



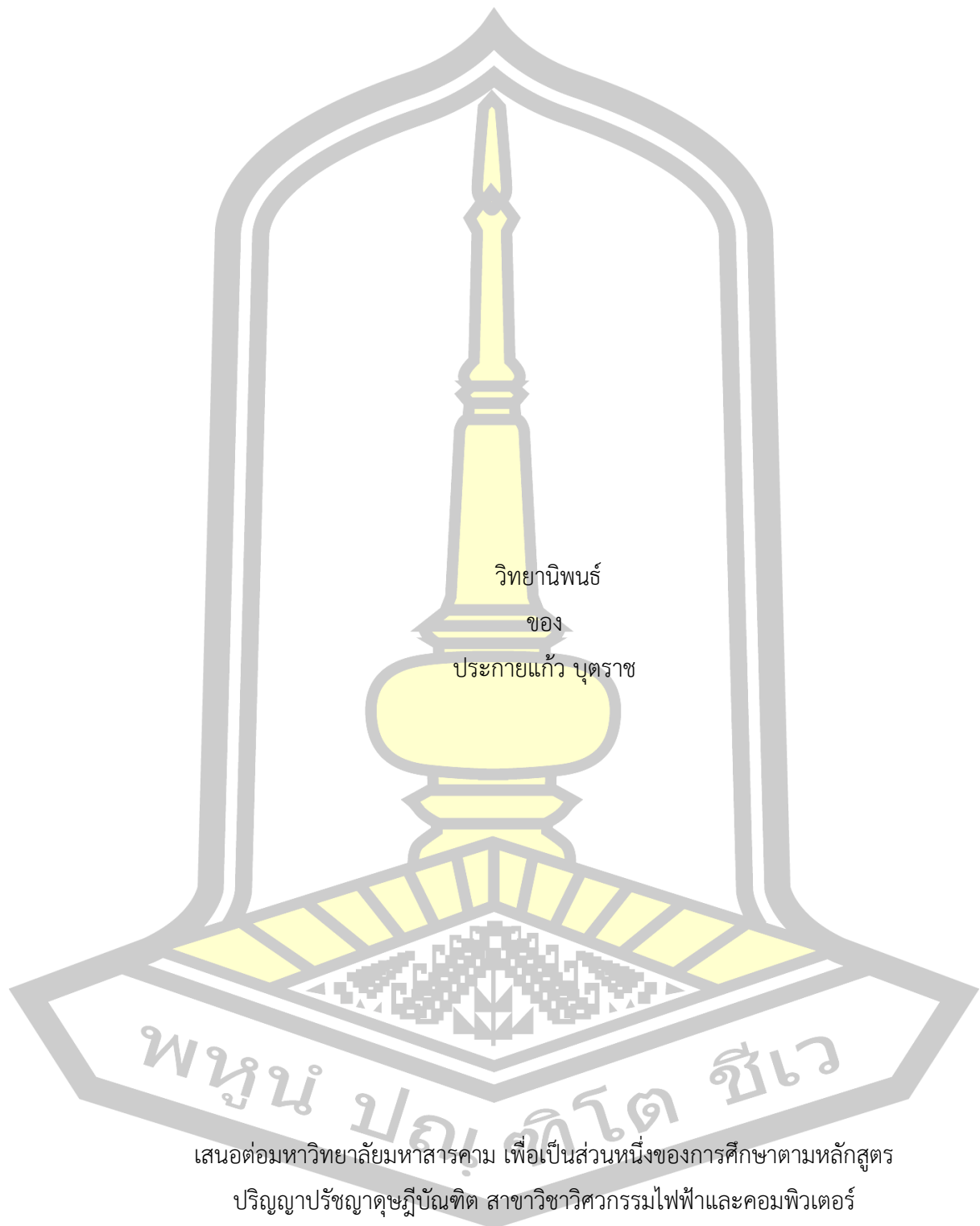
แบบจำลองการประมาณค่ารังสีอาทิตย์โดยใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาร่วมกับข้อมูลดัชนีคุณภาพอากาศ

วิทยานิพนธ์  
ของ  
ประกายแก้ว บุตรราช

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์  
พฤษภาคม 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

แบบจำลองการประมาณค่ารังสีอาทิตย์โดยใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาร่วมกับข้อมูลดัชนีคุณภาพอากาศ



เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

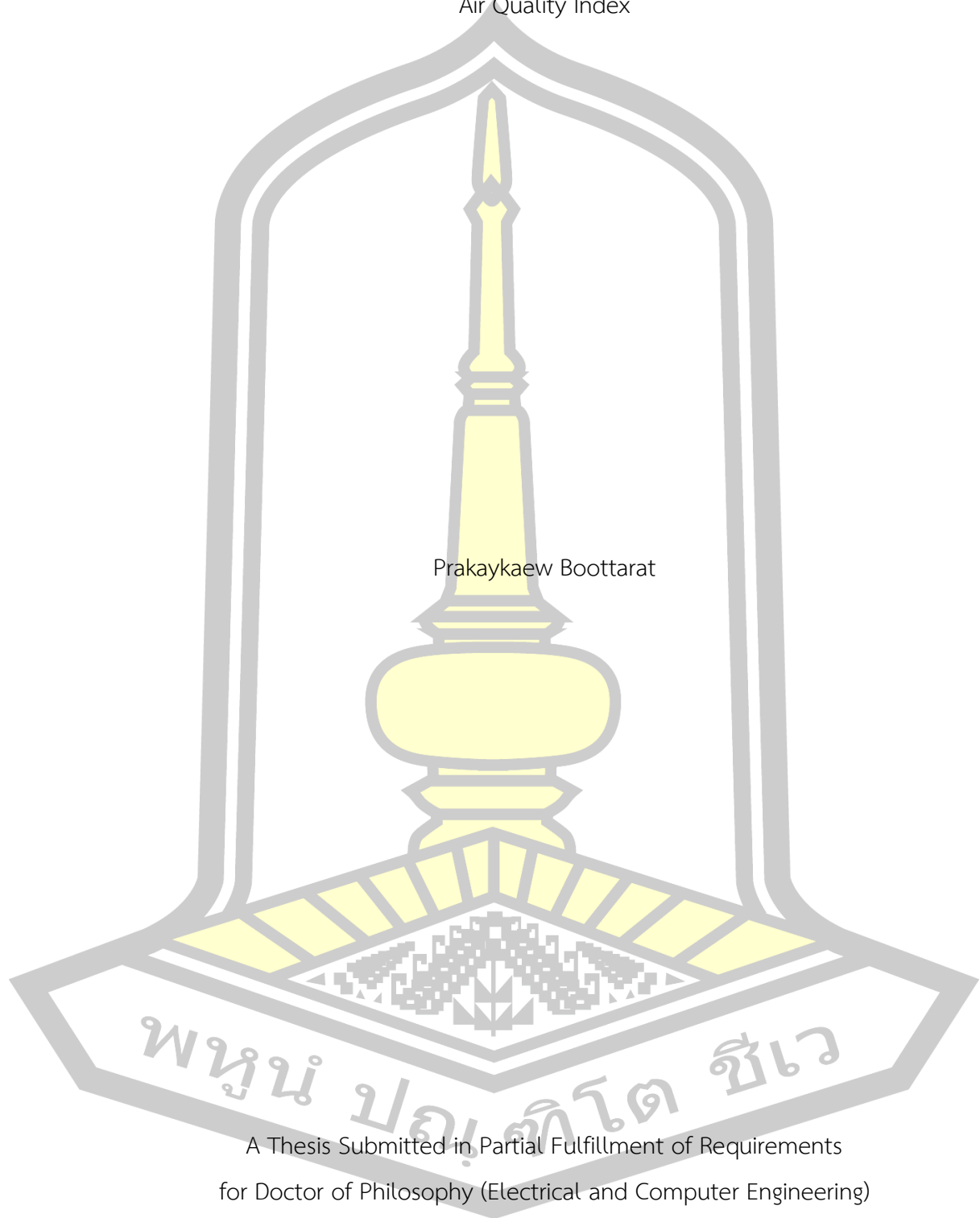
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

พฤษภาคม 2566

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

A Solar Insolation Estimation Model using Manipulating Data from Meteorology and  
Air Quality Index

Prakaykaew Boottarat



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements  
for Doctor of Philosophy (Electrical and Computer Engineering)

November 2023

Copyright of Mahasarakham University



คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนายประกายแก้ว บุตรราช  
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา  
วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. อนันต์ เครือทรัพย์ถาวร )

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รศ. ดร. ชลธิ์ โพธิ์ทอง )

.....กรรมการ

(ศ. ดร. วรวัฒน์ เสงี่ยมวิบูล )

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ณัฐฉา สุวรรณทา )

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. สุพรรณนิกา วัฒนนะ )

มหาวิทยาลัยขอนแก่นให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญา ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัย  
มหาสารคาม

.....  
(รศ. ดร. เกียรติศักดิ์ ศรีประทีป )

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

.....  
(รศ. ดร. กริสน์ ชัยมูล )

