรถไฟฟ้า

ตัวแปรที่มีผลกระทบต่อระบบควบคุมการจราจรของรถไฟฟ้า เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สามารถนำไปสร้างตารางเวลาการเดินทางนั้น สามารถจำแนกตัวแปรได้ดังต่อไปนี้คือ จำนวนสถานี ระยะทางระหว่างสถานี อัตราเร่งและอัตราในการหยุดรถไฟฟ้า ความเร็วของรถไฟฟ้าสูงสุด ความเร็วเฉลี่ยเวลาในการหยุดรอรับผู้โดยสารในแต่ละสถานี และน้ำหนักผู้โดยสาร

3.1. จำนวนสถานี

จำนวนสถานี (number of stations : n) เป็นตัวแปรที่บอกจำนวนสถานีในโครงการที่ต้องการออกแบบระบบควบคุมจราจรรถไฟฟ้าทั้งหมด

3.2. ระยะทางระหว่างสถานี

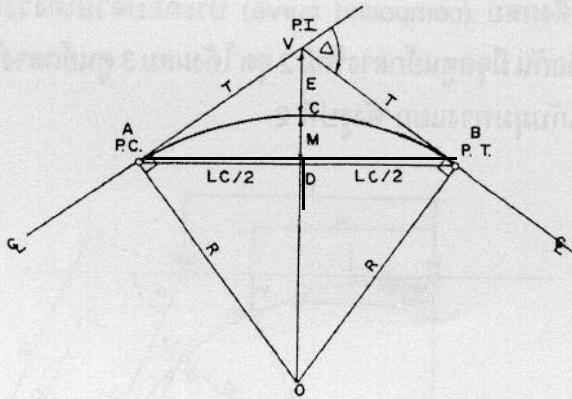
ระยะทางระหว่างสถานี (distance between stations : s) เป็นตัวแปรที่สำคัญในการพัฒนาระบบ โดยเส้นทางระหว่างสถานีสามารถจำแนกออกได้ดังนี้

- เส้นทางตรง (straight line) เป็นเส้นทางตรงที่รถไฟฟ้าสามารถเร่งได้ถึงความเร็วสูงสุด (maximum speed)

- เส้นทางโค้งตามแนวตั้ง (vertical curve) ในการออกแบบระบบรถไฟฟ้า นั้น เส้นทางโค้งตามแนวตั้งจะไม่ค่อยมีผลกระทบต่อความเร็วมากเท่าไร เนื่องจากการออกแบบทางโค้งจะมีรัศมีที่น้อยมาก หรือถ้ามีรัศมีมากส่วนโค้งก็จะมีความโค้งมากพอที่จะรองรับถึงความเร็วสูงสุด ซึ่งทำให้ความเร็วของรถไฟฟ้าในเส้นทางโค้งตามแนวตั้งจะมีเท่ากับเส้นทางตรง

- เส้นทางโค้งตามแนวนอน (horizontal curve) การออกแบบทางโค้งนี้จะมีผลกระทบมากซึ่งต้องพิจารณาถึงความปลอดภัยและความเร็ว โดยสามารถแบ่งทางโค้งที่ใช้ออกแบบระบบรถไฟฟ้าได้ดังนี้

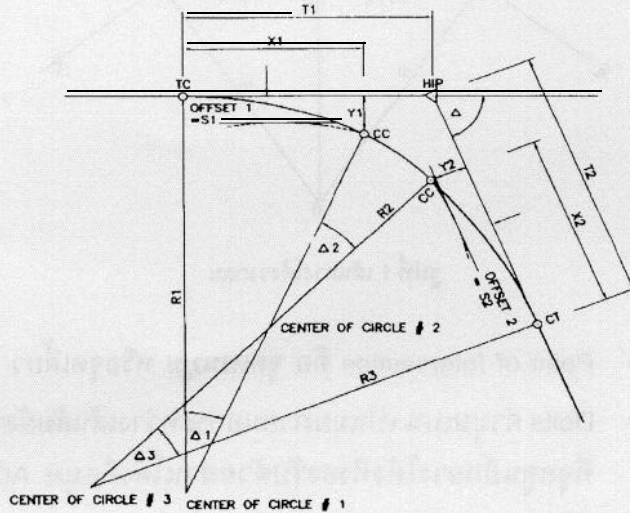
- 1) เส้นทางโค้งวงกลม (circular curve) ทางโค้งมีรัศมีเท่ากันตลอด และมีจุดศูนย์กลางของรัศมีจุดเดียว



รูปที่ 1 เส้นทางโค้งวงกลม

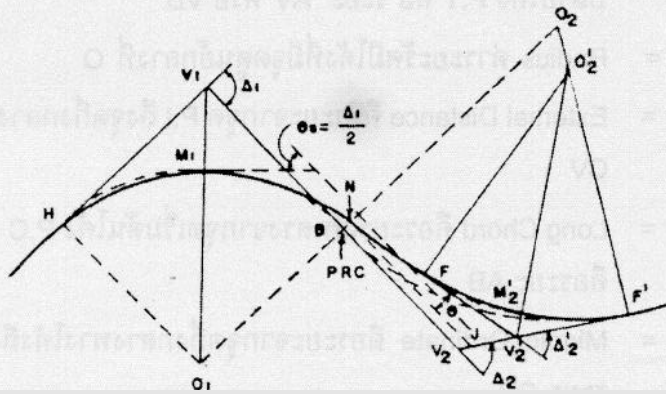
- P.I = Point of Intersection คือ จุดเบนมุม หรือจุดเลี้ยว
- Δ = Delta ค่ามุมเบน เป็นมุมภายนอกระหว่างเส้นสัมผัสทั้งสอง มีค่าเท่ากับมุมที่จุดศูนย์กลางโค้งที่รองรับด้วยส่วนโค้งคือมุม AOB ซึ่งรองรับส่วนโค้ง AB(L)
- P.C = Point of Curvature จุดเริ่มต้นโค้งที่เบี่ยงเบนออกจากเส้นตรงคือจุด A
- P.T = Point of Tangency จุดสิ้นสุดโค้ง ซึ่งเข้าบรรจบกับเส้นตรงคือจุด B
- T = Tangent Distance ระยะเส้นสัมผัสจากจุด P.I ถึงจุดเริ่มต้นโค้ง P.C หรือปลายโค้ง P.T คือ ระยะ AV หรือ VB
- R = Radius ค่าระยะรัศมีโค้งที่มีจุดศูนย์กลางที่ O
- E = External Distance คือ ระยะจากจุด P.I ถึงจุดกึ่งกลางของโค้ง AB คือระยะ CV
- LC = Long Chord คือระยะเส้นตรงจากจุดเริ่มต้นโค้ง P.C ถึงจุดสิ้นสุดโค้ง P.T คือระยะ AB
- M = Middle Ordinate คือระยะจากจุดกึ่งกลางทางโค้งถึงจุดกึ่งกลางคอร์ดคือระยะ CD
- L = Length of Curve คือระยะความยาวทางโค้ง AB
- D = Degree of Curve มุมที่จุดศูนย์กลางรองรับส่วนโค้งยาว 100 เมตร หรือคอร์ดยาว 100 เมตร ใช้เป็นค่ากำหนดความโค้ง ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่ารัศมีโค้ง R โดยที่ $R = 5729.58/D$ (R มีหน่วยเป็นเมตร ส่วน D มีหน่วยเป็นองศา)

- 2) เส้นทางโค้งผสม (compound curve) ประกอบด้วยโค้งวงกลม มีรัศมีขนาดต่างกัน มาเชื่อมต่อกัน มีจุดศูนย์กลางรัศมี 2 จุด โค้งผสม 3 ศูนย์กลางใช้ลบมุมทางแยกให้ลัทธิกลมกลืนกับมุมทางแยก ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 เส้นทางโค้งผสม

- 3) เส้นทางโค้งผสมย้อนทาง (reverse curve) มีโค้งวงกลม 2 โค้งต่อเนื่องกัน ลักษณะที่จุดศูนย์กลางของโค้งอยู่ในทิศตรงกันข้าม ดังรูป 3



