

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาเรื่องการปรับปรุงความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้าด้วยการบำรุงรักษาครอบคลุมถึง

1. ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวกับระบบรถไฟฟ้า
3. การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาเรื่องการปรับปรุงความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้าด้วยการบำรุงรักษาประกอบด้วย

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

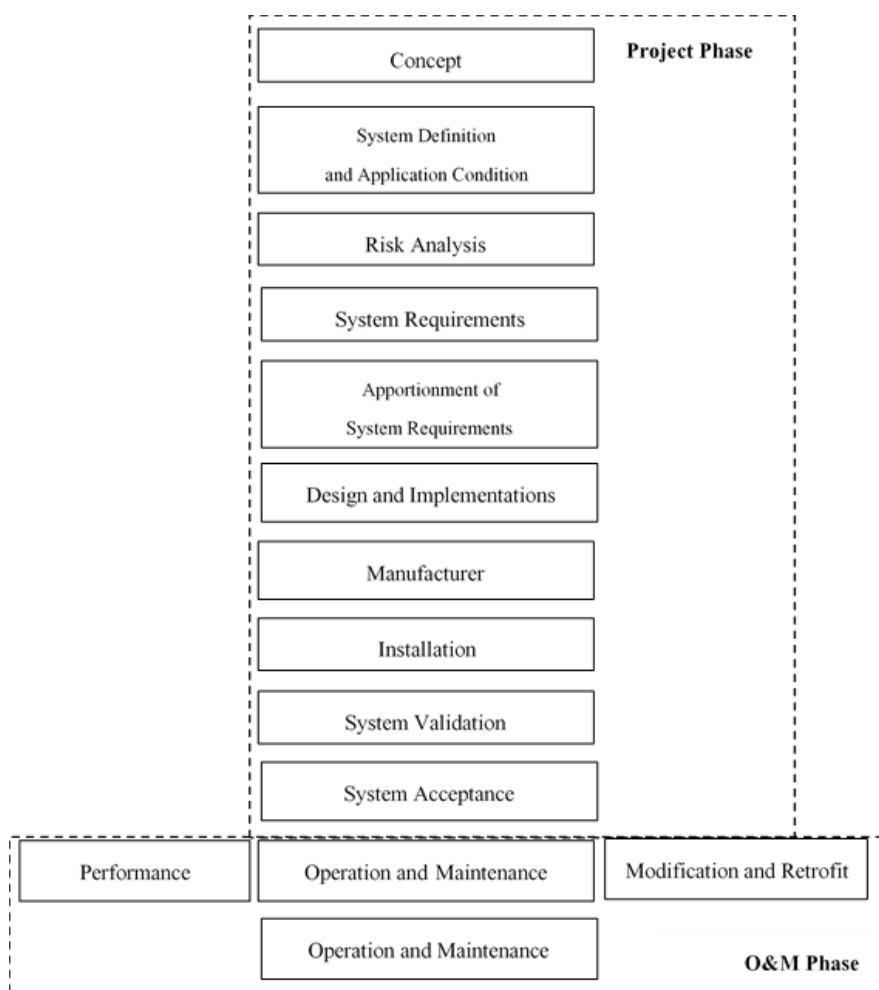
2.1.1 ทฤษฎีการบริหารโครงการรถไฟฟ้า

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 ระบบตัวถังรถไฟ 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 ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณจะอยู่ใน โดเมนเวลาที่อุปกรณ์ อาจเกิดความล้มเหลวหรือมีความเป็นไปได้ที่อุปกรณ์จะเกิดความล้มเหลว เวลาของอุปกรณ์แต่ละประเภทจะเกิดความล้มเหลวแตกต่างกันซึ่งไม่สามารถพิสูจน์ทราบได้อย่างแน่ชัดในทางปฏิบัติ ดังนั้นเวลาที่ อุปกรณ์ต้องการการบำรุงรักษาจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยที่อุปกรณ์นั้นถูกติดตั้งและใช้งานเป็นสำคัญ

