การประชุมวิชาการระดับชาติด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ครั้งที่ 10
วันที่ 25-26 กุมภาพันธ์ 2569 ISBN: xxx – xxx – xxx – xxx – x

# การพัฒนาระบบสนับสนุนการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์

# DEVELOPMENT OF A PREDICTIVE MAINTENANCE SUPPORT SYSTEM FOR SOLAR POWER GENERATION SYSTEMS

ชัยวัฒน์ คงพันธุ์[1] เอกชัย เนาวนิช [2]
Chaiwat Kongphan[1], Ekachai Naowanich[2]

*[1] *คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ*
[2] *คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ*
* *167480322003-st@rmutsb.ac.th*

**บทคัดย่อ**

การใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานทดแทนมีการเติบโตอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้การบำรุงรักษาระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพและความคุ้มค่าของการลงทุน อย่างไรก็ตาม กระบวนการบำรุงรักษาแบบดั้งเดิมทั้งเชิงแก้ไขและเชิงป้องกันยังคงมีข้อจำกัด ทั้งในด้านต้นทุน เวลา และความแม่นยำในการตรวจพบความผิดปกติล่วงหน้า งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) เพื่อพัฒนาระบบสนับสนุนการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ และ 2) เพื่อประเมินประสิทธิภาพและความพึงพอใจต่อระบบสนับสนุนการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ การพัฒนางานวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 การศึกษาและออกแบบระบบสนับสนุนบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ ขั้นตอนที่ 2 การพัฒนาระบบสนับสนุนบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ และขั้นตอนที่ 3 การประเมินประสิทธิภาพและประเมินความพึงพอใจของระบบสนับสนุนบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ โดยในการพัฒนาระบบได้นำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์มาร่วมในการวิเคราะห์ข้อมูลการบำรุงรักษาจากสถานีผลิตพลังงานแสงอาทิตย์จำนวน 20 แห่ง ข้อมูลย้อนหลัง 2 ปี จากปี พ.ศ.2567 ถึงปี พ.ศ.2568 เพื่อสร้างแบบจำลองที่สามารถประเมินแนวโน้มความเสื่อมสภาพของอุปกรณ์และตรวจจับความผิดปกติที่อาจเกิดขึ้นล่วงหน้าได้อย่างแม่นยำ และรายงานผลการบำรุงรักษาในรูปแบบของแดชบอร์ด ประเมินประสิทธิภาพของระบบสนับสนุนการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ โดยผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 ท่าน และประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน โดยกลุ่มตัวอย่าง คือพนักงานและผู้บริหารบริษัท พี.แอล.ซี. เทเลคอม จำกัด จำนวน 10 คน ด้วยวิธีการเลือกแบบเจาะจง ผลการวิจัยพบว่าระบบสนับสนุนการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพโดยรวมอยู่ในระดับดีมาก และผู้ใช้งานมีความพึงพอใจในระดับดีมากเช่นกัน

**คำสำคัญ:** การบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ พลังงานแสงอาทิตย์ ปัญญาประดิษฐ์

**ABSTRACT**

The increasing adoption of solar energy has highlighted the critical importance of maintaining solar power generation systems to ensure operational efficiency and investment effectiveness. However, traditional maintenance approaches, both corrective and preventive, still have limitations in terms of cost, time, and the accuracy of detecting early-stage abnormalities. This research aims to: 1) develop a predictive maintenance support system for solar power generation systems, and 2) evaluate the efficiency and user satisfaction of the developed system. The research was conducted in three stages: Stage 1 involved studying and designing the predictive maintenance support system; Stage 2 focused on developing the predictive maintenance support system; and Stage 3 consisted of evaluating the system's efficiency and user satisfaction. In developing the system, artificial intelligence technologies were applied to analyze maintenance data collected from 20 solar power stations over a two-year period from 2024 to 2025. This enabled the creation of predictive models capable of accurately assessing equipment degradation trends and detecting potential abnormalities in advance. The system presents its results through a dashboard for maintenance monitoring. The system efficiency was evaluated by five experts, while user satisfaction was assessed by a purposive sample of ten employees and executives from P.L.C. Telecom Co., Ltd. The results indicate that the development of a predictive maintenance support system for solar power generation systems demonstrates an overall efficiency at a very high level, and users also report a very high level of satisfaction.

**Keywords:** Predictive Maintenance, Solar Power System, Artificial Intelligence

## 1. บทนำ

ในสภาวการณ์ปัจจุบัน พลังงานแสงอาทิตย์ได้กลายเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่ทวีความสำคัญอย่างยิ่งในระดับโลก เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาดและมีบทบาทหลักในการช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของภาวะโลกร้อน (Mellit et al., 2020; Dhimish et al., 2018) การลงทุนในระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในรูปแบบของฟาร์มพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Farm) ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทั้งในภาคอุตสาหกรรมและระดับประเทศ (Serrano-Guerrero et al., 2021) ซึ่งประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ถือเป็นหัวใจสำคัญที่จะทำให้การลงทุนมีความคุ้มค่าและสามารถจ่ายพลังงานได้อย่างต่อเนื่อง (Ben-gzaiel et al., 2021) โดยทั่วไปแล้ว การทำงานที่ผิดปกติหรือการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์หลักในระบบ เช่น แผงโซลาร์เซลล์ อินเวอร์เตอร์ หรืออุปกรณ์เชื่อมต่อต่างๆ อาจส่งผลให้กำลังการผลิตพลังงานลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และหากความผิดปกติเหล่านี้ไม่ได้รับการแก้ไขอย่างทันท่วงที อาจนำไปสู่ความเสียหายที่รุนแรงและส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงสูงขึ้นกว่าปกติหลายเท่าตัว (Jordan et al., 2018) ดังนั้น การรักษาระบบให้ทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพสูงสุดตลอดเวลาจึงเป็นความท้าทายที่สำคัญยิ่งสำหรับผู้ดูแลระบบและนักลงทุนในธุรกิจพลังงาน

