การประมาณการเครื่องจักรสำหรับงานซ่อมบำรุงใหญ่ของรถไฟฟ้า

นางสาวรินรดา จิราวรรณสถิตย์

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

Machine Estimation for Overhaul Maintenance of Rolling Stock

Miss Rinrada Jiravanstit

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	การประมาณการเครื่องจักรสำหรับงานซ่อมบำรุงใหญ่ของรถไฟฟ้า
โดย	นางสาวรินรดา จิราวรรณสถิตย์
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

รินรดา จิราวรรณสถิตย์ : การประมาณการเครื่องจักรสำหรับงานซ่อมบำรุงใหญ่ของรถไฟฟ้า (Machine Estimation for Overhaul Maintenance of Rolling Stock) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ, 126 หน้า.

การซ่อมบำรุงคือการบำรุงรักษาชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ต่างๆ ที่ชำรุดเสียหายให้สามารถใช้งานได้ และปลอดภัยในการใช้งาน การซ่อมบำรุงใหญ่เป็นการซ่อมบำรุงโดยมีการถอดประกอบชิ้นส่วนเพื่อซ่อมบำรุงหรือเปลี่ยนชิ้นส่วนเพื่อป้องกันการเกิดการชำรุดเสียหาย ซึ่งมีระยะห่างระหว่างการซ่อมบำรุงมากกว่า 1 ปี ถึงแม้ว่าการซ่อมบำรุงมีค่าใช้จ่ายสูง แต่เป็นส่วนที่ขาดไม่ได้ ดังนั้นการลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงจึงเป็นส่วนสำคัญ ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงส่วนใหญ่คือค่าใช้จ่ายของเครื่องจักร ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาจำนวนทรัพยากรที่น้อยที่สุดที่จำเป็นในการซ่อมบำรุงใหญ่ของรถไฟฟ้า โดยใช้การวางแผนการซ่อมบำรุงการรวมงานซ่อมบำรุง และการเกลี่ยงานซ่อมบำรุง

จำนวนเครื่องจักรในการซ่อมบำรุงจะขึ้นอยู่กับปริมาณงานซ่อมบำรุง และจำนวนรถไฟฟ้าในงานวิจัยนี้จะพิจารณารถไฟฟ้าทั้งหมด 8 โครงการ และงานซ่อมบำรุงใหญ่ทั้งหมด 12 งาน ซึ่งสามารถแบบเป็น 5 กลุ่มคือ งานซ่อมบำรุงทุก 1 ปี 5 ปี 6 ปี 9 ปี และ 12 ปี การแก้ปัญหาจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่เนื่องจากระยะเวลาในการวางแผนยาว ทำให้ไม่สามารถหาผลเฉลยได้ภายในครั้งเดียว จึงต้องแบ่งปัญหาออกเป็นส่วนย่อยๆ โดยใช้หลักการวางแผนที่มีลักษณะยืดหยุ่นและปรับได้ หรือเรียกว่า การวางแผนก้าวหน้า จากการวิเคราะห์พบว่า เมื่อมีการรวมศูนย์ซ่อมบำรุงจำนวนเครื่องจักรที่ต้องใช้ทั้งหมดจะลดลง และเมื่อมีการขยายช่วงเวลาที่ยอมรับได้ในการซ่อมบำรุงจะทำให้จำนวนเครื่องจักรที่ใช้ลดลง ซึ่งถ้าหากเป็นการรวมศูนย์ซ่อมบำรุงใหญ่สำหรับ 8 โครงการต้องใช้เครื่องจักรรวมทั้งหมด 34 เครื่อง ภายใต้การขยายช่วงเวลาในการซ่อมบำรุงเท่ากับ 1/4 เท่าของระยะห่างการซ่อมบำรุง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2559

5770287321 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS: MAINTENANCE / MIXED INTEGER PROGRAMMING / SCHEDULING / ROLLING-STOCK

RINRADA JIRAVANSTIT: Machine Estimation for Overhaul Maintenance of Rolling Stock. ADVISOR: ASSOC. PROF. WIPAWEE THARMMAPHORNPHILAS, Ph.D., 126 pp.

Maintenance is a process associated with reconditioning of defective devices or parts, with purpose of resuming to its safe-to-operate state. Overhaul Maintenace, an infrequent maintenance approach, accentuates on disassemble and alter part to prevent plausible failure. It is time-based maintenance that has interval time equal to one year or more than one year. Maintenance massively costs, nonetheless, is indispensable. Hence, reduction of maintenance cost is thus far crucial especially in the perspective of machine cost. This research aspires to determine the minimum resource obligated for scheme of rolling stock overhaul by grouping the maintenance activities and arranging the maintenance activities with similar usability each period.

The number of machines is based on the amounts of maintenance work and the number of trains. This research focus on eight railway projects and twelve maintenance tasks which are divided into five groups of overhaul maintenance (every one year, five years, six years, nine years and twelve years). This problem uses mathematic model to analyze. However, this plan is a long-term plan, the model cannot solve this problem in single round. To find the solution, the model divides into sub problem by using rolling plan method. The analysis found that in maintenance depot for eight railway projects uses 34 machines for all types and each maintenance task has spread out 1/4 of interval time.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department: Industrial Engineering Student's Signature .....

Field of Study: Industrial Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงไม่สามารถสำเร็จสมบูรณ์ขึ้นมาได้ หากปราศจากความเมตตากรุณา และความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากรองศาสตราจารย์ ดร. วิภาวี ธรรมาภรณ์พินาศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เสียสละเวลาอันมีค่าให้ข้อมูล คำแนะนำ และแนวทางในการแก้ไขปัญหาในการทำวิจัย ตลอดจนให้แนวคิดในการทำงานและการดำเนินชีวิต ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งใจและสำนึกในความช่วยเหลือของอาจารย์เป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตรจารย์ ดร. ดาริชา สุธีวงศ์ ที่กรุณาให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบ, ผู้ช่วยศาสตรจารย์ดร.โอฬาร กิตติธีรพรชัยกรรมการสอบและ ดร. นันทชัย กานตะนันทะ กรรมการสอบภายนอกมหาวิทยาลัย ที่เสียสละเวลาพิจารณาวิทยานิพนธ์และชี้แนะแนวทางการพัฒนางานวิจัยให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนให้ความรู้ทางด้านวิชาการแก่ผู้เขียน และขอขอบพระคุณเจ้าของเอกสารและงานวิจัยทุกท่านตลอดจนผู้เขียนหนังสือที่ผู้เขียนได้ศึกษาค้นคว้าและนำมาอ้างอิงในการทำวิจัยจนกระทั่งงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ และผู้เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณนพปฎล สกุลสม ที่เสียสละเวลาให้ คำแนะนำ และแนวทางในการแก้ไขปัญหา ตลอดจนช่วยเหลือในด้านต่างๆด้วยดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัวที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ตลอดจนส่งเสริมการศึกษา และให้กำลังใจเป็นอย่างดี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฌ
สารบัญภาพ ..... ฎ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ที่มาและความสำคัญ 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 4
1.3 ขอบเขตและสมมติฐานของงานวิจัย 4
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 5
1.5 ผลที่นำส่ง 9
1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ 9
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 10
2.1 โครงการรถไฟฟ้า 10
2.2 งานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า 21
2.3 การจัดตารางงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า 30
2.4 แบบจำลองเชิงเส้นแบบจำนวนเต็ม (Integer Programming) 35
2.5 โปรแกรมโอพีเอล 37
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย 41
3.1 ลักษณะปัญหา 41
3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาจำนวนเครื่องจักรที่น้อยสุด 49

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การจัดตารางการซ่อมบำรุงในแต่ละเดือน 60
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย 75
4.1 ระยะเผื่อที่แตกต่างกัน 75
4.2 ศูนย์ซ่อมบำรุงสำหรับทุกสายและแยกสาย 96
4.3 การกำหนดความกว้างของแต่ละช่วงเวลา 101
4.4 จำนวนรถไฟฟ้าที่เหมาะสมกับ 1 ชุดของเครื่องจักรที่ใช้ในการซ่อมบำรุง 106
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย 110
5.1 ลักษณะของปัญหา และปัจจัยที่มีผลต่อจำนวนเครื่องจักร 110
5.2 ขั้นตอนการดำเนินการ 110
5.3 ผลการดำเนินการ 111
5.4 ปัญหาและอุปสรรค 113
5.5 ข้อเสนอแนะ 113
รายการอ้างอิง 115
ภาคผนวก 118
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 126

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 7

ตารางที่ 2.1 ความถี่ในการให้บริการเดินรถไฟฟ้าโครงการต่างๆ 16

ตารางที่ 2. 2 ความคืบหน้าของโครงการรถไฟฟ้าสายต่างๆ 17

ตารางที่ 2.3 รายละเอียดโครงการรถไฟฟ้าที่จะเปิดให้บริการตั้งแต่ปีพ.ศ. 2559 ถึงปีพ.ศ.2572 20

ตารางที่ 2.4 งานซ่อมบำรุงรักษาโบกี้ 27

ตารางที่ 2.5 งานซ่อมบำรุงระบบปรับอากาศ 27

ตารางที่ 2.6 งานซ่อมบำรุงระบบประตูผู้โดยสาร 28

ตารางที่ 2.7 งานซ่อมบำรุงแบตเตอรี่ 28

ตารางที่ 2.8 งานซ่อมบำรุงเครื่องอัดอากาศ 28

ตารางที่ 2.9 เครื่องจักรที่ใช้ในแต่ละกลุ่มงานซ่อมบำรุง 28

ตารางที่ 2.10 ตัวอย่างอาเรย์ 1 มิติ 38

ตารางที่ 2.11 ตัวอย่างอาเรย์ 2 มิติ 39

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลรายละเอียดโครงการรถไฟฟ้าที่จะเปิดให้บริการสำหรับงานวิจัยนี้ 42

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างอายุรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการในเดือนมีนาคม ปีพ.ศ. 2543 43

ตารางที่ 3.3 งานย่อยของแต่ละกลุ่มงานซ่อมบำรุงที่มีระยะห่างการซ่อมบำรุงเท่ากัน 44

ตารางที่ 3.4 เวลาที่ใช้ในการซ่อมบำรุงของงานย่อยทั้งหมด 12 งาน (ชั่วโมง) 45

ตารางที่ 3.5 เวลาที่ใช้ในการซ่อมบำรุงของกลุ่มงานซ่อมบำรุง (ชั่วโมง) 46

ตารางที่ 3.6 เวลาที่ใช้ในการซ่อมบำรุงของแต่ละเครื่องจักรในหน่วยไตรมาส 47

ตารางที่ 3.7 เวลาที่ใช้ในการซ่อมบำรุงของแต่ละเครื่องจักรในหน่วยเดือน 47

ตารางที่ 3.8 ตัวอย่างข้อมูลงานซ่อมบำรุง 48

ตารางที่ 3.9 ตัวอย่างข้อมูลรายละเอียดของรถไฟฟ้า 56

ตารางที่ 3.10 ตัวอย่างข้อมูลรายละเอียดของงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า 57

ตารางที่ 3.11 ตัวอย่างกำหนดการซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า 57

ตารางที่ 3.12 การตารางงานซ่อมบำรุงของรถไฟฟ้าแต่ละเดือน ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 58

ตารางที่ 3.13 จำนวนเครื่องจักรที่ใช้ในแต่ละเดือนในช่วง {1, 2, 3, ..., 12} ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 58

ตารางที่ 3. 14 การตารางงานซ่อมบำรุงของรถไฟฟ้าในช่วง {1, 2, 3, ..., 12} 59

ตารางที่ 3.15 งานซ่อมบำรุงที่มีกำหนดการอยู่ในช่วง {1, 2, 3, ..., 12} แต่ไม่มีการซ่อมบำรุง ในช่วง {1, 2, 3, ..., 12} 59

ตารางที่ 3.16 การเลื่อนกำหนดการของงานซ่อมบำรุงที่มีกำหนดการอยู่ในช่วง {1, 2, 3, ..., 12} แต่ไม่มีการซ่อมบำรุงในช่วง {1, 2, 3, ..., 12} 59

ตารางที่ 3. 17 กำหนดการในการซ่อมบำรุงหลังจากช่วงที่ 13 59

ตารางที่ 3.18 ตัวอย่างการจัดตารางงานซ่อมบำรุงในแต่ละเดือน 61

ตารางที่ 3.19 งานซ่อมบำรุงย่อย 62

ตารางที่ 3.20 เครื่องจักรที่ใช้ในแต่ละงานซ่อมบำรุงย่อย ($TaskMC_{jm}$) 63

ตารางที่ 3.21 ตัวอย่างสำหรับอธิบายสมการที่ (3-3) ถึง (3-7) 65

ตารางที่ 3.22 ตัวอย่างสำหรับอธิบายสมการที่ (3-6) ถึง (3-7) 65

ตารางที่ 3.23 ตัวอย่างสำหรับอธิบายสมการที่ (3-12) ถึง (3-16) 67

ตารางที่ 3.24 แผนงานการซ่อมบำรุงของเดือนมีนาคมปี 2566 69

ตารางที่ 3.25 จำนวนเครื่องจักรของเดือนมีนาคมปี 2566 70

ตารางที่ 3.26 ตารางงานซ่อมบำรุงงานย่อยของเดือนมีนาคมปี 2566 71

ตารางที่ 3.27 ตารางการเข้า - ออกของรถไฟฟ้าในเดือนมีนาคมปี 2566 73

ตารางที่ 4.1 ระยะเผื่อของงานซ่อมบำรุง 1/12 ของ Interval 75

ตารางที่ 4.2 ระยะเผื่อของงานซ่อมบำรุง 1/6 ของ Interval 76

ตารางที่ 4.3 ระยะเผื่อของงานซ่อมบำรุง 1/4 ของ Interval 76

ตารางที่ 4.4 ระยะเผื่อของงานซ่อมบำรุง 1/3 ของ Interval 76

ตารางที่ 4.5 ไม่มีระยะเผื่อ 76

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.6 จำนวนเครื่องจักรในระยะเผื่อต่างๆ โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม 94

ตารางที่ 4.7 จำนวนเครื่องจักรแต่ละประเภทที่ระยะเผื่อ 1/4 ของ interval 96

ตารางที่ 4.8 จำนวนเครื่องจักรในศูนย์ซ่อมบำรุงของแต่ละโครงการ 97

ตารางที่ 4.9 จำนวนเครื่องจักรในแต่ละศูนย์ซ่อมบำรุง (3 ศูนย์) 98

ตารางที่ 4.10 จำนวนเครื่องจักรที่ใช้ในการซ่อมบำรุงเมื่อรวมทุกโครงการ 98

ตารางที่ 4.11 จำนวนเครื่องจักรที่ใช้ในการซ่อมบำรุงในกรณีต่างๆ 99

ตารางที่ 4.12 ระยะเผื่อการซ่อมบำรุงแต่ละงาน 101

ตารางที่ 4.13 จำนวนเครื่องจักรแต่ละประเภท เมื่อระยะเผื่อเท่ากับ 1/4 ของ Interval (เดือน, ไตรมาส) 103

ตารางที่ 4.14 ระยะเผื่อการซ่อมบำรุงแต่ละงาน เมื่อมีระยะเผื่อประมาณ 15% ของ Interval 104

ตารางที่ 4.15 จำนวนเครื่องจักรในความกว้างของช่วงเวลาเดือน และไตรมาส 105

ตารางที่ 4. 16 กำหนดการของงานซ่อมบำรุงของรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการในเดือน 1 (b = 1) 107

ตารางที่ 4.17 จำนวนรถไฟฟ้าที่มากที่สุดของการซ่อมบำรุงโดยมีเครื่องจักรประเภทละ 1 ชุดในระยะเผื่อ 108

ตารางที่ 4.18 จำนวนเครื่องจักรแต่ละประเภท 109

ตารางที่ 4.19 จำนวนรถไฟฟ้าที่มากที่สุดของการซ่อมบำรุงโดยมีเครื่องจักรตามที่กำหนดไว้ในระยะเผื่อต่างๆ 109

ตารางที่ 5.1 จำนวนเครื่องจักรแต่ละประเภท เมื่อมีระยะเผื่อ 1/4 ของ interval 111

ตารางที่ 5.2 จำนวนเครื่องจักรในแต่ละศูนย์ซ่อมบำรุง (3 ศูนย์) โดยแต่ละศูนย์จะรับผิดชอบรถไฟฟ้าประมาณ 100 ขบวน 112

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญภาพ

รูปที่ 2.1 เส้นทางรถไฟฟ้าบีทีเอสสายสุขุมวิทและสายสีลม 11
รูปที่ 2.2 เส้นทางรถไฟฟ้าเอ็มอาร์ทีที่เปิดให้บริการในปัจจุบัน 12
รูปที่ 2.3 เส้นทางเดินรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์เอกซ์เพรสและแอร์พอร์ตลิงค์ซิตี้ไลน์ 13
รูปที่ 2.4 สถานีของรถไฟฟ้าสายแอร์พอร์ตลิงค์ 14
รูปที่ 2.5 โครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการในปัจจุบัน และศูนย์ซ่อมบำรุง 14
รูปที่ 2.6 โครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการในอนาคต และศูนย์ซ่อมบำรุง 15
รูปที่ 2.7 ความเสียหายของอุปกรณ์ต่างๆ 23
รูปที่ 2.8 ระบบซ่อมบำรุง 24
รูปที่ 2.9 ไฟล์สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 38
รูปที่ 2.10 ไฟล์สำหรับเก็บข้อมูล 39
รูปที่ 2.11 Problem Browser ของ OPL CPLEX 40
รูปที่ 3.1 ช่วงเวลาสำหรับการวิเคราะห์หาจำนวนเครื่องจักร 55
รูปที่ 3.2 การกำหมดช่วงเวลาในการวิเคราะห์ข้อมูลแต่ละรอบ 56
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการหาขอบเขตของเครื่องจักร 69
รูปที่ 4.1 จำนวนเครื่องจักรแต่ละประเภท เมื่อระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 ของ Interval 77
รูปที่ 4.2 อรรถประโยชน์ของเครื่องจักรแต่ละประเภท เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 ของ Interval 80
รูปที่ 4.3 จำนวนเครื่องจักรแต่ละประเภท เมื่อระยะเผื่อเท่ากับ 1/6 ของ Interval 80
รูปที่ 4.4 อรรถประโยชน์ของเครื่องจักรแต่ละประเภท เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/6 ของ Interval 83
รูปที่ 4.5 จำนวนเครื่องจักรแต่ละประเภท เมื่อระยะเผื่อเท่ากับ 1/4 ของ Interval 83
รูปที่ 4.6 อรรถประโยชน์ของเครื่องจักรแต่ละประเภท เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/4 ของ Interval 86
รูปที่ 4.7 จำนวนเครื่องจักรแต่ละประเภท เมื่อระยะเผื่อเท่ากับ 1/3 ของ Interval 86
รูปที่ 4.8 อรรถประโยชน์ของเครื่องจักรแต่ละประเภท เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/3 ของ Interval 89

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4.9 จำนวนเครื่องจักร Bearing Removal Equipment ในระยะเผื่อ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval 90

รูปที่ 4.10 จำนวนเครื่องจักร Bearing Removal Equipment ในระยะเผื่อ 1/12 และ 1/6 ของ Interval 90

รูปที่ 4.11 จำนวนเครื่องจักร Bearing Removal Equipment ในระยะเผื่อ 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval 91

รูปที่ 4.12 จำนวนเครื่องจักร Hydraulic Wheel Press ในระยะเผื่อ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval 92

รูปที่ 4.13 จำนวนเครื่องจักร Hydraulic Wheel Press ในระยะเผื่อ 1/12 และ 1/6 ของ Interval 92

รูปที่ 4.14 จำนวนเครื่องจักร Hydraulic Wheel Press ในระยะเผื่อ 1/4 และ 1/3 ของ Interval 93

รูปที่ 4.15 จำนวนเครื่องจักร Brake and Compressor Test Equipment ในระยะเผื่อ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval 93

รูปที่ 4.16 จำนวนเครื่องจักร Train Air Conditioning Module Repair ในระยะเผื่อ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval 94

รูปที่ 4.17 จำนวนเครื่องจักรรวมทุกประเภท สำหรับระยะเผื่อแบบต่างๆ 95

รูปที่ 4.18 การใช้ประโยชน์เครื่องจักรแต่ละประเภท ในการรวมศูนย์ซ่อมบำรุงกรณีต่างๆ 100

รูปที่ 4.19 จำนวนเครื่องจักรแต่ละประเภท เมื่อระยะเผื่อเท่ากับ 1/4 ของ Interval 102

รูปที่ 4.20 จำนวนเครื่องจักรแต่ละประเภท เมื่อระยะเผื่อเท่ากับ 1/4 ของ Interval (ไตรมาส) 102

รูปที่ 4.21 จำนวนเครื่องจักรแต่ละประเภท เมื่อระยะเผื่อประมาณ 15% ของ Interval (เดือน) 104

รูปที่ 4.22 จำนวนเครื่องจักรแต่ละประเภท เมื่อระยะเผื่อประมาณ 15% ของ Interval (ไตรมาส) 105

รูปที่ 5.1 จำนวนเครื่องจักรทั้งหมด เมื่อมีระยะเผื่อค่าต่างๆ 111

รูปที่ ก.1 จำนวนเครื่องจักร Axle Lathe เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval 119

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ ก.2 จำนวนเครื่องจักร Bearing Removal Equipment เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval 119

รูปที่ ก.3 จำนวนเครื่องจักร Bogie Preload Stand เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval 120

รูปที่ ก.4 จำนวนเครื่องจักร Bogie Turntables เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval 120

รูปที่ ก.5 จำนวนเครื่องจักร Brake and Compressor Test Equipment เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval 121

รูปที่ ก.6 จำนวนเครื่องจักร Hydraulic Wheel Press เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval 121

รูปที่ ก.7 จำนวนเครื่องจักร Movable Jacking System 10 ton เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval 122

รูปที่ ก.8 จำนวนเครื่องจักร Movable Jacking System 15 ton เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval 122

รูปที่ ก.9 จำนวนเครื่องจักร Overhead Bridge Crane 100kN เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval 123

รูปที่ ก.10 จำนวนเครื่องจักร Overhead Bridge Crane 20kN เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval 123

รูปที่ ก.11 จำนวนเครื่องจักร Train Air Conditioning Module Repair เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval 124

รูปที่ ก.12 จำนวนเครื่องจักร Underfloor Trainset Lifting System เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval 124

รูปที่ ก. 13 จำนวนเครื่องจักร Vehicle Door Test Stand เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval 125

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1 บทนำ

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึง ที่มาและความสำคัญ พร้อมทั้ง วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ขอบเขตและสมมติฐานของงานวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ผลที่นำส่ง และประโยชน์ที่ได้รับ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การคมนาคมและการขนส่งเป็นหนึ่งในปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญในการขับเคลื่อนพัฒนาเศรษฐกิจ และสังคมของประเทศ อีกทั้งยังช่วยยกระดับคุณภาพชีวิตของประชาชน สร้างโครงข่ายทางการค้า และเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันทางการค้า ในปัจจุบันกรุงเทพมหานครมีระบบการขนส่งสาธารณะมากมายหลายรูปแบบ สำหรับการเดินทางไปยังสถานที่ต่างๆ ในการเดินทางทางบก เช่น รถแท็กซี่มิเตอร์ รถเมล์ รถไฟ และรถไฟฟ้า และในการเดินทางทางน้ำ เช่น เรือข้ามฝาก เรือด่วนเจ้าพระยา และเรือขนส่ง แต่ระบบคมนาคมขนส่งหลักในกรุงเทพมหานคร คือการเดินทางทางบก หนึ่งในการเดินทางทางบกที่เป็นที่น่าสนใจคือ ระบบรถไฟ หรือระบบราง เนื่องจากเป็นระบบคมนาคมที่สามารถขนส่งคน หรือบรรทุกสินค้าได้ครั้งละจำนวนมากๆ โดยที่มีค่าใช้จ่ายในการขนส่งต่ำกว่าการคมนาคมแบบอื่นๆ อีกทั้งเป็นการแก้ปัญหาการจราจรติดขัดในเมืองหลวงอย่างกรุงเทพมหานครได้เป็นอย่างดี ระบบรางที่นิยมใช้ในเมืองใหญ่คือ ระบบขนส่งมวลชนความเร็วสูง (Mass Rapid Transit) หรือที่เรียกว่า ระบบรถไฟฟ้า รถไฟฟ้าใต้ดิน หรือเมโทร เนื่องจากระบบรถไฟฟ้าใช้ระบบไฟฟ้าในการขับเคลื่อน จึงมีความสะดวกสบาย รวดเร็ว ตรงต่อเวลา ไม่ต้องเสียเวลาจากการจราจรที่ติดขัด ทำให้สามารถลดความเครียดในการเดินทางของผู้โดยสาร ลดการเกิดมลภาวะ ทำให้สภาพแวดล้อมของกรุงเทพมหานครดีขึ้น และเพิ่มคุณภาพชีวิตให้แก่ประชาชน นอกจากนี้ระบบรถไฟฟ้ายังเป็นส่วนหนึ่งในการกระจายการพัฒนาความเจริญออกไปสู่ส่วนต่างๆตามแนวเส้นทางรถไฟฟ้า ส่งผลให้ระบบเศรษฐกิจมีความคล่องตัวมากยิ่งขึ้น

ในปัจจุบัน กรุงเทพมหานครมีรถไฟฟ้าทั้งหมด 4 สาย ได้แก่ รถไฟฟ้าสายเฉลิมพระเกียรติฯ 1 รถไฟฟ้าสายเฉลิมพระเกียรติฯ 2 รถไฟฟ้ามหานครสายเฉลิมรัชมงคล และรถไฟฟ้าท่าอากาศยานสุวรรณภูมิหรือ แอร์พอร์ตลิงค์ [1] ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้น เป็นรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน หรือระบบขนส่งมวลชนหนัก (Heavy Rail Transit System, HRT) มีเส้นทางเป็นรางอยู่ใต้ดินหรือรางยกระดับ และสามารถรองรับผู้โดยสารได้จำนวนมาก จากเส้นทางรถไฟฟ้าทั้ง 4 สายจะเห็นได้ว่า เส้นทางรถไฟฟ้ายังไม่ครอบคลุมพื้นที่ในกรุงเทพมหานครมากนัก จึงเกิดโครงการการพัฒนาโครงข่ายระบบขนส่งมวลชนสายหลักและสายรองขึ้น [2] แต่ทั้งนี้การดำเนินโครงการรถไฟฟ้าจะต้องใช้เงินในการลงทุนเป็นมูลค่ามหาศาล ทั้งในส่วนของการจัดหาพื้นที่สำหรับสร้างรถไฟฟ้า การให้บริการเดินรถ การ

จัดตั้งศูนย์ซ่อมบำรุง การสร้างรางสำหรับเดินรถไฟฟ้า และที่สำคัญที่สุดคือลงทุนและการซ่อมบำรุงตัวรถไฟฟ้า [3]

เนื่องจากในประเทศไทยยังไม่มีโรงงานสำหรับผลิตรถไฟฟ้า ตัวรถไฟฟ้าและอะไหล่สำคัญต่างๆจึงต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ ทำให้รถไฟฟ้ามีมูลค่าสูง เพื่อเป็นการประหยัดงบประมาณ ผู้ประกอบการรถไฟฟ้าจึงต้องบริหารจำนวนรถไฟฟ้าที่มีอยู่ให้เกิดประสิทธิภาพในการดำเนินการสูงสุด พร้อมทั้งสามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้บริการในช่วงเวลาเร่งด่วนได้ด้วย นอกจากนี้ผู้ประกอบการรถไฟฟ้ายังต้องคำนึงถึงความปลอดภัยของผู้ใช้บริการเป็นสำคัญ การซ่อมบำรุงจึงเป็นส่วนสำคัญต่อธุรกิจรถไฟฟ้า เพื่อให้รถไฟฟ้าสามารถดำเนินการได้อย่างปกติ งานซ่อมบำรุงจะครอบคลุมกิจกรรมทุกอย่างที่ทำให้เครื่องจักรและอุปกรณ์อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งานอยู่เสมอ อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและความปลอดภัยในการใช้งาน หน้าที่สำคัญในการซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าคือการบำรุงรักษาชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ต่างๆ ที่ชำรุดเสียหาย จนไม่สามารถทำให้รถไฟฟ้าใช้งานได้ ไม่ปลอดภัยในการใช้งาน หรือประสิทธิภาพในการใช้งานของรถไฟฟ้าลดลง ซึ่งเมื่อเกิดการชำรุดเสียหายก็จะมีความเสี่ยงต่อการให้บริการเดินรถไฟหรือเกิดอันตรายต่างๆขึ้นได้ การซ่อมบำรุงเป็นการทำงานที่ต้องคำนึงถึงความเหมาะสมในช่วงเวลาและวิธีการบำรุงรักษา การซ่อมบำรุงโดยทั่วไปจะแบ่งออกเป็น 3 ประเภทตามลักษณะการซ่อมบำรุง หนึ่งคือ การซ่อมบำรุงเมื่อรถไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ภายในรถไฟฟ้าเกิดการชำรุดเสียหายจากเหตุการณ์ฉุกเฉินที่ไม่คาดการณ์ไว้ล่วงหน้า จะเรียกการซ่อมบำรุงนี้ว่า การบำรุงรักษาเชิงแก้ไข (Corrective Maintenance) [4] สองคือการซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน (Preventative Maintenance) เป็นการซ่อมบำรุงเพื่อลดความสูญเสียที่เกิดจากการชำรุดเสียหายที่ไม่คาดการณ์ไว้ล่วงหน้าหรือหยุดชะงักของการดำเนินงาน และเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดเหตุการณ์ความเสียหายที่ไม่คาดคิดบ่อยครั้ง โดยการซ่อมบำรุงเชิงป้องกันจะมีการวางแผนการตรวจสอบสภาพของรถไฟฟ้าหรืออุปกรณ์ต่างๆตามกำหนดเวลา หรือเมื่อถึงเงื่อนไขที่กำหนด [4] และสุดท้ายคือการซ่อมบำรุงใหญ่ (Overhaul) การซ่อมบำรุงใหญ่เป็นการซ่อมบำรุงโดยมีการถอดประกอบชิ้นส่วนเพื่อซ่อมบำรุงหรือเปลี่ยนชิ้นส่วนเพื่อป้องกันการเกิดการชำรุดเสียหาย การซ่อมบำรุงใหญ่จะมีการกำหนดเวลาในการซ่อมบำรุงที่แน่นอน ซึ่งมีระยะห่างระหว่างการซ่อมบำรุงมากกว่า 1 ปี เช่น การเปลี่ยนน้ำมันเกียร์ทุก 1 ปี การเปลี่ยนล้อและตรวจสอบรอยแตกของเพลาทุก 5 ปี การบำรุงรักษาระบบแอร์ทุก 6 ปี เป็นต้น

เมื่อศึกษาบทความการจัดตารางกิจกรรมการซ่อมบำรุงเชิงป้องกันระบบรถไฟฟ้า [5] พบว่าความตรงต่อเวลาและความปลอดภัยเป็นสิ่งสำคัญในระบบไฟฟ้า ดังนั้นการซ่อมบำรุงที่เพียงพอจึงเป็นปัจจัยสำคัญ อย่างไรก็ตามการซ่อมบำรุงมีค่าใช้จ่ายสูงและส่วนใหญ่การอนุมัติค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงจะอยู่ภายใต้แรงกดดันของผู้บริหารธุรกิจ การลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงโดยไม่ลดการซ่อมบำรุง จึงเป็นจุดมุ่งหมายสำคัญ ดังนั้นถึงแม้ว่าการซ่อมบำรุงจะเป็นส่วนงานที่มีค่าใช้จ่ายสูง และ

ไม่ให้ผลกำไรต่อธุรกิจ แต่การซ่อมบำรุงเป็นส่วนที่ขาดไม่ได้ เพราะช่วยให้ธุรกิจหรือรถไฟฟ้าดำเนินการต่อไปได้อย่างปกติ ซึ่งค่าใช้จ่ายในส่วนของงานซ่อมบำรุงส่วนใหญ่เกิดจากทรัพยากร ทรัพยากรหมายถึงทรัพยากรมนุษย์ ส่วนประกอบของรถไฟและเครื่องจักร วิธีการในการลดค่าใช้จ่ายทางด้านการซ่อมบำรุงจึงจำเป็นต้องจำกัดจำนวนทรัพยากรที่มีให้น้อยที่สุดและบริหารทรัพยากรอย่างเหมาะสมจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานทรัพยากรมากขึ้น เกิดการกระจายงานให้มีความสม่ำเสมอมากขึ้น และเพื่อให้ต้นทุนในการทำงานซ่อมบำรุงต่ำที่สุดโดยที่เพียงพอต่อการใช้งานและไม่ส่งผลกระทบกับระบบซ่อมบำรุง

การซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าเป็นหนึ่งในปัญหาการดำเนินงานที่สำคัญสำหรับหน่วยงานขนส่งทางราง การบำรุงรักษารถไฟฟ้าและการบำรุงรักษาโครงสร้างพื้นฐานคิดเป็นประมาณ 75% ของค่าใช้จ่ายทั้งหมดสำหรับโครงการรถไฟฟ้า ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเสนอวิธีการในการหาจำนวนทรัพยากรที่น้อยที่สุดที่จำเป็นในการซ่อมบำรุงใหญ่ของรถไฟฟ้า โดยหลักการสำคัญในการลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงตัวรถไฟฟ้ามี 3 ประการสำคัญคือ การแบ่งปันทรัพยากรในการซ่อมบำรุงใหญ่ การรวมกลุ่มงานซ่อมบำรุง และการเกลี่ยงานซ่อมบำรุง

1. การแบ่งปันทรัพยากรในการซ่อมบำรุงใหญ่

เมื่อพิจารณาถึงการซ่อมบำรุงใหญ่ การซ่อมบำรุงใหญ่จะมีการวางแผนงานโดยอ้างอิงจากสถิติหรือข้อมูลที่ได้จากเอกสารการซ่อมบำรุงส่วนมากจะมีระยะห่างระหว่างการซ่อมบำรุง (Interval) แต่ละครั้งมากกว่า 1 ปี เช่น 1 ปี 2 ปี 3 ปี 6 ปี หรือ 12 ปี เป็นต้น การใช้ทรัพยากรหรือเครื่องมือในการซ่อมบำรุงใหญ่จะมีความถี่ต่ำ การมีศูนย์ซ่อมบำรุงของแต่ละโครงการ จะทำให้ทรัพยากรที่มีอยู่ใช้ได้อย่างไม่คุ้มค่าเช่น ในรถไฟฟ้าสายสีม่วง มีจำนวนรถไฟฟ้าทั้งหมด 45 ขบวน การบำรุงรักษาประตูผู้โดยสารจะซ่อมบำรุงทุก 1 ปี โดยใช้เครื่องจักร Vehicle Door Test Stand เป็นเวลา 16 ชั่วโมงต่อขบวน ดังนั้นใน 1 ปี (365 วัน) เครื่องจักรนี้จะดำเนินการทั้งหมดเป็นเวลา 30 วัน คิดเป็นร้อยละการทำงานของเครื่องจักรในแต่ละปีเท่ากับ 8.22 ซึ่งถือได้ว่ามีการใช้งานเครื่องจักรน้อยมาก การแบ่งปันเครื่องมือ-อุปกรณ์สำหรับการซ่อมบำรุงใหญ่จะเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการซื้อเครื่องจักรของแต่ละศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าซึ่งเป็นต้นทุนคงที่ (Fixed Cost) ถ้าหากรถไฟฟ้าทุกโครงการสามารถแบ่งปันทรัพยากรกันได้จะทำให้ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงเฉลี่ยต่อขบวนลดลง

2. การรวมกลุ่มงานซ่อมบำรุง

การซ่อมบำรุงเป็นกิจกรรมที่ทำให้รถไฟฟ้าสามารถดำเนินงานได้อย่างปกติ โดยงานซ่อมบำรุงจะขึ้นอยู่กับประเภทของตู้รถไฟฟ้าในแต่ละขบวน

ในระหว่างการซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าจะถูกครอบครองทำให้ไม่สามารถทำการเดินรถได้ การจัดตารางการซ่อมบำรุงจึงเป็นส่วนสำคัญในการลดเวลาในการครอบครองรถ ดังนั้นการจัดตารางการซ่อมบำรุงเชิงป้องกันจะทำการรวมกลุ่มงานให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ [5] เพื่อลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการเข้า และออกศูนย์ซ่อมบำรุงของรถไฟฟ้า

3. การกำหนดระยะห่างของการซ่อมบำรุงเป็นช่วง

การซ่อมบำรุงใหญ่จะมีระยะห่างการซ่อมบำรุงที่แตกต่างกัน เช่น ทุก1 ปี ทุก 2 ปี หรือทุก 12 ปี ซึ่งจำนวนรถไฟฟ้าในโครงการต่างๆจะเพิ่มขึ้นในเวลาเดียวเป็นจำนวนมากเช่น ในปีพ.ศ. 2562 โครงการรถไฟฟ้าเกือบทุกโครงการมีการใช้รถไฟฟ้าขบวนใหม่ ทำให้ปีพ.ศ. 2567 มีความต้องการในงานซ่อมรถไฟฟ้าทุก 5 ปี เป็นจำนวนมาก ส่งผลถึงความต้องการทรัพยากรเครื่องจักร แต่ในปีพ.ศ. 2568 จะมีความต้องการในงานซ่อมรถไฟฟ้าทุก 5 ปี น้อยมาก ดังนั้นจึงต้องบริหารการเดินรถให้ระยะทางวิ่งสะสมของรถไฟฟ้าแต่ละขบวนไม่เท่ากัน ดังนั้นความต้องการซ่อมบำรุงจะเกิดที่อายุรถต่างๆกัน ทำให้สามารถเกลี่ยงานซ่อมบำรุงได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะไม่พิจารณาการบริหารการเดินรถ แต่จะกำหนดขอบเขตของแต่ละงานซ่อมบำรุงให้ซ่อมบำรุงได้ภายในช่วงเวลาซ่อมบำรุง เช่น งานที่ต้องซ่อมบำรุงทุก 1 ปี สามารถซ่อมบำรุงได้ระหว่าง 1 ปี ถึง 1 ปีครึ่ง (เดือนที่ 13-18: 6 เดือน) เป็นต้น

ในปัจจุบัน ประเทศไทยมีโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบันมีทั้งหมด 4 สาย และจะมีการพัฒนาโครงการรถไฟฟ้ารถไฟฟ้าขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นรวมเป็น 8 สายรายละเอียดทั้งหมดจะอยู่ในบทที่ 2 นอกจากนั้นในบทที่ 2 จะกล่าวถึงความรู้เบื้องต้นในการดำเนินงานซ่อมบำรุงระบบรถไฟฟ้า และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 3 จะกล่าวถึงการดำเนินงานวิจัย ซึ่งเริ่มต้นจากลักษณะของปัญหา และการสรุปข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ งานซ่อมบำรุง และจำนวนรถไฟฟ้าสายต่างๆ ไปจนกระทั่งหาจำนวนเครื่องจักรที่น้อยที่สุดที่สามารถซ่อมบำรุงได้ตามเวลาในระยะเผื่อต่างๆ ในบทที่ 4 และ 5 ของรายงานจึงกล่าวถึงผลของการดำเนินงานวิจัย และสรุปข้อเปรียบเทียบจำนวนเครื่องจักรที่ใช้ในการซ่อมบำรุงในแง่มุมต่างๆ เช่น การกำหนดงานซ่อมบำรุงเป็นช่วงเวลาที่แตกต่างกัน การรวมศูนย์และแยกสายในการซ่อมบำรุง เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อนำเสนอวิธีการในการหาจำนวนทรัพยากรที่น้อยที่สุดที่จำเป็นในการซ่อมบำรุงใหญ่ของรถไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตและสมมติฐานของงานวิจัย

1. การวางแผนงานซ่อมบำรุง
    - ใช้เวลาในการกำหนดงานซ่อมบำรุง (Time Based or Fixed-Time Maintenance)

- มุ่งเน้นการซ่อมบำรุงใหญ่ที่มีระยะห่างของการซ่อมบำรุงมากกว่า 1 ปี เป็นหลัก ซึ่งเป็นการวางแผนการซ่อมบำรุงระยะยาว
- สามารถรวมกลุ่มงานซ่อมบำรุงที่มีระยะห่างของการซ่อมบำรุงที่เท่ากันไว้ด้วยกัน เนื่องจากจะเป็นการลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการเดินทางเข้า-ออกจากศูนย์ซ่อมบำรุง
- ในการวางแผนการซ่อมบำรุงจะพิจารณาเฉพาะทรัพยากรเครื่องจักรเป็นหลัก

2. งานซ่อมบำรุง และทรัพยากรซ่อมบำรุง

งานซ่อมบำรุงตัวรถไฟฟ้าจะสนใจเฉพาะงานซ่อมบำรุงใหญ่เท่านั้น โดยข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยได้แก่ งานซ่อมบำรุง เวลาในการซ่อมบำรุง ระยะห่างการซ่อมบำรุง และทรัพยากรเครื่องจักรที่ใช้ในการซ่อมบำรุง จะอ้างอิงจากงานวิจัยการศึกษาและเปรียบเทียบงานซ่อมบำรุงขบวนรถไฟฟ้าและล้อเลื่อน [6] งานซ่อมบำรุงทั้ง 12 งาน จะแบ่งเป็นกลุ่มงานซ่อมบำรุงได้ทั้งหมด 5 กลุ่มคือ งานซ่อมบำรุงทุก 1 ปี 5 ปี 6 ปี 9 ปีและ 12 ปี โดยแต่ละกลุ่มงานซ่อมบำรุงจะมีเวลาในการซ่อมบำรุงของแต่ละเครื่องจักรคงที่

3. รถไฟฟ้า

ปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งในการวางแผนการซ่อมบำรุงคือ ความต้องการซ่อมบำรุง จำนวนรถไฟฟ้าในโครงการรถไฟฟ้าต่างๆจะเป็นส่วนสำคัญในการกำหนดความต้องการซ่อมบำรุง ในงานวิจัยนี้จะอ้างอิงจำนวนรถไฟฟ้าจากรายงานการศึกษาและเปรียบเทียบการดำเนินงานของศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า [1] ในการซ่อมบำรุงใหญ่ รถไฟฟ้าจะเข้าศูนย์ซ่อมพร้อมกันทั้งขบวนโดยไม่แยกเป็นตู้รถไฟ โดยส่วนใหญ่ใน 1 ขบวนจะประกอบไปด้วยตู้รถไฟ 3 ตู้ เป็นตู้รถไฟฟ้าแบบ A-Car ทั้งหมด 2 ตู้ และตู้รถไฟฟ้าแบบ C-Car ทั้งหมด 1 ตู้ เมื่อมีการกำหนดตารางซ่อมบำรุงของศูนย์ซ่อมบำรุงแล้ว รถไฟฟ้าขบวนนั้นจะพร้อมซ่อมบำรุงที่ศูนย์ซ่อมบำรุงเสมอ ซึ่งในแต่ละโครงการจะนำรถเข้าศูนย์ซ่อมบำรุงในขณะใดขณะหนึ่งเพียง 1 ขบวนเท่านั้น เนื่องจากการซ่อมรถไฟฟ้าจะทำให้รถไฟฟ้าไม่สามารถเดินรถได้ ถ้าหากนำรถไฟฟ้าของสายเดียวกันมาซ่อมบำรุงหลายขบวนพร้อมกัน จะทำให้รถไฟฟ้าไม่เพียงพอต่อการรองรับการให้บริการ หรือต้องสำรองรถไฟฟ้าในแต่ละโครงการไว้เป็นจำนวนมาก

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาการดำเนินงานซ่อมบำรุงของโครงการรถไฟฟ้าต่างๆที่เปิดให้บริการในปัจจุบัน (พ.ศ.2558) และศึกษาโครงการรถไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในอนาคต

2. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับประเภทการซ่อมบำรุง การทำงานซ่อมบำรุง การจัดเรียงงาน และการหาทรัพยากรที่น้อยที่สุดในการทำงาน
3. ศึกษาการสร้างระบบฐานข้อมูลสำหรับเป็นฐานข้อมูลการซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า
4. สร้างฐานข้อมูลการซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า
5. สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณความต้องการทรัพยากร ขณะที่มีการเกลี่ยงาน โดยใช้ข้อมูลจำลองที่มีไม่มากนัก
6. หาแนวคิดหรือวิธีการในการหาจำนวนที่น้อยที่สุดของทรัพยากรที่จำเป็นในการซ่อมบำรุงใหญ่ของรถไฟฟ้า ขณะที่มีการเกลี่ยงาน
7. สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน
8. จัดทำรายงานผลการดำเนินงาน
9. นำเสนอผลการดำเนินงาน

ระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย 18 เดือน โดยมีรายละเอียดตารางที่ 1.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	ปีพ.ศ. 2558									ปีพ.ศ. 2559								
	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ศึกษาการดำเนินงานซ่อมบำรุงของโครงการรถไฟฟ้าต่างๆที่เปิดให้บริการในปัจจุบัน (พ.ศ. 2558) และศึกษาโครงการรถไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในอนาคต																		
ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับประเภทการซ่อมบำรุง การทำงานซ่อมบำรุง การจัดเรียงงาน และการหาทรัพยากรที่น้อยที่สุดในการทำงาน																		
ศึกษาการสร้างระบบฐานข้อมูลสำหรับเป็นฐานข้อมูลการซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า																		
สร้างฐานข้อมูลการซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า																		
สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณความต้องการทรัพยากร ขณะที่มีการเกลี่ยงานโดยใช้ข้อมูลที่มีไม่มากนัก																		
หาแนวคิดหรือวิธีการในการหาจำนวนที่น้อยที่สุดของทรัพยากรที่จำเป็นในการซ่อมบำรุงใหญ่ของรถไฟฟ้า ขณะที่มีการเกลี่ยงาน																		

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	ปีพ.ศ. 2558									ปีพ.ศ. 2559								
	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน																		
จัดทำรายงานผลการดำเนินงาน																		
นำเสนอผลการดำเนินงาน																		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.5 ผลที่นำส่ง

แนวคิดหรือวิธีการในการหาจำนวนที่น้อยที่สุดของทรัพยากรที่จำเป็นในการซ่อมบำรุงใหญ่

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ใช้ประมาณจำนวนทรัพยากรเครื่องจักรสำหรับซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าในแต่ละปี
2. เป็นแนวทางในการประเมินความต้องการในการซ่อมบำรุงที่เพิ่มขึ้นในแต่ละปี
3. เป็นแนวทางในการคาดการณ์การสั่งซื้อเครื่องจักรสำหรับซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า
4. เป็นแนวทางในการจัดตารางสำหรับการซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า
5. เป็นแนวทางในการกำหนดระยะเผื่อสำหรับแต่ละงานซ่อมบำรุง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ส่วนสำคัญในการดำเนินธุรกิจรถไฟฟ้าคือ การซ่อมบำรุง การซ่อมบำรุงจะแบ่งออกเป็นหลายประเภทตามลักษณะการซ่อมบำรุง ในงานวิจัยนี้จะแก้ปัญหาในส่วนของค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงที่เกิดจากการใช้ทรัพยากรเครื่องจักร โดยแบ่งปันเครื่องจักรในการซ่อมบำรุงใหญ่ระหว่างแต่ละโครงการรถไฟฟ้า ให้มีจำนวนทรัพยากรเครื่องจักรที่ใช้น้อยที่สุด ในการวางแผนการซ่อมบำรุงจะมีการเก็บข้อมูลงานซ่อมบำรุงทั้งหมดของรถไฟฟ้า 1 ขบวน และปีที่รถไฟฟ้าแต่ละขบวนเปิดให้ใช้บริการ ซึ่งรายละเอียดจะอยู่ในส่วนที่ 2.1 และการซ่อมบำรุงจะอยู่ในส่วนที่ 2.2 การวางแผนการซ่อมบำรุงจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์เป็นลำดับแรก การหาจำนวนเครื่องจักรที่น้อยที่สุดในการซ่อมบำรุงจะมีการกำหนดเงื่อนไขหรือข้อจำกัดต่างๆ เช่น ช่วงเวลาในการซ่อมบำรุง การกระจายงานซ่อมบำรุง เป็นต้น ซึ่งจะกล่าวในส่วนที่ 2.3 และเนื่องจากจำนวนเครื่องจักรมีลักษณะเป็นจำนวนเต็ม จึงใช้ทฤษฎีแบบจำลองเชิงเส้นแบบจำนวนเต็ม (Integer Programming) ซึ่งจะกล่าวในส่วนที่ 2.4 และโปรแกรมโอพีเอลในส่วนที่ 2.5

2.1 โครงการรถไฟฟ้า

โครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วในปัจจุบันมีทั้งหมด 3 โครงการ 4 สาย ได้แก่ รถไฟฟ้าสายเฉลิมพระเกียรติฯ 1 รถไฟฟ้าสายเฉลิมพระเกียรติฯ 2 รถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคล และรถไฟฟ้าเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ [1, 7] โดยมีรายละเอียดดังนี้

