การจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและการซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน

นางสาวยุวรัตน์ ศรีประพฤทธิ์ชัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Scheduling for Rolling Stock Operation and Preventive Maintenance

Miss Yuwarat Sripraprutchai

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและการซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน
โดย	นางสาวยุวรัตน์ ศรีประพฤทธิ์ชัย
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดาริชา สุธีวงศ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โอฬาร กิตติธีรพรชัย)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นันทชัย กานตานันทะ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ยุวรัตน์ ศรีประพฤทธิ์ชัย : การจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและการซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน (Scheduling for Rolling Stock Operation and Preventive Maintenance) อ .ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ, 95 หน้า.

เนื่องจากธุรกิจการให้บริการรถไฟฟ้าเป็นธุรกิจที่มีต้นทุนสูงจึงต้องการการบริหารจัดการที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยเฉพาะรถไฟฟ้าซึ่งเป็นหัวใจหลักของการทำงาน งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาวิธีการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและการทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน โดยใช้รถไฟฟ้าจำนวนน้อยที่สุด ทั้งนี้จะต้องสามารถให้บริการเดินรถไฟฟ้าได้ตามตารางการเดินรถที่กำหนดไว้

จำนวนรถไฟฟ้าที่น้อยที่สุดสำหรับการให้บริการนั้นจะขึ้นอยู่กับระยะทางและความถี่ในการให้บริการ โดยระยะทางที่มากขึ้นจะต้องใช้จำนวนรถมากขึ้น และความถี่การให้บริการที่มากขึ้นหรือเวลาห่างระหว่างขบวนที่น้อยลงจะต้องใช้จำนวนรถที่มากขึ้นด้วยเช่นกัน ทั้งนี้ตารางการเดินรถส่วนใหญ่จะแบ่งช่วงเวลาการให้บริการเป็นช่วงชั่วโมงเร่งด่วนและชั่วโมงปกติ โดยชั่วโมงเร่งด่วนจะมีความถี่การให้บริการมากกว่าชั่วโมงปกติ ทำให้อาจจะมีรถไฟฟ้าว่างจากการให้บริการ ในช่วงเวลาปกติจึงสามารถทำงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าขบวนที่ว่างระหว่างวันได้ และยังมีเวลาว่างที่สามารถทำงานซ่อมบำรุงเพิ่มเติมได้ในช่วงกลางคืน

เนื่องจากรถไฟฟ้าจะเข้าทำงานซ่อมบำรุงเมื่อถูกใช้ไปตามระยะทางที่กำหนด จึงทำการพิจารณาการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุลซึ่งคือการใช้งานรถอย่างเท่าๆ กัน และแบบไม่สมดุลซึ่งคือการใช้รถไฟฟ้าบางขบวนเพื่อให้มีระยะทางสะสมถึงกำหนดการทำงานซ่อมบำรุงก่อน พบว่าการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบไม่สมดุลจะทำให้เกิดความล่าช้าของการเข้าทำงานซ่อมบำรุงน้อยกว่า โดยรถไฟฟ้าที่เข้าทำงานซ่อมบำรุงล่าช้ากว่ากำหนดน้อยจะทำให้มีความเสี่ยงที่รถไฟฟ้าจะเสียหายและเกิดอุบัติเหตุน้อยลง นอกจากนี้การจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบไม่สมดุลจะช่วยกระจายความต้องการซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าของแต่ละขบวน ทำให้สามารถบริหารจัดการการใช้งานศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าง่ายขึ้น

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2559

5770278721 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING
KEYWORDS: ROLLING STOCK / SCHEDULING / MATHEMATHICAL MODEL / PREVENTIVE MAINTENANCE / HEURISTICS

YUWARAT SRIPRAPRUTCHAI: Scheduling for Rolling Stock Operation and Preventive Maintenance. ADVISOR: ASSOC. PROF. WIPAWEE THARMMAPHORNPHILAS, 95 pp.

Railway business needs a large capital for run the business. Therefore, well management is seriously required to maximize the efficiency, especially, the rolling stock which is one of the most important machines. The objective of this research is to schedule the rolling stock operation and preventive maintenance. The minimum rolling stock must be able to run the services in given a timetable.

The minimum number of trains can be calculated by using network model. The number of trains depends on the distance and headway of services. The longer distance and the lower headway needed more trains. Normally, there are two types of period in timetable; peak hour and off-peak hour. The headway of peak hour is less than the headway in off-peak hour. Thus, there may be some train does not use to do the services in the off-peak hour so it is available to do maintenance. Futhermore, the maintenance can be executed during night time.

The train mileage was the condition of executing preventive maintenance. The two concepts of scheduling were considered; balanced and unbalanced. The balanced scheduling uses all trains equally so the train mileages usually close to each other. The unbalanced scheduling uses specific train for make its mileage reachs the maintenance condition. From the results, the maintenance tardinesses of the unbalanced scheduling is less than the balanced scheduling. The risk of train unexpected breakdown and also accident will decrease if the train did not execute maintenance late. The workshop management will be easier by applying unbalanced scheduling because the maintenance demand did not happen at the same time.

Department: Industrial Engineering Student's Signature .....
Field of Study: Industrial Engineering Advisor's Signature .....
Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง การจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและการซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน จะสำเร็จลุล่วงไม่ได้เลยหากไม่ได้รับความอนุเคราะห์จาก รองศาสตราจารย์ ดร. วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ขอถือโอกาสนี้ขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูงที่ให้ความเมตตากรุณาสั่งสอน ให้คำชี้แนะ และแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความใจเย็นอย่างดีเสมอมา

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้โอกาสในการเข้ารับการศึกษา ขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้ รวมถึงผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดาริชา สุธีวงศ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. โอฬาร กิตติธีรพรชัย และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นันทะชัย กานตานันทะ ประธานและคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่สละเวลามาทำการสอบและให้คำชี้แนะ ขอขอบคุณพี่นพปฎล สกุลสมที่คอยให้คำปรึกษาและช่วยชี้แนะข้อผิดพลาด ขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ และรุ่นน้องที่คอยเป็นกำลังใจและให้คำปรึกษา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณสมาชิกครอบครัวศรีประพฤทธิ์ชัย โดยเฉพาะคุณสมเกียรติ และคุณวายุ ศรีประพฤทธิ์ชัย บิดามารดาผู้ที่เลี้ยงดู ให้ความรัก ให้ความรู้ ให้โอกาส ให้การสนับสนุนให้กำลังใจ และให้ความช่วยเหลือจนผู้วิจัยประสบความสำเร็จในวันนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญรูป ..... ฏ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1. ที่มาและความสำคัญ 1

1.2. โครงการรถไฟฟ้าในปัจจุบัน 3

1.3. ลักษณะปัญหา 7

1.4. วัตถุประสงค์ 9

1.5. ขอบเขตและสมมติฐาน 9

1.5.1. ตารางการเดินรถไฟฟ้า 9

1.5.2. การนำรถไฟฟ้าไปใช้บริการ 11

1.5.3. เงื่อนไขการใช้งานรถไฟฟ้า 11

1.5.4. งานซ่อมบำรุง 12

1.5.5. ความสามารถในการทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันของศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า 13

1.5.6. การนับระยะทางวิ่งสะสมของรถไฟฟ้า 13

1.6. สิ่งที่นำส่ง 13

1.7. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 13

1.8. ขั้นตอนการดำเนินงาน 14

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

2.1. โครงการรถไฟฟ้าในอนาคตของประเทศไทย 15
2.2. การทำงานซ่อมบำรุง 17
2.3. การวิจัยดำเนินงานกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 20
2.4. การจัดตาราง 21
2.5. การจัดเส้นทางการใช้รถไฟฟ้าตามตารางเวลาที่กำหนด 22
2.6. การจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและการทำงานซ่อมบำรุง 23
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน 26
3.1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 26
3.1.1. แบบจำลองสำหรับหาจำนวนรถไฟฟ้าที่น้อยที่สุดสำหรับให้บริการเดินรถไฟฟ้า 27
3.1.2. แบบจำลองสำหรับจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและทำงานซ่อมบำรุง 29
3.2. วิธีการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและการทำงานซ่อมบำรุง 36
3.2.1. การหาจำนวนรถไฟฟ้าที่น้อยที่สุดสำหรับให้บริการเดินรถไฟฟ้าและทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน 36
3.2.2. การจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและการทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน 45
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน 49
4.1. ตัวอย่างการหาจำนวนรถไฟฟ้าและการจัดตารางการใช้งานและทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน 49
4.2. สรุปจำนวนรถไฟฟ้า 66
4.2.1 จำนวนรถไฟฟ้าของโครงการที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบัน 66
4.2.2 จำนวนรถไฟฟ้าสำหรับโครงการรถไฟฟ้าในอนาคต 71
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน 74
5.1. ปัจจัยที่มีผลต่อจำนวนรถไฟฟ้า 74
5.2. การจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุลและแบบไม่สมดุล 75
5.2.1. ความล่าช้าของการเข้าทำงานซ่อมบำรุง 75

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

5.2.2. การใช้งานของศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า 81
5.3. การรวมงานซ่อมบำรุง 84
5.4. ปัญหาและอุปสรรค 87
5.5. ข้อเสนอแนะ 87
รายการอ้างอิง 88
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 95

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 ข้อมูลทั่วไปของโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบัน 5

ตาราง 2 ลักษณะตารางเดินรถของโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบัน 6

ตาราง 3 ตัวอย่างตารางการเดินรถไฟฟ้าสายแอร์พอร์ตลิงค์ที่สถานีพญาไท 8

ตาราง 4 สมมติฐานความเร็วเฉลี่ยและเวลาระหว่างขบวนรถในการให้บริการเดินรถไฟฟ้าของโครงการในอนาคต 11

ตาราง 5 งานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันที่จะพิจารณาในการจัดตารางการเดินรถ 12

ตาราง 6 ข้อมูลโครงการรถไฟฟ้าสายหลัก 16

ตาราง 7 ตัวอย่างการหาจำนวนวันที่ต้องใช้ในการทำงานซ่อมบำรุงทั้งหมดในรอบเวลาซ่อมบำรุงร่วมสำหรับรถไฟฟ้า 1 ขบวน 42

ตาราง 8 แนวคิดการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุล 46

ตาราง 9 แนวคิดการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบไม่สมดุล 48

ตาราง 10 รอบการเดินรถในเส้นทางการเดินรถต่างๆ สำหรับโครงการรถไฟฟ้าสายแอร์พอร์ตลิงค์ . 51

ตาราง 11 รายละเอียดของเส้นทางเดินรถของโครงการรถไฟฟ้าสายแอร์พอร์ตลิงค์ 53

ตาราง 12 ตารางการใช้งานรถไฟฟ้าสายแอร์พอร์ตลิงค์แบบสมดุล 56

ตาราง 13 ตารางการใช้งานรถไฟฟ้าสายแอร์พอร์ตลิงค์แบบไม่สมดุล 60

ตาราง 14 จำนวนรถไฟฟ้าสำหรับให้บริการตามตารางเดินรถของโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบัน 67

ตาราง 15 รายละเอียดของเส้นทางเดินรถของโครงการรถไฟฟ้าสายสีเขียวเข้ม 68

ตาราง 16 รายละเอียดของเส้นทางเดินรถของโครงการรถไฟฟ้าสายสีเขียวอ่อน 69

ตาราง 17 รายละเอียดของเส้นทางเดินรถของโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน 70

ตาราง 18 สรุปเวลาหยุดพักที่มากที่สุดของโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบัน 71

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง 19 จำนวนวันรวมที่ต้องใช้ในการซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าของโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบันสายต่างๆ 71

ตาราง 20 จำนวนรถไฟฟ้าที่ต้องการสำหรับโครงการรถไฟฟ้าสายต่างๆ ในอนาคต 72

ตาราง 21 พิจารณาความสามารถในการซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า 73

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูป

หน้า

รูป 1 โครงข่ายรถไฟฟ้าของประเทศไทยในปัจจุบัน 4

รูป 2 ตัวอย่างการนำรถไฟฟ้าไปใช้ให้บริการ 8

รูป 3 โครงข่ายรถไฟฟ้าในเขตกรุงเทพและปริมณฑล..... 16

รูป 4 อัตราการเกิดการเสียหายของเครื่องจักรตลอดช่วงอายุการใช้งาน..... 18

รูป 5 แนวคิดการนับจำนวนรถที่จอดอยู่ในสถานีเมื่อสิ้นสุดการให้บริการในแต่ละวัน 22

รูป 6 แนวคิดการนับจำนวนรถที่ออกจากโรงจอดรถเพื่อไปให้บริการในแต่ละวัน 23

รูป 7 โครงข่ายของจุดและเส้นสำหรับการหาจำนวนรถไฟฟ้าที่น้อยที่สุดสำหรับตารางเดินรถที่กำหนด..... 28

รูป 8 โครงข่ายของจุดและเส้นสำหรับการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและทำงานซ่อมบำรุง 31

รูป 9 ขั้นตอนการหาจำนวนรถไฟฟ้าสำหรับให้บริการเดินรถและทำงานซ่อมบำรุง..... 37

รูป 10 ขั้นตอนการหาจำนวนวันที่ต้องใช้ในการทำงานซ่อมบำรุงทั้งหมด ในรอบเวลาซ่อมบำรุงร่วมสำหรับรถไฟฟ้า 1 ขบวน..... 41

รูป 11 ขั้นตอนการจัดเส้นทางเดินรถไฟฟ้า..... 44

รูป 12 แนวคิดการปรับปรุงเวลาหยุดพักช่วงกลางวันของเส้นทางเดินรถสำหรับทำงานซ่อมบำรุง ... 45

รูป 13 ระยะทางสะสมของรถไฟฟ้าสายแอร์พอร์ตลิงค์เมื่อจัดตารางการใช้งานแบบสมดุล 65

รูป 14 ระยะทางสะสมของรถไฟฟ้าสายแอร์พอร์ตลิงค์เมื่อจัดตารางการใช้งานแบบไม่สมดุล 66

รูป 15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนรถไฟฟ้ากับระยะทางของโครงการรถไฟฟ้า 75

รูป 16 กราฟความล่าช้า (กม.) ในการเข้าซ่อมบำรุงงาน M1 จากการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุลของโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบัน 76

รูป 17 กราฟความล่าช้า (วัน) ในการเข้าซ่อมบำรุงงาน M1 จากการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุลของโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบัน 77

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูป 18 กราฟความล่าช้า (กม.) ในการเข้าซ่อมบำรุงงาน M1 จากการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบไม่สมดุลของโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบัน 79

รูป 19 กราฟความล่าช้า (วัน) ในการเข้าซ่อมบำรุงงาน M1 จากการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบไม่สมดุลของโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบัน 80

รูป 20 ชั่วโมงการใช้งานศูนย์ซ่อมบำรุงเมื่อจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้า แบบสมดุลของโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วในประเทศไทย 82

รูป 21 ชั่วโมงการใช้งานศูนย์ซ่อมบำรุงเมื่อจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้า แบบไม่สมดุลของโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วในประเทศไทย 83

รูป 22 กราฟเปรียบเทียบความล่าช้าการทำงาน M2 และการรวมงาน M1 กับ M2 เมื่อจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุล 85

รูป 23 กราฟเปรียบเทียบความล่าช้าการทำงาน M2 และการรวมงาน M1 กับ M2 เมื่อจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบไม่สมดุล..... 85

รูป 24 ชั่วโมงการใช้งานศูนย์ซ่อมบำรุงเมื่อพิจารณาการทำงาน M1 และ M2 พร้อมกัน ของจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุล..... 86

รูป 25 ชั่วโมงการใช้งานศูนย์ซ่อมบำรุงเมื่อพิจารณาการทำงาน M1 และ M2 พร้อมกัน ของจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบไม่สมดุล..... 86

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1 บทนำ

1.1. ที่มาและความสำคัญ

การขนส่งระบบรางเป็นวิธีการขนส่งที่คิดค้นขึ้นมาสำหรับขนส่งคนหรือสินค้าครั้งละจำนวนมากๆ เพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายในการขนส่งต่อหน่วย ซึ่งการขนส่งทางรางมีต้นทุนในการขนส่งต่อหน่วยต่ำเมื่อเทียบกับการขนส่งทางเครื่องบิน ทางรถ และทางเรือ นอกจากนี้ยังมีการนำระบบการขนส่งทางรางมาใช้เพื่อแก้ไขปัญหาการจราจร ดังจะเห็นได้จากประเทศพัฒนาแล้วอย่างประเทศสหรัฐอเมริกา อังกฤษ เยอรมันนี และญี่ปุ่น เป็นต้น จะมีการวางโครงข่ายระบบรถไฟให้ครอบคลุมทั่วประเทศเพื่อใช้เป็นวิธีการเดินทางหลักภายในเมืองที่มีความหนาแน่นของประชากรอย่างเมืองหลวง เมืองเศรษฐกิจ และทำหน้าที่เชื่อมเมืองใหญ่เหล่านั้นเข้าด้วยกัน ทั้งนี้ระบบรถไฟยังเป็นการยกระดับการใช้ชีวิตของประชาชนภายในเมืองให้มีความสะดวกสบายมากขึ้นและยังเป็นการกระจายความเจริญออกสู่เมืองรอบข้างอีกด้วย ช่วยลดความหนาแน่นภายในเมืองเมื่อสามารถเดินทางถึงใจกลางเมืองได้อย่างง่ายดาย จึงไม่ผิดนักถ้าระบบรถไฟจะเป็นสัญลักษณ์ของความเจริญ ดังจะเห็นได้จากห้างสรรพสินค้าเปิดใหม่และราคาที่ดินรอบสถานีรถไฟมีราคาพุ่งสูงขึ้นอย่างมากเมื่อมีระบบรถไฟมาถึง

ประเทศไทยก็ได้มีการกำหนดแผนพัฒนาโครงข่ายระบบรถไฟฟ้าเหมือนประเทศกำลังพัฒนาอื่นๆ เพื่อแก้ไขปัญหาการจราจรและเป็นทางเลือกในการเดินทางภายในเมืองหลวงที่แออัดอย่างกรุงเทพมหานคร แต่เนื่องจากการก่อสร้างและการดำเนินโครงการรถไฟฟ้าต้องใช้เงินทุนมูลค่ามหาศาล ต้องการความเชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีที่พิเศษและเฉพาะทาง อีกทั้งต้องการพื้นที่จำนวนมากในการก่อสร้างเส้นทางเดินรถ จึงยากที่องค์กรเอกชนหรือหน่วยงานของรัฐบาลจะสามารถดำเนินการได้โดยลำพัง โครงการรถไฟฟ้าจึงมักอยู่ในรูปแบบสัมปทานของหน่วยงานรัฐบาลที่เปิดประมูลให้แก่บริษัทเอกชนที่มีความเชี่ยวชาญเข้ามาดำเนินการ ดังนั้นบริษัทเอกชนที่ต้องการชนะการประมูลจะต้องวางแผนจัดการให้โครงการรถไฟฟ้ามีต้นทุนต่ำที่สุด โดยเงินลงทุนสัดส่วนใหญ่ของโครงการรถไฟฟ้าจะอยู่ที่โครงสร้างงานโยธาและระบบรถไฟฟ้า โดยโครงสร้างงานโยธาคือระบบรางรถไฟ สะพานยกระดับ อุโมงค์ และอาคารสถานี และเงินลงทุนสำคัญอีกส่วนหนึ่งคือตัวรถไฟฟ้าซึ่งถึงแม้จะไม่มากเท่าในส่วนของโครงสร้างงานโยธา แต่มูลค่าของรถไฟฟ้าหนึ่งขบวนก็ถือเป็นมูลค่าที่มีนัยสำคัญต่อเงินลงทุนทั้งโครงการทีเดียว อีกทั้งจำนวนรถไฟฟ้าในระบบจะส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนการดำเนินงาน โดยเฉพาะค่าใช้จ่ายในการทำงานซ่อมบำรุงซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่ของต้นทุนการดำเนินงานให้บริการเดินรถไฟฟ้าเพราะอุปกรณ์เครื่องจักรสำหรับทำงานซ่อมบำรุงมีราคาแพง และ

ต้องการแรงงานฝีมือในการทำงาน ดังนั้นยิ่งมีรถไฟฟ้ามากก็จะมีงานซ่อมบำรุงที่ต้องทำมากตามไปด้วย ซึ่งหมายความว่าจะมีค่าใช้จ่ายเกิดมากขึ้นนั่นเอง

รถไฟฟ้าก็คือเครื่องจักรชนิดหนึ่งที่เมื่อมีการนำไปใช้งานก็ย่อมต้องการการดูแลบำรุงรักษาให้อยู่ในสภาพที่ดีพร้อมอยู่เสมอ และเนื่องจากรถไฟฟ้าต้องให้บริการแก่คนจำนวนมากจึงต้องมีสภาพที่สมบูรณ์อยู่ตลอดเวลา ดังนั้นต้องมีการทำงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้รถไฟฟ้ามีความน่าเชื่อถือ มีความพร้อมใช้งาน สามารถซ่อมบำรุงได้เมื่อต้องการ และมีความปลอดภัย (RAMs: Reliability, Availability, Maintainability and Safety) [1] ซึ่งเป็นแนวทางที่บริษัทผู้ให้บริการเดินรถไฟฟ้าทั่วโลกยึดปฏิบัติ เพราะถ้าหากเกิดการขัดข้องขึ้นจนกระทบกับการให้บริการเดินรถจะส่งผลต่อระดับความพึงพอใจของผู้โดยสารทันที หรือถ้ารุนแรงถึงขั้นเกิดอุบัติเหตุขึ้นจะไม่เพียงแต่ระดับความพึงพอใจและชื่อเสียงของบริษัทเดินรถที่สูญเสียไปเท่านั้น ยังอาจรวมถึงชีวิตและทรัพย์สินจำนวนมหาศาลอีกด้วย นอกจากการดูแลบำรุงรักษารถไฟฟ้าที่ดีจะช่วยเพิ่มความมั่นใจในการใช้งานรถไฟฟ้าแล้วยังจะทำให้อายุการใช้งานของรถไฟฟ้ายาวนานขึ้นอีกด้วย ดังนั้นการซ่อมบำรุงเชิงป้องกันจึงเป็นสิ่งที่บริษัทเดินรถไฟฟ้าให้ความสำคัญอย่างมาก โดยรถไฟฟ้าทุกขบวนจะต้องเข้าทำงานซ่อมบำรุงเมื่อถึงเวลาหรือเงื่อนไขที่กำหนด ทั้งนี้ในขณะทำงานซ่อมบำรุงจะไม่สามารถใช้งานรถไฟฟ้าขบวนนั้นได้ บริษัทผู้ให้บริการเดินรถจึงต้องทำการบริหารจัดการวางแผนการทำงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าไม่ให้กระทบกับเวลาการให้บริการเดินรถไฟฟ้า

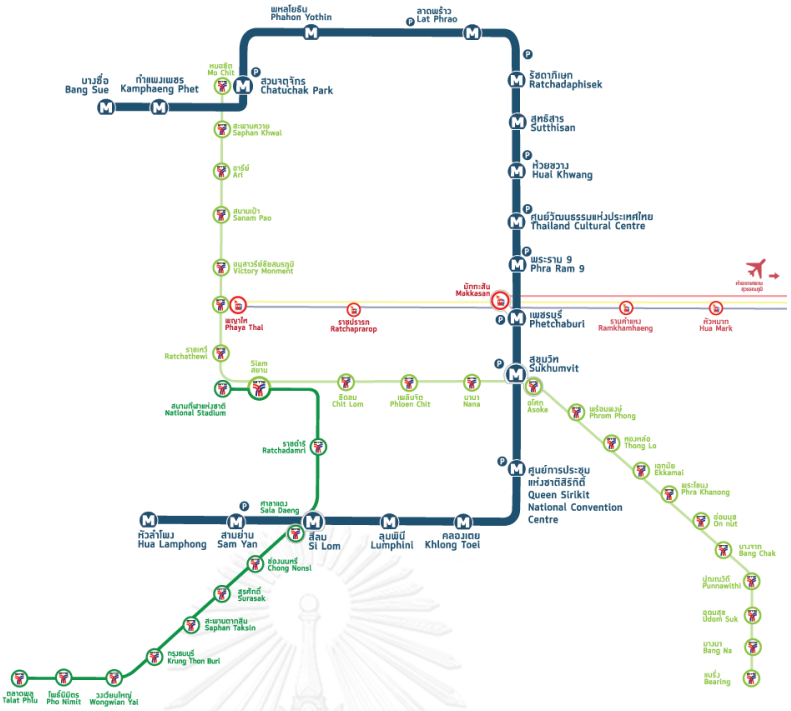
การให้บริการเดินรถไฟฟ้าเป็นหนึ่งในธุรกิจการให้บริการ ฉะนั้นแนวทางในการดำเนินธุรกิจให้บริการเดินรถไฟฟ้าจะให้ความสำคัญกับระดับความพึงพอใจของผู้โดยสารเป็นสำคัญ ซึ่งระดับความพึงพอใจนี้จะส่งผลโดยตรงต่อรายได้ของธุรกิจด้วย กล่าวคือถ้าผู้โดยสารมีความสะดวกสบาย มีความพึงพอใจในการใช้บริการรถไฟฟ้า ผู้โดยสารก็จะมาใช้บริการอย่างสม่ำเสมอ โดยความพึงพอใจของผู้โดยสารได้แก่ การมีรถไฟฟ้าให้บริการอย่างสม่ำเสมอ มีตารางเดินรถที่แน่นอน ปลอดภัย และราคาถูก บริษัทเดินรถไฟฟ้าจึงต้องมีการกำหนดตารางเดินรถไว้ให้เพียงพอต่อความต้องการของผู้โดยสาร โดยจะต้องสามารถให้บริการเดินรถได้ตามที่กำหนดไว้ด้วย ทั้งนี้มีเหตุผลหลายประการที่ทำให้ไม่สามารถให้บริการเดินรถได้ตามกำหนด และหนึ่งในนั้นก็คือเหตุผลที่เกี่ยวกับรถไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นรถไฟฟ้าไม่เพียงพอหรือรถไฟฟ้าไม่พร้อมใช้งาน แต่เนื่องจากตัวรถไฟฟ้ามีราคาที่สูงมากทำให้บริษัทผู้ให้บริการเดินรถไฟฟ้าไม่สามารถที่จะซื้อรถไฟฟ้าเก็บไว้เผื่อในระบบเป็นจำนวนมากได้ อีกทั้งรถไฟฟ้ายังต้องการสถานที่ในการจัดเก็บ และการซ่อมบำรุงซึ่งเป็นค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น ดังนั้นบริษัทผู้ให้บริการเดินรถไฟฟ้าจะต้องทำการบริหารจัดการการใช้งานรถไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดเพื่อที่จะได้ใช้

รถไฟฟ้าได้ในจำนวนน้อยที่สุดที่จะสามารถให้บริการเดินรถได้ตามตารางเวลาเดินรถที่กำหนดไว้ได้ รวมถึงจะต้องสามารถทำงานซ่อมบำรุงเมื่อถึงเวลาที่กำหนดได้ด้วย

1.2. โครงการรถไฟฟ้าในปัจจุบัน

ในปัจจุบันประเทศไทยมีโครงการรถไฟฟ้าเปิดให้บริการแล้วทั้งหมด 4 โครงการ คือโครงการรถไฟฟ้าสายสีเขียวเข้ม (บีทีเอสสายสุขุมวิท) โครงการรถไฟฟ้าสายสีเขียวอ่อน (บีทีเอสสายสีลม) โครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน (เอ็มอาร์ที) และโครงการรถไฟฟ้าสายสีแดงเลือดหมู (แอร์พอร์ลิงค์) ซึ่งมีโครงข่ายเส้นทางดังแสดงในรูป 1 จะเห็นว่าโครงข่ายรถไฟฟ้าของประเทศไทยไม่มีการใช้รางรถไฟร่วมกันระหว่างสาย แม้ว่าสายสีเขียวเข้มและเขียวอ่อนจะมีจุดที่รางเชื่อมต่อกันที่สถานีสยามก็ตาม แต่ก็เพื่อการเชื่อมต่อกับศูนย์ซ่อมบำรุงที่อยู่หมอชิตเท่านั้น จะเห็นได้จากการที่ผู้โดยสารจะต้องเปลี่ยนชานชาลาเมื่อต้องการเปลี่ยนสายรถไฟ ทำให้การเดินรถของรถไฟฟ้าแต่ละโครงการเป็นอิสระต่อกัน ทั้งเรื่องตารางการเดินรถและรถไฟฟ้าที่ไม่นำมาใช้ร่วมระหว่างโครงการ และจะเห็นว่าโครงการรถไฟฟ้าสายสีเขียวเข้ม สายสีเขียวอ่อน และสายสีน้ำเงินจะมีจำนวนสถานีมากและระยะห่างระหว่างสถานีน้อยเพราะเป็นรถไฟฟ้าประเภทขนส่งมวลชนที่มีเส้นทางผ่านใจกลางเมือง จึงมีความหนาแน่นของผู้ใช้บริการมากหรือมีความต้องการใช้บริการมากนั่นเอง ทำให้มีเวลาระหว่างขบวนรถไฟฟ้าน้อยหรือมีรถให้บริการบ่อย ในขณะที่รถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์เป็นรถไฟฟ้าชานเมืองจึงมีจำนวนสถานีน้อยและมีระยะห่างระหว่างสถานีมาก ความต้องการใช้บริการไม่มากเท่ารถไฟฟ้าขนส่งในกลางเมืองจึงมีเวลาระหว่างขบวนรถไฟฟ้านานกว่า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูป 1 โครงข่ายรถไฟฟ้าของประเทศไทยในปัจจุบัน

เวลาระหว่างขบวนรถไฟหรือเฮดเวย์ (Headway) คือระยะเวลาห่างระหว่างรถไฟฟ้าสองขบวนที่กำลังให้บริการ ถ้ามีเฮดเวย์น้อยจะมีความถี่ในการเดินรถสูง ก็คือจะมีรถไฟให้บริการบ่อย ส่งผลให้ตารางเดินรถมีจำนวนรอบในการให้บริการมาก ทำให้ต้องมีรถไฟฟ้าใช้งานหมุนเวียนอยู่ในระบบจำนวนมากให้เพียงพอต่อรอบการเดินรถที่มี เฮดเวย์จึงเป็นปัจจัยสำคัญปัจจัยหนึ่งในการคำนวณจำนวนรถไฟฟ้าของแต่ละโครงการ ทั้งนี้ระยะเวลาที่ใช้ในการเดินรถก็มีผลต่อจำนวนรถไฟฟ้าในระบบด้วย ถ้าเวลาในการเดินรถต่อรอบนานก็จะทำให้รถไฟฟ้าที่กำลังให้บริการอยู่บนราง ณ ช่วงเวลาหนึ่งมีจำนวนมากขึ้น โดยเวลาในการให้บริการต่อรอบจะขึ้นอยู่กับระยะทางของเส้นทางและความเร็วของรถไฟฟ้า ซึ่งการที่ระยะห่างระหว่างสถานีน้อยจะทำให้ความเร็วเฉลี่ยของรถไฟฟ้าต่ำลง เนื่องจากปัจจัยดังกล่าวทำให้โครงการรถไฟฟ้าแต่ละโครงการมีจำนวนรถไฟฟ้าอยู่ในระบบแตกต่างกัน ดังแสดงในตาราง 1

ตาราง 1 ข้อมูลทั่วไปของโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบัน

โครงการรถไฟฟ้า	ระยะทาง (กม.)	จำนวนสถานี	เวลาระหว่างขบวน(นาที) *	จำนวนรถไฟฟ้า (ขบวน) **
สายสีเขียวเข้ม	21.8	22	2.50 – 8.00	35
สายสีเขียวอ่อน	14.5	13	4.50 – 8.00	17
สายสีน้ำเงิน	20	18	3.52 – 7.22	19
แอร์พอร์ตลิงค์***	28.5	8	10.00 – 18.00	9

* ภาคผนวก ก.

