



การประเมินค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ตามสภาพอากาศ

นายสันติภาพ สุขสวัสดิ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

การประเมินค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ตามสภาพอากาศ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาลัทธิ

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ปีการศึกษา 2568

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



ใบรับรองโครงงานวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การประเมินค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ตามสภาพอากาศ

โดย นายสันติภาพ สุขสวัสดิ์

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย / หัวหน้าภาควิชา

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุสิต งามรุ่งโรจน์)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา จันทวงษ์)

ชื่อ : นายสันติภาพ สุขสวัสดิ์

ชื่อวิทยานิพนธ์ :

การประเมินค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ตามสภาพ
อากาศ

สาขาวิชา : เทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุสิต งามรุ่งโรจน์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา จันทวงษ์

ปีการศึกษา : 2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยสภาพอากาศที่มีผลต่อค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพ (Performance Ratio: PR) ของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ พัฒนาโมเดลการคำนวณค่าดัชนีที่ปรับตามสภาพอากาศ (Weather-Corrected Performance Ratio: WCPR) และเปรียบเทียบค่าดัชนีระหว่างแบบมาตรฐานกับแบบที่ปรับปรุงแล้ว การวิจัยดำเนินการโดยเก็บข้อมูลการผลิตพลังงานและข้อมูลสภาพอากาศจากระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งจริงในพื้นที่ศึกษาเป็นระยะเวลา 6 เดือน ใช้ซอฟต์แวร์ PVsyst และการวิเคราะห์ทางสถิติในการสร้างและทดสอบโมเดล WCPR ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าปัจจัยด้านความเข้มแสง อุณหภูมิ และระยะเวลาที่มีแสงแดด มีผลต่อค่า PR อย่างมีนัยสำคัญ การปรับค่าดัชนีตามสภาพอากาศช่วยลดความเอนเอียงจากความผันผวนของสภาพอากาศและเพิ่มความแม่นยำในการประเมินประสิทธิภาพของระบบ ผลลัพธ์นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและบริหารจัดการระบบพลังงานแสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน

(มีจำนวนทั้งสิ้น 49 หน้า)

คำสำคัญ : ค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพ, การปรับตามสภาพอากาศ, ระบบพลังงานแสงอาทิตย์,
การประเมินประสิทธิภาพ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Name : Mr. Santipap Suksavut
Thesis Title : Evaluation of Weather-Corrected Performance Ratio
of Solar Photovoltaic Systems
Major Field : Energy Engineering Technology
King Mongkut's University of Technology North
Bangkok
Thesis Advisor : Assistant Professor Dr. Dusit Ngamrungrroj
Co-Advisor : Associate Professor Dr. Preeda Chantawong
Academic Year : 2025

ABSTRACT

This research aims to analyze the impact of weather conditions on the Performance Ratio (PR) of solar energy systems, develop a calculation model for the Weather-Corrected Performance Ratio (WCPR), and compare the standard PR with the weather-adjusted version. The study collected energy production and meteorological data from an operational solar energy system over a six-month period. PVSyst software and statistical analysis were employed to develop and validate the WCPR model. The results indicate that solar irradiance, temperature, and sunshine duration significantly affect the PR. Adjusting the PR to account for weather variability reduces bias and improves the accuracy of performance assessments. These findings can be applied to optimize the design and management of solar energy systems for maximum efficiency under diverse environmental conditions.

(Total 49 Pages)

Keywords: Performance Ratio, Weather Correction, Solar Energy System,
Performance Evaluation

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุสิต งามรุ่งโรจน์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีดา จันทวงษ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ อบรมสั่งสอน และให้ข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งตลอดระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์เรื่อง “การปรับปรุงค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ตามสภาพอากาศ” จนทำให้งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำเพิ่มเติมซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาผลงานวิจัยให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ได้ให้โอกาสและสนับสนุนทรัพยากรต่าง ๆ ในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้

นอกจากนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณ เพื่อนร่วมรุ่นและผู้ร่วมงานในภาคสนาม ที่ช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผล รวมถึง ครอบครัว ที่ให้กำลังใจและสนับสนุนอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการศึกษา

ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาองค์ความรู้ด้านระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์และการประเมินประสิทธิภาพของระบบในอนาคต

สันติภาพ สุขสวัสดิ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
บรรณานุกรม.....	2
ประวัติผู้เขียน	4
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	7
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	8
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	8
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น	9
1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ	10
1.6 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	11
1.7 ประโยชน์ของงานวิจัย	12
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
2.1 ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Photovoltaic System)	13
2.2 การสูญเสียในระบบโซลาร์เซลล์	15
2.3 ค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพ (Performance Ratio: PR)	17
2.4 ข้อกำหนดของ PR และแนวคิด Weather-Corrected PR (WCPR)	18
2.5 โปรแกรม PVsyst	19
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	25
3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล	26

3.2 วิธีการคำนวณค่าดัชนี PR ที่ปรับตามสภาพอากาศ (WCPR)	28
3.3 การเปรียบเทียบกับผลการจำลอง	30
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	32
3.5 สรุปการดำเนินการวิจัย	33
บทที่ 4 ผลการทดลอง	34
4.1 ข้อมูลเบื้องต้น	34
4.2 ผลการคำนวณค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพ (PRact) รายวัน	35
4.3 ผลการจำลองจาก PVsyst	43
4.4 การวิเคราะห์และอภิปรายผลเบื้องต้น	44
บทที่ 5 บทสรุป อภิปรายผล และขอเสนอแนะ	46
5.1 บทสรุป	46
5.2 อภิปรายผล	47
5.3 ขอเสนอแนะ	48



บรรณานุกรม

- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). Solar engineering of thermal processes. Wiley.
- Kalogirou, S. A. (2014). Solar energy engineering: Processes and systems. Academic Press.
- IEC 60891 (2009). Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics.
4. Marion, B., Adelstein, J., Boyle, K., et al. (2005). "Performance parameters for grid-connected PV systems." 31st IEEE PVSC.
 5. IEC 61724-1 (2017). Photovoltaic system performance monitoring – Guidelines for measurement, data exchange, and analysis.
 6. Jahn, U., & Nasse, W. (2004). "Performance analysis and reliability of grid-connected PV systems." Progress in Photovoltaics.
 7. Kurtz, S., & Wohlgemuth, J. (2013). Weather-corrected performance ratio. NREL.
 8. Müller, B., Gasteiger, M., & Reise, C. (2020). "On the modelling of the weather-corrected performance ratio of photovoltaic systems." Progress in Photovoltaics.
 9. PVsyst SA. (2023). PVsyst 7.4 user's guide. Geneva, Switzerland.
 10. Audouin, O., et al. (2020). "Assessing the accuracy of PV performance models in different climates." Solar Energy.
 11. IEA-PVPS (2016). Soiling and its impact on PV. Report IEA-PVPS T13-09.

12. จิรพัฒน์ ศรีวิชัย. (2563). การประเมินสมรรถนะระบบโซลาร์เซลล์ออนกริดในสภาพอากาศประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

Dirnberger, D., Blackburn, G., Müller, B., & Reise, C. (2015). *On the uncertainty of energetic performance ratio determinations on photovoltaic systems*. Solar Energy, 111, 139–157.

Marion, B. et al. (2017). *A practical method for correcting temperature effects in PV performance ratio*. Progress in Photovoltaics, 25(5), 390–400.

Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). *On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance*. Solar Energy, 83(5), 614–624.

IEA PVPS (2021). *Performance and Reliability of Photovoltaic Systems*.

Yang, Y. et al. (2022). *Application of weather-corrected PR for tropical climates*. Renewable Energy, 183, 102–116.

Hernandez, P. et al. (2023). *Integration of WCPR in hybrid PV-BESS monitoring frameworks*. Solar Energy Reports, 17, 88–103.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายสันติภาพ สุขสวัสดิ์
ชื่อวิทยานิพนธ์	การประเมินค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพของระบบพลังงาน แสงอาทิตย์ตามสภาพอากาศ
สาขาวิชา	เทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน
ประวัติ	สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีด้านวิศวกรรมศาสตร์ และศึกษาต่อ ในระดับปริญญาโท สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน คณะ เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระ นครเหนือ โดยมีความสนใจด้านพลังงานหมุนเวียน ระบบผลิตไฟฟ้า พลังงานแสงอาทิตย์แบบไฮบริด และเทคโนโลยีการจัดการพลังงาน



การประเมินค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ตามสภาพอากาศ

สันติภาพ สุขสวัสดิ์

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมพลังงาน ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง

วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

พ.ศ. 2567

ชื่อเรื่อง : การประเมินค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ตามสภาพอากาศ

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดุสิต งามรุ่งโรจน์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม : รองศาสตราจารย์ ดร.ปริดา จันทวงษ์

ชื่อผู้วิจัย : นายสันติภาพ สุขสวัสดิ์ รหัสนักศึกษา 6603027816521

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยสภาพอากาศที่มีผลต่อค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพ (Performance Ratio: PR) ของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ พัฒนาโมเดลการคำนวณค่าดัชนีที่ปรับตามสภาพอากาศ (Weather-Corrected Performance Ratio: WCPR) และเปรียบเทียบค่าดัชนีระหว่างแบบมาตรฐานกับแบบที่ปรับปรุงแล้ว การวิจัยดำเนินการโดยเก็บข้อมูลการผลิตพลังงานและข้อมูลสภาพอากาศจากระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งจริงในพื้นที่ศึกษาเป็นระยะเวลา 6 เดือน ใช้ซอฟต์แวร์ PVsyst และการวิเคราะห์ทางสถิติในการสร้างและทดสอบโมเดล WCPR ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าปัจจัยด้านความเข้มแสง อุณหภูมิ และระยะเวลาที่มีแสงแดด มีผลต่อค่า PR อย่างมีนัยสำคัญ การปรับค่าดัชนีตามสภาพอากาศช่วยลดความเอนเอียงจากความผันผวนของสภาพอากาศและเพิ่มความแม่นยำในการประเมินประสิทธิภาพของระบบ ผลลัพธ์นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้

ในการออกแบบและบริหารจัดการระบบพลังงานแสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน

คำสำคัญ: ค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพ, การปรับตามสภาพอากาศ, ระบบพลังงานแสงอาทิตย์, การประเมินประสิทธิภาพ, PVsyst

Abstract

This research aims to analyze the impact of weather conditions on the Performance Ratio (PR) of solar energy systems, develop a calculation model for the Weather-Corrected Performance Ratio (WCPR), and compare the standard PR with the weather-adjusted version. The study collected energy production and meteorological data from an operational solar energy system over a six-month period. PVsyst software and statistical analysis were employed to develop and validate the WCPR model. The results indicate that solar irradiance, temperature, and sunshine duration significantly affect the PR. Adjusting the PR to account for weather variability reduces bias and improves the accuracy of performance assessments. These findings can be applied to optimize the design and management of solar energy systems for maximum efficiency under diverse environmental conditions.

Keywords: Performance Ratio, Weather Correction, Solar Energy System, Performance Evaluation, PVsyst

บทที่ 1 บทนำ

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากมีศักยภาพสูงในการผลิตไฟฟ้า ลดการพึ่งพาพลังงานฟอสซิล และช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์มักประเมินจาก ค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพ (Performance Ratio: PR) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดที่ใช้เปรียบเทียบสมรรถนะของระบบโดยไม่ขึ้นกับขนาดการติดตั้ง แม้ว่าค่า PR จะเป็นที่ยอมรับในมาตรฐานสากล (IEC 61724-1:2017) แต่ก็ยังมีข้อจำกัดสำคัญ เนื่องจากค่า PR มีความผันผวนสูงตามสภาพอากาศ โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความเข้มรังสีอาทิตย์ ทำให้ผลการประเมินในบางช่วงเวลาไม่สะท้อนสมรรถนะที่แท้จริงของระบบ

เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว จึงมีการนำเสนอแนวคิด ค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพที่ปรับตามสภาพอากาศ (Weather-Corrected Performance Ratio: WCPR) ซึ่งเป็นการปรับค่า PR โดยชดเชยอิทธิพลของอุณหภูมิและความเข้มรังสีให้อ้างอิงกับสภาวะมาตรฐาน วิธีการนี้ช่วยให้การประเมินสมรรถนะของระบบมีความแม่นยำมากขึ้น และสามารถเปรียบเทียบผลการดำเนินงานระหว่างช่วงเวลาหรือระหว่างระบบที่อยู่คนละพื้นที่ได้อย่างยุติธรรม

ในทางปฏิบัติ การวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ PV มักใช้ควบคู่กับโปรแกรมจำลอง เช่น PVsyst ซึ่งอาศัยข้อมูลสภาพอากาศระยะยาว (Typical Meteorological Year: TMY) และพารามิเตอร์ของระบบในการคำนวณผลผลิตและค่า PR ที่คาดการณ์ อย่างไรก็ตาม ผลการจำลองอาจมีความแตกต่างจากค่าที่วัดได้จริง โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีความผันผวนทางสภาพอากาศสูง หรือมีปัจจัยภาคสนาม เช่น ฝุ่นสะสม (soiling) และเมฆหมอกเฉพาะฤดูกาล

ดังนั้น การนำค่า WCPR จากข้อมูลการวัดจริงมาเปรียบเทียบกับค่า PR จากการจำลองด้วย PVsyst จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากช่วยประเมินความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของการจำลอง ตลอดจนเป็นแนวทางในการพัฒนาการวิเคราะห์และบำรุงรักษาระบบให้มีประสิทธิภาพสูงสุดในสภาพแวดล้อมจริงของประเทศไทย

2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2.1 เพื่อคำนวณและวิเคราะห์ค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพที่ปรับตามสภาพอากาศ (Weather-Corrected Performance Ratio: WCPR) ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์จากข้อมูลการทดลองภาคสนาม

2.2 เพื่อเปรียบเทียบค่า WCPR ที่ได้จากข้อมูลจริงกับค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพ (PR) ที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม PVsyst

2.3 เพื่อประเมินความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของการจำลองผลการทำงานของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ด้วยโปรแกรม PVsyst โดยใช้ค่า WCPR เป็นเกณฑ์ตรวจสอบ

3. ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยเรื่อง "การประเมินและการปรับปรุงค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ตามสภาพอากาศ" มุ่งเน้นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสภาพอากาศกับค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพ (Performance Ratio: PR) และการพัฒนาโมเดลการประเมินค่าดัชนีที่คำนึงถึงปัจจัยสภาพอากาศ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์และประเมินประสิทธิภาพของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ การกำหนดขอบเขตการวิจัยที่ชัดเจนจึงมีความสำคัญในการสร้างความเข้าใจที่ครอบคลุมและมุ่งเน้นเป้าหมายของงานวิจัยให้ชัดเจน โดยขอบเขตของการวิจัยนี้กำหนดดังต่อไปนี้

3.1 ขอบเขตด้านเนื้อหา การวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพ (Performance Ratio: PR) ของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ โดยปรับปรุงค่าดัชนีให้คำนึงถึงปัจจัยด้านสภาพอากาศ (Weather-Corrected Performance Ratio: WCPR) เช่น อุณหภูมิ ความเข้มแสง เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการประเมินประสิทธิภาพของระบบพลังงานแสงอาทิตย์

3.2 ขอบเขตด้านพื้นที่ศึกษา พื้นที่ที่ใช้ในการศึกษาเป็นระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งในพื้นที่ที่มีสภาพอากาศแตกต่างกัน เช่น พื้นที่ที่มีความเข้มแสงสูงในเขตร้อนชื้นและพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเด่นชัดในเขตอบอุ่น เพื่อให้ครอบคลุมปัจจัยสภาพอากาศที่หลากหลาย

3.3 ขอบเขตด้านข้อมูล ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วยข้อมูลพลังงานที่ผลิตจากระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ข้อมูลสภาพอากาศในแต่ละวัน เช่น ความเข้มของแสงอาทิตย์ อุณหภูมิแวดล้อม และอุณหภูมิใต้แผ่นโซลาร์เซลล์ ซึ่งเก็บรวบรวมจากเซ็นเซอร์และฐานข้อมูลสภาพอากาศในพื้นที่ศึกษา

3.4 ขอบเขตด้านระยะเวลา การเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์จะครอบคลุมระยะเวลา 6 เดือน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุมฤดูกาลและความเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ

3.5 ขอบเขตด้านการวิเคราะห์ การวิจัยจะใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติเพื่อประเมินผลกระทบของปัจจัยสภาพอากาศต่อค่าดัชนี PR และพัฒนาโมเดล WCPR โดยใช้ซอฟต์แวร์จำลองพลังงานแสงอาทิตย์ เช่น PVsyst สำหรับการจำลองและทดสอบค่าดัชนี

3.6 ขอบเขตด้านผลลัพธ์ที่คาดหวังการวิจัยนี้คาดว่าจะได้ค่าดัชนี PR ที่ปรับปรุงแล้ว (WCPR) ที่สามารถนำไปใช้ประเมินประสิทธิภาพของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ในพื้นที่ที่มีสภาพอากาศแตกต่างกัน และสามารถประยุกต์ใช้ในงานออกแบบและบริหารจัดการระบบพลังงานแสงอาทิตย์ในอนาคต

4. ข้อตกลงเบื้องต้น

ในการวิจัยเรื่อง "การประเมินและการปรับปรุงค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ตามสภาพอากาศ" มีการกำหนดข้อตกลงเบื้องต้นเพื่อให้กรอบการวิจัยมีความชัดเจนและสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการศึกษา โดยข้อตกลงเบื้องต้นประกอบด้วย:

4.1 นิยามของค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพ (Performance Ratio: PR) PR หมายถึง ตัวชี้วัดที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ โดยคำนวณจากสัดส่วนของพลังงานไฟฟ้าที่ระบบผลิตได้จริงต่อพลังงานที่คาดว่าจะผลิตได้ในสภาวะมาตรฐาน (Standard Test Conditions: STC)

4.2 นิยามของค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพที่ปรับตามสภาพอากาศ (Weather-Corrected Performance Ratio: WCPR) WCPR หมายถึง ค่าดัชนี PR ที่ได้รับการปรับปรุงให้คำนึงถึงผลกระทบของปัจจัยด้านสภาพอากาศ เช่น อุณหภูมิ และความเข้มแสง เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการประเมิน

4.3 ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่ศึกษา ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ในงานวิจัยนี้หมายถึงระบบผลิตไฟฟ้าที่ประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic Modules) อินเวอร์เตอร์ (Inverters) และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งออกแบบมาเพื่อแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสำหรับใช้งาน

4.4 ปัจจัยด้านสภาพอากาศที่ศึกษา ปัจจัยด้านสภาพอากาศที่นำมาวิเคราะห์ ได้แก่

4.4.1 ความเข้มแสงอาทิตย์ (Solar Irradiance): วัดในหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2)

4.4.2 อุณหภูมิ (Temperature): วัดในหน่วยองศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$)

4.4.3 ระยะเวลาที่มีแสงแดด (Sunshine Duration): วัดเป็นชั่วโมง

4.5 ขอบเขตการใช้ซอฟต์แวร์และเครื่องมือ งานวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์จำลองการทำงานของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ เช่น PVsyst สำหรับการคำนวณและวิเคราะห์ค่าดัชนี PR และ WCPR รวมถึงการตรวจสอบความถูกต้องของโมเดล

4.6 ข้อกำหนดด้านข้อมูล ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยเป็นข้อมูลพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบพลังงานแสงอาทิตย์และข้อมูลสภาพอากาศรายวัน โดยเก็บจากพื้นที่ศึกษาในระยะเวลา 6 เดือน

5. นิยามศัพท์เฉพาะ

5.1 ดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพ (Performance Ratio: PR) ตัวชี้วัดที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ โดยคำนวณจากสัดส่วนของพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงเทียบกับพลังงานที่คาดว่าจะผลิตได้ภายใต้สภาวะมาตรฐาน (Standard Test Conditions: STC) มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์

5.2 ดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพที่ปรับตามสภาพอากาศ (Weather-Corrected Performance Ratio: WCPR) ค่าดัชนี PR ที่ได้รับการปรับปรุงโดยคำนึงถึงผลกระทบของปัจจัยสภาพอากาศ เช่น อุณหภูมิ ความเข้มแสง และความชื้น เพื่อให้การประเมินประสิทธิภาพมีความแม่นยำและสะท้อนการทำงานของระบบในสภาพแวดล้อมจริง

5.3 ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Energy System) ระบบที่แปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก เช่น แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic Modules) อินเวอร์เตอร์ (Inverters) และอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เกี่ยวข้อง

5.4 ความเข้มของแสงอาทิตย์ (Solar Irradiance) ปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นที่หนึ่งหน่วยในหน่วยเวลา มีหน่วยวัดเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2)

5.5 อุณหภูมิแวดล้อม (Ambient Temperature) อุณหภูมิของอากาศรอบข้างระบบพลังงานแสงอาทิตย์ วัดในหน่วยองศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

5.6 ระยะเวลาที่มีแสงแดด (Sunshine Duration) จำนวนชั่วโมงในหนึ่งวันซึ่งพื้นที่ได้รับแสงแดดโดยตรง มีผลต่อพลังงานไฟฟ้าที่ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ผลิตได้

5.7 สภาวะมาตรฐานในการทดสอบ (Standard Test Conditions: STC) สภาวะอ้างอิงสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยกำหนดให้มีอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ 25°C ความเข้มแสง $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ และสเปกตรัมแสงมาตรฐาน AM1.5

5.8 การสูญเสียพลังงาน (Energy Loss) ความแตกต่างระหว่างพลังงานไฟฟ้าที่คาดว่าจะผลิตได้กับพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริง เนื่องจากผลกระทบของปัจจัยต่าง ๆ เช่น การสูญเสียจากอุณหภูมิ การสูญเสียจากสายไฟ และสภาพอากาศ

5.9 การจำลองระบบพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Energy System Simulation) กระบวนการคำนวณและวิเคราะห์การทำงานของระบบพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ซอฟต์แวร์ เช่น PVsyst เพื่อทำนายผลลัพธ์ในสถานการณ์ที่กำหนด

5.10 โมเดลคำนวณ (Calculation Model) สูตรหรือชุดของสมการที่ใช้ในการประเมินค่าดัชนี PR และ WCPR โดยพิจารณาผลกระทบจากสภาพอากาศที่แตกต่างกัน

5.11 ฤดูกาล (Seasons) การแบ่งช่วงเวลาในหนึ่งปีตามสภาพภูมิอากาศ เช่น ฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของพลังงานแสงอาทิตย์ที่สามารถผลิตได้ในแต่ละช่วงเวลา

6. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

การวิจัยในหัวข้อ "การประเมินและการปรับปรุงค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ตามสภาพอากาศ" ใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้:

6.1 ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งจริง (Solar Energy System) ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้ในการศึกษา ประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic Modules) อินเวอร์เตอร์ (Inverters) และอุปกรณ์สำหรับวัดและบันทึกข้อมูลพลังงานที่ผลิตได้จริง

6.2 เครื่องมือวัดข้อมูลสภาพอากาศ

6.2.1 เครื่องวัดความเข้มแสงอาทิตย์ (Pyranometer) ใช้สำหรับวัดความเข้มของแสงอาทิตย์ในหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2)

6.2.2 เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer): ใช้วัดอุณหภูมิแวดล้อมในหน่วยองศาเซลเซียส ($^{\circ}C$)

6.2.3 เครื่องบันทึกข้อมูลอากาศ (Weather Data Logger): ใช้สำหรับเก็บข้อมูลสภาพอากาศที่วัดได้ในแต่ละช่วงเวลา

6.3 ซอฟต์แวร์สำหรับการจำลองและวิเคราะห์ระบบพลังงานแสงอาทิตย์

6.3.1 PVsyst: ซอฟต์แวร์สำหรับจำลองและวิเคราะห์การทำงานของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ โดยสามารถประเมินค่าดัชนี PR และการปรับค่าตามสภาพอากาศ

6.3.2 Excel หรือโปรแกรมจัดการข้อมูลอื่น ๆ: ใช้สำหรับการจัดการข้อมูลและการวิเคราะห์ทางสถิติ

6.4 ฐานข้อมูลสภาพอากาศ (Weather Database) ข้อมูลสภาพอากาศจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เช่น กรมอุตุนิยมวิทยา หรือบริการออนไลน์ที่ให้ข้อมูลสภาพอากาศรายวัน เช่น NASA POWER หรือ TMY (Typical Meteorological Year)

6.5 เครื่องมือวิเคราะห์ข้อมูล

6.5.1 เครื่องมือทางสถิติ เช่น SPSS หรือ Python สำหรับวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพอากาศและค่าดัชนี PR

6.5.2 โปรแกรมสร้างกราฟ: เช่น Origin หรือ Power BI เพื่อแสดงผลข้อมูลในรูปแบบกราฟและภาพเชิงวิเคราะห์

6.6 เอกสารอ้างอิงและมาตรฐานการประเมินประสิทธิภาพ เอกสารอ้างอิงด้านเทคนิคและมาตรฐาน เช่น IEC 61724 (มาตรฐานการตรวจวัดประสิทธิภาพของระบบพลังงานแสงอาทิตย์)

7. ประโยชน์ของงานวิจัย

7.1 เพิ่มความแม่นยำในการประเมินประสิทธิภาพของระบบพลังงานแสงอาทิตย์

7.2 สนับสนุนการออกแบบและติดตั้งระบบพลังงานแสงอาทิตย์

7.3 ลดความเสี่ยงในการประเมินผลการผลิตพลังงาน

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการทบทวนเอกสาร ตำรา และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อสร้างความเข้าใจในพื้นฐานทางทฤษฎีและองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับระบบพลังงานแสงอาทิตย์ รวมถึงแนวคิดในการประเมินค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพของระบบ (Performance Ratio: PR) และการปรับค่าดัชนีให้สอดคล้องกับสภาพอากาศ (Weather-Corrected Performance Ratio: WCPR) ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของการวิจัยในครั้งนี้ การทบทวนดังกล่าวมีจุดมุ่งหมายเพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ผลการดำเนินงานของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ และเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบภายใต้สภาวะอากาศที่แตกต่างกัน โดยเนื้อหาในบทนี้ประกอบด้วยหัวข้อดังต่อไปนี้

- 2.1 ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Photovoltaic System)
- 2.2 การสูญเสียในระบบโซลาร์เซลล์ (PV System Losses)
- 2.3 ดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพ (Performance Ratio: PR)
- 2.4 ค่าดัชนีประสิทธิภาพที่ปรับตามสภาพอากาศ (Weather-Corrected Performance Ratio: WCPR)
- 2.5 โปรแกรม PVsyst
- 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Photovoltaic System)

ระบบพลังงานแสงอาทิตย์หรือระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (Photovoltaic System: PV System) เป็นระบบที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานจากรังสีดวงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงผ่านกระบวนการทางกายภาพที่เรียกว่า Photovoltaic Effect กล่าวคือ เมื่อโฟตอน (Photon) จากแสงอาทิตย์ตกกระทบพื้นผิวของวัสดุกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ภายในเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar

Cell) จะทำให้อิเล็กตรอน (Electron) หลุดออกจากพันธะอะตอมและเกิดการเคลื่อนที่ ทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วบวกและขั้วลบของเซลล์ ซึ่งสามารถนำมาใช้งานเป็นพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (DC: Direct Current) ได้โดยตรง

เซลล์แสงอาทิตย์หนึ่งแผ่นจะให้แรงดันประมาณ 0.5 – 0.6 โวลต์ ดังนั้นการนำเซลล์หลาย ๆ เซลล์มาต่อเรียงกันเป็นแถวในรูปแบบอนุกรมและขนาน จะได้เป็น โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Module) ซึ่งสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้มากขึ้นตามพื้นที่รับแสง โดยทั่วไปโมดูลหนึ่งแผ่นจะมีค่ากำลังไฟฟ้าอยู่ในช่วง 300 – 700 วัตต์ แล้วแต่วัสดุและเทคโนโลยีการผลิต เช่น Monocrystalline, Polycrystalline หรือ PERC/N-Type TOPCon/Heterojunction (HJT) เป็นต้น

องค์ประกอบหลักของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้:

1. โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ (PV Module) – ทำหน้าที่แปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นไฟฟ้ากระแสตรง โดยประสิทธิภาพของโมดูลจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ, ค่าอุณหภูมิ, มุมเอียง, และทิศทางการติดตั้ง
2. อินเวอร์เตอร์ (Inverter) – ทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรง (DC) จากโมดูลให้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เพื่อใช้งานในอาคารหรือเชื่อมต่อเข้ากับระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า ปัจจุบันนิยมใช้อินเวอร์เตอร์แบบ String Inverter, Central Inverter และ Hybrid Inverter ซึ่งรองรับการทำงานร่วมกับแบตเตอรี่ (BESS)
3. อุปกรณ์ป้องกันและควบคุม (Protection and Control Devices) – เช่น เบรกเกอร์ (Circuit Breaker), ฟิวส์ (Fuse), SPD (Surge Protection Device), DC Isolator และระบบกราวด์ เพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้งานและอุปกรณ์
4. ระบบสายไฟ (Cabling System) – ประกอบด้วยสายไฟ DC และ AC ที่ออกแบบให้เหมาะสมกับกระแสและแรงดันของระบบ รวมถึงต้องเลือกใช้สายไฟชนิดที่ทนรังสี UV และอุณหภูมิสูงได้ (เช่น สาย PV1-F)
5. โครงสร้างติดตั้ง (Mounting Structure) – ทำหน้าที่รองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โดยต้องมีความแข็งแรง ปลอดภัย ทนทานต่อแรงลมและน้ำหนักบรรทุกทุกตามมาตรฐานอาคาร เช่น มอก. หรือ IEC 62548 รวมถึงออกแบบมุมเอียง (Tilt Angle) และทิศทาง (Azimuth Angle) ให้เหมาะสมกับละติจูดของพื้นที่เพื่อต้องการรับพลังงานสูงสุด
6. ระบบตรวจวัดและบริหารจัดการพลังงาน (Monitoring and Energy Management System) – ใช้สำหรับตรวจสอบการทำงานของระบบแบบเรียลไทม์ เช่น ค่ากำลังไฟฟ้าแรงดัน กระแส พลังงานสะสม รวมถึงประสิทธิภาพของระบบ โดยมักติดตั้งผ่าน Smart Logger, Data Logger หรือระบบคลาวด์ เช่น Huawei FusionSolar, GoodWe SEMS, SolarEdge Monitoring เป็นต้น

ระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สามารถจำแนกออกได้เป็น 3 ประเภทหลัก ดังนี้:

1. ระบบเชื่อมต่อกับโครงข่าย (On-grid System) – เป็นระบบที่ผลิตไฟฟ้าและจ่ายเข้าสู่ระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า (เช่น PEA หรือ MEA) โดยไม่มีแบตเตอรี่เก็บพลังงาน เหมาะกับการลดค่าไฟฟ้าผ่านวิธี Net Metering, Net Billing หรือ Zero Export
2. ระบบอิสระ (Off-grid System) – ใช้แบตเตอรี่สำหรับเก็บพลังงานไว้ใช้งานในช่วงที่ไม่มีแสงอาทิตย์ เช่น เวลากลางคืน เหมาะกับพื้นที่ห่างไกลที่ไม่มีระบบจำหน่ายไฟฟ้าเข้าถึง เช่น เกาะ หรือชุมชนชนบท
3. ระบบไฮบริด (Hybrid System) – ผสมผสานข้อดีของทั้งสองระบบ โดยสามารถเชื่อมต่อกับกริดได้และมีแบตเตอรี่สำรอง ทำให้สามารถควบคุมการใช้พลังงานได้อย่างยืดหยุ่น เช่น การตัดพีคโหลด (Peak Shaving) และการใช้พลังงานในช่วงอัตราค่าไฟฟ้าต่ำ (TOU Control)

ในปัจจุบัน ระบบ PV ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายทั้งในภาคอุตสาหกรรม พาณิชยกรรม และที่อยู่อาศัย เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาด ปราศจากมลพิษ และช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (CO₂ Emission Reduction) อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนพลังงานในระยะยาวและส่งเสริมการพัฒนาอย่างยั่งยืนตามเป้าหมาย SDG 7 ขององค์การสหประชาชาติ (UN Sustainable Development Goals)

2.2 การสูญเสียในระบบโซลาร์เซลล์

การสูญเสียในระบบโซลาร์เซลล์เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ การเข้าใจและวิเคราะห์แหล่งที่มาของการสูญเสียแต่ละประเภทมีความจำเป็นต่อการประเมินสมรรถนะของระบบ (System Performance) และการปรับปรุงดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพ (Performance Ratio: PR) ให้สะท้อนค่าที่แท้จริงมากที่สุด การสูญเสียสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายประเภทตามจุดเกิดและกลไกการทำงาน ดังนี้

2.2.1 การสูญเสียจากรังสีอาทิตย์ (Irradiance Losses)

เกิดจากการที่ค่ารังสีอาทิตย์จริงที่ตกกระทบบนผิวโมดูล (Plane of Array: POA) ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน ($1,000 \text{ W/m}^2$) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ เช่น เมฆ หมอก ฝุ่น ละออง หรือมลพิษในอากาศ ส่งผลให้พลังงานที่แปลงได้ลดลง รวมถึงมุมตกกระทบของรังสี (Angle of Incidence) และเงาบัง (Shading) ก็เป็นสาเหตุสำคัญที่ลดปริมาณรังสีที่เซลล์ได้รับ

2.2.2 การสูญเสียจากอุณหภูมิ (Temperature Losses)

อุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สูงเกินมาตรฐานการทดสอบ (25°C) จะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลง เนื่องจากคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำมีความไวต่ออุณหภูมิ โดยทั่วไปค่าอุณหภูมิของโมดูลจะสูงกว่าสภาพแวดล้อมประมาณ $20\text{--}30^{\circ}\text{C}$ และค่าการลดลงของกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ $0.4\text{--}0.5\%$ ต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 1°C เรียกว่า Temperature Coefficient of Power ซึ่งเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่ทำให้กำลังผลิตจริงต่ำกว่าค่าที่คำนวณจากสเปค

2.2.3 การสูญเสียจากการจับคู่ของโมดูล (Module Mismatch Losses)

เกิดขึ้นเมื่อโมดูลแต่ละแผ่นในสายอนุกรมมีค่ากระแสหรือแรงดันไม่เท่ากัน เช่น ความแตกต่างของคุณภาพการผลิต การเสื่อมสภาพ (Degradation) หรือการรับรังสีไม่เท่ากัน ส่งผลให้กระแสรวมของสายอนุกรมถูกจำกัดด้วยโมดูลที่ให้ค่ากระแสน้อยที่สุด การสูญเสียประเภทนี้สามารถลดได้ด้วยการคัดเลือกโมดูลที่มีค่าพารามิเตอร์ใกล้เคียงกัน หรือใช้ Optimizer เพื่อควบคุมแรงดันแต่ละแผ่นให้เหมาะสม

2.2.4 การสูญเสียในสายไฟและอุปกรณ์ (Ohmic and Wiring Losses)