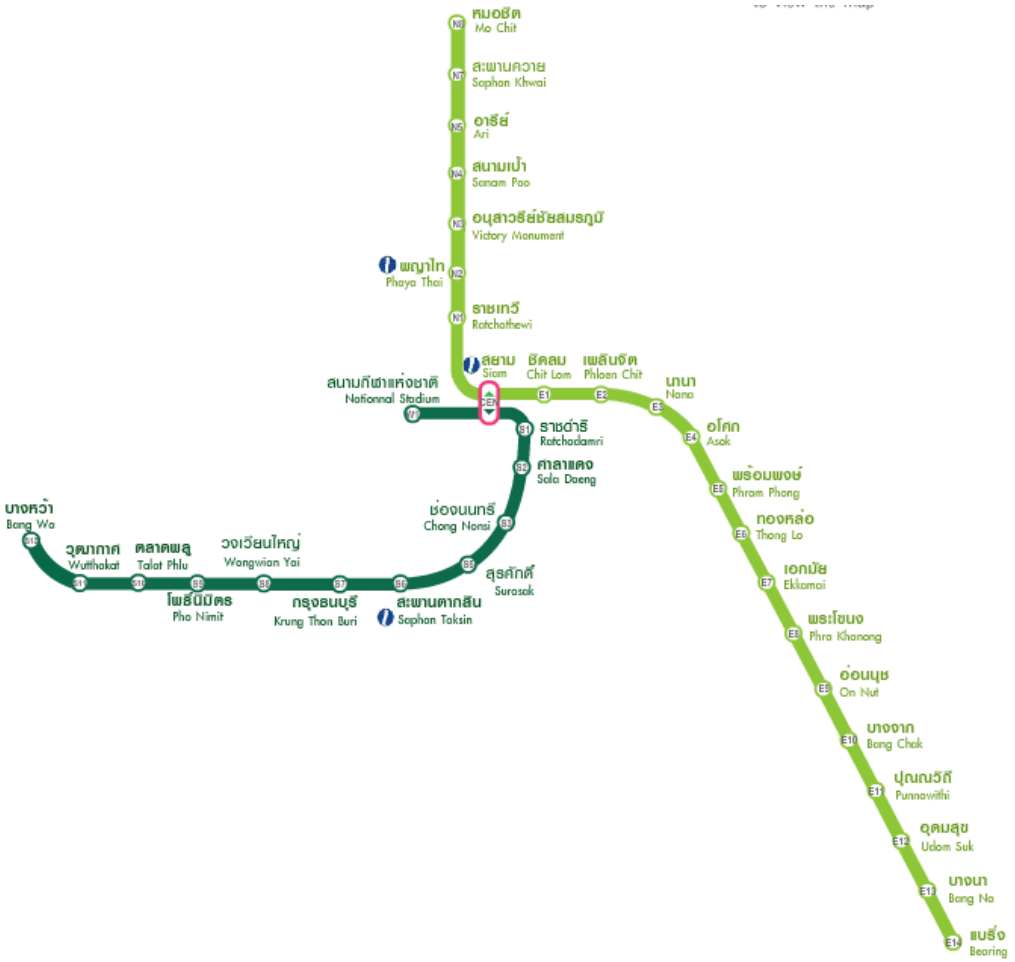
1. รถไฟฟ้าสายเฉลิมพระเกียรติฯ 1 และ 2 [8]

รถไฟฟ้าสายเฉลิมพระเกียรติฯ 1 และ 2 โดยส่วนใหญ่เรียกว่า “รถไฟฟ้าบีทีเอส” รถไฟฟ้าบีทีเอสเป็นโครงการที่เปิดให้บริการเมื่อวันที่ 5 ธันวาคม 2542 โดยเคลื่อนที่บนรางคู่ขนาดมาตรฐาน (Standard Gauge) ขนาดราง 1.435 เมตร ที่มีระบบจ่ายไฟรางที่สาม (Third Rail) รถไฟมีความเร็วเฉลี่ย 35 กิโลเมตรต่อชั่วโมง มีช่วงห่างของรถแต่ละขบวนต่ำที่สุดคือ 2 นาที 50 วินาที รถไฟฟ้าที่ให้บริการมี 2 ระบบ คือระบบรถไฟฟ้าซีเมนส์ และระบบรถไฟฟ้าชางชุน

รถไฟฟ้าสายเฉลิมพระเกียรติฯ 1 หรือสายสุขุมวิท (สายสีเขียวเข้ม) ปัจจุบันเปิดบริการ 22 สถานี รวมระยะทางทั้งหมด 21.8 กิโลเมตร ได้แก่ สถานีแบริ่ง สถานีบางนา สถานีอุดมสุข สถานีปุณณวิถี สถานีบางจาก สถานีอ่อนนุช สถานีพระโขนง สถานีเอกมัย สถานีทองหล่อ สถานีพร้อมพงษ์ สถานีอโศก สถานีนานา สถานีเพลินจิต สถานีชิดลม สถานีสยาม (สถานีร่วมกับสายสีลม) สถานีราชเทวี สถานีพญาไท สถานีอนุสาวรีย์ชัยสมรภูมิ สถานีสนามเป้า สถานีอารีย์ สถานีสะพานควาย และสถานีหมอชิต ดังแสดงในรูปที่ 2.1 นอกจากนี้ยังมีโครงการรถไฟฟ้าส่วนต่อขยายที่กำลังอยู่ระหว่างดำเนินการก่อสร้างอยู่ 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงแบริ่ง-สมุทรปราการ ระยะทาง 12.8 กิโลเมตร 9 สถานี (มี

โรงจอดและศูนย์ซ่อมบำรุง) ช่วงหมอชิต-สะพานใหม่ ระยะทาง 11.4 กิโลเมตร 12 สถานี และช่วงสะพานใหม่-คูคต ระยะทาง 7.0 กิโลเมตร 4 สถานี (มีศูนย์ซ่อมบำรุงและศูนย์ควบคุมการเดินรถ)

รถไฟฟ้าสายเฉลิมพระเกียรติฯ 2 หรือรถไฟฟ้าบีทีเอสสายสีลม (สายสีเขียวอ่อน) ปัจจุบันเปิดบริการแล้ว 13 สถานี ระยะทางรวม 14.5 กิโลเมตรได้แก่ สถานีสนามกีฬาแห่งชาติ สถานีสยาม (สถานีร่วมกับสายสุขุมวิท) สถานีราชดำริ สถานีศาลาแดง สถานีช่องนนทรี สถานีสุรศักดิ์ สถานีสะพานตากสิน สถานีกรุงธนบุรี สถานีวงเวียนใหญ่ สถานีโพธิ์นิมิตร สถานีตลาดพลู สถานีวุฒากาศ และสถานีบางหว้า ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 เส้นทางรถไฟฟ้าบีทีเอสสายสุขุมวิทและสายสีลม [9]

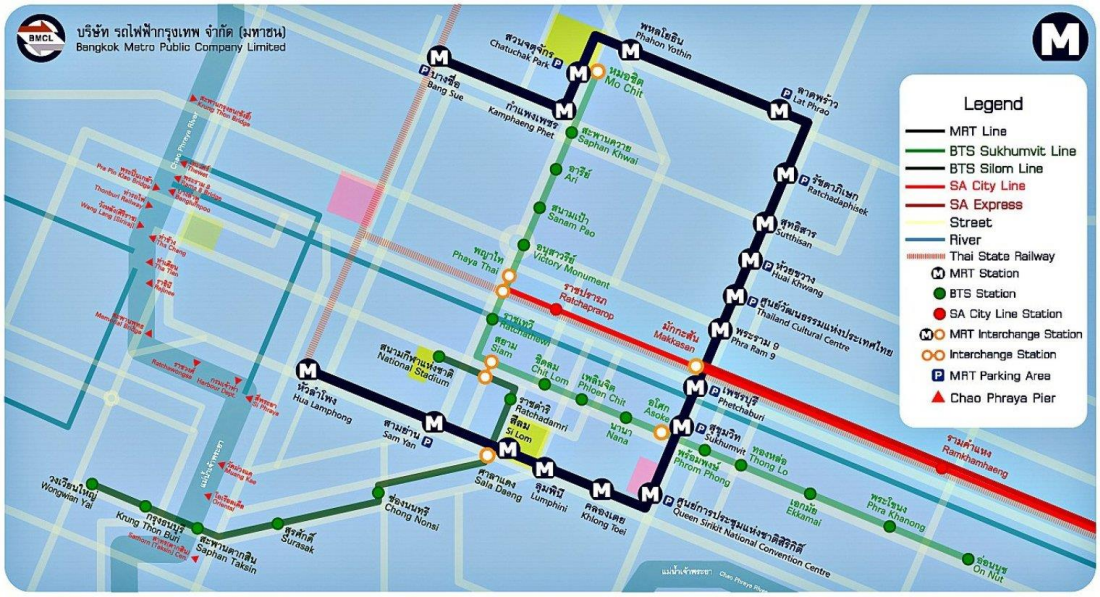
รถไฟฟ้าบีทีเอสมีศูนย์ซ่อมบำรุง (BTS depot Morchit) อยู่บริเวณสถานีหมอชิต อาคารบีทีเอส 1000 ถนน พหลโยธิน แขวงจอมพล เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900 บนเนื้อที่ประมาณ 40 ไร่ โดยประกอบไปด้วยศูนย์ควบคุมและปฏิบัติการเดินรถ โรงจอดและซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า งานซ่อมบำรุงระบบไฟฟ้าเครื่องกล

งานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าบีทีเอสแบ่งเป็น 2 ประเภทหลัก คือ การซ่อมบำรุงเชิงป้องกันหรืองานซ่อมบำรุงที่วางแผนล่วงหน้าได้ และการซ่อมบำรุงเชิงรักษาหรืองานซ่อมบำรุงที่ไม่สามารถวางแผนล่วงหน้าได้

2. รถไฟฟ้าสายเฉลิมรัชมงคล [10, 11]

โครงการรถไฟฟ้ามหานครสายเฉลิมรัชมงคลหรือโดยทั่วไปเรียกว่า “รถไฟฟ้าเอ็มอาร์ที” (สายสีน้ำเงิน) ซึ่งเปิดให้บริการเดินรถเมื่อวันที่ 3 กรกฎาคม 2547 รถไฟฟ้าเอ็มอาร์ที่ใช้รางคู่ขนาดมาตรฐานและใช้รางที่สามสำหรับจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับตัวรถรถไฟฟ้าเช่นเดียวกับรถไฟฟ้าบีทีเอสโครงการนี้เป็นโครงการใต้ดินตลอดสาย รถไฟจะวิ่งอยู่ในอุโมงค์คู่โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในอุโมงค์ 5.7 เมตร และความลึกของอุโมงค์จากระดับพื้นดินเท่ากับ 15 - 25 เมตร

ในปัจจุบันรถไฟฟ้าเอ็มอาร์ทีมีทั้งหมด 18 สถานี รวมเป็นระยะทาง 20 กิโลเมตร ได้แก่ สถานีหัวลำโพง สถานีสามย่าน สถานีสีลม สถานีลุมพินี สถานีคลองเตย สถานีศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ สถานีสุขุมวิท สถานีเพชรบุรี สถานีพระราม 9 สถานีศูนย์วัฒนธรรมแห่งประเทศไทย สถานีห้วยขวาง สถานีสุทธิสาร สถานีรัชดาภิเษก สถานีลาดพร้าว สถานีพหลโยธิน สถานีสวนจตุจักร สถานีกำแพงเพชร และสถานีบางซื่อ โดยที่รถไฟฟ้าเอ็มอาร์ทีจะมีสถานีเชื่อมต่อกับรถไฟฟ้าบีทีเอสที่สถานีสวนจตุจักร และสถานีสีลม ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 เส้นทางรถไฟฟ้าเอ็มอาร์ทีที่เปิดให้บริการในปัจจุบัน [10]

รถไฟฟ้าเอ็มอาร์ทีมีศูนย์ซ่อมบำรุง (MRTA Depot) อยู่บริเวณห้วยขวาง อยู่ภายในบริเวณบริษัท รถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน) เลขที่ 189 ถนนพระราม 9 แขวงห้วยขวาง เขตห้วยขวาง กรุงเทพฯ 10310 ภายในศูนย์ซ่อมบำรุงจะแบ่งออกเป็น ส่วนซ่อมบำรุง และส่วนทำความสะอาด

รถไฟฟ้า พร้อมทั้งมีรางสำหรับทดสอบรถไฟฟ้า ซึ่งจะมีการทดสอบหลังจากการซ่อมบำรุง เพื่อให้เครื่องจักรและอุปกรณ์ต่างๆ อยู่ในสภาพพร้อมใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในการซ่อมบำรุง ระดับการซ่อมบำรุงของรถไฟฟ้าเอ็มอาร์ทีมี 3 ระดับคือ ระดับแรกเป็นการทดสอบการทำงาน การปรับอุปกรณ์และการหล่อลื่นซึ่งจะต้องดำเนินการโดยตรงกับอุปกรณ์ ระดับที่สองคือการถอดส่วนประกอบย่อยออกไปซ่อมบำรุง หรือเปลี่ยนอะไหล่ และสุดท้ายคือ การซ่อมบำรุงโดยถอดส่วนประกอบทั้งหมด หลักการในการซ่อมบำรุงแบ่งเป็น 2 ประเภทหลัก คือ การซ่อมบำรุงเชิงป้องกันและการซ่อมบำรุงเชิงรักษา

3. รถไฟฟ้าเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ [12]

โครงการระบบขนส่งมวลชนทางรถไฟเชื่อมท่าอากาศยานสุวรรณภูมิเป็นส่วนหนึ่งของโครงการระบบรถไฟฟ้าชานเมือง โดยระบบรถไฟฟ้าเชื่อมต่อระหว่างท่าอากาศยานกับพื้นที่ใจกลางกรุงเทพมหานคร ที่ทำให้สามารถเดินทางได้รวดเร็ว และตรงต่อเวลา โครงการนี้จะเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า “รถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์” โดยจะแบ่งการบริการออกเป็น 2 ระบบคือ ระบบซิตี้ไลน์และระบบรถด่วน รถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์เปิดให้บริการเมื่อวันที่ 23 สิงหาคม พ.ศ.2553 ซึ่งสามารถรองรับผู้โดยสารได้มากถึง 50,000 คนต่อวัน

รูปที่ 2.3 เส้นทางเดินรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์เอกซ์เพรสและแอร์พอร์ตลิงค์ซิตี้ไลน์ [12]

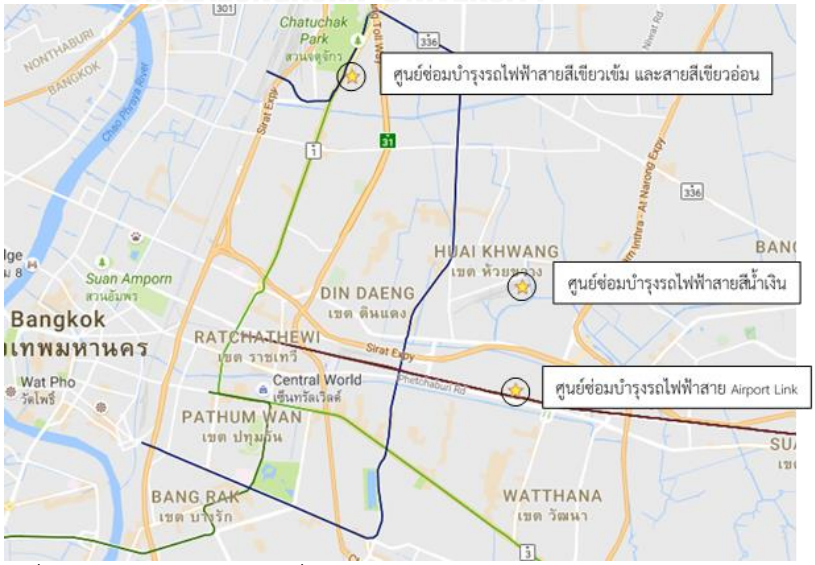
รถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์มี 8 สถานี ระยะทาง 28.5 กิโลเมตร ได้แก่ สถานีสุววรณภูมิ สถานีลาดกระบัง สถานีบ้านทับช้าง สถานีหัวหมาก สถานีรามคำแหง สถานีมักกะสัน สถานีราชปรารภ และสถานีพญาไท

รูปที่ 2.4 สถานีของรถไฟฟ้าสายแอร์พอร์ตลิงค์ [12]

รถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์มีศูนย์ซ่อมบำรุงอยู่ภายในบริเวณบริษัท รถไฟฟ้า ร.ฟ.ท. จำกัด เลขที่ 27 ซอยเพชรบุรี 47 (ศูนย์วิจัย) แขวงบางกะปิ เขตห้วยขวาง กรุงเทพฯ 10320 ใกล้กับสถานีมักกะสัน หรือเรียกว่า “ศูนย์ซ่อมบำรุงคลองตัน” (Airport Rail Link Depot Klong Ton) ภายในประกอบไปด้วยศูนย์ควบคุมการเดินรถ ลาดจอดรถไฟฟ้า โรงซ่อมบำรุง และส่วนสนับสนุนการบำรุงรักษา และปฏิบัติการ

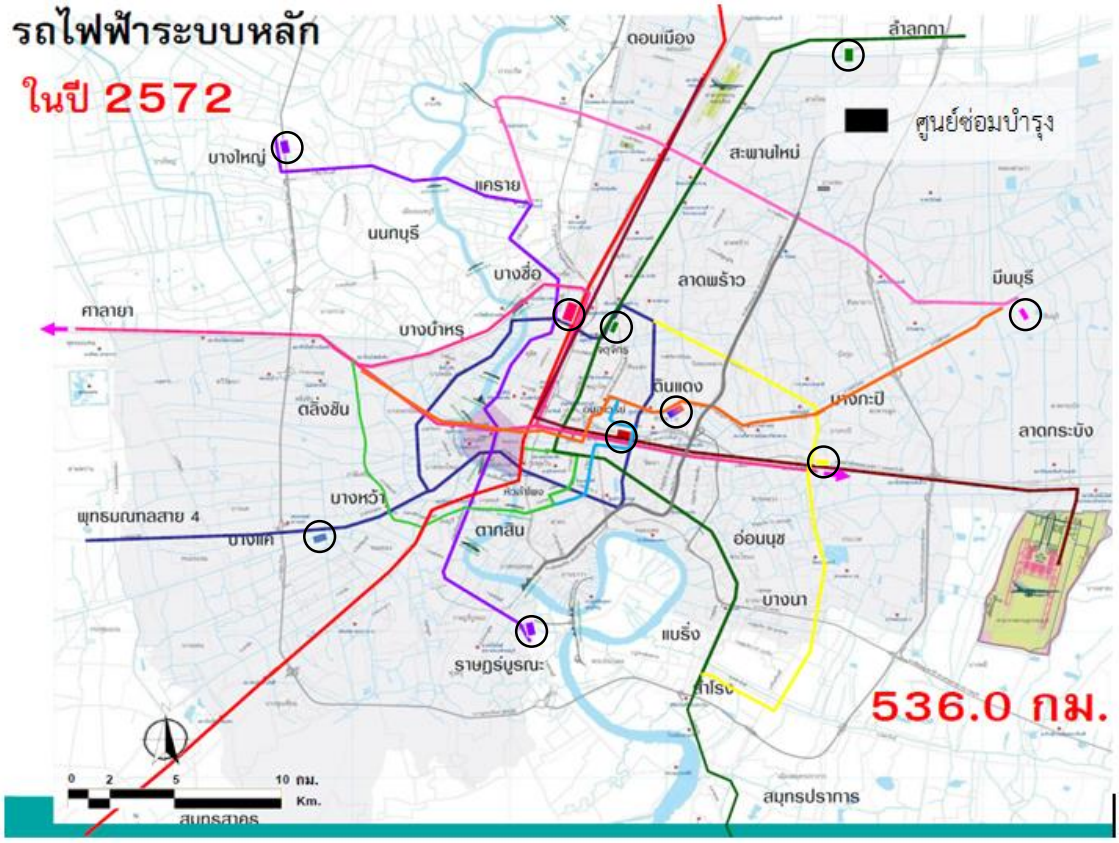
การซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงค์แบ่งเป็น 3 ประเภทหลัก คือ การซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน การซ่อมบำรุงเชิงรักษา และการซ่อมบำรุงอื่นๆ การซ่อมบำรุงเชิงป้องกันเป็นงานซ่อมบำรุงที่สามารถวางแผนงานซ่อมบำรุงรวมถึงทรัพยากรที่ต้องการไว้ล่วงหน้า สำหรับงานซ่อมบำรุงเชิงรักษาเป็นงานซ่อมบำรุงที่ไม่สามารถวางแผนการซ่อมบำรุงไว้ล่วงหน้าได้ เมื่อเกิดเหตุขัดข้อง ฝ่ายเดินรถจะต้องแจ้งไปยังศูนย์งานซ่อมบำรุง ส่วนงานซ่อมบำรุงอื่นๆนั้น จะเป็นที่นอกเหนือจากงานซ่อมบำรุงเชิงรักษาและเชิงป้องกัน เช่น งานอัพเกรดซอฟท์แวร์หรืออุปกรณ์ เป็นต้น

ในปัจจุบันมีโครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการแล้วทั้งหมด 4 โครงการ โดยมีศูนย์ซ่อมบำรุงทั้งหมด 3 แห่ง ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการในปัจจุบัน และศูนย์ซ่อมบำรุง

นอกจากนี้ ยังมีโครงการรถไฟฟ้าตามการพัฒนาโครงข่ายระบบขนส่งมวลชนสายหลักและสายรองตามแผนแม่บทระบบขนส่งมวลชนทางรางในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล (Mass Rapid Transit Master Plan in Bangkok Metropolitan Region: M-MAP) ที่กำลังจะเปิดให้บริการเพิ่มขึ้นในอนาคตทั้งหมด 12 โครงการ ซึ่งเป็นโครงข่ายสายหลัก 8 โครงการได้แก่ สายสีแดงเข้ม สายสีแดงอ่อน สายแอร์พอร์ตลิงค์ สายสีเขียวเข้ม สายสีเขียวอ่อน สายสีน้ำเงิน สายสีม่วง และสายสีส้ม โครงการทั้ง 12 โครงการนี้จะมีศูนย์ซ่อมบำรุงของแต่ละโครงการดังรูปที่ 2.6 จากรายงานความคืบหน้าของโครงการต่างๆตามหน่วยงานที่รับผิดชอบ เช่น



รูปที่ 2.6 โครงการรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการในอนาคต และศูนย์ซ่อมบำรุง [8]

สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจรกองการขนส่งสำนักการจราจรและกองการขนส่งขนส่งกรุงเทพมหานคร และการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย สามารถสรุปได้ตามตารางที่ 2.2 โครงการทั้งหมดนี้มีกำหนดจะเปิดให้บริการภายในปีพ.ศ. 2572 ในการเปิดให้บริการของแต่ละโครงการจะมีระยะเวลาที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งจำนวนรถไฟฟ้าในแต่ละโครงการจะต้องสามารถรับรองความต้องการในการใช้บริการ จำนวนรถไฟฟ้าในแต่ละโครงการจะขึ้นอยู่กับสายทางการเดินรถ (สายในเมือง/สายชานเมือง) ระยะทางเดินรถ และความถี่ในการเดินรถ (ตารางที่ 2.1)

ตารางที่ 2.1 ความถี่ในการให้บริการเดินรถไฟฟ้าโครงการต่างๆ [1]

สายที่	โครงการรถไฟฟ้า	Headway Peak (นาที)	Headway Off-Peak (นาที)
1	สายสีแดงเข้ม *	9.5	17.5
2	สายสีแดงอ่อน *	9.5	17.5
3	Airport Rail Link	12	15
4	สายสีเขียวเข้ม	2.4	8
5	สายสีเขียวอ่อน	4.5	8
6	สายน้ำเงิน	4.17	7
7	สายสีม่วง	3.45	8
8	สายสีส้ม	3.6	7.71

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2.2 ความคืบหน้าของโครงการรถไฟฟ้าสายต่างๆ

สายที่	รถไฟฟ้า	ช่วง	ระยะทาง	แผนเปิดบริการ พ.ศ.				จำนวนสถานี	จำนวนรถ (คัน)
			(กม.)	2559	2560	2562	2572		
1	สายสีแดงเข้ม	บางซื่อ-รังสิต-ธรรมศาสตร์	36.3	✓				-	-
		บางซื่อ-หัวลำโพง	6.5			✓		-	-
		หัวลำโพง-บางบอน	18				✓	-	-
		บางบอน-มหาชัย	20				✓	-	-
2	สายสีแดงอ่อน	บางซื่อ-พญาไท-มักกะสัน	9			✓		-	-
		มักกะสัน-หัวหมาก	10			✓		-	-
		บางซื่อ-ตลิ่งชัน	15			✓		-	-
		ตลิ่งชัน-ศาลายา	14			✓		-	-
		ตลิ่งชัน-ศิริราช	6				✓	-	-
3	แอร์พอร์ตลิงค์	พญาไท-มักกะสัน-สุวรรณภูมิ	28.5	เปิดบริการแล้ว เมื่อ พ.ศ. 2554				8	31
		ดอนเมือง-บางซื่อ-พญาไท	21.8			✓		-	-
4	สายสีเขียวเข้ม	หมอชิต-อ่อนนุช	16.5	เปิดบริการแล้ว เมื่อ พ.ศ. 2542				22	140
		อ่อนนุช-แบริ่ง	5.3	เปิดบริการแล้ว เมื่อ พ.ศ. 2554					
		หมอชิต-สะพานใหม่-คูคต	18.4			✓		16	68
		คูคต-ลำลูกกา	6.5				✓	-	-
		แบริ่ง-สมุทรปราการ	12.8			✓		9	39
		สมุทรปราการ-บางปู	7				✓	-	-

สายที่	รถไฟฟ้า	ช่วง	ระยะทาง	แผนเปิดบริการ พ.ศ.				จำนวนสถานี	จำนวนรถ (คัน)
			(กม.)	2559	2560	2562	2572		
5	สายสีเขียวอ่อน	สนามกีฬาแห่งชาติ-สะพานตากสิน	7	เปิดบริการแล้ว เมื่อ พ.ศ. 2542				13	68
		สะพานตากสิน-ถนนตากสิน	2.2	เปิดบริการแล้ว เมื่อ พ.ศ. 2552					
		ถนนตากสิน-บางหว้า	5.3	เปิดบริการแล้ว เมื่อ พ.ศ. 2556					
		สนามกีฬา-ยศเส	1				✓	1	-
		บางหว้า-ตลิ่งชัน	7.5				✓	6	-
6	สายน้ำเงิน	บางซื่อ-หัวลำโพง	20	เปิดบริการแล้ว เมื่อ พ.ศ. 2547				18	57
		บางซื่อ-ท่าพระ	13		✓			4 (ใต้ดิน)	84
		หัวลำโพง-บางแค	14		✓			15 (ยกระดับ)	
		บางแค-พุทธมณฑลสาย4	8				✓	-	-
7	สายสีม่วง	บางใหญ่-บางซื่อ	23			✓		16	63
		เตาปูน-วงแหวนกาญจนาภิเษก	23.6			✓		11 (ใต้ดิน) 5 (ยกระดับ) *เตาปูน-ราษฎร์บูรณะ	72
8	สายสีส้ม	ตลิ่งชัน-ศูนย์วัฒนธรรม	17.5			✓		21 (ใต้ดิน)	144
		ศูนย์วัฒนธรรม-มีนบุรี	20			✓		8 (ยกระดับ)	

นอกจากการรายงานความคืบหน้าโครงการรถไฟฟ้าจากหน่วยงานที่รับผิดชอบแล้ว ข่าวสารต่างๆจะมีการรายงานความคืบหน้าของโครงการรถไฟฟ้าด้วยเช่นกัน ในวันที่ 2 มกราคม พ.ศ. 2558 ไทยรัฐได้เสนอข่าวที่มีหัวข่าวว่า “สิ้นสุดการรอคอย “รถไฟฟ้า” มาหาซะที เจาะลึกทุกสถานี 10 เส้นทางผ่านบ้านใคร” [13] โดยเนื้อหาข่าวสามารถสรุปได้ดังนี้

- สายสีแดงเข้ม ช่วงหัวหมาก-บางซื่อ-ม.ธรรมศาสตร์ รังสิตคาดว่าจะแล้วเสร็จในปีพศ. 2561
- สายสีแดงอ่อน ช่วงตลิ่งชัน-บางซื่อ-หัวหมากคาดว่าจะแล้วเสร็จในปีพศ. 2561
- สายแอร์พอร์ต เรล ลิงค์ ช่วงพญาไท-บางซื่อ-ดอนเมือง ส่วนต่อขยายคาดว่าจะแล้วเสร็จในปีพศ. 2562
- สายสีม่วง ช่วงบางใหญ่-บางซื่อ พร้อมเปิดให้บริการในวันที่ 12 สิงหาคม ปีพศ. 2559
- สายสีเขียวเข้ม ช่วงหมอชิต-สะพานใหม่-คูคต คาดว่าจะแล้วเสร็จในปีพศ. 2562 และช่วงแบริ่ง-สมุทรปราการ คาดว่าจะแล้วเสร็จในปีพศ. 2563
- สายสีน้ำเงิน ช่วงหัวลำโพง-บางแค คาดว่าเปิดให้บริการในปีพศ. 2562
- สายสีส้ม ช่วงศูนย์วัฒนธรรม-มีนบุรี คาดว่าจะก่อสร้างเสร็จในปีพ.ศ. 2563

และ ในวันที่ 26 ตุลาคม พศ. 2558 ไทยพีบีเอสออนไลน์ได้เสนอข่าวที่มีหัวข่าวว่า “อัพเดท “รถไฟฟ้า” คนกรุงฯ จะได้ใช้เมื่อไหร่” [14] โดยเนื้อหาข่าวสามารถสรุปได้ดังนี้

- สายสีแดงเข้ม ช่วงม.ธรรมศาสตร์ รังสิต - มหาชัยคาดว่าจะแล้วเสร็จในปีพ.ศ. 2561-2562
- สายสีแดงอ่อน ช่วงตลิ่งชัน-บางซื่อ-หัวหมากคาดว่าจะแล้วเสร็จในปีพ.ศ. 2561
- สายแอร์พอร์ต เรล ลิงก์ ช่วงพญาไท-บางซื่อ-ดอนเมือง คาดว่าจะแล้วเสร็จในปีพ.ศ. 2562
- สายสีเขียวเข้ม ช่วงหมอชิต-สะพานใหม่-คูคต และช่วงแบริ่ง-สมุทรปราการคาดว่าจะเปิดให้บริการเดือนกุมภาพันธ์ ปีพ.ศ. 2563
- สายสีเขียวอ่อน ช่วงยศเส - บางหว้า คาดว่าจะแล้วเสร็จหลังปีพ.ศ. 2562
- สายสีน้ำเงิน ช่วงหัวลำโพง-บางแค คาดว่าเปิดให้บริการในเดือนเมษายน ปีพ.ศ. 2562
- สายสีม่วง ช่วงบางใหญ่-บางซื่อ พร้อมเปิดให้บริการในเดือนสิงหาคม ปีพ.ศ. 2559
- สายสีส้ม ช่วงศูนย์วัฒนธรรม-มีนบุรี คาดว่าจะก่อสร้างเสร็จในปีพ.ศ. 2565

จากการรายงานความคืบหน้าโครงการรถไฟฟ้าสายต่างๆของหน่วยงานที่รับผิดชอบ ทั้งสำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (สนข.) กองการขนส่ง สำนักการจราจรและขนส่งกรุงเทพมหานคร และการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย และข่าวสารต่างๆสามารถสรุปความคืบหน้าของโครงการได้ดังตารางที่ 2.3 โดยจำนวนรถที่นอกเหนือจากตารางที่ 2.2 จะได้มาจาก

รายงานการศึกษาและเปรียบเทียบการดำเนินงานของศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า [1] ที่มีการคำนวณจากระยะทางและความถี่ในการเดินรถ

ตารางที่ 2.3 รายละเอียดโครงการรถไฟฟ้าที่จะเปิดให้บริการตั้งแต่ปีพ.ศ. 2559 ถึงปีพ.ศ.2572 [1]

รถไฟฟ้า	ช่วง	ระยะทาง (กม.)	ปีที่ (คาดว่าจะ) เปิดให้บริการ	จำนวนรถ (ขบวน)
สายสีแดงเข้ม	บางซื่อ-รังสิต-ธรรมศาสตร์	36.3	2559	8 *
	บางซื่อ-หัวลำโพง	6.5	2562	2 *
	หัวลำโพง-บางบอน	18	2572	8 *
	บางบอน-มหาชัย	20		
สายสีแดงอ่อน	บางซื่อ-พญาไท-มักกะสัน	9	2562	10 *
	มักกะสัน-หัวหมาก	10		
	บางซื่อ-ตลิ่งชัน	15		
	ตลิ่งชัน-ศาลายา	14		
	ตลิ่งชัน-ศิริราช	6	2572	2 *
แอร์พอร์ตลิงค์	พญาไท-มักกะสัน-สุวรรณภูมิ	28.5	มกราคม 2554	9
	ดอนเมือง-บางซื่อ-พญาไท	21.8	2562	4 *
สายสีเขียวเข้ม	หมอชิต-อ่อนนุช	16.5	ธันวาคม 2542	35
	อ่อนนุช-แบริ่ง	5.3		
	หมอชิต-สะพานใหม่-คูคต	18.4	กุมภาพันธ์ 2563	17 **
	แบริ่ง-สมุทรปราการ	12.8	กุมภาพันธ์ 2563	10 **
	คูคต-ลำลูกกา	6.5	2572	20 *
	สมุทรปราการ-บางปู	7	2572	
สายสีเขียวอ่อน	สนามกีฬาแห่งชาติ-สะพานตากสิน	7	2553	17
	สะพานตากสิน-ถนนตากสิน	2.2		
	ถนนตากสิน-บางหว้า	5.3		
	สนามกีฬา-ยศเส	1	2572	7 *
	บางหว้า-ตลิ่งชัน	7.5		
สายน้ำเงิน	บางซื่อ-หัวลำโพง	20	กรกฎาคม 2547	19
	บางซื่อ-ท่าพระ	13	เมษายน 2562	28 **
	หัวลำโพง-บางแค	14		
	บางแค-พุทธมณฑลสาย4	8	2572	7 *
สายสีม่วง	บางใหญ่-บางซื่อ	23	สิงหาคม 2559	21 **
	เตาปูน-วงแหวนกาญจนาภิเษก	23.6	กันยายน 2562	24 **

รถไฟฟ้า	ช่วง	ระยะทาง (กม.)	ปีที่ (คาดว่าจะ) เปิดให้บริการ	จำนวนรถ (ขบวน)
สายสีส้ม	ตลิ่งชัน-ศูนย์วัฒนธรรม	17.5	2565	48 **
	ศูนย์วัฒนธรรม-มีนบุรี	20		

() จำนวนรถไฟฟ้าจากการคำนวณในรายงานการศึกษาและเปรียบเทียบการดำเนินงานของศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า

(*) จำนวนรถไฟฟ้าที่ใช้ดำเนินการในปัจจุบัน

(**) จำนวนรถไฟฟ้าตามเอกสาร การประชุมเชิงปฏิบัติการ “บทบาทของหน่วยงานภาครัฐในการร่วมพัฒนาระบบรถไฟฟ้าขนส่งมวลชน”

2.2 งานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า

ระบบรางหรือระบบรถไฟฟ้าเป็นระบบให้ความสำคัญกับการตรงต่อเวลาและความปลอดภัยในการเดินทาง ดังนั้นการซ่อมบำรุงที่เพียงพอจึงเป็นปัจจัยสำคัญ [3, 5] การทำงานซ่อมบำรุงเป็นการรักษาสภาพของรถไฟฟ้าให้ดีอยู่เสมอ

บทบาทที่สำคัญของหน่วยงานซ่อมบำรุงไม่เพียงแต่ต้องซ่อมบำรุงได้อย่างรวดเร็วเมื่อเกิดภาวะฉุกเฉินขึ้น และสามารถป้องกันการหยุดชะงักของเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ได้เท่านั้น แต่จะต้องสามารถบำรุงรักษาให้พร้อมในการใช้งานอยู่เสมอ รวมทั้งสามารถใช้งานได้อย่างดีที่สุด ดังนั้นเป้าหมายที่สำคัญของการซ่อมบำรุง [15] คือ

1) ความพร้อมในการใช้งานของเครื่องจักรและอุปกรณ์
2) สภาพในการใช้งานของเครื่องจักรและอุปกรณ์ให้เครื่องจักรและอุปกรณ์สามารถใช้งานได้อย่างดีที่สุด
3) การใช้ทรัพยากรในการซ่อมบำรุงอย่างคุ้มค่า
4) เพื่อยืดอายุการใช้งานของเครื่องจักรให้ได้นานที่สุด
5) การจัดเก็บชิ้นส่วนสำรองในคลังให้น้อยที่สุด
6) ความสามารถในการเข้าทำงานซ่อมบำรุงอย่างรวดเร็ว

งานซ่อมบำรุงแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ การซ่อมเมื่อเสีย (Run to Failure) และการซ่อมแบบป้องกันการเสีย (Preventive Maintenance) [4, 15]

- หลักการของการจัดการซ่อมเมื่อเสียเป็นหลักการที่ง่ายและตรงไปตรงมา กล่าวคือ เมื่อเครื่องจักรขัดข้องหรือไม่สามารถทำงานต่อได้ ก็จะทำการซ่อมบำรุงเครื่องจักรนั้น หรือถ้าหากเครื่องจักรสามารถทำงานได้อยู่ ก็จะไม่ทำการซ่อมบำรุงได้ การซ่อมบำรุงแบบซ่อมเมื่อเสียจะไม่มีค่าใช้จ่ายจนกระทั่งเครื่องจักรชำรุด ไม่สามารถดำเนินงานต่อได้ ทำให้การซ่อมบำรุงแต่ละครั้งเกิดค่าใช้จ่ายสูง ซึ่งเกิดจากค่าใช้จ่าย

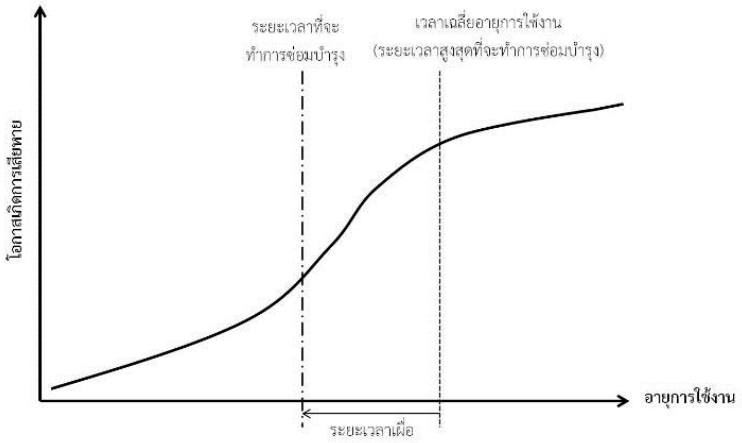
ในการจัดเก็บชิ้นส่วน ค่าแรงงานการทำงานล่วงเวลา และค่าใช้จ่ายในการหยุดเครื่องจักรที่ทำให้ไม่สามารถทำงานต่อได้

- หลักการของการซ่อมบำรุงแบบป้องกันการเสีย คือจะทำการซ่อมบำรุงขณะที่เครื่องจักรยังสามารถใช้งานได้ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหาย ซึ่งระยะเวลาในการกำหนดงานซ่อมบำรุงต้องสามารถประมาณการได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ในการประมาณการเวลารวมถึงการพิจารณาทรัพยากรในการซ่อมบำรุงจะอาศัยคำแนะนำจากผู้ผลิตเครื่องจักร มาตรฐานการซ่อมบำรุง การศึกษาโดยใช้เวลาและการเคลื่อนไหว และประสบการณ์หรือข้อมูลทางสถิติ ซึ่งประสบการณ์ถือว่าเป็นส่วนสำคัญที่สุด โดยจะต้องมีการวิเคราะห์ข้อมูลอย่างรอบคอบให้แน่ใจว่าแนวทางดังกล่าวเป็นแนวทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งาน

งานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า ส่วนประกอบหรืออุปกรณ์แต่ละชนิดจะมีวิธีและหลักการในการซ่อมบำรุงที่แตกต่างกัน การซ่อมบำรุงชิ้นส่วนต่างๆจึงต้องคำนึงถึงความเหมาะสมในการซ่อมและช่วงเวลาในการซ่อม นอกจากการซ่อมบำรุงมีบทบาทสำคัญในการดูแลความปลอดภัยแล้ว ยังช่วยให้การบริการเดินรถเป็นไปอย่างราบรื่น การซ่อมบำรุงเป็นสิ่งสำคัญและมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง ดังนั้นการใช้ทรัพยากรในการซ่อมบำรุงจึงควรมีการจัดการที่ดี เพื่อให้มีประสิทธิในการซ่อมบำรุงที่สูงที่สุด ประหยัดงบประมาณแต่มีความปลอดภัยต่อยผู้ใช้บริการ ดังนั้นการบำรุงรักษามีวัตถุประสงค์ที่สำคัญ คือ ชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์ต่างๆสามารถใช้งานได้ มีสมรรถนะในการทำงานสูง และปลอดภัยในการใช้งาน

ในการซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า งานซ่อมบำรุงสามารถแบ่งเป็น 3 ประเภท [4, 15] คือ การบำรุงรักษาเชิงแก้ไข (Corrective Maintenance) การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventative Maintenance) และการซ่อมบำรุงใหญ่ (Overhaul) การบำรุงรักษาเชิงแก้ไข เป็นการซ่อมบำรุงเมื่อรถไฟฟ้าเกิดความชำรุดเสียหายโดยไม่สามารถคาดการณ์ไว้ล่วงหน้า หรือเรียกได้ว่าเป็นเหตุการณ์ฉุกเฉิน การบำรุงรักษาเชิงแก้ไขเป็นการซ่อมแซมเพื่อแก้ไขในส่วนที่ชำรุด หรือเสียหายให้สามารถกลับมาดำเนินการได้อย่างเป็นปกติ การชำรุดเสียหายของชิ้นส่วนภายในรถไฟฟ้าอาจส่งผลให้เกิดการหยุดชะงักของระบบรถไฟฟ้า หรือเกิดอุบัติเหตุร้ายแรงได้ ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันจึงต้องมีการตรวจสอบหรือบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งเรียกว่า การบำรุงเชิงป้องกัน การบำรุงรักษาเชิงป้องกันเป็นงานซ่อมบำรุงที่มีการวางแผนงานที่แน่นอน มีการกำหนดระยะห่างของการซ่อมบำรุงแต่ละครั้ง โดยบริษัทเดินรถไฟฟ้าจะมีการกำหนดงานซ่อมบำรุง วัน เวลา สถานที่ และ ผู้ปฏิบัติการ การบำรุงรักษาเชิงป้องกันมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ

- การซ่อมบำรุงโดยใช้ระยะเวลาเป็นตัวกำหนด (Time Based or Fixed Time Maintenance) เป็นการซ่อมบำรุงอย่างสม่ำเสมอทุก 1 สัปดาห์ 10 วัน หรือ 3 เดือน เป็นต้น โดยการซ่อมบำรุงจะเป็นการตรวจสอบหรือการเปลี่ยนชิ้นส่วนตามแผนการบำรุงรักษา การบำรุงรักษารายวัน เช่น การทำความสะอาด การตรวจเช็คด้วยสายตา หรือการบำรุงรักษาตามระยะเวลาอื่นๆ เช่น การบำรุงรักษาแบตเตอรี่ทุก 3 เดือน การบำรุงรักษาชิ้นส่วนต่างๆจะมีระยะเวลาความห่างในการซ่อมบำรุงที่ไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับชนิดของชิ้นส่วนนั้นๆ การซ่อมบำรุงเชิงป้องกันตามระยะเวลาจะต้องคาดการณ์ว่า ควรจะดำเนินการซ่อมบำรุงเมื่อใดไม่ให้ชิ้นส่วนชำรุดเสียหายหรือเสื่อมสภาพก่อน เพื่อลดความเสี่ยงในการสร้างความเสียหายขณะดำเนินการหรือเดินรถ การบำรุงรักษาด้วยวิธีนี้ใช้เวลาเป็นตัวกำหนดจึงต้องใช้ข้อมูลทางด้านสถิติเพื่อหาอายุการใช้งานที่เกิดความเสียหายโดยเฉลี่ยของชิ้นส่วนต่างๆภายในรถไฟฟ้า และควรกำหนดระยะเผื่อ เนื่องจากชิ้นส่วนต่างๆอาจจะเกิดการชำรุดก่อนหรือหลังช่วงเวลาดังกล่าว ดังรูปที่ 2.7 ถ้ากำหนดระยะเวลาเผื่อมากเกินไป หรือน้อยเกินไป ก็อาจจะเกิดความสิ้นเปลืองหรือเสียหายขึ้นได้

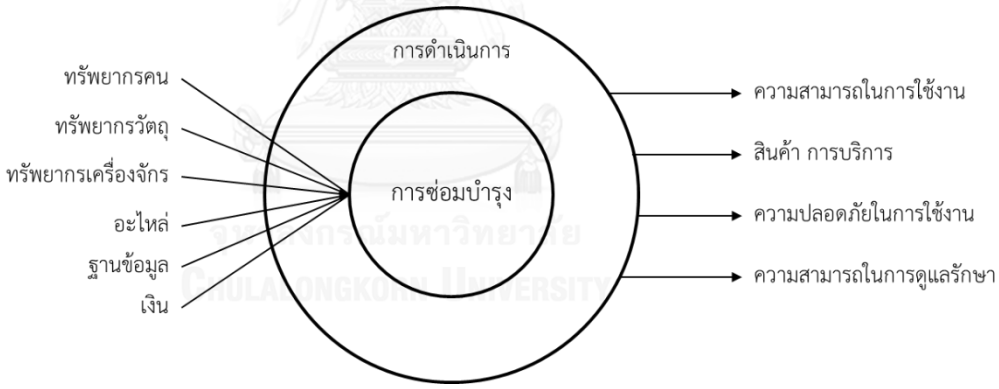


รูปที่ 2.7 ความเสียหายของอุปกรณ์ต่างๆ [4]

- การซ่อมบำรุงโดยตรวจสอบสภาพ (Condition Based : CBM) เป็นการซ่อมบำรุงชิ้นส่วน หรืออุปกรณ์ตามสภาพของอุปกรณ์ โดยอ้างอิงจากพื้นฐานข้อมูลในอดีตในการกำหนดระดับการบำรุงรักษา หรืออาศัยสัญญาณเตือน เช่น อุณหภูมิชิ้นส่วน ความถี่ในการสั่นสะเทือน ความผิดปกติของชิ้นส่วนต่างๆเป็นต้น

การซ่อมบำรุงใหญ่ (Overhaul) คือการซ่อมบำรุงที่มีการถอดอุปกรณ์ออกมาตรวจสอบ ปรับปรุง หรือเปลี่ยนใหม่ เป็นการซ่อมบำรุงครั้งสำคัญ โดยจะกำหนดเป็นระยะเวลาหรือระยะการใช้งาน เช่น ทุก 8 ปี หรือ ทุก 1,000,000 กม. ขอบเขตงานซ่อมบำรุงใหญ่ของรถไฟ เช่น โบกี้ ระบบกันสะเทือน ระบบเบรก ระบบปรับอากาศ ระบบจ่ายลม มอเตอร์ขับเคลื่อน ห้องเกียร์ ชุดรับกระแสไฟ เป็นต้น การซ่อมบำรุงใหญ่จะมีการกำหนดกรอบเวลาการทำงานที่แน่นอน ปัจจัยที่สำคัญในการวางแผนซ่อมบำรุงของชิ้นส่วนต่างๆคือ อายุอุปกรณ์ หรืออายุใช้งาน

งานซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน และงานซ่อมบำรุงใหญ่ มีความสำคัญในลดโอกาสการเกิดเหตุฉุกเฉินหรือการเกิดความเสียหายที่ไม่คาดคิดให้มากที่สุด และสร้างความมั่นใจว่าระบบรถไฟฟ้าอยู่ในสภาพที่ดี สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [15] ซึ่งงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันและงานซ่อมบำรุงใหญ่เป็นงานซ่อมบำรุงที่ต้องมีการวางแผนและกำหนดเวลาในการทำงาน ในการบริหารงานซ่อมบำรุง [16] จากรูปที่ 2.8 จะเห็นว่า ส่วนประกอบสำคัญในการซ่อมบำรุงได้แก่ ทรัพยากรคน ทรัพยากรวัตถุ ทรัพยากรเครื่องจักร อะไหล่ ฐานข้อมูลและเงิน โดยมีวัตถุประสงค์การซ่อมบำรุงเพื่อให้เกิดความคล่องตัวในการดำเนินงาน คุณภาพของรถไฟฟ้า และความปลอดภัยในการทำงาน ซึ่งจะเป็นตัวชี้วัดสำคัญทางกำไรในการประกอบธุรกิจ



รูปที่ 2.8 ระบบซ่อมบำรุง [14]

ระบบการซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 4 องค์ประกอบหลัก [16] คือ

- ส่วนประกอบของรถไฟฟ้า โดยรถไฟฟ้ามีอายุการใช้งานเฉลี่ยประมาณ 30-40 ปี
- ระบบการสื่อสาร
- ฐานข้อมูล ฐานข้อมูลจะต้องเก็บรวบรวมข้อมูลไว้ใช้ตลอดอายุการใช้งานของรถไฟฟ้าหรือยาวนานกว่านั้น ส่วนใหญ่จะการเก็บข้อมูลโดยใช้เทคโนโลยี SQL โดยข้อมูลรถไฟฟ้าและส่วนประกอบของรถไฟฟ้าจะแตกต่างกันออกไปตามผู้ผลิต
- โปรแกรม เป็นส่วนที่ทำให้สามารถเข้าถึงฐานข้อมูลได้สะดวกขึ้น หรือเป็นหน้าต่างการใช้งาน

ในการซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าของแต่ละศูนย์ซ่อมบำรุงจะมีแผนการซ่อมบำรุงที่แตกต่างกันออกไปเช่น ในการซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าของระบบขนส่งมวลชนในลอนดอน [17] พบว่างานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันของระบบดูแลรถไฟฟ้าแบ่งเป็น 6 ระดับคือ

1. การทดสอบในเวลากลางคืนของอุปกรณ์ความปลอดภัย และกวาดฝุ่นละออง
2. การตรวจสอบทุก 7 หรือ 14 วันโดยผู้ตรวจสอบ 2-3 คน ครอบคลุมรถไฟประมาณ 6-8 คัน ใช้เวลาประมาณรวม 5.7 คน-ชั่วโมง
3. การตรวจสอบทุก 18 ถึง 36 สัปดาห์
4. การตรวจสอบทุก 2 หรือ 4 ปี
5. การซ่อมบำรุงกึ่งการซ่อมบำรุงใหญ่ทุก 9 ปี
6. การซ่อมบำรุงทุก 18 ปีเป็นการซ่อมบำรุงครึ่งอายุการใช้งานของรถไฟ

หรือในการซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าของบริษัทโตเกียวเมโทรจะแบ่งการซ่อมบำรุงออกเป็น 2 แบบ [1] คือ