** ข้อมูลเมื่อเดือนตุลาคม พ.ศ. 2558

*** เฉพาะแอร์พอร์ตลิงค์สายซิตี้ไลน์ (สายเอ็กเพรสได้หยุดให้บริการตั้งแต่เดือนกันยายน พ.ศ. 2557)

เมื่อพิจารณาตารางการเดินรถของแต่ละโครงการรถไฟฟ้าพบว่าตารางเดินรถไฟฟ้าของโครงการต่างๆ มีลักษณะวนซ้ำเป็นวัฏจักร คือเหมือนเดิมทุกวันหรือทุกสัปดาห์ สามารถแบ่งเป็นช่วงชั่วโมงเร่งด่วนและชั่วโมงปกติ โดยช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนคือช่วงเวลาที่มีความต้องการโดยสารรถไฟฟ้ามากกว่าปกติ ซึ่งก็คือเวลาช่วงเช้าก่อนเข้างานและช่วงเย็นหลังเลิกงาน ส่วนชั่วโมงปกติคือช่วงเวลาที่นอกเหนือจากชั่วโมงเร่งด่วนซึ่งจะมีความต้องการโดยสารรถไฟฟ้าน้อยลง จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าถ้าเฮดเวย์มากขึ้นจะมีรอบการให้บริการเดินรถน้อยลง ความต้องการรถไฟฟ้าสำหรับนำไปให้บริการก็ลดลง และอาจส่งผลให้ในช่วงเวลาชั่วโมงปกติระหว่างวันอาจจะมีรถไฟฟ้าบางขบวนที่ไม่จำเป็นต้องนำไปใช้งาน ในตาราง 2 แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของเฮดเวย์ระหว่างช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนและช่วงเวลาช่วงปกติของรถไฟฟ้าสายต่างๆ พบว่ารถไฟฟ้าขนส่งมวลชนทั้ง 3 สายจะมีความแตกต่างของเฮดเวย์ในช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนและชั่วโมงปกติระหว่างวันสูงมาก จึงอาจจะมีรถไฟฟ้าหลายขบวนที่ว่างจากการนำไปให้บริการระหว่างวัน ส่วนรถไฟฟ้าสายแอร์พอร์ตลิงค์มีความแตกต่างระหว่างแต่ละช่วงเวลาไม่มาก จึงอาจจะไม่มีรถว่างจากการให้บริการระหว่างวัน

ตาราง 2 ลักษณะตารางเดินรถของโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบัน

โครงการรถไฟฟ้า	ช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วน	เฮดเวย์ชั่วโมงเร่งด่วน (นาที)	เฮดเวย์ชั่วโมงปกติระหว่างวัน (นาที)
สายสีเขียวเข้ม	7.00 – 9.30 น., 16.00 – 20.00 น.	2.50 – 4.25	5.55
สายสีเขียวอ่อน	7.00 – 9.00 น., 17.00 – 20.00 น.	4.50	6.00
สายสีน้ำเงิน	6.00 – 9.00 น., 16.00 – 20.00 น.	3.52 - 4.00	6.14
แอร์พอร์ตลิงค์	6.00 – 9.30 น., 16.00 – 20.00 น.	10 - 13	15

การทำงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าถูกแบ่งเป็น 3 ประเภท คือ (1) งานซ่อมบำรุงใหญ่ หรือ overhaul (2) งานซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน และ (3) งานซ่อมบำรุงเชิงแก้ไข โดยงานซ่อมบำรุงใหญ่และงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันเป็นงานซ่อมบำรุงที่สามารถวางแผนการทำงานล่วงหน้าได้ แตกต่างกันที่งานซ่อมบำรุงใหญ่จะเป็นการตรวจสอบสภาพชิ้นส่วนของรถไฟฟ้าอย่างละเอียดและทำการปรับปรุงสภาพของรถไฟฟ้าให้มีสภาพที่ดีขึ้น ทันสมัยขึ้น มีการถอดประกอบชิ้นส่วนรถไฟฟ้าด้วย ทำให้ต้องใช้เวลาและทรัพยากรมากจึงไม่สามารถทำได้บ่อยครั้ง เช่น ทุก 1 ปี ทุก 6 ปี เป็นต้น ส่วนงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันจะเป็นกิจกรรมการตรวจเช็คสภาพโดยรวมของรถไฟฟ้าหรือเปลี่ยนชิ้นส่วนอะไหล่เล็กๆ เพื่อให้แน่ใจว่ารถไฟฟ้ายังอยู่ในสภาพที่ดีอยู่ ไม่มีการถอดประกอบชิ้นส่วนรถไฟฟ้า เป็นงานซ่อมบำรุงที่จะต้องทำอย่างสม่ำเสมอ เช่น ทุกวัน ทุกสัปดาห์ ทุกเดือน เป็นต้น งานซ่อมบำรุงเชิงแก้ไขคืองานซ่อมบำรุงอื่นๆ ที่นอกเหนือจากงานซ่อมบำรุงที่วางแผนไว้ มักเป็นการซ่อมเมื่อรถไฟฟ้าเกิดความเสียหายขึ้นแล้ว รวมถึงการปรับปรุงสภาพความผิดปกติที่พบจากการตรวจเช็คสภาพในงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันด้วย บริษัทเดินรถไฟฟ้าจะมีการรวบรวมรายการงานซ่อมบำรุงที่จะต้องทำสำหรับรถไฟฟ้าแต่ละขบวนไว้ในระบบการจัดการงานซ่อมบำรุงรักษาด้วยคอมพิวเตอร์ (Computerizes Maintenance Management System; CMMS) เมื่อถึงเวลาที่กำหนดระบบจะออกใบแจ้งเตือนการเข้ารับการทำงานซ่อมบำรุงของรถไฟฟ้าแต่ละขบวนให้ รถไฟฟ้าจะต้องถูกนำเข้าทำงานซ่อมบำรุงเมื่อถึงเวลาที่กำหนดและจะต้องไม่เกินช่วงเวลาที่กำหนดไว้ [2]

เนื่องจากงานซ่อมบำรุงเชิงแก้ไขไม่สามารถวางแผนล่วงหน้าได้ ทำให้ไม่ทราบว่าจะมีรถไฟฟ้าขบวนใดจะต้องเข้ารับการทำงานซ่อมบำรุงเมื่อใดบ้าง การสำรองรถไฟฟ้าไว้ในระบบจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะหลีกเลี่ยงปัญหาจากการไม่มีรถไฟฟ้าที่มีสภาพดีสำหรับการให้บริการถึงแม้ว่าจะทำให้ต้นทุนการดำเนินการสูงขึ้นก็ตาม แต่อย่างไรก็ตามควรจะสำรองรถไฟฟ้าไว้ในจำนวนที่เหมาะสมเท่านั้นเพื่อลดค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็นที่จะทำให้กำไรของบริษัทลดลง

1.3. ลักษณะปัญหา

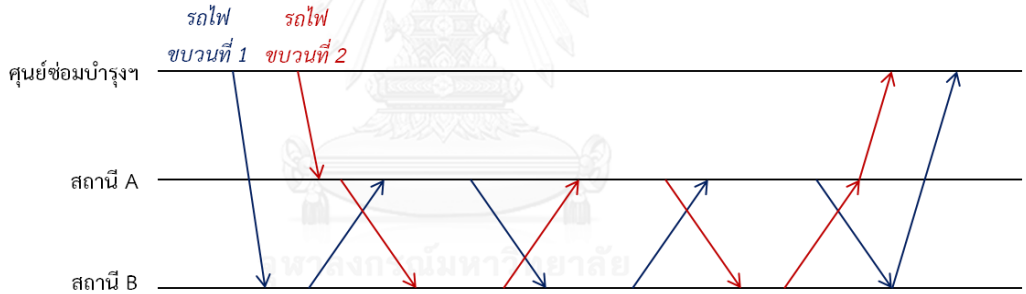
เนื่องจากรถไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์สำคัญสำหรับการให้บริการเดินรถไฟฟ้า อีกทั้งยังมีราคาสูงมาก การบริหารจัดการการใช้งานรถไฟฟ้าที่ดีจะทำให้ใช้จำนวนรถไฟฟ้าน้อยลง ซึ่งจะทำให้เงินลงทุนและต้นทุนการดำเนินการมีค่าน้อยลง นอกจากนี้การทำงานซ่อมบำรุงจะเป็นตัวการสำคัญที่จะช่วยให้รถไฟฟ้ามีสภาพที่ดีพร้อมสำหรับการให้บริการอยู่เสมอและไม่เกิดการเสียหายจนกระทบต่อการให้บริการเดินรถ อีกทั้งยังช่วยยืดอายุการใช้งานของรถไฟฟ้า เนื่องจากงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันเป็นงานที่สามารถวางแผนการทำงานไว้ล่วงหน้าได้ ไม่เหมือนกับงานซ่อมบำรุงเชิงแก้ไขที่ไม่สามารถคาดเดาได้ว่าจะเกิดขึ้นเมื่อไร จึงไม่สามารถวางแผนการทำงานได้ นอกจากนี้งานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันมีความถี่ของการซ่อมบำรุงมากกว่า จึงอาจส่งผลต่อการใช้งานรถไฟฟ้าในการให้บริการ ดังนั้นในการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าจึงควรพิจารณาการจัดรถไฟฟ้าไปใช้ในการให้บริการควบคู่ไปกับการทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันเพื่อให้มีรถไฟฟ้าเพียงพอต่อการใช้งานและรถไฟฟ้าได้รับการซ่อมบำรุงตามช่วงเวลาที่กำหนด

จำนวนรถไฟฟ้าที่น้อยที่สุดสำหรับการนำไปใช้ให้บริการตามตารางเดินรถที่กำหนดไว้นั้นสามารถหาได้จากการพิจารณาเวลาออกจากสถานีต้นทาง และเวลาถึงจากสถานีปลายทางของรอบการเดินรถต่างๆ ที่กำหนดไว้ในตารางเดินรถ ซึ่งมีตัวอย่างดังแสดงในตาราง 3 โดยรถไฟฟ้าจะสามารถนำไปใช้ให้บริการได้อย่างต่อเนื่องตลอดทั้งวัน เมื่อเริ่มต้นวันรถไฟฟ้าจะออกเดินทางจากศูนย์ซ่อมบำรุงไปยังสถานีต้นทางแล้วจึงถูกนำไปใช้ให้บริการในรอบการเดินรถต่างๆ เมื่อให้บริการในรอบแรกเสร็จแล้วจะถูกนำไปให้บริการในรอบถัดไปที่มีสถานีต้นทางเดียวกันกับสถานีปลายทางที่เพิ่งไปถึงและเวลาออกเดินทางของบริการรอบถัดไปต้องมากกว่าเวลาถึงของบริการรอบก่อนหน้า เมื่อไม่มีรอบบริการที่สามารถนำรถไปให้บริการต่อได้แล้วให้นำรถไฟฟ้ากลับไปเก็บที่ศูนย์ซ่อมบำรุงเป็นอันสิ้นสุดการทำงานของวันนั้นดังแสดงในรูป 2 แต่อย่างไรก็ตามจำนวนรถไฟฟ้าที่น้อยที่สุดที่คำนวณได้อาจจะไม่เพียงพอหากมีพิจารณาการทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันเพราะหากกำลังทำงานซ่อมบำรุงอยู่จะไม่

สามารถนำรถไปใช้ให้บริการได้ จึงทำให้อาจจะต้องสำรองรถไฟฟ้าจำนวนหนึ่งไว้สำหรับการทำงานซ่อมบำรุงเพื่อไม่ให้กระทบกับการให้บริการเดินรถ

ตาราง 3 ตัวอย่างตารางการเดินรถไฟฟ้าสายแอร์พอร์ตลิงค์ที่สถานีพญาไท

รอบที่	สุวรรณภูมิ-พญาไท (Up direction)		พญาไท-สุวรรณภูมิ (Down direction)	
	เวลาออก	เวลาถึง	เวลาออก	เวลาถึง
1	5.56	6.22	6.02	6.28
2	6.08	6.34	6.14	6.40
3	6.20	6.46	6.26	6.52
4	6.32	6.58	6.38	7.04
...	...	...	...	...



รูป 2 ตัวอย่างการนำรถไฟฟ้าไปใช้ให้บริการ

จากการศึกษาตารางให้บริการของโครงการรถไฟฟ้าในปัจจุบันพบว่าในเวลาชั่วโมงปกติระหว่างวันประมาณ 7 ชม. อาจจะมีรถไฟฟ้าบางขบวนที่ไม่ได้ถูกนำไปใช้งาน ซึ่งเป็นโอกาสเหมาะสำหรับการนำรถไฟฟ้าที่ว่างจากการใช้งานไปทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน การจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้ให้บริการเดินรถและเข้าทำงานซ่อมบำรุงจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะทำให้การบริหารจัดการรถไฟฟ้ามีประสิทธิภาพมากขึ้น และอาจจะไม่จำเป็นต้องสำรองรถไฟฟ้าเพียงเพื่อทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าให้มีการกระจายการใช้งานรถไฟฟ้าอย่างสมดุลหรือการกระจายงานให้เท่ากันทุกขบวนจะทำให้รถไฟฟ้าแต่ละขบวนมีระยะทางสะสมที่ใกล้เคียงกันมาก จะส่งผลให้รถไฟฟ้าทุกขบวนเกิดความต้องการทำงานซ่อมบำรุงในช่วงเวลาเดียวกัน แต่เนื่องจากเครื่องจักรและอุปกรณ์สำหรับการซ่อมบำรุงมีราคาสูงจึงเกิดข้อจำกัดด้านความสามารถในการทำงานซ่อมบำรุงขึ้น เนื่องจากมีทรัพยากรไม่เพียงพอทำให้ไม่สามารถทำงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าพร้อมกันหลายขบวนได้ จึงก่อให้เกิดความล่าช้า (Tardiness) จากการเข้าทำงานซ่อมบำรุงขึ้น รถไฟฟ้าที่เข้ารับการทำงานซ่อมบำรุงล่าช้าจะมีความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายสูงขึ้น ซึ่งจะนำไปสู่ผลเสียต่างๆ มากมาย เช่น กระทบต่อความพึงพอใจของผู้โดยสาร เกิดอุบัติเหตุ เป็นต้น การจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและการซ่อมบำรุงเชิงป้องกันที่ดีจะทำให้ต้องใช้รถไฟฟ้าจำนวนน้อยที่สุด และเกิดความล่าช้าของการเข้าทำงานซ่อมบำรุงน้อยที่สุด

1.4. วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์เรื่อง การจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและการซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน มีดังนี้

1) เพื่อสร้างวิธีในการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าสำหรับให้บริการเดินรถไฟฟ้าตามตารางเดินรถที่กำหนดไว้ และรถไฟฟ้าจะต้องเข้าทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันเมื่อถึงกำหนดโดยไม่กระทบกับการให้บริการเดินรถ
2) เพื่อเป็นแนวทางในการประมาณจำนวนรถไฟฟ้าฟ้าที่น้อยที่สุดที่ควรมีสำหรับโครงการรถไฟฟ้าต่างๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.5. ขอบเขตและสมมติฐาน

ขอบเขตและสมมติฐานของวิทยานิพนธ์เรื่อง การจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและการซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน มีดังนี้

1.5.1. ตารางการเดินรถไฟฟ้า

ในการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและคำนวณจำนวนขบวนรถไฟฟ้าที่ต้องใช้นั้นจะอ้างอิงตามตารางการให้บริการเดินรถที่บริษัทผู้ให้บริการเดินรถของแต่ละโครงการประกาศไว้ โดยจะพิจารณา

เฉพาะสถานีต้นทางและสถานีปลายทางของการให้บริการเท่านั้น แต่ละบริษัทฯ ประกาศข้อมูลตารางการให้บริการเดินรถแตกต่างกันไป จึงตั้งสมมติฐานตารางเดินรถของโครงการต่างๆ ไว้ดังนี้

เวลาออกจากสถานีต้นทาง

มีเพียงรถไฟฟ้าสายแอร์พอร์ตลิงค์เท่านั้นที่ประกาศเวลาที่รถไฟฟ้าออกจากสถานีไปให้บริการเดินรถแต่ละรอบไว้อย่างชัดเจน ในขณะที่รถไฟฟ้าสายสีเขียวเข้ม สายสีเขียวอ่อน และสายสีน้ำเงินประกาศเป็นเวลาเปิด-ปิดให้บริการ รถไฟฟ้าขบวนแรก รถไฟฟ้าขบวนสุดท้าย และความถี่การเดินรถในแต่ละช่วงเวลาของวัน (ข้อมูลในภาคผนวก ก.) ดังนั้นตารางเวลาเดินรถจะเริ่มจากเวลาที่รถไฟฟ้าขบวนไฟฟ้าขบวนแรกออกให้บริการเดินรถรอบการแรก ส่วนรอบถัดไปจะห่างจากขบวนก่อนหน้าตามความถี่การให้บริการเดินรถในแต่ละช่วงเวลา และสิ้นสุดที่เวลาให้บริการรถไฟฟ้าขบวนสุดท้ายที่ประกาศไว้

เวลาถึงสถานีปลายทาง

พิจารณาเวลาที่ใช้ในการเดินรถจากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฉลี่ย ระยะทาง และเวลา ($V = s/t$) โดยรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนจะมีความเร็วเฉลี่ย 35 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และรถไฟฟ้าชานเมืองจะมีความเร็วเฉลี่ย 65 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เพราะฉะนั้นเวลาที่รถไฟฟ้าจะถึงสถานีปลายทางในแต่ละรอบการเดินรถคือเวลาที่รถไฟฟ้าออกจากสถานีรวมกับเวลาที่ใช้ในการเดินทางระหว่างสถานีต้นทางและสถานีปลายทาง

ตารางเวลาให้บริการเดินรถสำหรับโครงการรถไฟฟ้าในอนาคต

ตารางเวลาให้บริการเดินรถสำหรับโครงการรถไฟฟ้าในอนาคตจะอ้างอิงจากตารางเวลาเดินรถของโครงการรถไฟฟ้าในปัจจุบัน โดยจะมีช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วน 2 ช่วงคือ ช่วงเช้าและเย็น ส่วนช่วงเวลานอกเหนือช่วงเร่งด่วนคือชั่วโมงปกติ โดยชั่วโมงเร่งด่วนจะมีเวลาระหว่างขบวนรถไฟฟ้าน้อยกว่าชั่วโมงปกติ มีรายละเอียดดังแสดงในตาราง 4

ตาราง 4 สมมติฐานความเร็วเฉลี่ยและเวลาระหว่างขบวนรถในการให้บริการเดินรถไฟฟ้าของโครงการในอนาคต

	รถไฟฟ้าขนส่งมวลชน	**รถไฟฟ้าชานเมือง**
เวลาเปิดให้บริการ	5.00 – 24.00 น.	
ชั่วโมงเร่งด่วน	7.00 – 9.00 น. และ 16.30 – 20.00 น.	
ความเร็วเฉลี่ย (กม./ชม.)	35	65
เวลาระหว่างขบวนรถในชั่วโมงเร่งด่วน (นาที)	3.50	12.00
เวลาระหว่างขบวนรถในชั่วโมงปกติ (นาที)	7.50	15.00

1.5.2. การนำรถไฟฟ้าไปใช้บริการ

รถไฟฟ้าสามารถเดินทางจากสถานีต้นทางทั้งสองฝั่งไปยังศูนย์ซ่อมบำรุงฯได้ เวลาที่ใช้ในการเดินรถรวมเวลาที่รถไฟฟ้าจะต้องเดินทางจากโรงจอดรถหรือศูนย์ซ่อมบำรุงฯ มาที่สถานีต้นทางแล้วจึงไม่พิจารณาเวลาที่ต้องใช้เดินทางระหว่างโรงจอดรถไฟฟ้าหรือศูนย์ซ่อมบำรุงฯ และสถานีต้นทาง และในทำนองเดียวกันเวลาที่ใช้ในการเดินรถก็รวมเวลาในการเตรียมรถเพื่อนำไปให้บริการในรอบการเดินรถถัดไปแล้ว เช่น เวลาในการกลับรถ ดังนั้นรถไฟฟ้าจึงสามารถถูกนำไปให้บริการเดินรถในรอบถัดไปได้ทันทีเมื่อสิ้นสุดการให้บริการในรอบก่อนหน้า

1.5.3. เงื่อนไขการใช้งานรถไฟฟ้า

1) รถไฟฟ้ามีสภาพพร้อมใช้งานอยู่เสมอ กล่าวคือสามารถนำไปใช้งานได้ทันทีที่มีการเรียกใช้และไม่เกิดการเสียหายระหว่างการใช้งาน
2) เวลาที่ใช้ในการเดินรถไฟฟ้าแต่ละรอบและเวลาในการทำงานซ่อมบำรุงมีความแน่นอนเท่ากันทุกครั้ง

1.5.4. งานซ่อมบำรุง

งานซ่อมบำรุงที่จะนำมาพิจารณาในการจัดตารางคืองานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันเท่านั้น ไม่พิจารณางานซ่อมบำรุงครั้งใหญ่ (overhaul) เนื่องจากงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันมีความถี่ในการทำงานมากจึงทำให้มีผลต่อการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแต่ละขบวนมาก งานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันจะใช้เวลาในการทำงานไม่นาน และมีเครื่องจักรใหญ่ไม่มากเพราะไม่จำเป็นต้องถอดประกอบรถไฟฟ้า โครงการรถไฟฟ้าแต่ละสายจึงมีศูนย์ซ่อมบำรุงย่อยเพื่อทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันแก่รถไฟฟ้าของตัวเอง โดยกำหนดการเข้าทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันจะพิจารณาเป็นระยะทางกิโลเมตรสะสม เพราะจะใกล้เคียงกับสภาพการใช้งานจริงมากกว่าการนับอายุรถ

เนื่องจากรถไฟฟ้ามีระบบย่อยหลายระบบที่สามารถจัดให้ทำงานพร้อมกันได้ งานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันจึงมักทำการรวมกลุ่มงานที่มีกำหนดการทำงานใกล้เคียงกันให้ทำพร้อมกัน โดยมีกลุ่มงานตัวอย่างที่จะพิจารณาดังแสดงในตาราง 5 รถไฟฟ้าจะต้องเข้ารับการทำงานซ่อมบำรุงเมื่อถูกใช้งานครบทุกๆ ระยะทางที่กำหนด และไม่เกินช่วงระยะเผื่อที่กำหนดไว้ โดยแต่ละกลุ่มงานจะใช้เวลาในการทำงานซ่อมบำรุงแตกต่างกันไป เช่น รถไฟฟ้าจะต้องทำงานซ่อมบำรุงกลุ่ม M1 เมื่อถูกใช้งานไปทุกๆ 15,000 กิโลเมตร โดยมีระยะเผื่อ 10% คือ 1,500 กิโลเมตร หมายความว่ารถไฟฟ้าจะต้องทำงานซ่อมบำรุงกลุ่ม M1 เมื่อถูกใช้งานไปทุกๆ 15,000 ± 1,500 กิโลเมตร หรือ ทำงานซ่อมบำรุงเมื่อถูกใช้งานไป 13,500 – 16,500 กิโลเมตร ในงานวิจัยนี้ไม่อนุญาตให้รถไฟฟ้าเข้าทำงานซ่อมบำรุงก่อน 13,500 กิโลเมตร แต่หากรถไฟฟ้าเข้าทำงานซ่อมบำรุงหลัง 16,500 กิโลเมตรจะถือเป็นความเสียหายในการวางแผน โดยแผนการใช้งานรถไฟฟ้าจะต้องพิจารณาเพื่อให้รถไฟฟ้าได้รับการซ่อมบำรุงในช่วงเวลาที่ต้องการ และลดการเข้าทำงานซ่อมบำรุงล่าช้า โดยระยะเวลาซ่อมบำรุงคือระยะเวลารวมที่รถจะจอดอยู่ในศูนย์ซ่อมบำรุงเพื่อทำงานซ่อมบำรุงและจะไม่สามารถนำไปใช้งานให้บริการได้

ตาราง 5 งานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันที่จะพิจารณาในการจัดตารางการเดินรถ

กลุ่มงาน	รอบระยะทาง (กม.)	ระยะเผื่อ (%)	เวลาในการทำงานซ่อมบำรุง (นาที)
M1	15,000	±10	120
M2	45,000	±10	240
M3	90,000	±10	480

1.5.5. ความสามารถในการทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันของศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า

ศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้ามีความสามารถในการทำงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า (Capacity) ได้ 1 ขบวน และมีชั่วโมงการทำงานปกติของศูนย์ซ่อมบำรุงคือ 8.00 – 17.00 น. ถ้าหากทำงานซ่อมบำรุงนอกเวลานี้ถือว่าเป็นการทำงานนอกเวลา ในการวางแผนจะพยายามให้การทำงานซ่อมบำรุงเกิดในช่วงชั่วโมงการทำงานปกติ

1.5.6. การนับระยะทางวิ่งสะสมของรถไฟฟ้า

ในการนับระยะทางวิ่งสะสมของรถไฟฟ้าแต่ละขบวนจะนับจากระยะทางระหว่างสถานีต้นทางและสถานีปลายทางคูณกับจำนวนรอบการเดินรถที่รถไฟฟ้าขบวนนั้นถูกนำไปใช้วิ่ง เช่น ระยะทางจากสถานีต้นทางไปสถานีปลายทางคือ 20 กิโลเมตร รถไฟฟ้าถูกนำไปใช้งาน 3 รอบ รถไฟฟ้าขบวนนั้นจะมีระยะทางวิ่งสะสมเมื่อสิ้นสุดการใช้งานในรอบที่ 3 เท่ากับ 20 x 3 = 60 กิโลเมตร

1.6. สิ่งที่นำส่ง

สิ่งที่นำส่งในวิทยานิพนธ์เรื่อง การจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและการซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน มีดังนี้

1) วิธีการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าเพื่อนำไปใช้ให้บริการเดินรถตามตารางเดินรถที่กำหนดไว้และทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันเมื่อถึงเงื่อนไขที่กำหนด
2) ตัวอย่างตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและตารางการซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า
3) จำนวนรถไฟฟ้าที่ควรสำรองไว้ในระบบสำหรับโครงข่ายรถไฟฟ้าในอนาคตของประเทศไทย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.7. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำวิทยานิพนธ์เรื่อง การจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและการซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน มีดังนี้

1) แนวทางในการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้า
2) เป็นแนวทางในการประมาณจำนวนรถไฟฟ้าขั้นต่ำที่ต้องมีสำหรับโครงการรถไฟฟ้าในอนาคต
3) เป็นแนวทางในการกำหนดนโยบายการสำรองรถไฟฟ้าเพื่อให้มีรถไฟฟ้าที่พร้อมให้บริการเดินรถเสมอ ตามระดับความเสี่ยงและความเสียหายที่บริษัทเดินรถแต่ละบริษัทจะรับได้ หากเกิดกรณีที่มีรถไฟฟ้าต้องทำงานซ่อมบำรุงเชิงแก้ไขหรือไม่สามารถให้บริการได้

4) เป็นแนวทางในการประมาณจำนวนรถไฟฟ้าที่จะต้องมีสำหรับโครงการรถไฟฟ้าในประเทศไทย มาวิเคราะห์แนวทางการพัฒนาอุตสาหกรรมรถไฟฟ้าที่เป็นไปได้สำหรับประเทศไทย
5) ส่งเสริมให้ตระหนักถึงความสำคัญของการทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน

1.8. ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์เรื่อง การจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและการซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน มีดังนี้

1) ศึกษาและวิเคราะห์โครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบัน เช่น เส้นทางการเดินรถ ตารางเวลาในการให้บริการเดินรถ จำนวนรถไฟฟ้าที่มีอยู่ในระบบ และแนวทางในการทำงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า
2) ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า การหาจำนวนรถไฟฟ้า และการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้า รวมถึงโครงการรถไฟฟ้าที่กำลังจะเกิดขึ้นในอนาคต
3) สร้างวิธีการคำนวณหาจำนวนรถไฟฟ้าน้อยที่สุดที่ต้องมีอยู่ในระบบ และการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าสำหรับให้บริการตามตารางการเดินรถไฟฟ้า
4) สร้างวิธีการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าสำหรับให้การบริการและการซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน
5) ทดลองจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าสำหรับให้การบริการและการซ่อมบำรุงเชิงป้องกันในโครงการรถไฟฟ้าตัวอย่าง
6) สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน
7) จัดทำรายงานผลการดำเนินงาน
8) นำเสนอผลการดำเนินงาน

ในบทถัดไปจะกล่าวถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จากนั้นจะกล่าวถึงรายละเอียดของการดำเนินงานในขั้นตอนต่างๆ ตามด้วยผลลัพธ์ที่ได้จากการดำเนินงาน และสรุปผลการดำเนินงานตามลำดับ

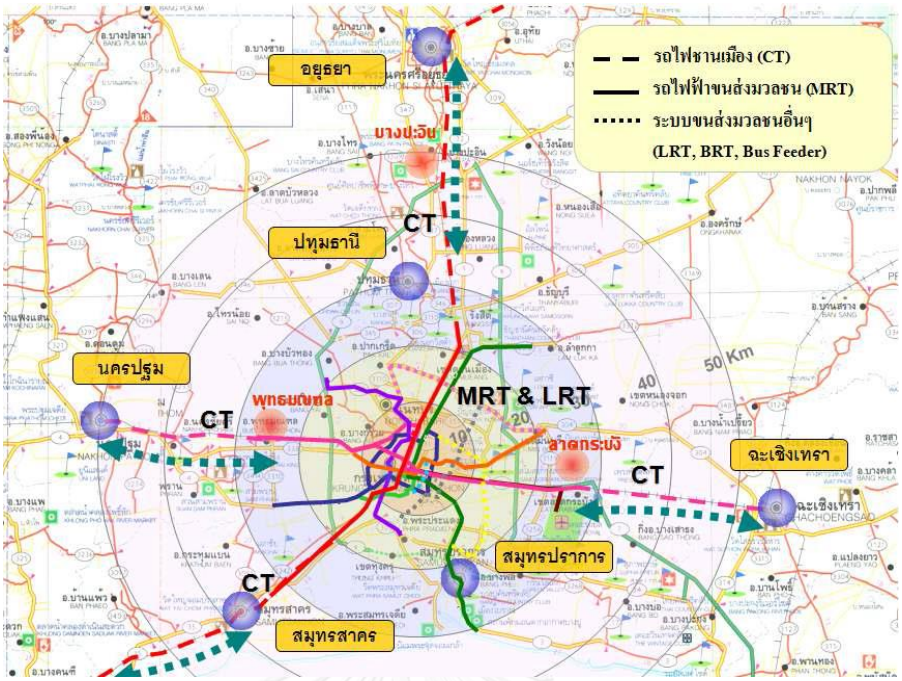
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ส่วนแรกคือโครงการรถไฟฟ้าในอนาคตของประเทศไทยที่จะนำมาทำการประมาณจำนวนรถไฟฟ้าที่ต้องการ ส่วนต่อมาจะกล่าวถึงการทำงานซ่อมบำรุงประเภทต่างๆ ส่วนถัดมาคือประเภทของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ตามด้วยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดเส้นทางการใช้รถไฟฟ้าเมื่อกำหนดตารางเดินรถไว้ล่วงหน้า และส่วนสุดท้ายคืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและการทำงานซ่อมบำรุง

2.1. โครงการรถไฟฟ้าในอนาคตของประเทศไทย

เพื่อพัฒนาระบบการคมนาคมในเขตกรุงเทพ ฯ และปริมณฑลของประเทศไทยให้สามารถเชื่อมต่อกันอย่างมีประสิทธิภาพ ในปีพ.ศ. 2553 สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (สนข.) กระทรวงคมนาคมได้วางโครงข่ายเส้นทางเดินรถโดยพัฒนาจากโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบัน ประกอบกับการสำรวจความหนาแน่นของการเดินทางในเส้นทางต่างๆ สามารถแบ่งเส้นทางการคมนาคมเป็นเส้นทางสายหลัก สายรอง และสายเสริม โดยมีโครงข่ายดังแสดงในรูป 1รูป 3 เส้นทางสายหลักจะใช้การขนส่งมวลชนทางรางขนาดใหญ่ รวมทั้งสิ้น 8 โครงการ ดังแสดงในตาราง 6 โดยเส้นทางสายหลักแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือระบบรถไฟฟ้าชานเมืองที่ให้บริการขนส่งระหว่างใจกลางเมืองกรุงเทพมหานครออกสู่ชุมชนรอบนอกในรัศมี 50 – 100 กิโลเมตร ด้วยความเร็วเฉลี่ย 50 – 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีระยะห่างระหว่างสถานี 3 – 5 กิโลเมตร อีกระบบคือระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนให้บริการในเขตเมืองที่มีความหนาแน่นสูงภายในรัศมี 15 – 30 กิโลเมตรจากใจกลางกรุงเทพมหานคร ด้วยความเร็วเฉลี่ย 35 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีระยะห่างระหว่างสถานีประมาณ 1 กิโลเมตร ใช้เวลาในการเดินทางไม่เกิน 1 ชั่วโมง ส่วนเส้นทางสายรองและสายเสริมจะให้บริการในเขตเมืองที่มีความหนาแน่นปานกลางและต่ำ มีหน้าที่สนับสนุนเส้นทางสายหลักด้วยการนำผู้โดยสารจากชุมชนต่างๆ เข้าสู่เส้นทางสายหลักโดยใช้ระบบการขนส่งต่างๆ เช่น ระบบขนส่งมวลชนทางรางขนาดเบา รถโดยสารประจำทาง รถตู้ เรือ เป็นต้น [3]



รูป 3 โครงข่ายรถไฟฟ้าในเขตกรุงเทพและปริมณฑล [3]

ตาราง 6 ข้อมูลโครงการรถไฟฟ้าสายหลัก [2]

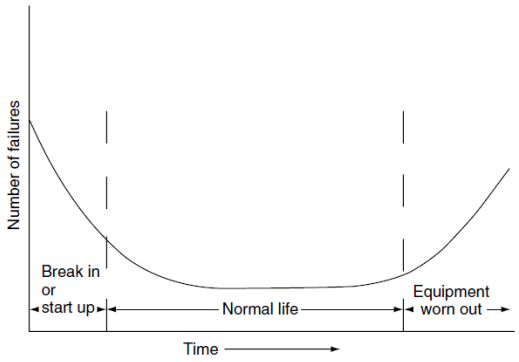
ประเภทรถไฟฟ้า	โครงการรถไฟฟ้า	ระยะทาง (กม.)
รถไฟฟ้าชานเมือง	สายสีแดงเข้ม	80.8
	สายสีแดงอ่อน	54
	แอร์พอร์ตลิงค์	50.3
รถไฟฟ้าขนส่งมวลชน	สายสีเขียวเข้ม	66.5
	สายสีเขียวอ่อน	23
	สายสีน้ำเงิน	55
	สายสีม่วง	46.6
	สายสีส้ม	37.5
รวม		*413.7*

2.2. การทำงานซ่อมบำรุง

การซ่อมบำรุงรถก็เพื่อรักษาให้เครื่องจักรสามารถใช้งานได้ โดยหลักการบริหารการทำงานซ่อมบำรุงแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ ซ่อมเมื่อเสีย (Run to Failure) และซ่อมแบบป้องกันการเสีย (Preventive Maintenance) [4] มีรายละเอียดดังนี้

1) *ซ่อมเมื่อเสีย* เป็นหลักการทำงานซ่อมบำรุงที่จะลงมือทำเมื่อเครื่องจักรเกิดการเสียหายขึ้นแล้ว กล่าวคือจะไม่มีการลงมือทำถ้าหากว่าเครื่องจักรยังสามารถใช้งานได้อยู่ การทำงานซ่อมบำรุงแบบซ่อมเมื่อเสียจะไม่มีค่าใช้จ่ายระหว่างที่เครื่องจักรยังสามารถทำงานได้ดี แต่ถ้าเมื่อใดที่เครื่องจักรเกิดการเสียหายขึ้นมาจะนำไปสู่ค่าใช้จ่ายก้อนใหญ่ที่อาจมีจำนวนมากกว่าการซ่อมแบบป้องกันถึง 3 เท่า ซึ่งประกอบด้วย (1) ค่าจัดเก็บอะไหล่ที่สูง เนื่องจากต้องมีอะไหล่ให้พร้อมเมื่อเครื่องจักรเสีย (2) ค่าแรงงานนอกเวลาทำงาน เพราะไม่สามารถกำหนดเวลาเสียของเครื่องจักรได้ และถ้าเครื่องจักรเสียหลังเวลาทำงานก็จำเป็นที่จะต้องให้แรงงานมาทำงานซ่อมทันที ให้เครื่องจักรใช้งานได้เร็วที่สุดเพื่อไม่ให้กระทบต่อแผนการทำงาน (3) มีเวลาหยุดเครื่องนาน และส่งผลให้ (4) เครื่องจักรมีความพร้อมในการทำงานต่ำ การทำงานซ่อมบำรุงแบบนี้จึงมักใช้สำหรับชิ้นส่วนหรืออะไหล่ขนาดเล็ก ราคาไม่แพง ไม่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัย และไม่ส่งผลต่อการทำงานของระบบใหญ่

2) *ซ่อมแบบป้องกันการเสีย* เป็นหลักการทำงานซ่อมบำรุงที่พยายามจะลงมือทำก่อนเครื่องจักรจะเกิดการเสียขึ้นโดยอาศัยประสบการณ์และการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเป็นตัวกำหนดเวลาการลงมือทำงานซ่อมบำรุงแบบป้องกันนี้ โดยปกติแล้วเครื่องจักรจะมีอัตราการเกิดการเสียหายแบบกราฟรูปอ่างน้ำ (Bathtub Curve) ดังแสดงในรูป 4 คือในช่วงต้นของการใช้งานจะมีอัตราการเสียสูงแต่จะลดลงอย่างรวดเร็วจนคงที่ในระยะเวลาหนึ่ง และเมื่อถึงจุดหนึ่งอัตราการเสียจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ฉะนั้นการกำหนดเวลาทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันที่ดีที่สุดคือช่วงเวลาก่อนที่เครื่องจักรจะมีอัตราการเสียหายเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่ถ้ากำหนดเวลาการเริ่มทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันเร็วเกินไปก็จะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงโดยใช่เหตุและเครื่องจักรยังไม่ได้ใช้งานเต็มประสิทธิภาพ แต่ถ้ากำหนดช้าเกินไปเครื่องจักรก็อาจจะเกิดเสียหายก่อนซ่อมได้ จึงเกิดการทำนายการทำงานซ่อมบำรุง (Predictive Maintenance) ขึ้นเพื่อตรวจสอบสภาพจริงของเครื่องจักรนั้นก่อนจะลงมือทำงานซ่อมบำรุงจริง เช่น การตรวจสภาพด้วยสายตา การตรวจวัดค่าต่างๆ เพื่อลดการทำงานซ่อมบำรุงที่เสียเปล่า



รูป 4 อัตราการเกิดการเสียหายของเครื่องจักรตลอดช่วงอายุการใช้งาน

เป้าหมายของการทำงานซ่อมบำรุงในองค์กรระดับสากลมีดังนี้ [4]

1) เพื่อให้เครื่องจักรมีความพร้อมในการใช้งานมากที่สุด
2) เพื่อให้มีสภาพในการทำงานดีที่สุดทั้งเครื่องจักรหลัก เครื่องจักรเสริม แรงงาน
3) เพื่อให้ทรัพยากรที่ใช้ในการซ่อมบำรุงอย่างคุ้มค่ามากที่สุด
4) เพื่อให้เครื่องจักรมีอายุการใช้งานนานที่สุด
5) เพื่อให้มีการจัดเก็บอะไหล่สำรองน้อยที่สุด
6) เพื่อให้สามารถเข้าทำงานซ่อมบำรุงได้อย่างรวดเร็วที่สุด

งานซ่อมบำรุงสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ งานซ่อมบำรุงเชิงปรับปรุง (Maintenance Improvement: MI) และงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) ซึ่งเป็นการทำงานซ่อมบำรุงแบบป้องกันการเสีย และงานซ่อมบำรุงเชิงแก้ไข (Corrective Maintenance) ซึ่งเป็นการทำงานซ่อมบำรุงแบบซ่อมเมื่อเสีย มีรายละเอียดดังนี้ [4]

1) *งานซ่อมบำรุงเชิงปรับปรุง* มีระดับความน่าเชื่อถือของเครื่องจักรเป็นตัวกำหนดการทำงานซ่อมบำรุง เช่น ในกรณีที่เครื่องจักรมีอายุมากแล้วทำให้มีอัตราการเสียเพิ่มขึ้น อาจจะเกิดการเสียบ่อยขึ้น ทำให้มีความต้องการซ่อมบำรุงมากขึ้น หรือต้องการพัฒนาให้เครื่องจักรมีความทันสมัย มีสมรรถนะและประสิทธิภาพมากขึ้น งานซ่อมบำรุงประเภทนี้เช่น การยกเครื่อง การดัดแปลง การอัพเกรดอุปกรณ์ เป็นต้น
2) *งานซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน* ใช้เงื่อนไขในการกำหนดการทำงานซ่อมบำรุง คือ เมื่อครบเวลาที่กำหนด เช่น ทุกสัปดาห์ ทุกเดือน ทุกปี หรือเมื่อครบการใช้งานที่กำหนด เช่น ทุก 10,000

กิโลเมตร ทุก 2,000 ชั่วโมง หรือเมื่อสภาพการใช้งานหลังการตรวจสอบมีแนวโน้มเข้าใกล้เกณฑ์ที่กำหนด

3) *งานซ่อมบำรุงเชิงแก้ไข* ใช้เหตุการณ์เป็นตัวกำหนดการทำงานซ่อมบำรุง นั่นก็คือเมื่อเครื่องจักรไม่สามารถใช้งานได้ หรือเมื่อมีสัญญาณแจ้งเตือนความผิดปกติ

