



การปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาของระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิงในท่าเทียบเรือขนถ่ายปิโตรเคมีเหลว IMPROVEMENT OF MAINTENANCE PLAN FOR FIRE PUMP SYSTEM IN PETROCHEMICAL JETTY AND TERMINAL

จิตรา รุกิจการพานิช^{1*} และณภัทร บรรจงกิจ²

^{1*}รองศาสตราจารย์, ²นิสิตปริญญาโท, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

*Corresponding author: mr_chukiat@yahoo.com

บทคัดย่อ

แผนการบำรุงรักษาของระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการระงับเหตุเพลิงไหม้ในท่าเทียบเรือที่ใช้น้ำมันปิโตรเคมีเหลว แผนการบำรุงรักษาที่มีอยู่เดิมนั้นยังขาดการตรวจพบความผิดปกติล่วงหน้าจึงส่งผลให้เกิดการขัดข้องของเครื่องสูบน้ำดับเพลิงหลายครั้งในขณะฝึกซ้อมแผนฉุกเฉิน เมื่อวัดค่าความพร้อมใช้งานของเครื่องสูบน้ำดับเพลิงได้เพียง 65.4% งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาโดยเพิ่มเติมวิธีการตรวจจับความผิดปกติของการทำงานของระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิง โดยส่วนประกอบของระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิงในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า เครื่องยนต์ดีเซล และเครื่องสูบน้ำดับเพลิง ในการดำเนินงานวิจัยได้เริ่มจาก 1) ทำการวิเคราะห์ความล้มเหลวของการทำงานของส่วนประกอบของระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิง 2) จัดลำดับอาการขัดข้องที่ทำให้เกิดความล้มเหลวของการทำงาน 3) นำอาการขัดข้องที่วิเคราะห์ได้มากำหนดเป็นความผิดปกติที่ต้องตรวจและกำหนดเป็นแผนการบำรุงรักษา 4) ดำเนินงานตามแผนการบำรุงรักษา ผลการดำเนินงานในช่วงแรกพบว่าสามารถตรวจพบความผิดปกติล่วงหน้าได้ 9 รายการ เมื่อดำเนินการแก้ไขความผิดปกติที่ตรวจพบและดำเนินการตามแผนการบำรุงรักษาที่ปรับปรุงแล้วอย่างต่อเนื่อง เมื่อทำการติดตามผลเป็นเวลาหนึ่งปีแล้วยังไม่พบการขัดข้องของระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิงในขณะฝึกซ้อมแผนฉุกเฉินอีก

คำสำคัญ: ระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิง, ท่าเทียบเรือที่ใช้น้ำมันปิโตรเคมีเหลว, แผนการบำรุงรักษา

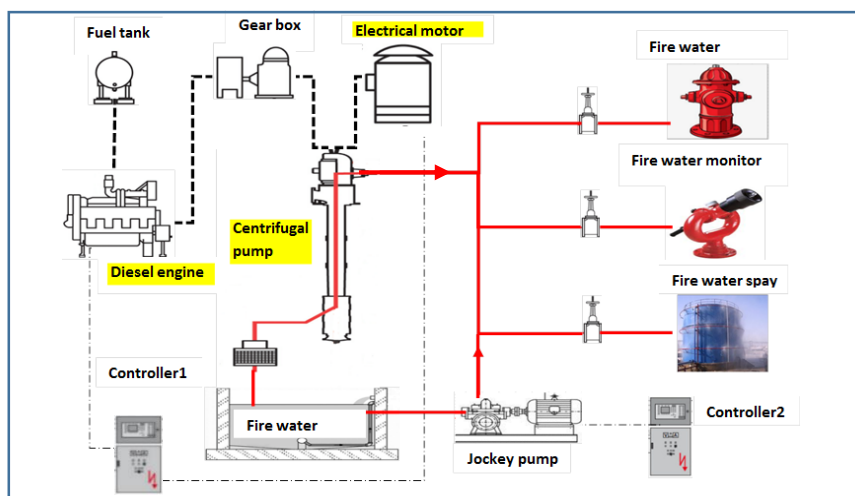
ABSTRACT

The maintenance plan of the fire pump system is particularly important for firefighting in petrochemical jetty and terminal. The existing maintenance plan still lacked detection of abnormalities, therefore, resulting in many failures of the fire pumps during practicing the emergency plans. When measuring the availability of fire pumps, the value was only 65.4% . This research, therefore, aimed to improve the maintenance plan by adding methods for detecting abnormalities of the fire pump system. The components of the fire pump system in this research consisted of electric motors, diesel engines, and fire pumps. In conducting the research, started from 1) analyzing the failures of the components of the fire pump system, 2) arranging the sequence of failures that cause these failures, 3) finding the methods to detect the abnormalities that cause each failure. These methods would be defined in the revised maintenance plan, 4) doing according to the maintenance plan. The results of the initial phase

KEYWORDS: fire pump system, petrochemical jetty and terminal, maintenance plan

การดำเนินงานเกี่ยวกับการขนถ่ายปิโตรเคมีเหลวในบริเวณท่าเรือจำเป็นต้องมีระบบดับเพลิงที่มีความพร้อมใช้งานตลอดเวลา เพื่อลดความเสี่ยงที่เมื่อเกิดเพลิงไหม้แล้วไม่สามารถระงับเหตุได้จนเกิดความเสียหายรุนแรงขึ้นได้ ระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิง (fire pump system) ถือได้ว่าเป็นเครื่องจักรหลักในระบบดับเพลิงซึ่งทำหน้าที่สูบน้ำและจ่ายน้ำจากบ่อเก็บน้ำ (reservoir) ให้เข้าไปในระบบท่อดับเพลิงที่ถูกลวางแต่ละจุดของโรงงานเพื่อส่งต่อไปยังอุปกรณ์ดับเพลิง ถ้าระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิงเกิดการขัดข้องจะส่งผลกระทบต่อให้ไม่สามารถใช้อุปกรณ์ดับเพลิงทุกชนิดในโรงงานได้

ระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิงของโรงงานกรณีศึกษา ประกอบไปด้วยเครื่องสูบน้ำดับเพลิงจำนวน 5 เครื่อง พร้อมระบบควบคุม มอเตอร์ไฟฟ้า (electrical motor) 1 เครื่อง เครื่องยนต์ดีเซล (diesel engine) 4 เครื่อง เครื่องสูบน้ำดับเพลิง (centrifugal pump) พร้อมชุดควบคุม 5 เครื่อง ซึ่งมีการทำงานของระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิงแสดงดังรูปที่ 1 อธิบายได้ดังนี้ ตามปกติแล้วเครื่องสูบน้ำ รักษาแรงดัน (jockey pump) จะทำหน้าที่รักษาแรงดันในระบบท่อดับเพลิง เมื่อมีการใช้น้ำจะส่งผลให้แรงดันน้ำในระบบท่อลดลง จนเครื่องสูบน้ำรักษาแรงดันไม่สามารถรักษาแรงดันน้ำไว้ได้ ดังนั้นเครื่องสูบน้ำดับเพลิงทั้ง 5 เครื่องจะทำงานโดยอัตโนมัติโดยทำการสูบน้ำและส่งน้ำไปยังระบบท่อดับเพลิง ถ้าเครื่องสูบน้ำดับเพลิงไม่สามารถสูบน้ำและส่งน้ำสำหรับการดับเพลิงได้จะส่งผลให้ไม่มีน้ำอยู่ในระบบท่อดับเพลิงและเครื่องจักรที่ใช้ในระบบปั๊มสูบน้ำดับเพลิงอันได้แก่ มอเตอร์ไฟฟ้า เครื่องยนต์ดีเซล และปั๊มดับเพลิง จะไม่สามารถทำงานได้



รูปที่ 1 การทำงานของระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิง

จากการศึกษาข้อมูลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2558-2560 พบว่าระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิงได้รับการบำรุงรักษาเชิงป้องกันตามรอบเวลา แต่เมื่อทำการเดินเครื่องสูบน้ำดับเพลิงเพื่อซ่อมตามแผนฉุกเฉินในการระงับเหตุเพลิงไหม้ทุกสัปดาห์เป็นเวลา 52 สัปดาห์ต่อปีนั้น ได้พบว่าระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิงเกิดการขัดข้องในขณะที่ซ่อมแผนฉุกเฉิน จำนวนครั้งที่เกิดการขัดข้องแสดงดังตารางที่ 1 คิดเป็น ค่าความพร้อมใช้งานของระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิงเพียง 56-65 เปอร์เซ็นต์

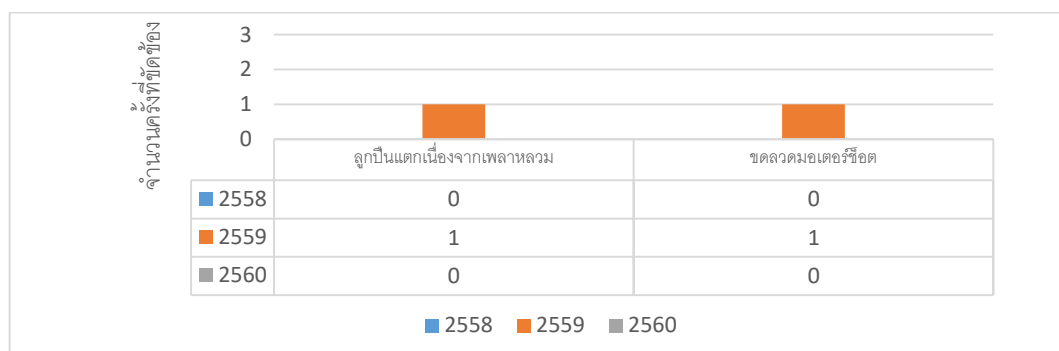
ตารางที่ 1 จำนวนครั้งการขัดข้องและค่าความพร้อมใช้งานของระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิง(ก่อนการปรับปรุง)

