



การปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้าด้วยการบำรุงรักษา

นายประดิษฐ์ แก้วสาร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสยาม

พุทธศักราช 2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสยาม



Improvement of Dependability of Metro System by Maintenance Activity

Mr. Pradit Kaewsarn

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering

Graduate School

Siam University

2017



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสยาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
ปริญญา

การจัดการงานวิศวกรรม
(สาขาวิชา)

บัณฑิตวิทยาลัย
(คณะ)

เรื่อง การปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้ด้วยการบำรุงรักษา
Improvement of Dependability of Metro System by Maintenance Activity

ผู้แต่ง นายประดิษฐ์ แก้วสาร
Mr. Pradit Kaewsarn

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ.....วันที่ 24 เดือน ๕.๕ พ.ศ. 256๖

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ต่อศักดิ์ เลิศศรีสุกุลรัตน์)

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ ไสตรโยม)

อาจารย์ที่ปรึกษาที่ร่วม.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมเกียรติ วงศ์วนิชทวี)

กรรมการ.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธชัย บรรเทึงจิตร)

กรรมการ.....

(รองศาสตราจารย์ ศันสนีย์ สุภาภา)

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย วัชรนิช)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 24 เดือน ๕.๕ พ.ศ. 256๖

บทคัดย่อ

ชื่อเรื่อง : การปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้ด้วยการบำรุงรักษา

โดย : นายประดิษฐ์ แก้วสาร

ชื่อปริญญา : วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา : การจัดการงานวิศวกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา : อภิเดช ไสตรโยม อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม: ภาวิณี เกียรติไชยา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิเดช ไสตรโยม) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาวิณี เกียรติไชยา)

..... 24 / 12 / 60 23 / 12 / 60

ความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้ได้ถูกประเมินเพื่อการปรับปรุงให้สอดคล้องกับการออกแบบเพื่อให้บริการขนส่งมวลชน การศึกษานี้เป็นการนำเสนอการปรับปรุงความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้ด้วยการวางแผนงานบำรุงรักษาให้เหมาะสมกับสภาพการใช้งานจริงของอุปกรณ์

ความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้จะเพิ่มขึ้นเมื่อปรับปรุงแผนงานบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่มีความเสี่ยงต่อความน่าเชื่อถือ โดยใช้การเก็บรวบรวมข้อมูลงานบำรุงรักษาในช่วงทดลองให้บริการเปรียบเทียบกับข้อมูลงานบำรุงรักษาที่กำหนดโดยบริษัทผู้ผลิต รายการงานบำรุงรักษาได้ถูกปรับปรุงให้สอดคล้องกับความเสี่ยงของอุปกรณ์ที่เกิดความล้มเหลวขึ้นในช่วงทดลองให้บริการตามทฤษฎีการบำรุงรักษา โดยมีจัดอันดับความสำคัญของอุปกรณ์ที่ส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้ เพื่อให้สามารถวางแผนบำรุงรักษาก่อนที่จะเกิดความล้มเหลวและมีการประเมินความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้ทั้งก่อนและหลังการปรับปรุงงานบำรุงรักษาเพื่อยืนยันผลการศึกษา

จากการศึกษาพบว่า การปรับความถี่ของแผนงานบำรุงรักษาให้สอดคล้องกับสภาพการใช้งานทำให้ความพร้อมใช้ของระบบมากขึ้นจาก 99.75% เป็น 100% ปริมาณงานซ่อมบำรุงฉุกเฉินลดลงจาก 52 งานซึ่งสามารถซ่อมบำรุงได้เสร็จเพียง 96.23% เหลือเพียง 12 งานซึ่งสามารถซ่อมบำรุงได้สำเร็จทั้งหมด จากผลดังกล่าวทำให้ประเมินได้ว่าระบบรถไฟฟ้มีความเชื่อถือได้สูงขึ้นเพราะความไม่พร้อมใช้ของการให้บริการความล่าช้าของการให้บริการมีค่าลดลงอันเป็นผลโดยตรงจากความพร้อมใช้ของระบบไฟฟ้ที่มีค่ามากขึ้นนั่นเอง

ABSTRACT

Title : Improvement of Dependability of Metro System by Maintenance Activity
 By : Mr. Pradit Kaewsarn
 Degree : Master of Engineering
 Major Field : Engineering Management

Thesis Advisor: *Asst. Prof. Dr. Arthit Sode-Yome* Co-Advisor: *Asst. Prof. Dr. Chalermkiat Wongvanichtawee*
 (Asst. Prof. Dr. Arthit Sode-Yome) (Asst. Prof. Dr. Chalermkiat Wongvanichtawee)
 28 / 12 / 17 28 / 12 / 17

Reliability was evaluated for improvement to conform with the design for mass transportation service. This study aims to present the Metro System Reliability Improvement by maintenance planning which is appropriated with real equipment usage.

The Metro System reliability will increase when the maintenance planning for equipment under reliability risk is improved by comparing the maintenance data during the service-testing period with the producer's maintenance data. The maintenance report will be adjusted theoretically according to the risk of the equipment failure during the testing period. By ranking the important equipment that may affect the Metro System reliability so that the maintenance plan can be set before failure. Meanwhile, the Metro System reliability can be evaluated before and after the maintenance improvement to assure the result of the study.

The study found that the frequency of planned maintenance task in accordance with the conditions of use. Availability of the system increased from 99.75 % to 100 %, the emergency workload is reduced from 52 works which can be completed just 96.23 % to only 12 works which can be completed, all from such results can make an estimation that the system had a higher reliability mean while unavailability of the service is reduced as a directly resulted in the electric system has more dependability.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยการให้คำปรึกษา แนะนำ ช่วยเหลือที่ดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อาทิตย์ โสทรโยม และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เฉลิมเกียรติ วงศ์นิชทวี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย ธิจิรวิช คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ตรวจทานการแก้ไขจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จได้และผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ต่อศักดิ์ เลิศศรีสกุลรัตน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เฉลิมเกียรติ วงศ์นิชทวี รองศาสตราจารย์ ดร. ยุทธชัย บรรเทงจิตร และรองศาสตราจารย์ ศันสนีย์ สุภาภา ที่กรุณาให้แนวคิดและคำแนะนำอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการวิจัยในครั้งนี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัทตัวอย่าง และขอบคุณเพื่อนพนักงานทุกท่านที่กรุณาให้คำแนะนำการทำวิจัยและการเก็บข้อมูลอันเป็นประโยชน์จนทำให้การศึกษานี้สำเร็จลุล่วงไปได้ และที่สำคัญที่สุดผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา รวมทั้งครอบครัวของผู้วิจัยที่คอยให้กำลังใจและกำลังสติปัญญาต่อผู้วิจัยตลอดมา รวมไปถึงครูอาจารย์ทุกท่านที่เคยให้การอบรมสั่งสอนจนสามารถนำความรู้มาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์

ประดิษฐ์ แก้วสาร

24 กันยายน 2560

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ช
สารบัญตาราง	ซ
 บทที่ 1 บทนำ.....	 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	2
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	3
1.3 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 นิยามศัพท์ทั่วไป	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1.1 ทฤษฎีการบริหารโครงการรถไฟฟ้า.....	7
2.1.2 ทฤษฎีความน่าเชื่อถือ.....	8
2.1.3 การประเมินความพร้อมใช้.....	14
2.1.4 รูปแบบความล้มเหลวของอุปกรณ์หรือระบบที่ซับซ้อน	14
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับระบบรถไฟฟ้า	17
2.2.1 ความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้า.....	17
2.2.2 ความน่าเชื่อถือและคุณภาพของการให้บริการระบบรถไฟฟ้า	17
2.2.3 การประเมินคุณภาพการให้บริการระบบรถไฟฟ้า	18
2.2.4 การประเมินความพร้อมใช้ของระบบรถไฟฟ้า	21
2.2.5 การประเมินงานบำรุงรักษาบริภัณฑ์ไฟฟ้าสำหรับระบบรถไฟฟ้า	21

2.2.6 การประเมินความเสี่ยงของอุปกรณ์ในระบบรถไฟฟ้า	23
2.2.7 กิจกรรมงานบำรุงรักษาบริภัณฑ์ไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้า	25
2.3 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
2.3.1 การศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบการล้มเหลวของอุปกรณ์	28
2.3.2 การศึกษาประเภทของงานบำรุงรักษา	30
2.3.3 การศึกษาการบำรุงรักษาเพื่อความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์	31
บทที่ 3 ดำเนินการวิจัย	33
3.1 ภาพรวมวิธีการทำการวิจัย	33
3.2 คุณภาพการให้บริการระบบรถไฟฟ้าจากการออกแบบระบบไฟฟ้า	34
3.3 ความพร้อมใช้ของบริภัณฑ์ไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้า	35
3.4 ประเมินความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้าช่วงทดลองให้บริการ	48
3.4.1 ประเมินคุณภาพการให้บริการในช่วงทดลองให้บริการรถไฟฟ้า	53
3.4.2 ประเมินความพร้อมใช้ของระบบรถไฟฟ้าในช่วงทดลองให้บริการ	53
3.4.3 ประเมินความสามารถในการบำรุงรักษาในช่วงทดลองการให้บริการ	54
3.4.4 ความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้าจากการออกแบบกับช่วงทดลองให้บริการ	55
3.5 ประเมินระดับความเสี่ยงจากการล้มเหลวของอุปกรณ์ไฟฟ้า	56
3.6 ปรับปรุงรายการงานบำรุงรักษาระบบไฟฟ้าตามความเสี่ยง	59
3.7 ประเมินความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้าช่วงให้บริการ	61
3.7.1 ประเมินคุณภาพการให้บริการในช่วงให้บริการรถไฟฟ้า	61
3.7.2 ประเมินความพร้อมใช้ของระบบรถไฟฟ้าในช่วงให้บริการ	62
3.7.3 ประเมินความสามารถในการบำรุงรักษาในช่วงการให้บริการ	62
3.7.4 ความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้าจากการออกแบบกับช่วงให้บริการ	63
บทที่ 4 ผลการศึกษาวิจัย	64
4.1 ผลการประเมินความเชื่อถือได้ของการออกแบบระบบไฟฟ้า	64
4.2 ผลการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้าช่วงทดสอบ	66
4.3 ผลการประเมินระดับความเสี่ยงจากการล้มเหลวของอุปกรณ์ไฟฟ้า	67
4.4 ผลการปรับปรุงงานบำรุงรักษาระบบไฟฟ้าตามความเสี่ยง	68
4.5 ผลการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้าช่วงให้บริการ	69
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	71
5.1 บทสรุปผลการศึกษา	71
5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนา	72

บรรณานุกรม.....	73
ภาคผนวก ก ระบบไฟฟ้าสำหรับระบบรถไฟฟ้า.....	75
ภาคผนวก ข Reliability Block Diagram	83
ภาคผนวก ค ปัจจัยที่ส่งกระทบต่อความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้า.....	85



สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 วัฏจักรของระบบ (System Lifecycle)	8
รูปที่ 2.2 รูปแบบการล้มเหลวของอุปกรณ์	16
รูปที่ 2.3 องค์ประกอบที่ส่งผลต่อคุณภาพการให้บริการระบบรถไฟฟ้า	18
รูปที่ 3.1 แผนภาพวิธีการดำเนินการวิจัย	33
รูปที่ 3.2 การประเมิน λ ของระบบ	46
รูปที่ 3.3 ตัวอย่างแนวเส้นทางให้บริการระบบรถไฟฟ้า	49
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างประกาศการทดลองให้บริการระบบรถไฟฟ้า	50
รูปที่ 3.5 ตัวอย่างประกาศการทดลองให้บริการระบบรถไฟฟ้า (เพิ่มเติม)	51
รูปที่ 3.6 ตัวอย่างโครงสร้างราคาค่าโดยสารระบบรถไฟฟ้า	52
รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบความเชื่อถือได้เป้าหมายกับการออกแบบระบบ	65
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบความเชื่อถือได้เป้าหมายกับการทดลองให้บริการ	66
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบความเชื่อถือได้เป้าหมายกับการให้บริการ	70
รูปที่ 4.4 สรุปผลการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าสำหรับระบบรถไฟฟ้า	70

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 สมการพื้นฐานสำหรับประเมินความน่าเชื่อถือ	13
ตารางที่ 2.2 ระดับความถี่ในการเกิดความล้มเหลว	23
ตารางที่ 2.3 ระดับความรุนแรงจากการล้มเหลวของอุปกรณ์ต่อการให้บริการระบบรถไฟฟ้า.....	24
ตารางที่ 2.4 ตารางไขว้การประเมินระดับความเสี่ยง.....	25
ตารางที่ 2.5 เกณฑ์การประเมินระดับความเสี่ยง	25
ตารางที่ 2.6 ความถี่การบำรุงรักษาอุปกรณ์ไฟฟ้าสำหรับระบบรถไฟฟ้า	26
ตารางที่ 2.7 ตารางไขว้ตัวคุณความถี่งานบำรุงรักษาบริภัณฑ์ระบบไฟฟ้า	27
ตารางที่ 2.8 รูปแบบการล้มเหลวของอุปกรณ์และความถี่ที่เกิดขึ้น	28
ตารางที่ 2.9 ลำดับการบำรุงรักษาเพื่อความน่าเชื่อถือ.....	32
ตารางที่ 2.10 ลำดับการบำรุงรักษาเพื่อความน่าเชื่อถือ.....	33
ตารางที่ 3.1 ตัวชี้วัดความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้า.....	34
ตารางที่ 3.2 คุณภาพการให้บริการระบบรถไฟฟ้าและการออกแบบระบบไฟฟ้า	35
ตารางที่ 3.3 ความน่าเชื่อถือของบริภัณฑ์ระบบไฟฟ้า.....	35
ตารางที่ 3.4 โอกาสที่จะเกิดความล้มเหลว	46
ตารางที่ 3.5 การประเมินความน่าเชื่อถือได้ของระบบ	47
ตารางที่ 3.6 ค่าความพร้อมใช้ของระบบ	47
ตารางที่ 3.7 เหตุการณ์ความล้มเหลวของอุปกรณ์ในช่วงทดลองการให้บริการ	52
ตารางที่ 3.8 ประเมินคุณภาพการให้บริการระบบรถไฟฟ้าในช่วงทดลองให้บริการ	53
ตารางที่ 3.9 ประเมินความพร้อมใช้ของระบบรถไฟฟ้าในช่วงทดลองให้บริการ	54
ตารางที่ 3.10 ประเมินการบำรุงรักษาบริภัณฑ์ระบบไฟฟ้าในช่วงทดลองให้บริการ	54
ตารางที่ 3.11 เปรียบเทียบความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้าจากการออกแบบกับช่วงทดลองให้บริการ....	55
ตารางที่ 3.12 ความล้มเหลวของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นช่วงทดลองให้บริการ.....	56
ตารางที่ 3.13 บริภัณฑ์ไฟฟ้าที่มีความเสี่ยงต่อความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้าและการบำรุงรักษา	59
ตารางที่ 3.14 เปรียบเทียบงานบำรุงรักษาก่อนและหลังการปรับปรุง.....	60
ตารางที่ 3.15 ประเมินคุณภาพการให้บริการระบบรถไฟฟ้าในช่วงให้บริการ	61
ตารางที่ 3.16 ประเมินความพร้อมใช้ของระบบรถไฟฟ้าในช่วงให้บริการ	62

ตารางที่ 3.17 ประเมินการบำรุงรักษาระบบไฟฟ้าในช่วงให้บริการ	62
ตารางที่ 3.18 เปรียบเทียบความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าจากการออกแบบกับช่วงให้บริการ.....	63
ตารางที่ 4.1 ผลการประเมินความเชื่อถือได้ในช่วงออกแบบเทียบกับเป้าหมาย	65
ตารางที่ 4.2 ผลการประเมินความเชื่อถือได้ในช่วงทดลองให้บริการเทียบกับเป้าหมาย	66
ตารางที่ 4.3 ผลการประเมินความเสี่ยงของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่อการให้บริการรถไฟฟ้า	67
ตารางที่ 4.4 ผลการปรับปรุงแผนการบำรุงรักษา	68
ตารางที่ 4.5 ผลการประเมินความเชื่อถือได้ในช่วงให้บริการเทียบกับเป้าหมาย	69



บทที่ 1

บทนำ

ประเทศไทยเริ่มมีการพัฒนาการขนส่งระบบรางเป็นครั้งแรกในรัชสมัยของพระบาทสมเด็จพระจุลจอมเกล้า เจ้าอยู่หัวรัชกาลที่ ๕ เนื่องจากทรงเล็งเห็นความสำคัญของการคมนาคมซึ่งจะเป็นรากฐานของการพัฒนาประเทศทำให้สยามประเทศมีพัฒนาการในด้านการคมนาคมขนส่งอย่างไม่ย่อหน้าประเทศใดในภูมิภาคเอเชีย ปัจจุบันเวลาผ่านไปกว่าร้อยปีแต่การขนส่งระบบรางในประเทศไทยยังไม่สามารถแสดงบทบาทเพื่อผลักดันการพัฒนาประเทศอย่างเต็มที่เหมือนในหลายประเทศซึ่งพัฒนาระบบรางให้มีศักยภาพสูงทั้งในเชิงเทคโนโลยีและให้บริการซึ่งอาจเป็นเพราะประเทศเหล่านั้นเล็งเห็นถึงประสิทธิภาพของการคมนาคมขนส่งในฐานะที่เป็นพื้นฐานของการพัฒนาประเทศในด้านต่าง ๆ

การขนส่งระบบรางเป็นทางออกที่ดีที่สุดทางหนึ่งในการช่วยลดการสูญเสียเงินตราไปกับการนำเข้าพลังงาน ลดการสร้างมลภาวะที่เกิดจากการขนส่งทางรถยนต์และการใช้รถส่วนบุคคลเพราะระบบขนส่งทางรางสามารถใช้ทรัพยากรน้อยเพื่อขนส่งสินค้าหรือผู้โดยสารปริมาณมากในแต่ละครั้ง ทำให้เกิดการกระจายตัวของที่อยู่อาศัยจากศูนย์กลางเมืองออกไปยังนอกเมืองซึ่งมีส่วนช่วยลดปัญหาความแออัดของที่อยู่อาศัยในเขตเมือง ทั้งยังเป็นการให้ทางเลือกแก่ประชาชนในการเดินทางที่สะดวก รวดเร็ว และปลอดภัย

ปัจจุบันระบบรางในประเทศไทยมีสองรูปแบบหลัก คือ ระบบรางภายในเมืองและระบบรางระหว่างเมือง โดยมีหน่วยงานหลักที่รับผิดชอบสามหน่วยงาน คือ การรถไฟฟ้าแห่งประเทศไทย (รฟท.) เป็นหน่วยงานที่รับผิดชอบดำเนินการรถไฟฟ้าระหว่างเมืองทั่วประเทศรวมทั้งรถไฟฟ้าแอร์พอร์ตลิงก์ (Airport Rail Link, ARL) จากสถานีพญาไทถึงสถานีสุวรรณภูมิซึ่งอยู่ภายในสนามบินสุวรรณภูมิ การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย (รฟม.) เป็นหน่วยงานที่รับผิดชอบรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินหรือรถไฟฟ้ามหานครสายเฉลิมรัชมงคล (Mass Rapid Transit, MRT) ให้บริการระหว่างสถานีบางซื่อถึงสถานีหัวลำโพงและรถไฟฟ้าสายสีม่วงให้บริการระหว่างสถานีบางใหญ่ถึงสถานีเตาปูนซึ่งเป็นสถานีเชื่อมต่อกับระบบรถไฟฟ้าสายสีน้ำเงินและจะมีส่วนต่อขยายเพิ่มเติมในอนาคต ทั้ง รฟม. และ รฟท. มีฐานะเป็นรัฐวิสาหกิจภายใต้การกำกับดูแลของกระทรวงคมนาคม ส่วนการปกครองส่วนท้องถิ่นกรุงเทพมหานครรับผิดชอบรถไฟฟ้าสายสีเขียว (Bangkok Mass Transit System, BTS) ให้บริการในแนวเส้นทางถนนสุขุมวิทจากสถานีอ่อนนุชไปยังสถานีแบริ่งและตามแนวถนนพหลโยธินซึ่งจะต่อขยายไปถึงอำเภอลำลูกกา

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ระบบรถไฟฟ้าเป็นระบบขนส่งมวลชนขนาดใหญ่ที่มีผู้ใช้บริการจำนวนมากในแต่ละวัน ความชำรุดบกพร่องของอุปกรณ์ในระบบที่ส่งผลกระทบต่อการใช้งานบริการอย่างที่เคยปรากฏในช่วง เช่น ความล้มเหลวของระบบไฟฟ้าสำรองในระบบรถไฟฟ้าสายหนึ่งทำให้ผู้โดยสารต้องตกค้างอยู่ในขบวนรถเนื่องจากไม่สามารถเคลื่อนตัวรถไปยังสถานีได้ ทำให้ผู้โดยสารต้องอพยพ เป็นต้น และนั่นคือความเสี่ยงที่ไม่ควรเกิดขึ้นในระบบรถไฟฟ้า ดังนั้นการเกิดความเสี่ยงควรได้รับการประเมินล่วงหน้าเพื่อจำกัดโอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์เช่นนั้นขึ้นในระบบ งานวิจัยนี้ได้รวบรวมวิธีการที่จำเป็นที่ต้องดำเนินการเพื่อแก้ไขปัญหาคือความเสี่ยงที่ไม่เป็นที่น่าเชื่อถือดังกล่าวอย่างเป็นระบบ ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในภารกิจที่ต้องดูแลรักษาระบบรถไฟฟ้าควรนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างสูงที่สุด

รูปแบบการล้มเหลวของอุปกรณ์มีลักษณะเฉพาะตัวที่แตกต่างกัน[3] ดังนั้นความเสี่ยงของระบบรถไฟฟ้าที่เกิดจากความล้มเหลวของแต่ละอุปกรณ์จึงไม่เหมือนกัน ผลกระทบจากความล้มเหลวที่เกิดจากอุปกรณ์ที่มีความเสี่ยงสูงอาจส่งผลกระทบทำให้ความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้าลดลง การบำรุงรักษาอุปกรณ์ในระบบรถไฟฟ้าในช่วงเริ่มต้นเปิดให้บริการเดินรถจะถูกดำเนินการตามตารางกิจกรรมการบำรุงรักษาที่กำหนดไว้ตามแผนงานการบำรุงรักษาที่ได้รับมาจากบริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์ (Original Equipment Manufacturer, OEM) เมื่อนำอุปกรณ์แต่ละตัวมาติดตั้งใช้งานร่วมกันหลายประเภททำให้ระบบมีความซับซ้อนมากขึ้น ตลอดจนอายุการใช้งานของอุปกรณ์ (Aging of Equipment) เพิ่มขึ้นทำให้สภาพของอุปกรณ์เปลี่ยนไปตามลักษณะการใช้งาน ความเสี่ยงที่อุปกรณ์จะเกิดความล้มเหลวจากการใช้งานย่อมมีมากขึ้น รูปแบบการล้มเหลวของอุปกรณ์มีทั้งแบบสอดคล้องกับอายุการใช้งาน (Age Related Failure) และความล้มเหลวของอุปกรณ์ที่เกิดขึ้นแบบสุ่ม (Random Failure)[3] ดังนั้นเพื่อยืดอายุการใช้งานอุปกรณ์งานระบบให้ยาวนาน การปรับปรุงกิจกรรมการบำรุงรักษาให้สอดคล้องกับสภาพปัจจุบันของอุปกรณ์จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องดำเนินการไปพร้อมกับการใช้งานไปตลอดช่วงชีวิตของอุปกรณ์ที่ได้ถูกออกแบบไว้ (Designed Life of Equipment)

ความพร้อมใช้ของอุปกรณ์ในระบบรถไฟฟ้าส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือโดยรวมของระบบรถไฟฟ้า นอกเหนือจากความผิดพลาดที่มีผลมาจากผู้ปฏิบัติงานและผู้โดยสาร

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

วัตถุประสงค์ของการศึกษามีดังนี้

1. ศึกษาความล้มเหลวของอุปกรณ์ที่ส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่วงทดลองให้บริการ
2. ประเมินระดับความเสี่ยงของอุปกรณ์ที่เกิดความล้มเหลวขึ้นและส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้า
3. ปรับปรุงกิจกรรมการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าให้สอดคล้องกับความเสี่ยงจากการใช้งานในระบบรถไฟฟ้า
4. ประเมินความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้าด้วยโดยค่าความน่าเชื่อถือ ความพร้อมใช้ของอุปกรณ์ และความสามารถในการบำรุงรักษา ต้องมีสมรรถนะใกล้เคียงการออกแบบหรือต้องไม่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.035% 0.025% และ 95% ตามลำดับ

1.3 ขั้นตอนการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษามีดังนี้

- 1 รวบรวมข้อมูลอุปกรณ์ระบบไฟฟ้าที่อาจส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้าในช่วงออกแบบ จัดหาดัดตั้ง และช่วงทดสอบระบบ
- 2 รวบรวมข้อมูลความล้มเหลวของอุปกรณ์ไฟฟ้าจากข้อมูลการทดลองให้บริการระบบรถไฟฟ้า
- 3 ประเมินระดับความเสี่ยงจากการล้มเหลวของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้า
- 4 ปรับปรุงกิจกรรมงานบำรุงรักษาให้สอดคล้องกับความเสี่ยงในระบบรถไฟฟ้า
- 5 ประเมินความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้าจากข้อมูลการให้บริการหลังในช่วงเปิดให้บริการแก่สาธารณะ

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

ระบบรถไฟฟ้าเป็นระบบที่ประกอบด้วยระบบย่อยหลายระบบ งานวิจัยนี้ศึกษาผลกระทบของอุปกรณ์ไฟฟ้าซึ่งเมื่อเกิดความล้มเหลวจะส่งผลกระทบขยายวงกว้างไปยังระบบย่อยอื่น ๆ ด้วย งานวิจัยนี้จึงศึกษาบนแนวคิดที่ระบบย่อยอื่นในระบบรถไฟฟ้า เช่น ระบบโครงสร้างทางโยธา ระบบตัวรถโดยสาร

ระบบอาณัติสัญญาณ ระบบสื่อสาร ระบบรางวิ่งและรางตัวนำ ระบบประตูกั้นขบวนขบวน ระบบประตูเก็บค่าโดยสารอัตโนมัติ ระบบออกบัตรโดยสารหรือเหรียญโดยสาร และ โครงสร้างราคาค่าโดยสาร มีความพร้อมใช้สมบูรณ์ และไม่เกิดความชำรุดบกพร่องใด ๆ ในระบบดังกล่าว

การศึกษานี้จะไม่รวมปัจจัยที่เกิดจากเจ้าหน้าที่ผู้ให้บริการและผู้โดยสารเช่น ขาดความรู้ความเข้าใจ วิธีการใช้งานระบบรถไฟฟ้าที่ถูกต้อง ความผิดปกติของสภาพร่างกาย อวัยวะส่วนหนึ่งส่วนใด เครื่องแต่งกายและสัมภาระของผู้โดยสารที่ทำให้ระบบรถไฟฟ้าขัดข้องจนไม่สามารถให้บริการได้

การศึกษานี้เป็นการใช้การคำนวณความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้าโดยพิจารณาจากความไม่พร้อมบริการของระบบรถไฟฟ้า (Train Service Unavailability, TSU) และความล่าช้าเกินสองนาที่จากตารางเวลาการให้บริการ (Train Service Delay, TSD) ของการให้บริการซึ่งได้รับผลกระทบจากการล้มเหลวของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของการให้บริการระบบรถไฟฟ้า