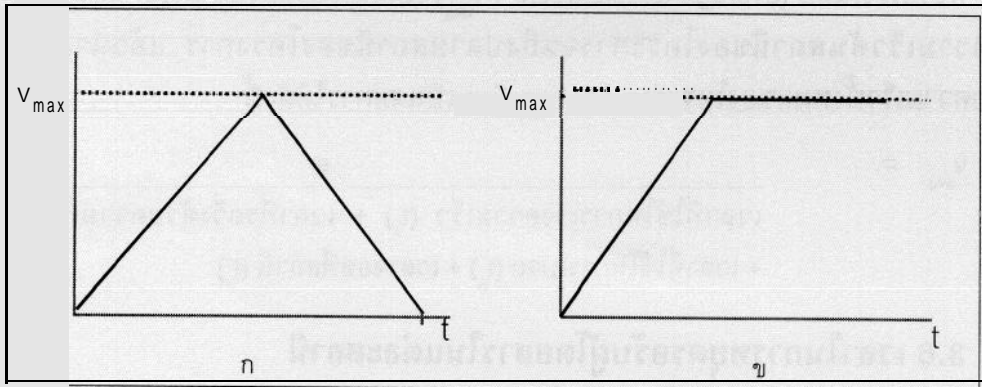
รูปที่ 3 เส้นทางโค้งผสมย้อนทาง

3.3. อัตราเร่งและอัตราในการหยุดรถไฟฟ้า

อัตราเร่งและอัตราในการหยุดรถไฟฟ้า (acceleration and service breaking rate : a) เป็นตัวแปรที่ใช้กำหนดอัตราเร่งของรถไฟฟ้า เพื่อเพิ่มความเร็วในการเคลื่อนที่ให้ได้ความเร็วที่ต้องการควบคุม หรือความเร็วสูงสุด และใช้อัตราในการหยุดรถเป็นตัวแปรในการลดความเร็วลงในขณะที่แล่นเข้าโค้งหรือขณะหยุดรถเมื่อถึงสถานี

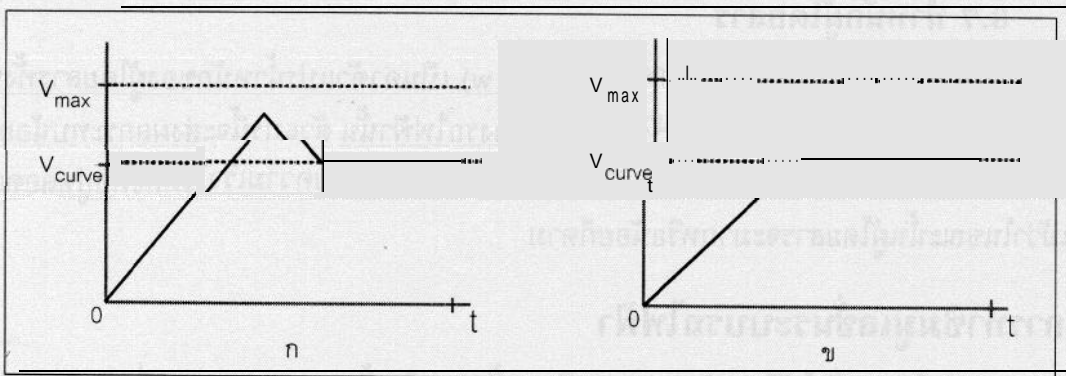
3.4. ความเร็วของรถไฟฟ้าสูงสุด

ความเร็วของรถไฟฟ้าสูงสุด (maximum speed : v) เป็นตัวแปรในการกำหนดความเร็วสูงสุดของรถไฟฟ้า ส่วนมากความเร็วนี้จะเหมาะสมสำหรับเส้นทางตรงและเส้นทางโค้งตามแนวตั้ง ทั้งนี้จะต้องมีระยะทางที่เพียงพอที่จะสามารถวิ่งได้ถึงความเร็วสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 4 ส่วนเส้นทางโค้งตามแนวนอน มักจะมีการลดความเร็วลงในขณะเข้าโค้ง ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 4 กราฟแสดงความเร็วสูงสุดกับเวลา

จากรูปที่ 4ก. แสดงการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าจากความเร็วต้นเริ่มต้นจากศูนย์จนถึงความเร็วสูงสุดซึ่งไม่จำเป็นต้องสูงเท่า v_{max} ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างสถานี รถเร่งความเร็วไปถึงความเร็วระดับหนึ่ง $v < v_{max}$ ก็ต้องเบรกเพื่อจอดสถานีถัดไป ส่วนรูปที่ 4ข. แสดงการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าจากความเร็วต้นจากศูนย์จนถึงความเร็วสูงสุด และเคลื่อนที่ต่อด้วยความเร็วคงที่จนกระทั่งลดความเร็วลงเมื่อจอดเข้าสถานี



รูปที่ 5 กราฟแสดงความเร็วขณะเข้าโค้งกับเวลา

จากรูปที่ 5ก. แสดงการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าจากความเร็วต้นจากศูนย์จนถึงความเร็ว ณ จุดหนึ่งๆ และลดความเร็วลงในขณะเข้าเส้นทางโค้ง และเคลื่อนที่ต่อไปด้วยความเร็วคงที่ในเส้นทาง

โค้งนั้น จนพ้นทางโค้งแล้วเร่งความเร็วขึ้นอีกครั้งหรือลดความเร็วลงจนกระทั่งจอดเข้าสถานี ส่วนรูปที่ 5 ข. เป็นกราฟแสดงการเคลื่อนที่ของรถไฟจากความเร็วต้นจากศูนย์จนถึงความเร็วขณะเข้าโค้ง และเคลื่อนที่ต่อด้วยความเร็วคงที่ไปยังอีกสถานี

3.5 ความเร็วเฉลี่ย

ความเร็วเฉลี่ย (average acceleration : v_{avg}) เป็นผลรวมของความเร็วที่ได้จากการคำนวณ ตั้งแต่ความเร็วต้นสถานีของโครงการจนถึงปลายสถานีของโครงการ แล้วนำผลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยความเร็วทั้งหมดของโครงการ สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$v_{avg} = \frac{s}{\text{เวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็ว } (t_u) + \text{เวลาที่วิ่งด้วยความเร็วคงที่ } (t_{v_{max}}) + \text{เวลาที่ใช้ในการเบรค } (t_b) + \text{เวลาจอดที่สถานี } (t_s)}$$

3.6 เวลาในก¹%หยุดรอรับผู้โดยสารในแต่ละสถานี

เวลาในการหยุดรอรับผู้โดยสารในแต่ละสถานี (t_s) เป็นตัวแปรที่สามารถกำหนดเวลาในการเดินรถระหว่างสถานีหรือตลอดทั้งโครงการ โดยเป็นค่าตัวแปรที่ถูกกำหนดไว้ก่อนล่วงหน้าว่าในแต่ละสถานีจะสามารถหยุดรอรับผู้โดยสารได้เป็นเวลาเท่าไร หน่วยที่ใช้เป็นวินาทีหรือนาที และนำค่าไปรวมกับค่าที่ได้จากการคำนวณเวลาการเดินทางรถไฟระหว่างสถานี ก็จะทำให้ทราบเวลาในการเดินรถในช่วงระหว่างสถานีนั้นรถไฟคันแรกจะใช้เวลาเท่าใด ก่อนที่รถไฟคันถัดไปจะสามารถเดินรถได้ และค่าได้จากผลรวมนี้ก็จะสามารถนำไปสร้างตารางเวลาในการเดินรถไฟเพื่อควบคุมการจราจรของระบบรถไฟ

3.7 น้ำหนักผู้โดยสาร

น้ำหนักผู้โดยสาร (weight of passenger : w) เป็นค่าตัวแปรน้ำหนักของผู้โดยสารทั้งหมดที่อยู่บนรถไฟ แต่เนื่องจากการคำนวณการวิ่งของรถไฟนั้น ตัวแปรนี้จะส่งผลกระทบต่อผลกระทบน้อยมาก จึงไม่จำเป็นที่จะต้องมาคำนวณ เนื่องจากรถไฟจะวิ่งรักษาระดับความเร็วให้คงที่อยู่ตลอดเวลา ถึงแม้ว่าในขณะที่นั้นผู้โดยสารจะมากหรือน้อยก็ตาม