ปี	จำนวนครั้งของการทดสอบ	จำนวนครั้งการขัดข้อง	ค่าความพร้อมใช้งาน (%)
2558	52	20	62
2559	52	23	56
2560	52	18	65

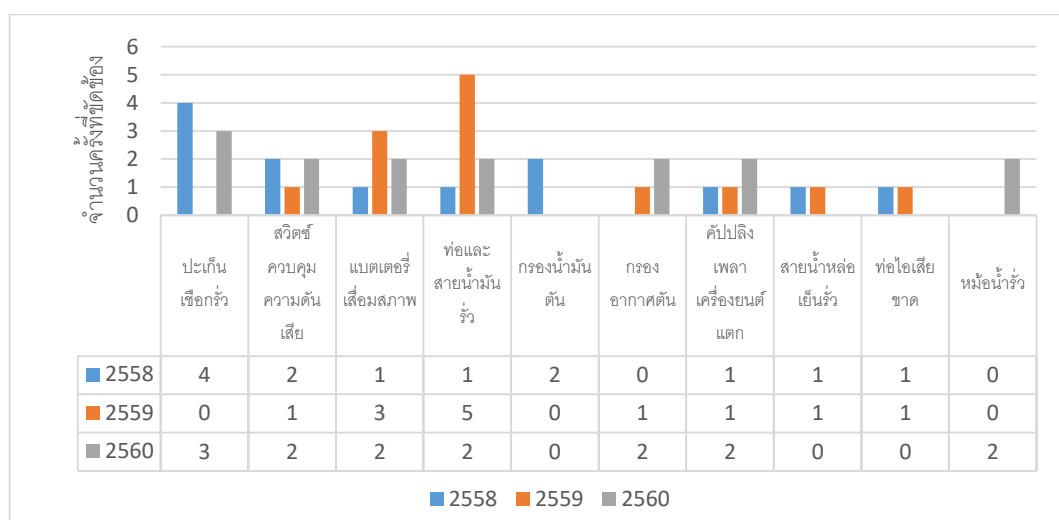
จำนวนครั้งการขัดข้องที่เกิดขึ้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2558-2560 สามารถแยกตามอาการและชนิดของเครื่องจักรดังแสดงในรูปที่ 2 การขัดข้องของมอเตอร์ไฟฟ้าเกิดขึ้นเป็นเรื่องถูกป้อนแตกและขดลวดมอเตอร์ลัดวงจรซึ่งความถี่ที่พบรายการละหนึ่งครั้งในรอบสามปี ในขณะที่เครื่องชนิดดีเซลพบว่ามีสถิติการขัดข้องสูงที่สุด ส่วนเครื่องสูบน้ำพบว่ามีสถิติการขัดข้องในลำดับรองลงมา ดังนั้น แนวโน้มของการตรวจจับความผิดปกติที่ต้องเข้มงวดขึ้นจะอยู่ในส่วนของเครื่องชนิดดีเซลและเครื่องสูบน้ำ

Carnero, M.C., 2006 [1] ได้อธิบายถึงจุดอ่อนของการบำรุงรักษาเชิงป้องกันและเสนอให้ใช้การบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์เพื่อแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นจากจุดอ่อนนั้น โดยได้กล่าวไว้ว่าแผนงานของการบำรุงรักษาเชิงป้องกันไม่ได้ถูกสร้างขึ้นจากการวิเคราะห์อาการขัดข้องที่เกิดขึ้นจึงอาจไม่สามารถตรวจพบความผิดปกติที่จะเกิดขึ้นได้ล่วงหน้า ในขณะที่แผนงานของการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์เกิดจาก 1) การใช้สถิติและวิเคราะห์เพื่อทำนายอาการขัดข้องที่จะเกิดขึ้น หรือ 2) การทำนายจากสถานะของเครื่องจักรที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน [2] จากที่กล่าวมาแล้วจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจที่จะสร้างแผนงานของการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์เพื่อปรับปรุงแผนงานการบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่มีอยู่ โดยส่วนที่ปรับปรุงนั้นเป็นการตรวจจับความผิดปกติของการทำงานของเครื่องจักร การทำนายการขัดข้องของเครื่องจักรและทำการแก้ไขก่อนที่เครื่องจักรจะเกิดการขัดข้อง

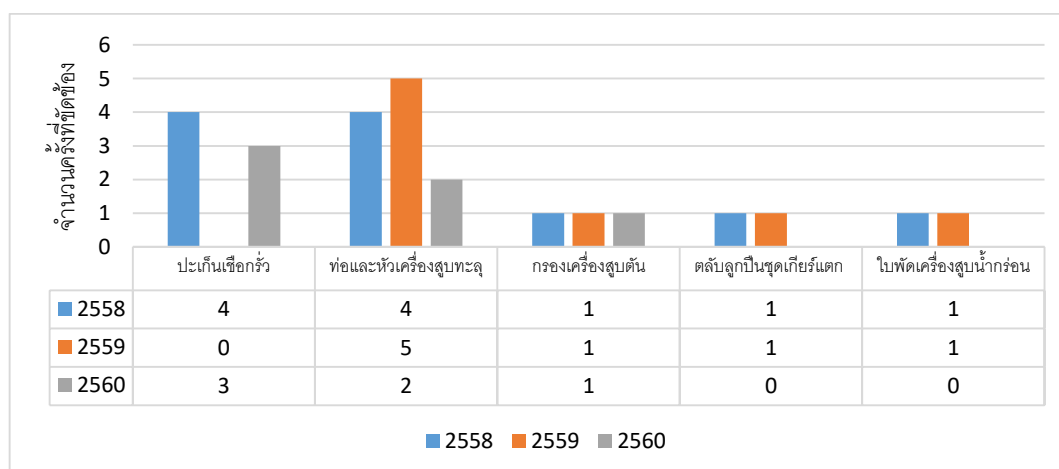
การระบุในแผนงานการบำรุงรักษาว่าต้องทำการตรวจจับความผิดปกติจากสิ่งใดนั้นจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์เป็นขั้นตอนเพื่อให้เกิดแผนงานการบำรุงรักษาที่สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและลดการขัดข้องของเครื่องจักรลงได้ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการวิเคราะห์หาอาการขัดข้องของเครื่องจักรที่เกิดขึ้นทีละลำดับชั้น ทำการวิเคราะห์ลึกลงไปที่ละชั้นเพื่อหาอาการขัดข้องหรือความผิดปกติก่อนหน้า ทำการวิเคราะห์หาไปจนถึงอาการขัดข้องเริ่มต้น นำอาการขัดข้องหรือความผิดปกติของการทำงานที่เริ่มต้นนั้นมากำหนดลงในแผนการบำรุงรักษาที่จะปรับปรุง ซึ่งคาดว่าจะสามารถช่วยลดการขัดข้องของระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิงในขณะใช้งานลงได้ ในการวิเคราะห์หาความล้มเหลวเหล่านี้ได้ใช้เครื่องมือที่เรียกว่า FMEA (Failure modes and effect analysis) หรือการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบมาช่วย ทั้งนี้กระบวนการวิเคราะห์ความล้มเหลวเพื่อการตรวจพบความผิดปกติล่วงหน้าจนกระทั่งนำไปปรับปรุงแผนงานการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์นั้นได้ดำเนินการไปพร้อมกับการสร้างทีมงานบำรุงรักษาให้มีความรู้ความเข้าใจถึงองค์ประกอบของระบบเครื่องสูบน้ำและหน้าที่การทำงานขององค์ประกอบ มีการแลกเปลี่ยนความคิดเห็นเพื่อพัฒนาความรู้ความสามารถของทุกคนในทีมโดยใช้หลักการมีส่วนร่วม [3-4]



a) มอเตอร์ไฟฟ้า



b) เครื่องยนต์ดีเซล



c) เครื่องสูบน้ำ

รูปที่ 2 สถิติการเกิดอาการขัดข้องของเครื่องจักร

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์

การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive maintenance, PM) และการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ (Predictive maintenance, PdM) ทั้งสองวิธีนี้ถูกใช้ในการลดการขัดข้องของเครื่องจักร ซึ่งหลักการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์จะใช้ในการทำนายและลดอาการขัดข้องของเครื่องจักร ในขณะที่การบำรุงรักษาเชิงป้องกันเป็นการบำรุงรักษาตามรอบระยะเวลา [5]

Beebe [6] ได้อธิบายว่าการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ใช้การสังเกตจากประสิทธิภาพและอาการผิดปกติต่าง ๆ เพื่อนำมาทำนายและวางแผนการซ่อมบำรุง มีการใช้เทคนิคต่างๆ ช่วยในการสังเกต เช่น การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน การวิเคราะห์จากอุณหภูมิ การวิเคราะห์สภาพน้ำมัน การวิเคราะห์จากการตรวจวัดความหนาของโลหะ การวิเคราะห์ความต้านทานของขดลวดไฟฟ้า และเทคนิคการตรวจสอบโดยไม่ทำลายแบบอื่น ๆ เพื่อให้ผลที่ได้มีความแม่นยำมากที่สุด ส่วน Yong [7] ได้เสนอขั้นตอนและวิธีการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ในผนังอุโมงค์ ในขณะที่ Feili [8] ได้กล่าวถึงวิธีการตรวจพบความผิดปกติในการป้องกันการขัดข้องของเครื่องจักรเช่นกัน

2.2 การวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบ (Failure modes and effect analysis, FMEA)

การวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับวิเคราะห์อาการขัดข้องของเครื่องจักรและผลกระทบที่ตามมา เริ่มต้นจากการวิเคราะห์การทำงานของเครื่องจักรและชิ้นส่วนต่าง ๆ ว่ามีความล้มเหลวหรือการขัดข้องใดเกิดขึ้นได้บ้าง [9] ซึ่งอาการผิดปกติของเครื่องจักรและชิ้นส่วนต่าง ๆ เหล่านี้จะนำมาพัฒนาแผนการบำรุงรักษาของเครื่องจักรได้ ตัวอย่างความล้มเหลวและการขัดข้องของเครื่องจักรที่วิเคราะห์โดย FMEA เช่น Rodrigo [10] ได้ใช้วิเคราะห์อาการขัดข้องของระบบกังหันน้ำ และ Sobra [11] ได้ใช้ FMEA ในการวิเคราะห์ความล้มเหลวการทำงานในเครื่องย่นดัดเชล

