

บทความวิจัย (Research Article)

การปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันเครื่องจักรของสายการผลิตเครื่องดื่ม บรรจุภัณฑ์ชนิดกระป๋อง

รุ่งพราย สารคำ^{1,*} และ ประจวบ กล่อมจิตร¹

¹ สาขาการจัดการงานวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์

*ผู้ประสานงานบทความฉบับนี้: sarakum_r@silpakorn.edu โทรศัพท: 093-8913661

(รับบทความ: 11 มีนาคม 2569; แก้ไขบทความ: 16 พฤษภาคม 2569; ตอรับบทความ: 18 พฤษภาคม 2569)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อยกระดับความน่าเชื่อถือและประสิทธิภาพการบำรุงรักษาของเครื่องบรรจุขวดและหุ้มฟิล์มในสายการผลิตเครื่องดื่มบรรจุภัณฑ์ชนิดกระป๋อง โดยนำเสนอซึ่งเป็นเครื่องจักรคอกขวดที่มีอัตราการหยุดทำงานสูงสุดจากการประเมินด้วยเทคนิคคะแนนถ่วงน้ำหนัก (Weight Score Method) ทั้งนี้ แนวทางการบำรุงรักษาแบบดั้งเดิมที่อ้างอิงเพียงคู่มือผู้ผลิตหรือประสบการณ์ผู้ปฏิบัติงานไม่สามารถระบุพฤติกรรมการเสื่อมสภาพที่แท้จริงของเครื่องจักรได้ งานวิจัยนี้จึงนำเสนอแนวคิดใหม่โดยการดำเนินงานเป็นการประยุกต์ใช้หลักการวิศวกรรมความน่าเชื่อถือผ่านการวิเคราะห์การแจกแจงแบบไวบูลล์ (Weibull Distribution Analysis) โดยมีค่าพารามิเตอร์รูปร่าง (β) เท่ากับ 2.79 เพื่อยืนยันพฤติกรรมการเสียหายแบบสึกหรอ (Wear-Out Failure) จากข้อมูลเวลาการทำงานก่อนเสียหายจริงจากนั้นจึงนำผลการวิเคราะห์ดังกล่าวมาบูรณาการร่วมกับแนวคิดการบำรุงรักษาที่ทุกคนมีส่วนร่วม (TPM) ซึ่งแตกต่างจากการประยุกต์ใช้แบบดั้งเดิมที่อาศัยเพียงดุลยพินิจของผู้ปฏิบัติงาน งานวิจัยนี้ใช้หลักฐานทางสถิติจากการวิเคราะห์ไวบูลล์เป็นฐานในการกำหนดรายการตรวจสอบและรอบเวลาบำรุงรักษา เพื่อพัฒนาแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) ที่สอดคล้องกับสภาพการใช้งานทางวิศวกรรม ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะก่อนและหลังการปรับปรุงพบว่า สามารถลดระยะเวลาการหยุดเครื่องจักรรวม (Breakdown Time) ลงร้อยละ 44.03 ความถี่การเกิดเหตุขัดข้อง (Failure Frequency) ลดลงร้อยละ 35.20 ลดเวลาเฉลี่ยในการซ่อม (MTTR) ร้อยละ 13.63 และเพิ่มเวลาเฉลี่ยระหว่างการเสีย (MTBF) ได้ถึงร้อยละ 55.70 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการพัฒนาแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่ขับเคลื่อนด้วยข้อมูลและการวิเคราะห์เชิงระบบสามารถช่วยลดความสูญเสียเพิ่มเสถียรภาพของเครื่องจักร และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรประเภทอื่นในสายการผลิตที่มีลักษณะใกล้เคียงกันได้

คำสำคัญ: การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน การบำรุงรักษาที่ทุกคนมีส่วนร่วม MTBF MTTR ความน่าเชื่อถือของเครื่องจักร

การอ้างอิงบทความ: รุ่งพราย สารคำ และ ประจวบ กล่อมจิตร, "การปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันเครื่องจักรของสายการผลิตเครื่องดื่มบรรจุภัณฑ์ชนิดกระป๋อง," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 4, ฉบับที่ 4, หน้า 1-19, 2569.

Improvement of a Preventive Maintenance Plan for Machinery in the Canned Beverage Production Line

Rungprai Sarakum^{1,*} and Prachuab Klomjit¹

¹ Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University

*Corresponding Author: sarakum_r@silpakorn.edu, Tel: 093-8913661
(Received: March 11, 2026; Revised: May 16, 2026; Accepted: May 18, 2026)

Abstract

This research aims to enhance the reliability and maintenance efficiency of a Tray Packer machine in a canned beverage production line, which was identified as the bottleneck machine with the highest downtime rate through the Weight Score Method. Conventional maintenance approaches that rely solely on manufacturer manuals or operator experience are insufficient for accurately identifying true machine degradation behavior. This study therefore proposes a novel framework by applying reliability engineering principles through Weibull Distribution Analysis, yielding a shape parameter (β) of 2.79, to verify wear-out failure behavior using actual time-to-failure field data. The findings were then integrated with the Total Productive Maintenance (TPM) concept. Unlike conventional TPM applications that depend primarily on operator judgment, this study uniquely employs statistical evidence derived from Weibull analysis as the basis for defining inspection items and maintenance intervals, resulting in a data-driven Preventive Maintenance plan that reflects actual engineering operating conditions. A comparative performance evaluation before and after implementation revealed a statistically significant reduction in total Breakdown Time by 44.03% and Failure Frequency by 35.20%. Furthermore, the Mean Time to Repair (MTTR) decreased by 13.63%, while the Mean Time Between Failures (MTBF) increased by 55.70%, at a statistical significance level of 0.05 ($p < 0.05$). The findings demonstrate that a data-driven preventive maintenance plan developed through systematic analysis can effectively reduce production losses, enhance machine stability, and serve as a replicable model applicable to other machinery with similar operating characteristics in the production line.

Keywords: Preventive Maintenance, Total Productive Maintenance, MTBF, MTTR, Machine Reliability

Please cite this article as: R. Sarakum and P. Klomjit, "Improvement of a Preventive Maintenance Plan for Machinery in the Canned Beverage Production Line," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 4, no. 4, pp. 1-19, 2026.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

ภาคอุตสาหกรรมการผลิตให้ความสำคัญกับความต่อเนื่องของกระบวนการผลิต เนื่องจากการหยุดชะงักส่งผลกระทบต่อต้นทุน แม้หลายองค์กรจะประยุกต์ใช้การบำรุงรักษาเชิงป้องกันแบบกำหนดระยะเวลา (Time-Based Maintenance) [1-5] แต่ในทางปฏิบัติมักพบข้อจำกัดเรื่องความแตกต่างของสภาพแวดล้อมและภาระงาน ส่งผลให้แผนรูปแบบเดิมไม่สามารถป้องกันการขัดข้องได้อย่างสมบูรณ์ โดยเฉพาะในระบบการผลิตแบบต่อเนื่อง (Continuous Production System) ลักษณะการหยุดทำงานของเครื่องจักรนั้นมีความหลากหลาย ทั้งการหยุดขัดข้องบ่อยครั้งหรือการหยุดซ่อมเป็นระยะเวลานาน (MTTR) ซึ่งการขัดข้องของเครื่องจักรเพียงจุดเดียวสามารถส่งผลกระทบลูกโซ่ให้กระบวนการผลิตทั้งหมดต้องหยุดชะงัก ดังนั้น องค์กรจึงจำเป็นต้องประเมินและคัดเลือกเครื่องจักรที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพรวมของสายการผลิตมากที่สุดอย่างเป็นระบบด้วยเทคนิคคะแนนถ่วงน้ำหนัก (Weight Score Method) [6] ดังเช่นกรณีศึกษาในสายการผลิตเครื่องตีบรรจุกระป๋องที่ผลการประเมินพบว่า เครื่องบรรจุอัดและหุ้มฟิล์มเป็นคอขวดสำคัญที่มีอัตราการหยุดทำงานสูงถึงร้อยละ 22.30 สะท้อนให้เห็นถึงความไม่สอดคล้องระหว่างรอบการตรวจสอบกับพฤติกรรมเสื่อมสภาพที่แท้จริง

แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพการบำรุงรักษาที่ผ่านมา มักมุ่งเน้นการจัดการเชิงเอกสาร การวางแผนตามรอบเวลา (Time-Based Maintenance) หรือการประเมินความเสี่ยงด้วยเทคนิค FMEA [7] ซึ่งมีข้อจำกัดสำคัญคือ การพึ่งพาดุลยพินิจ ประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน หรือคู่มือผู้ผลิตเป็นหลัก โดยไม่ได้สะท้อนถึงสภาพแวดล้อมและภาระงานจริงในระบบการผลิตแบบต่อเนื่อง การจัดการดังกล่าวยังขาดการประเมินความวิกฤตของปัญหาเชิงปริมาณ และขาดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มารองรับ ทำให้การ

กำหนดรอบการบำรุงรักษาเกิดความคลาดเคลื่อนและไม่สามารถป้องกันการขัดข้องซ้ำได้อย่างเด็ดขาด แม้งานวิจัยในระยะหลังจะเริ่มนำแบบจำลองความน่าเชื่อถือ เช่น การวิเคราะห์การแจกแจงแบบไวบูลล์ (Weibull Distribution) มาประยุกต์ใช้ในบริบทอุตสาหกรรม [8,9] หรือนำหลักการ TPM มาใช้เพื่อยกระดับการมีส่วนร่วมของพนักงาน แต่งานวิจัยส่วนใหญ่ยังคงใช้เครื่องมือเหล่านี้แบบแยกส่วน และมักเน้นการสร้างแบบจำลองเพื่อพยากรณ์ผลเพียงอย่างเดียว โดยขาดการนำผลลัพธ์ทางสถิติมาแปลงเป็นแผนปฏิบัติงานจริงในระดับหน้างาน [10] นอกจากนี้ ยังขาดการบูรณาการเชิงระบบที่อ้างอิงข้อมูลความเสียหายจริงจากสภาพแวดล้อมการผลิตแบบต่อเนื่อง ซึ่งถือเป็นช่องว่างสำคัญที่งานวิจัยนี้มุ่งเติมเต็ม

