

Chulalongkorn University

## Chula Digital Collections

---

Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)

---

2022

### การประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้น

พรกิตติ มหิทธิบุรินทร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์

Follow this and additional works at: <https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd>



Part of the [Electrical and Electronics Commons](#)

---

#### Recommended Citation

มหิทธิบุรินทร์, พรกิตติ, "การประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้น" (2022). *Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)*. 6565.  
<https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/6565>

This Thesis is brought to you for free and open access by Chula Digital Collections. It has been accepted for inclusion in Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD) by an authorized administrator of Chula Digital Collections. For more information, please contact [ChulaDC@car.chula.ac.th](mailto:ChulaDC@car.chula.ac.th).

การประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้วิธีการถดถอยเชิง  
เส้น



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2565  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EVALUATION OF PERFORMANCE DEGRADATION RATE OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS  
USING LINEAR REGRESSION



Mr. Pornkitti Mahitthiburin

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2022

Copyright of Chulalongkorn University

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์               | การประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้า |
|                                 | พลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้น     |
| โดย                             | นายพรกิตติ มหิทธิบุรินทร์                       |
| สาขาวิชา                        | วิศวกรรมไฟฟ้า                                   |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ศาสตราจารย์ ดร.วาทีต เบญจพลกุล                  |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม | รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เตชัสอนันต์           |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุรัชย์ ชัยทัศน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ศาสตราจารย์ ดร.วาทีต เบญจพลกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย เตชัสอนันต์)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ)

พรกิตติ มหิทธิบุรินทร์ : การประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้า  
พลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้น. ( EVALUATION OF PERFORMANCE  
DEGRADATION RATE OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS USING LINEAR  
REGRESSION) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.วาทิต เบญจพลกุล, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร.  
ธวัชชัย เตชสอนันต์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอถึงแนวทางการประเมินประสิทธิภาพและการเสื่อมสมรรถนะ  
ของระบบโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งในภูมิประเทศไทย การทดสอบได้ใช้ข้อมูลจากโรงไฟฟ้าพลังงาน  
แสงอาทิตย์ที่อำเภอทับสะแก จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ประกอบด้วยแผงโซลาร์เซลล์ที่ต่างกัน 3  
ชนิด ได้แก่ CIGS,  $\mu\text{-Si}$  และ  $\text{a-Si}$  งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 3 ส่วน; (1) การคำนวณ  
การลดลงประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ (2) การประเมินประสิทธิภาพของระบบโซลาร์เซลล์ (3)  
การประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะจากสมการเส้นตรงด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น และได้้นำ  
วิธีการแยกส่วนประกอบด้วยค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ กับโมเดล ARIMA มาใช้ร่วมกับวิธีการถดถอยเชิงเส้น  
จากการทดสอบการคำนวณประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์พบว่าอินเวอร์เตอร์ไม่มีผลต่ออัตราการ  
เสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์ การทดสอบการประเมินประสิทธิภาพพบว่าระบบโซลาร์  
เซลล์ที่ติดตั้งแผงชนิด  $\text{a-Si}$  มีค่า  $R_p$  เฉลี่ยรายปีสูงที่สุด และระบบโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งแผงชนิด  $\mu\text{-Si}$   
มีค่า  $R_p$  เฉลี่ยรายปีต่ำที่สุด การทดสอบการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะพบว่าระบบโซลาร์  
เซลล์ชนิด  $\mu\text{-Si}$  ให้ผลอัตราการเสื่อมสมรรถนะสูงสุด และระบบโซลาร์เซลล์ชนิด  $\text{a-Si}$  ให้ผลอัตรา  
การเสื่อมสมรรถนะต่ำสุด โดยการนำวิธีการแยกส่วนประกอบด้วยค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่และโมเดล  
ARIMA เข้ามาใช้ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้น ส่งผลให้ช่วยลดค่า RMSE ที่เกิดจาก error ของการ  
กระจายของ  $R_p$  จึงสามารถช่วยเพิ่มความแม่นยำในการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะได้ จาก  
ผลการเปรียบเทียบอัตราการเสื่อมสมรรถนะกับระยะเวลาการคืนทุนสามารถสรุปได้ว่าระบบโซลาร์  
เซลล์ที่ติดตั้งแผงชนิด  $\text{a-Si}$  มีความเหมาะสมสำหรับการติดตั้งในประเทศไทย เพราะมีค่ากำลังการ  
ผลิตเฉลี่ยสูงที่สุด ให้มีอัตราการเสื่อมสมรรถนะต่ำที่สุด และมีระยะเวลาคืนทุนไวที่สุด โดยข้อเสียที่  
มีข้อจำกัดเรื่องพื้นที่การติดตั้งเท่านั้น

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....

# # 6270172121 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORD: Photovoltaic system, PV module, Solar farm, PV Performance,  
Degradation rate

Pornkitti Mahitthiburin : EVALUATION OF PERFORMANCE DEGRADATION  
RATE OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS USING LINEAR REGRESSION. Advisor:  
Prof. WATIT BENJAPOLAKUL, Ph.D. Co-advisor: Assoc. Prof. THAVATCHAI  
TAYJASANANT, Ph.D.

The purpose of this research is to offer an analysis of the performance and degradation rate of photovoltaic (PV) systems in Thailand environment. This research uses data from the solar power plant at Thap Sakae, Prachuap Khiri Khan and the PV technologies which used in this research are CIGS,  $\mu\text{-Si}$ , and a-Si. This research separated into three parts; (1) Calculate the decreasing in efficiency of the inverters, (2) Evaluate the performance of the PV system, (3) Estimate the PV degradation rate by using linear regression, decomposition combined with linear regression and ARIMA combined with linear regression. As the result, the inverter does not affect the degradation rate of the PV system. The evaluation of performance shows that a-Si PV has the highest yearly  $R_p$  and  $\mu\text{-Si}$  PV has the lowest yearly  $R_p$ . The evaluation of PV degradation rate shows that the  $\mu\text{-Si}$  PV having the highest degradation rate and the a-Si PV having the lowest degradation rate. Combining the decomposition method and ARIMA with linear regression can lower the RMSE caused by the uncertainty of outliers, which improves the evaluation accuracy. Finally, the comparison of degradation rate and payback makes the a-Si PV technology the best option for the solar farm system in Thailand, which has the highest yearly  $R_p$ , lowest degradation rate, and fastest payback, but require a larger installation area as a drawback.

Field of Study: Electrical Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2022

Advisor's Signature .....

Co-advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือให้คำปรึกษา และการสนับสนุนจากอาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ศาสตราจารย์ ดร. วาทีต เบญจพลกุล ที่ได้ให้ข้อคิดเห็นในการทำการวิจัยและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ มาตลอด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์. ดร.สุรัชย์ ชัยทัศนีย์ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัชชัย เตชสื่อนันต์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล และรองศาสตราจารย์ ดร.ภูมิพัฒน์ แสงอุดมเลิศ ที่ได้ให้เกียรติมาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ในการชี้แนะแนวทางการปรับปรุงวิทยานิพนธ์ และข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณ คุณวัฒน์ศักดิ์ ศรีศิริ นิสิตระดับปริญญาตรีบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำถึงแนวทางในการเริ่มต้นทำการวิจัย และแนวทางในการเขียนงานวิจัย จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ล่วงหน้า

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยสำหรับการอำนวยความสะดวกของสถานที่ทำการวิจัย

ขอขอบคุณหน่วยงานจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่อำเภอทับสะแก จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ที่ให้การสนับสนุนด้านการให้ข้อมูลการผลิต เครื่องมือ และสถานที่ทำการวิจัย งานวิจัยฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยได้ขอบพระคุณครอบครัวของผู้วิจัยที่ให้ความสนับสนุนตลอดการศึกษานี้ และเป็นกำลังใจให้ผู้ทำวิจัยตลอดมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

พรกิตติ มหิทธิบุรินทร์

## สารบัญ

### หน้า

|  |    |
|--|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....   | ค  |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....  | ง  |
| กิตติกรรมประกาศ.....   | จ  |
| สารบัญ.....  | ฉ  |
| สารบัญตาราง.....   | ฉ  |
| สารบัญรูปภาพ.....  | ญ  |
| บทที่ 1 บทนำ .....   | 1  |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ .....   | 1  |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....  | 2  |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย .....  | 2  |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย.....   | 2  |
| บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและแนวคิดทฤษฎี.....   | 4  |
| 2.1 การทบทวนวรรณกรรม.....  | 4  |
| 2.1.1 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการประเมินประสิทธิภาพและการเสื่อมสมรรถนะของโซลาร์เซลล์ ..... | 4  |
| 2.1.2 สรุปผลการทบทวนวรรณกรรม.....  | 10 |
| 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....   | 11 |
| 2.2.1 การประเมินประสิทธิภาพของระบบโซลาร์เซลล์.....   | 11 |
| 2.2.1.1 ทฤษฎีการประเมินประสิทธิภาพของระบบโซลาร์เซลล์.....                                  | 11 |
| 2.2.2 การประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์ .....                              | 13 |
| 2.2.2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression).....                | 13 |



|   |    |
|---|----|
| 2.2.2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับวิธีการแยกองค์ประกอบอนุกรมเวลา (Classical Decomposition) .....  | 14 |
| 2.2.2.3 การใช้ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving average) ในการคำนวณแนวโน้มของข้อมูล .....   | 16 |
| 2.2.2.4 การคำนวณสมการเส้นตรงของ Regression line โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method).....                       | 17 |
| 2.2.2.5 ทฤษฎีเกี่ยวกับโมเดล ARIMA.....  | 18 |
| 2.2.3 การประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะของแผงโซลาร์เซลล์ด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น .  | 20 |
| 2.2.4 การประยุกต์ใช้ Machine learning เพื่อวิเคราะห์ข้อมูล .....  | 22 |
| 2.2.4.1 การทดสอบความเหมาะสมโมเดลโดยใช้ Machine learning .....   | 22 |
| บทที่ 3 วิธีการและแนวทางการทดสอบดำเนินการวิจัย .....  | 24 |
| 3.1 ข้อกำหนดทางเทคนิค (Specification) ของระบบโซลาร์เซลล์และอินเวอร์เตอร์ .....  | 24 |
| 3.1.1 โครงสร้างและข้อกำหนดทางเทคนิคของแผงโซลาร์เซลล์ .....  | 24 |
| 3.1.2 ข้อกำหนดทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์ .....   | 25 |
| 3.2 แนวทางการทดสอบการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์ .....  | 27 |
| 3.2.1 การกำหนดขอบเขตการทดสอบและพารามิเตอร์เพื่อลดความผิดพลาดของการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะ .....                          | 28 |
| 3.2.2 วิธีการทดสอบการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์โดยใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้น.....                            | 29 |
| 3.2.3 วิธีการทดสอบการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้น ..... | 29 |
| 3.2.4 วิธีการทดสอบการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์โดยใช้โมเดล ARIMA ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้น .....            | 30 |
| บทที่ 4 การทดสอบและผลการวิจัย .....   | 32 |
| 4.1 ระยะเวลาทดสอบและเก็บข้อมูล.....   | 32 |
| 4.2 ผลการทดสอบการประเมินประสิทธิภาพของระบบโซลาร์เซลล์.....  | 33 |

|   |    |
|---|----|
| 4.2.1 การทดสอบการประเมินประสิทธิภาพและเปรียบเทียบผลของระบบโซลาร์เซลล์ .....   | 33 |
| 4.2.2 การทดสอบความเกี่ยวข้องของอินเวอร์เตอร์ต่อการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์ .....                                     | 34 |
| 4.3 ผลการทดสอบการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์.....  | 35 |
| 4.3.1 ผลการทดสอบประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์โดยใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้น.....                               | 35 |
| 4.3.2 ผลการทดสอบการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้น ..... | 39 |
| 4.3.3 ผลการทดสอบการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์โดยใช้โมเดล ARIMA ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้น .....            | 42 |
| 4.4 สรุปผลการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะและการเปรียบเทียบของระบบโซลาร์เซลล์ .....  | 46 |
| 4.4.1 การเปรียบเทียบความเหมาะสมของโมเดลโดยใช้ Root mean square error (RMSE) .....   | 47 |
| 4.4.2 การเปรียบเทียบความเหมาะสมในการติดตั้งของแผงโซลาร์เซลล์โดยคำนึงถึงพื้นที่การติดตั้งและระยะเวลาการคืนทุน.....           | 49 |
| 4.4.3 การนำข้อมูลประสิทธิภาพและอัตราการเสื่อมสมรรถนะมาใช้ประโยชน์สำหรับวางแผนการผลิตไฟฟ้า .....                             | 50 |
| บทที่ 5 สรุป อภิปรายและข้อเสนอแนะการวิจัย.....  | 52 |
| บรรณานุกรม.....   | 54 |
| ประวัติผู้เขียน .....   | 58 |

## สารบัญตาราง

### หน้า

|   |    |
|---|----|
| ตารางที่ 1 ข้อกำหนดทางเทคนิคและรายละเอียดการติดตั้งของแผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้ในการทดสอบ .  | 25 |
| ตารางที่ 2 ข้อกำหนดทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ .....  | 26 |
| ตารางที่ 3 ระยะเวลาการเก็บข้อมูลการผลิตของระบบโซลาร์เซลล์ทั้ง 4 โซน.....  | 32 |
| ตารางที่ 4 สรุปพารามิเตอร์ที่ตรวจติดตาม และใช้ในการประเมินประสิทธิภาพและการเสื่อมสมรรถนะระบบโซลาร์เซลล์ .....   | 33 |
| ตารางที่ 5 ประสิทธิภาพเฉลี่ยรายปีของระบบโซลาร์เซลล์ โดยใช้พารามิเตอร์ Performance ratio (Rp).....   | 34 |
| ตารางที่ 6 การทดสอบความเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์กับประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ .....  | 34 |
| ตารางที่ 7 การคำนวณความเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์ด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น .....  | 38 |
| ตารางที่ 8 การคำนวณความเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้น.....   | 42 |
| ตารางที่ 9 การกำหนด Order ของโมเดล ARIMA สำหรับการคำนวณ .....   | 43 |
| ตารางที่ 10 การคำนวณความเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์ด้วยโมเดล ARIMA ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้น.....   | 46 |
| ตารางที่ 11 ผลการคำนวณ RMSE ของโมเดลที่ใช้ วิธีการถดถอยเชิงเส้น วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้น และโมเดล ARIMA ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้น ..... | 49 |
| ตารางที่ 12 พื้นที่การติดตั้งและระยะเวลาคืนทุนของระบบโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ อำเภอทับสะแก จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ .....          | 50 |

## สารบัญรูปภาพ

### หน้า

|   |    |
|---|----|
| รูปที่ 1 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสมรรถนะของแผงโซลาร์เซลล์.....  | 5  |
| รูปที่ 2 ตัวอย่างการถดถอยเชิงเส้นเพื่อหาสมการเส้นตรง (Regression line) จากกราฟรูปแบบ Scatter plot .....           | 14 |
| รูปที่ 3 การจำแนกข้อมูลอนุกรมเวลาโดยใช้วิธีการแยกองค์ประกอบ .....   | 15 |
| รูปที่ 4 การคำนวณหาแนวโน้มของข้อมูลโดยใช้ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ .....  | 16 |
| รูปที่ 5 ส่วนประกอบของโมเดล ARIMA.....  | 20 |
| รูปที่ 6 การใช้ Linear regression เพื่อคำนวณแนวโน้มของ Performance ratio ในการประเมิน อัตราการเสื่อมสมรรถนะ ..... | 21 |
| รูปที่ 7 แผนผังระบบโซลาร์เซลล์ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์อำเภอทับสะแก จังหวัด ประจวบคีรีขันธ์ .....              | 24 |
| รูปที่ 8 ตำแหน่งของเซ็นเซอร์ตรวจติดตามข้อมูลการผลิตของระบบโซลาร์เซลล์ระหว่างอินเวอร์เตอร์ .....                   | 26 |
| รูปที่ 9 ผังงานลำดับการคำนวณอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์.....  | 27 |
| รูปที่ 10 กราฟฮิสโตแกรมแสดงถึงช่วงความถี่ของของปริมาณ Performance ratio เฉลี่ยรายวันที่ได้ จากการคำนวณ.....       | 28 |
| รูปที่ 11 ตัวอย่างการใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้นเพื่อคำนวณเส้น regression line และสมการเส้นตรง                        | 29 |
| รูปที่ 12 ขั้นตอนของการแยกส่วนประกอบโดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่เพื่อหาแนวโน้มของข้อมูล Performance ratio .....  | 30 |
| รูปที่ 13 ตัวอย่างกราฟแนวโน้มของข้อมูล Performance ratio ที่ได้จากการคำนวณด้วยโมเดล ARIMA .....                   | 31 |
| รูปที่ 14 กราฟแสดงประสิทธิภาพเฉลี่ยรายเดือนและกราฟการถดถอยเชิงเส้นของระบบโซลาร์เซลล์ ชนิด CIGS (Zone A) .....     | 35 |

|  |    |
|--|----|
| รูปที่ 15 กราฟแสดงประสิทธิภาพเฉลี่ยรายเดือนและกราฟการถดถอยเชิงเส้นของระบบโซลาร์เซลล์ชนิด $\mu\text{-Si}$ (Zone C) .....  | 36 |
| รูปที่ 16 กราฟแสดงประสิทธิภาพเฉลี่ยรายเดือนและกราฟการถดถอยเชิงเส้นของระบบโซลาร์เซลล์ชนิด a-Si (Zone D).....  | 36 |
| รูปที่ 17 กราฟแสดงประสิทธิภาพเฉลี่ยรายเดือนและกราฟการถดถอยเชิงเส้นของระบบโซลาร์เซลล์ชนิด a-Si (Zone E).....  | 37 |
| รูปที่ 18 กราฟแสดงประสิทธิภาพเฉลี่ยรายเดือนและกราฟการถดถอยเชิงเส้นของระบบโซลาร์เซลล์ทั้ง 4 โซน .....   | 37 |
| รูปที่ 19 การเกิดฟองอากาศบนแผงโซลาร์เซลล์ในโซน A(CIGS).....  | 38 |
| รูปที่ 20 กราฟเส้นตรงแสดงค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของประสิทธิภาพการผลิตและการถดถอยเชิงเส้นของระบบโซลาร์เซลล์ชนิด CIGS (Zone A) .....   | 40 |
| รูปที่ 21 กราฟเส้นตรงแสดงค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของประสิทธิภาพการผลิตและการถดถอยเชิงเส้นของระบบโซลาร์เซลล์ชนิด $\mu\text{-Si}$ (Zone C) .....                              | 40 |
| รูปที่ 22 กราฟเส้นตรงแสดงค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของประสิทธิภาพการผลิตและการถดถอยเชิงเส้นของระบบโซลาร์เซลล์ชนิด a-Si (Zone D) .....   | 40 |
| รูปที่ 23 กราฟเส้นตรงแสดงค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของประสิทธิภาพการผลิตและการถดถอยเชิงเส้นของระบบโซลาร์เซลล์ชนิด a-Si (Zone E).....  | 41 |
| รูปที่ 24 กราฟเส้นตรงแสดงค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของประสิทธิภาพการผลิตและการถดถอยเชิงเส้นของระบบโซลาร์เซลล์ทั้ง 4 โซน .....   | 41 |
| รูปที่ 25 กราฟแสดงแนวโน้มประสิทธิภาพเฉลี่ยรายเดือนและกราฟเส้นตรงที่ได้จากการใช้โมเดล ARIMA ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้นของระบบโซลาร์เซลล์ชนิด CIGS (Zone A).....            | 43 |
| รูปที่ 26 กราฟแสดงแนวโน้มประสิทธิภาพเฉลี่ยรายเดือนและกราฟเส้นตรงที่ได้จากการใช้โมเดล ARIMA ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้นของระบบโซลาร์เซลล์ชนิด $\mu\text{-Si}$ (Zone C)..... | 44 |
| รูปที่ 27 กราฟแสดงแนวโน้มประสิทธิภาพเฉลี่ยรายเดือนและกราฟเส้นตรงที่ได้จากการใช้โมเดล ARIMA ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้นของระบบโซลาร์เซลล์ชนิด a-Si (Zone D).....            | 44 |
| รูปที่ 28 กราฟแสดงแนวโน้มประสิทธิภาพเฉลี่ยรายเดือนและกราฟเส้นตรงที่ได้จากการใช้โมเดล ARIMA ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้นของระบบโซลาร์เซลล์ชนิด a-Si (Zone E).....            | 45 |

|  |    |
|--|----|
| รูปที่ 29 กราฟแสดงแนวโน้มประสิทธิภาพเฉลี่ยรายเดือนและกราฟเส้นตรงที่ได้จากการใช้โมเดล<br>ARIMA ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้นของระบบโซลาร์เซลล์ทั้ง 4 โซน..... | 45 |
| รูปที่ 30 แผนภูมิเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของระบบโซลาร์เซลล์ทั้ง 4 โซน.....   | 47 |



## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันการใช้พลังงานหมุนเวียนเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากปัญหาสิ่งแวดล้อมและราคาของแผงโซลาร์เซลล์ที่ถูกลง อีกทั้งโซลาร์เซลล์ได้มีการยอมรับว่าเป็นแหล่งผลิตไฟฟ้าที่ราคาถูกที่สุดโดย IEA (International Energy Agency) ในปี 2020 ทำให้ผู้ใช้ไฟฟ้าพิจารณาถึงการเปลี่ยนมาใช้พลังงานหมุนเวียนมากขึ้นและส่งผลให้อัตราพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากระบบโซลาร์เซลล์มีการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในประเทศไทยปี 2020 มีกำลังการผลิตของแผงโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งทั้งหมดเท่ากับ 3939.8 MW<sub>p</sub> [1] อีกทั้งประเทศไทยยังเป็นหนึ่งในประเทศที่ผลิตและจำหน่ายทั้งในรูปแบบระบบบนหลังคา (rooftop) และรูปแบบระบบขนาดใหญ่ (large scale) เช่นโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ โดยแบ่งเป็นติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์เพื่อจำหน่าย กับติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์เพื่อลดค่าใช้จ่ายของค่าไฟฟ้า

อย่างไรก็ตามพลังงานที่ผลิตจากโซลาร์เซลล์จะไม่มีความแน่นอนเนื่องจากปัจจัยทางธรรมชาติที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตของตัวแผงโซลาร์เซลล์ลดลง และผลิตไฟฟ้าได้น้อยลงตามระยะเวลาการใช้งาน สิ่งนี้เรียกว่าการเสื่อมสมรรถนะ (Degradation) จึงเป็นเหตุผลที่ทำให้การพยากรณ์และการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะนั้นมีความสำคัญ เพราะเมื่อการอัตราเสื่อมสมรรถนะของแผงโซลาร์เซลล์สูง ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ก็ลดลงและส่งผลกระทบต่อรายได้ในอนาคต ผวนวกกับผู้เขียนได้ร่วมทำโครงการวิจัยและพัฒนาระบบวิเคราะห์สภาพและตรวจติดตามเซลล์แสงอาทิตย์ ร่วมกับการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และได้รับข้อมูลจากโซลาร์ฟาร์มที่อำเภอทับสะแก จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ซึ่งแบ่งเป็น 5 โซน (A, B, C, D และ E) ประกอบด้วยแผงโซลาร์เซลล์ต่างกัน 4 ชนิด ได้แก่ Copper indium gallium selenide (CIGS), Crystalline silicon (c-Si), Micro crystalline silicon thin film ( $\mu$ c-Si) และ Amorphous silicon thin film (a-Si) โดยโซน D และ E ใช้แผงชนิดเดียวกัน ทำให้พลังงานและรายได้ที่ได้รับในแต่ละโซนก็ต่างกันออกไปเช่นกัน ซึ่งผู้เขียนคำนึงถึงความสำคัญของการทดสอบประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์เพื่อเป็นตัวช่วยในการเลือกชนิดของแผงโซลาร์เซลล์ในการติดตั้งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับภูมิประเทศและภูมิอากาศของประเทศไทยที่อยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตร ทำให้ได้รับปริมาณแสงแดดที่สูงตลอดทั้งปี

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อเสนออัลกอริทึมสำหรับประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ใช้แผงโซลาร์เซลล์ชนิดต่างๆ
2. เพื่อเปรียบเทียบอัตราการเสื่อมสมรรถนะของแผงโซลาร์เซลล์ในระดับ DC กับอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ในระดับ AC

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. งานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบความเหมาะสมสำหรับการติดตั้งระบบโซลาร์เซลล์ชนิดซิลิคอนที่เทคโนโลยีการผลิตที่แตกต่างกัน โดยติดตั้งในภูมิภาคประเทศไทย ได้แก่ CIGS, Amorphous silicon thin film และ Micro crystalline ที่ติดตั้งในโซลาร์ฟาร์มที่อำเภอทับสะแก จังหวัดประจวบคีรีขันธ์
2. งานวิจัยนี้จะคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบและความเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์เท่านั้น
3. งานวิจัยนี้จะเปรียบเทียบอัตราการเสื่อมสมรรถนะที่คำนึงถึงแผงโซลาร์เซลล์อย่างเดียว ที่งานวิจัยในปัจจุบันได้นำเสนอกับอัตราการเสื่อมสภาพที่คำนึงถึงทั้งระบบโซลาร์เซลล์ที่ได้จากอัลกอริทึมของงานวิจัยนี้
4. การทดลองจะทดสอบโดยใช้ข้อมูลจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ทับสะแก จังหวัดประจวบคีรีขันธ์
5. ตัวแปรที่ใช้ในการทดสอบนี้ได้แก่ ความเข้มแสง แรงดัน กระแส จำนวน String และ Array ข้อกำหนดของแผงโซลาร์เซลล์และอินเวอร์เตอร์ โดยใช้ข้อมูลจากโซลาร์ฟาร์มที่อำเภอทับสะแก จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ที่ได้มีการตรวจติดตามตั้งแต่ปี 2018-2022