1. การซ่อมบำรุงใหญ่ (Overhaul)

- การซ่อมบำรุงทุก 4 ปี (Principal Parts Overhaul) เป็นการตรวจสอบโดยถอดเฉพาะชิ้นส่วนที่สำคัญในการตรวจสอบและซ่อมแซม
- การซ่อมบำรุงทุก 8 ปี (Complete Overhaul) เป็นการตรวจสอบอย่างละเอียดมีการถอดชิ้นส่วนต่างๆเพื่อตรวจสอบและซ่อมแซม

2 การตรวจสอบ (Inspection) เป็นการตรวจสอบตามเวลาในทุก 10 วัน และทุก 3 เดือน

ซึ่งจะเห็นได้ว่าข้อมูลในการซ่อมบำรุงจะแตกต่างกันออกไปตามรูปแบบการดำเนินการ โดยในงานวิทยานิพนธ์นี้จะอ้างอิงจากงานวิจัยการศึกษาและเปรียบเทียบงานซ่อมบำรุงขบวนรถไฟฟ้าและล้อเลื่อน

ปัจจุบันรถไฟฟ้าในประเทศไทยส่วนใหญ่แต่ละขบวนประกอบด้วย 3 ตู้รถไฟฟ้า ตู้รถไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ

- A-Car เป็นตู้รถไฟฟ้าที่มีระบบขับเคลื่อน และระบบควบคุมหรือห้องคนขับ
- B-Car เป็นตู้รถไฟฟ้าที่มีระบบขับเคลื่อน แต่ไม่มีระบบควบคุมหรือห้องคนขับ
- C-Car เป็นตู้รถไฟฟ้าที่ไม่มีระบบขับเคลื่อนและระบบควบคุมหรือห้องคนขับ แต่จะมีแหล่งจ่ายไฟฟ้าสำหรับระบบปรับอากาศ และระบบแสงสว่างภายในห้องโดยสาร

เช่น รถไฟฟ้าเอ็มอาร์ทีจะมีการเรียงตู้รถไฟแบบ A-Car C-Car และA-Car ตามลำดับ ยกเว้น รถไฟฟ้าบีทีเอส ใน 1 ขบวนจะมีทั้งหมด 4 ตู้รถไฟ และมีการเรียงแบบ A-Car C-Car C-Car และ A-Car ตามลำดับ

Chulalongkorn University

ระบบดูแลตัวรถไฟจะรับผิดชอบภายในรถไฟฟ้าการบำรุงรักษาระบบดูแลตัวรถไฟเพื่อให้รถไฟฟ้าสามารถดำเนินการได้ตามปกติ และหลีกเลี่ยงการเกิดความผิดพลาดหรือการชำรุดเสียหายในขณะใช้งาน แต่หากเกิดเหตุการณ์ความเสียหายขึ้น จะต้องสามารถแก้ปัญหาได้อย่างรวดเร็วและปลอดภัย โดยระบบดูแลตัวรถไฟฟ้าจะมีส่วนประกอบของรถไฟฟ้าที่รับผิดชอบดังนี้

- โครงหลัก (Main Frame) โครงสร้างหลักที่ใช้ยึดโบกี้ และตัวถังตู้โดยสารเข้าด้วยกันเป็นขบวนรถไฟ โดยส่วนใหญ่ โครงหลักจะสร้างจากเหล็กกล้า
- ตู้รถไฟ (Car Body) คือตัวโครงสร้างหลักของตู้รถไฟ ส่วนประกอบของตู้รถไฟได้แก่ หลังคา ผนังด้านข้าง แผ่นพื้น และแผ่นปิดหัวท้าย
- อุปกรณ์ภายในตู้รถไฟ (Car Interior) คือส่วนตกแต่งภายในของตู้รถไฟ เช่น ส่วนหุ้มผนังห้องโดยสาร เพดานห้องโดยสาร ระบบส่องสว่างภายในกระจกนิรภัย ราวจับและชั้นวางของ ที่นั่ง และอื่นๆ
- อุปกรณ์ภายนอกตู้รถไฟ (Car Exterior) เช่น ระบบส่องสว่าง กระจกหน้า ที่ปัดฝนและระบบล้างกระจกหน้า ป้ายบอกข้อมูลต่างๆที่ด้านหน้ารถ และอื่นๆ
- ห้องควบคุมรถ (Operator's Cab) เป็นส่วนของห้องควบคุมรถ
- โบกี้ (Bogie) เป็นส่วนสำคัญที่รองรับตู้รถไฟไว้และประกอบด้วยระบบขับเคลื่อน เบรกและระบบกันสะเทือน โดยมีส่วนประกอบคือ โครงสร้างโบกี้ ระบบขับเคลื่อน ล้อ และเพลา ส่วนเชื่อมต่อโบกี้ ระบบห้ามล้อ ระบบกันสะเทือน และอุปกรณ์อื่นๆ ที่ติดตั้งบริเวณโบกี้
- ระบบห้ามล้อ (Braking System) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ห้ามล้อของขบวนรถไฟ จะถูกติดตั้งในโบกี้และบางส่วนอยู่ด้านล่างของตู้โดยสาร
- ระบบขับเคลื่อน (Traction System) ในรถไฟจะใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับแบบเหนี่ยวนำ จะควบคุมความเร็วของมอเตอร์โดยที่ปลายเพลาจะติดตั้งเฟืองขับส่งกำลังผ่านเกียร์ที่ติดตั้งอยู่บนเพลาล้อ ทำให้ล้อหมุนเคลื่อนที่ไปได้
- เครื่องพ่วง (Coupler) เป็นชิ้นส่วนที่ใช้ต่อเชื่อมตู้รถไฟ
- ระบบประตู (door system) คือระบบประตูสำหรับผู้โดยสารประตูสำหรับคนขับประตูระหว่างตู้รถไฟฟ้าและประตูฉุกเฉินในรถไฟฟ้า
- ระบบส่องสว่าง (lighting)
- ระบบปรับอากาศและระบายอากาศ (air condition and ventilation system)
- ระบบผลิตและจ่ายลม (pneumatic system or air supply system)
- ระบบไฟฟ้า (electrification and power supply system)

งานบำรุงรักษาส่วนประกอบของรถไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 5 ส่วนสำคัญ [6] คือ

1. การบำรุงรักษาโบกี้ (Bogie Maintenance) รายละเอียดงานแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 งานซ่อมบำรุงรักษาโบกี้

Submodule	Task	Interval	Type Car	Duration (hr/train)
Gear Box	การเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเกียร์	ทุก 1 ปี	A-Car	32
Wheelset	การเปลี่ยนล้อ และตรวจสอบรอยแตกของเพลา	ทุก 5 ปี	A-Car & C-Car	42
Traction Motor	Disassemble Parts and Bearing Replacement	ทุก 6 ปี	A-Car	64
Bearing Box	การเปลี่ยนแหวนรอง และ อัดจาระบี	ทุก 6 ปี	A-Car	16
Air Spring	การเปลี่ยน Air Spring	ทุก 6 ปี	A-Car & C-Car	21
Torsion Bar	การบำรุงรักษาเหล็กกันโคลง เปลี่ยนชิ้นส่วน ไซเลนท์ บล็อก (Silent Block) และแท่งบิด (Torsion Bar)	ทุก 6 ปี	A-Car & C-Car	12
Bogie Frame	การบำรุงรักษา Bogie Frame	ทุก 12 ปี	A-Car & C-Car	84

2. การบำรุงรักษาระบบปรับอากาศ (Air Condition) รายละเอียดงานแสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 งานซ่อมบำรุงระบบปรับอากาศ

Submodule	Task	Interval	Type Car	Duration (hr/train)
Air Condition	การบำรุงรักษาระบบปรับอากาศ	ทุก 6 ปี	A-Car & C-Car	18
Air Condition	การบำรุงรักษาระบบปรับอากาศ	ทุก 9 ปี	A-Car & C-Car	24
Air Condition	การบำรุงรักษาระบบปรับอากาศ	ทุก 12 ปี	A-Car & C-Car	24

3. การบำรุงรักษาประตูผู้โดยสาร (Passenger Door) รายละเอียดงานแสดงดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 งานซ่อมบำรุงระบบประตูผู้โดยสาร

Submodule	Task	Interval	Type Car	Duration (hr/train)
Passenger Door	การบำรุงรักษาประตูผู้โดยสาร	ทุก 1 ปี	A-Car & C-Car	12

4. การบำรุงรักษาแบตเตอรี่ (Battery) รายละเอียดงานแสดงดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 งานซ่อมบำรุงแบตเตอรี่

Submodule	Task	Interval	Type Car	Duration (hr/train)
Battery	การบำรุงรักษาแบตเตอรี่	ทุก 6 เดือน	C-Car	4

5. การบำรุงรักษาเครื่องอัดอากาศ (Air Compressor) รายละเอียดงานแสดงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 งานซ่อมบำรุงเครื่องอัดอากาศ

Submodule	Task	Interval	Type Car	Duration (hr/train)
Air Compressor	การบำรุงรักษาเครื่องอัดอากาศ	ทุก 1 ปี	A-Car & C-Car	3

ในแต่ละงานซ่อมบำรุงจะใช้เครื่องจักรที่แตกต่างกับไปตามตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 เครื่องจักรที่ใช้ในแต่ละกลุ่มงานซ่อมบำรุง

Module	Submodule	Task	Resource
Bogie	Gear Box	การเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเกียร์	Vehicle Door Test Stand
Bogie	Wheel Set	การเปลี่ยนล้อ และตรวจสอบรอยแตกของเพลา	Underfloor Trainset Lifting System
			Overhead Bridge Crane 100 kN
			Bogie Turntables
			Overhead Bridge Crane 20 kN
			Bearing Removal Equipment
			Movable Jacking System 10 ton
			Axle Lathe
			Hydraulic Wheel Press
Bogie	Traction Motor	Disassemble Parts and Bearing Replacement	Underfloor Trainset Lifting System
			Overhead Bridge Crane 100 kN
			Bogie Turntables

Module	Submodule	Task	Resource
			Overhead Bridge Crane 20 kN
			Bearing Removal Equipment
			Movable Jacking System 10 ton
Bogie	Bearing Box	การเปลี่ยนแหวนรอง และอัดจาระบี	Underfloor Trainset Lifting System
			Overhead Bridge Crane 100 kN
			Bogie Turntables
			Overhead Bridge Crane 20 kN
			Bearing Removal Equipment
			Movable Jacking System 10 ton
			Hydraulic Wheel Press
			Movable Jacking System 15 ton
			Bogie Preload Stand
Bogie	Air Spring	การเปลี่ยน Air Spring	Underfloor Trainset Lifting System
			Overhead Bridge Crane 100 kN
			Bogie Turntables
			Overhead Bridge Crane 20 kN
			Bearing Removal Equipment
			Movable Jacking System 10 ton
			Hydraulic Wheel Press
			Movable Jacking System 15 ton
			Bogie Preload Stand
Bogie	Torsion Bar	การบำรุงรักษาเหล็กกันโคลงเปลี่ยนชิ้นส่วน ไซเลนท์ บล็อก (Silent Block) และแท่งบิด (Torsion Bar)	Movable Jacking System 10 ton
			Train Air Conditioning Module Repair
Bogie	Bogie Frame	การบำรุงรักษา Bogie Frame	Underfloor Trainset Lifting System
			Overhead Bridge Crane 100 kN
			Bogie Turntables
			Overhead Bridge Crane 20 kN
			Bearing Removal Equipment
			Movable Jacking System 10 ton
			Hydraulic Wheel Press
			Movable Jacking System 15 ton

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Module	Submodule	Task	Resource
			Bogie Preload Stand
Air Condition	Air Condition	การบำรุงรักษาระบบปรับอากาศ	Underfloor Trainset Lifting System
			Hydraulic Wheel Press
Air Condition	Air Condition	การบำรุงรักษาระบบปรับอากาศ	Movable Jacking System 10 ton
Air Condition	Air Condition	การบำรุงรักษาระบบปรับอากาศ	Movable Jacking System 10 ton
			Train Air Conditioning Module Repair
Door	Passenger Door	การบำรุงรักษาประตูผู้โดยสาร	Underfloor Trainset Lifting System
			Overhead Bridge Crane 100 kN
			Bogie Turntables
			Overhead Bridge Crane 20 kN
			Bearing Removal Equipment
			Movable Jacking System 10 ton
Battery	Battery	การบำรุงรักษาแบตเตอรี่	electronic workshop
			battery charging equipment
Air Compressor	Air compressor	การบำรุงรักษาเครื่องอัดอากาศ	Brake and Compressor Test Equipment

2.3 การจัดตารางงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า

“การจัดตารางงาน หมายถึง การจัดสรรทรัพยากร (Resource) ที่มีอยู่อย่างจำกัดให้กับภารกิจที่กำหนดให้จำนวนหนึ่ง ภายใต้ระยะเวลาที่กำหนดให้ เพื่อที่จะทำให้องค์กรสามารถบรรลุถึงเป้าหมายหรือวัตถุประสงค์สูงสุดที่องค์กรกำหนดเอาไว้ที่เวลานั้นได้” [18] โดยทรัพยากรหมายถึงคน เครื่องจักร เครื่องมือ และอื่นๆ โดยในงานวิจัยนี้ทรัพยากรที่สนใจคือ เครื่องจักรในจัดสรรงานลงเครื่องจักรจะต้องคำนึงปริมาณงานและลำดับการทำงานของเครื่องจักรแต่ละเครื่อง งานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันและงานซ่อมบำรุงใหญ่จะมีการจัดตารางการซ่อมบำรุงโดยมี 6 ส่วนสำคัญคือ เครื่องจักร เครื่องมือ ชิ้นส่วนหรือส่วนประกอบ ความพร้อมในการดำเนินงาน ข้อมูลในการดำเนินงาน และการครอบครองพื้นที่ หรือการได้รับอนุญาตในการทำงาน ในการซ่อมบำรุงแต่ละงานจะขาดส่วนใดส่วนหนึ่งไปไม่ได้ [19]

ในการจัดสรรงานลงเครื่องจักร ส่วนใหญ่จะเป็นระบบการผลิตแบบยืดหยุ่นที่รองรับการผลิตได้หลายรูปแบบสามารถเปลี่ยนแปลงคำสั่งได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ ระบบการผลิตแบบยืดหยุน มีสวนประกอบพื้นฐาน 3 ส่วน [20] คือ

1. สถานีปฏิบัติการ (Processing Station)
2. หนวยจัดเก็บและขนยายวัสดุ (Material Handling and Storage)
3. ระบบควบคุมดวยคอมพิวเตอร (Computer Control System)

ปัญหาการจัดสรรงาน [20] เป็นการกำหนดชิ้นงานที่จะผลิต เครื่องมือที่ใช้ในการผลิต ขั้นตอนการผลิต และทรัพยากรอื่นๆที่ใช้ เช่น เครื่องมือในการจับชิ้นงาน ที่วางชิ้นงาน และอื่นๆ ในการจัดสรรหรือมอบหมายงานเพื่อให้ได้การจัดสรรงานที่เหมาะสมที่สุดจะมีเป้าหมาย 6 อย่างคือ

1. ทำให้เวลาการทำงานของแต่ละเครื่องจักรสมดุลกัน
2. ทำให้มีการเคลื่อนย้ายงานน้อยที่สุด
3. ทำให้ภาระงานที่มีต่อเครื่องจักรในกลุ่มเดียวกัน ขนาดเดียวกัน มีค่าใกล้เคียงกัน
4. ทำให้ภาระงานที่มีต่อเครื่องจักรในกลุ่มเดียวกัน ขนาดต่างกันเดียวกัน จะไม่สมดุลกัน
5. ทำให้เครื่องมืออยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน
6. ทำให้ผลรวมของความสำคัญของงานที่ดำเนินการมีค่ามากที่สุด

ปัญหาในการจัดสรรงานส่วนใหญ่กำหนดจำนวนงานและเครื่องจักร [21] โดยจะมีวัตถุประสงค์ในการจัดสรรงานแตกต่างกันออกไปเช่น การจัดสรรงานให้มีเวลาปิดงานน้อยที่สุด การจัดสรรงานให้มีความล่าช้ารวมน้อยที่สุด เป็นต้น หรือเรียกปัญหาแบบนี้ว่า ปัญหา n งาน m เครื่องจักร [22] จากบทความ [21] ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการจัดสรรงาน โดยกำหนดตัวแปร

i : เซตของตัวแทน (Agent) {1,2,3...,m}

j : เซตของงาน {1,2,3...,n}

C_{ij} : ค่าใช้จ่ายในการมอบหมายงาน j ให้กับตัวแทน i

R_{ij} : จำนวนทรัพยากรที่ต้องใช้สำหรับงาน j ของแต่ละตัวแทน i

b_i : จำนวนทรัพยากรที่แต่ละตัวแทน i มี

และตัวแปรตัดสินใจคือ X_{ij} ซึ่งมีค่า 0 หรือ 1 โดยจะมีค่าเป็น 1 เมื่อมอบหมายงาน j ให้กับตัวแทน i โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ คือ ค่าใช้จ่ายรวมที่น้อยที่สุด และมีเงื่อนไขคือ (1) มอบหมายงาน j แต่ละงานให้กับตัวแทน i ตัวแทนละ 1 งาน (2) ทรัพยากรที่ใช้น้อยกว่าทรัพยากรที่พร้อมใช้งาน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นดังนี้

Chulalongkorn University

$$Minimize \quad \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{ij} X_{ij}$$
$$s.t. \quad \sum_{i \in I} X_{ij} = 1 \qquad \forall j \in J$$
$$\sum_{j \in J} R_{ij} X_{ij} \leq b_i \quad \forall i \in I$$
$$X_{ij} \in \{0, 1\} \qquad \forall i \forall j$$

จะเห็นได้ว่าโดยส่วนใหญ่จะมีการกำหนดจำนวนงาน และจำนวนเครื่องจักรในการจัดสรรงาน แต่ในงานวิจัยนี้จะแตกต่างออกไปคือ มีการกำหนดงานในแต่ละช่วงเวลา แต่ไม่มีการกำหนดจำนวนเครื่องจักรที่ใช้ ในการจัดสรรงานในแต่ละช่วงเวลาจะพยายามให้เกิดการกระจายงานอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้การใช้งานของเครื่องจักรมีความสม่ำเสมอและมีช่างเวลาว่างงานน้อยที่สุด บทความที่เกี่ยวกับการจัดตารางการซ่อมบำรุงมีอยู่หลายบทความเช่น

- การจัดตารางงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน [5] โดยการรวมงานซ่อมบำรุงที่มีการซ่อมบำรุงเวลาเดียวกันไว้ด้วยกันเพื่อลดเวลาในการเข้าศูนย์ซ่อมบำรุง การวางแผนซ่อมบำรุงจะกำหนดงานบำรุงรักษาเชิงป้องกันตามช่วงเวลา (เดือน / สัปดาห์ / ชั่วโมง) โดยสำหรับการซ่อมบำรุงระยะยาวจะต้องทราบระยะเวลาในการซ่อมบำรุงแต่ละงาน และช่วงเวลาที่สามารถทำการซ่อมบำรุงโดยที่ไม่เร็วหรือช้าเกินไป ซึ่งในบทความนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือในส่วนแรกจะใช้การเขียนโปรแกรมทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดตารางการซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ค่าที่น้อยที่สุดของผลรวมระหว่างค่าใช้จ่ายในการครอบครอง ค่าใช้จ่ายการบำรุงรักษา และค่าปรับเมื่อไม่สามารถทำการซ่อมบำรุงได้ตามเวลา รูปแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับหาผลเฉลยมีความซับซ้อนมาก ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาในการหาคำตอบส่วนที่ 2 จึงใช้ฮิวริสติก 4 วิธีในการแก้ปัญหา โดยแบ่งออกเป็น 2 วิธีสำหรับแก้ปัญหาการจัดตารางการซ่อมบำรุงเชิงป้องกัน ได้แก่ 1) Single Component Strategy เริ่มต้นด้วยการจัดตารางเวลาที่ดีที่สุดสำหรับแต่ละงานประจำ โดยกำหนดระยะห่างระหว่างการซ่อมบำรุงแต่ละครั้งเป็นค่าคงที่ โดยในขั้นตอนนี้จะไม่สนใจความเป็นไปได้ในการทำงาน แต่จะมุ่งเน้นการจัดตารางของแต่ละงาน และ 2) Most Frequent Work First Heuristic เริ่มต้นด้วยการจัดตารางงานประจำที่มีความถี่สูงที่สุดก่อนแล้วค่อยจัดงานอื่นๆ จะเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายโดยรวมที่น้อยที่สุด โดยกำหนดระยะห่างระหว่างการซ่อมบำรุงแต่ละครั้งเป็นค่าคงที่ เช่นเดียวกับวิธีแรก หลังจากที่จัดตารางงานประจำเสร็จจึงทำการกำหนดตารางการซ่อมบำรุงระยะยาว ในอีก 2 วิธีสำหรับแก้ปัญหาการจัดตารางการซ่อมบำรุงเชิงป้องกันที่มีข้อกำหนดสำหรับเวลาการทำงาน ได้แก่ 1) Opportunity-based Heuristic เป็นรูปแบบการบำรุงรักษาที่ขึ้นอยู่กับโอกาส การชำรุดหรือเสียหายของระบบเป็นตัวกำหนดการซ่อมบำรุงเชิงป้องกันโดยรวมกิจกรรมที่วางแผนและไม่ได้วางแผนเข้าด้วยกัน ในการวางแผนเบื้องต้นจะกำหนดเวลาครั้งแรกของการซ่อมบำรุงที่มีความถี่สูงสุด หลังจากนั้นจะตรวจสอบความเหมาะสมของการซ่อมบำรุงทุกงานลงในตารางเวลาของการทำงาน ซึ่งสามารถ

ลดค่าใช้จ่ายได้มากกว่าการแยกงาน และเวลาในการครอบครองรถน้อยลง และ 2) Most Costly Work First Heuristic เริ่มต้นจากการจัดงานที่มีค่าใช้จ่ายสูง การจัดตารางเบื้องต้นจะเปลี่ยนเวลาการดำเนินการของการซ่อมบำรุง เช่นในตอนสุดท้าย งานทั้งหมดที่ระบุไว้จะต้องดำเนินการ ถึงแม้ว่าจะส่งผลให้ต้นทุนการบำรุงรักษาเพิ่มสูงขึ้น ความแตกต่างที่สำคัญระหว่างที่สองฮิวริสติกคือ อันแรกจะเลื่อนการดำเนินงานของงานประจำให้ใกล้กับโอกาสที่เป็นไปได้มากที่สุด แต่อันสุดท้ายคือ สามารถเลื่อนการดำเนินการไปข้างหน้า ถึงแม้ว่าการดำเนินการนี้จะทำให้ค่าใช้จ่ายสูงขึ้นก็ตาม

- บทความทางวิชาการที่เขียนโดย B.M. Worrall และ B. Mery [23] ได้เปรียบการวางแผนงานซ่อมบำรุงและการจัดตารางงานซ่อมบำรุงเหมือนกับการวางแผนงานในระบบผลิตแบบตามงาน (Job Shop) ซึ่งสามารถแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ งานเร่งด่วน (Emergency) เป็นงานที่ต้องทำทันที และงานไม่เร่งด่วน (Non-Emergency) เป็นงานที่สามารถเลื่อนการทำงานออกไปได้ การจัดตารางงานของระบบซ่อมบำรุงจะจัดตามลำดับความสำคัญ ปริมาณงานที่ค้างอยู่ภายในระบบ และปริมาณงานที่คาดการณ์ว่าจะเกิดขึ้นในอนาคต ซึ่งการจัดลำดับความสำคัญของงานจะขึ้นอยู่กับ 3 ปัจจัยคือ เวลาที่คงเหลือของแต่ละงาน น้ำหนักของการมอบหมายงาน และความสำคัญของงาน

- การจัดตารางเพื่อจำกัดการเดินรถเปล่าให้น้อยที่สุดจะเป็นการลดต้นทุนระบบดูแลรถไฟ [19] เงื่อนไขในการจัดตารางเพื่อให้เกิดการเดินรถเปล่าน้อยที่สุดมีอยู่ 3 อย่างคือ เส้นทางเดินรถ จำนวนรถไฟฟ้าที่เข้าโหนดเท่ากับจำนวนรถไฟฟ้าที่ออกจากโหนด และเงื่อนไขการซ่อมบำรุง เงื่อนไขการซ่อมบำรุงมีหลายเงื่อนไข เช่น การคำนวนระยะทางในการเดินรถของรถไฟฟ้าแต่ละคัน การกำหนดงานซ่อมบำรุงและการคำนวนระยะทางใหม่หลังจากการซ่อมบำรุงงานนั้นแล้ว และการกำหนดขอบล่าง-ขอบบนสำหรับการซ่อมบำรุง

- การจัดตารางการดำเนินการ และการซ่อมบำรุงเชิงป้องกันสำหรับเรือบรรทุกสินค้า [24] จะต้องจัดตารางงานซ่อมบำรุงให้สอดคล้องกับตารางการเดินเรือ การจัดตารางเวลาในการดำเนินการจะระบุเวลาในการทำงานของแต่ละระบบย่อย และการจัดเวลาในการซ่อมบำรุงจะกำหนดเวลาในการเริ่มทำงาน (Start Time) และเวลาสิ้นสุดของแต่ละงานซ่อมบำรุง ซึ่งเวลาสิ้นสุดของงานซ่อมบำรุงนั้นจะขึ้นอยู่กับตารางการดำเนินการข้อจำกัด 4 ประการในการจัดตารางคือ (1) ความต้องการของระบบย่อย (2) ความพร้อมของทรัพยากรคน (3) เวลาในการทำงานที่มีอยู่อย่างจำกัด และ (4) ระยะห่างของเวลาในการซ่อมบำรุงแต่ละครั้งการจัดตารางจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อกำหนดให้เวลาที่งานเสร็จใกล้กับกำหนดการมากที่สุด ไม่เสร็จ

ก่อนหรือเสร็จหลังกำหนดการมากเกินไป พบว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีความซับซ้อนมาก จึงแก้ปัญหาโดยใช้ฮิวริสติก ฮิวริสติกที่ใช้ในการจัดตารางแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการสร้างตารางงาน ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อยคือสร้างตารางการดำเนินการของระบบย่อย กำหนดเวลาเวลาสิ้นสุดของงาน และกำหนดเวลาเริ่มต้นของงาน ในขั้นตอนที่ 2 จะเป็นการพัฒนาตารางซ่อมบำรุง ซึ่งแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนย่อยคือ การจัดเรียงลำดับการดำเนินการและการเปลี่ยนลำดับงานในระบบย่อยถ้าหากค่าความแตกต่างระหว่างกำหนดการกับเวลาทำงานลดลง

- การจัดตารางการซ่อมบำรุงเชิงป้องกันโดยใช้ทาบู (TABU) [25] พีเอ็มทาบู (PM-Tabu) ดำเนินการโดยเริ่มจากการเพิ่มงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันลงในตารางงาน การลดหรือการยกเลิกงานซ่อมบำรุงเชิงป้องกันในตารางงาน และการแลกเปลี่ยนการมอบหมายงาน ฮิวริสติกที่ใช้เป็นการจัดตารางการซ่อมบำรุงเพื่อให้ผลรวมของความสำคัญของงานที่ถูกจัดตารางมีค่าสูงสุดภายใต้ข้อจำกัดด้านความพร้อมใช้งานของทรัพยากร เงื่อนไขในการจัดตารางที่สำคัญคืองานจะถูกมอบหมายในแต่ละตารางงานซ่อมบำรุงครบถ้วน และงานที่ถูกมอบหมายต้องไม่เกินกว่าความพร้อมในการใช้งาน ในการแก้ปัญหาจะใช้ฮิวริสติกทั้งหมด 4 ฮิวริสติกโดยแบ่งเป็น 2 ฮิวริสติกสำหรับจัดประเภทงาน ฮิวริสติกแรกจัดประเภทงานซ่อมบำรุงตามลำดับความสำคัญและมอบหมายงานเป็นลำดับแรกสุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ฮิวริสติกที่ 2 จัดลำดับงานโดยให้ความสำคัญกับเวลาในการซ่อมบำรุง และฮิสลิสติกที่ 3 และ 4 เป็นการมอบหมายงานให้เปอร์เซ็นในการทำงานเทียบกับเวลาที่มีอยู่มีค่ามากที่สุด

แต่เนื่องจากในการซ่อมบำรุงแต่ละงานของรถไฟฟ้าจะต้องใช้เครื่องจักรหลายเครื่องพร้อมกัน ในการกำหนดเวลางานซ่อมบำรุงจึงต้องคำนึงถึงความสามารถในการทำงานของเครื่องจักรด้วย การจัดตารางซ่อมบำรุงจะต้องระบุเครื่องจักรที่ใช้งาน ไม่ให้เกิดการใช้งานที่ซ้อนทับกัน โดยที่เครื่องจักรแต่ละประเภทอาจจะมีจำนวนหลายเครื่อง วัตถุประสงค์ในการจัดตารางมีหลายแบบแตกต่างกันออกไปเช่น การจัดตารางเพื่อหาวันกำหนดส่งงาน หรือการจัดตารางเพื่อให้เวลาของงานที่อยู่ในระบบน้อยที่สุด เป็นต้น จากบทความ “A genetic algorithm for minimizing the makespan in the case of scheduling identical parallel machines” ได้เสนอวิธีการจัดตารางเพื่อให้เวลาในการปิดงานมีค่าน้อยที่สุด โดยกำหนดให้มี n งานและใช้ m เครื่องจักร ซึ่งจะมีเวลาในการทำงานที่คงที่ [26] และ บทความ “Scheduling a music rehearsal problem with un equal music piece length” ได้เสนอการจัดตารางซ้อมของนักดนตรีซึ่งมีความคล้ายคลึงกับการจัดตารางแบบเครื่องจักรขนาน โดยจะเป็นการจัดตารางการซ้อมของนักดนตรีเพื่อให้นักดนตรีแต่ละคนมีวันซ้อมน้อยที่สุด ในแต่ละเพลงจะมีนักดนตรีและความยาวของเนื้อเพลงแตกต่างกันออกไป [27]

2.4 แบบจำลองเชิงเส้นแบบจำนวนเต็ม (Integer Programming)

การวิจัยดำเนินการ (Operations Research) เป็นวิธีการตัดสินใจตามหลักวิทยาศาสตร์ในการหาการออกแบบระบบหรือการใช้งานระบบที่ดีที่สุด โดยปกติจะอยู่ภายใต้เงื่อนไขการจัดสรรทรัพยากรที่ขาดแคลน ในการตัดสินใจจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หนึ่งแบบจำลอง หรือมากกว่าการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการตัดสินใจส่วนงานอุตสาหกรรม เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต การลดค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิต การหาเส้นทางการขนส่งที่เหมาะสม เป็นต้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะประกอบไปด้วย

- ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) ส่วนใหญ่จะเป็นการหาค่าที่มากที่สุด หรือการหาค่าที่น้อยที่สุด เช่น การหาเส้นทางเดินรถที่เสียค่าใช้จ่ายน้อยสุด เป็นต้น
- ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables) เป็นตัวแปรต่างๆที่ต้องการทราบค่า และกำหนดขึ้นภายใต้เงื่อนไข
- เงื่อนไข หรือข้อจำกัด (Constraints)

แบบจำลองเชิงเส้น (Linear Programming: LP) [28] เป็นวิธีการในการหาผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุด แบบจำลองเชิงเส้นส่วนประกอบของแบบจำลองเชิงเส้นมี 3 ส่วนสำคัญคือ ตัวแปรตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และ เงื่อนไข โดยเงื่อนไขและฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะอยู่ในรูปแบบของสมการเชิงเส้นเท่านั้นรูปแบบของสมการเชิงเส้นคือ $C_1X_1 + C_2X_2 + ...C_nX_n$ โดยที่มีค่า C_i เป็นค่าสัมประสิทธิ์ และค่า X_i เป็นตัวแปรตัดสินใจโดยจะกำหนดปัญหาหรือวัตถุประสงค์ที่ต้องการไว้ที่ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ส่วนใหญ่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์จะเป็นการหาค่ามากที่สุด หรือค่าน้อยที่สุด โดยค่าของตัวแปรตัดสินใจจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขบังคับหรือข้อจำกัด และจะมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0 เสมอ ผลลัพธ์ของแบบจำลองจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ ผลลัพธ์ที่เป็นไปได้คือผลลัพธ์ที่ไม่ขัดแย้งกับเงื่อนไขบังคับที่กำหนดไว้ โดยผลลัพธ์ที่ดีที่สุดคือผลลัพธ์จะออกมาเป็นค่ามากที่สุดหรือน้อยที่สุดตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ และผลลัพธ์ที่เป็นไปไม่ได้คือมีความขัดแย้งกันระหว่างเงื่อนไขบังคับบางข้อเมื่อทราบผลลัพธ์หรือหาค่าที่เหมาะสมได้แล้วนั้นจะทราบว่า เงื่อนไขบังคับใดเป็นข้อบังคับแบบผูกพัน (Binding Constraints) และเงื่อนไขบังคับใดเป็นข้อบังคับแบบไม่ผูกพัน (Non-Binding Constraints)

แบบจำลองเชิงเส้นแบบจำนวนเต็ม (Integer Programming: IP) คือแบบจำลองเชิงเส้น (LP) ที่มีตัวแปรตัดสินใจบางตัว หรือทุกตัวเป็นจำนวนเต็มที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0 เช่น 1 2 3 เป็นต้น ปัญหาแบบจำลองเชิงเส้นแบบจำนวนเต็มได้แก่ การเลือกสมาชิกเพื่อจัดตั้งคณะทำงาน การเลือกเส้นการเดินทาง การเลือกจำนวนคลังสินค้า เป็นต้น แบบจำลองเชิงเส้นแบบจำนวนเต็มแบ่งออกเป็น 3 ลักษณะคือ

1 แบบจำลองเชิงเส้นแบบจำนวนเต็มแท้จริง (Pure Integer Programming : IP) คือตัวแปรตัดสินใจทุกตัวเป็นจำนวนเต็มบวก เช่น

$$\begin{array}{llllll} \text{Max} & z & = & 4x_1 & + & 6x_2 \\ \text{s.t.} & x_1 & + & x_2 & \leq & 5 \\ & x_1 , x_2 & \geq & 0 \ , \ x_1 , x_2 & & \text{integer} \end{array}$$

2 แบบจำลองเชิงเส้นแบบจำนวนเต็มผสม (Mixed Integer Programming : MIP) คือตัวแปรตัดสินใจบางตัวเป็นจำนวนเต็มบวก เช่น

$$\begin{array}{llllll} \text{Max} & z & = & 4x_1 & + & 6x_2 \\ \text{s.t.} & x_1 & + & x_2 & \leq & 5 \\ & x_1 , x_2 & \geq & 0 \ , \ x_1 & & \text{integer} \end{array}$$

3 แบบจำลองเชิงเส้นแบบจำนวนเต็มศูนย์-หนึ่ง (0-1 Integer Programming) คือตัวแปรตัดสินใจที่มีค่าเป็น 0 หรือ 1 เท่านั้น เช่น

$$\begin{array}{llllll} \text{Max} & z & = & x_1 & - & x_2 \\ \text{s.t.} & 3x_1 & - & x_2 & \leq & 1 \\ & x_1 & + & 2x_2 & \leq & 4 \\ & x_1 , x_2 & \in & \{0,1\} & & \end{array}$$

จะเห็นได้ว่าแบบจำลองเชิงเส้นแบบจำนวนเต็มเป็นเพียงการเพิ่มเงื่อนไขให้ตัวแปรตัดสินใจมีค่าเป็นจำนวนเต็ม เมื่อนำเงื่อนไขจำนวนเต็มออกจะเรียกแบบจำลองเชิงเส้นแบบจำนวนเต็มนั้นว่าแบบจำลองเชิงเส้นแบบผ่อนคลาย (LP Relaxation) ซึ่งผลลัพธ์ของแบบจำลองเชิงเส้นแบบจำนวนเต็มจะเป็นส่วนหนึ่งของแบบจำลองเชิงเส้นแบบผ่อนคลายเสมอ ดังนั้นค่าผลลัพธ์ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เหมาะสมที่สุดของแบบจำลองเชิงเส้นแบบจำนวนเต็มจะมีค่าแย่กว่าหรือเท่ากับแบบจำลองเชิงเส้นแบบผ่อนคลายเสมอ

<u>การสร้างเงื่อนไข If-Then และ Either-Or</u>

เงื่อนไข If-Then

ถ้าเงื่อนไข$f(x_1, x_2, \dots, x_n) > 0$ เป็นจริง จะทำให้เงื่อนไข $g(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0$เป็นจริงด้วย

แต่ถ้าเงื่อนไข$f(x_1, x_2, \dots, x_n) > 0$ ไม่เป็นจริง จะทำให้เงื่อนไข $g(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0$เป็นจริงหรือไม่ก็ได้

เงื่อนไข If-Then จะเขียนสมการได้ดังนี้

$$\begin{gathered} -g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq \mathrm{My} \\ f(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq \mathrm{M}(1-\mathrm{y}) \\ \mathrm{y} \ \epsilon \{0,1\} \end{gathered}$$

เงื่อนไข Either-Or

ถ้า $f(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0$ เป็นจริง หรือ $g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0$ เป็นจริง

เงื่อนไข Either-Or จะเขียนสมการได้ดังนี้

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq \mathrm{My}$$
$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq \mathrm{M}(1-\mathrm{y})$$
$$\mathrm{y} \quad \epsilon \{0,1\}$$

การหาผลลัพธ์ของแบบจำลองมีหลายวิธีเช่น วิธีการแตกติ่งและจำกัดของเขต การใช้กราฟ และการใช้โปรแกรม โปรแกรมที่ใช้ในการหาคำตอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ก็มีอยู่หลายโปรแกรมเช่น Excel-Solver Lindo และ OPLCPLEX โดยโปรแกรมที่เลือกใช้คือโปรแกรมโอพีแอลซึ่งเป็นลิขสิทธ์ของบริษัทไอบีเอ็ม [29]

2.5 โปรแกรมโอพีเอล

ในโปรแกรมโอพีเอลจะมีส่วนประกอบเหมือนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [29] คือ การระบุฟังก์ชันวัตถุประสงค์ การกำหนดตัวแปรตัดสินใจ และเงื่อนไขหรือข้อจำกัด การสร้างโปรแกรมโอพีเอลจะเริ่มจากการสร้างโปรเจคใหม่ (New OPL Project) ซึ่งจะเป็นการสร้างไฟล์งาน 2 ไฟล์คือ ไฟล์สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (.mod) และไฟล์สำหรับเก็บข้อมูล (.dat) ในไฟล์สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะประกอบไปด้วย

- การกำหนดตัวแปรและการกำหนดพารามิเตอร์ เช่น int profit = ...;
- การกำหนดตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable) เช่น dvar Boolean X_{ij} ;

  การกำหนดตัวแปร การกำหนดพารามิเตอร์ และการกำหนดตัวแปรตัดสินใจ จะต้องบ่งบอกรูปแบบของตัวแปรต่างๆ เช่น dvar BooleanX_{ij} ; หมายถึง X_{ij}เป็นตัวแปรที่มีค่า 0 หรือ 1 เท่านั้น รูปแบบต่างๆของตัวแปรมีดังนี้

  - Int ใช้สำหรับกำหนดตัวแปรที่เป็นจำนวนเต็ม เช่น 1 2 3
  - Float ใช้สำหรับกำหนดตัวแปรที่เป็นจำนวนใดๆ เช่น 1.5 2.6 3.01
  - Boolean ใช้สำหรับกำหนดตัวแปรที่เป็นที่มีค่า 0 หรือ 1
  - String ใช้สำหรับกำหนดตัวแปรที่เป็นตัวอักษร เช่น Toyota Honda BM
  - Array ใช้สำหรับกำหนดตัวแปรที่เป็นชุดหรือกลุ่มข้อมูล โดยจะมี 2 มิติขึ้นไป
- การกำหนดสมการวัตถุประสงค์ จะใช้คำสั่ง Maximum และ Minimum
- การกำหนดเงื่อนไข จะเริ่มต้นด้วยคำสั่ง Subject To โดยจะกำหนดเงื่อนไขอยู่ภายใน {...} เช่น

```
subject to {
forall (m in machine, w in week)
```

```
        sum ( i in task )  (x[w][i] * Duration[i][m]) <= MC[m][w];
    }
```

- การแสดงผล เช่น writeln();

*Depot_Location_plain.mod | Depot_Location_plain.dat

```
1  int NumCustomer = ...;
2  int NumDepot = ...;
3
4  range Cust = 1..NumCustomer;
5  range Depot = 1..NumDepot;
6
7  float CFix[Depot] = ...;
8  float Cost[Depot][Cust] = ...;
9  float Dem[Cust] = ...;
10 float Cap[Depot] = ...;
11
12 dvar float+ fflow[Depot][Cust];
13 dvar boolean build[Depot];
14
15 minimize sum(d in Depot)(CFix[d]*build[d])
16       + sum(d in Depot,c in Cust)(Cost[d][c]*fflow[d][c]);
17
18 subject to {
19
20 forall(d in Depot, c in Cust)
21 ct1:fflow[d][c] <= 1;
22
23 forall(c in Cust)
24 ct2:sum(d in Depot)fflow[d][c] == 1;
25
26 forall(d in Depot)
27 ct3:sum(c in Cust)(Dem[c]*fflow[d][c]) <= Cap[d]*build[d];
28
29 }
```

รูปที่ 2.9 ไฟล์สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตัวอย่างเช่น ในรูปที่ 2.9 จะเป็นไฟล์สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในบรรทัดที่ 1 – 5 จะเป็นการกำหนดเซตข้อมูล Cust และ Depot โดย Cust = {1, 2, 3, ..., NumCustomer} และ Depot = {1, 2, 3, ..., NumDepot} ในบรรทัดที่ 7 – 10 เป็นการกำหนดค่าพารามิเตอร์ โดยจะกำหนดอยู่ในรูปแบบของอาเรย์ซึ่งในบรรทัดที่ 7, 9 และ 10 จะเป็นอาเรย์ 1 มิติ (ตารางที่ 2.10) แต่ในบรรทัดที่ 8 จะเป็นอาเรย์ 2 มิติ (ตารางที่ 2.11)

ตารางที่ 2.10 ตัวอย่างอาเรย์ 1 มิติ

Depot	Cap
1	500
2	550
3	400
4	280
5	375

ตารางที่ 2.11 ตัวอย่างอาเรย์ 2 มิติ

Depot	Customer									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	100	80	50	50	60	100	120	90	60	70
2	120	90	60	70	65	110	140	110	80	80
3	140	110	80	80	75	130	160	125	100	130
4	160	125	100	100	80	150	190	150	130	120
5	190	150	130	200	200	200	200	80	70	60

ในบรรทัดที่ 12 – 13 เป็นตัวแปรตัวสินใจ ซึ่ง dvar float+ จะเป็นตัวแปรตัวสินใจจำนวนใดๆ ที่มีค่ามากกว่า 0 และ dvar boolean จะเป็นตัวแปรตัวสินใจที่มีค่า 0 หรือ 1 เท่านั้น ฟังค์ชันวัตถุประสงค์จะอยู่ในบรรทัดที่ 15 - 16 ในตัวอย่างนี้จะเห็นได้ว่าใช่คำสั่ง Minimum เพื่อหาค่าใช้จ่ายที่น้อยที่น้อยที่สุด ในส่วนของเงื่อนไขจะอยู่ภายใต้คำสั่ง subject to {...} ซึ่งอยู่ในบรรทัดที่ 18 – 29

ในไฟล์สำหรับเก็บข้อมูลจะเป็นส่วนข้อมูลที่นำไปใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะอยู่ในรูปแบบการกำหนดค่าลงในไฟล์เช่น YearEnd = 2572; YearBegin = 2542; ดังรูปที่ 2.10

*Depot_Location_plain.mod *Depot_Location_plain.dat

```
1 NumCustomer = 10;
2 NumDepot = 5;
3
4 CFix = [3500 9000 7000 4000 3000];
5 Cost = [[100 80 50 50 60 100 120 90 60 70]
6         [120 90 60 70 65 110 140 110 80 80]
7         [140 110 80 80 75 130 160 125 100 130]
8         [160 125 100 100 80 150 190 150 130 120]
9         [190 150 130 200 200 200 200 80 70 60]];
10 Dem  = [120 80 75 100 110 100 90 60 50 30];
11 Cap  = [500 550 400 280 375];
```

รูปที่ 2.10 ไฟล์สำหรับเก็บข้อมูล

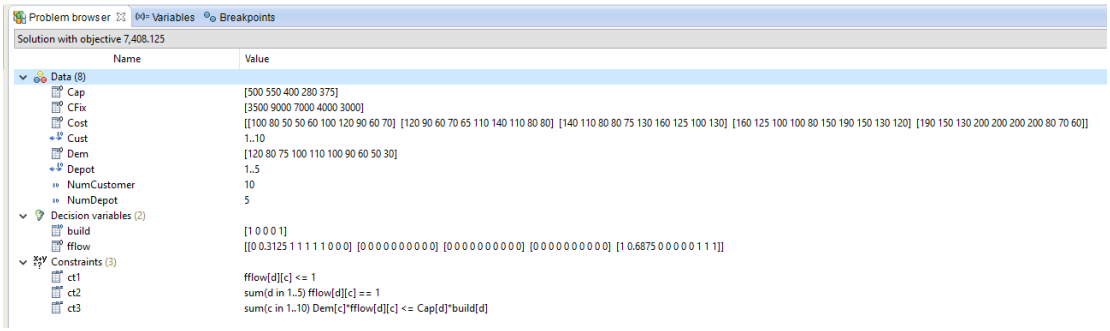
หรือจะเป็นการนำข้อมูลมาจากไฟล์เก็บข้อมูลอื่นเช่น

SheetConnection sheet ("Age.xlsx");

Color from SheetRead (sheet, "Color!B2:B9");

ในส่วนของการวิเคราะห์ข้อมูลหรือประมวลผลนั้น เมื่อรับแบบจำลองด้วยคำสั่ง Run Configuration ผลของแบบจำลองจะอยู่ในส่วนของ Problem Browser ดังรูปที่ 2.11 ในส่วนของ

“Solution with objective” จะบอกผลลัพธ์ที่ดีที่สุดของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยผลลัพธ์ที่ได้จะเกิดจากค่าของตัวแปรตัดสินใจที่อยู่ในส่วนของ Decision variables



รูปที่ 2.11 Problem Browser ของ OPL CPLEX

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้ ส่วนแรกจะกล่าวถึง ลักษณะปัญหาของการงานวิจัย ซึ่งจะเริ่มต้นด้วย ข้อมูลตั้งต้นสำหรับหาจำนวนเครื่องจักรในการซ่อมบำรุง ได้แก่ รถไฟฟ้า และงานซ่อมบำรุง ต่อมาจะอธิบายถึงการหาอายุรถไฟฟ้า และกำหนดการในการซ่อมบำรุงของรถไฟฟ้าแต่ละขบวน ในส่วนที่ 3.2 จะนำข้อมูลจากส่วนแรกไปวิเคราะห์หาจำนวนเครื่องจักรที่น้อยที่สุด โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในส่วนนี้จะได้ผลลัพธ์ 2 รูปแบบคือ ปริมาณเครื่องจักรในแต่ละช่วงเวลา และกำหนดการซ่อมบำรุง แต่เนื่องจากในส่วนที่ 3.2 นั้นเป็นการวางแผนระยะยาวจึงเสนอการจัดตารางการซ่อมบำรุงในแต่ละเดือนในส่วนที่ 3.3 การจัดตารางการซ่อมบำรุงในแต่ละเดือนมีไว้ตรวจสอบความเป็นไปได้ของการวางแผนระยะยาว

3.1 ลักษณะปัญหา

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงใหญ่ การลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงใหญ่ทำได้โดยจำกัดจำนวนทรัพยากรที่จำเป็นในการซ่อมบำรุงซึ่งถือได้ว่าเป็นต้นทุนคงที่ ทรัพยากรที่สำคัญในการซ่อมบำรุงคือทรัพยากรเครื่องจักรแต่เนื่องจากการซ่อมบำรุงใหญ่จะมีความถี่ในการใช้งานเครื่องจักรน้อย การรวมศูนย์ซ่อมบำรุงใหญ่จึงเป็นการเพิ่มความถี่ในการใช้เครื่องจักร เมื่อรวมศูนย์ซ่อมบำรุงแล้ว การจัดตารางการซ่อมบำรุงจะช่วยในการกระจายงานซ่อมบำรุงให้รถไฟฟ้าทุกขบวนสามารถทำการซ่อมบำรุงได้ภายในกรอบเวลาที่กำหนดโดยใช้จำนวนเครื่องจักรที่น้อยที่สุด แต่เนื่องจากไม่มีการขายหรือคืนเครื่องจักรจำนวนเครื่องจักรในแต่ละช่วงจะมีจำนวนเท่าเดิมหรือเพิ่มขึ้นเสมอ จำนวนเครื่องจักรในแต่ละช่วงเวลาจะขึ้นอยู่กับปริมาณความต้องการในการงานซ่อมบำรุง โดยปริมาณความต้องการในการซ่อมบำรุงจึงขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยหลักคือจำนวนรถไฟฟ้าและงานซ่อมบำรุง

1. จำนวนรถไฟฟ้า

โครงการรถไฟฟ้ามีทั้งหมด 12 โครงการ เป็นโครงการรถไฟฟ้าขนาดใหญ่ทั้งหมด 8 โครงการ จากตารางที่ 2.3 พบว่ารถไฟฟ้าทั้งหมด 8 สาย มีจำนวนรถไฟฟ้ารวมทั้งหมด 296 ขบวน แต่ละสายจะมีเวลาที่เปิดให้บริการแตกต่างกันออกไปเมื่อมีการเปิดเส้นทางใหม่ๆ จำนวนรถไฟฟ้าของสายต่างๆ จะมีเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งในตารางที่ 2.3 จะพบว่ามีรถไฟฟ้าบางสายระบุเวลาเปิดให้บริการเฉพาะปี ดังนั้นสำหรับรถไฟฟ้าในสายใดที่ไม่ได้ระบุเดือนที่เปิดให้บริการจะทำการสุ่มแบบการกระจายสม่ำเสมอ (Uniform) หรือมีโอกาสเปิดบริการในเดือนต่างๆเท่ากัน เป็นดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลรายละเอียดโครงการรถไฟฟ้าที่จะเปิดให้บริการสำหรับงานวิจัยนี้