2.3 ค่าความพร้อมใช้งานของเครื่องจักร (Availability)

ค่าความพร้อมใช้งานของเครื่องจักร หมายถึงการแสดงความพร้อมของเครื่องจักรในการทำงานซึ่งเปรียบเทียบระหว่างเวลาที่เครื่องจักรทำงานกับเวลาที่เครื่องจักรหยุดการทำงานกะทันหันโดยไม่มีการวางแผนล่วงหน้า ถ้าเครื่องจักรมีการขัดข้องบ่อยครั้งจะส่งผลให้เครื่องจักรมีค่าความพร้อมใช้งานต่ำและมีความน่าเชื่อถือต่ำด้วย Jain [12] และ Modgil [13] เป็นตัวอย่างที่แสดงถึงการปรับปรุงค่าความพร้อมใช้งานกับเครื่องจักรในโรงงานขนาดกลางและขนาดเล็ก สูตรที่ใช้ในการคำนวณเป็นดังนี้

$$\text{ค่าความพร้อมใช้งาน(\%)} = \left(\frac{\text{เวลารับภาระงาน} - \text{เวลาสูญเสียจากเครื่องจักรหยุด}}{\text{เวลารับภาระงาน}} \right) \times 100$$

2.4 ระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิง

เครื่องจักรหลักของระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิง ได้แก่

1) มอเตอร์ไฟฟ้า เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกล โดยหลักการทำงานของมอเตอร์เกิดจากการทำงานร่วมกันระหว่างสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กในตัวมอเตอร์และสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสในขดลวดทำให้เกิดแรงดูด

และแรงผลักรวมของสนามแม่เหล็กทั้งสองส่งผลให้เกิดแรงในรูปของการหมุน ซึ่งระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิงใช้มอเตอร์ไฟฟ้าในการหมุนส่งกำลังให้เครื่องสูบน้ำดับเพลิงหมุนเพื่อส่งน้ำให้ระบบดับเพลิง

2) เครื่องยนต์ดีเซล เป็นเครื่องยนต์ชนิดหนึ่งในเครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน ซึ่งจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเชื้อเพลิงให้เป็นพลังงานกล เครื่องยนต์ดีเซลทำงานโดยการจุดระเบิดส่วนผสมระหว่างอากาศและเชื้อเพลิง โดยเชื้อเพลิงจะถูกอัดเข้าไปในห้องเผาไหม้ที่มีอากาศถูกอัดไว้และเกิดการลุกไหม้ขึ้น ผลของการเผาไหม้จะทำให้แก๊สที่เกิดขึ้นมีความดันและอุณหภูมิสูงก็จะขยายตัวดันลูกสูบลงมา และไปผลักให้ข้อเหวี่ยงหมุน ซึ่งระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิงใช้เครื่องยนต์ดีเซลในการหมุนส่งกำลังให้เครื่องสูบน้ำดับเพลิงหมุนส่งน้ำให้ระบบดับเพลิง

3) เครื่องสูบน้ำแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สูบน้ำเข้าสู่ระบบท่อดับเพลิง ทำงานโดยอาศัยการหมุนของใบพัดจากเครื่องยนต์หรือมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อศูนย์กลางของเหลว (น้ำสำหรับดับเพลิง) เข้าทางศูนย์กลางใบพัดและผลักดันเข้าสู่ผนังเรือนเครื่องสูบน้ำด้วยแรงผลักรวมของครีบบใบพัดและแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง หลังจากนั้นของเหลวจะไหลออกสู่ท่อด้านส่งของเครื่องสูบน้ำ

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 การวิเคราะห์การขัดข้องและลำดับความเสียหายของระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิง

ในการดำเนินงานวิจัยนี้ตั้งแต่ต้นได้มีการจัดตั้งทีมงาน ประกอบไปด้วย หัวหน้าทีม วิศวกรเครื่องกล วิศวกรไฟฟ้า วิศวกรตรวจสอบและวิศวกรปฏิบัติการ โดยสมาชิกทุกคนในทีมจะร่วมกันวิเคราะห์เพื่อหาอาการขัดข้องและลำดับการเกิดอาการผิดปกติ วิธีการตรวจจบบอาการผิดปกติของเครื่องจักรด้วยวิธีการและเครื่องมือต่างๆ กำหนดช่วงเวลาในการตรวจเครื่องจักร ปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิง และประเมินผล ทั้งนี้เพื่อให้ทุกคนมีแนวทางการทำงานเดียวกันจึงนำหลักการ SMART (Specific, Measurable, Attainable, Realistic and Time-sensitive) ที่ Doran เคยนำเสนอไว้เมื่อปี พ.ศ. 2524 [14] และต่อมา มีการใช้อย่างแพร่หลายในการทำให้โครงการสำเร็จมาช่วยด้วย กล่าวโดยสรุปคือในการบริหารให้โครงการสำเร็จต้องสามารถวัดผลได้ มีความสมเหตุสมผลและสามารถปฏิบัติได้จริง คำนึงถึงทั้งเทคโนโลยี ความสามารถของบุคลากร ค่าใช้จ่ายและเวลา

งานวิจัยนี้ได้นำ FMEA เพื่อหาโหมด (mode) ของเครื่องจักรที่อาจเกิดการล้มเหลวหรือขัดข้อง โดยเริ่มต้นจากคำถามพื้นฐาน คือ 1) หน้าที่หรือฟังก์ชัน (function) ของการทำงานของเครื่องจักรคืออะไร 2) อาการขัดข้องที่เกิดขึ้นส่งผลอย่างไรต่อฟังก์ชันการทำงานของเครื่องจักร หลังจากนั้นจะเริ่มวิเคราะห์อาการขัดข้องที่เกิดขึ้นโดยการเรียงตามลำดับของการเกิดอาการขัดข้อง เริ่มจากซ้ายมือคืออาการขัดข้องที่เกิดขึ้นภายหลัง ส่วนทางขวามือเป็นอาการขัดข้องที่เกิดขึ้นก่อนหน้า ดังแสดงตัวอย่างในตารางที่ 2 ซึ่งเมื่อสามารถวิเคราะห์อาการขัดข้องที่เกิดขึ้นได้ตามลำดับแล้ว จึงทำการพิจารณาและตัดสินใจเลือกลำดับของการขัดข้องที่ควรกำหนดให้เป็นจุดตรวจพบความผิดปกติสำหรับกำหนดไว้ในแผนงานการบำรุงรักษาที่ปรับปรุงใหม่ การตัดสินใจเลือกจุดตรวจพบความผิดปกติสำหรับกำหนดไว้ในแผนงานการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์สำหรับงานวิจัยนี้ กำหนดเกณฑ์โดยคำนึงถึงความเหมาะสมด้าน (1) ค่าใช้จ่ายในการตรวจสอบ (2) ค่าใช้จ่ายด้านอะไหล่ของเครื่องจักร (3) เครื่องมือ (4) ความสามารถของบุคลากร และ (5) วิธีการตรวจสอบความผิดปกตินั้นต้องสามารถทำได้โดยไม่มีการถอดหรือแยกชิ้นส่วนเพื่อตรวจสอบภายในเครื่องจักร (เพราะหากต้องมีการถอดหรือจะปฏิบัติได้ยาก)

ตารางที่ 2 ได้แสดงการวิเคราะห์การล้มเหลวของหน้าที่ของมอเตอร์ไฟฟ้า โดยหน้าที่ของมอเตอร์ไฟฟ้าคือหมุนส่งกำลังให้เครื่องสูบน้ำ ดังนั้นการล้มเหลวของหน้าที่คือไม่สามารถหมุนส่งกำลังให้เครื่องสูบน้ำได้ ซึ่งเกิดได้จาก 3 สาเหตุ คือ 1) คลับลูกปืนติดขัด 2) คับปลิงแตก 3) ขดลวดไฟฟ้าลัดวงจร ดังที่แสดงในอาการขัดข้องลำดับที่ 1

การวิเคราะห์การล้มเหลวจะทำการวิเคราะห์ทีละลำดับเริ่มจากลำดับที่ 1 ซึ่งเป็นอาการขัดข้องสุดท้าย ไปยังอาการขัดข้องก่อนหน้านั้น เช่น กรณีมอเตอร์ไฟฟ้าไม่สามารถหมุนเครื่องสูบน้ำได้ คับปลิงแตกเป็นอาการขัดข้องลำดับที่ 1 มีการขัดข้องก่อนหน้านั้นคือลูกปืนและรางลูกปืนแตก (อาการขัดข้องลำดับที่ 2) หากอาการขัดข้องลำดับที่ 2 ไม่ได้รับการแก้ไขได้ทันทั่วที่จะส่งผลให้เกิดคับปลิงแตก (อาการขัดข้องลำดับที่ 1) ในเวลาต่อมา

ตารางที่ 3 แสดงการวิเคราะห์การล้มเหลวของเครื่องยนต์ดีเซล โดยหน้าที่ของเครื่องยนต์ดีเซลคือหมุนส่งกำลังให้เครื่องสูบน้ำ ดังนั้นการล้มเหลวคือเครื่องยนต์ไม่สามารถหมุนส่งกำลังให้เครื่องสูบน้ำได้ ซึ่งเกิดได้จาก 3 สาเหตุ คือ 1) เครื่องยนต์สตาร์ทไม่ได้ 2) เครื่องยนต์เดินเครื่องได้ไม่เต็มกำลัง 3) คับปลิงแตก ดังที่แสดงอาการขัดข้องในลำดับที่ 1 เช่นกัน หลังจากนั้นอาการขัดข้องในลำดับที่ 1 จะถูกนำมาวิเคราะห์หาอาการขัดข้องที่เกิดขึ้นก่อนหน้านั้นตามลำดับจนถึงจุดเริ่มต้นของความผิดปกติ (ลำดับสุดท้ายของการวิเคราะห์) เช่นกัน