รถไฟฟ้าเป็นเครื่องจักรขนาดใหญ่ที่มีความซับซ้อนเป็นอย่างมากประกอบด้วยส่วนที่เป็นเครื่องจักรกลและส่วนที่เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ มีชิ้นส่วนและอุปกรณ์มากมายซึ่งมีความสำคัญต่อการทำงานของระบบมากน้อยแตกต่างกันไป เพื่อให้รถไฟฟ้ามีสภาพดีอยู่เสมอจึงมีการแบ่งกลุ่มการทำงานซ่อมบำรุงระบบรถไฟฟ้าออกเป็น 3 กลุ่มดังนี้

1) *งานซ่อมบำรุงครั้งใหญ่ (Overhaul)* เป็นการซ่อมบำรุงเพื่อปรับปรุงให้รถไฟฟ้าที่ผ่านการใช้งานมานานมีสภาพที่ดีขึ้นเหมือนใหม่อีกครั้ง มีการถอด-ประกอบตัวรถไฟฟ้าเพื่อตรวจสภาพและทำการซ่อมแซมชิ้นส่วนภายในและชิ้นส่วนชิ้นใหญ่ๆ เช่น การกลึงล้อ การเปลี่ยนน้ำมันเกียร์ การซ่อมบำรุงระบบแอร์ การปรับปรุงโครงสร้างตัวรถไฟ การอัพเกรดชิ้นส่วนและอุปกรณ์ต่างๆ เป็นต้น การซ่อมบำรุงครั้งใหญ่ต้องใช้เวลาในการหยุดรถเพื่อนำใช้ในการดำเนินการซ่อมบำรุงนาน แต่ไม่บ่อยครั้ง สามารถวางแผนการทำงานและกำหนดเวลาการเข้าทำงานได้ล่วงหน้า เงื่อนไขที่รถไฟฟ้าต้องเข้ารับการซ่อมบำรุงประเภทนี้คือเมื่อครบอายุหรือระยะทางวิ่งสะสม แต่นิยมใช้อายุเป็นตัวกำหนดมากกว่าเพราะง่ายต่อการวางแผนการทำงานซ่อมบำรุง เช่น ทุก 1 ปี ทุก 6 ปี ทุก 9 ปี เป็นต้น โดยใช้เวลาในการดำเนินงานซ่อมบำรุงนานมากกว่า 1 วัน

2) *งานซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน (PM)* เป็นการทำงานเพื่อเพิ่มความมั่นใจในการใช้งานรถไฟฟ้า รักษาให้สภาพการใช้งานไม่ให้แย่ลง มักเป็นงานตรวจสอบ เช่น การตรวจสภาพด้วยสายตาตามรายการที่กำหนดไว้ (Check List) การตรวจวัดเบื้องต้น เป็นต้น เพื่อเช็คสภาพของชิ้นส่วน-อุปกรณ์ต่างๆ ว่าสมควรได้รับการลงมือปฏิบัติงานซ่อมบำรุงแล้วหรือยัง รวมถึงการซ่อมแซมหรือเปลี่ยนชิ้นส่วนอะไหล่ชิ้นเล็กๆ เช่น ตรวจสารหล่อลื่นต่างๆ ระบบส่องสว่าง ระบบไฟฟ้า เป็นต้น เงื่อนไขที่รถไฟฟ้าต้องเข้ารับการซ่อมบำรุงประเภทนี้คือเมื่อครบอายุหรือระยะทางวิ่งสะสมอย่างใดอย่างหนึ่งก็ได้ งานซ่อมบำรุงกลุ่มนี้จะใช้เวลาในการดำเนินงานนานไม่เกิน 1 วัน นาน และจะทำบ่อยครั้ง เช่น ทุก 2 สัปดาห์หรือ 7,500 กิโลเมตร ทุก 1 เดือนหรือ 15,000 กิโลเมตร เป็นต้น โดยกำหนดเวลาไม่เกิน 1 ปี

3) *งานซ่อมบำรุงเชิงแก้ไข (CM)* เป็นการทำงานซ่อมบำรุงเมื่อรถไฟฟ้าเกิดความผิดปกติขึ้น จึงเป็นกลุ่มงานที่บริษัทให้บริการเดินรถต้องการให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด เพราะเป็นงานงานที่ไม่สามารถวางกำหนดการทำงานไว้ล่วงหน้าได้ แต่ต้องเตรียมแผนการรับมือให้พร้อมอยู่เสมอโดยจะต้องมีทีมช่างฝีมือและอุปกรณ์ให้พร้อมตลอดเวลา ทำให้เกิดความสูญเปล่าจำนวนมาก

เพื่อประสิทธิภาพการใช้งานรถไฟฟ้าที่ดี จึงมีการนำงานซ่อมบำรุงครั้งใหญ่และงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันมาจัดตารางการทำงานซ่อมบำรุงไว้ล่วงหน้าเพราะสามารถรู้กำหนดการทำงานซ่อมบำรุงต่างๆ ล่วงหน้าได้ แต่เนื่องจากรถไฟฟ้าประกอบไปด้วยชิ้นส่วนอุปกรณ์มากมาย ทำให้มีงานซ่อมบำรุงที่จะต้องทำมีจำนวนมากตามไปด้วย และการทำงานซ่อมบำรุงแต่ละครั้งจะต้องหยุดใช้งานรถไฟฟ้าขบวนนั้นเพื่อนำมาทำงานซ่อมบำรุง ฉะนั้นเพื่อให้ใช้เวลาในการหยุดรถไฟฟ้าน้อยที่สุด จึงควรจะทำการจัดกลุ่มงานซ่อมบำรุงที่สามารถทำพร้อมกันได้ให้ทำพร้อมกัน กล่าวคืองานที่มีรอบเวลาในการทำงานซ่อมบำรุงพร้อมกันของแต่ละชิ้นส่วนให้รวมเป็นกลุ่มเดียวแล้วทำพร้อมกัน [5]

2.3. การวิจัยดำเนินงานกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การวิจัยดำเนินงาน หรือ Operation Research เป็นวิธีการทางวิทยาศาสตร์แบบหนึ่งที่ใช้ในการออกแบบการทำงานเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ [6] เช่น เงื่อนไขด้านข้อจำกัดทางทรัพยากร ความสามารถในการทำงาน เป็นต้น การวิจัยดำเนินงานนี้ถูกนำมาใช้ครั้งแรกในช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 เพื่อวางแผนการจัดการทำงานต่างๆ ของกองทัพอังกฤษ หลังจากนั้นถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางสำหรับออกแบบการทำงานต่างๆ เช่น วางแผนการผลิตในอุตสาหกรรมต่างๆ วางแผนการใช้งานทรัพยากร วางแผนการเดินทางของอุตสาหกรรมการขนส่ง เป็นต้น

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หรือ Mathematical Model เป็นเครื่องมืออย่างหนึ่งสำหรับใช้ในการหาคำตอบของการออกแบบการทำงาน โดยจะมีเป้าหมายว่าคำตอบที่ได้จะต้องมีผลลัพธ์ดีที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ โดยใช้สถานการณ์และข้อมูลจริงมาเป็นพื้นฐานในการตัดสินใจ การใช้วิธีการนี้ในการหาคำตอบจึงต้องมีความเข้าใจในสภาพของปัญหาเป็นอย่างดี การสร้างแบบจำลองประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

1. สมการวัตถุประสงค์ (objective function) เป็นสมการที่กำหนดตัวชี้วัดที่ใช้พิจารณาในการหาคำตอบ โดยมีเป้าหมาย 2 ทิศทาง คือ มากที่สุด และ น้อยที่สุด ความสัมพันธ์ของตัวแปร

ตัดสินใจต่างๆ จะถูกกำหนดขึ้นเพื่อใช้ในการหาคำตอบ เช่น เพื่อหากำไรมากที่สุด เพื่อหาต้นทุนน้อยที่สุด เป็นต้น

2. ตัวแปรตัดสินใจ (decision variables) เป็นตัวแปรที่มีผลต่อสมการวัตถุประสงค์ และเป็นตัวแปรที่ต้องการตัดสินใจว่าคำตอบที่ดีที่สุดเป็นเท่าไร เช่น จำนวนหน่วยของสินค้าที่ต้องขายให้ได้ เป็นต้น
3. สมการเงื่อนไข (constraints) เป็นสมการที่เป็นเงื่อนไขของแบบจำลอง เป็นการกำหนดความเป็นไปได้ของแบบจำลองจากสถานการณ์จริง เช่น ความสามารถในการผลิต จำนวนสินค้าขั้นต่ำที่ต้องผลิต เป็นต้น

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบโครงข่าย (Network model) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประเภทหนึ่งที่ใช้ได้ดีสำหรับการหาคำตอบบางประเภท มีการกำหนดกลุ่มของสัญลักษณ์ 2 ประเภท คือ จุด (node) และ เส้น (arc) ซึ่งก็คือเส้นที่เป็นไปได้ที่เชื่อมระหว่างจุดต่างๆ เพื่อเป็นส่วนประกอบของโครงข่าย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบโครงข่ายสามารถแบ่งเป็นประเภทย่อยๆ สำหรับแก้ปัญหาที่มีลักษณะแตกต่างกันออกไป ปัญหา Minimum-Cost Network Flow เป็นปัญหาพื้นฐานของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบโครงข่าย โดยมีเงื่อนไข เช่น เส้นแต่ละเส้นในโครงข่ายมีคุณสมบัติต่างกัน จุดแต่ละจุดมีความสามารถต่างกัน เป็นต้น ใช้ในการหาคำตอบของปัญหาการขนส่ง (transportation) การสั่งการใช้งาน (assignment) การวางแผนโครงการ (critical path) การจัดเส้นทางการทำงานที่สั้นที่สุด (shortest path) เป็นต้น [7]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

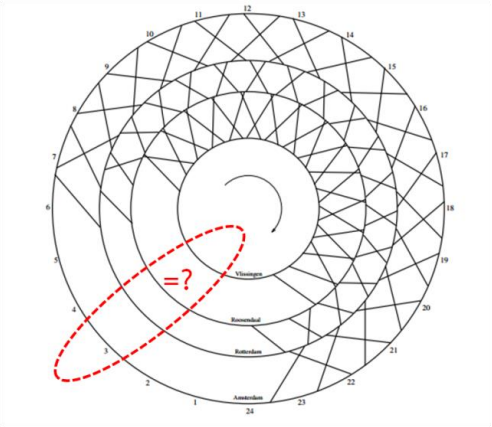
2.4. การจัดตาราง

การจัดตาราง หรือ scheduling เป็นกระบวนการจัดลำดับหรือจัดเรียงกิจกรรม รวมถึงการจัดสรรทรัพยากร ที่มีอยู่อย่างจำกัดเพื่อทำกิจกรรมให้สำเร็จลุล่วงได้ตามวัตถุประสงค์ เป้าหมาย และเงื่อนไขที่กำหนด [8, 9] ในปัจจุบันการจัดตารางมีความสำคัญมากในทุกๆ ภาคส่วน ไม่ว่าจะเป็นโรงงานอุตสาหกรรม โรงพยายาบาล สายการบิน หน่วยงานรัฐบาล ธนาคาร หรือแม้แต่ในชีวิตประจำวันของบุคคลทั่วไป การจัดตาราที่ดีจะทำให้สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยประหยัดเวลาซึ่งเป็นทรัพยากรที่มีค่าอย่างหนึ่ง และอาจจะส่งผลให้สามารถลดต้นทุนได้หรืออาจจะได้กำไรเพิ่มขึ้นอีกด้วย

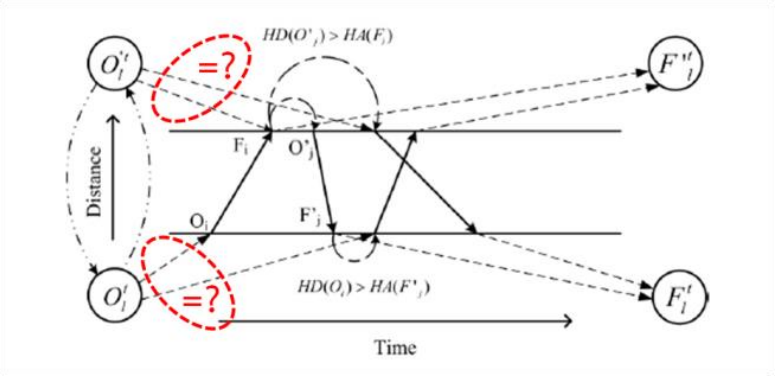
ปัญหาการจัดตารางส่วนใหญ่เป็นปัญหาประเภทเอ็นพีแบบยาก (NP-Hard) คือเมื่อขนาดของปัญหาที่ใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้ต้องใช้เวลาในการหาคำตอบที่ดีที่สุดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในบางปัญหาอาจจะสามารถหาคำตอบได้แต่ต้องใช้เวลานานและไม่มีประสิทธิภาพ โดยส่วนใหญ่แล้วจะไม่สามารถหาคำตอบได้ ฮิวริสติกจึงเป็นแนวทางที่นิยมนำมาแก้ปัญหาการจัดตาราง ถึงแม้จะไม่ได้การันตีว่าจะได้คำตอบที่ดีที่สุด แต่ฮิวริสติกจะนำเสนอคำตอบที่ดีเพียงพอและยอมรับได้ (Good & Acceptable) ซึ่งในปัจจุบันมีนักวิจัยหลายท่านได้นำเสนอฮิวริสติกสำหรับการจัดตารางที่เป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลาย เช่น เทคนิคการค้นหางานข้างเคียง (Neighborhood Search Technique) การค้นหาแบบข้อห้าม (Tabu Search) ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) เป็นต้น [9]

2.5. การจัดเส้นทางการใช้รถไฟฟ้าตามตารางเวลาที่กำหนด

มีงานวิจัยหลายงานที่ศึกษาเกี่ยวกับการจัดเส้นทางการเดินรถไฟฟ้า โดยงานวิจัยส่วนใหญ่จะมีการกำหนดตารางการให้บริการเดินรถไว้ล่วงหน้า ซึ่งตารางการเดินรถจะมีลักษณะเป็นวัฏจักรแบบวนซ้ำ เช่น ตารางให้บริการเดินรถแบบรายวัน แบบรายเดือน เป็นต้น มีการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างแบบจำลองเครือข่ายมาใช้ในการแก้ปัญหา วัตถุประสงค์พื้นฐานของปัญหาประเภทนี้คือการหาจำนวนเส้นทางการเดินรถที่น้อยที่สุด ซึ่งก็คือจำนวนรถไฟฟ้าที่น้อยที่สุดนั่นเอง สำหรับให้บริการเดินรถได้ตามเงื่อนไขต่างๆ ที่แตกต่างกันไป มีเทคนิคในการหาคำตอบต่างๆ มากมาย เช่น การนับจำนวนรถไฟฟ้าที่จอดอยู่ที่สถานีในเวลากลางคืนหลังสิ้นสุดการให้บริการ เพราะเป็นช่วงเวลาที่รถไฟฟ้าทุกขบวนจะจอดอยู่สถานี [10] ดังแสดงในรูป 5 หรือการนับจำนวนรถไฟฟ้าที่ออกจากโรงจอดรถไฟฟ้าก่อนไปให้บริการในแต่ละวัน [11] ดังแสดงในรูป 6



รูป 5 แนวคิดการนับจำนวนรถที่จอดอยู่ในสถานีเมื่อสิ้นสุดการให้บริการในแต่ละวัน [10]



รูป 6 แนวคิดการนับจำนวนรถที่ออกจากโรงจอดรถเพื่อไปให้บริการในแต่ละวัน [11]

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยส่วนหนึ่งที่พิจารณาการถอดประกอบตู้รถไฟด้วย เนื่องจากตู้รถไฟแต่ละตู้มีความสามารถในการรองรับผู้โดยสารต่างกัน ประกอบกับตู้รถไฟฟ้าแต่ละประเภทมีจำนวนจำกัด การถอดประกอบตู้รถไฟจึงช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของความสามารถในการให้บริการ เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของผู้โดยสารในแต่ละช่วงเวลาตามที่คาดการณ์ไว้ และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้งานตู้รถไฟ โดยกระบวนการถอดประกอบตู้รถไฟนี้ไม่สามารถทำขณะให้บริการเดินรถได้ และเนื่องจากต้องใช้อุปกรณ์พิเศษที่มีอย่างจำกัด จึงสามารถทำได้เฉพาะบางสถานีเท่านั้น [12] ต่อมามีการขยายขอบเขตการศึกษาการใช้งานรถไฟฟ้าสำหรับใช้ในการให้บริการเดินรถเส้นทางเดียวเป็นโครงข่ายหลายเส้นทางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานรถไฟฟ้า เนื่องจากขนาดปัญหาที่ใหญ่ขึ้น ทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่สามารถแก้ปัญหาอย่างมีประสิทธิภาพได้อีกต่อไป [13] คอมพิวเตอร์ต้องใช้เวลานานในการหาคำตอบ และอาจจะไม่สามารถหาคำตอบได้ การแก้ปัญหาด้วยวิธีฮิวริสติกต่างๆ จึงถูกนำเสนอในการหาคำตอบ [14]

2.6. การจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและการทำงานซ่อมบำรุง

งานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันมีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันการเกิดการเสียหายที่ไม่คาดคิดขึ้น และยังช่วยยืดอายุการใช้งานของรถไฟฟ้า ดังนั้นการทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันจึงมีความสำคัญอย่างมากในหลายๆ ประการ จึงมักถูกนำมาพิจารณาวางแผนควบคู่ไปกับการใช้งาน โดยตัวชี้วัดหนึ่งที่สำคัญสำหรับการทำงานซ่อมบำรุงคือ ความล่าช้าของการเข้ารับการทำงานซ่อมบำรุง (tardiness) [15] เนื่องจากถ้าถึงกำหนดการทำงานซ่อมบำรุงแล้วไม่ทำงานซ่อมบำรุงและยังถูกนำไปใช้งานต่ออีก จะทำให้รถไฟฟ้ามีสภาพที่แย่ลงและเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายหรืออันตรายได้

ในการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าสำหรับให้บริการและทำงานซ่อมบำรุงสามารถทำได้หลายแนวทาง แนวทางหนึ่งที่ง่ายคือการพิจารณาการใช้งานแยกกับการทำงานซ่อมบำรุง โดยเริ่มแรกหาจำนวนรถไฟฟ้าน้อยที่สุดสำหรับให้บริการตามตารางเดินรถที่กำหนด แล้วทำการจัดเส้นทางการเดินรถให้แต่ละเส้นทางมีระยะทางวิ่งใกล้เคียงกัน จากนั้นพิจารณาการทำงานซ่อมบำรุงเพื่อคำนวณจำนวนรถไฟฟ้าที่จะสำรองเพื่อทำงานซ่อมบำรุงโดยเฉพาะ [11] ทำให้การทำงานซ่อมบำรุงไม่รบกวนการใช้งานรถไฟฟ้าเลย แต่การมีรถไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดค่าใช้จ่ายมากขึ้น สำหรับรถไฟระหว่างเมืองที่มีเวลาหยุดพักระหว่างรอบการให้บริการมาก ซึ่งอาจจะมากพอสำหรับทำงานซ่อมบำรุงบางงานได้ รวมกับเวลาช่วงกลางคืนหลังจากหยุดให้บริการ การสำรองรถไฟเพื่อทำงานซ่อมบำรุงโดยเฉพาะอาจจะไม่จำเป็น [16] รถไฟฟ้าจะต้องทำงานซ่อมบำรุงเมื่อถูกใช้งานถึงระยะทางที่กำหนด [17] การวางแผนการใช้งานมักจะเป็นการวางแผนระยะสั้น เช่น 2-3 วัน หรือ 1 สัปดาห์ เพื่อให้สามารถใช้งานรถไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด ไม่เข้าทำงานซ่อมบำรุงเร็วเกินไปหรือช้าเกินไป นอกจากนี้อุปกรณ์สำหรับทำงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้ายังมีราคาที่แพงมาก ทำให้เกิดข้อจำกัดด้านความสามารถในการทำงานซ่อมบำรุง ศูนย์ปฏิบัติงานซ่อมบำรุงจะมีในบางสถานีเท่านั้น ซึ่งแต่ละศูนย์ปฏิบัติงานซ่อมบำรุงอาจจะมีความสามารถในการทำงานซ่อมบำรุงที่แตกต่างกัน ศูนย์ปฏิบัติงานซ่อมบำรุงหนึ่งๆ อาจจะสามารถทำงานซ่อมบำรุงได้เพียงบางงาน และมีความต้องการการใช้งานสูง ทำให้ต้องจัดตารางการใช้งานให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด [18, 19] และเนื่องจากศูนย์ปฏิบัติงานซ่อมบำรุงมีอยู่ที่บางสถานีเท่านั้น เมื่อถึงเวลาการทำงานซ่อมบำรุงจึงต้องมีรถไฟบางขบวนที่ต้องวิ่งรถเปล่าเพื่อไปยังศูนย์ปฏิบัติงานซ่อมบำรุงต่างๆ เกิดความสูญเสียขึ้น ทั้งด้านพลังงาน แรงงาน และเวลา แต่ในการยอมให้เกิดการสูญเสียบ้างจะช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นในการจัดเส้นทางการเดินรถ และอาจจะทำให้สามารถใช้รถไฟฟ้าในจำนวนที่น้อยลงได้ [20, 21]

ปัญหาการจัดตารางได้รับการศึกษาวิจัยอย่างแพร่หลาย มีงานวิจัยหลายฉบับที่สามารถพิสูจน์ได้ว่าปัญหาการจัดตารางเป็นปัญหาประเภทเอ็นพีแบบยาก โดยเฉพาะการจัดตารางการทำงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าที่มีความซับซ้อนมาก มีส่วนประกอบต่างๆ มากมายที่ต้องการการดูแลรักษา อีกทั้งยังมีจำนวนงานการทำงานซ่อมบำรุงมากมาย เมื่อไม่สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ วิธีฮิวริสติกต่างๆ จึงถูกนำเสนอในการแก้ปัญหามากมาย เช่น การจัดกลุ่มการทำงานซ่อมบำรุงที่สามารถกระทำพร้อมกันได้ให้อยู่ในกลุ่มเดียวกัน [5, 22] การจำกัดช่วงเวลาการพิจารณา

การทำงาน และการแบ่งเป็นปัญหาย่อยๆ แล้วค่อยแยกกันหาคำตอบ [23-25] จะเห็นว่าทั้งหมดนี้เพื่อลดขนาดของปัญหาทั้งสิ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

รถไฟฟ้าซึ่งเป็นหัวใจของการดำเนินธุรกิจการให้บริการเดินรถไฟฟ้าเป็นทรัพยากรที่มีราคาแพงมาก จึงต้องบริหารจัดการการใช้งานให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยจะต้องให้บริการเดินรถตามตารางเวลาที่กำหนดและเข้าทำงานซ่อมบำรุงเมื่อถึงเวลา โครงการรถไฟฟ้าสายต่างๆ ที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบันจึงถูกนำมาพิจารณา พบว่าในตารางเวลาให้บริการเดินรถนั้นจะมีช่วงเวลาเร่งด่วนที่มีรอบการให้บริการมาก จึงต้องการรถไฟฟ้าจำนวนมากเพื่อให้สามารถให้บริการได้ตามตารางที่กำหนดไว้ แต่ในช่วงเวลาปกตินั้นมีรอบการให้บริการน้อยลง จึงอาจจะสามารถใช้รถไฟฟ้าในการให้บริการเดินรถได้ในจำนวนที่น้อยลง ทำให้มีรถไฟฟ้าบางขบวนว่างจากการให้บริการเดินรถในช่วงเวลานี้และสามารถนำไปทำงานซ่อมบำรุงได้ ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการดำเนินงานในแต่ละขั้นตอนเพื่อจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน ในส่วนแรกนั้นกล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกนำมาใช้ในการหาจำนวนรถไฟฟ้าและจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและการทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน โดยรถไฟฟ้าจำนวนน้อยที่สุดจะต้องสามารถให้บริการเดินรถตามตารางเวลาที่กำหนดไว้ จากนั้นรถไฟฟ้าที่มีระยะทางสะสมครบกำหนดการทำงานซ่อมบำรุงจะต้องเข้าทำงานซ่อมบำรุงภายในระยะเวลาที่กำหนด แต่เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่สามารถใช้ในการแก้ปัญหาการจัดตารางได้ ส่วนที่สองจึงนำเสนอฮิวริสติกสำหรับการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันแบ่งเป็นการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุล และการใช้งานรถไฟฟ้าแบบไม่สมดุล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบ่งเป็น 2 แบบจำลอง โดยแบบจำลองแรกเป็นแบบจำลองสำหรับหาจำนวนรถไฟฟ้าที่น้อยที่สุดที่เพียงพอต่อการนำไปให้บริการตามตารางรถไฟฟ้าที่กำหนดให้ ส่วนแบบจำลองที่สองเป็นการนำรถไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองแรกไปจัดตารางการใช้สำหรับให้บริการเดินรถไฟฟ้าและทำงานซ่อมบำรุงโดยให้เกิดความล่าช้าน้อยที่สุด

3.1.1. แบบจำลองสำหรับหาจำนวนรถไฟฟ้าที่น้อยที่สุดสำหรับให้บริการเดินรถไฟฟ้า

วัตถุประสงค์ของแบบจำลองนี้คือเพื่อหาจำนวนรถไฟฟ้าที่น้อยที่สุดสำหรับนำไปใช้ให้บริการเดินรถตามตารางเดินรถที่กำหนดไว้ โดยตารางเดินรถจะประกอบด้วยสถานีต้นทาง เวลาออกจากสถานีต้นทาง สถานีปลายทาง และเวลาออกจากสถานีปลายทาง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

<u>สัญลักษณ์และพารามิเตอร์</u>

S เซตของรอบการให้บริการเดินรถไฟฟ้า, s = {1, 2, 3, ..., n}

ds_s สถานีต้นทางของรอบบริการ s

dt_s เวลาออกเดินทางจากสถานีต้นทางของรอบบริการ s

as_s สถานีปลายทางของรอบบริการ s

at_s เวลาเดินทางถึงสถานีปลายทางของรอบบริการ s

open เวลาเปิดให้บริการเดินรถไฟฟ้า (นาที) = 0

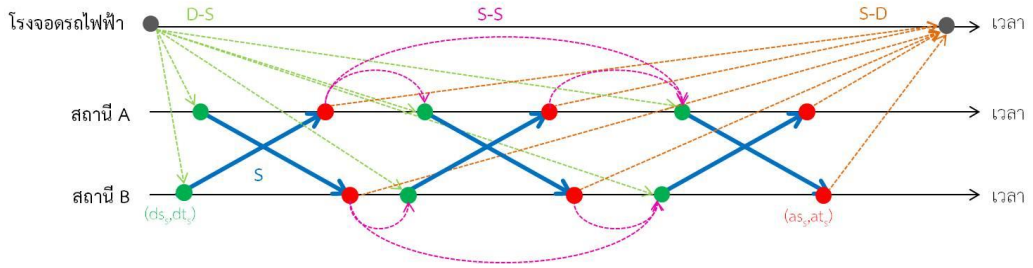
close เวลาปิดให้บริการเดินรถไฟฟ้า (นาที) = (24×60) - 1 = 1439

จุด

สำหรับจุดหรือ node จะบ่งบอกเหตุการณ์การเข้าออกของรถไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ณ เวลา (t) และสถานที่ (p) ต่างๆ โดยสถานที่ในแบบจำลองนี้ประกอบไปด้วยโรงจอดรถไฟฟ้า สถานี A และสถานี B สำหรับในแบบจำลองเพื่อหาจำนวนรถไฟฟ้าที่เพียงพอสำหรับการให้บริการตามตารางเดินรถที่กำหนดไว้ประกอบด้วยเซตของจุดดังนี้

- D_D เซตของจุดที่รถออกจากโรงจอดรถไฟฟ้าเมื่อเวลาเปิดให้บริการ
  = {(depot , open)}
- A_D เซตของจุดที่รถกลับมาโรงจอดรถไฟฟ้าเมื่อเวลาปิดให้บริการ
  = {(depot , close)}
- D_S เซตของจุดที่รถออกจากสถานีต้นทางของรอบบริการ s
  = $\{(ds_s , dt_s) ; \forall s \in S \}$
- A_S เซตของจุดที่รถมาถึงสถานีปลายทางของรอบบริการ s
  = $\{(as_s , at_s) ; \forall s \in S \}$

เส้น



รูป 7 โครงข่ายของจุดและเส้นสำหรับการหาจำนวนรถไฟฟ้าที่น้อยที่สุดสำหรับตารางเดินรถที่กำหนด

สำหรับเส้น หรือ arc คือการแสดงการเคลื่อนที่ของรถไฟฟ้าจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง รูป 7 แสดงถึงเส้นที่เชื่อมจากจุดต่างๆ ในแบบจำลองการหาจำนวนรถไฟฟ้าที่น้อยที่สุดสำหรับตารางเดินรถที่กำหนดไว้ โดยชุดของเส้นที่เป็นไปได้ในแบบจำลองนี้คือ เส้นการให้บริการเดินรถจากสถานีต้นทางไปยังสถานีปลายทางตามเวลาที่กำหนดไว้ตามตารางเดินรถ เส้นที่รถไฟฟ้าเดินทางจากโรงจอดรถไฟฟ้ามาที่สถานีต้นทางเพื่อให้บริการ เส้นที่รถไฟฟ้าที่เดินทางกลับไปยังโรงจอดรถไฟฟ้าเมื่อให้บริการเสร็จ และเส้นที่รถไฟฟ้าถูกนำไปใช้ให้บริการใหม่ในรอบการเดินรถถัดไป โดยจะต้องมีสถานีต้นทางเดียวกับสถานีปลายทางของรอบการเดินรถก่อนหน้าและจะต้องมีเวลาออกเดินทางช้ากว่าเวลามาถึงของรอบการเดินรถก่อนหน้า ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

- A_s เซตของเส้นที่แสดงถึงรอบการให้บริการ s (S)
  $= \{((ds_s,dt_s), (as_s, at_s)); \forall\ s \in S\ \}$
- A_{DS} เซตของเส้นจากโรงจอดรถไปสถานีต้นทาง (D-S)
  $= \{(i,j)\ ;\ \forall\ i \in D_D\ ,\ \forall\ j \in D_S\ \}$
- A_{SD} เซตของเส้นจากสถานีปลายทางกลับโรงจอดรถ (S-D)
  $= \{(i,j)\ ;\ \forall\ i \in A_S\ ,\ \forall\ j \in A_D\}$
- A_{SS} เซตของเส้นที่แสดงถึงการนำรถไฟฟ้าไปให้บริการรอบใหม่ (S-S)
  $= \{(i,j)\ ;\ \forall\ i \in A_S\ ,\ \forall\ j \in D_S : t_i \leq t_j\ ,\ p_i = p_j\ \}$
  เมื่อ p_i , t_i , p_j และ t_j หมายถึง สถานที่และเวลาของจุด i และ j ตามลำดับ

ดังนั้น $A = A_s \cup A_{DS} \cup A_{SD} \cup A_{SS}$

ตัวแปรตัดสินใจ

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{ถ้ามีรถไฟฟ้าเดินทางจากจุด i ไปจุด j} \\ 0 & \text{ถ้าไม่มีรถไฟฟ้าเดินทางจากจุด i ไปจุด j} \end{cases}$$

แบบจำลอง

$$\min \quad z = \sum_{(i,j)\in A_{DS}} X_{ij} \tag{0}$$

st.

$$X_{ij} = 1 \qquad \forall (i,j) \in A_s \tag{1}$$

$$\sum_{i:(i,j)\in A} X_{ij} = \sum_{k:(j,k)\in A} X_{jk} \qquad \forall j \in D_S \cup A_S \tag{2}$$

$$\sum_{(i,j)\in A_{DS}} X_{ij} = \sum_{(i,j)\in A_{SD}} X_{ij} \tag{3}$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \qquad \forall (i,j) \in A \tag{4}$$

เมื่อสมการที่ (0) แสดงถึงสมการวัตถุประสงค์ คือการที่มีรถไฟฟ้าออกจากโรงจอดรถไปให้บริการน้อยที่สุดคือหมายถึงจำนวนรถไฟฟ้าที่น้อยที่สุดสำหรับตารางเดินรถที่กำลังพิจารณาอยู่ โดยจะต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ คือ จะต้องมีรถไฟฟ้าไปให้บริการทุกรอบการให้บริการดังสมการที่ (1) ส่วนสมการที่ (2) คือเมื่อมีรถไฟฟ้าไปยังจุดใดจะต้องมีรถไฟฟ้าออกจากจุดนั้นเท่ากัน สมการที่ (3) คือรถไฟฟ้าที่ออกจากโรงจอดรถจะต้องมีจำนวนเท่ากับรถไฟฟ้าที่กลับมายังโรงจอดรถเมื่อให้บริการเสร็จสิ้นแล้ว และสุดท้ายสมการที่ (4) คือการกำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจมีค่าเป็นศูนย์และหนึ่งเท่านั้น

จากแบบจำลองนี้ทำให้สามารถทราบจำนวนรถไฟฟ้าที่น้อยที่สุดที่จำเป็นสำหรับตารางการเดินรถที่กำหนดไว้ จากนั้นจะนำจำนวนรถที่ได้ไปใช้จัดตารางการให้บริการและทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันเมื่อถึงระยะทางที่กำหนดในแบบจำลองถัดไป

3.1.2. แบบจำลองสำหรับจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและทำงานซ่อมบำรุง

แบบจำลองนี้เป็นการปรับปรุงแบบจำลองการหาจำนวนรถไฟฟ้า โดยจะทำการจัดตารางการใช้งานและการซ่อมบำรุงของรถไฟฟ้าที่ได้จากแบบจำลองก่อนหน้านี้ เนื่องจากการเข้าทำงานซ่อมบำรุงหลังกำหนดจะทำให้ความเสี่ยงที่รถไฟฟ้าจะเสียหายมีสูงขึ้น แต่ถ้าหากเข้าทำงานซ่อมบำรุงเร็วเกินไปก็จะเป็นการสิ้นเปลือง ดังนั้นเป้าหมายของการจัดตารางการใช้งานและซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าคือให้มีค่าความล่าช้าของการเข้าทำงานซ่อมบำรุงที่มากที่สุด (maximum tardiness) หรือค่าการเริ่ม

ทำงานซ่อมบำรุงก่อนกำหนดที่มากที่สุด (maximum earliness) มีค่าน้อยที่สุด เมื่อความล่าช้าและค่าการเริ่มทำงานก่อนกำหนดคือจำนวนระยะทางสะสมของรถไฟฟ้าขณะเข้ารับการทำงานซ่อมบำรุงที่มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าระยะทางที่กำหนดไว้ มีรายละเอียดของแบบจำลองดังต่อไปนี้

<u>สัญลักษณ์และพารามิเตอร์</u>

M เซตของกลุ่มงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน, m = {1, 2, 3, ..., e}

R เซตของรถไฟฟ้า, r = {1, 2, 3, ..., f}

D เซตของวันในแผนการจัดตาราง, d = {1, 2, 3, ..., g}

du_m ระยะเวลาการทำงานซ่อมบำรุง m (นาที)

in_mi_m รอบระยะทางที่กำหนดเพื่อเข้าทำงานซ่อมบำรุง m (กม.)

in_a_m ระยะเผื่อของกลุ่มงานซ่อมบำรุง m

$mi^{0,r}$ ระยะทางสะสมเริ่มต้นของรถไฟฟ้า r (กม.)

$mi_c_m^{0,r}$ ระยะทางสะสมที่รถไฟฟ้า r ต้องการทำงานซ่อมบำรุง m ตอนเริ่มต้น (กม.)

cap ความสามารถในการซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า (ขบวน)

bigm ค่าสมมติจำนวนมากๆ เพื่อทำให้สมการเงื่อนไขเป็นจริง

$dist_{ij}$ ระยะทางจากจุด i ไปจุด j (กม.)