โดยปกติ กระบวนการบำรุงรักษาระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบันจะมีอยู่สองรูปแบบหลัก คือ การบำรุงรักษาเชิงแก้ไข (Corrective Maintenance) ซึ่งเป็นการซ่อมแซมเมื่ออุปกรณ์เกิดความเสียหายหรือหยุดทำงานไปแล้ว และการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) ซึ่งเป็นการบำรุงรักษาตามระยะเวลาที่กำหนดไว้ล่วงหน้า

(Gao et al., 2019; Chine et al., 2016) แม้ว่าการบำรุงรักษาเชิงป้องกันจะช่วยลดความเสี่ยงจากการหยุดทำงานกะทันหันได้ดีกว่าการรอให้เสียหาย แต่ก็ยังมีข้อจำกัดที่สำคัญเนื่องจากอาจเป็นการดำเนินการที่เร็วเกินความจำเป็น ทำให้เกิดความสิ้นเปลืองทรัพยากร แรงงาน และค่าใช้จ่ายโดยใช่เหตุ หรือในทางกลับกัน การบำรุงรักษาตามรอบเวลาอาจช้าเกินไปจนไม่สามารถป้องกันความล้มเหลวที่เกิดขึ้นอย่างกะทันหันในช่วงระหว่างรอบการตรวจเช็กได้ (Li et al., 2020; Zarmai et al., 2019) เพื่อแก้ไขข้อจำกัดที่เกิดขึ้นจากแนวทางการบำรุงรักษาแบบดั้งเดิม แนวคิด "การบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์" (Predictive Maintenance: PdM) จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมสมัยใหม่ โดยอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลการทำงานของอุปกรณ์จริงเพื่อคาดการณ์แนวโน้มความผิดปกติและวางแผนการบำรุงรักษาได้อย่างแม่นยำและทันท่วงทีตามสภาพจริงของอุปกรณ์ (Jardine et al., 2006; Kumar et al., 2022) ซึ่งแนวทางนี้ได้รับการยอมรับในระดับสากลว่าสามารถช่วยลดระยะเวลาที่ระบบหยุดทำงาน (Downtime) และลดต้นทุนการดำเนินงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด (Basit et al., 2021) เพื่อให้ระบบการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์มีความชาญฉลาดและแม่นยำยิ่งขึ้น เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) และการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning: ML) จึงถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือสำคัญในการวิเคราะห์ชุดข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data) ที่รวบรวมจากเซ็นเซอร์ต่างๆ ภายในระบบผลิตพลังงาน (Applasamy et al., 2021; Madeti & Singh, 2017) แบบจำลอง AI/ML เหล่านี้มีความสามารถพิเศษในการเรียนรู้รูปแบบความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนของข้อมูลพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น อุณหภูมิแผง แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และความเข้มแสง เพื่อตรวจจับสัญญาณความผิดปกติเพียงเล็กน้อยที่อาจไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยประสาทสัมผัสของมนุษย์ และสามารถพยากรณ์ความเสี่ยงที่อุปกรณ์จะเสียหายล่วงหน้าได้อย่างแม่นยำ (Abo-Khalil et al., 2020)

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อออกแบบและพัฒนาระบบสนับสนุนการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์อัจฉริยะสำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้เทคนิค AI และ Machine Learning ในการวิเคราะห์ข้อมูลการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (PM) จากสถานีผลิตพลังงานจริงจำนวน 20 แห่ง ย้อนหลัง 2 ปี จากปี พ.ศ.2567 ถึงปี พ.ศ.2568 เพื่อสร้างแบบจำลองการคาดการณ์ที่มีประสิทธิภาพและแม่นยำสูง ระบบที่พัฒนาขึ้นนี้ไม่ได้มุ่งเน้นเพียงแค่การวิเคราะห์เบื้องหลังเท่านั้น แต่ยังให้ความสำคัญกับการแสดงผลในรูปแบบแดชบอร์ดที่เข้าใจง่าย พร้อมทั้งมีระบบการแจ้งเตือนความผิดปกติที่รวดเร็ว ซึ่งจะช่วยให้ทีมบำรุงรักษาสามารถตัดสินใจได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำบนพื้นฐานของข้อมูล (Data-Driven Decision Making) อันจะนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน การลดต้นทุนการซ่อมบำรุงในระยะยาว และส่งเสริมความยั่งยืนของระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ในฐานะโครงสร้างพื้นฐานด้านพลังงานของประเทศต่อไป

## 2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนาระบบสนับสนุนการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ จำเป็นต้องอาศัยองค์ความรู้จากหลายสาขา ทั้งด้านระบบพลังงานแสงอาทิตย์ แนวคิดการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้ของเครื่อง รวมถึงทฤษฎีการยอมรับเทคโนโลยี งานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปสาระสำคัญได้ดังนี้

2.1 ระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์และความท้าทายด้านการบำรุงรักษา

ระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีบทบาทสำคัญในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและสนับสนุนความยั่งยืนด้านพลังงาน อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของระบบขึ้นอยู่กับสภาพการทำงานของอุปกรณ์หลัก เช่น แผงเซลล์แสงอาทิตย์ อินเวอร์เตอร์ และอุปกรณ์เชื่อมต่อ งานวิจัยหลายฉบับชี้ให้เห็นว่าความผิดปกติหรือการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์เพียงเล็กน้อยสามารถส่งผลให้กำลังการผลิตลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และเพิ่มต้นทุนการดำเนินงานในระยะยาว (Jordan et al., 2018; Mellit et al., 2020; Serrano-Guerrero et al., 2021)

2.2 แนวคิดการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ (Predictive Maintenance)

การบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์เป็นแนวทางที่พัฒนาขึ้นเพื่อลดข้อจำกัดของการบำรุงรักษาเชิงแก้ไขและเชิงป้องกัน โดยอาศัยการวิเคราะห์ข้อมูลการทำงานจริงของอุปกรณ์เพื่อพยากรณ์ความผิดปกติล่วงหน้า งานวิจัยยืนยันว่าแนวคิดนี้สามารถช่วยลดระยะเวลาการหยุดทำงานของระบบและลดต้นทุนการซ่อมแซมได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Jardine et al., 2006; Kumar et al., 2022; Basit et al., 2021)

2.3 การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้ของเครื่องในระบบพลังงานแสงอาทิตย์

ปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้ของเครื่องมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลจากเซ็นเซอร์ในระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์อย่างแพร่หลาย เพื่อสนับสนุนการตรวจจับความผิดปกติและการพยากรณ์ความล้มเหลวของอุปกรณ์ งานวิจัยของ Abo-Khalil et al. (2020) แสดงให้เห็นว่าโครงข่ายประสาทเทียมสามารถใช้ในการคาดการณ์ความผิดปกติของระบบได้อย่างแม่นยำ ขณะที่ Applasamy et al. (2021) และ Li et al. (2020) ชี้ให้เห็นว่า AI/ML มีประสิทธิภาพสูงในการวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่และตรวจจับสัญญาณความผิดปกติที่ซับซ้อน ซึ่งมนุษย์ไม่สามารถสังเกตได้โดยตรง

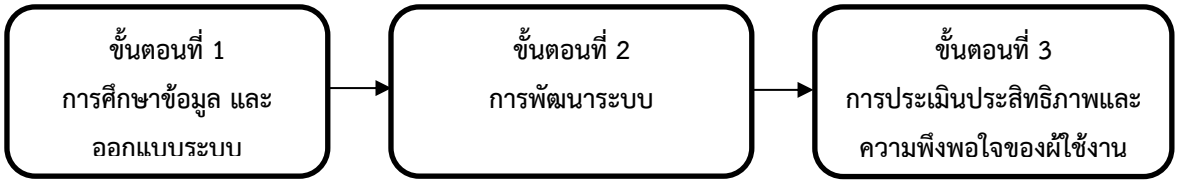
2.4 ระบบสนับสนุนการตัดสินใจและการยอมรับเทคโนโลยี

นอกจากประสิทธิภาพเชิงเทคนิคแล้ว ความสำเร็จของระบบสนับสนุนการบำรุงรักษายังขึ้นอยู่กับการยอมรับของผู้ใช้งาน งานวิจัยหลายฉบับได้นำแบบจำลองการยอมรับเทคโนโลยี (Technology Acceptance Model: TAM) มาใช้ในการอธิบายปัจจัยที่ส่งผลต่อการใช้งานระบบ โดยเฉพาะการรับรู้ถึงประโยชน์ (Perceived Usefulness) และความง่ายในการใช้งาน (Perceived Ease of Use) (Taherdoost, 2024) นอกจากนี้ แนวคิดการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และปัญญาประดิษฐ์ยังถูกมองว่าเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตัดสินใจในระบบบำรุงรักษาอัจฉริยะ (Li et al., 2023)

อย่างไรก็ตาม จากการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่างานวิจัยส่วนใหญ่ยังมุ่งเน้นการพัฒนาแบบจำลองหรืออัลกอริทึมเพื่อการพยากรณ์ความผิดปกติของอุปกรณ์เป็นหลัก และยังขาดการบูรณาการองค์ประกอบต่าง ๆ ให้เป็นระบบสนับสนุนการตัดสินใจที่ครอบคลุม ทั้งในด้านการวิเคราะห์ การแสดงผลข้อมูล และการประเมินการยอมรับของผู้ใช้งานในบริบทของระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์จริง ช่องว่างดังกล่าวจึงเป็นที่มาของการพัฒนาระบบสนับสนุนการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ในงานวิจัยนี้

## 3.วิธีดำเนินการวิจัย

การพัฒนางานวิจัยแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 การศึกษาและออกแบบระบบสนับสนุนบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ ขั้นตอนที่ 2 การพัฒนาระบบสนับสนุนบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ และขั้นตอนที่ 3 การประเมินประสิทธิภาพและประเมินความพึงพอใจของระบบสนับสนุนบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ ดังภาพที่ 1 โดยมีรายละเอียดและวิธีการวิจัย ดังนี้

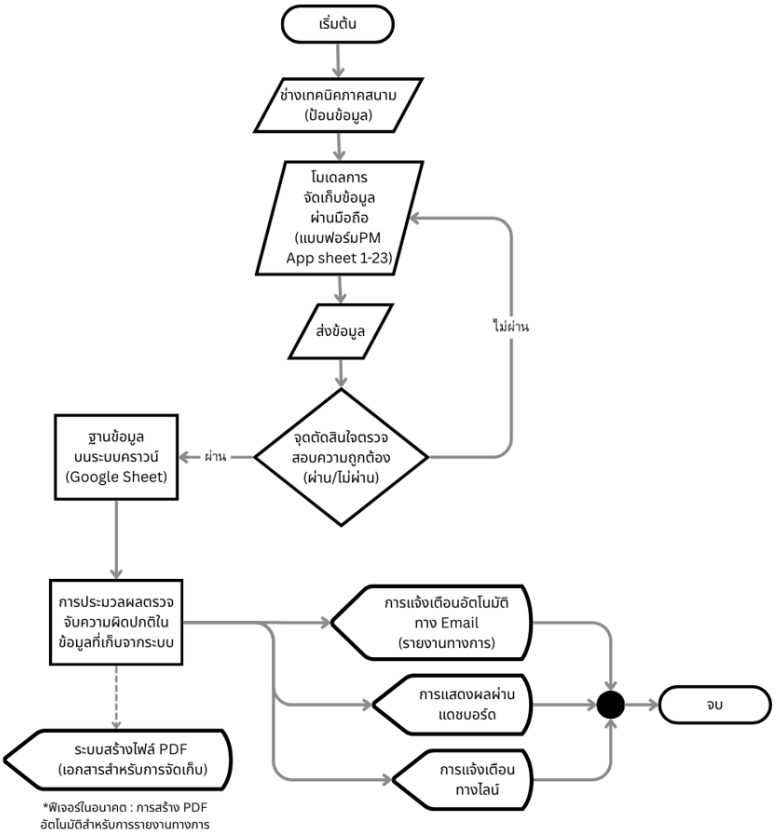


**ภาพที่ 1** ขั้นตอนการพัฒนางานวิจัย

**3.1 ขั้นตอนที่ 1 การศึกษาและออกแบบระบบสนับสนุนบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์** ผู้วิจัยได้ดำเนินการดังนี้