เพื่อเติมเต็มช่องว่างการวิจัยดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงนำเสนอกรอบแนวคิดการบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่บูรณาการเครื่องมือเชิงปริมาณและหลักการวิศวกรรมความน่าเชื่อถือเข้าด้วยกันอย่างเป็นระบบ ประกอบด้วย 1) การประยุกต์ใช้เทคนิคคะแนนถ่วงน้ำหนัก (Weight Score Method) ที่ให้น้ำหนักกับค่าเวลาเฉลี่ยในการซ่อม (MTTR) และความถี่การหยุดเครื่องเป็นหลัก เพื่อคัดเลือกเครื่องจักรคอขวดอย่างปราศจากความเอนเอียง 2) การนำข้อมูลเวลาการทำงานก่อนเสียหายจริง (Time to Failure) มาวิเคราะห์การแจกแจงแบบไวบูลล์ (Weibull Distribution) เพื่อพิสูจน์พฤติกรรมเสื่อมสภาพทางกลไกด้วยหลักฐานทางคณิตศาสตร์ และ 3) การนำข้อค้นพบทางสถิติดังกล่าวไปบูรณาการร่วมกับหลักการบำรุงรักษาที่ทุกคนมีส่วนร่วม (TPM) เพื่อยกระดับวิธีการและรอบการตรวจสอบ ทั้งนี้ นวัตกรรมของงานวิจัยฉบับนี้ ไม่ใช่เพียงการนำเครื่องมือทางวิศวกรรมที่มีอยู่เดิมมาใช้ แต่คือการสร้างกรอบการปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่ขับเคลื่อนด้วยข้อมูลจริง กรอบการวิจัยนี้จึงเป็นการเปลี่ยนผ่านจากการใช้ความรู้สึกในการ

บทความวิจัย (Research Article)

ประเมิน ไปสู่การวางแผนการปรับปรุงการบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่สอดคล้องกับพฤติกรรมการสึกหรอทางวิศวกรรม

วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่ขับเคลื่อนด้วยข้อมูล โดยเริ่มต้นจากการประยุกต์ใช้เทคนิคคะแนนถ่วงน้ำหนัก (Weight Score Method) เพื่อประเมินและคัดเลือกเครื่องจักรที่เป็นคอขวดของสายการผลิตอย่างเป็นรูปธรรม จากนั้นจึงอาศัยข้อมูลเชิงสถิติและการวิเคราะห์เชิงระบบ มุ่งเน้นการประเมินเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดสมรรถนะด้านความน่าเชื่อถือและประสิทธิภาพของเครื่องจักร ได้แก่ ค่าเวลาเฉลี่ยระหว่างการเสีย (MTBF) ค่าเวลาเฉลี่ยในการซ่อม (MTTR) ความถี่ การเกิดเหตุขัดข้อง (Failure Frequency) และระยะเวลาการหยุดเครื่องรวม (Breakdown Time) เพื่อยกระดับความพร้อมใช้งานและเสถียรภาพของเครื่องจักร พร้อมทั้งเสนอเป็นกรอบแนวคิดการบำรุงรักษาแบบอาศัยข้อมูลจริงสำหรับนำไปประยุกต์ใช้เป็นต้นแบบกับเครื่องจักรประเภทอื่นในระบบอุตสาหกรรมการผลิตที่มีลักษณะการทำงานใกล้เคียงกัน

2. การทบทวนวรรณกรรม

2.1 การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance)

การกำหนดรอบเวลาบำรุงรักษา (Time-Based Maintenance) เพื่อป้องกันเครื่องจักรชำรุด [1-5] มักอ้างอิงตามคู่มือผู้ผลิต (OEM) ซึ่งมีข้อจำกัดเมื่อนำมาใช้กับสายการผลิตแบบต่อเนื่อง เนื่องจากไม่สะท้อนถึงภาระงานและสภาพแวดล้อมที่แท้จริง ทำให้มักเกิดการสึกหรอก่อนกำหนดหรือเกิดการบำรุงรักษาที่เกินความจำเป็น

2.2 วิศวกรรมความน่าเชื่อถือ (Reliability Engineering)

ศาสตร์ที่มุ่งลดอัตราการเสียและยกระดับความพร้อมใช้งาน (Availability) ของระบบ [10-12] โดยให้ความสำคัญกับการลดความถี่การขัดข้องและควบคุมเวลาเฉลี่ยในการซ่อม (MTTR) ควบคู่กัน เพื่อเปลี่ยนผ่านจากการบำรุงรักษาเชิงรับ ไปสู่การวิเคราะห์พฤติกรรมเครื่องจักรอย่างเป็นรูปธรรม

2.3 การแจกแจงแบบไวบูลล์ (Weibull Distribution)

แบบจำลองทางสถิติที่นำข้อมูลเวลาการทำงานก่อนเสียหาย (Time to Failure) มาประเมินหาค่าพารามิเตอร์รูปร่าง (β) [8-9] ซึ่งเป็นดัชนีที่ช่วยยืนยันพฤติกรรมการเสียหาย (Failure Mode) โดยมีการตีความดังนี้

$(\beta) < 1$ หมายถึงการเสียหายในระยะเริ่มต้น (Early Failure) มักเกิดจากความบกพร่องในการผลิตหรือการติดตั้งชิ้นส่วน

$(\beta) = 1$ หมายถึงการเสียหายแบบสุ่ม (Random Failure) เป็นความเสียหายที่เกิดขึ้นอย่างคงที่และคาดเดาได้ยาก

$(\beta) > 1$ หมายถึงการเสียหายจากการสึกหรอ (Wear-out Failure) ซึ่งเกิดขึ้นตามอายุการใช้งานและการเสื่อมสภาพของกลไก

การวิเคราะห์นี้จึงช่วยยืนยันพฤติกรรมความเสียหายด้วยหลักฐานทางคณิตศาสตร์ ทำให้สามารถกำหนดรอบเวลาการตรวจสอบได้อย่างแม่นยำ ปราศจากการคาดเดา

2.4 การบำรุงรักษาที่ทุกคนมีส่วนร่วม (TPM)

กลยุทธ์การจัดการเครื่องจักรเชิงรุกตามแนวทางของ Nakajima [5] ซึ่งในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการนำ

บทความวิจัย (Research Article)

หลักการ TPM มาบูรณาการร่วมกับข้อมูลเชิงสถิติ เพื่อพัฒนาเป็นมาตรฐานการทำงานและรายการตรวจสอบ (PM Checklist) ที่สะท้อนถึงจุดเสี่ยงและพฤติกรรมความเสี่ยงสภาพหน้างานจริง อย่างไรก็ตามการนำ TPM ไปใช้ยังคงมุ่งเน้นที่การดำเนินงานและไม่ได้รวมโมเดลวิศวกรรมความน่าเชื่อถือเพื่อกำหนดช่วงเวลาการบำรุงรักษาที่เหมาะสมอย่างชัดเจน

การศึกษาล่าสุดชี้ให้เห็นว่าการรวมการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือเข้ากับ TPM สามารถปรับปรุงการตัดสินใจในการบำรุงรักษาได้โดยการเชื่อมโยงพฤติกรรมความเสี่ยงในการดำเนินงานกับการวางแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

2.5 การคัดเลือกเครื่องจักรคอกวดด้วยเทคนิคคะแนนถ่วงน้ำหนัก (Weight Score Method)

เครื่องมือประเมินเชิงปริมาณตามแนวทางของ Jardine and Tsang [6] ที่ใช้แปลงดัชนีความสูญเสีย

ให้เป็นคะแนนรวม โดยกำหนดน้ำหนักตามผลกระทบทางวิศวกรรม เช่น MTTR (ร้อยละ 40) และความถี่การหยุดเครื่อง (ร้อยละ 30) ช่วยให้การระบุเครื่องจักรเป้าหมายมีความแม่นยำและปราศจากความเอนเอียง (Bias) จากดุลยพินิจของบุคลากรที่จะทำงานซ่อมบำรุงเพื่อวิเคราะห์จุดและเห็นความผิดปกติก่อนจะทำการซ่อมบำรุงจุดยากลำบาก ทั้งนี้วิธีการดังกล่าวมีความโดดเด่นกว่าการประเมินแบบดั้งเดิมในแง่ที่สามารถบูรณาการตัวชี้วัดหลายมิติพร้อมกันได้ในสมการเดียว โดยไม่จำกัดเพียงการพิจารณาจากเวลาหยุดทำงานสะสมเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ยังสามารถปรับค่าน้ำหนักให้สอดคล้องกับบริบทของแต่ละสายการผลิตได้อย่างยืดหยุ่น ทำให้เป็นเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับการจัดลำดับความสำคัญของเครื่องจักรในระบบการผลิตแบบต่อเนื่องที่มีความซับซ้อนสูง