จุด

สำหรับแบบจำลองการจัดตารางนี้จะมีจุดที่แสดงเวลาของศูนย์ปฏิบัติงานซ่อมบำรุงเพิ่มขึ้นมาจากแบบจำลองการหาจำนวนรถไฟฟ้า ซึ่งก็คือจุดที่เริ่มทำงานซ่อมบำรุง และจุดที่งานซ่อมบำรุงเสร็จสิ้น โดยมีรายละเอียดดังนี้

- S_WS เซตของจุดที่เริ่มทำงานซ่อมบำรุง = {(workshop , open)} $\cup$ {(workshop , at_s) ; $\forall$ s $\in$ S }
- F_WS เซตของจุดที่ทำงานซ่อมบำรุงเสร็จ = {(p_i, t_i+du_m) ; $\forall$ i $\in$ S_WS, $\forall$ m $\in$ M }

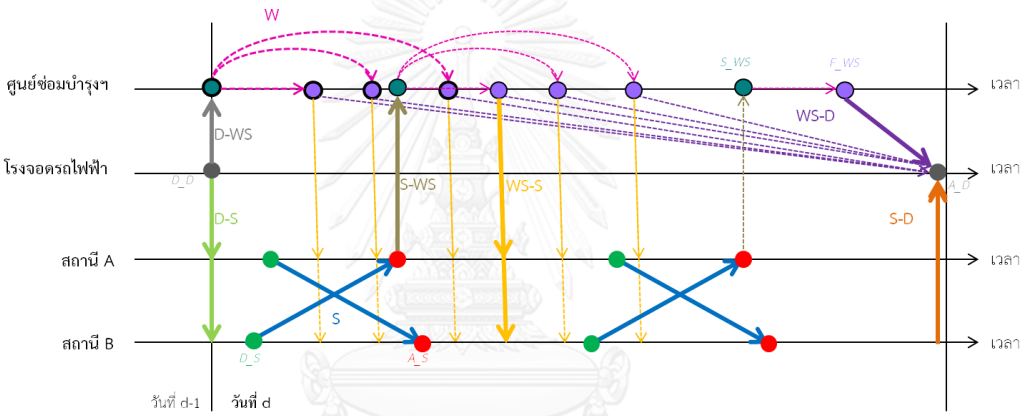
ดังนั้น N = D_D $\cup$ A_D $\cup$ D_S $\cup$ A_S $\cup$ S_WS $\cup$ F_WS.

งานซ่อมบำรุง

เนื่องจากตารางการเดินรถที่มีช่วงเวลาชั่วโมงเร่งด่วนและชั่วโมงปกติ ทำให้มีบางช่วงเวลาที่รถไฟฟ้าสามารถถูกนำทำงานซ่อมบำรุงได้ระหว่างรอให้บริการให้รอบการเดินรถถัดไป ดังนั้นงานซ่อมบำรุงคือการกำหนดช่วงเวลาที่เป็นไปได้ที่รถไฟฟ้าจะถูกนำไปทำงานซ่อมบำรุงโดยไม่กระทบกับตารางการให้บริการเดินรถ โดยกำหนดให้ (m,i,j) คือช่วงเวลาการทำงานซ่อมบำรุง m ที่มีเวลาเริ่มต้นการทำงานที่จุด i และเสร็จสิ้นการทำงานที่จุด j ซึ่งมีดังนี้

- $W = \{(m,i,j) ; \forall\, m \in M , \forall\, i \in S_WS, \forall\, j \in F_WS : t_j=t_i+du_m\}$

เส้น (arc)



รูป 8 โครงข่ายของจุดและเส้นสำหรับการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและทำงานซ่อมบำรุง

สำหรับแบบจำลองการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าจะมีชุดเส้นที่แสดงถึงการเดินทางของรถไฟฟ้าเพิ่มเติมจากแบบจำลองการหาจำนวนรถไฟฟ้าเพื่อไปยังศูนย์ปฏิบัติการทำงานซ่อมบำรุงเพิ่มขึ้นมา โดยรวมเป็น 7 กลุ่ม คือ เส้นที่รถไฟฟ้าเดินทางจากโรงจอดรถไปยังสถานีต้นทาง เส้นที่รถไฟฟ้าเดินทางจากโรงจอดรถไปยังศูนย์ปฏิบัติการทำงานซ่อมบำรุงเพื่อทำงานซ่อมบำรุง เส้นที่รถไฟฟ้าเดินทางจากสถานีปลายทางไปยังศูนย์ปฏิบัติการทำงานซ่อมบำรุงเมื่อมีเวลาว่างระหว่างรอให้บริการในรอบถัดไป เส้นที่รถไฟฟ้าเดินทางจากศูนย์ปฏิบัติการทำงานซ่อมบำรุงไปยังสถานีต้นทางเพื่อกลับไปให้บริการต่อ เส้นที่รถไฟฟ้าเดินทางจากสถานีปลายทางกลับไปเก็บที่โรงจอดรถเมื่อให้บริการเสร็จสิ้น และเส้นที่รถไฟฟ้าเดินทางจากศูนย์ปฏิบัติการทำงานซ่อมบำรุงกลับไปยังโรงจอดรถเมื่อไม่มีรอบการเดินรถที่สามารถไปให้บริการต่อได้ดังแสดงในรูป 8 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- A_s เซตของเส้นที่แสดงถึงรอบการให้บริการ s

  $= \{((ds_s,dt_s), (as_s,at_s)) ; \forall\ s \in S\}$

- A_{DS} เซตของเส้นจากโรงจอดรถไปสถานีต้นทาง (D-S)

  $= \{(i, (p_j,t_i)) ; \forall\ i \in D_D, \forall\ j \in D_S\}$

- A_{DWS} เซตของเส้นจากโรงจอดรถไปศูนย์ซ่อมฯ (D-WS)

  $= \{(i,j) ; \forall\ i \in D_D , \forall\ j \in S_WS : t_i=t_j\}$

- A_{SWS} เซตของเส้นจากสถานีปลายทางไปศูนย์ซ่อมฯ (S-WS)

  $= \{(i,j) ; \forall\ i \in A_S , \forall\ j \in S_WS : t_i=t_j\}$

- A_{WSS} เซตของเส้นจากศูนย์ซ่อมฯไปสถานีปลายทาง (WS-S)

  $= \{(i,(p_j,t_i)); \forall\ i \in F_WS , \forall\ j \in D_S\}$

- A_{SD} เซตของเส้นจากสถานีปลายทางกลับโรงจอดรถ (S-D)

  $= \{((p_i,t_j),j) ; \forall i \in A_S , \forall j \in A_D\}$

- A_{WSD} เซตของเส้นจากศูนย์ซ่อมฯไปโรงจอดรถ (WS-D)

  $= \{(i,j) ; \forall\ i \in F_WS , \forall\ j \in A_D\}$

ดังนั้น $A = A_S \cup A_{DS} \cup A_{DWS} \cup A_{SWS} \cup A_{WSS} \cup A_{SD} \cup A_{WSD}$

<u>ตัวแปรตัดสินใจ</u>

$X_{ij}^{d,r}$ = { 1 ถ้ารถไฟฟ้า r เดินทางจากจุด i ไปจุด j ในวันที่ d
0 ถ้ารถไฟฟ้า r ไม่ได้เดินทางจากจุด i ไปจุด j ในวันที่ d

$Y_{mij}^{d,r}$ = { 1 ถ้ารถไฟฟ้า r ทำงานซ่อมบำรุง m จากจุด i ไปจุด j ในวันที่ d
0 ถ้ารถไฟฟ้า r ไม่ได้ทำงานซ่อมบำรุง m จากจุด i ไปจุด j ในวันที่ d

$Mi_i^{d,r}$ ระยะทางสะสมของรถไฟฟ้า r ที่จุด i ในวันที่ d (กม.)

$Mi_c_{m,i}^{d,r}$ ระยะทางสะสมที่รถไฟฟ้า r ต้องการทำงานซ่อมบำรุง m ที่จุด i ในวันที่ d (กม.)

E ค่าการทำงานก่อนกำหนดที่มากที่สุด (กม.)

T ค่าความล่าช้าที่มากที่สุด (กม.)

<u>แบบจำลอง</u>

$$\min \quad z = \max\{E, T\} \tag{5}$$

st.

$$X_{ij}^{d,r} = 1 \qquad \forall\, d \in D, \forall\, (i,j) \in A_S \tag{6}$$

$$\sum_{j:(i,j)\in A} X_{ij}^{d,r} \le 1 \qquad \forall\, d \in D, \forall\, r \in R, \forall\, i \in D_D \tag{7}$$

$$\sum_{i:(i,j)\in A} X_{ij}^{d,r} \le 1 \qquad \forall\, d \in D, \forall\, r \in R, \forall\, j \in A_D \tag{8}$$

$$\sum_{r\in R}\sum_{(i,k)\in A} X_{ik}^{d,r} = \sum_{r\in R}\sum_{(k,j)\in A} X_{kj}^{d,r} \qquad \forall\, d \in D, \forall\, i \in D_D, \forall\, j \in A_D \tag{9}$$

$$\sum_{(k,l)\in A:p_l=p_i,t_l\le t_i} X_{kl}^{d,r} - \sum_{(k,l)\in A:(k,l)\ne(i,j),p_k=p_i,t_k\le t_i} X_{kl}^{d,r} \ge X_{ij}^{d,r} \qquad \forall\, d \in D, \forall\, r \in R, \forall\, (i,j) \in A\backslash\{A_{DS}, A_{DWS}\} \tag{10}$$

$$\sum_{(j,i)\in A} X_{ji}^{d,r} = \sum_{(m,i,j)\in W} Y_{mij}^{d,r} \qquad \forall\, d \in D, \forall\, r \in R, \forall\, i \in S_WS \tag{11}$$

$$Y_{mij}^{d,r} = \sum_{(j,k)\in A} X_{jk}^{d,r} \qquad \forall\, d \in D, \forall\, r \in R, \forall\, (m,i,j) \in W \tag{12}$$

$$\sum_{r\in R}\sum_{(i,j)\in A:p_j=p_k,t_j\le t_k} X_{ik}^{d,r} - \sum_{r\in R}\sum_{(i,j)\in A:p_i=p_k,t_i\le t_k} X_{kj}^{d,r} \le cap \qquad \forall\, d \in D, \forall\, k \in S_WS \cup F_WS \tag{13}$$

$$X_{ij}^{d,r} \le \sum_{(k,i)\in A_S} X_{ki}^{d,r} \qquad \forall\, d \in D, \forall\, r \in R, \forall\, (i,j) \in A_{SWS} \tag{14}$$

$$X_{ij}^{d,r} \le \sum_{(k,l)\in A_S:p_k=p_j,t_k\ge t_j} X_{kl}^{d,r} \qquad \forall\, d \in D, \forall\, r \in R, \forall\, (i,j) \in A_{WSS} \tag{15}$$

$$Mi_k^{d,r} = mi^{0,r} + \sum_{d'\in D:d'<d}\sum_{(i,j)\in A} X_{ij}^{d',r} * dist_{ij} + \sum_{(i,j)\in A:\, t_j\le t_k} X_{ij}^{d,r} * dist_{ij} \qquad \forall\, d \in D, \forall\, r \in R, \forall\, k \in N \tag{16}$$

$$Mi_c_{m,k}^{d,r} = mi_c_m^{0,r} + \sum_{d'\in D:d'<d}\sum_{(m,i,j)\in W} Y_{mij}^{d',r} * in_mi_m + \sum_{(m,i,j)\in W:t_j\le t_k} Y_{mij}^{d,r} * in_mi_m \qquad \forall\, d \in D, \forall\, r \in R, \forall\, k \in N, \forall\, m \in M \tag{17}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

$$E \geq (1\text{-}in_a_m)*Mi_c_{m,i}^{d,r} - Mi_i^{d,r} - \left(1\text{-}Y_{mij}^{d,r}\right)*bigm \quad \forall\, d \in D, \forall\, r \in R, \forall\, i \in N, \forall\, (mij) \in W, \forall\, m \in M \quad (18)$$

$$T \geq Mi_i^{d,r} - (1+in_a_m)*Mi_c_{m,i}^{d,r} - \left(1\text{-}Y_{mij}^{d,r}\right)*bigm \quad \forall\, d \in D, \forall\, r \in R, \forall\, i \in N, \forall\, (mij) \in W, \forall\, m \in M \quad (19)$$

$$X_{ij}^{d,r} \in \{0,1\} \quad \forall\, d \in D, \forall\, r \in R, \forall\, (i,j) \in A \quad (20)$$

$$Y_{mij}^{d,r} \in \{0,1\} \quad \forall\, d \in D, \forall\, r \in R, \forall\, (m,i,j) \in W \quad (21)$$

$$Mi_i^{d,r} \geq 0 \quad \forall\, d \in D, \forall\, r \in R, \forall\, i \in N \quad (22)$$

$$Mi_c_{m,i}^{d,r} \geq 0 \quad \forall\, d \in D, \forall\, r \in R, \forall\, I \in N, \forall\, m \in M \quad (23)$$

$$E \geq 0 \quad (24)$$

$$T \geq 0 \quad (25)$$

แบบจำลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและทำงานซ่อมบำรุง โดยในการทำงานซ่อมบำรุงของรถไฟฟ้าแต่ละงานจะต้องไม่ทำก่อนหรือหลังกำหนดจนเกินไป เพราะถ้าทำงานซ่อมบำรุงเร็วไปจะทำให้สิ้นเปลืองโดยใช่เหตุ แต่ถ้าทำช้าเกินไปจะเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหาย สมการที่ (5) แสดงถึงสมการวัตถุประสงค์คืองานซ่อมบำรุงทั้งหมดที่ต้องทำก่อนหรือช้ากว่ากำหนดมากที่สุดจะต้องมีค่าน้อยที่สุด (minimize maximum earliness and tardiness) โดยอยู่ภายใต้สมการเงื่อนไขต่างๆ ดังจะกล่าวต่อไปนี้

สมการที่ (6) คือรอบการให้บริการเดินรถตามตารางเดินรถที่กำหนดไว้จะต้องมีรถไฟฟ้า 1 ขบวนไปให้บริการ สมการที่ (7) และ (8) หมายความว่ารถไฟฟ้าแต่ละขบวนจะออกและเข้าโรงจอดรถได้วันละครั้งเท่านั้น สมการที่ (9) คือกฎการอนุรักษ์การเข้าและออกโรงจอดรถไฟฟ้าของรถไฟฟ้าในแต่ละวัน กล่าวคือในแต่ละวันจะต้องมีจำนวนรถไฟฟ้าเข้าและออกเท่ากัน

สมการที่ (10) คือการนับจำนวนรถไฟฟ้าสะสมที่มีในสถานที่ (p) ณ เวลา (t) ใดๆ โดยในทุกๆ เส้นการเดินรถจะต้องมีรถไฟฟ้ารออยู่ก่อนถึงจะสามารถใช้รถไฟฟ้าในเส้นทางการเดินรถนั้นได้ เช่น จำนวนรถที่เข้าและออกสถานีของจุด i (p_i) ก่อนเวลาของจุด i (t_i) จะต้องมีจำนวนมากกว่าหรือเท่ากับจำนวนรถไฟฟ้าที่จะนำไปใช้ในเส้นการเดินรถจากจุด i ไปจุด j

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สมการที่ (11) และ (12) คือกฎการอนุรักษ์การเข้าและออกของจุดในศูนย์ปฏิบัติงานซ่อมบำรุงฯ สมการที่ (13) จำกัดจำนวนรถไฟฟ้าให้ศูนย์ซ่อมบำรุงฯ ตามความสามารถการซ่อมบำรุงที่มี

สมการที่ (14) และ (15) หมายถึงรถไฟฟ้าที่ไปยังสถานีต้นทางจะต้องถูกนำไปใช้ให้บริการ เพื่อป้องกันการเดินรถตัวเปล่า

สมการที่ (16) คือการนับระยะทางสะสมของรถไฟฟ้าแต่ละขบวนที่จุดต่างๆ โดยการคิดผลรวมระยะทางของเส้นการเดินรถที่รถไฟฟ้าขบวนนั้นๆ ได้วิ่ง จากนั้นในสมการที่ (17) เป็นการกำหนดค่ากำหนดระยะทางสะสมของงานซ่อมบำรุงต่างๆ ซึ่งเป็นระยะทางสะสมครั้งต่อไปที่รถไฟฟ้าแต่ละขบวนจะต้องเข้าทำงานซ่อมบำรุง ณ จุดต่างๆ โดยกำหนดระยะทางสะสมจะเปลี่ยนเมื่อรถไฟฟ้าได้เข้าทำงานซ่อมบำรุงงานนั้นๆ เสร็จแล้ว

สมการที่ (18) คือการหาค่าการเข้าทำงานซ่อมบำรุงก่อนกำหนดที่มากที่สุด ซึ่งมาจากผลต่างระหว่างระยะทางการเข้าทำงานก่อนกำหนดที่น้อยที่สุดที่ยอมรับได้และระยะทางสะสมของรถไฟฟ้าจริงตอนเข้าทำงานซ่อมบำรุง โดยค่าการเข้าทำงานซ่อมบำรุงก่อนกำหนดที่มากที่สุดจะมีค่าก็ต่อเมื่อเกิดการทำงานซ่อมบำรุงใดๆ ขึ้น หรือก็คือเมื่อ $Y_{mij}^{d,r}$ มีค่าเท่ากับ 1 ในทำนองเดียวกันสมการที่ (19) เป็นการหาค่าความล่าช้าของการเข้าทำงานที่มากที่สุด ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างระยะทางการเข้าทำงานหลังกำหนดที่มากที่สุดที่ยอมรับได้และระยะทางสะสมของรถไฟฟ้าจริงตอนเข้าทำงานซ่อมบำรุง ส่วนสมการที่ (20) – (25) คือการกำหนดประเภทของตัวแปรตัวสินใจต่างๆ

สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้มีตัวแปรตัดสินใจเป็นจำนวนมาก ซึ่งโดยส่วนใหญ่เป็นตัวแปรประเภทไบนารี่ ทำให้ขนาดของปัญหามีขนาดใหญ่ จึงไม่สามารถหาผลเฉลยได้ ตัวอย่างเช่น โครงการรถไฟฟ้าสายแอร์พอร์ตลิงค์ที่มีรถไฟฟ้าจำนวน 5 ขบวน มีรอบการให้บริการ 161 รอบต่อวัน เมื่อพิจารณาการจัดตาราง 1 วัน จะมีตัวแปรประมาณมากกว่า 31,000 ตัว เมื่อทดลองจัดตาราง 2 วัน ต้องใช้เวลากว่า 8 ชั่วโมง แต่ยังไม่สามารถหาผลเฉลยที่ดีที่สุดได้ ซึ่งเหมือนกับปัญหาการจัดตารางทั่วไปที่เป็นปัญหาเอ็นพีแบบยาก (NP-Hard) [8], [12] ทั้งนี้ในการจัดตารางการทำงานควรจะทำการจัดครั้งละอย่างน้อย 1 ปี อีกทั้งโครงการรถไฟฟ้าสายอื่นๆ มีจำนวนรอบการให้บริการต่อวันมากกว่านี้มาก ดังนั้นวิธีการฮิวริสติกสำหรับจัดตารางการการใช้งานรถไฟฟ้าและทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันจึงถูกนำเสนอ โดยจะกล่าวถึงในส่วนถัดไป

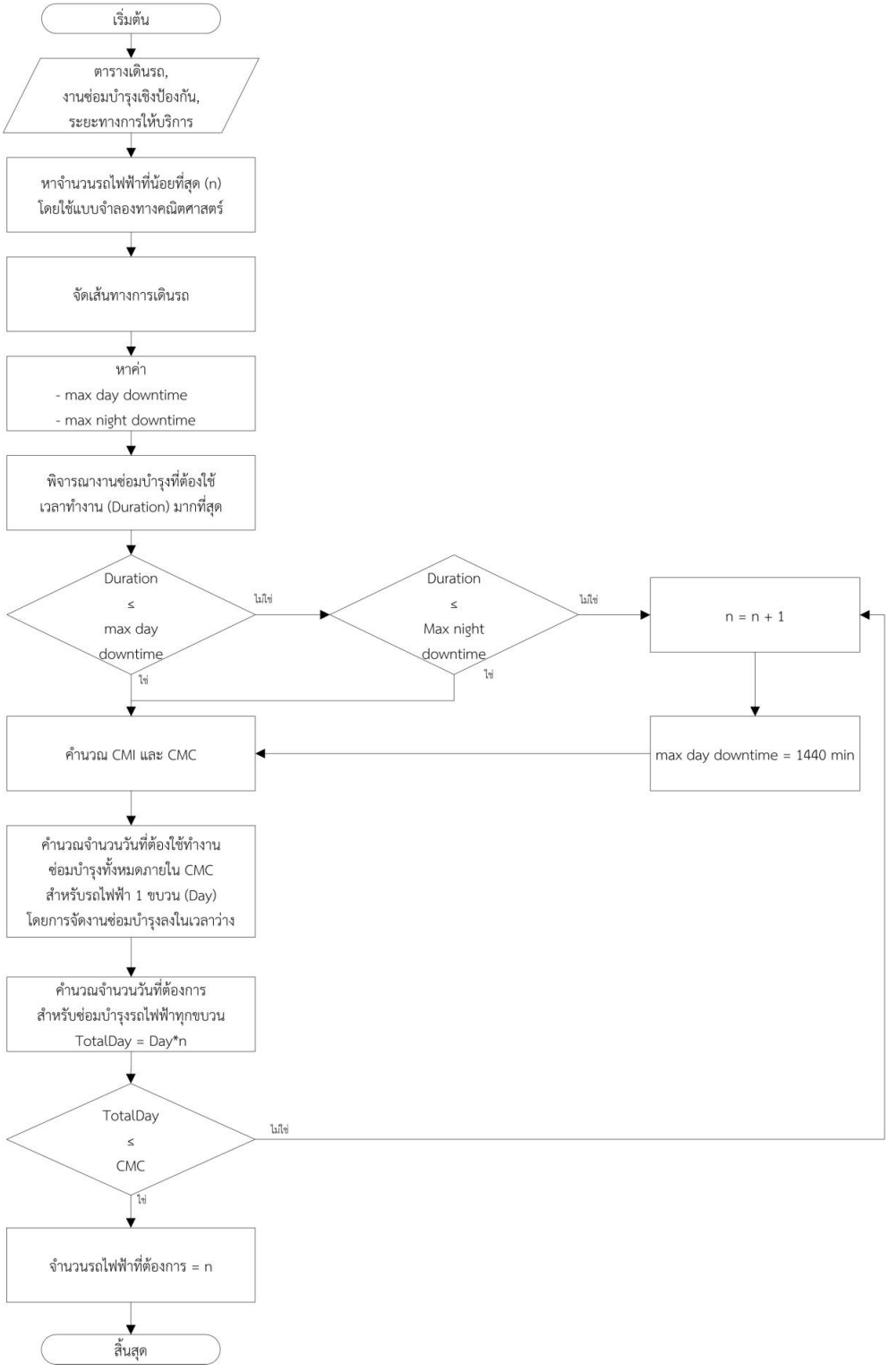
3.2. วิธีการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและการทำงานซ่อมบำรุง

วิธีการฮิวริสติกนี้ถูกนำเสนอขึ้นเนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่สามารถหาคำตอบได้ โดยวิธีการที่นำเสนอนี้จะแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกสำหรับหาจำนวนรถไฟฟ้าที่เพียงพอสำหรับการให้บริการและทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันเมื่อถึงระยะทางที่กำหนดไว้ ส่วนที่สองคือการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและตารางการทำงานซ่อมบำรุงซึ่งจะเป็นการจัดตารางรายวัน โดยจะเปรียบเทียบวิธีการจัด 2 แบบคือ การจัดการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุล และการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบไม่สมดุล

3.2.1. การหาจำนวนรถไฟฟ้าที่น้อยที่สุดสำหรับให้บริการเดินรถไฟฟ้าและทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน

ในการเริ่มต้นจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาจำนวนรถไฟฟ้าที่น้อยที่สุด จำนวนรถไฟฟ้าที่หาได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นจะเป็นจำนวนรถที่น้อยที่สุดสำหรับการให้บริการเดินรถเท่านั้นไม่ได้พิจารณาการทำงานซ่อมบำรุงควบคู่กันไปด้วย เนื่องจากเมื่อเพิ่มการทำงานซ่อมบำรุงเข้าไปในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความซับซ้อนขึ้นมากและไม่สามารถหาผลเฉลยที่ดีที่สุดได้ ในขั้นตอนนี้จะเป็นการหาจำนวนรถไฟฟ้าที่เพียงพอต่อการให้บริการเดินรถและทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันโดยใช้วิธีการฮิวริสติก

ข้อมูลที่ต้องการสำหรับการหาจำนวนรถไฟฟ้าคือตารางการให้บริการเดินรถที่กำหนดไว้ รายละเอียดงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันที่รถไฟฟ้าแต่ละขบวนจะต้องทำซึ่งได้แก่ เงื่อนไขในการเข้าทำงานซ่อมบำรุง (กิโลเมตร)และระยะเวลาในการทำงานซ่อมบำรุงต่างๆ และระยะทางการให้บริการเดินรถ ในรูป 9 กล่าวถึงขั้นตอนในการหาจำนวนรถไฟฟ้า โดยจะแบ่งเป็น 3 ส่วนใหญ่ ส่วนแรกเป็นการหาจำนวนรถไฟฟ้าขั้นต่ำจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จัดเส้นทางการเดินรถ และการหาเวลาที่รถไฟฟ้าว่างระหว่างการให้บริการเดินรถ ส่วนต่อมาคือการตรวจสอบว่างานซ่อมบำรุงแต่ละงานสามารถทำงานในช่วงเวลาที่รถไฟฟ้าหยุดพักระหว่างการใช้ให้บริการหรือไม่ และส่วนสุดท้ายคือการตรวจสอบว่าในรอบระยะเวลาหนึ่งๆ รถไฟฟ้าทุกขบวนมีเวลาว่างเพียงพอสำหรับการทำงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าทุกงานหรือไม่



รูป 9 ขั้นตอนการหาจำนวนรถไฟฟ้าสำหรับให้บริการเดินรถและทำงานซ่อมบำรุง

เนื่องจากรถไฟฟ้าเป็นทรัพยากรที่มีราคาแพงจึงไม่ต้องการมีรถไฟฟ้าจำนวนมากจนเกินไป ประกอบกับโดยส่วนใหญ่แล้วช่วงนอกชั่วโมงเร่งด่วนจะมีรถไฟฟ้าบางขบวนที่ไม่ถูกนำไปใช้ให้บริการจึงอาจจะสามารถนำมาทำงานซ่อมบำรุงได้ จำนวนรถไฟฟ้าที่น้อยที่สุดสำหรับการให้บริการตามตารางเดินรถที่กำหนดซึ่งสามารถหาได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงถูกนำมาเป็นจำนวนรถไฟฟ้าตั้งต้นสำหรับการคำนวณจำนวนรถไฟฟ้าที่เพียงพอต่อการใช้งานและทำงานซ่อมบำรุง จากนั้นจึงทำการจัดรูปแบบเส้นทางการเดินรถ (Circulation) สำหรับรถไฟฟ้าแต่ละขบวน โดยเส้นทางการเดินรถไฟฟ้านี้จะเป็นการจัดกลุ่มรอบการเดินรถจากตารางการเดินรถที่ถูกกำหนดมาตั้งแต่ต้น จำนวนเส้นทางการเดินรถจะเท่ากับจำนวนรถไฟฟ้า เมื่อได้เส้นทางการเดินรถแล้วจะต้องมีการกำหนดว่ารถไฟฟ้าขบวนใดจะต้องวิ่งในเส้นทางใดในแต่ละวัน โดยจะกล่าวถึงวิธีการจัดเส้นทางการเดินรถในภายหลัง เส้นทางการเดินรถต่างๆ จะมีเวลาหยุดพักระหว่างรอบการให้บริการต่างกัน เส้นทางเดินรถส่วนใหญ่นั้นจะมีช่วงเวลาที่รถได้หยุดพักจากการให้บริการ 2 ช่วงคือ เวลาพักช่วงกลางวัน ซึ่งเป็นเวลาที่รถไฟฟ้ารอไปให้บริการในรอบถัดไป และเวลาพักช่วงกลางคืน ซึ่งเป็นเวลาหลังจากให้บริการเดินรถตามตารางเดินรถของวันเสร็จสิ้นแล้วรอไปให้บริการในวันถัดไป ดังนั้นเวลาหยุดพักช่วงกลางวันที่มากที่สุด (max day downtime) และเวลาหยุดพักช่วงกลางคืนที่มากที่สุด (max night downtime) ของเส้นทางการเดินรถทั้งหมดจะเป็นช่วงเวลาที่นำมาพิจารณาเป็นเวลาว่างเพื่อทำงานซ่อมบำรุง

รถไฟฟ้าจะถูกนำมาทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันในเวลาหยุดพักช่วงกลางวันและช่วงกลางคืน โดยงานซ่อมบำรุงต่างๆ จะต้องทำโดยไม่ให้กระทบต่อตารางการให้บริการเดินรถ ดังนั้นจึงต้องทำการตรวจสอบว่าช่วงเวลาหยุดพักนั้นมีเวลาเพียงพอต่อการทำงานซ่อมบำรุงทุกงานหรือไม่ โดยทำการตรวจสอบว่างานซ่อมบำรุงที่มีเวลาการทำงานมากที่สุดนั้น สามารถทำในเวลาหยุดพักช่วงกลางวันหรือกลางคืนได้หรือไม่ ถ้างานซ่อมบำรุงที่มีเวลาการทำงานมากที่สุดสามารถทำได้ในเวลาหยุดพักช่วงใดช่วงหนึ่ง หมายความว่างานซ่อมบำรุงทุกงานสามารถทำได้ในช่วงเวลาหยุดพักที่มี แต่ถ้างานซ่อมบำรุงที่มีเวลาการทำงานมากที่สุดต้องการเวลาในการทำงานมากกว่าเวลาหยุดพักที่มี แสดงว่าไม่สามารถทำงานซ่อมบำรุงนั้นโดยไม่กระทบต่อการให้บริการเดินรถได้ จะต้องสำรองรถไฟฟ้าเพิ่มเพื่อทำงานซ่อมบำรุงนั้นโดยเฉพาะ และรถไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นมานั้นจะมีเวลาว่างทั้งวันสำหรับการทำงานซ่อมบำรุง ซึ่งก็คือ 1,440 นาที

เพื่อให้มั่นใจว่าเวลาหยุดพักระหว่างการให้บริการรวมสามารถทำงานซ่อมบำรุงได้ทุกงาน ขั้นตอนต่อมาจึงจะต้องตรวจสอบว่ามีเวลาว่างเพียงพอสำหรับทำงานซ่อมบำรุงทุกงานหรือไม่ เนื่องจากงานซ่อมบำรุงแต่ละงานมีรอบกำหนดการเข้าทำงานซ่อมบำรุงต่างกัน เพื่อพิจารณาการทำงานซ่อมบำรุงทุกงานจึงจะต้องกำหนด *“รอบระยะทางการซ่อมบำรุงร่วม”* หรือ Common

Maintenance Interval (CMI) โดยรอบระยะทางการซ่อมบำรุงร่วมนี้จะเป็นรอบระยะทางที่มากที่สุดที่งานซ่อมบำรุงทุกงานจะครบกำหนดการทำงานซ่อมบำรุงพอดี เช่น จากตัวอย่างกลุ่มงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันกลุ่มต่างๆ ซึ่งได้แก่ M1 M2 และ M3 จะมีรอบกำหนดระยะทางการทำงานซ่อมบำรุงที่ 15,000 45,000 และ 90,000 กิโลเมตรตามลำดับ โดยจะเห็นว่าที่ทุกๆ 90,000 กิโลเมตรเป็นรอบระยะทางที่งานซ่อมบำรุง M1 M2 และ M3 ครบกำหนดการทำงาน 6 2 และ 1 ครั้งตามลำดับพอดี เพราะฉะนั้นรอบระยะทางการทำงานซ่อมบำรุงร่วมเท่ากับ 90,000 กิโลเมตร หลังจากนั้นทำการเปลี่ยนจากหน่วยระยะทางมาเป็นหน่วยเวลาเพื่อกำหนด *“รอบเวลาการซ่อมบำรุงร่วม”* หรือ Common Maintenance Cycle (CMC) ซึ่งจะเป็นระยะเวลาเฉลี่ยที่รถไฟฟ้าถูกใช้งานจนครบกำหนดรอบระยะทางการทำงานซ่อมบำรุงร่วม เช่น รถไฟฟ้าสายแอร์พอร์ตลิงค์ที่มีรอบการเดินรถ 161 รอบต่อวัน มีระยะทางรอบละ 28.5 กิโลเมตร จะมีระยะทางการให้บริการเท่ากับ 161 x 28.5 = 4,588.5 กิโลเมตรต่อวัน เมื่อใช้รถไฟฟ้าจำนวน 5 ขบวน รถไฟฟ้าจะถูกใช้งานขบวนละ $\frac{4,588.5}{5}$ = 917.7 กิโลเมตรต่อวัน ดังนั้นเพื่อใช้งานรถไฟฟ้าแต่ละขบวนจนครบรอบระยะทางการทำงานซ่อมบำรุงร่วม 90,000 กิโลเมตรจะต้องใช้ $\frac{90,000}{917.7}$ = 98.07 วัน หรือประมาณ 98 วันที่รถไฟฟ้าทุกขบวนจะต้องทำงานซ่อมบำรุงทุกงานใน 1 รอบ

ในขั้นตอนต่อมาทำการพิจารณางานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าตลอดรอบเวลาการซ่อมบำรุงร่วมเพื่อคำนวณหาจำนวนวันที่ต้องใช้ในการทำงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าทั้งหมด จากตัวอย่างงานซ่อมบำรุงที่กำหนดไว้พบว่ารถไฟฟ้าแต่ละขบวนจะต้องทำงานซ่อมบำรุง M1 M2 และ M3 จำนวน 6 2 และ 1 ครั้งตามลำดับ โดยการทำงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าในวันหนึ่งๆ จะสามารถทำได้ 2 เวลาคือเวลาหยุดพักช่วงกลางวัน และเวลาหยุดพักช่วงกลางคืน ในรูป 10 จะกล่าวถึงขั้นตอนการหาจำนวนวันที่ต้องการสำหรับการทำงานซ่อมบำรุงทั้งหมดภายในรอบเวลาการซ่อมบำรุงร่วมสำหรับรถไฟฟ้า 1 ขบวน โดยจะทำการจัดงานซ่อมบำรุงที่มีเวลาการทำงาน (Duration) มากที่สุดลงในช่วงเวลาว่างที่มีก่อน แล้วค่อยจัดงานซ่อมบำรุงที่มีเวลาการทำงานน้อยลงมาทีหลัง เพราะงานซ่อมบำรุงที่มีเวลาการทำงานน้อยกว่าจะมีความยืดหยุ่นในการจัดลงตารางได้มากกว่า อาจจะสามารถทำงานในช่วงเวลาที่เหลือจากงานซ่อมบำรุงก่อนหน้าได้ ในขณะที่งานซ่อมบำรุงที่มีเวลาการทำงานมากจะมีช่วงเวลาที่สามารถทำงานได้น้อยกว่า ทั้งนี้จะเลือกจัดงานซ่อมบำรุงลงในเวลาหยุดพักช่วงกลางวันก่อนช่วงกลางคืน เนื่องจากในช่วงกลางวันจะสามารถทำงานได้สะดวกกว่าช่วงเวลากลางคืน ทั้งในด้านการจัดหาแรงงาน ค่าใช้จ่ายในการทำงานล่วงเวลา และการติดต่อสื่อสารกับผู้รับเหมาภายนอก ใน

ตาราง 7 แสดงตัวอย่างการหาจำนวนวันที่ต้องการสำหรับทำงานซ่อมบำรุง M1 M2 และ M3 จำนวน 6 2 และ 1 ครั้งตามลำดับ ซึ่งมีเวลาการทำงาน 120 240 และ 480 นาทีตามลำดับสำหรับรถไฟฟ้าสายแอร์พอร์ตลิงค์ ให้ Day คือวันต่างๆ ที่ต้องทำงานซ่อมบำรุง และ M คือกลุ่มงานซ่อมบำรุงที่ต้องทำให้วันนั้นๆ เรียงลำดับเวลาการทำงานจากมากไปหาน้อย จากนั้นทำการจัดงานซ่อมบำรุงต่างๆ ลงในช่วงเวลาว่างที่มี ถ้างานซ่อมบำรุงใดไม่สามารถจัดลงช่วงเวลาว่างได้จะถูกนำไปอยู่ในกลุ่มงาน X เพื่อพิจารณาการจัดสรรลงในเวลาว่างของวันถัดไป พบว่ารถไฟฟ้าสายแอร์พอร์ตลิงค์ที่มีเวลาหยุดพักช่วงกลางวันและกลางคืนมากที่สุด 387 และ 525 นาทีตามลำดับในวันต่างๆ จะต้องการเวลา 2 วันในการทำงานซ่อมบำรุงทั้งหมดสำหรับรถไฟฟ้า 1 ขบวน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูป 10 ขั้นตอนการหาจำนวนวันที่ต้องใช้ในการทำงานซ่อมบำรุงทั้งหมด ในรอบเวลาซ่อมบำรุงร่วมสำหรับรถไฟฟ้า 1 ขบวน

ตาราง 7 ตัวอย่างการหาจำนวนวันที่ต้องใช้ในการทำงานซ่อมบำรุงทั้งหมดในรอบเวลาซ่อมบำรุงร่วม สำหรับรถไฟฟ้า 1 ขบวน