3.1.1 ศึกษาข้อมูลและวิเคราะห์ความต้องการของระบบ ได้แก่ แบบฟอร์มตรวจสอบเอกสารเพื่อรวบรวมและจัดหมวดหมู่ข้อมูลการบำรุงรักษาแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Panel) ข้อมูลการบำรุงรักษาแผงเซลล์แสงอาทิตย์เชิงป้องกันย้อนหลังจากสถานีจำนวน 20 แห่งย้อนหลัง 2 ปี จากปี พ.ศ. 2567 ถึงปี พ.ศ. 2568 และเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการบำรุงรักษาแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และใช้แบบฟอร์มสรุปงานวิจัยเพื่อสังเคราะห์ข้อมูลจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ การเรียนรู้ของเครื่อง (ML) และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์สำหรับการบำรุงรักษาระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ รวมถึงแบบจำลองการยอมรับเทคโนโลยี (TAM) และใช้ไมโครซอฟท์เอ็กเซลในการจัดข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการบำรุงรักษาระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งช่วยให้การศึกษาความต้องการของระบบเป็นไปอย่างเป็นระบบ

3.1.2 ออกแบบระบบสนับสนุนบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์: ผู้วิจัยนำข้อมูลที่ผ่านการวิเคราะห์มาออกแบบองค์ประกอบของระบบ ฐานข้อมูล และส่วนติดต่อผู้ใช้ (User Interface) ให้เหมาะสมกับกลุ่มผู้ใช้งาน โดยในส่วนของการประมวลผล ได้เน้นการออกแบบโดยใช้ เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning: ML) ประเภทการตรวจจับความผิดปกติ (Anomaly Detection) และการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) เพื่อเปรียบเทียบข้อมูลการทำงานจริงกับเกณฑ์ค่ามาตรฐาน ซึ่งจะช่วยให้ระบบสามารถประเมินแนวโน้มความเสื่อมสภาพของอุปกรณ์และพยากรณ์ความล้มเหลวที่อาจเกิดขึ้นล่วงหน้าได้อย่างแม่นยำ ดังภาพที่ 2




**ภาพที่ 2** โฟล์วชาร์ตขั้นตอนการทำงานของระบบสนับสนุนบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์

จากภาพที่ 2 ระบบเริ่มต้นจากการบันทึกข้อมูลการบำรุงรักษาโดยช่างเทคนิคภาคสนามผ่านแบบฟอร์มการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์บนแอปพลิเคชันมือถือ จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งเข้าสู่ระบบเพื่อทำการตรวจสอบความถูกต้อง หากข้อมูลไม่ครบถ้วนหรือไม่ถูกต้อง ระบบจะส่งกลับให้แก้ไขก่อนส่งใหม่อีกครั้ง เมื่อข้อมูลผ่านการตรวจสอบแล้วจะถูกจัดเก็บในฐานข้อมูลบนระบบคลาวด์เพื่อใช้เป็นแหล่งข้อมูลกลางสำหรับการประมวลผลและวิเคราะห์ความผิดปกติของระบบ ผลการวิเคราะห์จะถูกนำเสนอผ่านการแจ้งเตือนอัตโนมัติทางอีเมล การแสดงผลผ่านแดชบอร์ด และการแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์ เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจด้านการบำรุงรักษา นอกจากนี้ ระบบยังสามารถสร้างรายงานในรูปแบบไฟล์ PDF เพื่อใช้เป็นเอกสารประกอบการจัดเก็บและอ้างอิงในอนาคต ซึ่งกระบวนการทั้งหมดช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการข้อมูล ลดภาระงานบุคลากร และสนับสนุนการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ของระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์

**3.2 ขั้นตอนที่ 2 การพัฒนาระบบสนับสนุนบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์** ผู้วิจัยได้ดำเนินการดังนี้

ในขั้นตอนการพัฒนาระบบสนับสนุนการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ เริ่มต้นผู้วิจัยได้พัฒนาแอปพลิเคชันบนอุปกรณ์พกพาโดยใช้แพลตฟอร์ม Google AppSheet ตามที่ได้ออกแบบไว้ในขั้นตอนก่อนหน้านี้ เพื่อให้ช่างเทคนิคภาคสนามสามารถบันทึกข้อมูลการบำรุงรักษาและสภาพการทำงานของอุปกรณ์จากสถานีผลิตพลังงานไฟฟ้าแสงอาทิตย์ได้โดยตรง ข้อมูลที่บันทึกผ่านแอปพลิเคชันมือถือจะถูกส่งและจัดเก็บลงในฐานข้อมูลบนระบบคลาวด์โดยใช้ Google Sheet ซึ่งทำหน้าที่เป็นแหล่งข้อมูลกลางสำหรับการจัดการและประมวลผลข้อมูลการบำรุงรักษา