เนื่องจากพารามิเตอร์ของ RAM ถูกกำหนดในรูปสมการความน่าจะเป็น ดังนั้นพารามิเตอร์ความน่าจะเป็น เช่น ตัวแปรตามแบบสุ่ม ฟังก์ชันความหนาแน่นการกระจายตัว และฟังก์ชันการแจกแจงความถี่ จึงถูกใช้สำหรับสร้างทฤษฎีความน่าเชื่อถือ

การศึกษาความน่าเชื่อถือจะเกี่ยวกับตัวแปรทั้งแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ตัวอย่างตัวแปรสุ่มแบบไม่ต่อเนื่องคือจำนวนครั้งการเกิดความล้มเหลวของอุปกรณ์ในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่ง ตัวอย่างตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่องคือระยะเวลาตั้งแต่อุปกรณ์ถูกติดตั้งจนกระทั่งอุปกรณ์นั้นเกิดความล้มเหลวหรือระยะเวลา ระหว่างความล้มเหลวของอุปกรณ์

ฟังก์ชันการแจกแจงความถี่สะสม $F(t)$ ถูกใช้เพื่อเป็นสมการความน่าจะเป็นในการทดสอบหาตัวแปรตามซึ่งมีค่าไม่เกินเวลา 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, $h(t)$) หรือความล้มเหลวขึ้นอย่างลับพลัน สามารถประเมินได้จาก การกำหนด $\Delta t \rightarrow 0$ ในสมการอัตราการความล้มเหลว $\lambda(t)$ จะได้ว่า

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{\Delta t R(t)}$$

$$h(t) = \frac{-1}{R(t)} \left[\frac{dR(t)}{dt} \right] = \frac{1}{R(t)} \left[\frac{-dR(t)}{dt} \right] \quad (2.7)$$

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 $h(t)$ จากการศึกษาความล้มเหลว $f(t)$ บนความน่าเชื่อถือ $R(t)$ ของอุปกรณ์ ณ เวลา t ใด ๆ

สมการที่ (2.7) อธิบายได้ว่าอัตราการเกิดอันตรายเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงอัตราความคงทนต่อหน่วยเวลาที่เปลี่ยนไป

เพื่อให้เข้าใจแนวคิดได้ชัดเจนยิ่งขึ้นผู้วิจัยขอยกตัวอย่างการทดสอบอุปกรณ์โดยเริ่มที่ความน่าเชื่อถือที่ t_0 ด้วยจำนวนอุปกรณ์ N_0 ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปเป็นเวลา t ทำให้อุปกรณ์ถูกใช้งานและเกิดความล้มเหลวขึ้นและเสียหายไปส่วนหนึ่ง N_s จนกระทั่งทำให้เหลืออุปกรณ์ที่ใช้งานได้เป็นจำนวน 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

$$h(t) = \frac{-1}{R(t)} \left[\frac{dR(t)}{dt} \right]$$

$$-h(t)dt = \frac{dR(t)}{R(t)} \quad (2.13)$$

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) เป็นรูปทั่วไปเมื่อพิจารณาให้อัตราความอันตรายจากการเกิดความล้มเหลวเป็นค่าคงที่จะได้สมการอัตราการเกิดความล้มเหลวคงที่ (λ) ซึ่งจะเป็นจริงเสมอสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้า[3]

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

สมการข้างต้นถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือ อย่างไรก็ตามการนำไปใช้จำเป็นต้องมีข้อมูลอัตราการล้มเหลวของอุปกรณ์ที่เชื่อถือได้ สมการสามารถนำไปใช้สำหรับคำนวณหาความน่าเชื่อถือของระบบที่อยู่ในรูปของระยะเวลาที่อุปกรณ์จะเกิดความล้มเหลว (Mean Tim 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 รูปแบบอย่างจะมีโอกาสล้มเหลวมากในระยะเริ่มต้นใช้งานและลดลงเมื่อใช้งานไปสักระยะ จากนั้นจะเพิ่มขึ้นเมื่อใกล้สิ้นอายุการใช้งานของอุปกรณ์