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

|                  |                                                                                        |            |                             |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------------------------|
| ชื่อเรื่อง       | แบบจำลองการประมาณค่ารังสีอาทิตย์โดยใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาร่วมกับข้อมูลดัชนีคุณภาพอากาศ |            |                             |
| ผู้วิจัย         | ประกายแก้ว บุตรราช                                                                     |            |                             |
| อาจารย์ที่ปรึกษา | รองศาสตราจารย์ ดร. ชลธิ์ โพธิ์ทอง                                                      |            |                             |
| ปริญญา           | ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต                                                                      | สาขาวิชา   | วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ |
| มหาวิทยาลัย      | มหาวิทยาลัยมหาสารคาม                                                                   | ปีที่พิมพ์ | 2566                        |

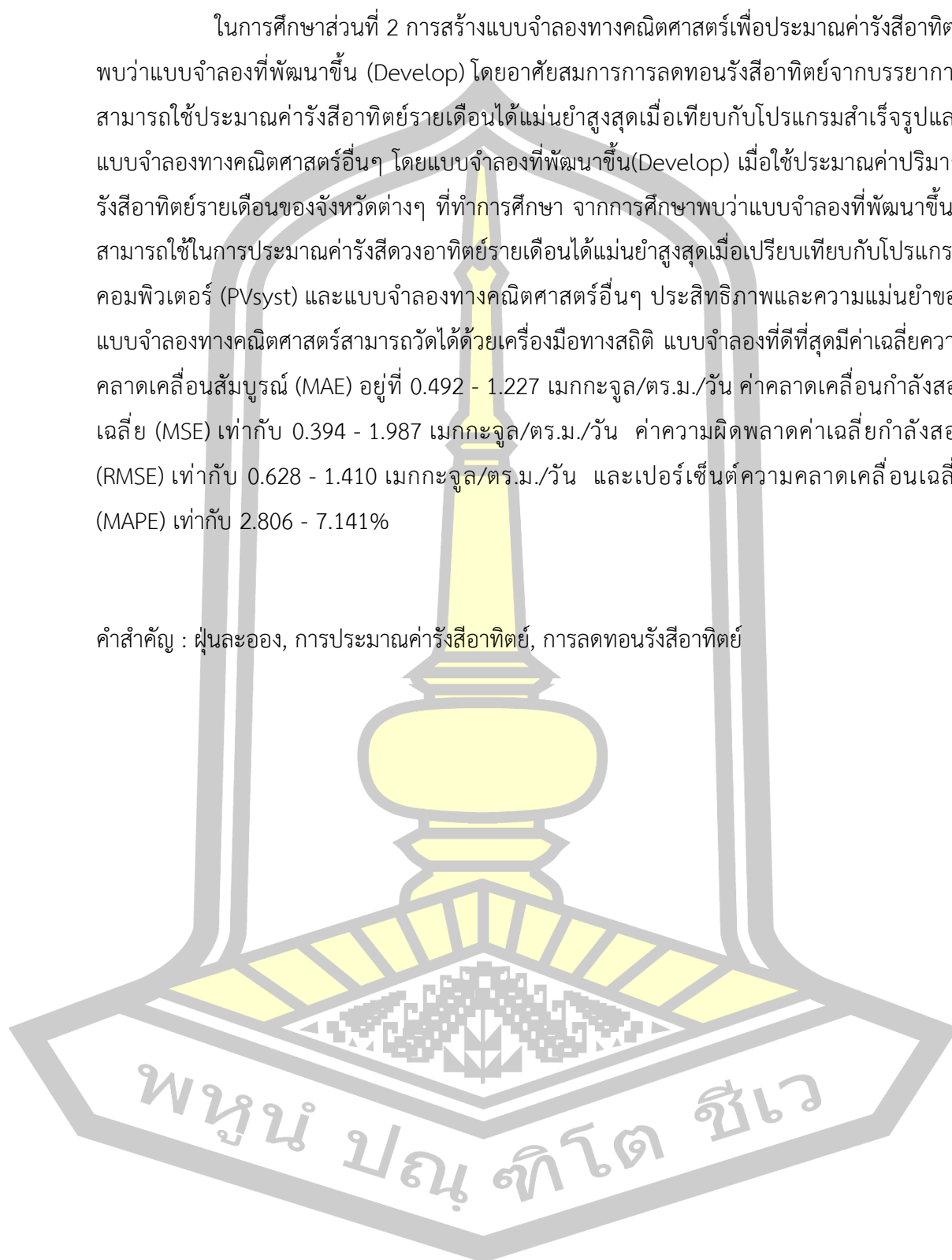
### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาการประมาณค่ารังสีอาทิตย์โดยใช้ข้อมูลจากอุตุนิยมวิทยา ร่วมกับข้อมูลดัชนีคุณภาพอากาศ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ศึกษาผลกระทบของฝุ่นละอองต่อการลดลงของรังสีอาทิตย์และประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในห้องปฏิบัติการ ส่วนที่ 2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับประมาณค่าปริมาณรังสีอาทิตย์รายเดือน โดยใช้ข้อมูลสภาพอากาศและคุณภาพอากาศจากสถานีวัดในพื้นที่จังหวัดทางภาคเหนือประเทศไทย