ตารางที่ 1 การวิพากษ์แนวคิดและทฤษฎีในอดีต

แนวคิดและทฤษฎี	ข้อวิพากษ์เชิงวิชาการ	การพัฒนางานวิจัย
การจัดการบำรุงรักษาเชิงป้องกันแบบดั้งเดิม	การกำหนดรอบเวลามักอ้างอิงตามคู่มือผู้ผลิต (OEM) หรือประสบการณ์ผู้ปฏิบัติงานเป็นหลัก ซึ่งไม่สะท้อนถึงภาระงานและสภาพแวดล้อมจริง	กำหนดรอบ PM โดยอ้างอิงข้อมูลเวลาการทำงานก่อนเสียหายจริง (TTF) แทนการใช้คู่มือผู้ผลิต
การประเมินความเสี่ยงและประสิทธิภาพ (FMEA & OEE)	กระบวนการตัดสินใจยังคงอาศัยดุลยพินิจเชิงคุณภาพของทีมงานเป็นหลัก ขาดแบบจำลองคณิตศาสตร์รองรับ	ใช้การวิเคราะห์ไวบูลล์เพื่อระบุพฤติกรรมความเสี่ยงด้วยหลักฐานทางคณิตศาสตร์ ลดความเอนเอียงจากดุลยพินิจ
แบบจำลองความน่าเชื่อถือและการจำลองสถานการณ์ (Reliability Simulation)	แม้มีความแม่นยำทางสถิติสูง แต่มักเน้นการสร้างแบบจำลองเพื่อพยากรณ์เพียงอย่างเดียว ขาดการนำผลลัพธ์ไปจัดทำแผนปฏิบัติงานจริง	นำผลการวิเคราะห์ไวบูลล์มาบูรณาการกับ TPM เพื่อจัดทำ PM Checklist ที่ใช้งานได้จริงในระดับหน้างาน

บทความวิจัย (Research Article)

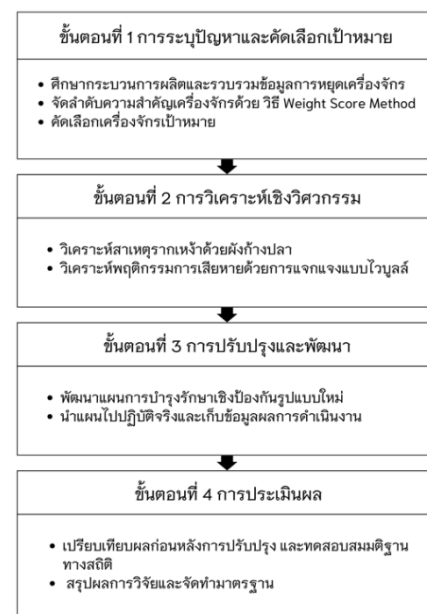
จากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้นจะเห็นได้ว่า แนวทางการบำรุงรักษาที่มีอยู่ในปัจจุบันยังมีข้อจำกัด ในสองประเด็นหลัก ประเด็นแรกคือ การขาดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อ้างอิงข้อมูลความเสียหายจริงในการกำหนดรอบการบำรุงรักษา และประเด็นที่สองคือ การขาดกลไกที่เชื่อมโยงผลการวิเคราะห์ทางสถิติกับแผนปฏิบัติงานในระดับหน่วยงานอย่างเป็นระบบ งานวิจัยนี้จึงพัฒนาต่อยอดจากงานวิจัยก่อนหน้าโดยบูรณาการจุดแข็งของแต่ละแนวทางเข้าด้วยกัน กล่าวคือ นำความแม่นยำของการวิเคราะห์ไวบูลล์ [8-9] มาใช้พิสูจน์พฤติกรรมความเสียหายของชิ้นส่วนเครื่องจักรโดยอาศัยข้อมูลความเสียหายที่เก็บรวบรวมจากสภาพการใช้งานจริงในพื้นที่ให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่สะท้อนอายุการใช้งานและอัตราการเสื่อมสภาพอย่างแม่นยำและนำหลักการ TPM มาเป็นกรอบในการแปลงผลการวิเคราะห์ดังกล่าวให้กลายเป็นมาตรฐานการปฏิบัติงานที่ใช้ได้จริง ไม่ว่าจะเป็นการกำหนดรอบการตรวจสอบ การระบุจุดวิกฤตที่ต้องเฝ้าระวัง และการจัดทำคู่มือบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่พนักงานทุกระดับสามารถเข้าใจและนำไปปฏิบัติได้อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งแนวทางดังกล่าวแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมาที่ใช้เครื่องมือเหล่านี้แบบแยกส่วน [10] โดยไม่ได้เชื่อมโยงผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณเข้ากับระบบการจัดการบำรุงรักษาในเชิงปฏิบัติอย่างครบวงจร

3. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้สกัดและสังเคราะห์ระเบียบวิธีวิจัยออกมาเป็นกรอบแนวคิดเชิงระบบของการบำรุงรักษาที่ขับเคลื่อนด้วยข้อมูลจริง ซึ่งก่อให้เกิดองค์ความรู้ใหม่และนวัตกรรมเชิงกระบวนการที่เหนือกว่าวิธีการบำรุงรักษาแบบดั้งเดิม โดยเปลี่ยนจากการนำเครื่องมือมาตรฐานมาใช้งานแบบแยกส่วน ไปสู่การสร้างเสริมความเชื่อมโยงของข้อมูล (Data Synergy) อย่าง

เป็นระบบโมเดลเชิงแนวคิดประกอบด้วยการบูรณาการ 3 องค์ประกอบด้วยกัน

การดำเนินงานวิจัยเริ่มต้นด้วยการศึกษากระบวนการผลิตและจัดลำดับความสำคัญของเครื่องจักรเพื่อระบุเป้าหมายหลักที่มีผลกระทบต่อสายการผลิตสูงสุด โดยประยุกต์ใช้เทคนิคคะแนนถ่วงน้ำหนัก (Weight Score Method) ตามหลักการของ Jardine and Tsang [6] วิธีการนี้ช่วยเปลี่ยนข้อมูลความสูญเสียเชิงประจักษ์ให้เป็นคะแนนเชิงปริมาณ (Total Score) เพื่อระบุเครื่องจักรที่เป็นคอขวด (Bottleneck) ของระบบได้อย่างแม่นยำและปราศจากความเอนเอียง (Bias) โดยกระบวนการดำเนินงานทั้งหมดสามารถเรียงลำดับขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การประเมินผลสัมฤทธิ์ของการปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่ขับเคลื่อนด้วยข้อมูล โดยจะใช้ข้อมูลประวัติการซ่อมบำรุงและรายงานการหยุดทำงานของเครื่องจักรทั้งหมดในสายการผลิตเครื่องเดิม

บทความวิจัย (Research Article)

บรรจุภัณฑ์ชนิดกระป๋อง โดยเลือกกลุ่มตัวอย่าง คือ เครื่องจักรประเภทบรรจุภัณฑ์และหุ้มฟิล์ม เนื่องจากผลการวิเคราะห์คะแนนถ่วงน้ำหนัก พบว่าเป็นเครื่องจักรที่มีอัตราการหยุดทำงานสูงสุด การศึกษาได้แบ่งระยะเวลาการเก็บข้อมูลออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงก่อนการปรับปรุงระยะเวลา 12 เดือนและช่วงหลังการปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาระยะเวลา 4 เดือน ทั้งนี้ ข้อมูลเวลาการปฏิบัติงานจริงของเครื่องจักรถือเป็นความลับ จึงนำเสนอตัวชี้วัดประสิทธิภาพ (MTBF, MTTR, Breakdown Time และ Failure Frequency) ในรูปแบบดัชนีฐานสัมพัทธ์ (Relative Baseline Index) โดยกำหนดดัชนีช่วงก่อนปรับปรุงให้มีค่าฐานเท่ากับ 100 และการแปลงข้อมูลดังกล่าวใช้เพื่อการนำเสนอเชิงเปรียบเทียบสัดส่วนเท่านั้น โดยไม่ส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของการวิเคราะห์การแจกแจงแบบไวบูลล์และค่าดัชนีสำคัญทางการทดสอบสมมติฐานทางสถิติแต่อย่างใด

ในการกำหนดตัวแปรเพื่อทดสอบสมมติฐาน ตัวแปรอิสระ (Independent Variables) คือ รูปแบบการบำรุงรักษา 2 ระดับ ได้แก่ แผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันรูปแบบเดิม (Time-Based Maintenance) [4] และแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันรูปแบบใหม่ที่พัฒนาขึ้นจากการใช้ข้อมูลความขัดข้องจริงกับการวิเคราะห์ด้วยการแจกแจงแบบไวบูลล์ (Weibull Distribution) ร่วมกับหลักการบำรุงรักษาที่ทุกคนมีส่วนร่วม (TPM) สำหรับ ตัวแปรตาม (Dependent Variables) คือดัชนีชี้วัดสมรรถนะด้านความน่าเชื่อถือและประสิทธิภาพ [11-13] ประกอบด้วย ความถี่การเกิดเหตุขัดข้อง (Failure Frequency) ค่าเวลาเฉลี่ยระหว่างการเสีย (MTBF) ค่าเวลาเฉลี่ยในการซ่อม (MTTR) และระยะเวลาการหยุดเครื่องรวม (Breakdown Time)

สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล ได้มีการนำข้อมูลชั่วโมงการทำงานก่อนเสียหาย (TTF) มาวิเคราะห์การ

แจกแจงแบบไวบูลล์ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์รูปร่าง (β) และค่าพารามิเตอร์มาตราส่วน (η) สำหรับระบุพฤติกรรมความเสี่ยงที่แท้จริงและใช้เป็นเกณฑ์กำหนดรอบการบำรุงรักษา [11,12] จากนั้นจึงประเมินผลสัมฤทธิ์ด้วยสถิติเชิงอนุมาน (Inferential Statistics) [14] โดยตรวจสอบข้อตกลงเบื้องต้นและทดสอบสมมติฐานด้วยสถิติที่เหมาะสม ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ($p < 0.05$) โดยกำหนดขนาดตัวอย่างจากข้อมูลดัชนีชี้วัดสมรรถนะรายเดือน ได้แก่ กลุ่มก่อนปรับปรุง ($n = 12$) และกลุ่มหลังปรับปรุง ($n = 4$) โดยกำหนดสมมติฐาน ดังนี้