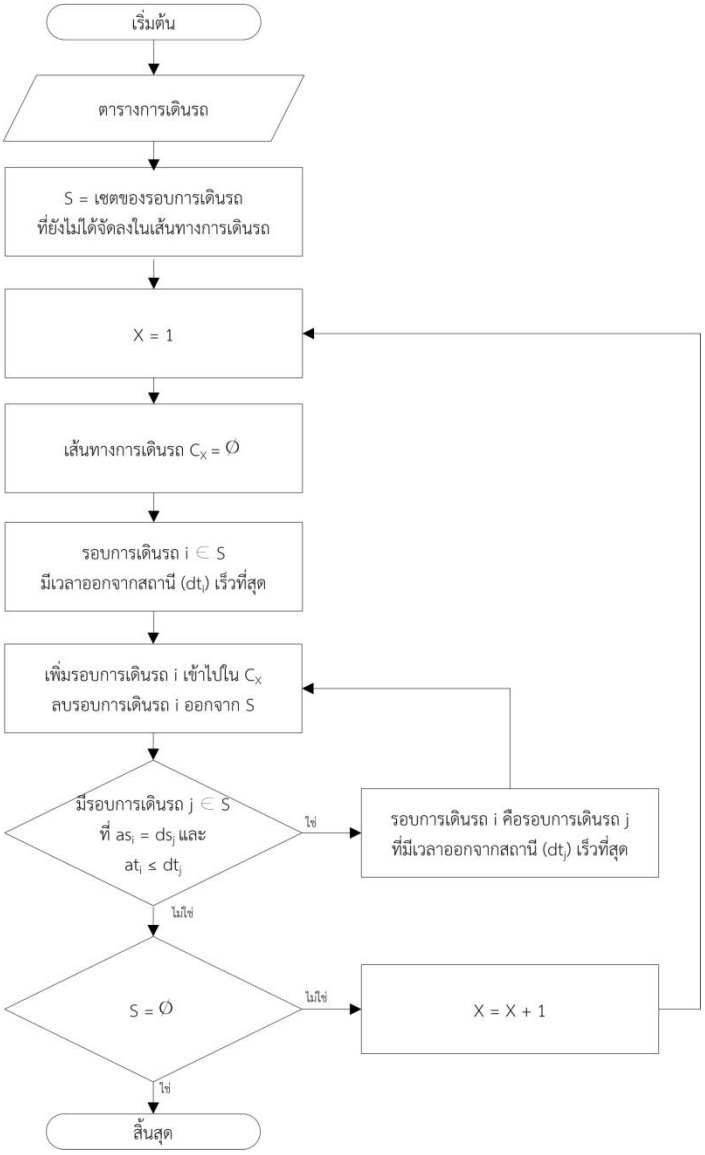
Day	M	Day Time	Night Time	i	$Duration_i$	$Duration_i \leq$ DayTime	$Duration_i \leq$ NightTime	X
1	{M3, M2,M2, M1,M1,M1, M1,M1,M1}	387	525	1	480	ไม่ใช่	ใช่	{}
		387	45	2	240	ใช่	-	{}
		147	45	3	240	ไม่ใช่	ไม่ใช่	{3}
		147	45	4	120	ใช่	-	{3}
		27	45	5	120	ไม่ใช่	ไม่ใช่	{3,5}
		27	45	6	120	ไม่ใช่	ไม่ใช่	{3,5,6}
		27	45	7	120	ไม่ใช่	ไม่ใช่	{3,5,6,7}
		27	45	8	120	ไม่ใช่	ไม่ใช่	{3,5,6,7,8}
		27	45	9	120	ไม่ใช่	ไม่ใช่	{3,5,6,7,8,9}
X ≠ Ø → Day = Day + 1								
2	{M2, M1,M1,M1, M1,M1}	387	525	1	240	ใช่	-	{}
		147	525	2	120	ใช่	-	{}
		27	525	3	120	ไม่ใช่	ใช่	{}
		27	405	4	120	ไม่ใช่	ใช่	{}
		27	285	5	120	ไม่ใช่	ใช่	{}
		27	165	6	120	ไม่ใช่	ใช่	{}
X = Ø → หยุด								

เมื่อรถไฟฟ้า 1 ขบวนต้องการเวลา 2 วันในการทำงานซ่อมบำรุงทั้งหมดตลอดรอบเวลาการซ่อมบำรุงร่วม ดังนั้นรถไฟฟ้าสายแอร์พอร์ตลิงค์จำนวน 5 ขบวนจะต้องใช้เวลาในการทำงานซ่อมบำรุงรวม (TotalDay) เท่ากับ 5x2 = 10 วัน ซึ่งมีความต้องการทำงานซ่อมบำรุงน้อยกว่าเวลาว่างที่มีจำนวน 98 วัน ดังนั้นงานซ่อมบำรุงทุกงานสำหรับรถไฟฟ้าทุกขบวนสามารถทำได้ภายในเวลาว่าง จึงไม่จำเป็นต้องสำรองรถไฟฟ้าสำหรับทำงานซ่อมบำรุงโดยเฉพาะ ดังนั้นรถไฟฟ้าจำนวน 5 ขบวนเพียงพอต่อการให้บริการเดินรถสายแอร์พอร์ตลิงค์และทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน สำหรับกรณีที่มีเวลาว่างไม่เพียงพอต่อความต้องการทำงานซ่อมบำรุงแล้วจะต้องทำการสำรองรถไฟฟ้าเพิ่มสำหรับทำงานซ่อมบำรุง

การจัดเส้นทางการเดินรถ

จากแนวความคิดในการทำงานซ่อมบำรุงในช่วงเวลากลางวันระหว่างที่รถไฟฟ้าหยุดพักเพื่อรอให้บริการในรอบการเดินรถถัดไป เมื่อเส้นทางการเดินรถไฟฟ้าคือเซตของรอบการเดินรถจากตารางการเดินรถที่กำหนดไว้สำหรับใช้งานรถไฟฟ้าขบวนหนึ่งๆ การจัดเส้นทางการเดินรถจึงทำการจัดให้มีเวลาหยุดพักช่วงกลางวันนานที่สุดเพื่อจะได้สามารถทำงานซ่อมบำรุงที่ใช้เวลานานได้ ในรูป 11 แสดงขั้นตอนการจัดเส้นทางการเดินรถไฟฟ้า โดยจะทำการจัดทีละเส้นทาง (C_x) เริ่มจากการจัดเส้นทางเดินรถที่ 1 (C_1) ให้เลือกรอบการเดินรถ i ที่มีเวลาออกจากสถานี (dt_i) เร็วที่สุดเป็นรอบการให้บริการรอบแรกของเส้นทางเดินรถ C_1 เนื่องจากรถไฟฟ้าสามารถถูกนำไปใช้ให้บริการต่อได้ถ้าหากมีรอบการเดินรถถัดไป (รอบการเดินรถ j) ที่สามารถนำไปให้บริการต่อได้ โดยรอบการเดินรถถัดไปจะต้องมีสถานีออกเดียวกับสถานีที่รถไฟฟ้าเพิ่งไปถึง ($as_i = ds_j$) และจะต้องมีเวลาออกมากกว่าเวลาที่รถไฟฟ้าเพิ่งไปถึง ($at_i \leq dt_j$) ถ้ามีรอบการเดินรถถัดไปที่รถไฟฟ้าสามารถนำไปใช้ให้บริการได้ ให้พิจารณาเพิ่มรอบการเดินรถที่สามารถให้บริการต่อได้เข้าไปในเส้นทางการเดินรถจนกว่าจะไม่มีรอบการเดินรถที่รถไฟฟ้าสามารถถูกนำไปใช้ให้บริการต่อได้ให้สิ้นสุดการจัดเส้นทางเดินรถเส้นทางนั้น จากนั้นให้เริ่มจัดเส้นทางการเดินรถถัดไปในแบบเดียวกันจนกว่ารอบการเดินรถทุกรอบในตารางการเดินรถจะถูกจัดสรรเข้าไปในเส้นทางการเดินรถต่างๆ ในการจัดเส้นทางการเดินรถทีละเส้นทางแบบนี้จะทำให้เส้นทางการเดินรถที่ถูกจัดก่อนมีจำนวนรอบการให้บริการมากกว่าเส้นทางการเดินรถที่ถูกจัดทีหลัง ส่งผลให้เส้นทางเดินรถที่ถูกจัดทีหลังมีรอบการให้บริการน้อย จึงทำให้มีเวลาว่างระหว่างรอบการให้บริการมากตามไปด้วย

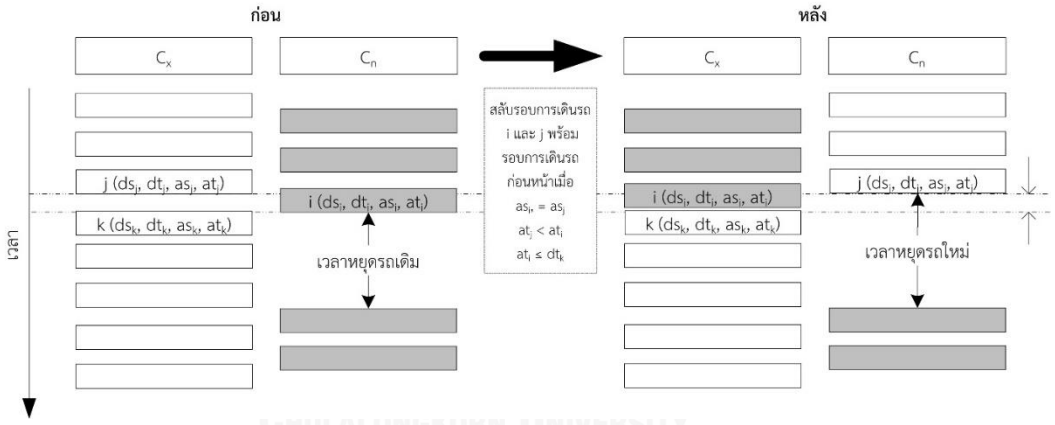
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูป 11 ขั้นตอนการจัดเส้นทางเดินรถไฟฟ้า

เมื่อได้เส้นทางเดินรถเบื้องต้นแล้ว ขั้นตอนถัดมาเป็นการปรับปรุงเส้นทางเดินรถเพื่อเพิ่มเวลาหยุดพักช่วงกลางวัน จากรูป 12 ต้องการเพิ่มเวลาหยุดพักช่วงกลางวันของเส้นทางการเดินรถ C_n ให้มากขึ้น สามารถทำได้โดยการพิจารณารอบการเดินรถรอบก่อนที่จะหยุดพักยาวในช่วงกลางวัน (รอบการเดินรถ i) ของเส้นทางการเดินรถ C_n จากนั้นพิจารณาว่ามีรอบการเดินรถ (รอบการเดินรถ j) ที่สามารถให้บริการทดแทนรอบการเดินรถ i หรือไม่ โดยรอบการเดินรถ j จะต้องมีสถานีปลายทางของการให้บริการเหมือนกับรอบการเดินรถ i ($as_j = as_i$) เพื่อที่รถไฟฟ้าจะได้สามารถนำไปให้บริการต่อใน

รอบการเดินรถถัดไปของเส้นทางการเดินรถ C_n ได้ เนื่องจากต้องการเพิ่มเวลาการหยุดพัก รอบการเดินรถ j จะต้องมีเวลาถึงสถานีปลายทางก่อนรอบการเดินรถ i ($at_j < at_i$) ทั้งนี้รอบการเดินรถ i และ j จะสามารถสลับกันได้ก็ต่อเมื่อรถไฟฟ้าที่ให้บริการเสร็จจากรอบการเดินรถ i จะต้องสามารถให้บริการต่อในรอบการเดินรถ k ได้ โดยรถไฟฟ้าที่ให้บริการในรอบการเดินรถ i จะต้องไปถึงสถานีปลายทางซึ่งก็คือสถานีต้นทางของรอบการให้บริการ k ก่อนเวลาออกของรอบการเดินรถ k ($at_i \leq dt_k$) โดยในการสลับรอบการเดินรถ i และ j นั้นจะทำการสลับรอบการเดินรถ i รวมถึงรอบการเดินรถก่อนหน้าทั้งหมดกับรอบการเดินรถ j รวมถึงรอบการเดินรถก่อนหน้าทั้งหมดด้วย เพราะถ้าสลับเฉพาะรอบการเดินรถ i และ j รอบการเดินรถ i อาจจะไม่สามารถให้บริการเดินรถต่อจากรอบการเดินรถก่อนหน้า j ได้ เช่นเดียวกับรอบการเดินรถ j อาจจะไม่สามารถให้บริการเดินรถต่อจากรอบการเดินรถก่อนหน้า i ได้ ทั้งนี้เวลาการหยุดพักรถที่เพิ่มขึ้นมาคือเวลาถึงสถานีปลายทางที่ต่างกันระหว่างรอบการเดินรถ i และ j ($at_i - at_j$)



รูป 12 แนวคิดการปรับปรุงเวลาหยุดพักช่วงกลางวันของเส้นทางเดินรถสำหรับทำงานซ่อมบำรุง

3.2.2. การจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและการทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน

ในส่วนนี้จะเป็นการจัดการใช้งานและการทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันให้รถไฟฟ้าแต่ละขบวน โดยการจัดการใช้งานรถไฟฟ้าคือการจัดเส้นทางเดินรถให้รถไฟฟ้าถูกนำไปใช้งานในเส้นทางเดินรถต่างๆ ส่วนการทำงานซ่อมบำรุงงานต่างๆ จะถูกจัดให้รถไฟฟ้าที่มีระยะทางสะสมถึงกำหนดการทำงานซ่อมบำรุงและถูกใช้งานในเส้นทางเดินรถที่มีเวลาว่างเพียงพอต่อการทำงานซ่อมบำรุงนั้นๆ ซึ่งก็คือเส้นทางเดินรถที่มีเวลาหยุดพักช่วงกลางวันหรือช่วงกลางคืนเพียงพอต่อการทำงานซ่อมบำรุงนั่นเอง โดยจะทำการจัดเส้นทางการเดินรถและการทำงานซ่อมบำรุงเป็นรายวัน ทั้งนี้จะพิจารณา

แนวทางในการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้า 2 แนวทางเปรียบเทียบกัน คือการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุลและแบบไม่สมดุล ดังนี้

การจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุล

การจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุลนี้จะเป็นการเกลี่ยการใช้งานรถไฟฟ้าแต่ละขบวนให้ถูกใช้งานอย่างใกล้เคียงกัน กล่าวคือรถไฟฟ้าแต่ละขบวนจะมีระยะทางสะสมที่ใกล้เคียงกันตลอดเวลา เนื่องจากรถไฟฟ้าแต่ละขบวนจะถูกสลับหมุนเวียนการใช้งานรถไฟฟ้าในเส้นทางการเดินรถต่างๆ อย่างเท่าเทียมกัน ตัวอย่างดังแสดงในตาราง 8 จะเห็นว่ารถไฟฟ้าแต่ละขบวนจะถูกใช้งานในเส้นทางเดินรถที่สลับหมุนเวียนกันไปในทุกๆ วัน อย่างรถไฟฟ้าขบวนที่ 1 จะถูกใช้งานในเส้นทางการเดินรถ C1 ในวันที่ 1 แล้วเปลี่ยนเป็นเส้นทางการเดินรถ C2 ในวันที่ 2 เปลี่ยนเส้นทางการเดินรถในแต่ละวันเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนเมื่อถูกใช้งานครบทุกเส้นทางการเดินรถแล้วในวันที่ 5 จะวนกลับมาเริ่มใช้เส้นทางการเดิน C1 อีกครั้งในวันที่ 6 และเป็นไปในทำนองเดียวกันกับการจัดการใช้งานรถไฟฟ้าขบวนอื่นๆ

ตาราง 8 แนวคิดการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุล

วันที่	รถไฟฟ้า 1	รถไฟฟ้า 2	รถไฟฟ้า 3	รถไฟฟ้า 4	รถไฟฟ้า 5
1	C1	C2	C3	C4	C5
2	C2	C3	C4	C5	C1
3	C3	C4	C5	C1	C2
4	C4	C5	C1	C2	C3
5	C5	C1	C2	C3	C4
6	C1	C2	C3	C4	C5

ในการจัดการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุลนี้ไม่ต้องพิจารณาระยะทางสะสมของรถไฟฟ้าแต่ละขบวนเพื่อการจัดเส้นทางการเดินรถ ทำให้มีความสะดวกและรวดเร็วในการจัดตารางการใช้งานมาก เพียงแต่ต้องติดตามระยะทางสะสมของรถไฟฟ้าแต่ละขบวนเพื่อทำงานซ่อมบำรุงเท่านั้น โดยสำหรับการจัดตารางการทำงานซ่อมบำรุงนั้นจะถูกจัดเมื่อรถไฟฟ้ามีระยะทางสะสมตอนต้นวันครบกำหนดการซ่อมบำรุง โดยจะสามารถเข้าทำงานซ่อมบำรุงในตอนกลางวันได้ก็ต่อเมื่อถูกสั่งให้ไปใช้งานในเส้นทางเดินรถที่มีเวลาหยุดพักช่วงกลางวันเพียงพอต่อการทำงานซ่อมบำรุง ในทำนองเดียวกันการทำงานซ่อมบำรุงช่วงกลางคืนจะสามารถทำได้เมื่อรถไฟฟ้าถูกใช้งานในเส้นทางเดินรถที่มีเวลา

หยุดพักช่วงกลางคืนเพียงพอ เนื่องจากทรัพยากรการทำงานซ่อมบำรุงมีจำกัด ดังนั้นในกรณีที่มีรถไฟฟ้าครบกำหนดการซ่อมบำรุงและสามารถทำงานซ่อมบำรุงได้พร้อมกันหลายขบวนจะเลือกทำงานซ่อมบำรุงให้รถไฟฟ้าที่มีระยะทางสะสมมากที่สุดก่อน เพื่อให้เกิดความล่าช้าจากการทำงานซ่อมบำรุงน้อยที่สุด

การจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบไม่สมดุล

การจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบไม่สมดุลจะเป็นการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าโดยตั้งเป้าหมายว่าจะทำงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าขบวนใดก่อน แล้วจึงทำการจัดตารางการใช้งานให้รถไฟฟ้าขบวนนั้นถูกใช้งานมากๆ เพื่อจะได้ครบกำหนดการซ่อมบำรุงก่อน การจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบนี้เป็นการแก้ปัญหาในกรณีที่รถไฟฟ้าหลายขบวนมีความต้องการซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าพร้อมกัน จะเห็นว่าในการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบไม่สมดุลนี้จะต้องคำนึงถึงระยะทางสะสมเมื่อต้นวันของรถไฟฟ้าแต่ละขบวน เพื่อเลือกเส้นทางเดินรถให้แก่รถไฟฟ้าแต่ละขบวนว่าต้องการถูกใช้งานเพื่อให้ครบกำหนดการซ่อมบำรุงหรือว่าครบกำหนดซ่อมบำรุงแล้วต้องการทำงานซ่อมบำรุง การจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบนี้จึงจะมีความซับซ้อนกว่าการจัดตารางการใช้งานแบบสมดุล แต่การจัดตารางการใช้งานแบบไม่สมดุลนี้จะช่วยเกลี่ยความต้องการซ่อมบำรุงของรถไฟฟ้าแต่ละขบวนไม่ให้เกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน

แนวคิดในการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบไม่สมดุลนี้จะทำการจัดเส้นทางการเดินรถที่มีระยะทางวิ่งมากที่สุดให้แก่รถไฟฟ้าที่ต้องการจะให้เข้าทำงานซ่อมบำรุงก่อน เมื่อรถไฟฟ้าขบวนนั้นถูกใช้งานจนมีระยะทางสะสมครบกำหนดการซ่อมบำรุงแล้ว จึงค่อยเปลี่ยนเส้นทางการเดินรถที่มีระยะวิ่งมากที่สุดให้เป็นเส้นทางเดินรถที่มีเวลาหยุดพักเพียงพอต่อการทำงานซ่อมบำรุงเพื่อให้รถไฟฟ้าขบวนนั้นเข้าทำงานซ่อมบำรุงต่อไป จากตัวอย่างการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบไม่สมดุลที่แสดงในตาราง 9 เมื่อเส้นทางการเดินรถ C1 เป็นเส้นทางการเดินรถที่มีระยะวิ่งที่มากที่สุด และ C5 เป็นเส้นทางการเดินรถที่มีเวลาหยุดพักรถเพียงพอต่อการทำงานซ่อมบำรุง เมื่อรถไฟฟ้าขบวนที่ 1 ถูกเลือกเป็นรถไฟฟ้าที่ต้องการให้เข้าทำงานซ่อมบำรุง รถไฟฟ้าขบวนที่ 1 จึงถูกใช้งานในเส้นทางการเดินรถ C1 ไปเรื่อยๆ จนในวันที่ 4 รถไฟฟ้าขบวนที่ 1 มีระยะทางสะสมตอนต้นวันครบกำหนดการทำงานซ่อมบำรุง จึงเปลี่ยนมาใช้เส้นทางการเดิน C5 เพื่อทำงานซ่อมบำรุง ส่วนรถไฟฟ้าขบวนที่ 2 เป็นรถไฟฟ้าที่มีระยะทางสะสมมากที่สุดในจำนวนรถไฟฟ้าขบวนที่เหลือจึงถูกเลือกให้เป็นรถไฟฟ้าที่ต้องเข้าทำงานซ่อมบำรุงเป็นขบวนถัดไป ดังนั้นเส้นทางการเดินรถ C1 จึงถูกจัดให้รถไฟฟ้าขบวนที่ 2 ต่อไปจนกว่าจะครบกำหนดการเข้าทำงานซ่อมบำรุง ในกรณีที่มีเส้นทางการเดินรถหลายเส้นทาง

สามารถทำงานซ่อมบำรุงได้ เช่น นอกจากเส้นทางเดินรถ C5 แล้ว เส้นทางเดินรถ C4 ก็มีเวลาหยุดพักระหว่างรอบการเดินรถเพียงพอต่อการทำงานซ่อมบำรุงด้วย ถ้าหากรถไฟฟ้าที่ครบกำหนดการทำงานซ่อมบำรุงกำลังถูกใช้งานในเส้นทาง C4 อยู่ก็สามารถทำงานซ่อมบำรุงได้เช่นกัน ถ้ามีเวลาว่างเหลือจากการทำงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าที่ใช้เส้นทาง C5 เพียงพอ เช่น ในวันที่ 4 รถไฟฟ้าขบวนที่ 5 ก็ต้องการทำงานซ่อมบำรุงเช่นกัน ถ้าหลังจากรอให้ทำงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าขบวนที่ 1 เสร็จสิ้นแล้วมีเวลาว่างเหลือเพียงพอ

ตาราง 9 แนวคิดการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบไม่สมดุล

วันที่	รถไฟฟ้า 1	รถไฟฟ้า 2	รถไฟฟ้า 3	รถไฟฟ้า 4	รถไฟฟ้า 5
1	C1	C2	C3	C4	C5
2	C1	C2	C3	C4	C5
3	C1	C2	C3	C4	C5
4	C5	C1	C2	C3	C4
5	C4	C5	C1	C2	C3
6	C4	C5	C1	C2	C3

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน

สำหรับในบทนี้จะนำเสนอผลการดำเนินงาน โดยในส่วนแรกจะกล่าวถึงขั้นตอนการหาจำนวนรถไฟฟ้าตลอดจนการจัดตารางการใช้งานและทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันของรถไฟฟ้าโดยใช้โครงการรถไฟฟ้าสายแอร์พอร์ตลิงค์ที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบันเป็นตัวอย่างในการอธิบาย ในส่วนต่อมาจะกล่าวถึงสรุปจำนวนรถไฟฟ้าสำหรับใช้งานและทำงานซ่อมบำรุงของโครงการรถไฟฟ้าในปัจจุบัน และนำเสนอจำนวนรถไฟฟ้าสำหรับโครงการรถไฟฟ้าในอนาคต

4.1. ตัวอย่างการหาจำนวนรถไฟฟ้าและการจัดตารางการใช้งานและทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน

ในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการหาจำนวนรถไฟฟ้าที่ต้องการสำหรับใช้ในการให้บริการเดินรถและทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันตามตารางเดินรถและกลุ่มงานซ่อมบำรุงที่กำหนดไว้ โดยใช้โครงการรถไฟฟ้าสายแอร์พอร์ตลิงค์เป็นตัวอย่างในการอธิบายตามขั้นตอนต่างๆ

ในการคำนวณหาจำนวนรถไฟฟ้าที่ต้องการสำหรับใช้ในการให้บริการเดินรถและทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันที่กำหนดจะเริ่มจากการหาจำนวนรถไฟฟ้าสำหรับการให้บริการตามตารางเดินรถที่กำหนดโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จากนั้นทำการจัดเส้นทางการเดินรถสำหรับให้รถไฟฟ้าใช้ในการให้บริการในแต่ละวัน แล้วทำการตรวจสอบว่ามีเวลาว่างระหว่างที่รถไฟฟ้าหยุดพักเพื่อรอให้บริการในรอบการเดินรถถัดไปซึ่งได้แก่ เวลาหยุดพักช่วงกลางวันและกลางคืนเพียงพอต่อการทำงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าทั้งหมดหรือไม่ โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการทำงานดังนี้

— การหาจำนวนรถไฟฟ้าสำหรับให้บริการตามตารางเดินรถที่กำหนด

เมื่อนำตารางการเดินรถที่กำหนดไว้ (ภาคผนวก ก.) ไปหาจำนวนรถไฟฟ้าโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับหาจำนวนรถไฟฟ้าที่น้อยที่สุดเพื่อใช้ในการให้บริการเดินรถไฟฟ้าตามตารางเดินรถที่กำหนดไว้ พบว่าโครงการรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์ต้องการรถไฟฟ้าจำนวน 5 ขบวนสำหรับให้บริการตามตารางเดินรถที่กำหนดไว้

– การจัดเส้นทางการเดินรถ

เมื่อทราบจำนวนรถไฟฟ้าที่ต้องการสำหรับให้บริการตามตารางเดินรถที่กำหนดแล้ว จากนั้นจะทำการจัดเส้นทางการเดินรถเพื่อให้รถไฟฟ้าแต่ละขบวนไปให้บริการ ดังนั้นจะได้จำนวนเส้นทางการเดินรถเท่ากับจำนวนรถไฟฟ้า เพราะฉะนั้นจะมีเส้นทางการเดินรถ 5 เส้นทางสำหรับรถไฟฟ้าสายแอร์พอร์ตลิงค์จำนวน 5 ขบวน โดยรอบการเดินรถต่างๆ มีรายละเอียดดังแสดงในError! Reference source not found. สำหรับการปรับปรุงเวลาหยุดพักช่วงกลางวันนั้นจะพิจารณาการเพิ่มเวลาการหยุดพักช่วงกลางวันของเส้นทางการเดินรถที่ 5 ซึ่งมีเวลาหยุดพักช่วงกลางวันมากที่สุดอยู่ 387 นาที โดยรอบการเดินรถ UP18 เป็นรอบการเดินรถสุดท้ายก่อนที่จะหยุดพักยาวในช่วงกลางวัน มีเวลาออกจากสถานี (DT: Departure Time) คือเวลาที่ 261 นาที และถึงเวลาที่ 287 นาที จากนั้นเพิ่มเวลาหยุดพักช่วงกลางวันด้วยการสลับรอบการเดินรถที่มาถึงเร็วขึ้น พบว่ารอบการเดินรถ UP17 ของเส้นทางการเดินรถ C3 เป็นรอบการเดินรถที่มีสถานีปลายทางเดียวกับรอบการเดินรถ UP18 และมีเวลาถึงสถานีปลายทางเร็วกว่า จึงพิจารณาว่ารอบการเดินรถที่ UP18 แล UP17 สามารถสลับกันได้หรือไม่ พบว่ารอบการเดินรถ UP18 ไม่สามารถนำไปให้บริการต่อในรอบการเดินรถ DOWN19 ซึ่งเป็นรอบการเดินรถถัดไปจากรอบการเดินรถ UP17 ของเส้นทางการเดินรถ C3 ได้ คือรอบการเดินรถ UP18 มีเวลาถึงสถานีปลายทางเวลา 287 นาทีไม่สามารถให้บริการในรอบการเดินรถ DOWN19 ที่มีเวลาออกเดินทางเวลา 286 นาทีได้ ดังนั้นเส้นทางเดินรถ C5 จึงมีเวลาหยุดพักช่วงกลางวันมากที่สุด 387 นาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง 10 รอบการเดินรถในเส้นทางการเดินรถต่างๆ สำหรับโครงการรถไฟฟ้าสายแอร์พอร์ตลิงค์

i	C1			C2			C3			C4			C5		
	ID_i	DT_i	AT_i	ID_i	DT_i	AT_i	ID_i	DT_i	AT_i	ID_i	DT_i	AT_i	ID_i	DT_i	AT_i
1	UP 1	56	82	DOWN 1	62	88	UP 2	68	94	DOWN 2	74	100	UP 3	80	106
2	DOWN 3	86	112	UP 4	92	118	DOWN 4	98	124	UP 5	104	130	DOWN 5	110	136
3	UP 6	116	142	DOWN 6	122	148	UP 7	128	154	DOWN 7	134	160	UP 8	140	166
4	DOWN 8	146	172	UP 9	152	178	DOWN 9	158	184	UP 10	164	190	DOWN 10	170	196
5	UP 11	176	202	DOWN 11	182	208	UP 12	188	214	DOWN 12	194	220	UP 13	200	226
6	DOWN 13	206	232	UP 14	212	238	DOWN 14	218	244	UP 15	224	250	DOWN 15	230	256
7	UP 16	236	262	DOWN 16	242	268	UP 17	248	274	DOWN 17	254	280	UP 18	261	287
8	DOWN 18	271	297	UP 19	272	298	DOWN 19	286	312	UP 20	284	310	DOWN 45	674	700
9	UP 21	302	328	DOWN 20	302	328	UP 22	317	343	DOWN 21	317	343	UP 48	704	730
10	DOWN 22	332	358	UP 23	332	358	DOWN 23	347	373	UP 24	347	373	DOWN 50	734	760
11	UP 25	362	388	DOWN 24	362	388	UP 26	377	403	DOWN 25	377	403	UP 53	764	790
12	DOWN 26	392	418	UP 27	392	418	DOWN 27	407	433	UP 28	407	433	DOWN 55	794	820
13	UP 29	422	448	DOWN 28	422	448	UP 30	437	463	DOWN 29	437	463	UP 58	824	850
14	DOWN 30	452	478	UP 31	452	478	DOWN 31	467	493	UP 32	467	493	DOWN 60	854	880
15	UP 33	482	508	DOWN 32	482	508	UP 34	497	523	DOWN 33	497	523	UP 63	884	910
16	DOWN 34	512	538	UP 35	512	538	DOWN 35	527	553	UP 36	527	553	DOWN 65	914	940
17	UP 37	542	568	DOWN 36	542	568	UP 38	557	583	DOWN 37	557	583	UP 68	944	970
18	DOWN 38	572	598	UP 39	572	598	DOWN 39	587	613	UP 40	587	613			

i	C1			C2			C3			C4			C5		
	ID_i	DT_i	AT_i	ID_i	DT_i	AT_i	ID_i	DT_i	AT_i	ID_i	DT_i	AT_i	ID_i	DT_i	AT_i
19	UP 41	602	628	DOWN 40	602	628	UP 42	617	643	DOWN 41	617	643			
20	DOWN 42	632	658	UP 43	632	658	DOWN 43	647	673	UP 44	650	676			
21	UP 45	662	688	DOWN 44	662	688	UP 46	677	703	DOWN 46	686	712			
22	DOWN 47	698	724	UP 47	692	718	DOWN 48	710	736	UP 49	716	742			
23	UP 50	728	754	DOWN 49	722	748	UP 51	740	766	DOWN 51	746	772			
24	DOWN 52	758	784	UP 52	752	778	DOWN 53	770	796	UP 54	776	802			
25	UP 55	788	814	DOWN 54	782	808	UP 56	800	826	DOWN 56	806	832			
26	DOWN 57	818	844	UP 57	812	838	DOWN 58	830	856	UP 59	836	862			
27	UP 60	848	874	DOWN 59	842	868	UP 61	860	886	DOWN 61	866	892			
28	DOWN 62	878	904	UP 62	872	898	DOWN 63	890	916	UP 64	896	922			
29	UP 65	908	934	DOWN 64	902	928	UP 66	922	948	DOWN 66	932	958			
30	DOWN 67	946	972	UP 67	932	958	DOWN 69	977	1003	UP 69	962	988			
31	UP 70	977	1003	DOWN 68	962	988	UP 72	1,007	1033	DOWN 70	992	1018			
32	DOWN 71	1007	1033	UP 71	992	1018	DOWN 73	1037	1063	UP 73	1,022	1048			
33	UP 74	1,037	1063	DOWN 72	1022	1048	UP 76	1,067	1093	DOWN 74	1052	1078			
34	DOWN 75	1067	1093	UP 75	1,052	1078	DOWN 77	1097	1123	UP 77	1,082	1108			
35	UP 78	1,097	1123	DOWN 76	1082	1108	UP 80	1,127	1153	DOWN 78	1112	1138			
36	DOWN 79	1127	1153	UP 79	1,112	1138				UP 81	1,142	1168			
37				DOWN 80	1142	1168									

ให้บริการเพียงพอต่อการใช้ในการทำงานซ่อมบำรุงบ้าง ในตาราง 11 แสดงรายละเอียดของเส้นทางการเดินรถต่างๆ สำหรับโครงการรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์ จะเห็นว่ามีเวลาหยุดพักช่วงกลางวันและกลางคืนที่มากที่สุด 387 และ 525 นาทีตามลำดับ

ตาราง 11 รายละเอียดของเส้นทางเดินรถของโครงการรถไฟฟ้าสายแอร์พอร์ตลิงค์

เส้นทางเดินรถ	**ระยะทาง (กม.)**	**เวลาหยุดพักช่วงกลางวันมากที่สุด (นาที)**	**เวลาหยุดพักช่วงกลางคืนมากที่สุด (นาที)**
C1	1026	56	342
C2	1054.5	62	327
C3	997.5	68	342
C4	1026	74	327
C5	484.5	387	525

— ตรวจสอบงานซ่อมบำรุงที่สามารถทำงานได้ในเวลาหยุดพักช่วงกลางวันและกลางคืน

ในการทำงานซ่อมบำรุงจะต้องมีเวลาว่างเพียงพอต่อการทำงาน โดยงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันทั้ง 3 กลุ่มคือ M1 M2 และ M3 ต้องการเวลาในการทำงาน 120 240 และ 480 นาทีตามลำดับ เมื่อรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์มีเวลาหยุดพักช่วงกลางวันที่มากที่สุด 387 นาที จะสามารถทำงานซ่อมบำรุง M1 และ M2 ได้ ส่วนในเวลากลางคืนจำนวน 525 นาทีสามารถทำงานซ่อมบำรุงทั้ง M1 M2 และ M3 ได้ ดังนั้นงานซ่อมบำรุงทุกกลุ่มงานสามารถทำได้ในช่วงเวลาว่างระหว่างรอบการให้บริการ

— รอบระยะทางการซ่อมบำรุงร่วม (CMI) และรอบเวลาการซ่อมบำรุงร่วม (CMC)

รอบระยะการซ่อมบำรุงร่วมเป็นรอบระยะทางขั้นต่ำที่รถไฟฟ้าแต่ละขบวนจะต้องทำงานซ่อมบำรุงครบทุกกลุ่มงาน เพราะฉะนั้นรอบระยะทางร่วมที่รถไฟฟ้าจะต้องทำงานครบทุก 15,000 45,000 และ 90,000 กิโลเมตร คือ 90,000 กิโลเมตรนั่นเอง

รอบเวลาการซ่อมบำรุงร่วมคือระยะเวลาเฉลี่ยที่รถไฟฟ้าจะถูกใช้งานครบรอบระยะทางการซ่อมบำรุงร่วมซึ่งก็คือ 90,000 กิโลเมตร ดังนั้นโครงการรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์ที่มีระยะทางการให้บริการ 4,588.5 กิโลเมตรต่อวันด้วยรถไฟฟ้าจำนวน 5 ขบวน จะมีรอบเวลาการซ่อมบำรุงร่วม 98 วัน