สายรถไฟฟ้า	ช่วง	ระยะทาง (กม.)	เดือนที่ (คาดว่าจะ) เปิดให้บริการ	ปีที่ (คาดว่าจะ) เปิดให้บริการ	จำนวนรถ (ขบวน)
สายสีแดงเข้ม	บางซื่อ-รังสิต-ธรรมศาสตร์	36.3	มกราคม*	2559	8
	บางซื่อ-หัวลำโพง	6.5	มีนาคม*	2562	2
	หัวลำโพง-บางบอน	18	สิงหาคม*	2572	8
	บางบอน-มหาชัย	20			
สายสีแดงอ่อน	บางซื่อ-พญาไท-มักกะสัน	9	มิถุนายน*	2562	10
	มักกะสัน-หัวหมาก	10			
	บางซื่อ-ตลิ่งชัน	15			
	ตลิ่งชัน-ศาลายา	14			
	ตลิ่งชัน-ศิริราช	6	กุมภาพันธ์*	2572	2
แอร์พอร์ตลิงค์	พญาไท-มักกะสัน-สุวรรณภูมิ	28.5	มกราคม	2554	9
	ดอนเมือง-บางซื่อ-พญาไท	21.8	พฤษภาคม*	2562	4
สายสีเขียวเข้ม	หมอชิต-อ่อนนุช	16.5	ธันวาคม	2542	35
	อ่อนนุช-แบริ่ง	5.3			
	หมอชิต-สะพานใหม่-คูคต	18.4	กุมภาพันธ์	2563	17
	แบริ่ง-สมุทรปราการ	12.8	กุมภาพันธ์	2563	10
	คูคต-ลำลูกกา	6.5	มีนาคม*	2572	20
	สมุทรปราการ-บางปู	7			
สายสีเขียวอ่อน	สนามกีฬาแห่งชาติ-สะพานตากสิน	7	มกราคม	2553	17
	สะพานตากสิน-ถนนตากสิน	2.2			
	ถนนตากสิน-บางหว้า	5.3			
	สนามกีฬา-ยศเส	1	เมษายน*	2572	7
	บางหว้า-ตลิ่งชัน	7.5			

สายรถไฟฟ้า	ช่วง	ระยะทาง (กม.)	เดือนที่ (คาดว่าจะ) เปิดให้บริการ	ปีที่ (คาดว่าจะ) เปิดให้บริการ	จำนวนรถ (ขบวน)
สายน้ำเงิน	บางซื่อ-หัวลำโพง	20	กรกฎาคม	2547	19
	บางซื่อ-ท่าพระ	13	เมษายน	2562	28
	หัวลำโพง-บางแค	14			
	บางแค-พุทธมณฑลสาย4	8	กรกฎาคม*	2572	7
สายสีม่วง	บางใหญ่-บางซื่อ	23	สิงหาคม	2559	21
	เตาปูน-วงแหวนกาญจนาภิเษก	23.6	กันยายน	2562	24
สายสีส้ม	ตลิ่งชัน-ศูนย์วัฒนธรรม	17.5	พฤศจิกายน*	2565	48
	ศูนย์วัฒนธรรม-มีนบุรี	20			

* เดือนที่เปิดให้บริการที่เกิดจากการสุ่ม

เนื่องจากความต้องการในการซ่อมบำรุงจะขึ้นอยู่กับอายุการใช้งานของรถไฟฟ้า ดังนั้นสามารถหาอายุของรถไฟฟ้าในแต่ละเดือนได้จากเดือน และปีที่เปิดให้บริการ เช่น รถไฟฟ้าขบวนนี้เปิดให้บริการในเดือนมีนาคม ปีพ.ศ. 2543 ในเดือนธันวาคม ปีพ.ศ. 2543 รถไฟฟ้าจะมีอายุ 10 เดือน (ตารางที่ 3.2) และในเดือนมกราคม ปีพ.ศ. 2544 รถไฟฟ้าจะมีอายุ 11 เดือนเป็นต้น (ตารางที่ 3.2)

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างอายุรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการในเดือนมีนาคม ปีพ.ศ. 2543

ปีพ.ศ.	เดือน	อายุรถไฟฟ้า (เดือน)
2543	มกราคม	0
	กุมภาพันธ์	0
	มีนาคม	1
	เมษายน	2
	พฤษภาคม	3
	มิถุนายน	4
	กรกฎาคม	5
	สิงหาคม	6
	กันยายน	7

ปีพ.ศ.	เดือน	อายุรถไฟฟ้า (เดือน)
	ตุลาคม	8
	พฤศจิกายน	9
	ธันวาคม	10
2544	มกราคม	11
	กุมภาพันธ์	12
	มีนาคม	13
	เมษายน	14
	พฤษภาคม	15
	มิถุนายน	16
	กรกฎาคม	17

2. งานซ่อมบำรุง

งานซ่อมบำรุงจะแบ่งออกเป็น 5 กลุ่มคือ การซ่อมบำรุงทุก 1 ปี การซ่อมบำรุงทุก 5 ปี การซ่อมบำรุงทุก 6 ปี การซ่อมบำรุงทุก 9 ปี และ การซ่อมบำรุงทุก 12 ปี โดยแต่ละกลุ่มงานจะมีงานย่อยๆ ดังตารางที่ 3.3 และการซ่อมบำรุงแต่ละงานจะใช้เครื่องจักรที่แตกต่างกัน มีเวลาที่ใช้ในการซ่อมบำรุงแต่ละงานเป็นดังตารางที่ 3.4 เมื่อรวมงานที่มีระยะห่างการซ่อมบำรุงเท่ากันไว้ด้วยกันจะมีเวลาที่ใช้ในการซ่อมบำรุงของแต่ละเครื่องจักรเป็นดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.3 งานย่อยของแต่ละกลุ่มงานซ่อมบำรุงที่มีระยะห่างการซ่อมบำรุงเท่ากัน

Interval	Module	Submodule	Task
ทุก 1 ปี (Y1)	Door	Passenger Door	การบำรุงรักษาประตูผู้โดยสาร
	Bogie	Gear Box	เปลี่ยนถ่ายน้ำมันเกียร์
	Air Compressor	Air Compressor	การบำรุงรักษาเครื่องอัดอากาศ
ทุก 5 ปี (Y5)	Bogie	Wheel Set	เปลี่ยนล้อและตัวสอบรอยแตกของเพลา
ทุก 6 ปี (Y6)	Bogie	Traction Motor	เปลี่ยนแหวนรองและ อัดจาระบี
	Bogie	Bearing Box	Disassemble Parts and Bearing Replacement
	Bogie	Air Spring	เปลี่ยน Air Spring
	Bogie	Torsion Bar	การบำรุงรักษาเหล็กกันโคลงเปลี่ยนชิ้นส่วนไซเลนท์ บล็อก (Silent Block) และแท่งบิด (Torsion Bar)
	Air Condition	Air Condition	บำรุงรักษาระบบแอร์

Interval	Module	Submodule	Task
ทุก 9 ปี (Y9)	Air Condition	Air Condition	บำรุงรักษาระบบแอร์
ทุก 12 ปี (Y12)	Bogie	Bogie Frame	การบำรุงรักษา Bogie Frame
	Air Condition	Air Condition	บำรุงรักษาระบบแอร์

ตารางที่ 3.4 เวลาที่ใช้ในการซ่อมบำรุงของงานย่อยทั้งหมด 12 งาน (ชั่วโมง)

Task		Machine Requirement (hour)												
		Axle Lathe	Bearing Removal Equipment	Bogie Preload Stand	Bogie Turntables	Brake and Compressor Test Equipment	Hydraulic Wheel Press	Movable Jacking System 10 ton	Movable Jacking System 15 ton	Overhead Bridge Crane 100kN	Overhead Bridge Crane 20kN	Train Air Conditioning Module Repair	Underfloor Trainset Lifting System	Vehicle Door Test Stand
Y1	เปลี่ยนถ่ายน้ำมันเกียร์		32		32			32		32	32		32	
	การบำรุงรักษาประตูผู้โดยสาร													16
	การบำรุงรักษาเครื่องอัดอากาศ					4								
Y5	เปลี่ยนล้อและตัวสอบรอยแตกของเพลา	56	56		56		56	56		56	56		56	
Y6	Disassemble parts and bearing replacement		64		64			64		64	64		64	
	เปลี่ยนแหวนรองและ อัดจาระบี		16	16	16		16	16	16	16	16		16	
	เปลี่ยน Air Spring		28	28	28		28	28	28	28	28		28	
	บำรุงรักษาระบบแอร์							24				24		
	การบำรุงรักษาเหล็กกันโคลง เปลี่ยนชิ้นส่วนไซเลนท์ บล็อก (silent block)						16						16	

Task		Machine Requirement (hour)												
		Axle Lathe	Bearing Removal Equipment	Bogie Preload Stand	Bogie Turntables	Brake and Compressor Test Equipment	Hydraulic Wheel Press	Movable Jacking System 10 ton	Movable Jacking System 15 ton	Overhead Bridge Crane 100kN	Overhead Bridge Crane 20kN	Train Air Conditioning Module Repair	Underfloor Trainset Lifting System	Vehicle Door Test Stand
	และแท่งบิด (torsion bar)													
Y9	บำรุงรักษาระบบแอร์							32						
Y12	การบำรุงรักษา bogie frame		112	112	112		112	112	112	112	112		112	
	บำรุงรักษาระบบแอร์							32				32		

ตารางที่ 3.5 เวลาที่ใช้ในการซ่อมบำรุงของกลุ่มงานซ่อมบำรุง (ชั่วโมง)

Task	Machine Requirement (hour)											
	Axle Lathe	Bearing Removal Equipment	Bogie Preload Stand	Bogie Turntables	Brake and Compressor Test Equipment	Hydraulic Wheel Press	Movable Jacking System 10 ton	Movable Jacking System 15 ton	Overhead Bridge Crane 100kN	Overhead Bridge Crane 20kN	Train Air Conditioning Module Repair	Underfloor Trainset Lifting System	Vehicle Door Test Stand
Y1	0	32	0	32	4	0	32	0	32	32	0	32	16
Y5	56	56	0	56	0	56	56	0	56	56	0	56	0
Y6	0	108	44	108	0	60	132	44	108	108	24	124	0
Y9	0	0	0	0	0	0	32	0	0	0	0	0	0
Y12	0	112	112	112	0	112	144	112	112	112	32	112	0

ในตารางที่ 3.6 – 3.7 เป็นเวลาที่ใช้ในการซ่อมบำรุงในหน่วยไตรมาส และเดือน โดยกำหนดให้ 1 ไตรมาส มี 3 เดือน 1 เดือนมี 30 วัน และ 1 วันมี 24 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.6 เวลาที่ใช้ในการซ่อมบำรุงของแต่ละเครื่องจักรในหน่วยไตรมาส

Task	Machine Requirement (quarter)												
	Axle Lathe	Bearing Removal Equipment	Bogie Preload Stand	Bogie Turntables	Brake and Compressor Test Equipment	Hydraulic Wheel Press	Movable Jacking System 10 ton	Movable Jacking System 15 ton	Overhead Bridge Crane 100kN	Overhead Bridge Crane 20kN	Train Air Conditioning Module Repair	Underfloor Trainset Lifting System	Vehicle Door Test Stand
Y1	0.0000	0.0148	0.0000	0.0148	0.0019	0.0000	0.0148	0.0000	0.0148	0.0148	0.0000	0.0148	0.0074
Y5	0.0259	0.0259	0.0000	0.0259	0.0000	0.0259	0.0259	0.0000	0.0259	0.0259	0.0000	0.0259	0.0000
Y6	0.0000	0.0500	0.0204	0.0500	0.0000	0.0278	0.0611	0.0204	0.0500	0.0500	0.0111	0.0574	0.0000
Y9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0148	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Y12	0.0000	0.0519	0.0519	0.0519	0.0000	0.0519	0.0667	0.0519	0.0519	0.0519	0.0148	0.0519	0.0000

ตารางที่ 3.7 เวลาที่ใช้ในการซ่อมบำรุงของแต่ละเครื่องจักรในหน่วยเดือน

Task	Machine Requirement (month)												
	Axle Lathe	Bearing Removal Equipment	Bogie Preload Stand	Bogie Turntables	Brake and Compressor Test Equipment	Hydraulic Wheel Press	Movable Jacking System 10 ton	Movable Jacking System 15 ton	Overhead Bridge Crane 100kN	Overhead Bridge Crane 20kN	Train Air Conditioning Module Repair	Underfloor Trainset Lifting System	Vehicle Door Test Stand
Y1	0.0000	0.0444	0.0000	0.0444	0.0056	0.0000	0.0444	0.0000	0.0444	0.0444	0.0000	0.0444	0.0222
Y5	0.0778	0.0778	0.0000	0.0778	0.0000	0.0778	0.0778	0.0000	0.0778	0.0778	0.0000	0.0778	0.0000
Y6	0.0000	0.1500	0.0611	0.1500	0.0000	0.0833	0.1833	0.0611	0.1500	0.1500	0.0333	0.1722	0.0000
Y9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0444	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Task	Machine Requirement (month)												
	Axle Lathe	Bearing Removal Equipment	Bogie Preload Stand	Bogie Turntables	Brake and Compressor Test Equipment	Hydraulic Wheel Press	Movable Jacking System 10 ton	Movable Jacking System 15 ton	Overhead Bridge Crane 100kN	Overhead Bridge Crane 20kN	Train Air Conditioning Module Repair	Underfloor Trainset Lifting System	Vehicle Door Test Stand
Y12	0.0000	0.1556	0.1556	0.1556	0.0000	0.1556	0.2000	0.1556	0.1556	0.1556	0.0444	0.1556	0.0000

เนื่องจากเป็นการซ่อมบำรุงโดยใช้ระยะเวลาเป็นตัวกำหนด งานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าจึงขึ้นอยู่กับอายุการใช้งานของรถไฟฟ้าเช่น งานซ่อมบำรุงทุก 1 ปี หรือเท่ากับ 12 เดือน รถไฟฟ้าจะต้องซ่อมบำรุงงานนี้ ในเดือนที่รถไฟฟ้ามีอายุเท่ากับ 13, 25, 37,... หรืองานซ่อมบำรุงทุก 5 ปี หรือเท่ากับ 60 เดือน รถไฟฟ้าจะต้องซ่อมบำรุงงานนี้ ในเดือนที่รถไฟฟ้ามีอายุเท่ากับ 61, 121, 181,... เป็นต้น และเมื่อรถไฟฟ้าอายุครบ 1 ปี 2 ปี 3 ปี และ 4 ปี รถไฟฟ้าจะต้องทำงานซ่อมบำรุงทุก 1 ปี แต่เมื่อรถไฟฟ้าอายุครบ 5 ปีรถไฟฟ้าจะต้องทำงานซ่อมบำรุงทุก 1 ปี และงานซ่อมบำรุงทุก 5 ปี และสำหรับเมื่อรถไฟฟ้าอายุครบ 6 ปีรถไฟฟ้าจะต้องทำงานซ่อมบำรุงทุก 1 ปี และงานซ่อมบำรุงทุก 6 ปีเป็นต้น

นอกจากนั้น รถไฟฟ้าจะมีอายุขัยประมาณ 30 ปีหรือ 360 เดือน ดังนั้นเมื่อครบอายุขัยแล้วจึงมีการสั่งซื้อรถไฟฟ้าขบวนใหม่เข้ามาแทนที่ ดังนั้นจึงเริ่มนับอายุใหม่โดยให้รถไฟฟ้าที่อายุเท่ากับ 361 เดือนเทียบเท่าอายุ 1 เดือน โดยในงานวิจัยนี้ กำหนดให้เดือนมกราคม ปีพ.ศ. 2542 เป็นเดือนที่ 1 ดังนั้นจะได้ตัวอย่างข้อมูลเป็นดังตารางที่ 3.8 เพื่อนำไปใช้ในการหาจำนวนเครื่องจักรที่น้อยที่สุดในการซ่อมบำรุงใหญ่ต่อไป

ตารางที่ 3.8 ตัวอย่างข้อมูลงานซ่อมบำรุง

เดือนของการวางแผน	สายรถไฟฟ้า	ขบวนรถไฟฟ้า	อายุรถไฟฟ้า (เดือน)	กลุ่มงานซ่อมบำรุง
24	Dark Green	1	13	1
24	Dark Green	2	13	1
36	Dark Green	1	25	1
36	Dark Green	2	25	1
48	Dark Green	1	37	1
48	Dark Green	2	37	1

เดือนของการวางแผน	สายรถไฟฟ้า	ขบวนรถไฟฟ้า	อายุรถไฟฟ้า (เดือน)	กลุ่มงานซ่อมบำรุง
60	Dark Green	1	49	1
60	Dark Green	2	49	1
72	Dark Green	1	61	1
72	Dark Green	1	61	2
72	Dark Green	2	61	1
72	Dark Green	2	61	2
84	Dark Green	1	73	1
84	Dark Green	1	73	3
84	Dark Green	2	73	1
84	Dark Green	2	73	3
96	Dark Green	1	85	1
96	Dark Green	2	85	1
108	Dark Green	1	97	1
108	Dark Green	2	97	1
120	Dark Green	1	109	1
120	Dark Green	1	109	4
120	Dark Green	2	109	1
120	Dark Green	2	109	4

3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาจำนวนเครื่องจักรที่น้อยสุด

ทรัพยากรที่สำคัญในการซ่อมบำรุงคือทรัพยากรเครื่องจักร ถ้าสามารถวางแผนการซ่อมบำรุงได้ก็จะช่วยในการจำกัดจำนวนเครื่องจักรเท่าที่จำเป็น ในแบบจำลองนี้จะเสนอการหาจำนวนเครื่องจักรที่น้อยที่สุด โดยสามารถทำงานซ่อมบำรุงได้ตามเวลาที่กำหนด แต่เนื่องจากมีรถไฟฟ้าเข้ามาพร้อมกันในแต่ละช่วงเวลาเป็นจำนวนมาก ความต้องการในการซ่อมบำรุงจึงเกิดขึ้นพร้อมๆกัน ซึ่งทำให้มีความต้องการเครื่องจักรมากเป็นช่วงๆ ในทางปฏิบัติจะมีการกระจายงานซ่อมบำรุง เช่นนั้นในแต่ละงานซ่อมบำรุงจะมีกำหนดช่วงเวลาในการทำงานที่เหมาะสมโดยในงานวิจัยนี้จะเรียกช่วงเวลานั้นว่า “เวลาเผื่อ” แต่อย่างไรก็ตามยังสามารถซ่อมบำรุงในช่วงเวลาที่กำหนดไม่ส่งผลต่อความปลอดภัยในการเดินรถดังนั้น ในการหาจำนวนทรัพยากรเครื่องจักรที่น้อยที่สุดในการซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าจึงมีเงื่อนไขดังนี้

1. รถไฟฟ้าจะเข้าศูนย์ซ่อมบำรุงทั้งขบวนพร้อมกัน
2. การซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าแต่ละขบวนจะขึ้นอยู่กับอายุของรถไฟฟ้า ซึ่งสามารถคำนวณอายุของรถไฟฟ้าได้จากปีและเดือนที่เปิดให้บริการ

3. งานซ่อมบำรุงทุกงานต้องเสร็จภายในการเข้าศูนย์ซ่อมบำรุง 1 รอบ
4. ในช่วงเวลาต่างๆจะสามารถซ่อมรถไฟฟ้าได้เพียง 1 ขบวนต่อสาย เนื่องจากการซ่อมรถไฟฟ้าจะทำให้รถไฟฟ้าไม่สามารถเดินรถได้ ถ้าหากนำรถไฟฟ้าของสายเดียวกันมาซ่อมบำรุงหลายขบวนพร้อมกันจะทำให้รถไฟฟ้าไม่เพียงพอต่อการรองรับการให้บริการ
5. การซ่อมบำรุงในแต่ละขบวนจะใช้เวลาในการซ่อมบำรุงแต่ละงาน แต่ละเครื่องจักรเท่ากันเสมอ
6. แต่ละงานซ่อมบำรุงจะมีระยะเผื่อ สำหรับกระจายงานซ่อมบำรุง เช่น งานซ่อมบำรุงที่มีระยะเผื่อครึ่งหนึ่งของระยะห่างการซ่อมบำรุง การซ่อมบำรุงเชิงป้องกันทุก 1 ปี (52 สัปดาห์) จะสามารถทำงานซ่อมบำรุงนี้ได้ในระหว่างสัปดาห์ที่ 53 ถึง 78 หรือถ้าหากมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/4 เท่าของระยะห่างการซ่อมบำรุง การซ่อมบำรุงเชิงป้องกันทุก 1 ปี (52 สัปดาห์) จะสามารถทำงานซ่อมบำรุงนี้ได้ในระหว่างสัปดาห์ที่ 53 ถึง 65
7. ปริมาณเครื่องจักรแต่ละประเภท จะต้องรองรับเวลารวมของงานซ่อมบำรุงในแต่ละช่วงเวลา
8. จำนวนเครื่องจักรในแต่ละช่วงเวลาจะมีจำนวนเท่าเดิมหรือเพิ่มขึ้นเสมอถึงแม้ว่าในช่วงเวลาถัดไปจะมีงานซ่อมบำรุงลดลง เนื่องจากกำหนดให้ไม่มีการคืนหรือขายเครื่องจักร

ในเบื้องต้น สามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประมาณการจำนวนเครื่องจักรที่น้อยที่สุดในการซ่อมบำรุง

3.2.1 Model Formulation

<u>สัญลักษณ์และพารามิเตอร์</u>

I เซตของกลุ่มงานซ่อมบำรุง, i = {1, 2, 3, 4, 5}

- i = 1 : กลุ่มงานซ่อมบำรุงทุก 1 ปี
- i = 2 : กลุ่มงานซ่อมบำรุงทุก 5 ปี
- i = 3 : กลุ่มงานซ่อมบำรุงทุก 6 ปี
- i = 4 : กลุ่มงานซ่อมบำรุงทุก 9 ปี
- i = 5 : กลุ่มงานซ่อมบำรุงทุก 12 ปี

O เซตของสายรถไฟฟ้า, o = {1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8}

- o = 1 : สายสีแดงเข้ม

- o = 2 : สายสีแดงอ่อน
- o = 3 : แอร์พอร์ตลิงค์
- o = 4 : สายสีเขียวเข้ม
- o = 5 : สายสีเขียวอ่อน
- o = 6 : สายน้ำเงิน
- o = 7 : สายสีม่วง
- o = 8 : สายสีส้ม

T เซตของขบวนรถไฟฟ้าในแต่ละสาย, t = {1, 2, 3, 4, 5, ..., o_t}

H เซตของช่วงเวลา (สัปดาห์), h = {1, 2, 3, 4, 5, ...2496}

M เซตของเครื่องจักร, m = {1, 2, 3, 4, 5, ..., 13}

- m = 1 : Axle Lathe
- m = 2 : Bearing Removal Equipment
- m = 3 : Bogie Preload Stand
- m = 4 : Bogie Turntables
- m = 5 : Brake and Compressor Test Equipment
- m = 6 : Hydraulic Wheel Press
- m = 7 : Movable Jacking System 10 Ton
- m = 8 : Movable Jacking System 15Ton
- m = 9 : Overhead Bridge Crane 100kN
- m = 10 : Overhead Bridge Crane 20kN
- m = 11 : Train Air Conditioning Module Repair
- m = 12 : Underfloor Trainset Lifting System
- m = 13 : Vehicle Door Test Stand

d_{im} เวลาที่ใช้ในการซ่อมบำรุงงาน i ของเครื่องจักร m

$Task_{ioth}$ มีค่าเท่ากับ 1 เมื่องาน i ของรถไฟฟ้าขบวน t สาย o ต้องทำการซ่อมบำรุงในช่วงเวลา h นอกนั้นจะมีค่าเท่ากับ 0

$Spread_i$ ระยะเผื่อสำหรับซ่อมบำรุงงาน i

<u>การกำหนดตัวแปรตัดสินใจ</u>

$Machine_{mh}$ จำนวนเครื่องจักร m ในช่วงเวลา h

$Plan_{ioth}$ มีค่าเท่ากับ 1 เมื่องาน i ของรถไฟฟ้าขบวน t สาย o มีแผนการซ่อมบำรุงในช่วงเวลา h นอกนั้นจะมีค่าเท่ากับ 0

วัตุประสงค์ของแบบจำลองนี้คือ เพื่อให้จำนวนเครื่องจักรที่ใช้ในการซ่อมบำรุงน้อยที่สุด

$$\text{Minimum} \qquad Z = \sum_h \sum_m \text{Machine}_{mh} \tag{1-0}$$

สมการที่ (1-1) และ (1-2) เนื่องจากกำหนดให้ไม่มีการคืน หรือขายเครื่องจักรจำนวนเครื่องจักรในแต่ละช่วงเวลาจะมีจำนวนเท่าเดิมหรือเพิ่มขึ้นเสมอถึงแม้ว่าในช่วงเวลาถัดไปจะมีงานซ่อมบำรุงลดลงก็ตาม

$$\text{Machine}_{m0} = 0 \qquad \forall m \in M \tag{1-1}$$

$$\text{Machine}_{m(h-1)} \le \text{Machine}_{mh} \qquad \forall m \in M, \forall h \in H \tag{1-2}$$

สมการที่ (1-3) จำนวนเครื่องจักรที่มีจะต้องเพียงพอกับงานซ่อมบำรุงในแต่ละสัปดาห์

$$\sum_i \sum_o \sum_t \text{Plan}_{ioth} \times d_{im} \le \text{Machine}_{mh} \qquad \forall m \in M, \forall h \in H \tag{1-3}$$

สมการที่ (1-4) ในสัปดาห์เดียวกัน แต่ละสายจะซ่อมบำรุงเพียง 1 ขบวน และแต่ละขบวนจะสามารถซ่อมบำรุงได้เพียง 1 กลุ่มงาน

$$\sum_i \sum_t \text{Plan}_{ioth} \le 1 \qquad \forall o \in O, \forall h \in H \tag{1-4}$$

สมการที่ (1-5) งานซ่อมบำรุงสามารถกระจายงานได้ตามระยะเผื่อ (Spread_i) ของแต่ละงาน i

$$\sum_h^{h+\text{Spread}_i-1} \text{Plan}_{ioth} = \text{Task}_{ioth} \qquad \forall i \in I, \forall o \in O, \forall t \in T, \forall h \in H \tag{1-5}$$

สมการที่ (1-6) เป็นสมการกำหนดค่าตัวแปรโดย Machine_{mh} เป็นจำนวนเครื่องจักรจึงเป็นจำนวนบวก และ Plan_{ioth} มีค่าเป็น 0 และ 1 เพื่อบอกว่ามีการวางแผนซ่อมบำรุงหรือไม่

$$\text{Machine}_{mh} \ge 0 \qquad \forall m \in M, \forall h \in H \tag{1-6}$$

$$\text{Plan}_{ioth} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in I, \forall o \in O, \forall t \in T, \forall h \in H \tag{1-7}$$

จากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio Version 12.4 เพื่อหาจำนวนทรัพยากรที่น้อยที่สุดสำหรับการซ่อมบำรุง พบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้สามารถหาจำนวนทรัพยากรเครื่องจักรที่น้อยที่สุดได้ แต่ใช้เวลานานในการหาคำตอบถึงแม้จะเป็นปัญหาที่มีขนาดเล็ก นอกจากนั้นในบางเงื่อนไขอาจเป็นไปไม่ได้เช่น ในสัปดาห์เดียวกันจะไม่ซ่อมบำรุงรถในสายเดียวกัน เพราะในความเป็นจริงรถไฟฟ้าเกิดขึ้นพร้อมกันจำนวนมาก

ทำให้ความต้องการซ่อมบำรุงในเวลาเดียวมีมาก จึงเปลี่ยนเงื่อนไขนี้เป็น ให้มีจำนวนรถไฟฟ้าเข้าซ่อมบำรุงพร้อมกันในหนึ่งช่วงเวลาน้อยที่สุด ดังนั้น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะแบ่งวัตถุประสงค์ออกเป็น 2 ประเด็นคือ เพื่อลดจำนวนเครื่องจักรที่ใช้ให้น้อยที่สุด และเพื่อลดปริมาณรถไฟฟ้าของแต่ละสายที่ซ่อมบำรุงพร้อมกันให้น้อยที่สุดในแบบจำลองต่อไปนี้ จะมีตัวแปรตัวสินใจอยู่ 3 รูปแบบคือ จำนวนเครื่องจักรในแต่ละช่วงเวลา แผนงานซ่อมบำรุงของรถไฟฟ้าขบวนต่างๆ จำนวนรถไฟฟ้าของแต่ละสายที่ซ่อมบำรุงพร้อมกันในแต่ละช่วงเวลา

<u>สัญลักษณ์และพารามิเตอร์</u>

I	เซตของกลุ่มงานซ่อมบำรุง, i = {1, 2, 3, 4, 5}
O	เซตของสายรถไฟฟ้า, o = {1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8}
T	เซตของขบวนรถไฟฟ้าในแต่ละสาย, t = {1, 2, 3, 4, 5, ..., o_t}
H	เซตของช่วงเวลา (เดือน), h = {1, 2, 3, 4, 5, ..., 576}
M	เซตของเครื่องจักร, m = {1, 2, 3, 4, 5, ..., 13}
d_{im}	เวลาที่ใช้ในการซ่อมบำรุงงาน i ของเครื่องจักร m
$Task_{ioth}$	มีค่าเท่ากับ 1 เมื่องาน i ของรถไฟฟ้าขบวน t สาย o ต้องทำการซ่อมบำรุงในช่วงเวลา h นอกนั้นมีค่าเท่ากับ 0
$Spread_i$	ระยะเผื่อสำหรับซ่อมบำรุงงาน i
$Machine_bf_m$	จำนวนเครื่องจักรประเภท m ที่มีอยู่ก่อนหน้านี้ หรือมีค่าเท่ากับ 0 ในช่วงเวลาแรก
M	จำนวนที่มีค่ามาก เช่น 10,000, 100,000 เป็นต้น

<u>การกำหนดตัวแปรตัดสินใจ</u>

$Machine_{mh}$	จำนวนเครื่องจักร m ในช่วงเวลา h
$Plan_{ioth}$	มีค่าเท่ากับ 1 เมื่องาน i ของรถไฟฟ้าขบวน t สาย o มีแผนการซ่อมบำรุงในช่วงเวลา h นอกนั้นมีค่าเท่ากับ 0
Num_Train_{oth}	มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อรถไฟฟ้าขบวน t ของสาย o อยู่ในศูนย์ซ่อมบำรุงในช่วงเวลา h นอกนั้นมีค่าเท่ากับ 0
MaxTrain	จำนวนรถไฟฟ้าของสายเดียวกัน ที่อยู่ศูนย์ในช่วงเดียวกัน ที่มากที่สุด

วัตถุประสงค์หลักของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์คือเพื่อลดจำนวนเครื่องจักรที่ใช้ให้น้อยที่สุดโดยหาได้จากผลรวมของเครื่องจักรทุกเครื่องและทุกเดือน นอกจากนี้ยังมีวัตถุประสงค์อีกอย่าง

คือลดปริมาณรถไฟฟ้าของแต่ละสายที่ซ่อมบำรุงพร้อมกันให้น้อยที่สุด เมื่อมีวัตถุประสงค์ที่มีความสำคัญไม่เท่ากันจึงใช้หลักการของแบบจำลองการโปรแกรมเป้าหมาย (Goal Programming Model) โดยนำค่าที่มากๆเช่น 10,000 หรือเรียกว่า big M คูณกับวัตถุประสงค์หลัก ดังสมการที่ (2-0)

$$\text{minimize } z = \left(M \times \sum_{m \in M} \sum_{h \in H} \text{Machine}_{mh}\right) + \text{MaxTrain} \qquad (2\text{-}0)$$

เงื่อนไขของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สมการที่ (2-1) และ (2-2) เป็นการกำหนดให้ปริมาณเครื่องจักรแต่ละประเภทมีค่าเพิ่มขึ้นเสมอ

$$\text{Machine_bf}_{m} \leq \text{Machine}_{m1} \qquad \forall m \in M \qquad (2\text{-}1)$$

$$\text{Machine}_{m(h-1)} \leq \text{Machine}_{mh} \qquad \forall m \in M, \forall h \in H - \{1\} \qquad (2\text{-}2)$$

สมการที่ (2-3) เป็นการวางแผนงานซ่อมบำรุง โดยถ้ามีกำหนดงานซ่อมบำรุงต้องมีการวางแผนการซ่อมบำรุงภายในเวลาที่กำหนดหรือระยะเผื่อ เช่น ถ้าในช่วงเวลา h มีงานซ่อมบำรุงที่มีระยะเผื่อของมีค่าเท่ากับ 3 หรือทำได้ภายใน 3 ช่วงเวลา งานซ่อมบำรุงนี้จะสามารถซ่อมบำรุงได้ในช่วงเวลา h, h+1 และ h+2 เป็นต้น

$$\text{Task}_{ioth} = \sum_{h}^{h-1+\text{Spread}_i} \text{Plan}_{ioth} \qquad \forall i \in I, \forall o \in O, \forall t \in T, \forall h \in H \qquad (2\text{-}3)$$

ในการวางแผนงานซ่อมบำรุง เวลาที่ใช้ในการซ่อมบำรุงของทุกงานจะต้องไม่เกินกำลังการซ่อมบำรุงของเครื่องจักร เวลาในการซ่อมบำรุงของงานทั้งหมดหาได้จากงานที่ใช้ในการซ่อมบำรุงคูณกับเวลาในการซ่อมบำรุงแต่ละงานของแต่ละเครื่องจักร ดังสมการที่ (2-4)

$$\sum_{i \in I} \sum_{o \in O} \sum_{t \in T} \text{Plan}_{ioth} \times D_{im} \leq \text{Machine}_{mh} \qquad \forall m \in M, \forall h \in H \qquad (2\text{-}4)$$

สมการที่ (2-5) และ (2-6) สำหรับหาปริมาณรถไฟฟ้าของแต่ละสายที่ซ่อมบำรุงในช่วงเวลาเดียวกัน ซึ่ง 2 สมการนี้จะแตกต่างจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบแรก เนื่องจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบแรกจะจำกัดจำนวนรถไฟฟ้าในแต่ละสาย ให้สามารถซ่อมบำรุงในช่วงเวลาเดียวกันได้เพียง 1 ขบวนเท่านั้น

$$\sum_{i \in I} \text{Plan}_{ioth} \leq M \times \text{Num_Train}_{oth} \qquad \forall o \in O, \forall t \in T, \forall h \in H \qquad (2\text{-}5)$$

$$\sum_{o \in O} \text{Num_Train}_{oth} \leq \text{MaxTrain} \qquad \forall t \in T, \forall h \in H \qquad (2\text{-}6)$$

สมการที่ (2-7) (2-8) (2-9) และ (2-10) เป็นการกำหนดค่าของตัวแปรตัดสินใจ โดย $Plan_{ioth}$ และ Num_Train_{oth} มีค่าเท่ากับ 1 หรือ 0 เท่านั้น และตัวแปรตัดสินใจอื่นๆจะมีค่าเป็นจำนวนบวก

$$Plan_{ioth} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in I, \forall o \in O, \forall t \in T, \forall h \in H \qquad (2\text{-}7)$$

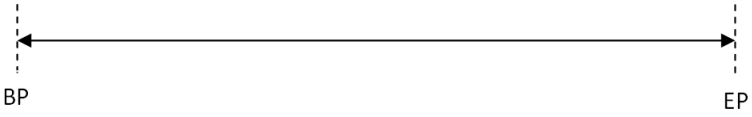
$$Machine_{mh} \geq 0 \qquad \forall m \in M, \forall h \in H \qquad (2\text{-}8)$$

$$Num_Train_{oth} \in \{0,1\} \qquad \forall o \in O, \forall t \in T, \forall h \in H \qquad (2\text{-}9)$$

$$MaxTrain \geq 0 \qquad (2\text{-}10)$$

3.2.2 การดำเนินการของแบบจำลอง

ผลเฉลยจากแบบจำลองจะแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ จำนวนเครื่องจักรในแต่ละเดือน และแผนงานการซ่อมบำรุงแต่ละเดือน อย่างไรก็ตามการวางแผนซ่อมบำรุงใหญ่เป็นการวางแผนระยะยาวทำให้มีข้อมูลจำนวนมากที่ใช้ในการวิเคราะห์ ในโมเดลนี้ไม่สามารถวิเคราะห์หาผลเฉลยทั้งหมดใน 1 ครั้ง ดังนั้นจึงใช้หลักการ “การวางแผนก้าวหน้า (Rolling Planning)” การวางแผนก้าวหน้า หมายถึงการวางแผนระยะยาวโดยแบ่งการดำเนินการออกเป็นช่วงๆในการวางแผน เมื่อได้ผลลัพธ์จากช่วงก่อนหน้า จะนำมาปรับข้อมูลนำเข้า เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ในช่วงต่อๆไป ในการวิเคราะห์ผลจึงได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกเป็นหาจำนวนเครื่องจักรที่น้อยที่สุดในการซ่อมบำรุง แต่ละรอบของการวิเคราะห์จะเริ่มต้นที่ช่วงเวลา BP หรือ Begin of Period และ สิ้นสุดที่ EP หรือ End of Period ดังนั้นในแต่ละรอบช่วงเวลาที่พิจารณาหรือ H จะอยู่ในช่วง{BP, BP+1, BP+2 ..., EP} ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ช่วงเวลาสำหรับการวิเคราะห์หาจำนวนเครื่องจักร

หลังจากวิเคราะห์แบบจำลองแรก ก็จะได้แผนงานซ่อมบำรุงในช่วง H {BP, BP+1, BP+2 ..., EP} ในรอบถัดไป ช่วงเวลาที่ใช้ H จะอยู่ในช่วง BP+n ถึง EP+n ซึ่งจะมีช่วงซ้อนทับกันอยู่กับช่วงเวลาก่อนหน้าบางส่วน (BP+n ถึง EP) ดังรูปที่ 3.2 ในงานวิจัยนี้จะวนหาผลเฉลยทุก 1 ปีหรือ 12 เดือน ดังนั้นจึงกำหนดให้ n เท่ากับ 12 เดือนและในการวิเคราะห์ 1 รอบจะวิเคราะห์ผลงานซ่อมบำรุงทั้งหมด 5 ปี หรือ 60 เดือน ดังนั้น EP จะเท่ากับ BP+59 ในช่วงแรก H จะอยู่ในช่วง {1, 2, 3, ..., 60} และในช่วงที่ 2 H จะอยู่ในช่วง {13, 14, 15, ..., 72} ดังนั้น จากผลเฉลยในรอบแรกจะกำหนดงานซ่อมบำรุงในในช่วง {1, 2, 3, ..., 12} (ช่วงเวลา BP ถึง BP+n-1) แต่ในช่วง {13, 14, 15, ..., 60} สามารถปรับกำหนดการซ่อมบำรุงได้จากการวิเคราะห์ในรอบถัดไป ซึ่งถ้าหากงานซ่อมบำรุงมีกำหนดที่ต้องทำในช่วงเวลา{1, 2, 3, ..., 12} แต่ยังไม่มีการวางแผนงาน ระยะเผื่อของงานนั้น ในการวางแผนรอบต่อไปจะลดลง เพราะฉะนั้น ระยะเผื่อของงานซ่อมบำรุงจะไม่คงที่ โดยระยะเผื่อจะขึ้นอยู่กับขบวนรถไฟฟ้าและช่วงเวลา จาก $Spread_i$ ในสมการ (2-3) จึงเปลี่ยนเป็น $Spread_{ioth}$ ซึ่งหมายถึง

ระยะเผื่อในการซ่อมบำรุงงาน i ของรถไฟฟ้าสาย o ขบวน t ในช่วงเวลา h ดังนั้น ในส่วนที่ 2 จึงเป็นหาข้อมูลสำหรับวเคราะห์ในรอบถัดไป

$$Task_{ioth} = \sum_{h}^{h-1+Spread_{ioth}} Plan_{ioth} \qquad \forall i \in I, \forall o \in O, \forall t \in T, \forall h \in H \qquad (2\text{-}3)$$

รูปที่ 3.2 การกำหมดช่วงเวลาในการวิเคราะห์ข้อมูลแต่ละรอบ

ตัวอย่างเช่น เมื่อ H อยู่ในช่วงเวลา {1, 2, ..., 60} โดยที่ BP เท่ากับ 1 และ BP+n เท่ากับ 13 ถ้าหากมีกำหนดการซ่อมบำรุงในช่วงที่ 11 โดยมีระยะเผื่อเท่ากับ 7 แต่ไม่มีแผนการซ่อมบำรุงงานนี้ในช่วงที่ 1 ถึง 12 ดังนั้นในรอบต่อไป (ช่วงที่ 13) จึงมีกำหนดการซ่อมบำรุงงานนี้ โดยเหลือระยะเผื่อเท่ากับ 5 ซึ่งงานซ่อมบำรุงอื่นๆที่มีกำหนดการอยู่ในช่วง BP+n และช่วงหลังจาก BP+n จะเป็นไปตามเดิม ในส่วนนี้จะได้ผลลัพธ์คือกำหนดการในการซ่อมบำรุง และระยะเผื่อในการซ่อมบำรุง ของงาน i รถไฟฟ้าขบวน t สาย o ในแต่ละช่วงเวลา h นอกจากนี้ $Machine_bf_m$ หรือจำนวนเครื่องจักรเริ่มต้นในรอบถัดไปจะได้จาก $Machine_{mh}$ ที่ช่วงเวลา BP+n– 1 ดังนั้นในการหาจำนวนเครื่องจักรที่น้อยที่สุดตลอดช่วงเวลาทำได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 หาอายุรถไฟฟ้าและกำหนดการซ่อมบำรุงของรถไฟฟ้าแต่ละขบวน โดยหาได้จาก ปี และเดือนที่เปิดให้บริการ และรายละเอียดงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า ซึ่งประกอบไปด้วย ระยะห่างการซ่อมบำรุง และช่วงเวลาในการทำงานซ่อมบำรุง (ระยะเผื่อ) ตัวอย่างเช่น ในตารางที่ 3.9 แสดงตัวอย่างข้อมูลรายละเอียดของรถไฟฟ้า โดยมีสายรถไฟฟ้าทั้งหมด 3 สาย แต่ละสายมีรถไฟฟ้า 3 ขบวน และในตารางที่ 3.10 แสดงตัวอย่างข้อมูลรายละเอียดของงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า โดยมีงานซ่อมบำรุงทั้งหมด 2 งาน ซึ่งตัวอย่างดังกล่าวจะใช้ในการอธิบายการหาจำนวนเครื่องจักร และการวางแผนงานซ่อมบำรุงในขั้นตอนต่อไป

ตารางที่ 3.9 ตัวอย่างข้อมูลรายละเอียดของรถไฟฟ้า

สายรถไฟฟ้า	รถไฟฟ้า	ปีที่เปิดให้บริการ	เดือนที่เปิดให้บริการ
A	1	2542	1
A	2	2542	1
A	3	2542	1
B	1	2542	5

B	2	2542	5
B	3	2542	5
C	1	2542	9
C	2	2542	9
C	3	2542	9

ตารางที่ 3.10 ตัวอย่างข้อมูลรายละเอียดของงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า

กลุ่มงานซ่อมบำรุง	ระยะห่างการซ่อมบำรุง (เดือน)	ระยะเผื่อ (เดือน)
1	6	3
2	10	5

จากตารางที่ 3.9 และ 3.10 สามารถหากำหนดการซ่อมบำรุง ได้ดังตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 ตัวอย่างกำหนดการซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า

สายรถไฟฟ้า	รถไฟฟ้า	ปีที่เปิดให้บริการ	เดือนที่เปิดให้บริการ	เดือนที่มีกำหนดการซ่อมบำรุง	
				กลุ่มงานที่ 1	กลุ่มงานที่ 2
A	1	2542	1	7, 13 ,19 , ...	11, 21 , ...
A	2	2542	1	7, 13 ,19 , ...	11, 21 , ...
A	3	2542	1	7, 13 ,19 , ...	11, 21 , ...
B	1	2542	5	11, 17, 23, ..	15, ...
B	2	2542	5	11, 17, 23, ..	15, ...
B	3	2542	5	11, 17, 23, ..	15, ...
C	1	2542	9	15, 21, ...	19, ...
C	2	2542	9	15, 21, ...	19, ...
C	3	2542	9	15, 21, ...	19, ...