แบบ ข รูปแบบดั้งเดิม โอกาสการล้มเหลวจะน้อยในระยะเริ่มแรกและคงที่ไปตลอดจะกระทั่งเมื่อใกล้สิ้นอายุการใช้งาน โอกาสการล้มเหลวจะเพิ่มขึ้น

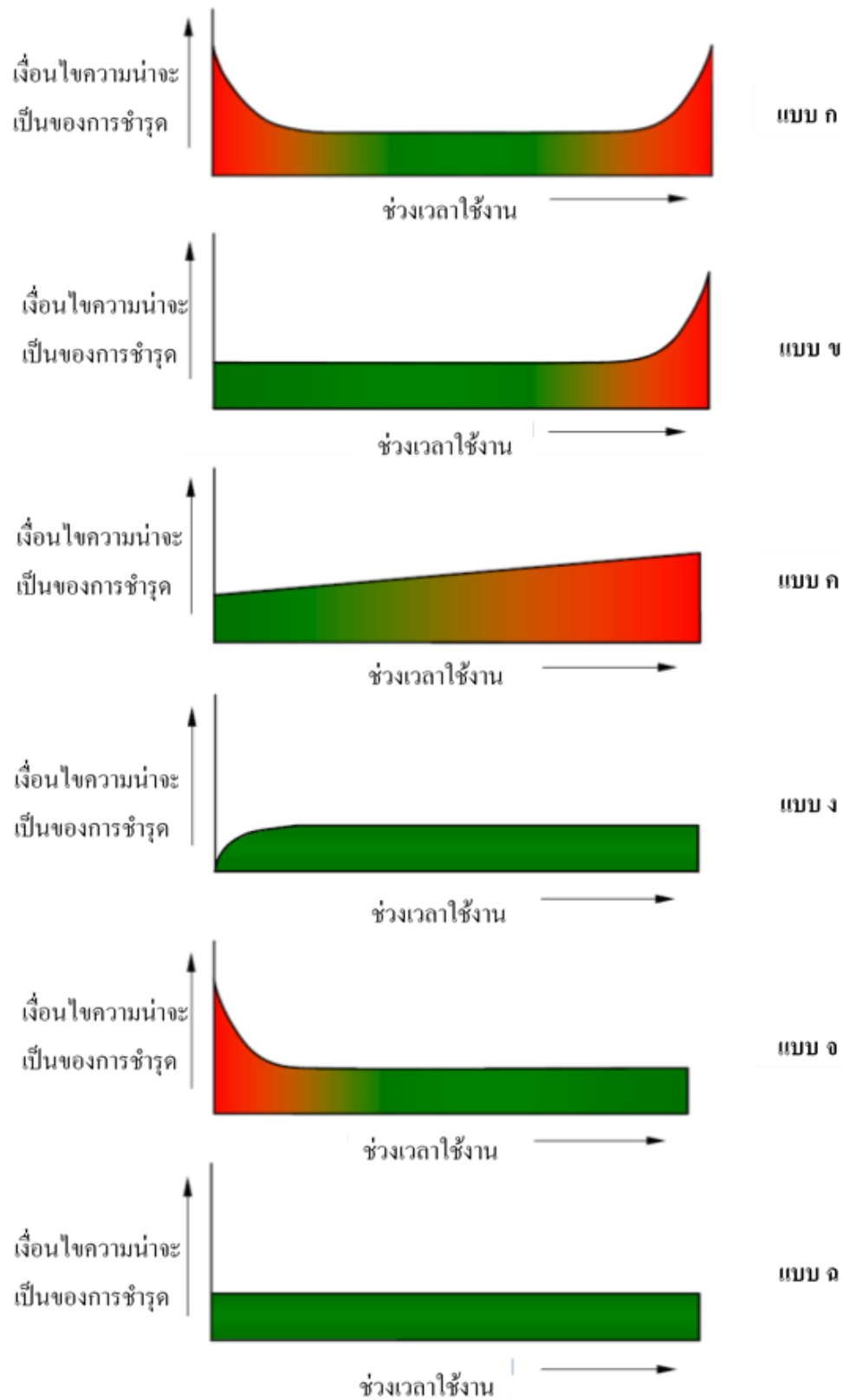
แบบ ค โอกาสการล้มเหลวจะเพิ่มขึ้นตามอายุการใช้งานของอุปกรณ์