— ตรวจสอบความสามารถในการทำงานซ่อมบำรุง

ตรวจสอบความสามารถในการทำงานซ่อมบำรุงคือการตรวจสอบว่าตลอดรอบการซ่อมบำรุงร่วม (CMC) สามารถทำงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าทุกงานสำหรับรถไฟฟ้าทุกขบวนได้หรือไม่ เมื่อความต้องการในการซ่อมบำรุงคือจำนวนวันรวมที่ต้องใช้เพื่อทำงานซ่อมบำรุงทั้งหมด ดังนั้นตลอดรอบเวลาซ่อมบำรุงร่วม 98 วัน รถไฟฟ้าขบวนหนึ่งๆ ต้องทำงานซ่อมบำรุง M1 จำนวน 6 ครั้ง M2 จำนวน 2 ครั้ง และ M3 จำนวน 1 ครั้ง โดยโครงการรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์ที่มีเวลาว่างตอนกลางวันและกลางคืน 387 และ 525 นาทีตามลำดับจะต้องใช้เวลา 2 วันในการทำงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า 1 ขบวน ดังนั้นรถไฟฟ้า 5 ขบวนจะต้องการเวลารวมจำนวน 10 วันในการทำงานซ่อมบำรุงทั้งหมด เนื่องจากจำนวนวันรวมที่ต้องการสำหรับทำงานซ่อมบำรุงทั้งหมดน้อยกว่ารอบเวลาการซ่อมบำรุงร่วม ดังนั้นจำนวนรถไฟฟ้าที่มีอยู่จึงเพียงพอต่อการใช้ให้บริการตามตารางเดินรถและทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันที่กำหนดไว้แล้ว ไม่จำเป็นต้องสำรองรถไฟฟ้าเพื่อทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน

— การจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน

ในการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันนี้เป็นการจัดเส้นทางการเดินรถให้รถไฟฟ้าแต่ละขบวนแบบรายวัน รถไฟฟ้าจะเริ่มเข้าทำงานซ่อมบำรุงได้ก่อนครบกำหนดได้ 10% ของรอบระยะทางที่กำหนดไว้ และถ้าเข้าทำงานซ่อมบำรุงช้ากว่ากำหนด 10% ของรอบระยะทางที่กำหนดไว้จะถือว่าเป็นความล่าช้าของเข้าการทำงานซ่อมบำรุง เช่น กลุ่มงานซ่อมบำรุง M1 จะสามารถเข้าทำงานซ่อมบำรุงเมื่อถูกใช้งานไปครบระยะทาง (1 - 0.1) x 15,000 = 13,500 กิโลเมตร โดยถ้าเข้าทำงานซ่อมบำรุงช้ากว่า (1 + 0.1) x 15,000 = 16,500 กิโลเมตร จะถือเป็นความล่าช้าของการเข้าทำงานซ่อมบำรุง โดยถ้าความล่าช้าของการเข้าทำงานซ่อมบำรุงที่เกิดขึ้นนั้นยิ่งมีค่ามากก็จะส่งผลให้ความเสี่ยงต่อการเกิดความเสียหายแบบไม่คาดหวังหรือเกิดอุบัติเหตุสูงขึ้นตามไปด้วย

การจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุลดังแสดงในตาราง 12 จะเป็นการจัดการใช้งานรถไฟฟ้าโดยการสลับหมุนเวียนเส้นทางเดินรถทุกวันเรียงลำดับจากเส้นทางเดินรถ C1 C2 C3 C4 และ C5 โดยไม่พิจารณาระยะทางสะสมของรถไฟฟ้าเมื่อสิ้นวันก่อนหน้า เนื่องจากเส้นทางเดินรถ C5 เป็นเส้นทางเดียวที่มีเวลาว่างเพียงพอต่อการทำงานซ่อมบำรุง M1 และ M2 ในช่วงเวลากลางวัน ดังนั้นรถไฟฟ้าที่ให้บริการในเส้นทางเดินรถ C5 จะสามารถเข้าทำงานซ่อมบำรุง M1 และ M2 ในตอนกลางวันได้ถ้ามีระยะสะสมตอนต้นวันถึงเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ส่วนในช่วงเวลากลางคืนรถไฟฟ้าทุกขบวนสามารถเข้าทำงานซ่อมบำรุงได้โดย C1 C2 C3 และ C4 สามารถทำงาน M1 และ M2 ได้ ส่วนงาน

M3 จะสามารถทำงาน M3 ได้ด้วย แต่จะสามารถเข้าทำงานได้ครั้งละ 1 ขบวนเท่านั้น และรถไฟฟ้าที่ใช้งานในเส้นทาง C5 จะได้รับการพิจารณาให้ทำงานก่อน

ในส่วนของการจัดตารางการใช้งานแบบไม่สมดุลดังแสดงในตาราง 13 นั้น จะเริ่มให้รถไฟฟ้าขบวนที่ 1 เข้าทำงานซ่อมบำรุงก่อน เมื่อรถไฟฟ้าขบวนที่ 1 ได้เข้าทำงานซ่อมบำรุงแล้วจะให้รถไฟฟ้าขบวนที่ 2 เข้าทำงานซ่อมบำรุงต่อไป ทำการเรียงลำดับเส้นทางเดินรถที่มีระยะทางจากมากไปน้อยได้ C2 C1 C4 C3 และ C5 เพื่อให้ง่ายต่อการจัดตาราง จากนั้นจะทำการจัดการใช้งานเส้นทางเดินรถ C2 ซึ่งมีระยะทางให้บริการมากที่สุดแก่รถไฟฟ้าขบวนที่ 1 ก่อน เพื่อให้รถไฟฟ้าขบวนที่ 1 ครบกำหนดเข้าทำงานซ่อมบำรุงก่อน เมื่อระยะทางสะสมเมื่อต้นวันของรถไฟฟ้าครบกำหนดเข้าทำงานซ่อมบำรุงแล้วให้เปลี่ยนไปใช้งานในเส้นทางเดินรถ C5 เพื่อเข้าทำงานซ่อมบำรุงในช่วงกลางวัน ในขณะที่รถไฟฟ้าขบวนอื่นๆที่ถึงกำหนดการซ่อมสามารถทำงานซ่อมบำรุงได้ในเวลากลางคืน แล้วให้รถไฟฟ้าขบวนที่ 2 เปลี่ยนไปใช้งานในเส้นทางเดินรถ C2 จนกว่าจะครบกำหนดการทำงานซ่อมบำรุงต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง 12 ตารางการใช้งานรถไฟฟ้าสายแอร์พอร์ตลิงค์แบบสมดุล

วันที่	เส้นทางเดินรถ					ระยะทางสะสมตอนสิ้นวัน					ความล่าช้าของงานซ่อมฯ กลุ่ม M1					ความล่าช้าของงานซ่อมฯ กลุ่ม M2					ความล่าช้าของงานซ่อมฯ กลุ่ม M3				
	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5
1	C1	C2	C3	C4	C5	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	C2	C3	C4	C5	C1	1026	1054.5	997.5	1026	484.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	C3	C4	C5	C1	C2	2080.5	2052	2023.5	1510.5	1510.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	C4	C5	C1	C2	C3	3078	3078	2508	2536.5	2565	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	C5	C1	C2	C3	C4	4104	3562.5	3534	3591	3562.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	C1	C2	C3	C4	C5	4588.5	4588.5	4588.5	4588.5	4588.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	C2	C3	C4	C5	C1	5614.5	5643	5586	5614.5	5073	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	C3	C4	C5	C1	C2	6669	6640.5	6612	6099	6099	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	C4	C5	C1	C2	C3	7666.5	7666.5	7096.5	7125	7153.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	C5	C1	C2	C3	C4	8692.5	8151	8122.5	8179.5	8151	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	C1	C2	C3	C4	C5	9177	9177	9177	9177	9177	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	C2	C3	C4	C5	C1	10203	10231.5	10174.5	10203	9661.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	C3	C4	C5	C1	C2	11257.5	11229	11200.5	10687.5	10687.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	C4	C5	C1	C2	C3	12255	12255	11685	11713.5	11742	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	C5	C1	C2	C3	C4	13281	12739.5	12711	12768	12739.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	C1	C2	C3	C4	C5	13765.5	13765.5	13765.5	13765.5	13765.5	0	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	C2	C3	C4	C5	C1	14791.5	14820	14763	14791.5	14250	-	0	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	C3	C4	C5	C1	C2	15846	15817.5	15789	15276	15276	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	C4	C5	C1	C2	C3	16843.5	16843.5	16273.5	16302	16330.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	C5	C1	C2	C3	C4	17869.5	17328	17299.5	17356.5	17328	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	C1	C2	C3	C4	C5	18354	18354	18354	18354	18354	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	C2	C3	C4	C5	C1	19380	19408.5	19351.5	19380	18838.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

วันที่	เส้นทางเดินรถ					ระยะทางสะสมตอนสิ้นวัน					ความล่าช้าของงานซ่อมฯ กลุ่ม M1					ความล่าช้าของงานซ่อมฯ กลุ่ม M2					ความล่าช้าของงานซ่อมฯ กลุ่ม M3				
	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5
23	C3	C4	C5	C1	C2	20434.5	20406	20377.5	19864.5	19864.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	C4	C5	C1	C2	C3	21432	21432	20862	20890.5	20919	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	C5	C1	C2	C3	C4	22458	21916.5	21888	21945	21916.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	C1	C2	C3	C4	C5	22942.5	22942.5	22942.5	22942.5	22942.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	C2	C3	C4	C5	C1	23968.5	23997	23940	23968.5	23427	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	C3	C4	C5	C1	C2	25023	24994.5	24966	24453	24453	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	C4	C5	C1	C2	C3	26020.5	26020.5	25450.5	25479	25507.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	C5	C1	C2	C3	C4	27046.5	26505	26476.5	26533.5	26505	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	C1	C2	C3	C4	C5	27531	27531	27531	27531	27531	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	C2	C3	C4	C5	C1	28557	28585.5	28529.5	28557	28015.5	-	0	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	C3	C4	C5	C1	C2	29611.5	29583	29554.5	29041.5	29041.5	0	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	C4	C5	C1	C2	C3	30609	30609	30039	30067.5	30096	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	C5	C1	C2	C3	C4	31635	31093.5	31065	31122	31093.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
36	C1	C2	C3	C4	C5	32119.5	32119.5	32119.5	32119.5	32119.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37	C2	C3	C4	C5	C1	33145.5	33174	33117	33145.5	32604	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
38	C3	C4	C5	C1	C2	34200	34171.5	34143	33630	33630	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
39	C4	C5	C1	C2	C3	35197.5	35197.5	34627.5	34656	34684.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	C5	C1	C2	C3	C4	36223.5	35682	35653.5	35710.5	35682	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
41	C1	C2	C3	C4	C5	36708	36708	36708	36708	36708	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
42	C2	C3	C4	C5	C1	37734	37762.5	37705.5	37734	37192.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
43	C3	C4	C5	C1	C2	38788.5	38760	38731.5	38218.5	38218.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
44	C4	C5	C1	C2	C3	39786	39786	39216	39244.5	39273	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
45	C5	C1	C2	C3	C4	40812	40270.5	40242	40299	40270.5	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
46	C1	C2	C3	C4	C5	41296.5	41296.5	41296.5	41296.5	41296.5	-	-	-	-	-	-	0	-	-	0	-	-	-	-	-

วันที่	เส้นทางเดินรถ					ระยะทางสะสมตอนสิ้นวัน					ความล่าช้าของงานซ่อมฯ กลุ่ม M1					ความล่าช้าของงานซ่อมฯ กลุ่ม M2					ความล่าช้าของงานซ่อมฯ กลุ่ม M3				
	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5
47	C2	C3	C4	C5	C1	42322.5	42351	42294	42322.5	41781	-	-	-	-	-	-	-	0	0	-	-	-	-	-	-
48	C3	C4	C5	C1	C2	43377	43348.5	43320	42807	42807	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
49	C4	C5	C1	C2	C3	44374.5	44374.5	43804.5	43833	43861.5	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	C5	C1	C2	C3	C4	45400.5	44859	44830.5	44887.5	44859	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
51	C1	C2	C3	C4	C5	45885	45885	45885	45885	45885	-	-	0	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
52	C2	C3	C4	C5	C1	46911	46939.5	46882.5	46911	46369.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
53	C3	C4	C5	C1	C2	47965.5	47937	47908.5	47395.5	47395.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
54	C4	C5	C1	C2	C3	48963	48963	48393	48421.5	48450	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
55	C5	C1	C2	C3	C4	49989	49447.5	49419	49476	49447.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
56	C1	C2	C3	C4	C5	50473.5	50473.5	50473.5	50473.5	50473.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
57	C2	C3	C4	C5	C1	51499.5	51528	51471	51499.5	50958	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58	C3	C4	C5	C1	C2	52554	52525.5	52497	51984	51984	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
59	C4	C5	C1	C2	C3	53551.5	53551.5	52981.5	53010	53038.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	C5	C1	C2	C3	C4	54577.5	54036	54007.5	54064.5	54036	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
61	C1	C2	C3	C4	C5	55062	55062	55062	55062	55062	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62	C2	C3	C4	C5	C1	56088	56116.5	56059.5	56088	55546.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63	C3	C4	C5	C1	C2	57142.5	57114	57085.5	56572.5	56572.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64	C4	C5	C1	C2	C3	58140	58140	57570	57598.5	57627	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
65	C5	C1	C2	C3	C4	59166	58624.5	58596	58653	58624.5	0	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
66	C1	C2	C3	C4	C5	59650.5	59650.5	59650.5	59650.5	59650.5	-	0	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
67	C2	C3	C4	C5	C1	60676.5	60705	60648	60676.5	60135	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
68	C3	C4	C5	C1	C2	61731	61702.5	61674	61161	61161	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
69	C4	C5	C1	C2	C3	62728.5	62728.5	62158.5	62187	62215.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	C5	C1	C2	C3	C4	63754.5	63213	63184.5	63241.5	63213	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

วันที่	เส้นทางเดินรถ					ระยะทางสะสมตอนสิ้นวัน					ความล่าช้าของงานซ่อมฯ กลุ่ม M1					ความล่าช้าของงานซ่อมฯ กลุ่ม M2					ความล่าช้าของงานซ่อมฯ กลุ่ม M3				
	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5
71	C1	C2	C3	C4	C5	64239	64239	64239	64239	64239	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
72	C2	C3	C4	C5	C1	65265	65293.5	65236.5	65265	64723.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
73	C3	C4	C5	C1	C2	66319.5	66291	66262.5	65749.5	65749.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
74	C4	C5	C1	C2	C3	67317	67317	66747	66775.5	66804	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
75	C5	C1	C2	C3	C4	68343	67801.5	67773	67830	67801.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
76	C1	C2	C3	C4	C5	68827.5	68827.5	68827.5	68827.5	68827.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
77	C2	C3	C4	C5	C1	69853.5	69882	69825	69853.5	69312	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
78	C3	C4	C5	C1	C2	70908	70879.5	70851	70338	70338	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
79	C4	C5	C1	C2	C3	71905.5	71905.5	71335.5	71364	71392.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	C5	C1	C2	C3	C4	72931.5	72390	72361.5	72418.5	72390	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
81	C1	C2	C3	C4	C5	73416	73416	73416	73416	73416	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
82	C2	C3	C4	C5	C1	74442	74470.5	74413.5	74442	73900.5	-	0	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
83	C3	C4	C5	C1	C2	75496.5	75468	75439.5	74926.5	74926.5	0	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
84	C4	C5	C1	C2	C3	76494	76494	75924	75952.5	75981	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
85	C5	C1	C2	C3	C4	77520	76978.5	76950	77007	76978.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
86	C1	C2	C3	C4	C5	78004.5	78004.5	78004.5	78004.5	78004.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
87	C2	C3	C4	C5	C1	79030.5	79059	79002	79030.5	78489	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
88	C3	C4	C5	C1	C2	80085	80056.5	80028	79515	79515	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
89	C4	C5	C1	C2	C3	81082.5	81082.5	80512.5	80541	80569.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-
90	C5	C1	C2	C3	C4	82108.5	81567	81538.5	81595.5	81567	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-
91	C1	C2	C3	C4	C5	82593	82593	82593	82593	82593	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
92	C2	C3	C4	C5	C1	83619	83647.5	83590.5	83619	83077.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-
93	C3	C4	C5	C1	C2	84673.5	84645	84616.5	84103.5	84103.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-
94	C4	C5	C1	C2	C3	85671	85671	85101	85129.5	85158	-	-	-	-	-	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-

วันที่	เส้นทางเดินรถ					ระยะทางสะสมตอนต้นวัน					ความล่าช้าของงานซ่อมฯ กลุ่ม M1					ความล่าช้าของงานซ่อมฯ กลุ่ม M2					ความล่าช้าของงานซ่อมฯ กลุ่ม M3				
	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5
95	C5	C1	C2	C3	C4	86697	86155.5	86127	86184	86155.5	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
96	C1	C2	C3	C4	C5	87181.5	87181.5	87181.5	87181.5	87181.5	-	-	-	-	-	-	-	0	-	0	-	-	-	-	-
97	C2	C3	C4	C5	C1	88207.5	88236	88179	88207.5	87666	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
98	C3	C4	C5	C1	C2	89262	89233.5	89205	88692	88692	0	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
99	C4	C5	C1	C2	C3	90259.5	90259.5	89689.5	89718	89746.5	-	0	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
100	C5	C1	C2	C3	C4	91285.5	90744	90715.5	90772.5	90744	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตาราง 13 ตารางการใช้งานรถไฟฟ้าสายแอร์พอร์ตลิงค์แบบไม่สมดุล

วันที่	เส้นทางเดินรถ					ระยะทางสะสมตอนต้นวัน					ความล่าช้าของงานซ่อมฯ กลุ่ม M1					ความล่าช้าของงานซ่อมฯ กลุ่ม M2					ความล่าช้าของงานซ่อมฯ กลุ่ม M3				
	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5
1	C2	C1	C4	C3	C5	0	0	0	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	C2	C1	C4	C3	C5	1054.5	1026	1026	997.5	484.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	C2	C1	C4	C3	C5	2109	2052	2052	1995	969	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	C2	C1	C4	C3	C5	3163.5	3078	3078	2992.5	1453.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	C2	C1	C4	C3	C5	4218	4104	4104	3990	1938	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	C2	C1	C4	C3	C5	5272.5	5130	5130	4987.5	2422.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	C2	C1	C4	C3	C5	6327	6156	6156	5985	2907	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	C2	C1	C4	C3	C5	7381.5	7182	7182	6982.5	3391.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	C2	C1	C4	C3	C5	8436	8208	8208	7980	3876	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	C2	C1	C4	C3	C5	9490.5	9234	9234	8977.5	4360.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	C2	C1	C4	C3	C5	10545	10260	10260	9975	4845	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	C2	C1	C4	C3	C5	11599.5	11286	11286	10972.5	5329.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

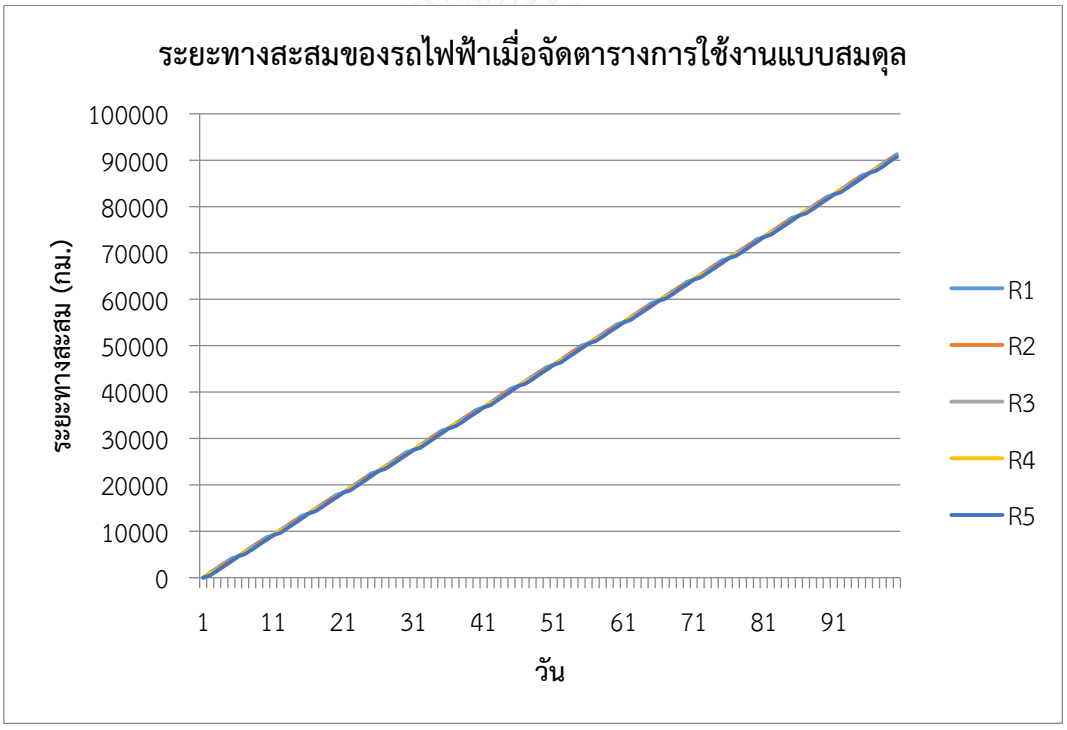
วันที่	เส้นทางเดินรถ					ระยะทางสะสมตอนต้นวัน					ความล่าช้าของงานซ่อมฯ กลุ่ม M1					ความล่าช้าของงานซ่อมฯ กลุ่ม M2					ความล่าช้าของงานซ่อมฯ กลุ่ม M3				
	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5
13	C2	C1	C4	C3	C5	12654	12312	12312	11970	5814	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	C2	C1	C4	C3	C5	13708.5	13338	13338	12967.5	6298.5	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	C5	C2	C1	C4	C3	14763	14364	14364	13965	6783	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	C3	C5	C2	C1	C4	15247.5	15418.5	15390	14991	7780.5	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	C4	C3	C5	C2	C1	16245	15903	16444.5	16017	8806.5	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	C1	C4	C3	C5	C2	17271	16900.5	16929	17071.5	9832.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	C1	C4	C3	C5	C2	18297	17926.5	17926.5	17556	10887	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	C1	C4	C3	C5	C2	19323	18952.5	18924	18040.5	11941.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	C1	C4	C3	C5	C2	20349	19978.5	19921.5	18525	12996	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	C1	C4	C3	C5	C2	21375	21004.5	20919	19009.5	14050.5	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	C2	C1	C4	C3	C5	22401	22030.5	21916.5	19494	15105	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
24	C2	C1	C4	C3	C5	23455.5	23056.5	22942.5	20491.5	15589.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25	C2	C1	C4	C3	C5	24510	24082.5	23968.5	21489	16074	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
26	C2	C1	C4	C3	C5	25564.5	25108.5	24994.5	22486.5	16558.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	C2	C1	C4	C3	C5	26619	26134.5	26020.5	23484	17043	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	C2	C1	C4	C3	C5	27673.5	27160.5	27046.5	24481.5	17527.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	C2	C1	C4	C3	C5	28728	28186.5	28072.5	25479	18012	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	C5	C2	C1	C4	C3	29782.5	29212.5	29098.5	26476.5	18496.5	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	C3	C5	C2	C1	C4	30267	30267	30124.5	27502.5	19494	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
32	C4	C3	C5	C2	C1	31264.5	30751.5	31179	28528.5	20520	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
33	C1	C4	C3	C5	C2	32290.5	31749	31663.5	29583	21546	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	C1	C4	C3	C5	C2	33316.5	32775	32661	30067.5	22600.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	C1	C4	C3	C5	C2	34342.5	33801	33658.5	30552	23655	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
36	C1	C4	C3	C5	C2	35368.5	34827	34656	31036.5	24709.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

วันที่	เส้นทางเดินรถ					ระยะทางสะสมตอนต้นวัน					ความล่าช้าของงานซ่อมฯ กลุ่ม M1					ความล่าช้าของงานซ่อมฯ กลุ่ม M2					ความล่าช้าของงานซ่อมฯ กลุ่ม M3				
	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5
37	C1	C4	C3	C5	C2	36394.5	35853	35653.5	31521	25764	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
38	C1	C4	C3	C5	C2	37420.5	36879	36651	32005.5	26818.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
39	C1	C4	C3	C5	C2	38446.5	37905	37648.5	32490	27873	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	C1	C4	C3	C5	C2	39472.5	38931	38646	32974.5	28927.5	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
41	C2	C1	C4	C3	C5	40498.5	39957	39643.5	33459	29982	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
42	C2	C1	C4	C3	C5	41553	40983	40669.5	34456.5	30466.5	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
43	C2	C1	C4	C3	C5	42607.5	42009	41695.5	35454	30951	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
44	C2	C1	C4	C3	C5	43662	43035	42721.5	36451.5	31435.5	0	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
45	C5	C2	C1	C4	C3	44716.5	44061	43747.5	37449	31920	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
46	C3	C5	C2	C1	C4	45201	45115.5	44773.5	38475	32917.5	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
47	C4	C3	C5	C2	C1	46198.5	45600	45828	39501	33943.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
48	C4	C3	C5	C2	C1	47224.5	46597.5	46812.5	40555.5	34969.5	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
49	C4	C3	C5	C2	C1	48250.5	47595	46797	41610	35995.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	C4	C3	C5	C2	C1	49276.5	48592.5	47281.5	42664.5	37021.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
51	C4	C3	C5	C2	C1	50302.5	49590	47766	43719	38047.5	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
52	C1	C4	C3	C5	C2	51328.5	50587.5	48250.5	44773.5	39073.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
53	C1	C4	C3	C5	C2	52354.5	51613.5	49248	45258	40128	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
54	C1	C4	C3	C5	C2	53380.5	52639.5	50245.5	45742.5	41182.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-
55	C1	C4	C3	C5	C2	54406.5	53665.5	51243	46227	42237	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
56	C1	C4	C3	C5	C2	55432.5	54691.5	52240.5	46711.5	43291.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
57	C1	C4	C3	C5	C2	56458.5	55717.5	53238	47196	44346	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58	C2	C1	C4	C3	C5	57484.5	56743.5	54235.5	47680.5	45400.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
59	C2	C1	C4	C3	C5	58539	57769.5	55261.5	48678	45885	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	C5	C2	C1	C4	C3	59593.5	58795.5	56287.5	49675.5	46369.5	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

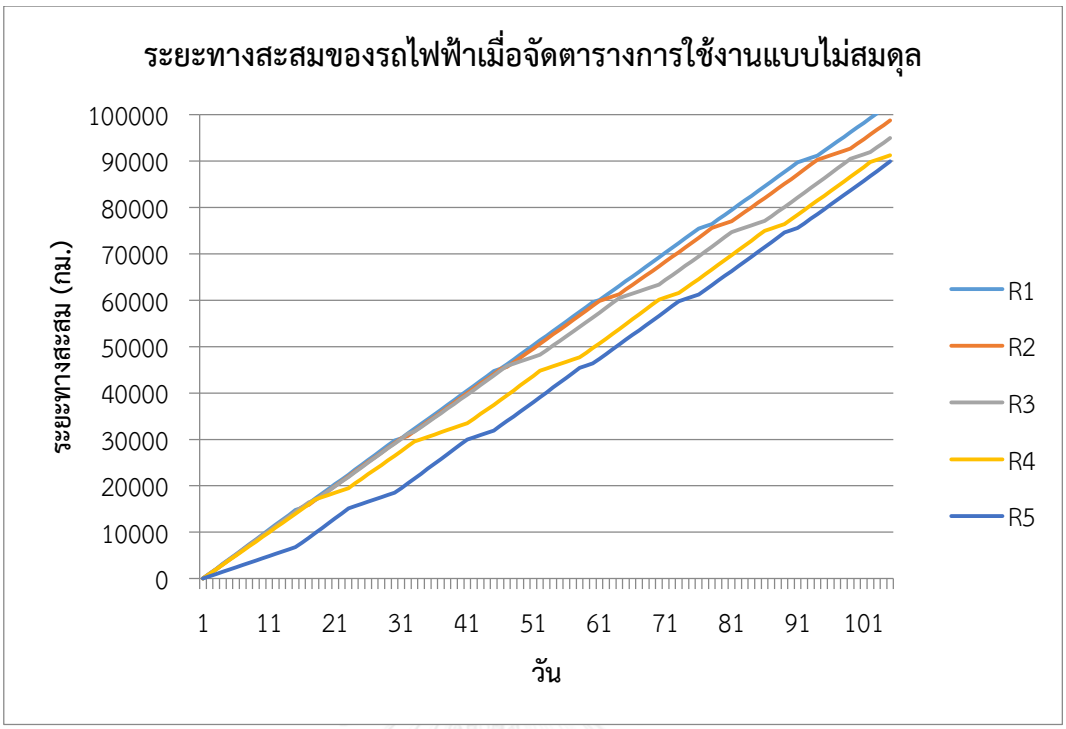
วันที่	เส้นทางเดินรถ					ระยะทางสะสมตอนสิ้นวัน					ความล่าช้าของงานซ่อมฯ กลุ่ม M1					ความล่าช้าของงานซ่อมฯ กลุ่ม M2					ความล่าช้าของงานซ่อมฯ กลุ่ม M3				
	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5
61	C3	C5	C2	C1	C4	60078	59850	57313.5	50701.5	47567	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
62	C3	C5	C2	C1	C4	61075.5	60834.5	58368	51727.5	48393	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
63	C3	C5	C2	C1	C4	62073	60819	59422.5	52753.5	49419	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64	C4	C3	C5	C2	C1	63070.5	61803.5	60477	53779.5	50445	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
65	C4	C3	C5	C2	C1	64096.5	62301	60961.5	54834	51471	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
66	C4	C3	C5	C2	C1	65122.5	63298.5	61446	55888.5	52497	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
67	C4	C3	C5	C2	C1	66148.5	64296	61930.5	56943	53523	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
68	C4	C3	C5	C2	C1	67174.5	65293.5	62415	57997.5	54549	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
69	C4	C3	C5	C2	C1	68200.5	66291	62899.5	59052	55575	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	C1	C4	C3	C5	C2	69226.5	67288.5	63384	60106.5	56601	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
71	C1	C4	C3	C5	C2	70252.5	68314.5	64381.5	60591	57655.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
72	C1	C4	C3	C5	C2	71278.5	69340.5	65379	61075.5	58710	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
73	C2	C1	C4	C3	C5	72304.5	70366.5	66376.5	61560	59764.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
74	C2	C1	C4	C3	C5	73359	71392.5	67402.5	62557.5	60249	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
75	C2	C1	C4	C3	C5	74413.5	72418.5	68428.5	63555	60733.5	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
76	C5	C2	C1	C4	C3	75468	73444.5	69454.5	64552.5	61218	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
77	C5	C2	C1	C4	C3	75952.5	74499	70480.5	65578.5	62215.5	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
78	C3	C5	C2	C1	C4	76437	75553.5	71506.5	66604.5	63213	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
79	C3	C5	C2	C1	C4	77434.5	76038	72561	67630.5	64239	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	C3	C5	C2	C1	C4	78432	76522.5	73615.5	68656.5	65265	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
81	C4	C3	C5	C2	C1	79429.5	77007	74670	69682.5	66291	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
82	C4	C3	C5	C2	C1	80455.5	78004.5	75154.5	70737	67317	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
83	C4	C3	C5	C2	C1	81481.5	79002	75639	71791.5	68343	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
84	C4	C3	C5	C2	C1	82507.5	79999.5	76123.5	72846	69369	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

วันที่	เส้นทางเดินรถ					ระยะทางสะสมตอนต้นวัน					ความล่าช้าของงานซ่อมฯ กลุ่ม M1					ความล่าช้าของงานซ่อมฯ กลุ่ม M2					ความล่าช้าของงานซ่อมฯ กลุ่ม M3				
	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5	R1	R2	R3	R4	R5
85	C4	C3	C5	C2	C1	83533.5	80997	76608	73900.5	70595	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
86	C1	C4	C3	C5	C2	84559.5	81994.5	77092.5	74955	71421	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
87	C1	C4	C3	C5	C2	85585.5	83020.5	78090	75439.5	72475.5	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
88	C1	C4	C3	C5	C2	86611.5	84046.5	79087.5	75924	73530	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
89	C2	C1	C4	C3	C5	87637.5	85072.5	80085	76408.5	74584.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	C2	C1	C4	C3	C5	88692	86098.5	81111	77406	75069	0	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-
91	C5	C2	C1	C4	C3	89746.5	87124.5	82137	78403.5	75553.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-
92	C5	C2	C1	C4	C3	90231	88179	83163	79429.5	76551	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
93	C5	C2	C1	C4	C3	90715.5	89233.5	84189	80455.5	77548.5	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
94	C3	C5	C2	C1	C4	91200	90288	85215	81481.5	78546	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-
95	C3	C5	C2	C1	C4	92197.5	90772.5	86269.5	82507.5	79572	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
96	C3	C5	C2	C1	C4	93195	91257	87324	83533.5	80598	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
97	C3	C5	C2	C1	C4	94192.5	91741.5	88378.5	84559.5	81624	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
98	C3	C5	C2	C1	C4	95190	92226	89433	85585.5	82650	-	-	0	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-
99	C4	C3	C5	C2	C1	96187.5	92710.5	90487.5	86611.5	83676	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-	-
100	C4	C3	C5	C2	C1	97213.5	93708	90972	87666	84702	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
101	C4	C3	C5	C2	C1	98239.5	94705.5	91456.5	88720.5	85728	-	-	-	0	-	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-
102	C1	C4	C3	C5	C2	99265.5	95703	91941	89775	86754	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-
103	C1	C4	C3	C5	C2	100291.5	96729	92938.5	90259.5	87808.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
104	C1	C4	C3	C5	C2	101317.5	97755	93936	90744	88863	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
105	C2	C1	C4	C3	C5	102343.5	98781	94933.5	91228.5	89917.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0

จากผลการทดลองจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุลและแบบไม่สมดุลจนรถไฟฟ้าทุกขบวนทำงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าครบทุกงานของ 1 รอบเวลาการซ่อมบำรุงร่วมซึ่งก็คือ งานซ่อมบำรุง M1 M2 และ M3 จำนวน 6 2 และ 1 ครั้งตามลำดับ โดยรูป 13 แสดงถึงระยะทางสะสมของรถไฟฟ้าแต่ละขบวนจากการจัดตารางการใช้งานแบบสมดุล จะเห็นว่ารถไฟฟ้าแต่ละขบวนจะมีระยะทางสะสมใกล้เคียงกันมากในแต่ละวัน ทำให้เกิดความต้องการทำงานซ่อมบำรุงพร้อมกัน ในขณะที่รูป 14 แสดงถึงระยะทางสะสมของรถไฟฟ้าแต่ละขบวนจากการจัดตารางการใช้งานแบบไม่สมดุล จะเห็นว่าเมื่อเริ่มแรกรถไฟฟ้าทุกขบวนมีระยะทางเริ่มต้นที่ 0 กิโลเมตรเท่ากัน แต่เมื่อเวลาผ่านไประยะทางสะสมของแต่ละขบวนจะถูกกระจายออกไป ทำให้รถไฟฟ้าแต่ละขบวนเกิดความต้องการซ่อมบำรุงไม่พร้อมกัน



รูป 13 ระยะทางสะสมของรถไฟฟ้าสายแอร์พอร์ตลิงค์เมื่อจัดตารางการใช้งานแบบสมดุล



รูป 14 ระยะทางสะสมของรถไฟฟ้าสายแอร์พอร์ตลิงค์เมื่อจัดตารางการใช้งานแบบไม่สมดุล

เมื่อพิจารณาผลการทดลองจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าและทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันของโครงการรถไฟฟ้าสายแอร์พอร์ตลิงค์จนทำงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าเสร็จครบทุกงานพบว่าไม่มีความล่าช้าของการเข้าทำงานซ่อมบำรุงที่เกิดขึ้นจากการทดลองจัดตารางการใช้งานทั้งแบบสมดุลและแบบไม่สมดุลทั้งงานซ่อมบำรุงกลุ่ม M1 M2 และ M3

4.2. สรุปจำนวนรถไฟฟ้า

ในส่วนนี้จะแบ่งเป็น 2 ส่วนย่อย ส่วนย่อยแรกจะกล่าวถึงจำนวนรถไฟฟ้าและเส้นทางการเดินรถไฟฟ้าของโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบันที่นำมาใช้ในการศึกษาการจัดตารางการใช้งานและซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน ส่วนย่อยที่สองคือจำนวนรถไฟฟ้าสำหรับโครงการรถไฟฟ้าในอนาคตของประเทศไทย

4.2.1 จำนวนรถไฟฟ้าของโครงการที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบัน

นอกจากโครงการรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์ที่เปิดให้บริการเดินรถแล้วในปัจจุบันยังมีโครงการรถไฟฟ้าอีก 3 โครงการ คือ โครงการรถไฟฟ้าสายสีเขียวเข้ม สายสีเขียวอ่อน และสายสีน้ำเงิน โดย

เมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์คำนวณหาจำนวนรถไฟฟ้าที่น้อยที่สุดสำหรับให้บริการตามตารางเดินรถที่กำหนดไว้แล้ว โครงการรถไฟฟ้าสายต่างๆ ต้องการจำนวนรถดังแสดงในตาราง 14 จะเห็นว่าระยะทางการให้บริการที่มากขึ้นกับเฮดเวย์ในชั่วโมงเร่งด่วนที่น้อยลงจะทำให้ต้องการรถไฟฟ้าจำนวนมากขึ้น