ขั้นตอนที่ 2 วิเคราะห์หาจำนวนเครื่องจักรที่ใช้ในการซ่อมบำรุง และการวางแผนงานซ่อมบำรุง จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาจำนวนเครื่องจักรที่น้อยสุด ซึ่งแต่ละรอบ ช่วงเวลาที่พิจารณา (H) จะอยู่ในช่วง {BP, BP+1, BP+2, ... EP} โดยที่ ในรอบแรก BP จะมีค่าเท่ากับ 1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้มีข้อมูลตั้งต้นคือ กำหนดการซ่อมบำรุงของรถไฟฟ้าแต่ละขบวนซึ่งหาได้จากขั้นตอนที่ 1 (ตารางที่ 3) และจำนวนเครื่องจักรแต่ละประเภทในช่วงเริ่มต้น (Machine_bf_m) เท่ากับ 0 เครื่อง จากการวิเคราะห์จะได้ผลลัพธ์ 2 ส่วนคือ จำนวนเครื่องจักรที่ใช้ในแต่ละเดือน และการตารางงานซ่อมบำรุงของรถไฟฟ้าแต่ละเดือน ซึ่งเนื่องจากเป็นการวางแผนก้าวหน้า (Rolling Plan) ทุก 1 ปี หรือ 12

เดือน ดังนั้นผลลัพธ์ที่สนใจจะอยู่ในช่วง {BP, BP+1, BP+2, ... BP+11} หรือ {1, 2, 3, ..., 12} สำหรับในรอบแรก เป็นดังตารางที่ 3.12 และ 3.13

ตารางที่ 3.12 การตารางงานซ่อมบำรุงของรถไฟฟ้าแต่ละเดือน ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2

เดือนที่ใช้ในการวางแผน	สายรถไฟฟ้า	รถไฟฟ้า	กลุ่มงานซ่อมบำรุง	ระยะเผื่อ (เดือน)	สามารถซ่อมบำรุงได้ในเดือน	ทำงานซ่อมบำรุงในเดือน
7	A	1	1	3	7, 8, 9	7
7	A	2	1	3	7, 8, 9	8
7	A	3	1	3	7, 8, 9	9
11	B	1	1	3	11, 12, 13	11
11	B	2	1	3	11, 12, 13	12
11	B	3	1	3	11, 12, 13	13
11	A	1	2	5	11, 12, 13, 14, 15	14
11	A	2	2	5	11, 12, 13, 14, 15	14
11	A	3	2	5	11, 12, 13, 14, 15	15

ตารางที่ 3.13 จำนวนเครื่องจักรที่ใช้ในแต่ละเดือนในช่วง {1, 2, 3, ..., 12} ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2

MC	เดือน											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
2	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ขั้นตอนที่ 3 นำตารางงานซ่อมบำรุงในช่วง {BP, BP+1, BP+2, ... EP} ในตารางที่ 3.12 มาหาข้อมูลตั้งต้นสำหรับรอบถัดไป โดยงานซ่อมบำรุงในช่วง {1, 2, 3, ..., 12} จะเป็นไปตามแผนงานเดิม (ตารางที่ 3.14) และงานซ่อมบำรุงที่มีกำหนดการอยู่ในช่วง {1, 2, 3, ..., 12} แต่ไม่ได้มีแผนการซ่อมบำรุงในช่วง {1, 2, 3, ..., 12} ตามตารางที่ 3.15 จะมีการเลื่อนกำหนดการไปอยู่ในช่วง 13 (BP+n) โดยที่มีระยะเผื่อลดลง เป็นดังตารางที่ 3.16 และกำหนดการในการซ่อมบำรุงหลังจากช่วงที่ 13 (BP+n) จะเป็นไปตามแผนงานเดิม เป็นดังตารางที่ 3.17

ตารางที่ 3. 14 การตารางงานซ่อมบำรุงของรถไฟฟ้าในช่วง {1, 2, 3, ..., 12}

เดือนที่ใช้ในการวางแผน	สายรถไฟฟ้า	รถไฟฟ้า	กลุ่มงานซ่อมบำรุง	ระยะเผื่อ (เดือน)	สามารถซ่อมบำรุงได้ในเดือน	ทำงานซ่อมบำรุงในเดือน
7	A	1	1	3	7, 8, 9	7
7	A	2	1	3	7, 8, 9	8
7	A	3	1	3	7, 8, 9	9
11	B	1	1	3	11, 12, 13	11
11	B	2	1	3	11, 12, 13	12

ตารางที่ 3.15 งานซ่อมบำรุงที่มีกำหนดการอยู่ในช่วง {1, 2, 3, ..., 12} แต่ไม่มีการซ่อมบำรุงในช่วง {1, 2, 3, ..., 12}

เดือนที่ใช้ในการวางแผน	สายรถไฟฟ้า	รถไฟฟ้า	กลุ่มงานซ่อมบำรุง	ระยะเผื่อ (เดือน)	สามารถซ่อมบำรุงได้ในเดือน	ทำงานซ่อมบำรุงในเดือน
11	B	3	1	3	11, 12, 13	13
11	A	1	2	5	11, 12, 13, 14, 15	14
11	A	2	2	5	11, 12, 13, 14, 15	14
11	A	3	2	5	11, 12, 13, 14, 15	15

ตารางที่ 3.16 การเลื่อนกำหนดการของงานซ่อมบำรุงที่มีกำหนดการอยู่ในช่วง {1, 2, 3, ..., 12} แต่ไม่มีการซ่อมบำรุงในช่วง {1, 2, 3, ..., 12}

เดือนที่ใช้ในการวางแผน	สายรถไฟฟ้า	รถไฟฟ้า	กลุ่มงานซ่อมบำรุง	ระยะเผื่อ (เดือน)	สามารถซ่อมบำรุงได้ในเดือน
13	B	3	1	1	13
13	A	1	2	3	13, 14, 15
13	A	2	2	5	13, 14, 15
13	A	3	2	5	13, 14, 15

ตารางที่ 3. 17 กำหนดการในการซ่อมบำรุงหลังจากช่วงที่ 13

เดือนที่ใช้ในการวางแผน	สายรถไฟฟ้า	รถไฟฟ้า	กลุ่มงานซ่อมบำรุง	ระยะเผื่อ (เดือน)	สามารถซ่อมบำรุงได้ในเดือน
13	A	1	1	3	13, 14, 15
13	A	2	1	3	13, 14, 15
13	A	3	1	3	13, 14, 15

เดือนที่ใช้ในการวางแผน	สายรถไฟฟ้า	รถไฟฟ้า	กลุ่มงานซ่อมบำรุง	ระยะเผื่อ (เดือน)	สามารถซ่อมบำรุงได้ในเดือน
15	C	1	1	3	15, 16, 17
15	C	2	1	3	15, 16, 17
15	C	3	1	3	15, 16, 17
15	B	1	2	5	15, 16, 17, 18, 19
15	B	2	2	5	15, 16, 17, 18, 19
15	B	3	2	5	15, 16, 17, 18, 19
17	B	1	1	3	17, 18, 19
17	B	2	1	3	17, 18, 19
17	B	3	1	3	17, 18, 19
19	A	1	1	3	19, 20, 21
19	A	2	1	3	19, 20, 21
19	A	3	1	3	19, 20, 21
19	C	1	2	5	19, 20, 21, 22, 23
19	C	2	2	5	19, 20, 21, 22, 23
19	C	3	2	5	19, 20, 21, 22, 23
21	A	1	2	5	21, 22, 23, 24, 25
21	A	2	2	5	21, 22, 23, 24, 25
21	A	3	2	5	21, 22, 23, 24, 25
21	C	1	1	3	21, 22, 23
21	C	2	1	3	21, 22, 23
21	C	3	1	3	21, 22, 23
23	B	1	1	3	23, 24, 25
23	B	2	1	3	23, 24, 25
23	B	3	1	3	23, 24, 25

ขั้นตอนที่ 4 ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 2 และ 3 จนครบทุกช่วงเวลา โดยในแต่ละรอบ BP จะเพิ่มขึ้นรอบละ 12 เดือน และจำนวนเครื่องจักรแต่ละประเภทในช่วงก่อนหน้า จะหาได้จากจำนวนเครื่องจักร BP-1 ตัวอย่างเช่น ในรอบที่ 2 BP จะเท่ากับ 13 โดยมีกำหนดการซ่อมบำรุงตามตารางที่ 8 และ 9 และมีจำนวนเครื่องจักรเริ่มต้นเท่ากับจำนวนเครื่องจักรในเดือนที่ 12 หรือเท่ากับ {1, 1, 0, 1, 0} เครื่อง

3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การจัดตารางการซ่อมบำรุงในแต่ละเดือน

เมื่อทราบถึงการวางแผนระยะยาวว่าแต่ละเดือนมีงานซ่อมบำรุงใดที่ต้องทำการซ่อมบำรุงบ้าง และจำนวนเครื่องจักรที่มีอยู่ แต่ในการซ่อมบำรุงอาจจะไม่สามารถทำตามการวางแผนระยะยาว

ได้ เนื่องจากอาจจะเกิดเหตุการณ์ความต้องการเครื่องจักรในเวลาเดียวกันมาก ถึงแม้ว่าเวลารวมในการทำงานแต่ละเดือนของเครื่องจักรจะเพียงพอ แต่อาจจะไม่สามารถทำการซ่อมบำรุงได้จริง ตัวอย่างเช่น กำหนดให้มีเวลาทั้งหมด 20 ชั่วโมง โดยที่ต้องทำงานซ่อมบำรุงดังนี้

- งานที่ 1 ใช้เครื่องจักร 1 และ 3 โดยใช้เวลาซ่อมบำรุงเท่ากับ 3 ชั่วโมง
- งานที่ 2 ใช้เครื่องจักร 1 และ 4 โดยใช้เวลาซ่อมบำรุงเท่ากับ 2 ชั่วโมง
- งานที่ 3 ใช้เครื่องจักร 1 และ 2 โดยใช้เวลาซ่อมบำรุงเท่ากับ 3 ชั่วโมง
- งานที่ 4 ใช้เครื่องจักร 1 3 และ 4 โดยใช้เวลาซ่อมบำรุงเท่ากับ 4 ชั่วโมง
- งานที่ 5 ใช้เครื่องจักร 2 3 และ 4 โดยใช้เวลาซ่อมบำรุงเท่ากับ 6 ชั่วโมง
- งานที่ 6 ใช้เครื่องจักร 1 3 และ 4 โดยใช้เวลาซ่อมบำรุงเท่ากับ 3 ชั่วโมง
- งานที่ 7 ใช้เครื่องจักร 1 และ 3 โดยใช้เวลาซ่อมบำรุงเท่ากับ 4 ชั่วโมง

พบว่า เครื่องจักร 1 2 3 และ 4 ใช้เวลาในการซ่อมบำรุงทั้งหมด 19, 9, 19 และ 15 ชั่วโมง ดังนั้น ในการซ่อมบำรุง เครื่องจักรเพียงเครื่องเดียวสามารถรองรับการซ่อมบำรุงได้ แต่ในการจัดตารางนั้น พบว่า ไม่สามารถปฏิบัติงานได้จริง ดังตัวอย่างการจัดตารางในตารางที่ 3.18 ต้องใช้เวลาถึง 25 ชั่วโมงในการทำงานซ่อมบำรุงทั้งหมด หรือต้องเพิ่มจำนวนเครื่องจักรเพื่อให้สามารถทำงานได้ใน 20 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.18 ตัวอย่างการจัดตารางงานซ่อมบำรุงในแต่ละเดือน

Machine	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
#1	งาน 1			งาน 2		งาน 3			งาน 4										งาน 6			งาน 7			
#2						งาน 3							งาน 5												
#3	งาน 1								งาน 4				งาน 5						งาน 6			งาน 7			
#4				งาน 2					งาน 4				งาน 5						งาน 6						

ฉะนั้นจึงทำการจัดตารางซ่อมบำรุงเพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ในการวางแผนระยะยาวแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อไปนี้จะเสนอการจัดตารางการซ่อมบำรุง ในการจัดตารางจะแยกงานซ่อมบำรุงออกเป็นงานย่อยๆ ดังตารางที่ 3.19 เนื่องจากในการซ่อมบำรุงงานย่อยจะมีการใช้เครื่องจักรหลายเครื่องพร้อมกัน ดังนั้นจึงกำหนดเวลาในการใช้เครื่องจักรของซ่อมบำรุงแต่ละงานเท่ากัน (d_j) ซึ่งเวลาที่ใช้ในการซ่อมบำรุงงานย่อยที่น้อยที่สุดคือ 4 ชั่วโมง จึงกำหนดให้ 1 ช่วงเวลามี 4 ชั่วโมง ในการจัดตารางการซ่อมบำรุงจะมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อให้รถไฟฟ้าแต่ละขบวนใช้เวลาในศูนย์

ซ่อมบำรุงน้อยที่สุด ถ้าหากต้องทำการซ่อมบำรุงงานทุก 1 ปี จะกำหนดให้การซ่อมบำรุงงานย่อย 1 2 และ 3 ทำการซ่อมบำรุงใกล้กันมากที่สุด หรือมีช่วงเวลาที่ขบวนรถไฟฟ้าอยู่ในศูนย์ซ่อมบำรุง แต่ไม่ได้ซ่อมบำรุงน้อยที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม ในช่วงเวลาเดียวกันรถไฟฟ้าแต่ละขบวนจะสามารถซ่อมบำรุงงานย่อยได้เพียง 1 งาน

ตารางที่ 3.19 งานซ่อมบำรุงย่อย

Task	SubTask		Duration (hr.)	Duration (Period) : 1 Period = 4 hr.
Y1	1	เปลี่ยนถ่ายน้ำมันเกียร์	32	8
	2	การบำรุงรักษาประตูผู้โดยสาร	16	4
	3	การบำรุงรักษาเครื่องอัดอากาศ	4	1
Y5	4	เปลี่ยนล้อและตัวสอบรอยแตกของเพลา	56	14
Y6	5	Disassemble Parts and Bearing Replacement	64	16
	6	เปลี่ยนแหวนรองและ อัดจาระบี	16	4
	7	เปลี่ยน Air Spring	28	7
	8	บำรุงรักษาระบบแอร์	24	6
	9	การบำรุงรักษาเหล็กกันโคลงเปลี่ยนชิ้นส่วนไซเลนท์ บล็อก (Silent Block) และแท่งบิด (Torsion Bar)	16	4
Y9	10	บำรุงรักษาระบบแอร์	32	8
Y12	11	การบำรุงรักษา Bogie Frame	112	28
	12	บำรุงรักษาระบบแอร์	32	8

3.3.1 Model Formulation

<u>สัญลักษณ์และพารามิเตอร์</u>

S เซตของช่วงเวลาใน 1 เดือนโดยกำหนดให้ 1 ช่วงเวลามี 4 ชั่วโมง 1 วันมี 24 ชั่วโมง ดังนั้น 1 เดือนมี 180 ช่วงเวลา = {1, 2, 3, 4, 5, ..., 180}

J เซตของงานซ่อมบำรุงย่อย, j = {1, 2, 3, ..., 12}

- j = 1 : เปลี่ยนถ่ายน้ำมันเกียร์
- j = 2 : การบำรุงรักษาประตูผู้โดยสาร

- j = 3 : การบำรุงรักษาเครื่องอัดอากาศ
- j = 4 : เปลี่ยนล้อและตัวสอบรอยแตกของเพลา
- j = 5 : Disassemble Parts and Bearing Replacement
- j = 6 : เปลี่ยนแหวนรอง และอัดจาระบี
- j = 7 : เปลี่ยน Air Spring
- j = 8 : บำรุงรักษาระบบแอร์ทุก 6 ปี
- j = 9 : การบำรุงรักษาเหล็กกันโคลงเปลี่ยนชิ้นส่วนไซเลนท์ บล็อก (Silent Block) และแท่งบิด (Torsion Bar)
- j = 10 : บำรุงรักษาระบบแอร์ทุก 9 ปี
- j = 11 : บำรุงรักษา Bogie Frame
- j = 12 : บำรุงรักษาระบบแอร์ทุก 12 ปี

O เซตของสายรถไฟฟ้า, o = {1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8}

T เซตของขบวนรถไฟฟ้าในแต่ละสาย, t = {1, 2, 3, 4, 5, ..., o_t}

M เซตของเครื่องจักร, m = {1, 2, 3, 4, 5, ..., 13}

d_j เวลาที่ใช้ในการซ่อมบำรุงงาน j

$Plan_{jot}$ มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อรถไฟฟ้า t สาย o ต้องซ่อมบำรุงงาน j

Num_MC_m จำนวนเครื่องจักรประเภท m

$TaskMC_{jm}$ มีค่าเท่ากับ 1 เมื่องาน j ใช้เครื่องจักร m ในการซ่อมบำรุง นอกนั้นมีค่าเท่ากับ 0 ดังตารางที่ 3.20 ตัวอย่างเช่น ในการซ่อมบำรุงงานย่อยที่ 1 จะใช้เครื่องจักร 2, 4, 7, 9, 10 และ 12

ตารางที่ 3.20 เครื่องจักรที่ใช้ในแต่ละงานซ่อมบำรุงย่อย ($TaskMC_{jm}$)

		Machine												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Task	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	1	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	0
	5	0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0
	6	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0
	7	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

		Machine												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	8	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
	9	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
	10	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	11	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0
	12	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0

การกำหนดตัวแปรตัดสินใจ

$timetable_{jots}$ มีค่าเป็น 1 เมื่อในช่วงเวลา s รถไฟฟ้าขบวน t สาย o ทำการซ่อมบำรุงงาน j นอกนั้นมีค่าเท่ากับ 0

$timestart_{jots}$ มีค่าเป็น 1 ตั้งแต่ช่วงเวลา s ที่รถไฟฟ้าขบวน t สาย o เริ่มซ่อมบำรุงงาน j นอกนั้นมีค่าเท่ากับ 0

$timeend_{jots}$ มีค่าเป็น 0 ตั้งแต่ช่วงเวลา s ที่รถไฟฟ้าขบวน t สาย o ซ่อมบำรุงงาน j เสร็จ นอกนั้นมีค่าเท่ากับ 1

$Machine_assign_{jotm}$ มีค่าเป็น 1 เมื่องานซ่อมบำรุง j ของรถไฟฟ้าขบวน t สาย o ใช้เครื่องจักร m นอกนั้นมีค่าเท่ากับ 0

$Machine_use_{jotms}$ มีค่าเป็น 1 เมื่อรถไฟฟ้าขบวน t สาย o ใช้เครื่องจักร m ซ่อมบำรุงงาน j ช่วงเวลา s
นอกนั้นมีค่าเท่ากับ 0

$timetable_train_{ots}$ มีค่าเป็น 1 เมื่อในช่วงเวลา s รถไฟฟ้าขบวน t สาย o อยู่ในศูนย์ซ่อมบำรุง นอกนั้นมีค่าเท่ากับ 0

$timestart_train_{ots}$ มีค่าเป็น 1 ตั้งแต่ช่วงเวลา s ที่รถไฟฟ้าขบวน t สาย o เข้าศูนย์ซ่อมบำรุง นอกนั้นมีค่าเท่ากับ 0

$timeend_train_{ots}$ มีค่าเป็น 0 ตั้งแต่ช่วงเวลา s ที่รถไฟฟ้าขบวน t สาย o ออกจากศูนย์ซ่อมบำรุง นอกนั้นมีค่าเท่ากับ 1

$Max_OperateTime$ เวลาที่รถไฟฟ้าอยู่ในศูนย์ซ่อมบำรุงนานที่สุด

$OperateTime_{ot}$ เวลาที่รถไฟฟ้าขบวน t สาย o อยู่ในศูนย์ซ่อมบำรุง

วัตถุประสงค์ของแบบจำลองนี้คือสามารถจัดตารางงานซ่อมบำรุงของรถไฟฟ้าได้ โดยที่รถไฟฟ้าใช้เวลาอยู่ในศูนย์ซ่อมบำรุงน้อยที่สุด

$$z=M \times Max_OperateTime+\sum_{o \in O}\sum_{t \in T} OperateTime_{ot} \quad (3\text{-}0)$$

เงื่อนไขของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สมการที่ (3-1) เป็นสมการจองตารางเวลาของขบวนรถ เมื่อรถไฟฟ้า t สาย o มีงานซ่อมบำรุง j ค่า $Plan_{jot}$ จะมีค่าเท่ากับ 1 ทำให้ผลรวมของ $timetable_{jots}$ มีค่าเท่ากับ เวลาที่ใช้ในการซ่อมบำรุง (d_j)

$$\sum_{s \in S} timetable_{jots} = d_j \times Plan_{jot} \qquad \forall j \in J, \forall o \in O, \forall t \in T \qquad (3\text{-}1)$$

สมการที่ (3-2) คือ ในแต่ละช่วงเวลา รถไฟฟ้าแต่ละขบวนจะสามารถซ่อมบำรุงได้เพียงงานเดียว ไม่สามารถซ่อมบำรุงซ้อนทับกันได้

$$\sum_{j \in J} timetable_{jots} \leq 1 \qquad \forall s \in S, \forall o \in O, \forall t \in T \qquad (3\text{-}2)$$

ในสมการที่ (3-3) เป็นการกำหนดว่าเมื่อรถไฟฟ้าเริ่มซ่อมบำรุงแล้ว $timestart_{jots}$ จะมีค่าเท่ากับ 1 นอกนั้นมีค่าเท่ากับ 0 และในสมการที่ (3-4) เป็นการกำหนดว่าเมื่อรถไฟฟ้าซ่อมบำรุงเสร็จแล้ว $timeend_{jots}$ จะมีค่าเท่ากับ 0 นอกนั้นมีค่าเท่ากับ 1 จากสมการที่ (3-5) ถ้าหาก $timestart_{jots}$ และ $timeend_{jots}$ มีค่าเท่ากับ 1 แล้ว $timetable_{jost}$ จะมีค่าเท่ากับ 1 ด้วย ดังตารางที่ 3.21

ตารางที่ 3.21 ตัวอย่างสำหรับอธิบายสมการที่ (3-3) ถึง (3-7)

S	1	2	3	4	5	6	7	8
$timestart_{jots}$	0	0	1	1	1	1	1	1
$timeend_{jots}$	1	1	1	1	1	1	0	0
$timetable_{jots}$	0	0	1	1	1	1	0	0

ซึ่งจะเห็นได้ว่า ในสมการที่ (3-5) ถึง (3-7) เป็นการกำหนดค่า $timetable_{jost}$ โดยถ้ามีแผนงานซ่อมบำรุง จะต้องจองเวลาในการซ่อมบำรุงเท่ากับ เวลาที่ใช้ในการซ่อมบำรุง และงานซ่อมบำรุงต้องต่อเนื่องกัน แต่จากสมการที่ (3-5) $timetable_{jost}$ สามารถมีค่าเท่ากับ 0 หรือ 1 ก็ได้ ตามตัวอย่างในตารางที่ 3.22 (เมื่อกำหนดให้ $\sum_{s \in S} timetable_{jots} = 4$ เช่นเดียวกันตารางที่ 3.21) ดังนั้นสมการที่ (3-6) และ (3-7) จะกำหนดว่า ถ้า $timestart_{jots}$ หรือ $timeend_{jots}$ มีค่าเท่า 0 $timetable_{jost}$ จะมีค่าเท่ากับ 0 เท่านั้น

ตารางที่ 3.22 ตัวอย่างสำหรับอธิบายสมการที่ (3-6) ถึง (3-7)

S	1	2	3	4	5	6	7	8
$timestart_{jots}$	0	0	0	0	1	1	1	1

S	1	2	3	4	5	6	7	8
$timeend_{jots}$	1	1	1	1	1	0	0	0
$timetable_{jots}$	0	0	1	0	1	1	0	1

เพราะฉะนั้น สมการที่ (3-3) ถึง (3-7) เป็นเงื่อนไขสำหรับกำหนดว่า งานซ่อมบำรุงแต่ละงานจะต้องทำเสร็จในรอบเดียว ติดต่อกันตลอด ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ ตั้งแต่เริ่มจนกว่าจะเสร็จงาน เช่น ตัวอย่างใน ตารางที่ 3.21

ในช่วงเวลา s เมื่อ $timestart_{jots}$ และ$timeend_{jots}$ มีค่าเท่ากับ 1 ทั้งคู่ จะทำให้ $timetable_{jots}$ มีค่าเท่ากับ 1 ด้วย แต่ถ้าหาก $timestart_{jots}$ หรือ $timeend_{jots}$ ตัวใดตัวหนึ่งมีค่าเท่ากับ 0 จะทำให้ $timetable_{jots}$ มีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งจะเห็นได้ว่า $timetable_{jots}$ ที่มีค่าเท่ากับ 1 จะมีช่วงเวลาที่ติดกัน นอกจากนี้ $timetable_{jots}$ ที่มีค่าเท่ากับ 1 จะแสดงถึงในช่วงเวลา s รถไฟฟ้าขบวน t สาย o มีการซ่อมบำรุงงานย่อย j รถไฟฟ้าขบวนนี้ ซ่อมบำรุงงานย่อย j ในช่วง 3 - 6 เป็นต้น

$$timestart_{jots} \le timestart_{jot(s+1)} \quad \forall j \in J, \forall o \in O, \forall t \in T, \forall s \in S\text{-}\{end\} \qquad (3\text{-}3)$$

$$timeend_{jots} \ge timeend_{jot(s+1)} \quad \forall j \in J, \forall o \in O, \forall t \in T, \forall s \in S\text{-}\{end\} \qquad (3\text{-}4)$$

$$timetable_{jots} \ge timestart_{jots} + timeend_{jots} - 1 \quad \forall j \in J, \forall o \in O, \forall t \in T, \forall s \in S \qquad (3\text{-}5)$$

$$timestart_{jots} \ge timetable_{jots} \quad \forall j \in J, \forall o \in O, \forall t \in T, \forall s \in S \qquad (3\text{-}6)$$

$$timeend_{jots} \ge timetable_{jots} \quad \forall j \in J, \forall o \in O, \forall t \in T, \forall s \in S \qquad (3\text{-}7)$$

สมการที่ (3-8) เป็นการจัดตารางเครื่องจักรกับงานซ่อมบำรุงในแต่ละช่วงเวลา เมื่อมีงานซ่อมบำรุงจะมีการจองเครื่องจักรที่ใช้ในการซ่อมบำรุงซึ่งอยู่ในสมการที่ (3-8)

$$Machine_assign_{jotm} = TaskMC_{jm} \times Plan_{jot} \quad \forall j \in J, \forall o \in O, \forall t \in T, \forall m \in M \qquad (3\text{-}8)$$

สมการที่ (3-9) และ (3-10) เป็นข้อจำกัดในเรื่องจำนวนเครื่องจักร โดยแต่ละช่วงเวลาการใช้เครื่องจักรแต่ละประเภทจะไม่เกินจำนวนเครื่องจักรที่มี อยู่ซึ่งในสมการที่ (3-9) ถ้าหากช่วงเวลา s มีงานซ่อมบำรุง ($timetable_{jots}$ =1) และต้องใช้เครื่องจักร m ($Machine_assign_{jotm}$ =1) แล้วเครื่องจักรจะถูกจองไว้ ($Machine_use_{jotms}$=1) ดังนั้นเมื่อรวมจำนวนเครื่องจักรที่ใช้ในแต่ละช่วงเวลาจะต้องไม่เกินจำนวนเครื่องจักรที่มีอยู่แสดงในสมการที่ (3-10)

$$Machine_use_{jotms} \ge Machine_assign_{jotm} + timetable_{jots} - 1$$

$$\forall j \in J, \forall o \in O, \forall t \in T, \forall s \in S, \forall m \in M \qquad (3\text{-}9)$$

$$\sum_{j\in J}\sum_{o\in O}\sum_{t\in T} \text{Machine_use}_{jotms} \le \text{Num_MC}_{m} \quad \forall s\in S, \forall m\in M \qquad (3\text{-}10)$$

สมการที่ (3-11) เมื่อมีการซ่อมบำรุงรถไฟฟ้า รถไฟฟ้าขบวนนั้นจะอยู่ในศูนย์ซ่อมบำรุง

$$\text{timetable_train}_{ots} \ge \sum_{j\in J} \text{timetable}_{jots} \qquad \forall o\in O, \forall t\in T, \forall s\in S \qquad (3\text{-}11)$$

สมการที่ (3-12) ถึง (3-16) จะคล้ายคลึงกับสมการที่ (3-3) ถึง (3-7) ต่างกันที่สมการที่ (3-12) ถึง (3-16) เป็นสมการในการหาช่วงเวลาทั้งหมดที่รถไฟฟ้าอยู่ในศูนย์ซ่อมบำรุง ซึ่งจะรวมเวลาในการซ่อมบำรุง และเวลาในการรอการซ่อมบำรุงงานถัดไป ตัวอย่างเช่น

ตารางที่ 3.23 ตัวอย่างสำหรับอธิบายสมการที่ (3-12) ถึง (3-16)

S	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$\text{timestart_train}_{ots}$	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$\text{timeend_train}_{ots}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
$\text{timetable_train}_{ots}$	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0

ในช่วงเวลา s เมื่อ $\text{timestart_train}_{ots}$ มีค่าเท่า 1 แสดงว่า รถไฟฟ้าขบวนนี้เข้ามายังศูนย์ซ่อมบำรุงแล้ว และ $\text{timeend_train}_{ots}$ มีค่าเท่า 0 แสดงว่า รถไฟฟ้าขบวนนี้ออกจากศูนย์ซ่อมบำรุงแล้ว ดังนั้นเมื่อทั้งคู่มีค่าเท่ากับ 1 จะทำให้ $\text{timetable_train}_{ots}$ มีค่าเท่ากับ 1 ด้วย ซึ่งหมายถึงรถไฟฟ้าขบวนนี้อยู่ภายในศูนย์ซ่อมบำรุง เช่น จากตัวอย่างในตาราง รถไฟฟ้าขบวนนี้อยู่ภายในศูนย์ซ่อมบำรุงในช่วง 2 - 9 เป็นต้นและในสมการที่ (3-17) OperateTime_{ot} เป็นเวลารวมทั้งหมดที่รถไฟฟ้าอยู่ในศูนย์ซ่อมบำรุง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

$$\text{timestart_train}_{ots} \le \text{timestart_train}_{ot(s+1)} \qquad \forall o\in O, \forall t\in T, \forall s\in S\text{-}\{end\} \qquad (3\text{-}12)$$

$$\text{timeend_train}_{ots} \ge \text{timeend_train}_{ot(s+1)} \qquad \forall o\in O, \forall t\in T, \forall s\in S\text{-}\{end\} \qquad (3\text{-}13)$$

$$\text{timetable_train}_{ots} \ge \text{timestart_train}_{ots} + \text{timeend_train}_{ots} - 1 \qquad \forall o\in O, \forall t\in T, \forall s\in S \qquad (3\text{-}14)$$

$$\text{timestart_train}_{ots} \ge \text{timetable_train}_{ots} \qquad \forall o\in O, \forall t\in T, \forall s\in S \qquad (3\text{-}15)$$

$$\text{timeend_train}_{ots} \ge \text{timetable_train}_{ots} \qquad \forall o\in O, \forall t\in T, \forall s\in S \qquad (3\text{-}16)$$

$$\text{OperateTime}_{ot} \ge \sum_{s\in S} \text{timetable_train}_{ots} \qquad \forall o\in O, \forall t\in T \qquad (3\text{-}17)$$

สมการที่ (3-18) เป็นการหาเวลาของรถไฟฟ้าที่อยู่ในศูนย์ซ่อมบำรุงที่มากที่สุด

$$\text{Max_OperateTime} \ge \text{OperateTime}_{ot} \qquad \forall o\in O, \forall t\in T \qquad (3\text{-}18)$$

สมการที่ (3-19) ถึง (3-28) เป็นการกำหนดค่าตัวแปรตัดสินใจ โดย $timetable_{jots}$, $timestart_{jots}$, $timeend_{jots}$, $timetable_train_{ots}$, $timestart_train_{ots}$, $timeend_train_{ots}$, $Machine_assign_{jotm}$ และ $Machine_use_{jotms}$ มีค่าเป็น 0 และ 1 เท่านั้น ในส่วนของ Max_OperateTime และ $OperateTime_{ot}$ มีค่าเป็นจำนวนบวก

$timetable_{jots} \in \{0,1\}$ $\forall j \in J, \forall o \in O, \forall t \in T, \forall s \in S$ (3-19)

$timestart_{jots} \in \{0,1\}$ $\forall j \in J, \forall o \in O, \forall t \in T, \forall s \in S$ (3-20)

$timeend_{jots} \in \{0,1\}$ $\forall j \in J, \forall o \in O, \forall t \in T, \forall s \in S$ (3-21)

$timetable_train_{ots} \in \{0,1\}$ $\forall o \in O, \forall t \in T, \forall s \in S$ (3-22)

$timestart_train_{ots} \in \{0,1\}$ $\forall o \in O, \forall t \in T, \forall s \in S$ (3-23)

$timeend_train_{ots} \in \{0,1\}$ $\forall o \in O, \forall t \in T, \forall s \in S$ (3-24)

$Machine_assign_{jotm} \in \{0,1\}$ $\forall j \in J, \forall o \in O, \forall t \in T, \forall m \in M, \forall s \in S$ (3-25)

$Machine_use_{jotms} \in \{0,1\}$ $\forall j \in J, \forall o \in O, \forall t \in T, \forall m \in M, \forall s \in S$ (3-26)

$OperateTime_{ot} \geq 0$ $\forall o \in O, \forall t \in T$ (3-27)

$Max_OperateTime \geq 0$ (3-28)

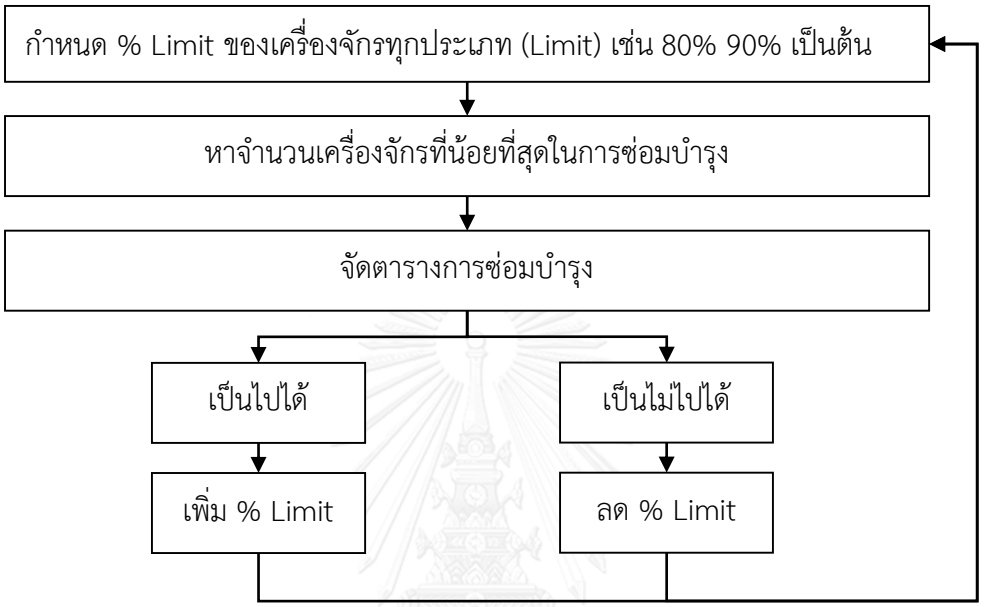
3.3.2 การดำเนินการของแบบจำลอง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การจัดตารางการซ่อมบำรุงในแต่ละเดือนจะได้ข้อมูล งานซ่อมบำรุงในแต่ละเดือน ($Plan_{jot}$) และจำนวนเครื่องจักรในแต่ละเดือน (Num_MC_m) มาจากผลลัพธ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาจำนวนเครื่องจักรที่น้อยสุด ซึ่งแบบจำลองนี้การจัดตารางการซ่อมบำรุงในแต่ละเดือน เพื่อให้ทราบถึงเวลาที่รถไฟฟ้าแต่ละขบวนเข้าศูนย์ซ่อมบำรุง และซ่อมบำรุงแต่ละงานเมื่อใด

เนื่องจากจำนวนเครื่องจักรและปริมาณงานเบื้องต้นใช้งานการวางแผนระยะยาว ถ้าหากไม่มีการกำหนดขอบเขตของการใช้งานเครื่องจักร (Limit of Utilization) หรือใช้งาน 100 % ของเครื่องจักรจะทำให้มีโอกาสเกิดงานที่ซ้อนกัน หรือไม่สามารถจัดตารางงานตามที่วางแผนมาได้ ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดขอบเขตของเครื่องจักรในการวางแผนระยะยาว เช่น เครื่องจักรแต่ละประเภททำงานไม่เกิน80เปอร์เซ็นต์ของเครื่องจักรเพื่อให้สามารถจัดเรียงงานลงตารางและไม่เกิดการซ้อนทับกันของงาน จึงเปลี่ยนสมการที่ 2-4 ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาจำนวนเครื่องจักรที่น้อยสุดเป็นดังนี้

$$\sum_{i \in I} \sum_{o \in O} \sum_{t \in T} Plan_{ioth} \times D_{im} \leq Limit \times MC_{mh} \qquad \forall m \in M, \forall h \in H \qquad (2\text{-}4)$$

ในการกำหนดขอบเขตของการใช้งานเครื่องจักร ถ้าหากกำหนดให้มีค่าน้อยถึงแม้ว่าจะทำให้สามารถจัดเรียงงานได้ภายในช่วงเวลา แต่ละทำให้จำนวนเครื่องจักรที่ต้องใช้ในแต่ละช่วงเวลามีค่ามากขึ้น แต่ถ้าหากกำหนดให้มีค่ามากเกินไปก็จะไม่สามารถซ่อมบำรุงงานทั้งหมดได้ภายในเวลาดังนั้นจึงควรหาค่าที่เหมาะสม ซึ่งหาได้ด้วยขั้นตอนดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการหาขอบเขตของเครื่องจักร

ในการตั้งขอบเขตของการใช้งานเครื่องจักรในรอบแรกนั้นกำหนดไว้ที่ 80% ของการความสามารถในการทำงานของเครื่องจักร เมื่อได้จำนวนเครื่องจักรที่เหมาะสมในแต่ละเดือนแล้ว นำงานซ่อมบำรุงที่วางแผนไว้ และจำนวนเครื่องจักรที่ใช้ มาจัดตารางการซ่อมบำรุงโดยมีวัตถุประสงค์หลักคือ ให้รถไฟฟ้าแต่ละขบวนอยู่ภายในศูนย์ซ่อมบำรุงให้น้อยที่สุด จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ “แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การจัดตารางการซ่อมบำรุง” จะได้ผลลัพธ์ใน 2 ส่วนคือ รถไฟฟ้าแต่ละขบวนจะเข้า และออกจากศูนย์ซ่อมบำรุงในช่วงเวลาใด และในแต่ละช่วงเวลา รถไฟฟ้าแต่ละขบวนจะทำงานซ่อมบำรุงย่อยใด เช่นตัวอย่างของการซ่อมบำรุงของเดือนมีนาคมปี 2566 ซึ่งมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 ของระยะห่างการซ่อมบำรุงมีแผนงานการซ่อมบำรุงทั้งหมดดังตารางที่ 3.24 และจำนวนเครื่องจักรดังตารางที่ 3.25

ตารางที่ 3.24 แผนงานการซ่อมบำรุงของเดือนมีนาคมปี 2566

เดือน	สายรถไฟฟ้า	ขบวนรถไฟฟ้า	กลุ่มงานซ่อมบำรุง
303	Dark Red	9	1
303	Dark Red	10	1

เดือน	สายรถไฟฟ้า	ขบวนรถไฟฟ้า	กลุ่มงานซ่อมบำรุง
303	Dark Green	2	3
303	Dark Green	14	3
303	Dark Green	17	3
303	Dark Green	19	3
303	Dark Green	20	3
303	Dark Green	21	3
303	Dark Green	22	3
303	Dark Green	23	3
303	Dark Green	28	3
303	Dark Green	29	3
303	Dark Green	30	3
303	Dark Green	31	3
303	Dark Green	35	3
303	Dark Green	39	2
303	Dark Green	40	2
303	Dark Green	47	2
303	Dark Green	50	2

ตารางที่ 3.25 จำนวนเครื่องจักรของเดือนมีนาคมปี 2566

เครื่องจักร	จำนวนเครื่องจักร
1	1
2	3
3	1
4	3
5	1
6	2
7	4
8	1
9	3
10	3
11	1
12	4

เครื่องจักร	จำนวนเครื่องจักร
1	1
13	2

พบว่าสามารถจัดตารางงานซ่อมบำรุงได้ โดยแต่ละงานซ่อมบำรุงมีช่วงเวลาในการซ่อมบำรุงดังตารางที่ 3.26 และรถไฟฟ้าแต่ละขบวนเข้าและออกศูนย์ซ่อมบำรุงในช่วงเวลาดังตารางที่ 3.27

ตารางที่ 3.26 ตารางงานซ่อมบำรุงงานย่อยของเดือนมีนาคมปี 2566

สายรถไฟฟ้า	ขบวนรถไฟฟ้า	งานซ่อมบำรุงย่อย	ช่วงเวลาเริ่มการซ่อมบำรุง	ช่วงเวลาสิ้นสุดการซ่อมบำรุง
Dark Green	2	5	36	51
		6	1	4
		7	107	113
		8	77	82
		9	17	20
	14	5	20	35
		6	47	50
		7	93	99
		8	63	68
		9	51	54
	17	5	56	71
		6	158	161
		7	143	149
		8	84	89
		9	74	77
	19	5	79	94
		6	75	78
		7	66	72
		8	113	118
		9	109	112
	20	5	31	46
		6	129	132
		7	51	57
		8	107	112

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สาย รถไฟฟ้า	ขบวน รถไฟฟ้า	งานซ่อมบำรุงย่อย	ช่วงเวลาเริ่มการซ่อมบำรุง	ช่วงเวลาสิ้นสุดการซ่อมบำรุง
		9	58	61
	21	5	52	67
		6	117	120
		7	28	34
		8	91	96
		9	84	87
	22	5	12	27
		6	79	82
		7	5	11
		8	29	34
		9	46	49
	23	5	37	52
		6	16	19
		7	100	106
		8	57	62
		9	71	74
	28	5	83	98
		6	12	15
		7	21	27
		8	41	46
		9	115	118
	29	5	141	156
		6	166	169
		7	121	127
		8	101	106
		9	137	140
	30	5	135	150
		6	170	173
		7	151	157
		8	51	56
		9	91	94
	31	5	126	141

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สายรถไฟฟ้า	ขบวนรถไฟฟ้า	งานซ่อมบำรุงย่อย	ช่วงเวลาเริ่มการซ่อมบำรุง	ช่วงเวลาสิ้นสุดการซ่อมบำรุง
		6	162	165
		7	174	180
		8	119	124
		9	113	116
	35	5	109	124
		6	61	64
		7	134	140
		8	141	146
		9	152	155
	39	4	162	175
	40	4	78	91
	47	4	95	108
	50	4	119	132
Dark Red	9	1	70	77
		2	66	69
		3	65	65
	10	1	6	13
		2	2	5
		3	14	14

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3.27 ตารางการเข้า - ออกของรถไฟฟ้าในเดือนมีนาคมปี 2566

สายรถไฟฟ้า	ขบวนรถไฟฟ้า	ช่วงเวลาเข้าศูนย์ซ่อมบำรุง	ช่วงเวลาออกจากศูนย์ซ่อมบำรุง
Dark Green	2	1	113
	14	20	99
	17	56	161
	19	66	118
	20	31	132
	21	28	120
	22	5	82
	23	16	106

สายรถไฟฟ้า	ขบวนรถไฟฟ้า	ช่วงเวลาเข้าศูนย์ซ่อมบำรุง	ช่วงเวลาออกจากศูนย์ซ่อมบำรุง
	28	12	118
	29	101	169
	30	51	173
	31	113	180
	35	61	155
	39	162	175
	40	78	91
	47	95	108
	50	119	132
Dark Red	9	65	77
	10	2	14

เมื่อวิเคราะห์ในระยะเผื่อแบบต่างๆ พบว่าการตั้งขอบเขตของการใช้งานเครื่องจักรไว้ที่ 80% ของความสามารถในการทำงานของเครื่องจักร งานซ่อมบำรุงสามารถทำงานได้จริง และไม่เกิดการทับซ้อนของงานบนเครื่องจักรประเภทต่างๆ จึงวิเคราะห์ใหม่โดยตั้งขอบเขตของการใช้งานเครื่องจักรไว้ที่ 90% และ 85% พบว่าไม่สามารถจัดเรียงงานได้จริง ดังนั้นขอบเขตของการใช้งานเครื่องจักรที่ดีที่สุดคือ 80%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4 ผลการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะแสดงถึงผลการวิจัยโดยเปรียบเทียบคำตอบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในด้านต่างๆ สำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาจำนวนเครื่องจักรที่น้อยที่สุดจะได้ผลลัพธ์ในรูปแบบของจำนวนเครื่องจักรในแต่ละช่วงเวลาและงานซ่อมบำรุงที่วางแผนในแต่ละช่วงเวลา ซึ่งเนื่องจากจำนวนเครื่องจักรจะขึ้นอยู่กับปริมาณความต้องการในการซ่อมบำรุง ดังนั้น ถ้าหากงานซ่อมบำรุงมีการกระจายกันอย่างสม่ำเสมอจะทำให้ จำนวนเครื่องจักรที่ต้องการใช้น้อยกว่า งานซ่อมบำรุงที่มีความต้องการซ่อมบำรุงพร้อมกันจำนวนมาก และเนื่องจากช่วงเวลาในการกระจายงานซ่อมบำรุงจะทำให้ เกิดการกระจายงาน ถ้ามีช่วงเวลาในการกระจายงานซ่อมบำรุงมาก ความต้องการในการซ่อมบำรุงก็จะสม่ำเสมอกันมากขึ้น ดังนั้น ในประเด็นแรกของงานวิจัยนี้จึงเสนอ ความแตกต่างของจำนวนเครื่องจักร เมื่อมีระยะเผื่อที่แตกต่างกัน

เมื่อพิจารณาการซ่อมบำรุงใหญ่พบว่า เครื่องจักรมีความถี่ในการใช้งานน้อยมาก เพราะการซ่อมบำรุงใหญ่มีระยะห่างการซ่อมบำรุงมากกว่า 1 ปี ดังนั้นการตั้งศูนย์ซ่อมบำรุงใหญ่ของแต่ละโครงการรถไฟฟ้าจะเกิดค่าใช้จ่ายในส่วนของการสั่งเครื่องจักร ซึ่งเป็นต้นทุนคงที่ ในงานวิจัยนี้จึงเสนอการรวมศูนย์ซ่อมบำรุง ประเด็นที่ 2 จึงกล่าวถึงความแตกต่างของจำนวนเครื่องจักรเมื่อเป็นศูนย์ซ่อมบำรุงสำหรับทุกสายและแยกสาย และประเด็นสุดท้ายจะเสนอ ความแตกต่างของจำนวนเครื่องจักรเมื่อกรอบเวลาต่างกัน โดยจะแบ่งกรอบเวลาออกเป็น 2 แบบคือ แบบเดือน และแบบไตรมาส

4.1 ระยะเผื่อที่แตกต่างกัน

ระยะเผื่อของงานซ่อมบำรุงที่แตกต่างกันทำให้จำนวนเครื่องจักรที่ใช้แตกต่างกันด้วย เช่น ถ้าหากในเดือนนั้นมีงานซ่อมบำรุงมาก อาจจะต้องเพิ่มจำนวนเครื่องจักรในการรองรับงานซ่อมบำรุงนั้น แต่ถ้าแต่ละงานสามารถมีระยะเผื่อหรือสามารถซ่อมบำรุงงานนั้นในเดือนถัดไปได้ ทำให้โหลดงานจะเกิดการกระจายมากขึ้น ไม่ต้องใช้เครื่องจักรจำนวนมากทั้งยังช่วงลดเวลาเดินเปล่าของเครื่องจักรอีกด้วย ทั้งนี้การเพิ่มระยะเผื่อต้องคำนึงถึงความปลอดภัยในการเดินรถ จึงไม่ค่อยมีระยะเผื่อที่มากเกินไป โดยในงานวิจัยนี้จะมีระยะเผื่อที่ศึกษา 5 ระดับคือ 1/12 ของ Interval, 1/6 ของ Interval, 1/4 ของ Interval, 1/3 ของ Interval และไม่มีระยะเผื่อดังตารางที่ 4.1 – 4.5 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 ระยะเผื่อของงานซ่อมบำรุง 1/12 ของ Interval

Task		Interval(เดือน)	ระยะเผื่อ(เดือน)
1	Every 1 year	12	1
2	Every 5 years	60	5

Task		Interval(เดือน)	ระยะเผื่อ(เดือน)
3	Every 6 years	72	6
4	Every 9 years	108	9
5	Every 12 years	144	12

ตารางที่ 4.2 ระยะเผื่อของงานซ่อมบำรุง 1/6 ของ Interval

Task		Interval(เดือน)	ระยะเผื่อ(เดือน)
1	Every 1 year	12	2
2	Every 5 years	60	10
3	Every 6 years	72	12
4	Every 9 years	108	18
5	Every 12 years	144	24

ตารางที่ 4.3 ระยะเผื่อของงานซ่อมบำรุง 1/4 ของ Interval

Task		Interval(เดือน)	ระยะเผื่อ(เดือน)
1	Every 1 year	12	3
2	Every 5 years	60	15
3	Every 6 years	72	18
4	Every 9 years	108	27
5	Every 12 years	144	36

ตารางที่ 4.4 ระยะเผื่อของงานซ่อมบำรุง 1/3 ของ Interval

Task		Interval(เดือน)	ระยะเผื่อ(เดือน)
1	Every 1 year	12	4
2	Every 5 years	60	20
3	Every 6 years	72	24
4	Every 9 years	108	36
5	Every 12 years	144	48

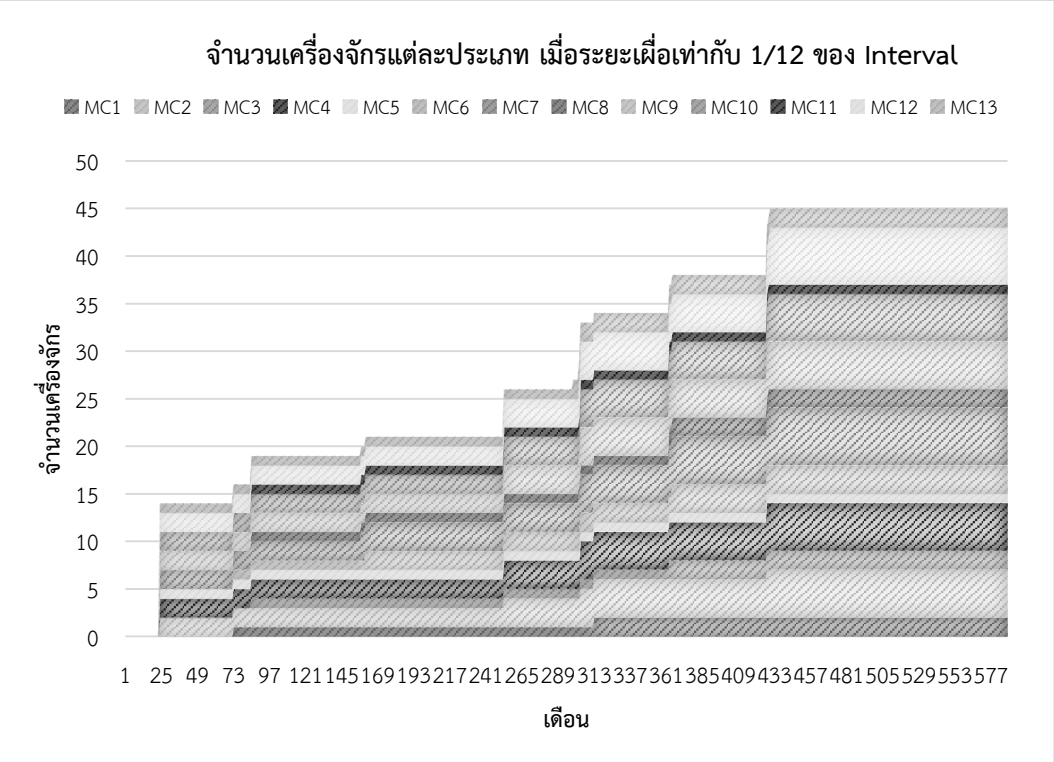
ตารางที่ 4.5 ไม่มีระยะเผื่อ

Task		Interval(เดือน)	ระยะเผื่อ(เดือน)
1	Every 1 year	12	1

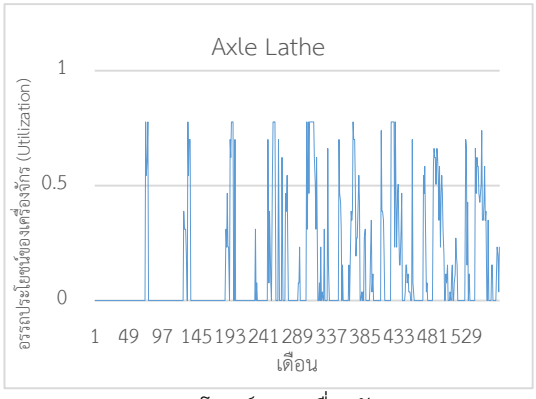
Task		Interval(เดือน)	ระยะเผื่อ(เดือน)
2	Every 5 years	60	1
3	Every 6 years	72	1
4	Every 9 years	108	1
5	Every 12 years	144	1

*ระยะเผื่อเท่ากับ 1 เดือน หมายถึง สามารถทำการซ่อมบำรุงได้ภายในเดือนที่ n+1 ของช่วงเวลาการซ่อมบำรุงเท่านั้น

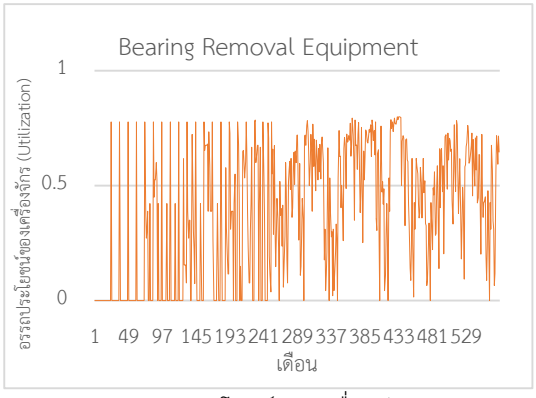
จำนวนเครื่องจักร และอรรถประโยชน์ของเครื่อง แต่ละประเภท เมื่อตั้งขอบเขตของการใช้งานเครื่องจักรไว้ที่ 80% ของการความสามารถในการทำงานของเครื่องจักรในระยะเผื่อต่างๆ เป็นดังรูปที่ 4.1 – 4.8 ซึ่งกำหนดให้เดือนที่ 1 คือเดือนมกราคม ปีพ.ศ. 2542



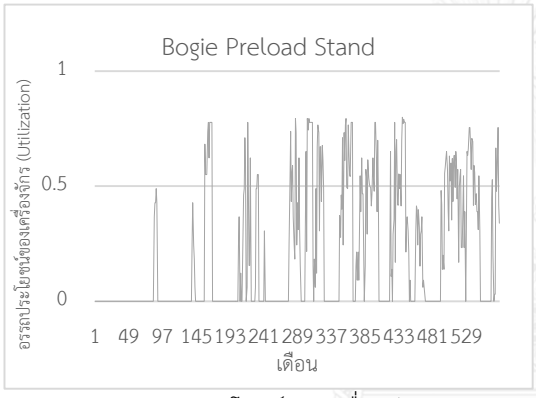
รูปที่ 4.1 จำนวนเครื่องจักรแต่ละประเภท เมื่อระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 ของ Interval