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1. แนวทางในการประเมินประสิทธิภาพของระบบโซลาร์เซลล์ โดยใช้ข้อมูลที่ได้รับจากการตรวจติดตามอัตโนมัติ



2. แนวทางการวิเคราะห์ข้อมูลความเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์ โดยใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้น
3. ช่วยในการวางแผนปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ในอนาคต โดยอ้างอิงจากอัตราความเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์
4. ช่วยในการวางแผนการซ่อมบำรุงรักษาของระบบโซลาร์เซลล์
5. ช่วยเป็นแนวทางในการอ้างอิงสำหรับการเลือกใช้แผงโซลาร์เซลล์และพื้นที่ในการติดตั้งในประเทศไทย



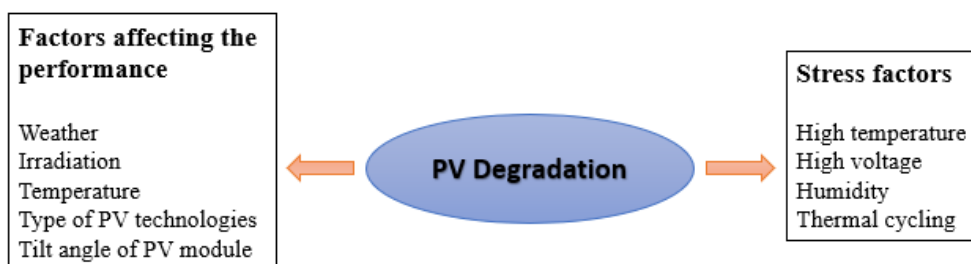
## บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและแนวคิดทฤษฎี

### 2.1 การทบทวนวรรณกรรม

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบโซลาร์เซลล์ การประเมินประสิทธิภาพและการเสื่อมสมรรถนะทำให้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ พร้อมแนวทางการพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับการคำนวณประสิทธิภาพและสามารถวิเคราะห์อัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์ได้ เพอร์เซ็นต์อัตราการเสื่อมสมรรถนะของแผงโซลาร์เซลล์แต่ละเทคโนโลยีในภูมิภาคประเทศ รวมถึงเทคโนโลยีและกระบวนการที่ใช้ในการคำนวณในปัจจุบัน เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงและต่อยอดเพื่อนำมาวิเคราะห์การประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะรายปีในประเทศไทย โดยงานวิจัยและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องมีดังนี้

#### 2.1.1 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการประเมินประสิทธิภาพและการเสื่อมสมรรถนะของโซลาร์เซลล์

Vikrant Sharma [2] ได้ทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพ และกลไกที่ทำให้เกิดความเสื่อมสภาพของแผงโซลาร์เซลล์ในระยะยาว โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนได้แก่ ส่วนแรกกล่าวถึงผลกระทบของอุณหภูมิและความเข้มแสงต่อกราฟ I-V ที่บ่งบอกถึงพลังงานที่ผลิตได้ โดยจำนวนความเข้มแสงที่ได้รับส่งผลให้ผลิตพลังงานได้มากขึ้น ในทางกลับกันอุณหภูมิสูงทำให้ผลิตพลังงานได้น้อยลงและส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานของแผงโซลาร์เซลล์ ส่วนที่สองกล่าวถึงพารามิเตอร์ที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ Final yield ( $Y_F$ ), Reference yield ( $Y_R$ ), Performance ratio (PR) และ PVUSA rating ซึ่งอ้างอิงจากมาตรฐาน IEC 61724 ส่วนที่สามกล่าวถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตของเซลล์แสงอาทิตย์ได้แก่ สภาพอากาศ อุณหภูมิ ความเข้มแสง ชนิดของแผงโซลาร์เซลล์ มุมติดตั้งของแผงโซลาร์เซลล์ และปัจจัยที่เร่งการเสื่อมสภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ อุณหภูมิและแรงดันที่สูง ความชื้น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ และ UV ดังรูปที่ 1 พร้อมกับระบุผลกระทบที่เกิดจากปัจจัยข้างต้น เช่น อุณหภูมิและแรงดันสูงส่งผลให้เกิดการอาร์ก (Electric Arc) และสมการประเมินเวลาใช้งานโดยใช้อัตราการเสื่อมสภาพต่อปีกับจุดเสื่อมสภาพ จึงสรุปได้ว่าการเสื่อมสภาพในการผลิตของแผงโซลาร์เซลล์จะเป็นในรูปแบบกราฟเส้นตรงในการใช้งานระยะยาว และมีความแตกต่างกันในแต่ละพื้นที่ ทำให้การเรียนรู้พฤติกรรมการผลิตและการเสื่อมสภาพของแผงโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งในภูมิภาคประเทศที่แตกต่างกัน สามารถช่วยวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพได้



**รูปที่ 1** ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเสื่อมสมรรถนะของแผงโซลาร์เซลล์

Alexander Phinikarides [3] ได้รวบรวมและทบทวนถึงวิธีการคำนวณอัตราการเสื่อมสภาพ ( $R_D$ ) สำหรับแผงโซลาร์เซลล์ของงานวิจัยในอดีตถึงปัจจุบัน เนื่องจากอัตราการเสื่อมสภาพสามารถคำนวณได้หลายวิธี และในแต่ละวิธีก็มีความแม่นยำที่ต่างกัน ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์เก็บข้อมูล, ความถูกต้องของข้อมูล และกระบวนการกรองข้อมูล โดยขั้นตอนการคำนวณอัตราการเสื่อมสภาพแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลัก ขั้นแรกจำเป็นต้องวิเคราะห์และกำหนดพารามิเตอร์ในการประเมินประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า กระบวนการประเมินประสิทธิภาพสามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ (1) กราฟ I-V, (2) Regression model, (3) Normalized ratings เช่น Performance ratio, (4) Scaled ratings เช่น  $P/P_{MAX}$  โดยกราฟ I-V สามารถคำนวณหาอัตราการเสื่อมสภาพได้ทันทีจากการเปรียบเทียบ เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง (Percentage error) ระหว่างโซลาร์เซลล์ 2 แผง ส่วนวิธีที่ 2-4 จำเป็นต้องคำนวณในส่วนที่สองเพื่อหาอัตราการเสื่อมสภาพต่อไป ส่วนที่สองได้นำข้อมูลประสิทธิภาพจากกระบวนการแรกมาวิเคราะห์เชิงสถิติ ในรูปแบบกราฟแนวโน้ม (trend) ในแต่ละช่วงเวลา โดยมีความชันของกราฟแนวโน้มสามารถนำมาคำนวณเพื่อหาอัตราการเสื่อมสภาพประจำปีได้ กระบวนการวิเคราะห์เชิงสถิติในงานวิจัยปัจจุบันมีทั้งหมด 4 วิธี ได้แก่ (1) Linear Regression (LR), (2) Classical Seasonal Decomposition (CSD), (3) Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) และ (4) Locally Weighted Scatterplot Smoothing (LOESS) โดยวิธี Linear Regression เป็นวิธีที่นิยมใช้ในงานวิจัยมากที่สุด เนื่องจากวิธีที่ 2-4 เป็นวิธีที่ซับซ้อนมากกว่า ในส่วนสุดท้ายงานวิจัยนี้ได้สรุปอัตราการเสื่อมสภาพจากงานวิจัยต่างๆ โดยวิธีเปรียบเทียบจากกราฟ I-V ให้ผลเปอร์เซ็นต์อัตราการเสื่อมสภาพได้ต่ำที่สุด, LR และ CSD มีความแม่นยำและการกระจายของข้อมูลในระดับปานกลาง ส่วนวิธี ARIMA กับ LOESS แม้ว่าจำนวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องน้อยที่สุด เนื่องจากความซับซ้อนของการคำนวณแต่ให้ผลแม่นยำและมีอัตราความผิดพลาดในการประเมินของข้อมูลน้อยที่สุด

Santiago Silvestre [4] กล่าวถึงวิธีการประเมินประสิทธิภาพและอัตราการเสื่อมสภาพของแผงโซลาร์เซลล์ โดยมีจุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบแผงโซลาร์เซลล์ต่างชนิดที่ติดตั้งในภูมิภาคประเทศเขตทะเลทราย เพื่อทดสอบว่าแผงโซลาร์เซลล์ชนิดใดสามารถใช้งานได้ยาวนานและคุ้มค่าที่สุด การทดลองนำแผงโซลาร์เซลล์ 3 ชนิด ได้แก่ Multi-crystalline, Mono-crystalline และ Heterojunction ทำการติดตั้งแล้วเปรียบเทียบประสิทธิภาพและอัตราการเสื่อมสภาพ ในการคำนวณหาอัตราการเสื่อมสภาพ ได้ใช้วิธี Linear regression โดยสามารถหาได้จากกราฟ 2 แบบ ได้แก่ กราฟ Peak power และกราฟ Performance ratio เฉลี่ยในแต่ละเดือนเป็นระยะเวลาทั้งหมด 3 ปีหลังการติดตั้ง หลังจากทำ Linear regression แล้ว จึงสามารถคำนวณหาความเสื่อมสภาพโดยใช้ความชันและจุดตัวแกน y จากสมการเส้นตรง ทำให้สามารถบ่งบอกว่าแผงโซลาร์นี้มีอัตราเสื่อมสภาพเป็นกี่เปอร์เซ็นต์ต่อปี จากผลการทดลองแม้ว่า Heterojunction มีอัตราการผลิตที่ให้ผล Peak power เฉลี่ยสูงที่สุด แต่จากการสังเกตพบว่าค่า Peak power ในปีถัดมามีค่าลดลงอย่างมากถึง 6% ซึ่งทำให้ Heterojunction มีอัตราการเสื่อมสภาพที่สูงที่สุด ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า Mono-crystalline จึงเหมาะสมในการติดตั้งในพื้นที่แถบทะเลทราย เพราะมีอัตราการเสื่อมสภาพต่ำที่สุด และมีค่า Peak power รองลงมาจาก Heterojunction

Amornrat Limmanee [5] กล่าวถึงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตและอัตราการเสื่อมสภาพของแผงโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งในประเทศไทยขนาด 10 kW มีแผงโซลาร์เซลล์ทั้งหมด 5 ชนิด ได้แก่ Polycrystalline, Heterojunction, Thin-film silicon, Amorphous silicon และ Copper indium gallium selenide (CIGS) ประเทศไทยมีภูมิอากาศแบบเขตร้อนที่มีอุณหภูมิปานกลางแต่มีความชื้นสูง ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่ออัตราการเสื่อมสภาพ งานวิจัยนี้ได้ใช้ Performance ratio (PR) ในการวัดประสิทธิภาพ โดยแบ่งสมการออกเป็น 2 แบบ คือแบบที่ไม่มีอุณหภูมิเกี่ยวข้องกับแบบที่มีอุณหภูมิเกี่ยวข้อง เนื่องจากแผงโซลาร์เซลล์แต่ละชนิดมี Temperature coefficient (TC) ที่ต่างกัน ซึ่งบอกถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแส แรงดัน และกำลังไฟฟ้าต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ จากนั้นนำค่า PR ในแต่ละเดือนมาทำ Linear regression เพื่อหาอัตราการเสื่อมสภาพในหน่วยเปอร์เซ็นต์ต่อปี ผลการทดลองสรุปได้ว่าโซลาร์เซลล์ชนิด CIGS, Thin-film silicon และ Heterojunction ที่มี Temperature coefficient ต่ำกว่า  $-0.31\%/^{\circ}\text{C}$  มีข้อได้เปรียบในประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานในประเทศไทย แต่ในระยะยาวพบว่าประสิทธิภาพในการผลิตลดลง เป็นผลมาจากการเสื่อมสภาพ โดยเปอร์เซ็นต์การเสื่อมสภาพต่อปีของแผงโซลาร์เซลล์ทั้ง 5 ชนิด ได้แก่ Polycrystalline (0.5%), Heterojunction (1.8%), Thin-film silicon (2%), Amorphous silicon

(5%) และ CIGS (2.8%) ซึ่งความแตกต่างในการผลิตพลังงานจะเห็นในช่วงตั้งแต่ 5 ปีขึ้นไป และคาดว่าจะเห็นผลชัดเจนตั้งแต่ 15 ปีขึ้นไป จึงสรุปได้ว่าแผงโซลาร์เซลล์ที่ต่างชนิดและต่างผู้ผลิตมีอัตราการผลิตที่ต่างกัน รวมถึงภูมิภาคที่ติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ด้วยเช่นกัน

Santiago Silvestre [6] กล่าวถึงพฤติกรรมการเสื่อมสภาพของแผงโซลาร์เซลล์ชนิด thin-film ที่มีอัตราการติดตั้งสูงขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากมีราคาถูกและมี Temperature coefficient ที่ต่ำทำให้อุณหภูมิไม่ส่งผลต่อการผลิตมาก แต่แผงโซลาร์เซลล์ชนิด thin-film มีพฤติกรรมการเสื่อมสภาพต่างจากแผงโซลาร์เซลล์ปกติ เป็นผลมาจาก Light induced degradation (LID) ที่ทำให้อัตราการเสื่อมสภาพสูงในช่วงแรกของการติดตั้งแล้วจึงเข้าสู่จุดเสถียรภาพ (Stabilization) โดยงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบอัตราการเสื่อมสภาพ และระยะเวลาที่อัตราการเสื่อมสภาพถึงจุดเสถียรภาพ ของแผงโซลาร์เซลล์ thin-film 4 ชนิด ได้แก่ Cadmium Telluride (CdTe), Copper indium gallium selenide sulphide (CIGS), Amorphous silicon (a-Si) และ Micromorph ในภูมิภาคแบบเมดิเตอร์เรเนียน การทดสอบได้กรองเฉพาะข้อมูลที่มีค่าความเข้มแสงมากกว่า  $700 \text{ W/m}^2$  และการคำนวณอัตราการเสื่อมสภาพสามารถประเมินได้จากการใช้วิธี Linear regression ของประสิทธิภาพกำลังสูงสุด (Effective peak power) เฉลี่ยในแต่ละเดือน จุดเสถียรภาพสามารถใช้วิธี Power-irradiance (P-G) โดยใช้กราฟกำลังไฟฟ้า DC ( $P_{DC}$ ) และกราฟ Gradient ที่คำนวณได้จากสมการ โดยใช้กำลังไฟฟ้า DC, ความเข้มแสง และกำลังไฟฟ้า DC ที่ความเข้มแสงเท่ากับศูนย์ ซึ่งช่วงแรกกราฟจะมีลักษณะดังลงอย่างเห็นได้ชัด จากนั้นกราฟจึงกลับมาถึงจุดเสถียรภาพในรูปแบบ Sinusoidal โดยผลการเปรียบเทียบทำให้สรุปได้ว่าแผงโซลาร์เซลล์ชนิด CIGS มีความเสถียรภาพมากที่สุด รวมถึงอัตราการเสื่อมสภาพและการสูญเสียพลังงานน้อยที่สุด

Nabil Kahoul [7] กล่าวถึงการคำนวณหาอัตราการเสื่อมสภาพของแผงโซลาร์เซลล์ในภูมิภาคทะเลทราย โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน (I-V) เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพในการผลิตหรือส่วนที่ชำรุด การทดสอบอัตราการเสื่อมสภาพสามารถประเมินได้จากการเปรียบเทียบลักษณะกราฟระหว่างกระแสกับแรงดัน (I-V characteristics) ระหว่างแผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้งานในระยะเวลาหนึ่งกับแผงโซลาร์เซลล์ที่เพิ่งใช้งาน การทดลองได้นำแผงโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งใหม่เป็นตัวอ้างอิง ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ใกล้เคียงกับ datasheet มาเปรียบเทียบกับแผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้งานแล้ว 11 ปี เพื่อคำนวณหาค่า FD% (Degradation factor) โดยผลการเปรียบเทียบได้บอกถึงอัตราการลดลงของพลังงานที่ผลิตได้ เช่น กระแส แรงดัน รวมถึงความต้านทาน ข้อมูลข้างต้นนี้สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของความผิดปกติในระบบ ในกรณีที่ค่า FD% สูงกว่าปกติ และ

สามารถวิเคราะห์สาเหตุของการเสื่อมสภาพ เช่น เมื่อแผงโซลาร์เซลล์มีค่าความต้านทาน ( $R_s$ ) สูงขึ้น และความชันของกราฟ I-V ลดลง สามารถบอกได้ว่ามีสาเหตุมาจากการติดตั้งในเขตที่อุณหภูมิที่สูง

Zhijun Peng [8] กล่าวถึงผลกระทบของความเข้มแสงและอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานและอายุการใช้งานของแผงโซลาร์เซลล์ โดยวัดกระแส แรงดัน พลังงาน และประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้า ที่ความเข้มแสงและอุณหภูมิที่ต่างกัน การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกจะทดลองผลกระทบของความเข้มแสง และในส่วนที่สองจะทดลองกับอุณหภูมิเมื่อความเข้มแสงคงที่ โดยติดตั้งระบบทำความเย็นช่วยควบคุมอุณหภูมิ ผลการทดลองพบว่าในสภาพแวดล้อมที่ความเข้มแสงสูงมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าสูงขึ้น ในทางกลับกันพบว่าเมื่อแผงโซลาร์เซลล์ได้รับอุณหภูมิเพิ่มขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพในการผลิตสูงขึ้น แต่เมื่ออุณหภูมิสูงถึงระดับหนึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพเริ่มลดลงเป็นรูปแบบกราฟพระจันทร์คว่ำ จากการทดลองสรุปได้ว่าความเข้มแสงและอุณหภูมิส่งผลต่อการผลิตไฟฟ้า โดยความเข้มแสงสูงทำให้ผลิตไฟฟ้าได้สูง แต่ในทางกลับกันอุณหภูมิที่สูงเกินไปส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า ทำให้การติดตั้งระบบทำความเย็นและควบคุมอุณหภูมิมีส่วนช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตของแผงโซลาร์เซลล์ได้

Labar Hocine [9] กล่าวถึงการพยากรณ์อายุการใช้งานของแผงโซลาร์เซลล์ เพื่อคาดการณ์ระยะเวลาในการใช้งานแผงโซลาร์เซลล์ก่อนที่จะเกิดการเสื่อมสภาพ โดยการอัตราการเสื่อมสภาพตามมาตรฐานจะอยู่ที่ 0.8%/ปี แต่ในความเป็นจริงอัตราการเสื่อมสภาพจะมากกว่า 0.8%/ปี เนื่องจากมีตัวแปรหลายตัวที่เร่งให้การเสื่อมสภาพเร็วขึ้น เช่น การเสื่อมสภาพของอุปกรณ์ภายในแผงโซลาร์เซลล์, การออกแบบและสภาพแวดล้อมภายนอก ทำให้การเสื่อมสภาพไวกว่าค่ามาตรฐานเสมอ โดยวรรณกรรมนี้ได้สร้างอัลกอริทึมโดยใช้ข้อมูลในอดีตมาวิเคราะห์ เช่น กระแส, แรงดัน, อุณหภูมิ และความเข้มแสง ทำให้สามารถจำแนกสาเหตุที่แผงโซลาร์เซลล์ผลิตพลังงานได้น้อยลงนั้น เกิดจากการ Shading, อุณหภูมิ หรือแผงโซลาร์เซลล์การเสื่อมสภาพจริงๆ รวมถึงคำนวณหารายได้จากการลงทุน (investment payback) ในส่วนสุดท้ายวรรณกรรมนี้ได้แนะนำแนวทางว่าควรทำอย่างไรหลังแผงโซลาร์เซลล์ถึงจุดเสื่อมสภาพ ซึ่งวรรณกรรมนี้ได้เสนอแนวทางการนำแผงโซลาร์เซลล์ที่เสื่อมสภาพแล้วไปใช้ซ้ำ (Reuse) ในระบบปั๊มน้ำสำหรับการเกษตรที่ใช้ปริมาณกำลังไฟฟ้าน้อย ทำให้สามารถยืดอายุการใช้งานของแผงโซลาร์เซลล์ได้อีก 8 ปี เนื่องจากปัจจุบันเทคโนโลยีการกำจัดของเสียจากแผงโซลาร์เซลล์ยังไม่พัฒนาเท่าที่ควร และเป็นการเพิ่มรายได้จากการลงทุนจากแผงโซลาร์เซลล์

Mari B. Øgaard [10] กล่าวถึงปัญหาจากการตรวจติดตามข้อมูลที่ได้ไม่แม่นยำ เนื่องจากมีบางช่วงเวลาเกิดความผิดพลาดสูง โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดความไม่เสถียรที่เกิดจากตัวแปรที่เกิดจากธรรมชาติ เช่น หิมะ, Curtailment, ความเข้มแสงที่ไม่เท่ากันในระบบ และความเบาบางของแสงและกรอง (filtering) ข้อมูลที่มีความผิดพลาดออกไป ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทดลองและศึกษาพฤติกรรมข้างต้น เพื่อหาขอบเขตในการกรองข้อมูลที่มีความไม่เสถียร โดยที่ข้อมูลที่สำคัญไม่ถูกรองทิ้งไปด้วยข้อมูลที่ทำการ filtering จำแนกได้เป็น 3 หัวข้อหลักๆคือ (1) ข้อมูลไม่สมบูรณ์ (invalid data) ทำให้ไม่สามารถ monitor ค่าพลังงานที่ผลิตได้ โดยเกิดจากหิมะและการจำกัดการผลิตของ inverter (2) ข้อมูลที่ไม่เกาะกลุ่ม สาเหตุมาจากการ shading และความเข้มแสงที่ไม่เท่ากัน (3) ช่วงเวลาที่ทำให้ข้อมูลไม่เสถียร (Unstable periods) พบว่าช่วงเวลาที่มีความเข้มแสงน้อยทำให้เกิด noise ในข้อมูลสูง โดยจะนำข้อมูลทั้งหมดมาคำนวณหาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) และหาช่วงเวลาและความเข้มแสงที่มีค่า SD น้อยกว่า 0.1 ในงานวิจัยนี้คือช่วงความเข้มแสงน้อยกว่า  $50 \text{ W/m}^2$  และช่วงที่ดวงอาทิตย์ทำมุมน้อยกว่า  $20^\circ$  ซึ่งวิธีนี้มีประสิทธิภาพมากที่สุด ไม่เพียงแต่ลดความไม่เสถียรหรือ noise ได้สูงที่สุด แต่ยังคงข้อมูลที่มีประโยชน์ไว้ในฐานข้อมูล เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์ต่อไป

Ngoc Thien Le [11] กล่าวถึงวิธีการประเมินประสิทธิภาพของระบบโซลาร์เซลล์โดยใช้ Machine learning มี จุดประสงค์เพื่อทดสอบว่าโครงสร้างของระบบโซลาร์เซลล์ที่มีจำนวนแผงโซลาร์เซลล์และอินเวอร์เตอร์ที่ต่างกัน ส่งผลต่อการผลิตพลังงานหรือไม่ จากการทดลองได้นำ Lifetime energy yield ( $Y_L$ ) มาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพ ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างพลังงานที่ผลิตต่อค่าพิกัดกำลัง (rated power) เพื่อประเมินกำลังการผลิตรายเดือนกับรายปี จากนั้นได้นำ Machine learning โดยจะแบ่งเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกได้นำ Bootstrap มาใช้ในการทำ t-test เพื่อเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างกลุ่มตัวอย่างสองกลุ่ม และตรวจสอบความแตกต่าง ทำให้สามารถเปรียบเทียบความแตกต่างของระบบโซลาร์เซลล์ได้ ในส่วนที่สองได้นำ Multiple linear regression เพื่อประเมินความเกี่ยวข้องของค่า input หลายตัว ว่ามีความเกี่ยวข้องกับ output มากเพียงใด โดยใช้ input เป็นจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ พลังงานพิกัดของแผงโซลาร์เซลล์ จำนวนอินเวอร์เตอร์ พลังงานพิกัดของอินเวอร์เตอร์ มุมเอียงของแผงโซลาร์เซลล์ สถานที่ติดตั้ง และ output เป็น energy yield จากการทดสอบสรุปได้ว่าส่วนประกอบของระบบโซลาร์เซลล์ เช่นจำนวนแผงโซลาร์เซลล์ และจำนวนอินเวอร์เตอร์ส่งผลต่อการผลิตพลังงาน แต่ไม่ส่งผลมากเท่ากับจุดติดตั้ง มุมเอียง และการเกิด Shading บนแผงโซลาร์เซลล์