ในการศึกษาส่วนที่ 1 ผลการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณของฝุ่นละอองที่ส่งผลกระทบต่อรังสีอาทิตย์ที่ปรากฏบนพื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์และประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในห้องปฏิบัติการ พบว่าการสะสมของฝุ่นจากดินขนาดต่าง ๆ ส่งผลต่อประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนี้ 1. ฝุ่นขนาด 32 - 37 (อนุภาคละเอียด) ประสิทธิภาพลดลงอยู่ระหว่าง 12.60 - 14.56% มีค่ารังสีอาทิตย์ลดลงอยู่ระหว่าง 401.06 - 463.52 W/m<sup>2</sup> 2. ฝุ่นขนาด 38 - 62 ประสิทธิภาพลดลงอยู่ระหว่าง 12.80 - 14.62% มีค่ารังสีอาทิตย์ลดลงอยู่ระหว่าง 407.26 - 465.25 W/m<sup>2</sup> 3. ฝุ่นขนาด 63 - 74 ประสิทธิภาพลดลงอยู่ระหว่าง 12.91 - 14.72% มีค่ารังสีอาทิตย์ลดลงอยู่ระหว่าง 410.90 - 468.39 W/m<sup>2</sup> 4. ฝุ่นขนาด 75 - 89 ประสิทธิภาพลดลงอยู่ระหว่าง 13.79 - 14.76% มีค่ารังสีอาทิตย์ลดลงอยู่ระหว่าง 438.77 - 469.63 W/m<sup>2</sup> และ 5. ฝุ่นขนาด 90 - 105 (อนุภาคหยาบ) ประสิทธิภาพลดลงอยู่ระหว่าง 14.20 - 15.36% มีค่ารังสีอาทิตย์ลดลงอยู่ระหว่าง 452.03 - 488.84 W/m<sup>2</sup> โดยฝุ่นละอองจากดินที่มีขนาดเล็ก (อนุภาคละเอียด) เมื่อมีการเพิ่มปริมาณการยึดเกาะที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะสามารถลดทอนการส่งผ่านรังสีอาทิตย์ได้สูงกว่าฝุ่นละอองขนาดใหญ่ (อนุภาคหยาบ)

ในการศึกษาส่วนที่ 2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประมาณค่ารังสีอาทิตย์ พบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น (Develop) โดยอาศัยสมการการลดทอนรังสีอาทิตย์จากบรรยากาศ สามารถใช้ประมาณค่ารังสีอาทิตย์รายเดือนได้แม่นยำสูงสุดเมื่อเทียบกับโปรแกรมสำเร็จรูปและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อื่นๆ โดยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น(Develop) เมื่อใช้ประมาณค่าปริมาณรังสีอาทิตย์รายเดือนของจังหวัดต่างๆ ที่ทำการศึกษา จากการศึกษพบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้ สามารถใช้ในการประมาณค่ารังสีดวงอาทิตย์รายเดือนได้แม่นยำสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (PVsyst) และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อื่นๆ ประสิทธิภาพและความแม่นยำของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สามารถวัดได้ด้วยเครื่องมือทางสถิติ แบบจำลองที่ดีที่สุดมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ (MAE) อยู่ที่ 0.492 - 1.227 เมกกะจูล/ตร.ม./วัน ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) เท่ากับ 0.394 - 1.987 เมกกะจูล/ตร.ม./วัน ค่าความผิดพลาดค่าเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) เท่ากับ 0.628 - 1.410 เมกกะจูล/ตร.ม./วัน และเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (MAPE) เท่ากับ 2.806 - 7.141%

คำสำคัญ : ฟูละลอง, การประมาณค่ารังสีอาทิตย์, การลดทอนรังสีอาทิตย์



|                   |                                                                                                    |              |                                     |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-------------------------------------|
| <b>TITLE</b>      | A Solar Insolation Estimation Model using Manipulating Data from Meteorology and Air Quality Index |              |                                     |
| <b>AUTHOR</b>     | Prakaykaew Boottarat                                                                               |              |                                     |
| <b>ADVISORS</b>   | Associate Professor Chonlatee Photong , Ph.D.                                                      |              |                                     |
| <b>DEGREE</b>     | Doctor of Philosophy                                                                               | <b>MAJOR</b> | Electrical and Computer Engineering |
| <b>UNIVERSITY</b> | Maharakham University                                                                              | <b>YEAR</b>  | 2023                                |