การนำข้อมูลกิจกรรมการบำรุงรักษาที่ผู้ผลิตให้มาพร้อมกับการติดตั้งอุปกรณ์มาประเมินความน่าเชื่อถือของระบบในช่วงทดลองเปิดให้บริการรถไฟฟ้า จากนั้นประเมินระดับความเสี่ยงของอุปกรณ์แต่ละตัวในระบบไฟฟ้าที่มีผลกระทบต่างกันเพื่อจัดอันดับความเสี่ยงของอุปกรณ์ จากนั้นทำการปรับปรุงกิจกรรมการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่มีความเสี่ยงในระดับสูงให้สอดคล้องกับสภาพที่แท้จริงของอุปกรณ์เพื่อป้องกันไม่ให้อุปกรณ์ที่มีความเสี่ยงสูงเกิดความล้มเหลวขึ้น แล้วประเมินความน่าเชื่อถือของการให้บริการระบบรถไฟฟ้าอีกครั้งเพื่อประเมินผลลัพธ์จากการปรับปรุงกิจกรรมการบำรุงรักษาในช่วงเปิดให้บริการแก่สาธารณะ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับมีดังนี้

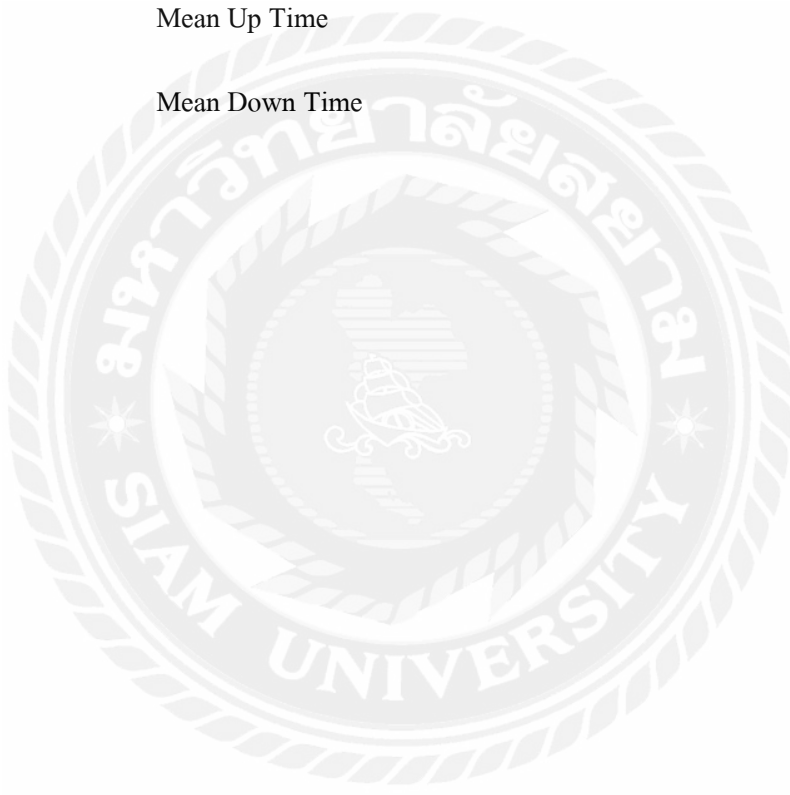
1. ทำให้เกิดมีการประเมินการให้บริการระบบรถไฟฟ้าในช่วงก่อนเปิดให้บริการแก่ประชาชน
2. สามารถสืบทราบที่มาของความเสี่ยงที่เกิดจากอุปกรณ์ไฟฟ้าซึ่งอาจจะส่งผลกระทบทำให้เกิดความไม่น่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้า
3. เป็นการปรับปรุงกิจกรรมการบำรุงรักษาของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าให้มีความพร้อมใช้งานอยู่เสมอ
4. ป้องกันไม่ให้ความบกพร่องของอุปกรณ์งานระบบรถไฟฟ้าที่มีความซับซ้อนส่งผลกระทบต่อสวัสดิภาพและความปลอดภัยของผู้โดยสาร

1.6 นิยามศัพท์ทั่วไป

นิยามศัพท์ทั่วไปมีดังนี้

สนข.	สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร
รฟท.	การรถไฟแห่งประเทศไทย
รฟม.	การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย
OEM	Original Equipment Manufacturer
Dependability	ความเชื่อถือได้
Reliability	ความน่าเชื่อถือ
Availability	ความพร้อมใช้ของระบบใด ๆ
Maintainability	ความสามารถทำการบำรุงรักษาตามแผนและบำรุงรักษาฉุกเฉิน
RBM	Risk Based Maintenance
RAMS	Reliability, Availability, Maintainability and Safety
O&M	Operation and Maintenance
TSU	Train Service Unavailability
TSD	Train Service Delay
RBD	Reliability Block Diagram
MTTF	Mean Time To Failure
MTBF	Mean Time Between Failures
MDT	Mean Down Time
MTTR	Mean Time To Repair
CME	Corrective Maintenance Efficiency
PME	Preventive Maintenance Efficiency

CM	Corrective Maintenance
CMA	Corrective Maintenance Analysis
PM	Preventive Maintenance
PMA	Preventive Maintenance Analysis
O&M	Operation and Maintenance
ALARP	As Low As Reasonably Practicable
MUT	Mean Up Time
MDT	Mean Down Time



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาเรื่องการปรับปรุงความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้าด้วยการบำรุงรักษาคลอบคลุมถึง

1. ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวกับระบบรถไฟฟ้า
3. การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาเรื่องการปรับปรุงความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้าด้วยการบำรุงรักษาประกอบด้วย

1. ทฤษฎีการบริหารโครงการรถไฟฟ้า
2. ทฤษฎีความน่าเชื่อถือ
3. การประเมินความพร้อมใช้ของอุปกรณ์ และ
4. รูปแบบความล้มเหลวของอุปกรณ์หรือระบบที่ซับซ้อน

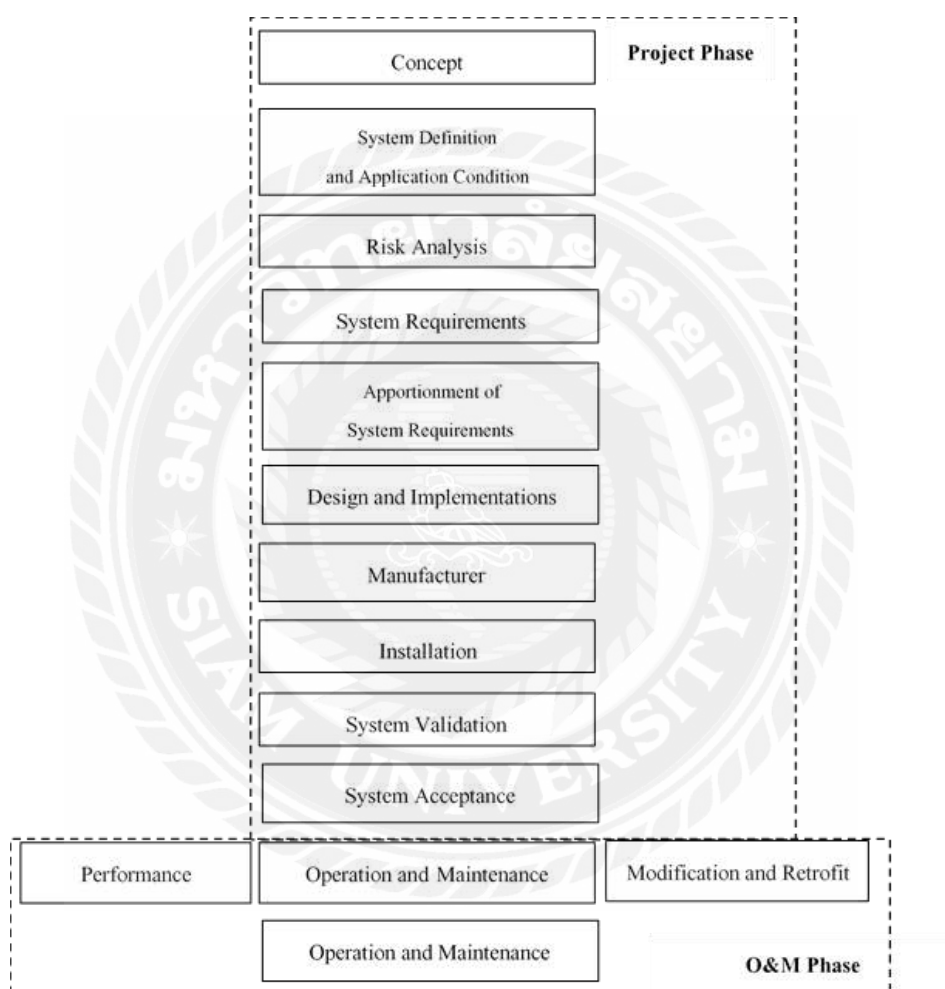
2.1.1 ทฤษฎีการบริหารโครงการรถไฟฟ้า

โครงการก่อสร้างรถไฟฟ้ามีกระบวนการดังนี้

1. เริ่มต้นจากผลการศึกษาความเหมาะสมสำหรับก่อสร้างเส้นทางรถไฟฟ้าจากสำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (สนข.)
2. ออกแบบระบบรถไฟฟ้า การออกแบบจะต้องครอบคลุมทุกขั้นตอนตลอดอายุการใช้งานระบบ (System Lifecycle) และสอดคล้องกับนโยบายของ สนข.
3. ก่อสร้างงานโครงสร้างทางโยธารวมทั้งงานระบบประกอบอาคาร เช่น ระบบรางวิ่ง ระบบไฟฟ้า อาคาร ระบบแจ้งเหตุเพลิงไหม้ ระบบน้ำดับเพลิง ระบบปรับอากาศ และสิ่งอำนวยความสะดวกอื่น ๆ
4. จัดหา ผลิต รวมทั้งการติดตั้ง ระบบรถไฟฟ้า และอุปกรณ์ประกอบของระบบรถไฟฟ้า เช่น ระบบไฟฟ้า ระบบอาณัติสัญญาณ ระบบตัวถังรถไฟฟ้า ระบบควบคุมและสั่งการจากระยะไกล ระบบจัดเก็บค่าโดยสาร เป็นต้น

5. ช่วงการทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐาน

โครงการก่อสร้างรถไฟฟ้าเริ่มต้นจากการนำผลการศึกษาความเหมาะสมสำหรับก่อสร้างเส้นทางรถไฟฟ้าจากสำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (สนข.) มาออกแบบในรูปแบบของระบบรถไฟฟ้า การออกแบบจะต้องครอบคลุมทุกขั้นตอนตลอดอายุการใช้งานระบบ (System Lifecycle) ทั้งช่วงก่อสร้าง ช่วงติดตั้งและทดสอบให้เป็นไปตามมาตรฐานการจัดการโครงการตามรูปที่ 2.1 วัฏจักรของระบบ (System Lifecycle)



รูปที่ 2.1 วัฏจักรของระบบ (System Lifecycle)

2.1.2 ทฤษฎีความน่าเชื่อถือ

ทฤษฎีความน่าเชื่อถือ (Dependability) ในทางวิศวกรรมจะอยู่ในรูปแบบชุดระเบียบปฏิบัติเชิงคณิตศาสตร์ โดยเฉพาะในทางวิศวกรรมความน่าเชื่อถือได้ ความพร้อมใช้งาน และความสามารถในการบำรุงรักษา (Reliability, Availability and Maintainability, RAM) ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องจะอยู่ในรูปของสมการ

ทางสถิติและความน่าจะเป็นทางคณิตศาสตร์ ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณจะอยู่ในโดเมนเวลาที่อุปกรณ์อาจจะเกิดความล้มเหลวหรือมีความเป็นไปได้ที่อุปกรณ์จะเกิดความล้มเหลว เวลาของอุปกรณ์แต่ละประเภทจะเกิดความล้มเหลวแตกต่างกันซึ่งไม่สามารถพิสูจน์ทราบได้อย่างแน่ชัดในทางปฏิบัติ ดังนั้นเวลาที่อุปกรณ์ต้องการการบำรุงรักษาจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยที่อุปกรณ์นั้นถูกติดตั้งและใช้งานเป็นสำคัญ

เนื่องจากพารามิเตอร์ของ RAM ถูกกำหนดในรูปสมการความน่าจะเป็น ดังนั้นพารามิเตอร์ความน่าจะเป็น เช่น ตัวแปรตามแบบสุ่ม ฟังก์ชันความหนาแน่นการกระจายตัว และฟังก์ชันการแจกแจงความถี่ จึงถูกใช้สำหรับสร้างทฤษฎีความน่าเชื่อถือ

การศึกษาความน่าเชื่อถือจะเกี่ยวกับตัวแปรทั้งแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ตัวอย่างตัวแปรสุ่มแบบไม่ต่อเนื่องคือจำนวนครั้งการเกิดความล้มเหลวของอุปกรณ์ในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง ตัวอย่างตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่องคือระยะเวลาตั้งแต่อุปกรณ์ถูกติดตั้งจนกระทั่งอุปกรณ์นั้นเกิดความล้มเหลวหรือระยะเวลาระหว่างความล้มเหลวของอุปกรณ์

ฟังก์ชันการแจกแจงความถี่สะสม $F(t)$ ถูกใช้เป็นสมการความน่าจะเป็นในการทดสอบหาตัวแปรตามซึ่งมีค่าไม่เกินเวลา t หรือ

$$F(t) = \int_{-\infty}^t f(t)dt \quad (2.1)$$

เมื่อ $f(t)$ คือ ฟังก์ชันความน่าจะเป็นของตัวแปรตามที่เวลา t ใด ๆ ที่อุปกรณ์เกิดความล้มเหลว

$F(t)$ คือ สมการแสดงความไม่น่าเชื่อถือของระบบขณะเกิดความล้มเหลวของอุปกรณ์

เมื่อแทนค่าเวลา $t = 0$ จะได้ $F(t) = 0$ ดังนั้นหากสมการเปลี่ยนเป็น $t = 0$ ถึง t และตัวแปรสุ่ม t เป็นแบบไม่ต่อเนื่อง สมการอนุพันธ์จะเปลี่ยนเป็นผลรวมของเหตุการณ์ที่เวลา $t = 0$ ถึง t ดังนั้นสมการความน่าเชื่อถือได้ $R(t)$ จะอยู่ในรูป

$$R(t) = 1 - F(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt \quad (2.2)$$

จากสมการเชิงอนุพันธ์ (2.2) แสดงว่า

$$\frac{-dR(t)}{dt} = f(t) \quad (2.3)$$

ความน่าจะเป็นที่จะเกิดความล้มเหลวขึ้นในช่วงเวลา t_1 ถึง t_2 จึงสามารถอธิบายได้ด้วยสมการความน่าเชื่อถือได้

$$\int_{t_1}^{\infty} f(t)dt - \int_{t_2}^{\infty} f(t)dt = R(t_1) - R(t_2) \quad (2.4)$$

อัตราการเกิดความล้มเหลว $\lambda(t)$ ของอุปกรณ์ในช่วงเวลา t_1 ถึง t_2 จึงเป็นสัดส่วนของความน่าจะเป็นที่จะเกิดความล้มเหลวขึ้นเทียบกับระยะเวลา สามารถเขียนได้เป็น

$$\lambda(t) = \frac{R(t_1) - R(t_2)}{(t_2 - t_1)R(t_1)} \quad (2.5)$$

เมื่อ $t = t_1$ ถึง $t_2 = t + \Delta t$

$$\lambda(t) = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t R(t)} \quad (2.6)$$

อัตราการเกิดอันตราย (Hazard rate, $h(t)$) หรือความล้มเหลวขึ้นอย่างฉับพลัน สามารถประเมินได้จากการกำหนด $\Delta t \rightarrow 0$ ในสมการอัตราการความล้มเหลว $\lambda(t)$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} h(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t R(t)} \\ h(t) &= \frac{-1}{R(t)} \left[\frac{dR(t)}{dt} \right] = \frac{1}{R(t)} \left[\frac{-dR(t)}{dt} \right] \end{aligned} \quad (2.7)$$

จากสมการ (2.3)

$$\frac{-dR(t)}{dt} = f(t)$$

แทนค่าสมการ (2.7) ด้วย (2.3) จะได้ว่า

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2.8)$$

สมการข้างต้นเป็นหนึ่งในความสัมพันธ์พื้นฐานของการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือซึ่งมีความสำคัญ เพราะเป็นฟังก์ชันการกระจายตัวเชิงสถิติ ตัวอย่างเช่น ถ้าหากทราบเวลาจนกระทั่งอุปกรณ์เกิดความล้มเหลว (Time to Failure) และฟังก์ชันความน่าเชื่อถือ $R(t)$ จะทำให้สามารถประเมินอัตราการเกิดอันตราย ณ เวลา

t ใด ๆ ได้จากสมการ (2.8) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดอันตราย $h(t)$ จากการความล้มเหลว $f(t)$ บนความน่าเชื่อถือ $R(t)$ ของอุปกรณ์ ณ เวลา t ใด ๆ

สมการที่ (2.7) อธิบายได้ว่าอัตราการเกิดอันตรายเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงอัตราความคงทนต่อหน่วยเวลาที่เปลี่ยนไป

เพื่อให้เข้าใจแนวคิดได้ชัดเจนยิ่งขึ้นผู้วิจัยขอยกตัวอย่างการทดสอบอุปกรณ์โดยเริ่มที่ความน่าเชื่อถือที่ t_0 ด้วยจำนวนอุปกรณ์ N_0 ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปเป็นเวลา t ทำให้อุปกรณ์ถูกใช้งานและเกิดความล้มเหลวขึ้นและเสียหายไปส่วนหนึ่ง N_s จนกระทั่งทำให้เหลืออุปกรณ์ที่ใช้ได้เป็นจำนวน N_f ณ เวลาสุดท้ายที่พิจารณา N_s นั่นคือ $N_0 = N_f + N_s$ จะได้สมการความน่าเชื่อถือที่ เวลา t ใด ๆ

$$R(t) = \frac{N_s}{N_0} \quad (2.9)$$

$$= \frac{N_0 - N_f}{N_0} = 1 - \frac{N_f}{N_0} \quad (2.10)$$

จากสมการที่ (2.3)

$$f(t) = \frac{-dR(t)}{dt} = \frac{1}{N_0} \times \frac{dN_f}{dt} \quad (2.11)$$

ดังนั้น ฟังก์ชันความหนาแน่นของความล้มเหลวจะแสดงสัดส่วนของจำนวนอุปกรณ์เมื่อเริ่มต้น N_0 กับปริมาณอุปกรณ์ที่เกิดการล้มเหลวขึ้นในช่วงเวลา $(t, t + \Delta t)$

ดังนั้นสมการที่ (2.8) (2.9) และ (2.11) สามารถประเมินได้เป็น

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\frac{dN_f}{N_0 dt}}{\frac{N_s}{N_0}} = \frac{1}{N_0} \times \frac{dN_f}{dt} \quad (2.12)$$

ดังนั้น ฟังก์ชันความอันตราย $h(t)$ จึงเป็นส่วนกลับของอุปกรณ์ที่คงทนอยู่ได้ใน

ช่วงเวลา $(t, t + \Delta t)$

การเปรียบเทียบสมการที่ (2.6) และที่ (2.7) กับอัตราการเกิดความล้มเหลว Failure Rate $\lambda(t)$ และอัตราการเกิดอันตราย Hazard Rate $h(t)$ ก่อนข้างมีความแตกต่างกันในทางคณิตศาสตร์ ปกติจะถูกนำไปใช้งานโดยมีความหมายที่คล้ายคลึงกันในทางปฏิบัติของงานวิศวกรรมความน่าเชื่อถือ

อัตราการอันตรายกับอัตราการล้มเหลวสามารถอธิบายโดยอุปมาว่า หากมีครอบครัวหนึ่งเดินทาง 200 กิโลเมตรได้ภายในเวลา 4 ชั่วโมง ดังนั้นความเร็วเฉลี่ยอยู่ที่ 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมง แม้ว่าจะมีบางช่วงเวลาที่ครอบครัวนี้จะใช้ความเร็วเร็วกว่าหรือช้ากว่าความเร็วโดยเฉลี่ยอยู่บ้าง หากต้องการทราบความเร็วชั่วขณะหนึ่งต้องตรวจสอบที่เครื่องมือวัดความเร็ว ณ ขณะนั้น ดังนั้นความเร็ว 50 กิโลเมตรต่อชั่วโมงจึงเป็นอัตราการล้มเหลวเชิงเส้นและความเร็ว ณ ขณะใดๆ ตลอดการเดินทางคืออัตราอันตรายเชิงเส้น

จากสมการ (2.8) สามารถอธิบายอัตราการเกิดอันตรายจากความล้มเหลวของอุปกรณ์ให้อยู่ในรูปของสมการความน่าเชื่อถือได้ $R(t)$ ดังนี้

จากสมการ (2.7) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} h(t) &= \frac{-1}{R(t)} \left[\frac{dR(t)}{dt} \right] \\ -h(t)dt &= \frac{dR(t)}{R(t)} \end{aligned} \quad (2.13)$$

ทำการอินทิเกรตทั้งสองข้างของสมการ (2.13) จะได้ว่า

$$\int_0^t \frac{dR(t)}{R(t)} = - \int_0^t h(t)dt$$

$$\ln R(t) - \ln R(0) = - \int_0^t h(t)dt$$

แต่ $R(0) = 1$ นั่นคือ $\ln R(0) = 0$

$$R(t) = \exp \left[- \int_0^t h(t)dt \right] \quad (2.14)$$

สมการ (2.14) เป็นรูปทั่วไปเมื่อพิจารณาให้อัตราความอันตรายจากการเกิดความล้มเหลวเป็นค่าคงที่ได้สมการอัตราการเกิดความล้มเหลวคงที่ (λ) ซึ่งจะเป็นจริงเสมอสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้า[3]

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.15)$$

สมการข้างต้นถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือ อย่างไรก็ตามการนำไปใช้จำเป็นต้องมีข้อมูลอัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ที่เชื่อถือได้ สมการสามารถนำไปใช้สำหรับคำนวณความน่าเชื่อถือของระบบที่อยู่ในรูปของระยะเวลาที่อุปกรณ์จะเกิดความล้มเหลว (Mean Time To Failure, MTTF) และช่วงเวลาระหว่างการล้มเหลวของอุปกรณ์ (Mean Time Between Failure, MTBF) ดังตารางสรุปสมการสำหรับประเมินความน่าเชื่อถือ [10]

ตารางที่ 2.1 สมการพื้นฐานสำหรับประเมินความน่าเชื่อถือ

ฟังก์ชันความเป็นไปได้ที่จะเกิด ความล้มเหลว	$f(t)$
สมการความน่าเชื่อถือพื้นฐาน	$R(t) = \int_t^\infty f(t)dt = \exp \left[- \int_0^t h(t)dt \right]$
อัตราความอันตราย อัตราการเกิดความล้มเหลว	$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$ $\lambda(t) = \int_0^t h(t)dt$
MTTF (กรณีอุปกรณ์เสียแล้วไม่ซ่อม)	$MTTF = \int_0^\infty R(t)dt$
MTBF (อัตราการเกิดความล้มเหลวคงที่ และซ่อมเมื่อเกิดความล้มเหลว)	$MTBF = \frac{T(t)}{r} = 1/\lambda$ เมื่อ $T(t)$ = รวมเวลาใช้งาน และ r = จำนวนการเกิดความล้มเหลวและ λ = อัตราความล้มเหลว (ครั้งต่อชั่วโมงทำงาน)
MTTR	เวลาที่ใช้สำหรับซ่อมบำรุงอุปกรณ์แต่ละตัว
MDT	$MDT = MTTR + \text{Administrative Time (ถ้ามี)}$

ความน่าเชื่อถือของระบบนอกจากจะคำนวณได้จากสมการพื้นฐานของความน่าจะเป็นเชิงสถิติแล้ว ยังสามารถคำนวณได้จากผลรวมเชิงฟังก์ชันของความน่าเชื่อถือของแต่ละชิ้นส่วน[1]

การทำนายความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ไฟฟ้าสามารถดำเนินการด้วยวิธี Part Count Reliability Prediction [4] ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับทำนายความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ที่อยู่ในระหว่างการออกแบบ และข้อมูลการติดตั้งอุปกรณ์ไม่สามารถหาได้อย่างครบถ้วน โดยมีสมการดังนี้

$$\lambda_{\text{EQUIP}} = \sum_{i=1}^n N_i (\lambda_g \pi_Q)_i \quad (2.16)$$

เมื่อ

λ_{EQUIP} คือ ผลรวมการล้มเหลวของอุปกรณ์ (ครั้งต่อชั่วโมงการทำงาน)

λ_g คือ อัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ ตัวที่ i

π_Q คือ ปัจจัยคุณภาพของอุปกรณ์ ตัวที่ i

n คือ จำนวนชิ้นส่วนของอุปกรณ์ที่ต่างชนิดกันในอุปกรณ์

N_i คือ จำนวนของอุปกรณ์ประเภทเดียวกัน ตัวที่ i

2.1.3 การประเมินความพร้อมใช้ของอุปกรณ์

การประเมินความพร้อมใช้ของอุปกรณ์ **Availability** ความพร้อมใช้ของระบบรถไฟฟ้าประเมินได้จากความพร้อมใช้ของอุปกรณ์ย่อยในระบบรถไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วย ความพร้อมใช้ของตู้โดยสารรถไฟฟ้า ความพร้อมใช้ของประตูกันชนชานชาลา ความพร้อมใช้ของระบบเก็บค่าโดยสารอัตโนมัติ ความพร้อมใช้ของเครื่องจำหน่ายตั๋วโดยสาร และความพร้อมใช้ของประตูอัตโนมัติ โดยอุปกรณ์เหล่านั้นได้รับการจ่ายพลังงานไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์ไฟฟ้า

ระบบหรืออุปกรณ์ที่ส่งผลกระทบต่อความพร้อมใช้ของระบบรถไฟฟ้าได้รับการจ่ายพลังงานด้วยอุปกรณ์จากระบบไฟฟ้า ดังนั้นจึงประเมินความพร้อมใช้ของระบบรถไฟฟ้าด้วยการประเมินความพร้อมใช้ของอุปกรณ์ไฟฟ้าซึ่งประเมินได้จากความพร้อมใช้ของอุปกรณ์ย่อยแต่ละตัวในระบบไฟฟ้าด้วยสมการ

$$\text{Availability (A)} = \frac{\text{Hours in Service}}{\text{Operating Hours}} \times 100 \quad (2.17)$$

2.1.4 รูปแบบความล้มเหลวของอุปกรณ์หรือระบบที่ซับซ้อน

รูปแบบความล้มเหลวของอุปกรณ์มีดังนี้

แบบ ก รูปแบบอาจจะมีโอกาสล้มเหลวมากในระยะเริ่มต้นใช้งานและลดลงเมื่อใช้งานไปสักระยะ จากนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อใกล้สิ้นอายุการใช้งานของอุปกรณ์

แบบ ข รูปแบบดั้งเดิม โอกาสการล้มเหลวจะน้อยในระยะเริ่มแรกและคงที่ไปตลอดจะกระทั่งเมื่อใกล้สิ้นอายุการใช้งาน โอกาสการล้มเหลวจะเพิ่มขึ้น