แบบ ง การล้มเหลวบกพร่องของอุปกรณ์จะน้อยในช่วงเริ่มต้นการใช้งานจากนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและคงที่ไปตลอดอายุการใช้งาน

แบบ จ โอกาสการล้มเหลวจะมีค่าสูงมากในระยะเริ่มต้นการใช้งานและจะลดลงเมื่อใช้งานไปเป็นระยะเวลาหนึ่ง จากนั้น โอกาสการล้มเหลวจะคงที่ตลอดจนถึงสิ้นสุดอายุการใช้งาน

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 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบรถไฟฟ้

ทฤษฎีเกี่ยวกับระบบรถไฟฟ้ประกอบด้วย ทฤษฎีความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟฟ้ ความสัมพันธ์ระหว่างความน่าเชื่อถือและคุณภาพของการให้บริการระบบรถไฟฟ้ การประเมินคุณภาพการให้บริการระบบรถไฟฟ้ การประเมินความพร้อมใช้ของระบบรถไฟฟ้ การประเมินงานบำรุงรักษาบริภัณฑ์ไฟฟ้สำหรับระบบรถไฟฟ้ การประเมินความเสี่ยงของอุปกรณ์ในระบบรถไฟฟ้ และกิจกรรมงานบำรุงรักษาบริภัณฑ์ไฟฟ้ของระบบรถไฟฟ้

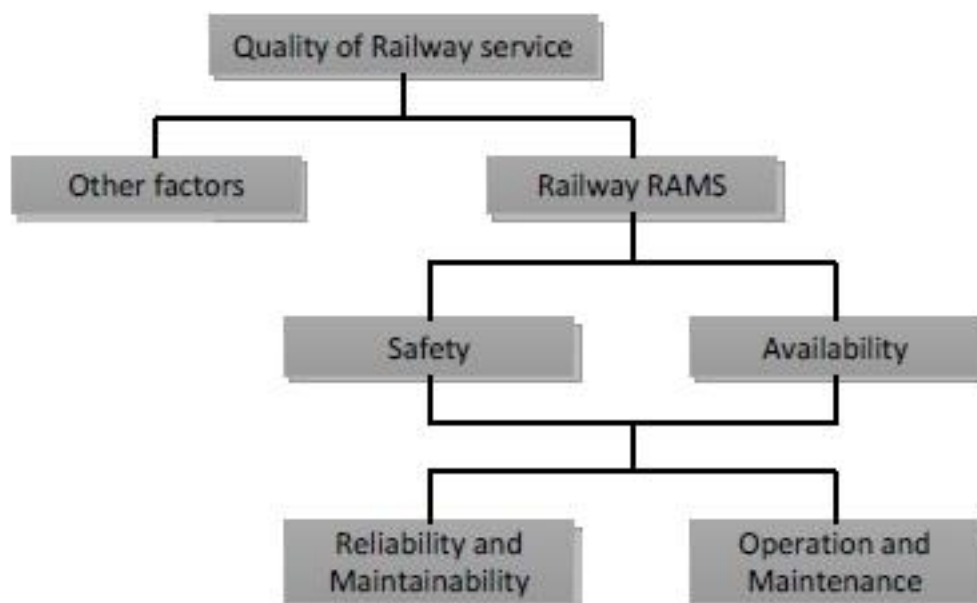
2.2.1 ความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้