ในทำนองเดียวกัน ตารางที่ 4 ได้แสดงการวิเคราะห์การล้มเหลวของเครื่องสูบน้ำ หน้าที่ของเครื่องสูบน้ำคือสูบและส่งน้ำให้ระบบดับเพลิงให้ได้ตามปริมาณการไหลและความดันที่ต้องการ ดังนั้นการล้มเหลวคือไม่สามารถสูบส่งน้ำได้ตามปริมาณและความดันที่ต้องการ

เมื่อเลือกจุดตรวจสอบความผิดปกติได้เรียบร้อยแล้วให้มีการกำหนดวิธีการตรวจวัดความผิดปกติของมอเตอร์ไฟฟ้า เครื่องยนต์ดีเซลและเครื่องสูบน้ำดังแสดงในตารางที่ 5, 6 และ 7 ตามลำดับ

3.2 การเลือกจุดตรวจพบความผิดปกติ

หลังจากได้วิเคราะห์ความล้มเหลวของหน้าที่และลำดับของการขัดข้องของระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิงแล้ว ขั้นตอนต่อมาที่ทีมงานจะเลือกลำดับอาการขัดข้องที่กำหนดให้เป็นจุดตรวจพบความผิดปกติ โดยมีเกณฑ์ในการเลือกสองประการได้แก่ (1) ต้องสามารถตรวจพบความผิดปกติได้รวดเร็วที่สุด (2) วิธีในการตรวจพบจะต้องไม่แยกชิ้นส่วนเครื่องจักรเพราะจะต้องเสียเวลา เสียกำลังพลและค่าใช้จ่ายจำนวนมาก เช่น มอเตอร์ไม่สามารถหมุนเครื่องสูบน้ำได้ทำงาน พบว่าในทางปฏิบัติไม่สามารถถอดหรือเพื่อตรวจดูว่าคลับลูกปืนและเพลาลูกกร้อน (อาการขัดข้องลำดับที่ 5) และไม่สามารถตรวจว่าเพลามอเตอร์และคลับลูกปืนหลวม (อาการขัดข้องลำดับที่ 4) ดังนั้นจึงเลือกจุดตรวจสอบมอเตอร์ว่ามีการสั่นสะเทือนสูง (อาการขัดข้องลำดับที่ 3) ให้เป็นจุดตรวจพบความผิดปกติ และวิธีการตรวจทำโดยใช้เครื่องวัดการสั่นสะเทือนเพื่อวัดระดับการสั่นสะเทือนของคลับลูกปืน

ในกรณีของขดลวดไฟฟ้าลัดวงจรได้เลือกความต้านทานของฉนวนหุ้มขดลวดไฟฟ้ามอเตอร์ต่ำกว่า 7.6 เมกะโอห์ม (อาการขัดข้องลำดับที่ 2) เป็นอาการผิดปกติที่เลือกเพื่อตรวจจับโดยใช้เมกะ โอห์มมิเตอร์เป็นเครื่องมือในการตรวจพบ แต่ไม่เลือกอาการขัดข้องลำดับที่ 3, 4 และ 5 เป็นจุดตรวจจับความผิดปกติเพราะไม่สามารถตรวจพบได้โดยง่าย

ตารางที่ 2 หน้าทีของเครื่องจักร การล้มเหลวของหน้าที่และอาการขัดข้องตามลำดับของมอเตอร์ไฟฟ้า

หน้าที่	การล้มเหลวของหน้าที่	อาการขัดข้องลำดับที่ 1	อาการขัดข้องลำดับที่ 2	อาการขัดข้องลำดับที่ 3	อาการขัดข้องลำดับที่ 4	อาการขัดข้องลำดับที่ 5
มอเตอร์หมุนเครื่องสูบน้ำให้ทำงาน	มอเตอร์ไม่สามารถหมุนเครื่องสูบน้ำให้ทำงาน	คลัทช์ถูกปิดขัด	ถูกปั่นและรางถูกปั่นแตก	มอเตอร์มีการสั่นสะเทือนสูง*	เฟลมมอเตอร์และคลัทช์ถูกปั่นหลวม	คลัทช์ถูกปั่นและเฟลลิกกร่อน
					ฐานมอเตอร์ไม่ได้อยู่ในระยะนาบที่เหมาะสม	ท่อด้านดูดและส่งจัดกับเครื่องสูบน้ำ
				คลัทช์ถูกปั่นมีความร้อนสูงเกินที่ออกแบบ*	น้ำมันหล่อลื่นไม่เพียงพอ	ฐานของมอเตอร์เป็นสนิม
		คัปปลิงแตก	คัปปลิงเกิดรอยร้าว	การผูกมัด	ลิกกันสนิมเสื่อมสภาพ*	-
				การล้าของคัปปลิง	มอเตอร์และเครื่องสูบน้ำไม่อยู่ในศูนย์กลางเดียวกัน*	ท่อด้านดูดและส่งจัดกับเครื่องสูบน้ำ
		ขดลวดมอเตอร์ลัดวงจร	ความต้านทานของฉนวนหุ้มขดลวดไฟฟ้ามอเตอร์ต่ำกว่า 7.6 เมกะโอห์ม*	มีความชื้นที่ขดลวดมอเตอร์	ประเก็น (seal) เสื่อมสภาพ	-
					เครื่องทำความร้อน (heater) เสีย	-
				ขดลวดเสื่อมสภาพ	ความร้อนสูง	ใช้กระแสไฟฟ้ามากเกินไป

หมายเหตุ * หมายถึง อาการขัดข้องที่ได้รับพิจารณาให้กำหนดลงในแผนการบำรุงรักษาที่ปรับปรุงใหม่

3.3 การปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิง

หลังจากที่ได้เลือกวิธีการตรวจพบความผิดปกติของเครื่องจักรในระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิงแล้ว นำวิธีการตรวจพบที่ถูกกำหนดขึ้นทั้งหมดมากำหนดเป็นแผนการบำรุงรักษาเครื่องจักรดังแสดงในตารางที่ 8 โดยในแผนการบำรุงรักษาประกอบไปด้วยกิจกรรมปฏิบัติ เครื่องมือที่ใช้และความถี่ของการตรวจสอบ ซึ่งความถี่หรือรอบระยะเวลาที่ใช้ในการตรวจสอบอ้างอิงมาจากคู่มือของเครื่องสูบน้ำดับเพลิงและตามคำแนะนำของสมาคมป้องกันอัคคีภัยแห่งชาติสหรัฐอเมริกา (NFPA25) [15] เช่น การตรวจจับความผิดปกติของมอเตอร์ไฟฟ้าด้วยการตรวจสอบมอเตอร์และเครื่องสูบน้ำว่าไม่ได้อยู่ในศูนย์กลางเดียวกันถูกกำหนดให้มีการตรวจสอบเป็นประจำทุกหนึ่งปี การตรวจจับเครื่องสูบน้ำมีการสั่นสะเทือนสูงให้มีการตรวจทุก 1 สัปดาห์

ตารางที่ 3 หน้าที่ของเครื่องจักร การล้มเหลวของหน้าที่และอาการขัดข้องตามลำดับของเครื่องยนต์ดีเซล

หน้าที่	การล้มเหลวของหน้าที่	อาการขัดข้องลำดับที่ 1	อาการขัดข้องลำดับที่ 2	อาการขัดข้องลำดับที่ 3	อาการขัดข้องลำดับที่ 4	อาการขัดข้องลำดับที่ 5
หมุน เครื่อง สูบลูก ทำงาน	ไม่สามารถ หมุนเครื่อง สูบลูก ทำงาน	เครื่องยนต์สตาร์ท ไม่ได้	น้ำมันเชื้อเพลิงหมด	น้ำมันเชื้อเพลิงในถังอยู่ระดับต่ำ*	-	-
			สวิตช์ควบคุมความดันไม่ทำงาน	ความดันที่ติดตั้งค่าไว้ผิดพลาด*	-	-
			แบตเตอรี่เสื่อม	แบตเตอรี่มีความต่างศักย์น้อยกว่า 12.6 โวลต์*	น้ำกลั่นไม่เพียงพอ	-
					ไม่สามารถชาร์จไฟไปที่แบตเตอรี่	อุปกรณ์ชาร์จแบตเตอรี่เสีย
			ไดร์สตาร์ทไม่หมุน	แบตเตอรี่มีไฟไม่พอ	แบตเตอรี่เสื่อม	แบตเตอรี่มีความต่างศักย์ต่ำกว่า 12.6 โวลต์*
		เครื่องยนต์เดินเครื่องได้ไม่เต็มกำลัง	ฝาสูบเครื่องยนต์โก่งงอ	ความร้อนเครื่องยนต์สูงเกิน	สายน้ำหล่อเย็นรั่ว	สายน้ำหล่อเย็นเสื่อมสภาพ*
					หม้อน้ำหล่อเย็นรั่ว	น้ำหล่อเย็นอยู่ในระดับต่ำ*
			ท่อไอเสียขาด	ท่อไอเสียมีรอยรั่ว*	การอ่อนล้าของวัสดุ	การสันตะเทียนของท่อ
					ท่อไอเสียเกิดสนิมกัดกร่อน	สีกันสนิมเสื่อมสภาพ
			น้ำมันเชื้อเพลิงไม่เพียงพอ	สายน้ำมันรั่ว	สายน้ำมันเสื่อมสภาพ*	-
				กรองน้ำมันตัน	ความดันน้ำมันเชื้อเพลิงต่ำ*	กรองน้ำมันเริ่มสกปรก
			อากาศไม่เพียงพอ	กรองอากาศตัน	เกจวัดกรองอากาศแสดงไฟเตือน*	กรองอากาศเริ่มสกปรก
			-กระบอกสูบติด -เพลาลูกเบี้ยวหัก -แกนเทอร์โบ (turbo) หัก	น้ำมันหล่อลื่นไม่เพียงพอ	ความดันน้ำมันหล่อลื่นต่ำ*	ท่อน้ำมันหล่อลื่นรั่ว
				น้ำมันหล่อลื่นเสื่อมสภาพ	น้ำมันหล่อลื่นมีความหนืดต่ำ*	เครื่องสูบน้ำมันหล่อลื่นเสีย
					น้ำมันหล่อลื่นมี	-
					น้ำมันหล่อลื่นปนเปื้อน*	-
					น้ำมันหล่อลื่น	-
		คัปปลิงแตก	คัปปลิงเกิดรอยรั่ว	คัปปลิงเกิดสนิม*	สีกันสนิมเสื่อมสภาพ	-
				คัปปลิงรับโหลดเกิน	ลูกปืนที่คัปปลิงติด	ไม่มีจาระบีหล่อลื่น*