### 2.1.2 สรุปผลการทบทวนวรรณกรรม

จากตัวอย่างงานวิจัยที่ได้นำเสนอวิธีคำนวณประสิทธิภาพและอัตราการเสื่อมสมรรถนะ รวมถึงผลกระทบของพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการผลิตไฟฟ้าของแผงโซลาร์เซลล์ ทำให้ทราบว่าอุณหภูมิและความชื้นมีผลต่อการผลิตไฟฟ้าและทำให้อัตราการเสื่อมสภาพในแต่ละประเทศไม่เท่ากัน การวิเคราะห์การเสื่อมสภาพประจำปีนั้น จำเป็นต้องคำนวณประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าเสมอ โดยใช้พารามิเตอร์ Performance ratio เป็นตัวกำหนด เนื่องจากเป็นวิธีที่ใช้ได้กับแผงโซลาร์เซลล์ทุกประเภท จากนั้นจึงใช้แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น (Linear regression) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมมากที่สุดในการคำนวณอัตราการเสื่อมสภาพประจำปีได้ ซึ่งนอกจากจะคำนวณหาการเสื่อมสภาพได้แล้ว ยังได้สมการและอัลกอริทึมของชนิดแผงโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งในภูมิอากาศในประเทศที่คำนวณอีกด้วย

โครงร่างวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงนำเสนองานวิจัยที่สร้างอัลกอริทึมสำหรับคำนวณประสิทธิภาพและอัตราการเสื่อมสภาพ เช่น แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น ของแผงโซลาร์เซลล์ต่างชนิด ที่ติดตั้งในประเทศไทย เพื่อเป็นแนวทางวัดค่าการเสื่อมสภาพของระบบโซลาร์เซลล์สำหรับการเสื่อมสภาพประจำปี รวมถึงพฤติกรรมของการเสื่อมสภาพของแผงโซลาร์เซลล์ต่างชนิดที่ใช้วัสดุและเทคโนโลยีที่ต่างกัน ทำให้สามารถใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงต่อการวางแผนเลือกติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ให้เหมาะสมต่อภูมิประเทศไทย การเก็บข้อมูลจากโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์สำหรับการวิเคราะห์การเสื่อมสภาพประจำปีนั้น การวิเคราะห์จำเป็นต้องใช้ข้อมูลการผลิตพลังงาน ความเข้มแสง รวมถึงอุณหภูมิตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน ในการจำลองการถดถอยเชิงเส้น และการกรองข้อมูลเหมาะสม เพื่อให้อัตราการเสื่อมสภาพมีความแม่นยำมากขึ้น เนื่องจากค่าพารามิเตอร์บางจุดมีค่าสูงหรือต่ำกว่าปกติ ทำให้มีผลต่อข้อมูลเฉลี่ยทั้งหมด จากตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่กล่าวถึงข้างต้นส่วนใหญ่มีเป้าหมายในการประเมินอัตราการเสื่อมสภาพของแผงโซลาร์เซลล์ที่ผลิตโดยใช้วัสดุที่ต่างกัน (CIGS, Heterojunction, Amorphous silicon, Mono-crystalline และ Multi-crystalline) แต่ไม่ได้วิเคราะห์อัตราการเสื่อมสภาพของโซลาร์เซลล์ของทั้งระบบ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงขอเสนออัลกอริทึมสำหรับการประเมินอัตราการเสื่อมสภาพโดยคำนึงถึงโครงสร้างของระบบโซลาร์เซลล์ ซึ่งในงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้คำนึงถึงเพียงในส่วนองวัสดุของแผงโซลาร์เซลล์เท่านั้น ทำให้สามารถนำมาเป็นแนวทางในการออกแบบโครงสร้าง และปรับปรุงคุณภาพการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ได้ต่อไป



## 2.2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้จะบอกถึงหลักการและข้อมูลพื้นฐานในการคำนวณอัตราการเสื่อมสมรรถนะของแผงโซลาร์เซลล์ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับอ้างอิงสำหรับตรวจสอบและบำรุงรักษาแผงโซลาร์เซลล์ ซึ่งประกอบด้วยทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับตัวแปรที่ส่งผลต่อการผลิตไฟฟ้าของแผงโซลาร์เซลล์ การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า และการพยากรณ์ความเสื่อมสมรรถนะของแผงโซลาร์เซลล์ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับการตรวจติดตามความเสื่อมสมรรถนะ และใช้เป็นตัวแปรในการตัดสินใจและวางแผนซ่อมบำรุง โดยสามารถประยุกต์ใช้ในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ให้มีการทำงานที่มั่นคงขึ้นได้

### 2.2.1 การประเมินประสิทธิภาพของระบบโซลาร์เซลล์

อัตราการเสื่อมสมรรถนะบอกถึงปริมาณการลดลงของกำลังการผลิตต่อเวลา เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการอ้างอิงอัตราการลดลงของกำลังการผลิต การวางแผนในอนาคต และตรวจสอบความผิดปกติของการผลิตในกรณีเมื่อพบว่าอัตราการเสื่อมสมรรถนะที่ประเมินในช่วงเวลาหนึ่งมีค่าสูงกว่าปกติ ซึ่งการประเมินประสิทธิภาพของระบบโซลาร์เซลล์ ได้นำ Performance ratio ที่เป็นอัตราส่วนระหว่างกำลังการผลิตกับความเข้มแสงที่ได้รับ แสดงถึงพลังงานที่ผลิตได้หลังจากหักลบการสูญเสียพลังงานจากการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์

#### 2.2.1.1 ทฤษฎีการประเมินประสิทธิภาพของระบบโซลาร์เซลล์

ปัจจุบันวัสดุที่ใช้ผลิตแผงโซลาร์เซลล์มีความหลากหลายมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานของแผงโซลาร์เซลล์ต่างชนิดไม่เท่ากัน รวมถึงสภาพภูมิประเทศก็ส่งผลต่ออัตราการผลิตพลังงานเช่นกัน ระบบโซลาร์เซลล์รูปแบบเชื่อมต่อกัน (grid-connected) ประกอบด้วยแผงโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งในรูปแบบ array และอินเวอร์เตอร์ การประเมินประสิทธิภาพการผลิตของทั้งระบบแบ่งออกถึงอัตราส่วนการผลิตพลังงานและการสูญเสียพลังงานสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ (1) การสูญเสียพลังงานจากการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า และ (2) การสูญเสียพลังงานของทั้งระบบ ดังนั้นจึงมีวิธีการประเมินประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์ต่างชนิดได้ โดยใช้ตัวแปรที่สามารถนำมาใช้ในการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพ ได้แก่ Yield และ Performance ratio (PR) [12] ซึ่ง Yield คือผลหารระหว่างปริมาณพลังงานที่ผลิตต่อกำลังการผลิตของแผงโซลาร์เซลล์ทั้งหมด มีหน่วยเป็น kWh/kWp โดยสามารถแบ่งเป็น 3 ส่วน ได้แก่ (1) Array yield, (2) Final yield และ (3) Reference yield และสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

(1) Array yield ( $Y_A$ ) คืออัตราส่วนพลังงาน DC จาก array ของแผงโซลาร์เซลล์ที่ผลิตได้ในแต่ละช่วงเวลา (รายวัน, รายเดือน, รายปี) ต่อพิกัดกำลังไฟฟ้าของระบบโซลาร์เซลล์ทั้งหมด (Rated power)

$$Y_A = \frac{E_{pv}(DC)}{P_{o, rated}} \quad (1)$$

(2) Final yield ( $Y_f$ ) คือพลังงานของแผงโซลาร์เซลล์ที่ผลิตได้ในแต่ละช่วงเวลา (รายวัน, รายเดือน, รายปี) จากอินเวอร์เตอร์โดยเป็นพลังงานรูปแบบ AC ต่อพิกัดกำลังไฟฟ้าของทั้งระบบ (rated power)

$$Y_f = \frac{E_{pv}(AC)}{P_{o, rated}} \quad (2)$$

(3) Reference yield ( $Y_r$ ) คืออัตราส่วนระหว่างความเข้มแสงทั้งหมดที่ตกกระทบบนแผงโซลาร์เซลล์ต่อความเข้มแสงที่ทดสอบตามเงื่อนไขมาตรฐาน Standard test condition เพื่อทดสอบกำลังการผลิต โดยมีค่าความเข้มแสงเท่ากับ  $1,000 \text{ W/m}^2$

$$Y_r = \frac{G_i}{G_{STC}} \quad (3)$$

โดยกำหนดให้

$E_{pv}(DC)$  คือ ค่าพลังงานไฟฟ้า DC ที่ผลิตจากแผงโซลาร์เซลล์ (kWh)

$E_{pv}(AC)$  คือ ค่าพลังงานไฟฟ้า AC ที่ผลิตจากระบบผลิตไฟฟ้าทั้งหมด (kWh)

$P_{o, rated}$  คือ ขนาดพิกัดของระบบผลิตไฟฟ้าที่ติดตั้ง (kWp)

$G_i$  คือ ค่าความเข้มแสงของดวงอาทิตย์ ( $\text{kWh/m}^2$ )

$G_{STC}$  คือ ค่าความเข้มแสงของดวงอาทิตย์ตามมาตรฐาน Standard Test Condition ( $\text{W/m}^2$ )

Normalized rating เป็นหนึ่งในวิธีที่ใช้ประเมินและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งในพื้นที่และสภาพอากาศที่ต่างกัน รวมถึงการออกแบบที่ต่างกัน [3] โดยวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือ Performance ratio ( $R_p$ ) ดังสมการที่ (4) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่าง Final yield และ Reference yield บอกถึงข้อมูลการสูญเสียพลังงานที่เกิดจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเช่น อุณหภูมิ, การตกกระทบของแสง และการเสื่อมของแผงโซลาร์เซลล์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างอัตราการผลิตจริง

กับอัตราการผลิตในอุดมคติ (ideal) โดยองค์การ IEA PVPS (international energy agency Photovoltaic Power Systems Programme) ได้รวบรวม Performance ratio ของระบบโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งในหลายๆประเทศ และสรุปได้ว่าระบบโซลาร์เซลล์ที่มี Performance ratio เฉลี่ยรายปี สูงกว่าหรือเท่ากับ 75% เป็นระบบที่มีการออกแบบได้ดี [13] ระบบที่มีค่า Performance ratio ต่ำ เกิดได้จากสาเหตุการบังเงา และเกิดข้อบกพร่องในระบบ เช่นอินเวอร์เตอร์ขัดข้อง (inverter failure), ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ต่ำ, การระบายความร้อน และแผงโซลาร์เซลล์ชำรุด

Performance ratio สามารถคำนวณได้ในหลายรูปแบบช่วงเวลา เช่น รายวัน, รายสัปดาห์, รายเดือน, รายปี ทำให้วิธีนี้เป็นจุดเด่นเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น [3] โดยมีสมการดังนี้

$$R_p = \frac{Y_f}{Y_r} \times 100 \quad (4)$$

โดยกำหนดให้

$R_p$  (Performance ratio) คือ อัตราส่วนประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของระบบ

## 2.2.2 การประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์

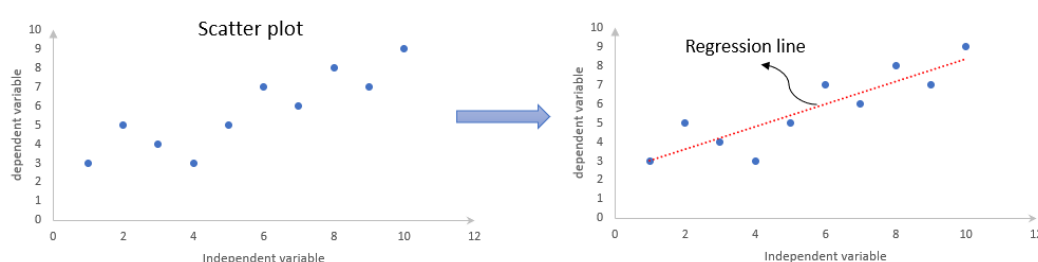
### 2.2.2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression)

การถดถอยเชิงเส้นเป็นโมเดลในการวิเคราะห์เชิงสถิติเพื่อหาแนวโน้มและทิศทางของตัวแปร 2 ชนิดในรูปแบบสมการความสัมพันธ์เส้นตรง สำหรับตรวจสอบความเหมาะสมของข้อมูลและความแม่นยำจะขึ้นอยู่กับจำนวน และความถูกต้องของข้อมูล โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) เป็นตัวแปรในการบ่งบอกถึงความสัมพันธ์และทิศทางระหว่างสองตัวแปร ซึ่งมีค่าระหว่าง -1 ถึง 1 โดยเมื่อค่าใกล้เคียง 1 บ่งบอกถึงตัวแปรทั้งสองตัว มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน ส่วนเมื่อค่าใกล้เคียง -1 บ่งบอกถึงตัวแปรทั้งสองตัว มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นมีจุดประสงค์ในการประเมินแนวโน้มของสมการในรูปแบบเส้นตรงเรียกว่า Regression line ของสองตัวแปรในรูปแบบกราฟ Scatter plot ในตัวอย่างดังรูปที่ 2 และมีเงื่อนไขคือตัวแปรทั้งสองตัวต้องมีความสัมพันธ์ Regression line มีรูปแบบเดียวกับสมการเส้นตรง กำหนดให้แกน x เป็นตัวแปรอิสระ เช่น เวลา และแกน y เป็นตัวแปรตามที่เปลี่ยนแปลงตามตัวแปรอิสระ เช่นความเข้มแสงที่เปลี่ยนไปตามระยะเวลา ดังสมการที่ (5) โดย m คือความชันของ

Regression line และ  $b$  เป็นจุดตัดของแกน  $y$  สมการที่ได้จาก Regression line สามารถนำมาวิเคราะห์ต่อได้หลายกรณี เช่น การวิเคราะห์ตลาด การพยากรณ์ ประเมินความเสี่ยงในการลงทุน รวมถึงประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะของแผงโซลาร์เซลล์ เนื่องจากการคำนวณหา Regression line จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น โดยใช้สมการนั้นต้องเวลาอย่างมาก ทำให้นิยมคำนวณผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เช่น Excel, MATLAB, Python มากกว่าการคำนวณปกติ

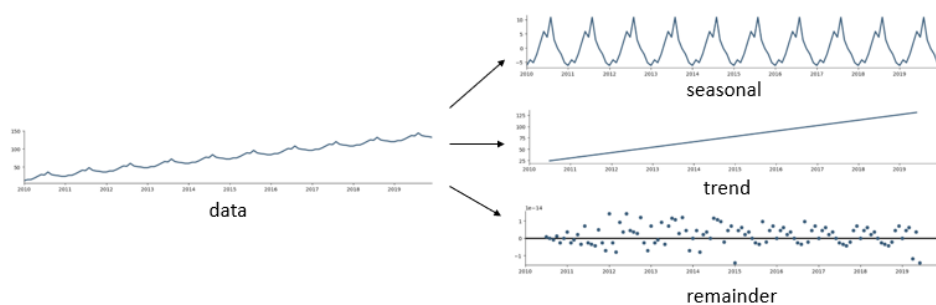
$$y = mx + b \quad (5)$$



**รูปที่ 2** ตัวอย่างการถดถอยเชิงเส้นเพื่อหาสมการเส้นตรง (Regression line) จากกราฟรูปแบบ Scatter plot

#### 2.2.2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับวิธีการแยกองค์ประกอบอนุกรมเวลา (Classical Decomposition)

ข้อมูลอนุกรมเวลา (time-series) สามารถจำแนกออกได้เป็นหลายรูปแบบ การแยกข้อมูล time-series มีจุดประสงค์เพื่อให้สามารถวิเคราะห์ time-series ได้ง่ายขึ้น เพราะทำให้สามารถตรวจสอบเฉพาะส่วนหรือวิเคราะห์เฉพาะส่วนของ time-series ได้ ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่าวิธีการแยกองค์ประกอบ (Decomposition) ข้อมูลรูปแบบ time-series จำแนกได้เป็น 3 ส่วนจากวิธีการแยกองค์ประกอบได้แก่ แนวโน้ม (Trend) แสดงภาพรวมถึงการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของข้อมูล และไม่จำเป็นต้องเป็นในรูปแบบกราฟเส้นตรง, ช่วงฤดูกาล (Seasonal) แสดงถึงลักษณะของข้อมูลที่เปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับการเกิดซ้ำซ้ำ เช่น ฤดูกาล, ราคาสินค้า และส่วนที่เหลือหลังจากจำแนกแนวโน้มและช่วงฤดูกาล (Remainder) ดังรูปที่ 3



**รูปที่ 3** การจำแนกข้อมูลอนุกรมเวลาโดยใช้วิธีการแยกองค์ประกอบ

วิธีการแยกองค์ประกอบเหมาะสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลที่เก็บมาในอดีตถึงปัจจุบัน และใช้สำหรับการพยากรณ์ข้อมูลในอนาคต เนื่องจากการวิเคราะห์ข้อมูล time-series โดยไม่จำแนกแนวโน้มและฤดูกาลนั้นทำได้ยาก ทำให้การแบ่งข้อมูล time-series ช่วยให้วิเคราะห์และเข้าใจข้อมูลได้ง่ายขึ้น และยังเพิ่มความแม่นยำในการพยากรณ์ ในวิธีการแยกองค์ประกอบแบบคลาสสิก (Classical decomposition) จะกำหนดให้ข้อมูลฤดูกาลมีค่าคงที่และเกิดขึ้นซ้ำทุกปี เช่นค่าไฟฟ้าที่เพิ่ม-ลดตามฤดูกาล วิธีการแยกองค์ประกอบแบ่งได้เป็น 2 ส่วน [14] ดังสมการที่ (6) และ (7) ได้แก่ การแยกองค์ประกอบแบบการบวก (Additive decomposition) เหมาะสำหรับข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงทางฤดูกาลคงที่และมีลักษณะแนวโน้มของข้อมูลเป็นเส้นตรง และการแยกองค์ประกอบแบบการคูณ (Multiplicative decomposition) เหมาะสำหรับข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงทางฤดูกาลไม่คงที่ และเพิ่มขึ้นแปรผันตรงกับค่าของข้อมูล มีลักษณะเป็นรูปแบบเอกซ์โพเนนเชียล

การแยกองค์ประกอบแบบการบวก (Additive decomposition)

$$Y_t = T_t + S_t + R_t \quad (6)$$

การแยกองค์ประกอบแบบการคูณ (Multiplicative decomposition)

$$Y_t = T_t \times S_t \times R_t \quad (7)$$

โดยกำหนดให้

$Y_t$  คือ ค่าของข้อมูลในรูปแบบ time-series ที่เวลา  $t$

$T_t$  คือ ค่าประมาณแนวโน้มของข้อมูล ที่เวลา  $t$

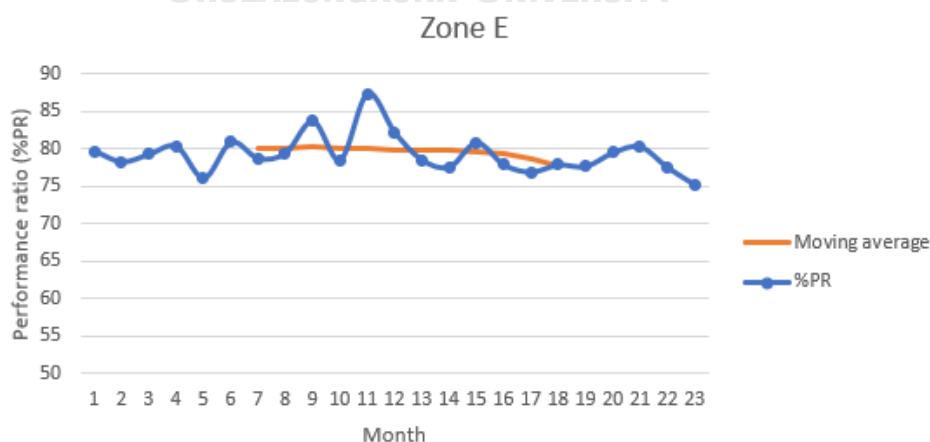
$S_t$  คือ ค่าประมาณช่วงฤดูกาลหรือลักษณะของข้อมูล ที่เวลา  $t$

$R_t$  คือ ค่า Remainder หรือ noise ของข้อมูล ที่เวลา  $t$

### 2.2.2.3 การใช้ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving average) ในการคำนวณแนวโน้มของข้อมูล

ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่เป็นหนึ่งในกระบวนการจำแนกข้อมูลอนุกรมเวลา ในการประเมินแนวโน้มของข้อมูลว่ามีการเพิ่มขึ้นหรือลดลง และเป็นขั้นตอนของวิธีการแยกส่วนประกอบแบบคลาสสิก (Classical decomposition) ซึ่งเป็นการนำข้อมูลย้อนหลังมาหาค่าเฉลี่ยในช่วงเวลาที่กำหนดให้อยู่ในรูปแบบเส้นเรียบ เพื่อให้สะดวกในการใช้แสดงแนวโน้ม และช่วยทำให้ลดความผิดปกติออกไปจากข้อมูลในกรณีที่มีข้อมูลเพิ่มขึ้นหรือลดลงอย่างไม่มีเหตุผล

การคำนวณค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่จำเป็นต้องกำหนดช่วงเวลาที่ต้องการเฉลี่ย ดังสมการที่ (8) [14] โดย  $M$  แสดงถึงช่วงเวลาที่ต้องการเฉลี่ย มีค่าเท่ากับ  $2k+1$  และจุดเริ่มต้นของค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่  $t$  เท่ากับ  $t=k+1$  เช่น เมื่อกำหนดให้ค่า  $M=12$  สำหรับข้อมูลรายเดือน แต่เนื่องจากค่า  $M$  เป็นจำนวนคู่ ทำให้  $t$  ไม่เป็นจำนวนเต็มจึงต้องใช้ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ 2 รอบเพื่อจุดกึ่งกลาง เริ่มต้นโดยนำค่าเฉลี่ยตั้งแต่เดือนที่ 1 ถึงเดือนที่ 12 กับค่าเฉลี่ยตั้งแต่เดือนที่ 2 ถึงเดือนที่ 13 มาเฉลี่ยกันรอบที่ 2 จากนั้นจึงทำในเดือนที่ 2 ถึง 14 และถัดไปจนครอบคลุมทุกข้อมูลจะได้กราฟแนวโน้มดังรูปที่ 4 กราฟแนวโน้มของข้อมูลที่ได้จากวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (MA) สามารถใช้ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้น (LR) ในการคำนวณหาสมการเส้นตรงของกราฟแนวโน้มที่ได้จากการหาค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ [3] โดยสมการเส้นตรงนำมาประยุกต์ได้หลายแบบ เช่นคำนวณหาอัตราการลดลงของกำลังการผลิตรายปี และใช้เป็นสมการอ้างอิงในการพยากรณ์กำลังการผลิตในอนาคตได้



รูปที่ 4 การคำนวณหาแนวโน้มของข้อมูลโดยใช้ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่

สมการค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ในช่วง  $M$  (Moving average of order  $M$ )

$$T_t = \frac{1}{M} \sum_{j=-k}^k y_{t+j} \quad (8)$$

โดยกำหนดให้

$T_t$  คือ ค่าแนวโน้มของข้อมูล ที่เวลา  $t$

$M$  คือ ขอบเขตที่ใช้การเฉลี่ยของข้อมูล

$y_t$  คือ ค่าข้อมูลในรูปแบบ time-series ที่เวลา  $t$

#### 2.2.2.4 การคำนวณสมการเส้นตรงของ Regression line โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square method)

วิธีกำลังสองน้อยที่สุดเป็นหนึ่งในกระบวนการที่ใช้คำนวณหา Regression line เนื่องจากข้อมูลที่อยู่บนกราฟ Scatter plot มีการกระจายทำให้ไม่สามารถลากผ่านข้อมูลทุกค่าที่ปรากฏอยู่บนแผนภาพได้ ดังนั้นเพื่อให้เส้นตรงที่เข้ากับตัวแปรทั้งสองมากที่สุด วิธีกำลังสองน้อยที่สุด จึงเป็นตัวเลือกในการกำหนดสมการเส้นตรงเพื่อให้ความแตกต่างของค่าตัวแปรทั้งสองตัว มีค่าน้อยที่สุดและให้ Regression line เข้ากับสมการของทั้งสองตัวแปรมากที่สุด การคำนวณมีจุดประสงค์เพื่อหาสมการเส้นตรงโดยใช้สมการที่ (8) จากนั้นจึงนำค่าความชันที่คำนวณได้มาใช้ในสมการที่ (9) เพื่อหาจุดตัดแกน  $y$  โดยใช้ค่าเฉลี่ยทั้งหมดของข้อมูลจากแกน  $x$  และ  $y$  จากนั้นนำค่าความชันและจุดตัดแกน  $y$  มาแทนในสมการที่ (10) ก็จะได้สมการเส้นตรงของตัวแปรทั้งสองตัวจากกราฟ Scatter plot

สมการความชันของ Regression line ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (9)$$