H_0 : ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ย MTBF, MTTR, Breakdown Time และ Failure Frequency ระหว่างแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันรูปแบบเดิมและรูปแบบใหม่

H_1 : มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ย MTBF, MTTR, Breakdown Time และ Failure Frequency ระหว่างแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันรูปแบบเดิมและรูปแบบใหม่ ($p < 0.05$)

3.1 การคัดเลือกเครื่องจักรและการวิเคราะห์พฤติกรรมความเสี่ยง

3.1.1 ศึกษากระบวนการผลิตและรวบรวมข้อมูล

การศึกษาระบวนการดำเนินงานจริงเพื่อทำความเข้าใจกระบวนการผลิต ดังรูปที่ 2 ทำให้เห็นภาพรวมของลำดับงานในสายการผลิตเครื่องตีบรรจุภัณฑ์ชนิดกระป๋อง ซึ่งส่วนนี้จะสรุปแหล่งข้อมูลดิบและแนวทางการประเมินด้วยเทคนิคคะแนนถ่วงน้ำหนัก (Weight Score Method) ที่ใช้ในการระบุและจัดลำดับความสำคัญของเครื่องจักรในฐานะส่วนประกอบที่สำคัญ เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจและจัดการกับเครื่องจักรที่ส่งผลกระทบต่อความต่อเนื่องในการผลิต (Downtime) อย่างเป็นระบบ

บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 2 แผนภาพแสดงลำดับการบรรจุภัณฑ์

นอกจากนี้ การประเมินดังกล่าวยังมีจุดมุ่งหมายเพื่อยกระดับความน่าเชื่อถือแผนการซ่อมบำรุงของเครื่องจักร นอกเหนือจากความพร้อมใช้งานตามแผนการผลิต การศึกษานี้ยังเน้นย้ำถึงความสามารถของเครื่องจักรในการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเผชิญกับสภาวะการทำงานจริง สิ่งนี้สะท้อนให้เห็นในตัวชี้วัดที่สำคัญ เช่น ระยะเวลาเฉลี่ยระหว่างการเสีย (MTBF) ระยะเวลาที่เครื่องจักรหยุดทำงานรวม (Breakdown Time) ความถี่ในการเกิดเหตุขัดข้อง (Failure Frequency) และเวลาเฉลี่ยในการซ่อม (MTTR)

การประเมินนี้ใช้ฐานข้อมูลเชิงประจักษ์ที่รวบรวมย้อนหลังเป็นระยะเวลา 12 เดือน ตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2566 ถึงเดือนสิงหาคม 2567 โดยอาศัยกลุ่มข้อมูลสารสนเทศการปฏิบัติงานแบบบูรณาการ ซึ่งครอบคลุมทั้งข้อมูลประวัติการหยุดเครื่องจักร ข้อมูลสถานะการทำงานตามเวลาจริง และรายงานผลการบรรจุ เพื่อปรับปรุงการประมาณค่าความน่าเชื่อถือและเพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับพฤติกรรมความ

ขัดข้องของเครื่องจักร การยกระดับและรับประกันความน่าเชื่อถือของเครื่องจักรคอขวดที่สำคัญ ถือเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการรักษาการดำเนินงานที่ราบรื่นและลดความสูญเสียในสายการผลิต

3.1.2 การจัดลำดับความสำคัญและคัดเลือกเครื่องจักรเป้าหมาย

การจัดลำดับความสำคัญและคัดเลือกเครื่องจักรเป้าหมายอาศัยข้อมูลรายงานการหยุดทำงานของเครื่องจักร (Machine Breakdown Report) เป็นระยะเวลา 12 เดือน ตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2566 ถึงเดือนสิงหาคม 2567 โดยมีเกณฑ์การคัดเลือกข้อมูลคือ ต้องเป็นบันทึกเหตุขัดข้องทางวิศวกรรมที่ส่งผลให้สายการผลิตหยุดชะงัก (Downtime) และมีการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล (Data Validation) ด้วยการเทียบเคียงข้อมูลระหว่างบันทึกการซ่อมบำรุงกับรายงานผลการผลิตประจำวัน เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อน และเพื่อคัดข้อมูลที่ปราศจากข้อมูลที่ไม่จำเป็นมาวิเคราะห์จัดลำดับความสำคัญด้วยเทคนิคคะแนนถ่วงน้ำหนัก (Weight Score Method) คำนวณจากผลรวมของคะแนนปัจจัยคูณกับน้ำหนักความสำคัญดังสมการที่ 1

$$\text{Total Score} = \sum_{i=1}^n (W_i \times S_i) \quad (1)$$

โดยที่

Total Score คือ คะแนนรวมของเครื่องจักร

W_i คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของปัจจัยที่ i โดยผลรวมของน้ำหนักทั้งหมดต้องเท่ากับ 100%

S_i คือ คะแนนดิบ หรือ คะแนนที่ปรับฐานแล้วของปัจจัยที่ i

บทความวิจัย (Research Article)

การกำหนดตัวชี้วัดสมรรถนะ (KPIs) 4 ด้าน และค่าน้ำหนัก (W_i) อ้างอิงตามระดับความรุนแรงของผลกระทบที่มีต่อสายการผลิตแบบต่อเนื่อง

(Continuous Production Line) เพื่อสะท้อนสภาพปัญหาหน้างานจริง โดยมีเหตุผลทางวิศวกรรมในการกำหนดค่าน้ำหนักดังสรุปในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เกณฑ์ค่าน้ำหนักตัวชี้วัดสมรรถนะและเหตุผลทางวิศวกรรมสำหรับการคัดเลือกเครื่องจักร

ตัวชี้วัด (KPIs)	ค่าน้ำหนัก (%)	ผลกระทบต่อสายการผลิต
MTTR (Mean Time To Repair)	40	ส่งผลกระทบโดยตรงต่อการหยุดชะงักของกระบวนการผลิต ก่อให้เกิดความสูญเสียโอกาสการผลิตสูง
Frequency of Breakdown	30	สายการผลิตสะดุดบ่อยครั้ง กระทบต่อความเสถียรของเครื่องจักรและเพิ่มภาระงานของผู้ปฏิบัติงาน
Breakdown Time	20	สะท้อนภาพรวมของความสูญเสียด้านเวลาสะสมทั้งหมด ซึ่งเป็นผลกระทบต่อเนื่องมาจาก MTTR และความถี่ในการขัดข้อง
MTBF (Mean Time Between Failures)	10	แม้เป็นดัชนีสำคัญด้านความน่าเชื่อถือ แต่ในบริบทการค้นหาข้อผิดพลาด ผลกระทบเชิงประจักษ์ด้านเวลาซ่อมและความถี่จะส่งผลกระทบต่อความต่อเนื่องที่ชัดเจนกว่า

การบูรณาการค่าน้ำหนักทั้ง 4 ปัจจัยจากตารางข้างต้น นำมาสู่การสร้างสมการประเมินคะแนนความวิกฤตของเครื่องจักรดังสมการที่ 2

$$\text{Score} = (0.40 \times S_{\text{MTTR}}) + (0.30 \times S_{\text{Freq}}) + (0.20 \times S_{\text{BD}}) + (0.10 \times S_{\text{MTBF}}) \quad (2)$$

โดยในการคำนวณได้มีการนำข้อมูลดิบของแต่ละตัวชี้วัดมาปรับฐาน (Normalization) ให้เป็นคะแนน S ในสเกลเดียวกันก่อนนำมาคูณกับค่าน้ำหนัก เพื่อให้สามารถนำตัวแปรที่มีหน่วยต่างกันมาบวกกันได้ อย่างถูกต้องตามหลักคณิตศาสตร์ทำให้จากการจัดลำดับความสำคัญที่ ช่วยระบุคอขวด (Bottleneck) และปราศจากความเอนเอียงทางความรู้สึก พบว่า

เครื่องบรรจุถาดและหุ้มฟิล์ม เป็นเครื่องจักรที่มีคะแนนความวิกฤตสูงสุด ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนการหยุดทำงานถึงร้อยละ 22.30 ของเวลาสูญเสียทั้งหมดในสายการผลิต โดยรายละเอียดการคำนวณคะแนนถ่วงน้ำหนัก ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งให้เห็นว่าปัจจัยหลักของความวิกฤตเกิดจากค่า MTTR และความถี่การหยุดเครื่องที่สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐาน

จากการวิเคราะห์ข้อมูลในตารางที่ 3 พบว่าปัญหาหลักมาจากกลุ่มระบบจัดการขึ้นรูปถาด ซึ่งมีความถี่ความขัดข้องสูงถึง 82 ครั้ง คิดเป็นร้อยละ 65.60 ของปัญหาทั้งหมด โดยมีอาการของปัญหาที่สามารถจำแนกได้ตามแผนภูมิพาเรโตความถี่ของอาการดังรูปที่ 3

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์คะแนนถ่วงน้ำหนักเครื่อง บรรจุถาดและหุ้มฟิล์ม

ตัวชี้วัด (KPIs)	ค่าน้ำหนัก (%)	คะแนนถ่วงน้ำหนัก
MTTR	40	35.00
Frequency of Breakdown	30	29.15
Breakdown Time	20	19.78
MTBF	10	16.07