ข้อมูลที่ถูกจัดเก็บในระบบคลาวด์จะถูกนำมาแสดงผลในรูปแบบแดชบอร์ด เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถติดตามสถานะการทำงานของระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งในระดับภาพรวมและรายสถานีได้อย่างสะดวกและเป็นปัจจุบัน จากนั้นข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการประมวลผลและวิเคราะห์ความผิดปกติของระบบ โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) เพื่อเปรียบเทียบข้อมูลการทำงานจริงกับเกณฑ์ค่ามาตรฐานของระบบ ซึ่งช่วยในการตรวจจับความผิดปกติและสนับสนุนการพยากรณ์แนวโน้มการเสื่อมสภาพของอุปกรณ์

ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่องจะถูกนำไปใช้ในการสนับสนุนการตัดสินใจด้านการบำรุงรักษาและใช้เป็นข้อมูลสำหรับการแสดงผลและการแจ้งเตือนผ่านระบบแดชบอร์ดและช่องทางอื่น ๆ ซึ่งช่วยให้การบริหารจัดการการบำรุงรักษาระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับการใช้งานจริง

**3.3 ขั้นตอนที่ 3 การประเมินประสิทธิภาพและประเมินความพึงพอใจของระบบสนับสนุนบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์** ผู้วิจัยได้ดำเนินการดังนี้

3.3.1 ออกแบบและสร้างแบบสอบถามเพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบสนับสนุนบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์โดยผู้เชี่ยวชาญ และแบบสอบถามความพึงพอใจต่อการใช้งานระบบสนับสนุนบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์จากผู้ใช้งาน โดยแบบสอบถามมีลักษณะเป็นมาตราส่วนประมาณค่า (Rating Scale) ตามมาตรวัดของลิเคิร์ท (Likert Scale) มี 5 ระดับ และนำแบบสอบถามทั้ง 2 แบบสอบถามที่สร้างให้ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่านประเมินความตรงเชิงเนื้อหาด้วยดัชนีความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับวัตถุประสงค์ (Index of Item–Objective Congruence: IOC) ผลการประเมินทุกข้อคำถามจากแบบสอบถาม มีค่า IOC มากกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ( IOC >0.50) โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.92 และ 0.94 ตามลำดับ ซึ่งสะท้อนถึงความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับวัตถุประสงค์การวิจัย

3.3.2 นำระบบสนับสนุนบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนา ทดสอบ และเขียนคู่มือการใช้งานระบบเรียบร้อยแล้ว ให้ผู้เชี่ยวชาญใช้งานระบบและประเมินประสิทธิภาพของระบบ โดยกลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของระบบเป็นผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ จำนวน 5 ท่าน ด้วยวิธีการเลือกแบบเจาะจง

และนำระบบสนับสนุนบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ให้ผู้ใช้งานประเมินความพึงพอใจ โดยกลุ่มตัวอย่าง คือ พนักงานและผู้บริหารบริษัท พี.แอล.ซี.เทเลคอม จำกัด จำนวน 10 คน ด้วยวิธีการเลือกแบบเจาะจง เครื่องมือที่ใช้ ได้แก่ แบบประเมินประสิทธิภาพของการพัฒนาระบบสนับสนุนบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ และแบบประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ต่อการใช้งานระบบสนับสนุนบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์

3.3.3 นำข้อมูลที่ได้จากแบบประเมินประสิทธิภาพของการพัฒนาระบบสนับสนุนบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ และแบบประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ต่อการใช้งานระบบสนับสนุนบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ มาเก็บข้อมูลและคำนวณ โดยสถิติที่ใช้ในการวิจัยใช้สถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ($\overline{X}$) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) เกณฑ์ที่ใช้แปลความหมายคุณภาพแบ่งออกเป็น 5 ระดับโดยแบ่งระดับการแปลผลดังนี้

เกณฑ์การประเมิน (ประคอง กรรณสูต, 2542)