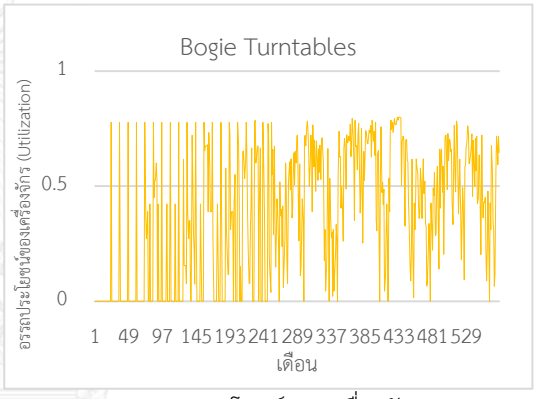
ก. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Axle Lathe



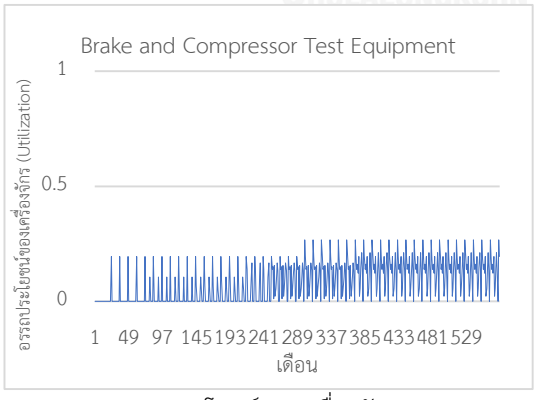
ข. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Bearing Removal Equioment



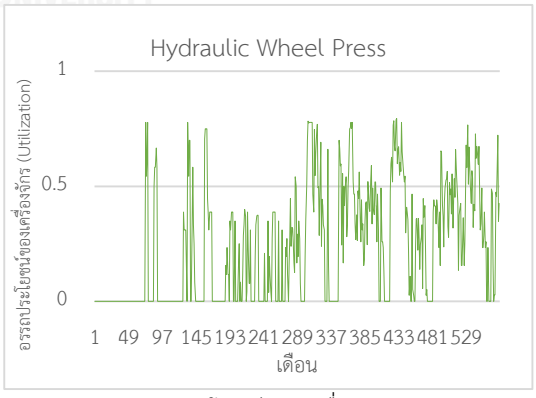
ค. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Bogie Preload Stand



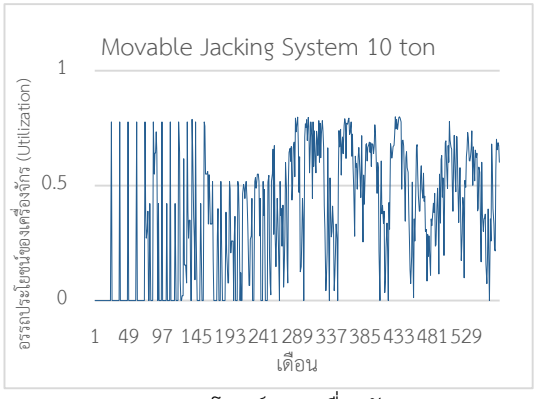
ง. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Bogie Turntables



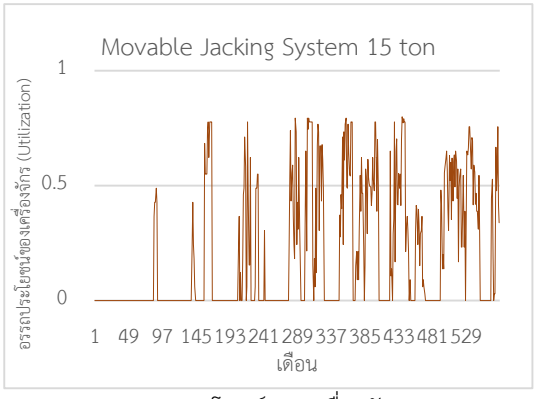
จ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Brake and Compressor Test Equipment



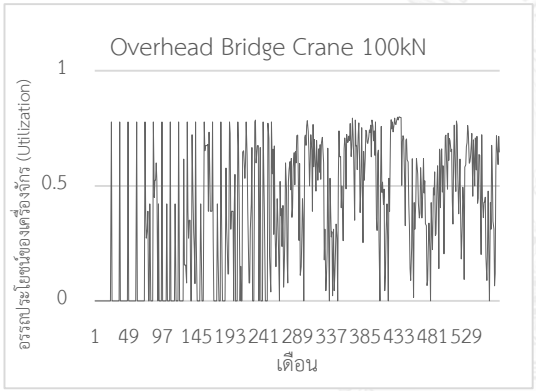
ฉ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Hydraulic Wheel Press



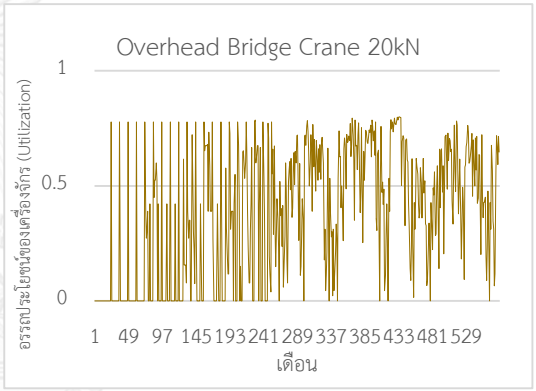
ช. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Movable Jacking System 10 ton



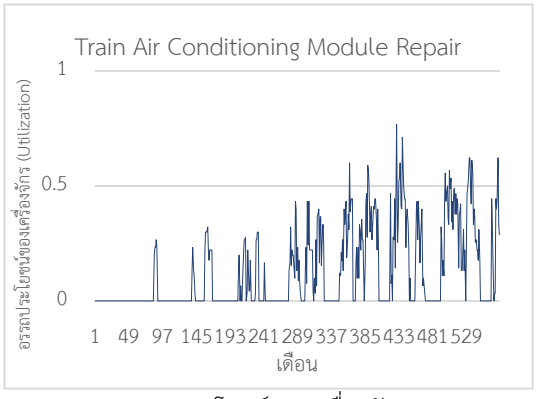
ซ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Movable Jacking System 15 ton



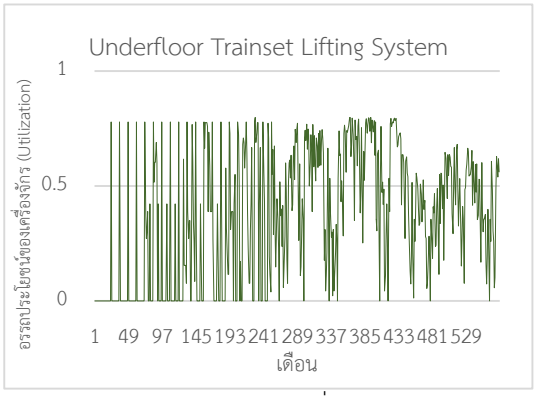
ฌ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Overhead Bridge Crane 100kN



ญ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Overhead Bridge Crane 20kN

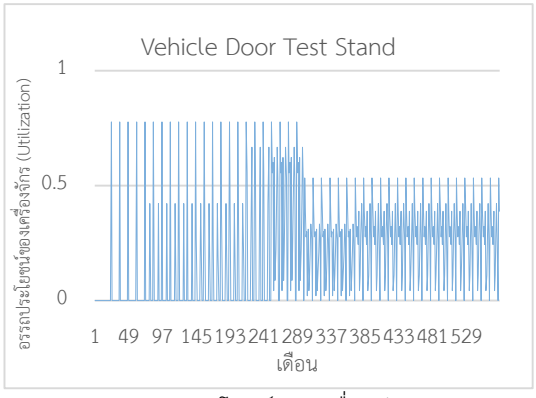


ฎ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Train Air Conditioning Module Repair



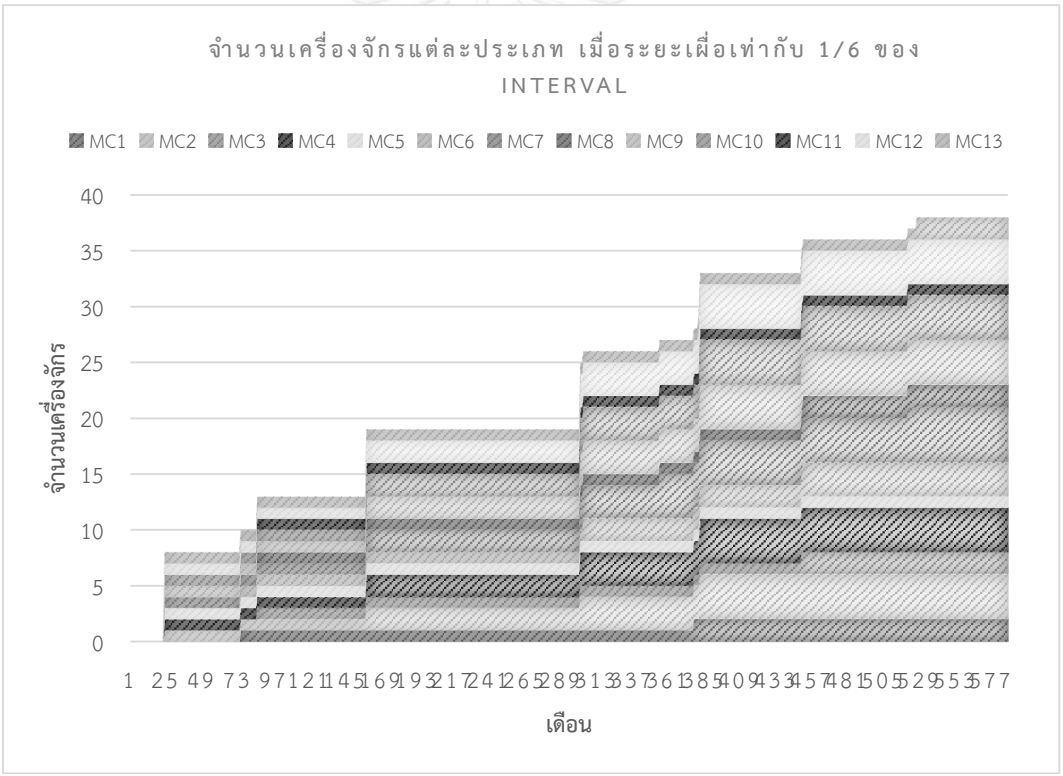
ฏ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Underfloor Trainset Lifting System

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

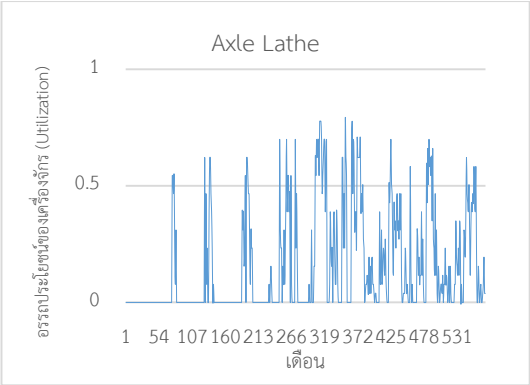


ฐ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Vehicle Door Test Stand

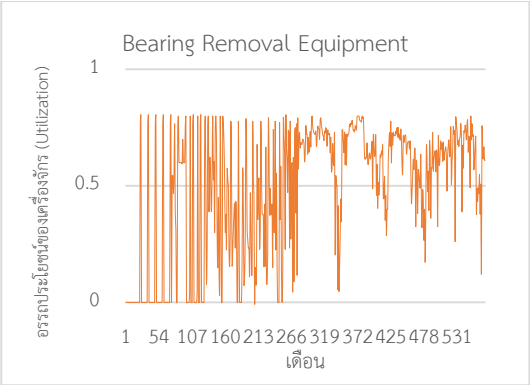
รูปที่ 4.2 อรรถประโยชน์ของเครื่องจักรแต่ละประเภท เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 ของ Interval



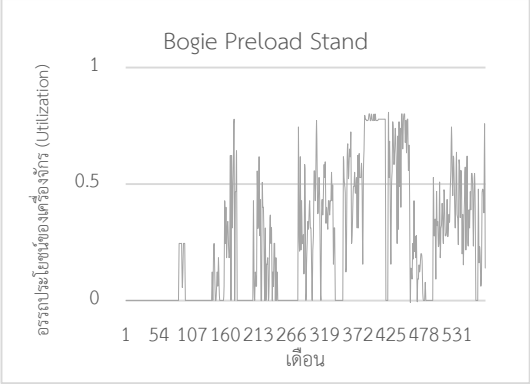
รูปที่ 4.3 จำนวนเครื่องจักรแต่ละประเภท เมื่อระยะเผื่อเท่ากับ 1/6 ของ Interval



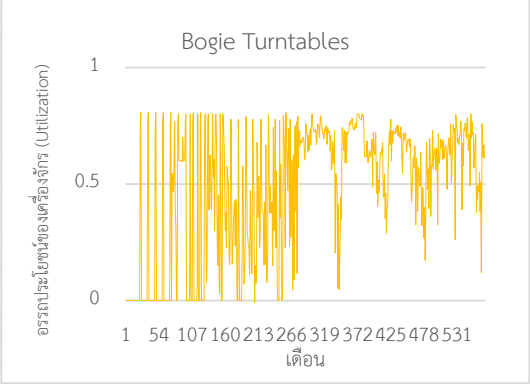
ก. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Axle Lathe



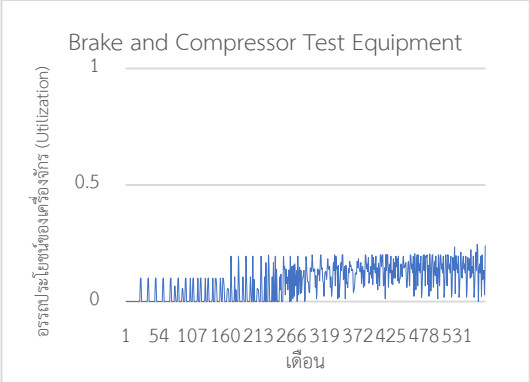
ข. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Bearing Removal Equipment



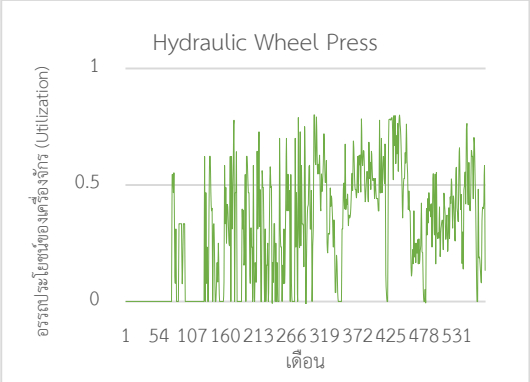
ค. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Bogie Preload Stand



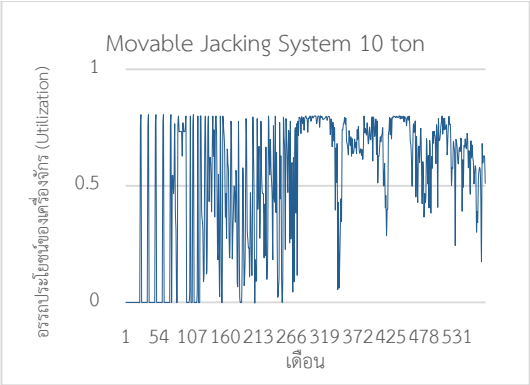
ง. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Bogie Turntables



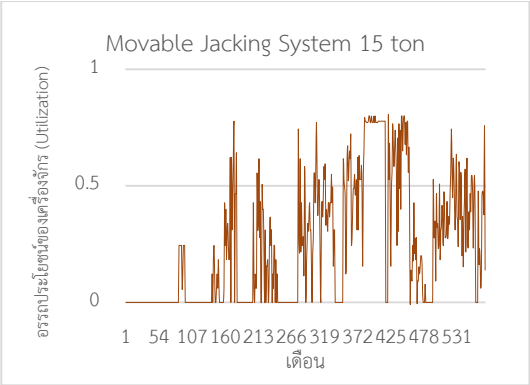
จ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Brake and Compressor Test Equipment



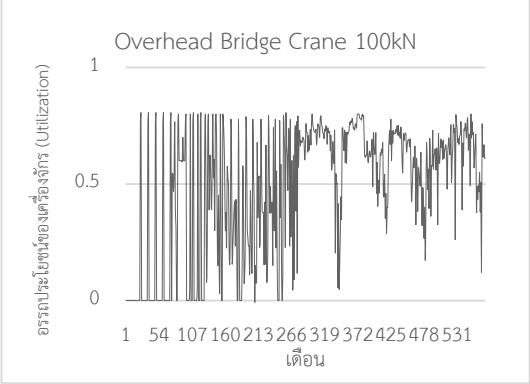
ฉ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Hydraulic Wheel Press



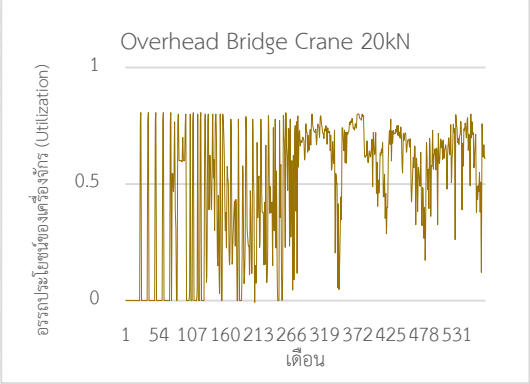
ช. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Movable Jacking System 10 ton



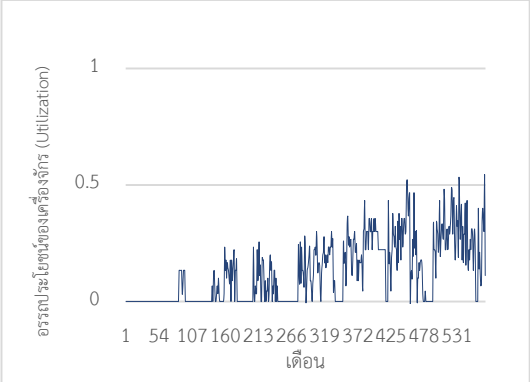
ซ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Movable Jacking System 15 ton



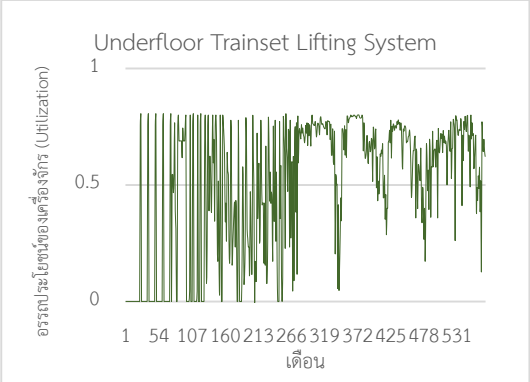
ฌ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Overhead Bridge Crane 100kN



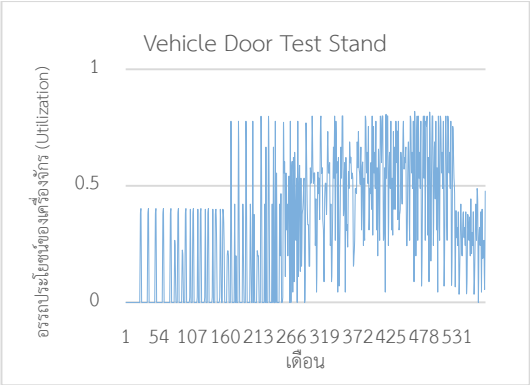
ญ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Overhead Bridge Crane 20kN



ฎ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Train Air Conditioning Module Repair

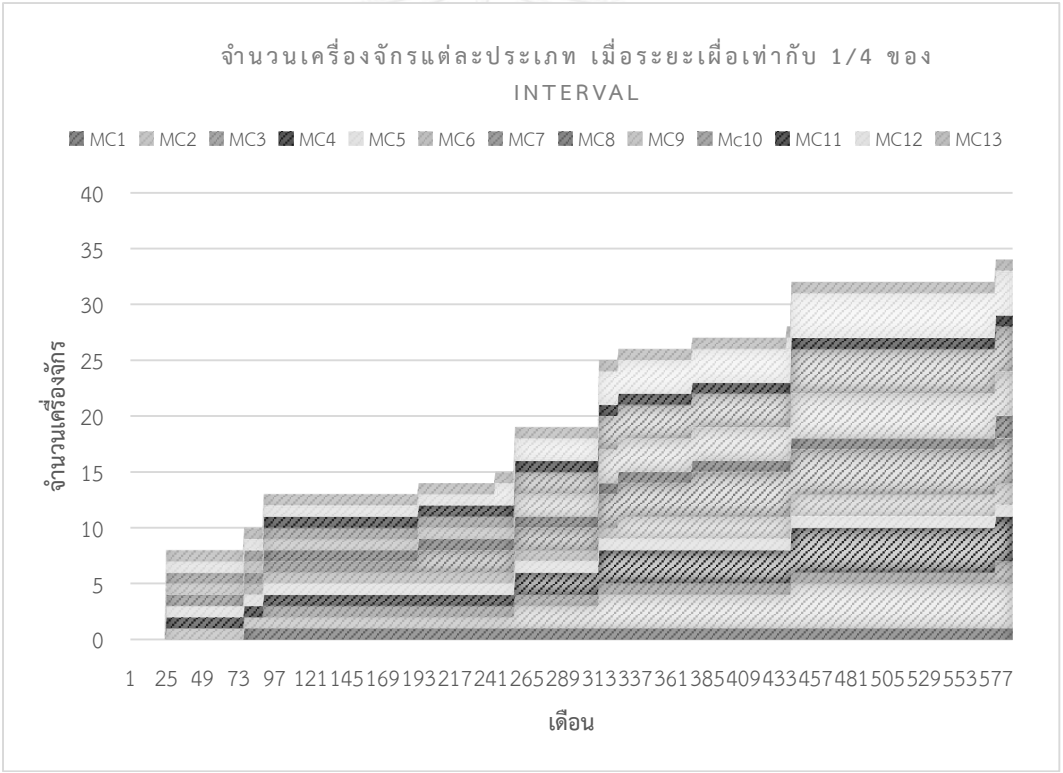


ฏ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Underfloor Trainset Lifting System

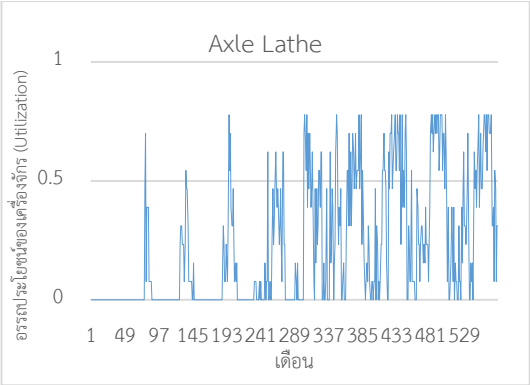


ฐ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Vehicle Door Test Stand

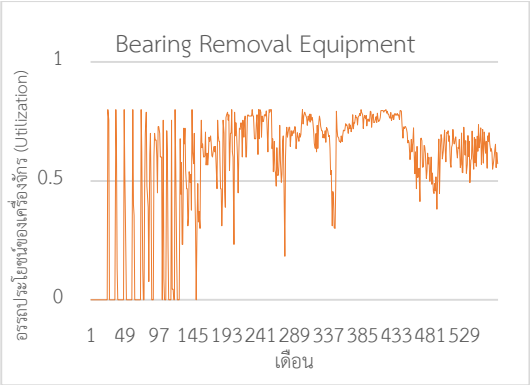
รูปที่ 4.4 อรรถประโยชน์ของเครื่องจักรแต่ละประเภท เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/6 ของ Interval



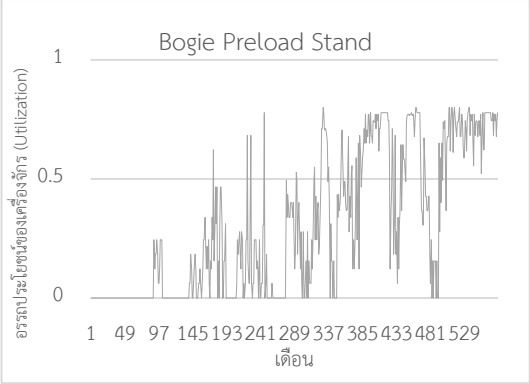
รูปที่ 4.5 จำนวนเครื่องจักรแต่ละประเภท เมื่อระยะเผื่อเท่ากับ 1/4 ของ Interval



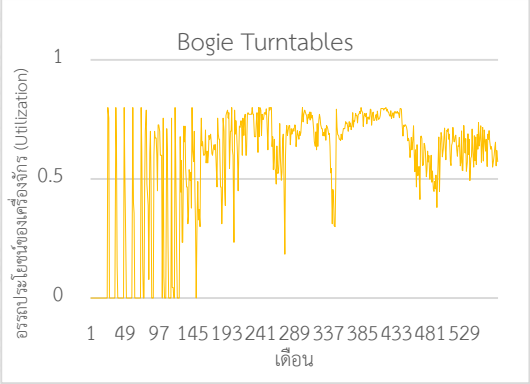
ก. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Axle Lathe



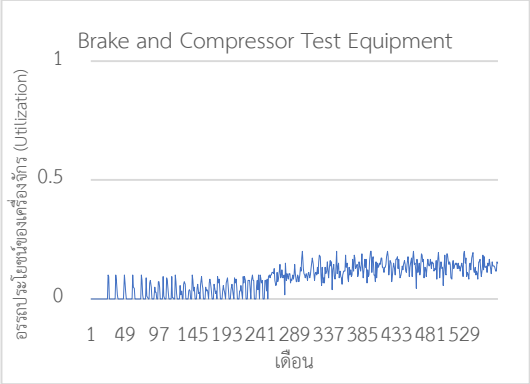
ข. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Bearing Removal Equipment



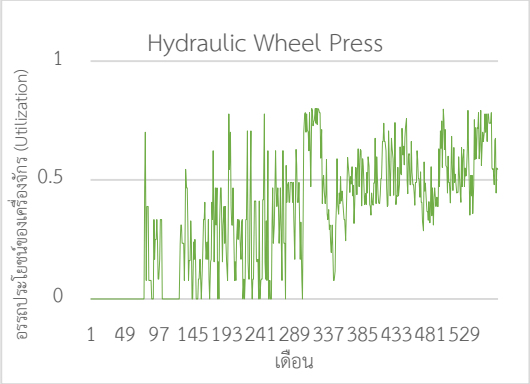
ค. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Bogie Preload Stand



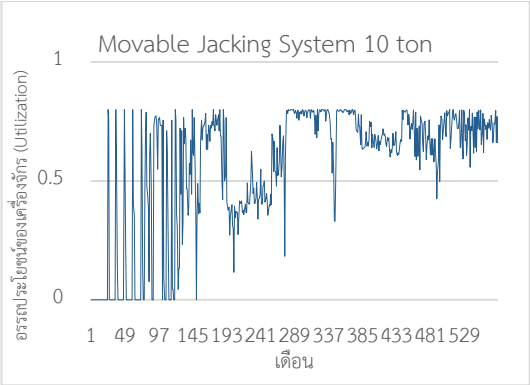
ง. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Bogie Turntables



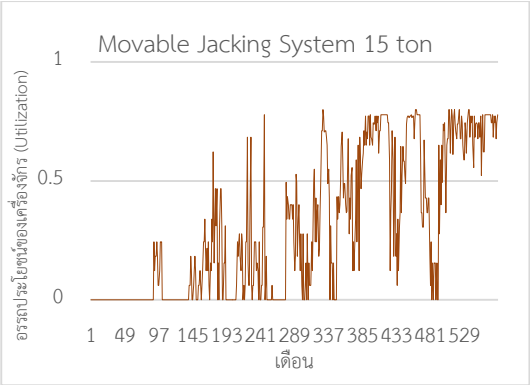
จ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Brake and Compressor Test Equipment



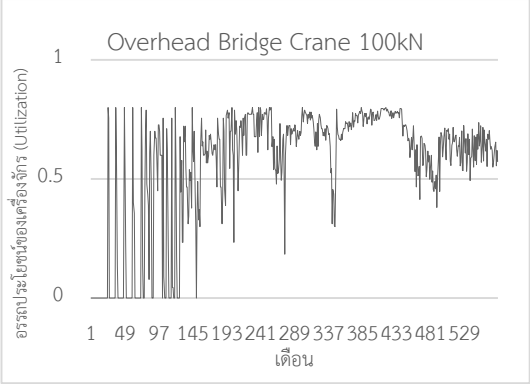
ฉ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Hydraulic Wheel Press



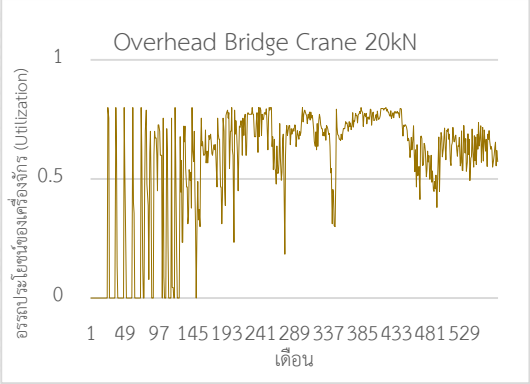
ช. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Movable Jacking System 10 ton



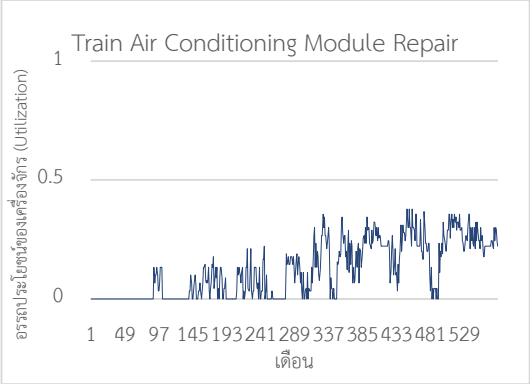
ซ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Movable Jacking System 15 ton



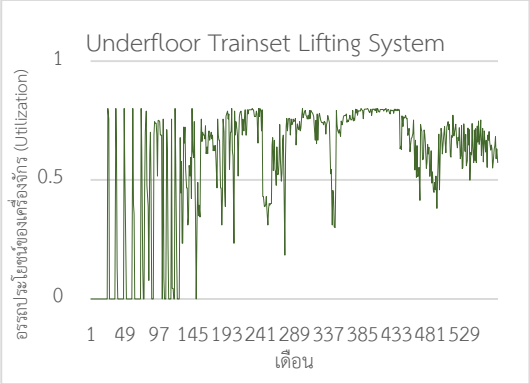
ฌ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Overhead Bridge Crane 100kN



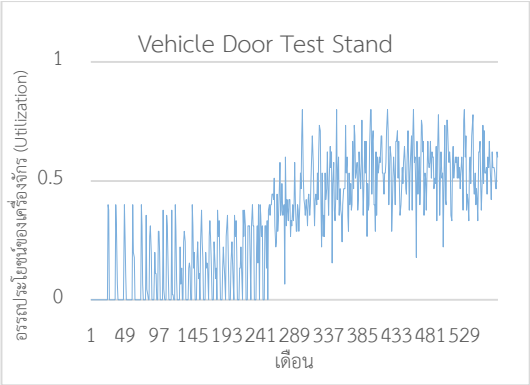
ญ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Overhead Bridge Crane 20kN



ฎ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Train Air Conditioning Module Repair

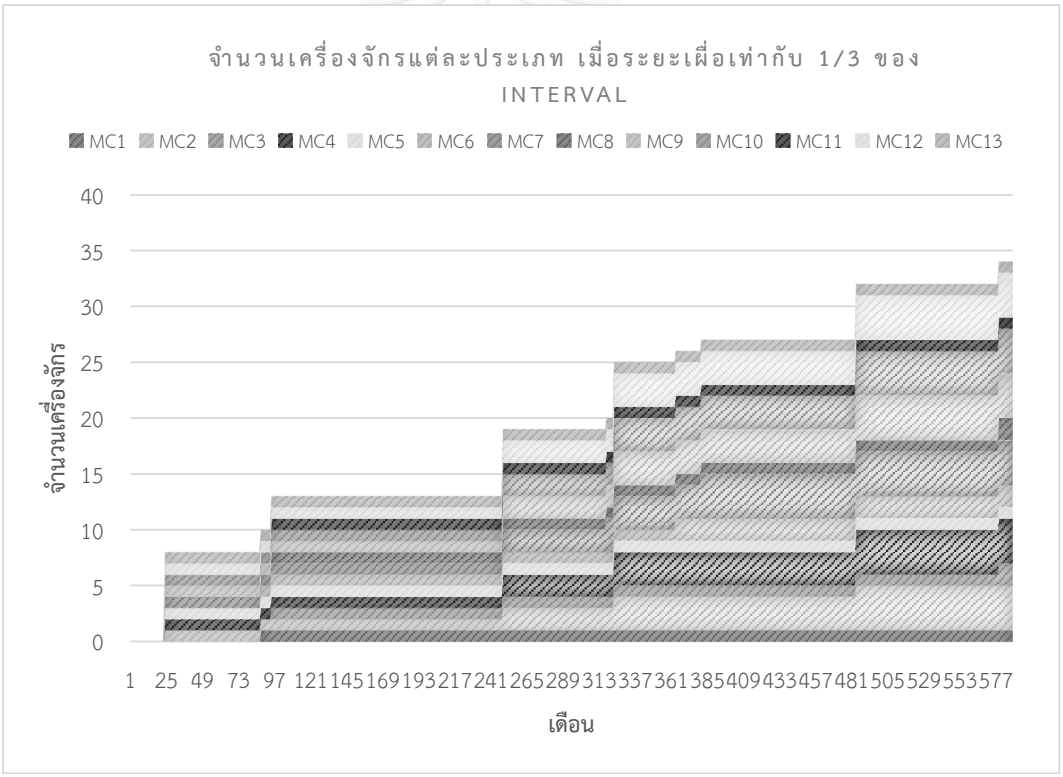


ฏ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Underfloor Trainset Lifting System

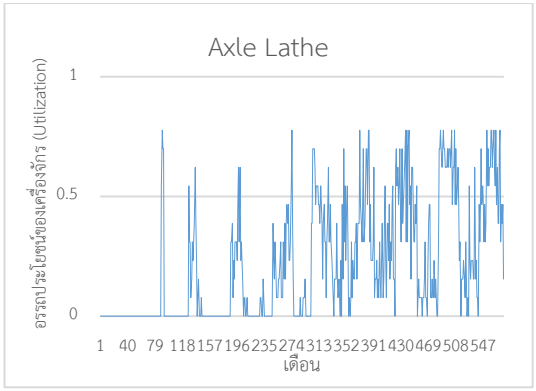


ฐ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Vehicle Door Test Stand

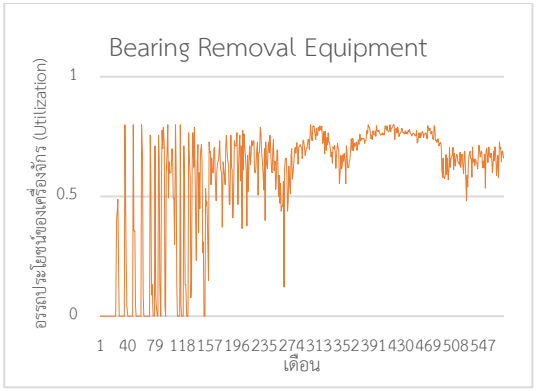
รูปที่ 4.6 อรรถประโยชน์ของเครื่องจักรแต่ละประเภท เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/4 ของ Interval



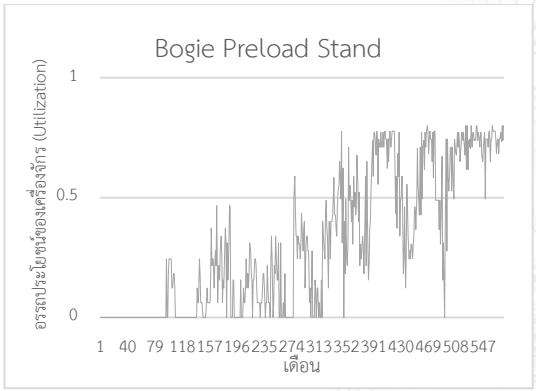
รูปที่ 4.7 จำนวนเครื่องจักรแต่ละประเภท เมื่อระยะเผื่อเท่ากับ 1/3 ของ Interval



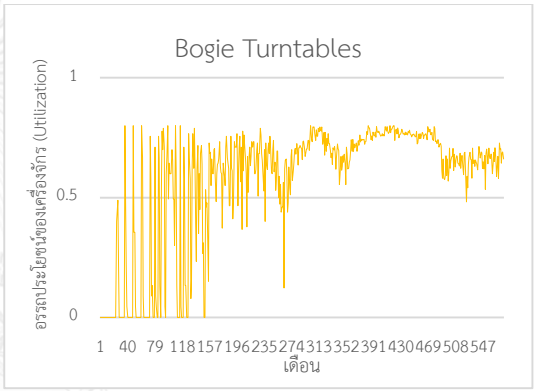
ก. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Axle Lathe



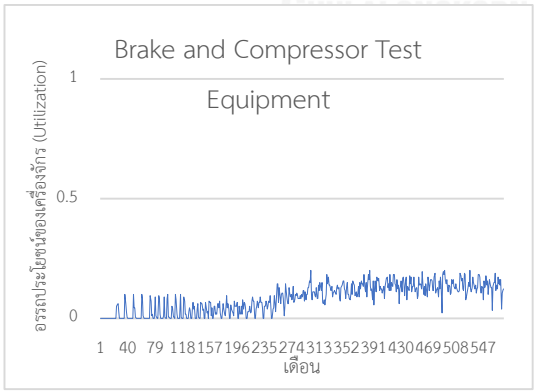
ข. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Bearing Removal Equipment



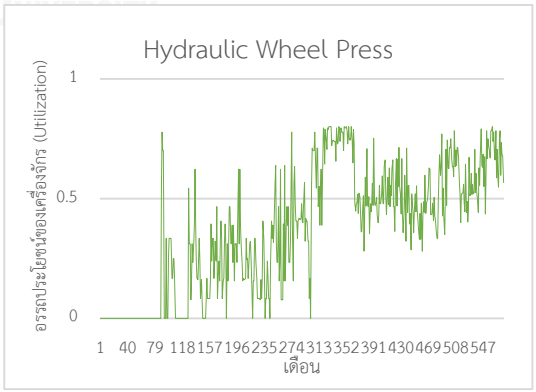
ค. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Bogie Preload Stand



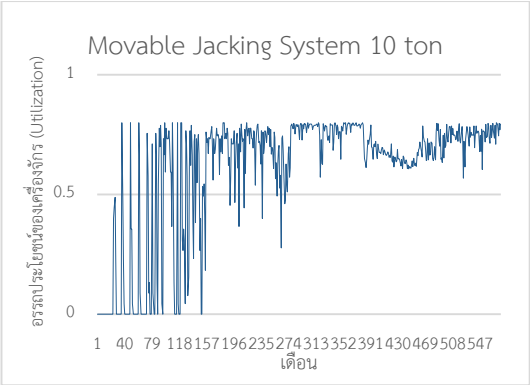
ง. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Bogie Turntables



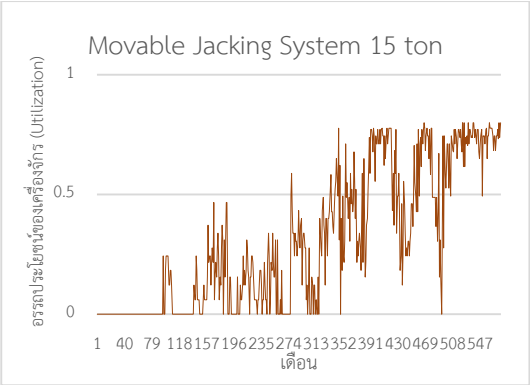
จ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Brake and Compressor Test Equipment



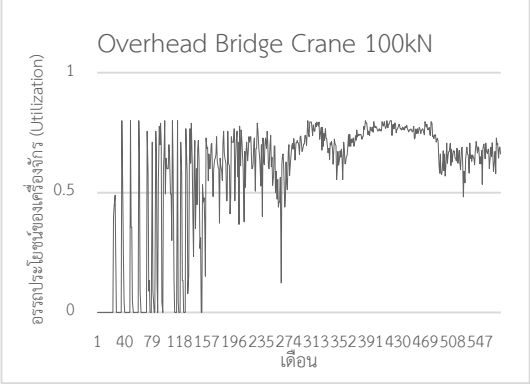
ฉ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Hydraulic Wheel Press



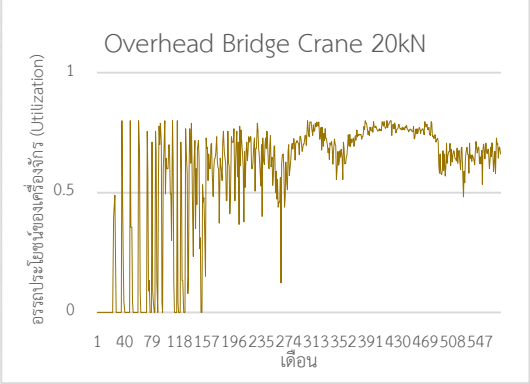
ช. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Movable Jacking System 10 ton



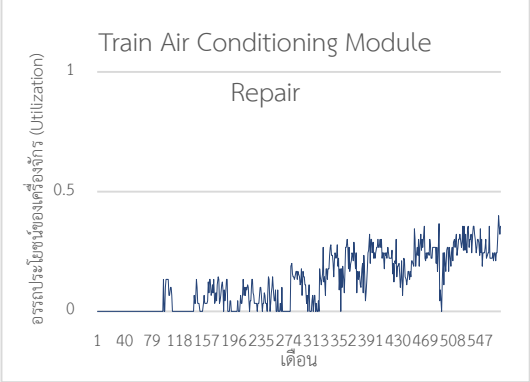
ซ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Movable Jacking System 15 ton



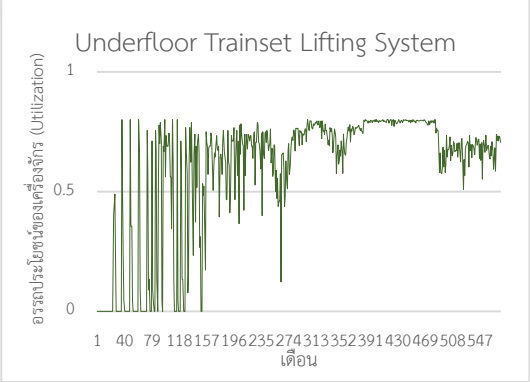
ฌ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Overhead Bridge Crane 100kN



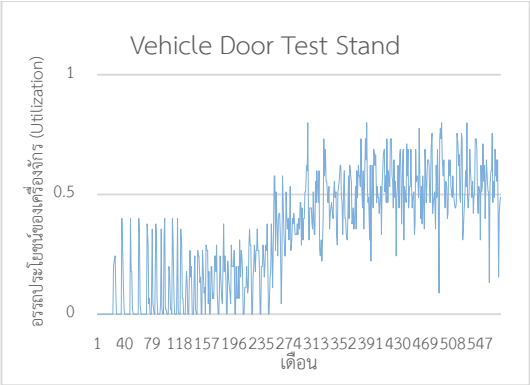
ญ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Overhead Bridge Crane 20kN



ฎ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Train Air Conditioning Module Repair



ฏ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Underfloor Trainset Lifting System



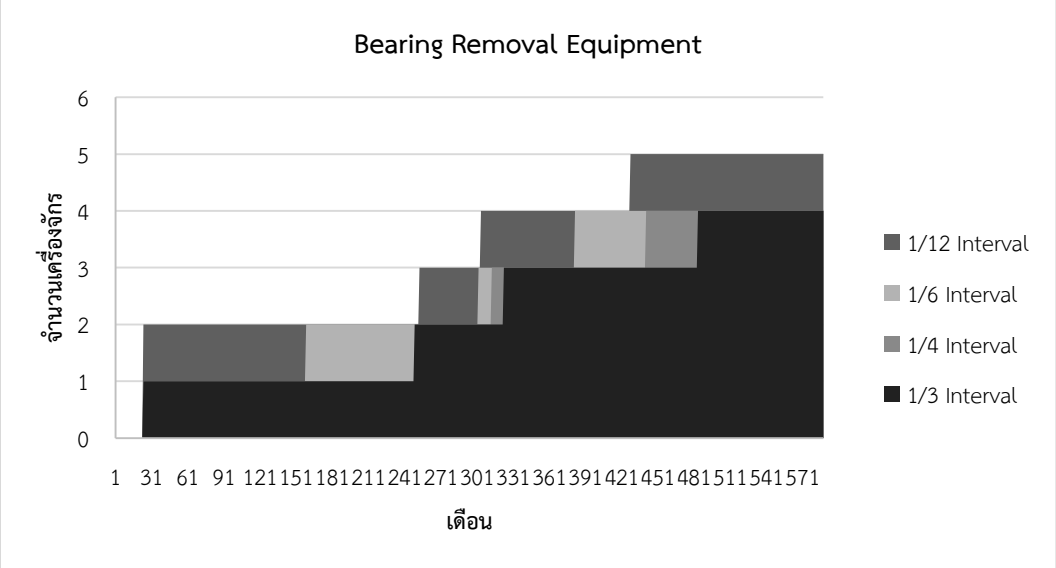
ฐ. อรรถประโยชน์ของเครื่องจักร Vehicle Door Test Stand

รูปที่ 4.8 อรรถประโยชน์ของเครื่องจักรแต่ละประเภท เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/3 ของ Interval

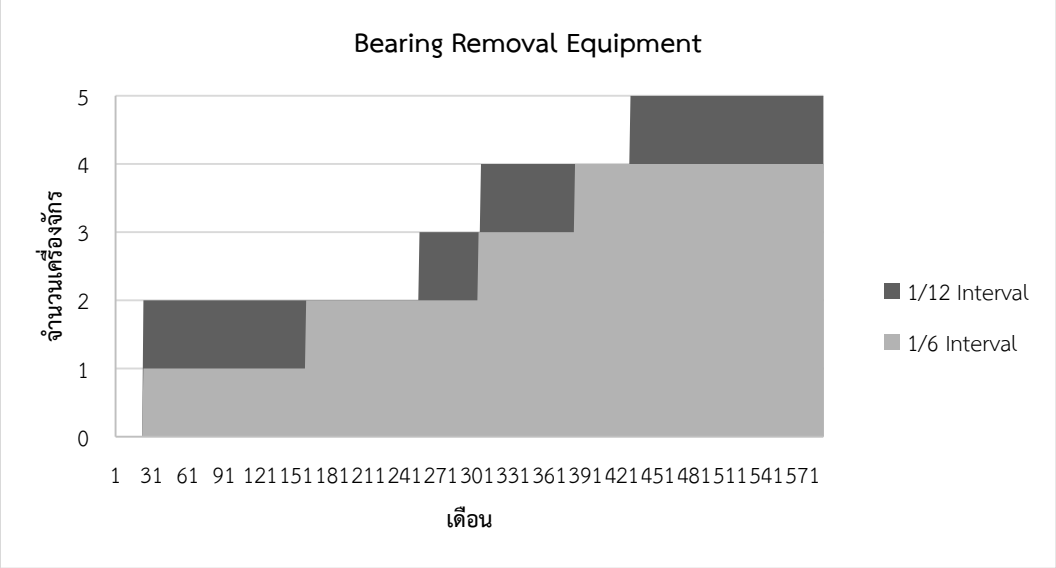
จากรูปที่ 4.1 4.3 4.5 และ 4.7 เมื่อรวมจำนวนเครื่องจักรทุกประเภทในทุกเดือนพบว่า เมื่อมีระยะเผื่อ 1/12 ของ interval จะสามารถลดจำนวนเครื่องจักรลดได้เหลือเพียง 22.6% เมื่อเทียบกับไม่มีระยะเผื่อ และเมื่อระยะเผื่อเท่ากับ 1/6 1/4 และ 1/3 เทียบกับระยะเผื่อ 1/12 ของ Interval แล้วจะสามารถลดจำนวนเครื่องจักรลดได้เหลือเพียง 17.9% 15.7% และ 15.2% ของจำนวนเครื่องจักรเมื่อไม่มีระยะเผื่อ ตามลำดับ หรือเหลือเพียง 79.0% 69.4% และ 67.2% ของจำนวนเครื่องจักรที่มีระยะเผื่อ 1/12 ของ Interval ตามลำดับนอกจากนั้นยังพบว่าจำนวนเครื่องจักรรวมทั้งหมดทุกประเภท ถ้าหากไม่สามารถมีระยะเผื่อจะต้องใช้เครื่องจักรทั้งหมด 187 เครื่องแต่เมื่อมีระยะเผื่อ 1/12 ของ interval จะมีจำนวนเครื่องจักรทั้งหมดเพียง 45 เครื่อง และเมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/6 1/4 และ 1/3 จะมีจำนวนเครื่องจักรทั้งหมด 38 34 และ 34 เครื่องตามลำดับ โดยจะสามารถลดจำนวนเครื่องจักรเหลือเพียง 24.1% 20.3%, 18.1% และ 18.1% ตามลำดับเมื่อเทียบกับไม่มีระยะ นอกจากนั้น จากรูปที่ 4.2 4.4 4.6 และ 4.8 จะเห็นได้ว่า เมื่อระยะเผื่อมีมากขึ้นจะทำให้ อรรถประโยชน์ของเครื่องจักรในแต่ละช่วงเวลามีความสม่ำเสมอกันมากขึ้น และไม่มีช่วงที่เครื่องจักรว่างงานมากจนเกินไป เมื่อแยกการวิเคราะห์ออกตามเครื่องจักรแต่ละประเภทจะสามารถแบ่งกลุ่มของเครื่องจักรได้ออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