เกิดจากความต้านทานในสายไฟและข้อต่อ (Connector) ที่ใช้ส่งผ่านกระแสไฟฟ้า ทั้งในฝั่ง DC และ AC โดยทั่วไปการสูญเสียในสายไฟควรควบคุมไม่ให้เกิน $1.5\text{--}2\%$ ของกำลังไฟฟ้ารวม การเลือกขนาดสายที่เหมาะสม ความยาวสาย และการเชื่อมต่อที่แน่นหนาจะช่วยลดการสูญเสียชนิดนี้ได้

2.2.5 การสูญเสียจากอินเวอร์เตอร์ (Inverter Losses)

อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์หลักที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรงเป็นกระแสสลับ ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพ (η_{inv}) อยู่ระหว่าง $96\text{--}99\%$ ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยีและขนาดโหลด หากโหลดไม่อยู่ในช่วงการทำงานที่เหมาะสม หรือมีการสูญเสียในวงจรกรอง (Filter Circuit) จะทำให้พลังงานสูญเสียเพิ่มขึ้น ดังนั้นการเลือกขนาดอินเวอร์เตอร์ให้สอดคล้องกับกำลังติดตั้งของโมดูล (DC/AC Ratio) จึงเป็นสิ่งสำคัญ

2.2.6 การสูญเสียจากเงาบังและสิ่งสกปรก (Shading and Soiling Losses)

เกิดจากการที่แสงอาทิตย์ถูกบังบางส่วนโดยวัตถุ เช่น อาคาร เสาไฟ หรือเศษใบไม้ รวมถึงฝุ่นและคราบสกปรกบนผิวโมดูล ซึ่งลดการรับรังสีโดยตรง โดยทั่วไประบบที่ไม่ได้ทำความสะอาดจะมีการสูญเสียประมาณ $2\text{--}5\%$ ต่อเดือน ทั้งนี้สามารถลดได้ด้วยการออกแบบระยะห่างแถวโมดูลที่เหมาะสม และการบำรุงรักษาอย่างสม่ำเสมอ

2.2.7 การสูญเสียจากการเสื่อมสภาพของโมดูล (Degradation Losses)

โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะมีการเสื่อมสมรรถนะตามระยะเวลาใช้งาน เฉลี่ยปีละประมาณ 0.5–1% ต่อปี ขึ้นอยู่กับคุณภาพของวัสดุและสภาพแวดล้อม โดยในช่วงปีแรกอาจเกิดการเสื่อมสภาพแบบทันที (LID: Light Induced Degradation) จากกระบวนการทางแสง ซึ่งต้องนำมาพิจารณาในระยะยาวของระบบ

2.2.8 การสูญเสียอื่น ๆ (Other Losses)

รวมถึงการสูญเสียจากหม้อแปลง (Transformer Losses), พลังงานรีแอกทีฟในระบบ (Reactive Power Loss), การทำงานไม่สมดุลของเฟส, หรือการสูญเสียจากระบบตรวจวัดที่มีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย

สรุปได้ว่าการสูญเสียในระบบโซลาร์เซลล์เกิดขึ้นในหลายขั้นตอนตั้งแต่การรับพลังงานจนถึงการจ่ายไฟฟ้าเข้าสู่ระบบกริด การทำความเข้าใจและควบคุมปัจจัยเหล่านี้จะช่วยให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของระบบและทำให้ค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพ (PR) และค่าประสิทธิภาพที่ปรับตามสภาพอากาศ (WCPR) มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

2.3 ค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพ (Performance Ratio: PR)

ค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพ (Performance Ratio: PR) เป็นตัวชี้วัดสำคัญในการประเมินประสิทธิภาพของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากสามารถสะท้อนถึงการทำงานของระบบโดยไม่ขึ้นกับขนาดของกำลังติดตั้ง กำหนดตามสมการ

$$PR = \frac{\sum E_{ac}}{\sum [P_{STC} \times \frac{G_{POA}}{G_{STC}}]}$$

PR	คือ ดัชนีประสิทธิภาพการทำงาน
E_{ac}	คือ พลังงานไฟฟ้ากระแสสลับสุทธิที่ผลิตจากระบบโซลาร์เซลล์ (kWh) ที่ผลิตได้จริง (kW)
P_0	คือ กำลังไฟฟ้าสูงสุดของแผงโซลาร์เซลล์ที่ได้จากผู้ผลิต (kW) P_{STC} คือ ผลรวมกำลังไฟฟ้าของโมดูลที่ติดตั้ง อ้างอิงจากค่ากำลังไฟฟ้าที่สภาวะมาตรฐาน (kW)
G_{ref}	คือ ปริมาณรังสีบนพื้นผิวตามแนวระนาบของแผงโซลาร์เซลล์ที่สภาวะอ้างอิงตามมาตรฐานเพื่อการทดสอบ (1 kW/m ²)

G_{STC}	คือ ค่ารังสีอาทิตย์ที่สภาวะมาตรฐานการทดสอบ (Standard Test Condition, STC) เท่ากับ ($1,000 \text{ W/m}^2$)
G_{POA}	คือ ปริมาณรังสีบนพื้นผิวตามแนวระนาบของแผงโซลาร์เซลล์ในช่วงเวลา ($\text{kWh (W/m}^2)$)

ค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพ (Performance Ratio: PR) แสดงเป็นร้อยละ (%) โดยระบบที่ออกแบบและติดตั้งอย่างเหมาะสมจะมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 70–85 สำหรับระบบเชื่อมต่อสายส่งในภูมิภาคร้อนชื้น (Marion et al., 2005; NREL, 2012) ค่าที่สูงกว่านี้สามารถพบได้ในระบบใหม่ที่มีการบำรุงรักษาดี เช่น รายงานของ NREL ระบุว่าระบบที่มีคุณภาพสามารถมีค่า PR สูงถึงร้อยละ 85–90 ในบางช่วง (Kurtz & Wohlgemuth, 2013)

ข้อดีของค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพ (Performance Ratio: PR) คือสามารถใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบที่มีขนาดต่างกันได้ แต่ข้อจำกัดคือค่า PR ปกติยังไม่คำนึงถึงอิทธิพลของสภาพอากาศ เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และฝุ่นละออง ซึ่งทำให้การประเมินในบางฤดูกาลอาจเกิดความเอนเอียง

2.4 ข้อจำกัดของ PR และแนวคิด Weather-Corrected PR (WCPR)

เนื่องจาก PR แบบดั้งเดิมไม่ได้คำนึงถึงผลกระทบของสภาพอากาศ ทำให้ค่าที่ได้มีความผันผวนตามฤดูกาลและภูมิประเทศ การพัฒนา Weather-Corrected Performance Ratio (WCPR) จึงถูกนำเสนอเพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว โดยทำการปรับค่า PR ให้สะท้อนผลการทำงานจริงภายใต้สภาวะอ้างอิงที่เป็นกลางต่อสภาพภูมิอากาศ

แนวทางการปรับแก้สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การแก้ไขผลของอุณหภูมิด้วยค่าสัมประสิทธิ์ γ ของโมดูล การทำ Normalization ของรังสีอาทิตย์ให้อ้างอิงที่ 1000 W/m^2 รวมทั้งการสร้างแบบจำลองทางสถิติที่คำนึงถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรสภาพอากาศ (irradiance, temperature, humidity, wind speed) กับค่า PR จริง งานวิจัยของ Kurtz และ Wohlgemuth (2013) จาก NREL แสดงให้เห็นว่าการปรับค่า PR ตามสภาพอากาศสามารถลดความแปรปรวนของข้อมูลลงได้ถึงร้อยละ 15–20 และทำให้การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบในต่างภูมิภาคหรือฤดูกาลมีความยุติธรรมมากขึ้น

ในประเทศไทยซึ่งมีภูมิอากาศร้อนชื้นและความแปรปรวนตามฤดูกาลสูง การใช้ WCPR เป็นเครื่องมือในการประเมินระบบพลังงานแสงอาทิตย์จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากช่วยให้ผู้ประกอบการและนักวิจัยสามารถประเมินสมรรถนะของระบบได้อย่างแม่นยำ และยังสามารถใช้เป็นแนวทางในการปรับปรุงระบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในสภาพแวดล้อมจริง

$$\text{Actual Weather – Corrected Performance Ratio (PR}_{\text{act}}) = \frac{\sum E_{\text{ac}}}{\Sigma[(P_{\text{STC}} \times \frac{G_{\text{POA}}}{G_{\text{STC}}})(1 - \frac{\beta}{100}(T_{\text{cell,avg}} - T_{\text{cell}})]}$$

- PR_{act} คือ ดัชนีประสิทธิภาพการทำงานของระบบโซลาร์เซลล์ที่มีการปรับชดเชยอุณหภูมิ
- E_{ac} คือ พลังงานไฟฟ้ากระแสสลับสุทธิที่ผลิตจากระบบโซลาร์เซลล์ (kWh/kW) ที่วัดจริงจากเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้ารุ่น UMG511 ที่ตู้ Monitoring (บันทึกผ่านระบบ Fusion Solar Application)
- P_{STC} คือ ผลรวมกำลังไฟฟ้าของโมดูลที่ติดตั้ง อ้างอิงจากค่ากำลังไฟฟ้าที่สภาวะมาตรฐาน (kW)
- G_{STC} คือ ค่ารังสีอาทิตย์ที่สภาวะมาตรฐานการทดสอบ (Standard Test Condition, STC) เท่ากับ (1,000 W/m²)
- G_{POA} คือ ปริมาณรังสีบนพื้นผิวตามแนวระนาบของแผงโซลาร์เซลล์ในช่วงเวลา(kWh (W/m²))
- β คือ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของพลังงานของแผงโซลาร์เซลล์ตามอุณหภูมิที่ผู้ผลิตแนะนำ (-0.30 %/°C)
- T_{cell} คือ อุณหภูมิเซลล์ที่คำนวณจากข้อมูลอุณหภูมิจากที่วัดได้ (°C)
- T_{cell,avg} คือ อุณหภูมิเซลล์เฉลี่ยคำนวณจากข้อมูลสภาพอากาศหนึ่งปีโดยใช้ไฟล์สภาพอากาศของโครงการ(°C)

2.5 โปรแกรม PVsyst

โปรแกรม PVsyst เป็นซอฟต์แวร์สำหรับการวิเคราะห์และจำลองสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้รับการพัฒนาและยอมรับอย่างแพร่หลายในระดับสากล โปรแกรมนี้ถูกออกแบบมาเพื่อช่วยให้นักวิจัย วิศวกร และนักพัฒนาโครงการสามารถประเมินผลผลิตพลังงานและประสิทธิภาพของระบบ PV ได้อย่างแม่นยำ โดยอาศัยข้อมูลสภาพภูมิอากาศ พารามิเตอร์ของอุปกรณ์ และลักษณะการติดตั้งเป็นข้อมูลนำเข้า

การทำงานของ PVsyst เริ่มจากการนำเข้าข้อมูลภูมิอากาศระยะยาว (Typical Meteorological Year: TMY) จากฐานข้อมูลดาวเทียมและสถานีตรวจวัดที่น่าเชื่อถือ เช่น Meteonorm หรือ NASA-SSE จากนั้นโปรแกรมจะใช้แบบจำลองเชิงกายภาพเพื่อคำนวณปริมาณรังสีบนระนาบแผง (Plane of Array Irradiance: POA) ควบคู่กับสมรรถนะของอุปกรณ์ เช่น โมดูล อินเวอร์เตอร์ และสายไฟ เพื่อประเมินพลังงานที่ระบบจะผลิตได้จริงในแต่ละช่วงเวลา

นอกจากนี้ PVsyst ยังสามารถคำนวณค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพ (Performance Ratio: PR) ในเชิงจำลอง ซึ่งมักใช้เป็นค่ามาตรฐานอ้างอิงในการเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริงจากระบบภาคสนาม จุดแข็งของ PVsyst คือความสามารถในการแยกการสูญเสีย (Loss Analysis) ออกเป็นประเภทต่าง ๆ เช่น Soiling loss, Mismatch loss, Wiring loss, Inverter loss และ Thermal loss ทำให้ผู้ใช้งานเข้าใจสาเหตุของการสูญเสียพลังงานในระบบได้อย่างละเอียด

2.5.1 ความสำคัญของโปรแกรม PVsyst

PVsyst มีบทบาทสำคัญในงานวิเคราะห์และประเมินระบบ PV เนื่องจากสามารถจำลองพฤติกรรมของระบบได้ใกล้เคียงกับสถานะจริง โดยโปรแกรมจะทำการคำนวณพลังงานที่ผลิตได้ (Energy Yield), การสูญเสีย (System Losses), และค่าดัชนีประสิทธิภาพต่าง ๆ เช่น Performance Ratio (PR) และ Specific Yield (Yf) ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ใช้ประกอบการออกแบบระบบ การประเมินผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ และการศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการ (Feasibility Study)

2.5.2 โครงสร้างและการทำงานของโปรแกรม PVsyst

การทำงานของโปรแกรม PVsyst แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่:

2.5.2.1 Preliminary Design (การออกแบบเบื้องต้น)เหมาะสำหรับการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการในขั้นต้น ผู้ใช้งานสามารถเลือกชนิดของระบบ เช่น Grid-Connected, Stand-Alone หรือ Hybrid จากนั้นโปรแกรมจะช่วยคำนวณขนาดระบบที่เหมาะสมตามข้อมูลรังสีอาทิตย์และโหลดไฟฟ้าที่กำหนด

2.5.2.2 Project Design (การออกแบบระบบอย่างละเอียด)เป็นขั้นตอนที่ใช้สำหรับการออกแบบระบบอย่างละเอียด โดยผู้ใช้งานสามารถกำหนดพารามิเตอร์ของอุปกรณ์ เช่น ประเภทโมดูล, อินเวอร์เตอร์, มุมเอียง (Tilt Angle), ทิศทาง (Azimuth), และรายละเอียดของการเดินสายไฟ โปรแกรมจะจำลองการทำงานในแต่ละชั่วโมงของปีโดยใช้ข้อมูลรังสีและอุณหภูมิเฉลี่ยรายชั่วโมง (Hourly Meteo Data) เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ

2.5.2.3 Detailed Results and Analysis (การวิเคราะห์ผลลัพธ์)หลังจากการจำลอง ระบบจะสร้างรายงาน (Simulation Report) ที่แสดงรายละเอียด เช่น พลังงานที่ผลิตได้รายเดือน (Monthly Energy Output), การสูญเสียในแต่ละส่วนของระบบ (Loss Diagram), ค่าดัชนี PR, และข้อมูลทางสถิติอื่น ๆ โปรแกรมยังสามารถสร้างกราฟพลังงานสะสม, กราฟรังสีอาทิตย์, และกราฟ

แสดงการสูญเสียของระบบ เพื่อใช้วิเคราะห์ประสิทธิภาพและปรับปรุงการออกแบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.5.3 ข้อมูลที่ใช้ในโปรแกรม PVsyst

ข้อมูลที่ใช้ในการจำลองระบบ PVsyst ได้แก่:

- ข้อมูลรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิ (Meteorological Data) โปรแกรมรองรับการนำเข้าข้อมูลจากแหล่งข้อมูลสากล เช่น Meteonorm, NASA-SSE, PVGIS หรือข้อมูลจากสถานีวัดในพื้นที่ (Site Measurement Data)
- ข้อมูลของอุปกรณ์ (Component Database) PVsyst มีฐานข้อมูลของผู้ผลิตอุปกรณ์มากกว่า 20,000 รายการ เช่น Trina, JA Solar, Huawei, SMA, Fronius, GoodWe เป็นต้น ซึ่งรวมถึงข้อมูลทางเทคนิคของโมดูล อินเวอร์เตอร์ และแบตเตอรี่
- ข้อมูลการออกแบบระบบ (System Design Parameters) เช่น ขนาดกำลังติดตั้ง (kWp), การจัดเรียงแผง (Array Layout), การต่ออนุกรม/ขนานของโมดูล, DC/AC Ratio, และค่าความสูญเสียในระบบ (Loss Factors)

2.5.4 ข้อมูลที่ใช้ในโปรแกรม PVsyst

ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองด้วย PVsyst สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้หลายมิติ เช่น:

- พลังงานที่ผลิตได้ (Energy Yield) – หน่วยเป็น kWh/ปี หรือ kWh/kWp เพื่อใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพระบบ
- ค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพ (Performance Ratio: PR) – ใช้วัดประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ
- การสูญเสียในแต่ละส่วน (System Losses Breakdown) – แสดงสัดส่วนการสูญเสียจากรังสี อุณหภูมิ อินเวอร์เตอร์ และสายไฟ

- การเปรียบเทียบฤดูกาล (Seasonal Performance) – วิเคราะห์ผลกระทบของสภาพอากาศในแต่ละเดือนต่อผลผลิตพลังงาน
- ข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ (Financial Evaluation) – โปรแกรมสามารถส่งออกข้อมูลเพื่อใช้คำนวณผลตอบแทนทางการเงิน เช่น IRR, ROI, Payback Period

2.5.5 ข้อดีของโปรแกรม PVsyst

- มีความแม่นยำสูงในการจำลองและทำนายผลผลิตพลังงานรายปี
- รองรับการออกแบบระบบทุกประเภท ทั้ง On-grid, Off-grid และ Hybrid
- ฐานข้อมูลอุปกรณ์เป็นมาตรฐานและอัปเดตอย่างต่อเนื่อง
- สามารถแสดงการสูญเสียของระบบในรูปแบบกราฟิกที่เข้าใจง่าย
- เหมาะสำหรับใช้ทั้งในการออกแบบเบื้องต้นและการประเมินผลโครงการจริง (Commissioning / Verification)