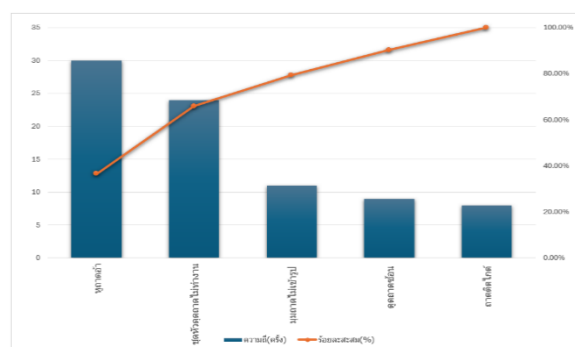
3.1.3 การวิเคราะห์ปัญหาและพฤติกรรมความเสียหาย

เพื่อให้การปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันเป็นไปอย่างตรงจุดและครอบคลุม จึงได้มีการวิเคราะห์จำแนกข้อมูลความขัดข้องของเครื่องบรรจุถาดและหุ้มฟิล์มตามกลุ่มระบบการทำงานดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 สถิติความถี่และร้อยละความขัดข้อง จำแนกตามกลุ่มระบบเครื่องบรรจุถาดและหุ้มฟิล์ม

กลุ่มระบบเครื่องจักร	ความถี่ (ครั้ง)	ร้อยละ (%)
ระบบจัดการขึ้นรูปถาด	82	65.60
ระบบจัดการฟิล์มและห่อหุ้ม	25	20.00
ระบบสายพานลำเลียง	18	14.40
ยอดรวม	125	100.00

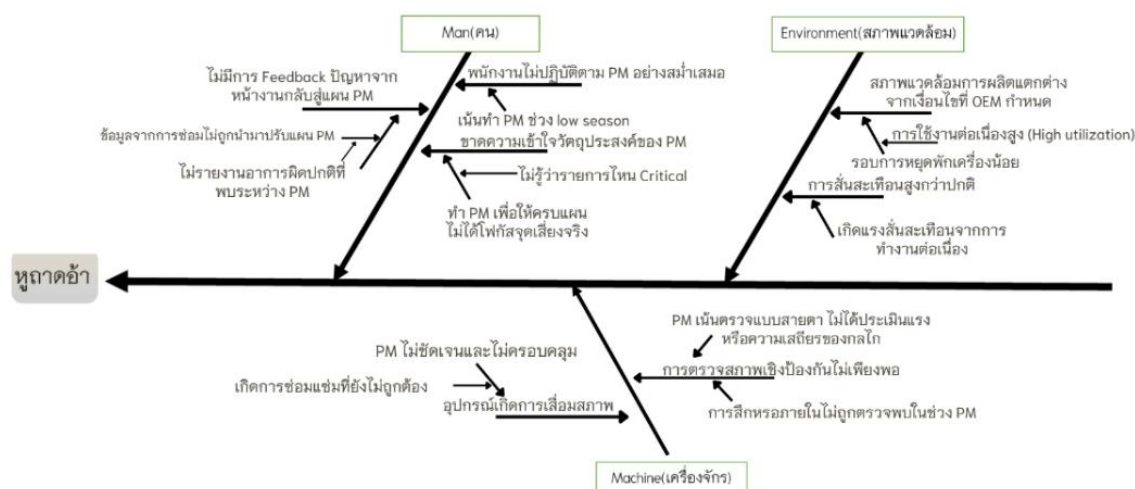
เมื่อดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลความขัดข้องของเครื่องบรรจุถาดและหุ้มฟิล์มกลุ่มระบบจัดการขึ้นรูปถาด พบว่า ความสูญเสียหลักเกิดจากปัญหาหูด้าซึ่งมีความถี่ในการเกิดสูงสุดถึง 30 ครั้ง (เฉลี่ย 2.50 ครั้งต่อเดือน) ดังนั้นจึงพิจารณาเลือกอาการขัดข้องดังกล่าวเป็นกรณีศึกษาหลักในการวิเคราะห์สาเหตุรากเหง้า ระบุปัจจัยที่ส่งผลต่อปัญหาหูด้า โดยเพิ่มการประยุกต์ใช้ผังแสดงเหตุและผล (Fishbone Diagram) ดังรูปที่ 4 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงปัจจัยเชิงคุณภาพที่ก่อให้เกิดความขัดข้อง ได้แก่ ความไม่สอดคล้องกันระหว่างระบบพับถาดและระบบฉีดกาวจากกลไกตามรอบการทำงาน



รูปที่ 3 แผนภูมิพาเรโตแสดงสัดส่วนอาการของปัญหา ที่พบในเครื่องบรรจุถาดและหุ้มฟิล์ม

อย่างไรก็ตาม เพื่อก้าวข้ามข้อจำกัดของการวิเคราะห์เชิงคุณภาพที่อาศัยเพียงประสบการณ์ จึงได้ดำเนินการวิเคราะห์เชิงปริมาณ โดยนำข้อมูลชั่วโมงการทำงานก่อนเสียหาย (TTF) มาทดสอบด้วยการแจกแจงแบบไวบูลล์ (Weibull Distribution Analysis) จากอาการหูด้าซึ่งเป็นสาเหตุหลักจำนวน 30 เหตุการณ์ ผ่านการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Minitab โดยเลือกใช้วิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์แบบภาวะน่าจะเป็นสูงสุด ดังรูปที่ 5 เพื่อยืนยันพฤติกรรมความเสียหายทางวิศวกรรม (Failure Mode) อย่างเป็นรูปธรรมดังสมการที่ 3

บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 4 การวิเคราะห์ด้วยแผนผังแสดงเหตุและผล

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right] \quad (3)$$

เมื่อ

$f(t)$ คือ ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น
ของการเสียหาย ณ เวลา t

t คือ เวลาการทำงานก่อนเสียหาย

β คือ ค่าพารามิเตอร์รูปร่าง ที่บ่งชี้ลักษณะ และพฤติกรรมการเสียหาย

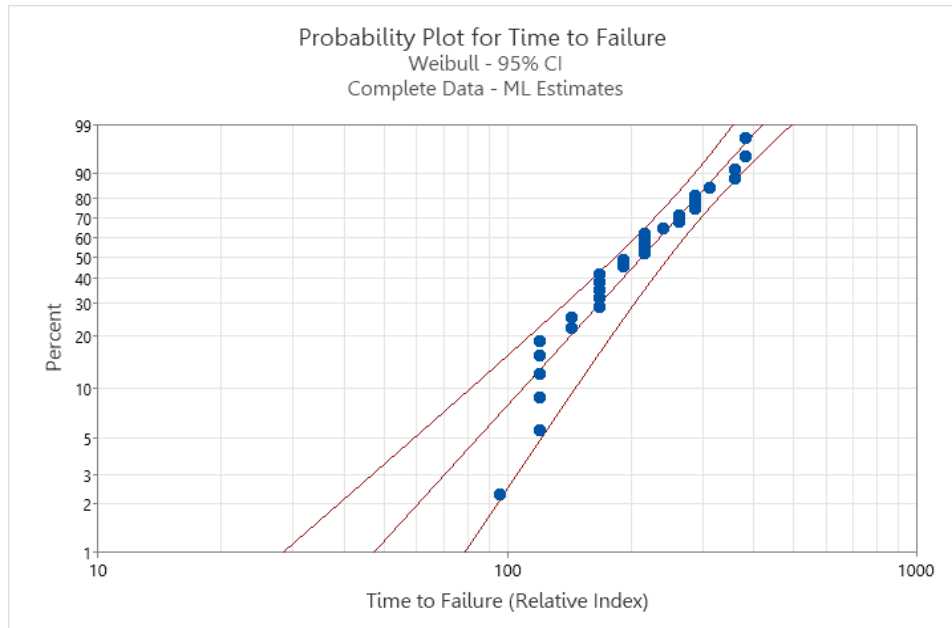
๗ คือ ค่าพารามิเตอร์มาตรฐาน หรือ
อายุขัยลักษณะโดยเป็นรูปแบบดัชนีฐาน

จากผลการวิเคราะห์การแจกแจงแบบไวบูลล์พบว่าค่าพารามิเตอร์รูปร่าง (β) มีค่าเท่ากับ 2.79 โดยมีช่วงความเชื่อมั่น 95% (CI: [2.125, 3.679]) ซึ่งขอบล่างของช่วงความเชื่อมั่นมีค่ามากกว่า 1 อย่างมีนัยสำคัญ ผลลัพธ์นี้เป็นเครื่องยืนยันทางวิศวกรรมความน่าเชื่อถือว่า พฤติกรรมการเสียหายของชุดพัดตมมีลักษณะเป็น การสึกหรอตามอายุการใช้งาน

(Wear-Out Failure) โดยมีค่าอายุขัยลักษณะ (η) เพื่อใช้เป็นตัวชี้ฐาน (Baseline Index) สำหรับประเมินอายุการใช้งานที่เครื่องจักรส่วนใหญ่จะเกิดความเสียหาย ข้อมูลเชิงลึกนี้ช่วยเปลี่ยนการบำรุงรักษาจากการคาดเดาหรือทำตามคู่มือมาตรฐานมาเป็นการกำหนดรอบ PM ที่มีหลักการวิศวกรรมความน่าเชื่อถือรองรับ ทำให้แผนงานสอดคล้องกับสภาพการเสื่อมสภาพจริงและป้องกันปัญหาซ้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อมูลเชิงสถิตินี้ช่วยปฏิเสธสมมติฐานการเสียหายแบบสุ่ม (Random Failure) และชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ปัญหาไม่ได้เกิดจากความผิดพลาดในการเดินเครื่อง แต่เกิดจากรอบการบำรุงรักษาเดิมที่ไม่สัมพันธ์กับการสึกหรอจริง ดังนั้น การนำแนวคิดการบำรุงรักษาทีละผลที่ทุกคนมีส่วนร่วม (TPM) เข้ามาบูรณาการเพื่อสร้างแผนการบำรุงรักษาเชิงรุก และกำหนดรอบการตรวจสอบให้สั้นกว่าขีดจำกัดความเสียหายที่วิเคราะห์ได้ จึงเป็นกลยุทธ์ทางวิศวกรรมที่จำเป็นที่สุดในการป้องกันการเกิดปัญหาซ้ำและเพิ่มความเสถียรของระบบอย่างยั่งยืน

บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 5 กราฟการแจกแจงแบบไวบูลล์ (Weibull Distribution)

3.2 การพัฒนาและประยุกต์ใช้แผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

ผลการพิสูจน์พฤติกรรมความเสียหายแบบสึกหรอ (Wear-Out Failure) จากการวิเคราะห์เชิงปริมาณ นำมาสู่การกำหนดกรอบแนวคิดในการปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (PM) โดยมุ่งเน้นการบูรณาการข้อมูลความน่าเชื่อถือทางสถิติร่วมกับหลักการบำรุงรักษาที่ทุกคนมีส่วนร่วม (TPM) เพื่อยกระดับมาตรการทางวิศวกรรมให้สามารถแก้ไขปัญหาความเสื่อมสภาพของกลไกได้อย่างเป็นระบบ และสอดคล้องกับสถานะการใช้งานจริง

3.2.1 การประเมินข้อจำกัดของแผนการบำรุงรักษาเดิม

การทบทวนแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันรูปแบบเดิมพบว่าระบบเดิมอาศัยการกำหนดรอบเวลาตามมาตรฐานคู่มือผู้ผลิตซึ่งมีข้อจำกัดสำคัญคือ ไม่สอดคล้องกับภาระงาน และสภาพแวดล้อมการผลิตจริง นอกจากนี้ ยังขาดการนำข้อมูลความน่าเชื่อถือ

ทางสถิติ เช่น ค่าเวลาเฉลี่ยในการซ่อม (MTTR) และความถี่การชำรุด มาปรับปรุงรอบการบำรุงรักษา ส่งผลให้ขึ้นส่วนเกิดการสึกหรอก่อนถึงรอบการตรวจสอบ ดังรายละเอียดข้อจำกัดที่สรุปไว้ในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ตารางสรุปข้อจำกัดที่พบจากแผน PM เดิมของเครื่องบรรจุถาดและหุ้มฟิล์ม

ข้อจำกัดของแผน PM เดิม	รายละเอียดข้อจำกัด
ความถี่ การตรวจสอบไม่เหมาะสม	ใช้ความถี่ตามคู่มือผู้ผลิต แต่ไม่สอดคล้องกับภาระและรอบการผลิตจริงทำให้เกิดอาการสึกหรอเร็วกว่ารอบ PM

บทความวิจัย (Research Article)

ตารางที่ 5 ตารางสรุปข้อจำกัดที่พบจากแผน PM เดิมของเครื่องบรรจุภัณฑ์และหุ้มฟิล์ม (ต่อ)

ข้อจำกัดของแผน PM เดิม	รายละเอียดข้อจำกัด
การใช้ข้อมูลจากการบันทึกไม่เต็มประสิทธิภาพ	บันทึกข้อมูลซ่อมบำรุงไม่สมบูรณ์ ไม่ได้นำ MTTR หรือแนวโน้มการเสียมาใช้ปรับรอบ PM ทำให้แผนไม่เหมาะสม
ไม่สอดคล้องกับสภาพการผลิตจริง	คู่มือของผู้ผลิตไม่รองรับสภาพแวดล้อมการผลิตจริง เช่น สภาพแวดล้อม การสั่นสะเทือน และการใช้งานที่ต่อเนื่องสูง

3.2.2 การพัฒนารอบการบำรุงรักษาเชิงป้องกันรูปแบบใหม่

พัฒนาแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (PM) รูปแบบใหม่โดยบูรณาการร่วมกับแนวคิด TPM ภายใต้แนวทางเชิงระบบ โดยการนำสาเหตุรากเหง้า (Root Cause) จากการวิเคราะห์ด้วยผังก้างปลาและรูปแบบความเสียหาย (Failure Mode) เพื่อกำหนดจุดตรวจสอบเฉพาะ ควบคู่กับการนำข้อมูลเชิงสถิติจากการบันทึกซ่อมบำรุง ได้แก่ ค่า MTTR ความถี่ของการเกิดปัญหา ระยะเวลาเครื่องจักรหยุดทำงาน (Breakdown Time) และค่า MTBF มาวิเคราะห์เพื่อกำหนดรอบเวลาที่เหมาะสม จากนั้นจึงดำเนินการปรับปรุงรายการตรวจสอบให้ครอบคลุมจุดเสี่ยงหลักที่มีผลต่อความเสถียรของชุดผลิต โดยปรับเปลี่ยนรูปแบบการบำรุงรักษาที่ช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถจัดลำดับความสำคัญก่อนและหลังในการเข้าตรวจสอบหรือซ่อมบำรุงขึ้นส่วนได้อย่างตรงจุด ซึ่งช่วยลดภาระการสุ่มตรวจ เพิ่มมาตรฐานวิธีการ

ตรวจสอบและความแม่นยำในการวัดค่าความสึกหรอและลดความแปรผันของผู้ปฏิบัติงาน นอกจากนี้ได้มีการประยุกต์ใช้ TPM เพื่อกำหนดบทบาทและแบ่งแยกขอบเขตงานซ่อมบำรุงเชิงเทคนิคให้มีความชัดเจนยิ่งขึ้น โดยมีการกำหนดบทบาทหน้าที่และขอบเขตการทำงานอย่างชัดเจน กล่าวคือ พนักงานคุมเครื่องจักรหน้างานจะมีบทบาทสำคัญในการตรวจสอบสภาพเบื้องต้นด้วยสายตา (Visual Inspection) และรายงานความผิดปกติของกลไกตามจุดเสี่ยง เพื่อส่งข้อมูลป้อนกลับ (Feedback) ให้กับทีมซ่อมบำรุงอย่างทันท่วงที ในขณะที่ช่างซ่อมบำรุงจะรับผิดชอบการเข้าตรวจสอบตามระยะเวลาที่กำหนดภายในตัวรายการตรวจสอบแต่ละระดับโดยแยกประเภทงานแต่ละงานเพื่อค้นหาจุดผิดปกติก่อนที่จะเกิดความเสียหายและเปลี่ยนชิ้นส่วนเชิงเทคนิคตามระยะเวลาเพื่อเพิ่มสภาพคล่องในการทำงานโดยระบบการเดินเครื่องสามารถกลับมาเดินได้ปกติอีกครั้งโดยไม่มีการหยุดชะงักในระหว่างการทำงาน ผลลัพธ์จากการบูรณาการกระบวนการดังกล่าวนำไปสู่การจัดทำมาตรฐานการปฏิบัติงานและ PM Checklist ฉบับปรับปรุงดังรูปที่ 6 ซึ่งอ้างอิงจากข้อมูลการใช้งานจริงและพร้อมสำหรับการประเมินผลสัมฤทธิ์ในลำดับถัดไป

4. ผลการวิจัย

4.1 ผลการเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดความน่าเชื่อถือของเครื่องจักร

ภายหลังจากการนำกรอบแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่ขับเคลื่อนด้วยข้อมูลไปประยุกต์ใช้กับเครื่องบรรจุภัณฑ์และหุ้มฟิล์มเป็นระยะเวลา 4 เดือน เพื่อติดตามและเก็บรวบรวมข้อมูลทำการประเมินผลสัมฤทธิ์โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลก่อนการปรับปรุงระยะเวลา 12 เดือน ทั้งนี้ เนื่องจากข้อมูลเวลาการ

บทความวิจัย (Research Article)

ปฏิบัติงานและรายละเอียดความสูญเสียเชิงประจักษ์ของเครื่องจักร เป็นข้อมูลความลับทางธุรกิจของบริษัทกรณีศึกษาซึ่งมีข้อจำกัดในการเผยแพร่สู่สาธารณะ ทางผู้วิจัยจึงได้รับอนุญาตให้นำเสนอผลการเปรียบเทียบตัวชี้วัดประสิทธิภาพ ได้แก่ MTBF, MTTR, Breakdown Time และ Failure Frequency ในรูปแบบดัชนีฐานสัมพัทธ์และร้อยละการ

เปลี่ยนแปลงแทนการใช้ตัวเลขเวลาจริง โดยกำหนดให้ดัชนีช่วงก่อนปรับปรุงมีค่าฐานเท่ากับ 100 ซึ่งการแปลงข้อมูลดังกล่าวใช้เพื่อการนำเสนอสัดส่วนการพัฒนาเชิงเปรียบเทียบ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของการทดสอบสมมติฐานทางสถิติแต่อย่างใด ดังแสดงผลในตารางที่ 6