1. เมื่อมีระยะเผื่อมากขึ้น จำนวนเครื่องจักรที่ใช้ในแต่ละเดือนจะลดลง ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.9 และ 4.10 จะเห็นได้ว่าเครื่องจักร 1 2 3 4 6 7 8 9 10 และ 12 เมื่อมีการระยะเผื่อจำนวนเครื่องจักรที่ใช้จะลดลงและมีการเพิ่มเครื่องจักรที่ช้าลง จนกระทั่งมีการเพิ่มระยะเผื่อมากถึงจุดหนึ่งจะทำให้เครื่องจักรที่ใช้มีค่าคง ความแตกต่างของจำนวนเครื่องจักรเกิดจากเมื่อมีระยะเผื่อเพิ่มขึ้นทำให้สามารถจัดตารางงานในการซ่อมบำรุงได้ดีขึ้น หรือหมายถึงสามาร

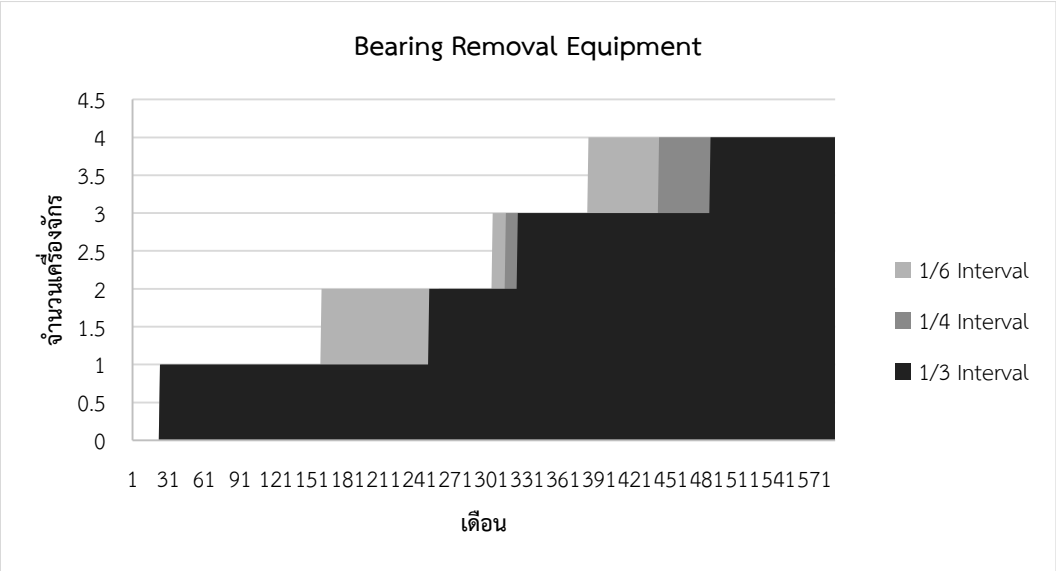
กระจายงานซ่อมบำรุงได้มากขึ้น ทำให้ความต้องการในการซ่อมบำรุงในช่วงเวลาเดียวกันลดลง แต่เนื่องจากในแต่ละปีมีจำนวนรถไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ทำให้ความต้องการในการซ่อมบำรุงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.9 จำนวนเครื่องจักร Bearing Removal Equipment ในระยะเผื่อ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval

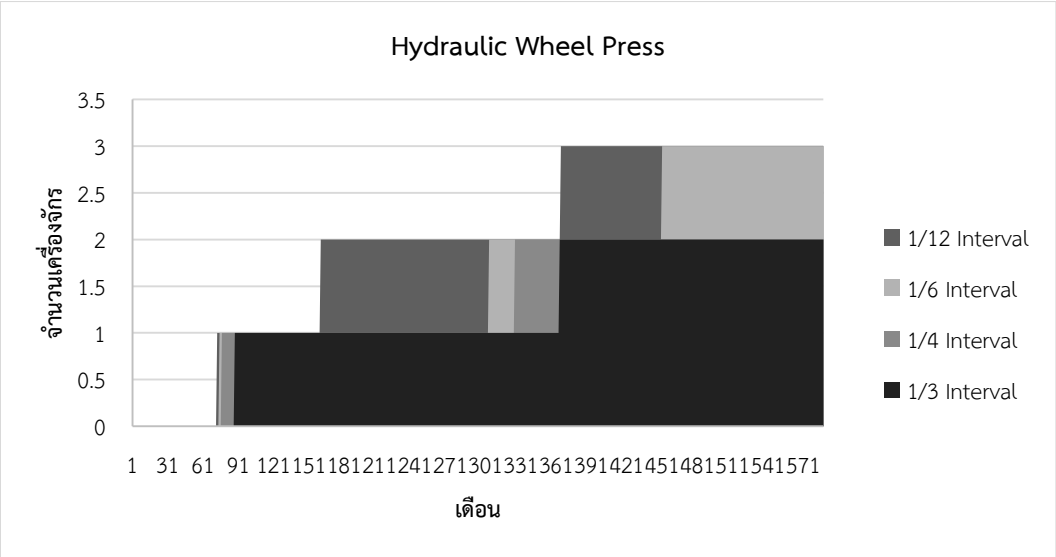


รูปที่ 4.10 จำนวนเครื่องจักร Bearing Removal Equipment ในระยะเผื่อ 1/12 และ 1/6 ของ Interval

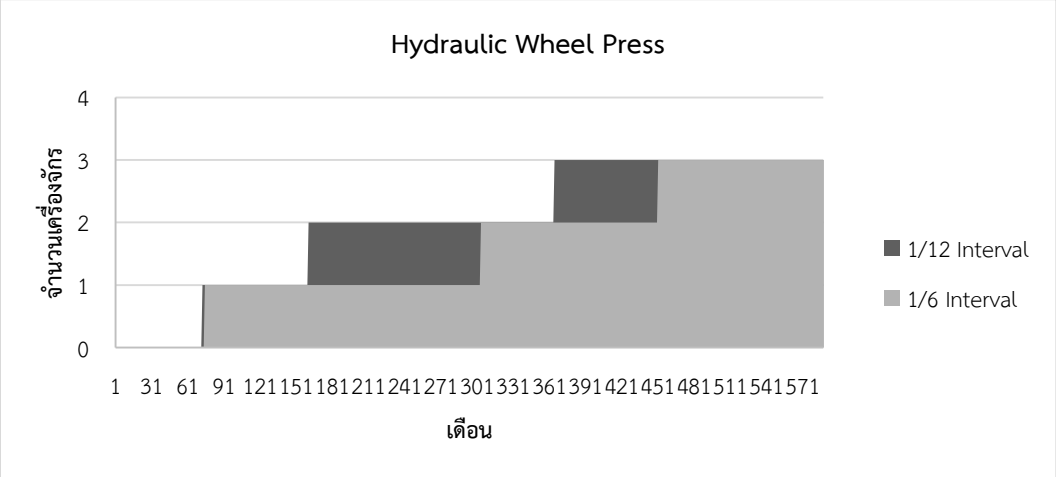


รูปที่ 4.11 จำนวนเครื่องจักร Bearing Removal Equipment ในระยะเผื่อ 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval

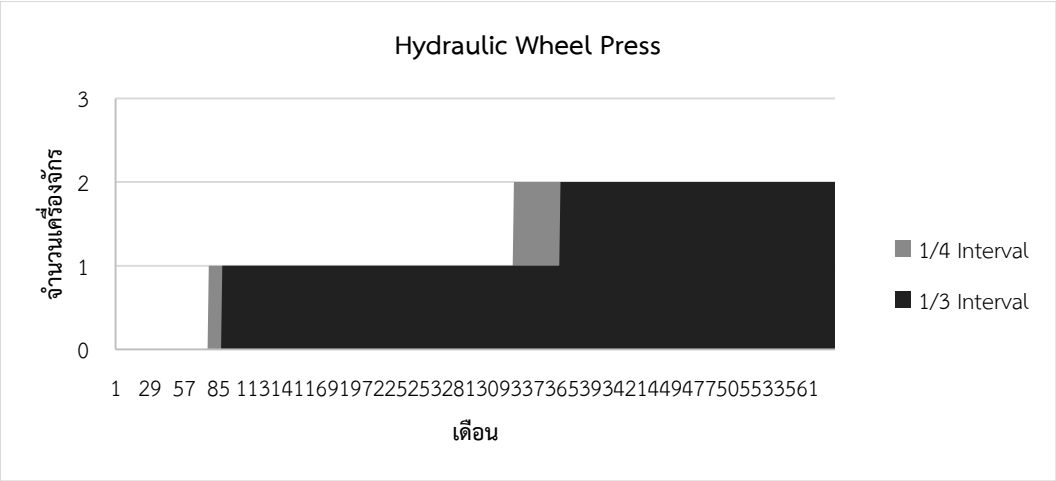
จากรูปที่ 4.11 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า จำนวนเครื่องจักรเมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 ของ Interval จะมีจำนวนมากกว่าเมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/6 ของ Interval เสมอ แต่ในรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่า จำนวนเครื่องจักรเมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval จะมีจำนวนใกล้เคียงกัน จำนวนเครื่องจักรเมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/6 ของ Interval อาจจะมีการเพิ่มขึ้นที่รวดเร็วกว่าเล็กน้อย โดยสำหรับจำนวนเครื่องจักรเมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/4 และ 1/3 ของ Interval จะมีจำนวนใกล้เคียงกันมากในแต่ละช่วงเวลา นอกจากนั้น ในรูปที่ 4.12 – 4.14 ก็เช่นเดียวกัน จำนวนเครื่องจักรเมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/4 และ 1/3 ของ interval จะมีจำนวนใกล้เคียงกันมากในแต่ละช่วงเวลา



รูปที่ 4.12 จำนวนเครื่องจักร Hydraulic Wheel Press ในระยะเผื่อ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval

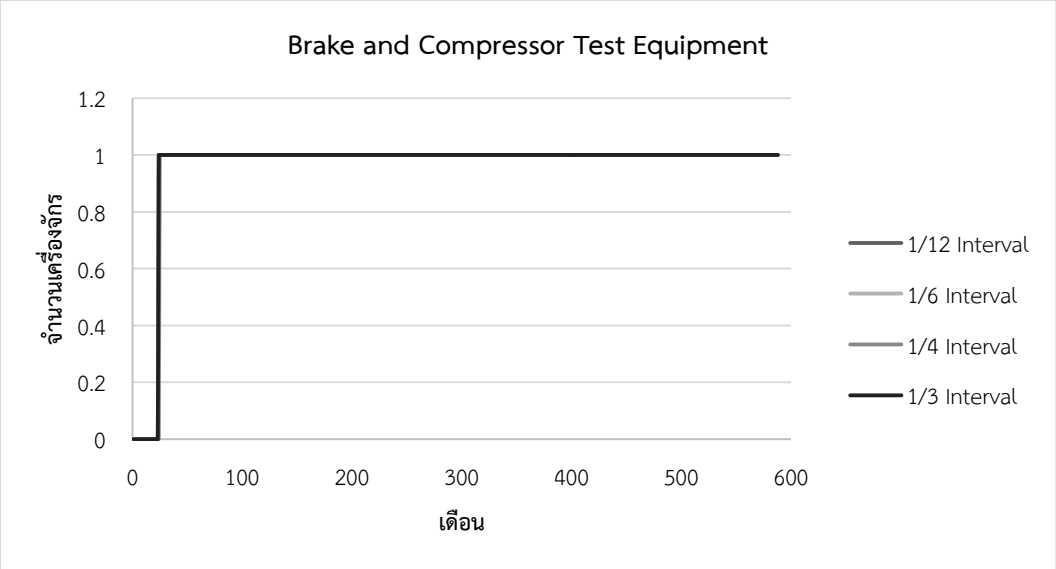


รูปที่ 4.13 จำนวนเครื่องจักร Hydraulic Wheel Press ในระยะเผื่อ 1/12 และ 1/6 ของ Interval

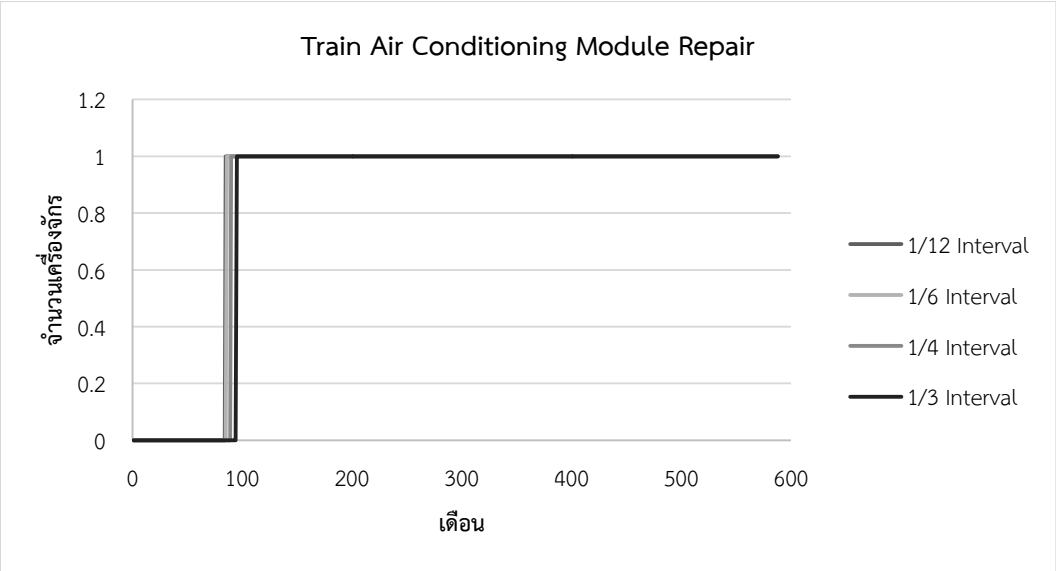


รูปที่ 4.14 จำนวนเครื่องจักร Hydraulic Wheel Press ในระยะเผื่อ 1/4 และ 1/3 ของ Interval

2. สำหรับเครื่องจักร 5 และ 11 มีความแตกต่างออกไป ดังรูปที่ 4.15 และ 4.16 พบว่าเครื่องจักร 5 ใช้สำหรับซ่อมบำรุงงานทุก 1 ปีเท่านั้น โดยใช้เวลาในการซ่อมบำรุง 4 ชั่วโมง และเครื่องจักร 11 ใช้สำหรับซ่อมบำรุงงานทุก 6 ปี โดยใช้เวลา 24 ชั่วโมง และทุก 12 ปีโดยใช้เวลา 32 ชั่วโมงการมีเครื่องจักร 5 และ 11 อย่างละเครื่องจึงเพียงพอสำหรับรองรับงานซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าทั้งหมด 296 ขบวน



รูปที่ 4.15 จำนวนเครื่องจักร Brake and Compressor Test Equipment ในระยะเผื่อ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval



รูปที่ 4.16 จำนวนเครื่องจักร Train Air Conditioning Module Repair ในระยะเผื่อ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval

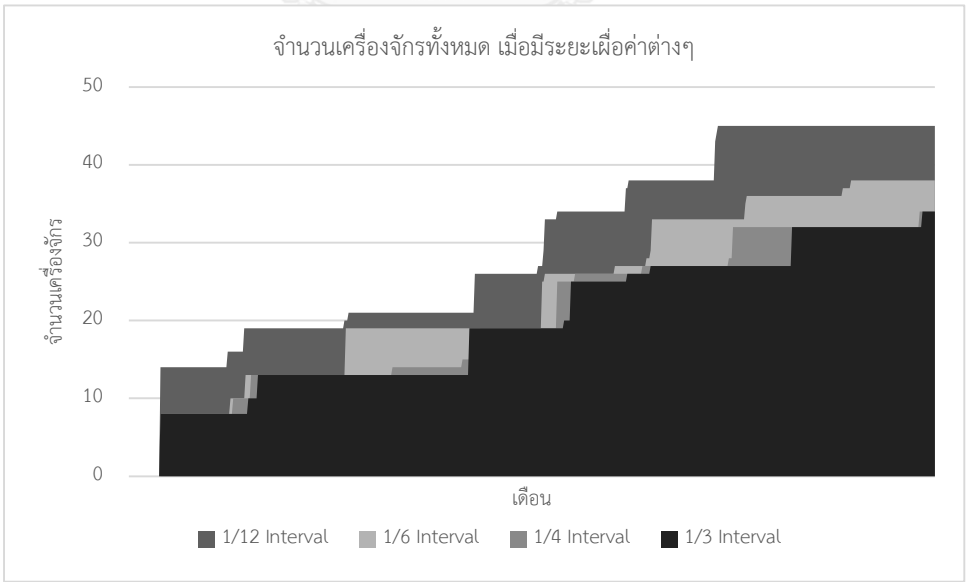
ดังนั้น สามารถสรุปจำนวนเครื่องจักรในระยะเผื่อต่างๆ โดยแบ่งกลุ่มเครื่องจักรเป็น 2 กลุ่มได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 จำนวนเครื่องจักรในระยะเผื่อต่างๆ โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม

ประเภทเครื่องจักร	ระยะเผื่อ			
	1/12 Interval	1/6 Interval	1/4 Interval	1/3 Interval
กลุ่มที่ 1 เมื่อมีระยะเผื่อมากขึ้น จำนวนเครื่องจักรที่ใช้ในแต่ละเดือนจะลดลง				
Axle Lathe	2	2	1	1
Bearing Removal Equipment	5	4	4	4
Bogie Preload Stand	2	2	2	2
Bogie Turntables	5	4	4	4
Hydraulic Wheel Press	3	3	2	2
Movable Jacking System 10 ton	6	5	4	4
Movable Jacking System 15 ton	2	2	2	2
Overhead Bridge Crane 100kN	5	4	4	4
Overhead Bridge Crane 20kN	5	4	4	4

ประเภทเครื่องจักร	ระยะเผื่อ			
	1/12 Interval	1/6 Interval	1/4 Interval	1/3 Interval
Underfloor Trainset Lifting System	6	4	4	4
Vehicle Door Test Stand	2	2	1	1
กลุ่มที่ 2 เครื่องจักรเพียงเครื่องเดียว เพียงพอสำหรับการซ่อมบำรุงในระยะเผื่อต่างๆ				
Brake and Compressor Test Equipment	1	1	1	1
Train Air Conditioning Module Repair	1	1	1	1
รวม	45	38	34	34

ซึ่งจากข้อมูล (ภาคผนวก ก) พบว่าที่ระยะเผื่อ1/4 ของ Interval มีจำนวนเครื่องจักรที่ใช้เท่ากับ เมื่อมีระยะเผื่อ1/3 ของ interval ในทุกประเภท และจากรูปที่ 4.17 พบว่าช่วงเวลาในการสั่งซื้อ หรือเพิ่มจำนวนเครื่องจักรของทั้ง 2 ระยะเผื่อ เป็นช่วงเวลาที่ใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นจึงสรุปว่า เมื่อตั้งขอบเขตของการใช้งานเครื่องจักรไว้ที่ 80% ระยะเผื่อที่เหมาะสมคือ 1/4 ของ Interval โดยใช้เครื่องจักรรวมทั้งหมด 34 เครื่องสามารถแบ่งตามประเภทได้ตามตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.17 จำนวนเครื่องจักรรวมทุกประเภท สำหรับระยะเผื่อแบบต่างๆ

ตารางที่ 4.7 จำนวนเครื่องจักรแต่ละประเภทที่ระยะเผื่อ 1/4 ของ interval

ประเภทเครื่องจักร		จำนวนเครื่องจักร
1	Axle Lathe	1
2	Bearing Removal Equipment	4
3	Bogie Preload Stand	2
4	Bogie Turntables	4
5	Brake and Compressor Test Equipment	1
6	Hydraulic Wheel Press	2
7	Movable Jacking System 10 ton	4
8	Movable Jacking System 15 ton	2
9	Overhead Bridge Crane 100kN	4
10	Overhead Bridge Crane 20kN	4
11	Train Air Conditioning Module Repair	1
12	Underfloor Trainset Lifting System	4
13	Vehicle Door Test Stand	1
	รวม	34

4.2 ศูนย์ซ่อมบำรุงสำหรับทุกสายและแยกสาย

จาก 4.1 พบว่า ต้องกำหนดค่าขอบเขตของการใช้งานเครื่องจักรเป็น 80 % และตั้งระยะเผื่อของงานซ่อมบำรุงเป็น 1/4 ของระยะห่างการซ่อมบำรุง ในการหาความแตกต่างของจำนวนเครื่องจักร เมื่อเป็นศูนย์ซ่อมบำรุงสำหรับทุกสายและแยกสายได้แบ่งออกเป็น 4 กรณีโดยในการรวมศูนย์รถไฟฟ้าสายสีแดงเข้ม สายสีแดงอ่อน และสายแอร์พอร์ตลิงค์ จะจัดไว้ด้วยกัน รถไฟฟ้าสายสีเขียวเข้ม และสายสีเขียวอ่อน จะจัดไว้ด้วยกัน และ สายสีน้ำเงินจะจัดไว้กับสายสีม่วง เนื่องจากเป็นผู้เดินรถหน่วยงานเดียวกันโดยบริษัท รถไฟฟ้า ร.ฟ.ท. จำกัด (SRTET) เป็นผู้เดินรถสายสีแดงเข้ม สายสีแดงอ่อน และสายแอร์พอร์ตลิงค์บริษัทระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำกัด (มหาชน) (BTSC) เป็นผู้เดินรถสายสีเขียวเข้ม และสายสีเขียวอ่อนและบริษัท รถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน) (BMCL) เป็นผู้เดินรถสายสีน้ำเงิน และสายสีม่วงนอกจากนี้ ในการแบ่งแต่ละกรณี ศูนย์ซ่อมบำรุงรวมแต่ละศูนย์จะรับผิดชอบจำนวนรถไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน การรวมศูนย์ทั้ง 3 กรณีเป็นดังนี้

1. <u>กรณีที่ 1</u> มีศูนย์ซ่อมบำรุงของแต่ละโครงการรถไฟฟ้า เมื่อวิเคราะห์พบว่าศูนย์ซ่อมบำรุงของแต่ละโครงการจะต้องมีเครื่องจักรแต่ละประเภทดังตารางที่ 4.8 โดยต้องมีเครื่องจักรทั้งหมด 110 เครื่อง

ตารางที่ 4.8 จำนวนเครื่องจักรในศูนย์ซ่อมบำรุงของแต่ละโครงการ

เครื่องจักร	สายสีแดงเข้ม	สายสีแดงอ่อน	สายแอร์พอร์ตลิงค์	สายสีเขียวเข้ม	สายสีเขียวอ่อน	สายสีน้ำเงิน	สายสีม่วง	สายสีส้ม	รวม
1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
2	1	1	1	2	1	1	1	1	9
3	1	1	1	1	1	1	1	1	8
4	1	1	1	2	1	1	1	1	9
5	1	1	1	1	1	1	1	1	8
6	1	1	1	1	1	1	1	1	8
7	1	1	1	2	1	1	1	1	9
8	1	1	1	1	1	1	1	1	8
9	1	1	1	2	1	1	1	1	9
10	1	1	1	2	1	1	1	1	9
11	1	1	1	1	1	1	1	1	8
12	1	1	1	2	1	1	1	1	9
13	1	1	1	1	1	1	1	1	8
รวม	13	13	13	19	13	13	13	13	110

2. <u>กรณีที่ 2</u> มีศูนย์ซ่อมบำรุง 3 ศูนย์ โดยแต่ละศูนย์จะรับผิดชอบรถไฟฟ้าประมาณ 100 ขบวน
   - ศูนย์ซ่อมบำรุงที่ 1 ใช้สำหรับซ่อมบำรุง สายสีแดงเข้ม สายสีแดงอ่อน สายแอร์พอร์ตลิงค์ และสายสีส้ม
   - ศูนย์ซ่อมบำรุงที่ 2 ใช้สำหรับซ่อมบำรุง สายสีเขียวเข้ม และสายสีเขียวอ่อน
   - ศูนย์ซ่อมบำรุงที่ 3 ใช้สำหรับซ่อมบำรุง สายสีน้ำเงิน และสายสีม่วง

เมื่อวิเคราะห์พบว่าศูนย์ซ่อมบำรุงแต่ละศูนย์จะต้องมีเครื่องจักรแต่ละประเภทดังตารางที่ 4.9 โดยต้องมีเครื่องจักรทั้งหมด 58 เครื่อง

ตารางที่ 4.9 จำนวนเครื่องจักรในแต่ละศูนย์ซ่อมบำรุง (3 ศูนย์)

เครื่องจักร	สายสีแดงเข้ม สายสีแดงอ่อน สายแอร์พอร์ตลิงค์ สายสีส้ม	สายสีเขียวเข้ม สายสีเขียวอ่อน	สายสีน้ำเงิน สายสีม่วง	รวม
1	1	1	1	3
2	2	2	2	6
3	1	1	1	3
4	2	2	2	6
5	1	1	1	3
6	1	1	1	3
7	3	2	2	7
8	1	1	1	3
9	2	2	2	6
10	2	2	2	6
11	1	1	1	3
12	2	2	2	6
13	1	1	1	3
รวม	20	19	19	58

3. <u>กรณีที่ 3</u> มี ศูนย์ซ่อมบำรุง 1 ศูนย์รองรับรถไฟฟ้าจากทุกโครงการ เมื่อวิเคราะห์พบว่าศูนย์ซ่อมบำรุงแต่ละศูนย์จะต้องมีเครื่องจักรแต่ละประเภทดังตารางที่ 4.10 โดยต้องมีเครื่องจักรทั้งหมด 34 เครื่อง

ตารางที่ 4.10 จำนวนเครื่องจักรที่ใช้ในการซ่อมบำรุงเมื่อรวมทุกโครงการ

ประเภทเครื่องจักร		จำนวนเครื่องจักร
1	Axle Lathe	1
2	Bearing Removal Equipment	4
3	Bogie Preload Stand	2

ประเภทเครื่องจักร		จำนวนเครื่องจักร
4	Bogie Turntables	4
5	Brake and Compressor Test Equipment	1
6	Hydraulic Wheel Press	2
7	Movable Jacking System 10 ton	4
8	Movable Jacking System 15 ton	2
9	Overhead Bridge Crane 100kN	4
10	Overhead Bridge Crane 20kN	4
11	Train Air Conditioning Module Repair	1
12	Underfloor Trainset Lifting System	4
13	Vehicle Door Test Stand	1
	รวม	34

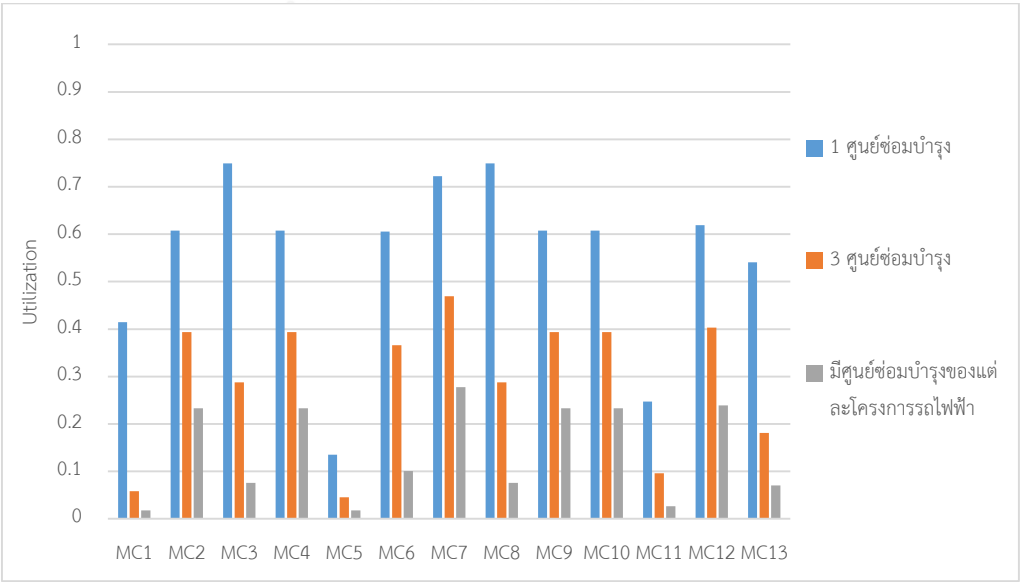
จากทั้ง 3 กรณี จำนวนเครื่องจักรที่ใช้ในการซ่อมบำรุงในกรณีต่างๆเป็นดังตารางที่ 4.11 และ เครื่องจักรแต่ละประเภทมีการใช้ประโยชน์ (Utilization) เป็นดังรูปที่ 4.18 พบว่าเมื่อรวมศูนย์ซ่อมบำรุงจะทำให้จำนวนเครื่องจักรลดลง กรณีที่ดีที่สุดคือรวมศูนย์ซ่อมบำรุงของรถไฟฟ้าทุกโครงการแต่จากจะเห็นได้ว่ารถไฟฟ้าแต่ละสายครอบคลุมพื้นที่บริเวณกว้าง และบางสายไม่เชื่อมต่อกันทำให้ยากต่อการเข้าซ่อมบำรุงที่ศูนย์ซ่อมบำรุงเดียวกัน แต่ถ้าหากแบ่งศูนย์ซ่อมบำรุงออกเป็น 3 ศูนย์ โดยให้แต่ละศูนย์ซ่อมบำรุงดูแลรถไฟฟ้าของผู้เดินรถเดียวกันจึงแบ่งออกเป็น สายสีแดงเข้ม สายสีแดงอ่อน สายแอร์พอร์ตลิงค์และสายสีส้มซ่อมภายในศูนย์ซ่อมบำรุงเดียวกัน สายสีเขียวเข้ม และสายสีเขียวอ่อน ซ่อมภายในศูนย์ซ่อมบำรุงเดียวกัน และสายสีน้ำเงิน และสายสีม่วง ซ่อมภายในศูนย์ซ่อมบำรุงเดียวกัน จะทำให้ใช้เครื่องจักรมากกว่าการรวมศูนย์ซ่อมบำรุงของทุกสาย แต่จะทำให้การบริการงานในการเข้าซ่อมบำรุงสะดวกขึ้น

ตารางที่ 4.11 จำนวนเครื่องจักรที่ใช้ในการซ่อมบำรุงในกรณีต่างๆ

ประเภทเครื่องจักร		กรณีที่ 1 (มีศูนย์ซ่อมบำรุงของแต่ละโครงการรถไฟฟ้า)	กรณีที่ 2 (3 ศูนย์ซ่อมบำรุง)	กรณีที่ 3 (ศูนย์ซ่อมบำรุงรวม)
1	Axle Lathe	8	3	1
2	Bearing Removal Equipment	9	6	4
3	Bogie Preload Stand	8	3	2

ประเภทเครื่องจักร		กรณีที่ 1 (มีศูนย์ซ่อมบำรุงของแต่ละโครงการรถไฟฟ้า)	กรณีที่ 2 (3 ศูนย์ซ่อมบำรุง)	กรณีที่ 3 (ศูนย์ซ่อมบำรุงรวม)
4	Bogie Turntables	9	6	4
5	Brake and Compressor Test Equipment	8	3	1
6	Hydraulic Wheel Press	8	3	2
7	Movable Jacking System 10 ton	9	7	4
8	Movable Jacking System 15 ton	8	3	2
9	Overhead Bridge Crane 100kN	9	6	4
10	Overhead Bridge Crane 20kN	9	6	4
11	Train Air Conditioning Module Repair	8	3	1
12	Underfloor Trainset Lifting System	9	6	4
13	Vehicle Door Test Stand	8	3	1
รวม		110	58	34

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



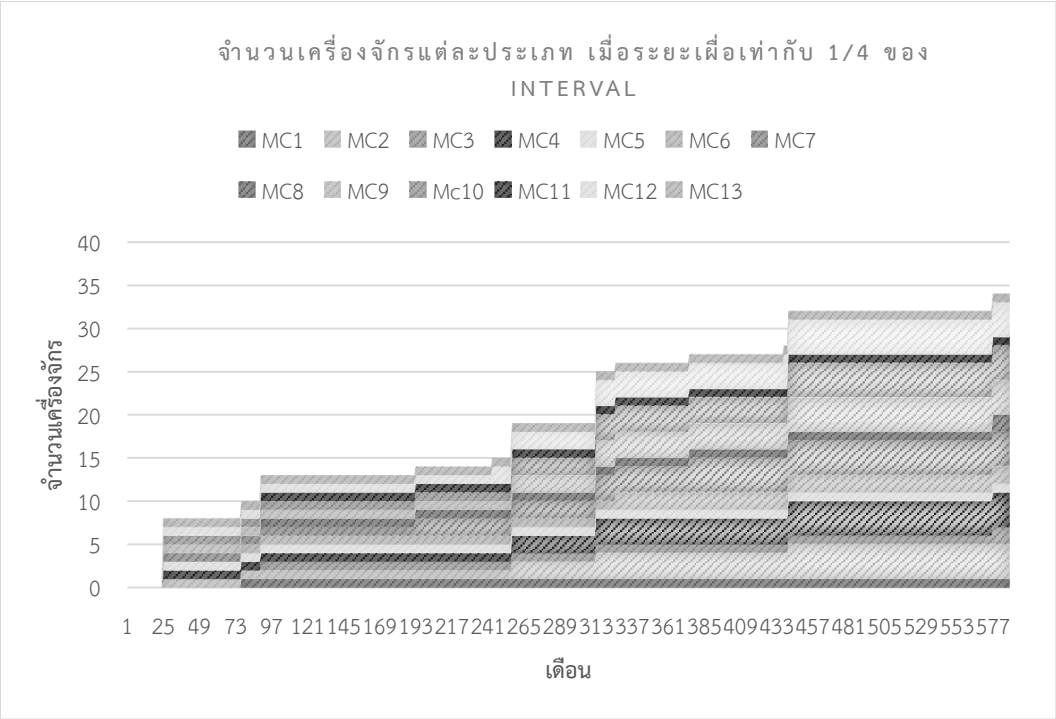
รูปที่ 4.18 การใช้ประโยชน์เครื่องจักรแต่ละประเภท ในการรวมศูนย์ซ่อมบำรุงกรณีต่างๆ

4.3 การกำหนดความกว้างของแต่ละช่วงเวลา

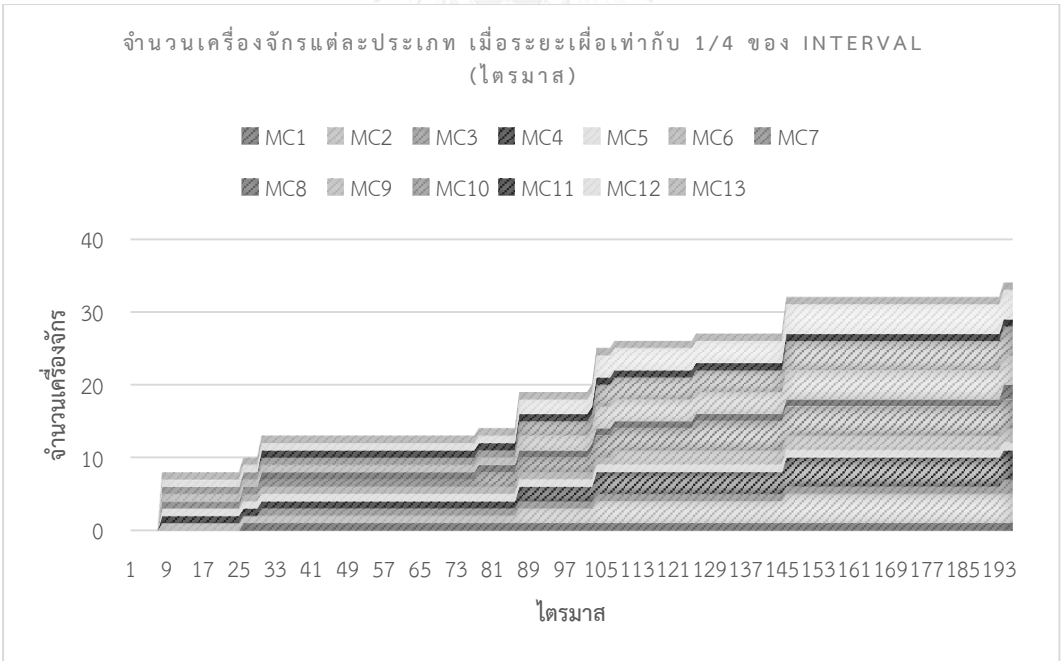
ในการวางแผนระยะยาวของการซ่อมบำรุงเพื่อหาจำนวนเครื่องจักรที่ใช้จะเป็นการวางแผนที่คำนึงถึงอนาคตข้างหน้าไม่ต่ำกว่า 5 ปีขึ้นไป การวางแผนระยะยาวจึงแบ่งช่วงเวลาออกเป็นช่วงๆ เพื่อหางานซ่อมบำรุง หรือจำนวนเครื่องจักรที่ต้องใช้ ในช่วงเวลาต่างๆ ซึ่งในการกำหนดความกว้างของช่วงเวลาอาจจะส่งผลถึงจำนวนเครื่องจักร ดังนั้น ในส่วนนี้จะวิเคราะห์ถึงการกำหนดความกว้างของแต่ละช่วงเวลา โดยแบ่งออกเป็น 2 แบบคือ 1 ช่วงเวลาแทน 1 เดือน และ 1 ช่วงเวลาแทน 1 ไตรมาส หรือ 3 เดือน เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการซ่อมบำรุงมีหน่วยเป็นชั่วโมง จึงกำหนดให้ 1 ไตรมาส มี 3 เดือน 1 เดือนมี 30 วัน และ 1 วันมี 24 ชั่วโมงทำงาน เวลาในการทำงานจึงเป็นดังตารางที่ 3.5 และ 3.6 เมื่อตั้งขอบเขตของการใช้งานเครื่องจักรไว้ที่ 80% พบว่าเมื่อกำหนดระยะเผื่อเท่ากับ 1/4 ของ Interval จำนวนเครื่องจักรเป็นดังรูปที่ 4.19 – 4.20 จากการวิเคราะห์พบว่าอาจมีความแตกต่างในด้านของช่วงเวลาที่เครื่องจักรมีจำนวนเพิ่มขึ้น แต่เครื่องจักรที่ใช้มีจำนวนเท่ากัน คือทั้งหมด 34 เครื่อง (ตารางที่ 4.13)

ตารางที่ 4.12 ระยะเผื่อการซ่อมบำรุงแต่ละงาน

Task		Interval(เดือน)	ระยะเผื่อ(เดือน)	ระยะเผื่อ(ไตรมาส)
1	Every 1 year	12	3	1
2	Every 5 years	60	15	5
3	Every 6 years	72	18	6
4	Every 9 years	108	27	9
5	Every 12 years	144	36	12



รูปที่ 4.19 จำนวนเครื่องจักรแต่ละประเภท เมื่อระยะเผื่อเท่ากับ 1/4 ของ Interval



รูปที่ 4.20 จำนวนเครื่องจักรแต่ละประเภท เมื่อระยะเผื่อเท่ากับ 1/4 ของ Interval (ไตรมาส)

ตารางที่ 4.13 จำนวนเครื่องจักรแต่ละประเภท เมื่อระยะเผื่อเท่ากับ 1/4 ของ Interval (เดือน, ไตรมาส)

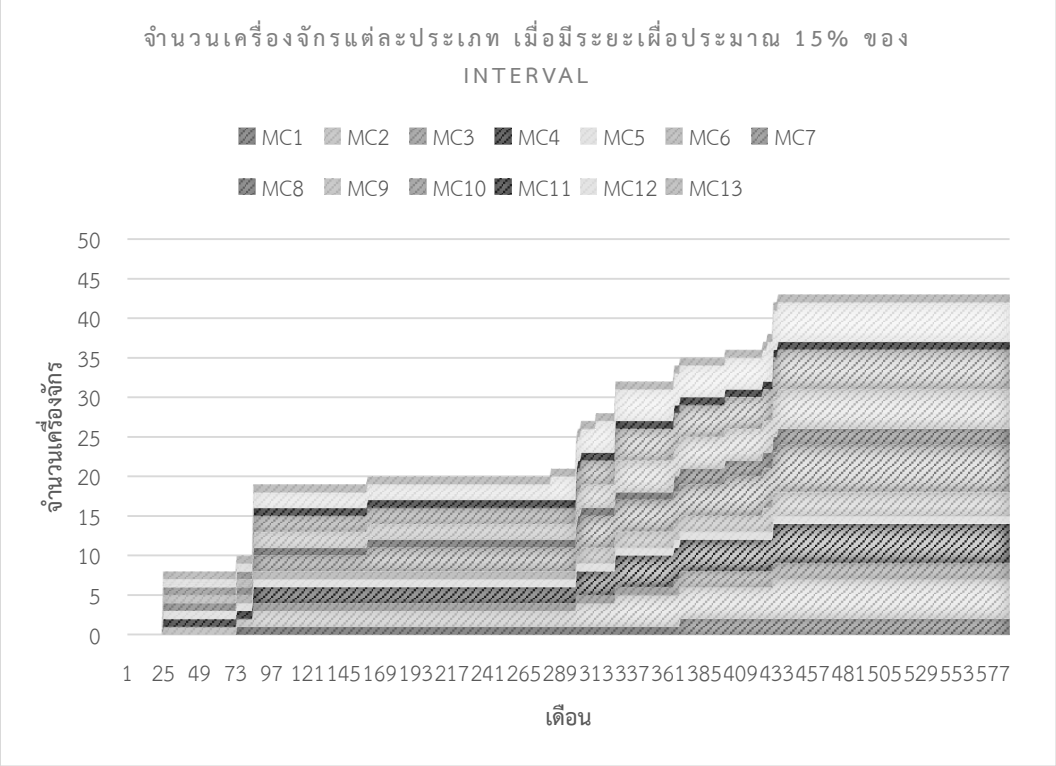
ประเภทเครื่องจักร		จำนวนเครื่องจักร (เครื่อง)	
		1 ช่วงเวลา = 1 เดือน	1 ช่วงเวลา = 1 ไตรมาส
1	Axle Lathe	1	1
2	Bearing Removal Equipment	4	4
3	Bogie Preload Stand	2	2
4	Bogie Turntables	4	4
5	Brake and Compressor Test Equipment	1	1
6	Hydraulic Wheel Press	2	2
7	Movable Jacking System 10 ton	4	4
8	Movable Jacking System 15 ton	2	2
9	Overhead Bridge Crane 100kN	4	4
10	Overhead Bridge Crane 20kN	4	4
11	Train Air Conditioning Module Repair	1	1
12	Underfloor Trainset Lifting System	4	4
13	Vehicle Door Test Stand	1	1
รวม		34	34

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

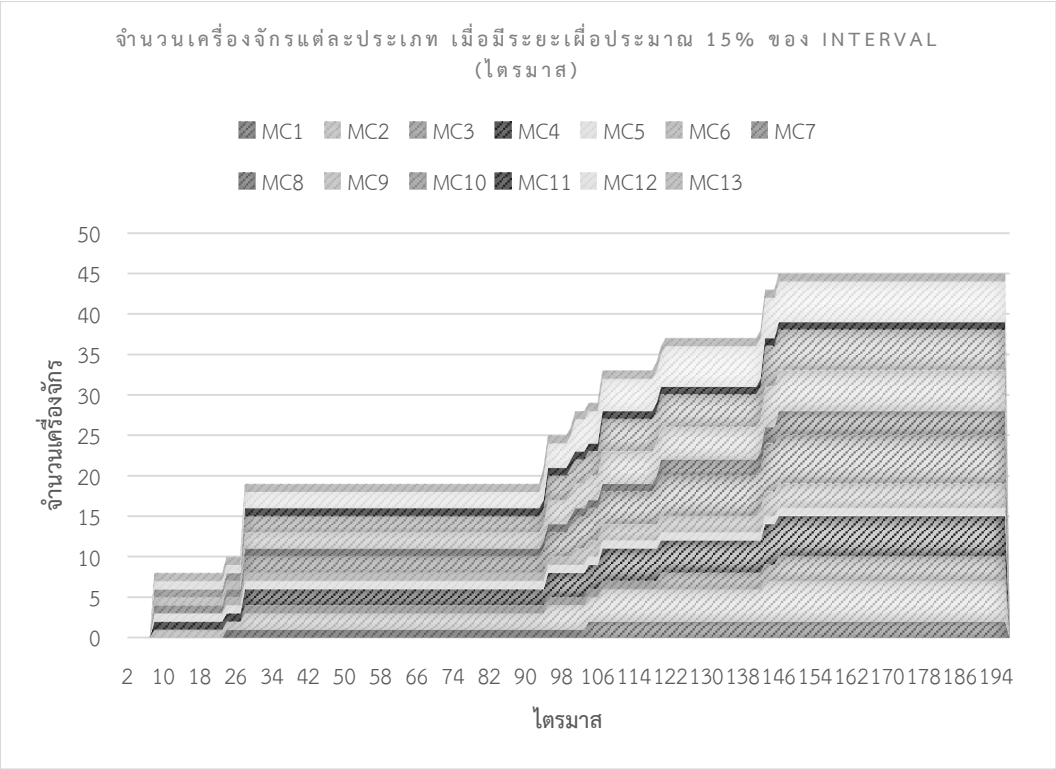
และเมื่อกำหนดระยะเผื่อมีค่าประมาณ 15% ของ Interval ตามตารางที่ 4.13 จำนวนเครื่องจักรเป็นดังรูปที่ 4.21 – 4.22 พบว่าจำนวนเครื่องจักรที่ใช้มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยคือ เมื่อใช้ความกว้างของช่วงเวลา 1 เดือนจะมีจำนวนเครื่องจักรรวมทั้งหมด 43 เครื่องและเมื่อใช้ความกว้างของช่วงเวลา 1 ไตรมาสจะมีจำนวนเครื่องจักรรวมทั้งหมด 45 เครื่อง ซึ่งจำนวนเครื่องจักรแต่ละประเภทอยู่ในตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.14 ระยะเผื่อการซ่อมบำรุงแต่ละงาน เมื่อมีระยะเผื่อประมาณ 15% ของ Interval

Task		Interval (เดือน)	ระยะเผื่อ (เดือน)	ระยะเผื่อ (ไตรมาส)
1	Every 1 year	12	3	1
2	Every 5 years	60	6	2
3	Every 6 years	72	6	2
4	Every 9 years	108	9	3
5	Every 12 years	144	12	4



รูปที่ 4.21 จำนวนเครื่องจักรแต่ละประเภท เมื่อระยะเผื่อประมาณ 15% ของ Interval (เดือน)



รูปที่ 4.22 จำนวนเครื่องจักรแต่ละประเภท เมื่อระยะเผื่อประมาณ 15% ของ Interval (ไตรมาส)

ตารางที่ 4.15 จำนวนเครื่องจักรในความกว้างของช่วงเวลาเดือน และไตรมาส

ประเภทเครื่องจักร		จำนวนเครื่องจักร (เครื่อง)	
		1 ช่วงเวลา = 1 เดือน	1 ช่วงเวลา = 1 ไตรมาส
1	Axle Lathe	2	2
2	Bearing Removal Equipment	5	5
3	Bogie Preload Stand	2	3
4	Bogie Turntables	5	5
5	Brake and Compressor Test Equipment	1	1
6	Hydraulic Wheel Press	3	3
7	Movable Jacking System 10 ton	6	6
8	Movable Jacking System 15 ton	2	3
9	Overhead Bridge Crane 100kN	5	5
10	Overhead Bridge Crane 20kN	5	5

ประเภทเครื่องจักร		จำนวนเครื่องจักร (เครื่อง)	
		1 ช่วงเวลา = 1 เดือน	1 ช่วงเวลา = 1 ไตรมาส
11	Train Air Conditioning Module Repair	1	1
12	Underfloor Trainset Lifting System	5	5
13	Vehicle Door Test Stand	1	1
รวม		43	45

จากตัวอย่างทั้ง 2 เหตุการณ์จะพบว่า มีเพียง 2 เครื่องจักรคือ Bogie Preload Stand และ Movable Jacking System 15 Ton ที่การกำหนดความกว้างของช่วงเวลาแบบไตรมาสมีจำนวนเครื่องจักรที่มากกว่า ซึ่งจะมีผลเนื่องจากงานซ่อมบำรุงมีระยะเผื่ออยู่คนละช่วงกัน ตัวอย่างเช่น งานซ่อมบำรุงที่มีระยะเผื่อเท่ากับ 1/4 ของระยะห่างการซ่อมบำรุง ถ้ารถไฟฟ้ามีกำหนดงานซ่อมบำรุงในเดือนที่ 2 หรือไตรมาสที่ 1 ซึ่งสำหรับความกว้างของช่วงเวลา 1 ช่วงเวลาเท่ากับ 1 เดือน งานซ่อมบำรุงนี้จะสามารถซ่อมบำรุงได้ในเดือน 2 3 และ 4 แต่สำหรับความกว้างของช่วงเวลา 1 ช่วงเวลาเท่ากับ 1 ไตรมาส งานซ่อมบำรุงนี้จะสามารถซ่อมบำรุงได้ในเดือน 1 2 และ 3 ถ้าหากเดือน 1, 2 และ 3 เครื่องจักรมีงานซ่อมบำรุงจำนวนมากและไม่ว่างงาน ความกว้างของช่วงเวลาแบบไตรมาสจะต้องเพิ่มจำนวนเครื่องจักรแต่สำหรับความกว้างของช่วงเวลาแบบเดือนจะสามารถซ่อมบำรุงงานนี้ในเดือนที่ 4 ได้ จึงสรุปได้ว่า การกำหนดความกว้างของช่วงเวลามีผลต่อจำนวนเครื่องจักรน้อยมาก

4.4 จำนวนรถไฟฟ้าที่เหมาะสมกับ 1 ชุดของเครื่องจักรที่ใช้ในการซ่อมบำรุง

นอกจากนี้ ในศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าส่วนใหญ่จะมีเครื่องจักรแต่ละประเภทจำนวนจำกัด ดังนั้นสิ่งที่สำคัญคือ จำนวนเครื่องจักรที่มีอยู่นั้นจะสามารถรองรับรถไฟฟ้าได้จำนวนมากที่สุดเท่าใด จึงทำการศึกษาโดยจำกัดให้ศูนย์ซ่อมบำรุงรถไฟฟ้ามีเครื่องจักรแต่ละประเภทเพียง 1 เครื่องเท่านั้น และรถฟ้าทุกขบวนเกิดขึ้นในปีเดียวกัน สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