ระบบรถไฟฟ้มีเป้าหมายเพื่อการขนส่งภายในเวลาที่กำหนดอย่างปลอดภัย ความเชื่อถือได้ (Dependability) ของระบบรถไฟฟ้เป็นตัวชี้วัด (Railway Reliability, Availability, Maintainability and Safety: Railway RAMS) ถูกกำหนดขึ้นเพื่อให้ผู้โดยสารมีความมั่นใจได้ว่าระบบรถไฟฟ้มีสมรรถนะและความสามารถบรรลุเป้าหมาย[2] ส่งผลต่อคุณภาพการให้บริการแก่ผู้โดยสาร ความเชื่อถือได้ของระบบรถไฟฟ้ประกอบด้วย ความน่าเชื่อถือของระบบ (Reliability) ความพร้อมใช้ของระบบ (Availability) ความสามารถในการบำรุงรักษาระบบ (Maintainability) และสวัสดิภาพความปลอดภัย (Safety) ของผู้โดยสารที่ใช้งานระบบ นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นที่ตอบสนองต่อความพึงพอใจของผู้โดยสาร เช่น ความถี่ของการให้บริการ ความสม่ำเสมอของการให้บริการ โครงสร้างราคาค่าโดยสาร เป็นต้น [1]

2.2.2 ความน่าเชื่อถือและคุณภาพของการให้บริการระบบรถไฟฟ้

ปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพการให้บริการระบบรถไฟฟ้ในประเทศไทยมีทั้งปัจจัยที่มาจากผู้ปฏิบัติงานให้บริการ ผู้โดยสารและปัจจัยที่มาจากความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์ในระบบรถไฟฟ้ซึ่งเมื่อเกิดความล้มเหลวขึ้นแล้วจะส่งผลต่อคุณภาพการให้บริการแก่ผู้โดยสาร

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



รูปที่ 2.3 แสดงองค์ประกอบที่ส่งผลต่อคุณภาพการให้บริการระบบรถไฟ

เพื่อพิจารณาองค์ประกอบที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพการให้บริการเฉพาะที่มาจากความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟโดยไม่พิจารณาองค์ประกอบจากปัจจัยภายนอก เช่น ผู้ใช้งานระบบ โครงสร้างราคาค่าโดยสารซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ จะทำให้สามารถระบุตัวชี้วัดความน่าเชื่อถือของระบบรถไฟได้[1]

2.2.3 การประเมินคุณภาพการให้บริการระบบรถไฟ

การประเมินคุณภาพการให้บริการระบบรถไฟสามารถพิจารณาได้จากความพร้อมใช้ของการให้บริการรถไฟ และความไม่ตรงต่อเวลาของการให้บริการรถไฟอันเนื่องมาจากความล้มเหลวของอุปกรณ์ไฟฟ้า

ความถี่ของการให้บริการระบบรถไฟจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัน เช่น วันทำงานปกติ วันหยุดประจำสัปดาห์ เป็นต้น และช่วงเวลาระหว่างวันจะมีความถี่การให้บริการที่ต่างกันเช่น ความถี่การให้บริการในชั่วโมงเร่งด่วน (Peak Hour Headway) ของวันจะมีความถี่ที่มากกว่าเพื่อให้บริการได้ทันกับความต้องการใช้บริการของผู้โดยสาร ดังนั้นการพิจารณาการให้บริการจึงนิยมพิจารณาโดยใช้ความถี่การให้บริการโดยเฉลี่ยในรอบปี (Average Headway) ซึ่งสามารถประเมินได้จากจำนวนชั่วโมงที่ระบบรถไฟเปิดให้บริการตลอดทั้งปีเปรียบเทียบกับครึ่งหนึ่งของจำนวนเที่ยวที่ให้บริการตลอดทั้งปี