4.50 – 5.00 หมายถึง มากที่สุด

3.50 – 4.49 หมายถึง มาก

2.50 – 3.49 หมายถึง ปานกลาง

1.50 – 2.49 หมายถึง น้อย

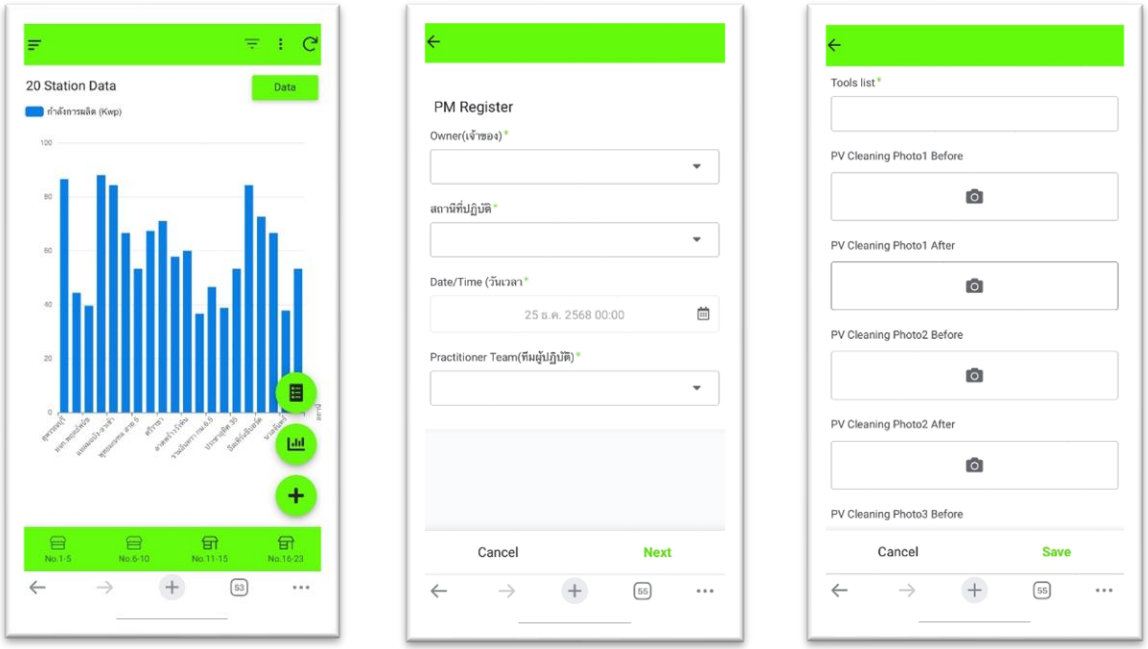
1.00 – 1.49 หมายถึง น้อยที่สุด

## 4.ผลการวิจัย

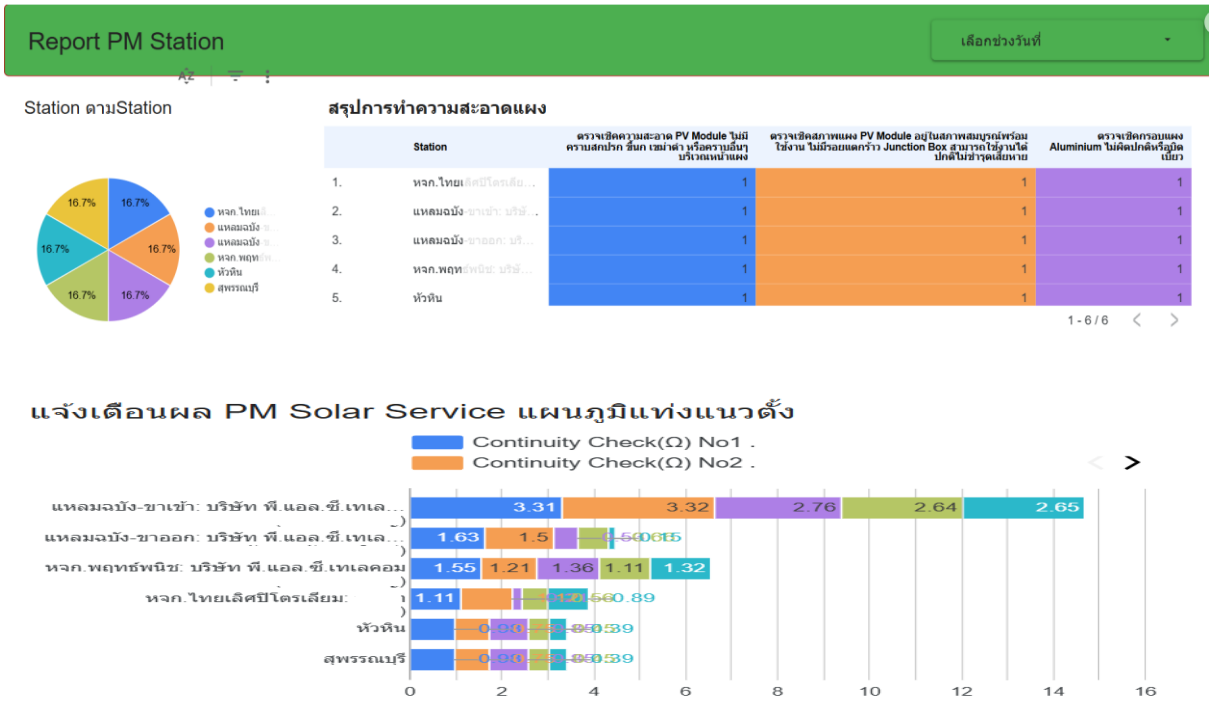
ผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษา ออกแบบและพัฒนาระบบสนับสนุนบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ และนำระบบระบบสนับสนุนบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบโดยผู้เชี่ยวชาญและประเมินความ พึงพอใจจากผู้ใช้งาน ผลการวิจัยการพัฒนาระบบฯ รายละเอียด ดังนี้

### 4.1 ผลการพัฒนาระบบสนับสนุนบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์

การออกแบบและพัฒนาระบบสนับสนุนบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อจัดเก็บข้อมูลการบำรุงรักษาระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์จากแอปพลิเคชันมือถือลงในระบบคลาวด์เพื่อใช้เป็นแหล่งข้อมูลกลางสำหรับแสดงผลในรูปแบบแดชบอร์ด เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถติดตามสถานะการทำงานของระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งในระดับภาพรวมและรายสถานีได้ รวมถึงใช้ข้อมูลในการประมวลผลและวิเคราะห์ความผิดปกติของระบบ และการแจ้งเตือน ตัวอย่างผลลัพธ์จากการพัฒนาระบบดังภาพที่ 3 และภาพที่ 4




**ภาพที่ 3** แอปพลิเคชันมือถือบนอุปกรณ์พกพาโดยใช้แพลตฟอร์ม Google AppSheet




**ภาพที่ 4** แดชบอร์ดแสดงการบำรุงรักษาแผงเซลล์แสงอาทิตย์และการแจ้งเตือนผลการบำรุงรักษา

**4.2 ผลการประเมินประสิทธิภาพและความพึงพอใจของระบบสนับสนุนบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์**

ผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบสนับสนุนบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์โดยผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ จำนวน 5 ท่าน ซึ่งประกอบด้วยประเด็นวัดประสิทธิภาพของระบบในด้านต่าง ๆ จำนวน

5 ด้าน ได้แก่ ด้านตรงตามความต้องการ ด้านสามารถทำงานได้ตามหน้าที่ ด้านความง่ายต่อการใช้งาน ด้านประสิทธิภาพ และด้านการรักษาความปลอดภัยของข้อมูล ผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบ

| ประเด็นวัดประสิทธิภาพของระบบ | $\bar{X}$ | S.D. | การแปลผล |
|---|---|---|---|
| 1. ด้านตรงตามความต้องการ (Function Requirement) | 4.80 | 0.41 | ดีมาก |
| 2. ด้านสามารถทำงานได้ตามหน้าที่ (Function) | 4.44 | 0.58 | ดี |
| 3. ด้านความง่ายต่อการใช้งาน (Usability) | 4.84 | 0.37 | ดีมาก |
| 4. ด้านประสิทธิภาพ (Performance) | 4.72 | 0.46 | ดีมาก |
| 5. ด้านการรักษาความปลอดภัยของข้อมูล (Security) | 4.68 | 0.48 | ดีมาก |
| **ค่าเฉลี่ยรวมทุกด้าน** | **4.70** | **0.48** | **ดีมาก** |