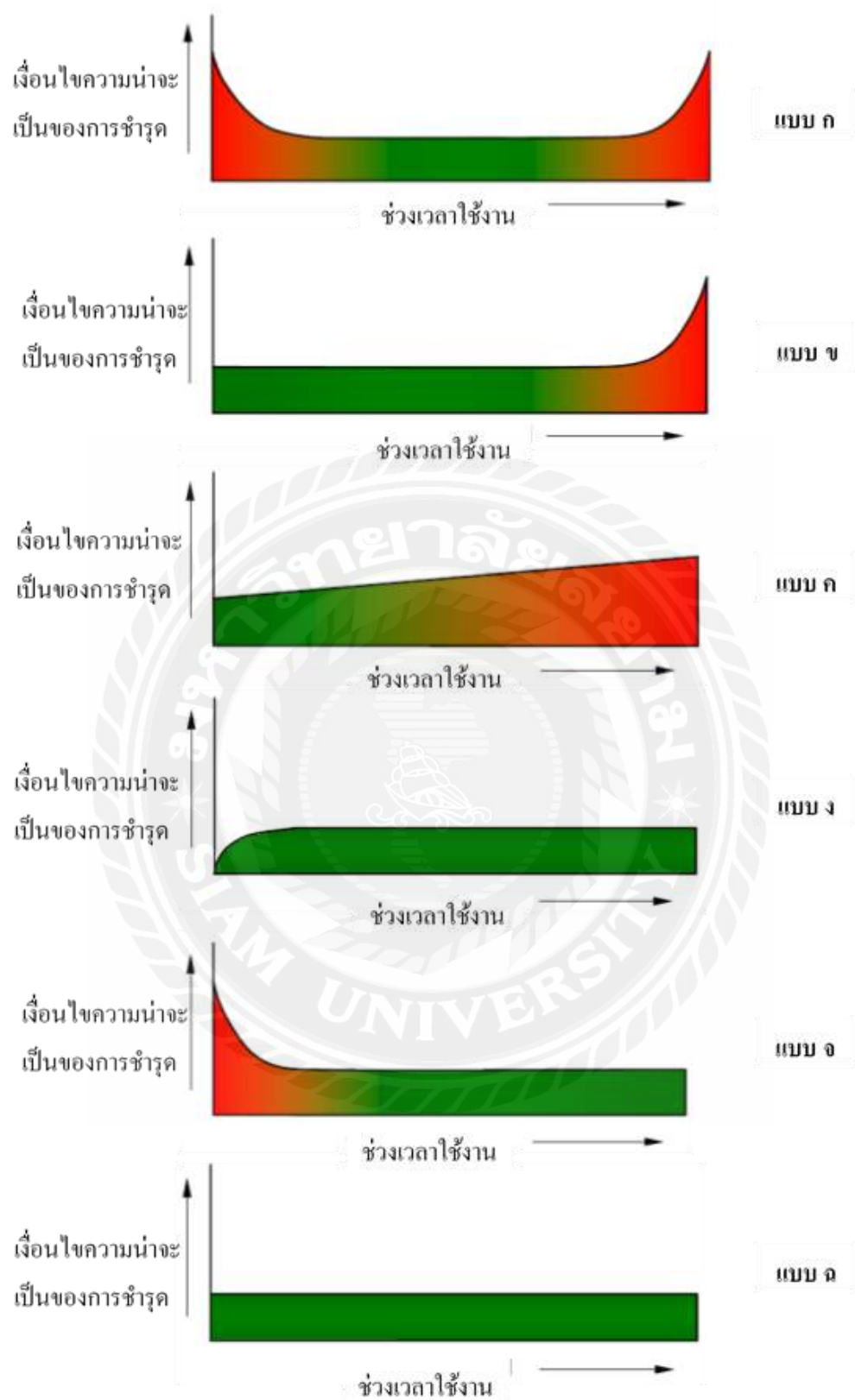
แบบ ค โอกาสการล้มเหลวจะเพิ่มขึ้นตามอายุการใช้งานของอุปกรณ์

แบบ ง การล้มเหลวบกพร่องของอุปกรณ์จะน้อยในช่วงเริ่มต้นการใช้งาน จากนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและคงที่ไปตลอดอายุการใช้งาน

แบบ จ โอกาสการล้มเหลวจะมีค่าสูงมากในระยะเริ่มต้นการใช้งานและจะลดลงเมื่อใช้งานไปเป็นระยะเวลาหนึ่ง จากนั้นโอกาสการล้มเหลวจะคงที่ตลอดจนสิ้นสุดอายุการใช้งาน

แบบ ฉ การล้มเหลวของอุปกรณ์จะเป็นแบบสุ่มและมีโอกาสเกิดขึ้นได้เท่ากันตลอดเวลาการใช้งาน

รูปที่ 2.2 แสดงรูปแบบความล้มเหลวของอุปกรณ์ที่กล่าวข้างต้น การบำรุงรักษาเพื่อยืดอายุอุปกรณ์ที่มีโอกาสการล้มเหลวขึ้นอยู่กับอายุการใช้งานจะทำการกำหนดเวลาที่แน่นอน คือ รูปแบบการล้มเหลวแบบ ก ข และ ค สำหรับการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่มีโอกาสการล้มเหลวไม่แปรผันตรงตามระยะเวลาการใช้งานคือ รูปแบบ ง จ และ ฉ ต้องได้รับการจัดการการบำรุงรักษาอย่างถูกต้องตลอดอายุการใช้งานของอุปกรณ์



รูปที่ 2.2 รูปแบบการล้มเหลวของอุปกรณ์

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบรถไฟ

ทฤษฎีเกี่ยวกับระบบรถไฟประกอบด้วย ทฤษฎีความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟ ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าเชื่อถือและคุณภาพของการให้บริการระบบรถไฟ การประเมินคุณภาพการให้บริการระบบรถไฟ การประเมินความพร้อมใช้ของระบบรถไฟ การประเมินงานบำรุงรักษาบริภัณฑ์ไฟฟ้าสำหรับระบบรถไฟ การประเมินความเสี่ยงของอุปกรณ์ในระบบรถไฟ และกิจกรรมงานบำรุงรักษาบริภัณฑ์ไฟฟ้าของระบบรถไฟ

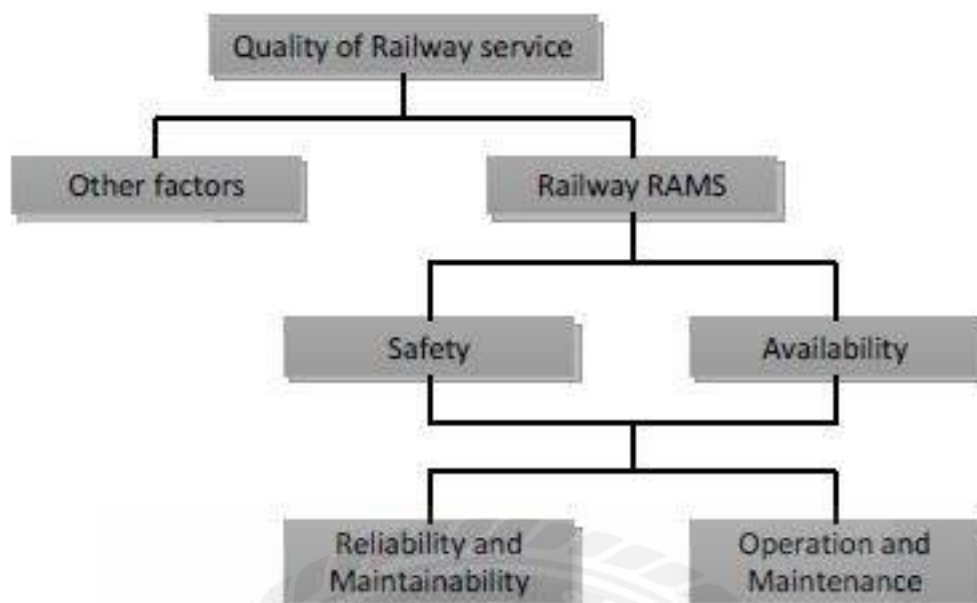
2.2.1 ความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟ

ระบบรถไฟมีเป้าหมายเพื่อการขนส่งภายในเวลาที่กำหนดอย่างปลอดภัย ความเชื่อถือได้ (Dependability) ของระบบรถไฟเป็นตัวชี้วัด (Railway Reliability, Availability, Maintainability and Safety: Railway RAMS) ถูกกำหนดขึ้นเพื่อให้ผู้โดยสารมีความมั่นใจได้ว่าระบบรถไฟมีสมรรถนะและความสามารถบรรลุเป้าหมาย[2] ส่งผลต่อคุณภาพการให้บริการแก่ผู้โดยสาร ความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟประกอบด้วย ความน่าเชื่อถือของระบบ (Reliability) ความพร้อมใช้ของระบบ (Availability) ความสามารถในการบำรุงรักษาระบบ (Maintainability) และสวัสดิภาพความปลอดภัย (Safety) ของผู้โดยสารที่ใช้งานระบบ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นที่ตอบสนองต่อความพึงพอใจของผู้โดยสาร เช่น ความถี่ของการให้บริการ ความสม่ำเสมอของการให้บริการ โครงสร้างราคาโดยสาร เป็นต้น [1]

2.2.2 ความน่าเชื่อถือและคุณภาพของการให้บริการระบบรถไฟ

ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพการให้บริการระบบรถไฟในประเทศไทยมีทั้งปัจจัยที่มาจากผู้ปฏิบัติงานให้บริการ ผู้โดยสารและปัจจัยที่มาจากความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ในระบบรถไฟซึ่งเมื่อเกิดความล้มเหลวขึ้นแล้วจะส่งผลต่อคุณภาพการให้บริการแก่ผู้โดยสาร

ความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟสำหรับขนส่งมวลชนมีส่วนประกอบที่สำคัญร่วมกันคือความพร้อมใช้ของระบบรถไฟ (Availability) และสวัสดิภาพความปลอดภัย (Safety) ของผู้โดยสาร ดังนั้นการให้บริการระบบรถไฟให้มีคุณภาพจะเกิดขึ้นได้ต้องทำให้อุปกรณ์งานระบบมีความน่าเชื่อถือรวมทั้งสามารถที่จะบำรุงรักษาได้ (Reliability and Maintainability) ตลอดช่วงอายุการใช้งานระบบ (Whole Life Cycle of System) นอกจากนี้การใช้งานและบำรุงรักษาที่เหมาะสมยังเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่ต้องดำเนินการควบคู่ไปกับการให้บริการ [1]



รูปที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบที่ส่งผลต่อคุณภาพการให้บริการระบบรถไฟฟ้า

เพื่อพิจารณาองค์ประกอบที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพการให้บริการเฉพาะที่มาจากความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้าโดยไม่พิจารณาองค์ประกอบจากปัจจัยภายนอก เช่น ผู้ใช้งานระบบ โครงสร้างราคาค่าโดยสารซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ จะทำให้สามารถระบุตัวชี้วัดความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้าได้[1]

2.2.3 การประเมินคุณภาพการให้บริการระบบรถไฟฟ้า

การประเมินคุณภาพการให้บริการระบบรถไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้จากความไม่พร้อมใช้ของการให้บริการรถไฟฟ้า และความไม่ตรงต่อเวลาของการให้บริการรถไฟฟ้าอันเนื่องมาจากความล้มเหลวของอุปกรณ์ไฟฟ้า

ความถี่ของการให้บริการระบบรถไฟฟ้าจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัน เช่นวันทำงานปกติ วันหยุดประจำสัปดาห์ เป็นต้น และช่วงเวลาระหว่างวันจะมีความถี่การให้บริการที่ต่างกันเช่น ความถี่การให้บริการในชั่วโมงเร่งด่วน (Peak Hour Headway) ของวันจะมีความถี่ที่มากกว่าเพื่อให้บริการได้ทันกับความต้องการใช้บริการของผู้โดยสาร ดังนั้นการพิจารณาการให้บริการจึงนิยมพิจารณาโดยใช้ความถี่การให้บริการโดยเฉลี่ยในรอบปี (Average Headway) ซึ่งสามารถประเมินได้จากจำนวนชั่วโมงที่ระบบรถไฟฟ้าเปิดให้บริการตลอดทั้งปีเปรียบเทียบกับครึ่งหนึ่งของจำนวนเที่ยวที่ให้บริการตลอดทั้งปี

จำนวนรถไฟฟ้าที่ไม่พร้อมให้บริการหรือจำนวนรถไฟฟ้าที่ถูกยกเลิกให้บริการประเมินได้จากเวลาที่เหตุการณ์ความล้มเหลวนั้นเกิดขึ้นและส่งผลให้การให้บริการระบบรถไฟฟ้าต้องถูกระงับไปจนกระทั่ง

ระบบได้ถูกแก้ไขและกลับคืนสู่สภาวะการให้บริการปกติ ซึ่งประเมินได้จากสองเท่าของการปิดพิเศษเลข
ทศนิยมขึ้นให้เป็นจำนวนเต็มของอัตราส่วนระหว่างเวลาที่ใช้การให้บริการถูกระงับกับความถี่การให้บริการ
เฉลี่ย จากสูตร

$$\text{TSUc, TSDc} = \text{Roundup} \left(\frac{\text{Time During Canceled Train Trip}}{\text{Average Headway}} \right) \quad (2.18)$$

คุณลักษณะเฉพาะของการให้บริการระบบรถไฟฟ้า

Indicator	Value
Peak Hour Headway (min:sec)	03:52 [232 seconds]
Average Headway (min:sec)	05:33 [333 seconds]
Operating Fleet (trains in peak hour)	18
Operating Fleet (cars in peak hour)	54
Total Number of Trains	21
Total Number of Cars	63
Annual Train-km	3,099,049
Annual Car-km	9,297,147
Scheduled Train Trips (per year)	145,920
Operating Hours (per day)	18.5
Operating Hours (per year)	6,753
Calendar Hours (per year)	8,760

การประเมินคุณภาพการให้บริการระบบรถไฟฟ้า (Railway Service Monitoring) มี 2 ลักษณะ ดังนี้

- ความไม่พร้อมให้บริการรถไฟฟ้า (Train Service Unavailability, TSU)
- ความไม่ตรงต่อเวลาของการให้บริการรถไฟฟ้า (Train Service Delay, TSD)

ความไม่พร้อมให้บริการรถไฟฟ้า

ความไม่พร้อมให้บริการรถไฟฟ้าประเมินจากการหาอัตราส่วนระหว่างจำนวนเที่ยวโดยสารที่
ยกเลิกให้บริการเปรียบเทียบกับจำนวนเที่ยวโดยสารที่ระบุไว้ในตารางเวลาการเดินทางซึ่งสามารถคำนวณได้
จากสูตร

$$TSU = \frac{TSU_c}{TSU_s} \times 100\% \quad (2.19)$$

เมื่อ TSUs คือ จำนวนเที่ยวโดยสารที่ระบุไว้ในตารางเวลาการในเดือนที่พิจารณา

TSU_c คือ จำนวนเที่ยวโดยสารที่ยกเลิกด้วยสาเหตุจากความล้มเหลวของอุปกรณ์

เที่ยวโดยสารหมายถึงการให้บริการขบวนรถไฟฟ้าที่ออกจากสถานีต้นทางถึงสถานีที่ต้องกลับทิศทางการให้บริการและมายังสถานีเริ่มต้นอีกครั้งตามตารางเวลาการให้บริการและเที่ยวโดยสารที่ยกเลิกหมายถึง เที่ยวโดยสารใดๆ ที่ไม่สามารถออกให้บริการจากสถานีต้นทางได้ภายใน 2 นาทีในช่วงชั่วโมงเร่งด่วน และภายใน 5 นาทีนอกชั่วโมงเร่งด่วน

ความไม่ตรงต่อเวลาของการให้บริการรถไฟฟ้า

ความไม่ตรงต่อเวลาของการให้บริการประเมินเทียบกับค่าที่กำหนดไว้โดยหน่วยงานของรัฐวิสาหกิจผู้ทำหน้าที่กำกับดูแลกิจกรรมการให้บริการในรูปแบบตารางเวลาการเดินรถ เพื่อให้เป็นมาตรการควบคุมคุณภาพการให้บริการในแต่ละวัน โดยการบันทึกความล่าช้าของขบวนรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการจะพิจารณาเฉพาะเที่ยวที่ล่าช้าจนเกินกำหนดซึ่งไม่รวมความล่าช้าที่เกิดจากพนักงานผู้ให้บริการหรือความล่าช้าที่เกิดจากผู้โดยสาร

ความไม่ตรงต่อเวลาประเมินจากจำนวนเที่ยวรถไฟฟ้าที่ให้บริการล่าช้ากว่า 2 นาทีเปรียบเทียบกับจำนวนเที่ยวการให้บริการที่ระบุไว้ในตารางเวลาให้บริการ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตร

$$TSD = \frac{TSD_c}{TSD_s} \times 100\% \quad (2.20)$$

เมื่อ TSDs คือ จำนวนเที่ยวรถไฟฟ้าซึ่งระบุไว้ในตารางเวลาเพื่อให้บริการ

TSD_c คือ จำนวนเที่ยวรถไฟฟ้าที่เกิดความล่าช้าเกิน 2 นาทีด้วยสาเหตุมาจากความล้มเหลวของระบบไฟฟ้า

ตัวอย่างการประเมินความล่าช้าของระบบรถไฟฟ้าซึ่งเกิดจากความล้มเหลวของอุปกรณ์จนทำให้ระบบรถไฟฟ้าเกิดความล่าช้า 2 นาที

เนื่องจากความล้มเหลวของอุปกรณ์นั้นทำให้ระบบรถไฟฟ้าเกิดความล่าช้าเกินกว่า 1 ขบวน เทียบกับปริมาณเที่ยวรถไฟฟ้าที่ให้บริการในแต่ละเดือน 12,160 เที่ยว จึงสามารถประเมินจำนวนรถไฟฟ้าเกิดความล่าช้าได้จากสูตร

$$TSD_c = \text{Roundup} \left(\frac{1660 \text{ sec}}{2 \times 40 \text{ min.} \times 60 \text{ sec.}} \right) = 1 \text{ train trip}$$

$$TSD = \left(\frac{1}{12160} \right) \times 100\% = 0.008\%$$

2.2.4 การประเมินความพร้อมใช้ของระบบรถไฟฟ้า

การประเมินความพร้อมใช้ของระบบรถไฟฟ้าสามารถแบ่งออกเป็นสองรูปแบบคือความพร้อมใช้งานที่ประเมินไว้สำหรับการทำงานบำรุงรักษาตามวาระ หรือเรียกว่า ความไม่พร้อมใช้ตามแผน และความไม่พร้อมใช้งานระบบที่เกิดขึ้นจากความล้มเหลวของอุปกรณ์ซึ่งจำเป็นต้องใช้เวลาในการกู้คืนระบบให้กลับสู่สภาวะพร้อมใช้งาน หรือเรียกว่า ความไม่พร้อมใช้งานฉุกเฉิน

ความไม่พร้อมใช้ตามแผน Non-Availability (Maintenance): $1 - AM$

ความไม่พร้อมใช้ฉุกเฉิน Non-Availability (Repair): $1 - AR$

$$A = 1 - [(1 - AM) + (1 - AR)]$$

$$A = \frac{MUT}{(MUT + MDT)} ; 0 \leq A \leq 1 \quad (2.21)$$

เมื่อ A คือ ความพร้อมใช้งานระบบ

MUT คือ Mean Up Time อาจถูกแทนค่าด้วย MTBF หรือ MTBSF เป็นต้น

MDT คือ Mean Down Time อาจถูกแทนค่าด้วย MTTM หรือ MTTR เป็นต้น

ดังนั้น ประเมินเวลาการเกิดความล้มเหลว down time $d(T)$ ในช่วงเวลาที่พิจารณา T (เช่น ช่วงเวลาประเมิน 1 เดือน หรือ 1 ปี เป็นต้น) ได้จากสมการ

$$d(T) = (1 - A) \times T \quad (2.22)$$

2.2.5 การประเมินงานบำรุงรักษาบริภัณฑ์ไฟฟ้าสำหรับระบบรถไฟฟ้า

การประเมินงานซ่อมบำรุง (Maintainability Analysis) กำหนดขึ้นเพื่อตรวจสอบกิจกรรมซ่อมบำรุงที่จะดำเนินการกับระบบพร้อมทั้งสำรวจและประเมินความเพียงพอของเวลาที่ใช้ทำงานซ่อมบำรุง ทักษะความชำนาญของผู้ปฏิบัติงาน อุปกรณ์สิ้นเปลืองและเครื่องมือที่จำเป็น การตรวจสอบงานซ่อมบำรุง

ประกอบด้วยการตรวจสอบงานบำรุงรักษาเพื่อป้องกันตามวาระ(Preventive Maintenance Analysis, PMA) และการบำรุงรักษาเชิงแก้ไขเมื่อเกิดความล้มเหลวขึ้น (Corrective Maintenance Analysis, CMA)

การประเมินงานบำรุงรักษาเชิงแก้ไขเพื่อกู้คืนระบบ (CMA) จะใช้เพื่อประเมินประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดเพื่อกู้คืนระบบให้กลับสู่สภาพที่พร้อมใช้งานได้อย่างถูกต้องตามอาการที่เกิดขึ้น ดังนั้นจะเป็นการวัดประสิทธิภาพของผู้ปฏิบัติงานซึ่งต้องการการส่งเสริมให้มีความรู้ความสามารถพร้อมสำหรับกู้คืนสถานการณ์ ใช้เป็นข้อมูลเพื่อปรับปรุงปริมาณงานบำรุงรักษาให้สอดคล้องกับสภาพของอุปกรณ์ด้วย และใช้สำหรับประเมินสมรรถนะและขีดความสามารถของเครื่องมือที่ใช้ในการซ่อมบำรุงอีกทางหนึ่ง

การประเมินการบำรุงรักษาเพื่อป้องกันการล้มเหลวตามวาระ (PMA) จะถูกประเมินและดำเนินการเพื่อสร้างความน่าเชื่อถือต่อระบบโดยรวมว่าจะไม่เกิดความล้มเหลวเนื่องจากการบำรุงรักษาที่ไม่เพียงพอ การบำรุงรักษาเชิงป้องกันจะดำเนินงานตามตารางเวลาที่ถูกสร้างขึ้นสำหรับดำเนินกิจกรรมบำรุงรักษาเพื่อป้องกันก่อนอุปกรณ์ก่อนการล้มเหลว ซึ่งประกอบด้วย การตรวจสอบด้วยประสาทสัมผัส การตรวจติดตามเงื่อนไขการทำงานของอุปกรณ์ และเปลี่ยนชิ้นส่วนที่ได้รับความเสียหาย

การประเมินประสิทธิภาพในการจัดการงานซ่อมบำรุงจะประเมิน 2 ส่วน ส่วนแรกประเมินประสิทธิภาพการบำรุงรักษาเชิงแก้ไข (Corrective Maintenance Efficiency, CME) ซึ่งจะเป็นตัวชี้วัดความสามารถในการกู้คืนระบบหรืออุปกรณ์ให้กลับคืนสู่สถานะพร้อมใช้งาน ส่วนที่สองประเมินประสิทธิภาพการบำรุงรักษาตามเชิงป้องกัน(Preventive Maintenance Efficiency, PME) ที่ได้ดำเนินการแล้วเสร็จภายในช่วงเวลาที่กำหนดซึ่งเป็นตัวชี้วัดความสามารถในการบำรุงรักษาตามแผนงานที่ได้กำหนดไว้เพื่อป้องกันเหตุการณ์ความล้มเหลวของอุปกรณ์ก่อนเกิดความล้มเหลวขึ้น

ประสิทธิภาพการบำรุงรักษาเชิงแก้ไข (CME)

$$CME = \frac{CM_f}{CM_{t-1} + CM_t} \times 100\% \quad (2.23)$$

เมื่อ CM_{t-1} คือ ปริมาณงานซ่อมบำรุงเชิงแก้ไขคงค้างจากเดือนที่ผ่านมา
พิจารณาในเดือนปัจจุบัน

CM_f คือ ปริมาณงานซ่อมบำรุงเชิงแก้ไขที่ดำเนินการแล้วเสร็จในเดือนปัจจุบัน

CM_t คือ ปริมาณงานซ่อมบำรุงเชิงแก้ไขทั้งหมดในเดือนปัจจุบัน

ประสิทธิภาพการบำรุงรักษาตามเชิงป้องกัน (PME)

$$PME = \left[\frac{PM_f}{PM_{t-1} + PM_t} \right] \times 100\% \quad (2.24)$$

เมื่อ PM_{t-1} คือ ปริมาณงานบำรุงรักษาเชิงป้องกันคงค้างของเดือนที่ผ่านมาพิจารณาในเดือนปัจจุบัน

PM_t คือ ปริมาณงานบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่ต้องดำเนินการให้แล้วเสร็จภายในเดือนปัจจุบัน

PM_f คือ ปริมาณงานบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่ดำเนินการแล้วเสร็จในเดือนปัจจุบัน

2.2.6 การประเมินความเสี่ยงของอุปกรณ์ในระบบรถไฟ

การประเมินความเสี่ยง[1]ของอุปกรณ์ไฟฟ้าเริ่มต้นด้วยการนำความเป็นไปได้หรือจำนวนครั้งของการเกิดความล้มเหลวของอุปกรณ์ขึ้นในระบบไฟฟ้ามาจัดอันดับเพื่อพิจารณาความถี่ที่เกิดขึ้น และ ประเมินความรุนแรงของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นกับระบบรถไฟอันเนื่องมาจากการล้มเหลวของอุปกรณ์ จากนั้นทำการประเมินระดับความเสี่ยงโดยใช้ตารางไขว้ความเสี่ยง

2.2.6.1 ความถี่ในการเกิดความล้มเหลว

ความถี่ของการเกิดเหตุการณ์ที่ทำให้เกิดอันตรายนั้น สามารถแบ่งได้ตาม ตารางที่ 2.2 ระดับความถี่ในการเกิดความล้มเหลว

ตารางที่ 2.2 ระดับความถี่ในการเกิดความล้มเหลว

ระดับความถี่	จำนวนครั้งที่อุปกรณ์เกิดความล้มเหลว	โอกาสที่อุปกรณ์จะเกิดความล้มเหลว
Frequent	มากกว่า 1 ครั้ง ใน 1 เดือน	เป็นไปได้ว่าจะเกิดขึ้นบ่อยครั้ง จะเกิดอันตรายเป็นประจำ
Probable	น้อยกว่า 1 ครั้งใน 1 เดือน ถึง 1 ครั้ง ใน 1 ปี	เกิดขึ้นหลายครั้ง สามารถคาดการณ์ได้ว่าจะเกิดอันตรายขึ้นบ่อย
Occasional	น้อยกว่า 1 ครั้ง ใน 1 ปี ถึง 1 ครั้ง ใน 10 ปี	เป็นไปได้ว่าจะเกิดขึ้นหลายครั้ง สามารถคาดการณ์ได้ว่าจะเกิดอันตรายขึ้นหลายครั้ง

ระดับความถี่	จำนวนครั้งที่อุปกรณ์เกิดความล้มเหลว	โอกาสที่อุปกรณ์จะเกิดความล้มเหลว
Remote	น้อยกว่า 1 ครั้ง ใน 10 ปี ถึง 1 ครั้ง ใน 100 ปี	เป็นไปได้ว่าจะเกิดขึ้นเป็นบางครั้งในช่วงวงจรชีวิตของระบบ (ประมาณ 30 ปี) สามารถคาดการณ์อย่างเป็นเหตุเป็นผลได้ว่า จะเกิดอันตรายขึ้น
Improbable	น้อยกว่า 1 ครั้ง ใน 100 ปี ถึง 1 ครั้ง ใน 1000 ปี	ไม่น่าจะเกิดแต่ก็เป็นไปได้ที่จะเกิดขึ้น เป็นไปได้ว่าอันตราย อาจเกิดขึ้นได้เป็นกรณีพิเศษ
Incredible	น้อยกว่า 1 ครั้ง ใน 1000 ปี	ไม่น่าจะเกิดขึ้นเลย เป็นไปได้ว่าจะไม่เกิดอันตรายขึ้น

2.2.6.2 ความรุนแรงที่เกิดขึ้นจากความล้มเหลว

ความรุนแรงที่เกิดขึ้นจากความล้มเหลวที่อาจส่งผลกระทบต่อคน สภาพแวดล้อมในการปฏิบัติงานหรือให้บริการรถไฟฟ้า แบ่งเป็นระดับความรุนแรงที่จะเกิดขึ้นตามตารางที่ 2.3 ระดับความรุนแรงจากความล้มเหลวของอุปกรณ์ต่อการให้บริการระบบรถไฟฟ้า