จำนวนรถไฟที่ไม่พร้อมให้บริการหรือจำนวนรถไฟที่ถูกยกเลิกให้บริการประเมินได้จากเวลาที่เหตุการณ์ความล้มเหลวนั้นเกิดขึ้นและส่งผลให้การให้บริการระบบรถไฟต้องถูกระงับไปจนกระทั่ง

ระบบได้ถูกแก้ไขและกลับคืนสู่สภาวะการให้บริการปกติ ซึ่งประเมินได้จากสองเท่าของการปิดพิเศษเลข
ทศนิยมขึ้นให้เป็นจำนวนเต็มของอัตราส่วนระหว่างเวลาที่การให้บริการถูกระงับกับความถี่การให้บริการ
เฉลี่ย จากสูตร

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

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

TSUc คือ จำนวนเที่ยวโดยสารที่ยกเลิกด้วยสาเหตุจากความล้มเหลวของอุปกรณ์

เที่ยวโดยสารหมายถึงการให้บริการขบวนรถไฟฟ้าที่ออกจากสถานีต้นทางถึงสถานีที่ต้องกลับทิศทางการให้บริการและมายังสถานีเริ่มต้นอีกครั้งตามตารางเวลาการให้บริการและเที่ยวโดยสารที่ยกเลิกหมายถึง เที่ยวโดยสารใดๆ ที่ไม่สามารถออกให้บริการจากสถานีต้นทางได้ภายใน 2 นาทีในช่วงชั่วโมงเร่งด่วน และภายใน 5 นาทีนอกชั่วโมงเร่งด่วน

ความไม่ตรงต่อเวลาของการให้บริการรถไฟฟ้า

ความไม่ตรงต่อเวลาของการให้บริการประเมินเทียบกับค่าที่กำหนดไว้โดยหน่วยงานของรัฐวิสาหกิจผู้ทำหน้าที่กำกับดูแลกิจกรรมการให้บริการในรูปแบบตารางเวลาการเดินทาง เพื่อให้เป็นมาตรการควบคุมคุณภาพการให้บริการในแต่ละวัน โดยการบันทึกความล่าช้าของขบวนรถไฟฟ้าที่เปิดให้บริการจะพิจารณาเฉพาะเที่ยวที่ล่าช้าเกินกำหนดซึ่งไม่รวมความล่าช้าที่เกิดจากพนักงานผู้ให้บริการหรือความล่าช้าที่เกิดจากผู้โดยสาร

ความไม่ตรงต่อเวลาประเมินจากจำนวนเที่ยวรถไฟฟ้าที่ให้บริการล่าช้ากว่า 2 นาทีเปรียบเทียบกับจำนวนเที่ยวการให้บริการที่ระบุไว้ในตารางเวลาให้บริการ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตร

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

เมื่อ TSDs คือ จำนวนเที่ยวรถไฟฟ้าซึ่งระบุไว้ในตารางเวลาเพื่อให้บริการ

TSDc คือ จำนวนเที่ยวรถไฟฟ้าที่เกิดความล่าช้าเกิน 2 นาทีด้วยสาเหตุมาจากความล้มเหลวของระบบไฟฟ้า

ตัวอย่างการประเมินความล่าช้าของระบบรถไฟฟ้าซึ่งเกิดจากความล้มเหลวของอุปกรณ์จนทำให้ระบบรถไฟฟ้าเกิดความล่าช้า 2 นาที

เนื่องจากความล้มเหลวของอุปกรณ์นั้นทำให้ระบบรถไฟฟ้าเกิดความล่าช้าเกินกว่า 1 ขบวน เทียบกับปริมาณเที่ยวรถไฟฟ้าที่ให้บริการในแต่ละเดือน 12,160 เที่ยว จึงสามารถประเมินจำนวนรถไฟฟ้าเกิดความล่าช้าได้จากสูตร