หมายเหตุ * หมายถึง อาการขัดข้องที่ได้รับพิจารณาให้กำหนดลงในแผนการบำรุงรักษาที่ปรับปรุงใหม่

ตารางที่ 4 หน้าที่ของเครื่องจักร การสั้ผลของหน้าที่และการขัดข้องตามลำดับของเครื่องสูบ

หน้าที่	การสั้ผลของหน้าที่	อาการขัดข้องลำดับที่ 1	อาการขัดข้องลำดับที่ 2	อาการขัดข้องลำดับที่ 3	อาการขัดข้องลำดับที่ 4	อาการขัดข้องลำดับที่ 5
สร้าง ความดัน และอัตราการไหล ให้น้ำ	น้ำไม่มี ความดัน และอัตราการไหล	ชุดเกียร์ไม่สามารถ หมุนได้	คลั้บลูกปืนคั้ดขัด	ลูกปืนและราง ลูกปืนแตก	มีการสั้ สะเทือนสูง*	เพลาคู้เครื่องสูบลวม
					ความร้อนสูง	น้ำมันหล่อลั้ของลูกปืน ไม่เพียงพอ*
			ฟันเฟืองเกียร์หัก	ความร้อนสูง	น้ำมันหล่อลั้ชุด เกียร์ไม่เพียงพอ*	-
			ฟันเฟืองเกียร์สึก หรอ	น้ำมันหล่อลั้เสื่อม คุณภาพ	น้ำมันหล่อลั้ ความหนั้ต่ำ*	-
					น้ำมันหล่อลั้ ปนเปื้อน*	-
		คลั้ปลั้เพลาคู้เครื่อง สูบแตก	คลั้ปลั้เพลารับ แรงเกินที่ออกแบบ	มีการสั้ สะเทือนสูง*	เพลาคู้ไม่ได้ อยู่ เส้นตรง ศูนย์กลาง เดียวกัน	เพลาคู้โก้งงอ
						คอลลั้มนั้ไม่อยู่เส้น ตรงศูนย์กลางเดียวกัน
						ฟั้คั้สวมนู้ชและเพลาคู้เกิน ค่ากำหนด
						ฐานคู้เครื่องสูบเป็นสนิม
						เรือนคู้เครื่องสูบไม่อยู่ใน เส้นตรง ศูนย์กลางเดียวกัน
					ใบฟั้คั้เครื่องสูบ ไม่สมดุล	ใบฟั้คั้ถูกคั้กร่อน
					เพลาคู้เครื่องสูบไม่ สมดุล	เพลาคู้ถูกคั้กร่อน
	น้ำมีความ ดันและ อัตราการไหลต่ำ	หัวคู้เครื่องสูบและ คอลลั้มนั้รั่ว	ผนังมีความหนา น้อยกว่า 3 มิลลิเมตร*	คอลลั้มนั้คู้กร่อน	สีกั้สนิม เสื่อมสภาพ*	
				หัวคู้เครื่องสูบถูกคั้ กร่อน	-	-
		ปะเก็นคู้เครื่องสูบ รั่ว	ปะเก็นเชือกใหม่	จาระบิหล่อลั้ไม่ เพียงพอ*	-	-
			นื้อคั้ลลั้คั้ปะเก็น เชือกหลวมหรือ คั้ลายคั้*	ปะเก็นเชือก เสื่อมสภาพ	-	-
		คั้วกรอด้้านคู้ด คั้น	ความคั้นน้ำคั้นคั้ง ของคู้เครื่องสูบคั้*	เศษขะขะที่คั้วกรอ คั้นคู้ดมีจันวนมาก	-	-

หมายเหตุ * หมายถึง อาการขัดข้องที่ด้รับพิจารณาให้กำหนดลงในแผนการบำรุงรักษาที่ปรับปรุงใหม่

ตารางที่ 5 อาการขัดข้องและวิธีการตรวจจับความผิดปกติของมอเตอร์ไฟฟ้า

อาการขัดข้อง	อาการผิดปกติ	เครื่องมือ/วิธีการ	เวลาในการตรวจสอบ
คลັบลูกปืนติดขัด	มอเตอร์มีการสั่นสะเทือนสูง	เครื่องวัดความสั่นสะเทือน	10 นาที
	คลັบลูกปืนมีความร้อนสูงเกินที่ออกแบบ	เครื่องวัดอุณหภูมิ	2 นาที
กลับปลิงแตก	สีกันสนิมเสื่อมสภาพ	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	2 นาที
	มอเตอร์และเครื่องสูบลมอยู่ในศูนย์กลางเดียวกัน	เครื่องมือตั้งศูนย์เพลลา	60 นาที
ขดลวดลัดวงจร	ความต้านทานของฉนวนหุ้มขดลวดไฟฟ้ามอเตอร์ต่ำกว่า 7.6 เมกะโอห์ม	เมกะโอห์มมิเตอร์	20 นาที
	กระแสไฟฟ้าเข้ามอเตอร์มากเกินไป	มัลติมิเตอร์	2 นาที

ตารางที่ 6 อาการขัดข้องและวิธีการตรวจจับความผิดปกติของมอเตอร์เครื่องยนต์

อาการขัดข้อง	สาเหตุการขัดข้อง	เครื่องมือ/วิธีการ	เวลาในการตรวจสอบ
เครื่องยนต์สตาร์ทไม่ได้	น้ำมันเชื้อเพลิงในถังอยู่ระดับต่ำ	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	2 นาที
	ความดันที่คังค่าไว้ผิดพลาด	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	2 นาที
	แบตเตอรี่มีความต่างศักย์น้อยกว่า 12.6 โวลต์	มัลติมิเตอร์	5 นาที
เครื่องยนต์เดินเครื่องได้ไม่เต็มกำลัง	สายน้ำหล่อเย็นเสื่อมสภาพ	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	5 นาที
	น้ำหล่อเย็นอยู่ในระดับต่ำ	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	2 นาที
	ท่อไอเสียมีรอยรั่ว	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	2 นาที
	สายน้ำมันเสื่อมสภาพ	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	5 นาที
	ความดันน้ำมันเชื้อเพลิงต่ำ	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	2 นาที
	เกจวัดกรองอากาศแสดงสีแดง	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	2 นาที
	ความดันน้ำมันหล่อลื่นต่ำ	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	2 นาที
	น้ำมันหล่อลื่นความหนืดต่ำ	ตรวจสอบคุณภาพน้ำมัน	30 นาที
	น้ำมันหล่อลื่นปนเปื้อน	ตรวจสอบคุณภาพน้ำมัน	30 นาที
กลับปลิงแตก	สีกันสนิมเสื่อมสภาพ	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	5 นาที
	ไม่มีจาระบีหล่อลื่น	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	5 นาที

นอกจากนี้ การกำหนดความถี่ยังพิจารณาจากประวัติความเสียหายของตัวเองหรือเทียบเคียงจากการเสียของอุปกรณ์อื่นที่เคยเกิดขึ้น เช่น การตรวจจับความต้านทานของฉนวนหุ้มขดลวดไฟฟ้ามอเตอร์ต่ำกว่า 7.6 เมกะโอห์ม แม้จากประวัติความเสียหายจะพบว่ามอเตอร์เสียหายจากความต้านทานของฉนวนในขดลวดไฟฟ้าต่ำเกิดขึ้นเพียง 1 ครั้งในรอบ 3 ปี แต่มีการใช้งานมอเตอร์ที่มีขนาดใกล้เคียงกันแต่ใช้งานในกระบวนการอื่นแล้วการเสียหายในลักษณะเดียวกันในช่วงเวลาทุก 3 เดือน ดังนั้นเพื่อความมั่นใจจึงได้กำหนดการตรวจสอบความต้านทานของฉนวนหุ้มขดลวดไฟฟ้ามอเตอร์ต่ำกว่า 7.6 เมกะโอห์ม ทุก 3 เดือนและเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานเพื่อปรับปรุงความถี่ในอนาคต

ตารางที่ 7 อาการขัดข้องและวิธีการตรวจจับความผิดปกติของเครื่องสูบ

อาการขัดข้อง	สาเหตุการขัดข้อง	เครื่องมือ/วิธีการ	เวลาในการตรวจสอบ
ชุดเกียร์ไม่สามารถหมุนได้	มีการสันสะเทือนสูง	เครื่องวัดความสันสะเทือน	10 นาที
	น้ำมันหล่อลื่นชุดเกียร์ไม่เพียงพอ	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	2 นาที
	น้ำมันหล่อลื่นความหนืดต่ำ	ตรวจสอบคุณภาพน้ำมัน	30 นาที
	น้ำมันหล่อลื่นปนเปื้อน	ตรวจสอบคุณภาพน้ำมัน	30 นาที
คับปลิงเพลาคู่มือเครื่องสูบแตก	มีการสันสะเทือนสูง	เครื่องวัดความสันสะเทือน	10 นาที
หัวเครื่องสูบและคอล์มรีว	สึกนสนิมเสื่อมสภาพ	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	5 นาที
	ผนังมีความหนาแน่นน้อยกว่า 3 มิลลิเมตร	เครื่องวัดความหนาโลหะ	10 นาที
ปะเก็นเครื่องสูบรั่ว	จาระบีหล่อลื่นไม่เพียงพอ	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	5 นาที
	น็อตล็อกปะเก็นเข็กลายตัว	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	5 นาที
ตัวกรองด้านดูดตัน	ความดันน้ำด้านส่งของเครื่องสูบต่ำ	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	2 นาที