สมการจุดตัดแกน  $y$  ของ Regression line ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด

$$b = \bar{y} - m\bar{x} \quad (10)$$

โดยกำหนดให้

$x_i$  คือ ค่าตัวแปรแกน  $x$  โดยที่  $i$  เป็นลำดับของตัวแปร

$y_i$  คือ ค่าตัวแปรแทน  $y$  โดยที่  $i$  เป็นลำดับของตัวแปร

$\bar{x}$  คือ ค่าเฉลี่ยทั้งหมดของตัวแปรทั้งหมดของแทน  $x$

$\bar{y}$  คือ ค่าเฉลี่ยทั้งหมดของตัวแปรทั้งหมดของแทน  $y$

#### 2.2.2.5 ทฤษฎีเกี่ยวกับโมเดล ARIMA

โมเดล ARIMA (Auto Regressive Integrated Moving Average) เป็นแบบจำลองที่ได้รับการความนิยมสำหรับการใช้วิเคราะห์และพยากรณ์ข้อมูลรูปแบบอนุกรมเวลา (time-series) สำหรับการประยุกต์วิธีทางสถิติเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูล โดยการวิเคราะห์ได้อาศัยข้อมูลในอดีตเพื่อกำหนดรูปแบบของข้อมูลและพยากรณ์ข้อมูลในอนาคต โมเดล ARIMA เกิดจากการรวมกันของทั้ง 3 ฟังก์ชันได้แก่

(1) Autoregressive (p) ทำหน้าที่คำนวณความสัมพันธ์ของข้อมูลในปัจจุบันกับค่าที่เกิดขึ้นมาแล้วจากอดีต เช่น  $p=2$  หมายถึงฟังก์ชันจะคำนวณความสัมพันธ์โดยอ้างอิงข้อมูลในอดีต 2 ช่วงข้อมูล มีสมการของฟังก์ชันดังนี้

$$y_t = \alpha + \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_p y_{t-p} + \varepsilon_t \quad (11)$$

โดยกำหนดให้

$\alpha$  คือ ค่าจุดตัดแกน  $y$  ของข้อมูล (constant)

$\phi$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของ Autoregressive

$y_t$  คือ ค่าของข้อมูลในรูปแบบ time-series ที่เวลา  $t$

$\varepsilon_t$  คือ ค่าความแปรปรวนของข้อมูล (error)

(2) Integrated (d) ทำหน้าที่หาผลต่างของอนุกรมเวลาระหว่างข้อมูล โดยการหาอนุพันธ์ (Differentiation) เพื่อให้ข้อมูลอยู่ในรูปแบบคงที่ (Stationary) จำนวน order จะแสดงถึงจำนวนครั้งที่ทำการหาอนุพันธ์



(3) Moving Average (q) ทำหน้าที่คำนวณการเคลื่อนที่ค่าความคลาดเคลื่อน (error) ของข้อมูลก่อนหน้าและปัจจุบัน มีสมการของฟังก์ชันดังนี้

$$y_t = \alpha + \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} + \cdots + \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (12)$$

โดยกำหนดให้

$\alpha$  คือ ค่าจุดตัดแกน y ของข้อมูล (constant)

$\theta$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของ Moving Average

$y_t$  คือ ค่าของข้อมูลในรูปแบบ time-series ที่เวลา t

$\varepsilon_t$  คือ ค่าความแปรปรวนของข้อมูล (error)

โดยฟังก์ชันทั้ง 3 ส่วนเรียกว่า order สามารถเขียนรวมได้ว่า ARIMA (p,d,q) โมเดล ARIMA สามารถประยุกต์ใช้กับข้อมูลที่แปรผันตามฤดูกาล (seasonal) ซึ่งเขียนได้เป็น ARIMA (p,d,q)(P,D,Q)<sub>m</sub> ดังรูปที่ 5 โดยแบ่งเป็นส่วนที่ไม่เกี่ยวข้องกับฤดูกาล (p,d,q) ส่วนที่เกี่ยวข้องกับฤดูกาล (P,D,Q) และ m แสดงถึงช่วงฤดูกาลในหนึ่งปี เช่นข้อมูลรายเดือน m จะเท่ากับ 12 โมเดล ARIMA มีรูปแบบดังสมการที่ (13) ดังนี้

$$\phi_p(B)\phi_P(B^S)\Delta^d\Delta_s^D y_t = \theta_q(B)\theta_Q(B^S)\varepsilon_t \quad (13)$$

โดยกำหนดให้

$\phi$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของ Autoregressive

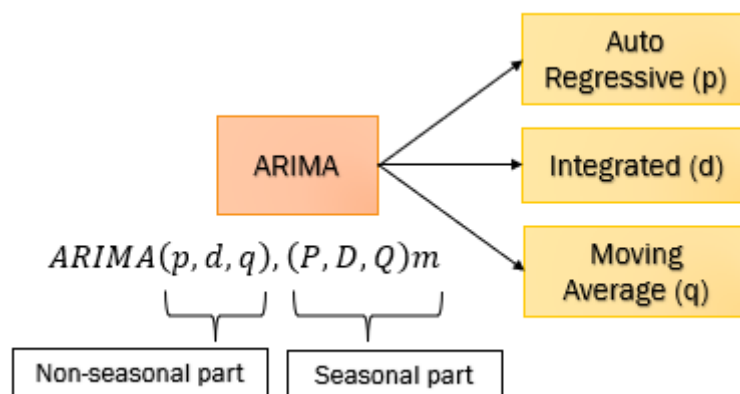
$\Delta$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของ Integrated

$\theta$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของ Moving Average

$B$  คือ ค่า backshift operator

$\varepsilon_t$  คือ ค่าความแปรปรวนของข้อมูล

$y_t$  คือ ค่าของข้อมูลในรูปแบบ time-series ที่เวลา t



รูปที่ 5 ส่วนประกอบของโมเดล ARIMA

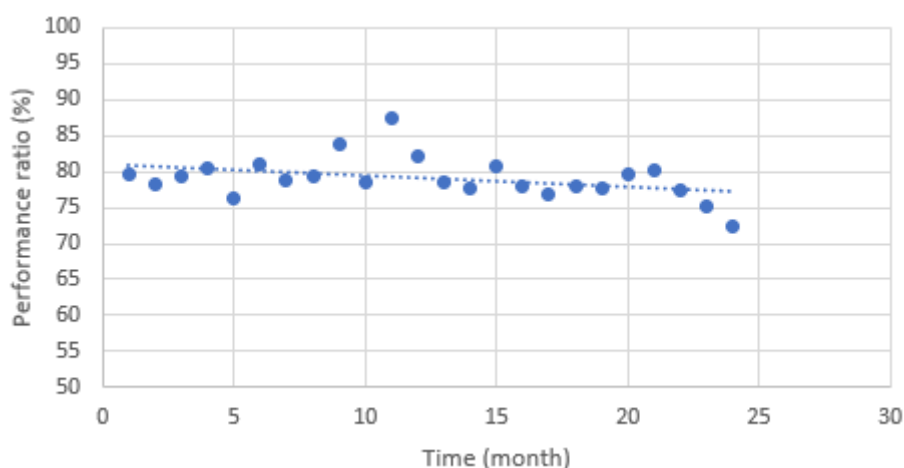
สาเหตุที่ ARIMA ได้รับความนิยมเนื่องจากโมเดลเหมาะกับข้อมูลที่มีค่าการผันแปรตามฤดูกาล, สามารถจัดการกับข้อมูลที่แตกต่างไปจากข้อมูลค่าอื่นหรือมีค่าห่างจากกลุ่ม (outlier) และช่วยกำจัด noise, error ได้ เนื่องจากสมการของโมเดล ARIMA มีความซับซ้อน ทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโมเดล ARIMA จำเป็นต้องใช้โปรแกรมมาช่วยในการคำนวณได้แก่ R Programming และ python ซึ่งประกอบด้วย library ในการเลือก order ที่เหมาะสมและการคำนวณโมเดล ARIMA

### 2.2.3 การประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะของแผงโซลาร์เซลล์ด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น

การเสื่อมสมรรถนะของแผงโซลาร์เซลล์แสดงถึงการลดลงของกำลังการผลิตไฟฟ้า มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0-1% ต่อปี [3] ขึ้นอยู่กับสถานที่ ภูมิอากาศของจุดที่ติดตั้ง และชนิดของแผงโซลาร์เซลล์ โดยอาจมีค่า 2-4% ต่อปีในภูมิภาคที่มีความเข้มแสงและอุณหภูมิสูง ทำให้การตรวจติดตามการเสื่อมสมรรถนะสามารถนำไปเป็นข้อมูลสำหรับพิจารณาพลังงานที่ผลิตได้ในอนาคตรวมถึงบอกถึงความผิดปกติ เมื่ออัตราการเสื่อมสมรรถนะสูงกว่ามาตรฐาน เช่น เมื่ออัตราการเสื่อมสมรรถนะของแผงโซลาร์เซลล์จะมีค่าสูงในช่วงปีแรก ทำให้สามารถเร่งตรวจสอบได้ว่าเกิดจากความผิดปกติของระบบหรือ จากปรากฏการณ์ Light Induced Degradation (LID) ที่ทำให้การเสื่อมสมรรถนะสูงในปีแรกเกิดจากการโดนแสงแดดในช่วงติดตั้งใหม่

การคำนวณอัตราการเสื่อมสมรรถนะ จะอยู่ในรูปแบบ Performance loss rate (PLR) แสดงถึงประสิทธิภาพการผลิตพลังงานที่ลดลงรายปี ซึ่งข้อมูลที่จำเป็นแบ่งได้เป็น 3 ส่วน ได้แก่ ตัวแปรในการบ่งชี้พฤติกรรมในการผลิตพลังงาน เช่น Performance ratio, Peak power, yield ระยะห่างในการเก็บข้อมูลที่ใช้ในการเก็บข้อมูล (รายวัน, รายเดือน) และกระบวนการเชิงสถิติสำหรับการตรวจสอบแนวโน้มการลดลงในการผลิตพลังงานจากกราฟ time-series ซึ่งวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด

ได้แก่การประยุกต์ใช้ Linear regression โดยใช้ข้อมูล performance ratio เฉลี่ยในแต่ละเดือนมาวิเคราะห์เชิงสถิติเพื่อหาเส้น Regression line ให้เหมาะสมกับข้อมูลมากที่สุด ดังรูปที่ 6 กำหนดให้ แกน y คือ performance ratio เฉลี่ยของแต่ละเดือน และแกน x เป็นเวลา (เดือน) โดยสมการที่ได้จาก Linear regression สามารถบอกถึงอัตราการเสื่อมสมรรถนะของแผงโซลาร์เซลล์ และทำให้ทราบถึงอัตราการผลิตที่ลดลงเป็นกิโลวัตต์ต่อปี



**รูปที่ 6** การใช้ Linear regression เพื่อคำนวณแนวโน้มของ Performance ratio ในการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะ

การประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะจำเป็นต้องใช้กระบวนการ 2 ส่วน ได้แก่ Performance metrics และ Statistical analysis ส่วนแรกเป็นการกำหนดวิธีการประเมินสมรรถนะ ซึ่งจะใช้วิธี Normalized rating ในการประเมิน ได้แก่ performance ratio โดยอ้างอิงสมการตามมาตรฐาน International Electrotechnical Commission : IEC 61724 [15] และส่วนที่สองเป็นการนำข้อมูลสมรรถนะทั้งหมดมาวิเคราะห์เชิงสถิติเพื่อหากราฟแนวโน้มและสมการของประสิทธิภาพการผลิตของแผงโซลาร์เซลล์ที่เป็นสมการเส้นตรง เนื่องจากสมการเส้นตรงสามารถใช้ประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะรายปีได้จากการคำนวณการลดลงของ performance ratio เมื่อคำนวณการลดลงของ performance ratio ในหนึ่งปีได้ ก็จะสามารถประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะรายปีได้ จากสมการที่ (14) และ (15) โดยใช้ความชันและจุดตัดแกน y ของสมการเส้นตรงที่ได้จากกราฟเส้นตรง

การคำนวณหาอัตราการเสื่อมสมรรถนะสามารถทำได้จากการใช้ความชันและจุดตัดแกน y ของเส้นแนวโน้มได้ดังนี้

สมการการคำนวณอัตราการเสื่อมสมรรถนะ

$$R_D = \left( \frac{t \cdot m}{c} \right) * 100\% \quad (14)$$

สมการการคำนวณอัตราการเสื่อมสมรรถนะรายปี (t=12)

$$R_D(\text{yearly}) = \left( \frac{12m}{c} \right) * 100\% \quad (15)$$

โดยกำหนดให้

$R_D$  คือ อัตราการเสื่อมสมรรถนะของแผงโซลาร์เซลล์ (%/ปี)

$t$  คือ จำนวนเดือนที่ต้องการหาอัตราการเสื่อมสมรรถนะ (อัตราการเสื่อมสมรรถนะรายปี  $t = 12$ )

$m$  คือ ความชันของสมการเส้นตรง

$c$  คือ จุดตัดแกน  $y$  ของสมการเส้นตรง

## 2.2.4 การประยุกต์ใช้ Machine learning เพื่อวิเคราะห์ข้อมูล

Machine learning คือระบบพื้นฐานคอมพิวเตอร์ ที่สามารถเรียนรู้ข้อมูลได้จากชุดข้อมูล ตัวอย่างที่ใส่เข้าไปใช้สำหรับการสร้างโมเดล การทำนายข้อมูลในอนาคต และออกแบบโมเดล การทำ Machine learning นิยมใช้สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีจำนวนมากและมีสมการในการคำนวณซับซ้อน ได้แก่การทำ Regression ฟังก์ชัน Machine learning ประกอบด้วยเครื่องมือในการวิเคราะห์เชิงสถิติ เช่น Linear regression, Decomposition และในส่วนการฝึก/การทดสอบ (train/test) เพื่อใช้ในการพยากรณ์และเปรียบเทียบความเชื่อถือได้ของโมเดล

### 2.2.4.1 การทดสอบความเหมาะสมโมเดลโดยใช้ Machine learning

Machine learning ถูกออกแบบมาให้มีอัลกอริทึมสำหรับการวิเคราะห์ความเกี่ยวข้องของพารามิเตอร์ของชุดข้อมูลว่ามีผลต่อข้อมูล output อย่างไร ทำให้สามารถทดสอบความเหมาะสมของโมเดลได้ การทดสอบความเหมาะสมของโมเดลสามารถทำได้หลายวิธี เช่นการใช้ ANOVA (Analysis of Variance) เพื่อทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของข้อมูลระหว่างกลุ่มตัวอย่างสามารถพิจารณาพารามิเตอร์ของข้อมูลหลายกลุ่ม และ Bootstrap ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการทำ t-test เพื่อ

เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลระหว่างกลุ่มตัวอย่างสองกลุ่ม [11] เหมาะสำหรับเปรียบเทียบข้อมูลสองกลุ่มที่มีจำนวนข้อมูลไม่เท่ากัน โดยตัวแปรที่ได้จากการวิเคราะห์จะบ่งบอกถึงความเหมาะสมและความเกี่ยวข้อง ได้แก่ p-value, f-value, R-square, Confidence interval (CI), Root mean square error และ Autocorrelation ซึ่งตัวแปรเหล่านี้สามารถบอกถึงความเกี่ยวข้องหรือเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของข้อมูลได้



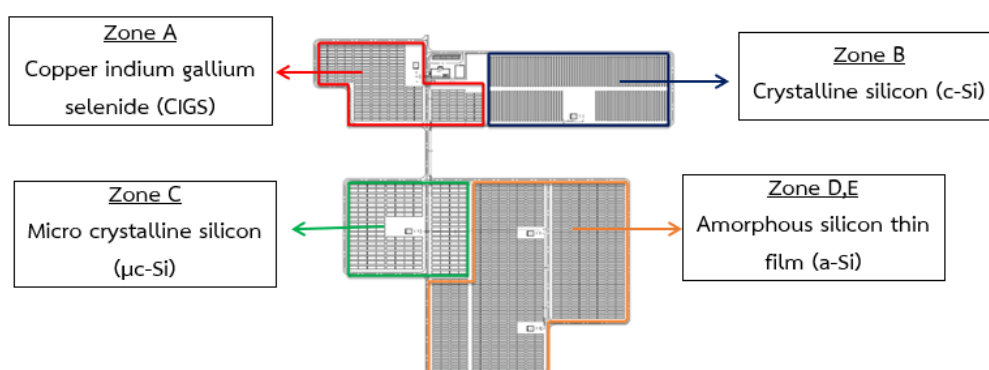
### บทที่ 3 วิธีการและแนวทางการทดสอบดำเนินการวิจัย

#### 3.1 ข้อกำหนดทางเทคนิค (Specification) ของระบบโซลาร์เซลล์และอินเวอร์เตอร์

##### 3.1.1 โครงสร้างและข้อกำหนดทางเทคนิคของแผงโซลาร์เซลล์

งานวิจัยนี้ฉบับนี้ได้รับข้อมูลจากโซลาร์ฟาร์มที่อำเภอทับสะแก จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ซึ่งแบ่งเป็น 5 โซน (A, B, C, D และ E) ที่ติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ต่างกัน 4 ชนิด ได้แก่ (1) Copper indium gallium selenide (CIGS), (2) Crystalline silicon (c-Si), (3) Micro crystalline silicon thin film ( $\mu$ c-Si) และ (4) Amorphous silicon thin film (a-Si) โดยโซน D และ E ใช้แผงชนิดเดียวกัน และแต่ละโซนมีกำลังการผลิตที่ติดตั้งโซนละ 1 MW ดังรูปที่ 7 โดยระบบโซลาร์ฟาร์มที่อำเภอทับสะแกในแต่ละโซนได้ต่อเข้ากับอินเวอร์เตอร์ เพื่อแปลงไฟฟ้าจากไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ให้เป็นกระแสสลับ (AC) และต่อไปยังระบบกริดไฟฟ้าเพื่อส่งและแจกจ่ายไฟฟ้าที่ผลิตไปยังผู้ใช้ไฟฟ้า

การตรวจสอบข้อกำหนดทางเทคนิคของแผงโซลาร์เซลล์ บอกถึงอัตราการผลิตพลังงาน ประสิทธิภาพ รวมถึงระดับของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อการผลิตไฟฟ้า และข้อมูลพื้นฐานต่างๆ เช่น ขนาดของแผง และน้ำหนักแผงข้อกำหนดทางเทคนิคเป็นข้อมูลที่ใช้ในการอ้างอิงก่อนออกแบบ วางแผน และติดตั้งระบบ รวมถึงใช้เปรียบเทียบกับข้อมูลการผลิตหลังจากการติดตั้งจริง เพื่อทดสอบว่าระบบโซลาร์เซลล์ผลิตพลังงานได้ตรงตามข้อกำหนดหรือไม่ และสามารถส่งกระแสแผงโซลาร์เซลล์กับทางผู้ผลิตเมื่อข้อมูลการผลิตจริงต่ำกว่าข้อกำหนดทางเทคนิค โดยข้อกำหนดทางเทคนิคและรายละเอียดการติดตั้งของแผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้ทดสอบทั้ง 4 โซน ได้แสดงดังตารางที่ 1



รูปที่ 7 แผนผังระบบโซลาร์เซลล์ของโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์อำเภอทับสะแก จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

**ตารางที่ 1** ข้อกำหนดทางเทคนิคและรายละเอียดการติดตั้งของแผงโซลาร์เซลล์ที่ใช้ในการทดสอบ

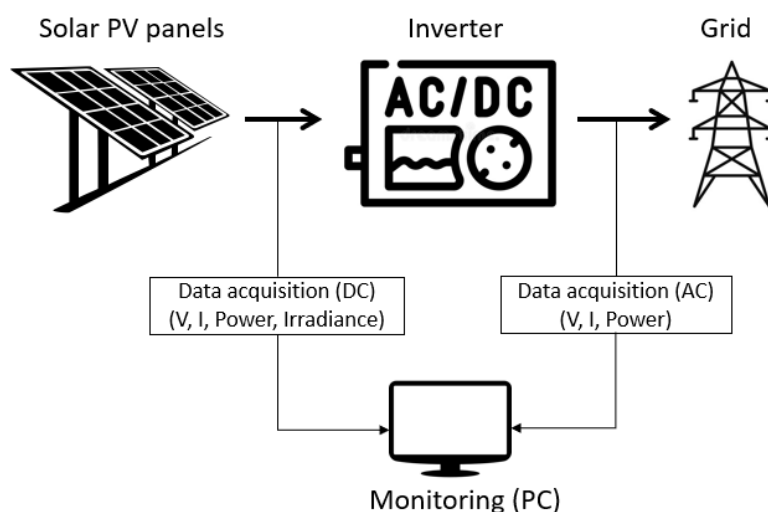
| พารามิเตอร์                                 | ชนิดของแผงโซลาร์เซลล์ |                  |            |
|---|-----------------------|------------------|------------|
|   | CIGS                  | $\mu\text{c-Si}$ | a-Si       |
| 1. ค่ากำลังสูงสุด ( $P_{\text{MAX}}$ )      | 115 W/แผง             | 132.4 W/แผง      | 65 W/แผง   |
| 2. ค่าแรงดันเปิดวงจร ( $V_{\text{OC}}$ )    | 97.6 V                | 74.38 V          | 89 V       |
| 3. ค่ากระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $I_{\text{SC}}$ ) | 1.69 A                | 2.74 A           | 1.12 A     |
| 4. ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ                  | -0.38 %/°C            | -0.29%/°C        | -0.19%/°C  |
| 5. ประสิทธิภาพ (%)                          | $\geq 12\%$           | $\geq 9\%$       | $\geq 6\%$ |
| 6. จำนวนแผงที่ติดตั้ง (แผง)                 | 10,880                | 9,792            | 20,000     |

จากตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกำลังไฟฟ้าแสดงถึงผลของอุณหภูมิต่อความสามารถในการผลิตของแผงโซลาร์เซลล์และค่าประสิทธิภาพของแผงโซลาร์เซลล์แสดงถึงความสามารถในการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ในตารางที่ 1 สังเกตได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของกำลังไฟฟ้าของแผงโซลาร์เซลล์ชนิด CIGS มีค่าสูงที่สุด ซึ่งหมายความว่าเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการผลิตจะลดลงมากกว่าแผงโซลาร์เซลล์ชนิดอื่น

### 3.1.2 ข้อกำหนดทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์

อินเวอร์เตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงกำลังไฟฟ้ากระแสตรง (DC) ที่ผลิตจากระบบโซลาร์เซลล์ให้กลายเป็นกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) เพื่อนำมาใช้งานในระบบไฟฟ้าต่อไป การแปลงกระแสไฟฟ้าผ่านอินเวอร์เตอร์นั้นมีการสูญเสียกำลังไฟฟ้าขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของยี่ห้ออินเวอร์เตอร์ และปัจจัยภายนอก เช่น อุณหภูมิ ทำให้ค่ากำลังไฟฟ้า DC สูงกว่า กำลังไฟฟ้า AC เสมอ ดังนั้นเพื่อให้ทราบว่าอินเวอร์เตอร์มีผลต่อการเสื่อมสมรรถนะการผลิตของระบบโซลาร์เซลล์หรือไม่ จึงได้ทดสอบการเสื่อมสมรรถนะของอินเวอร์เตอร์เพื่อตรวจสอบว่าอัตราการเสื่อมสมรรถนะนั้นมาจากการเสื่อมของแผงโซลาร์เซลล์อย่างเดียวหรือไม่ เนื่องจากมีงานวิจัยกล่าวถึงการลดลงของประสิทธิภาพในการทำงาน เมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานในอุณหภูมิมากกว่า 37°C ทำให้ประสิทธิภาพลดลง 2.5% [16] โดยทางโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ อำเภอทับสะแก จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ได้มีการติดตั้งเซ็นเซอร์ตรวจติดตามการผลิตของกำลังไฟฟ้าในระดับ DC และกำลังไฟฟ้าในระดับ AC ดังรูปที่ 8 ทำให้สามารถคำนวณประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์และทดสอบว่าประสิทธิภาพการแปลง

ไฟฟ้ามีการลดลงหรือไม่ อินเวอร์เตอร์ที่ใช้แปลงกระแสไฟฟ้าในการทดสอบนี้มีข้อกำหนดทางเทคนิค ดังตารางที่ 2



รูปที่ 8 ตำแหน่งของเซ็นเซอร์ตรวจติดตามข้อมูลการผลิตของระบบโซลาร์เซลล์ระหว่างอินเวอร์เตอร์

ตารางที่ 2 ข้อกำหนดทางเทคนิคของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ

| พารามิเตอร์                       | รายละเอียด       |
|-----------------------------------|------------------|
| ยี่ห้อของอินเวอร์เตอร์            | SG630MX          |
| กำลังไฟ AC พิกัด (AC Rated power) | 630 kW           |
| Power factor                      | [-0.9,0.9]       |
| ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม            | -30 °C ถึง 55 °C |
| ประสิทธิภาพสูงสุด                 | 99%              |

จากการทดสอบได้นำข้อมูลกำลังการผลิตในระดับ DC และระดับ AC มาคำนวณค่า Performance ratio เพื่อประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะ และคำนวณประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์โดยใช้สมการที่ (16) [17] โดยข้อมูลตรวจติดตามตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ปี 2020 ถึงเดือนมกราคมปี 2022 เพื่อตรวจสอบว่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์มีผลต่อเสื่อมสมรรถนะหรือไม่

สมการการคำนวณประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์

$$Inverter\ efficiency\ (\%) = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} \times 100\% \quad (16)$$