4. การทำซิมมูลชันระบบรถไฟ

การทำซิมมูลชันได้มีการจำแนกออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการคำนวณซึ่งเป็นการอธิบายวิธีการการคำนวณและวิเคราะห์ปัญหากรณีต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อระบบรถไฟ เพื่อหาค่าเวลาระหว่างสถานี และขั้นตอนการทำซิมมูลชันระบบรถไฟ เป็นส่วนที่แสดงถึงผลกระทบต่างๆ เมื่อทำการเปลี่ยนค่าในตัวแปรว่าส่งผลกระทบต่อระบบอย่างไร โดยผลที่ได้จากการทำซิมมูลชันจะแสดงในรูปแบบของตารางเวลาเดินรถไฟ ซึ่งแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

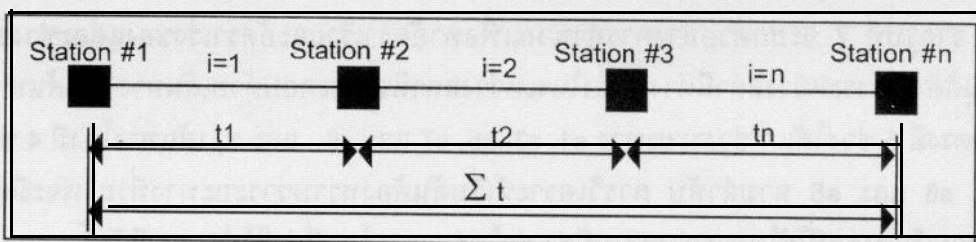
4.1 ขั้นตอนการคำนวณ

การคำนวณหาค่าเวลาในการเดินรถไฟฟ้าตลอดทั้งโครงการนั้น เกิดจากค่าผลรวมที่หาได้จากเวลาการเดินรถไฟฟ้าระหว่างสถานีนั่นเอง มีรูปแบบสมการ ดังแสดงในรูปที่ 6 ค่าของเวลาคือ

$$t \text{ ของทั้งโครงการ} = \sum_{i=1}^n t_i \quad (1)$$

โดยที่ i คือจำนวนสถานี มีค่าตั้งแต่ 1, 2, ..., n

t_i คือเวลาที่ใช้ในการเดินรถระหว่างสถานี



รูปที่ 6 ตัวอย่างแสดงเส้นทางเดินรถ

เนื่องจากระยะทางระหว่างสถานี จะประกอบด้วยเส้นทาง 3 แบบ ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น นอกจากคำนึงถึงแนวเส้นทางแล้ว อีกส่วนหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงก็คือความเร็วในการวิ่งของรถไฟฟ้า ซึ่งสามารถแยกได้เป็น 2 กรณี โดยมีสมการพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณหาระยะทาง (s) ความเร็วต้นทาง (u) ความเร็วปลายทาง (v) เวลาที่ใช้ (t) มี 4 สมการพื้นฐานดังนี้คือ

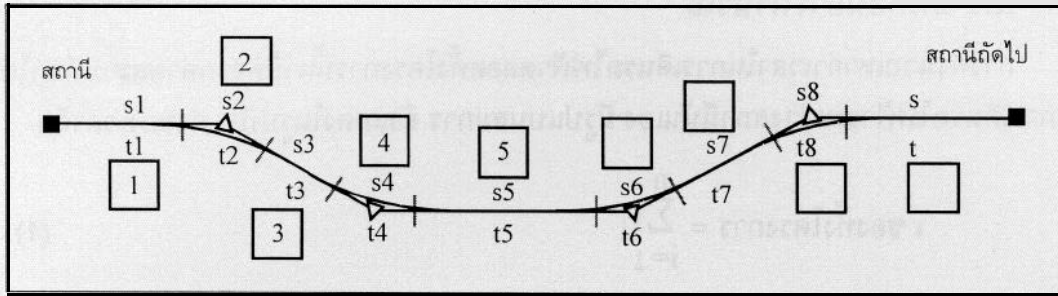
$$v^2 = u^2 + 2as \quad (2)$$

$$v = u + at \quad (3)$$

$$s = ut + \frac{1}{2}at^2 \quad (4)$$

$$s = \frac{(u+v)}{2} \cdot t, \text{ a คงที่} \quad (5)$$

กรณีที่รถไฟฟ้าวิ่งด้วยความเร็วสูงสุดและไม่ต้องลดความเร็วเมื่อถึงเส้นโค้งตามแนวออน ทั้งนี้การออกแบบเส้นทางโค้งแบบตามแนวออนรัศมีความโค้งต้องสามารถรองรับความเร็วที่เหมาะสมและความเร็วสูงสุดได้ โดยที่รถไฟฟ้าไม่วิ่งออกนอกราง เนื่องจากรัศมีความโค้งมีความโค้งพอที่จะรองรับความเร็วในขณะนั้นได้ ส่วนในกรณีที่รถไฟฟ้าวิ่งด้วยความเร็วไประยะหนึ่งแล้วต้องลดความเร็วลงในตอนวิ่งเข้าโค้ง และวิ่งด้วยความเร็วคงที่ในทางโค้ง เมื่อหลุดออกจากโค้งก็เร่งความเร็วขึ้นถึงความเร็วที่เหมาะสม หรืออาจจะถึงความเร็วสูงสุดอีกครั้งในเส้นทางตรง ซึ่งกรณีนี้ก็จะมีตัวแปรความเร็ว 2 ตัวแปรเข้ามาเกี่ยวข้อง คือความเร็วสูงสุดและความเร็วขณะเข้าโค้งโดยรายละเอียดขั้นตอนการคำนวณสามารถดูเพิ่มเติมจากภาคผนวก ก.

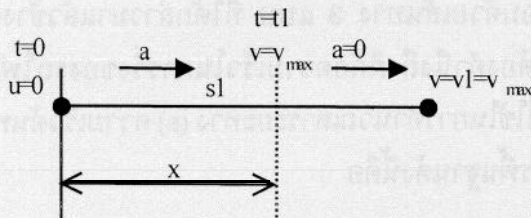


รูปที่ 7 ตัวอย่างแนวเส้นทางระหว่าง 2 สถานีของรถไฟฟ้า

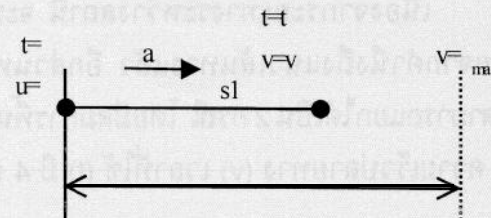
4.1.1 ตัวอย่างการคำนวณ

จากรูปที่ 7 จะยกตัวอย่างการคำนวณเพื่อหาอัตราเร็วและอัตราเร่งของแต่ละช่วงระยะทาง โดยสมมุติค่าเวลาระหว่างสถานีต่างๆ ซึ่งในระหว่างสถานีจะประกอบด้วยเส้นทาง 2 เส้นทางคือ ก) เส้นทางตรงมี 5 ช่วงได้แก่ ช่วงระยะทาง s1, s3, s5, s7 และ s9 และ ข) เส้นทางโค้งมี 4 ช่วงได้แก่ s2, s4, s6 และ s8 ตามลำดับ การวิเคราะห์เริ่มต้นต้องทราบวาระยะทางที่รถไฟจะมีความเร่งจนถึงความเร็วสูงสุดที่ใช้ในการออกแบบมีค่าเท่าไร (x=?) โดยที่ค่านี้ได้ 2 กรณีดังนี้