ตารางที่ 2.3 ระดับความรุนแรงจากการล้มเหลวของอุปกรณ์ต่อการให้บริการระบบรถไฟฟ้า

ระดับความรุนแรง	ผลกระทบจากความล้มเหลวของอุปกรณ์
Insignificant	หยุดหรือปิดการให้บริการรถไฟฟ้า น้อยกว่า 15 นาที
Marginal	ปิดการให้บริการรถไฟฟ้า 15 นาที ถึง 1 วัน
Critical	ปิดการให้บริการรถไฟฟ้ามากกว่า 1 วัน ถึง 3 เดือน
Catastrophic	ปิดการให้บริการรถไฟฟ้ามากกว่า 3 ถึง 12 เดือน

2.2.6.3 การประเมินความเสี่ยง

ประเมินความเสี่ยงโดยการพิจารณารวมกันระหว่างความรุนแรงและความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์อันตราย ซึ่งสามารถประเมินและจัดอันดับความรุนแรงในการเกิดเหตุการณ์อันตรายของแต่ละเหตุการณ์ตามตาราง[1] เมื่ออุปกรณ์ไฟฟ้าเกิดความล้มเหลวขึ้นจะต้องมีระดับความเสี่ยงที่ส่งผลกระทบต่อระบบรถไฟฟ้าอยู่ในระดับต่ำที่สุดที่สามารถยอมรับได้อย่างสมเหตุสมผลในทางปฏิบัติ (As Low As Reasonably Practicable, ALARP) ก่อนที่จะถูกนำไปใช้งานในระบบรถไฟฟ้า

ตารางที่ 2.4 ตารางไขว้การประเมินระดับความเสี่ยง

ระดับความถี่	ระดับความรุนแรง				
		Insignificant	Marginal	Critical	Catastrophic
	Frequent	Undesirable	Intolerable	Intolerable	Intolerable
	Probable	Tolerable	Undesirable	Intolerable	Intolerable
	Occasional	Tolerable	Undesirable	Undesirable	Intolerable
	Remote	Negligible	Tolerable	Undesirable	Undesirable
	Improbable	Negligible	Negligible	Tolerable	Tolerable
	Incredible	Negligible	Negligible	Negligible	Negligible

2.2.6.4 เกณฑ์การประเมินระดับความเสี่ยง

จากเกณฑ์การประเมินระดับความเสี่ยง สามารถประเมินได้จากแนวโน้มความล้มเหลวที่อาจเกิดขึ้นดังตารางที่ 2.4 เกณฑ์การประเมินระดับความเสี่ยง

ตารางที่ 2.5 เกณฑ์การประเมินระดับความเสี่ยง

ระดับความเสี่ยง	ความหมาย
Intolerable	ความเสี่ยงที่ยอมรับไม่ได้ ต้องหยุดดำเนินการและปรับปรุงแก้ไขเพื่อลดและควบคุมความเสี่ยงทันที
Undesirable	ความเสี่ยงสูงต้องดำเนินการจัดทำมาตรการเพื่อลดและควบคุมความเสี่ยง มิฉะนั้นต้องได้รับความเห็นชอบจากฝ่ายบริหารขององค์กร โดยผ่านความเห็นชอบของคณะกรรมการความปลอดภัย จึงจะสามารถยอมรับได้
Tolerable	ความเสี่ยงที่ยอมรับได้ โดยต้องมีมาตรการควบคุม
Negligible	ความเสี่ยงเล็กน้อย ไม่ต้องดำเนินการใด ๆ

2.2.7 กิจกรรมงานบำรุงรักษาบริภัณฑ์ไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้า

กิจกรรมการบำรุงรักษาอุปกรณ์ระบบไฟฟ้าเป็นข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต (Original Equipment Manufacturer, OEM) ผู้ใช้งานต้องบำรุงรักษาตามคำแนะนำเพื่อให้อุปกรณ์เกิดความน่าเชื่อถือตามที่ผู้ผลิตได้ออกแบบไว้ กรณีที่อุปกรณ์ถูกออกแบบ ผลิต และติดตั้งเพื่อใช้งานแต่ไม่ระบุกิจกรรมบำรุงรักษาไว้ ผู้ใช้งานสามารถเลือกใช้งานบำรุงรักษาตามมาตรฐานได้[11]

ตารางที่ 2.6 ความถี่การบำรุงรักษาอุปกรณ์ไฟฟ้าสำหรับระบบรถไฟ

อุปกรณ์ไฟฟ้าสำหรับระบบรถไฟ	ความถี่การบำรุงรักษา (เดือน)
PM, GIS 69 kV Switchgear	1
PM, Power Transformer	1, 12
PM, MCB for Charger	3
PM, 24kV Switchgear	12
PM, Traction Substation	12
PM, Service Substation	12
PM, Short Circuit Device	12
PM, Trackside Switch	12
PM, Test run Diesel Generator	0.5
PM, Neural Grounding Resistor, NGR	12
PM, Diesel Generator Set	6, 12, 36
PM, Emergency Trip Switch, ETS	12
PM, MDB, MCCB for UPS	3
PM, Measure track to earth resistance	12
PM, Filter Plant	6
PM, SMS System	0.25, 1, 12
PM, Power Supply for Stinger System	6
PM, UPS & Batt	3, 6, 12, 36
PM, DC Charger & Battery	1, 3, 6, 12, 36
PM, Step-up Transformer & Switchgear of GEN	12
PM, Protection Relays	24
PM, Discharge UPS batteries	Y3

เมื่อนำบริภัณฑ์ไฟฟ้ามาติดตั้งใช้งานในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างจากสิ่งที่คุณผลิตแนะนำจะทำให้
อุปกรณ์เหล่านั้นมีความน่าเชื่อถือที่เปลี่ยนไป ดังนั้น เพื่อคงสภาพให้อุปกรณ์ทำงานได้อย่างมีความ
น่าเชื่อถือ กิจกรรมการบำรุงรักษาต้องได้รับการพิจารณาปรับปรุงให้สอดคล้องกับสภาพที่ใช้งานจริง

สภาพการใช้งานบริภัณฑ์ไฟฟ้าตามมาตรฐาน[11] มี 3 ลักษณะคือ ติดตั้งใช้งานภายนอกอาคารปราศจากสิ่งป้องกันมลภาวะที่มาจากสิ่งแวดล้อม (Poor Condition) ติดตั้งใช้งานภายในอาคารที่มีการระบายอากาศโดยพึ่งพาการหมุนเวียนอากาศตามธรรมชาติ (Average Condition) และติดตั้งใช้งานภายในอาคารที่มีระบบควบคุมสภาพแวดล้อมทั้งอุณหภูมิและความชื้น (Good Condition) เพื่อให้การใช้งานบริภัณฑ์ไฟฟ้าให้เกิดความน่าเชื่อถือสูงสุดสามารถปรับปรุงความถี่ในการบำรุงรักษาโดยใช้ตัวคูณตามตารางไขว้ตัวคูณความถี่งานบำรุงรักษาบริภัณฑ์ระบบไฟฟ้า[11]

ตารางที่ 2.7 ตารางไขว้ตัวคูณความถี่งานบำรุงรักษาบริภัณฑ์ระบบไฟฟ้า

EQUIPMENT RELIABILITY REQUIREMENT	EQUIPMENT CONDITION		
	POOR	AVERAGE	GOOD
LOW	1.0	2.0	2.5
MEDIUM	0.50	1.0	1.5
HIGH	0.25	0.50	0.75

2.3 การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะครอบคลุม

1. การศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบการล้มเหลวของอุปกรณ์
2. การศึกษาประเภทของงานบำรุงรักษา
3. การศึกษาการบำรุงรักษาเพื่อความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์

2.3.1 การศึกษาเกี่ยวกับรูปแบบการล้มเหลวของอุปกรณ์

งานวิจัยที่ค้นคว้ารูปแบบและความถี่การล้มเหลวของอุปกรณ์หรือระบบที่มีความซับซ้อนไม่มีความสัมพันธ์กับอายุการใช้งาน[3]ได้ถูกตีพิมพ์อย่างแพร่หลาย ตารางต่อไปนี้แสดงความถี่และรูปแบบการเกิดการล้มเหลวของอุปกรณ์ที่ค้นพบ

ตารางที่ 2.8 รูปแบบการล้มเหลวของอุปกรณ์และความถี่ที่เกิดขึ้น

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง				
รูปแบบการล้มเหลว	Brooberg, 1973 [7] (%)	UAL, 1978 [6] (%)	MSP, 1982 [8] (%)	SUBMEPP 2001 [9] (%)
ก	3	4	3	2
ข	1	2	17	10
ค	4	5	3	17
ง	11	7	6	9
จ	15	14	42	56
ฉ	66	68	29	6
รวม	100	100	100	100

งานศึกษาเพื่อกำหนดช่วงเวลาที่ชัดเจนสำหรับการค้นหาความล้มเหลวของชิ้นส่วนก่อนที่จะเกิดความล้มเหลวจนส่งผลกระทบต่อฟังก์ชันการทำงานของอุปกรณ์ ผลงานศึกษาที่ได้สามารถนำไปใช้กับความล้มเหลวที่ยังไม่แสดงผล (hidden failure) ซึ่งในกรณีนี้ต้องทำการประเมินความเป็นไปได้ที่ความล้มเหลวที่ยังไม่แสดงผลจะพัฒนาขึ้นจนเป็นสาเหตุทำให้ฟังก์ชันหลักของอุปกรณ์เกิดความล้มเหลว

Andrews and MOSS [12] ได้ทำการศึกษาเมื่อปี ค.ศ. 1993 เพื่อหาความเหมาะสมของช่วงเวลาที่แน่นอนที่ต้องดำเนินการค้นหาความล้มเหลวของชิ้นส่วนภายในของอุปกรณ์ก่อนที่ความล้มเหลวนั้นจะกระทบต่อฟังก์ชันการทำงานของอุปกรณ์ พบว่าความน่าเชื่อถือของฟังก์ชันการป้องกันความล้มเหลวซึ่งอยู่ในรูปของ MTBF ความไม่พร้อมใช้งานของอุปกรณ์ และช่วงเวลาสำหรับการค้นหาการเกิดความล้มเหลว มีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้นตามสมการ

$$\text{Unavailability} = 0.5 \times \left(\frac{\text{FFI}}{\text{MTBF}_{\text{pv}}} \right) \quad (2.25)$$

เมื่อ FFI คือ ช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับค้นหาความล้มเหลวของอุปกรณ์

MTBF_{pv} คือ ฟังก์ชันการป้องกันความล้มเหลวก่อนการเกิดความล้มเหลวของอุปกรณ์

ความสัมพันธ์เชิงเส้นนี้ใช้ได้เมื่อความไม่พร้อมใช้ของอุปกรณ์น้อยกว่า 5% และความสามารถในการบำรุงรักษาสอดคล้องกับสภาพปัจจุบันของอุปกรณ์ เนื่องจากสมการนี้ถูกสร้างขึ้นบนสมมติฐานที่ความไม่พร้อมใช้ของอุปกรณ์กระจายตัวต่อเนื่อง ความไม่พร้อมใช้ของอุปกรณ์จากสมการข้างต้น ไม่รวมความไม่พร้อมใช้เนื่องจากสาเหตุความจำเป็นที่ต้องทำอุปกรณ์ให้กลับคืนสู่การทำงานตามฟังก์ชันเมื่อถูกพบความล้มเหลว อย่างไรก็ตาม ระยะเวลาการค้นหาความเสี่ยงที่อาจก่อให้เกิดความล้มเหลวแล้วแก้ไขก่อนที่จะอุปกรณ์จะเกิดความล้มเหลวยังน้อยกว่าที่จะต้องดำเนินการแก้ไขเมื่อฟังก์ชันหลักของอุปกรณ์เกิดความล้มเหลว

SAE JA [13] ทำการศึกษาในปี 2002 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความน่าเชื่อถือของระบบที่ดำเนินการเพื่อป้องกันความล้มเหลวของอุปกรณ์ ฟังก์ชันการป้องกันของตัวอุปกรณ์ และความน่าจะเป็นที่จะเกิดความล้มเหลวของอุปกรณ์ขึ้นหลายครั้ง พบว่ามีความสัมพันธ์กันตามสมการ

$$FFI = 2 \times \left(\frac{MTBF_{mf} \times MTBF_{pt}}{PR_{mf}} \right) \quad (2.26)$$

เมื่อ FFI คือ ช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับค้นหาความล้มเหลวของอุปกรณ์
 $MTBF_{mf}$ คือ ฟังก์ชันการป้องกันก่อนการเกิดความล้มเหลวของอุปกรณ์หลายครั้ง
 $MTBF_{pt}$ คือ ฟังก์ชันการป้องกันก่อนการเกิดความล้มเหลวของอุปกรณ์ที่มีโอกาสเกิดความล้มเหลวขึ้น

NAVAIR [14] ทำการศึกษาในปี 2003 และถูกตีพิมพ์ผลการศึกษากลับมาเกี่ยวกับการหาความเป็นไปได้ที่จะเกิดความล้มเหลวของอุปกรณ์ขึ้นพร้อมกัน ความล้มเหลวที่ไม่แสดงผล และความล้มเหลวที่เกิดเพิ่มขึ้น โดยได้ผลการศึกษาดังสมการ

$$P_{mf} = P_h + P_{add} \quad (2.27)$$

เมื่อ P_{mf} คือ ความเป็นไปได้ที่จะเกิดความล้มเหลวขึ้นพร้อมกันของอุปกรณ์
 P_h คือ ความเป็นไปได้ที่จะเกิดความล้มเหลวขึ้นแต่ไม่แสดงผลให้ผู้ใช้งาน
 P_{add} คือ ความเป็นไปได้ที่จะเกิดความล้มเหลวเพิ่มขึ้นของอุปกรณ์
 $MTBF$ คือ ช่วงเวลาเฉลี่ยที่อุปกรณ์ไม่เกิดความล้มเหลวขึ้น

สมมติให้การเกิดความล้มเหลวแบบไม่แสดงผล P_h และ P_{add} มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ สมการที่ (2.27) สามารถใช้เป็นสมการเพื่อหาความเป็นไปได้ ณ ช่วงเวลาใดๆ ได้ดังนี้

$$P = 1 - e^{\left(\frac{-t}{MTBF}\right)} \quad (2.28)$$

เมื่อ

P คือ ความเป็นไปได้ที่จะเกิดความล้มเหลวขึ้น ณ เวลา t

t คือ ช่วงเวลาที่อาจจะเกิดความล้มเหลวขึ้น

MTBF คือ ช่วงเวลาเฉลี่ยที่อุปกรณ์ไม่เกิดความล้มเหลวขึ้น

MTBF สามารถประเมินได้โดยการกำหนดความเป็นได้ที่อุปกรณ์จะเกิดความล้มเหลวขึ้นอย่างเหมาะสมตลอดช่วงเวลาการใช้งานอุปกรณ์ เช่น การกำหนดช่วงชีวิตของการใช้งานอุปกรณ์ เป็นต้น

2.3.2 การศึกษาประเภทของงานบำรุงรักษา

การศึกษาของ Piotrowski [15] เมื่อปี 2001 ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสัดส่วนการบำรุงรักษาเชิงแก้ไข (Reactive Maintenance) การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) การบำรุงรักษาตามเงื่อนไขที่ได้จากการประเมิน (Predictive Maintenance)

การบำรุงรักษาเชิงแก้ไข

การบำรุงรักษาเชิงแก้ไขหรือกู้คืนระบบให้สามารถกลับมาใช้งานได้เมื่ออุปกรณ์เกิดความชำรุดขึ้นแล้ว ยังคงเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมสูงสุดในสหรัฐอเมริกา โดยผลการศึกษาพบว่าสัดส่วนการบำรุงรักษาแสดงดังนี้

- การบำรุงรักษาเชิงแก้ไขมีสัดส่วน >55%
- การบำรุงรักษาเชิงป้องกันมีสัดส่วนเป็น 31%
- การบำรุงรักษาตามเงื่อนไขมีสัดส่วนเป็น 12%
- วิธีการอื่นๆ มีสัดส่วนเป็น 2%

ข้อดี ต้นทุนต่ำและใช้จำนวนพนักงานน้อย

ข้อเสีย ต้นทุนการกู้คืนระบบสูงเมื่อเกิดความเสียหายขึ้นโดยไม่ทราบล่วงหน้า ทรัพยากรที่ใช้สำหรับการซ่อมบำรุงอาจไม่เพียงพอและอาจทำให้ความเสียหายที่เกิดจากการชำรุดนั้นเป็นต้นเหตุให้อุปกรณ์อื่นๆเสียหายตามไปด้วย

การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

การบำรุงรักษาเชิงป้องกันปกติจะดำเนินการตามเวลาที่ได้รับการวางไว้จากบริษัทผู้ผลิต ซึ่งเป็นวิธีการที่ทำให้ผู้ดูแลรักษาอุปกรณ์สามารถมั่นใจผลลัพธ์ที่ได้

ข้อดี อุปกรณ์จะสามารถทำงานได้ใกล้เคียงกับอุปกรณ์ต้นแบบมากที่สุด กิจกรรมการบำรุงรักษาเชิงป้องกันมีความยืดหยุ่นสามารถดำเนินการบำรุงรักษาได้ตามการเอื้ออำนวยของทรัพยากร วางแผนทางการเงินได้ สามารถเพิ่มอายุการใช้งานอุปกรณ์ได้ ประหยัดพลังงาน ลดช่วงเวลาที่อุปกรณ์เกิดความเสียหายลงได้ 12% ถึง 18% เมื่อเปรียบเทียบกับการบำรุงรักษาเชิงแก้ไขเพียงอย่างเดียว

ข้อเสีย ความชำรุดเสียหายที่รุนแรงยังสามารถเกิดขึ้นได้ การบำรุงรักษาเกินความจำเป็นอาจส่งผลให้อุปกรณ์ตกอยู่ในความเสี่ยงที่จะเกิดความชำรุดบกพร่องขึ้นเนื่องจากผู้ปฏิบัติงาน

การบำรุงรักษาตามเงื่อนไข

การบำรุงรักษาตามเงื่อนไขของอุปกรณ์เป็นการใช้เครื่องมือสำหรับวินิจฉัยเงื่อนไขการทำงานของอุปกรณ์ตลอดเวลา

ข้อดี ทำให้สามารถจัดการบำรุงรักษาได้โดยไม่ต้องมีการสำรองวัสดุเกินความจำเป็น สามารถวางแผนกำลังทรัพยากรเพื่อการบำรุงรักษาได้ ทำให้ความชำรุดเสียหายรุนแรงหายไปเนื่องจากอุปกรณ์ได้ผ่านการวินิจฉัยอย่างต่อเนื่อง ลดการจ้างพนักงานเพื่อบำรุงรักษาที่เกินความจำเป็น เพิ่มความปลอดภัยต่ออุปกรณ์ ต่อผู้ปฏิบัติงาน ลดการใช้พลังงานและลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอุปกรณ์ได้ประมาณ 8% ถึง 12% เมื่อเปรียบเทียบกับการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน ใ้บุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญในงานที่รับผิดชอบ

ข้อเสีย เสียค่าใช้จ่ายไปกับอุปกรณ์ เครื่องมือ และบุคลากรสำหรับวินิจฉัยอุปกรณ์ เพิ่มงบประมาณสำหรับพนักงานที่ต้องได้รับการฝึกอบรมเพื่อใช้เครื่องมือที่มีความพิเศษเฉพาะด้าน

2.3.3 การศึกษาการบำรุงรักษาเพื่อความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์

การบำรุงรักษาแบบ Reliability Centered Maintenance เริ่มมีแนวความคิดมาตั้งแต่ปี 1950 ที่ได้มีการพบว่า การบำรุงรักษาเชิงป้องกันไม่เพียงพอต่อการบำรุงรักษาชิ้นส่วนที่ซับซ้อนของเครื่องบิน ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาระบบการบำรุงรักษาที่ให้ความมั่นใจได้มากขึ้น จนกระทั่งในปี 1980 RCM จึงได้เริ่มถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมการบิน (United Airline) หลังจากนั้นจึงถูกนำไปประยุกต์ในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ และอุตสาหกรรมอื่นๆที่มีความเสี่ยงของอันตรายต่อทรัพย์สิน ชีวิต และสิ่งแวดล้อมสูง

การศึกษาของ Piotrowski¹ เมื่อปี 2001 ยังพบว่าการบำรุงรักษาระบบที่เหมาะสมควรให้น้ำหนักการบำรุงรักษา คือ การบำรุงรักษาเชิงแก้ไขไม่ควรเกิน 10% การบำรุงรักษาเชิงป้องกันควรอยู่ระหว่าง 25% ถึง 35% และให้น้ำหนักการบำรุงรักษาตามเงื่อนไขที่ประเมินได้จากสภาพที่แท้จริงของอุปกรณ์คือ 45% to 55%

ข้อดี เป็นวิธีการบำรุงรักษาที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ลดค่าใช้จ่ายจากการลดการบำรุงรักษาที่ไม่จำเป็น ลดความถี่ในการซ่อมบำรุง ลดโอกาสที่อุปกรณ์จะเกิดความชำรุดขึ้นอย่างทันทีทันใด สามารถให้ความสำคัญกับการบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่มีความสำคัญก่อนได้ รู้สาเหตุรากฐานของการเกิดความชำรุดและเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบโดยรวม

ข้อเสีย ค่าใช้จ่ายในการเริ่มต้นมีค่าสูง เนื่องจากพนักงานต้องได้รับการเข้าอบรมการใช้เครื่องมือพิเศษ อุปกรณ์พิเศษ เป็นต้น

NASA² ทำการศึกษาเมื่อปี 2000 เพื่อประมวลกลยุทธ์ที่เหมาะสมสำหรับการทำบำรุงรักษาโดยใช้หลักเกณฑ์ความวิกฤติ (criticality) ที่เกิดขึ้นเมื่ออุปกรณ์เกิดความชำรุดบกพร่องและมูลค่าความเสียหายซึ่งเกิดจากอุปกรณ์ชำรุด ได้ผลการศึกษาตามตาราง

ตารางที่ 2.9 ลำดับการบำรุงรักษาเพื่อความน่าเชื่อถือ

ลำดับการบำรุงรักษาเพื่อความน่าเชื่อถือ		
บำรุงรักษาเชิงแก้ไข	การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน	การบำรุงรักษาตามเงื่อนไข
อุปกรณ์หรือชิ้นส่วนขนาดเล็ก	อุปกรณ์ที่เกิดความล้า (Wear) ตามอายุการใช้งาน	อุปกรณ์ที่มีอัตราการชำรุดเป็นแบบสุ่ม
อุปกรณ์ที่ไม่มีความวิกฤติเมื่อชำรุด	อุปกรณ์ที่ใช้แล้วทิ้ง	อุปกรณ์ที่มีความสำคัญขึ้นวิกฤติเมื่อเกิดการชำรุด
อุปกรณ์ที่มีความเป็นไปได้ที่จะไม่ชำรุด	อุปกรณ์ที่รู้อัตราการชำรุดแน่ชัด	อุปกรณ์ที่ไม่เสื่อมตามเวลา
อุปกรณ์ที่มีระบบสำรองทำงานแทนเมื่อชำรุด	ตามคำแนะนำจากผู้ผลิต	ระบบที่อาจเกิดความชำรุดขึ้นเนื่องจากซ่อมบำรุงเชิงป้องกันไม่ถูกวิธี

¹ Piotrowski, J., Pro-Active Maintenance for Pumps, Archives, February 2001

² NASA. Reliability Centred Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment. National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C. 2000

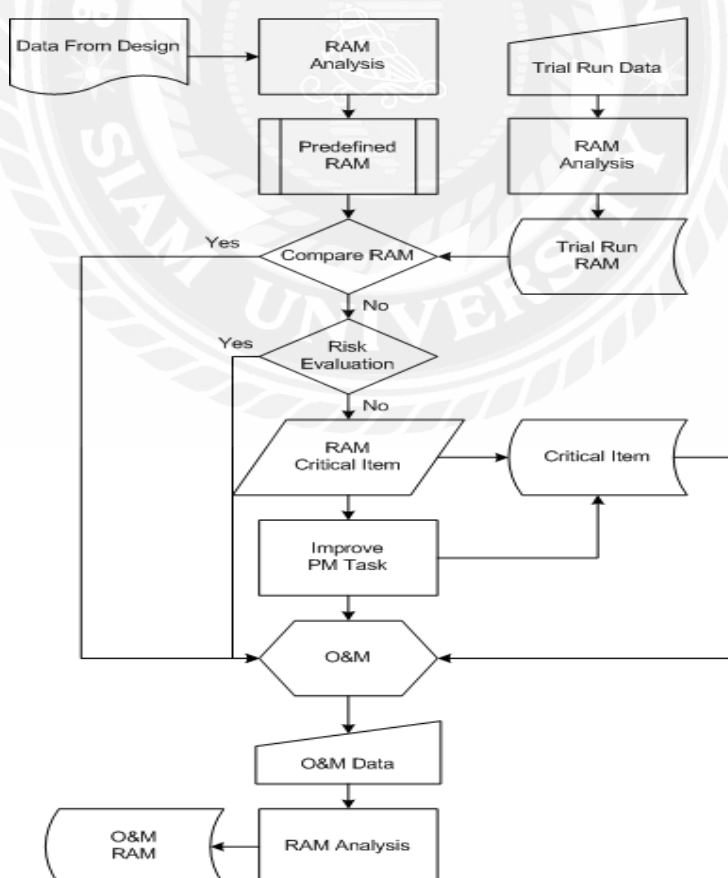
บทที่ 3

วิธีดำเนินการศึกษา

การศึกษาเพื่อปรับปรุงความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้าด้วยการบำรุงรักษาเป็นการศึกษาความล้มเหลวของอุปกรณ์ที่ส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่วงทดลองให้บริการ โดยมีการประเมินระดับความเสี่ยงของอุปกรณ์ที่เกิดความล้มเหลวขึ้นและส่งผลกระทบต่อความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้า ทั้งนี้จะมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกิจกรรมการบำรุงรักษาอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าให้สอดคล้องกับความเสี่ยงจากการใช้งานในระบบรถไฟฟ้า พร้อมทั้งการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้าด้วยโดยค่าความน่าเชื่อถือ ความพร้อมใช้ของอุปกรณ์และความสามารถในการบำรุงรักษา ต้องมีสมรรถนะใกล้เคียงการออกแบบหรือต้องสูงขึ้น

3.1 ภาพรวมวิธีการทำการวิจัย

การศึกษานี้มีขั้นตอนการทำงานเพื่อประเมินความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าและปรับปรุงกิจกรรมบำรุงรักษาเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้า ตามรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพวิธีการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการทำงานวิจัยนี้เริ่มต้นด้วยการศึกษาความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ที่มีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าโดยใช้ข้อมูลจากการออกแบบ (Predefined RAM) เปรียบเทียบกับความน่าเชื่อถือที่เกิดขึ้นจริงในระบบรถไฟฟ้าช่วงทดลองให้บริการ (Trial Run Data) อุปกรณ์ใดที่มีความน่าเชื่อถือดีกว่าที่ได้รับการออกแบบไว้สามารถนำไปใช้งานร่วมกับการบำรุงรักษา (Operation and Maintenance, O&M) หากอุปกรณ์ใดเกิดความล้มเหลวขึ้นซึ่งอาจส่งผลถึงความน่าเชื่อถือโดยรวมของระบบรถไฟฟ้าจะถูกประเมินระดับความเสี่ยง ถ้าระดับความเสี่ยงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ อุปกรณ์จะถูกนำไปใช้งานร่วมกับการบำรุงรักษาต่อไป ถ้าระดับความเสี่ยงอยู่ในระดับสูงซึ่งไม่สามารถยอมรับได้ อุปกรณ์ที่มีความเสี่ยงสูงจะถูกบันทึกไว้เป็นอุปกรณ์ที่ต้องมีมาตรการเฝ้าระวังในขั้นตอนการใช้งาน อุปกรณ์นั้นจะถูกปรับปรุงรายการกิจกรรมสำหรับการบำรุงรักษาเพื่อลดระดับความเสี่ยงให้อยู่ในระดับต่ำที่สุดที่สามารถยอมรับได้อย่างสมเหตุสมผลในทางปฏิบัติ (ALARP) แล้วจึงนำเข้าไปใช้งานพร้อมกับบำรุงรักษาตามรายการที่ถูกปรับปรุงแล้ว ในระหว่างการใช้งานและบำรุงรักษาต้องประเมินความน่าเชื่อถือตลอดช่วงอายุการใช้งานระบบ