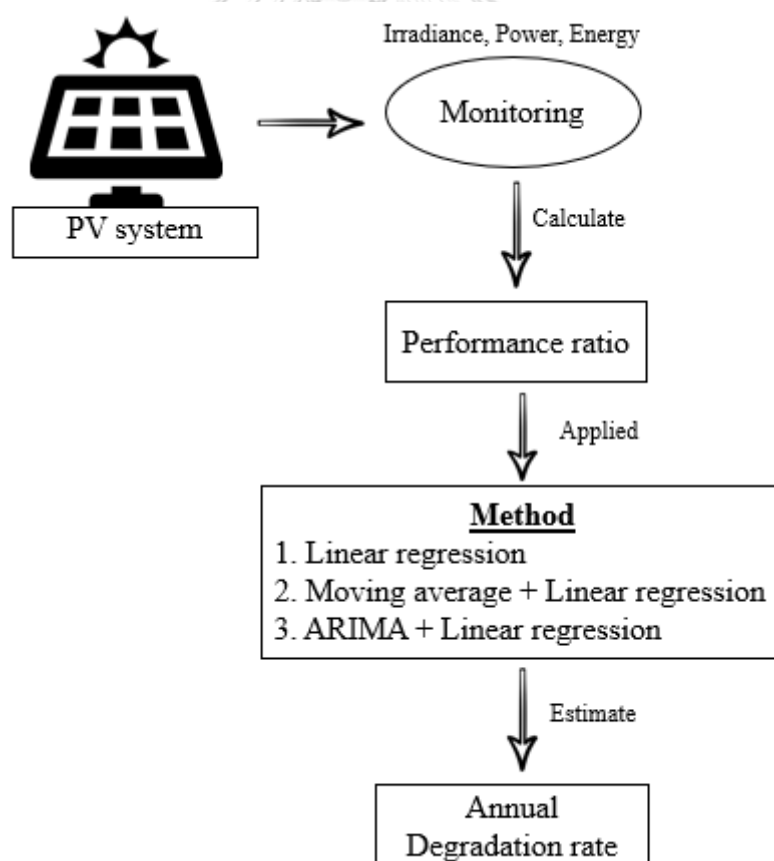
โดยกำหนดให้

$P_{DC}$  = กำลังไฟฟ้าในระดับ DC ของระบบโซลาร์เซลล์

$P_{AC}$  = กำลังไฟฟ้าในระดับ AC ของระบบโซลาร์เซลล์

### 3.2 แนวทางการทดสอบการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์

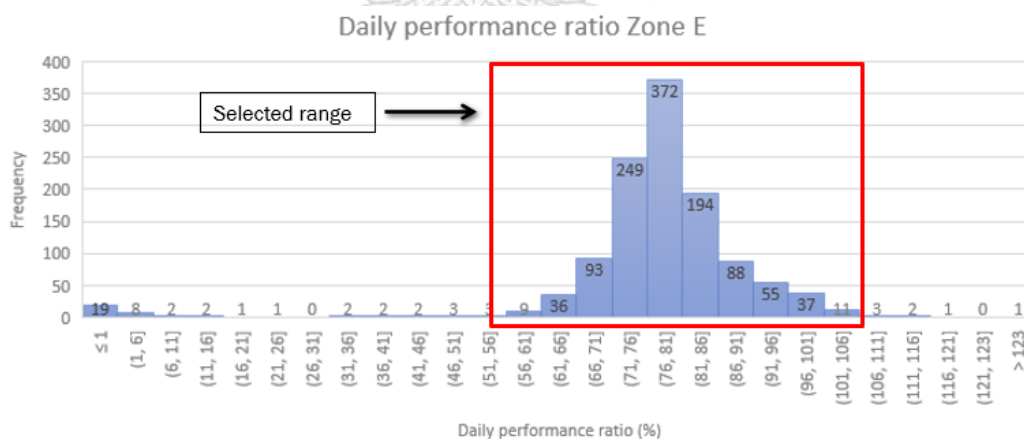
การทดสอบการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะได้ใช้ข้อมูลกำลังการผลิตในระดับ AC เป็นหลัก เนื่องจากต้องการคำนวณอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์ทั้งหมด การทดสอบได้คำนวณอัตราการลดลงของ  $R_p$  เฉลี่ยรายเดือนด้วยสมการเส้นตรง วิธีการคำนวณแบ่งออกเป็นสามวิธี ได้แก่ วิธีการถดถอยเชิงเส้น วิธีการแยกส่วนประกอบด้วยค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ร่วมกับวิธีการถดถอยเชิงเส้น และโมเดล ARIMA ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้น โดยรูปที่ 9 แสดงถึงผังงานขั้นตอนการคำนวณอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์



รูปที่ 9 ผังงานลำดับการคำนวณอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์

### 3.2.1 การกำหนดขอบเขตการทดสอบและพารามิเตอร์เพื่อลดความผิดพลาดของการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะ

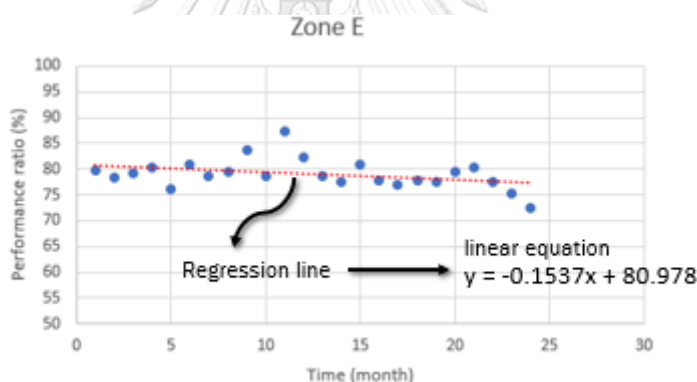
ในการเก็บข้อมูลการผลิตไฟฟ้าของระบบโซลาร์เซลล์อาจมีข้อผิดพลาดจากปัจจัยภายนอก เช่น Fault และ Shading ทำให้ข้อมูลการตรวจติดตามในบางช่วงเวลามีการผิดปกติ เนื่องจากการคำนวณค่า Performance ratio เป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ กับปริมาณความเข้มแสงที่ได้รับ เมื่อเกิด Fault หรือ Shading บริเวณแผงโซลาร์เซลล์ มีผลทำให้ค่า Performance ratio ในบางช่วงเวลามีค่าสูงและต่ำอย่างมาก ดังนั้นเพื่อลดความผิดพลาดในการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะ จึงได้กำหนดขอบเขตของค่า Performance ratio ที่นำมาเฉลี่ยรายเดือน โดยขั้นตอนการกำหนดขอบเขตการกรองข้อมูลได้นำข้อมูล Performance ratio เฉลี่ยรายวันทั้งหมดมาพล็อตกราฟฮิสโตแกรม (Histogram) เพื่อหาช่วง Performance ratio ที่เหมาะสม ดังรูปที่ 10 ซึ่งแสดงถึงช่วงความถี่ของค่า Performance ratio เฉลี่ยรายวันของระบบโซลาร์เซลล์โซน E จากกราฟฮิสโตแกรมสังเกตได้ว่าค่า Performance ratio มีการเกาะกลุ่มอยู่ในช่วง 56% ถึง 106% ทำให้สามารถเลือกการกรองค่า Performance ratio ในช่วงที่มีการเกาะกลุ่ม โดยการทดสอบของงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ตัดสินใจกำหนดช่วงการกรองอยู่ที่ 30% ถึง 100% เพื่อลดการผิดพลาดที่เกิดจากการตรวจติดตามหรือ fault ที่ทำให้ค่า Performance ratio ในบางวันมีค่าน้อยหรือเท่ากับ 0



รูปที่ 10 กราฟฮิสโตแกรมแสดงถึงช่วงความถี่ของปริมาณ Performance ratio เฉลี่ยรายวันที่ได้จากการคำนวณ

### 3.2.2 วิธีการทดสอบการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์โดยใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้น

การประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะในระบบโซลาร์เซลล์ด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น สามารถทำได้โดยคำนวณ Performance ratio เฉลี่ยในแต่ละเดือนของระบบโซลาร์เซลล์จากข้อมูลการตรวจติดตามที่ได้รับตั้งแต่ปี 2018 ถึง ปี 2022 และนำข้อมูลเฉพาะในช่วงเวลาตั้งแต่ 7.00 ถึง 18.00 เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่แผงโซลาร์เซลล์ได้รับแสง แล้วนำมาพล็อตกราฟดังรูปที่ 11 จากนั้นจึงนำวิธีการถดถอยเชิงเส้นเข้ามาใช้เพื่อคำนวณหา regression line และสมการเส้นตรงของกราฟ เพื่อนำความชันกับจุดตัดแกน y มาใช้ในการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะจากสมการที่ (15) ตัวอย่างเช่น สมการเส้นตรงที่ได้จากการถดถอยเชิงเส้นในระบบโซลาร์เซลล์โซน E ในรูปที่ 11 สมการเส้นตรงมีค่าเท่ากับ  $-0.1537x + 80.978$  ซึ่งมีความชันเท่ากับ  $-0.1537$  และจุดตัดแกน y มีค่าเท่ากับ 80.978 เมื่อนำมาแทนในสมการที่ (15) จะได้อัตราการเสื่อมสมรรถนะเท่ากับ 2.394%/ปี ซึ่งหมายความว่าในระยะเวลาหนึ่งปีระบบโซลาร์เซลล์มีประสิทธิภาพลดลงประมาณ 2.278 เปอร์เซ็นต์ต่อปี

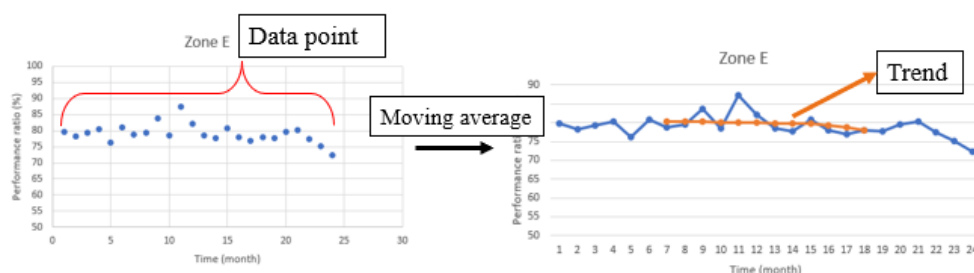


รูปที่ 11 ตัวอย่างการใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้นเพื่อคำนวณเส้น regression line และสมการเส้นตรง

### 3.2.3 วิธีการทดสอบการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้น

การประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะด้วยการแยกส่วนประกอบโดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ เป็นการคำนวณหาแนวโน้มของประสิทธิภาพของระบบโซลาร์เซลล์และลดความผิดพลาดที่เกิดจากข้อมูลที่ห่างจากกลุ่ม (outlier) ส่งผลให้มีความแม่นยำในการประเมินมากกว่า เนื่องจากการกระจายของข้อมูลเป็นผลมาตัวแปรจากฤดูกาลซึ่งส่งผลต่อปริมาณการผลิตของระบบโซลาร์เซลล์ เช่นฤดูฝนมีปริมาณแสงแดดที่ได้รับน้อยส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพที่คำนวณได้ต่ำ จึงมีผลให้สมการเส้นตรงที่ได้จากวิธีการถดถอยเชิงเส้นมีความไม่แน่นอน ดังนั้นการประยุกต์นำวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ที่สามารถ

ปรับปรุงให้การประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นนั้นมีประสิทธิภาพมากขึ้นได้ โดยรูปที่ 12 แสดงถึงการนำวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่เพื่อคำนวณแนวโน้มของ Performance ratio เฉลี่ยในแต่ละเดือน จากนั้นจึงใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้น กราฟสีส้มบอกถึงแนวโน้มของกราฟที่ได้จากวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ จากนั้นจึงใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้นเพื่อคำนวณหา regression line ของเส้นแนวโน้ม และนำเสนอการเส้นตรงที่ได้จากการถดถอยเชิงเส้นมาประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะจากสมการที่ (15) ต่อไป

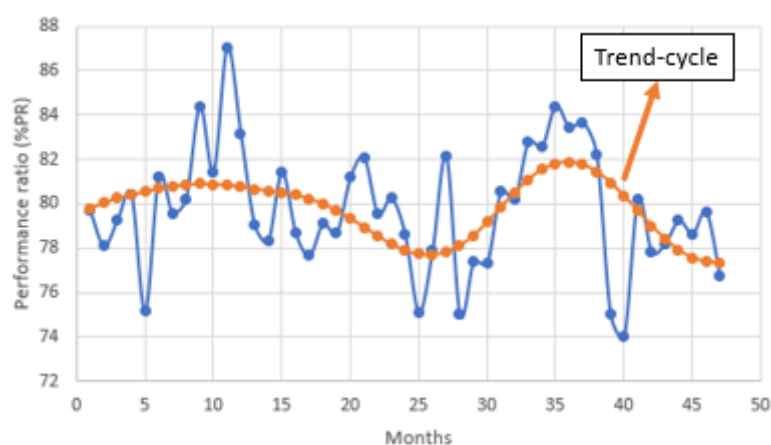


รูปที่ 12 ขั้นตอนของการแยกส่วนประกอบโดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่เพื่อหาแนวโน้มของข้อมูล Performance ratio

### 3.2.4 วิธีการทดสอบการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์โดยใช้โมเดล ARIMA ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้น

การประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะด้วยโมเดล ARIMA ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้นเป็นการคำนวณแนวโน้มของกราฟก่อนที่จะคำนวณหาสมการเส้นตรง ซึ่งมีขั้นตอนคล้ายกับการประเมินการแยกส่วนด้วยวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ โดยโมเดล ARIMA ช่วยในการลดค่าสหสัมพันธ์อัตโนมัติ (autocorrelation) และค่าความคลาดเคลื่อน (residuals) ทำให้มีความยืดหยุ่นและซับซ้อนมากกว่าวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ โมเดล ARIMA สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์แนวโน้มของกราฟ โดยมีจุดเด่นในการช่วยกำจัด noise, ลด error, เหมาะกับข้อมูลที่มีค่าการผันแปรตามฤดูกาลและสามารถจัดการกับข้อมูลที่ห่างจากกลุ่ม (outliers) ได้ [18] ในการใช้โมเดล ARIMA สามารถแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนได้แก่ (1) การกำหนด order ได้นำโปรแกรม X-13 ARIMA ซึ่งอยู่ใน library เสริมของ python และ R programming ที่พัฒนาโดยหน่วยงาน U.S. Census Bureau [19] โดยใช้ฟังก์ชัน Autocorrelation function (ACF) ในการหา order ที่มีเหมาะสมที่สุด และใช้ค่า Akaike's Information Criterion (AIC) เป็นเกณฑ์สำหรับการเลือกกระหว่างแบบจำลอง โดย order ที่เหมาะสมที่สุดจะมีค่า AIC น้อยที่สุด (2) การรันโมเดล ARIMA โดยใช้ข้อมูล Performance ratio รายเดือน โปรแกรมจะคำนวณและตรวจจับข้อมูลที่ผิดปกติ เพื่อให้ได้กราฟแนวโน้มการลดลงของ Performance ratio ดังรูปที่ 13 โดย

กราฟสี่สั้มแสดงถึงเส้นแนวโน้มที่คำนวณได้จากโมเดล ARIMA จากนั้นจึงใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้นเพื่อคำนวณหาสมการเส้นตรงที่ได้จากการถดถอยเชิงเส้นมาประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะจากสมการที่ (15) เนื่องจากการคำนวณแนวโน้มด้วยโมเดล ARIMA ได้ใช้ข้อมูลในอดีตมาคำนวณ จึงจำเป็นต้องใช้ข้อมูลอย่างน้อย 3 ปี เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำมากขึ้น โดยในกรณีที่ข้อมูลไม่ถึง 3 ปี ส่งผลให้ความแม่นยำในการคำนวณของโมเดล ARIMA ลดลง ซึ่งเป็นข้อจำกัดของโมเดล ARIMA



รูปที่ 13 ตัวอย่างกราฟแนวโน้มของข้อมูล Performance ratio ที่ได้จากการคำนวณด้วยโมเดล ARIMA



## บทที่ 4 การทดสอบและผลการวิจัย

### 4.1 ระยะเวลาทดสอบและเก็บข้อมูล

การตรวจติดตามข้อมูลการผลิตของระบบโซลาร์เซลล์เริ่มเก็บข้อมูลตั้งแต่เดือนตุลาคมปี 2018 ถึงเดือนสิงหาคม ปี 2022 แต่เนื่องจากระบบตรวจติดตามในบางโซนเกิดการขัดข้อง ทำให้ข้อมูลที่ได้รับในแต่ละโซนไม่เท่ากัน ตารางที่ 3 แสดงถึงจำนวนเดือนที่ใช้การทดสอบการคำนวณประสิทธิภาพและการเสื่อมสมรรถนะ โดยโซน A (CIGS) ใช้ข้อมูลตั้งแต่ ตุลาคมปี 2018 ถึงเดือน มีนาคม ปี 2021 เนื่องจากเกิดการขัดข้องในระบบตรวจติดตาม, โซน C (a-Si) ใช้ข้อมูลตั้งแต่เดือน ตุลาคมปี 2019 ถึงเดือนสิงหาคมปี 2022, โซน D ( $\mu$ c-Si) ใช้ข้อมูลตั้งแต่เดือนตุลาคมปี 2018 ถึงเดือนสิงหาคมปี 2022 และ โซน E ( $\mu$ c-Si) ใช้ข้อมูลตั้งแต่เดือนตุลาคมปี 2018 ถึงเดือนมีนาคม ปี 2022 เนื่องจากหลังเดือนมีนาคมระบบเกิดปัญหาอินเวอร์เตอร์ขัดข้องทำให้ประสิทธิภาพที่คำนวณได้ มีการลดลงอย่างเห็นได้ชัด จึงไม่สามารถใช้ในการคำนวณอัตราการเสื่อมสมรรถนะได้ ระบบตรวจติดตามเซลล์แสงอาทิตย์ได้เก็บข้อมูลการผลิตได้แก่ ความเข้มแสง, พลังงานที่ผลิตได้ และกำลังการผลิตของระบบ โดยพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการทดสอบนี้ได้แสดงดังตารางที่ 4 ซึ่งจะใช้พารามิเตอร์เหล่านี้ในการคำนวณประสิทธิภาพและอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์ต่อไป

ตารางที่ 3 ระยะเวลาการเก็บข้อมูลการผลิตของระบบโซลาร์เซลล์ทั้ง 4 โซน

| พารามิเตอร์                | ชนิดของแผงโซลาร์เซลล์ |                |          |          |
|----------------------------|-----------------------|----------------|----------|----------|
|                            | CIGS (A)              | $\mu$ c-Si (C) | a-Si (D) | a-Si (E) |
| ระยะเวลาเก็บข้อมูล (เดือน) | 30                    | 35             | 47       | 42       |

**ตารางที่ 4** สรุปพารามิเตอร์ที่ตรวจติดตาม และใช้ในการประเมินประสิทธิภาพและการเสื่อมสมรรถนะระบบโซลาร์เซลล์

| พารามิเตอร์    | รายละเอียดพารามิเตอร์  |
|----------------|--|
| $E_{PV}$       | พลังงานรวมที่ระบบโซลาร์เซลล์ผลิตได้ใน 1 วัน (kWh)                        |
| $P_{o, rated}$ | พิกัดกำลังของระบบโซลาร์เซลล์ (kW)  |
| $G_i$          | จำนวนความเข้มแสงที่ได้รับตลอดทั้งวัน ( $W/m^2$ )                         |
| $G_{STC}$      | ความเข้มแสงของมาตรฐาน Standard Test Conditions มีค่าเท่ากับ $1000 W/m^2$ |
| $P_{DC}$       | กำลังการผลิตของระบบโซลาร์เซลล์ในระดับ DC (kW)                            |
| $P_{AC}$       | กำลังการผลิตของระบบโซลาร์เซลล์ในระดับ AC (kW)                            |

## 4.2 ผลการทดสอบการประเมินประสิทธิภาพของระบบโซลาร์เซลล์

### 4.2.1 การทดสอบการประเมินประสิทธิภาพและเปรียบเทียบผลของระบบโซลาร์เซลล์

การคำนวณประสิทธิภาพโดยใช้พารามิเตอร์ Performance ratio ( $R_p$ ) ของระบบโซลาร์เซลล์มีจุดประสงค์เพื่อแสดงประสิทธิภาพและตรวจสอบความผิดปกติของระบบโซลาร์เซลล์ เนื่องจากการประเมินประสิทธิภาพด้วยพารามิเตอร์  $R_p$  ได้รับความนิยมในการประเมินประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าของระบบโซลาร์เซลล์ เพราะสามารถนำมาเปรียบเทียบกับแผงโซลาร์เซลล์ในพื้นที่อื่นได้ แผงโซลาร์เซลล์ตามมาตรฐานจะมี  $R_p$  อยู่ในช่วง 70-90%

การทดสอบได้คำนวณ  $R_p$  เฉลี่ยรายปีของระบบโซลาร์เซลล์โซน A, C, D และ E ซึ่งได้แสดงในตารางที่ 5 โดยได้ทำการคำนวณตั้งแต่ช่วงเวลาดังแต่เดือนตุลาคมปี 2018 ถึงเดือนสิงหาคมปี 2022 จากตารางผลการประเมินสังเกตได้ว่าเปอร์เซ็นต์  $R_p$  ในแต่ละปีมีการลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยประสิทธิภาพในปีที่ 1-2 มีค่าเฉลี่ยมากกว่าและเท่ากับ 70-80% ซึ่งอยู่ในช่วงค่ามาตรฐานของแผงโซลาร์เซลล์ ในทางกลับกัน  $R_p$  ของโซน A, C และ E มีค่าต่ำกว่า 70% ในปีสุดท้าย ซึ่งสาเหตุสามารถเกิดได้จากความผิดปกติในระบบ (fault) เช่นการเกิดฟองอากาศ และอินเวอร์เตอร์เสียหาย ระบบที่ติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ชนิด a-Si ให้ผลการลดลงน้อยที่สุด และมีเปอร์เซ็นต์สูงกว่าค่าเฉลี่ยมาตรฐานอ้างอิงจากค่าเฉลี่ย  $R_p$  ของแผงโซลาร์เซลล์ของ IEA PVPS มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 75% ซึ่งบอกถึงการวางระบบที่ดี ในส่วนนี้จึงสามารถคาดการณ์ได้ว่าระบบโซลาร์เซลล์ในโซน D มีอัตราเสื่อมสมรรถนะต่ำที่สุด

**ตารางที่ 5** ประสิทธิภาพเฉลี่ยรายปีของระบบโซลาร์เซลล์ โดยใช้พารามิเตอร์ Performance ratio ( $R_p$ )

| ชนิดของแผงโซลาร์เซลล์ | Performance ratio เฉลี่ยรายปี (%) |         |         |         |
|-----------------------|-----------------------------------|---------|---------|---------|
|                       | ปีที่ 1                           | ปีที่ 2 | ปีที่ 3 | ปีที่ 4 |
| 1. CIGS (A)           | 79.351                            | 76.765  | 70.999* | -       |
| 2. $\mu$ c-Si (C)     | -                                 | 78.461  | 75.624  | 68.895* |
| 3. a-Si 1(D)          | 80.82                             | 79.567  | 79.919  | 78.693* |
| 4. a-Si 2(E)          | 80.714                            | 77.802  | 77.665  | 74.672* |

\*หมายเหตุ: ในปีที่ 3 ของโซน A ได้นำ  $R_p$  เฉลี่ยทั้งหมด 6 เดือนเท่านั้น และในปีที่ 4 โซน C และ D ได้นำ  $R_p$  เฉลี่ยทั้งหมด 11 เดือน และโซน E ได้นำ  $R_p$  เฉลี่ยทั้งหมด 6 เดือนเท่านั้น

#### 4.2.2 การทดสอบความเกี่ยวข้องของอินเวอร์เตอร์ต่อการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์

การทดสอบได้คำนวณประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์โดยใช้สมการที่ 16 ผลการทดสอบแสดงในตารางที่ 6 พบว่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ในระยะเวลาการตรวจติดตามเวลา 2 ปี มีการเพิ่มขึ้นหรือลดลงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการทำงานของอินเวอร์เตอร์ไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์ สาเหตุที่อินเวอร์เตอร์ไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเสื่อมสมรรถนะคาดว่ามาจากสถานที่ติดตั้งอินเวอร์เตอร์ จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าเมื่ออินเวอร์เตอร์ทำงานในที่อุณหภูมิสูง พบว่ามีประสิทธิภาพจะลดลง 2.5% [16] โดยอินเวอร์เตอร์ที่ทางโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ อำเภอทับสะแก จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ ได้ติดตั้งในห้องที่มีระบบระบายอากาศทำให้อุณหภูมิจากภูมิอากาศภายนอกไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของอินเวอร์เตอร์

**ตารางที่ 6** การทดสอบความเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์กับประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์