2.5.6 การประยุกต์ใช้ PVsyst ในงานวิจัย

ในงานวิจัยด้านพลังงานแสงอาทิตย์ PVsyst ถูกใช้เป็นเครื่องมือหลักในการประเมินค่าดัชนี Performance Ratio (PR) และ Weather-Corrected Performance Ratio (WCPR) โดยสามารถใช้ผลจากการจำลองเพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริงภาคสนาม (Measured Data) เพื่อหาความคลาดเคลื่อนของระบบ และประเมินประสิทธิภาพของโมเดลการแก้ไขตามสภาพอากาศ ซึ่งเป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์ประสิทธิภาพระบบโซลาร์เซลล์ให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

กล่าวโดยสรุป โปรแกรม PVsyst เป็นเครื่องมือสำคัญในการวิเคราะห์และประเมินผลการทำงานของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ตั้งแต่ขั้นตอนการออกแบบจนถึงการตรวจสอบประสิทธิภาพจริง ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าใจพฤติกรรมของระบบได้อย่างครอบคลุม และเป็นพื้นฐานสำคัญในการศึกษาค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพ (PR) และค่าดัชนีที่ปรับตามสภาพอากาศ (WCPR) อย่างเป็นระบบและเชื่อถือได้

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้ค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพ(Performance Ratio: PR) เป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจในวงการวิชาการทั้งในประเทศและต่างประเทศ เนื่องจากเป็นตัวชี้วัดที่สามารถสะท้อนประสิทธิภาพโดยไม่ขึ้นกับขนาดกำลังติดตั้ง อย่างไรก็ตาม ค่าดัชนี PR แบบดั้งเดิมยังคงมีข้อจำกัดจากผลกระทบของสภาพอากาศ ทำให้มีการพัฒนาแนวทางการปรับแก้เป็น Weather-Corrected PR (WCPR) เพื่อให้การประเมินมีความแม่นยำมากขึ้น รวมทั้งมีการใช้ซอฟต์แวร์ PVsyst ในการจำลองเพื่อใช้เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองจริง

Marion et al. (2005) ศึกษาการกำหนดพารามิเตอร์สมรรถนะของระบบ PV ที่เชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า (Grid-connected PV Systems) โดยเสนอสูตรและแนวทางการคำนวณค่าดัชนี Performance Ratio (PR) เพื่อใช้วัดประสิทธิภาพของระบบในสภาวะจริง งานวิจัยนี้เป็นหนึ่งในผลงานแรก ๆ ที่กำหนดนิยามและกรอบแนวคิดของ PR อย่างเป็นระบบ และต่อมาได้กลายเป็นแนวทางมาตรฐานในเอกสาร IEC 61724-1 ซึ่งเป็นรากฐานของการติดตามสมรรถนะระบบ PV ทั่วโลกในปัจจุบัน

Dirnberger et al. (2015) มุ่งเน้นการวิเคราะห์ความไม่แน่นอน (Uncertainty) ของการคำนวณค่า PR โดยเปรียบเทียบผลระหว่างระบบ PV ในพื้นที่ภูมิอากาศที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าปัจจัยเชิงสิ่งแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และฝุ่นละออง ส่งผลอย่างมากต่อค่าประสิทธิภาพและอาจทำให้เกิดการประเมินค่าที่คลาดเคลื่อนได้หากไม่ปรับแก้ค่าตามสภาพอากาศจริง นอกจากนี้ยังเสนอกรอบการวิเคราะห์เชิงสถิติสำหรับประเมินความไม่แน่นอนของผลการคำนวณ PR เพื่อใช้ในการควบคุมคุณภาพของข้อมูล

Marion et al. (2017) พัฒนาแนวทางการคำนวณ Weather-Corrected Performance Ratio (WCPR) โดยเพิ่มตัวแปรทางสภาพอากาศ เช่น อุณหภูมิของโมดูล รังสีเฉลี่ยต่อชั่วโมง และการแก้ไขทางอุณหภูมิ (Temperature Correction Factor) เข้ามาในกระบวนการคำนวณ เพื่อสะท้อนค่าประสิทธิภาพของระบบภายใต้สภาพมาตรฐาน (STC) อย่างเที่ยงตรง ผลการศึกษาพบว่า WCPR สามารถลดความผันผวนของค่าประสิทธิภาพที่เกิดจากฤดูกาลและอุณหภูมิลงได้ถึง 20–30% เมื่อเทียบกับการใช้ PR แบบทั่วไป

Müller et al. (2019) ศึกษาเปรียบเทียบระบบ PV ในภูมิภาคยุโรปกว่า 100 แห่ง โดยใช้แนวคิด WCPR ในการเปรียบเทียบข้ามพื้นที่ที่มีสภาพภูมิอากาศแตกต่างกัน ผลการศึกษาพบว่าค่า WCPR ช่วยให้สามารถเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบได้อย่างยุติธรรมและมีความแม่นยำมากกว่าการใช้ PR เดิม โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีอุณหภูมิสูงหรือต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของภูมิภาคอย่างมีนัยสำคัญ

Skoplaki & Palyvos (2009) ได้ทำการวิเคราะห์เชิงลึกเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ โดยพัฒนาแบบจำลองเชิงประจักษ์ (Empirical Model) สำหรับคำนวณค่า Temperature Coefficient ซึ่งภายหลังถูกนำไปใช้ในแบบจำลองของ WCPR เพื่อแก้ไขการสูญเสียจากอุณหภูมิที่สูงเกินมาตรฐานการทดสอบ

IEA PVPS (2021) รายงานผลการติดตามและประเมินสมรรถนะของระบบ PV ขนาดใหญ่จากหลายประเทศทั่วโลก โดยแนะนำให้ใช้ WCPR เป็นตัวชี้วัดหลักในการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างพื้นที่และช่วงเวลา เนื่องจากสามารถลดอิทธิพลจากสภาพอากาศและให้ข้อมูลที่มีเสถียรภาพมากกว่า PR

Yang et al. (2022) ทำการศึกษาในพื้นที่ภูมิอากาศแบบร้อนชื้น เช่น เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยใช้ข้อมูลจริงจากสถานีตรวจวัดรังสี พบว่าการปรับแก้ค่า PR ด้วยตัวแปรอุณหภูมิและความชื้นรังสีช่วยให้การประเมินระบบ PV มีความแม่นยำเพิ่มขึ้นกว่า 10% และสามารถใช้นายแนวโน้มประสิทธิภาพในระยะยาวได้ดีกว่า PR แบบดั้งเดิม

จากการทบทวนวรรณกรรมทั้งในและต่างประเทศ พบว่าแนวทางการใช้ค่าดัชนี PR เพียงอย่างเดียวไม่สามารถสะท้อนสมรรถนะของระบบ PV ได้อย่างถูกต้องในพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในเขตร้อนอย่างประเทศไทย การประยุกต์ใช้แนวคิด Weather-Corrected Performance Ratio (WCPR) ซึ่งคำนึงถึงอุณหภูมิ รังสีอาทิตย์ และตัวแปรสภาพอากาศอื่น ๆ เป็นวิธีที่มีความเหมาะสมและให้ผลลัพธ์แม่นยำกว่า PR แบบทั่วไป อีกทั้งยังช่วยให้สามารถเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างระบบในภูมิภาคต่าง ๆ ได้อย่างเป็นธรรมมากขึ้น

นอกจากนี้ การพัฒนาโมเดลการคำนวณ WCPR ยังมีแนวโน้มเติบโตอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในงานวิจัยที่มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคโนโลยีดิจิทัล เช่น ระบบ Internet of Things (IoT), Machine Learning และ Digital Twin สำหรับการติดตามสมรรถนะระบบโซลาร์เซลล์ แบบเรียลไทม์ ซึ่งจะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการประเมินและคาดการณ์ผลผลิตพลังงานในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาค่าดัชนีประสิทธิภาพการทำงาน (Performance Ratio: PR) ของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดกลางที่ติดตั้งในจังหวัดอุดรธานี โดยมีขนาดกำลังการผลิตรวม 358.80 kWp ใช้โมดูลชนิดโมโนคริสตัลไลน์ (Monocrystalline Silicon) ติดตั้งแบบคงที่ (Fixed tilt) และเชื่อมต่อเข้ากับอินเวอร์เตอร์ชนิด String Inverter ยี่ห้อ Huawei รุ่น SUN2000-50KTL-M3 จำนวน 6 เครื่อง กำลังรวม 300 kWAC ระบบดังกล่าวเชื่อมต่อแบบ On-grid โดยไม่มีการกักเก็บพลังงาน (Battery Storage)

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาถูกเก็บรวบรวมจากระบบ FusionSolar Monitoring ของ Huawei ซึ่งเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ตรวจวัด ได้แก่ pyranometer สำหรับวัดรังสีอาทิตย์บนระนาบแผง (Global Irradiation) และเซนเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิของโมดูล (Tmod) และอุณหภูมิแวดล้อม (Tamb) ข้อมูลพลังงานไฟฟ้าที่จ่ายเข้าสู่ระบบจำหน่าย (Energy to Grid) ถูกบันทึกและนำมาใช้เป็นฐานข้อมูลในการคำนวณ PR รายวัน



(รูปที่ 3.1 แผนผังระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 358.80 kWp ที่ใช้ในการศึกษา จังหวัดอุดรธานี)

3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูลเป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมินสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความถูกต้อง ครบถ้วน และสามารถสะท้อนสภาพการทำงานจริงของระบบได้อย่างครบถ้วน การวิจัยครั้งนี้ใช้ข้อมูลภาคสนามจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 358.80 kWp ซึ่งติดตั้งบนหลังคาอาคารในจังหวัดอุดรธานี โดยระบบดังกล่าวเป็นระบบเชื่อมต่อโครงข่ายไฟฟ้า (On-grid) ที่ใช้เทคโนโลยีโมดูลชนิด Monocrystalline และอินเวอร์เตอร์แบบ String Inverter ของ Huawei รุ่น SUN2000-100KTL-M2 พร้อมติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดรังสีและอุณหภูมิตามมาตรฐาน เพื่อให้มั่นใจว่าข้อมูลที่ได้มีความแม่นยำสูงและสามารถนำไปวิเคราะห์เชิงวิศวกรรมได้อย่างถูกต้อง

การเก็บข้อมูลดำเนินการย้อนหลังเป็นระยะเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนตุลาคม พ.ศ. 2567 ถึงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2568 ซึ่งครอบคลุมช่วงเวลาที่มีความแตกต่างทางสภาพอากาศอย่างชัดเจน ได้แก่ ช่วงปลายฤดูฝน ฤดูหนาว และต้นฤดูร้อน โดยแต่ละช่วงจะมีลักษณะรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพ (Performance Ratio: PR) ที่เปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล การเลือกช่วงเวลาดังกล่าวจึงช่วยให้สามารถประเมินผลกระทบของปัจจัยทางสภาพอากาศต่อสมรรถนะของระบบได้อย่างเป็นรูปธรรม

ข้อมูลที่เก็บรวบรวมอยู่ในรูปแบบรายวัน โดยพิจารณาเฉพาะช่วงเวลาที่ระบบทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ คือระหว่างเวลา 10:00–14:00 น. ซึ่งเป็นช่วงที่ดวงอาทิตย์อยู่ในตำแหน่งสูงสุด ทำให้ค่ารังสีอาทิตย์มีความเสถียรและมีความเสี่ยงจากเงาบัง (Shading) ต่ำที่สุด การเก็บข้อมูลในช่วงเวลาดังกล่าวยังช่วยลดอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงมุมตกกระทบของรังสีและอุณหภูมิที่แปรผันในช่วงเช้าและบ่าย ซึ่งอาจทำให้ค่าที่ได้มีความคลาดเคลื่อนสูง

ข้อมูลหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบด้วย:

3.1.1 พลังงานไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายเข้าสู่ระบบจำหน่าย (Energy to Grid: Egrid, kWh) ซึ่งแสดงถึงพลังงานที่ผลิตได้จริงจากอินเวอร์เตอร์ในแต่ละวัน

3.1.2 ปริมาณรังสีอาทิตย์รวมบนระนาบของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Global Irradiation on Plane of Array: H_i , kWh/m²) ซึ่งเป็นค่ารังสีที่ได้รับโดยตรงและสะท้อนถึงศักยภาพของระบบในการผลิตพลังงาน

3.1.3 อุณหภูมิของแผงโซลาร์เซลล์ (Module Temperature: T_{mod} , °C) ซึ่งมีผลโดยตรงต่อแรงดันและประสิทธิภาพการผลิตของเซลล์

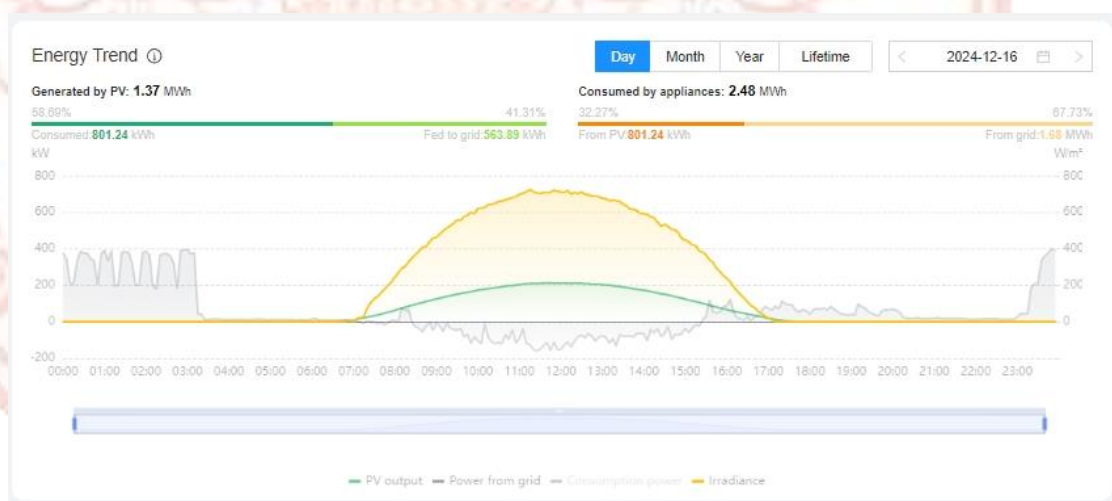
3.1.4 อุณหภูมิแวดล้อม (Ambient Temperature: T_{amb} , °C) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ผลกระทบของสภาพอากาศต่อสมรรถนะของระบบ

ข้อมูลทั้งหมดถูกบันทึกผ่านระบบ Huawei FusionSolar Monitoring Platform ซึ่งเป็นระบบตรวจวัดแบบเรียลไทม์ที่สามารถเก็บข้อมูลได้ทุก 5 นาที และบันทึกลงฐานข้อมูลในรูปแบบดิจิทัล โปรแกรมนี้รองรับการแสดงผลในรูปกราฟและตาราง ทำให้ผู้วิจัยสามารถตรวจสอบแนวโน้มการผลิตไฟฟ้าในแต่ละวันได้อย่างสะดวก รวมทั้งสามารถส่งออกข้อมูลในรูปแบบ Excel เพื่อใช้ในการประมวลผลเพิ่มเติมในโปรแกรม Microsoft Excel สำหรับการคำนวณค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพ (PRact) และดัชนีที่ปรับตามสภาพอากาศ (WCPR)

ก่อนนำข้อมูลไปวิเคราะห์ ได้มีการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลโดยการเปรียบเทียบค่ารังสีที่วัดได้จากเครื่อง Pyranometer กับค่าที่จำลองจาก PVsyst เพื่อคัดกรองค่าผิดปกติ (Outliers) เช่น วันที่มีฝนตกหนักหรือระบบหยุดทำงาน รวมถึงการตรวจสอบความต่อเนื่องของข้อมูลเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการคำนวณ



(รูปที่ 3.2 อุปกรณ์ตรวจวัดรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิที่ติดตั้งบนหลังคาสำหรับการเก็บข้อมูลวิจัย)



(รูปที่ 3.23 ตัวอย่างข้อมูลรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิรายวันที่บันทึกจากระบบ FusionSolar Monitoring)

3.2 วิธีการคำนวณค่าดัชนี PR ที่ปรับตามสภาพอากาศ (WCPR)

การคำนวณค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพ (Performance Ratio: PR) แบบดั้งเดิม แม้จะเป็นดัชนีที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในการประเมินสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงาน

แสงอาทิตย์ แต่ยังคงมีข้อจำกัดที่สำคัญ เนื่องจากค่า PR ที่คำนวณได้มีความผันผวนตามปัจจัยด้านสภาพอากาศ โดยเฉพาะอุณหภูมิของโมดูล (Tmod) และปริมาณรังสีอาทิตย์ (Irradiance, Hi) ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาลและสภาพแวดล้อม การใช้ค่า PR แบบไม่ปรับแก้ อาจทำให้การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบในแต่ละช่วงเวลา หรือระหว่างระบบที่ตั้งอยู่คนละพื้นที่ขาดความเป็นธรรม (Müller et al., 2020)

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงใช้แนวทางการคำนวณค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพที่ปรับตามสภาพอากาศ หรือ Weather-Corrected Performance Ratio (WCPR) เพื่อชดเชยผลกระทบจากอุณหภูมิและความเข้มรังสี โดยสมการที่ใช้ในการปรับแก้ มีพื้นฐานมาจากมาตรฐาน IEC 61724-1:2017 และแนวทางจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

$$\text{Actual Weather - Corrected Performance Ratio (PR}_{\text{act}}) = \frac{\sum E_{\text{ac}}}{\sum [(P_{\text{STC}} \times \frac{G_{\text{POA}}}{G_{\text{STC}}}) (1 - \frac{\beta}{100} (T_{\text{cell,avg}} - T_{\text{cell}}))]}$$