กรณีที่ 1 ภายในระยะทาง



กรณีที่ 2 เกินระยะทาง



การหาค่า x ด้วยสมการที่ (2) และ (3) โดยที่ $v=v_{max}$, $u=0$, $s=x$ ดังนี้

$$v_{max}^2 = 0 + 2ax$$

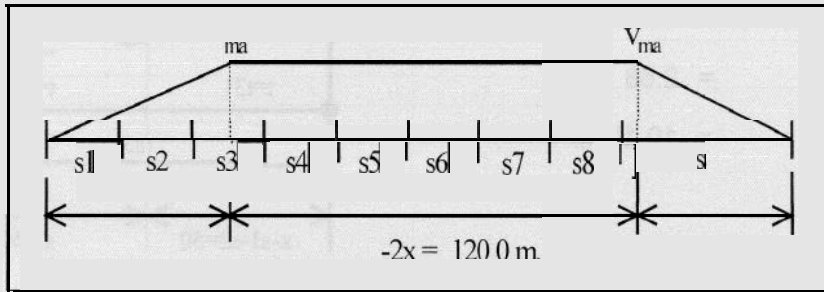
$$\text{และ } v_{max} = 0 + at$$

$$x = (v_{max}^2) / 2a \dots\dots\dots(a)$$

$$t = v_{max} / a \dots\dots\dots(b)$$

จากนั้นตรวจสอบว่า $x > s1$ หรือไม่ ถ้ามากกว่า แสดงว่าเป็นกรณีที่ 2 มิฉะนั้นเข้าข่ายกรณีที่ 1 และจะทราบว่า ค่า x ตกอยู่ในช่วงใด

จากตัวอย่างถ้าสมมติว่า ค่าที่ได้จากโปรแกรมหาระยะทางเป็นดังนี้ (ดูจากรูปที่ 7 ประกอบ) $s1=100$ m., $s2=50$ m., $s3=200$ m., $s4=100$ m., $s5=400$ m., $s6=100$ m., $s7=150$ m., $s8=100$ m., $s9=400$ m. และเกณฑ์ในการออกแบบ โดยสมมุติค่า $v_{max} = 20$ m/s ค่าอัตราเร่งและอัตราเบรคสมมุติ $a=1.0$ m/s² แทนค่าดังกล่าวลงในสมการ (a) และ (b) จะได้ $x=200$ m. และ $t=20$ s. และผลลัพธ์ที่ได้จะพบว่า x อยู่ในช่วงที่ 3 เพราะ $s1+s2=150$ m. ซึ่งน้อยกว่า x ดังนั้นในช่วงที่ 1 และ 2 จะมีการเคลื่อนที่แบบกรณีที่ 2 ดูรูปที่ 8



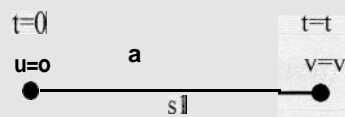
รูปที่ 8

การหาค่า t_1 จากสมการที่ (4) แทนค่า

$$s_1 = 0 \cdot t_1 + \frac{1}{2}(1.0)(t_1)^2$$

$$100 = 0 + (0.5)(t_1)^2$$

$$t_1 = 14.14 \text{ s.}$$



จากนั้นหา v_1 เพราะจะให้เป็นความเร็วต้นของช่วงต่อไป โดยใช้สมการที่ (3) ผลลัพธ์จากการแทนค่าคือ

$$v_1 = 0 + 1.0 \cdot t_1 = 14.14 \text{ m/s}$$

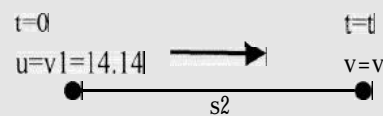
การหาค่า t_2 จากสมการที่ (4) แทนค่า

$$s_2 = v_1 \cdot t_2 + \frac{1}{2}a(t_2)^2$$

$$50 = (14.14)(t_2) + \frac{1}{2}(1.0)(t_2)^2$$

$$t_2 = 3.179 \text{ s. ในทำนองเดียวกัน}$$

$$v_2 = 17.319 \text{ m/s}$$



การหาค่า t_3 โดยที่ทราบว่าเป็นแบบกรณีที่ 1 โดยให้ $t_3 = t_{31} + t_{32}$ ดังรูป

จากสมการที่ (4) แทนค่าหา t_{31}

$$50 = v_2 \cdot t_{31} + \frac{1}{2}a(t_{31})^2$$

$$= (17.319)(t_{31}) + \frac{1}{2}(1.0)(t_{31})^2$$

ดังนั้น $t_{31} = 2.68 \text{ s. ในทำนองเดียวกัน}$

$$v_{31} = v_{\max} = 20 \text{ m/s}$$

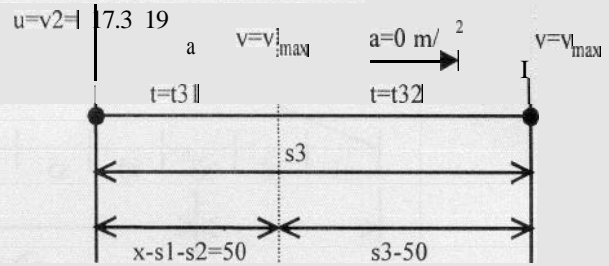
จากสมการที่ (4) แทนค่าหา t_{32}

$$s_3 - 50 = v_{\max} \cdot t_{32} + \frac{1}{2}a(t_{32})^2$$

$$150 = (20)(t_{32}) + \frac{1}{2}(0)(t_{32})^2$$

$$t_{32} = 7.5 \text{ s.}$$

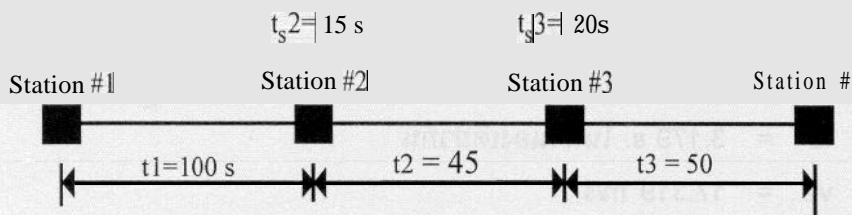
เพราะว่า $t_3 = t_{31} + t_{32}$
 $= 2.68 + 7.5$
 $= 10.18 \text{ s.}$



การหาค่า t_4 เนื่องจากความเร่งจะคงที่คือ 0 m/s^2 (ความเร็วคงที่ $v_{\text{max}} = 20 \text{ m/s}$) จนถึงจุดที่ลดความเร็วเพื่อลดดลไกลทาง ใช้สมการที่ (4) แทนค่าหา t_4 พบว่า $t_4 = v_{\text{max}} * t_4$

ดังนั้น $t_4 = 100/20 = 5 \text{ s.}$

การคำนวณหาเวลาที่ใช้ช่วง $\sum s_i - 2x$ พิจารณาจาก $s = vt$ โดยที่ $s = \sum s_i - 2x$, $v = v_{\text{max}}$ เพราะ $a=0$ ในช่วงนี้ เพราะฉะนั้นจะได้ $t = 1200/20 = 60 \text{ s.}$ เมื่อนำมารวมกับเวลาที่ใช้ในการเร่งความเร็วจาก 0 ถึง v_{max} และเวลาที่ใช้ในการลดความเร็วจาก v_{max} ถึง 0 ซึ่งเท่ากับ 20 s. ทั้งสองกรณี ผลลัพธ์ของเวลาที่ใช้จากสถานีต้นทางถึงสถานีปลายทางระหว่างสถานีเท่ากับ $60 + 20 + 20 = 100 \text{ s.}$ ดังนั้นเวลาจากสถานีต้นทางถึงสถานีปลายทางระหว่างสถานีรวมกับเวลาที่จอดรับผู้โดยสาร จะเท่ากับเวลาการเดินทางไฟฟ้าระหว่างสถานีจริง เมื่อทำการคำนวณเวลาแต่ละสถานีเรียบร้อยแล้วตลอดทั้งโครงการแล้ว เราสามารถหาเวลาการเดินทางทั้งหมดจากต้นทางของโครงการจนถึงปลายทางของโครงการได้ ดังแสดงในตัวอย่างต่อไปนี้



จากรูปเป็นการหาเวลาการเดินทางไฟฟ้าจากสถานีที่ 1 ถึงสถานีที่ 2 จริง $= t_1 + t_2 = 100 + 15 = 115 \text{ s.}$ และจากสถานีที่ 2 ถึงสถานีที่ 3 จริง $= t_2 + t_3 = 45 + 20 = 65 \text{ s.}$ เพราะฉะนั้นเวลาการเดินทางทั้งหมดของทั้งโครงการคือ $115 + 65 + 50 = 230 \text{ sec.}$ จากการคำนวณเราสามารถนำค่ามาทำการประยุกต์ใช้ในการทำซิมูเลชันระบบการควบคุมเดินรถไฟฟ้าได้ เช่นการจัดตารางการเดินรถไฟฟ้า (Timetable) และระบบควบคุมสัญญาณไฟการเดินรถไฟฟ้า