ตารางที่ 3.1 ตัวชี้วัดความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้า

RAM	สัญลักษณ์	ความหมาย
Reliability	TSU	ความไม่พร้อมให้บริการระบบรถไฟฟ้าตามตารางเวลาการให้บริการระบบรถไฟฟ้าเนื่องจากความล้มเหลวของอุปกรณ์ไฟฟ้า (Target=0.35%)[18]
	TSD	การให้บริการระบบรถไฟฟ้าด้วยความล่าช้าเกินกว่าที่กำหนดตามตารางเวลาการให้บริการระบบรถไฟฟ้าเนื่องจากความล้มเหลวของอุปกรณ์ไฟฟ้า (Target=0.25%)[18]
Availability	A	ความพร้อมใช้ของระบบรถไฟฟ้า (Target=99.5%)[17]
Maintainability	PME	ผลการวิเคราะห์ความสำเร็จในการทำการบำรุงรักษาตามแผนงานการบำรุงรักษา (Target=95.0%)
	CME	ผลการวิเคราะห์ความสำเร็จในการทำการบำรุงรักษาฉุกเฉิน (Target=95.0%)

3.2 คุณภาพการให้บริการระบบรถไฟฟ้าจากการออกแบบระบบไฟฟ้า

การพิจารณาคุณภาพการให้บริการระบบไฟฟ้าจากการออกแบบระบบไฟฟ้า เป็นประเมินความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้าด้วยการพิจารณาคุณภาพการให้บริการแก่สาธารณะ ตัวแปรอิสระที่ประเมินคือความไม่พร้อมใช้งานของระบบรถไฟฟ้าสอดคล้องกับตารางเวลาให้บริการที่ผู้ให้บริการประกาศไว้ (TSU) ซึ่งอาจรวมถึงช่วงเวลาสำหรับเข้าทำการบำรุงรักษาอุปกรณ์งานระบบตามแผนงาน และตัวแปรด้านความตรงต่อเวลาของการให้บริการ (TSD)

ตารางที่ 3.2 คุณภาพการให้บริการระบบรถไฟฟ้าและการออกแบบระบบไฟฟ้า

ตัวชี้วัด	คำอธิบาย
TSU	ความไม่พร้อมให้บริการในแต่ละเดือนจะต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.5% [17] และ[18]
TSD	ความล่าช้าของการให้บริการในแต่ละเดือนจะต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.5% [17] และ [18]

3.3 ความพร้อมใช้ของบริภัณฑ์ไฟฟ้าของระบบรถไฟฟ้า

การออกแบบระบบที่มีความซับซ้อนเป็นการนำเอาอุปกรณ์พื้นฐานเข้ามาประกอบเข้าด้วยกันเป็นระบบย่อยของระบบ (Subsystem of System) ความพร้อมใช้งานของอุปกรณ์แต่ละตัวจะมีค่าไม่เท่ากัน ข้อมูลที่มักจะถูกนำไปใช้เพื่อประเมินความพร้อมใช้ของอุปกรณ์คือ อัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ (Failure Rate) และระยะเวลาที่สามารถใช้งานอุปกรณ์ได้โดยอุปกรณ์นั้นจะไม่เกิดความล้มเหลวขึ้น (MTBF)

ตารางที่ 3.3 ความน่าเชื่อถือของบริภัณฑ์ระบบไฟฟ้า

Name	MTBF [hr]	Failure Rate [1/hr]
High Voltage – Gas Insulated Switchgear		
GAS Circuit Breaker	6.42E+04	1.56E-05
Disconnecter	2.17E+04	4.60E-05
Earthing Switch	2.17E+04	4.60E-05
Disconnecting Device	2.17E+04	4.60E-05
Voltage Transformer	6.65E+06	1.50E-07
Current Transformer	5.85E+05	1.71E-06
Voltmeter	4.28E+04	2.34E-05
Ammeter	5.37E+05	1.86E-06
Wathour Meter	6.42E+04	1.56E-05
Function Indicator	2.93E+04	3.41E-05
Gas Density Monitor	7.15E+04	1.40E-05

ตารางที่ 3.3 ความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ระบบไฟฟ้า (ต่อ)

Name	MTBF [hr]	Failure Rate [1/hr]
Miniature Current Breaker	6.89E+05	1.45E-06
Auxiliary Relay	2.13E+06	4.69E-07
LED Lamp	1.10E+06	9.12E-07
Control and Protection Panel		
Protection Relay	2.15E+07	4.66E-08
Multi Meter	4.54E+05	2.20E-06
I/O Box	4.07E+06	2.46E-07
Miniature Current Breaker	4.42E+05	2.26E-06
Auxiliary Relay	4.77E+05	2.10E-06
LED Lamp	1.69E+05	5.93E-06
Optical Repeater	1.69E+05	2.14E-06
Main Transformer		
Transformer Tank	2.63E+05	3.81E-06
Insulating Oil	5.99E+05	1.67E-06
On-Load Tap Changer	1.71E+04	5.84E-05
Tap Position Indicator	2.33E+05	4.29E-06
Oil Level Gauge	2.33E+05	4.29E-06
Buchholz Relay	2.13E+06	4.69E-07
Temperature Meter	4.28E+04	2.34E-05
Lightning Arrester	2.14E+04	4.67E-05
Cooling Fan	8.63E+04	1.16E-05
Dehydrating Breather	1.80E+06	5.57E-07
Miniature Current Breaker	6.89E+05	1.45E-06
Auxiliary Relay	2.13E+06	4.69E-07

ตารางที่ 3.3 ความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ระบบไฟฟ้า (ต่อ)

Name	MTBF [hr]	Failure Rate [1/hr]
LED Lamp	1.10E+06	9.12E-07
Main Transformer AVR Panel		
Voltage Regulating Relay	1.71E+04	5.84E-05
Voltmeter	4.28E+04	2.34E-05
Miniature Current Breaker	6.89E+05	1.45E-06
Auxiliary Relay	2.13E+06	4.69E-07
LED Lamp	1.10E+06	9.12E-07
Neutral Grounding Resistor		
Resistor	1.15E+08	8.70E-09
Current Transformer	5.85E+05	1.71E-06
115kV Disconnecter and Earthing Switch		
Disconnecter	2.17E+04	4.60E-05
Earthing Switch	2.17E+04	4.60E-05
Miniature Current Breaker	6.89E+05	1.45E-06
24kV Gas Insulated Switchgear		
Vacuum Circuit Breaker (for loop main feed)	6.89E+05	1.45E-06
3-Position Disconnecter	1.83E+05	5.47E-06
Voltage Transformer	6.65E+06	1.50E-07
Current Transformer	5.85E+05	1.71E-06
Multi-Function Protection Relay	2.13E+06	4.69E-07
Transducer	1.21E+06	8.26E-07
Voltage Indicator	2.14E+04	4.67E-05
Gas Density monitor	7.15E+04	1.40E-05

ตารางที่ 3.3 ความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ระบบไฟฟ้า (ต่อ)

Name	MTBF [hr]	Failure Rate [1/hr]
Miniature Current Breaker	6.89E+05	1.45E-06
Auxiliary Relay	2.13E+06	4.69E-07
LED Lamp	1.10E+06	9.12E-07
Vacuum Circuit Breaker (for incoming feeder and associated assembly)	6.89E+05	1.45E-06
Vacuum Circuit Breaker (for Rectifier transformer and trackside)	6.89E+05	1.45E-06
Vacuum Circuit Breaker (for Service transformer)	6.89E+05	1.45E-06
Vacuum Circuit Breaker (for Generator)	6.89E+05	1.45E-06
Vacuum Circuit Breaker (at TSS09)	6.89E+05	1.45E-06
Battery Charger for 125V DC		
Isolated Transformer	1.00E+06	1.00E-06
Lightning Arrestor	5.00E+04	2.00E-05
Circuit Breaker	1.00E+05	1.00E-05
Thyristor	1.00E+05	1.00E-05
Surge Suppressor	1.08E+05	9.26E-06
Alarm & Relay Board	5.00E+04	2.00E-05
Control Board	5.00E+04	2.00E-05
Ammeter	1.00E+05	1.00E-05
Voltmeter	1.00E+05	1.00E-05
LED Lamp	2.00E+05	5.00E-06
Miniature Current Breakers (in Distribution Board)	2.00E+08	5.00E-09
Steps Dropper	2.00E+08	5.00E-09

ตารางที่ 3.3 ความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ระบบไฟฟ้า (ต่อ)

Name	MTBF [hr]	Failure Rate [1/hr]
Ground Detector	2.13E+06	4.69E-07
Battery for 125V DC		
Battery	4.72E+05	2.12E-06
Battery Charger for 110V DC		
Isolated Transformer	1.00E+06	1.00E-06
Lightning Arrestor	5.00E+04	2.00E-05
Circuit Breaker	1.00E+05	1.00E-05
Thyristor	1.00E+05	1.00E-05
Surge Suppressor	1.08E+05	9.26E-06
Alarm & Relay Board	5.00E+04	2.00E-05
Control Board	5.00E+04	2.00E-05
Ammeter	1.00E+05	1.00E-05
Voltmeter	1.00E+05	1.00E-05
LED Lamp	2.00E+05	5.00E-06
Miniature Current Breakers (in Distribution Board)	2.00E+08	5.00E-09
Step Dropper	2.00E+08	5.00E-09
Low Battery Cutoff	2.13E+06	4.69E-07
Battery for 110V DC		
Battery Block	7.39E+04	1.35E-05
RMU		
Vacuum Circuit Breaker	6.89E+05	1.45E-06
3-Position Loadbreak Switch	2.17E+04	4.60E-05
3-Position Disconnect	2.17E+04	4.60E-05
Power Fuse	7.82E+05	1.28E-06

ตารางที่ 3.3 ความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ระบบไฟฟ้า (ต่อ)

Name	MTBF [hr]	Failure Rate [1/hr]
Earthing Switch	2.17E+04	4.60E-05
Voltage Transformer	6.65E+06	1.50E-07
Current Transformer	5.85E+05	1.71E-06
Protection Relay	2.13E+06	4.69E-07
Voltage Indicator	2.93E+04	3.41E-05
Ground Fault Indicator	2.14E+04	4.67E-05
Gas Density Monitor	7.15E+04	1.40E-05
Miniature Current Breaker	6.89E+05	1.45E-06
Auxiliary Relay	2.13E+06	4.69E-07
LED Lamp	1.10E+06	9.12E-07
Service Transformer		
Auxiliary Transformer	1.99E+05	5.02E-06
Temperature Meter	8.65E+04	1.16E-05
AC & DC Distribution Panel		
Voltmeter	4.28E+04	2.34E-05
Ammeter	5.37E+05	1.86E-06
Miniature Current Breaker	6.89E+05	1.45E-06
Auxiliary Relay	2.13E+06	4.69E-07
LED Lamp	1.10E+06	9.12E-07
Fuse	7.82E+05	1.28E-06
Emergency Generator		
Generator	1.89E+04	5.30E-05
Engine	1.95E+04	5.14E-05
Diesel Tank (Fuel System)	2.63E+05	3.81E-06

ตารางที่ 3.3 ความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ระบบไฟฟ้า (ต่อ)

Name	MTBF [hr]	Failure Rate [1/hr]
Air Inlet Sound Attenuator	1.89E+04	5.30E-05
Air Outlet Sound Attenuator	1.89E+04	5.30E-05
Radiator	9.62E+04	1.04E-05
Control Panel	1.52E+04	6.56E-05
Miniature Current Breaker	6.89E+05	1.45E-06
Auxiliary Relay	2.13E+06	4.69E-07
LED Lamp	1.10E+06	9.12E-07
Fuse	7.82E+05	1.28E-06
Lube Oil System	2.14E+04	4.67E-05
Chemical Dosing Unit	7.15E+04	1.40E-05
Uninterruptible Power Supply		
Auxiliary Contact	9.43E+05	1.06E-06
MCB	6.89E+05	1.45E-06
Isolate Switch	2.17E+04	4.60E-05
Manual Bypass Switch	6.67E+06	1.50E-07
Automatic Bypass Switch (static Bypass switch)	8.77E+04	1.14E-05
Invertor	1.28E+05	7.78E-06
Rectifier	2.06E+06	4.85E-07
MCCB	6.89E+05	1.45E-06
Battery	7.39E+04	1.35E-05
Fuse	7.82E+05	1.28E-06
LED Lamp	1.10E+06	9.12E-07

ตารางที่ 3.3 ความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ระบบไฟฟ้า (ต่อ)

Name	MTBF [hr]	Failure Rate [1/hr]
Step Up Transformer		
Dry Transformer	1.99E+05	5.02E-06
Temperature Meter	8.65E+04	1.16E-05
Interface Terminal Board		
Terminal Board	5.14E+05	1.95E-06
PLC Automatic Change Over System		
PLC Panel	1.23E+05	8.13E-06
Rectifier Transformer		
Dry Transformer	9.49E+07	1.05E-08
Temperature Meter	8.65E+04	1.16E-05
Rectifier		
Diode	5.00E+06	2.00E-07
Diode Fuse	7.82E+05	1.28E-06
Lightning Arrester	2.14E+04	4.67E-05
Frame Leakage	2.14E+04	4.67E-05
Miniature Current Breaker	6.89E+05	1.45E-06
Auxiliary Relay	2.13E+06	4.69E-07
LED Lamp	1.10E+06	9.12E-07
Thermostat	8.65E+04	1.16E-05
Base Load Resistor	1.15E+08	8.70E-09
750V DC Switchgear		
High Speed Circuit Breaker	6.89E+05	1.45E-06
Shunt	7.15E+04	1.40E-05

ตารางที่ 3.3 ความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ระบบไฟฟ้า (ต่อ)

Name	MTBF [hr]	Failure Rate [1/hr]
Lightning Arrester	2.14E+04	4.67E-05
DC Protection relay	2.13E+06	4.69E-07
Circuit Breaker Control Module (CBCM)	6.42E+04	1.56E-05
Fuse	7.82E+05	1.28E-06
Flame Leakage	2.14E+04	4.67E-05
DC Voltage meter	2.93E+04	3.41E-05
Transducer	1.21E+06	8.26E-07
Miniature Current Breaker	6.89E+05	1.45E-06
DC/DC Converter	1.54E+04	6.50E-05
Auxiliary Relay	2.13E+06	4.69E-07
LED Lamp	1.10E+06	9.12E-07
Bypass panel		
Load Break Switch	5.10E+05	1.96E-06
Lightning Arrester	1.00E+08	1.00E-08
Miniature Current Breaker	1.00E+08	1.00E-08
DC/DC Converter	1.54E+04	6.50E-05
Auxiliary Relay	2.13E+06	4.69E-07
LED Lamp	1.10E+06	9.12E-07
Negative Return Panel		
Disconnecter	8.33E+06	1.20E-07
Shunt	7.15E+04	1.40E-05
Lightning Arrester	1.00E+08	1.00E-08
Transducer	8.26E+05	1.21E-06
Ammeter	5.00E+05	2.00E-06

ตารางที่ 3.3 ความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ระบบไฟฟ้า (ต่อ)

Name	MTBF [hr]	Failure Rate [1/hr]
Miniature Current Breaker	1.00E+08	1.00E-08
DC/DC Converter	1.54E+04	6.50E-05
Auxiliary Relay	2.13E+06	4.69E-07
LED Lamp	1.10E+06	9.12E-07
Voltage Limiting Device		
Contactor	5.95E+05	1.68E-06
Shunt	7.15E+04	1.40E-05
Transducer	8.26E+05	1.21E-06
Control and Protection Unit	1.92E+05	5.21E-06
Miniature Current Breaker	1.00E+06	1.00E-06
DC/DC Converter	1.54E+04	6.50E-05
Auxiliary Relay	2.13E+06	4.69E-07
LCD Display	3.00E+04	3.33E-05
Load Break Switch		
Load Break Switch	6.89E+05	1.45E-06
Lightning Arrester	2.14E+04	4.67E-05
Miniature Current Breaker	6.89E+05	1.45E-06
DC/DC Converter	1.54E+04	6.50E-05
Auxiliary Relay	2.13E+06	4.69E-07
LED Lamp	1.10E+06	9.12E-07
Disconnect Switch		
Disconnecter	8.33E+06	1.20E-07
Lightning Arrester	1.00E+08	1.00E-08

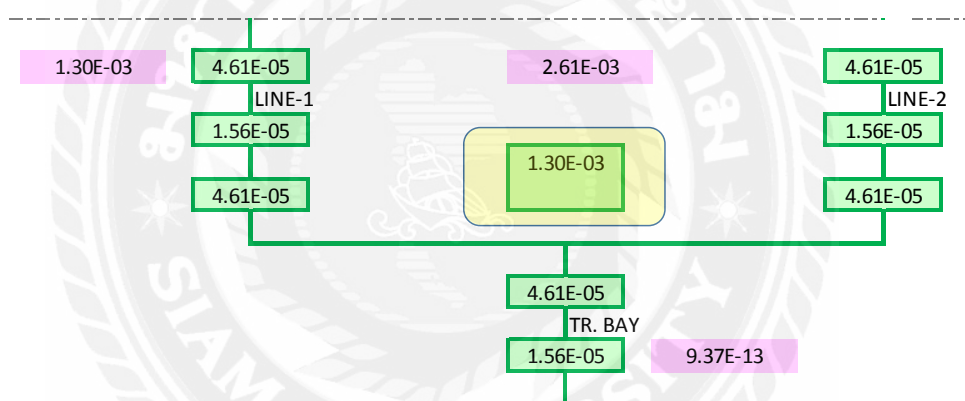
ตารางที่ 3.3 ความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ระบบไฟฟ้า (ต่อ)

Name	MTBF [hr]	Failure Rate [1/hr]
Voltage Relay	5.00E+05	2.00E-06
Miniature Current Breaker	1.00E+08	1.00E-08
DC/DC Converter	1.21E+06	8.26E-07
Auxiliary Relay	2.13E+06	4.69E-07
LED Lamp	1.10E+06	9.12E-07
Stinger Panel		
Load Break Switch	6.89E+05	1.45E-06
Disconnect Switch	6.89E+05	1.45E-06
Fuse	7.82E+05	1.28E-06
Lightning Arrester	2.14E+04	4.67E-05
Miniature Circuit Breaker	6.89E+05	1.45E-06
LED Lamp	1.10E+06	9.12E-07
Emergency Trip Switch for Emergency Trip System		
Push Button	2.19E+05	4.57E-06
Lamp Test Button	2.33E+05	4.29E-06
Relay Panel for Emergency Trip System		
Miniature Circuit Breaker	1.00E+06	1.00E-06
Auxiliary Relay	2.13E+06	4.69E-07
LED Lamp	1.10E+06	9.12E-07
Stray Current Monitoring System		
Multi-Function Protection Relay	2.13E+06	4.69E-07
Central Evaluation Unit	2.14E+04	4.67E-05

ประเมินปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพการให้บริการทั้ง TSU และ TSD จากการชำรุดบกพร่องของอุปกรณ์ช่วงการออกแบบระบบไฟฟ้าเท่านั้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการประเมินความพร้อมใช้ของอุปกรณ์ Availability จาก Reliability Block Diagrams ของอุปกรณ์ ประเมินความพร้อมใช้ของระบบไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้าจากข้อมูลการออกแบบด้วยวิธีการ Part-Count-Method [MIL-STD-217E][4] และวิธีการประเมินด้วย Reliability Block Diagram ได้เท่ากับ 0.46 ชั่วโมงทำงานต่อเดือน หรือคิดเป็นความพร้อมใช้ 99.917% ซึ่งมีค่าสูงกว่าเงื่อนไขตามสัญญาที่รัฐบาลสิงคโปร์กำหนด[17] ที่ 99.50% เพื่อใช้เป็นเป้าหมายกำกับดูแลผู้ให้บริการระบบรถไฟฟ้า

ตัวอย่างการประเมิน λ ของอุปกรณ์ด้วยทฤษฎี Function Box Diagram เช่น Gas Switching Unit (GSU) ประกอบด้วยอุปกรณ์ คือ Gas Circuit Breaker, Circuit Breaker, Earthing Switch และ Disconnecting Switch ซึ่งมีข้อมูลเฉพาะตัวดังนี้

เมื่อนำอุปกรณ์ดังกล่าวต่อใช้งานเป็นระบบ จึงสามารถประเมิน λ ของระบบได้ตามตัวอย่างต่อไปนี้



รูปที่ 3.2 การประเมิน λ ของระบบ

จากการประเมินด้วยวิธีการข้างต้นจะทำให้เราทราบว่าระบบจะมีโอกาสที่จะเกิดความล้มเหลวขึ้นสูงสุด $9.25E-5$ ครั้งต่อชั่วโมง

ตารางที่ 3.4 โอกาสที่จะเกิดความล้มเหลว

Location	System	Failure Rate(λ)	MTBF (Hrs)
Terminal Station	TSS NB	4.63E-05	21592.6
	TSS SB	4.63E-05	21592.6
	SSS	5.55E-71	Infinite
Typical Station	TSS NB	9.25E-05	10813.5
	TSS SB	9.25E-05	10813.5
	SSS	5.55E-71	Infinite

ดังนั้นเมื่อสมมุติว่าเกิดความล้มเหลวขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการเวลาในการกู้คืนระบบนานที่สุด คือ 9 ชั่วโมงต่อครั้งทำให้สามารถประเมินความเชื่อถือได้ของระบบได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.5 การประเมินความน่าเชื่อถือได้ของระบบ

Terminal Station	RAM	Designed
	R	99.958%
	A	99.958%
	M	100.00%
Typical Station	RAM	Designed
	R	99.917%
	A	99.917%
	M	100.00%

เมื่อระบบรถไฟให้บริการ 18.5 ชั่วโมงต่อวัน หรือ 555 ชั่วโมงต่อเดือน จะทำให้ทราบว่าระบบ จะไม่มีโอกาสเกิดความล้มเหลวสูงสุดเท่ากับ 99.917% ดังนั้นสามารถคำนวณหาค่าความพร้อมใช้ของระบบได้ดังนี้

ตารางที่ 3.6 ค่าความพร้อมใช้ของระบบ

	Monthly	Yearly	Unit
Operating Hours =	555.0	6,660.0	hrs
Availability =	99.917%	99.917%	
Unavailability =	0.46	5.53	hrs
Unavailability =	1,660	19,924	sec
Average Headway =	333.0	333.0	sec
Cancelled Trian Trip per Month =	3	30	Trian Trip
Scheduled Trian Trip per Month =	12160	145,920	Trian Trip
Trian Service Unavailability (TSU) =	0.025%	0.021%	
Unavailability =	0.46	5.53	hrs
Unavailability =	1,660	19,924	sec
Time Service per Train trip =	4800	4800	sec
Delayed Train Trip =	1	5	Trian Trip
Scheduled Train Trip per Month =	12160	145,920	Trian Trip
Trian Service Delay (TSD) =	0.008%	0.003%	

จากสมการ

$$TSU = \frac{Canceled\ Trian\ Trip}{Scheduled\ Trian\ Trip}$$

$$= \frac{3}{12160} \times 100\%$$

ดังนั้น

$$TSU = 0.025\%$$

หรือ ระบบสามารถให้บริการได้ $100\% - 0.025\% = 99.975\%$ ต่อเดือน

สำหรับ TSD คือเป้าหมายความล่าช้าการเข้าจอดที่สถานีของระบบรถไฟฟ้ากำหนดไว้เป็น 0.5% และประเมินความสามารถในการบำรุงรักษานบนพื้นฐานการจัดสรรกำลังคนและอุปกรณ์ไว้อย่างเพียงพอในแผนงานการบำรุงรักษา Maintenance Service Plan ดังนั้น Maintainability จากการออกแบบจึงคิดเป็น 100%

จากสมการ

$$TSD = \frac{\text{Delayed Trian Trip}}{\text{Scheduled Trian Trip}}$$

$$= \frac{1}{12160} \times 100\%$$

ดังนั้น

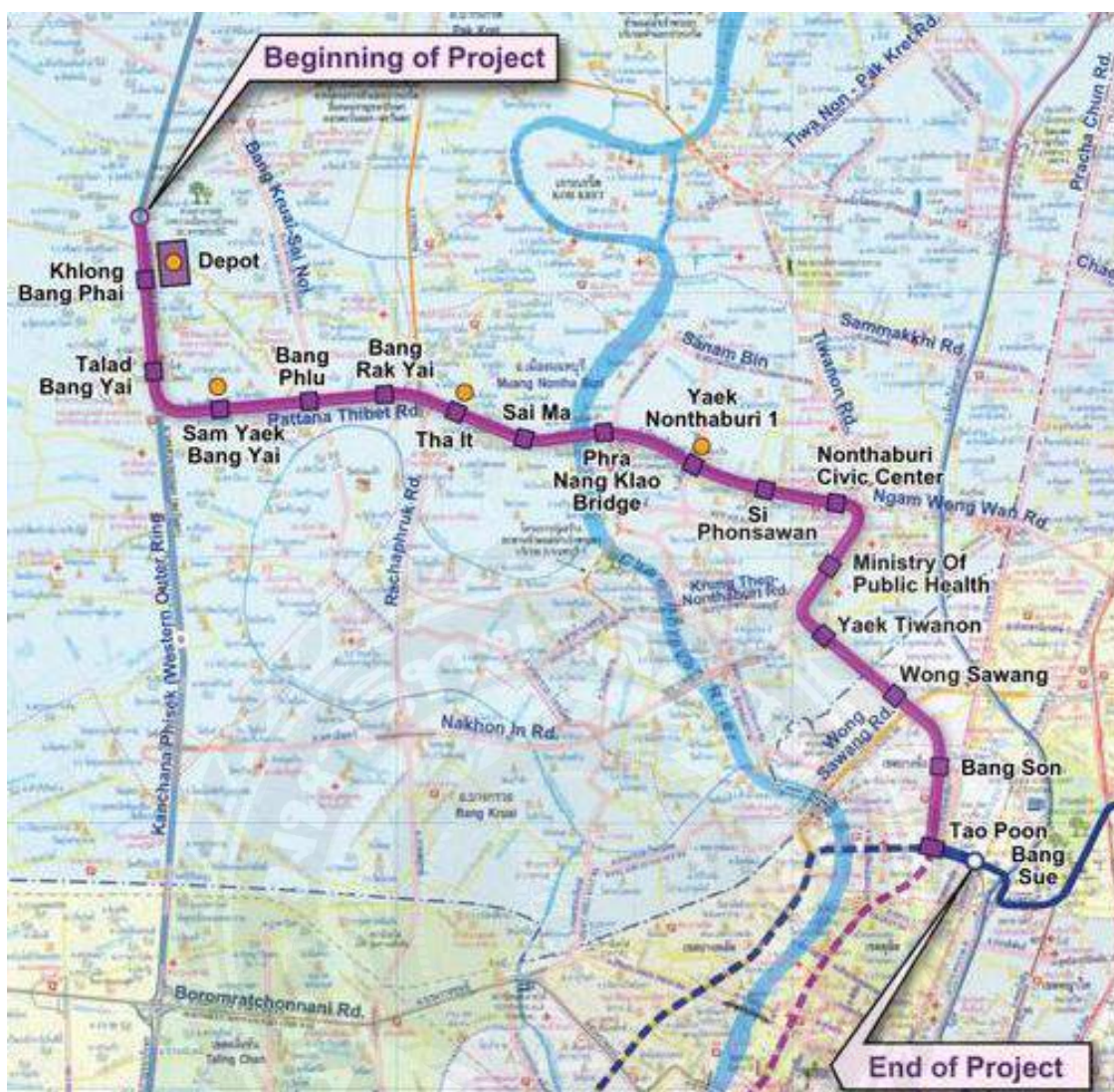
$$TSD = 0.008\%$$

หรือ ระบบสามารถให้บริการได้โดยไม่ล่าช้า $100\% - 0.008\% = 99.992\%$ ต่อเดือน

สำหรับความสามารถในการบำรุงรักษา Maintainability ในช่วงออกแบบประเมินว่าการวางแผนได้ทำการประเมินการใช้ทรัพยากรอย่างเพียงพอต่อการบำรุงรักษาจึงทำให้สามารถบำรุงรักษาระบบได้ 100% ทั้งการบำรุงรักษาตามแผนและการบำรุงรักษาฉุกเฉินเพื่อกู้คืนระบบ

3.4 ประเมินความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้าช่วงทดลองให้บริการ

โครงการรถไฟฟ้าสายหนึ่งมีแนวทางวิ่งให้บริการตลอดแนวกลางถนน มีจุดเริ่มต้นบนถนนกาญจนาภิเษก สถานีแรกคือ สถานีคลองบางไผ่ เลี้ยวขวาเข้าสู่ถนนรัตนธิเบศร์ เลี้ยวขวาเข้าสู่ถนนติวานนท์ เลี้ยวซ้ายเข้าสู่ถนนกรุงเทพ-นนทบุรี ถนนประชาราษฎร์ และถนนประชาราษฎร์ 2 ใช้ระบบรถไฟฟ้ารางหนัก (Heavy Rail) แบบเดียวกับสายสีเขียวและสีน้ำเงิน



รูปที่ 3.3 ตัวอย่างแนวเส้นทางให้บริการระบบรถไฟฟ้า

การศึกษานี้เก็บข้อมูลจากการรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย กำหนดการเปิดทดลองให้บริการ ระบบรถไฟฟ้าสายหนึ่งในเดือน มิ.ย - ก.ค 2559 ก่อนจะเปิดให้บริการจริงในวันที่ 6 ส.ค. 59 แบ่งเป็น 6 รอบโดยมีรายละเอียดดังนี้

การทดลองให้บริการระบบรถไฟฟ้า รฟม เปิดให้ประชาชนลงทะเบียนรับบัตรที่ 3 สถานี คือ สถานีคลองบางไผ่ สถานีแยกถนนพหลโยธิน และสถานีเตาปูน โดยผู้โดยสาร 1 ท่านรับบัตรได้ 3 ใบ สำหรับเดินทาง 3 วันของสัปดาห์ถัดไป โดยบัตร 1 ใบ ใช้เดินทางพร้อมกันได้ 2 คน ซึ่ง รฟม จะให้บัตรจำนวน 5,000 ใบ และทดลองให้บริการ 15,000 คนต่อสัปดาห์

รอบที่ 1 วันที่ 5 มิ.ย 59 เวลา 7.00-9.00 น.