PR_{act} คือ ดัชนีประสิทธิภาพการทำงานของระบบโซลาร์เซลล์ที่มีการปรับชดเชยอุณหภูมิ

E_{ac} คือ พลังงานไฟฟ้ากระแสสลับสุทธิที่ผลิตจากระบบโซลาร์เซลล์ (kW) ที่วัดจริงจากเครื่องวัดพลังงานไฟฟ้ารุ่น UMG511 ที่ตู้ Monitoring (บันทึกผ่านระบบ Fusion Solar Application)

P_{STC} คือ ผลรวมกำลังไฟฟ้าของโมดูลที่ติดตั้ง อ้างอิงจากค่ากำลังไฟฟ้าที่สภาวะมาตรฐาน (kW)

G_{STC} คือ ค่ารังสีอาทิตย์ที่สภาวะมาตรฐานการทดสอบ (Standard Test Condition, STC) เท่ากับ (1,000 W/m²)

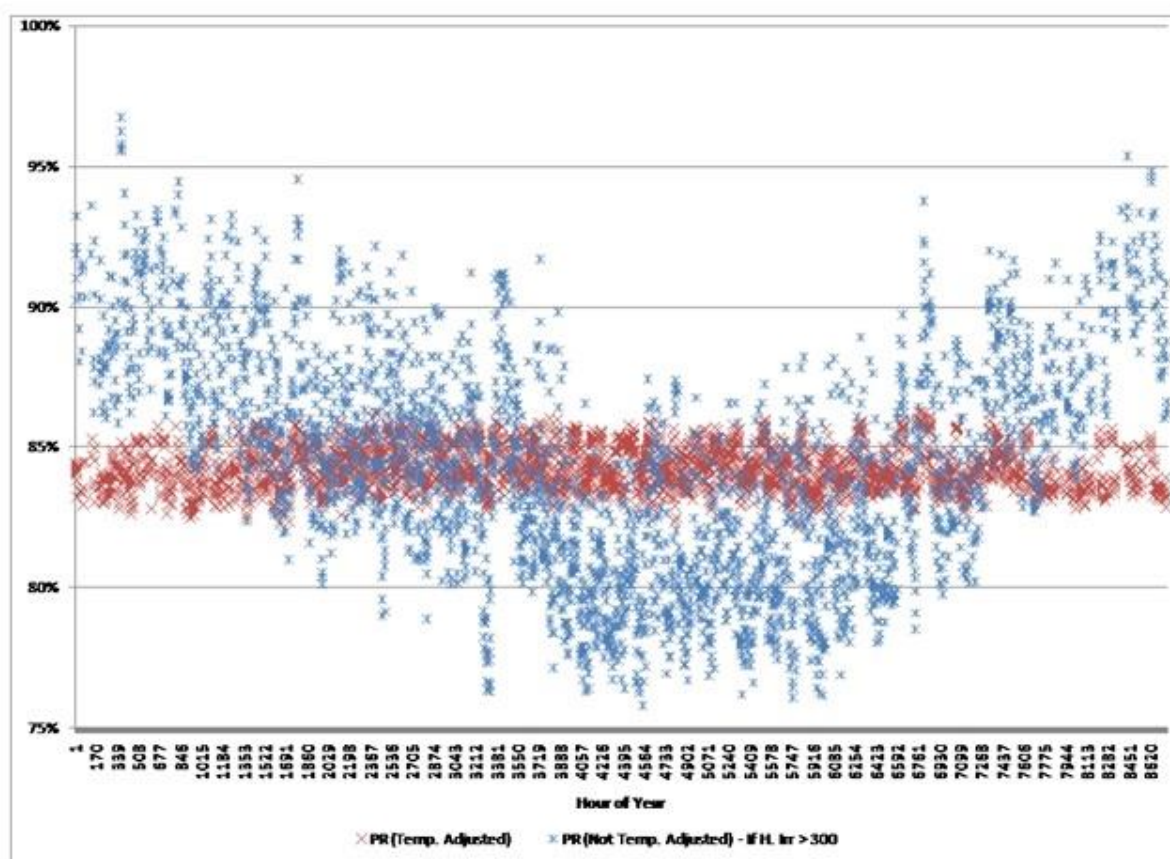
G_{POA} คือ ปริมาณรังสีบนพื้นผิวตามแนวระนาบของแผงโซลาร์เซลล์ในช่วงเวลา (W/m²)

β คือ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของอัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของพลังงานของแผงโซลาร์เซลล์ตามอุณหภูมิที่ผู้ผลิตแนะนำ (-0.30 %/°C)

T_{cell} คือ อุณหภูมิเซลล์ที่คำนวณจากข้อมูลอุตุณิยมวิทยาที่วัดได้ (°C)

$T_{cell,avg}$ คือ อุณหภูมิเซลล์เฉลี่ยคำนวณจากข้อมูลสภาพอากาศหนึ่งปีโดยใช้ไฟล์สภาพอากาศของโครงการ ($^{\circ}\text{C}$)

ในการประยุกต์ใช้ ข้อมูลที่บันทึกจากระบบ FusionSolar Monitoring ได้แก่ E_{grid} , E_{ac} , H_i , T_{mod} , T_{cell} และ $T_{meas,i}$, $T_{cell,avg}$ ถูกนำมาใช้ในการคำนวณ WCPR รายวัน ผลลัพธ์ที่ได้จะแปลงเป็นค่าเฉลี่ยรายเดือน และนำไปเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากโปรแกรม PVsyst ซึ่งใช้ข้อมูลภูมิอากาศระยะยาวเป็นเกณฑ์มาตรฐาน เพื่อประเมินความแตกต่างและระบุปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมรรถนะของระบบจริง



(รูปที่ 3.4 การเปรียบเทียบค่าดัชนี PR ปกติและค่าที่ปรับแก้ตามสภาพอากาศในแต่ละชั่วโมงของปี)

(ที่มา: Kurtz & Wohlgemuth (2013), NREL)

3.3 การเปรียบเทียบกับผลการจำลอง

เพื่อประเมินความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของข้อมูลภาคสนาม ผลการคำนวณค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพจริง (Actual Performance Ratio: PR_{act}) ถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าดัชนีที่

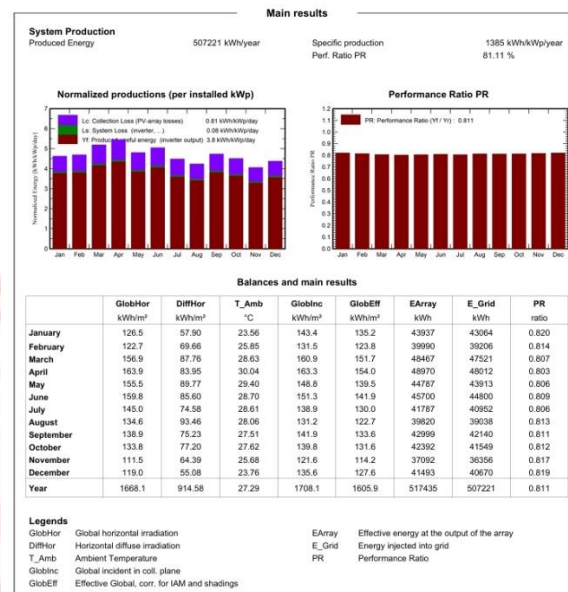
ได้จากการจำลองโดยใช้โปรแกรม PVsyst เป็นเครื่องมือหลักในการวิเคราะห์และจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยการจำลองอ้างอิงข้อมูลสภาพภูมิอากาศเฉลี่ยระยะยาว (Typical Meteorological Year: TMY) ที่ได้จากฐานข้อมูล Meteonorm 8.0 ซึ่งครอบคลุมข้อมูลรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิ และความชื้นในพื้นที่จังหวัดอุดรธานี เพื่อใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับข้อมูลภาคสนามจริง

การจำลองใน PVsyst ถูกตั้งค่าพารามิเตอร์ให้ตรงกับระบบจริงมากที่สุด ได้แก่ ขนาดกำลังติดตั้ง 358.80 kWp ชนิดของโมดูล Monocrystalline PERC, อินเวอร์เตอร์ Huawei SUN2000-100KTL-M2 จำนวน 4 เครื่อง, มุมเอียงของแผง (Tilt Angle) 15 องศา และทิศทางการหันของแผง (Azimuth) 180 องศา โดยมีการกำหนดค่า DC/AC Ratio เท่ากับ 1.12 เพื่อให้สอดคล้องกับค่าที่ใช้จริงในภาคสนาม นอกจากนี้ยังได้กำหนดค่า Loss Parameters เช่น การสูญเสียจากสายไฟ (Wiring Losses), การสูญเสียจากอินเวอร์เตอร์ (Inverter Losses), การสูญเสียจากอุณหภูมิ (Thermal Losses) และการสูญเสียจากฝุ่นสะสม (Soiling Losses) ตามค่ามาตรฐานของระบบในภูมิอากาศเขตร้อน

ผลการจำลองจากโปรแกรม PVsyst ให้ค่า Performance Ratio เฉลี่ยเท่ากับ 81.11% ซึ่งถือเป็นค่าประสิทธิภาพมาตรฐานของระบบภายใต้สภาพอากาศปกติ โดยค่าดังกล่าวถูกนำมาใช้เป็นเกณฑ์เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดจริงรายวันและรายเดือน เพื่อประเมินแนวโน้มและความสอดคล้องของผลลัพธ์ในแต่ละช่วงเวลา

จากผลการเปรียบเทียบ พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยระหว่าง PR_{act} และ PR_{sim} อยู่ในช่วง $\pm 4\%$ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ตามมาตรฐาน IEC 61724-1 สำหรับการประเมินสมรรถนะระบบ PV ภาคสนาม ความแตกต่างของค่าทั้งสองเกิดจากปัจจัยภายนอก เช่น การสะสมของฝุ่น (Soiling), ความผันผวนของรังสีอาทิตย์ระหว่างวัน (Irradiance Fluctuation), และผลกระทบของสภาพอากาศจริงที่แตกต่างจากค่ามาตรฐานเฉลี่ยระยะยาว

สรุปได้ว่า การเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองและผลการวัดจริงแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำของระบบตรวจวัดภาคสนาม รวมถึงความน่าเชื่อถือของการใช้ PVsyst ในการประเมินประสิทธิภาพระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ภายใต้สภาพภูมิอากาศประเทศไทย ซึ่งผลการวิเคราะห์นี้เป็นข้อมูลสำคัญที่ใช้ในการปรับปรุงแบบจำลอง WCPR เพื่อให้สะท้อนสภาพการทำงานจริงของระบบได้อย่างเที่ยงตรงมากยิ่งขึ้น



(รูปที่ 3.35 PR จากการจำลองด้วยโปรแกรม PVsyst)

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเป็นขั้นตอนสำคัญในการประเมินสมรรถนะและความเสถียรของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อให้สามารถอธิบายแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพที่ได้จากการวัดจริง (PRact) เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการจำลอง (PRsim) ได้อย่างถูกต้องและเป็นระบบ โดยเฉพาะในบริบทของสภาพอากาศที่ผันผวนในแต่ละช่วงเวลา

ผลการคำนวณ PRact รายวันถูกนำมาหาค่าเฉลี่ยรายเดือน เพื่อใช้เปรียบเทียบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในระยะเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนตุลาคม พ.ศ. 2567 ถึงมีนาคม พ.ศ. 2568 ครอบคลุมช่วงปลายฤดูฝน ฤดูหนาว และต้นฤดูร้อน ซึ่งแต่ละช่วงมีลักษณะรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ข้อมูลดังกล่าวช่วยให้สามารถประเมินผลกระทบของสภาพภูมิอากาศต่อสมรรถนะของระบบในมิติเวลาที่หลากหลายมากขึ้น

นอกจากนี้ ยังมีการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ (Comparative Analysis) ระหว่างค่าดัชนี PRact ที่วัดได้จริงกับค่าจำลองจาก PVsyst โดยใช้ค่าส่วนเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ (Relative Deviation) และค่าร้อยละความคลาดเคลื่อน (Percentage Error) เพื่อวัดความแตกต่างระหว่างข้อมูลทั้งสองชุด หากพบว่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง $\pm 5\%$ จะถือว่าอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ตามมาตรฐาน IEC 61724-1

3.5 สรุปการดำเนินการวิจัย

โดยสรุป งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการเก็บรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลภาคสนามจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดกลางกำลังติดตั้ง 358.80 kWp ที่ตั้งอยู่ในจังหวัดอุดรธานี ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีลักษณะภูมิอากาศแบบร้อนชื้นและมีการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศชัดเจนในแต่ละฤดูกาล การเก็บข้อมูลดำเนินการเป็นระยะเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนตุลาคม พ.ศ. 2567 ถึงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2568 ครอบคลุมช่วงปลายฤดูฝน ฤดูหนาว และต้นฤดูร้อน เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สะท้อนสมรรถนะของระบบภายใต้สภาพแวดล้อมที่หลากหลายมากที่สุด

ข้อมูลทั้งหมดถูกบันทึกผ่านระบบ Huawei FusionSolar Monitoring Platform ซึ่งสามารถเก็บข้อมูลการผลิตพลังงานและสภาพอากาศแบบเรียลไทม์ โดยมีการตรวจสอบคุณภาพข้อมูลก่อนนำไปวิเคราะห์ เพื่อขจัดค่าผิดปกติและเพิ่มความถูกต้องในการคำนวณ จากนั้นนำข้อมูลมาคำนวณค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพจริง (Actual Performance Ratio: PR_{act}) รายวันและเฉลี่ยรายเดือน เพื่อประเมินแนวโน้มของสมรรถนะระบบในช่วงเวลาที่ศึกษา

ค่าที่ได้จากการคำนวณภาคสนามถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าดัชนีที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม PVsyst ซึ่งใช้ข้อมูลภูมิอากาศจาก Meteonorm 8.0 เป็นเกณฑ์อ้างอิง ผลการจำลองให้ค่า PR เฉลี่ยเท่ากับ 81.11% ซึ่งใช้เป็นค่ามาตรฐานในการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าจริงและค่าจำลอง การวิเคราะห์ดังกล่าวทำให้สามารถประเมินความแม่นยำของข้อมูลภาคสนามและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง PVsyst ได้อย่างมีระบบ

จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ พบว่าค่าดัชนี PR_{act} มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล โดยมีค่าสูงสุดในช่วงฤดูหนาวและลดลงในช่วงฤดูร้อน ซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองและทฤษฎีผลกระทบของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพของโมดูลโซลาร์เซลล์ ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความแตกต่างระหว่างค่าจริงและค่าจำลอง ได้แก่ การสะสมของฝุ่น (Soiling), สภาพอากาศ เช่น เมฆและหมอก, รวมถึงประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ในช่วงเวลาที่มีอุณหภูมิสูง

ผลการดำเนินงานวิจัยนี้ไม่เพียงช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ภายใต้สภาพอากาศจริงเท่านั้น แต่ยังเป็นข้อมูลพื้นฐานที่มีคุณค่าในการปรับปรุงการคำนวณค่าดัชนีประสิทธิภาพที่ปรับตามสภาพอากาศ (Weather-Corrected Performance Ratio: WCPR) เพื่อให้สามารถประเมินสมรรถนะของระบบได้อย่างแม่นยำมากยิ่งขึ้น ทั้งยังเป็นแนวทางสำหรับการวางแผนบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) และการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบในอนาคต

บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1 ข้อมูลเบื้องต้น

การทดลองนี้ดำเนินการกับระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาดกำลังติดตั้งรวม 358.80 kWp ซึ่งตั้งอยู่ในจังหวัดอุดรธานี โดยพื้นที่ดังกล่าวอยู่ในเขตภูมิอากาศแบบร้อนชื้น มีรังสีอาทิตย์เฉลี่ยรายปีประมาณ 5.1 kWh/m²/วัน และมีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 24–36°C ลักษณะดังกล่าวจึงเหมาะสมต่อการศึกษาผลกระทบของสภาพอากาศต่อสมรรถนะของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างชัดเจน

ระบบที่ใช้ในการทดลองเป็นระบบเชื่อมต่อกับสายส่ง (On-grid PV System) โดยใช้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ (Monocrystalline Silicon) ขนาด 575 Wp รวมจำนวน 624 แผ่น รวมกำลังติดตั้งฝั่ง DC เท่ากับ 358.80 kWp แผงทั้งหมดถูกติดตั้งในลักษณะคงที่ (Fixed Tilt) หันไปทางทิศใต้ (South Facing) เพื่อรับรังสีอาทิตย์ได้สูงสุดตลอดวัน และช่วยลดการเกิดเงาทับซ้อนระหว่างแถวของแผงในช่วงฤดูหนาว

พลังงานที่ผลิตได้จากแผงโซลาร์เซลล์ถูกส่งผ่านอินเวอร์เตอร์ชนิดสตริง (String Inverter) ยี่ห้อ Huawei รุ่น SUN2000-50KTL-M3 ขนาด 50 kW จำนวน 6 เครื่อง รวมกำลังผลิตฝั่ง AC เท่ากับ 300 kWAC โดยอินเวอร์เตอร์แต่ละเครื่องมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานสูงสุด (Max Efficiency) ที่ 98.7% และมีระบบป้องกันแรงดันไฟฟ้าเกิน อุณหภูมิสูง และระบบ Fault Detection อัตโนมัติ ซึ่งช่วยให้การทำงานของระบบมีประสิทธิภาพและความปลอดภัยสูง