4.2 การทำซิมูเลชันระบบการควบคุมการเดินรถไฟฟ้า

การทำซิมูเลชันของระบบควบคุมการเดินรถไฟฟ้านั้น สิ่งที่ต้องคำนึงถึงก็คือความปลอดภัยในการเดินรถไฟฟ้าระหว่างสถานี ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะอยู่ในรูปแบบของตารางเวลาในเดินรถไฟฟ้าที่เหมาะสม โดยที่การจัดตารางเวลาในการเดินรถไฟฟ้านั้นมีอยู่ 2 ตัวแปรที่ต้องคำนึงถึงก็คือ

1. เวลาในการปล่อยรถระหว่างขบวน (Tr) คือ เวลาการปล่อยรถไฟฟ้าระหว่างขบวนที่เริ่มต้นกับขบวนต่อมา โดยเวลาที่ปล่อยนี้สามารถจำแนกช่วงการปล่อยรถไฟฟ้าได้ 2 แบบ

แบบที่ 1. ในช่วงเวลาเร่งรัดหรือในช่วงเวลาธุรกิจ และเลิกธุรกิจ เป็นช่วงเวลาที่มีการใช้รถไฟฟ้ามากหรือเป็นช่วงเวลาที่ผู้โดยสารใช้บริการมาก เวลาที่ใช้ในการปล่อยรถส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 2-4 นาที

แบบที่ 2. ในช่วงเวลาที่ไม่เร่งรัด เป็นช่วงเวลาที่ปริมาณทั้งการใช้รถไฟฟ้าและการใช้บริการของผู้โดยสารน้อย เวลาที่ใช้การปล่อยรถไฟฟ้าในช่วง 4-10 นาที

2. เวลาในการจอดรอรับผู้โดยสารในแต่ละสถานี (Ts) โดยสามารถจำแนกช่วงเวลากการจอดรอรับในแต่ละสถานีได้ 2 แบบ

แบบที่ 1. ในช่วงเวลาเร่งรัดหรือในช่วงเวลาธุรกิจ และเลิกธุรกิจ เป็นช่วงเวลาที่มีการใช้รถไฟฟ้ามาก หรือเป็นช่วงเวลาที่ผู้โดยสารใช้บริการมาก เวลาที่ใช้ในการจอดรอรับส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 10-15 วินาที

แบบที่ 2. ในช่วงเวลาที่ไม่เร่งรัด เป็นช่วงเวลาที่ปริมาณทั้งการใช้รถไฟฟ้าและการใช้บริการของผู้โดยสารน้อย เวลาที่ใช้การจอดรอรับผู้โดยสารในแต่ละสถานีจะอยู่ในช่วง 15-25 วินาที

เมื่อพิจารณาตัวแปรทั้งสองข้างต้นพบว่าเป็นตัวแปรที่สำคัญในการทำซิมมูลেশันของระบบ ซึ่งปกติจะพิจารณาจากความต้องการของผู้โดยสาร (passenger demand) ความจุ (capacity) ของขบวนรถ และนโยบายของผู้ประกอบการ ซึ่งประยุกต์ทั้งในกรณีชั่วโมงเร่งด่วนและไม่เร่งด่วน จนกว่าได้ค่าเวลาของตัวแปรที่เหมาะสมเพื่อนำมาจัดตารางเวลาในการเดินรถไฟฟ้าระหว่างสถานี โดยที่ตัวแปรทั้งสองเข้าไปเกี่ยวข้องกับที่ได้ฝึก เวที เหนวเหม ในหัวข้อที่ 4.1 และสามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมจากผังงานในภาคผนวก ก.

การทำ Simulation ระบบรถไฟฟ้านี้ เราจะทำการแยกออกเป็น 3 กรณี คือ

1. ช่วงเวลาที่มีการจราจรแบบเร่งด่วน
2. ช่วงเวลาที่มีการจราจรแบบไม่เร่งด่วน
3. ช่วงเวลาแบบผสม คือ ทั้งกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 รวมกัน

ทั้งนี้เรากำหนดว่าในโครงการนี้มี 10 สถานี เวลาเริ่มทำการเดินรถไฟฟ้าตั้งแต่เวลา 8.00-18.00 น. มีรถไฟฟ้า 3 ขบวน และมีเวลาการเดินทางระหว่างสถานีที่ได้ผ่านการคำนวณ ดังนี้

กรณีแรกเป็นช่วงเวลาเร่งด่วน ($Tr=2$ min และ $Ts=17$ sec) สามารถนำมาจัดทำตารางเวลาในการเดินรถไฟฟ้าได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางเวลาในการเดินรถไฟฟ้าที่ได้จากการทำซิมูเลชัน กรณีที่ช่วงเวลาเร่งด่วน
(Tr=2 min และ Ts=10 sec)

สถานี	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
เวลาที่ใช้ (นาที)	10	15	12	20	23
ขบวนที่ 1	8.00.00-8.10.00	8.10.17-8.25.17	8.25.34-8.37.34	8.37.51-8.57.51	8.58.08-9.21.08
ขบวนที่ 2	8.02.00-8.12.00	8.12.17-8.27.17	8.27.34-8.39.34	8.39.51-8.59.51	9.00.08-9.23.08
ขบวนที่ 3	8.04.00-8.14.00	8.14.17-8.29.17	8.29.34-8.41.34	8.41.51-9.01.51	9.02.08-9.25.08
สถานี	6-7	7-8	8-9	9-10	
เวลาที่ใช้ (นาที)	13	16	22	10	
ขบวนที่ 1	9.21.25-9.34.25	9.34.42-9.50.42	9.50.59-10.12.59	10.13.16-10.23.16	
ขบวนที่ 2	9.23.25-9.36.25	9.36.42-9.52.42	9.52.59-10.14.59	10.15.16-10.25.16	
ขบวนที่ 3	9.25.25-9.38.25	9.38.42-9.54.42	9.54.59-10.16.59	10.17.16-10.27.16	

กรณีที่ 2 เป็นช่วงเวลาไม่เร่งด่วน (Tr=6 และ Ts=33) สามารถนำมาจัดทำตารางเวลาในการเดินรถไฟฟ้าได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตารางเวลาในการเดินรถไฟฟ้าที่ได้จากการทำซิมูเลชัน กรณีที่ช่วงเวลาไม่เร่งด่วน
(Tr=6 min และ Ts=33 sec)

สถานี	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
เวลาที่ใช้ (นาที)	10	15	12	20	23
ขบวนที่ 1	8.00.00-8.10.00	8.10.33-8.25.33	8.26.06-8.38.06	8.38.39-8.58.39	8.59.02-9.22.02
ขบวนที่ 2	8.06.00-8.16.00	8.16.33-8.31.33	8.32.06-8.44.06	8.44.39-8.04.39	9.05.02-9.28.02
ขบวนที่ 3	8.12.00-8.22.00	8.22.33-8.37.33	8.38.06-8.52.06	8.52.39-9.12.39	9.13.02-9.36.02
สถานี	6-7	7-8	8-9	9-10	
เวลาที่ใช้ (นาที)	13	16	22	10	
ขบวนที่ 1	9.22.35-9.35.35	9.36.08-9.52.08	9.52.41-10.14.41	10.15.14-10.25.14	
ขบวนที่ 2	9.28.35-9.41.35	9.42.08-9.58.08	9.58.41-10.20.41	10.21.14-10.31.14	
ขบวนที่ 3	9.36.35-9.49.35	9.50.08-10.06.08	10.07.41-10.29.41	10.30.14-10.40.14	

กรณีที่ 3 เป็นช่วงเวลาแบบผสม เป็นการผสมช่วงเวลาในการเดินรถไฟฟ้าในกรณีที่ 1 กับกรณี
ที่ 2 โดยมีการกำหนดช่วงเวลาในการเดินรถไฟฟ้า เช่น

ก. ช่วงเวลาเร่งด่วน ตั้งแต่เวลา 8.00-9.00 น. และ 16.00-18.00 น. ให้ $Tr=2$ นาที และ $Ts=17$ วินาที