Checksheet การบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive maintenance)																									
Department			Production Line No.				PM Interval				Weekly Check														
ITEM		วิธีการตรวจสอบ	ความถี่	ช่วงเวลาการตรวจสอบ				สถานะ	วันเดือนปี :																
				ก่อนการผลิต	ระหว่างผลิต	หลังการผลิต	CIP		กุมภาพันธ์				มีนาคม				พฤษภาคม				ธันวาคม				หมายเหตุ
	Traypacker Machine		สัปดาห์						W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	W4	W5	W1	W2	W3	W4	W1	W2	W3	
1	ปรับค่าลมหัวดูด	ปรับค่าตามมาตรฐานหน้าเครื่องตามค่าSet point	4	-	/	-	-	ปกติ ไม่ปกติ																	
	ตรวจสอบก่อนBlower Shink turner	แรงดันลมต้องไม่เกิน 10% - 15% จากค่าSet pointและคอยสังเกตลักษณะความผิดปกติต่างๆ	15	/	-	/	-	ปกติ ไม่ปกติ																	
2	ตรวจสอบ Roller	ใช้ด้อยัดหัวไม่เกิน 1.5% - 2% จะพอสหัวหรืออยู่ที่ประมาณ 2% - 3% ของระยะห่างระหว่างศูนย์กลางเฟือง	11	-	-	/	-	ปกติ ไม่ปกติ																	
	ปรับ Spacer	ปรับตามค่ามาตรฐานเครื่องจักร	5	/	-	/	-	ปกติ ไม่ปกติ																	
3	ปรับค่าลมหัวดูด	ตรวจสอบมาตรฐานตาม SOP กำหนด	8	/	/	/	-	ปกติ ไม่ปกติ																	
5	ปรับ Timing Separator	ตรวจสอบมาตรฐานตาม SOP กำหนด	11	-	-	/	-	ปกติ ไม่ปกติ																	
	ปรับพาวเวอร์ Separator	ตรวจสอบมาตรฐานตาม SOP กำหนด	5	-	-	/	-	ปกติ ไม่ปกติ																	
6	ปรับค่าพาวเวอร์หัวไป	ตรวจสอบมาตรฐานตาม SOP กำหนด	5	/	-	/	-	ปกติ ไม่ปกติ																	
	ปรับความเร็ว Folding	ตรวจสอบมาตรฐานตาม SOP กำหนด	3	/	/	/	-	ปกติ ไม่ปกติ																	
	ปรับตำแหน่งโซ่ Folding	ตรวจสอบมาตรฐานตาม SOP กำหนด	3	/	-	/	-	ปกติ ไม่ปกติ																	

รูปที่ 6 แผนงาน PM Checklist ฉบับปรับปรุง

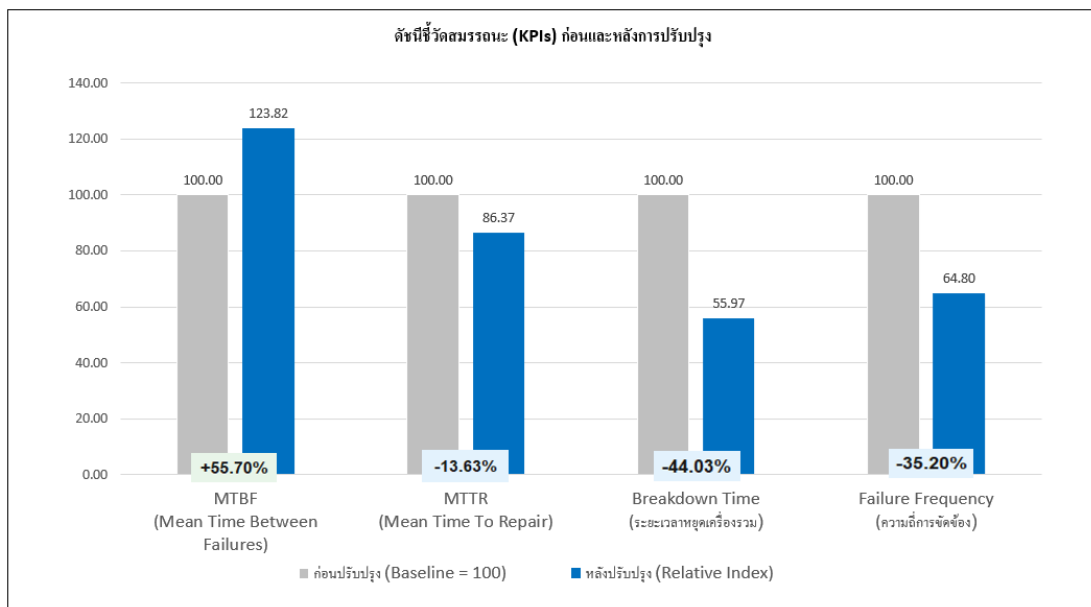
ตารางที่ 6 สรุปผลการเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดสมรรถนะก่อนและหลังการปรับปรุง

ตัวชี้วัด (KPIs)	ก่อนปรับปรุง (ดัชนีฐาน)	หลังปรับปรุง (ดัชนีสัมพัทธ์)	ผลต่าง (ร้อยละ)	P-Value
MTBF	100.0	123.82	+55.70%	0.037
MTTR	100.0	86.37	-13.63%	0.019
BreakdownTime	100.0	55.97	-44.03%	0.021
Failure Frequency	100.0	64.80	-35.20%	0.014

บทความวิจัย (Research Article)

ผลจากตารางที่ 5 พบว่า แผนการบำรุงรักษาแบบใหม่ส่งผลให้ประสิทธิภาพของเครื่องจักรดีขึ้นในทุกมิติ โดยระยะเวลาการหยุดเครื่องรวม (Breakdown Time) ลดลงร้อยละ 44.03 ในขณะที่ความสามารถในการซ่อมบำรุง (Maintainability) ปรับตัวดีขึ้น โดยค่าเวลาเฉลี่ยในการซ่อม (MTTR) ลดลงร้อยละ 13.63 ความถี่การเกิดเหตุขัดข้อง (Failure Frequency) ลดลงร้อยละ 35.20 และค่าเวลาเฉลี่ยระหว่างการเสีย (MTBF) เพิ่มขึ้นร้อยละ 55.70 ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงเสถียรภาพของเครื่องจักรที่สูงขึ้น

เพื่อให้เห็นภาพการเปลี่ยนแปลงของดัชนีชี้วัดสมรรถนะได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบค่า KPIs ทั้ง 4 ตัวชี้วัดได้แก่ MTBF, MTTR, Breakdown Time และ Failure Frequency ในรูปแบบกราฟแท่งเปรียบเทียบ (Grouped Bar Chart) โดยใช้ดัชนีฐานก่อนปรับปรุงเป็น 100 เพื่อสะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพของกรอบแนวคิดที่บูรณาการการวิเคราะห์ไวบูลล์ร่วมกับหลักการ TPM อย่างเป็นรูปธรรม



รูปที่ 7 กราฟเปรียบเทียบดัชนีชี้วัดสมรรถนะ (KPIs) ก่อนและหลังการปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน

ผลการปรับปรุงแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันส่งผลเชิงบวกต่อดัชนีชี้วัดสมรรถนะทุกมิติอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่า Breakdown Time ที่ลดลงร้อยละ 44.03 เป็นผลจากการกำหนดรอบการตรวจสอบโดยอ้างอิงค่าอายุขัยลักษณะ (η) จากการวิเคราะห์ไวบูลล์ ทำให้สามารถเปลี่ยนชิ้นส่วนก่อนเกิดความ

เสียหายได้ทันเวลา ค่า Failure Frequency ที่ลดลงร้อยละ 35.20 เป็นผลจากการแบ่งบทบาทหน้าที่ตามหลักการ TPM ที่ทำให้ตรวจพบความผิดปกติได้ตั้งแต่ระยะเริ่มต้น ค่า MTTR ที่ลดลงร้อยละ 13.63 เกิดจาก PM Checklist ที่ระบุลำดับการตรวจสอบอย่างชัดเจน ช่วยลดเวลาวินิจฉัยปัญหา และค่า MTBF ที่

บทความวิจัย (Research Article)

เพิ่มขึ้นร้อยละ 55.70 สะท้อนให้เห็นว่าการบูรณาการ การวิเคราะห์ไวบูลล์ร่วมกับหลักการ TPM ปรับปรุง แผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันสามารถยกระดับ เสถียรภาพของเครื่องจักรได้อย่างเป็นรูปธรรม

4.2 การทดสอบสมมติฐานทางสถิติ

เพื่อยืนยันนัยสำคัญของผลลัพธ์ได้ทำการทดสอบ สมมติฐานทางสถิติ โดยเริ่มต้นจากการตรวจสอบการ แจกแจงของข้อมูลด้วยวิธี Shapiro-Wilk พบว่าข้อมูล มีการแจกแจงแบบปกติ จึงเลือกใช้สถิติทดสอบการ เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยแบบ 2 กลุ่มอิสระ (Two-Sample T-Test) ผลการทดสอบพบว่า ค่า P-Value ของการเปรียบเทียบ MTBF MTTR Failure Frequency และ Breakdown Time มีค่าน้อยกว่า ระดับนัยสำคัญที่กำหนด ($p < 0.05$) จึงปฏิเสธ สมมติฐานหลัก (H_0) สรุปได้ว่าแผนการบำรุงรักษาเชิง ป้องกันรูปแบบใหม่สามารถยกระดับความน่าเชื่อถือ ของเครื่องจักรได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

5. อภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีส่วนช่วยเชื่อมโยงว่างระหว่างแนวทางการบำรุงรักษาแบบกำหนดรอบเวลา (Time-Based Maintenance) กับการประยุกต์ใช้แบบจำลองความน่าเชื่อถือเชิงวิศวกรรมใน สภาพแวดล้อมอุตสาหกรรมจริง โดยแสดงให้เห็นว่า การกำหนดรอบการบำรุงรักษาบนพื้นฐานข้อมูลความเสียหายจริงสามารถยกระดับสมรรถนะเครื่องจักรได้ อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อนำผลการศึกษามาพิจารณา เปรียบเทียบในประเด็น ความสอดคล้อง (Similarity) กับทฤษฎีสากล พบว่าผลลัพธ์นี้สนับสนุนหลักการ วิศวกรรมความน่าเชื่อถือของ Elsayed [11] ที่ชี้ให้เห็นว่าการลดลงของอัตราการเสีย (λ) เป็นตัว บ่งชี้พื้นฐานของการเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบ

นอกจากนี้ การลดลงของ MTTR อย่างมีนัยสำคัญยัง สอดคล้องกับแนวคิดของ Ebeling [12] ที่ระบุว่าค่า ความพร้อมใช้งาน (Availability) เป็นตัวชี้วัดที่ต้อง อาศัยการจัดการเชิงระบบทั้งด้านการลดความถี่การ เสียและการควบคุมเวลาซ่อมควบคู่กัน การประยุกต์ใช้ TPM ตามหลักการของ Nakajima [5] จึงเป็นกลไก สำคัญที่ทำให้สมรรถนะทั้งสองด้านดีขึ้นพร้อมกัน