### ABSTRACT

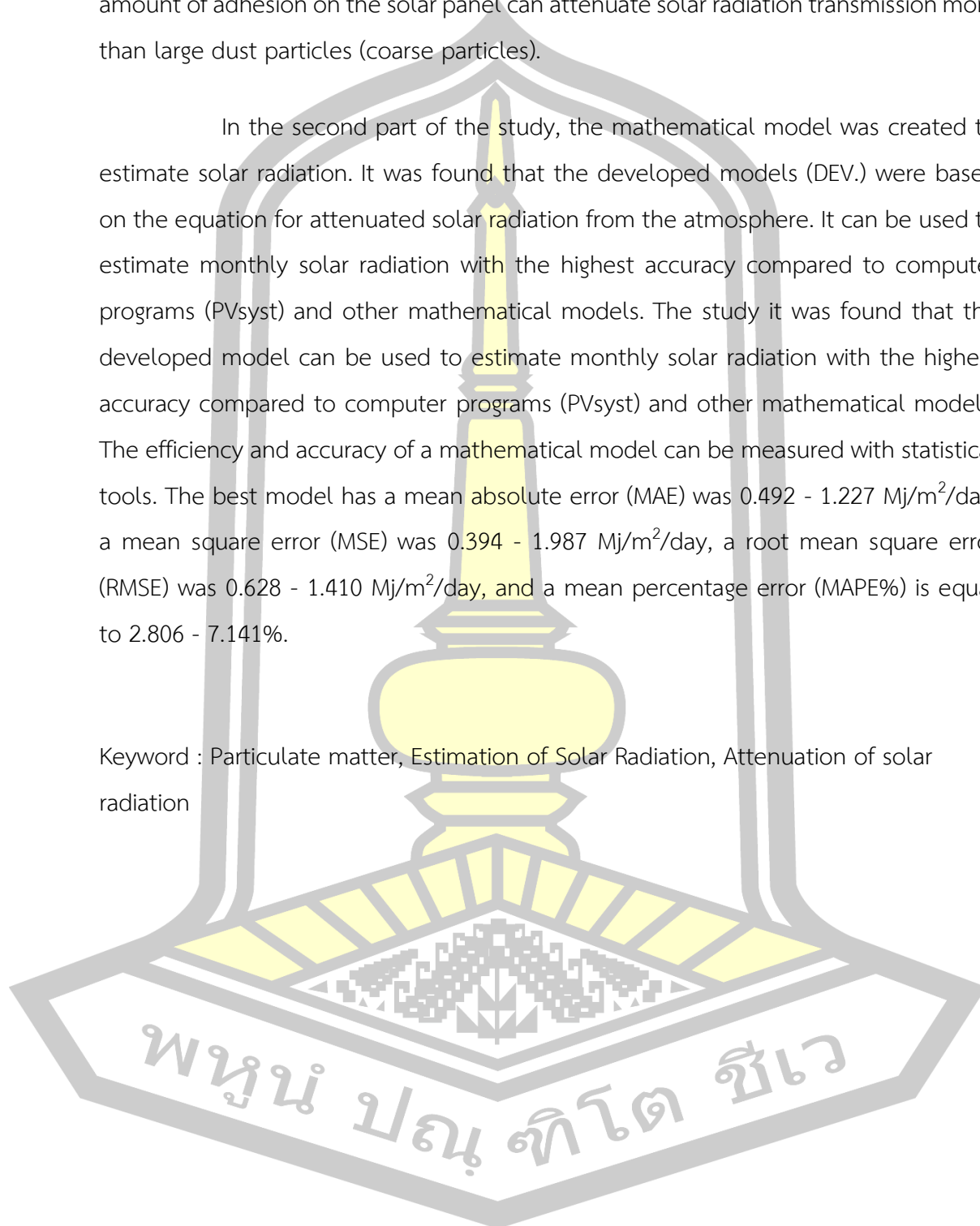
This research is the study of estimated solar radiation used meteorological data and air quality index data. The study was divided into two parts. Part 1 studied the effects of soil dust on the reduced of solar radiation and the efficiency of solar cell panels in the laboratory. Part 2 created and developed a mathematical model for estimated solar radiation by weather and air quality data from measured stations in Northern of Thailand.