ข. ช่วงเวลาไม่เร่งด่วน คือตั้งแต่เวลา 9.00-16.00 น. ให้ $Tr=6$ นาที และ $Ts=33$ วินาที ซึ่งค่า
ที่กำหนดเวลาในการเดินรถแบบผสมนี้จะต้องมีความชัดเจนและแน่นอน โดยที่ค่าดังกล่าว
ต้องมีการประเมินจากแหล่งข้อมูลต่างๆ เช่น ข้อมูลจากการสำรวจความเป็นไปในการใช้
บริการของผู้โดยสาร การคำนวณจากจำนวนรถไฟฟ้าที่มีอยู่ในโครงการ หรือคำนวณจาก
เส้นทางของโครงการ และเส้นทางที่เป็นโครงข่ายที่สลับซับซ้อน ข้อมูลของแหล่งข้อมูลเดิม
ที่มีการเดินรถ และข้อมูลจากการสุ่มตัวอย่างโดยอาศัยการสังเกตจากจำนวนผู้โดยสาร
ตามสถานีต่างๆ โดยเทียบกับจำนวนรถไฟฟ้าและระยะทางของเส้นทางระหว่างสถานีและทั้ง
โครงการ

การวิเคราะห์สภาวะในปัจจุบันนี้ส่วนใหญ่พบว่า เป็นการเดินรถไฟฟ้าโดยใช้ช่วงเวลาแบบผสม
ซึ่งเป็นกรณีที่มีความซับซ้อน และค่าที่ได้จะต้องมาจากแหล่งข้อมูลที่ได้มีการสำรวจและวิเคราะห์
มาอย่างละเอียด หรือจากแหล่งข้อมูลที่น่าเชื่อถือ

5. สรุปผล

รายงานการออกแบบระบบควบคุมการเดินรถไฟฟ้านี้ เป็นการศึกษาวิเคราะห์และออกแบบ
แนวทางการเริ่มต้นสร้างรูปแบบการจำลอง Graphics Animation เพื่อนำไปพัฒนาการเดินรถไฟฟ้า
สำหรับเส้นทางที่มีโครงข่ายที่สลับซับซ้อน ผลจากการออกแบบและจำลองการทำงานของระบบนั้น
จำเป็นต้องทราบข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับระบบรถไฟฟ้า ทั้งทางด้านการจราจร สัญญาณไฟ ตารางเวลา
การเดินรถไฟฟ้า คุณสมบัติของรถไฟฟ้า (เช่น ความเร็วสูงสุด อัตราเร่ง เป็นต้น) และวิธีการคำนวณหา
ค่าเวลาระหว่างสถานี เพื่อทำการวิเคราะห์และพิจารณาข้อจำกัดในกรณีต่างๆ อาทิ กรณีที่รถไฟฟ้า
วิ่งด้วยความเร็วสูงสุดและไม่ต้องลดความเร็วเมื่อถึงทางโค้ง และกรณีที่รถไฟฟ้าวิ่งด้วยความเร็ว
ไประยะหนึ่งแล้วต้องลดความเร็วลงในขณะเข้าโค้งและเร่งความเร็วเมื่อพ้นทางโค้ง รวมทั้งตัวแปรต่างๆ
เช่น ความเร็วสูงสุด ความเร็วเฉลี่ย อัตราเร่งและหยุดรถไฟฟ้า ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานของจราจร
ของรถไฟฟ้าจากกรณีดังกล่าวที่ทำการคำนวณสมการทางด้านฟิสิกส์ โดยอาศัยกฎการเคลื่อนที่
ในการหาระยะทางระหว่างสถานีและเวลาระหว่างสถานี เพื่อทำการจำลองในรูปแบบของตารางเวลา
การเดินรถไฟฟ้า ซึ่งพิจารณาเหตุการณ์ 3 สถานการณ์ คือช่วงเวลาที่เร่งด่วน ช่วงเวลาที่ไม่เร่งด่วน
และช่วงเวลาแบบผสม ซึ่งในทางปฏิบัติส่วนใหญ่ จะใช้กรณีแบบผสม เนื่องจากสภาวะปัจจุบันจะมีการ
คาบเกี่ยวของ 2 เวลา คือ ช่วงเวลาเร่งด่วนและช่วงเวลาไม่เร่งด่วน การวิเคราะห์และคำนวณเพื่อให้ได้
ผลลัพธ์ในรูปแบบการจัดตารางเวลาในการเดินรถไฟฟ้าซึ่งเป็นระบบควบคุมการเดินรถไฟฟ้าโดยคำนึงถึง
ความปลอดภัยในการเดินรถไฟฟ้า

5.1 งานวิจัยที่ควรทำต่อไป

1. ทำโปรแกรมระบบการควบคุมการเดินรถไฟไฟฟ้าในรูปแบบ Graphics Animation เพราะการสร้างเคลื่อนไหวนั้นทำให้มองเห็นปัญหาได้อย่างชัดเจนขึ้น และระบุแนวทางการแก้ปัญหาได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

2. ทำการวิเคราะห์และประมวลผลในรูปแบบของเครือข่ายเส้นทางการเดินรถไฟไฟฟ้าในรูปแบบที่มีหลายเส้นทางซับซ้อนและทับกัน เพราะระบบขนส่งมวลชนรถไฟไฟฟ้าในอนาคตจะมีการเส้นทางกว้างขึ้นและมีปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อระบบเพิ่มขึ้นตามลำดับ