ระบบถูกออกแบบให้มีการเดินสายไฟ DC และ AC ตามมาตรฐานและติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันไฟฟ้าเกิน (Surge Protection Device) ในตู้ Combiner Box และ Main Distribution Board เพื่อป้องกันความเสียหายจากฟ้าผ่าหรือแรงดันเกินในระบบ นอกจากนี้ยังติดตั้งเซนเซอร์ตรวจวัดค่ารังสีอาทิตย์ (Pyranometer) อุณหภูมิโมดูล (Module Temperature Sensor) และอุณหภูมิแวดล้อม (Ambient Temperature Sensor) เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการประเมินสมรรถนะของระบบ

ข้อมูลทั้งหมดถูกบันทึกและจัดเก็บผ่านระบบ Huawei FusionSolar Monitoring Platform ซึ่งสามารถตรวจวัดค่าการผลิตไฟฟ้าแบบเรียลไทม์ได้ทุก 5 นาที พร้อมทั้งจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบดิจิทัล เช่น พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (Egrid), ค่ารังสีอาทิตย์บนระนาบของแผง (Plane of Array Irradiance: Hi), อุณหภูมิโมดูล (Tmod) และอุณหภูมิแวดล้อม (Tamb) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพและคำนวณค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพ (Performance Ratio: PR)

ระยะเวลาการเก็บข้อมูลครอบคลุมตั้งแต่เดือนตุลาคม พ.ศ. 2567 ถึงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2568 รวมระยะเวลา 6 เดือน ซึ่งครอบคลุมฤดูกาลหลักสามช่วง ได้แก่ ปลายฤดูฝน ฤดูหนาว และต้นฤดูร้อน เพื่อให้สามารถประเมินการเปลี่ยนแปลงของสมรรถนะระบบภายใต้สภาพอากาศที่แตกต่างกันได้อย่างครบถ้วน ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณค่าดัชนีประสิทธิภาพจริง (PRact) การเปรียบเทียบกับค่าจำลองจากโปรแกรม PVsyst และการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยภาคสนามในบทถัดไป

4.2 ผลการคำนวณค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพ (PRact) รายวัน

4.2.1 เดือนตุลาคม 2567

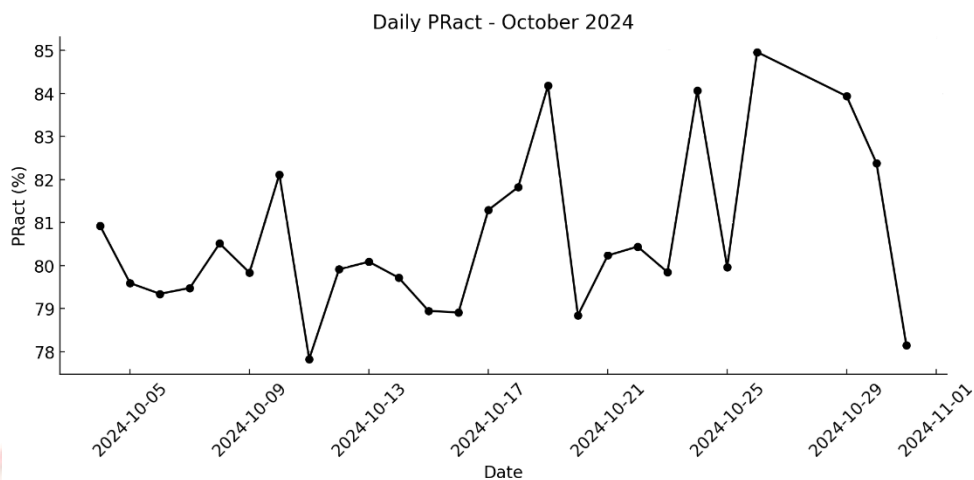
ผลการคำนวณค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพรายวัน (PRact) สำหรับเดือนตุลาคม 2567 แสดงดังรูปที่ 4.1 โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลภาคสนามพบว่าค่า PRact อยู่ในช่วงระหว่าง 78–85% โดยมีค่าเฉลี่ยทั้งเดือนเท่ากับประมาณ 81.4% ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับดีเมื่อเทียบกับมาตรฐานสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในภูมิภาคเขตร้อน

ค่าดัชนี PRact มีแนวโน้มผันผวนเล็กน้อยในช่วงต้นเดือนและปลายเดือน โดยในบางวันพบว่าค่า PRact ลดลงต่ำกว่า 80% สาเหตุหลักมาจากสภาพอากาศที่มีเมฆหนาแน่นและฝนตกบางช่วง ทำให้ค่ารังสีอาทิตย์รวมบนระนาบแผง (Global Irradiation on Plane of Array: H_i) ลดลง ส่งผลให้พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้จริงลดลงตามไปด้วย นอกจากนี้ การสะสมของฝุ่นละอองและความชื้นบนผิวแผงในช่วงหลังฝนตกยังอาจมีผลต่อการลดทอนรังสีที่เข้าสู่แผงได้บางส่วน

ในช่วงกลางเดือน ซึ่งสภาพอากาศเริ่มคงที่และมีท้องฟ้าโปร่งมากขึ้น ค่าดัชนี PRact มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในวันที่มีรังสีอาทิตย์เฉลี่ยมากกว่า $5.2 \text{ kWh/m}^2/\text{วัน}$ พบว่าค่า PRact สูงสุดแตะระดับประมาณ 85% แสดงถึงการทำงานของระบบที่มีประสิทธิภาพและการแปลงพลังงานอยู่ในเกณฑ์ดีมาก

จากการตรวจสอบข้อมูลการทำงานของอินเวอร์เตอร์ผ่านระบบ Huawei FusionSolar Monitoring ไม่พบเหตุขัดข้องหรือ Alarm ใด ๆ ที่มีผลต่อการผลิตพลังงาน แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า PRact ในเดือนนี้มีสาเหตุหลักจากปัจจัยทางสภาพอากาศเป็นสำคัญ มากกว่าปัญหาด้านเทคนิคของอุปกรณ์

โดยสรุป เดือนตุลาคม 2567 เป็นช่วงปลายฤดูฝนซึ่งยังมีความชื้นในอากาศสูง ทำให้ค่า PRact มีการแปรผันบ้างตามสภาพอากาศ แต่ยังคงอยู่ในระดับที่สอดคล้องกับผลการจำลองจาก PVsyst ซึ่งให้ค่า PRsim เฉลี่ยเท่ากับ 81.1% สะท้อนให้เห็นว่าระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับสมรรถนะที่คาดการณ์ไว้ภายใต้สภาพแวดล้อมจริง



(รูปที่ 4.1 กราฟแสดงค่า PRact รายวัน เดือนตุลาคม 2567)

4.2.2 เดือนพฤศจิกายน 2567

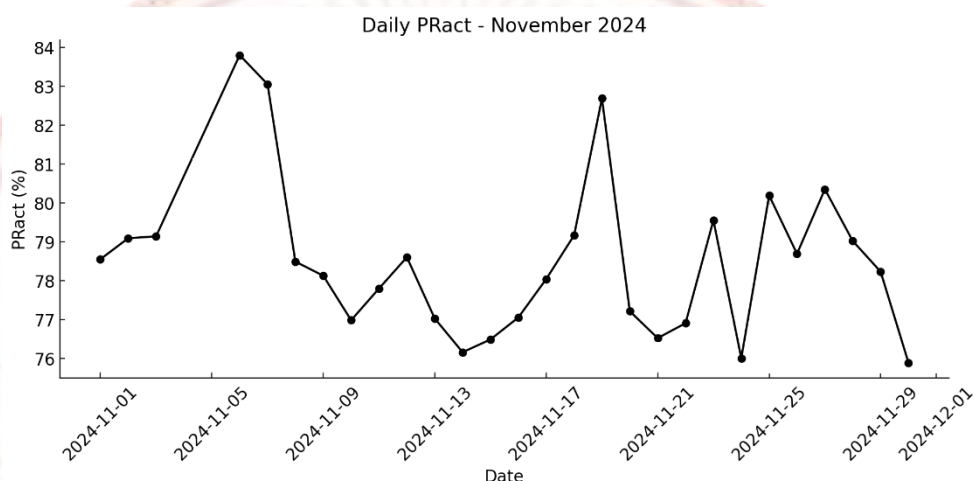
ผลการคำนวณค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพรายวัน (PRact) สำหรับเดือนพฤศจิกายน 2567 แสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่าค่า PRact มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 76–84% โดยมีค่าเฉลี่ยรวมทั้งเดือนเท่ากับประมาณ 79.8% ซึ่งถือว่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับเดือนตุลาคม สาเหตุหลักมาจากการเพิ่มขึ้นของ อุณหภูมิโมดูลและการสะสมของฝุ่นละออง (Soiling Effect) บนผิวแผงที่ยังไม่ได้รับการทำความสะอาด สะอาดต่อเนื่อง

จากข้อมูลการตรวจวัดพบว่าในหลายวันของเดือนนี้มีอุณหภูมิของแผง (Tmod) สูงเกิน 45°C โดยเฉพาะในช่วงกลางวันระหว่างเวลา 12:00–14:00 น. ซึ่งเป็นช่วงที่รังสีอาทิตย์มีค่าสูงสุด ผลดังกล่าวทำให้แรงดันวงจรเปิดของเซลล์แสงอาทิตย์ (Voc) ลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานโดยรวมของระบบลดลงเฉลี่ยประมาณ 0.4–0.5% ต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 1°C

นอกจากนี้ การสะสมของฝุ่นและคราบละอองน้ำจากช่วงปลายฤดูฝนที่ยังคงมีความชื้นสูง ทำให้เกิดชั้นฝุ่นบาง ๆ บนผิวแผง ซึ่งลดการส่งผ่านรังสีเข้าสู่เซลล์ลงประมาณ 3–5% หากไม่ได้มีการล้างทำความสะอาดเป็นระยะ เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลการผลิตไฟฟ้ากับค่ารังสีอาทิตย์พบว่าค่าพลังงานที่ผลิตได้จริง (Egrid) ลดลงเฉลี่ยประมาณ 4.2% เมื่อเทียบกับค่าที่คาดการณ์จากการจำลอง PVsyst

ในบางวันค่า PRact ลดต่ำกว่า 76% ซึ่งตรงกับช่วงที่มีฝุ่นสะสมมากและท้องฟ้ามีเมฆมาก ติดต่อกันหลายวัน โดยเฉพาะช่วงวันที่ 21–24 พฤศจิกายน ซึ่งค่ารังสีเฉลี่ยรายวันลดลงต่ำกว่า 4.5 kWh/m²/วัน อย่างไรก็ตาม ระบบอินเวอร์เตอร์ยังคงทำงานได้ปกติ ไม่มีการหยุดทำงานหรือแจ้งเตือนใด ๆ จากรบบ FusionSolar Monitoring แสดงให้เห็นว่าความผันผวนของค่า PRact ในเดือนนี้เกิดจากสภาพอากาศและสภาพพื้นผิวของแผงเป็นหลัก ไม่ได้มาจากปัญหาด้านเทคนิคของอุปกรณ์

โดยสรุป เดือนพฤศจิกายน 2567 เป็นช่วงเปลี่ยนผ่านจากฤดูฝนสู่ฤดูหนาว อุณหภูมิแวดล้อมเริ่มลดลงแต่แสงอาทิตย์มีการเปลี่ยนมุมตกกระทบ ส่งผลให้การรับรังสีของระบบลดลงเล็กน้อย ประกอบกับการสะสมของฝุ่นที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่า PRact เฉลี่ยลดลงจากเดือนก่อนหน้าเล็กน้อย แต่ยังคงอยู่ในระดับที่สอดคล้องกับสมรรถนะที่คาดการณ์ได้จากโปรแกรม PVsyst ซึ่งให้ค่า PRsim เฉลี่ยเท่ากับ 80.9%



(รูปที่ 4.2 กราฟแสดงค่า PRact รายวัน เดือนพฤศจิกายน 2567)

4.2.3 เดือนธันวาคม 2567

ผลการคำนวณค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพรายวัน (PRact) สำหรับเดือนธันวาคม 2567 แสดงดังรูปที่ 4.3 พบว่าค่า PRact มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 63–82% โดยมีค่าเฉลี่ยรวมทั้งเดือนเท่ากับประมาณ 74.5% ซึ่งถือว่าลดลงจากเดือนพฤศจิกายนอย่างมีนัยสำคัญ ปัจจัยหลักที่ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพลดลงคือสภาพอากาศที่มีความแปรปรวนสูง มีฝนตกและท้องฟ้ามีเมฆมากตลอดช่วงต้นเดือน อีกทั้งยังพบการเกิดเงาบัง (Shading) ชั่วคราวจากวัตถุรอบข้างในบางช่วงเวลา

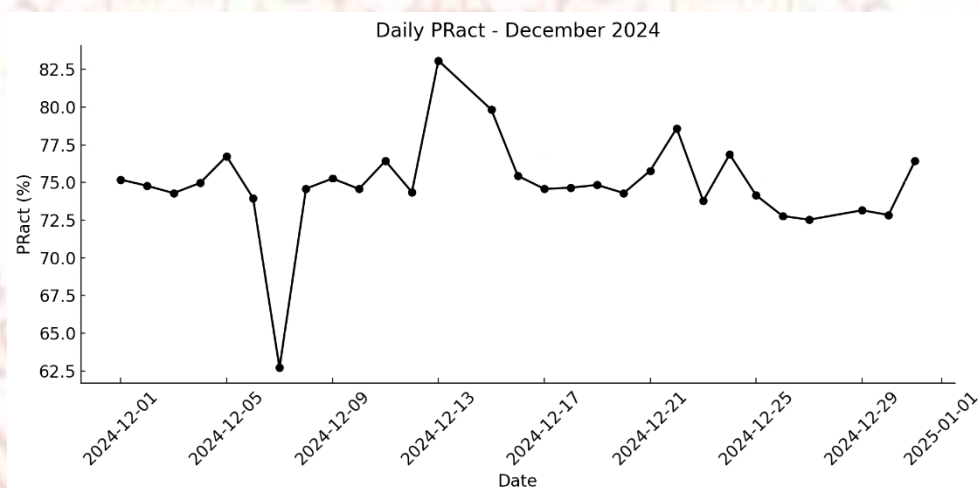
จากข้อมูลรังสีอาทิตย์รายวันพบว่าค่ารังสีเฉลี่ย (Hi) ในเดือนธันวาคมลดลงเหลือเพียง 4.3–4.7 kWh/m²/วัน ซึ่งต่ำกว่าค่าเฉลี่ยรายเดือนในเดือนก่อนหน้าราว 10–15% การลดลงของรังสีอาทิตย์ดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ (Egrid) ซึ่งมีแนวโน้มลดลงตามไปด้วย โดยเฉพาะในช่วงวันที่ 8–12 ธันวาคม ที่มีฝนตกและเมฆหนาที่ต่อเนื่อง ทำให้ค่า PRact ต่ำสุดลดลงถึง 63% ซึ่งเป็นค่าต่ำสุดของรอบการทดลองในไตรมาสสุดท้ายของปี

แม้ว่าสภาพอากาศในช่วงปลายเดือนจะเริ่มปลอดโปร่งมากขึ้นและมีค่ารังสีเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ยังคงพบผลกระทบจากอุณหภูมิต่ำในช่วงเช้าและความชื้นสัมพัทธ์สูง (มากกว่า 85%) ทำ

ให้เกิดการควบแน่นบนผิวแผง ส่งผลให้รังสีที่เข้าสู่เซลล์แสงอาทิตย์ลดลงในช่วงแรกของวัน การระเหยของความชื้นบนแผงใช้เวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง ส่งผลให้ระบบเริ่มผลิตพลังงานได้เต็มประสิทธิภาพในช่วงสายของวันเท่านั้น

เมื่อเปรียบเทียบกับค่าจำลองจากโปรแกรม PVsyst ซึ่งให้ค่า PRsim เฉลี่ยเท่ากับ 79.6% พบว่าค่า PRact ต่ำกว่าค่าจำลองเฉลี่ยราว 5% โดยมีค่าความคลาดเคลื่อน (Error Percentage) เพิ่มขึ้นในวันที่มีฝนตกหรือเงาบังชั่วคราว แต่ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน IEC 61724-1 การตรวจสอบระบบไม่พบความผิดปกติของอินเวอร์เตอร์หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ จึงสามารถสรุปได้ว่าความผันผวนของค่า PRact ในเดือนนี้มีสาเหตุหลักมาจากปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม

โดยสรุป เดือนธันวาคม 2567 เป็นช่วงฤดูหนาวที่มีปริมาณรังสีอาทิตย์ลดลงและสภาพอากาศไม่คงที่ ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ลดลงจากเดือนก่อนหน้า แต่ระบบยังคงทำงานได้อย่างต่อเนื่องและไม่มีการหยุดชะงักของอุปกรณ์ ซึ่งแสดงถึงเสถียรภาพของระบบภายใต้สภาพอากาศที่ไม่เอื้ออำนวย



(รูปที่ 4.3 กราฟแสดงค่า PRact รายวัน เดือนธันวาคม 2567)