จากสถิติการตรวจสอบสภาพของน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ดีเซลตั้งแต่ปี 2557-2559 พบว่าระยะเวลาของการเสื่อมสภาพน้ำมันหล่อลื่นน้อยที่สุดอยู่ที่ 6-8 เดือน ดังนั้นจึงเลือกระยะเวลาที่น้อยที่สุดคือ 6 เดือน เพื่อกำหนดเป็นช่วงเวลาในการตรวจสอบคุณภาพของน้ำมันหล่อลื่นของเครื่องยนต์ดีเซล แล้วกำหนดลงในแผนงานดังตารางที่ 8 หลังจากนั้นจัดทำใบรายการตรวจสอบ (ตารางที่ 9) ใบรายการตรวจสอบมอเตอร์ไฟฟ้า (ตารางที่ 10) ใบรายการตรวจสอบเครื่องยนต์ดีเซล และรายการตรวจสอบเครื่องสูบ (ตารางที่ 11) ซึ่งเกณฑ์ที่ใช้ในการตรวจสอบจะถูกกำหนดขึ้นจากคู่มือของเครื่องจักร เช่น ตรวจสอบการร่วมศูนย์ของมอเตอร์และเครื่องสูบต้องน้อยกว่า 0.05 มิลลิเมตร ความดันของน้ำมันหล่อลื่นเครื่องยนต์ดีเซลต้องอยู่ระหว่าง 20-70 PSI

รูปที่ 3 แสดงป็นยังอุณหภูมิการตรวจสอบอุณหภูมิคลัทช์ลูกปืนของมอเตอร์ไฟฟ้า โดยการใช้ปืนยังอุณหภูมิซึ่งผลที่ได้ต้องต่ำกว่า 80 องศาเซลเซียส ส่วนรูปที่ 4 แสดงเกจ (gauge) ใช้สำหรับตรวจสอบการตั้งค่าของสวิตช์ควบคุมความดันโดยที่เข็มต้องแสดงที่ 7 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรเท่านั้น

4. การดำเนินการแผนการบำรุงรักษาที่ปรับปรุงแล้วและผลที่ได้

การทดลองใช้แผนการบำรุงรักษาเครื่องสูบน้ำดับเพลิงที่ปรับปรุงขึ้นมาใหม่ใช้ระยะเวลา 1 ปี (1 มกราคม 2561 ถึงวันที่ 31 ธันวาคม 2561) ทั้งนี้ในการดำเนินการตามแผนจะมีการสร้างใบรายการตรวจสอบเครื่องจักรซึ่งถูกออกแบบมาสำหรับให้ช่างเทคนิคสามารถตรวจสอบได้ครบทุกรายการและยังเป็นข้อมูลการบำรุงรักษาเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป

ตารางที่ 8 แผนการบำรุงรักษาระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิง

สาเหตุการขัดข้อง	กิจกรรม	เครื่องมือ	รอบเวลาตรวจ
มอเตอร์ไฟฟ้า			
มอเตอร์มีการสั่นสะเทือนสูง	วัดการสั่นสะเทือนของมอเตอร์	เครื่องวัดความสั่นสะเทือน	1 สัปดาห์
คลัตช์ถูกป้อนมีความร้อนสูงเกินที่ออกแบบ	วัดอุณหภูมิคลัตช์ถูกป้อนมอเตอร์	เครื่องวัดอุณหภูมิ	1 สัปดาห์
ลิกนีสนิมเสื่อมสภาพ	ตรวจสอบสภาพลิกนีสนิม	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	1 สัปดาห์
มอเตอร์ใช้กระแสไฟฟ้ามากเกินไป	ตรวจสอบกระแสไฟฟ้ามอเตอร์	มัลติมิเตอร์	1 สัปดาห์
ความต้านทานของฉนวนหุ้มขดลวดไฟฟ้ามอเตอร์ต่ำกว่า 7.6 เมกะ โอห์ม	ตรวจสอบความต้านทานของขดลวดไฟฟ้ามอเตอร์	เมกะ โอห์มมิเตอร์	3 เดือน
มอเตอร์และเครื่องสูบน้ำไม่ได้อยู่ในศูนย์กลางเดียวกัน	ตรวจสอบการร่วมศูนย์ของมอเตอร์และเครื่องสูบน้ำ	เครื่องมือตั้งศูนย์เพลลา	1 ปี
เครื่องชนิดพิเศษ			
น้ำมันเชื้อเพลิงในถังอยู่ระดับต่ำ	ตรวจสอบระดับน้ำมันเชื้อเพลิง	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	1 สัปดาห์
ความต่างศักย์แบตเตอรี่ต่ำกว่า 12.6 โวลต์	วัดความต่างศักย์ของแบตเตอรี่	มัลติมิเตอร์	1 สัปดาห์
สายน้ำหล่อเย็นเสื่อมสภาพ	ตรวจสอบสภาพสายน้ำหล่อเย็น	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	1 สัปดาห์
น้ำหล่อเย็นอยู่ในระดับต่ำ	ตรวจสอบระดับน้ำหล่อเย็น	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	1 สัปดาห์
ท่อไอเสียมีรอยรั่ว	ตรวจสอบรอยรั่วของท่อไอเสีย	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	1 สัปดาห์
สายน้ำมันเสื่อมสภาพ	ตรวจสอบสภาพสายน้ำมัน	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	1 สัปดาห์
ความดันน้ำมันเชื้อเพลิงต่ำ	ตรวจสอบความดันน้ำมันเชื้อเพลิง	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	1 สัปดาห์
เกจวัดกรองอากาศแสดงสีแดง	ตรวจสอบเกจวัดกรองอากาศ	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	1 สัปดาห์
ความดันน้ำมันหล่อลื่นต่ำ	ตรวจสอบความดันน้ำมันหล่อลื่น	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	1 สัปดาห์
ลิกนีสนิมเสื่อมสภาพ	ตรวจสอบสภาพลิกนีสนิม	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	1 สัปดาห์
ไม่มีจาระบีหล่อลื่น	ตรวจสอบจาระบี	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	1 สัปดาห์
น้ำมันหล่อลื่นความหนืดต่ำ	ตรวจสอบคุณภาพน้ำมันหล่อลื่น	ตรวจสอบคุณภาพน้ำมัน	6 เดือน
น้ำมันหล่อลื่นปนเปื้อน	ตรวจสอบคุณภาพน้ำมันหล่อลื่น	ตรวจสอบคุณภาพน้ำมัน	6 เดือน
ความดันที่ติดตั้งไว้ผิดพลาด	ตรวจสอบการตั้งค่าของสวิตช์ควบคุมความดัน	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	6 เดือน
เครื่องสูบน้ำ			
มีการสั่นสะเทือนสูง	วัดการสั่นสะเทือนของชุดเกียร์	เครื่องวัดความสั่นสะเทือน	1 สัปดาห์
น้ำมันหล่อลื่นชุดเกียร์ไม่เพียงพอ	ตรวจสอบระดับน้ำมันชุดเกียร์	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	1 สัปดาห์
น้ำมันหล่อลื่นความหนืดต่ำ	ตรวจสอบคุณภาพน้ำมันหล่อลื่น	ตรวจสอบคุณภาพน้ำมัน	6 เดือน
น้ำมันหล่อลื่นปนเปื้อน	ตรวจสอบคุณภาพน้ำมันหล่อลื่น	ตรวจสอบคุณภาพน้ำมัน	6 เดือน
เครื่องสูบน้ำมีการสั่นสะเทือนสูง	วัดการสั่นสะเทือนของเครื่องสูบน้ำ	เครื่องวัดความสั่นสะเทือน	1 สัปดาห์
ลิกนีสนิมเสื่อมสภาพ	ตรวจสอบสภาพลิกนีสนิม	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	1 สัปดาห์
ผนังมีความหนาน้อยกว่า 3 มิลลิเมตร	ตรวจวัดความหนาเครื่องสูบน้ำ	เครื่องวัดความหนาโลหะ	1 ปี
จาระบีหล่อลื่นปะเก็นเชือกไม่เพียงพอ	ตรวจสอบจาระบี	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	1 สัปดาห์
น็อตล็อกปะเก็นเชือกหลวม	ตรวจสอบการคลายตัวของน็อต	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	1 สัปดาห์
ความดันน้ำด้านส่งของเครื่องสูบน้ำต่ำ	ตรวจสอบความดันของน้ำดับเพลิง	ตรวจสอบด้วยตาเปล่า	1 สัปดาห์

ตารางที่ 9 ใบรายการตรวจสอบมอเตอร์ไฟฟ้า

ใบรายการตรวจสอบมอเตอร์ไฟฟ้าหมายเลขเครื่อง : วันที่ตรวจ :		
กิจกรรม	ปกติ	ผิดปกติ
รอบเวลาการตรวจ 1 สัปดาห์		
ตรวจวัดการสั่นสะเทือนของมอเตอร์	☐ ≤ 7.1 mm/s	☐ > 7.1 mm/s
ตรวจวัดอุณหภูมิของตลับลูกปืนมอเตอร์ DE	☐ $\leq 80^{\circ}\text{C}$	☐ $> 80^{\circ}\text{C}$
ตรวจวัดอุณหภูมิของตลับลูกปืนมอเตอร์ NDE	☐ $\leq 80^{\circ}\text{C}$	☐ $> 80^{\circ}\text{C}$
ตรวจสอบสภาพลัดกันสนิม	☐ ปกติ	☐ สีเสื่อมสภาพ
ตรวจวัดกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์	☐ ≤ 75 แอมป์	☐ > 75 แอมป์
รอบเวลาการตรวจ 3 เดือน		
ตรวจสอบความต้านทานของขดลวดไฟฟ้า	☐ ≥ 7.6 เมกะโอห์ม	☐ < 7.6 เมกะโอห์ม
รอบเวลาการตรวจ 1 ปี		
ตรวจสอบการร่วมนูนของมอเตอร์และเครื่องสูบล	☐ ≤ 0.05 มิลลิเมตร	☐ > 0.05 มิลลิเมตร