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

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

2.2.4 การประเมินความพร้อมใช้ของระบบรถไฟฟ้

การประเมินความพร้อมใช้ของระบบรถไฟฟ้สามารถแบ่งออกเป็นสองรูปแบบคือความไม่พร้อมใช้งานที่ประเมินไว้สำหรับการทำงานบำรุงรักษาตามวาระ 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 การประเมินงานบำรุงรักษาบริภัณฑ์ไฟฟ้าสำหรับระบบรถไฟฟ้

การประเมินงานซ่อมบำรุง (Maintainability Analysis) กำหนดขึ้นเพื่อตรวจสอบกิจกรรมซ่อมบำรุงที่จะดำเนินการกับระบบพร้อมทั้งสำรวจและประเมินความเพียงพอของเวลาที่ใช้ทำงานซ่อมบำรุง ทักษะ ความชำนาญของผู้ปฏิบัติงาน อุปกรณ์สิ้นเปลืองและเครื่องมือที่จำเป็น การตรวจสอบงานซ่อมบำรุง

ประกอบด้วย การตรวจสอบงานบำรุงรักษาเพื่อป้องกันตามวาระ (Preventive Maintenance Analysis, PMA) และการบำรุงรักษาเชิงแก้ไขเมื่อเกิดความล้มเหลวขึ้น (Corrective Maintenance Analysis, CMA)

การประเมินงานบำรุงรักษาเชิงแก้ไขเพื่อกู้คืนระบบ (CMA) จะใช้เพื่อประเมินประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดเพื่อกู้คืนระบบให้กลับสู่สภาพที่พร้อมใช้งานได้อย่างถูกต้องตามอาการที่เกิดขึ้น ดังนั้นจะเป็นการวัดประสิทธิภาพของผู้ปฏิบัติงานซึ่งต้องการการส่งเสริมให้มีความรู้ความสามารถพร้อมสำหรับกู้คืนสถานการณ์ ใช้เป็นข้อมูลเพื่อปรับปรุงปริมาณงานบำรุงรักษาให้สอดคล้องกับสภาพของอุปกรณ์ด้วย และใช้สำหรับประเมินสมรรถนะและขีดความสามารถของเครื่องมือที่ใช้ในการซ่อมบำรุงอีกทางหนึ่ง

การประเมินการบำรุงรักษาเพื่อป้องกันการล้มเหลวตามวาระ (PMA) จะถูกประเมินและดำเนินการเพื่อสร้างความน่าเชื่อถือต่อระบบ โดยรวมว่าจะไม่เกิดความล้มเหลวเนื่องจากการบำรุงรักษาที่ไม่เพียงพอ 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 การประเมินความเสี่ยงของอุปกรณ์ในระบบรถไฟฟ้

การประเมินความเสี่ยง[1]ของอุปกรณ์ไฟฟ้าเริ่มต้นด้วยการนำความเป็นไปได้หรือจำนวนครั้งของการเกิดความล้มเหลวของอุปกรณ์ขึ้นในระบบไฟฟ้ามาจัดอันดับเพื่อพิจารณาความถี่ที่เกิดขึ้น และ ประเมินความรุนแรงของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นกับระบบรถไฟฟ้ อันเนื่องมาจากการล้มเหลวของอุปกรณ์ 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 ครั้ง ใน 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) สามารถคาดการณ์อย่างเหตุผลได้ว่า 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

ความรุนแรงที่เกิดขึ้นจากความล้มเหลวที่อาจส่งผลกระทบต่อบุคคล 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

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

ตารางที่ 2.4 ตารางไขว้การประเมินระดับความเสี่ยง

		ระดับความรุนแรง			
		Insignificant	Marginal	Critical	Catastrophic
ระดับความถี่	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