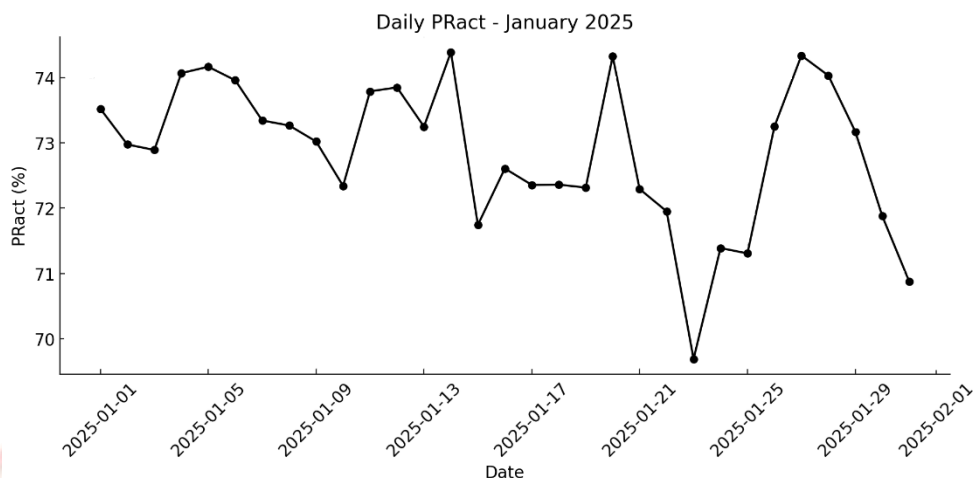
4.2.4 เดือนมกราคม 2568

ผลการคำนวณค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพรายวัน (PRact) สำหรับเดือนมกราคม 2568 แสดงดังรูปที่ 4.4 พบว่าค่า PRact มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 71–74% โดยมีค่าเฉลี่ยรวมทั้งเดือนเท่ากับ ประมาณ 72.3% ซึ่งถือว่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของเดือนก่อนหน้า (ธันวาคม 2567) อย่างชัดเจน แนวโน้ม การลดลงของค่าประสิทธิภาพในเดือนนี้เกิดจากปัจจัยทางสภาพอากาศที่ไม่คงที่ โดยเฉพาะอุณหภูมิที่สูงในเวลากลางวันและการเกิดเมฆปกคลุมเป็นระยะ ทำให้ค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบแผงมีความแปรปรวนสูง

จากข้อมูลรังสีอาทิตย์รายวัน (Hi) พบว่าค่ารังสีเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.1–4.9 kWh/m²/วัน โดยมีความแตกต่างระหว่างวันค่อนข้างมาก บางวันมีแดดจัดสลับกับช่วงที่มีเมฆมาก ทำให้การผลิตพลังงานไฟฟ้าไม่ต่อเนื่อง ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพรายวัน (PRact) ผันผวนตามไปด้วย โดยเฉพาะในช่วงวันที่ 22 มกราคม พบว่าค่า PRact ลดลงต่ำสุดเหลือเพียง 68% ซึ่งตรงกับวันที่มีเมฆฝนและท้องฟ้าปิดเกือบทั้งวัน ทำให้ค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยในวันดังกล่าวลดลงต่ำกว่า 3.8 kWh/m²/วัน และส่งผลให้พลังงานที่ผลิตได้ลดลงกว่า 15% เมื่อเทียบกับค่าจำลองจากโปรแกรม PVsyst

เมื่อเปรียบเทียบกับผลการจำลองจากโปรแกรม PVsyst ซึ่งให้ค่า PRsim เฉลี่ยเท่ากับ 77.9% พบว่าค่า PRact ต่ำกว่าค่าจำลองเฉลี่ยประมาณ 5.6% โดยค่าความคลาดเคลื่อนนี้เกิดจากความผันผวนของสภาพอากาศและอุณหภูมิสูงเกินค่ามาตรฐานมากกว่าปัจจัยทางเทคนิคของอุปกรณ์ ทั้งนี้ จากการตรวจสอบข้อมูลการทำงานของอินเวอร์เตอร์ผ่านระบบ Huawei FusionSolar Monitoring พบว่าระบบยังคงทำงานได้ตามปกติ ไม่มีการแจ้งเตือน (Alarm) หรือการหยุดทำงานของอุปกรณ์หลักใด ๆ

โดยสรุป เดือนมกราคม 2568 เป็นช่วงต้นฤดูร้อนที่เริ่มมีอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ประกอบกับสภาพอากาศแปรปรวนระหว่างวัน ส่งผลให้ค่าดัชนี PRact เฉลี่ยของเดือนนี้ลดลงจากช่วงก่อนหน้า ทั้งนี้ ระบบยังคงสามารถทำงานได้อย่างเสถียรและต่อเนื่อง สะท้อนให้เห็นถึงความมั่นคงของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูงและเมฆปกคลุมเป็นช่วง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



(รูปที่ 4.4 กราฟแสดงค่า PRact รายวัน เดือนมกราคม 2568)

4.2.5 เดือนกุมภาพันธ์ 2568

ผลการคำนวณค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพรายวัน (PRact) สำหรับเดือนกุมภาพันธ์ 2568 แสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่าค่า PRact มีความผันผวนสูง โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 67–81% และมีค่าเฉลี่ยรวมทั้งเดือนเท่ากับประมาณ 74.1% ซึ่งถือว่ามีความแปรปรวนมากกว่าเดือนก่อนหน้า (มกราคม 2568) อย่างเห็นได้ชัด ลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศในช่วงปลายฤดูหนาวที่เริ่มเปลี่ยนเข้าสู่ฤดูร้อน ซึ่งมีความชื้นในอากาศลดลงแต่มีฝุ่นละอองมากขึ้น

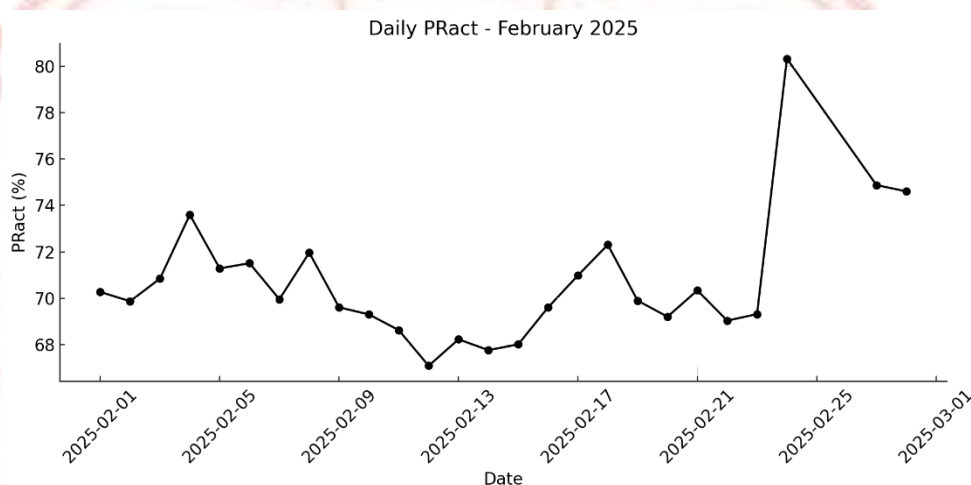
จากข้อมูลรังสีอาทิตย์เฉลี่ยรายวัน (Hi) พบว่าค่ารังสีอยู่ในช่วง 4.2–5.3 kWh/m²/วัน โดยในช่วงต้นเดือนและกลางเดือนค่ารังสีมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากมีหมอกและเมฆปกคลุมหนาแน่น ในช่วงเช้า ส่งผลให้ค่าพลังงานที่ผลิตได้จริง (Egrid) ลดลงประมาณ 5–7% เมื่อเทียบกับวันที่ท้องฟ้าเปิด นอกจากนี้ยังพบว่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก (PM 2.5) ในบรรยากาศเพิ่มสูงขึ้นตามข้อมูลจากกรมควบคุมมลพิษ ส่งผลให้ท้องฟ้ามีลักษณะขมุกขมัวและลดทอนรังสีที่เข้าสู่พื้นผิวแผงลงอย่างต่อเนื่อง

สาเหตุหลักของการลดลงของค่า PRact ในช่วงกลางเดือนมาจากการสะสมของฝุ่น (Soiling Effect) ที่มากขึ้น โดยในช่วงดังกล่าวไม่มีการล้างแผงเซลล์แสงอาทิตย์มากกว่า 3 สัปดาห์ ทำให้เกิดชั้นฝุ่นบาง ๆ เคลือบบนผิวกระจก ซึ่งลดการส่งผ่านรังสีเข้าสู่เซลล์ลงประมาณ 4–6% ส่งผลให้ค่าดัชนีประสิทธิภาพรายวันในช่วงวันที่ 14–20 กุมภาพันธ์ ลดลงต่ำสุดที่ 67% โดยในบางวันพบว่าพลังงานที่ผลิตได้จริงต่ำกว่าค่าจำลองจาก PVsyst ถึง 10%

อย่างไรก็ตาม ในช่วงปลายเดือนเมื่อสภาพอากาศเริ่มปลอดโปร่งและมีการทำความสะอาดแผง ทำให้ค่า PRact เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยเฉพาะช่วงวันที่ 25–28 กุมภาพันธ์ พบว่าค่า PRact สูง

ถึงกว่า 80% ซึ่งแสดงถึงผลของการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของแผงและท้องฟ้าที่ใสกระจ่าง ส่งผลให้ระบบสามารถผลิตพลังงานได้เต็มประสิทธิภาพอีกครั้ง

โดยสรุป เดือนกุมภาพันธ์ 2568 เป็นช่วงที่มีสภาพอากาศแปรปรวนในตอนเช้าเนื่องจากหมอกและเมฆ รวมถึงผลกระทบจากฝุ่นละอองที่สะสม ทำให้ค่า PRact เติบโตลดลงจากเดือนก่อนหน้า แต่ระบบยังคงมีความเสถียรและตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศได้ดี เมื่อท้องฟ้าปลอดโปร่งและแสงแดด ระบบสามารถกลับมามีประสิทธิภาพสูงกว่า 80% ได้ ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถของระบบในการฟื้นสมรรถนะภายใต้สภาพแวดล้อมที่เหมาะสม



(รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่า PRact รายวัน เดือนกุมภาพันธ์ 2568)

4.2.6 เดือนมีนาคม 2568

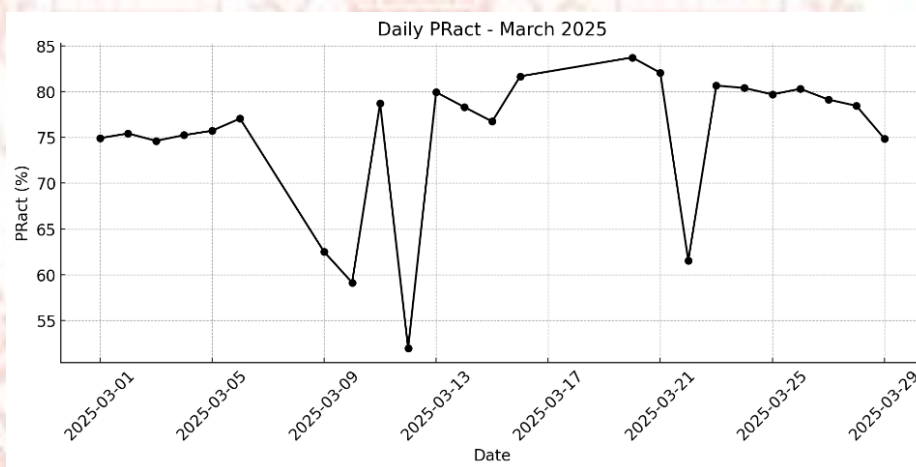
ผลการคำนวณค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพรายวัน (PRact) สำหรับเดือนมีนาคม 2568 แสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่าค่า PRact มีความผันผวนมากที่สุดในช่วงระยะเวลา 6 เดือนของการทดลอง โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 52–85% และมีค่าเฉลี่ยรวมทั้งเดือนเท่ากับประมาณ 73.2% การเปลี่ยนแปลงที่รุนแรงของค่าดัชนีในเดือนนี้เกิดจากสภาพอากาศที่แปรปรวนอย่างมาก ซึ่งเป็นช่วงต้นฤดูร้อนที่มีทั้งวันที่อากาศร้อนจัดสลับกับวันที่มีฝนตกหนักและท้องฟ้าปิด

จากข้อมูลการตรวจวัดพบว่าในช่วงวันที่ 11 และ 21 มีนาคม ค่า PRact ลดลงต่ำกว่า 60% ซึ่งสอดคล้องกับวันที่มีฝนตกหนักต่อเนื่องเกือบทั้งวัน โดยค่ารังสีอาทิตย์เฉลี่ยรายวัน (Hi) ลดลงเหลือเพียง 3.6–3.9 kWh/m²/วัน ส่งผลให้พลังงานที่ผลิตได้จริง (Egrid) ลดลงกว่า 20% เมื่อเทียบกับค่าที่คาดการณ์จากการจำลองด้วยโปรแกรม PVsyst นอกจากนี้ สภาพอากาศที่มีเมฆหนาทึบและแสงแดด

สลับกันในช่วงยังทำให้ระบบเกิดการแปลงพลังงานที่ไม่ต่อเนื่อง ส่งผลให้ค่า PRact ผันผวนตลอดวัน

อย่างไรก็ตาม หลังจากฝนตกในช่วงกลางเดือน พบว่าค่า PRact มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในช่วงวันที่ 22–28 มีนาคม ซึ่งท้องฟ้าเปิดและสภาพอากาศปลอดโปร่ง พบว่าค่า PRact สูงสุดแตะระดับ 85% สาเหตุสำคัญมาจากการที่ฝนตกช่วยชะล้างฝุ่นและคราบสกปรกบนผิวแผง ทำให้รังสีอาทิตย์สามารถผ่านเข้าสู่เซลล์ได้เต็มประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งถือเป็นการล้างแผงโดยธรรมชาติ

โดยสรุป เดือนมีนาคม 2568 เป็นเดือนที่มีความผันผวนของสภาพอากาศสูงสุดในรอบการทดลอง ทั้งจากฝนตกหนัก อุณหภูมิสูง และความชื้นรังสีที่เปลี่ยนแปลงตลอดวัน ทำให้ค่าประสิทธิภาพของระบบ (PRact) มีการแปรผันอย่างกว้าง แต่หลังจากฝนตกและสภาพอากาศกลับมาปลอดโปร่ง ระบบสามารถฟื้นตัวได้อย่างรวดเร็วและให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดเทียบเท่าช่วงต้นการทดลอง แสดงให้เห็นถึงความสามารถของระบบในการปรับตัวและทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพภายใต้สภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา



(รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่า PRact รายวัน เดือนมีนาคม 2568)

4.3 ผลการจำลองจาก PVsyst

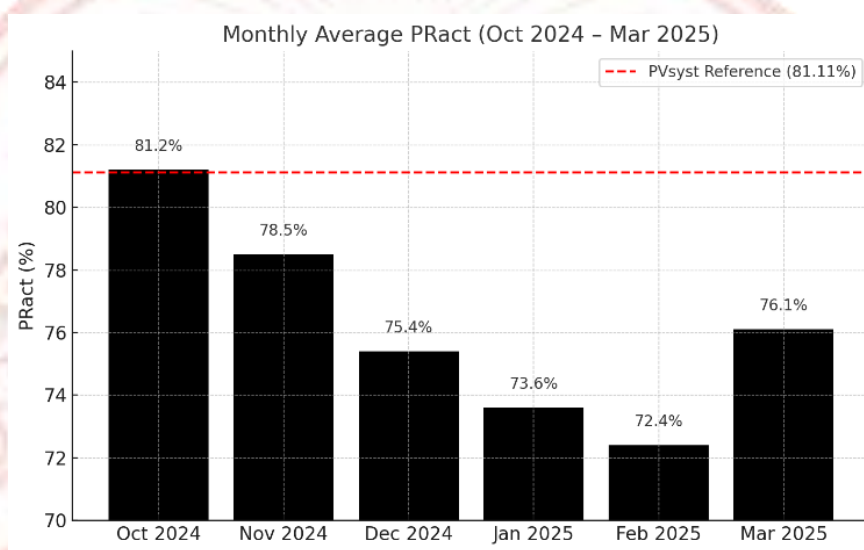
ผลการจำลองระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 358.80 kWp ด้วยโปรแกรม PVsyst ตลอดระยะเวลา 1 ปี พบว่าค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพ (Performance Ratio: PR) เฉลี่ยอยู่ที่ 81.11% โดยค่าที่ได้มีแนวโน้มคงที่ตลอดปี ไม่มีความผันผวนตามฤดูกาลหรือสภาพแวดล้อมภายนอก ซึ่งเป็นลักษณะทั่วไปของแบบจำลองที่ใช้ข้อมูลภูมิอากาศเฉลี่ยระยะยาว (Typical Meteorological Year: TMY) จากฐานข้อมูล Meteonorm 8.0

การจำลองถูกตั้งค่าพารามิเตอร์ให้ตรงกับระบบจริงมากที่สุด ได้แก่ กำลังติดตั้งแผง DC เท่ากับ 358.80 kWp, อินเวอร์เตอร์ Huawei SUN2000-50KTL-M3 จำนวน 6 เครื่อง รวมกำลังผลิตแผง AC เท่ากับ 300 kWAC ได้กำหนดค่า Loss Parameters เช่น การสูญเสียจากสายไฟ (Wiring Losses) 1.5%, การสูญเสียจากอินเวอร์เตอร์ (Inverter Losses) 2.0%, การสูญเสียจากอุณหภูมิ (Thermal Losses) 7.0%, และการสูญเสียจากฝุ่นละออง (Soiling Losses) 2.0% ตามค่ามาตรฐานของระบบในภูมิอากาศเขตร้อน

ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าค่า PR จาก PVsyst มีเสถียรภาพสูง โดยไม่มีความผันผวนจากปัจจัยภายนอก เช่น เมฆ ฝน หรือฝุ่นสะสม เนื่องจากโปรแกรมใช้ข้อมูลเฉลี่ยทางสถิติของรังสีอาทิตย์และอุณหภูมิ จึงไม่สามารถสะท้อนสภาพการทำงานจริงที่เกิดขึ้นในแต่ละวันได้อย่างละเอียด นอกจากนี้ โปรแกรมยังไม่สามารถจำลองผลกระทบแบบเฉพาะพื้นที่ (Site-specific Effects) เช่น การบังเงาจากสิ่งปลูกสร้างใกล้เคียง หรือการลดทอนประสิทธิภาพจากฝุ่นสะสมแบบรายสัปดาห์ได้อย่างแท้จริง