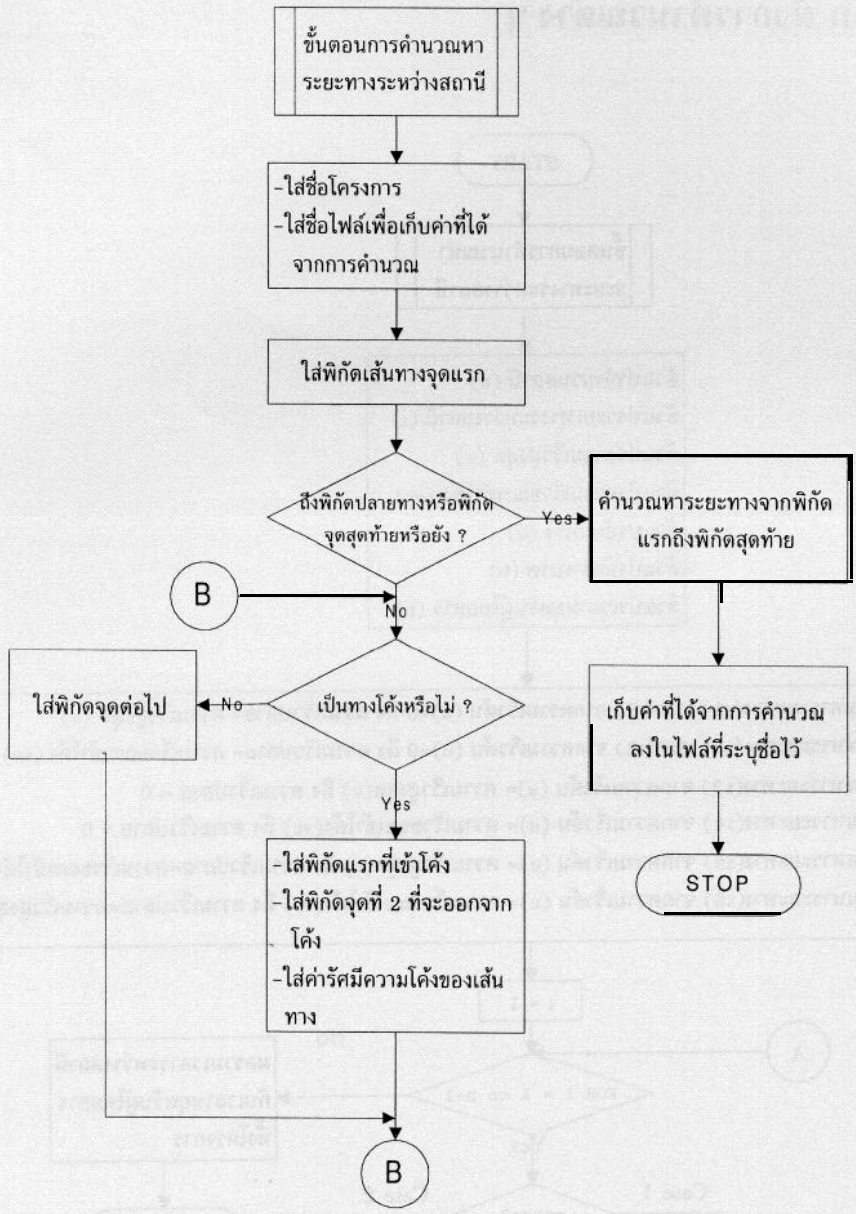
เอกสารอ้างอิง

1. Paul H. Wright and Norman J. Ashford, 1989, *Transportation Engineering: Planning and Design*, 3rd Edition, Courier Companies, pp. 121 - 135.
2. William W. Hay, 1987, *Manual of Recommended Practice, American Railway Engineering Association*, Chicago, Part 2, pp. 120-156.
3. William W. Hay, 1988, *Manual of Recommended Practice, American Railway Engineering Association*, Chicago, Part 3, pp. 76-113.
4. R. J. Paquette and Norman J. Ashford, *Transportation and Traffic Engineering Handbook*, 1982, 2nd Edition, Prentice Hall, pp. 45-60.
5. British Railway Board, 1973, *Railway Curves : Rules for Speed of Trains in Relation to Radius of Curve, Cant and Length of Transition*, Handbook No.3, pp. 56-68.
6. Alan Black, 1995, *Urban Mass Transportation Planning*, McGraw-Hill, pp. 206-231.
7. บริษัท เอเชียฟ เอ็นจิเนียริง คอนซัลแต้นส์ จำกัด, 2539, *เอกสารข้อมูลจากโครงการรถไฟฟ้ามหานคร รถไฟฟ้าสายสีส้ม สายสีน้ำเงิน*. สำนักพิมพ์สมภพการพิมพ์, ฉบับที่ 1, หน้า 20-47.