ตาราง 14 จำนวนรถไฟฟ้าสำหรับให้บริการตามตารางเดินรถของโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบัน

โครงการรถไฟฟ้า	**ระยะทาง (กม.)**	เฮดเวย์ชั่วโมงเร่งด่วน (นาที)	**จำนวนรถไฟฟ้า (ขบวน)**
สายสีเขียวเข้ม	21.8	2.50 – 4.25	28
สายสีเขียวอ่อน	14.5	4.50	12
สายสีน้ำเงิน	20	3.52 - 4.00	18

เมื่อทราบจำนวนรถไฟฟ้าที่ต้องการสำหรับการให้บริการเดินรถไฟฟ้าตามตารางการเดินรถที่กำหนดแล้ว ต่อมาทำการจัดเส้นทางการเดินรถสำหรับให้บริการเดินรถไฟฟ้า ในตาราง 15 – 17 แสดงรายละเอียดของเส้นทางการเดินรถต่างๆ ซึ่งประกอบไปด้วยระยะทางวิ่งต่อวัน ระยะเวลาหยุดพักช่วงกลางวันที่มากที่สุดซึ่งอยู่ในระหว่างเวลา 8.00 – 17.00 น. และระยะเวลาหยุดพักช่วงกลางคืนที่มากที่สุดซึ่งคือช่วงเวลานอกเหนือจาก 8.00 - 17.00 น.ของรถไฟฟ้าสายสีเขียวเข้ม สายสีเขียวอ่อน และสายสีน้ำเงิน โดยเส้นทางการเดินรถเหล่านี้จะใช้ในการจัดตารางการเดินรถและทำงานซ่อมบำรุงในภายหลังต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตาราง 15 รายละเอียดของเส้นทางเดินรถของโครงการรถไฟฟ้าสายสีเขียวเข้ม

เส้นทางเดินรถ	ระยะทาง (กม.)	เวลาหยุดพักช่วงกลางวันมากที่สุด (นาที)	เวลาหยุดพักช่วงกลางคืนมากที่สุด (นาที)
C1	632.2	4.0	264
C2	610.4	4.0	306.1
C3	610.4	5.2	298.1
C4	610.4	5.2	298.1
C5	610.4	5.5	282.1
C6	610.4	5.5	282.1
C7	610.4	5.7	276
C8	610.4	5.7	274.1
C9	588.6	4.0	290.1
C10	588.6	4.0	290.1
C11	523.2	7.6	406.1
C12	523.2	7.6	406.1
C13	501.4	17.2	412.1
C14	501.4	17.2	412.1
C15	283.4	376.3	463.1
C16	283.4	376.3	463.1
C17	239.8	397.9	485.6
C18	239.8	397.9	485.6
C19	218	389.5	512.6
C20	218	389.5	512.6
C21	174.4	447.6	534.2
C22	174.4	447.6	534.2
C23	152.6	447.9	582.8
C24	152.6	447.9	582.8
C25	152.6	445.9	573.8
C26	152.6	445.9	573.8
C27	65.4	440.1	734
C28	65.4	440.1	734

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง 16 รายละเอียดของเส้นทางเดินรถของโครงการรถไฟฟ้าสายสีเขียวอ่อน

เส้นทางเดินรถ	**ระยะทาง (กม.)**	**เวลาหยุดพักช่วงกลางวันมากที่สุด (นาที)**	**เวลาหยุดพักช่วงกลางคืนมากที่สุด (นาที)**
C1	565.5	7.0	262.0
C2	551	7.0	288.3
C3	551	8.0	274.0
C4	551	8.0	272.3
C5	551	16.0	296.3
C6	536.5	16.0	250.0
C7	536.5	24.0	280.3
C8	536.5	24.0	280.3
C9	464	56.0	404.3
C10	435	56.0	404.3
C11	174	461.8	522.0
C12	145	461.8	522.0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง 17 รายละเอียดของเส้นทางเดินรถของโครงการรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน

เส้นทางเดินรถ	ระยะทาง (กม.)	เวลาหยุดพักช่วงกลางวันมากที่สุด (นาที)	เวลาหยุดพักช่วงกลางคืนมากที่สุด (นาที)
C1	580	3.0	360.6
C2	580	3.0	360.6
C3	580	3.3	353.1
C4	580	3.3	353.1
C5	580	5.7	345.6
C6	580	5.7	345.6
C7	580	8.0	334.0
C8	580	8.0	334.0
C9	560	10.4	368.1
C10	560	10.4	368.1
C11	480	12.7	519.1
C12	480	12.7	519.1
C13	260	435.1	508.4
C14	260	435.1	508.4
C15	200	443.1	609.9
C16	200	443.1	609.9
C17	200	447.1	601.9
C18	200	447.1	601.9

จากนั้นทำการตรวจสอบความสามารถในการทำงานซ่อมบำรุงในช่วงเวลาว่างระหว่างรอบการให้บริการดังแสดงในตาราง 18 โดยการเปรียบเทียบจำนวนวันรวมที่ต้องการสำหรับทำงานซ่อมบำรุงกับจำนวนวันตลอดรอบการซ่อมบำรุงร่วม ในตาราง 19 จะเห็นว่าโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วสายต่างๆ ต้องการจำนวนวันรวมสำหรับทำงานซ่อมบำรุงทั้งหมดน้อยกว่าจำนวนวันที่มีตลอดรอบการซ่อมบำรุงร่วม ดังนั้นสามารถทำงานซ่อมบำรุงทั้งหมดได้ภายในช่วงเวลาหยุดพักรถที่มี

ตาราง 18 สรุปเวลาหยุดพักที่มากที่สุดของโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบัน

โครงการรถไฟฟ้า	**เวลาหยุดพักช่วงกลางวันมากที่สุด (นาที)**	**เวลาหยุดพักช่วงกลางคืนมากที่สุด (นาที)**
สายสีเขียวเข้ม	447.9	734
สายสีเขียวอ่อน	461.8	522
สายสีน้ำเงิน	447.1	601.9

ตาราง 19 จำนวนวันรวมที่ต้องใช้ในการซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าของโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบันสายต่างๆ

โครงการรถไฟฟ้า	**จำนวนรถไฟฟ้า (ขบวน)**	**จำนวนวันที่ต้องใช้ในการซ่อมบำรุงต่อขบวน (วัน)**	**จำนวนวันรวมที่ต้องใช้ในการซ่อมบำรุง (วัน)**	รอบเวลาการซ่อมบำรุงร่วม
สายสีเขียวเข้ม	28	2	56	235
สายสีเขียวอ่อน	12	2	24	193
สายสีน้ำเงิน	18	2	36	201

4.2.2 จำนวนรถไฟฟ้าสำหรับโครงการรถไฟฟ้าในอนาคต

เมื่อพิจารณาโครงการรถไฟฟ้าสายต่างๆ ในอนาคตของประเทศไทยที่มีวัตถุประสงค์และความยาวของระยะทางการให้บริการที่ต่างกันภายใต้ตารางเดินรถตามสมมติฐาน ซึ่งจะแบ่งเป็นรถไฟฟ้าชานเมืองที่ให้บริการในระยะทางที่ยาวกว่าแต่มีความถี่ในการให้บริการน้อยกว่า กับรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนที่มีระยะทางการให้บริการน้อยกว่าแต่มีความถี่ของการให้บริการมากกว่า พบว่าโครงการรถไฟฟ้าในอนาคตของประเทศไทยจะต้องมีรถไฟฟ้าสำหรับให้บริการตามตารางเดินรถที่กำหนดไว้อย่างน้อย 240 ขบวน ซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในตาราง 20

ตาราง 20 จำนวนรถไฟฟ้าที่ต้องการสำหรับโครงการรถไฟฟ้าสายต่างๆ ในอนาคต

โครงการรถไฟฟ้า	**ประเภท**	**ระยะทาง (กม.)**	**จำนวนรถไฟฟ้า (ขบวน)**
สายสีแดงเข้ม	รถไฟฟ้าชานเมือง	80.8	14
สายสีแดงอ่อน		54	10
แอร์พอร์ตลิงค์		50.3	8
สายสีเขียวเข้ม	รถไฟฟ้าขนส่งมวลชน	66.5	60
สายสีเขียวอ่อน		23	22
สายสีน้ำเงิน		55	50
สายสีม่วง		46.6	42
สายสีส้ม		37.5	34
รวม		***413.7***	***240***

เมื่อพิจารณาการทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันควบคู่ไปกับการให้บริการเดินรถไฟฟ้า ในตาราง 21 แสดงให้เห็นว่าโครงการรถไฟฟ้าแต่ละสายมีเวลาว่างเพียงพอต่อการทำงานซ่อมบำรุงทั้งหมด ดังนั้นจำนวนรถไฟฟ้าสำหรับใช้ในการให้บริการและทำงานซ่อมบำรุงของโครงการรถไฟฟ้าทุกโครงการในอนาคตรวมมีจำนวน 240 ขบวน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตาราง 21 พิจารณาความสามารถในการซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า

โครงการรถไฟฟ้า	เวลาหยุดพัก (นาที)		จำนวนวันรวมที่ต้องใช้ในการซ่อมบำรุง (วัน)	รอบเวลาการทำงานซ่อมบำรุงร่วม (วัน)	รถไฟฟ้าสำรอง (ขบวน)
	ช่วงกลางวัน	ช่วงกลางคืน			
สายสีแดงเข้ม	540	665	28	95	0
สายสีแดงอ่อน	505	654	20	101	0
แอร์พอร์ตลิงค์	387	525	26	87	0
สายสีเขียวเข้ม	494	713	120	219	0
สายสีเขียวอ่อน	526	664	44	232	0
สายสีน้ำเงิน	513	735	100	221	0
สายสีม่วง	528	670	84	219	0
สายสีส้ม	543	700	68	220	0

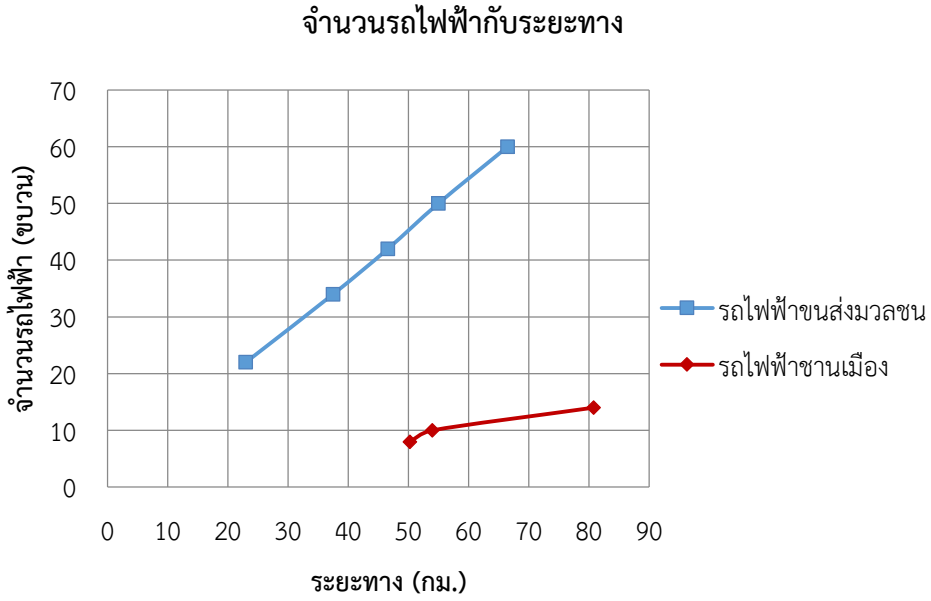
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน

ในส่วนนี้จะเป็นการสรุปและวิเคราะห์ผลที่ได้การดำเนินงานในประเด็นต่างๆ ประเด็นแรกคือปัจจัยที่มีผลต่อจำนวนรถไฟฟ้า ประเด็นต่อมาคือการเปรียบเทียบการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุลและแบบไม่สมดุล จากนั้นจะเป็นการสรุปปัญหาและอุปสรรคที่พบระหว่างการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

5.1. ปัจจัยที่มีผลต่อจำนวนรถไฟฟ้า

รถไฟฟ้าเป็นเครื่องจักรที่เป็นหัวใจของการดำเนินธุรกิจการให้บริการเดินรถไฟฟ้า และด้วยเหตุว่ารถไฟฟ้าขบวนหนึ่งๆ นั้นมีราคาที่สูงมาก รวมถึงค่าใช้งานในการดูแลรักษายังเป็นค่าใช้จ่ายที่สูงมากอย่างมีนัยสำคัญต่อต้นทุนการดำเนินงาน ดังนั้นการทราบถึงจำนวนรถไฟฟ้าที่ต้องการเพื่อวางแผนการสร้างโครงการรถไฟฟ้าในอนาคตจะช่วยประเมินงบประมาณการดำเนินการได้อย่างแม่นยำมากขึ้น ทำให้สามารถสร้างโครงการรถไฟฟ้าได้อย่างสำเร็จลุล่วงและมีประสิทธิภาพ ในคำนวณหาจำนวนรถไฟฟ้าสำหรับให้บริการโครงการรถไฟฟ้าต่างๆ นั้น พบว่าระยะทางในการให้บริการเดินรถส่งผลอย่างชัดเจนต่อจำนวนรถไฟฟ้าที่ต้องการ โดยโครงการรถไฟฟ้าที่มีระยะทางการเดินรถที่มากขึ้นนั้นจะต้องการรถไฟฟ้าในจำนวนที่มากขึ้น นอกจากระยะทางแล้วประเภทของการให้บริการก็มีผลต่อจำนวนรถไฟฟ้าที่ต้องการด้วยเช่นกัน โดยรถไฟฟ้าประเภทขนส่งมวลชนซึ่งมีความถี่ในการเดินรถ (นาที) หรือเฮดเวย์น้อยกว่ารถไฟฟ้าแบบชานเมืองจะต้องการรถไฟฟ้าในจำนวนที่มากกว่า โดยเฮดเวย์ที่น้อยลงจะทำให้มีอัตราการเพิ่มขึ้นของจำนวนรถไฟฟ้าที่สูงขึ้น จากรูป 15 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างระยะทางการให้บริการเดินรถกับจำนวนรถไฟฟ้าที่ต้องการสำหรับโครงการรถไฟฟ้าในอนาคตของไทย ซึ่งแบ่งเป็นรถไฟฟ้าประเภทชานเมือง 3 สาย และรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน 5 สาย จะพบว่ารถไฟฟ้าขนส่งมวลชนมีอัตราการเพิ่มขึ้นของรถไฟฟ้าประมาณ 0.92 ขบวนต่อกิโลเมตร ส่วนรถไฟฟ้าชานเมืองมีอัตราการเพิ่มขึ้น 0.17 ขบวนต่อกิโลเมตร ดังนั้นปัจจัยในการคำนวณหาจำนวนรถไฟฟ้าสำหรับโครงการรถไฟฟ้าต่างๆ คือระยะทางและเฮดเวย์ในการให้บริการเดินรถ

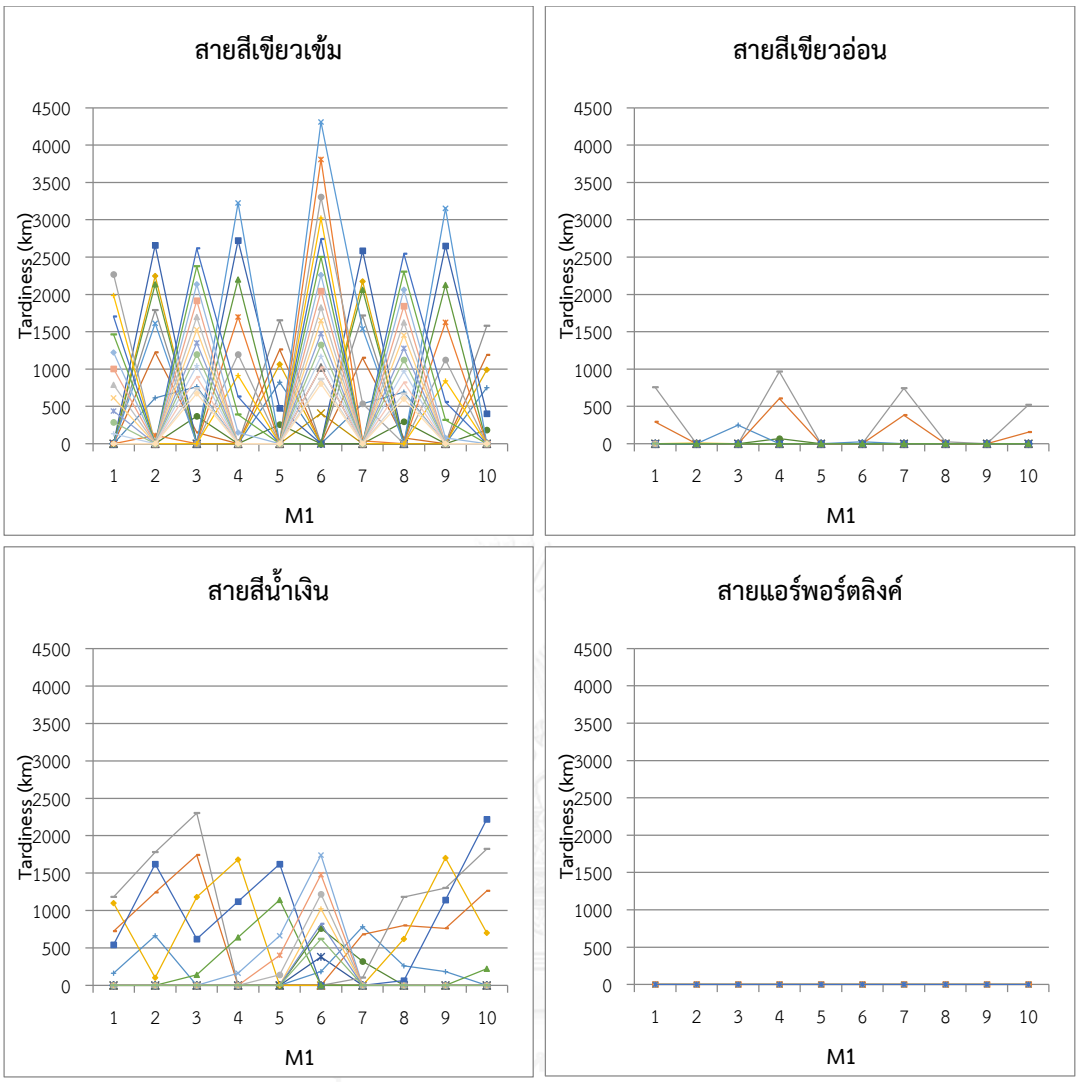


รูป 15 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างจำนวนรถไฟฟ้ากับระยะทางของโครงการรถไฟฟ้า

5.2. การจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุลและแบบไม่สมดุล

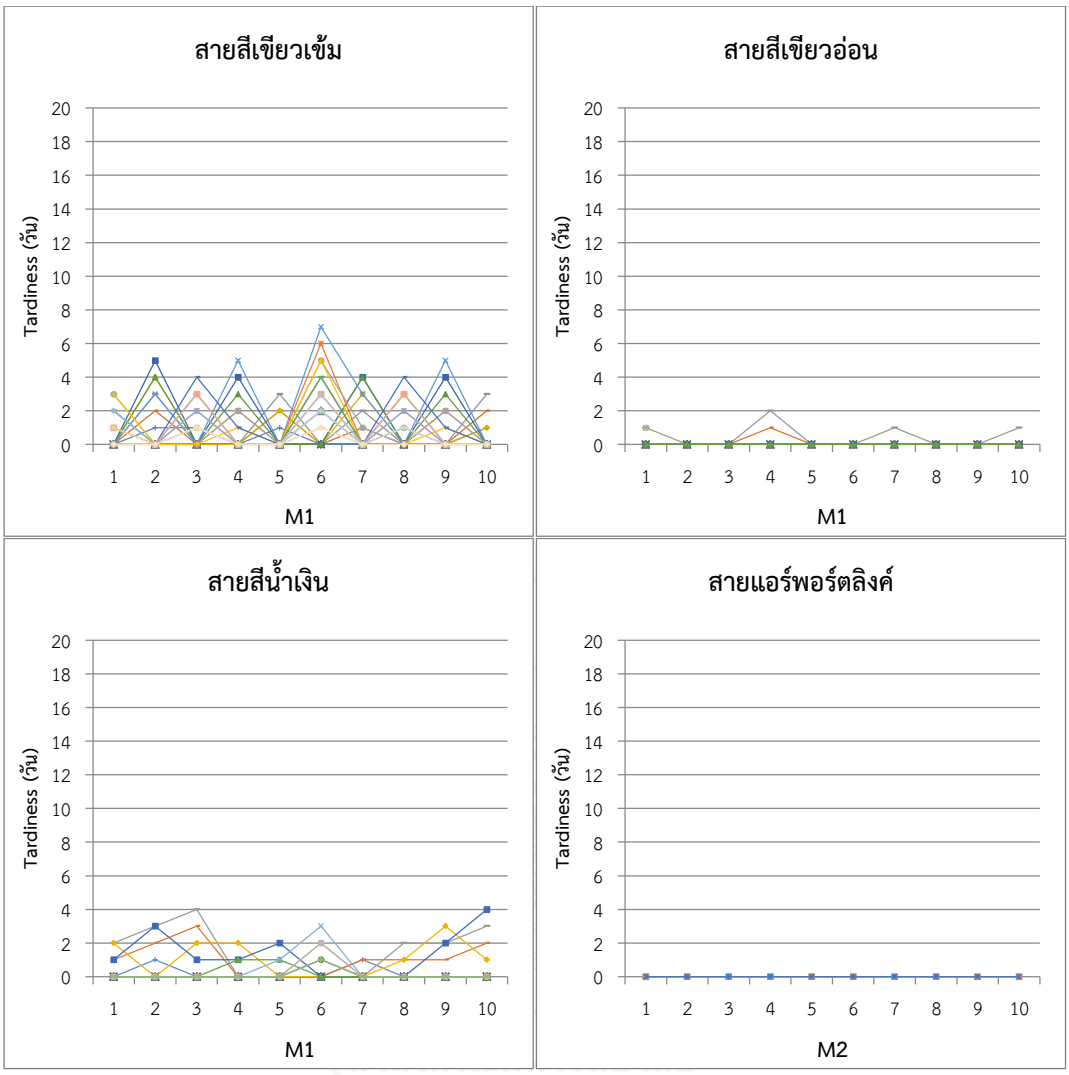
5.2.1. ความล่าช้าของการเข้าทำงานซ่อมบำรุง

รถไฟฟ้าต้องเข้ารับการทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันเพื่อป้องกันการเกิดความเสียหายที่ไม่คาดคิดขึ้นซึ่งอาจเป็นสาเหตุนำไปสู่การเกิดอุบัติเหตุได้ หรืออาจจะไม่สามารถใช้งานได้จนทำให้กระทบต่อการให้บริการ ยิ่งรถไฟฟ้าเข้ารับการทำงานซ่อมบำรุงช้า ความเสี่ยงของการเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวก็ยิ่งสูงขึ้น เพราะฉะนั้นรถไฟฟ้าจะต้องไม่เข้ารับการทำงานซ่อมบำรุงล่าช้ากว่ากำหนดจนเกินไป ดังนั้นความล่าช้าในการเข้าทำงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน (tardiness) ของจากการจัดตารางการใช้งานและซ่อมบำรุงจึงถูกนำมาพิจารณา โดยทำการพิจารณาการทำงานซ่อมบำรุง 10 ครั้งเพื่อดูแนวโน้มของความล่าช้าที่เกิดขึ้นของโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบัน พบว่ามีเพียงงานซ่อมบำรุง M1 ที่เกิดความล่าช้าในการเข้าทำงานซ่อมบำรุงขึ้น ส่วนงานซ่อมบำรุง M2 และ M3 ไม่เกิดความล่าช้าในการเข้าทำงานทั้งการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุลและไม่สมดุลในทุกโครงการรถไฟฟ้าที่พิจารณา



รูป 16 กราฟความล่าช้า (กม.) ในการเข้าซ่อมบำรุงงาน M1 จากการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุลของโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบัน

Chulalongkorn University



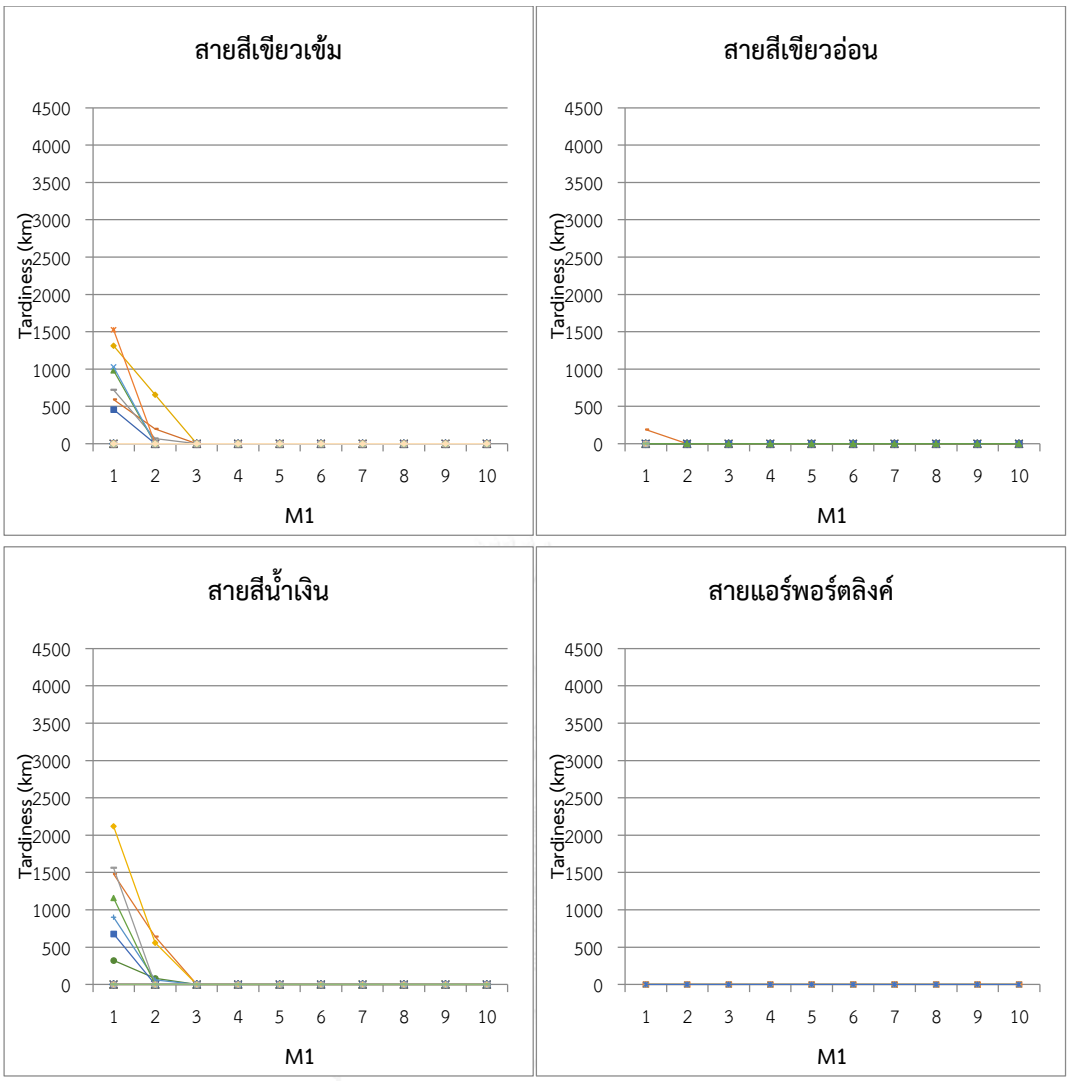
รูป 17 กราฟความล่าช้า (วัน) ในการเข้าซ่อมบำรุงงาน M1 จากการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุลของโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบัน

จากรูป 16 และ รูป 17 แสดงความล่าช้าในการเข้าทำงานซ่อมบำรุงกลุ่ม M1 ที่เกิดจากการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุลของโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบัน จะเห็นว่าในโครงการรถไฟฟ้าสายสีเขียวเข้ม สายสีเขียวอ่อน และสายสีน้ำเงินมีการเกิดความล่าช้าขึ้น โดยรถไฟฟ้าสายสีเขียวเข้มที่มีจำนวนรถไฟฟ้ามากที่สุดจะเกิดความล่าช้ามากที่สุด ทั้งจำนวนครั้งที่เกิดความล่าช้าขึ้นจากจำนวนการทำงานซ่อมบำรุงทั้งหมด จำนวนระยะทางที่รถไฟฟ้าถูกใช้งานเกินกำหนดมากที่สุด (กิโลเมตร) และจำนวนรถไฟฟ้าที่เข้าทำงานซ่อมบำรุงล่าช้าในแต่ละครั้ง โดยรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน และสายสีเขียวอ่อนที่มีจำนวนรถไฟฟ้ารองลงมามีการเกิดความล่าช้าของการ

เข้าทำงานซ่อมบำรุงรองลงมา ส่วนโครงการรถไฟฟ้าสายแอร์พอร์ตลิงค์ที่มีจำนวนรถไฟฟ้าน้อยที่สุด ไม่มีรถไฟฟ้าขบวนใดเกิดความล่าช้าในการเข้าทำงานซ่อมบำรุงเลย จะเห็นว่าจำนวนรถไฟฟ้ามีผลโดยตรงต่อการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุล เนื่องจากการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุลจะทำให้รถไฟฟ้าแต่ละขบวนมีระยะทางสะสมที่ใกล้เคียงกัน ทำให้รถไฟฟ้าแต่ละขบวนครบกำหนดการทำงานซ่อมบำรุงพร้อมกัน เมื่อศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าไม่สามารถซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าได้พร้อมกันหลายขบวน ทำให้รถไฟฟ้าต้องถูกใช้งานไปเรื่อยๆ จนกว่าจะถึงเวลาว่างที่สามารถเข้าทำงานซ่อมบำรุงได้ ดังนั้นยิ่งมีรถไฟฟ้าจำนวนมากก็จะต้องรอคิวการทำงานซ่อมบำรุงนาน ส่งผลให้ความล่าช้ามีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย

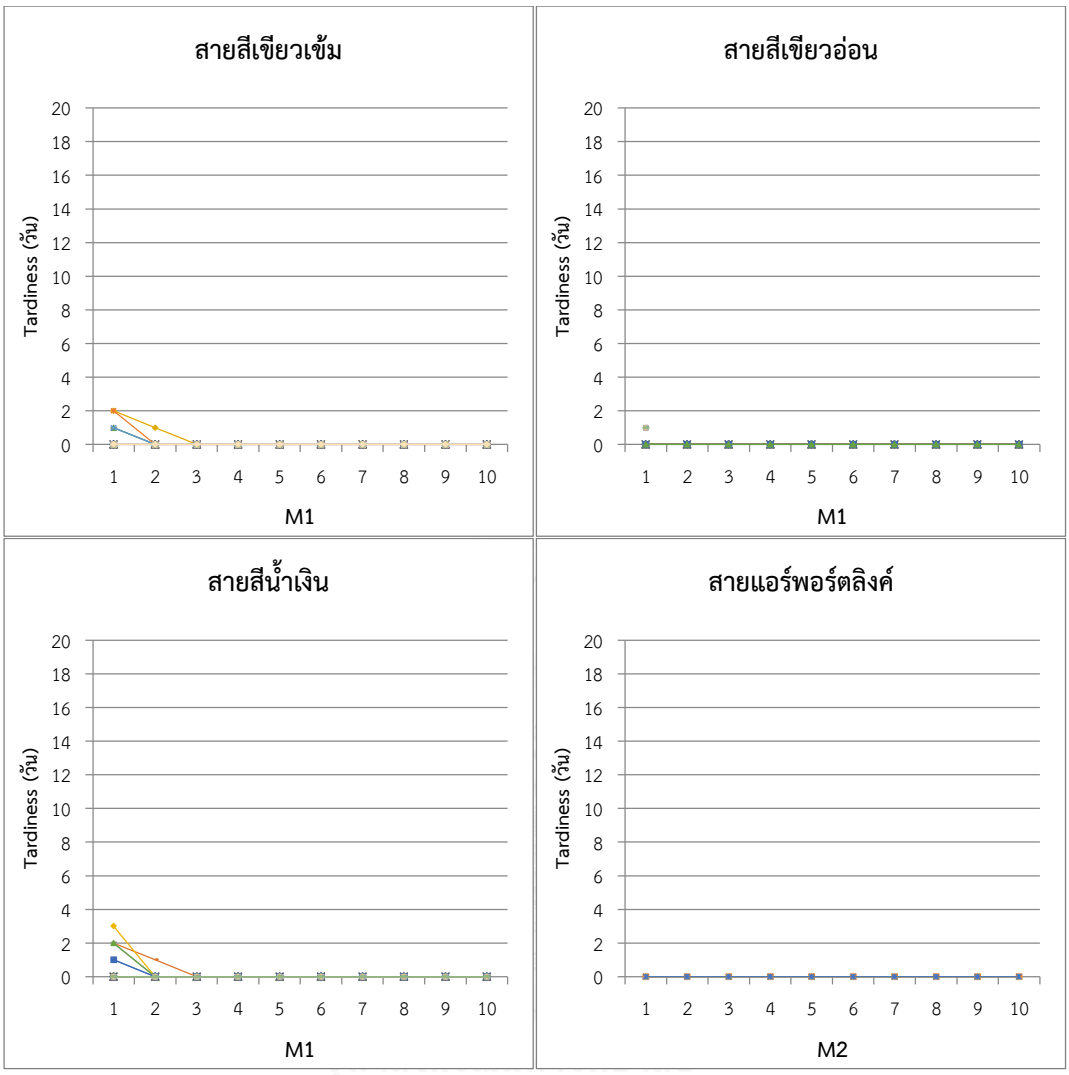
เมื่อพิจารณาจำนวนวันที่ล่าช้าในการทำงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าจากกำหนดการเข้าซ่อมบำรุงที่เร็วที่สุดที่ยอมรับได้ พบว่าทุกโครงการรถไฟฟ้ามีการทำงาน M1 ช้ากว่ากำหนดการ สำหรับโครงการรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์ที่ไม่เกิดความล่าช้าจากการทำงาน M1 ก็มีการเข้าทำงานซ่อมบำรุงช้ากว่ากำหนดเช่นกัน แต่ยังอยู่ในเกณฑ์ที่รับได้ คือรถไฟฟ้าบางขบวนไม่ได้ทำงานซ่อมบำรุงทันทีที่มีระยะทางสะสมครบกำหนด โดยได้รับการซ่อมบำรุงในวันถัดมาซึ่งยังอยู่ในขอบเขตที่รับได้

ส่วนความล่าช้าจากการจัดตารางการใช้งาน M1 ที่เกิดจากการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบไม่สมดุลของโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบันแสดงในรูป 18 และรูป 19 จะเห็นว่าความล่าช้าที่มากที่สุดจะเกิดขึ้นในการทำงานซ่อมบำรุงครั้งแรก จากนั้นมีแนวโน้มลดลงจนเป็นศูนย์ในที่สุด เนื่องจากในตอนแรกรถไฟฟ้าทุกขบวนมีระยะทางเริ่มต้นเท่ากัน เมื่อครบกำหนดการทำงานซ่อมบำรุงในครั้งแรกรถไฟฟ้าบางขบวนยังมีระยะทางสะสมใกล้เคียงกันอยู่ ทำให้เกิดความต้องการซ่อมบำรุงใกล้เคียงกัน จะเห็นได้จากความล่าช้าที่มากที่สุดที่เกิดขึ้นในรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินมีค่ามากกว่ารถไฟฟ้าสายสีเขียวเข้มถึงแม้ว่าจะมีจำนวนรถไฟฟ้าน้อยกว่าก็ตาม เนื่องจากกว่าเส้นทางเดินรถแต่ละเส้นทางของรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินมีระยะทางวิ่งที่ใกล้เคียงกันมากกว่าของรถไฟฟ้าสายสีเขียวเข้ม ดังนั้นถึงแม้จะไม่ได้สลับเส้นทางการเดินรถก็ยังทำให้รถไฟฟ้าแต่ละขบวนมีระยะทางสะสมที่ใกล้เคียงกัน ทำให้ในช่วงแรกๆ รถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินเกิดความต้องการซ่อมบำรุงขึ้นพร้อมกันมากกว่า แต่หลังจากถูกใช้งานไปเรื่อยๆ รถไฟฟ้าแต่ละขบวนจะมีระยะทางสะสมไม่เท่ากัน ทำให้กระจายการเกิดความต้องการซ่อมบำรุงขึ้น หรือถ้าเกิดขึ้นพร้อมกันก็ไม่ทุกขบวนจึงไม่ต้องรอคิวเข้าทำงานซ่อมบำรุงนานเท่าการจัดตารางการทำงานแบบสมดุล ทำให้ความล่าช้าจากการทำงานซ่อมบำรุงมีค่าน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการจัดตารางการทำงานแบบสมดุล



Chulalongkorn University

รูป 18 กราฟความล่าช้า (กม.) ในการเข้าซ่อมบำรุงงาน M1 จากการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบไม่สมดุลของโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบัน



รูป 19 กราฟความล่าช้า (วัน) ในการเข้าซ่อมบำรุงงาน M1 จากการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบไม่สมดุลของโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบัน

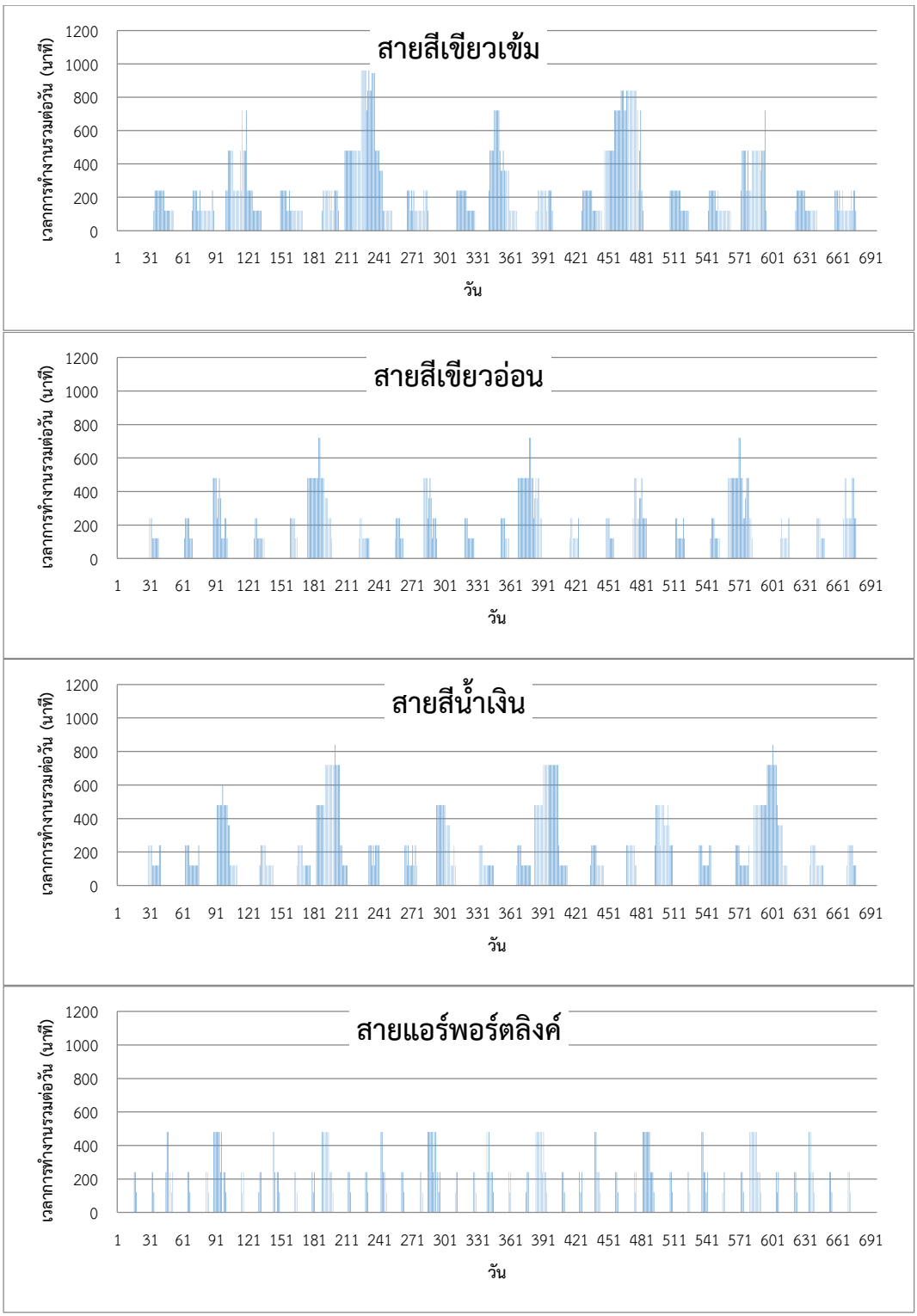
ทั้งนี้การกำหนดระยะเผื่อที่ยอมรับได้เป็นสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ของกำหนดระยะทางการทำงานซ่อมบำรุง เช่น 10% ของระยะทางที่กำหนดจะทำให้งานซ่อมบำรุงที่มีกำหนดระยะทางการทำงานซ่อมบำรุงที่ยาวกว่าจะมีโอกาสเข้าทำงานซ่อมบำรุงในขอบเขตที่ยอมรับได้มากกว่า เช่น งานซ่อมบำรุง M1 ซึ่งมีกำหนดระยะทางการซ่อมบำรุง 15,000 กิโลเมตรจะสามารถเข้าทำงานซ่อมบำรุงได้ล่วงหน้า 1,500 กิโลเมตร ในขณะที่งานซ่อมบำรุง M2 ซึ่งมีกำหนดระยะทาง 45,000 กิโลเมตรจะสามารถเข้าทำงานซ่อมบำรุงได้ล่วงหน้า 4,500 กิโลเมตร ในทำนองเดียวกันงานซ่อมบำรุงที่มีกำหนดระยะทางการซ่อมบำรุงยาวกว่าจะมีระยะเผื่อที่รถไฟฟ้าสามารถเข้าทำงานซ่อมบำรุงได้หลังกำหนด

มากกว่าเมื่อมีเปอร์เซ็นต์ของกำหนดระยะทางการทำงานซ่อมบำรุงที่ยอมรับได้เท่ากัน เมื่อสามารถเข้าทำงานซ่อมบำรุงได้ก่อนและสามารถทำงานซ่อมบำรุงหลังกำหนดได้มากกว่าก็จะมีโอกาสที่รถไฟฟ้าจะถูกใช้งานจนเกินระยะทางเผื่อที่ยอมรับได้น้อยลง ดังนั้นงานซ่อมบำรุงที่มีกำหนดการเข้าทำงานซ่อมบำรุงที่ยาวจะเกิดความล่าช้าของการเข้าทำงานซ่อมบำรุงน้อยกว่า งานซ่อมบำรุง M2 และ M3 จะไม่มีความล่าช้าของการซ่อมบำรุงที่เกิดขอบเขตที่ยอมรับได้

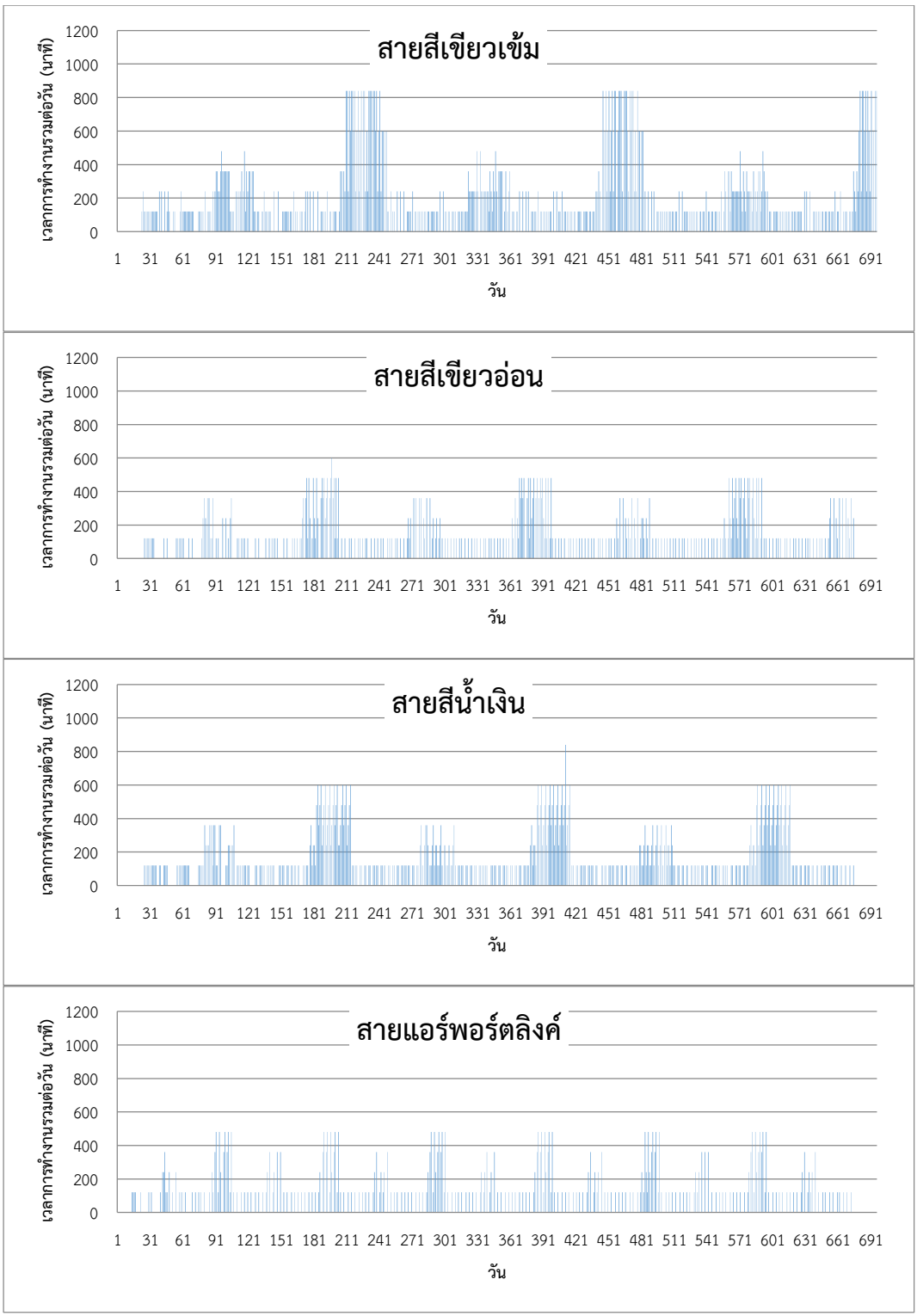
5.2.2. การใช้งานของศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า

ศูนย์ซ่อมบำรุงเป็นสถานที่ที่มีอุปกรณ์และเครื่องจักรสำหรับทำงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า พิจารณาการเข้าทำงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าในศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าของโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบันจากการจัดตารางการใช้งานแบบสมดุลและไม่สมดุลเพื่อวิเคราะห์ลักษณะการใช้งานศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า ในรูป 20 และรูป 21 แสดงชั่วโมงการทำงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าในศูนย์ซ่อมบำรุงรวมต่อวันของการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุลและไม่สมดุลตามลำดับ จะเห็นว่ามีการกระจายตารางการใช้ศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าต่างกัน โดยการจัดตารางการใช้งานแบบสมดุลจะเกิดความต้องการซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าพร้อมๆ กัน ทำให้ต้องทำงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าติดกันเป็นช่วงๆ และต้องเร่งทำงานจนเต็มเวลาว่างที่จะสามารถทำงานได้ โดยจะเห็นว่ามีชั่วโมงรวมในการทำงานต่อวันสูงกว่าการจัดตารางการใช้งานแบบไม่สมดุล การใช้งานศูนย์ซ่อมบำรุงที่เป็นช่วงยาวติดต่อกัน แล้วว่างเป็นช่วงยาวสลับกันจะทำให้ง่ายต่อการจัดเตรียมเครื่องจักรและอุปกรณ์สำหรับทำงานซ่อมบำรุง เพราะมีการทำงานต่อเนื่องกัน จึงไม่ต้องเสียเวลาจัดตั้งเครื่องจักรหลายครั้ง แต่การทำงานติดต่อกันเป็นช่วงเวลานานอาจจะทำให้พนักงานเกิดความล้าสะสมจากการทำงานได้ และถ้าเครื่องจักรสำหรับทำงานซ่อมบำรุงเกิดเสียจนไม่สามารถทำงานได้ขึ้นมา จะทำให้เกิดความล่าช้าในการทำงานขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ในส่วนของการจัดตารางการใช้งานแบบไม่สมดุลจะมีความต้องการซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าเกิดขึ้นไม่พร้อมกัน ศูนย์ซ่อมบำรุงจึงจะถูกใช้งานตามความต้องการที่เกิดขึ้น ทำให้เกิดการกระจายการใช้งานศูนย์ซ่อมบำรุงออกไปตามความต้องการซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าที่จะเกิดขึ้นตามตารางการใช้งานรถไฟฟ้า เนื่องจากรถไฟฟ้าเกิดความต้องการซ่อมบำรุงทีละขบวน งานซ่อมบำรุงที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาหนึ่งๆ ของการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบไม่สมดุลจึงอาจจะไม่สูงและไม่ต้องเร่งการทำงานเท่าการจัดตารางการใช้งานแบบสมดุล ทำให้ไม่ต้องเคร่งเครียดและกังวลในกรณีที่ทำงานซ่อมบำรุงจะเสร็จไม่ทันกำหนด อีกทั้งชั่วโมงการทำงานต่อวันที่น้อยกว่าจะช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการทำงานล่วงเวลาอีกด้วย



รูป 20 ชั่วโมงการใช้งานศูนย์ซ่อมบำรุงเมื่อจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุลของโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วในประเทศไทย



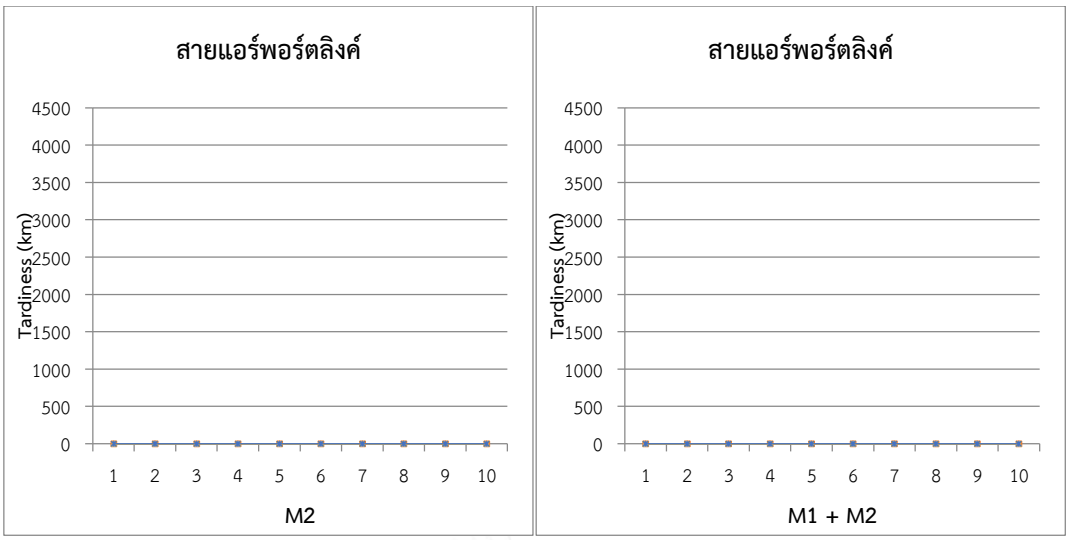
รูป 21 ชั่วโมงการใช้งานศูนย์ซ่อมบำรุงเมื่อจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบไม่สมดุลของโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วในประเทศไทย

เมื่อพิจารณาภาพรวมของการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุลและแบบไม่สมดุลในแง่มุมของความล่าช้าในการเข้าทำงานซ่อมบำรุงและการใช้งานศูนย์ซ่อมบำรุงแล้ว การจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบไม่สมดุลจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า เพราะความล่าช้าที่เกิดขึ้นอาจจะส่งผลกระทบอย่างมากต่อการให้บริการเดินรถไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นการเสียชื่อเสียงและเสียโอกาสหากรถไฟฟ้าเสียจนไม่สามารถให้บริการได้ หรืออาจจะรุนแรงถึงขั้นเกิดอุบัติเหตุ อีกทั้งการใช้งานศูนย์ซ่อมบำรุงมีความง่ายต่อการบริหารจัดการการใช้งานศูนย์ซ่อมบำรุงมากกว่าเพราะว่ามีการใช้งานศูนย์ซ่อมบำรุงอย่างสม่ำเสมอมากกว่า ทำให้ง่ายต่อการจัดการทรัพยากรด้านแรงงาน เนื่องจากมีความต้องการใช้งานอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่องทั้งในเรื่องวันทำงาน และชั่วโมงการทำงานต่อวัน

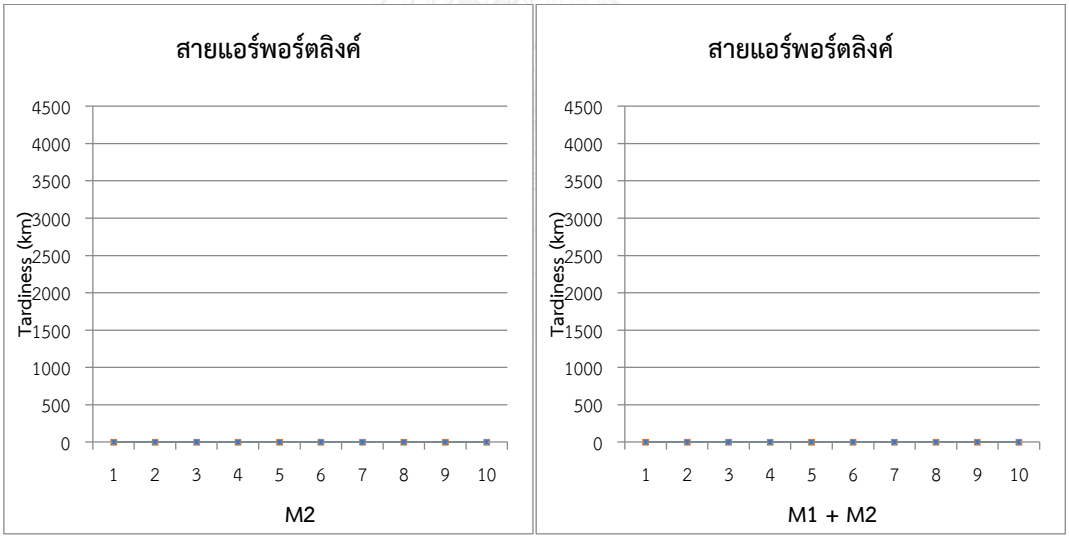
5.3. การรวมงานซ่อมบำรุง

เนื่องจากโครงการรถไฟฟ้าส่วนใหญ่มีเวลาหยุดพักช่วงกลางวันและกลางคืนเพียงพอต่อการทำงานซ่อมบำรุง M1 และ M2 พร้อมกัน จึงพิจารณาการทำงานซ่อมบำรุง M1 และ M2 พร้อมกันเพื่อความสะดวกในการนำรถไฟฟ้าเข้าทำงานซ่อมบำรุง และอาจจะสามารถลดเวลาการทำงานซ่อมบำรุงลงได้

เมื่อพิจารณาการทำงานซ่อมบำรุง M2 พร้อมกับงานซ่อมบำรุง M1 โดยงาน M2 จะทำเมื่อรถไฟฟ้าที่เข้าทำงาน M1 มีครบกำหนดการทำงาน M2 พอดีเช่นกัน จากรูป 22 และรูป 23 แสดงการเปรียบเทียบความล่าช้าที่เกิดจากการทำงานซ่อมบำรุงระหว่างการทำงานซ่อมบำรุง M2 อย่างอิสระและการทำงาน M1 และ M2 พร้อมกันของการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุลและแบบไม่สมดุลตามลำดับของโครงการรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์ พบว่าการทำงาน M2 อย่างอิสระกับการทำงาน M1 พร้อม M2 ของการจัดตารางทั้งสองแบบไม่เกิดความล่าช้าที่เกินขอบเขตที่ยอมรับได้ แต่เมื่อพิจารณาการเข้าทำงานซ่อมบำรุงตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ที่เร็วที่สุดที่ยอมรับได้จะพบว่างาน M2 ที่ต้องทำพร้อมงาน M1 จะถูกทำช้ากว่ากำหนดที่สามารถทำได้มากกว่าการทำงาน M2 อย่างอิสระ แต่อย่างไรก็ตามยังคงอยู่ในขอบเขตที่สามารถยอมรับได้ โดยการจัดตารางการทำงานแบบไม่สมดุลจะทำงาน M2 ช้ากว่ากำหนด (วัน) น้อยกว่าการจัดตารางการใช้งานแบบสมดุล

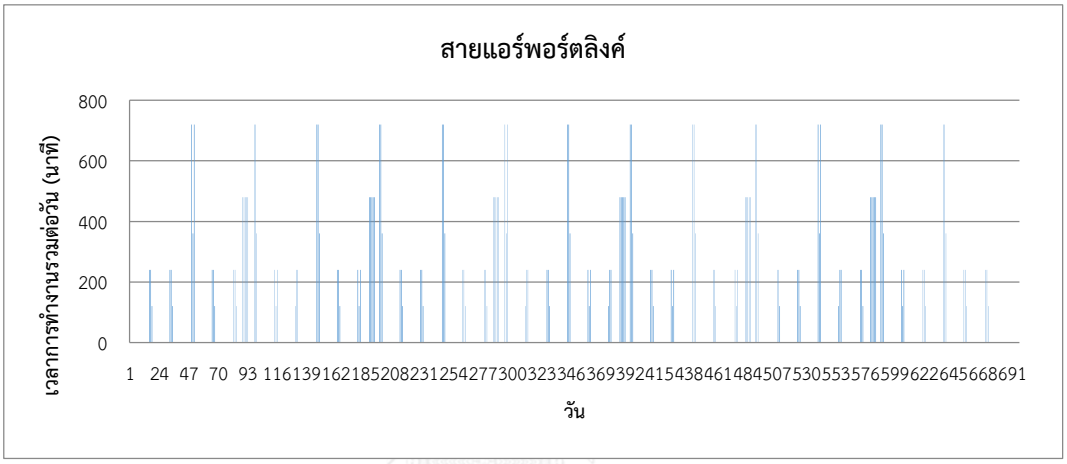


รูป 22 กราฟเปรียบเทียบความล่าช้าการทำงาน M2 และการรวมงาน M1 กับ M2 เมื่อจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุล

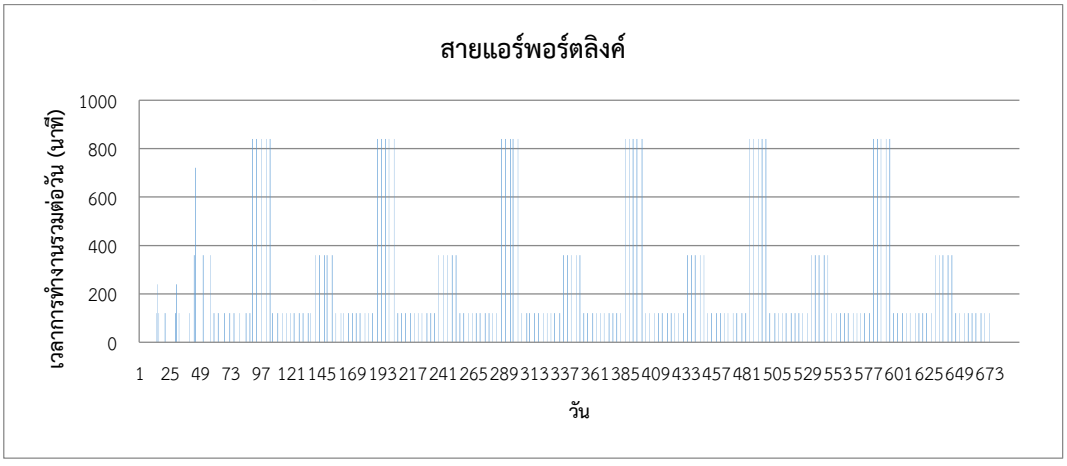


รูป 23 กราฟเปรียบเทียบความล่าช้าการทำงาน M2 และการรวมงาน M1 กับ M2 เมื่อจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบไม่สมดุล

การใช้งานศูนย์ซ่อมบำรุงเมื่อพิจารณาการทำงาน M1 และ M2 พร้อมกันของการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุลและแบบไม่สมดุลดังรูป 24 และรูป 25 ตามลำดับ พบว่าจะมีชั่วโมงการทำงานรวมต่อวันที่สูงที่สุดสูงกว่าการทำงาน M2 อย่างอิสระ แต่จะมีจำนวนวันในการทำงานน้อยกว่า การทำงานซ่อมบำรุงจากการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุลยังคงมีลักษณะติดกันเป็นช่วงๆ ในขณะที่การทำงานซ่อมบำรุงจากการจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบไม่สมดุลกระจายการทำงานซ่อมบำรุงออกไป



รูป 24 ชั่วโมงการใช้งานศูนย์ซ่อมบำรุงเมื่อพิจารณาการทำงาน M1 และ M2 พร้อมกันของจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบสมดุล



รูป 25 ชั่วโมงการใช้งานศูนย์ซ่อมบำรุงเมื่อพิจารณาการทำงาน M1 และ M2 พร้อมกันของจัดตารางการใช้งานรถไฟฟ้าแบบไม่สมดุล

5.4. ปัญหาและอุปสรรค

ในการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้พบปัญหาและอุปสรรคระหว่างการทำงานดังนี้

1) ตารางเดินรถของโครงการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนไม่ได้กำหนดเวลาการให้บริการที่ชัดเจน ทำให้ต้องสร้างตารางเดินรถขึ้นมาบนสมมติฐานเพื่อใช้ในการทำงาน จึงอาจจะเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น
2) ข้อมูลเกี่ยวกับโครงการรถไฟฟ้าในอนาคตที่สามารถหาได้อาจจะไม่ใช่ข้อมูลที่ได้รับการปรับปรุงให้เป็นปัจจุบัน
3) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีน้อยและเก่า อีกทั้งส่วนใหญ่จะกล่าวถึงรถไฟระหว่างเมืองที่มีลักษณะแตกต่างจากรถไฟฟ้าขนส่งมวลซึ่งเป็นประเภทรถไฟฟ้าส่วนใหญ่ของประเทศไทย
4) ไม่สามารถใช้หาคำตอบของการจัดตารางจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แม้จะลดขนาดของปัญหาลงก็ตาม ทำให้วิธีทางฮิวริสติกที่คิดค้นขึ้นไม่มีตัวอย่างเปรียบเทียบ

5.5. ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อเสนอแนะดังนี้

1) เนื่องจากจำนวนรถไฟฟ้าขึ้นอยู่กับระยะทางและเฮดเวย์ของการให้บริการเดินรถ การวางแผนระยะทางและความถี่ในการให้บริการเดินรถที่เหมาะสมจะช่วยให้สามารถใช้รถไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น แต่อาจจะกระทบต่อความต้องการของผู้โดยสาร
2) เนื่องจากศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าเป็นทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด ซึ่งอาจจะไม่ได้ถูกใช้งานในบางวัน การแบ่งปันการใช้งานศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้าหลายสายจะช่วยให้สามารถใช้งานศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น
3) เนื่องจากการจัดเส้นทางการเดินรถสามารถปรับปรุงเวลาหยุดพักทั้งช่วงเวลากลางวันและกลางคืนได้อย่างหลากหลาย การปรับลดเวลาหยุดพักช่วงกลางวันให้ลดลงเพื่อให้มีเวลาพักช่วงกลางคืนมากขึ้นอาจจะทำให้สามารถทำงานซ่อมบำรุงได้มากขึ้น
4) วิธีการที่นำเสนอนี้เหมาะสำหรับการวางแผนการจัดการรถไฟฟ้าสำหรับโครงการรถไฟฟ้าในอนาคต

รายการอ้างอิง

[1] C. EN50126, "Railway application–The specification and demonstration of dependability, reliability, availability, maintainability and safety (RAMS)," ed: March, 2000.

[2] ว. ธรรมาภรณ์พิลาศ, "การศึกษาและเปรียบเทียบการดำเนินงานของศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า ," กรุงเทพมหานคร2558.

[3] สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, "โครงการศึกษาปรับแผนแม่บทขนส่งมวลชนทางรางในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล: แผนแม่บทการพัฒนาโครงข่ายระบบขนส่งมวลชนสายหลักและสายรองในกรุงเทพฯ และปริมณฑล," กรุงเทพมหานคร2553.

[4] K. R. Mobley, *Impact of Maintenance*, 2 ed.: Elsevier Inc., 2004.

[5] G. Budai, D. Huisman, and R. Dekker, "Scheduling preventive railway maintenance activities," *Journal of the Operational Research Society,* vol. 57, pp. 1035-1044, 2006.

[6] W. L. Winston, *An Introduction to Model-Building*, 4 ed., 2004.

[7] W. L. Winston, *Network Models*, 4 ed., 2004.

[8] ป. ชุติมา, การประยุกต์เทคนิคการจัดตารางในอุตสาหกรรม กรุงเทมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

[9] ป. ชุติมา, เทคนิคการจัดตารางการดำเนินงาน 2ed. กรุงเทมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.

[10] A. Schrijver, "Minimum circulation of railway stock," *Cwi Quarterly,* vol. 6, pp. 205-217, 1993.

[11] D. Canca, M. Sabido, and E. Barrena, "A Rolling Stock Circulation Model for Railway Rapid Transit Systems," *Transportation Research Procedia,* vol. 3, pp. 680-689, 2014.

[12] A. Alfieri, R. Groot, L. Kroon, and A. Schrijver, "Efficient circulation of railway rolling stock," *Transportation Science,* vol. 40, pp. 378-391, 2006.

[13] P.-J. Fioole, L. Kroon, G. Maróti, and A. Schrijver, "A rolling stock circulation model for combining and splitting of passenger trains," *European Journal of Operational Research,* vol. 174, pp. 1281-1297, 2006.

[14] M. Peeters and L. Kroon, "Circulation of railway rolling stock: a branch-and-price approach," *Computers & operations research,* vol. 35, pp. 538-556, 2008.

[15] H. Go, J.-S. Kim, and D.-H. Lee, "Operation and preventive maintenance scheduling for containerships: mathematical model and solution algorithm," *European Journal of Operational Research,* vol. 229, pp. 626-636, 2013.

[16] J.-F. Cordeau, G. Desaulniers, N. Lingaya, F. Soumis, and J. Desrosiers, "Simultaneous locomotive and car assignment at VIA Rail Canada," *Transportation Research Part B: Methodological,* vol. 35, pp. 767-787, 2001.

[17] G. Maróti and L. Kroon, "Maintenance routing for train units: The interchange model," *Computers & Operations Research,* vol. 34, pp. 1121-1140, 2007.

[18] G. L. Giacco, D. Carillo, A. D'Ariano, and D. Pacciarelli, "Short-term rolling stock rostering and maintenance scheduling optimization," *Ingegneria Ferroviaria,* vol. 1, pp. 39-52, 2014.

[19] G. L. Giacco, D. Carillo, A. D'Ariano, D. Pacciarelli, and Á. G. Marín, "Short-term rail rolling stock rostering and maintenance scheduling," *Transportation Research Procedia,* vol. 3, pp. 651-659, 2014.

[20] G. L. Giacco, A. D'Ariano, and D. Pacciarelli, "Mixed-integer linear-programming formulations for a railway rolling stock circulation problem," in *Proceedings of the 12th International Conference on Advanced Systems for Public Transport*, 2012.

[21] G. L. Giacco, A. D'Ariano, and D. Pacciarelli, "Rolling stock rostering optimization under maintenance constraints," *Journal of Intelligent Transportation Systems,* vol. 18, pp. 95-105, 2014.

[22] J. v. Z.-d. Fokkert, D. den Hertog, F. v. d. Berg, and J. Verhoeven, "The Netherlands schedules track maintenance to improve track workers' safety," *Interfaces,* vol. 37, pp. 133-142, 2007.

[23] J. Díaz-Ramírez, J. I. Huertas, and F. Trigos, "Aircraft maintenance, routing, and crew scheduling planning for airlines with a single fleet and a single

Chulalongkorn University

maintenance and crew base," *Computers & Industrial Engineering,* vol. 75, pp. 68-78, 2014.

[24] Y.-C. Lai, D.-C. Fan, and K.-L. Huang, "Optimizing rolling stock assignment and maintenance plan for passenger railway operations," *Computers & Industrial Engineering,* vol. 85, pp. 284-295, 2015.

[25] F. Peng, Y. Ouyang, and K. Somani, "Optimal routing and scheduling of periodic inspections in large-scale railroad networks," *Journal of Rail Transport Planning & Management,* vol. 3, pp. 163-171, 2013.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางเดินรถไฟฟ้าและความถี่ของการเดินรถ

รถไฟฟ้าบีทีเอส

เวลาให้บริการ (วันธรรมดา)

	สายสุขุมวิท		สายสีลม	
สถานีต้นทาง	หมอชิต	แบริ่ง	สนามกีฬาฯ	บางหว้า
สถานีปลายทาง	แบริ่ง	หมอชิต	บางหว้า	สนามกีฬาฯ
รถไฟขบวนแรก	5.15	5.15	5.30	5.30
รถไฟขบวนสุดท้าย	24.12	24.00	24.24	00.00

ความถี่ของการเดินรถ (วันธรรมดา)

ช่วงเวลา (น.)	เวลาระหว่างขบวนโดยประมาณ	
	สายสุขุมวิท (นาที)	สายสีลม (นาที)
06.00 – 07.00	5.00	6.00
07.00 – 09.00	2.50	4.50
09.00 – 09.30	3.35	6.00
09.30 – 16.00	5.55	6.00
16.00 – 16.30	4.25	6.00
16.30 – 17.00	3.00	6.00
17.00 – 19.00	3.00	4.50
19.00 – 20.00	3.35	4.50
20.00 – 21.00	4.25	6.00
21.00 – 22.00	6.00	6.00
22.00 – 24.00	8.00	8.00

(http://www.bts.co.th/customer/th/pdf/ServiceTimetable.pdf : สืบค้นวันที่ 5 พ.ย. 2559)

<u>รถไฟฟ้าเอ็มอาร์ที</u>

เวลาให้บริการ (วันธรรมดา)

สถานีต้นทาง	บางซื่อ	หัวลำโพง
สถานีปลายทาง	หัวลำโพง	บางซื่อ
รถไฟขบวนแรก	6.00	6.00
รถไฟขบวนสุดท้าย	23.50	23.50

ความถี่ของการเดินรถ (วันธรรมดา)

ช่วงเวลา (น.)	เวลาระหว่างขบวนโดยประมาณ
06.00 – 09.00	4.00
09.00 – 16.30	6.14
16.30 – 19.30	3.52
19.30 – 21.00	5.16
21.00 – 24.00	7.22

(http://www.deesudsud.com/ตารางเวลา- รถไฟฟ้าใต้ดิน/ : สืบค้นวันที่ 4 พ.ย. 2559)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

<u>รถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์</u>

ตารางเดินรถไฟฟ้าสายซิตี้ไลน์ (วันธรรมดา)

สุวรรณภูมิ – พญาไท						พญาไท – สุวรรณภูมิ				
นาที					ชม.	นาที				
				56	5					
08	20	32	44	56	6	02	14	26	38	50
08	20	32	44	56	7	02	14	26	38	50
08	20	32	44	56	8	02	14	26	38	50
	08	21	32	44	9	02	14	31	46	
	02	17	32	47	10	02	17	32	47	
	02	17	32	47	11	02	17	32	47	
	02	17	32	47	12	02	17	32	47	
	02	17	32	47	13	02	17	32	47	
	02	17	32	47	14	02	17	32	47	
	02	17	32	50	15	02	17	32	47	
02	17	32	44	56	16	02	14	26	38	50
08	20	32	44	56	17	02	14	26	38	50
08	20	32	44	56	18	02	14	26	38	50
08	20	32	44	56	19	02	14	26	38	50
	08	22	32	44	20	02	14	32	46	
	02	17	32	47	21	02	17	32	47	
	02	17	32	47	22	02	17	32	47	
	02	17	32	47	23	02	17	32	47	
		02	15	30	24	02				

(http://www.srtet.co.th/th/11_time_table/lastest/Timetable_PTH1.pdf : สืบค้นวันที่ 5 พ.ย. 2559

http://www.srtet.co.th/th/11_time_table/lastest/Timetable_SVB1.pdf : สืบค้นวันที่ 5 พ.ย. 2559)

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวยุวรัตน์ ศรีประพฤทธิ์ชัย เกิดเมื่อวันที่ 8 ตุลาคม พ.ศ. 2534 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญาตรีจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ เมื่อปีพ.ศ. 2557 เคยเข้ารับการฝึกงานที่บริษัท ปูนซิเมนต์ไทย (แก่งคอย) จำกัด ปัจจุบันกำลังศึกษาอยู่ในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University