เมื่อนำบริษัทไฟฟ้ามาติดตั้งใช้งานในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างจากสิ่งที่คุณผลิตแนะนำจะทำให้ อุปกรณ์เหล่านั้นมีความน่าเชื่อถือที่เปลี่ยนไป ดังนั้น เพื่อคงสภาพให้อุปกรณ์ทำงานได้อย่างมีความน่าเชื่อถือ กิจกรรมการบำรุงรักษาต้องได้รับการพิจารณาปรับปรุงให้สอดคล้องกับสภาพที่ใช้งานจริง

สภาพการใช้งานบริษัทไฟฟ้าตามมาตรฐาน[11] มี 3 ลักษณะคือ ติดตั้งใช้งานภายนอกอาคารปราศจากสิ่งป้องกันมลภาวะที่มาจากสิ่งแวดล้อม (Poor Condition) ติดตั้งใช้งานภายในอาคารที่มีการระบายอากาศโดยพึ่งพาการหมุนเวียนอากาศตามธรรมชาติ (Average Condition) และติดตั้งใช้งานภายในอาคารที่มีระบบควบคุมสภาพแวดล้อมทั้งอุณหภูมิและความชื้น (Good Condition) เพื่อให้การใช้งานบริษัทไฟฟ้าให้เกิดความน่าเชื่อถือสูงสุดสามารถปรับปรุงความถี่ในการบำรุงรักษาโดยใช้ตัวคูณตามตารางไขว้ตัวคูณความถี่งานบำรุงรักษาบริษัทระบบไฟฟ้า[11]

ตารางที่ 2.7 ตารางไขว้ตัวคูณความถี่งานบำรุงรักษาบริษัทระบบไฟฟ้า

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 เนื่องจากสมการนี้ถูกสร้างขึ้นบนสมมติฐานที่ความพร้อมใช้ของอุปกรณ์กระจายตัวต่อเนื่อง ความไม่พร้อมใช้ของอุปกรณ์จากสมการข้างต้น ไม่รวมความไม่พร้อมใช้เนื่องจากสาเหตุความจำเป็นที่ต้องทำอุปกรณ์ให้กลับคืนสู่การทำงานตามฟังก์ชันเมื่อถูกพบความล้มเหลว อย่างไรก็ตาม ระยะเวลาการค้นหาความเสี่ยงที่อาจก่อให้เกิดความล้มเหลวแล้วแก้ไขก่อนที่อุปกรณ์จะเกิดความล้มเหลวยังน้อยกว่าที่จะต้องดำเนินการแก้ไขเมื่อฟังก์ชันหลักของอุปกรณ์เกิดความล้มเหลว

SAE JA [13] ทำการศึกษาในปี 2002 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความน่าเชื่อถือของระบบที่ดำเนินการเพื่อป้องกันความล้มเหลวของอุปกรณ์ ฟังก์ชันการป้องกันของตัวอุปกรณ์ และความน่าจะเป็นที่อาจจะเกิดความล้มเหลวของอุปกรณ์ขึ้นหลายครั้ง 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 โดยได้ผลการศึกษาดังตามสมการ

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

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

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

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

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 ได้บุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญในงานที่รับผิดชอบ

ข้อเสีย เสียค่าใช้จ่ายไปกับอุปกรณ์ เครื่องมือ และบุคลากรสำหรับวินิจฉัยอุปกรณ์ เพิ่มงบประมาณสำหรับพนักงานที่ต้องได้รับการฝึกอบรมเพื่อใช้เครื่องมือที่มีความพิเศษเฉพาะด้าน

2.3.3 การศึกษาการบำรุงรักษาเพื่อความน่าเชื่อถือของอุปกรณ์

การบำรุงรักษาแบบ Reliability Centered Maintenance เริ่มมีแนวความคิดมาตั้งแต่ปี 1950 ที่ได้มีการพบว่าการบำรุงรักษาเชิงป้องกันไม่เพียงพอต่อการบำรุงรักษาชิ้นส่วนที่ซับซ้อนของเครื่องบิน 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 ได้ผลการศึกษาดังตาราง

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