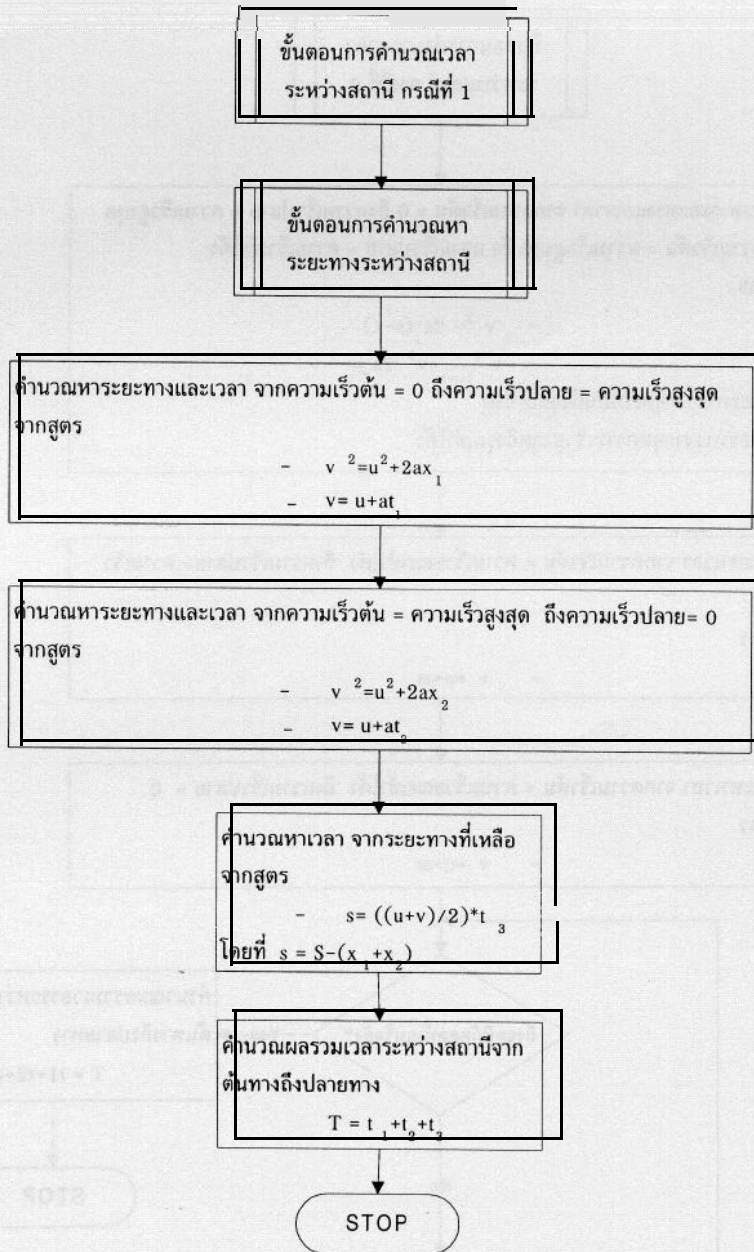
วารสารวิจัยแ

ภาคผนวก ก ผังการคำ

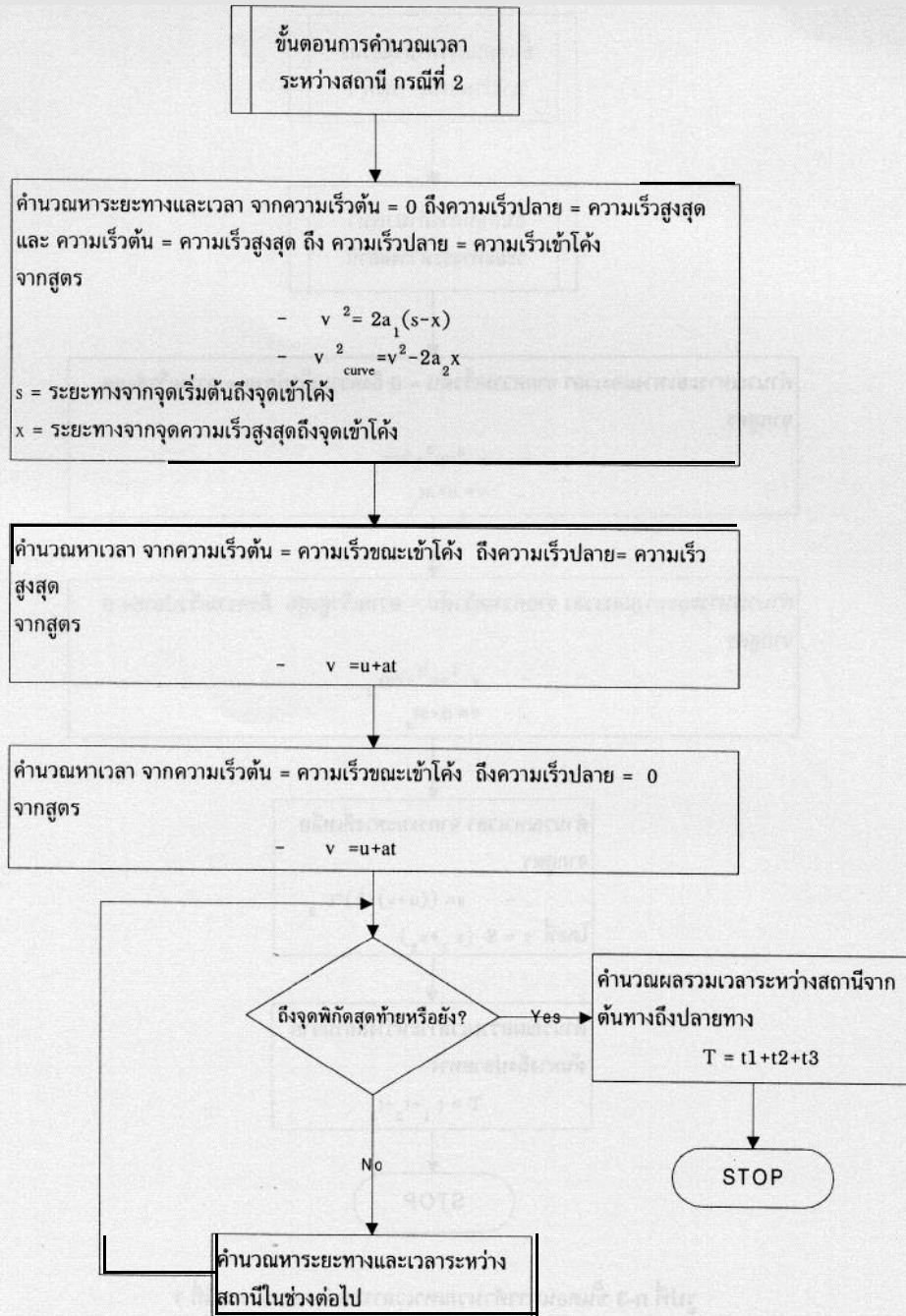
๓๐
๓๑
๓๒
๓๓



รูปที่ ก-2 ขั้นตอนการคำนวณหาระยะทางระหว่างสถานี



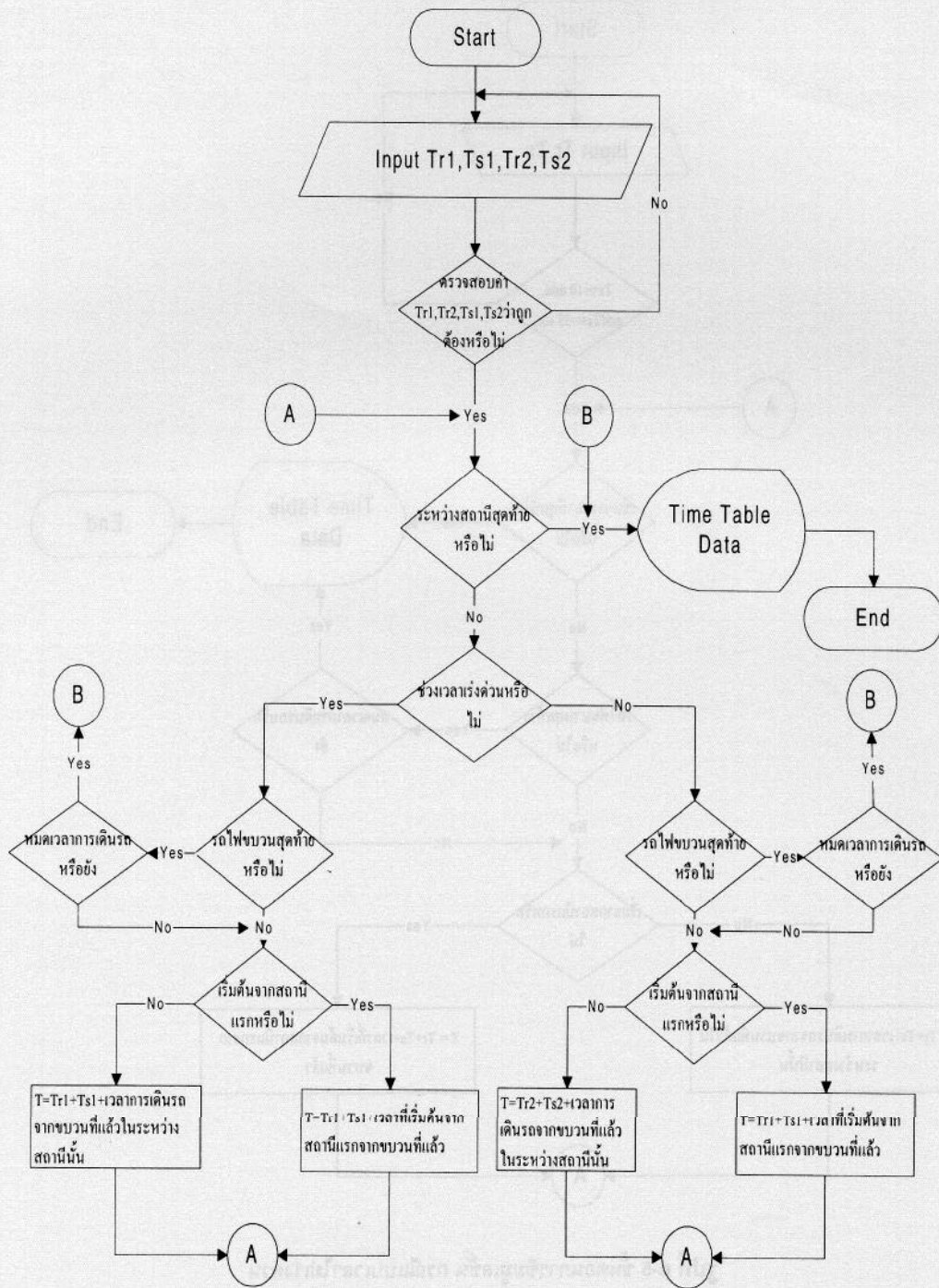
รูปที่ ก-3 ขั้นตอนการคำนวณหาเวลาระหว่างสถานี กรณีที่ 1



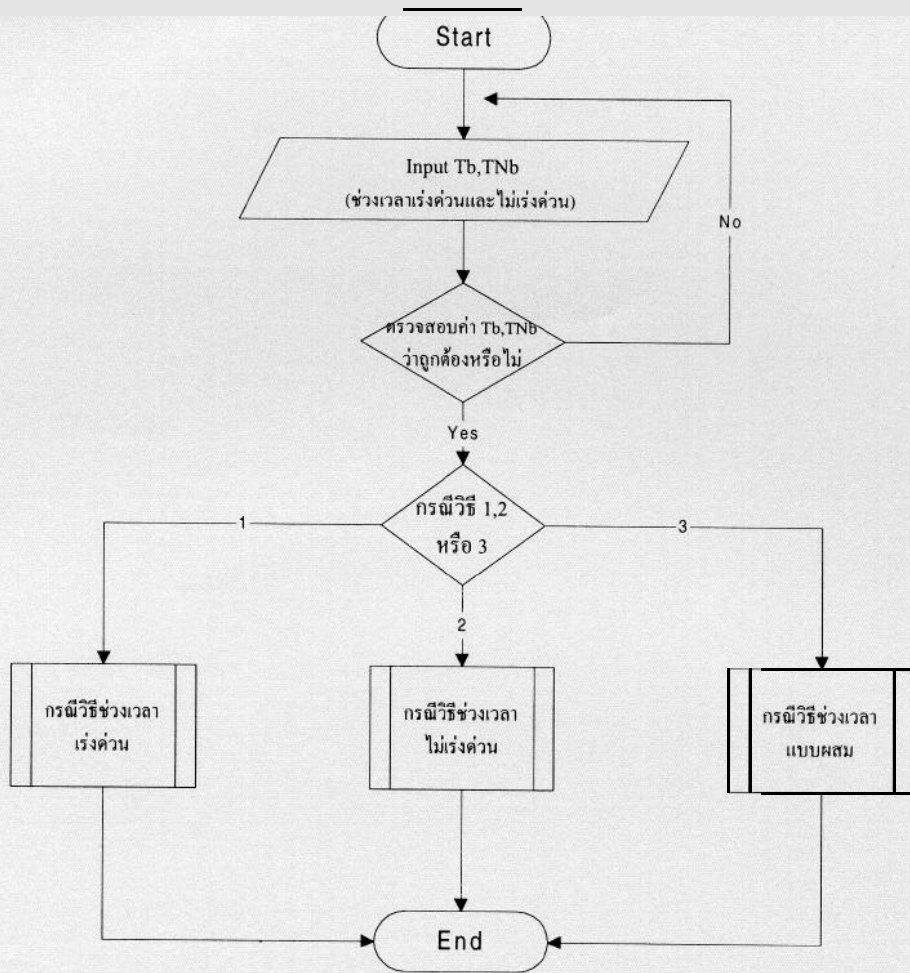
รูปที่ ก-4 ขั้นตอนการคำนวณหาเวลาระหว่างสถานี กรณีที่ 2

วารสาร

A



รูปที่ ก-6 ขั้นตอนการขิมมูละชั้น กรณีแบบเวลาผสม



รูปที่ ก-7 ขั้นตอนการชิมมุเลชั่น ทั้ง 3 กรณีวิธี