ทดลองให้บริการ 13, 15, 17 มิ.ย 59

รอบที่ 2 วันที่ 12 มิ.ย 59 เวลา 7.00-9.00 น.

ทดลองให้บริการ 20, 22, 24 มิ.ย 59

รอบที่ 3 วันที่ 19 มิ.ย 59 เวลา 7.00-9.00 น.

ทดลองให้บริการ 27, 29 มิ.ย และ 1 ก.ค 59

รอบที่ 4 วันที่ 26 มิ.ย 59 เวลา 7.00-9.00 น. และ 16.00-18.00 น.

ทดลองให้บริการ 4, 6, 8 ก.ค 59

รอบที่ 5 วันที่ 3 ก.ค.59 เวลา 7.00-9.00 น. และ 16.00-18.00 น.

ทดลองให้บริการ 11, 13, 15 ก.ค.59

รอบที่ 6 วันที่ 10 ก.ค 59 เวลา 7.00-9.00 น. และ 16.00-18.00 น.

ทดลองให้บริการ 18, 20, 22 ก.ค 59

ตารางการลงทะเบียนบัตรโดยสาร					
 รอบที่ 1 วันที่ 5 มิถุนายน 2559 ทดลองให้บริการ 13, 15, 17 มิถุนายน 2559 เวลา 07:00 - 09:00 น.	 รอบที่ 2 วันที่ 12 มิถุนายน 2559 ทดลองให้บริการ 20, 22, 24 มิถุนายน 2559 เวลา 07:00 - 09:00 น.	 รอบที่ 3 วันที่ 19 มิถุนายน 2559 ทดลองให้บริการ 27, 29 มิถุนายน และ 1 กรกฎาคม 2559 เวลา 07:00 - 09:00 น.	 รอบที่ 4 วันที่ 26 มิถุนายน 2559 ทดลองให้บริการ 4, 6, 8 กรกฎาคม 2559 เวลา 07:00 - 09:00 น. และ 16:00 - 18:00 น.	 รอบที่ 5 วันที่ 3 กรกฎาคม 2559 ทดลองให้บริการ 11, 13, 15 กรกฎาคม 2559 เวลา 07:00 - 09:00 น. และ 16:00 - 18:00 น.	 รอบที่ 6 วันที่ 10 กรกฎาคม 2559 ทดลองให้บริการ 18, 20, 22 กรกฎาคม 2559 เวลา 07:00 - 09:00 น. และ 16:00 - 18:00 น.

รูปที่ 3.4 ตัวอย่างประกาศการทดลองให้บริการระบบรถไฟฟ้า

ตารางการเดินรถไฟฟ้าในช่วงทดลองให้บริการจะถูกแจ้งให้ทราบเป็นรายสัปดาห์ว่าขึ้นและลงได้ที่สถานีใดบ้างและอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้ทุกสัปดาห์

รอบที่ 2 ของการทดลองให้บริการ รฟม เปิดให้บริการประชาชนสามารถใช้บริการได้ทุกสถานีดังรายละเอียดดังนี้

**เรียนผู้โดยสารที่ได้รับบัตรทดลองโดยสาร
รถไฟฟ้าสายสีม่วง ช่วงบางใหญ่-เตาปูน**

**ในวันจันทร์ พุธ ศุกร์
สามารถเข้าใช้บริการ
ขึ้น-ลง
ได้ถึง 16 สถานี
เริ่มตั้งแต่
วันที่ 20 มิ.ย.59
เป็นต้นไป**

****สามารถใช้งานได้ตามวันและเวลาที่กำหนดในบัตรเท่านั้น****
รถไฟฟ้าขบวนสุดท้ายออกจากสถานีเวลา 8.30 น.
ขบวนสุดท้ายมาถึงสถานีเวลา 8.30 น.

คลองบางไฟ
ตลาดบางโพธิ์
สามแยกบางโพธิ์
บางพลู
บางรักใหญ่
บางซื่อ
ไทรม้า
สะพานพระนั่งเกล้า
แยกถนนพญาไท 1
บางกอกน้อย
ศูนย์ราชการนนทบุรี
กระทรวงสาธารณสุข
แยกวัดวานนภิ
วงศ์สร้าง
บางซื่อ
เตาปูน

สอบถามรายละเอียดเพิ่มเติม โทร. 0 2715 4044
BEM โทร. 0 2354 2000 ต่อ 3255, 3256 , 0 2306 0705

การรถไฟฟ้าขนส่งมวลชนแห่งประเทศไทย
Mass Rapid Transit Authority of Thailand



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างประกาศการทดลองให้บริการระบบรถไฟฟ้า (เพิ่มเติม)

การให้บริการจริงรถไฟฟ้าสายหนึ่งในวันที่ 6 ต.ค 59 จะมีโครงสร้างราคาค่าโดยสารคิดตามระยะทางเริ่มต้น 14 บาท ถึง 42 บาท ซึ่งรถไฟฟ้าสายหนึ่งมีระยะทาง 23 กิโลเมตร รวม 16 สถานี

สถานีปลายทาง สถานีต้นทาง	คลองบางไผ่	ตลาดบางใหญ่	สามแยกบางใหญ่	บางพลู	บางรักใหญ่	บางรักน้อยท่าอิฐ	ไทรมา้า	สะพานพระนั่งเกล้า	แยกถนนบุรี 1	บางกระสอ	ศูนย์ราชการนนทบุรี	กระทรวงสาธารณสุข	แยกติวานนท์	วงศ์สว่าง	บางซื่อ	เตาปูน
คลองบางไผ่	14	17	20	23	25	27	30	33	36	38	40	42	42	42	42	42
ตลาดบางใหญ่	17	14	17	20	22	24	27	30	33	35	37	40	42	42	42	42
สามแยกบางใหญ่	20	17	14	17	19	21	24	27	30	32	34	37	39	42	42	42
บางพลู	23	20	17	14	16	18	21	24	27	29	31	34	36	39	42	42
บางรักใหญ่	25	22	19	16	14	16	19	22	25	27	29	32	34	37	40	42
บางรักน้อยท่าอิฐ	27	24	21	18	16	14	17	20	23	25	27	30	32	35	38	41
ไทรมา้า	30	27	24	21	19	17	14	17	20	22	24	27	29	32	35	38
สะพานพระนั่งเกล้า	33	30	27	24	22	20	17	14	17	19	21	24	26	29	32	35
แยกถนนบุรี 1	36	33	30	27	25	23	20	17	14	16	18	21	23	26	29	32
บางกระสอ	38	35	32	29	27	25	22	19	16	14	16	19	21	24	27	30
ศูนย์ราชการนนทบุรี	40	37	34	31	29	27	24	21	18	16	14	17	19	22	25	28
กระทรวงสาธารณสุข	42	40	37	34	32	30	27	24	21	19	17	14	16	19	22	25
แยกติวานนท์	42	42	39	36	34	32	29	26	23	21	19	16	14	17	20	23
วงศ์สว่าง	42	42	42	39	37	35	32	29	26	24	22	19	17	14	17	20
บางซื่อ	42	42	42	42	40	38	35	32	29	27	25	22	20	17	14	17
เตาปูน	42	42	42	42	42	41	38	35	32	30	28	25	23	20	17	16

รูปที่ 3.6 ตัวอย่างโครงสร้างราคาค่าโดยสารระบบรถไฟฟ้า

ระหว่างทดลองให้บริการเป็นเวลา 3 เดือนมีเหตุการณ์ที่อุปกรณ์เกิดความล้มเหลวขึ้นจำนวน 684 ครั้ง โดยมีผลกระทบที่แตกต่างกัน และมี MDT เท่ากับ 6.101 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.7 เหตุการณ์ความล้มเหลวของอุปกรณ์ในช่วงทดลองการให้บริการ

ผลกระทบที่เกิดขึ้น		
Mean Down Time (MDT)	6.101	H
Operation Hours (3 months)	1,688	H

Availability	99.64%
---------------------	--------

3.4.1 ประเมินคุณภาพการให้บริการในช่วงทดลองให้บริการรถไฟฟ้า

การทดลองให้บริการระบบรถไฟฟ้าเป็นเวลาสามเดือนพบว่าอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าเกิดความล้มเหลวขึ้นและส่งผลกระทบต่อความพร้อมใช้ของระบบรถไฟฟ้าเฉลี่ยเป็นเวลา 6.101 ชั่วโมง แต่ไม่พบว่ามี การชำรุดบกพร่องใดทำให้ระบบรถไฟฟ้าต้องหยุดให้บริการ ทำให้สามารถประเมินตัวชี้วัด $TSU_c = 0$ ในช่วงเวลาทดลองให้บริการได้ตามตารางประเมินคุณภาพการให้บริการระบบรถไฟฟ้าในช่วงทดลอง ให้บริการ

ข้อมูลการทดลองให้บริการระบบรถไฟฟ้าเป็นเวลาสามเดือน พบว่าอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าเกิดความล้มเหลวขึ้นแต่ไม่ส่งผลกระทบต่อความล่าช้ากว่าตารางเวลาการเดินทางทำให้สามารถประเมินตัวชี้วัด $TSD_c = 0$ ในช่วงเวลาทดลองให้บริการได้ตาม ตารางที่ 3.8 ประเมินคุณภาพการให้บริการระบบรถไฟฟ้า ในช่วงทดลองให้บริการ

ตารางที่ 3.8 ประเมินคุณภาพการให้บริการระบบรถไฟฟ้าในช่วงทดลองให้บริการ

RAM	สูตร		Trial Run (3-Months)	
Reliability	$TSU = (TSU_c/TSU_s) \times 100\%$	TSUs	36,480	0.00%
		TSUc	0	
	$TSD = (TSD_c/TSD_s) \times 100\%$	TSDs	36,480	0.00%
		TSDc	0	

3.4.2 ประเมินความพร้อมใช้ของระบบรถไฟฟ้าในช่วงทดลองให้บริการ

ประเมินความพร้อมใช้งานของระบบรถไฟฟ้าในช่วงทดลองให้บริการโดยใช้ข้อมูลความล้มเหลวของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นแล้วส่งผลกระทบต่อระบบรถไฟฟ้าไม่สามารถให้บริการได้ โดยพิจารณาช่วงเวลาที่เสียไปเมื่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าเกิดความล้มเหลวขึ้นโดยเฉลี่ย (Mean Down Time, MDT) จากข้อมูลการให้บริการในช่วงทดลองพบว่าเกิดความล้มเหลวของอุปกรณ์ขึ้นจำนวน 684 ครั้ง ในแต่ละครั้งเสียเวลาการ ให้บริการระบบไฟฟ้าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความรุนแรงของเหตุการณ์ เวลาที่เสียไปเมื่อเกิดความล้มเหลวของอุปกรณ์ขึ้นเฉลี่ยเท่ากับ 6.101 ชั่วโมง ดังนั้นสามารถประเมินความพร้อมใช้งานของระบบรถไฟฟ้าได้ ตามตารางที่ 3.9 ประเมินความพร้อมใช้ของระบบรถไฟฟ้าในช่วงทดลองให้บริการ

ตารางที่ 3.9 ประเมินความพร้อมใช้ของระบบรถไฟฟ้าในช่วงทดลองให้บริการ

RAM	สูตร		Trial Run (3-Months)	
Availability	$A = \text{MUT} / (\text{MUT} + \text{MDT})$	MUT	1,688.25	99.64%
		MDT	6.10	

3.4.3 ประเมินความสามารถในการบำรุงรักษาในช่วงทดลองการให้บริการ

ประเมินความสามารถในการบำรุงรักษา (Maintainability) ในช่วงทดลองให้บริการเดือนแรกมีงานบำรุงรักษา PM ทั้งสิ้น 64 งาน ดำเนินการแล้วเสร็จ จำนวน 64 งานจึงทำให้ไม่มีงานค้าง และเกิดซ่อมบำรุงฉุกเฉินขึ้นทั้งสิ้น 71 งาน ดำเนินการแล้วเสร็จ จำนวน 70 งานจึงทำให้มีค้างจำนวน 1 งาน ในช่วงทดลองให้บริการเดือนที่สองมีงานบำรุงรักษาทั้งสิ้น 54 งาน ดำเนินการแล้วเสร็จ จำนวน 54 งานจึงทำให้ไม่มีงานค้างและเกิดซ่อมบำรุงฉุกเฉินขึ้นทั้งสิ้น 72 งาน ดำเนินการแล้วเสร็จ จำนวน 71 งานจึงทำให้มีค้างจำนวน 1 งาน

จากข้อมูลงานบำรุงรักษาข้างต้น สามารถประเมินความสามารถในการจัดการงานซ่อมบำรุงได้ตาม

ตารางที่ 3.10 ประเมินการบำรุงรักษาบริภัณฑ์ระบบไฟฟ้าในช่วงทดลองให้บริการ

ตารางที่ 3.10 ประเมินการบำรุงรักษาบริภัณฑ์ระบบไฟฟ้าในช่วงทดลองให้บริการ

RAM	สูตร		Trial Run (2-Months)	
Maintainability	$\text{PME} = \text{PMf} / (\text{PMt-1} + \text{PMt}) \times 100\%$	PMt-1	0	100.00%
		PMt	118	
		PMf	118	
	$\text{CME} = \text{CMf} / (\text{CMt-1} + \text{CMt}) \times 100\%$	CMt-1	0	98.60%
		CMt	143	
		CMf	141	

3.4.4 ความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้าจากการออกแบบกับช่วงทดลองให้บริการ

เปรียบเทียบความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้าจากข้อมูลการออกแบบและข้อมูลที่รวบรวมจากการทดลองให้บริการตารางที่ 3.11 เปรียบเทียบความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้าจากการออกแบบกับช่วงทดลองให้บริการ

ตารางที่ 3.11 เปรียบเทียบความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้าจากการออกแบบกับช่วงทดลองให้บริการ

RAM	สูตรที่ใช้		Predefined (Yearly)		Trial Run (3-Months)	
Reliability	$\text{TSU} = (\text{TSUc}/\text{TSUs}) \times 100\%$	TSUs	145,920	0.021%	36,480	0.00%
		TSUc	30		0	
	$\text{TSD} = (\text{TSDc}/\text{TSDs}) \times 100\%$	TSDs	145,920	0.003%	36,480	0.00%
		TSDc	5		-	
Availability	$A = \text{MUT}/(\text{MUT} + \text{MDT})$	MUT	6,654	99.917%	1,440	99.58%
		MDT	5.53		6.10	
Maintainability	$\text{PME} = \text{PMf}/(\text{PMt} - 1 + \text{PMt}) \times 100\%$	PMt-1	-	100%	-	100.00%
		PMt	-		118	
		PMf	-		118	
	$\text{CME} = \text{CMf}/(\text{CMt} - 1 + \text{CMt}) \times 100\%$	CMt-1	-	100%	-	98.60%
		CMt	-		143	
		CMf	-		141	

จากตารางเปรียบเทียบความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้าจากข้อมูลการออกแบบและข้อมูลที่รวบรวมจากการทดลองให้บริการทำให้เห็นความแตกต่างของความเชื่อถือได้ที่เกิดขึ้นจริง ณ ช่วงเวลา

ทดลองให้บริการน้อยกว่าค่าจากการออกแบบ ดังนั้นจึงทำการประเมินระดับความเสี่ยงของอุปกรณ์ที่เกิดความล้มเหลวเพื่อจัดการกับความเสี่ยงให้ลดลงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

3.5 ประเมินระดับความเสี่ยงจากการล้มเหลวของอุปกรณ์ไฟฟ้า

จากข้อมูลระบบรถไฟฟ้าในช่วงทดลองให้บริการ ได้ข้อมูลการล้มเหลวของอุปกรณ์ที่ต้องประเมินความเสี่ยง โดยพิจารณาจากความถี่ตามตารางที่ 2.2 และความรุนแรงของผลกระทบที่เกิดจากความล้มเหลวตามตารางที่ 2.3 ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพการให้บริการระบบรถไฟฟ้า เช่น อุปกรณ์ B1 เกิดความล้มเหลวด้วยความถี่ 2 ครั้งภายในรอบ 3 ภายในระยะเวลา 3 เดือน และเมื่อเกิดความบกพร่องขึ้นมีความรุนแรงจนทำให้ระบบไม่สามารถใช้งานได้เกิน 1 วันเพื่อกู้คืนระบบ จากเหตุการณ์ดังกล่าวเมื่อประเมินตามตารางประเมินความถี่ได้ในระดับ Probable และมีความรุนแรงระดับ Critical ตามตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.12 ความล้มเหลวของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นช่วงทดลองให้บริการ

อุปกรณ์ที่เกิดความล้มเหลว	ความรุนแรง	ความถี่
B1	Critical	Probable
U1	Marginal	Probable
T1	Critical	Probable
T2	Critical	Probable
C1	Critical	Probable
R1	Critical	Probable
L3	Critical	Probable
P1	Critical	Probable
U1	Marginal	Probable
U1	Marginal	Probable
H1	Critical	Probable
U1	Marginal	Probable
U1	Marginal	Probable
U1	Marginal	Probable

ตารางที่ 3.12 ความล้มเหลวของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นช่วงทดลองให้บริการ(ต่อ)

อุปกรณ์ที่เกิดความล้มเหลว	ความรุนแรง	ความถี่
T1	Critical	Probable
T1	Critical	Probable
M1	Critical	Probable
C1	Critical	Probable
M1	Critical	Probable
M1	Critical	Probable
R2	Critical	Probable
C1	Critical	Probable
E1	Critical	Probable
C1	Critical	Probable
C1	Critical	Probable
C1	Critical	Probable
M1	Critical	Probable
R3	Critical	Probable
R3	Critical	Probable
L3	Critical	Probable
L3	Critical	Probable
C1	Critical	Probable
B1	Critical	Probable
P1	Critical	Probable
P1	Critical	Probable
P1	Critical	Probable
I1	Critical	Probable
P1	Critical	Probable
M1	Critical	Probable

ตารางที่ 3.12 ความล้มเหลวของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นช่วงทดลองให้บริการ(ต่อ)

อุปกรณ์ที่เกิดความล้มเหลว	ความรุนแรง	ความถี่
U1	Marginal	Probable
M1	Critical	Probable
M1	Critical	Probable
M1	Critical	Probable
T1	Critical	Probable
D1	Marginal	Probable
D1	Marginal	Probable
I1	Critical	Probable
B1	Critical	Probable
R1	Critical	Probable
M1	Critical	Probable
M1	Critical	Probable
I1	Critical	Probable
R1	Critical	Probable
U1	Marginal	Probable
H1	Critical	Probable
T1	Critical	Probable
I1	Critical	Probable
I1	Critical	Probable

จากการประเมินระดับความเสี่ยงตามตารางที่ 2.5 ได้อุปกรณ์ที่มีระดับความเสี่ยงเกินขีดจำกัดที่สามารถยอมรับได้ Undesirable และ Intolerable ต้องได้รับการพิจารณาปรับปรุงตารางการบำรุงรักษาในตารางที่ 2.6 สำหรับแต่ละอุปกรณ์เพื่อไม่ให้ความล้มเหลวของอุปกรณ์ดังกล่าวส่งผลกระทบต่อความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้า

ตารางที่ 3.13 บริษัทไฟฟ้าที่มีความเสี่ยงต่อความเชื่อถือได้ของระบบบรอดไฟฟ้าและรอบการบำรุงรักษา

ลำดับ ที่	อุปกรณ์ที่เกิดความ ล้มเหลว	ระดับความเสี่ยง	รอบการทำ PM (เดือน)
1	B1	Intolerable	1, 3, 6, 12, 36
2	U1	Undesirable	3, 6, 12, 36
3	T1	Intolerable	12
4	T2	Intolerable	1, 12
5	C1	Intolerable	1, 3, 6, 12, 36
6	R1	Intolerable	12
7	L3	Intolerable	12
8	P1	Intolerable	24
9	B2	Intolerable	24
10	H1	Intolerable	1, 12
11	M1	Intolerable	12
12	R2	Intolerable	12
13	E1	Intolerable	1, 12
14	R3	Intolerable	0.5
15	D1	Undesirable	12

3.6 ปรับปรุงรายการงานบำรุงรักษาระบบไฟฟ้าตามความเสี่ยง

การปรับปรุงความถี่ในการซ่อมบำรุงเพื่อป้องกันความล้มเหลวไม่ให้เกิดขึ้น โดยการคูณความถี่การบำรุงรักษาด้วย ตัวคูณจากตารางที่ 2.7 ตารางไขว้ความถี่การบำรุงรักษา เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพการใช้งานจนทำให้อุปกรณ์มีความน่าเชื่อถือได้เพิ่มขึ้น โดยเลือกตัวคูณให้สอดคล้องกับความเสี่ยงและสภาพการติดตั้งอุปกรณ์ กล่าวคือใช้ตัวคูณ 0.5 สำหรับระดับความเสี่ยง Intolerable และเลือกใช้ตัวคูณ 0.75 สำหรับความเสี่ยง Undesirable ซึ่งเป็นระดับความเสี่ยงที่ไม่สูงมากนัก

รายการบำรุงรักษาใหม่หลังจากการปรับปรุงตามตารางที่ 3.14 ความถี่ PM หลังการปรับปรุงจะเห็นว่า รอบการทำ PM ระยะแรกจะถูกปรับลดลงให้สอดคล้องกับระดับความเสี่ยงของอุปกรณ์และตัวคุณสภาพการใช้งานของอุปกรณ์

ตารางที่ 3.14 เปรียบเทียบงานบำรุงรักษาก่อนและหลังการปรับปรุง

อุปกรณ์ที่เสี่ยง	ความถี่ PM ก่อนปรับปรุง (เดือน)	ระดับความเสี่ยง	ตัวคูณ	ความถี่ PM หลังปรับปรุง (เดือน)
B1	1, 3, 6, 12, 36	Intolerable	0.5	0.5, 3, 6, 12, 36
U1	3, 6, 12, 36	Undesirable	0.75	2.25, 6, 12, 36
T1	12	Intolerable	0.5	3*
T2	1, 12	Intolerable	0.5	0.5, 12
C1	1, 3, 6, 12, 36	Intolerable	0.5	0.5, 3, 6, 12, 36
R1	12	Intolerable	0.5	6
L3	12	Intolerable	0.5	6
P1	24	Intolerable	0.5	12
B2	24	Intolerable	0.5	12
H1	1, 12	Intolerable	0.5	0.5, 12
M1	12	Intolerable	0.5	6
R2	12	Intolerable	0.5	6
E1	1, 12	Intolerable	0.5	0.5, 12
R3	0.5	Intolerable	0.5	0.25
D1	12	Undesirable	0.75	9

*หมายเหตุ อุปกรณ์ใดมีความถี่หลังจากการปรับปรุงแล้วแต่เวลานั้นยังไม่ถึง เพื่อให้มั่นใจว่าอุปกรณ์นั้นจะไม่เกิดความบกพร่องขึ้นอีก รอบการบำรุงรักษาที่เร็วขึ้นควรนำไปใช้งานเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว เช่น กรณี อุปกรณ์ T1 ที่มีรอบการบำรุงรักษาทุก 12 เดือนแต่พบว่าในช่วง 3 เดือนเกิดเหตุการณ์ชำรุดบกพร่องขึ้น ถึงแม้จะปรับปรุงความถี่เป็นการบำรุงรักษาทุก 6 เดือนซึ่งยังไม่ถึง ดังนั้นควรนำรอบการบำรุงรักษาในรอบ 3 เดือนไปใช้งานร่วมด้วยเพื่อป้องกันการล้มเหลว เป็นต้น แต่ถ้าเนื่องจากรายการ PM รอบใหม่ที่ได้ถูกดำเนินการไปแล้ว เช่น อุปกรณ์ R1 L3 M1 R2 และ D1 ให้ดำเนินการตามรอบการบำรุงรักษาใหม่ต่อไป

3.7 ประเมินความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้าช่วงให้บริการ

การประเมินความน่าเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้าช่วงให้บริการประกอบด้วย

1. ประเมินคุณภาพการให้บริการในช่วงให้บริการรถไฟฟ้า
2. ประเมินความพร้อมใช้ของระบบรถไฟฟ้าในช่วงให้บริการ
3. ประเมินความสามารถในการบำรุงรักษาในช่วงการให้บริการ
4. ความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้าจากการออกแบบกับช่วงให้บริการ

3.7.1 ประเมินคุณภาพการให้บริการในช่วงให้บริการรถไฟฟ้า

เมื่อทำการปรับแผนการเฝ้าระวังอุปกรณ์ที่มีความเสี่ยงสูงและเคยเกิดความล้มเหลวขึ้นในระหว่างการทดลองให้บริการ การให้บริการระบบรถไฟฟ้าเป็นเวลาสามเดือน พบว่าอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าเกิดสัญญาณความล้มเหลวขึ้น 17 นาฬิกา แต่ถูกพบอาการของการล้มเหลวในระหว่างเข้าทำการตรวจสอบจึงสามารถป้องกันความล้มเหลวทำให้ไม่ส่งผลให้เกิดความไม่พร้อมใช้ของระบบรถไฟฟ้า ทำให้สามารถประเมินตัวชี้วัด TSUc สำหรับช่วงเวลาให้บริการได้ตามตารางประเมินคุณภาพการให้บริการระบบรถไฟฟ้าในช่วงเปิดให้บริการแก่สาธารณะ