**จากตารางที่** 1 ผลการประเมินพบว่า ประสิทธิภาพของระบบสนับสนุนบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ โดยรวมอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{X} = 4.70, S.D. = 0.48$) เมื่อพิจารณาเป็นรายด้านโดยเรียงลำดับค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพจากมากไปหาน้อย พบว่าค่าเฉลี่ยสูงสุด คือ ด้านความง่ายต่อการใช้งานอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{X} = 4.84, S.D. = 0.37$) รองลงมา คือ ด้านตรงตามความต้องการอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{X} = 4.80, S.D. = 0.41$) ด้านประสิทธิภาพอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{X} = 4.72, S.D. = 0.46$) ด้านการรักษาความปลอดภัยของข้อมูลอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{X} = 4.68, S.D. = 0.48$) และด้านสามารถทำงานได้ตามหน้าที่อยู่ในระดับดี ($\bar{X} = 4.44, S.D. = 0.58$) ตามลำดับ

ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบสนับสนุนบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์โดยกลุ่มตัวอย่าง คือ พนักงานและผู้บริหารบริษัท พี.แอล.ซี.เทเลคอม จำกัด จำนวน 10 คน ซึ่งประกอบด้วยประเด็นวัดความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบในด้านต่าง ๆ จำนวน 4 ด้าน ได้แก่ ด้านกระบวนการ/ขั้นตอนการใช้งานระบบ ด้านประสิทธิภาพของระบบ ด้านความปลอดภัยและการคุ้มครองข้อมูล และด้านคุณภาพของระบบ ความพึงพอใจต่อการใช้งานระบบจากผู้ใช้งาน ผลการประเมินความพึงพอใจแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการประเมินความพึงพอใจต่อการใช้งานระบบ

| ประเด็นวัดความพึงพอใจ | $\bar{X}$ | S.D. | ระดับความพึงพอใจ |
|---|---|---|---|
| 1. ด้านกระบวนการ/ขั้นตอนการใช้งานระบบ | 4.90 | 0.30 | ดีมาก |
| 2. ด้านประสิทธิภาพของระบบ | 4.82 | 0.39 | ดีมาก |
| 3. ด้านความปลอดภัยและการคุ้มครองข้อมูล | 4.93 | 0.25 | ดีมาก |
| 4. ด้านคุณภาพของระบบ | 4.85 | 0.37 | ดีมาก |
| **ค่าเฉลี่ยรวมทุกด้าน** | **4.88** | **0.33** | **ดีมาก** |

**จากตารางที่** 2 ผลการประเมินพบว่า ความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบสนับสนุนบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ โดยรวมอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{X} = 4.88, S.D. = 0.33$) เมื่อพิจารณาเป็นรายด้าน โดยเรียงลำดับค่าเฉลี่ยความพึงพอใจจากมากไปหาน้อย พบว่าค่าเฉลี่ยสูงสุด คือ ด้านความปลอดภัยและการคุ้มครองข้อมูล ความพึงพอใจอยู่ในระดับดีมาก ($\bar{X} = 4.93, S.D. = 0.25$) รองลงมา คือ ด้านกระบวนการ/ขั้นตอนการใช้งานระบบอยู่ในระดับดีมาก

($\overline{X} = 4.90, S.D. = 0.30$) ด้านคุณภาพของระบบอยู่ในระดับดีมาก ($\overline{X} = 4.85, S.D. = 0.37$) และด้านด้านประสิทธิภาพของระบบอยู่ในระดับดีมาก ($\overline{X} = 4.82, S.D. = 0.39$) ตามลำดับ

โดยสรุปงานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบสนับสนุนการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์โดยประยุกต์ใช้แอปพลิเคชันมือถือ ระบบคลาวด์ และเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง ผลการประเมินพบว่าระบบมีประสิทธิภาพโดยรวมอยู่ในระดับดีมาก และผู้ใช้งานมีความพึงพอใจในระดับดีมากเช่นกัน สะท้อนให้เห็นว่าระบบสามารถสนับสนุนการบริหารจัดการการบำรุงรักษา ลดภาระงานบุคลากร และเพิ่มประสิทธิภาพในการตัดสินใจด้านการบำรุงรักษาระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างเหมาะสมกับการใช้งานจริง

## 5. อภิปรายผลและข้อเสนอแนะการวิจัย

ผลการวิจัยพบว่าระบบสนับสนุนการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์สำหรับระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพโดยรวมอยู่ในระดับดีมาก และผู้ใช้งานมีความพึงพอใจในระดับดีมากเช่นกัน ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่าการบูรณาการแอปพลิเคชันมือถือ ระบบคลาวด์ และเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดเก็บ วิเคราะห์ และนำเสนอข้อมูลการบำรุงรักษาได้อย่างเป็นระบบ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ที่มุ่งเน้นการใช้ข้อมูลจริงในการสนับสนุนการตัดสินใจและลดความเสี่ยงจากการหยุดทำงานของระบบ (Jardine et al., 2006; Basit et al., 2021)

ด้านความง่ายต่อการใช้งานที่ได้รับการประเมินในระดับสูง สอดคล้องกับงานวิจัยที่ระบุว่าการออกแบบระบบให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลได้สะดวกและเข้าใจง่าย เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการยอมรับและการนำระบบไปใช้งานจริง (Taherdoost, 2024) นอกจากนี้ การใช้แดชบอร์ดในการแสดงผลข้อมูลยังช่วยให้ผู้ดูแลระบบสามารถติดตามสถานะการทำงานของระบบผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ชี้ให้เห็นว่าระบบสนับสนุนการตัดสินใจที่มีการแสดงผลข้อมูลแบบภาพรวมสามารถช่วยเพิ่มคุณภาพในการตัดสินใจด้านการบำรุงรักษาได้ (Li et al., 2023)