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาในประเด็นความ แตกต่าง (Difference) จากแนวทางดั้งเดิม พบว่าการ ทำ PM ทั่วไปมักอาศัยเพียงดุลยพินิจและคู่มือผู้ผลิต ซึ่งไม่สะท้อนภาระงานจริง แต่การศึกษานี้มีความโดดเด่นตั้งแต่การใช้เทคนิคคะแนนถ่วงน้ำหนัก (Weight Score Method) ตามแนวทางของ Jardine and Tsang [6] เพื่อระบุเครื่องจักรคอขวดอย่างเป็น รูปธรรม ทำให้การปรับปรุงแผนที่อิงจากข้อมูล วิศวกรรมหน้างานมีความแม่นยำกว่า ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Budimir et al. [8] หรือ อ้างอิงต่างประเทศอื่นๆ ที่มักเน้นการจำลอง สถานการณ์ (Simulation) [9] งานวิจัยนี้แตกต่าง อย่างชัดเจนด้วยการพิสูจน์ความถูกต้องของ แบบจำลองความน่าเชื่อถือ (Weibull Analysis) ผ่าน ข้อมูลการเสียหายจริง (Field Data) ในระดับ อุตสาหกรรม

แม้ระยะเวลาการติดตามผลหลังการปรับปรุงจะ อยู่ที่ 4 เดือน ซึ่งสั้นกว่าช่วงก่อนการปรับปรุง แต่ ช่วงเวลาดังกล่าวครอบคลุมรอบการผลิตปกติหลาย รอบ (Complete Production Cycles) โดยได้มีการ ใช้การทดสอบการแจกแจงแบบปกติด้วยวิธี Shapiro-Wilk และการทดสอบสมมติฐานเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย ดัชนีชี้วัดสมรรถนะระหว่างก่อนและหลังการปรับปรุง ด้วยสถิติ Two-Sample T-Test ผ่านโปรแกรม Minitab ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ($p < 0.05$) ตามที่ระบุในตารางที่ 5 เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของ ผลลัพธ์ และดำเนินการภายใต้สภาวะการผลิตที่ไม่มี

บทความวิจัย (Research Article)

ปัจจัยแทรกซ้อนพิเศษ จึงสามารถสะท้อนพฤติกรรมการทำงานจริงของเครื่องจักรได้อย่างเหมาะสม

6. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการยกระดับประสิทธิภาพการบำรุงรักษาเครื่องบรรจุกระป๋องลงกรดและหุ้มฟิล์ม โดยการเปลี่ยนผ่านจากการบำรุงรักษาแบบกำหนดรอบเวลาตามคู่มือ ไปสู่การบำรุงรักษาเชิงป้องกันที่ขับเคลื่อนด้วยข้อมูลด้วยเทคนิคคะแนนถ่วงน้ำหนัก (Weight Score Method) และการประยุกต์ใช้การแจกแจงแบบไวบูลล์ช่วยให้ค้นพบพฤติกรรมการเสียหายที่แท้จริง และเมื่อบูรณาการร่วมกับหลักการ TPM ส่งผลให้เครื่องจักรมีค่า MTBF เพิ่มขึ้นร้อยละ 55.70 ค่า MTTR ลดลงร้อยละ 13.63 ความถี่การเกิดเหตุขัดข้อง (Failure Frequency) ลดลงร้อยละ 35.20 และลดระยะเวลาการหยุดเครื่องรวม (Breakdown Time) ได้ถึงร้อยละ 44.03 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) กรอบแนวคิดเชิงวิศวกรรมที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ไม่เพียงแต่แก้ปัญหาของกรณีศึกษาได้อย่างเป็นรูปธรรมแต่ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแบบจำลองมาตรฐาน อย่างไรก็ตาม การศึกษานี้เป็นกรณีศึกษาเครื่องจักรเพียงหนึ่งประเภท และระยะเวลาการติดตามผลหลังการปรับปรุงยังอยู่ในช่วงระยะสั้น ดังนั้นการศึกษาต่อเนื่องในระยะยาวและการประยุกต์ใช้กับเครื่องจักรประเภทอื่น จะช่วยยืนยันความยั่งยืนและความสามารถในการประยุกต์ใช้ของแนวทางที่เสนอได้ดียิ่งขึ้น

7. ข้อเสนอแนะ

1. ควรติดตามข้อมูล MTBF, MTTR, Breakdown Time และ Frequency อย่างต่อเนื่อง เพื่อประเมินความเสถียรของเครื่องจักรหลังการปรับปรุง

2. ควรมีการอบรมทีมซ่อมบำรุงในการใช้ข้อมูลในการบันทึกและแผนการบำรุงรักษา ให้เต็มประสิทธิภาพ เพื่อสร้างฐานข้อมูลสนับสนุนการวางแผน PM แบบยั่งยืน

3. ควรนำกรอบแนวคิดที่พัฒนาขึ้นไปทดสอบกับเครื่องจักรประเภทอื่นในสายการผลิต เช่น เครื่องปิดฝากระป๋องหรือเครื่องพาสเจอร์ไรส์ เพื่อยืนยันความสามารถในการประยุกต์ใช้ในวงกว้างและรองรับการขยายผลในระดับอุตสาหกรรม

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบริษัทกรณีศึกษาที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการเข้าศึกษาพื้นที่หน่วยงานจริง สนับสนุนข้อมูลประวัติการซ่อมบำรุง ตลอดจนให้ความร่วมมือในการนำแผนการบำรุงรักษาเชิงป้องกันรูปแบบใหม่ไปทดลองปฏิบัติจริง ทั้งนี้ ข้อมูลตัวเลขสมรรถนะการผลิตจริงของบริษัทถือเป็นความลับทางธุรกิจ ผู้วิจัยจึงได้รับอนุญาตให้ใช้และเผยแพร่ข้อมูลในรูปแบบของดัชนีฐานสัมพัทธ์ (Relative Baseline Index) เพื่อประโยชน์ในเชิงวิชาการเท่านั้น

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] C. P. Au-Yong, N. F. Azmi, and N. E. Myeda, "Promoting employee participation in operation and maintenance of green office building by adopting the total productive maintenance (TPM) concept," *Journal of Cleaner Production*, vol. 352, Art. no. 131608, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131608.

บทความวิจัย (Research Article)

- [2] L. Lu, A. M. d'Avigneau, Y. Pan, Z. Sun, P. Luo, and I. Brilakis, "Modeling heterogeneous spatiotemporal pavement data for condition prediction and preventive maintenance in digital twin-enabled highway management," *Automation in Construction*, vol. 174, Art. no. 106134, 2025, doi: 10.1016/j.autcon.2025.106134.
- [3] ประจวบ กล่อมจิตร, *การออกแบบโรงงานอุตสาหกรรม: เพื่อเพิ่มผลผลิตและความปลอดภัย*, กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น, 2555.
- [4] สมชาย เปரியพรม, สุชาติ อารังสุข, และวรรณภรณ์ อนันตเจริญโชติ, "การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตด้วยการวางแผนการบำรุงรักษา: กรณีศึกษาเครื่องจักรสายพานลำเลียงภายในห้องรับ-จ่ายวัตถุดิบ," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 31, ฉบับที่ 2, หน้า 201-215, 2564. doi: 10.14416/j.kmutnb.2020.12.014.
- [5] S. Nakajima, ed., *TPM Development Program: Implementing Total Productive Maintenance*. Cambridge, MA, USA: Productivity Press, 1989.
- [6] A. K. S. Jardine and A. H. C. Tsang, *Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2006, doi: 10.1201/9781420044614.
- [7] รัฐภูมิ วงษ์วิทย์, "การพัฒนาระบบการบำรุงรักษาด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์อาการขัดข้องและผลกระทบกรณีศึกษาโรงงานอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์คอนกรีต," *วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม*, ปีที่ 16, ฉบับที่ 3, หน้า 59–69, 2566.
- [8] D. Budimir, D. Medić, V. Ružić, and M. Kulej, "Integrated approach to marine engine maintenance optimization: Weibull analysis, Markov chains, and DEA model," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 13, no. 4, Art. no. 798, 2025, doi: 10.3390/jmse13040798.
- [9] S. Sudadiyo, "Monte Carlo-based reliability- and availability-centered maintenance for GAS multi-purpose reactor pumps: A case study of the PA01-AP03 pump," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 446, Art. no. 114584, 2026, doi: 10.1016/j.nucengdes.2025.114584.
- [10] P. Semotam, "A data-driven approach to reliability and fault analysis in industrial maintenance," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 58, no. 9, pp. 97–102, 2024, doi: 10.1016/j.ifacol.2024.07.378.
- [11] E. A. Elsayed, *Reliability Engineering*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2012.
- [12] C. Ebeling, *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*, 2nd ed. Long Grove, IL, USA: Waveland Press, 2010.
- [13] ดุษดี มุกดา, รสสุคนธ์ ทับพร, และ สุวัจน์ ภูเสถียรพันธ์, "การปรับปรุงประสิทธิภาพของกลุ่มรถบรรทุกโดยใช้เทคนิคการจัดตั้งระบบการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน," *วารสารวิชาการ*

บทความวิจัย (Research Article)

มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี, ปีที่ 13, ฉบับที่ 1,
หน้า 191-205, 2567.

- [14] D. C. Montgomery and G. C. Runger,
*Applied Statistics and Probability for
Engineers*, 7th ed. Hoboken, NJ, USA:
John Wiley & Sons, 2018.