ข้อมูลการให้บริการระบบรถไฟฟ้าเป็นเวลาสามเดือน พบว่าอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าเกิดความล้มเหลวขึ้นและส่งผลให้เกิดความล่าช้าของการให้บริการระบบรถไฟฟ้าสะสมเป็นเวลา 9 นาฬิกา ทำให้สามารถประเมินตัวชี้วัด TSDc สำหรับช่วงเวลาให้บริการได้ตามตารางประเมินคุณภาพการให้บริการระบบรถไฟฟ้าในช่วงเปิดให้บริการแก่สาธารณะ

ตารางที่ 3.15 ประเมินคุณภาพการให้บริการระบบรถไฟฟ้าในช่วงให้บริการ

RAM	สูตร		Revenue Services	
			(3-Months)	
Reliability	$TSU = (TSUc/TSUs) \times 100\%$	TSUs	36,480	0.047%
		TSUc	17	
	$TSD = (TSDc/TSDs) \times 100\%$	TSDs	36,480	0.025%
		TSDc	9	

3.7.2 ประเมินความพร้อมใช้ของระบบรถไฟฟ้าในช่วงให้บริการ

ประเมินความพร้อมใช้งานของอุปกรณ์ไฟฟ้าในช่วงให้บริการโดยใช้ข้อมูลความล้มเหลวของอุปกรณ์ที่เกิดขึ้นแต่ไม่ส่งผลให้ระบบรถไฟฟ้าไม่สามารถให้บริการได้ โดยพิจารณาเวลาที่เสียไปเมื่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าเกิดความล้มเหลวขึ้นโดยเฉลี่ย (Mean Down Time, MDT) จากการให้บริการในช่วงพบว่าเกิดความล้มเหลวของอุปกรณ์ขึ้นจำนวน 46 ครั้ง ในแต่ละครั้งเสียเวลาการให้บริการระบบรถไฟฟ้าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความรุนแรงของเหตุการณ์ เวลาที่เสียไปเมื่อเกิดความล้มเหลวของอุปกรณ์ขึ้นเฉลี่ยเท่ากับ 3.83 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.16 ประเมินความพร้อมใช้ของระบบรถไฟฟ้าในช่วงให้บริการ

RAM	สูตร		Revenue Services (3-Months)	
Availability	$A = \text{MUT} / (\text{MUT} + \text{MDT})$	MUT	1,688	99.77%
		MDT	3.83	

3.7.3 ประเมินความสามารถในการบำรุงรักษาในช่วงการให้บริการ

ประเมินความสามารถในการบำรุงรักษา (Maintainability) ในช่วงให้บริการสามเดือนแรกมีงานบำรุงรักษาทั้งสิ้น 210 งาน ดำเนินการแล้วเสร็จ จำนวน 211 งานซึ่งรวมถึงงานคงค้างจำนวน 1 งาน และเกิดซ่อมบำรุงฉุกเฉินขึ้นทั้งสิ้น 12 งาน ดำเนินการแล้วเสร็จทั้งหมดรวมทั้งงานคงค้างจากช่วงก่อนเปิดให้บริการด้วยจำนวน 2 งาน จากข้อมูลงานบำรุงรักษาข้างต้น สามารถประเมินความสามารถในการจัดการงานซ่อมบำรุงได้ดังตาราง

ตารางที่ 3.17 ประเมินการบำรุงรักษาบริภัณฑ์ระบบรถไฟฟ้าในช่วงให้บริการ

RAM	สูตร		Revenue Services (3-Months)	
Maintainability	$PME = \text{PMf} / (\text{PMt-1} + \text{PMt})$	PMt-1	0	100.0%
		PMt	210	
		PMf	210	
	$CME = \text{CMf} / (\text{CMt-1} + \text{CMt}) \times 100\%$	CMt-1	2	100.0%
		CMt	12	

RAM	สูตร		Revenue Services (3-Months)	
		CMf	14	

3.7.4 ความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้าจากการออกแบบกับช่วงให้บริการ

เปรียบเทียบความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้าจากข้อมูลการออกแบบและข้อมูลที่รวบรวมจากการทดลองให้บริการตามตาราง

ตารางที่ 3.18 เปรียบเทียบความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้าจากการออกแบบกับช่วงให้บริการ

RAM	สูตรที่ใช้		Predefined (Yearly)		Revenue Services (3-Months)	
Reliability	TSU = $(TSU_c/TSU_s) \times 100\%$	TSUs	145,920	0.021%	6,480	0.047%
		TSU _c	30		17	
	TSD = $(TSD_c/TSD_s) \times 100\%$	TSDs	145,920	0.003%	36,480	0.025%
		TSD _c	5.0		9	
Availability	A = $MUT/(MUT+MDT)$	MUT	6,753	99.92%	1,688	99.77%
		MDT	5.53		3.83	
Maintainability	PME = $PM_f/(PM_{t-1}+PM_t)$	PM _{t-1}	-	100%	0	100%
		PM _t	-		210	
		PM _f	-		210	
	CME = $CM_f/(CM_{t-1}+CM_t) \times 100\%$	CM _{t-1}	-	100%	2	100%
		CM _t	-		12	
		CM _f	-		14	

จากตารางเปรียบเทียบความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้าจากข้อมูลการออกแบบและข้อมูลที่รวบรวมจากการให้บริการทำให้เห็นความแตกต่างของความเชื่อถือได้ที่เกิดขึ้นจริง ณ ช่วงเวลาให้บริการใกล้เคียงกับการออกแบบ ดังนั้นจึงสามารถนำอุปกรณ์เหล่านั้นไปใช้งานพร้อมกับการบำรุงรักษาอย่างเพียงพอเพื่อยืดอายุการใช้งานและลดความเสี่ยงให้ลดลงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ตลอดช่วงอายุการใช้งานระบบ

บทที่ 4

ผลการศึกษาวิจัย

การศึกษาอุปกรณ์ที่มีระดับความเสี่ยงเฉพาะตัวที่แตกต่างกันของระบบรถไฟฟ้าเมื่อเกิดความล้มเหลวส่งผลต่อความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้าไม่เหมือนกัน ผลกระทบจากความล้มเหลวที่เกิดจากอุปกรณ์ที่มีความเสี่ยงสูงส่งผลกระทบทำให้ความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้าลดลง การบำรุงรักษาอุปกรณ์ในระบบรถไฟฟ้าในช่วงเริ่มต้นเปิดให้บริการเดินรถถูกดำเนินการตามตารางกิจกรรมการบำรุงรักษาที่กำหนดไว้ตามแผนงานการบำรุงรักษาที่ได้รับมาจากบริษัทผู้ผลิต อุปกรณ์ที่ได้รับการบำรุงรักษาอย่างเพียงพอภายใต้สภาวะใช้งานและสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมสามารถมีสมรรถนะใกล้เคียงกับการออกแบบจากบริษัทผู้ผลิต เมื่อนำอุปกรณ์แต่ละตัวมาติดตั้งใช้งานร่วมกันหลายประเภททำให้เกิดเป็นระบบที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ตลอดจนอายุการใช้งานของอุปกรณ์ที่เพิ่มขึ้นทำให้สภาพของอุปกรณ์เปลี่ยนไปตามลักษณะการใช้งาน ความเสี่ยงที่อุปกรณ์จะเกิดความล้มเหลวจากการใช้งานย่อมมีมากขึ้น

การศึกษาความล้มเหลวของอุปกรณ์ที่ส่งผลกระทบต่อความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่วงทดลองให้บริการระบบรถไฟฟ้าถูกประเมินเปรียบเทียบกับความเชื่อถือได้ของระบบที่ได้ถูกออกแบบขึ้น ระดับความเสี่ยงของอุปกรณ์ที่เกิดความล้มเหลวขึ้นและส่งผลกระทบต่อความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้าได้ถูกประเมินแล้วปรับปรุงกิจกรรมการบำรุงรักษาอุปกรณ์ให้สอดคล้องกับความเสี่ยง ความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้าถูกประเมินอีกครั้งเมื่อระบบรถไฟฟ้าเปิดให้บริการแก่สาธารณะเพื่อยืนยันความพร้อมใช้ของระบบรถไฟฟ้าพร้อมกับการพัฒนากิจกรรมการบำรุงรักษาเพื่อให้ระบบคงมีสมรรถนะที่ดีต่อไปในระยะยาว

4.1 ผลการประเมินความเชื่อถือได้ของการออกแบบระบบไฟฟ้า

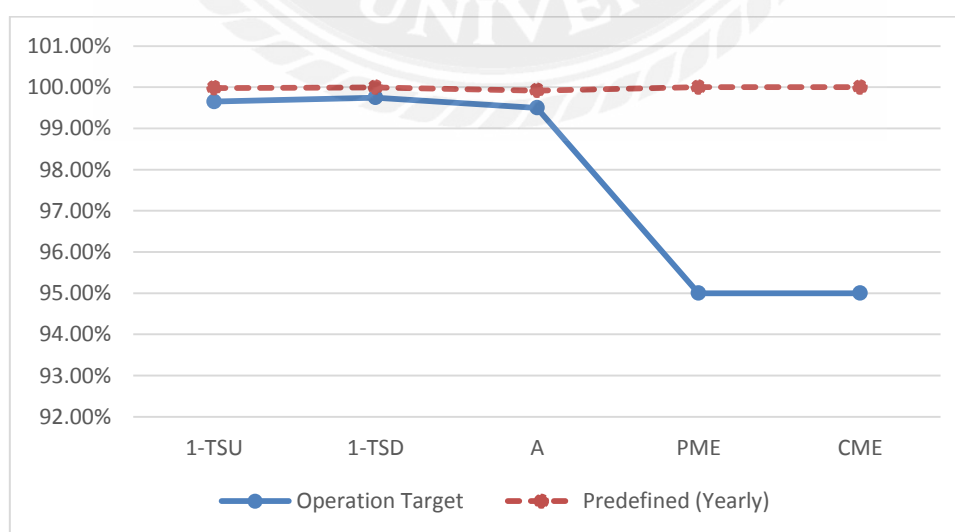
ระบบไฟฟ้าสำหรับรถไฟฟ้าได้ถูกประเมินความเชื่อถือได้เพื่อกำหนดเป็นความเชื่อถือได้สูงสุด การศึกษานี้ ดำเนินการประเมินโดยใช้ข้อมูลความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ย่อยของแต่ละระบบ คือ อัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ (Failure Rate: λ) และระยะเวลาที่สามารถใช้งานอุปกรณ์ได้โดยอุปกรณ์นั้นจะไม่เกิดความล้มเหลวขึ้น (MTBF)

$$MTBF = \frac{T(t)}{r} = 1/\lambda$$

อัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ถูกรวมขึ้นด้วยวิธีการรวมฟังก์ชัน[10] ได้ Predefined รายปีผลดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการประเมินความเชื่อถือได้ในช่วงออกแบบเทียบกับเป้าหมาย

RAM	สัญลักษณ์	ความหมาย	Predefined (Yearly)
Reliability	TSU	ความไม่พร้อมให้บริการระบบรดไฟฟ้าตามตารางเวลาการให้บริการระบบรดไฟฟ้าเนื่องจากความล้มเหลวของอุปกรณ์ไฟฟ้า (Target=0.35%)[18]	0.02%
	TSD	การให้บริการระบบรดไฟฟ้าด้วยความล่าช้าเกินกว่าที่กำหนดตามตารางเวลาการให้บริการระบบรดไฟฟ้าเนื่องจากความล้มเหลวของอุปกรณ์ไฟฟ้า (Target=0.25%)[18]	0.00%
Availability	A	ความพร้อมใช้ของระบบรดไฟฟ้า (Target=99.5%)[17]	99.92%
Maintainability	PME	ผลการวิเคราะห์ความสำเร็จในการทำการบำรุงรักษาตามแผนงานการบำรุงรักษา (Target=95.0%)	100%
	CME	ผลการวิเคราะห์ความสำเร็จในการทำการบำรุงรักษาฉุกเฉิน (Target=95.0%)	100%



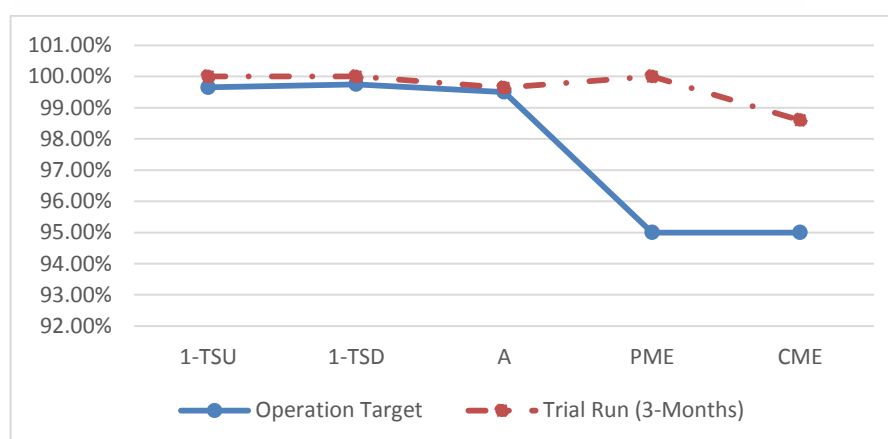
รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบความเชื่อถือได้เป้าหมายกับการออกแบบระบบ

4.2 ผลการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้าช่วงทดสอบ

ช่วงเวลาทดสอบให้บริการตลอด 3 เดือน ได้ถูกประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์ไฟฟ้าที่อาจส่งผลกระทบต่อการใช้งาน

ตารางที่ 4.2 ผลการประเมินความเชื่อถือได้ในช่วงทดลองให้บริการเทียบกับเป้าหมาย

RAM	Symbol	ความหมาย	Revenue (3-Months)
Reliability	TSU	ความไม่พร้อมให้บริการระบบรถไฟฟ้าตามตารางเวลาการให้บริการระบบรถไฟฟ้าเนื่องจากความล้มเหลวของอุปกรณ์ไฟฟ้า (Target=0.35%)[18]	0.047%
	TSD	การให้บริการระบบรถไฟฟ้าด้วยความล่าช้าเกินกว่าที่กำหนดตามตารางเวลาการให้บริการระบบรถไฟฟ้าเนื่องจากความล้มเหลวของอุปกรณ์ไฟฟ้า (Target=0.25%)[18]	0.025%
Availability	A	ความพร้อมใช้ของระบบรถไฟฟ้า (Target=99.5%)[17]	99.77%
Maintainability	PME	ผลการวิเคราะห์ความสำเร็จในการทำการบำรุงรักษาตามแผนงานการบำรุงรักษา (Target=95.0%)	100.0%
	CME	ผลการวิเคราะห์ความสำเร็จในการทำการบำรุงรักษาฉุกเฉิน (Target=95.0%)	100.0%



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบความเชื่อถือได้เป้าหมายกับการทดลองให้บริการ

4.3 ผลการประเมินระดับความเสี่ยงจากการล้มเหลวของอุปกรณ์ไฟฟ้า

จากขั้นตอนการประเมินความเสี่ยงที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น เมื่อทำการประเมินความเสี่ยงของอุปกรณ์ทุกตัวที่เกิดความล้มเหลวขึ้นได้ผลการประเมินดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.3 ผลการประเมินความเสี่ยงของอุปกรณ์ไฟฟ้าต่อการให้บริการรถไฟฟ้า

ลำดับที่	อุปกรณ์ที่เกิดความล้มเหลว	ระดับความเสี่ยง
1	DC Charger & Battery	Intolerable
2	UPS & Batt	Undesirable
3	24kV Switchgear	Intolerable
4	Power Transformer	Intolerable
5	DC Charger & Battery	Intolerable
6	24kV Switchgear	Intolerable
7	24kV Switchgear	Intolerable
8	P Protection Relays	Intolerable
9	B Protection Relays	Intolerable
10	Power Transformer	Intolerable
11	Traction Substation	Intolerable
12	Traction Substation	Intolerable
13	M Power Transformer	Intolerable
14	Relay	Intolerable
15	Short Circuit Device	Undesirable

4.4 ผลการปรับปรุงงานบำรุงรักษาระบบไฟฟ้าตามความเสี่ยง

ผลการปรับปรุงกิจกรรมซ่อมบำรุงเพื่อลดระดับความเสี่ยงที่ความล้มเหลวของอุปกรณ์จะส่งผลให้ความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้าต่ำลง ต้องมีการปรับปรุงความถี่ของการบำรุงรักษาตามมาตรฐาน ANSI [11] ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.4 ผลการปรับปรุงแผนการบำรุงรักษา

อุปกรณ์ที่เกิดความล้มเหลว	ระดับความเสี่ยง ก่อนปรับปรุง	รอบการถี่ PM ก่อนปรับปรุง (เดือน)	ความถี่ PM หลังปรับปรุง (เดือน)	ระดับความเสี่ยง หลังปรับปรุง
B1	Intolerable	1, 3, 6, 12, 36	0.5, 3, 6, 12, 36	Undesirable
U1	Undesirable	3, 6, 12, 36	2.25, 6, 12, 36	Tolerable
T1	Intolerable	12	3	Undesirable
T2	Intolerable	1, 12	0.5, 12	Undesirable
C1	Intolerable	1, 3, 6, 12, 36	0.5, 3, 6, 12, 36	Undesirable
R1	Intolerable	12	6	Undesirable
L3	Intolerable	12	6	Undesirable
P1	Intolerable	24	12	Undesirable
B2	Intolerable	24	12	Undesirable
H1	Intolerable	1, 12	0.5, 12	Undesirable
M1	Intolerable	12	6	Undesirable
R2	Intolerable	12	6	Undesirable
E1	Intolerable	1, 12	0.5, 12	Undesirable
R3	Intolerable	0	0.25	Undesirable
D1	Undesirable	12	9	Tolerable

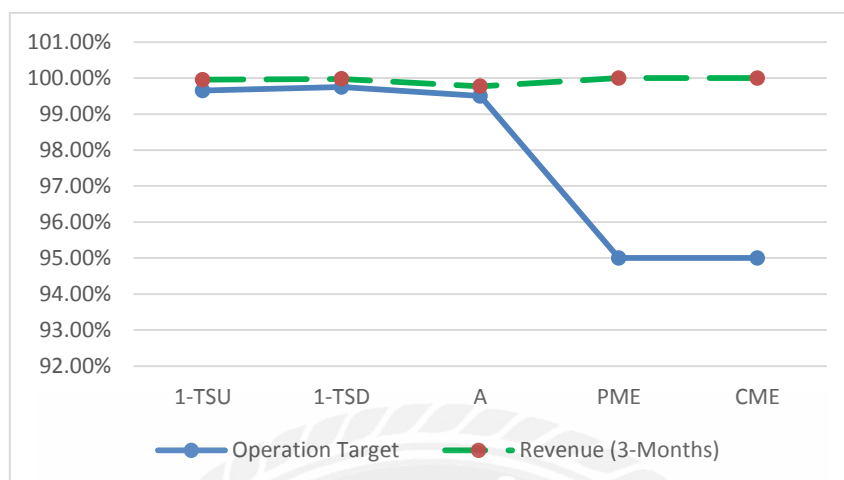
4.5 ผลการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้าช่วงให้บริการ

หลังจากทำการปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาตามความเสี่ยงของอุปกรณ์ แล้วประเมินความเชื่อถือได้ของระบบอีกครั้งได้ผลการประเมินตามตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 4.5 ผลการประเมินความเชื่อถือได้ในช่วงให้บริการเทียบกับเป้าหมาย

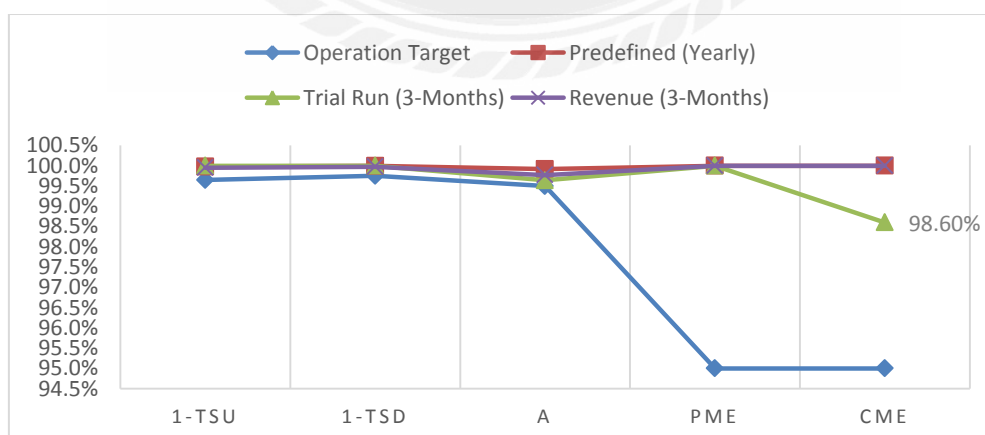
RAM	สัญลักษณ์	ความหมาย	Revenue (3-Months)
Reliability	TSU	ความไม่พร้อมให้บริการระบบรถไฟฟ้าตามตารางเวลาการให้บริการระบบรถไฟฟ้าเนื่องจากความล้มเหลวของอุปกรณ์ไฟฟ้า (Target=0.35%)[18]	0.047%
	TSD	การให้บริการระบบรถไฟฟ้าด้วยความล่าช้าเกินกว่าที่กำหนดตามตารางเวลาการให้บริการระบบรถไฟฟ้าเนื่องจากความล้มเหลวของอุปกรณ์ไฟฟ้า (Target=0.25%)[18]	0.025%
Availability	A	ความพร้อมใช้ของระบบรถไฟฟ้า (Target=99.5%)[17]	99.77%
Maintainability	PME	ผลการวิเคราะห์ความสำเร็จในการทำการบำรุงรักษาตามแผนงานการบำรุงรักษา (Target=95.0%)	100.0%
	CME	ผลการวิเคราะห์ความสำเร็จในการทำการบำรุงรักษาฉุกเฉิน (Target=95.0%)	100.0%

จากรายผลการวิจัยข้างต้นสามารถแสดงในรูปแบบกราฟเส้นได้ตามรูปต่อไปนี้



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบความเชื่อถือได้เป้าหมายกับการให้บริการ

การศึกษาบ่งชี้ว่าการปรับความถี่ของแผนงานบำรุงรักษาให้สอดคล้องกับสภาพการใช้งานทำให้ Reliability ใกล้เคียงกับการออกแบบโดยมีค่า TSU และ TSD เท่ากับ 0.08% และ 0.04% จากนั้นในช่วงเปิดให้บริการแก่สาธารณะลดลงเป็น 0.05% และ 0.02% ตามลำดับ ความพร้อมใช้ของระบบมากขึ้นจาก 99.75% เป็น 100% ปริมาณงานซ่อมบำรุงฉุกเฉินลดลงจาก 52 งานซึ่งสามารถซ่อมบำรุงได้เสร็จเพียง 96.23% เหลือเพียง 12 งานซึ่งสามารถซ่อมบำรุงได้สำเร็จทั้งหมด จากผลดังกล่าวทำให้ประเมินได้ว่าระบบรถไฟฟ้ามีความเชื่อถือได้สูงขึ้นเพราะความไม่พร้อมใช้ของการให้บริการ ความล่าช้าของการให้บริการมีค่าลดลง ความพร้อมใช้ของระบบไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นและการซ่อมบำรุงสามารถทำได้สำเร็จทั้งหมด



รูปที่ 4.4 สรุปผลการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้าสำหรับระบบรถไฟฟ้า

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การศึกษาเพื่อปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้ด้วยการบำรุงรักษามีข้อสรุปการศึกษาเป็นผลความเชื่อถือได้ของระบบและข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนา ดังนี้

5.1 บทสรุปผลการศึกษา

จากผลการประเมินความเชื่อถือได้ของระบบในช่วงของการออกแบบ ช่วงการทดลองให้บริการ และช่วงการให้บริการจริงแก่สาธารณะ เปรียบเทียบกันพบว่า การปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาที่ถูกต้องตามมาตรฐาน ANSI และสอดคล้องกับการใช้ระบบทำให้สามารถปรับปรุงความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้ให้สูงขึ้นได้

การศึกษาระบบการปรับความถี่ของแผนงานบำรุงรักษาให้สอดคล้องกับสภาพการใช้งานทำให้ Reliability ใกล้เคียงกับการออกแบบโดยมีค่า TSU และ TSD เท่ากับ 0.08% และ 0.04% จากนั้นในช่วงเปิดให้บริการแก่สาธารณะลดลงเป็น 0.05% และ 0.02% ตามลำดับ ความพร้อมใช้ของระบบมากขึ้นจาก 99.75% เป็น 100% ปริมาณงานซ่อมบำรุงฉุกเฉินลดลงจาก 52 งาน ซึ่งสามารถซ่อมบำรุงได้เสร็จเพียง 96.23% เหลือเพียง 12 งาน ซึ่งสามารถซ่อมบำรุงได้สำเร็จทั้งหมด จากผลดังกล่าวทำให้ประเมินได้ว่าระบบรถไฟฟ้มีความเชื่อถือได้สูงขึ้นเพราะความไม่พร้อมใช้ของการให้บริการ ความล่าช้าของการให้บริการมีค่าลดลง ความพร้อมใช้ของระบบไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นและการซ่อมบำรุงสามารถทำได้สำเร็จทั้งหมด

จากผลการประเมินพบว่าระบบในช่วงออกแบบมีค่าสูงที่สุด (Predefined) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าผู้ออกแบบได้สร้างระบบให้มีความเชื่อถือได้สูงที่สุดในทางทฤษฎีโดยการเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีคุณภาพ เช่น มีค่า MTBF ที่สูงมาก สำหรับค่าความเชื่อถือได้ในระหว่างการทดลองให้บริการนั้นมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการออกแบบเพียงเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามสามารถเห็นการเกิดเหตุการณ์ที่ระบบต้องถูกกู้คืนอย่างฉุกเฉินขึ้นได้โดยมีค่า CME เท่ากับ 98.60% เมื่อทำการปรับปรุงระบบตามความเสี่ยงที่ประเมินได้ทำให้ระบบมีความเชื่อถือได้โดยปราศจากเหตุการณ์ฉุกเฉินขึ้นในห้วงเวลาให้บริการจริง

อย่างไรก็ตามผลการประเมินดังกล่าวได้พิสูจน์ให้เห็นว่าค่าความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้มีค่ามากกว่าดัชนีชี้วัดที่ถูกกำหนดขึ้นอย่างมาก โดยพิจารณาเห็นได้จากผลการประเมินเส้นสีฟ้า อยู่ต่ำกว่าทุก

เส้น คือ ผลการออกแบบระบบ ผลการทดสอบระบบในช่วงทดลองให้บริการ และช่วงให้บริการจริงแก่สาธารณะนั้นในทุกๆช่วงมีค่าที่ดีกว่าดัชนีชี้วัดคุณภาพการให้บริการทั้งสิ้น