ในส่วนของการประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องเพื่อวิเคราะห์ความผิดปกติของระบบ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการเปรียบเทียบข้อมูลการทำงานจริงกับเกณฑ์ค่ามาตรฐานของระบบสามารถสนับสนุนการตรวจจับความผิดปกติได้อย่างเหมาะสม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าที่ระบุว่าเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องมีศักยภาพในการวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่และตรวจจับสัญญาณความผิดปกติที่ซับซ้อนในระบบพลังงานแสงอาทิตย์ (Abo-Khalil et al., 2020; Applasamy et al., 2021) อย่างไรก็ตาม ผลการประเมินประสิทธิภาพจากผู้เชี่ยวชาญในด้านสามารถทำงานได้ตามหน้าที่ซึ่งอยู่ในระดับดีสะท้อนให้เห็นว่ายังมีโอกาสในการพัฒนาระบบให้มีความสามารถตามหน้าที่การทำงานของระบบให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นในอนาคต

ข้อเสนอแนะในการวิจัย

1. ควรขยายการประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องให้ครอบคลุมการพยากรณ์ความล้มเหลวในระยะยาว และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองหลายรูปแบบ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์

2. ควรขยายการทดสอบระบบไปยังสถานีผลิตพลังงานแสงอาทิตย์ที่มีขนาดและบริบทการใช้งานที่หลากหลาย เพื่อประเมินความสามารถในการประยุกต์ใช้ระบบในสภาพแวดล้อมจริง

3. ควรศึกษาปัจจัยด้านการยอมรับเทคโนโลยีเพิ่มเติมในระยะยาว เพื่อประเมินผลกระทบของระบบต่อกระบวนการบำรุงรักษาและการบริหารจัดการพลังงานในองค์กร

**คำขอบคุณ**

ขอขอบพระคุณ บริษัท พี.แอล.ซี. เทเลคอม จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance: PM) จาก 20 สถานี ย้อนหลัง 2 ปี จากปี พ.ศ. 2567 ถึงปี พ.ศ. 2568 ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองโดยใช้ปัญญาประดิษฐ์ ตลอดจนขอขอบคุณผู้บริหารและเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องกับโครงการโซล่าเซลล์ทุกท่าน ที่สละเวลาอันมีค่าในการเป็นกลุ่มตัวอย่างทดลองใช้งานและประเมินความพึงพอใจต่อระบบ

**6.เอกสารอ้างอิง**

ประคอง กรรณสูต. (2542). สถิติเพื่อการวิจัยทางพฤติกรรมศาสตร์. พิมพครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Abo-Khalil, A. G., El-Sharkawy, R. M., & El-Dabah, M. A. (2020). An intelligent predictive maintenance system for photovoltaic plants based on artificial neural networks. Alexandria Engineering Journal, 59(6), 4887-4896.

Applasamy, V., Adzman, M. R., & Roslan, N. S. (2021). A review of fault detection and diagnosis methods in solar photovoltaic systems. Ain Shams Engineering Journal, 12(4), 4279-4296.

Basit, A., Khan, M. A., & Rehman, S. (2021). Economic analysis of predictive maintenance in photovoltaic systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 148, 111309.

Ben-gzaiel, M., Oualmakran, H., & El M'sirdi, N. K. (2021). A review of reliability and availability of photovoltaic systems. Energy Reports, 7, 6078-6091.

Chine, W., Mellit, A., Pavan, A. M., & Kalogirou, S. A. (2016). Fault detection method for grid-connected photovoltaic plants. Renewable Energy, 96, 804-815.

Dhimish, M., Holmes, V., Mather, P., & Sibley, M. (2018). Novel photovoltaic thermal (PV/T) collector design for residential applications. Energy Conversion and Management, 155, 23-38.

Gao, W., Wai, R. J., & Li, Y. (2019). A review on fault diagnosis and tolerant control for photovoltaic systems. IET Renewable Power Generation, 13(12), 2051-2066.

Gürbüz, Ö., & Dikici, S. (2023). A systematic literature review on predictive maintenance in the era of industry 4.0. [Journal Name not provided in source].

Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. Mechanical Systems and Signal Processing, 20(7), 1483-1510.

Jordan, D. C., Deline, C., & Kurtz, S. R. (2018). Robust PV degradation methodology and analysis. IEEE Journal of Photovoltaics, 8(2), 525-531.

Kumar, N. M., Subathra, M. S. P., & Albert, A. S. (2022). A comprehensive review of predictive maintenance for renewable energy systems. Journal of Cleaner Production, 338, 130635.

Li, L., et al. (2023). Human-AI collaboration in decision making: A review of the literature. [Journal Name not provided in source].

Li, X., Yang, Q., & Zha, X. (2020). A review of machine learning applications in photovoltaic systems. Energy Reports, 6, 324-338.

Madeti, S. R., & Singh, S. N. (2017). A comprehensive review on solar panel cleaning systems. Solar Energy, 158, 497-519.

Mellit, A., Kalogirou, S. A., & Hontoria, L. (2020). Artificial intelligence techniques for sizing photovoltaic systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 128, 109893.

Serrano-Guerrero, X., Gonzalez-Cabrera, N., & Leon-Sarmiento, F. E. (2021). Global trends in solar energy: A review. Heliyon, 7(8), e07817.

Taherdoost, H. (2024). A critical review of the technology acceptance model (TAM). [Journal Name not provided in source].

Zarmai, M. T., Ekere, N. N., Oduoza, C. F., & Amalu, E. H. (2019). A review of interconnection technologies for improved crystalline silicon solar cell photovoltaic module reliability. Applied Energy, 242, 173-195.