In the first part of the study, the results of the experiment were to determine the relationship between the size and amount of soil dust particles that affect solar radiation appeared on the surface of solar cells and the efficiency of solar cells in the laboratory. It was found that the accumulated from soil dust of various sizes affects the efficiency of solar cell panels as follows: 1. dust size 32 - 37 (fine particles) efficiency decreases between 12.60 - 14.56%, the solar radiation value decreases between 401.06 - 463.52 W/m<sup>2</sup> 2. dust size 38 - 62 efficiency decreased between 12.80 - 14.62%. Solar radiation value decreased between 407.26 - 465.25 W/m<sup>2</sup> 3. dust size 63 - 74 efficiency decreased between 12.91 - 14.72%. The solar radiation value decreased between 410.90 - 468.39 W/m<sup>2</sup>. 4. dust size 75 - 89 efficiency decreased between 13.79 - 14.76%. The solar radiation value decreased between 438.77 - 469.63 W/m<sup>2</sup> and 5. dust size 90 - 105 (coarse particles) efficiency decreased between 14.20 - 15.36%, and solar radiation value decreased between 452.03 - 488.84

W/m<sup>2</sup> by small dust particles from the soil dust (fine particles). When increasing the amount of adhesion on the solar panel can attenuate solar radiation transmission more than large dust particles (coarse particles).

In the second part of the study, the mathematical model was created to estimate solar radiation. It was found that the developed models (DEV.) were based on the equation for attenuated solar radiation from the atmosphere. It can be used to estimate monthly solar radiation with the highest accuracy compared to computer programs (PVsyst) and other mathematical models. The study it was found that the developed