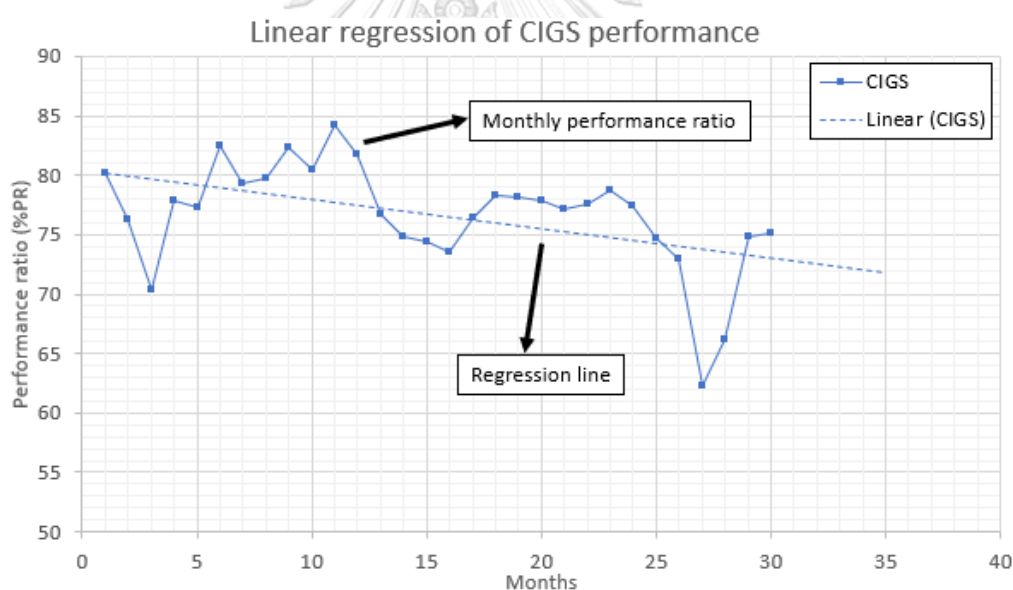
| ชนิดของแผงโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้ง | ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์เฉลี่ยปีที่ 1 | ประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์เฉลี่ยปีที่ 2 |
|---------------------------------|--|--|
| 1. Zone A (CIGS)                | 97.6523                                  | 97.7274                                  |
| 2. Zone C ( $\mu$ c-Si)         | 97.6012                                  | 97.6243                                  |
| 3. Zone D (a-Si)                | 97.6219                                  | 97.761                                   |
| 4. Zone E (a-Si)                | 97.7984                                  | 97.7274                                  |



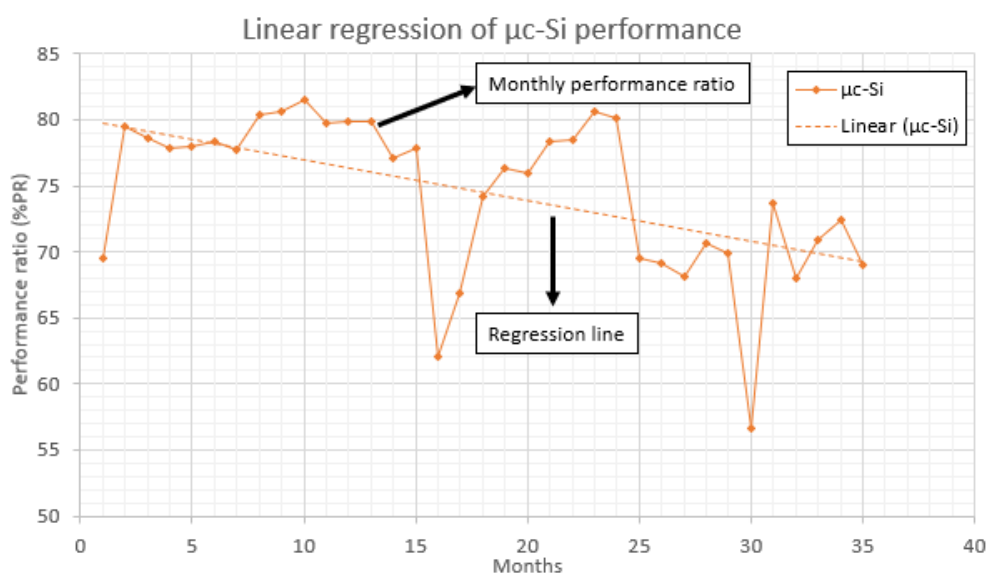
### 4.3 ผลการทดสอบการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์

#### 4.3.1 ผลการทดสอบประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์โดยใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้น

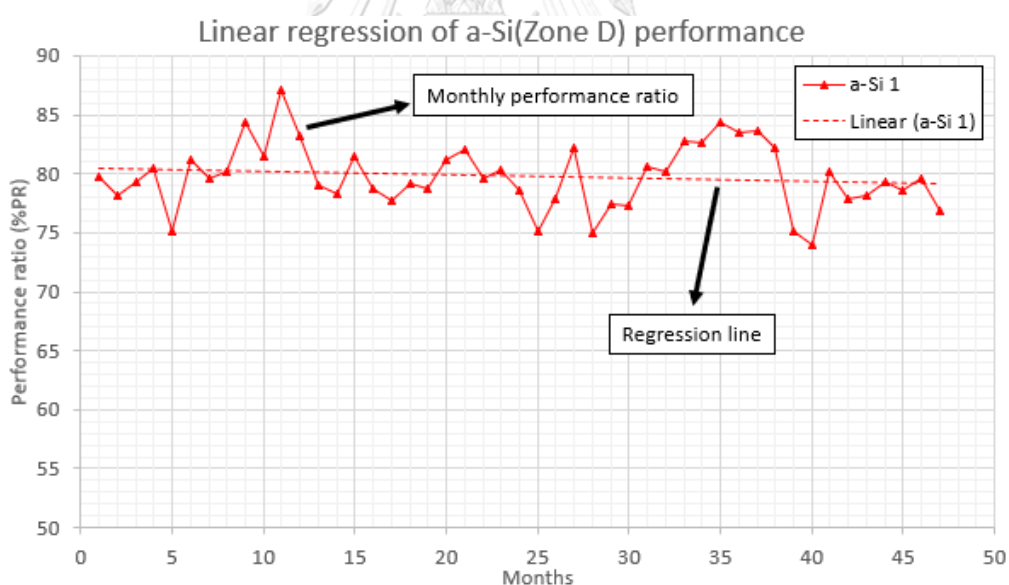
การทดสอบการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะโดยใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้นได้นำ  $R_p$  ที่คำนวณได้ของระบบโซลาร์เซลล์ในโซน A, C, D และ E เฉลี่ยในแต่ละเดือนมาวาดลงบนกราฟ โดยจะกำหนดนำช่วงที่มี  $R_p$  อยู่ในช่วง 30% ถึง 100% มาคำนวณ เพื่อใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้นคำนวณสมการเส้นตรงและเปรียบเทียบความแตกต่าง การทดสอบได้จำแนกกราฟให้แต่ละโซน ดังรูปที่ 14 ถึงรูปที่ 17 โดยแสดงถึงค่า  $R_p$  เฉลี่ยรายเดือนและเส้น regression line ของสมการเส้นตรงที่ได้จากวิธีการถดถอยเชิงเส้นของโซน A, C, D และ E ตามลำดับ และภาพรวมของกราฟทั้ง 4 โซนได้แสดงดังรูปที่ 18 ซึ่งบ่งบอกถึงความชันกราฟ  $R_p$  เพื่อใช้เปรียบเทียบ โดยกราฟที่มีความชันลดลงมากที่สุดจะมีอัตราการเสื่อมสมรรถนะสูงที่สุด



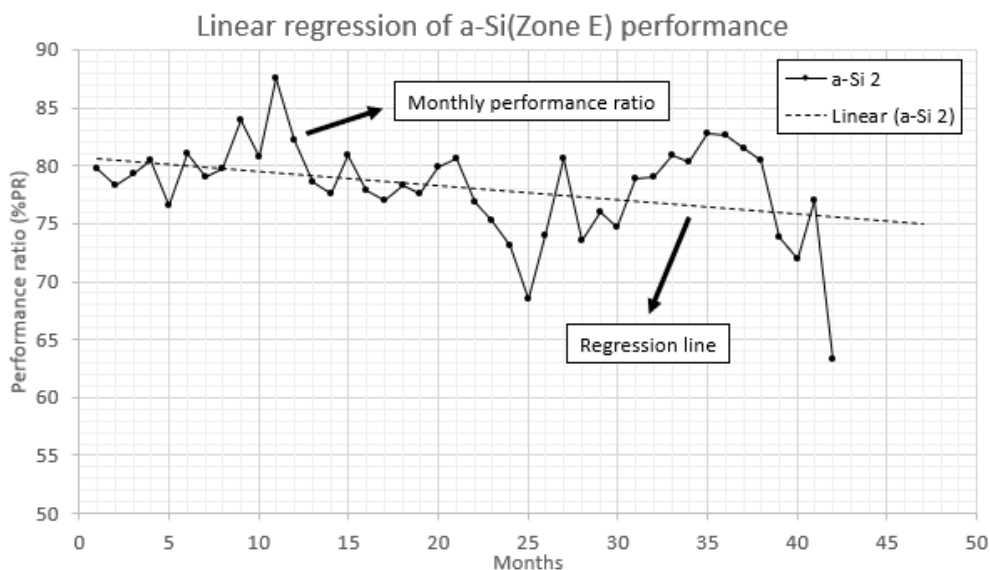
รูปที่ 14 กราฟแสดงประสิทธิภาพเฉลี่ยรายเดือนและกราฟการถดถอยเชิงเส้นของระบบโซลาร์เซลล์ชนิด CIGS (Zone A)



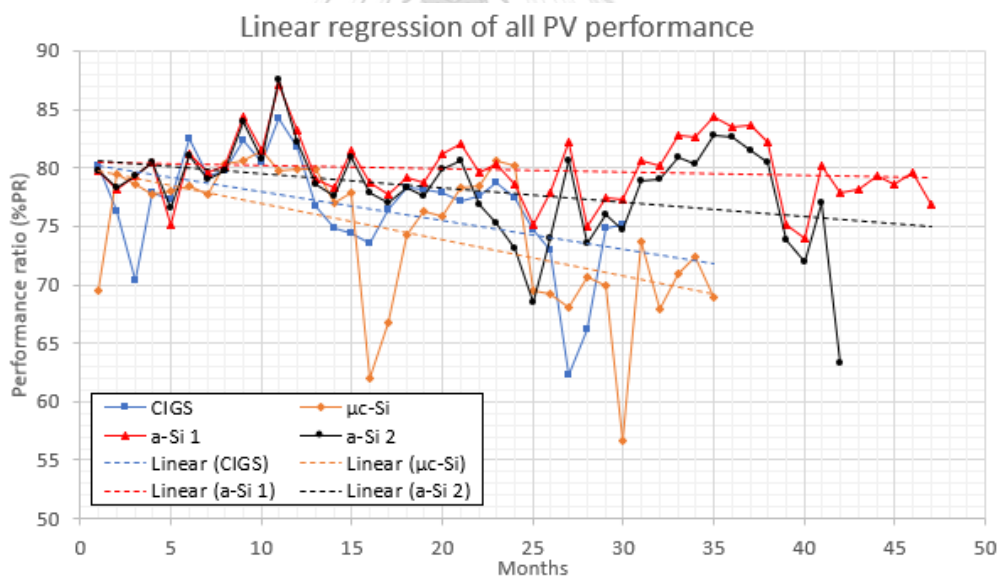
รูปที่ 15 กราฟแสดงประสิทธิภาพเฉลี่ยรายเดือนและกราฟการถดถอยเชิงเส้นของระบบโซลาร์เซลล์ชนิด  $\mu\text{c-Si}$  (Zone C)



รูปที่ 16 กราฟแสดงประสิทธิภาพเฉลี่ยรายเดือนและกราฟการถดถอยเชิงเส้นของระบบโซลาร์เซลล์ชนิด a-Si (Zone D)



รูปที่ 17 กราฟแสดงประสิทธิภาพเฉลี่ยรายเดือนและกราฟการถดถอยเชิงเส้นของระบบโซลาร์เซลล์  
ชนิด a-Si (Zone E)



รูปที่ 18 กราฟแสดงประสิทธิภาพเฉลี่ยรายเดือนและกราฟการถดถอยเชิงเส้นของระบบโซลาร์เซลล์  
ทั้ง 4 โซน

ผลการประเมินอัตราการเสื่อมสภาพของระบบโซลาร์เซลล์ได้แสดงดังตารางที่ 7 โดยโซน A(CIGS) มีอัตราการเสื่อมสมรรถนะเท่ากับ -3.6621 %/ปี, โซน C( $\mu$ C-Si) มีอัตราการเสื่อมสมรรถนะเท่ากับ -4.6535 %/ปี, โซน D(a-Si 1) มีอัตราการเสื่อมสมรรถนะเท่ากับ -0.4074 %/ปี, โซน E(a-Si 2) มีอัตราการเสื่อมสมรรถนะเท่ากับ -1.8272 %/ปี

ตารางที่ 7 การคำนวณความเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์ด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น

| พารามิเตอร์     | ชนิดของแผงโซลาร์เซลล์ |                      |           |           |
|-----------------|-----------------------|----------------------|-----------|-----------|
|                 | CIGS (A)              | $\mu\text{c-Si}$ (C) | a-Si 1(D) | a-Si 2(E) |
| ความชัน (m)     | -0.2455               | -0.3105              | -0.0273   | -0.123    |
| จุดตัดแกน y (c) | 80.4521               | 80.071               | 80.4274   | 80.7924   |
| $R_D$ (%/ปี)    | -3.6621               | -4.6535              | -0.4074   | -1.8272   |

เปอร์เซ็นต์อัตราการเสื่อมสมรรถนะรายปีแสดงถึงแนวโน้มการลดลงของประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของระบบโซลาร์เซลล์เฉลี่ยต่อปี จากข้อมูลเปอร์เซ็นต์อัตราการเสื่อมสมรรถนะของโซน C มีค่าสูงที่สุด และอัตราการเสื่อมสมรรถนะของโซน D มีค่าต่ำที่สุด จากการทดสอบพบว่าประสิทธิภาพของระบบโซลาร์เซลล์ในโซน A และ C มีอัตราการลดลงรายปีสูง ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการเสื่อมสมรรถนะ พบกับแผงโซลาร์เซลล์ในโซน A เกิดฟองอากาศ (Bubbles) ดังรูปที่ 19 ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีทำให้เกิดก๊าซขึ้นบนแผง [20] โดยปรากฏการณ์นี้เกิดจากการเสื่อมในการยึดเกาะของ Ethylene Vinyl Acetate (EVA) จึงเกิดฟองอากาศ เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพการผลิตลดลงในช่วงปีที่ 3 ของการเก็บข้อมูล รวมถึงส่งผลต่อความสามารถในการกระจายความร้อนบนแผงและอายุการใช้งานลดลง



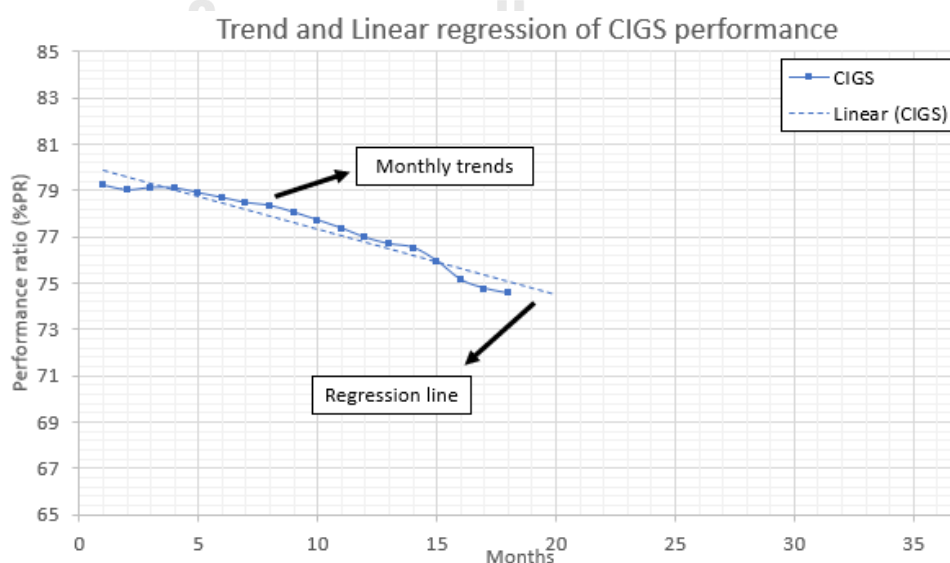
รูปที่ 19 การเกิดฟองอากาศบนแผงโซลาร์เซลล์ในโซน A(CIGS)

เนื่องจากแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นไม่ได้คำนึงถึงความแปรผันตามฤดูกาล ทำให้กราฟเส้นตรงที่ได้จากการทำการถดถอยเชิงเส้นมีความไม่คงที่ เพราะอัตราการผลิตของแผงโซลาร์เซลล์แปรผันตามฤดูกาลในได้ เช่นฤดูร้อนมีอัตราการผลิตสูง และในขณะเดียวกันฤดูหนาวอาจมีอัตราการผลิตที่ต่ำ ดังนั้นสมการเส้นตรงที่ได้จากแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นนั้นจึงมีความไม่แน่นอนและมี

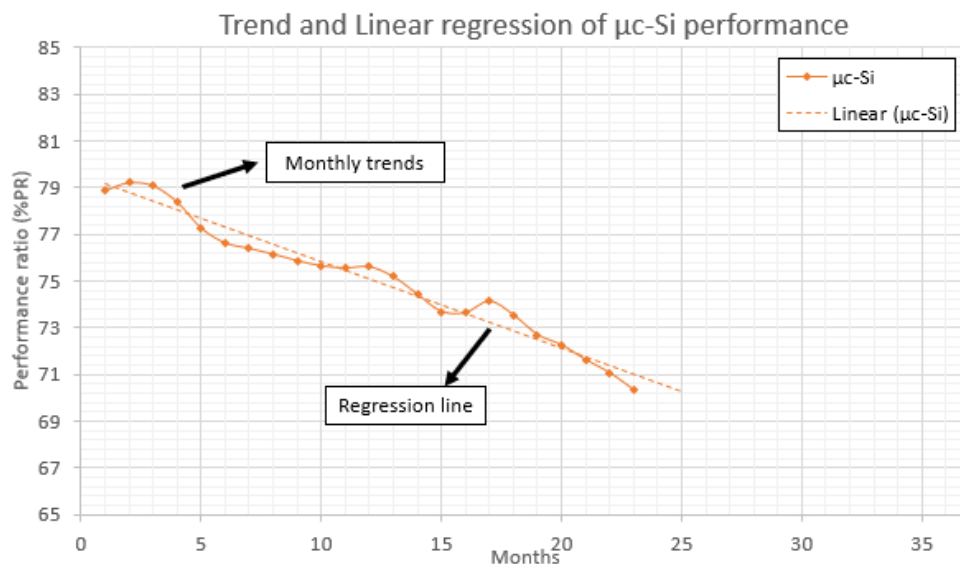
โอกาสที่จะมีความผิดพลาดในการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะเมื่อคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของฤดูกาล ในส่วนถัดไปจึงได้ทดสอบการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะโดยคำนึงถึงความแปรผันของฤดูกาลด้วยวิธี Classical seasonal decomposition (CSD)

#### 4.3.2 ผลการทดสอบการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้น

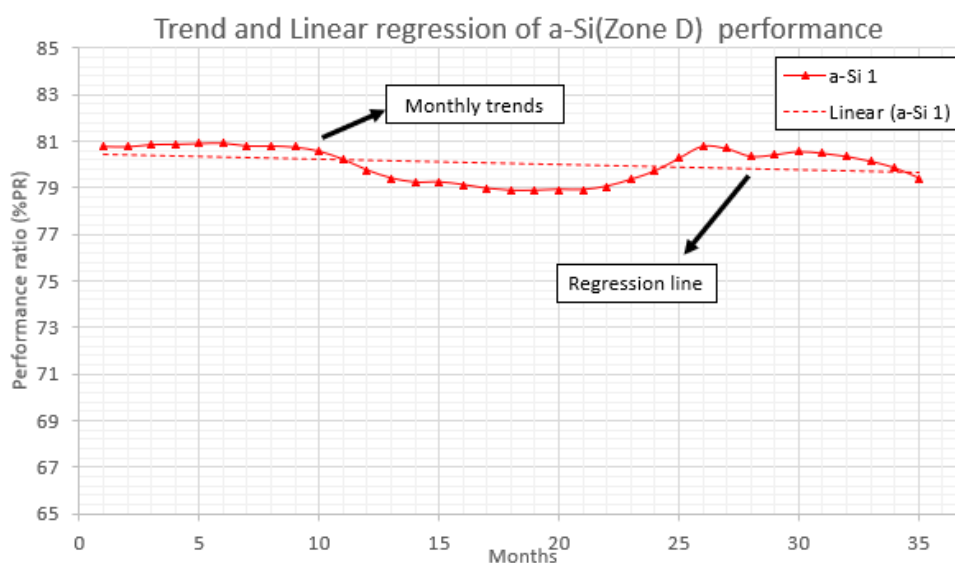
การทดสอบการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะด้วยวิธีการแยกส่วนประกอบด้วยค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ ได้ถูกนำมาใช้ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้น ซึ่งเป็นการประยุกต์ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่แบบง่าย ณ จุดกึ่งกลาง (Centered moving average) วิธีนี้ได้จำแนกความแปรผันตามฤดูกาลออกจากกราฟให้เหลือแต่แนวโน้มการเพิ่มขึ้น-ลดลงของข้อมูลเท่านั้น ทำให้ลดผลกระทบของตัวแปรฤดูกาลและลดการกระจายของข้อมูลที่ส่งผลต่อการทำวิธีการถดถอยเชิงเส้น โดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่เพื่อคำนวณหาเส้นแนวโน้ม (Trend line) ของ  $R_p$  เฉลี่ยในแต่ละเดือน ในรูปที่ 20 ถึงรูปที่ 23 ได้แสดงถึงกราฟแนวโน้ม  $R_p$  ของระบบโซลาร์เซลล์ของโซน A, C, D และ E หลังจากที่ได้ใช้วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่เพื่อคำนวณหาแนวโน้ม  $R_p$  ของระบบโซลาร์เซลล์ โดยได้กำหนดช่วงในการทำค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่เท่ากับ 12 ซึ่งเท่ากับจำนวนเดือนในหนึ่งปี ซึ่งค่าที่ได้จากการทำค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่จะแสดงถึงแนวโน้มการลดลงของประสิทธิภาพการผลิตของระบบโซลาร์เซลล์ จากนั้นจึงนำวิธีการถดถอยเชิงเส้นเพื่อคำนวณสมการเส้นตรงและเปรียบเทียบเพื่อประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะ กราฟรวมของทั้ง 4 โซนได้แสดงดังรูปที่ 24 ซึ่งบ่งบอกถึงภาพรวมแนวโน้มทิศทางการลดลงของ  $R_p$  และความชันกราฟที่ได้จากวิธีการถดถอยเชิงเส้น โดยกราฟที่มีความชันลดลงมากที่สุดจะมีอัตราการเสื่อมสมรรถนะสูงที่สุด



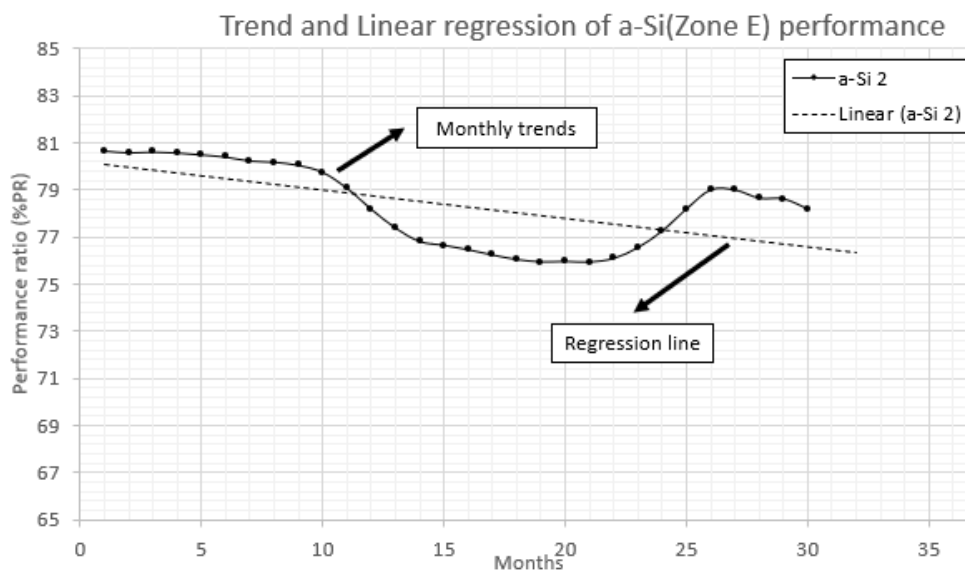
รูปที่ 20 กราฟเส้นตรงแสดงค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของประสิทธิภาพการผลิตและการถดถอยเชิงเส้นของระบบโซลาร์เซลล์ชนิด CIGS (Zone A)