<u>สัญลักษณ์และพารามิเตอร์</u>

B เซตของเดือนที่รถไฟฟ้าเปิดให้บริการ, b = {1, 2, 3 ...12}

I เซตของกลุ่มงานซ่อมบำรุง, i = {1, 2, 3, 4, 5}

T เซตของขบวนรถไฟฟ้า, t = {1, 2, 3, 4, 5, ...n}

H เซตของช่วงเวลา, h = {1, 2, 3, 4, 5, ..., 240}

M เซตของเครื่องจักร, m = {1, 2, 3, 4, 5, ..., 13}

การกำหนดพารามิเตอร์

d_{im} เวลาที่ใช้ในการซ่อมบำรุงงาน i ของเครื่องจักร m

$Spread_i$ ระยะเผื่อสำหรับซ่อมบำรุงงาน i

$Machine_m$ จำนวนเครื่องจักรประเภท m โดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 1

Int_i ระยะห่างระหว่างการซ่อมบำรุงของงานซ่อมบำรุง i

$TrainTask_{ihb}$ มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการในเดือน b ซ่อมบำรุงงาน i ในช่วงเวลา h ดังตัวอย่างในตารางที่ 4.16

ตารางที่ 4. 16 กำหนดการของงานซ่อมบำรุงของรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการในเดือน 1 (b = 1)

task	month																					
	13	25	37	49	61	73	85	97	109	121	133	145	157	169	181	193	205	217	229	241	253	275
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

การกำหนดตัวแปรตัดสินใจ

Num_Train_b จำนวนรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการในเดือน b

$Train_{bt}$ มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อมีรถไฟฟ้าขบวน t ที่เปิดให้บริการในเดือน b นอกนั้นมีค่าเท่ากับ 0

$Plan_{hbti}$ มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อรถไฟฟ้าขบวน t ที่เปิดให้บริการในเดือน b มีการวางแผนซ่อมบำรุงงาน i ในช่วงเวลา h นอกนั้นมีค่าเท่ากับ 0

วัตถุประสงค์ของแบบจำลองนี้คือ หาจำนวนรถไฟฟ้าที่มากที่สุดที่เป็นไปได้ ที่สามารถซ่อมบำรุงโดยใช่เครื่องจักรประเภทละ 1 เครื่อง

$$\text{maximize } z = \sum_{b \in B} Num_Train_b \quad (4\text{-}0)$$

เงื่อนไขของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สมการที่ (4-1) แสดงจำนวนรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการในแต่ละเดือน

$$Num_Train_b = \sum_{t \in T} Train_{bt} \qquad \forall b \in B \quad (4\text{-}1)$$

สมการที่ (4-2) เป็นการวางแผนการซ่อมบำรุงแต่ละงาน

$$TrainTask_{ihb} \times Train_{bt} = \sum_{l=h}^{l=h+Spread_i-1} Plan_{lbti} \qquad \forall i \in I, \forall b \in B, \forall t \in T, \forall h \in H \quad (4\text{-}2)$$

สมการที่ (4-3) เป็นสมการกำหนดขอบเขตการใช้งานเครื่องจักรไม่ให้เกิดความสามารถในการรองรับ

$$\sum_{b\in B,i\in I,t\in T}(Plan_{hbti}\times d_{im}) = Machine_m \qquad \forall h\in H,\ \forall m\in M \qquad (4\text{-}3)$$

สมการที่ (4-4) กำหนดค่าของตัวแปรตัดสินใจโดย $Plan_{hbti}$ มีค่าเป็น 0 หรือ 1 เท่านั้น และสมการที่ (4-5) และ (4-6) $Train_b$และ $Train_{bt}$ เป็นจำนวนบวก

$$Plan_{hbti} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in I,\ \forall b \in B,\ \forall h \in H,\ \forall t \in T \qquad (4\text{-}4)$$

$$Train_b \geq 0 \qquad \forall b \in B \qquad (4\text{-}5)$$

$$Train_{bt} \geq 0 \qquad \forall b \in B,\ \forall t \in T \qquad (4\text{-}6)$$

ในส่วนของแบบจำลองหาจำนวนรถไฟฟ้าที่มากที่สุดที่สามารถซ่อมบำรุงโดยกำหนดเครื่องจักรจะได้ผลลัพธ์ในรูปแบบของจำนวนรถไฟฟ้า สำหรับเครื่องจักรในการซ่อมบำรุง 1 ชุด โดยมีการตั้งขอบเขตของการใช้งานเครื่องจักรไว้ที่ 80 เปอร์เซนต์ ของความสามารถในการทำงาน สามารถซ่อมบำรุงรถไฟฟ้าได้จำนวนรถตามตารางที่ 4.17 โดยรถไฟฟ้าทุกขบวนจะมีการเปิดให้บริการในปีเดียวกันแต่มีการกระจายเดือนออกไป

ตารางที่ 4.17 จำนวนรถไฟฟ้าที่มากที่สุดของการซ่อมบำรุงโดยมีเครื่องจักรประเภทละ 1 ชุดในระยะเผื่อ

ระยะเผื่อ (เท่าของ Interval)	จำนวนรถไฟฟ้า (ขบวน)
1/12	33
1/6	50
1/4	67
1/3	85

จากตารางที่ 4.16 พบว่า ถ้าหากตั้งระยะเผื่อในการซ่อมบำรุงไว้ที่ 1/12 เท่าของ Interval ศูนย์ซ่อมบำรุงจะสามารรองรับรถไฟฟ้าได้ทั้งหมด 33 ขบวน แต่ถ้าหากตั้งระยะเผื่อในการซ่อมบำรุงไว้ที่ 1/6 1/4 และ 1/3 เท่าของ Interval ศูนย์ซ่อมบำรุงจะสามารรองรับรถไฟฟ้าได้ทั้งหมด 50 67 และ 85 ขบวนตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อวิเคราะห์จากค่าการใช้ประโยชน์ (Utilization) พบว่ามีเพียงเครื่องจักรที่ 2 4 6 7 8 9 10 และ 12 ที่ใช้งานอย่างเต็มที่ และมีเครื่องจักรประเภทอื่นว่างงานอยู่มากจึงเพิ่มจำนวนเครื่องจักรสำหรับอันที่มีค่า Utilization สูง โดยมีจำนวนเครื่องจักรแต่ละประเภทดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 จำนวนเครื่องจักรแต่ละประเภท

ประเภทเครื่องจักร		จำนวนเครื่องจักร
1	Axle Lathe	1
2	Bearing Removal Equipment	2
3	Bogie Preload Stand	1
4	Bogie Turntables	2
5	Brake and Compressor Test Equipment	1
6	Hydraulic Wheel Press	2
7	Movable Jacking System 10 ton	2
8	Movable Jacking System 15 ton	2
9	Overhead Bridge Crane 100kN	2
10	Overhead Bridge Crane 20kN	2
11	Train Air Conditioning Module Repair	1
12	Underfloor Trainset Lifting System	2
13	Vehicle Door Test Stand	1

ตารางที่ 4.19 จำนวนรถไฟฟ้าที่มากที่สุดของการซ่อมบำรุงโดยมีเครื่องจักรตามที่กำหนดไว้ในระยะเผื่อต่างๆ

ระยะเผื่อ (เท่าของ Interval)	จำนวนขบวนรถไฟฟ้า (ขบวน)
1/12	69
1/6	103
1/4	136
1/3	170

จากจำนวนเครื่องจักรดังตารางที่ 4.19 พบว่าเมื่อเพิ่มเครื่องจักรแล้ว สามารถซ่อมบำรุงขบวนรถไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น ถ้าหากตั้งระยะเผื่อในการซ่อมบำรุงไว้ที่ 1/12 เท่าของ Interval ศูนย์ซ่อมบำรุงจะสามารรองรับรถไฟฟ้าได้ทั้งหมด 69 ขบวน แต่ถ้าหากตั้งระยะเผื่อในการซ่อมบำรุงไว้ที่ 1/6 1/4 และ 1/3 เท่าของ Interval ศูนย์ซ่อมบำรุงจะสามารรองรับรถไฟฟ้าได้ทั้งหมด 103 136 และ 170 ขบวน ตามลำดับซึ่งพบว่าการเพิ่มเครื่องจักรทำให้สามารถรองรับจำนวนรถไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นเป็นเท่าตัว

บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

ในส่วนนี้เป็นการสรุปและวิเคราะห์ผลที่ได้การดำเนินงานในประเด็นต่างๆ ประเด็นแรกคือ ลักษณะของปัญหา และปัจจัยที่มีผลต่อจำนวนเครื่องจักร

5.1 ลักษณะของปัญหา และปัจจัยที่มีผลต่อจำนวนเครื่องจักร

การซ่อมบำรุงเป็นส่วนสำคัญต่อธุรกิจรถไฟฟ้า เพื่อให้รถไฟฟ้าสามารถดำเนินการได้อย่างปกติ หรือไม่เกิดอันตรายต่อผู้โดยสาร งานซ่อมบำรุงคือกิจกรรมทุกอย่างที่ทำให้เครื่องจักร และอุปกรณ์อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งานอยู่เสมอ และเพิ่มประสิทธิภาพ ความปลอดภัยในการใช้งาน เนื่องจากในการซ่อมบำรุงมีค่าใช้จ่ายสูง อีกทั้งเป็นส่วนที่ไม่ให้ผลกำไรต่อธุรกิจ การลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงโดยไม่ลดการซ่อมบำรุงจึงเป็นจุดมุ่งหมายสำคัญ ค่าใช้จ่ายในส่วนของงานซ่อมบำรุงส่วนใหญ่เกิดจากทรัพยากร จึงจำเป็นต้องจำกัดจำนวนทรัพยากรที่มีให้น้อยที่สุด และบริหารทรัพยากรอย่างเหมาะสม โดยทรัพยากรที่สนใจคือ ทรัพยากรเครื่องจักร ในงานวิจัยนี้ มีหลักการสำคัญในการลดค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงตัวรถไฟฟ้า 3 ประการ คือ การแบ่งปันทรัพยากรในการซ่อมบำรุงใหญ่ การรวมกลุ่มงานซ่อมบำรุง และการเกลี่ยงานซ่อมบำรุง ซึ่งจำนวนเครื่องจักรที่ใช้ในการซ่อมบำรุงจะขึ้นอยู่กับจำนวนรถไฟฟ้า ปริมาณงานซ่อมบำรุง และการวางแผนซ่อมบำรุง การวางแผน คือ การหาทางเลือกหรือวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการปฏิบัติงาน โดยมีปัจจัยต่างๆในการควบคุม

5.2 ขั้นตอนการดำเนินการ

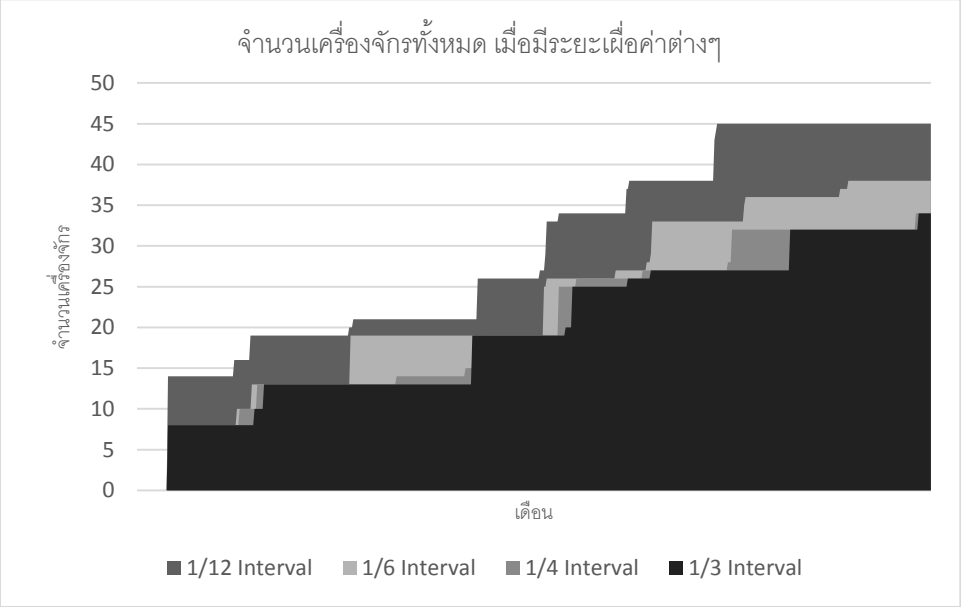
ในงานวิจัยนี้จะเริ่มด้วย การหาความต้องการในการซ่อมบำรุง ซึ่งหาได้จาก เดือน และปีที่รถไฟฟ้าเปิดให้บริการ และปริมาณงานซ่อมบำรุง ความต้องการในการซ่อมบำรุงเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการหาจำนวนเครื่องจักรที่ใช้ และวางแผนการซ่อมบำรุง ในแต่ละเดือน ซึ่งหาได้จาก “แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาจำนวนเครื่องจักรที่น้อยสุด” แต่เนื่องจาก ในการหาจำนวนเครื่องจักรที่ใช้ในการซ่อมบำรุงนั้น เป็นการวางแผนระยะยาว ดังนั้นจึงควรตั้งขอบเขตของการใช้งานเครื่องจักร เพราะถ้าหากวางแผนการใช้งานเครื่องจักร 100% หรือเต็มประสิทธิภาพของเครื่องจักร อาจจะทำให้เครื่องจักรไม่เพียงพอเมื่อนำไปใช้งานจริง ดังนั้นจึงต้องนำข้อมูลการวางแผนงานซ่อมบำรุงในแต่ละเดือน มาจัดตารางการทำงานซ่อมบำรุง โดยใช้ “แบบจำลองทางคณิตศาสตร์การจัดตารางการซ่อมบำรุงในแต่ละเดือน” จากการวิเคราะห์พบว่า ถ้าหากในการวางแผนระยะยาวมีแผนการใช้งานเครื่องจักร 100% จะไม่สามารถทำงานซ่อมบำรุงได้จริง ต่อมาจึงหาขอบเขตแผนการใช้งานเครื่องจักรค่าอื่นๆ พบว่า ค่าที่เหมาะสมคือ 80% ของการความสามารถในการทำงานของเครื่องจักร

5.3 ผลการดำเนินการ

ในการวางแผนการซ่อมบำรุงใหญ่ที่ใช้หลักการรวมกลุ่มงานซ่อมบำรุง และการเกลี่ยงานซ่อมบำรุง พบว่าสามารถรวมกลุ่มงานได้ 5 กลุ่มคือ ซ่อมบำรุงทุก 1 ปี 5 ปี 6 ปี 9 ปี และ 12 ปี ในการเกลี่ยงานซ่อมบำรุงจะใช้การกำหนดระยะเผื่อเป็นสัดส่วนของระยะห่างการซ่อมบำรุง ในงานวิจัยนี้จะสรุปการวิเคราะห์ผลได้ใน 4 ประเด็นดังนี้

1) ระยะเผื่อ

ถ้าหากสามารถรวมศูนย์ซ่อมบำรุงสำหรับทั้ง 8 สายไว้ด้วยกัน จากรูปที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าจำนวนเครื่องจักรทั้งหมดของระยะเผื่อ 1/4 และ 1/3 เท่าของระยะห่างการซ่อมบำรุง มีจำนวนเครื่องจักรที่ใช้ในแต่ละช่วงเวลาใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นระยะเผื่อที่ดีที่สุดคือ 1/4 เท่าของระยะห่างการซ่อมบำรุง จะใช้เครื่องจักรทั้งหมด 34 เครื่อง โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.1 จำนวนเครื่องจักรทั้งหมด เมื่อมีระยะเผื่อค่าต่างๆ

ตารางที่ 5.1 จำนวนเครื่องจักรแต่ละประเภท เมื่อมีระยะเผื่อ 1/4 ของ interval

ประเภทเครื่องจักร		จำนวนเครื่องจักร
1	Axle Lathe	1
2	Bearing Removal Equipment	4
3	Bogie Preload Stand	2
4	Bogie Turntables	4
5	Brake and Compressor Test Equipment	1
6	Hydraulic Wheel Press	2

ประเภทเครื่องจักร		จำนวนเครื่องจักร
7	Movable Jacking System 10 ton	4
8	Movable Jacking System 15 ton	2
9	Overhead Bridge Crane 100kN	4
10	Overhead Bridge Crane 20kN	4
11	Train Air Conditioning Module Repair	1
12	Underfloor Trainset Lifting System	4
13	Vehicle Door Test Stand	1
	รวม	34

2) การรวมศูนย์ซ่อมบำรุง

เนื่องจากการรวมศูนย์ซ่อมบำรุงสำหรับทั้ง 8 สาย อาจเกิดปัญหาในด้านของการบริหารงาน และ การขนส่งรถไฟฟ้าระหว่างแต่ละสายไปยังศูนย์ซ่อมบำรุง ดังนั้นการรวมสายเป็นกลุ่มย่อยๆ เช่นมีศูนย์ซ่อมบำรุง 3 ศูนย์ โดยแต่ละศูนย์จะรับผิดชอบรถไฟฟ้าประมาณ 100 ขบวน พบว่าศูนย์ซ่อมบำรุงแต่ละศูนย์จะต้องมีเครื่องจักรแต่ละประเภทดังตารางที่ 5.2 โดยต้องมีเครื่องจักรทั้งหมด 58 เครื่อง

ตารางที่ 5.2 จำนวนเครื่องจักรในแต่ละศูนย์ซ่อมบำรุง (3 ศูนย์) โดยแต่ละศูนย์จะรับผิดชอบรถไฟฟ้าประมาณ 100 ขบวน

เครื่องจักร	สายสีแดงเข้ม สายสีแดงอ่อน สายแอร์พอร์ตลิงค์ สายสีส้ม	สายสีเขียวเข้ม สายสีเขียวอ่อน	สายสีน้ำเงิน สายสีม่วง	รวม
1	1	1	1	3
2	2	2	2	6
3	1	1	1	3
4	2	2	2	6
5	1	1	1	3
6	1	1	1	3
7	3	2	2	7
8	1	1	1	3
9	2	2	2	6
10	2	2	2	6

เครื่องจักร	สายสีแดงเข้ม สายสีแดงอ่อน สายแอร์พอร์ตลิงค์ สายสีส้ม	สายสีเขียวเข้ม สายสีเขียวอ่อน	สายสีน้ำเงิน สายสีม่วง	รวม
11	1	1	1	3
12	2	2	2	6
13	1	1	1	3
รวม	20	19	19	58

3) การกำหนดความกว้างของแต่ละช่วงเวลา

จากการวิเคราะห์พบว่า การกำหนดความกว้างของแต่ละช่วงเวลา ไม่มีผลต่อจำนวนเครื่องจักรมากนัก

5.4 ปัญหาและอุปสรรค

ในการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พบปัญหาและอุปสรรคระหว่างการทำงานดังนี้

1. ข้อมูลเกี่ยวกับโครงการรถไฟฟ้าในอนาคตที่หาได้นั้น ไม่ใช่ข้อมูลในปัจจุบันทั้งหมด
2. ในบางโครงการ ยังไม่มีการระบุจำนวนรถไฟฟ้าที่ใช้ในการให้บริการ
3. คอมพิวเตอร์ไม่สามารถหาคำตอบของการจัดตารางการซ่อมบำรุงอย่างละเอียดได้ภายในรอบเดียว
4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหาจำนวนเครื่องจักรโดยใช้การจัดตารางงานมีน้อย
5. ข้อมูลสำหรับการซ่อมบำรุงที่หาได้นั้น เกิดจากการประมาณการ อาจจะมีความแตกต่างจากการทำงานซ่อมบำรุงของแต่ละหน่วยงาน

5.5 ข้อเสนอแนะ

จากการดำเนินงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงมีข้อเสนอแนะดังนี้

1. เนื่องด้วย การจัดตั้งศูนย์ซ่อมบำรุงรวมเพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายในด้านทรัพยากรเครื่องจักร แต่อาจจะต้องคำนึงถึงความสามารถในการบริหารของศูนย์ซ่อมบำรุง และเนื่องจาก ในปัจจุบันรถไฟฟ้าแต่ละสาย ไม่มีเส้นทางที่เชื่อมต่อระหว่างกัน และมีการกระจายเส้นทางเป็นวงกว้างรอบเขตกรุงเทพและปริมณฑล ดังนั้น ถ้าหากมีการใช้ศูนย์ซ่อมบำรุงร่วม จะต้องคำนึงถึงแนวทางการนำขบวนรถเข้าสู่ศูนย์ซ่อมบำรุง ด้วยเช่น ขนส่งทางถนนโดยใช้รถบรรทุก สร้างเส้นทางพิเศษมายังศูนย์ซ่อมบำรุง สำหรับรถไฟฟ้าแต่ละสาย เป็นต้น

2. เนื่องด้วย การวางแผนซ่อมบำรุงมีการกำหนดระยะเผื่อโดยใช้เวลาเป็นตัวกำหนด แต่ในการดำเนินงานจริงต้องมีการบริหารการเดินรถที่ไม่สมดุลกัน เพื่อให้ระยะทางสะสมของรถไฟฟ้าแต่ละขบวนไม่เท่ากัน
3. ถ้าหาก ภายในศูนย์ซ่อมบำรุงมีเครื่องจักรประเภทใดประเภทหนึ่งเพียงเครื่องเดียว ศูนย์ซ่อมบบำรุงต้องคำนึงถึงความเสี่ยงในด้านโอกาสที่เครื่องจักรเสีย หรือไม่สามารถใช้งานได้ ดังนั้นถึงแม้ว่า การมีเครื่องจักรเพียงเครื่องเดียวสามารถรองรับงานซ่อมบำรุงทั้งหมดได้ ก็ตาม จะต้องมีการเตรียมความพร้อม หรือแนวทางรองรับสำหรับเหตุการณ์ฉุกเฉินที่อาจจะเกิดขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายการอ้างอิง

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

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

[3] 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.

[4] จ. รู้กิจการพาณิชย์, การจัดการงานบำรุงรักษา กรุงเทพ: บริษัท เอส.พี.เอ็น.การพิมพ์ จำกัด, 2546.

[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] น. นุ่มวงษ์, "การศึกษาและเปรียบเทียบงานซ่อมบำรุงขบวนรถไฟฟ้าและล้อเลื่อน," กรุงเทพมหานคร2558.

[7] สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร, "โครงการศึกษาปรับแผนแม่บทขนส่งมวลชนทางรางในเขตกรุงเทพมหานครและปริมณฑล," กรุงเทพมหานคร2553.

[8] บีทีเอสกรุ๊ป, "รายงานประจำปี 2556/57," 2557.

[9] Patanasongsivilai, "ตะลอนทัวร์ห้างดังติด BTS."

[10] บ. ท. จ. (มหาชน). รถไฟฟ้าสายสีน้ำเงิน. Available: https://www.bangkokmetro.co.th/

[11] บ. ร. จ. (มหาชน). บริษัท ระบบขนส่งมวลชนกรุงเทพ จำกัด (มหาชน). Available: https://www.bts.co.th

[12] A. R. Link. ระบบงานรถไฟฟ้าแอร์พอร์ต เรล ลิงก์. Available: https://www.srtet.co.th

[13] ท. Thairat, "สิ้นสุดการรอคอย “รถไฟฟ้า” มาหาซะที เจาะลึกทุกสถานี 10 เส้นทางผ่านบ้านใคร," in *Thairat*, ed. http://www.thairath.co.th/content/472283, 2558.

[14] ส. อิ่มศิริ, "อัพเดท “รถไฟฟ้า” คนกรุงฯ จะได้ใช้เมื่อไหร่," in *Bkkcitismart*, ed. 2558.

[15] K. R. Mobley, "Impact of Maintenance," in *Maintenance Fundamentals* Second, Ed., ed, 2004.

[16] F. Mooren Ceng and L. Dongen, "Application of remote condition monitoring in different rolling stock life cycle phases," *Procedia CIRP,* vol. 11, pp. 135-138, 2013.

[17] G. Hafter and D. Morphew, "Maintenance aspects of London Transport rolling stock," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,* vol. 196, pp. 165-174, 1982.

[18] ป. ชุติมา, เทคนิคการจัดตารางการดำเนินงาน กรุงเทมหานคร: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2555.

[19] 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.

[20] A. Kumar, M. Tiwari, R. Shankar, and A. Baveja, "Solving machine-loading problem of a flexible manufacturing system with constraint-based genetic algorithm," *European Journal of Operational Research,* vol. 175, pp. 1043-1069, 2006.

[21] P. C. Chu and J. E. Beasley, "A genetic algorithm for the generalised assignment problem," *Computers & Operations Research,* vol. 24, pp. 17-23, 1997.

[22] ป. ชุติมา, "การจัดตารางระบบผลิตแบบไหลลื่น.," in การประยุกต์เทคนิคการจัดตารางในอุตสาหกรรม., ed: บริษัท วีพริ้นท์ จำกัด., 2551, pp. 114-122.

[23] B. Worrall and B. Mert, "Application of dynamic scheduling rules in maintenance planning and scheduling," *International Journal of Production Research,* vol. 18, pp. 57-71, 1980.

[24] 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.

[25] M. Gopalakrishnan, S. Mohan, and Z. He, "A tabu search heuristic for preventive maintenance scheduling," *Computers & industrial engineering,* vol. 40, pp. 149-160, 2001.

[26] L. Min and W. Cheng, "A genetic algorithm for minimizing the makespan in the case of scheduling identical parallel machines," *Artificial Intelligence in Engineering,* vol. 13, pp. 399-403, 1999.

[27] N. Sakulsom and W. Tharmmaphornphilas, "Scheduling a music rehearsal problem with unequal music piece length," *Computers & Industrial Engineering,* vol. 70, pp. 20-30, 2014.

[28] W. Winston, *Operations Research Applications and Algorithms* 4ed., 2003.

[29] IBM. (2013). *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio OPL Language User's Manual* Available: http://www.ibm.com/.

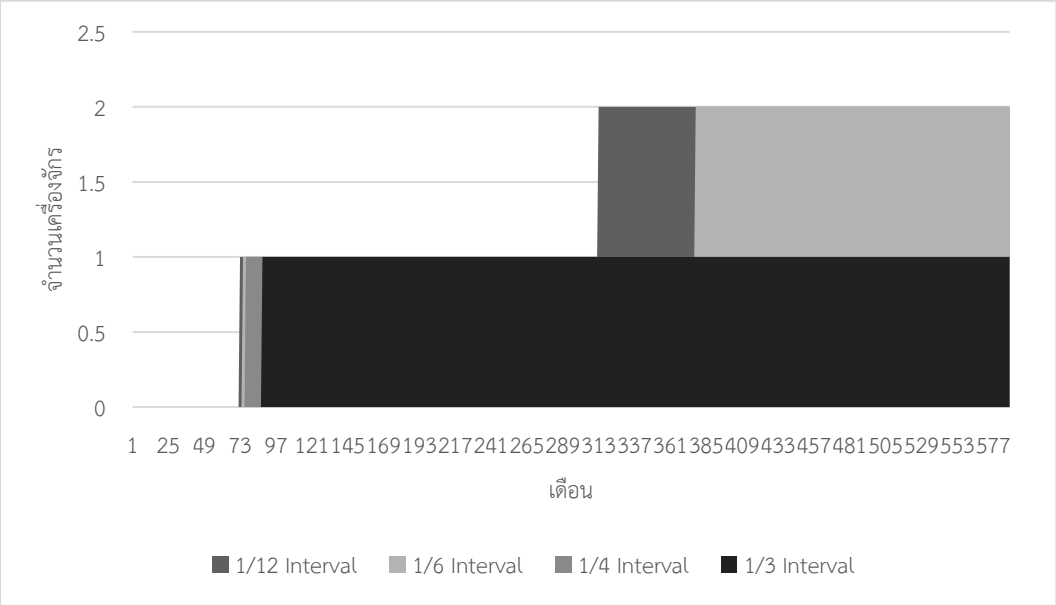
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

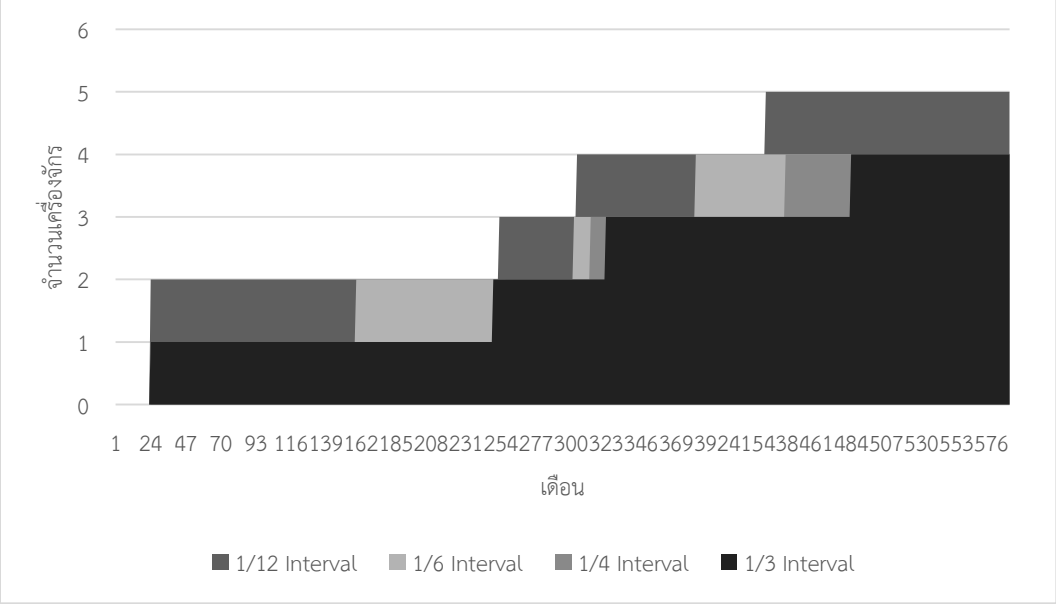
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก

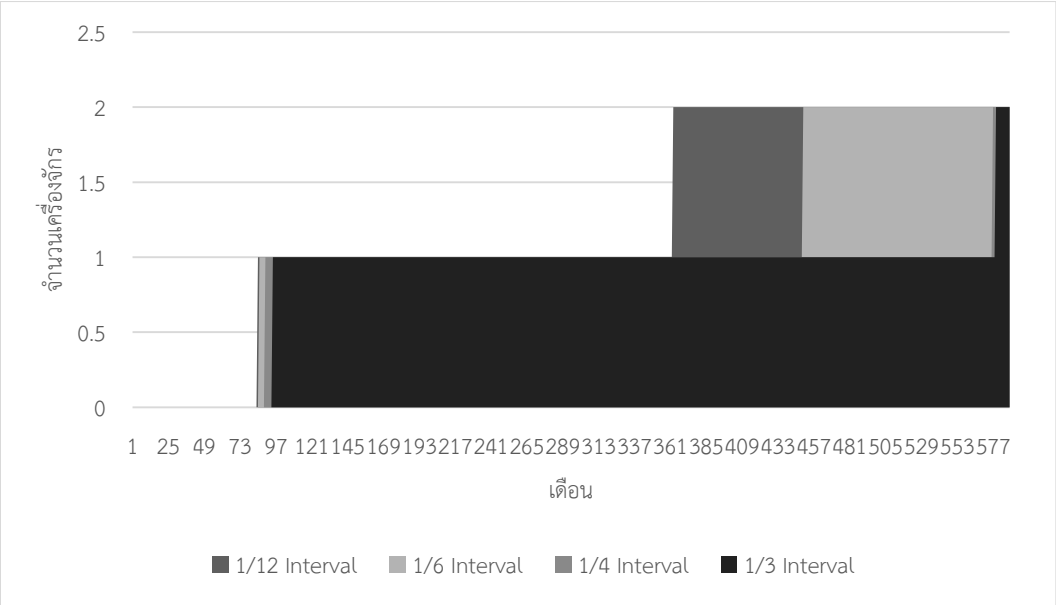
จำนวนเครื่องจักรแต่ละประเภท เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval



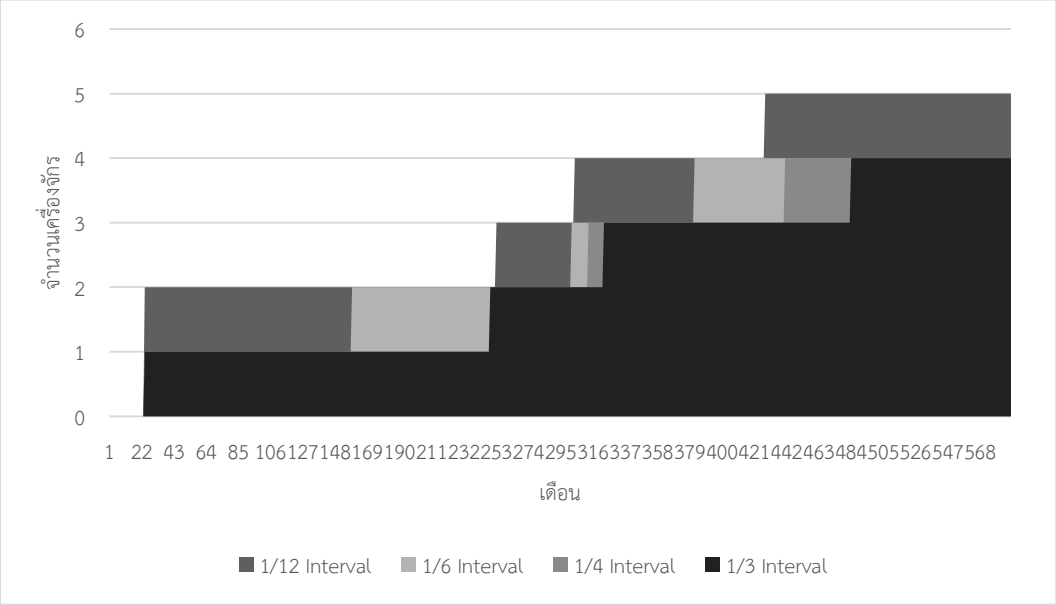
รูปที่ ก.1 จำนวนเครื่องจักร Axle Lathe เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval



รูปที่ ก.2 จำนวนเครื่องจักร Bearing Removal Equipment เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval

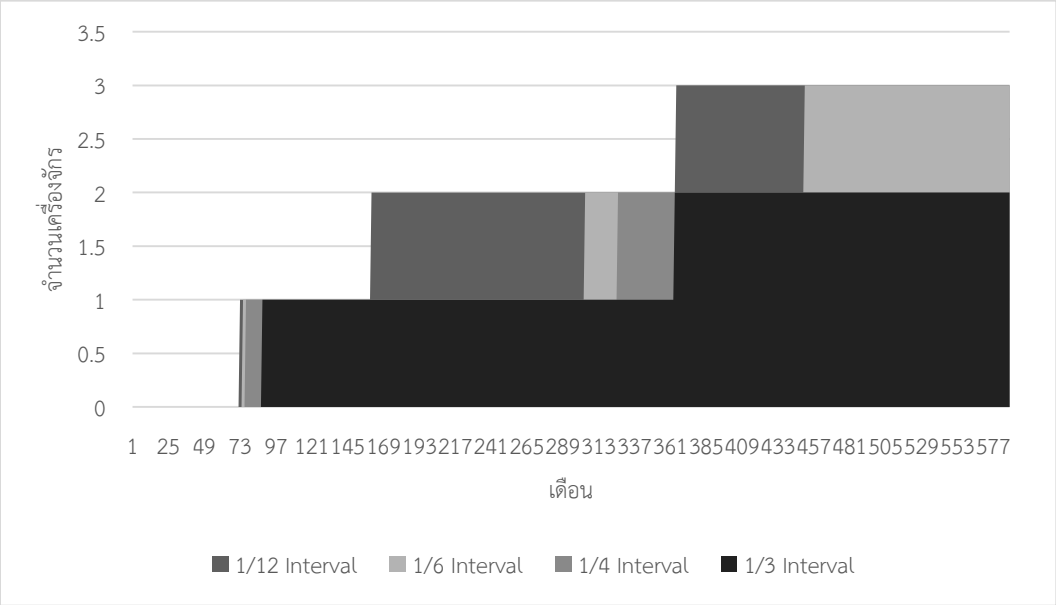


รูปที่ ก.3 จำนวนเครื่องจักร Bogie Preload Stand เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval

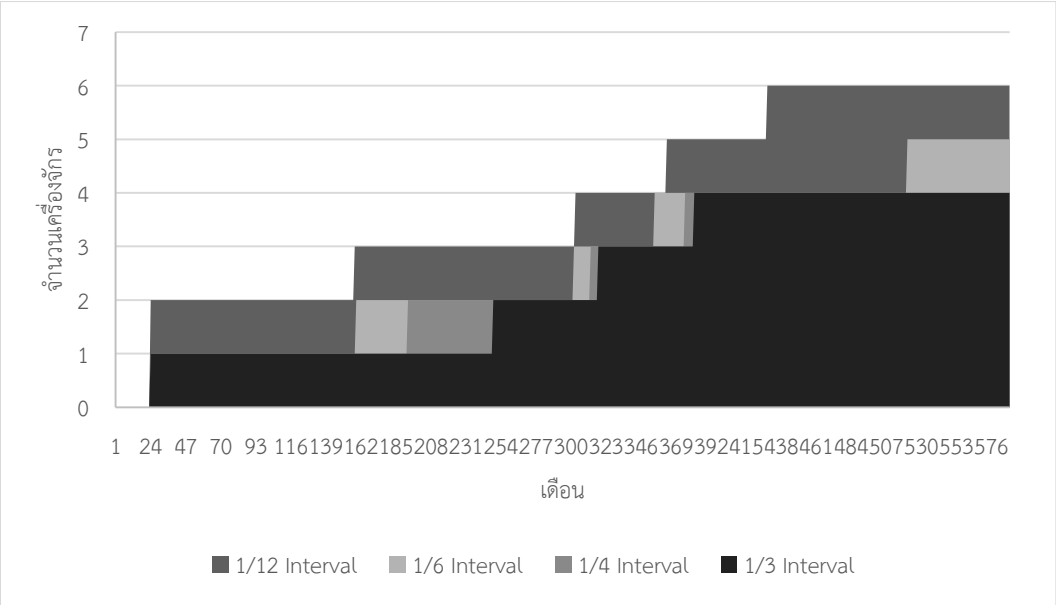


รูปที่ ก.4 จำนวนเครื่องจักร Bogie Turntables เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval

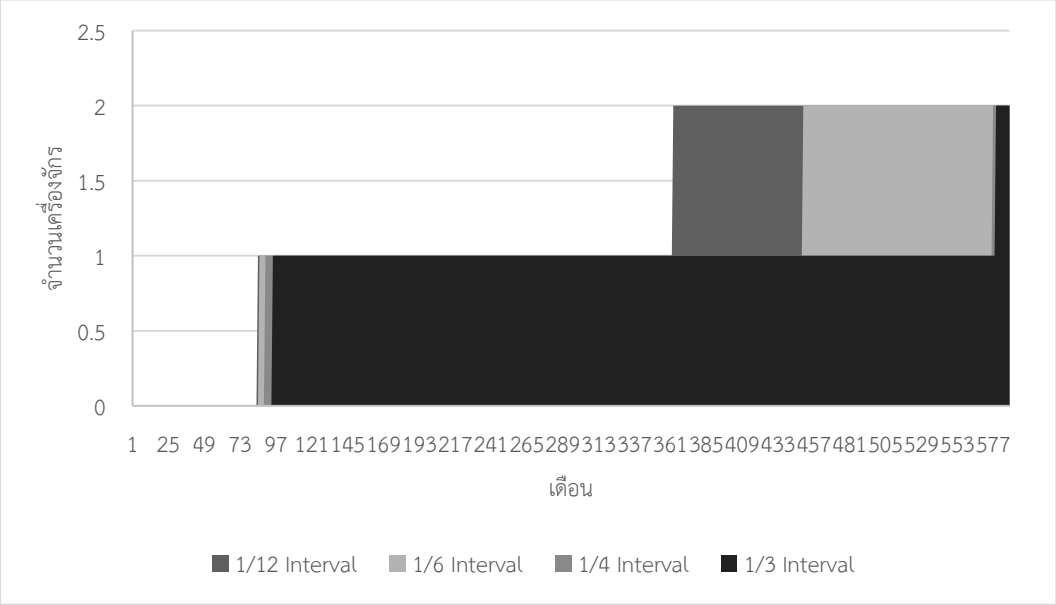
รูปที่ ก.5 จำนวนเครื่องจักร Brake and Compressor Test Equipment เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval



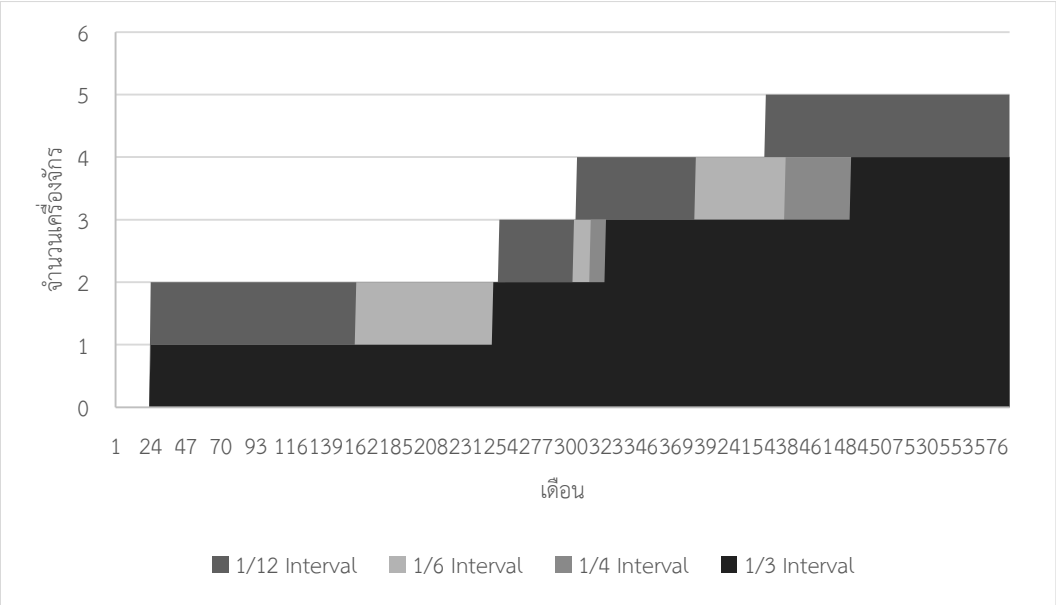
รูปที่ ก.6 จำนวนเครื่องจักร Hydraulic Wheel Press เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval



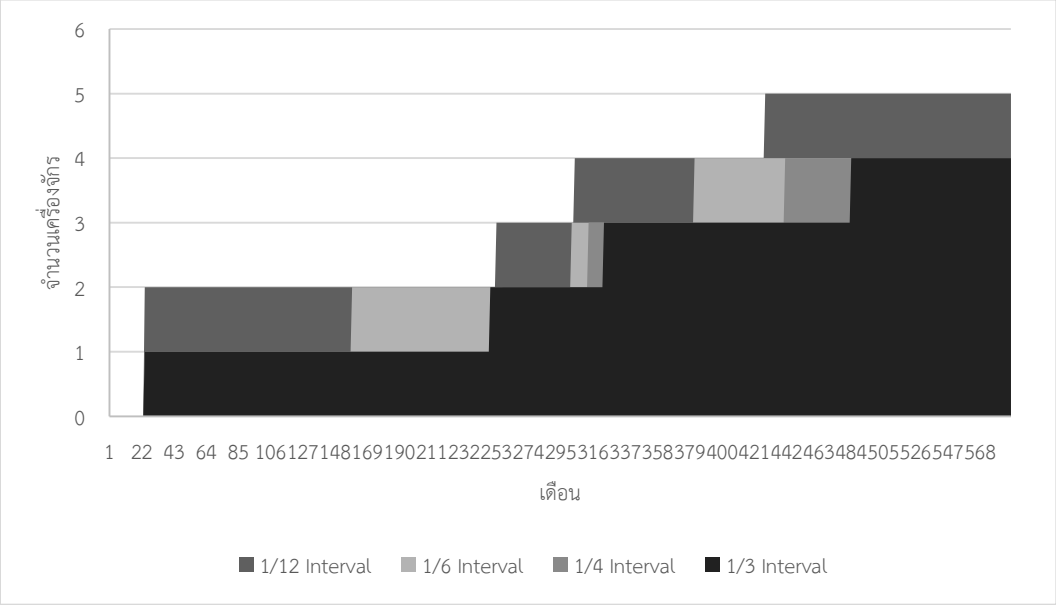
รูปที่ ก.7 จำนวนเครื่องจักร Movable Jacking System 10 ton เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval



รูปที่ ก.8 จำนวนเครื่องจักร Movable Jacking System 15 ton เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval

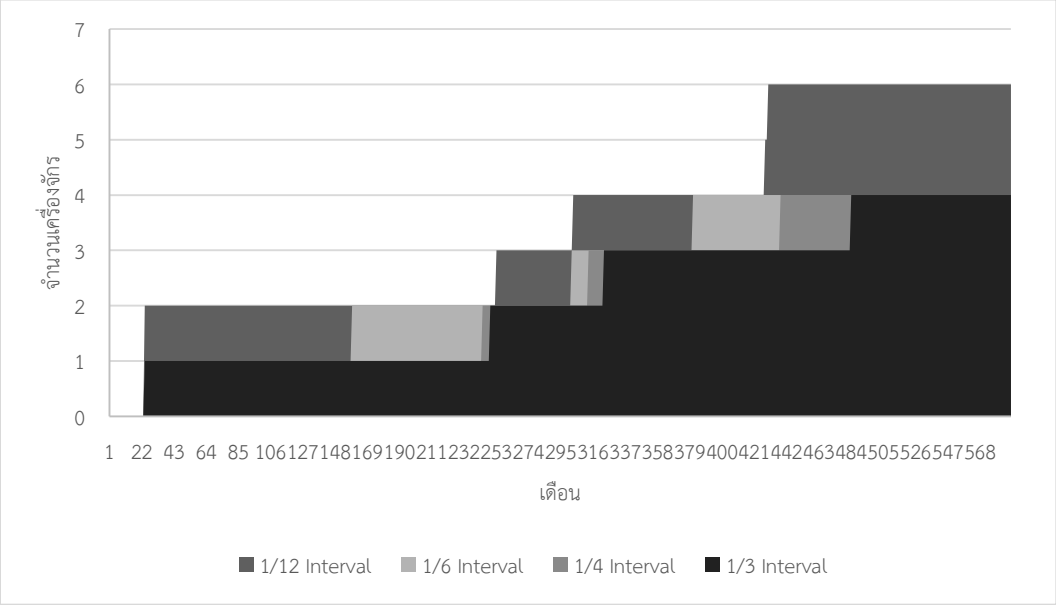


รูปที่ ก.9 จำนวนเครื่องจักร Overhead Bridge Crane 100kN เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval

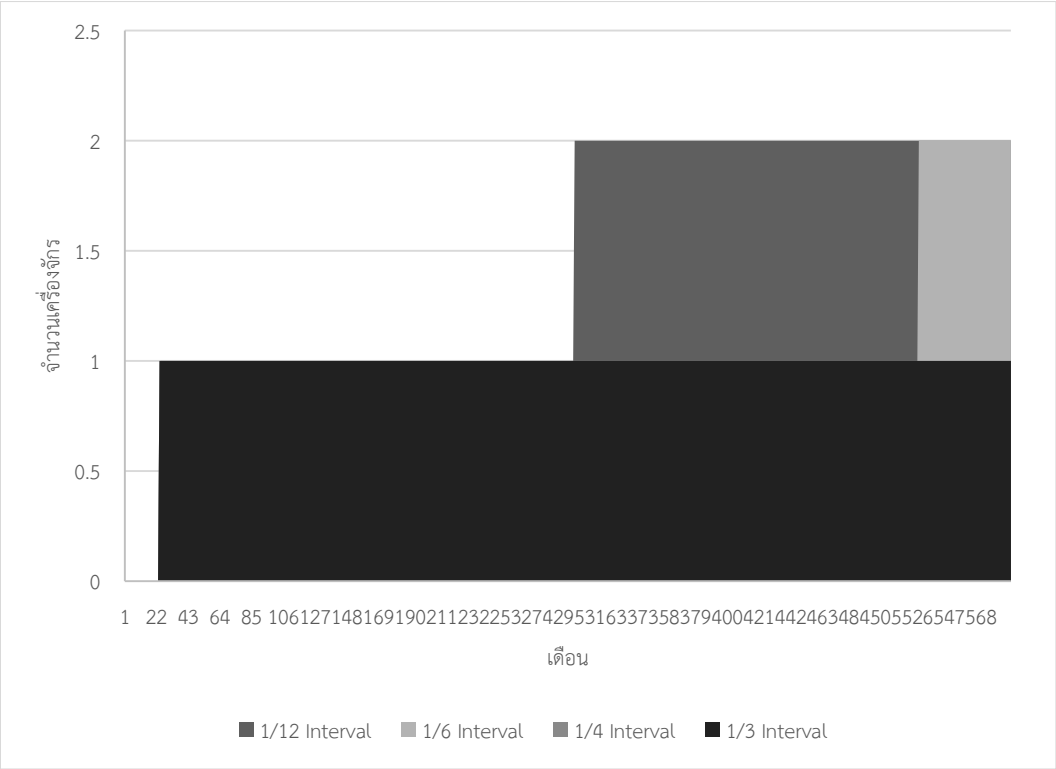


รูปที่ ก.10 จำนวนเครื่องจักร Overhead Bridge Crane 20kN เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval

รูปที่ ก.11 จำนวนเครื่องจักร Train Air Conditioning Module Repair เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval



รูปที่ ก.12 จำนวนเครื่องจักร Underfloor Trainset Lifting System เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval



รูปที่ ก. 13 จำนวนเครื่องจักร Vehicle Door Test Stand เมื่อมีระยะเผื่อเท่ากับ 1/12 1/6 1/4 และ 1/3 ของ Interval

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวรินรดา จิราวรรณสถิตย์ เกิดเมื่อวันที่ 15 กรกฎาคม พ.ศ. 2535 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนเซนต์โยเซฟคอนเวนต์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา พ.ศ. 2556 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอตุสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอตุสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคการศึกษาต้น ปีการศึกษา 2557

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University