5.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการพัฒนา

จากผลการศึกษาได้บ่งชี้ว่าการปรับความถี่ของงานบำรุงรักษาเชิงแก้ไขให้สอดคล้องกับสภาพการใช้งานควรถูกปรับปรุงไปพร้อมกับการปรับปรุงกิจกรรมการบำรุงรักษาแต่เนื่องจากระบบตัวอย่างที่ทำการศึกษาเป็นอุปกรณ์ใหม่และอยู่ภายใต้ระยะเวลารับประกันซึ่งจำเป็นต้องรักษางานบำรุงรักษาให้คงไว้สอดคล้องกับคำแนะนำจากบริษัทผู้ผลิตเพื่อรักษาเงื่อนไขการรับประกันไว้ ระเบียบวิธีการทำงานวิจัยนี้คงจะสามารถให้ผลลัพธ์ที่ชัดเจนและเป็นประโยชน์มากขึ้นเมื่อทำการวิจัยโดยใช้ระบบรถไฟฟ้าที่ได้เปิดดำเนินการไปจนหมดระยะเวลาประกันแล้วแต่ระบบยังสามารถใช้งานได้

ระบบรถไฟฟ้าประกอบด้วยระบบย่อยอีกมากซึ่งผู้วิจัยได้ยกตัวอย่างไว้ในบทที่ 1 ระบบเหล่านั้นต้องการการบำรุงรักษาที่สอดคล้องไปกับสภาพการใช้งานเช่นเดียวกับระบบไฟฟ้าซึ่งผู้วิจัยได้นำเสนอ ดังนั้น ระเบียบวิธีการปรับปรุงความเชื่อถือได้ยังสามารถนำไปศึกษาร่วมกับระบบย่อยอื่นได้ เช่น ระบบอาณัติสัญญาณ ระบบตัวถังรถไฟฟ้า ระบบประตูกันชนชานชาลา และระบบประตูเก็บค่าโดยสารอัตโนมัติ เป็นต้น ทั้งนี้ หากระบบย่อยทั้งหมดได้ถูกดำเนินการพัฒนาความเชื่อถือได้ด้วยกิจกรรมการบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่องพร้อมกับการใช้งานอย่างถูกต้องย่อมทำให้คุณภาพการให้บริการโดยรวมของระบบรถไฟฟ้าดียิ่งๆขึ้นไปด้วย

บรรณานุกรม

- [1] A Guide to the Reliability-Centred Maintenance (RCM) Standard, SAE JA1012, January 2002
- [2] ANDREWS, J.D. and MOSS, T.R., Reliability and Risk Assessment. Longman, Harlow, Essex, UK, 1993
- [3] Department of Defense United States of America, DoD Guide for Achieving Reliability, Availability, And Maintainability, August 2005
- [4] Department of Defense United States of America, Military Handbook Reliability Prediction of Electronic Equipment (MIL-HDBK-338B), December 1991
- [5] Department of Defense United States of America, Military Handbook Reliability Prediction of Electronic Equipment (MIL-HDBK-217F), December 1991
- [6] European Committee for Electrotechnical Standardization, EN50126, September 1999
- [7] European Committee for Electrotechnical Standardization, EN60300-3-11, November 2009
- [8] Guidelines for the Naval Aviation Reliability-Centred Maintenance Process, Navair 00-25-403, 1 March 2003
- [9] International Electrical Testing Association (NETA), Standard For Maintenance Testing Specification for Electrical Power Equipment and Systems (ANSI/NETA MTS-2011), 2011
- [10] L.F. Pau, published by Marcel-Dekker, Bromberg Study under NASA sponsorship (reported in 1973) and cited in Failure Diagnosis & Performance Monitoring Vol. 11, 1981
- [11] Land Transport Authority (LTA) and the service operators, SMRT and SBS Transit. <https://failrailsg.appspot.com/jan2014.html>, Singapore, January 2014
- [12] MSP Age Reliability Analysis Prototype Study by American Management Systems under contract to U.S. Naval Sea Systems Command Surface Warship Directorate reported, 1993
- [13] NASA. Reliability Centred Maintenance Guide for Facilities and Collateral Equipment. National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C. 2000
- [14] NOWLAN, F.S. and HEAP, H.F., Reliability-Centered Maintenance. Report AD/A 066-579, National Technical Information Service, US Department of Commerce, Springfield, Virginia. (UAL-DOD), 1978
- [15] Piotrowski, J., Pro-Active Maintenance for Pumps, Archives, February 2001
- [16] The Reliability Information Analysis Center, Electronic Parts Reliability Data (EPRD), 2014

- [17] Tim Allen, Submarine Maintenance Engineering, Planning and Procurement (SUBMEPP) a field activity of the Naval Sea Systems Command at Portsmouth NH, 2001
- [18] บริษัท ทางด่วนและรถไฟฟ้า จำกัด (มหาชน) คุณภาพการให้บริการ.แหล่งที่มา <http://www.bangkokmetro.co.th/> สืบค้นเมื่อวันที่ 23 ตุลาคม 2559.
- [19] สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (เลขที่อ้างอิงโครงการ 9300), รายงานการขอเปลี่ยนแปลงรายละเอียดโครงการในรายงานการวิเคราะห์ผลกระทบสิ่งแวดล้อมโครงการรถไฟฟ้าสายสีส้ม ช่วงศูนย์วัฒนธรรมแห่งประเทศไทย - ลำสาลี – มีนบุรี, สิงหาคม 2558



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – สกุล

นายประดิษฐ์ แก้วสาร

วัน เดือน ปีเกิด

25 มกราคม 2527

ประวัติการศึกษา

ระดับปริญญาตรี

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า ไฟฟ้ากำลัง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พ.ศ. 2549

สถานที่ทำงานปัจจุบัน

วิศวกรบริหารทรัพยากรที่บริษัททางด่วนและ
รถไฟฟ้ากรุงเทพ จำกัด (มหาชน)

ภาคผนวก ก

ระบบไฟฟ้าสำหรับระบบรถไฟฟ้า

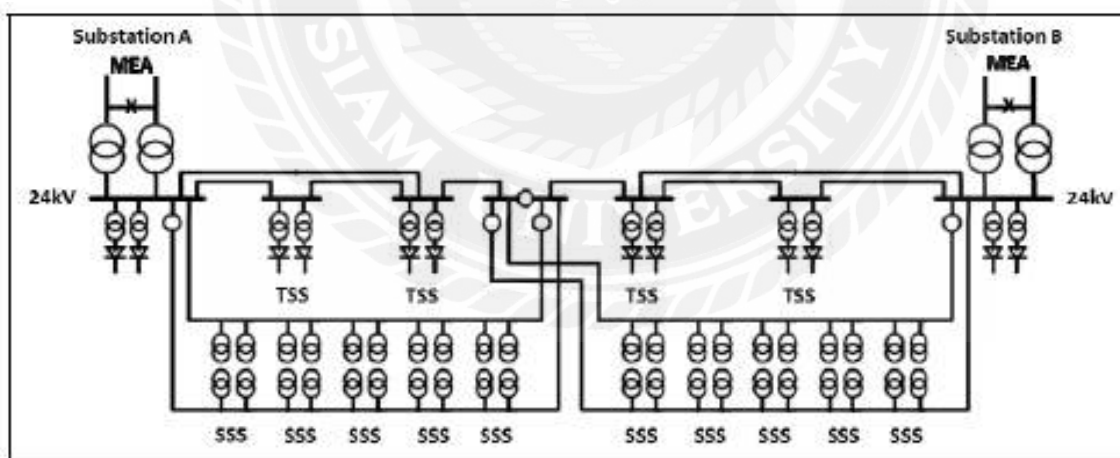


ระบบไฟฟ้าสำหรับระบบรถไฟฟ้า

ระบบจ่ายพลังงานให้กับโครงการรถไฟฟ้าเป็นระบบที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะเป็นระบบสนับสนุนให้ระบบขนส่งมวลชนให้บริการแก่ประชาชนได้อย่างปลอดภัย การออกแบบระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้านอกจากจะมุ่งเน้นความเพียงพอของพลังงานไฟฟ้าแล้วยังต้องมุ่งเน้นเรื่องเสถียรภาพของระบบโดยรวม ได้แก่ระบบพลังงานไฟฟ้า สำหรับสิ่งอำนวยความสะดวกในสถานี ภายในศูนย์ซ่อมบำรุง และระบบจ่ายพลังงานสำหรับการเดินรถ

1. ระบบไฟฟ้าโครงการ

ศูนย์ซ่อมบำรุงสำหรับโครงการสายสีส้มรับไฟฟ้าจากการไฟฟ้านครหลวงใน 2 ระดับแรงดันคือระดับ 115kV สำหรับจ่ายให้กับระบบปฏิบัติการและการบริหารการเดินรถทั้งหมด และระดับ 24kV สำหรับอาคารที่พักพนักงานขับรถ โดยไฟฟ้าแรงสูง 115kV นั้นจะรับมาจาก 2 แหล่งจ่าย ของการไฟฟ้านครหลวง คือ จากสถานีไฟฟ้าอยุธยาและสถานีไฟฟ้าอยุธยาบางกะปิ ผ่านมาทางสายส่งใต้ดินก่อนเข้าสู่ Bulk Substation ของโครงการที่จัดเตรียมไว้ แล้วแปลงระดับแรงดันลงเป็น 24kV ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า 115/24kV จ่ายให้กับระบบไฟฟ้าสำหรับขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้า (Traction Substations) และระบบไฟฟ้าสำหรับระบบสาธารณูปโภคอื่นๆ (Service Substations) ดังรูป



รูปที่ 1 ระบบไฟฟ้าสำหรับระบบรถไฟฟ้า

2. ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า

ระบบไฟฟ้าของโครงการสายสีส้มได้รับการกำหนดและออกแบบให้มีความน่าเชื่อถือสูง (High Reliability) กล่าว คือ มีโอกาสน้อยมากที่เกิดเหตุไฟฟ้าดับและยังมีระบบไฟฟ้าสำรองเมื่อเกิดไฟฟ้าขัดข้อง

อีกด้วย ผลของการรับไฟฟ้าจากการไฟฟ้านครหลวง 2 แหล่งจ่ายและในระดับแรงดัน 115kV และเป็นวงจรไฟฟ้าได้ดินซึ่งมีโอกาสน้อยมากที่ไฟฟ้าจากการไฟฟ้านครหลวงจะดับพร้อมกันทั้ง 2 แหล่งจ่าย

นอกจากนี้ยังออกแบบให้มีสถานีไฟฟ้า (Substation) 2 แห่ง โดย Substation A ตั้งอยู่ที่ศูนย์ซ่อม ส่วน Substation B ตั้งอยู่ที่สถานีสูวนทวงศ์ โดยมีการเชื่อมกันทางดำน 24kV ผ่าน Subsection Switchgear ในสถานีกกลางทาง เมื่อกระแสไฟฟ้าที่ Substation A ดับลงทั้งหมด Substation B ก็จะทำหน้าที่จ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับระบบแทนทั้งหมด ซึ่งขนาดหม้อแปลงใน Substation A และ Substation B จะมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะจ่ายไฟฟ้าให้กับโครงการทั้งหมด

3. ระบบไฟฟ้าสำรองฉุกเฉิน

ศูนย์ซ่อมบำรุงได้ออกแบบให้มีการติดตั้งเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรอง (Standby Generator) ขนาด 2,500 kVA จำนวน 5 ชุด ทำงานจ่ายไฟฟ้าขนานกันและส่งไปยังระบบ โดยแปลงไฟฟ้าเป็น 24kV ผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า 400V/24kV โดยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองนี้จะทำงานเมื่อเกิดภาวะฉุกเฉินในกรณีไฟฟ้าโครงการที่รับจาก

การไฟฟ้านครหลวงทั้งหมดดับลง ไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้านี้จะเน้นให้จ่ายกับระบบสำคัญๆ ระบบช่วยชีวิตและการอพยพผู้โดยสารเท่านั้น ซึ่งได้แก่ การให้ขบวนรถไฟฟ้าสามารถขับเคลื่อนไปยังสถานีใกล้เคียงได้ สำรองไฟฟ้าสำหรับอุปกรณ์ดับเพลิง ระบบระบายอากาศในสถานีในอุโมงค์ จ่ายไฟให้อุปกรณ์สำคัญในสถานี เช่น ลิฟต์ อุปกรณ์ควบคุมต่างๆ เป็นต้น

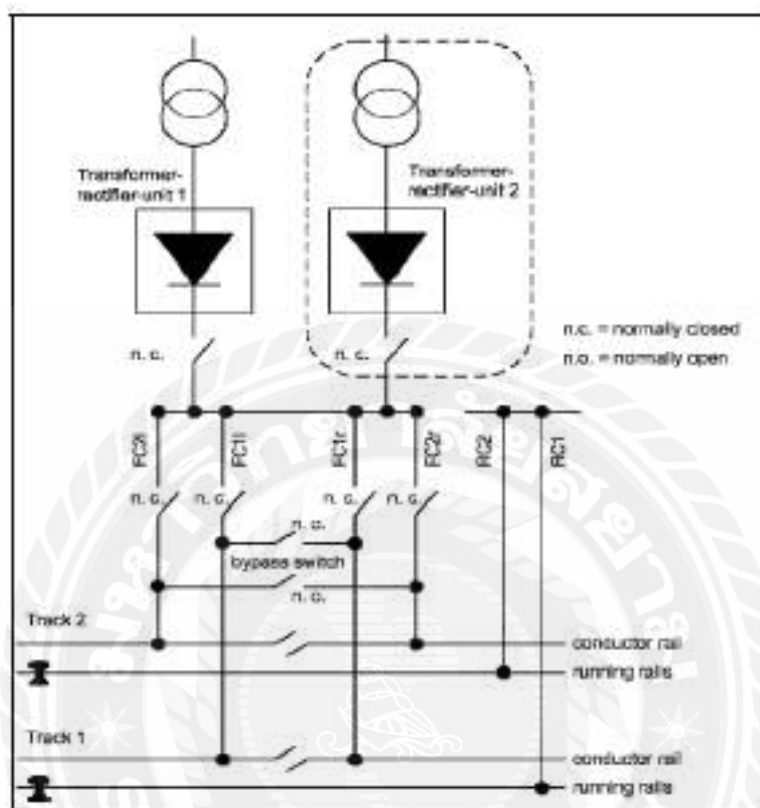


รูปที่ 2 ระบบพลังงานไฟฟ้าฉุกเฉินด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้า

4. ระบบไฟฟ้าสำหรับการเดินรถ

ระบบไฟฟ้าที่จ่ายให้ขบวนรถไฟฟ้านั้นรับมาจากไฟฟ้าโครงการที่ระดับ 24kV ac และแปลงลงเป็นไฟฟ้าแรงดันต่ำพร้อมกับเปลี่ยนเป็นไฟฟ้ากระแสตรงระดับแรงดัน 750Vdc ด้วย Traction Transformer และ

Rectifier และส่งกระแสไฟฟ้าตรงผ่านทางรางจ่ายไฟที่ 3 หรือ Conductor Rail เข้าขบวนรถไฟฟ้าที่ Collector Shoes เพื่อขับเคลื่อนขบวนรถไฟฟ้าต่อไป โดยอุปกรณ์ส่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงทั้งหมด ประกอบด้วย 24kV Switchgears, Traction Transformer, Rectifier, 750V dc switchgears นั้นติดตั้งอยู่ในห้อง Traction Substation ส่วน Conductor Rail นั้นจะวิ่งขนานไปกับรางวิ่งตลอดเส้นทาง



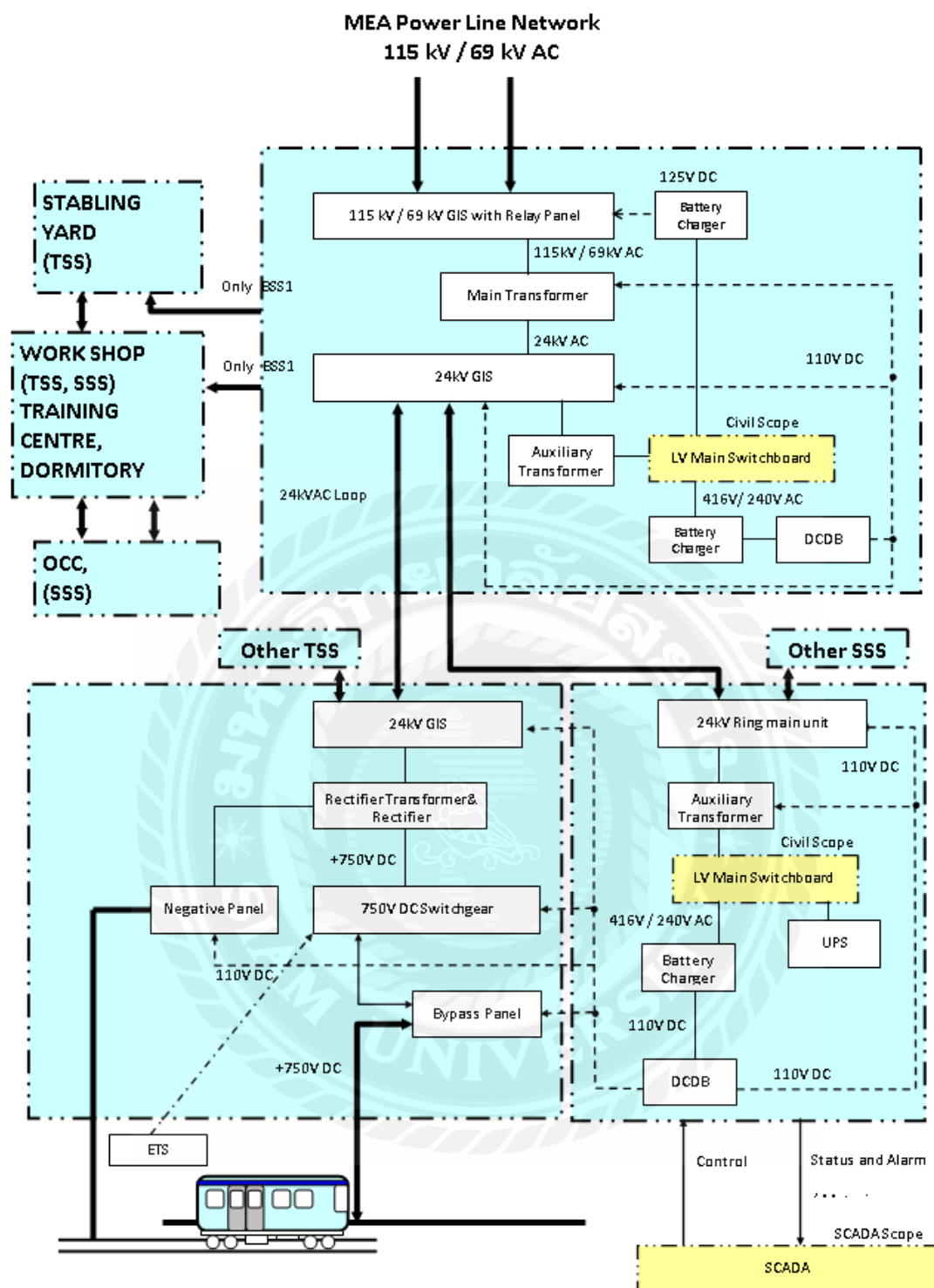
ตำแหน่ง Traction Substation จะถูกกำหนดด้วยการคำนวณและจำลองการใช้ไฟฟ้าสัมพันธ์กับจำนวนและตำแหน่งขบวนรถไฟฟ้าที่วิ่งอยู่บนเส้นทาง ทั้งในช่วงการเดินรถในสภาวะปกติและไม่ปกติ รวมถึงกำหนดขนาด Traction Transformer ให้มีขนาดเพียงพอกับความต้องการสูงสุด (Ultimate Capacity) ของโครงการอีกด้วย ซึ่งในโครงการสายสีส้ม Traction Substation จะตั้งอยู่ในสถานที่ที่มีระยะห่างกันประมาณ 2.0-2.5 กิโลเมตร รวมถึงติดตั้งอยู่ในศูนย์ซ่อมอีกด้วย

5. ระบบไฟฟ้าสำหรับการเดินรถในสภาวะฉุกเฉิน

สถานการณ์ที่เป็นสภาวะฉุกเฉินของระบบไฟฟ้าสำหรับการเดินรถ สามารถกำหนดการบริหารสถานการณ์ได้ดังนี้

1) กรณีที่ Traction Substation ชุดหนึ่งเกิดขัดข้องไม่สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ Traction Substation ตัวที่อยู่ถัดออกไปจะทำการจ่ายไฟฟ้าให้กับ Conductor Rail ในส่วนที่เกิดปัญหาทันทีแทน ซึ่งทำให้ Conductor Rail ยังคงมีไฟฟ้าป้อนให้กับขบวนรถไฟฟ้าอยู่ตลอด แต่ต้องทำการลดระดับความเร็วการเดินรถลงประมาณ ครึ่งหนึ่งของความเร็วปกติเพื่อไม่ให้ Traction Transformer รับภาระ Load มากเกินไป

2) กรณีที่ไฟฟ้าแหล่งจ่ายแรงสูงของการไฟฟ้าดับลงทั้งหมด ทำให้ไม่มีระบบไฟฟ้า 24kVac สำหรับป้อนให้กับ Traction Substation ต่างๆ ไม่มีไฟฟ้ากระแสตรงไปจ่ายให้กับขบวนรถไฟฟ้าตลอดเส้นทาง กรณีนี้มีโอกาสเกิดน้อยมาก ซึ่งในขบวนรถไฟฟ้านั้นเมื่อรับไฟฟ้า 750V dc แล้วจะแปลงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับด้วย Inverter จ่ายไฟฟ้าให้มอเตอร์ขับเคลื่อน นอกจากนี้ยังจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบอื่นๆ ในขบวนรถไฟฟ้าด้วย อาทิเช่น เครื่องปรับอากาศ หลอดไฟแสงสว่าง ระบบสื่อสาร การเปิด-ปิดประตู เป็นต้น โดยมีการติดตั้ง Battery สำรองสำหรับจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบที่สำคัญๆ ในสถานะฉุกเฉิน เช่น หลอดไฟห้องคนขับ ระบบควบคุมและป้องกันขบวนรถ ระบบระบายอากาศฉุกเฉิน ระบบสื่อสาร และการเปิดประตुरถไฟฟ้า ในรถไฟฟ้ารุ่นแรกๆ Battery สำรองนี้จะไม่จ่ายไฟฟ้าให้กับมอเตอร์ขับเคลื่อน เมื่อระบบไฟฟ้าขับเคลื่อน 750Vdc ดับลง ขบวนรถไฟฟ้ายังสามารถเคลื่อนต่อไปได้ด้วยแรงเฉื่อยสักพักหนึ่งและหยุดลง และเมื่อเครื่องกำเนิดไฟฟ้าสำรองส่วนกลางทำงานสามารถส่งกระแสไฟฟ้าภายใน 30 วินาที ผู้ควบคุมเส้นทางก็จะสั่งการให้ทำการเดินรถในแต่ละจุดไปส่งผู้โดยสารในสถานีที่ใกล้ที่สุดต่อไป และถ้าไม่มีกระแสไฟฟ้าจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีก พนักงานขับจะนำผู้โดยสารออกจากขบวนรถไปยังสถานีหรือทางออกที่ใกล้ที่สุดหลังจากได้รับอนุมัติจากผู้ควบคุมส่วนกลางแล้ว นอกจากนี้ในส่วนประตูกันชนขบวนรถที่สถานีรถไฟฟ้านั้น กำหนดการออกแบบให้มีประตู Emergency ที่สามารถเปิดจากด้านนอกด้วยมือได้ (Manual) ในสถานะที่ไฟฟ้าหลักของสถานีดับลงทั้งหมด



รูปที่ 3 แบบจำลองระบบไฟฟ้าสำหรับระบบรถไฟ

6. MTTR และ MDT ของบริษัทไฟฟ้า

ข้อมูลจำเพาะ MTTR ของบริษัทไฟฟ้าที่ใช้ในระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าสำหรับระบบรถไฟฟ้า เนื่องจากระบบรถไฟฟ้ามียกยณะโครงสร้างเป็นแนวยาวตามเส้นทางให้บริการ จุดประจำการของหน่วยซ่อมบำรุงจะอยู่ส่วนกลาง ดังนั้นเวลาที่ใช้สำหรับแก้ไขอุปกรณ์เมื่อเกิดความล้มเหลวขึ้นจำเป็นต้องบวกระยะเวลาเดินทางระหว่างศูนย์ประจำการไปยังที่ตั้งของอุปกรณ์

Element	Failure Rate (1/hr)	MTTR (hrs)	Data Source	MDT (hrs)
Diode module	3.44E-07	2.5	Engineering Experience	3.5
Thermostat	1.57E-05	1.5	Engineering Experience	2.5
Earth Fault Protection Replay	3.00E-07	1.5	Engineering Experience	2.5
Micro Switch	1.54E-06	1.5	Engineering Experience	2.5
Surge Arrestor	9.26E-06	2	Engineering Experience	3
HSCB	2.00E-08	1.5	Engineering Experience	2.5
Contactar	1.06E-06	2.5	Engineering Experience	3.5
Protect and Control Panel	4.17E-06	3	Engineering Experience	4
Control Fuse	1.28E-06	1	Engineering Experience	2
Battery	7.01E-06	3	Engineering Experience	4
Switch	7.00E-08	1	Engineering Experience	2
Rectifier	4.85E-07	2.5	Engineering Experience	3.5
Inverter	7.78E-06	2.5	Engineering Experience	3.5
MCCB	3.31E-09	1	Engineering Experience	2
Insulation Transformer	3.00E-08	3	Engineering Experience	4
Circuit Breaker	5.26E-06	3	Engineering Experience	4
BSS1 Genset	5.30E-05	6	Engineering Experience	7

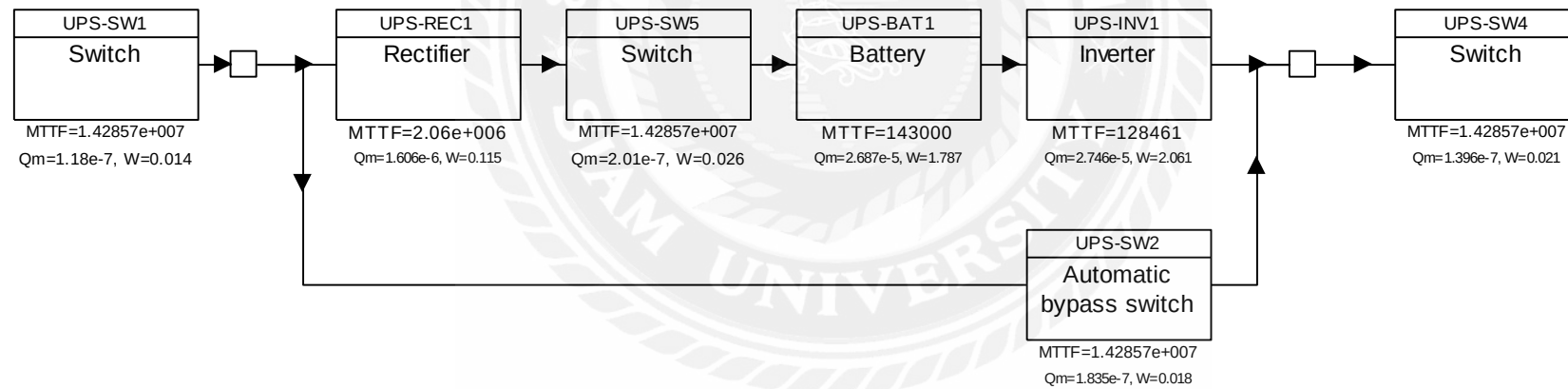
Element	Failure Rate (1/hr)	MTTR (hrs)	Data Source	MDT (hrs)
Switchgear	3.47E-06	8	Engineering Experience	9
Control Panel	1.73E-05	3	Engineering Experience	4
Transformer	5.02E-07	6	Engineering Experience	7
Metering Device	2.23E-07	2	Engineering Experience	3
HSCB	2.00E-08	2	Engineering Experience	3
Thermal Relay	1.57E-05	2	Engineering Experience	3
Load Break Switch	9.94E-09	6	Engineering Experience	7

ภาคผนวก ข

Reliability Block Diagram



Reliability Block Diagram





ภาคผนวก ค

ปัจจัยที่ส่งกระทบต่อความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟ

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟ