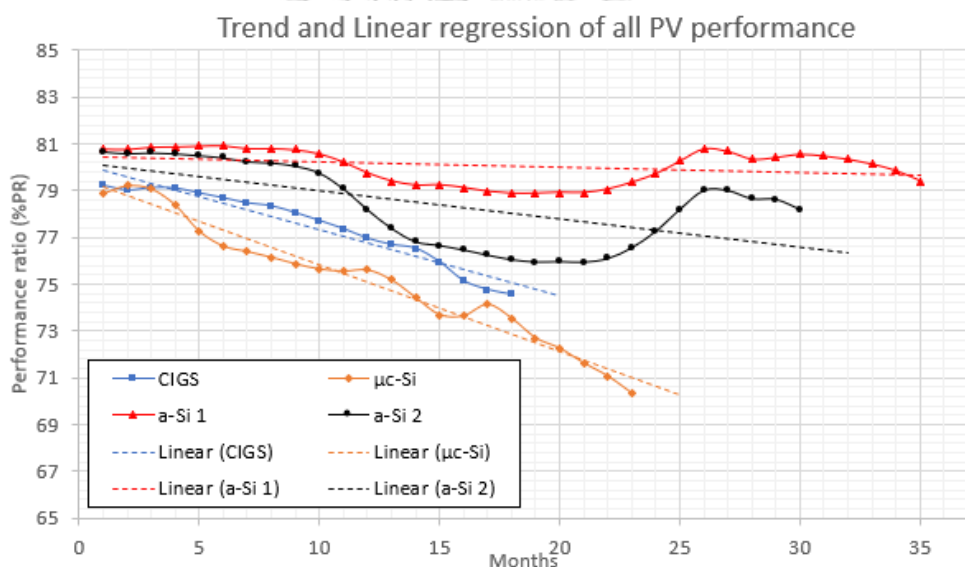
รูปที่ 21 กราฟเส้นตรงแสดงค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของประสิทธิภาพการผลิตและการถดถอยเชิงเส้นของระบบโซลาร์เซลล์ชนิด  $\mu$ -Si (Zone C)



รูปที่ 22 กราฟเส้นตรงแสดงค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของประสิทธิภาพการผลิตและการถดถอยเชิงเส้นของระบบโซลาร์เซลล์ชนิด a-Si (Zone D)



รูปที่ 23 กราฟเส้นตรงแสดงค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของประสิทธิภาพการผลิตและการถดถอยเชิงเส้นของระบบโซลาร์เซลล์ชนิด a-Si (Zone E)



รูปที่ 24 กราฟเส้นตรงแสดงค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ของประสิทธิภาพการผลิตและการถดถอยเชิงเส้นของระบบโซลาร์เซลล์ทั้ง 4 โซน

ตารางที่ 8 ได้แสดงถึงผลการประเมินอัตราการเสื่อมสภาพของระบบโซลาร์เซลล์ โดยโซน A(CIGS) มีอัตราการเสื่อมสมรรถนะเท่ากับ  $-4.1917\%$ /ปี, โซน C( $\mu$ c-Si) มีอัตราการเสื่อมสมรรถนะเท่ากับ  $-5.4237\%$ /ปี, โซน D(a-Si 1) มีอัตราการเสื่อมสมรรถนะเท่ากับ  $-0.3235\%$ /ปี, โซน E(a-Si 2) มีอัตราการเสื่อมสมรรถนะเท่ากับ  $-1.7598\%$ /ปี



**ตารางที่ 8** การคำนวณความเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์ด้วยวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ร่วมกับวิธีการถดถอยเชิงเส้น

| พารามิเตอร์     | ชนิดของแผงโซลาร์เซลล์ |                |           |           |
|-----------------|-----------------------|----------------|-----------|-----------|
|                 | CIGS (A)              | $\mu$ c-Si (C) | a-Si 1(D) | a-Si 2(E) |
| ความชัน (m)     | -0.2861               | -0.3695        | -0.0217   | -0.1186   |
| จุดตัดแกน y (c) | 81.9178               | 81.7541        | 80.5523   | 80.8819   |
| $R_p$ (%/ปี)    | -4.1917               | -5.4237        | -0.3235   | -1.7598   |

จากการทดสอบพบว่าอัตราการเสื่อมสมรรถนะของโซน C มีค่าสูงที่สุด และอัตราการเสื่อมสมรรถนะของโซน D มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งเหมือนกับการประเมินด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น และมีอัตราการเสื่อมสมรรถนะใกล้เคียงกัน ดังนั้นการนำวิธีการแยกส่วนประกอบ (Decomposition) มาใช้ร่วมกับวิธีการถดถอยเชิงเส้น จึงช่วยเพิ่มความถูกต้องในการประเมินการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์ ซึ่งเป็นการนำข้อมูลในอดีตมาหาค่าเฉลี่ยในช่วงเวลาที่กำหนด ทำให้ช่วยลดความผิดปกติออกไปจากข้อมูลในกรณีที่มีข้อมูลเพิ่มขึ้นหรือลดลงที่เกิดจากปัจจัยภายนอก เช่น สภาพอากาศ และความผิดปกติของระบบ อีกทั้งการประยุกต์วิธีการถดถอยเชิงเส้นร่วมกับการแยกส่วนประกอบได้จำแนกดัชนีฤดูกาลออกจากกราฟ ทำให้สามารถนำดัชนีจากฤดูกาลพัฒนาให้สามารถพยากรณ์อัตราการผลิตได้ ในส่วนถัดไปได้ทำการทดสอบการประเมินการเสื่อมสมรรถนะโดยใช้โมเดล ARIMA ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้น

#### 4.3.3 ผลการทดสอบการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์โดยใช้โมเดล ARIMA ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้น

การประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะด้วยโมเดล ARIMA ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้น มีลักษณะการประเมินคล้ายกับวิธีแยกส่วนประกอบด้วยค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ แต่มีความยืดหยุ่นและซับซ้อนมากกว่า เนื่องจากสามารถลดค่าสหสัมพันธ์อัตโนมัติ, ค่าความคลาดเคลื่อน และการกระจายของ  $R_p$  จากกราฟในแต่ละเดือนได้ การประเมินได้นำ library X-13 ARIMA ที่จัดทำโดยองค์กร U.S. Census Bureau ซึ่งเป็นฟังก์ชันการคำนวณโมเดล ARIMA สำหรับการถอดความแปรผันตามฤดูกาลออกจากกราฟเพื่อวิเคราะห์แนวโน้มและการเบี่ยงเบน ในการคำนวณด้วยโมเดล ARIMA จำเป็นต้องกำหนด Order ที่เหมาะสม การทดสอบจึงได้นำข้อมูล  $R_p$  ของระบบโซลาร์เซลล์มาคำนวณการค้นหาแบบกริด (Grid Search) และนำผลลัพธ์มาคำนวณหาค่า Akaike Information

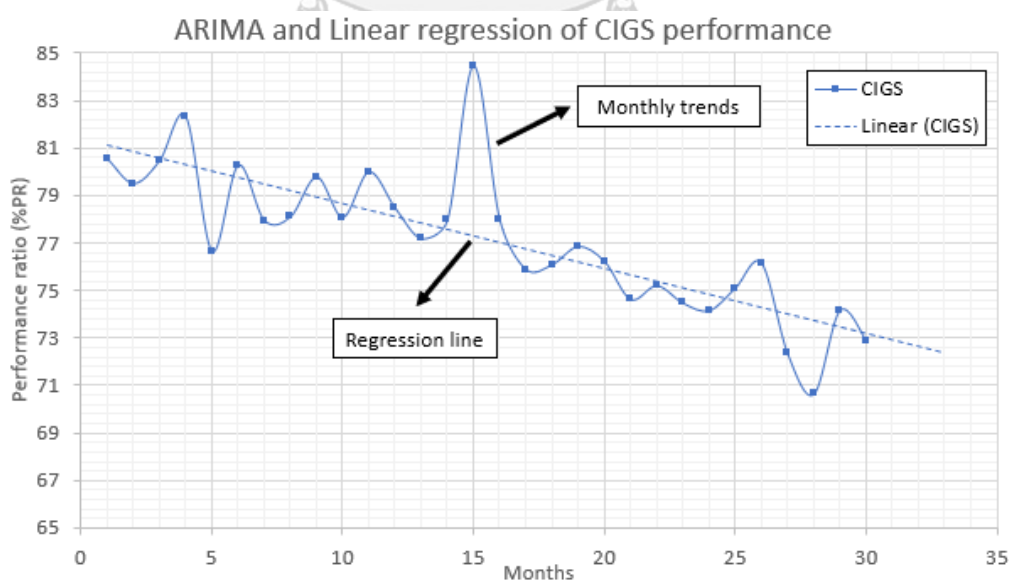


Criterion (AIC) โดยรูปแบบ Order ที่เหมาะสมที่สุดจะให้ผลการคำนวณได้ค่า AIC น้อยที่สุด ตารางที่ 9 แสดงถึง Order ที่เหมาะสมหลังจากค้นหาแบบกริดด้วยโปรแกรม X-13 ARIMA

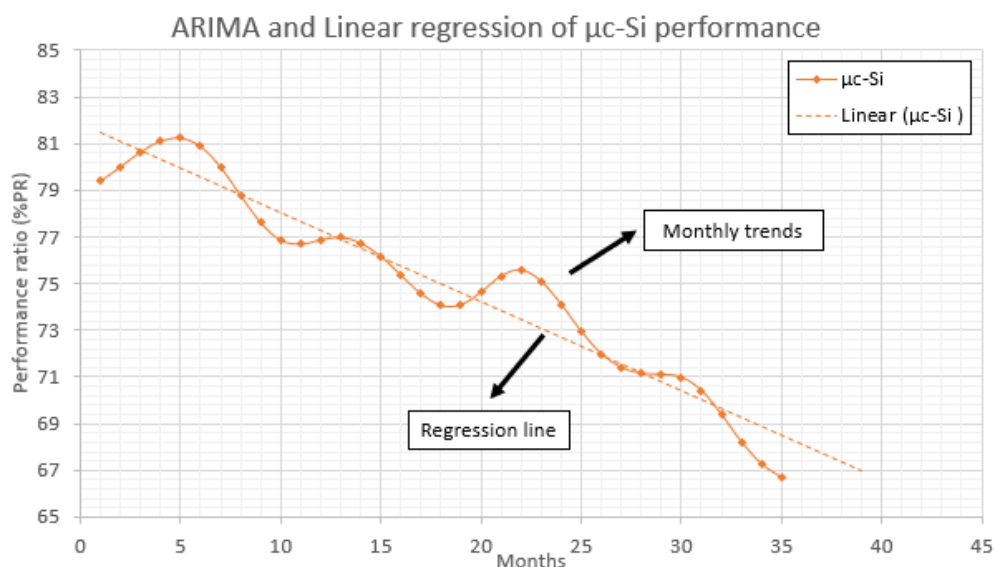
ตารางที่ 9 การกำหนด Order ของโมเดล ARIMA สำหรับการคำนวณ

| ชนิดของแผงโซลาร์เซลล์ | Order ของโมเดล ARIMA (p,d,q)(P,D,Q) <sub>m</sub> |
|-----------------------|--|
| 1. CIGS (A)           | (0,1,1)(0,1,1) <sub>12</sub>                     |
| 2. $\mu$ c-Si (C)     | (0,1,1)(0,1,1) <sub>12</sub>                     |
| 3. a-Si 1 (D)         | (1,0,0) <sub>12</sub>                            |
| 4. a-Si 2 (E)         | (0,1,1) <sub>12</sub>                            |

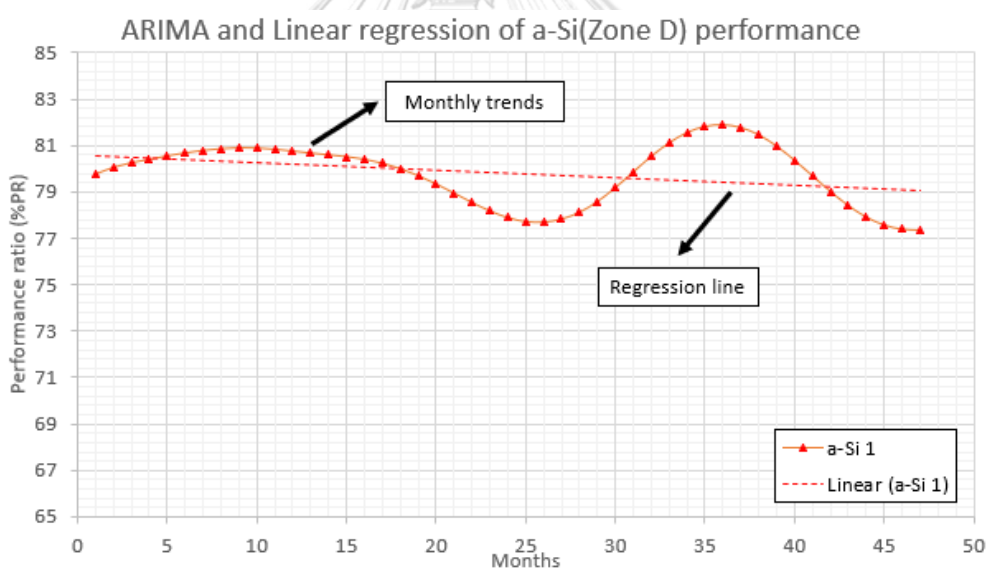
รูปที่ 25 ถึงรูปที่ 28 ได้แสดงถึงกราฟแนวโน้ม  $R_p$  เฉลี่ยรายเดือนหลังจากถอดตัวแปรฤดูกาลด้วยโมเดล ARIMA ของโซน A, C, D และ E และใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้นเพื่อคำนวณสมการเส้นตรงและเปรียบเทียบอัตราการเสื่อมสมรรถนะ ภาพรวมของกราฟทั้ง 4 โซนได้แสดงดังรูปที่ 29 แสดงถึงความชันของสมการเส้นตรงของกราฟทั้ง 4 โซน โดยกราฟที่มีความชันลดลงมากที่สุดจะมีอัตราการเสื่อมสมรรถนะสูงที่สุด



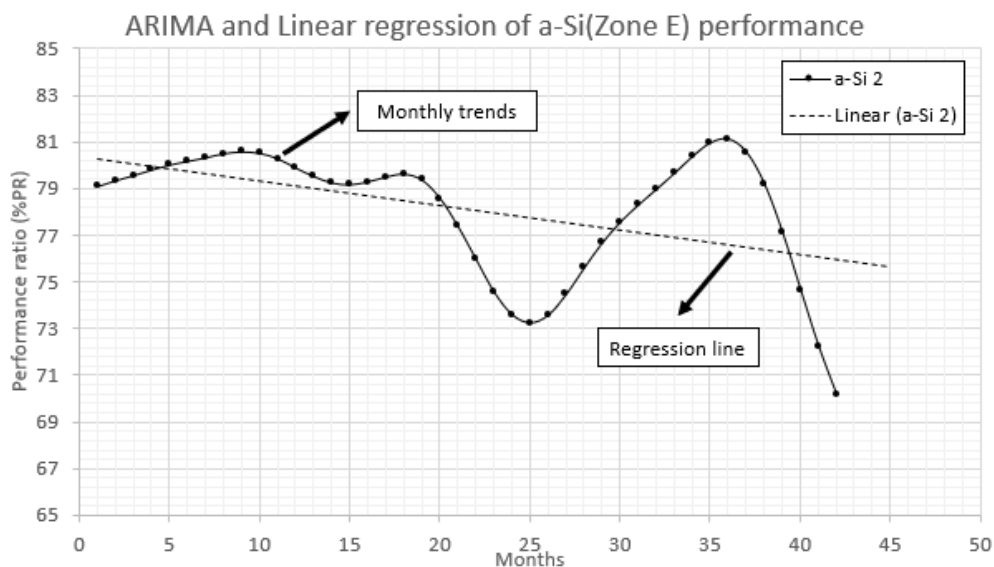
รูปที่ 25 กราฟแสดงแนวโน้มประสิทธิภาพเฉลี่ยรายเดือนและกราฟเส้นตรงที่ได้จากการใช้โมเดล ARIMA ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้นของระบบโซลาร์เซลล์ชนิด CIGS (Zone A)



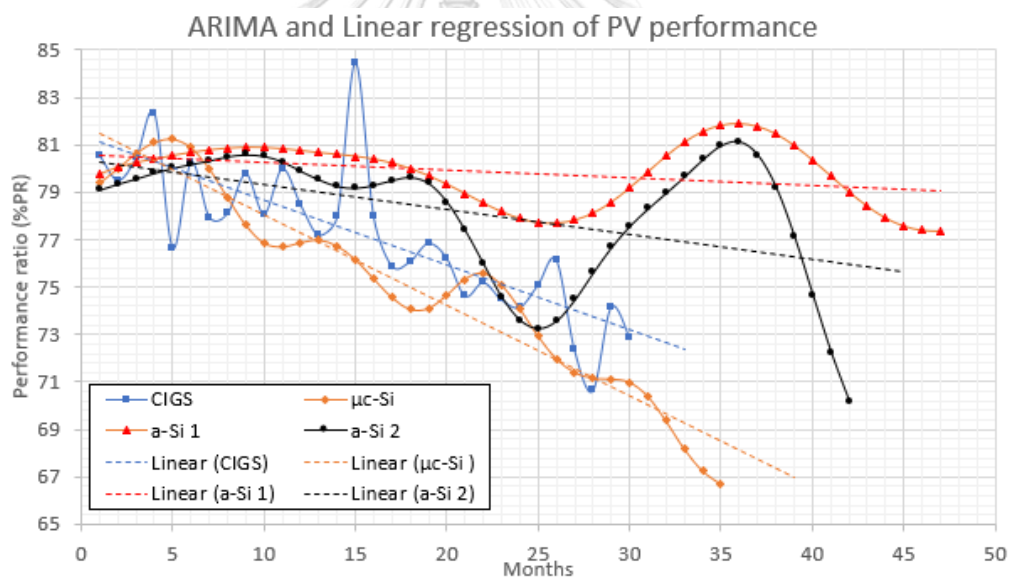
รูปที่ 26 กราฟแสดงแนวโน้มประสิทธิภาพเฉลี่ยรายเดือนและกราฟเส้นตรงที่ได้จากการใช้โมเดล ARIMA ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้นของระบบโซลาร์เซลล์ชนิด  $\mu\text{c-Si}$  (Zone C)



รูปที่ 27 กราฟแสดงแนวโน้มประสิทธิภาพเฉลี่ยรายเดือนและกราฟเส้นตรงที่ได้จากการใช้โมเดล ARIMA ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้นของระบบโซลาร์เซลล์ชนิด a-Si (Zone D)



รูปที่ 28 กราฟแสดงแนวโน้มประสิทธิภาพเฉลี่ยรายเดือนและกราฟเส้นตรงที่ได้จากการใช้โมเดล ARIMA ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้นของระบบโซลาร์เซลล์ชนิด a-Si (Zone E)



รูปที่ 29 กราฟแสดงแนวโน้มประสิทธิภาพเฉลี่ยรายเดือนและกราฟเส้นตรงที่ได้จากการใช้โมเดล ARIMA ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้นของระบบโซลาร์เซลล์ทั้ง 4 โซน

ตารางที่ 10 ได้แสดงถึงผลการประเมินอัตราการเสื่อมสภาพของระบบโซลาร์เซลล์ โดยโซน A(CIGS) มีอัตราการเสื่อมสมรรถนะเท่ากับ  $-4.0288$  %/ปี, โซน C( $\mu$ c-Si) มีอัตราการเสื่อมสมรรถนะเท่ากับ  $-5.5892$  %/ปี, โซน D(a-Si 1) มีอัตราการเสื่อมสมรรถนะเท่ากับ  $-0.4753$  %/ปี, โซน E(a-Si 2) มีอัตราการเสื่อมสมรรถนะเท่ากับ  $-1.56$  %/ปี

**ตารางที่ 10** การคำนวณความเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์ด้วยโมเดล ARIMA ร่วมกับวิธีการถดถอยเชิงเส้น

| พารามิเตอร์     | ชนิดของแผงโซลาร์เซลล์ |                |           |           |
|-----------------|-----------------------|----------------|-----------|-----------|
|                 | CIGS (A)              | $\mu$ c-Si (C) | a-Si 1(D) | a-Si 2(E) |
| ความชัน (m)     | -0.2733               | -0.3812        | -0.0319   | -0.1045   |
| จุดตัดแกน y (c) | 81.3949               | 81.8404        | 80.5486   | 80.3687   |
| $R_p$ (%/ปี)    | -4.0288               | -5.5892        | -0.4753   | -1.56     |

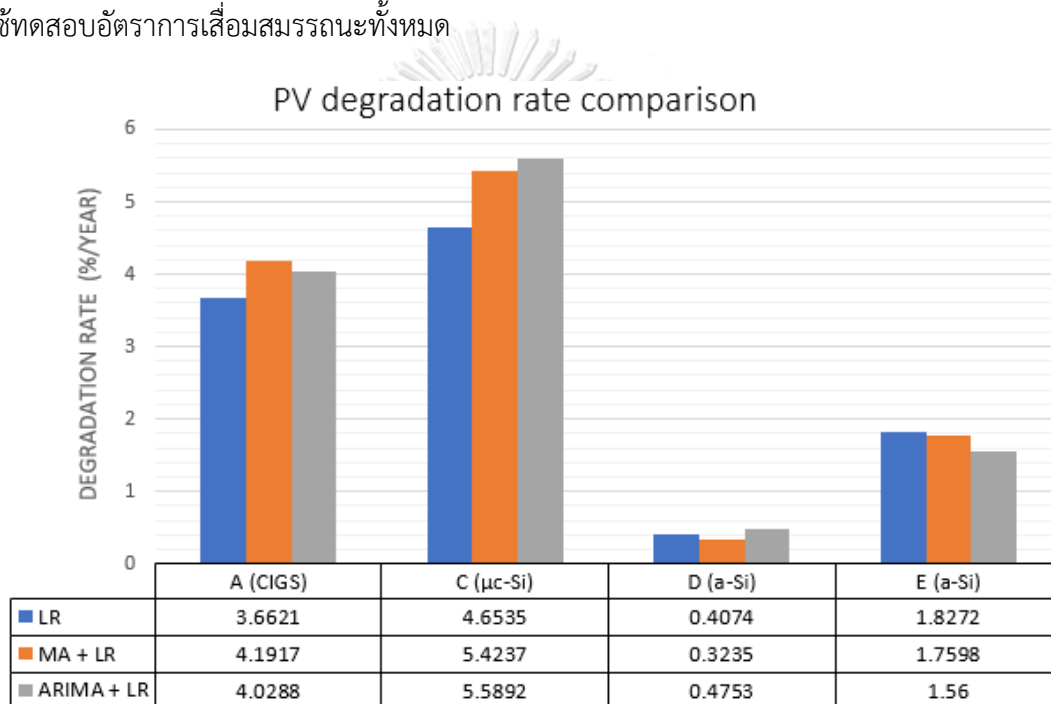
จากการทดสอบการคำนวณพบว่าอัตราการเสื่อมสมรรถนะของโซน C มีค่าสูงที่สุด และอัตราการเสื่อมสมรรถนะของโซน D มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์คล้ายกับวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้นและมีลำดับสูงสุด-ต่ำสุดของเปอร์เซ็นต์การเสื่อมสมรรถนะเหมือนกัน เนื่องจากโมเดล ARIMA มีการแยกส่วนกราฟเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณแนวโน้มของกราฟเหมือนกัน แต่โมเดล ARIMA ได้ทำการลดค่าความคลาดเคลื่อน ความผิดปกติ (noise) และการกระจายของ  $R_p$  และโมเดล ARIMA ได้นำข้อมูลในอดีตในการอ้างอิงในการคำนวณแนวโน้มของกราฟ ผนวกกับโมเดล ARIMA เป็นโมเดลที่ได้รับความนิยมในการพยากรณ์ ทำให้สามารถนำข้อมูลที่คำนวณมาพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับพยากรณ์ประสิทธิภาพต่อไปในอนาคตได้ ดังนั้นเพื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมของวิธีการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะ ในส่วนถัดไปจึงได้ทำการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้น และโมเดล ARIMA ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้น

#### 4.4 สรุปผลการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะและการเปรียบเทียบของระบบโซลาร์เซลล์

การทดสอบได้รวบรวมผลการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะรายปีของระบบโซลาร์เซลล์ที่ใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้น (LR) วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (MA) ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้น และโมเดล ARIMA ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้น เพื่อนำมาเปรียบเทียบความเหมาะสมต่อการใช้ในประเมินการเสื่อมสมรรถนะ รูปที่ 30 แสดงถึงผลการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะของการทดสอบทั้ง 3 วิธีในรูปแบบแผนภูมิ จากแผนภูมิสังเกตได้ว่าระบบโซลาร์เซลล์ในโซน C ( $\mu$ c-Si) มีเปอร์เซ็นต์การเสื่อมสมรรถนะสูงที่สุด รองลงมาได้แก่โซน A (CIGS) โซน E (a-Si) ตามลำดับ และโซน D (a-Si) มี

เปอร์เซ็นต์การเสื่อมสมรรถนะต่ำที่สุด โดยมีผลลัพธ์ไปในทิศทางเดียวกันและมีความแตกต่างของการประเมินน้อยที่สุดเท่ากับ 0.07%/ปี และสูงสุดเท่ากับ 0.99%/ปี

การผลิตไฟฟ้าของระบบโซลาร์เซลล์มีรูปแบบไม่เป็นเส้นตรงจากผลของฤดูกาลที่ทำให้การผลิตไฟฟ้าในแต่ละเดือนไม่เท่ากัน ทำให้เกิด error จากการทำการถดถอยเชิงเส้น เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะด้วยสมการเส้นตรงเท่านั้น ดังนั้นในส่วนถัดไปจึงได้ทำการคำนวณความเหมาะสมของวิธีการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะกับสมการเส้นตรงที่ได้จากการทำการถดถอยเชิงเส้นและคำนวณ error เพื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมของอัลกอริทึมของวิธีที่ใช้ทดสอบอัตราการเสื่อมสมรรถนะทั้งหมด