ตารางที่ 10 ใบรายการตรวจสอบเครื่องย่นดัดซีล

ใบรายการตรวจสอบเครื่องย่นดัดซีลหมายเลขเครื่อง : วันที่ตรวจ :		
กิจกรรม	ปกติ	ผิดปกติ
รอบเวลาการตรวจ 1 สัปดาห์		
ตรวจสอบระดับน้ำมันเชื้อเพลิง	☐ 60%-80% ของระดับสูงสุด	☐ $< 60\%$ ของระดับสูงสุด
ตรวจสอบความต่างศักย์ของแบตเตอรี่	☐ ≥ 12.6 โวลต์	☐ < 12.6 โวลต์
ตรวจสอบสภาพสายหล่อเย็น	☐ ปกติ	☐ สีเสื่อมสภาพ
ตรวจสอบระดับน้ำหล่อเย็น	☐ 60%-80% ของระดับสูงสุด	☐ $< 60\%$ ของระดับสูงสุด
ตรวจสอบรอยร้าวของท่อไอเสีย	☐ ปกติ	☐ มีรอยแตกร้าว
ตรวจสอบสภาพสายน้ำมัน	☐ ปกติ	☐ สีเสื่อมสภาพ
ตรวจสอบความดันน้ำมันเชื้อเพลิง	☐ 17-50 PSI	☐ < 17 PSI และ > 50 PSI
ตรวจสอบเกจวัดกรองอากาศ	☐ ระดับสีเขียว	☐ ระดับสีส้ม
ตรวจสอบความดันของน้ำมันหล่อลื่น	☐ 20-70 PSI	☐ < 20 PSI และ > 70 PSI
ตรวจสอบสภาพลัดกันสนิม	☐ ปกติ	☐ สีเสื่อมสภาพ
ตรวจสอบจาระบีที่ปลั๊ก	☐ จาระบีเพียงพอ	☐ จาระบีแห้ง
รอบเวลาการตรวจ 6 เดือน		
ตรวจสอบการตั้งค่าของสวิตช์ความดัน	☐ 7 kg/cm^2	☐ $< 7 \text{ kg/cm}^2$
ตรวจสอบคุณภาพน้ำมันหล่อลื่นเครื่องย่นดัด	☐ ปกติ	☐ สีเสื่อมสภาพ

ตารางที่ 11 ใบรายการตรวจสอบเครื่องสูบน้ำ

ใบรายการตรวจสอบเครื่องสูบน้ำดับเพลิงหมายเลขเครื่อง : วันที่ตรวจ :		
กิจกรรม	ปกติ	ผิดปกติ
รอบเวลาการตรวจ 1 สัปดาห์		
ตรวจวัดการสั่นสะเทือนของชุดเกียร์	☐ ≤ 18 mm/s	☐ > 18 mm/s
ตรวจวัดการสั่นสะเทือนของชุดเครื่องสูบน้ำ	☐ ≤ 7.1 mm/s	☐ > 7.1 mm/s
ตรวจสอบระดับน้ำมันหล่อลื่นชุดเกียร์	☐ 60%-80% ของระดับสูงสุด	☐ $< 60\%$ ของระดับสูงสุด
ตรวจสอบสภาพสึกหรอน้ำมัน	☐ ปกติ	☐ เสื่อมสภาพ
จาระบีหล่อลื่นไม่เพียงพอบริเวณปะเก็นเชือก	☐ จาระบีเพียงพอ	☐ จาระบีแห้ง
ตรวจสอบการคลายตัวของค้อนปะเก็นเชือก	☐ คลายตัว	☐ ไม่คลายตัว
ตรวจสอบความดันของน้ำดับเพลิง	☐ ≥ 100 PSI	☐ < 100 PSI
รอบเวลาการตรวจ 6 เดือน		
ตรวจสอบคุณภาพน้ำมันหล่อลื่นชุดเกียร์	☐ ปกติ	☐ เสื่อมสภาพ
รอบเวลาการตรวจ 1 ปี		
ตรวจวัดความหนาแน่นเครื่องสูบน้ำ	☐ > 3 mm	☐ ≤ 3 mm



รูปที่ 3 การตรวจสอบอุณหภูมิคลัทช์ลูกปืนของมอเตอร์ไฟฟ้าด้วยปืนวัดอุณหภูมิ



รูปที่ 4 เกจสำหรับตรวจสอบการตั้งค่าของสวิตช์ควบคุมความดัน

หลังการดำเนินการตามแผนการบำรุงรักษาให้มีการตรวจสอบความผิดปกติของเครื่องจักรในระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิงล่วงหน้า สามารถแสดงผลการเปรียบเทียบจำนวนครั้งที่เกิดการขัดข้องในขณะซ้อมดับเพลิงในรอบหนึ่งปีดังตารางที่ 12 พบว่าค่าเฉลี่ยของความพร้อมใช้งานของระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิงเพิ่มขึ้นจาก 60.89% ในปี พ.ศ. 2558-2560 เป็น 100% ในปี พ.ศ. 2561 ในขณะที่ระยะเวลาที่ใช้ในการตรวจสอบเครื่องสูบน้ำดับเพลิงตามแผนการบำรุงรักษาเพิ่มขึ้นจาก 82 ชั่วโมง 20 นาทีในปี พ.ศ. 2558-2560 เป็น 168 ชั่วโมง 50 นาที ในปี พ.ศ. 2561 ซึ่งใช้เวลาในการตรวจสอบเพิ่มขึ้นอีกเท่าตัว

ตารางที่ 12 การเปรียบเทียบจำนวนครั้งที่เกิดการขัดข้องก่อนและหลังการปรับปรุง

	ปี พ.ศ.	เวลาที่ใช้ในการ ตรวจสอบตาม แผนบำรุงรักษา		จำนวนครั้งที่ทดสอบ ต่อปี	จำนวนครั้งที่เกิดการขัดข้อง				ความพร้อมใช้งาน ของเครื่องสูบน้ำ ดับเพลิง (%)
		ชั่วโมง	นาที		มอเตอร์	เครื่องยนต์	เครื่องสูบน้ำ	รวม	
ก่อนการปรับปรุง	2558	82	20	52	1	8	11	20	61.5
ก่อนการปรับปรุง	2559	82	20	52	0	13	10	23	55.8
ก่อนการปรับปรุง	2560	82	20	52	2	10	6	18	65.4
หลังการปรับปรุง	2561	168	50	52	0	0	0	0	100

หมายเหตุ ค่าความพร้อมใช้งานของงานวิจัยนี้คิดจากจำนวนครั้งที่ทดสอบเดินเครื่อง (เวลารับภาระงาน) และจำนวนครั้งที่เกิดการขัดข้อง (เวลาสูญเสียจากเครื่องจักรหยุด) ทั้งนี้ระยะเวลาที่ใช้ในการทดสอบต่อครั้งคิดเป็น 1 ชั่วโมง ซึ่งเป็นค่าคงที่

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

เนื่องจากแผนการบำรุงรักษาที่มีอยู่เดิมเป็นแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่มีกำหนดตามระยะเวลายังขาดการตรวจพบความผิดปกติล่วงหน้าจึงไม่สามารถจัดการปัญหาการขัดข้องของระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิงได้ โดยวัดได้จากจำนวนครั้งที่เกิดการขัดข้องในขณะฝึกซ้อมแผนฉุกเฉินคิดเป็น 65.4% ในปี 2560 และมีแนวโน้มที่จะเกิดการขัดข้องสูงมากขึ้น จึงได้ทำการปรับปรุงแก้ไขโดยนำแนวทางของการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์มาใช้ เริ่มต้นจากการวิเคราะห์ความล้มเหลวของการทำงานของส่วนประกอบของระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิง ซึ่งได้แก่ มอเตอร์ไฟฟ้า เครื่องยนต์ดีเซล และเครื่องสูบน้ำดับเพลิง เมื่อวิเคราะห์จนกระทั่งได้ตารางแสดงอาการขัดข้องและลำดับเหตุการณ์ที่เกิดความล้มเหลว ในขั้นตอนต่อมาจึงได้พิจารณาถึงการขัดข้องที่สามารถกำหนดเป็นความผิดปกติที่ต้องตรวจจับและกำหนดลงในแผนการบำรุงรักษาที่ปรับปรุงใหม่ มีการตรวจจับความผิดปกติประจำสัปดาห์ ประจำสามเดือน ประจำหกเดือน และประจำปี โดยต้องใช้ระยะเวลาในการบำรุงรักษาเพิ่มขึ้นทั้งหมด 86 ชั่วโมง 30 นาที ผลการดำเนินงานในช่วงแรกพบว่าสามารถตรวจพบความผิดปกติล่วงหน้าได้ 9 รายการ แสดงดังตารางที่ 13 เป็นอาการขัดข้องที่เคยเกิด 7 รายการและไม่เคยเกิดขึ้นมาก่อน 2 รายการ

เมื่อดำเนินการแก้ไขความผิดปกติที่ตรวจพบล่วงหน้าแล้วจึงทำให้ไม่พบว่าการขัดข้องของระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิงในขณะฝึกซ้อมแผนฉุกเฉินในเวลาต่อมา เมื่อทำการตรวจจับหาความผิดปกติเมื่อครบกำหนดอย่างต่อเนื่องแล้ว ค่าความพร้อมใช้งานของระบบเครื่องสูบน้ำดับเพลิงมีค่าสูงขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้ให้เวลาในการดำเนินการหนึ่งปีแล้วจึงประเมินผลโดยวัดจากความพร้อมของระบบดับเพลิงในขณะที่ใช้ฝึกอบรมตามแผนฉุกเฉินทุกสัปดาห์เป็นเวลา 52 สัปดาห์ ซึ่งไม่พบว่ามีอาการขัดข้องเกิดขึ้นภายในระยะเวลาหนึ่งปีที่ผ่านมา

ตารางที่ 13 ความผิดปกติที่สามารถตรวจพบ (หลังการปรับปรุง)

	อาการผิดปกติที่พบ	กิจกรรม	เครื่องจักร	วันที่ตรวจพบ
1	อุณหภูมิของมอเตอร์ฝั่ง DE สูงเกิน 80 องศาเซลเซียส	ตรวจวัดอุณหภูมิของดัดลูกปืน	มอเตอร์ไฟฟ้า	พฤษภาคม พ.ศ.2561 (สัปดาห์ที่ 19)
2	*แบตเตอรี่มีความต่างศักย์ต่ำกว่า 12.6 โวลต์	ตรวจวัดความต่างศักย์ของแบตเตอรี่	เครื่องยนต์ดีเซล	กุมภาพันธ์ พ.ศ.2561 (สัปดาห์ที่ 6)
3	*สาหร่ายน้ำมันเสื่อมสภาพ	ตรวจสอบสภาพสาหร่ายน้ำมัน	เครื่องยนต์ดีเซล	เมษายน พ.ศ.2561 (สัปดาห์ที่ 14)
4	*การตั้งค่าของสวิตช์ควบคุมความดันผิดพลาด	ตรวจสอบการตั้งค่าของสวิตช์ควบคุมความดัน	เครื่องยนต์ดีเซล	มิถุนายน พ.ศ.2561 (สัปดาห์ที่ 24)
5	*สาหร่ายหล่อเย็นเสื่อมสภาพ	ตรวจสอบสภาพสาหร่ายหล่อเย็น	เครื่องยนต์ดีเซล	กันยายน พ.ศ.2561 (สัปดาห์ที่ 37)
6	*ความดันของน้ำมันเชื้อเพลิงต่ำกว่า 17 psi	ตรวจสอบความดันน้ำมันเชื้อเพลิง	เครื่องยนต์ดีเซล	ตุลาคม พ.ศ.2561 (สัปดาห์ที่ 43)
7	*การสั่นสะเทือนของเครื่องสูบน้ำเกิน 7.1 มิลลิเมตรต่อวินาที	ตรวจวัดการสั่นสะเทือนของเครื่องสูบน้ำ	เครื่องสูบน้ำ	สิงหาคม พ.ศ.2561 (สัปดาห์ที่ 34)
8	*ความหนาของหัวเครื่องสูบน้ำต่ำกว่า 3 มิลลิเมตร	ตรวจวัดความหนาของหัวเครื่องสูบน้ำคัปเพลริง	เครื่องสูบน้ำ	ธันวาคม พ.ศ.2561 (สัปดาห์ที่ 48)
9	มอเตอร์และเครื่องสูบน้ำไม่ได้เส้นตรงศูนย์กลางเดียวกัน	ตรวจสอบการร่วมศูนย์ของมอเตอร์และเครื่องสูบน้ำ	เครื่องสูบน้ำ	ธันวาคม พ.ศ.2561 (สัปดาห์ที่ 50)

* หมายถึง เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในปี 2558-2560 (ก่อนการปรับปรุง)

การเลือกการขัดข้องเพื่อกำหนดให้เป็นจุดตรวจวัดความผิดปกติเป็นสิ่งสำคัญ หากตรวจพบความผิดปกติได้เร็วเป็นสิ่งที่ดี อุปสรรคต่อการตรวจวัดความผิดปกติ เช่น ขาดความพร้อมของเครื่องมือในการตรวจวัด การเสียเวลาในการรื้อ ถอดชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องจักรก่อนจึงจะสามารถตรวจวัดได้ ในงานวิจัยนี้ได้ให้ข้อสรุปถึงเกณฑ์ในการเลือกจุดตรวจวัดความผิดปกติไว้สองประการได้แก่ (1) ต้องสามารถตรวจพบความผิดปกติได้รวดเร็วที่สุด (2) วิธีในการตรวจพบจะต้องไม่แยกชิ้นส่วนเครื่องจักรเพราะจะต้องเสียเวลา กำลังพลและค่าใช้จ่ายจำนวนมาก ซึ่งงานวิจัยนี้พบว่าแม้ใช้เกณฑ์ในการเลือกจุดตรวจวัดแล้วก็ตาม ยังต้องใช้เวลาในการตรวจสอบตามแผนการบำรุงรักษาหลังการปรับปรุงมากกว่าก่อนการปรับปรุงถึงเท่าตัว จากเดิมคิดเป็น 82 ชั่วโมง 20 นาที หลังการปรับปรุงเป็น 168 ชั่วโมง 50 นาที เพิ่มขึ้น 86 ชั่วโมง 30 นาที

การปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาที่ผนวกแนวทางของการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ส่งผลในทางบวกซึ่งสรุปได้ดังนี้ 1) ลดการขัดข้องของระบบเครื่องสูบน้ำคัปเพลริงและสามารถพบวิธีการที่จะยืดอายุการใช้งานก่อนที่จะเครื่องจักรจะขัดข้องได้ 2) หน่วยงานบำรุงรักษาเครื่องจักรสามารถวางแผนงานซ่อมบำรุงได้ล่วงหน้าส่งผลให้สามารถเตรียมกำลังพล อะไหล่ และเครื่องมือได้ล่วงหน้า ทำให้งานซ่อมบำรุงมีประสิทธิภาพและซ่อมบำรุงได้อย่างรวดเร็วด้วยงบประมาณที่เหมาะสม ข้อเสนอแนะที่ได้จากงานวิจัยนี้อีกประการคือ แผนการบำรุงรักษาควรมีการทบทวนเป็นประจำทุกปีเนื่องจากในมีการพัฒนาของเครื่องมือ เทคโนโลยี และความรู้ความสามารถของพนักงานอยู่ตลอดเวลา [16] ซึ่งในอนาคตมีโอกาสที่จะตรวจพบความผิดปกติของเครื่องจักรได้รวดเร็วและ

แม่นยำเพิ่มมากขึ้น รวมถึงอาจจะใช้เวลาในการตรวจสอบที่น้อยลง นอกจากนี้อาจต้องมีการปรับเปลี่ยนความถี่ของการตรวจสอบตามอาการผิดปกติที่ตรวจพบ เช่น หากพบว่าเครื่องจักรมีแนวโน้มเกิดความผิดปกติเร็ว จำเป็นต้องเพิ่มความถี่ของการตรวจสอบมากขึ้น ถ้าพบว่าความผิดปกติที่เกิดขึ้นมีช่วงเวลาในการเกิดห่างกว่าที่เข้าไปตรวจสอบ อาจจะพิจารณาขยายรอบเวลาของการตรวจสอบให้ยาวขึ้น ซึ่งจะช่วยลดเวลาในการทำงานและค่าใช้จ่ายของงานบำรุงรักษาลงได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Carnero, M.C. An evaluation system of the setting up of predictive maintenance. *Reliability Engineering and System safety*, 2006, 91 (1), pp. 945-963.
- [2] David J. Edwards, Gary D. Holt and Harris F.C. Predictive maintenance techniques and their relevance to construction plant. *Journal of Quality & Reliability Management*, 1998, 4 (1), pp. 25-37.
- [3] Cousins, J.B. and Earl, L.M. *Participatory evaluation in education: studies of evaluation use and organizational learning*, London: Falmer Press, 1995.
- [4] Rukijkanpanich, Jittra and Panit Pasuk. Maintenance management for transportation process in quarry industry. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 2018, 24 (2), pp. 185-199.
- [5] Eti M.C., Ogaji S.O.T. and Probert S.D. Development and implementation of preventive-mobile maintenance: a TPM Concept. *Journal of Quality & Reliability Management*, 2006, 32 (5), pp. 503-516.
- [6] Beebe, Ray S. *Predictive maintenance of pumps using condition monitoring*, London: Elsevier Science & Technology Book, 2004.
- [7] Yong Yuan, Xiaomo Jiang and Xian Liu. Predictive maintenance of shield tunnels. *European Journal of Operational Research*, 2013, 38 (1), pp.69-86.
- [8] Hamid Reza Feili and et al. Risk analysis of geothermal power plants using failure modes and effects analysis (FMEA) technique. *Energy Conversion and Management*. 2013 Vol. 72 pp.69-76.
- [9] Mike Gerdes, Dieter Scholz and Diego Galar. Effects of condition-based maintenance on costs caused by unscheduled maintenance of aircraft. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 2015 Vol. 22 No.4, pp. 394-417.
- [10] Rodrigo de Queiroz Souza and Alberto Jose' A'lvaes. FMEA and FTA Analysis for applicant of the reliability-centered maintenance methodology: case study on hydraulic turbines", *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, 2008, 3, pp. 803-812.
- [11] Sobral, J. and L.A. Ferreira. Availability of fire pumping system under periodic inspection. *Journal of Building Engineering*. 2016, 8, pp. 285-291.
- [12] Jain, A., Bhatti, S.K. and Singh, H. OEE enhancement in SMEs through mobile maintenance: a TPM concept", *Journal of Quality & Reliability Management*, 2015, 32 (5), pp. 503-516.
- [13] Modgil, V., Sharma, S.K. and Singha, H. Performance modeling and availability analysis of shoe upper manufacturing unit. *Journal of Quality and Reliability Management*, 2013, 21 (6), pp.567-580.
- [14] Doran, G. T. There's a S.M.A.R.T. way to write management's goals and objectives. *Management Review*. 1981, Vol.70 No.11, pp. 35-36.
- [15] National Fire Protection Association. *NFPA 25 Standard for the inspection, testing, and maintenance of water-based fire protection systems*, 2008.
- [16] Jittra Rukijkanpanich and Mathurot Mingmongkol. Enhancing performance of maintenance in solar power plant. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, November 2019. <http://doi.org/10.1108/IQME-11-2018-0098>