model can be used to estimate monthly solar radiation with the highest accuracy compared to computer programs (PVsyst) and other mathematical models. The efficiency and accuracy of a mathematical model can be measured with statistical tools. The best model has a mean absolute error (MAE) was 0.492 - 1.227 Mj/m<sup>2</sup>/day, a mean square error (MSE) was 0.394 - 1.987 Mj/m<sup>2</sup>/day, a root mean square error (RMSE) was 0.628 - 1.410 Mj/m<sup>2</sup>/day, and a mean percentage error (MAPE%) is equal to 2.806 - 7.141%.

Keyword : Particulate matter, Estimation of Solar Radiation, Attenuation of solar radiation



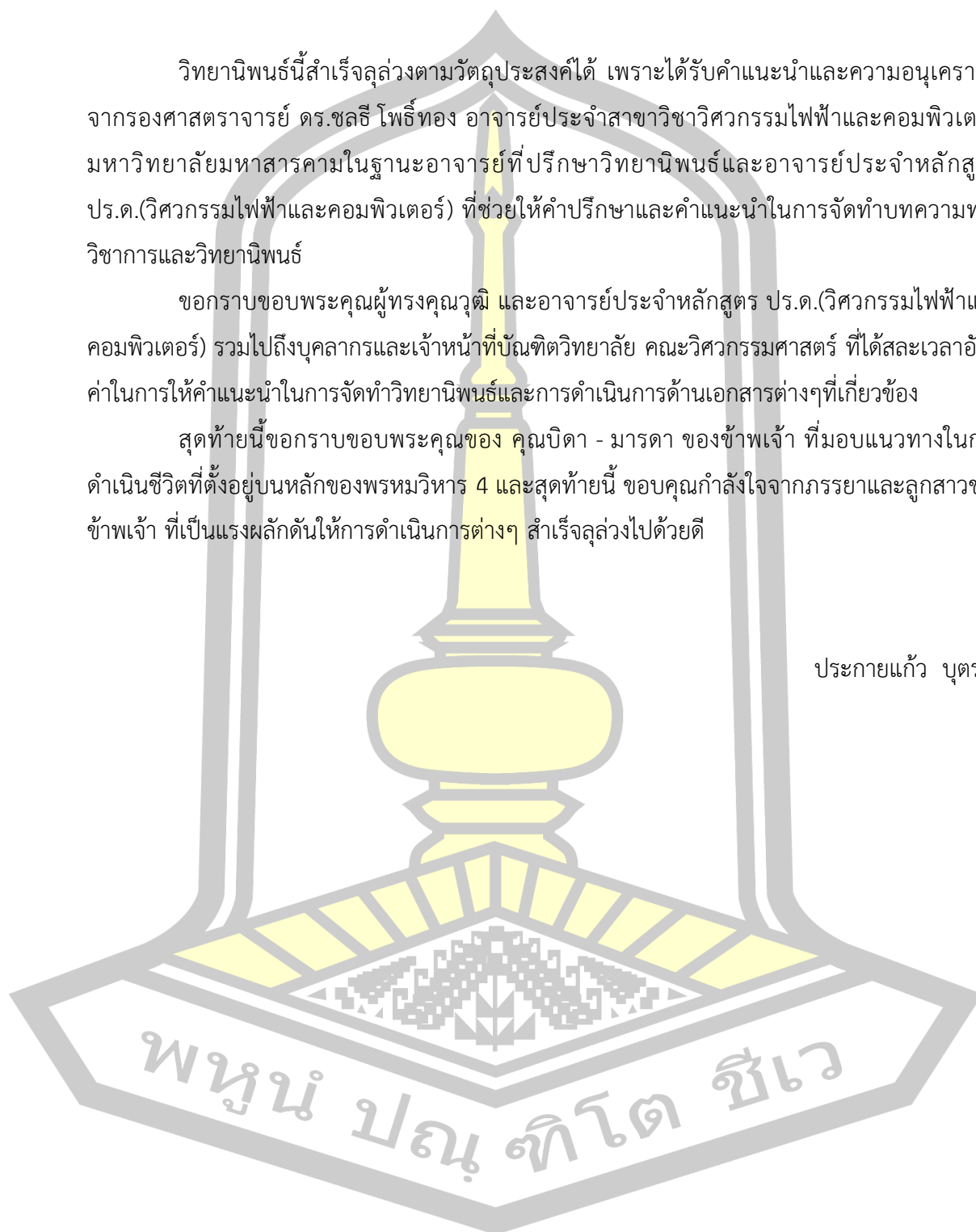
## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ได้ เพราะได้รับคำแนะนำและความอนุเคราะห์จากรองศาสตราจารย์ ดร.ชลธิ์ โพธิ์ทอง อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคามในฐานะอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และอาจารย์ประจำหลักสูตร ปร.ด.(วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์) ที่ช่วยให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการจัดทำบทความทางวิชาการและวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณผู้ทรงคุณวุฒิ และอาจารย์ประจำหลักสูตร ปร.ด.(วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์) รวมไปถึงบุคลากรและเจ้าหน้าที่บัณฑิตวิทยาลัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่าในการให้คำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์และการดำเนินการด้านเอกสารต่างๆที่เกี่ยวข้อง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณของ คุณบิดา - มารดา ของข้าพเจ้า ที่มอบแนวทางในการดำเนินชีวิตที่ตั้งอยู่บนหลักของพรหมวิหาร 4 และสุดท้ายนี้ ขอขอบคุณกำลังใจจากภรรยาและลูกสาวของข้าพเจ้า ที่เป็นแรงผลักดันให้การดำเนินการต่างๆ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ประกายแก้ว บุตรราช