รูปที่ 30 แผนภูมิเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของระบบโซลาร์เซลล์ทั้ง 4 โซน

#### 4.4.1 การเปรียบเทียบความเหมาะสมของโมเดลโดยใช้ Root mean square error (RMSE)

การเปรียบเทียบได้นำพารามิเตอร์ Root mean square error (RMSE) ซึ่งเป็นเกณฑ์สำหรับวัดประสิทธิภาพโมเดลหรืออัลกอริทึมจากการทำ Machine Learning เช่น การทำ Linear regression ที่ได้คำนวณในการทดสอบนี้ การสมการคำนวณ RMSE สามารถคำนวณได้ดังสมการที่

สมการการคำนวณ Root mean square error (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{N}} \quad (17)$$

โดยกำหนดให้

$\hat{y}_i$  = ค่าของข้อมูลที่ได้จากโมเดลการทดสอบนี้ได้แก่ สมการ Linear regression

$y_i$  = ค่าของข้อมูลจริงที่วัดได้ในการทดสอบนี้ได้แก่ Performance ratio ( $R_p$ )

$N$  = จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่นำมาคำนวณ

RMSE เป็นพารามิเตอร์สำหรับใช้ประเมินประสิทธิภาพของโมเดลการถดถอย (Regression model) ซึ่งบ่งบอกถึงค่า error เฉลี่ยของข้อมูลทุกจุดบนกราฟที่ห่างจากสมการเส้นตรงที่ได้จากการทำการถดถอยเชิงเส้น วิธีที่ให้ผลลัพธ์ที่มีค่า RMSE น้อยบ่งบอกถึงอัลกอริทึมที่มี error จากการทำ Linear regression น้อย และข้อมูลมีแนวโน้มในรูปแบบเส้นตรง และวิธีที่ให้ผลลัพธ์ที่มีค่า RMSE สูง บ่งบอกถึงอัลกอริทึมที่มี error จากการทำ Linear regression มาก รวมถึงข้อมูลมีการกระจายสูง ซึ่งสามารถเกิดจากสภาพอากาศไม่คงที่ หรือมีความผิดปกติในระบบโซลาร์เซลล์

ผลการคำนวณ RMSE ของวิธีการถดถอยเชิงเส้น วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้น และโมเดล ARIMA ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้น ได้แสดงดังตารางที่ 11 โดยวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้นให้ผลลัพธ์ RMSE น้อยที่สุด ซึ่งเป็นวิธีที่ให้ผลลัพธ์ค่า Performance ratio ( $R_p$ ) ให้มีรูปแบบใกล้เคียงสมการเส้นตรง รองลงมาได้แก่การใช้โมเดล ARIMA ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้น และวิธีการถดถอยเชิงเส้นให้ผลลัพธ์ RMSE สูงที่สุดจากผลการคำนวณพบว่าการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้นเพียงอย่างเดียวให้ผลลัพธ์ RMSE มากที่สุด เนื่องจากเมื่อมีข้อมูลที่แตกต่างไปจากข้อมูลค่าอื่นหรือมีค่าห่างจากกลุ่ม (outlier) ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์อัตราการเสื่อมสมรรถนะมีความไม่แน่นอน เช่น มีเมฆและฝนตกตลอดทั้งเดือนทำให้มีกำลังการผลิตในเดือนนั้นต่ำกว่าปกติ ทำให้ส่งผลต่อภาพรวมของอัตราการเสื่อมสมรรถนะทั้งหมดได้ ดังนั้นการนำวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่และโมเดล ARIMA มาคำนวณกราฟแนวโน้มของประสิทธิภาพการผลิต และใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้นในการคำนวณสมการเส้นตรง สามารถลดการกระจายของข้อมูลที่เกิดจากสภาพอากาศไม่คงที่ และผลกระทบจากฤดูกาลได้ และทำให้อัตราการเสื่อมสภาพที่คำนวณได้ให้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมกว่า เพราะสามารถลดความผิดพลาดที่เกิดจากข้อมูลที่ห่างจากกลุ่มจากตัวแปรทางฤดูกาลได้ดีขึ้น

**ตารางที่ 11** ผลการคำนวณ RMSE ของโมเดลที่ใช้ วิธีการถดถอยเชิงเส้น วิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้น และโมเดล ARIMA ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้น

| RMSE       | ชนิดของแผงโซลาร์เซลล์ |                 |          |          |
|------------|-----------------------|-----------------|----------|----------|
|            | A (CIGS)              | C ( $\mu$ c-Si) | D (a-Si) | E (a-Si) |
| LR         | 3.9506                | 4.9378          | 2.6946   | 3.8922   |
| MA + LR    | 0.3659                | 0.4453          | 0.7104   | 1.3837   |
| ARIMA + LR | 1.8062                | 1.0207          | 1.2404   | 2.381    |

#### 4.4.2 การเปรียบเทียบความเหมาะสมในการติดตั้งของแผงโซลาร์เซลล์โดยคำนึงถึงพื้นที่การติดตั้งและระยะเวลาการคืนทุน

การประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะเป็นหนึ่งในตัวชี้วัดสำหรับเปรียบเทียบและดูความเหมาะสมของแผงโซลาร์เซลล์กับประเทศไทย การตัดสินใจเลือกชนิดแผงโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งไม่ควรคำนึงแต่ผลอัตราการเสื่อมสมรรถนะเพียงอย่างเดียว แต่ควรนำกำลังการผลิต ค่าใช้จ่าย และระยะเวลาคืนทุนด้วย เช่นระบบโซลาร์เซลล์ที่มีอัตราการเสื่อมสมรรถนะสูง อาจให้ผลกำลังการผลิตมากกว่าและใช้ระยะเวลาคืนทุนไวกว่าระบบโซลาร์เซลล์ที่มีอัตราการเสื่อมสมรรถนะต่ำได้ เพราะการคำนวณคำนึงถึงอัตราการลดลงของประสิทธิภาพของระบบโซลาร์เซลล์เพียงอย่างเดียว จากการศึกษาข้อกำหนดทางเทคนิคของแผงโซลาร์เซลล์พบว่าแผงโซลาร์เซลล์ชนิด a-Si มีค่ากำลังพิกัดและมีขนาดของแผงโซลาร์เซลล์น้อยกว่าแผงชนิด CIGS และ  $\mu$ c-Si อยู่สองเท่า ทำให้เมื่อต้องการกำลังการผลิตรวม 1 MW จำเป็นต้องใช้แผงถึง 20,000 แผง ในขณะที่แผงชนิด CIGS ใช้เพียง 10,880 แผง

จากตารางที่ 12 แสดงถึงพื้นที่การติดตั้ง จำนวนแผงโซลาร์เซลล์ และการคาดการณ์ระยะเวลาคืนทุนและอัตราผลตอบแทนภายใน (Internal return rate) ของระบบโซลาร์เซลล์ที่โรงไฟฟ้า อำเภอทับสะแก จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ โดยทางโรงไฟฟ้าได้มีการนำค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบโซลาร์เซลล์ในแต่ละโซนและรายได้ที่ได้จากการขายไฟฟ้าต่อปีในการคำนวณระยะเวลาการคืนทุน จากตารางพบว่าระบบโซลาร์เซลล์ที่ใช้แผงชนิด a-Si มีระยะเวลาคืนทุนไวที่สุด และระบบโซลาร์เซลล์ที่ใช้แผงชนิด  $\mu$ c-Si ใช้เวลาคืนทุนนานที่สุด เนื่องจากแผงโซลาร์เซลล์ชนิด a-Si ถูกออกแบบมาให้ทนทานต่อสภาพแวดล้อมภายนอก เช่นการบังเงา การผลิตไฟฟ้าในพื้นที่ความเข้มแสงน้อย และพื้นที่ที่มีอุณหภูมิสูง แผงโซลาร์เซลล์ชนิด a-Si ราคาต่อแผงที่ถูกกว่าเมื่อเทียบกับแผงโซลาร์เซลล์ชนิด

อื่น ทำให้ต้นทุนค่าใช้จ่ายในการติดตั้งจึงมีราคาถูกกว่าระบบที่ใช้แผงโซลาร์เซลล์ชนิดอื่น เมื่อคำนวณถึงค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมจากพื้นที่ในการติดตั้ง

จากผลการทดสอบอัตราการเสื่อมสมรรถนะและระยะเวลาการคืนทุนสามารถสรุปได้ว่าระบบโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ชนิด a-Si มีความเหมาะสมกับประเทศไทยมากกว่าระบบที่ติดตั้งแผงชนิด CIGS และ  $\mu$ c-Si แต่มีข้อจำกัดในด้านพื้นที่ เนื่องจากพิภักดกำล้งการผลิตต่อแผงที่น้อยกว่ำแผงชนิดอื่น ระบบโซลาร์เซลล์ชนิด a-Si จึงใช้แผงมากกว่าแผงชนิด CIGS และ  $\mu$ c-Si เพื่อให้กำล้งการผลิตเท่ำกับ 1 MW ซึ่งเป็นข้อจำกัดของแผงชนิด a-Si ดังนั้นแผงโซลาร์เซลล์ชนิดนี้จึงไม่เหมาะสำหรัการติดตั้งในครัวเรือนที่มีพื้นที่การติดตั้งจำกัดและไม่สามารถขยายพื้นที่การติดตั้งได้

**ตารางที่ 12** พื้นที่การติดตั้งและระยะเวลาคืนทุนของระบบโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ที่ อำเภอบ้านสะแก จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

| รายละเอียด                               | ชนิดของแผงโซลาร์เซลล์ |                |          |          |
|--|-----------------------|----------------|----------|----------|
|  | CIGS (A)              | $\mu$ c-Si (C) | a-Si (D) | a-Si (E) |
| 1. จำนวนแผงที่ติดตั้ง                    | 10,880                | 9,792          | 20,000   | 20,000   |
| 2. พื้นที่แผงโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้ง (ไร่) | 5.12                  | 6.94           | 7.84     | 7.84     |
| 3. ระยะเวลาคืนทุน (ปี)                   | 15                    | 18             | 14       | 13       |
| 4. Internal rate of return (IRR)         | 4.58%                 | 2.65%          | 5.14%    | 5.76%    |

#### 4.4.3 การนำข้อมูลประสิทธิภาพและอัตราการเสื่อมสมรรถนะมาใช้ประโยชน์สำหรับวางแผนการผลิตไฟฟ้า

การคำนวณประสิทธิภาพช่วยในการตรวจสอบและวางแผนในการซ่อมบำรุงรักษาระบบโซลาร์เซลล์ โดยการทราบถึงค่า Performance ratio ( $R_p$ ) เฉลี่ยรายเดือน สามารถกำหนดช่วงที่จำเป็นต้องบำรุงรักษาได้ เมื่อค่า  $R_p$  ต่ำกว่าช่วงที่กำหนดไว้ เช่น ระบบโซลาร์เซลล์โซน D มีการกำหนดเป้าหมายให้  $R_p$  เฉลี่ยรายเดือนมากกว่าหรือเท่ากับ 75% แต่เมื่อติดตั้งไประยะเวลาหนึ่งพบว่าในเดือนล่าสุดระบบมีค่า  $R_p$  น้อยกว่า 75% จากการเสื่อมสมรรถนะ ทำให้สามารถช่วยในการวางแผนการซ่อมบำรุงรักษาของระบบโซลาร์เซลล์เมื่อมีการเสื่อมจนถึงจุดที่จำเป็นต้องบำรุงรักษา



การประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะทำให้ทราบถึงอัตราการลดลงของกำลังการผลิตของระบบโซลาร์เซลล์ ทำให้สามารถวางแผนปริมาณการผลิตที่ลดลงในอนาคต เพื่อคาดการณ์ว่าระยะเวลาใดควรเปลี่ยนแผงโซลาร์เซลล์ เช่น โรงไฟฟ้าพบว่าปริมาณการผลิตไฟฟ้าไม่ถึงที่คาดการณ์ไว้ ทำให้ทางโรงไฟฟ้าสามารถตัดสินใจเปลี่ยนแผงโซลาร์เซลล์ใหม่ แทนที่แผงโซลาร์เซลล์เก่าที่อัตราการผลิตไฟฟ้าน้อยลงจากการเสื่อมสมรรถนะ และสามารถใช้เป็นแนวทางการคำนวณเพื่อตรวจสอบประกันของแผงโซลาร์เซลล์ได้ เนื่องจากประกันของแผงโซลาร์เซลล์จะแบ่งออกเป็นประกันด้านวัสดุแผง และประกันด้านประสิทธิภาพการผลิต และใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการเปรียบเทียบแผงโซลาร์เซลล์สำหรับการเลือกเทคโนโลยีของแผงโซลาร์เซลล์ให้เหมาะกับพื้นที่ติดตั้ง



## บทที่ 5 สรุป อภิปรายและข้อเสนอแนะการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ประเมินประสิทธิภาพและประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์ที่ติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ 3 ชนิดที่ติดตั้งในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ อำเภอบ้านหมี่ จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ประเทศไทย ได้แก่ Copper indium gallium selenide (CIGS), Micro crystalline silicon thin film ( $\mu\text{c-Si}$ ) และ Amorphous silicon thin film (a-Si) เพื่อทดสอบว่าแผงโซลาร์เซลล์ชนิดใดมีประสิทธิภาพสูงและมีอัตราการเสื่อมสมรรถนะรายปีน้อยที่สุด ซึ่งแสดงถึงความเหมาะสมในการติดตั้งกับภูมิอากาศประเทศไทยหรือประเทศที่มีภูมิอากาศคล้ายคลึงกัน การทดสอบได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ การคำนวณประสิทธิภาพของระบบโซลาร์เซลล์ และการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์

การประเมินประสิทธิภาพได้กำหนดพารามิเตอร์ Performance ratio ( $R_p$ ) ซึ่งแสดงถึงเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการผลิตไฟฟ้าหลังจากหักลบการสูญเสียพลังงานภายนอก หรือเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่าเปอร์เซ็นต์ค่าพลังงานในระบบที่ผลิตได้ เมื่อเทียบกับค่าการผลิตในอุดมคติที่อ้างอิงเงื่อนไขมาตรฐาน STC โดยใช้ข้อมูลที่ได้รับจากโครงการโซลาร์เซลล์จากทางโรงไฟฟ้าแสงอาทิตย์ ได้แก่ ความเข้มแสง แดด และกระแส ที่ได้ตรวจติดตามในระยะเวลา 3-4 ปีมาคำนวณ  $R_p$  และนำมาเปรียบเทียบ โดยคำนวณ  $R_p$  เฉลี่ยในแต่ละปีเพื่อทำการเปรียบเทียบ ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าระบบที่ติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ชนิด a-Si (โซน D) มีค่า  $R_p$  สูงสุดเท่ากับ 80.82% ในปีที่ 1 และมีค่าเฉลี่ยรายปีของทุกปีสูงกว่า 75% ซึ่งกำหนดเป็นมาตรฐานของระบบโซลาร์เซลล์ที่เหมาะสมโดย IEA PVPS และระบบที่ติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ชนิด  $\mu\text{c-Si}$  (โซน C) มีค่า  $R_p$  น้อยที่สุดเท่ากับ 68.895% ในปีที่ 4 จากการสังเกตพบว่าค่า  $R_p$  มีการลดลงอย่างต่อเนื่องในแต่ละปี เป็นผลมาจากการเสื่อมของแผงโซลาร์เซลล์

การประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์ในส่วนแรกได้ทดสอบความเกี่ยวข้องของอินเวอร์เตอร์ต่อการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์ในระดับ DC และ AC พบว่าความแตกต่างของผลการคำนวณประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ส่งผลในระดับน้อยกว่า 0.5% เนื่องจากอินเวอร์เตอร์ได้ติดตั้งในห้องที่มีระบบระบายอากาศทำให้อุณหภูมิไม่ส่งผลต่อการทำงานของอินเวอร์เตอร์ ดังนั้นอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบโซลาร์เซลล์ระดับ DC และระดับ AC จึงมีความแตกต่างกันเล็กน้อยเท่านั้น

จากการทดสอบการประเมินอัตราการเสื่อมสมรรถนะได้นำวิธีการถดถอยเชิงเส้นในการประเมิน โดยวิเคราะห์การลดลงของ  $R_p$  ต่อปีจากสมการเส้นตรง แต่เนื่องจากแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นไม่ได้มีการจัดการกับข้อมูลที่มีค่า error สูง ทำให้กราฟเส้นตรงที่ได้จากการทำการถดถอยเชิงเส้นมีความไม่แน่นอน เพราะอัตราการผลิตของแผงโซลาร์เซลล์แปรผันตามฤดูกาล การทดสอบจึงได้นำวิธีการแยกส่วนประกอบด้วยค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ และโมเดล ARIMA มาใช้ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้นในการจัดการกับข้อมูลการผลิตที่มีค่าห่างจากกลุ่ม เพื่อจำแนกความแปรผันตามฤดูกาลออกจากกราฟให้อยู่ในรูปแบบกราฟแนวโน้ม ผลการทดสอบอัตราการเสื่อมสมรรถนะด้วยวิธีการถดถอยเชิงเส้น การแยกส่วนประกอบร่วมกับการถดถอยเชิงเส้น และโมเดล ARIMA ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้น ให้ผลลัพธ์ไปในทิศทางเดียวกันได้แก่ ระบบที่ติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ชนิด  $\mu\text{-Si}$  (โซน C) มีอัตราการเสื่อมสมรรถนะสูงที่สุดเท่ากับ 4.6535 %/ปี, 5.4237 %/ปี และ 5.5892 %/ปี ตามลำดับ และระบบที่ติดตั้งแผงโซลาร์เซลล์ชนิด  $\text{a-Si}$  (โซน D) มีอัตราการเสื่อมสมรรถนะต่ำที่สุดเท่ากับ 0.4074 %/ปี, 0.3235 %/ปี และ 0.4753 %/ปี ตามลำดับ จากการคำนวณประสิทธิภาพและอัตราการเสื่อมสมรรถนะ ทำให้สรุปได้ว่าแผงโซลาร์เซลล์ชนิด  $\text{a-Si}$  เหมาะสำหรับการติดตั้งในประเทศไทย โดยเมื่อเปรียบเทียบระยะเวลาคืนทุนระบบโซลาร์เซลล์ที่ใช้แผงชนิด  $\text{a-Si}$  มีระยะเวลาคืนทุนไวที่สุดและมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งถูกที่สุด เนื่องจากแผงโซลาร์เซลล์ชนิด  $\text{a-Si}$  มีราคาถูกกว่าแผงโซลาร์เซลล์ชนิดอื่น และได้ออกแบบมาให้ทนทานต่อสภาพแวดล้อมภายนอกในกรณีที่แผงโซลาร์เซลล์ได้รับแสงน้อย แต่แลกมากับกำลังการผลิตต่อแผงที่น้อย ระบบโซลาร์เซลล์ชนิด  $\text{a-Si}$  จึงใช้จำนวนแผงโซลาร์เซลล์มากกว่าชนิด CIGS และ  $\mu\text{-Si}$  ประมาณ 2 เท่า เพื่อให้กำลังการผลิตเท่ากัน จึงเป็นข้อเสียและข้อจำกัดในเรื่องพื้นที่ของการติดตั้งของแผงชนิด  $\text{a-Si}$

ในส่วนสุดท้ายได้ทำการประเมินประสิทธิภาพอัลกอริทึมของสมการเส้นตรงด้วยการคำนวณ Root mean square error (RMSE) ซึ่งแสดงถึงค่า error เฉลี่ยของข้อมูลบนกราฟกับสมการเส้นตรงที่ได้จากแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น จากการคำนวณพบว่าการนำการใช้ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ร่วมกับการถดถอยเชิงเส้นให้ผลลัพธ์ RMSE น้อยที่สุด และวิธีที่ใช้การถดถอยเชิงเส้นเพียงอย่างเดียว ให้ผลลัพธ์ RMSE สูงที่สุด ดังนั้นการนำวิธีค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่และ ARIMA ร่วมกับวิธีการถดถอยเชิงเส้นสามารถลดค่า error ที่เกิดจากการกระจายของ  $R_p$  เนื่องจากค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่เป็นการเฉลี่ยข้อมูลในช่วงเวลาหนึ่ง ทำให้ลดความผิดพลาดจากกำลังการผลิตที่ไม่คงที่จากฤดูกาลและแสงแดดได้ ส่งผลให้สามารถวางแผนการคาดการณ์กำลังการผลิตได้ดีขึ้น

## บรรณานุกรม

1. IEA PVPS Task 1, *National Survey Report of PV Power Applications in COUNTRY*. National Survey Report of PV Power Applications in THAILAND, 2021.
2. Sharma, V. and S. Chandel, *Performance and degradation analysis for long term reliability of solar photovoltaic systems: A review*. Renewable and sustainable energy reviews, 2013. **27**: p. 753-767.
3. Phinikarides, A., et al., *Review of photovoltaic degradation rate methodologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. **40**: p. 143-152.
4. Silvestre, S., et al., *Evaluation of the performance and degradation of crystalline silicon-based photovoltaic modules in the Saharan environment*. Energy, 2018. **152**: p. 57-63.
5. Limmanee, A., et al., *Field performance and degradation rates of different types of photovoltaic modules: A case study in Thailand*. Renewable Energy, 2016. **89**: p. 12-17.
6. Silvestre, S., et al., *Degradation analysis of thin film photovoltaic modules under outdoor long term exposure in Spanish continental climate conditions*. Solar Energy, 2016. **139**: p. 599-607.
7. Kahoul, N., M. Houabes, and M. Sadok, *Assessing the early degradation of photovoltaic modules performance in the Saharan region*. Energy conversion and management, 2014. **82**: p. 320-326.
8. Peng, Z., M.R. Herfatmanesh, and Y. Liu, *Cooled solar PV panels for output energy efficiency optimisation*. Energy Conversion and Management, 2017. **150**: p. 949-955.
9. Hocine, L. and K.M. Samira, *Optimal PV panel's end-life assessment based on the supervision of their own aging evolution and waste management forecasting*. Solar Energy, 2019. **191**: p. 227-234.
10. Mari B. Øgaard, H.N.R., Halvard Haug, Sabrina Sartori, Josefine H. Selj, *Photovoltaic system monitoring for high latitude locations*. Solar Energy, 2020. **207**: p. 1045-1054.

11. Le, N.T. and W. Benjapolakul, *Evaluation of contribution of PV array and inverter configurations to rooftop PV system energy yield using machine learning techniques*. *Energies*, 2019. **12**(16): p. 3158.
12. Chinnavornrungssee, P., *Evaluation of rooftop solar PV performance of different PV module technologies operating in Thailand*. *Ladkrabang Engineering Journal*, 2015. **32**(2): p. 19-24.
13. IEA PVPS Task 2, *COUNTRY REPORTS ON PV SYSTEM PERFORMANCE*, in *Report IEA-PVPS T2-05*. 2004.
14. Hyndman, R.J. and G. Athanasopoulos, *Forecasting: principles and practice*. 2nd edition ed. 2018, Melbourne, Australia.
15. International Electrotechnical Commission, *Photovoltaic system performance monitoring-guidelines for measurement, data exchange and analysis*, in *IEC 61724*. 1998.
16. Chumpolrat Kamonpan, S.V., Udomdachanut Nuttakarn, Kittisontirak Songkiate, Songtrai Sasiwimon, Chinnavornrungssee Perawut, Limmanee Amornrat, Sritharathikhun Jaran, Sriprapha Kobsak, *Effect of Ambient Temperature on Performance of Grid-Connected Inverter Installed in Thailand*. *International Journal of Photoenergy*, 2014: p. 1-6.
17. Aekapan Padsri, K.K., Akarin Intaniwet, *Efficiency and Performance Analysis of a 300 kW Grid-tied Solar Power Generation System*, in *3rd KU SRC Annual Conference*. 2018. p. 95-104.
18. Andreas Livera, A.P., George Makrides and George E. Georghiou, *Impact of Missing Data on the Estimation of Photovoltaic System Degradation Rate*, in *IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*. 2017: Washington, DC, USA. p. 1954-1958.
19. Sax C, E.D., *Seasonal Adjustment by X-13ARIMA-SEATS in R*. 2018. **87**(11): p. 1-17.
20. Jaeun Kim, M.R., Siva Parvathi Padi, Hasnain Yousuf, Eun-Chel Cho, Junsin Yi, *A Review of the Degradation of Photovoltaic Modules for Life Expectancy*. *Energies*, 2021. **14**(14): p. 4278.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

|                   |  |
|-------------------|--|
| ชื่อ-สกุล         | พรกิตติ มหิทธิบุรินทร์   |
| วัน เดือน ปี เกิด | 30 มีนาคม 2539   |
| สถานที่เกิด       | สระบุรี  |
| วุฒิการศึกษา      | วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  |
| ที่อยู่ปัจจุบัน   | 135/1 ถนนพหลโยธิน ซอย 21 ตำบลปากเพรียว อำเภอเมือง จังหวัด<br>สระบุรี 18000                                   |
| ผลงานตีพิมพ์      | การประเมินประสิทธิภาพและอัตราการเสื่อมสมรรถนะของระบบผลิตไฟฟ้า<br>พลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้วิธีการถดถอยเชิงเส้น |