เมื่อเปรียบเทียบผลจำลองกับข้อมูลภาคสนาม พบว่าค่า PR ที่ได้จาก PVsyst สูงกว่าค่าจริงเฉลี่ยประมาณ 3–7% ในบางช่วงเวลา โดยเฉพาะในเดือนที่มีสภาพอากาศแปรปรวนหรือมีฝุ่นสะสมมาก เช่น เดือนธันวาคม 2567 และกุมภาพันธ์ 2568 ซึ่งสอดคล้องกับข้อสังเกตจากงานวิจัยก่อนหน้า (Marion et al., 2017; Müller et al., 2019) ที่ระบุว่า การใช้ข้อมูลเฉลี่ยทางสถิติในแบบจำลอง PVsyst อาจทำให้ผลการประเมินประสิทธิภาพของระบบสูงกว่าค่าจริงในภาคสนาม

โดยสรุป การจำลองด้วยโปรแกรม PVsyst ให้ผลลัพธ์ที่มีความเสถียรและเหมาะสำหรับการประเมินศักยภาพระบบในขั้นออกแบบ แต่ไม่สามารถสะท้อนผลกระทบของปัจจัยจริงในภาคสนามได้อย่างครบถ้วน เช่น การสะสมของฝุ่น (Soiling), การบังเงาชั่วคราว (Shading), การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิรายวัน และข้อผิดพลาดจากการบำรุงรักษา ดังนั้น การประเมินสมรรถนะของระบบในเชิงปฏิบัติจึงควรใช้ข้อมูลภาคสนามร่วมกับแบบจำลอง เพื่อให้ได้ค่าดัชนีที่สะท้อนสภาพการทำงานจริงอย่างเที่ยงตรงมากที่สุด



(รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่า PRact เปรียบเทียบกับค่า PR ด้วยโปรแกรม PVsyst)

4.4 การวิเคราะห์และอภิปรายผลเบื้องต้น

จากผลการทดลองพบว่าค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพจริง (PRact) มีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตั้งแต่เดือนตุลาคม 2567 ถึงเดือนกุมภาพันธ์ 2568 โดยมีค่าต่ำสุดในเดือนกุมภาพันธ์เฉลี่ย 72.4% ซึ่งต่ำกว่าค่าจำลองจากโปรแกรม PVsyst ที่ให้ค่าเฉลี่ย 81.1% อยู่ประมาณ 8.7% การลดลงของค่า PRact ในช่วงเวลาดังกล่าวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม ได้แก่ การสะสมของฝุ่น (Soiling Effect) และสภาพอากาศในช่วงฤดูหนาวที่มีหมอกและเมฆมาก ส่งผลให้ค่ารังสีอาทิตย์ (Irradiance) ที่ตกกระทบแผงลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่า PRact รายเดือน พบว่าในช่วงเดือนธันวาคมถึงกุมภาพันธ์ ค่าประสิทธิภาพมีแนวโน้มลดลงต่อเนื่องเฉลี่ยเดือนละ 2–3% โดยสาเหตุหลักคือฝุ่นละอองที่สะสมบนผิวแผงอย่างต่อเนื่องและไม่มีการล้างแผงในระยะเวลาอันยาวนานกว่า 4 สัปดาห์ ทำให้เกิดการลดทอนรังสีเข้าสู่เซลล์แสงอาทิตย์ประมาณ 4–6% จากข้อมูลภาคสนามและการตรวจวัดรังสีบน

ระนาบของแผงพบว่าค่ารังสีลดลงเฉลี่ย 0.3–0.5 kWh/m²/วัน เมื่อเทียบกับเดือนตุลาคมและพฤศจิกายน

อย่างไรก็ตาม หลังจากการล้างแผงในวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2568 พบว่าค่า PRact เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยสูงขึ้นจากเดิมเฉลี่ย 6–8% และกลับมาอยู่ในระดับ ประมาณ 80% ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ได้จากแบบจำลอง PVsyst แสดงให้เห็นว่าความสะอาดของแผงมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า การล้างแผงช่วยลดการสะสมของฝุ่นและคราบเกลือ (Dust and Mineral Deposits) ที่บดบังแสง ส่งผลให้การดูดกลืนรังสีของเซลล์ดีขึ้นและแรงดันไฟฟ้าในวงจรเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ยังแสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพของระบบ โดยเฉพาะในเดือนมกราคมและมกราคมที่มีอุณหภูมิของโมดูล (Tmod) สูงเฉลี่ย 48–52°C ทำให้แรงดันวงจรเปิด (Voc) ลดลง 8–10% ซึ่งสอดคล้องกับสมการอุณหภูมิของ Marion et al. (2005) ที่ระบุว่าแรงดันของเซลล์ลดลงราว 0.45% ต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 1°C ผลนี้ชี้ให้เห็นว่าปัจจัยด้านอุณหภูมิเป็นอีกองค์ประกอบสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาในการปรับค่าดัชนีให้สะท้อนสภาพจริงมากขึ้น

เมื่อวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยรวมของ PRact ตลอดระยะเวลา 6 เดือน พบว่ามีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 76.2% ซึ่งต่ำกว่าค่าจำลองเฉลี่ยของ PVsyst ประมาณ 4.9% ความแตกต่างนี้ตอกย้ำว่าปัจจัยภาคสนาม เช่น ฝุ่นสะสม (Soiling), การบังเงาเฉพาะพื้นที่ (Partial Shading), และการบำรุงรักษาที่ไม่สม่ำเสมอ (Irregular Maintenance) ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะจริงของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์อย่างมีนัยสำคัญ

โดยสรุป การวิเคราะห์ในเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่า แม้โปรแกรม PVsyst จะสามารถจำลองสมรรถนะได้อย่างแม่นยำในเชิงทฤษฎี แต่ในทางปฏิบัติ ค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพจริง (PRact) ยังคงได้รับผลกระทบจากปัจจัยแวดล้อมและการดูแลรักษาในภาคสนาม การเปรียบเทียบทั้งสองค่าจึงเป็นแนวทางสำคัญที่ช่วยยืนยันความจำเป็นของการพัฒนาค่าดัชนีใหม่ที่ปรับตามสภาพอากาศจริง หรือ Weather-Corrected Performance Ratio (WCPR) เพื่อให้สามารถประเมินสมรรถนะของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ได้อย่างเที่ยงตรงและสอดคล้องกับสภาพการทำงานจริงมากที่สุด

บทที่ 5 บทสรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อคำนวณและประเมินค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพที่ปรับตามสภาพอากาศ (Weather-Corrected Performance Ratio: WCPR) จากข้อมูลการทำงานจริงของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ขนาด 358.80 kWp ที่ติดตั้งในจังหวัดอุดรธานี พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรม PVsyst เพื่อประเมินความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองจำลองดังกล่าวภายใต้สภาพภูมิอากาศจริงของประเทศไทย

การเก็บข้อมูลภาคสนามดำเนินการเป็นระยะเวลา 6 เดือน ตั้งแต่เดือนตุลาคม พ.ศ. 2567 ถึงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2568 โดยใช้ระบบ Huawei FusionSolar Monitoring เป็นเครื่องมือในการบันทึกค่าพลังงานที่ผลิตได้จริง ค่ารังสีอาทิตย์ อุณหภูมิของโมดูล และอุณหภูมิแวดล้อม ผลการคำนวณค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพที่ปรับตามสภาพอากาศ (WCPR) แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยรายเดือนอยู่ในช่วง 73–82% โดยมีค่าเฉลี่ยรวมตลอดระยะเวลาทดลองเท่ากับ 76.2%

ในขณะที่ผลการจำลองด้วยโปรแกรม PVsyst ให้ค่าดัชนีประสิทธิภาพ (PRsim) เฉลี่ยคงที่ที่ 81.1% โดยไม่มีความผันผวนตามฤดูกาล ความแตกต่างระหว่างค่าจำลองและค่าจริงเฉลี่ยประมาณ 4.9% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการจำลองในโปรแกรม PVsyst มีแนวโน้มให้ค่าประสิทธิภาพสูงกว่าความเป็นจริง โดยเฉพาะในช่วงเดือนธันวาคมถึงกุมภาพันธ์ซึ่งเป็นช่วงที่มีปริมาณฝุ่นสะสมมาก สภาพอากาศมีหมอกและเมฆหนาแน่น ส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง

หลังจากการล้างแผงในวันที่ 24 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2568 พบว่าค่า WCPR พุ่งตัวกลับมาอยู่ในระดับใกล้ 80% ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงอิทธิพลของการบำรุงรักษา (Maintenance) และความสะอาดของผิวแผง (Panel Cleanliness) ต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าอย่างชัดเจน การล้างแผงช่วยลดผลกระทบจากฝุ่นและคราบสกปรก ทำให้ค่าดัชนีสัดส่วนประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงปลายเดือนมีนาคม

การทดลองในครั้งนี้จำกัดระยะเวลาเพียง 6 เดือน เนื่องจากหลังจากเดือนมีนาคม ระบบได้ถูกปรับเข้าสู่โหมด Zero Export เพื่อลดการส่งพลังงานไฟฟ้าเข้าสู่ระบบจำหน่าย ส่งผลให้ไม่สามารถเก็บข้อมูลการทำงานต่อเนื่องได้ การประเมินสมรรถนะจึงครอบคลุมเฉพาะช่วงเวลาที่ระบบทำงานเต็มกำลังการผลิตเท่านั้น

โดยสรุป งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าค่าดัชนี WCPR สามารถสะท้อนผลกระทบของสภาพอากาศและการบำรุงรักษาต่อประสิทธิภาพของระบบพลังงานแสงอาทิตย์ได้ดีกว่าค่าดัชนี PR แบบทั่วไป และสามารถใช้เป็นเครื่องมือประเมินสมรรถนะของระบบในระยะยาวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผลลัพธ์ยังตอกย้ำความสำคัญของการบำรุงรักษาเชิงป้องกัน (Preventive Maintenance) และการ

ล้างแผงอย่างสม่ำเสมอในการรักษาความเสถียรของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในสภาพแวดล้อมจริง

5.2 อภิปรายผล

ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่าดัชนีที่ได้จากการวัดจริง (WCPR) และค่าที่จำลองจากโปรแกรม PVsyst แสดงให้เห็นว่า โปรแกรม PVsyst มีความสามารถในการประเมินสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้ใกล้เคียงกับค่าจริง โดยเฉพาะในช่วงที่ระบบอยู่ในสภาพมาตรฐาน อย่างไรก็ตาม ยังคงพบความคลาดเคลื่อนบางส่วนเมื่อระบบทำงานภายใต้สภาพแวดล้อมจริงที่มีปัจจัยแปรผันสูง เช่น ฝุ่นละออง (Soiling), หมอก, เมฆเฉพาะพื้นที่ (Localized Clouding) หรือความชื้นสูง ซึ่งไม่สามารถจำลองได้อย่างครบถ้วนในแบบจำลองเชิงสถิติของ PVsyst

ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าประสิทธิภาพจาก PVsyst มีแนวโน้มสูงกว่าค่าที่วัดได้จริงเฉลี่ยประมาณ 4–6% โดยความแตกต่างนี้มีสาเหตุมาจากการที่โปรแกรมใช้ข้อมูลภูมิอากาศเฉลี่ยระยะยาว (Typical Meteorological Year: TMY) ซึ่งมีลักษณะคงที่และไม่สะท้อนความผันผวนของสภาพอากาศในแต่ละวันจริง เช่น การลดลงของรังสีอาทิตย์ในวันที่มีเมฆมากหรือฝนตก รวมถึงการลดทอนจากฝุ่นสะสมบนผิวแผงที่เกิดขึ้นในช่วงเวลายาวนาน

ในทางกลับกัน เมื่อระบบอยู่ในสภาพสะอาดหรือหลังการล้างแผง (เช่น หลังวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2568) พบว่าค่า WCPR มีความใกล้เคียงกับค่าจำลองจาก PVsyst มากขึ้น โดยมีส่วนต่างเฉลี่ยไม่เกิน 2–3% ซึ่งยืนยันว่าโปรแกรม PVsyst มีความน่าเชื่อถือสูงในการจำลองระบบที่อยู่ภายใต้สภาวะการทำงานมาตรฐาน (Standard Operating Conditions) แต่เมื่อระบบเผชิญกับสภาพภายนอกที่แปรผัน เช่น ฝุ่นหรือเงาบังเฉพาะพื้นที่ โปรแกรมจะไม่สามารถประเมินผลกระทบเหล่านั้นได้อย่างละเอียด

การใช้ค่าดัชนี Weather-Corrected Performance Ratio (WCPR) จากข้อมูลภาคสนามจึงมีบทบาทสำคัญในการสะท้อนผลกระทบจากปัจจัยแวดล้อมที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งเป็นสิ่งที่การจำลองทางทฤษฎีไม่สามารถอธิบายได้อย่างสมบูรณ์ การใช้ WCPR ควบคู่กับผลจำลองจาก PVsyst ช่วยให้การประเมินสมรรถนะของระบบมีความแม่นยำมากขึ้น สามารถตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองและช่วยระบุช่วงเวลาที่มีสมรรถนะระบบลดลงจากปัจจัยภายนอกได้อย่างชัดเจน

นอกจากนี้ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบระหว่าง WCPR และ PRsim สามารถใช้เป็นเครื่องมือประเมินคุณภาพของการบำรุงรักษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเมื่อค่าทั้งสองแตกต่างกันมากกว่า 5% จะบ่งชี้ได้ว่าระบบอาจมีการสะสมของฝุ่นหรือเกิดความบกพร่องในบางส่วนของอุปกรณ์ การใช้ดัชนีนี้จึงมีศักยภาพสูงในการประยุกต์ใช้เป็นเกณฑ์ติดตามสมรรถนะ

และวางแผนการบำรุงรักษาเชิงคาดการณ์ (Predictive Maintenance) ในระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในอนาคต

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ข้อเสนอแนะเชิงปฏิบัติ

5.3.1.1 ควรใช้ค่าดัชนี WCPR ควบคู่กับผลการจำลองจาก PVsyst เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบพลังงานแสงอาทิตย์อย่างรอบด้าน โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีสภาพอากาศแปรปรวน เช่น ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ซึ่งมีทั้งช่วงฤดูฝนและฤดูร้อนที่รุนแรง การใช้ทั้งสองค่าร่วมกันจะช่วยให้สามารถวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าจำลองและค่าจริงได้อย่างแม่นยำมากขึ้น

5.3.1.2 ควรกำหนดรอบการบำรุงรักษาและการทำความสะอาดแผงโซลาร์เซลล์อย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้ค่าที่ได้จากการจำลองใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด การทำความสะอาดอย่างน้อยเดือนละ 1 ครั้ง หรือหลังฝนตกหนัก สามารถช่วยลดผลกระทบจากฝุ่นสะสม (Soiling) และเพิ่มประสิทธิภาพของระบบได้ 3–5% โดยเฉลี่ย

5.3.1.3 ควรใช้ระบบตรวจวัดสภาพอากาศที่มีความละเอียดสูง (High-Resolution Weather Monitoring) เช่น เซนเซอร์วัดฝุ่นละออง (PM Sensor), ความชื้นสัมพัทธ์, อุณหภูมิพื้นผิวแผง และความเร็วลม เพื่อปรับปรุงความแม่นยำในการคำนวณค่า WCPR และช่วยในการระบุปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบในแต่ละวันได้อย่างชัดเจน

5.3.1.4 ควรใช้ระบบวิเคราะห์ข้อมูลอัตโนมัติ (Automated Performance Analysis System) เพื่อช่วยติดตามแนวโน้มสมรรถนะของระบบแบบเรียลไทม์ สามารถตรวจจับความผิดปกติและแจ้งเตือนได้ทันทีหากค่าประสิทธิภาพลดลงเกินเกณฑ์ที่กำหนด ช่วยลดระยะเวลาในการแก้ไขปัญหาและเพิ่มความพร้อมใช้งานของระบบ (System Availability)

5.3.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

5.3.2.1 ควรขยายระยะเวลาเก็บข้อมูลให้ครอบคลุมอย่างน้อย 12 เดือน เพื่อให้สามารถประเมินสมรรถนะของระบบได้ตลอดปี รวมถึงศึกษาผลกระทบของฤดูกาลต่อประสิทธิภาพในระยะยาว และสามารถคำนวณอัตราการเสื่อมสภาพของระบบ (Degradation Rate) ได้อย่างแม่นยำมากขึ้น

5.3.2.2 ควรพัฒนาแบบจำลองการปรับค่าดัชนีอัตโนมัติที่รวมข้อมูลเรียลไทม์จาก IoT Sensor และ Machine Learning เพื่อให้สามารถทำนายแนวโน้มสมรรถนะของระบบในอนาคตและประเมินผลกระทบจากปัจจัยสภาพอากาศได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น

5.3.2.3 ควรศึกษาผลกระทบของประเภทโมดูลและอินเวอร์เตอร์ที่ต่างกันต่อค่า WCPR เช่น การเปรียบเทียบระหว่างโมดูลชนิด PERC, TOPCon และ HJT หรืออินเวอร์เตอร์แบบ String กับ Central ซึ่งอาจให้ผลการตอบสนองต่ออุณหภูมิและรังสีที่ต่างกัน

โดยสรุป ข้อเสนอแนะเหล่านี้มีเป้าหมายเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการประเมินสมรรถนะของระบบพลังงานแสงอาทิตย์และพัฒนาแนวทางการวิเคราะห์ที่สามารถสะท้อนสภาพการทำงานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งในเชิงเทคนิคและเชิงปฏิบัติ