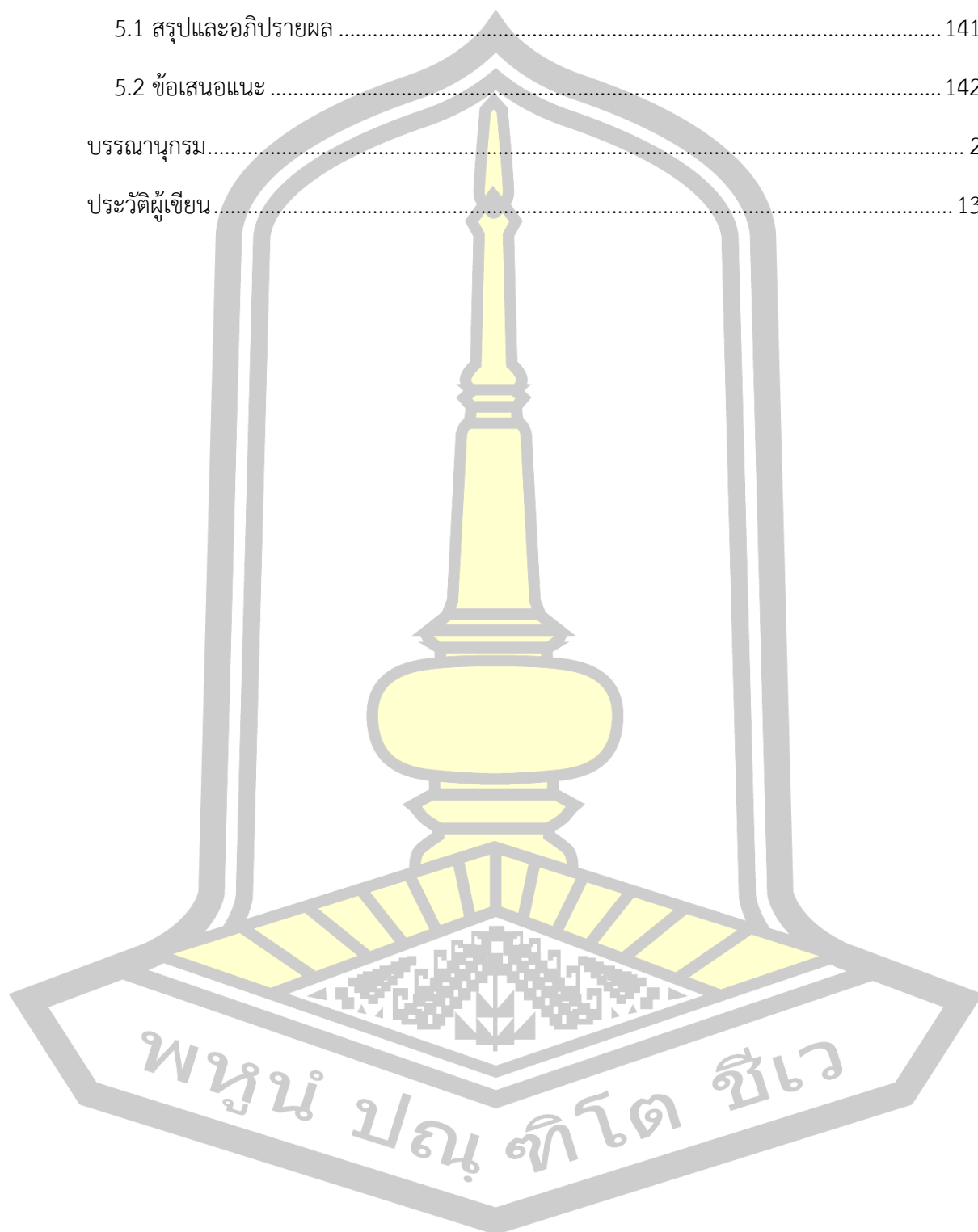


## สารบัญ

|                                                                                                                                                                | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                                                                                                                           | ง    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                                                                                                                                        | ฉ    |
| กิตติกรรมประกาศ.....                                                                                                                                           | ช    |
| สารบัญ.....                                                                                                                                                    | ฌ    |
| สารบัญตาราง.....                                                                                                                                               | ฉ    |
| สารบัญรูปภาพ.....                                                                                                                                              | ท    |
| บทที่ 1 บทนำ .....                                                                                                                                             | 1    |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ.....                                                                                                                                     | 1    |
| 1.2 ความมุ่งหมายของงานวิจัย.....                                                                                                                               | 4    |
| 1.3 ขอบเขตงานวิจัย .....                                                                                                                                       | 5    |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                                                                                                                             | 5    |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....                                                                                                                    | 6    |
| 2.1 ทฤษฎีรังสีอาทิตย์.....                                                                                                                                     | 6    |
| 2.2 การคำนวณรังสีอาทิตย์จากข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา .....                                                                                                        | 13   |
| 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของบรรยากาศต่อรังสีอาทิตย์ .....                                                                                              | 21   |
| 2.4 ทฤษฎีฝุ่นละอองในบรรยากาศ.....                                                                                                                              | 26   |
| 2.5 วิธีการทางสถิติสำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อการพยากรณ์.....                                                                                     | 39   |
| 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                                                                                                                                 | 49   |
| บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย .....                                                                                                                            | 66   |
| 3.1 การหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณของฝุ่นละอองที่ส่งผลกระทบต่อรังสีอาทิตย์ที่<br>ปรากฏบนพื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ..... | 66   |

|         |                                                                                                                                                                 |     |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1.1   | วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....                                                                                                                            | 66  |
| 3.1.2   | วิธีการทดลองและการเก็บผลการทดลอง.....                                                                                                                           | 71  |
| 3.2     | การสร้างแบบจำลองที่นำเสนอโดยงานวิจัยนี้.....                                                                                                                    | 83  |
| 3.2.1   | การรวบรวมข้อมูลทางสถิติสำหรับการพัฒนาแบบจำลองรังสีอาทิตย์ .....                                                                                                 | 83  |
| 3.2.2   | สมการทางคณิตศาสตร์สำหรับการพัฒนาแบบจำลองรังสีอาทิตย์ .....                                                                                                      | 95  |
| 3.2.3   | ตัวแปรอิสระที่ใช้ในงานวิจัย.....                                                                                                                                | 100 |
| 3.2.4   | การวัดประสิทธิภาพแบบจำลองประมาณค่ารังสีอาทิตย์โดยวิธีการทางสถิติ .....                                                                                          | 104 |
| บทที่ 4 | ผลการทดลอง.....                                                                                                                                                 | 106 |
| 4.1     | ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณของฝุ่นละอองที่ส่งผลกระทบต่อรังสีอาทิตย์ที่ปรากฏบนพื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในห้องปฏิบัติการ ... | 106 |
| 4.1.1   | ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณฝุ่นละอองกับแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ( $V_{OC}$ ) ..                                                                                 | 108 |
| 4.1.2   | ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณฝุ่นละอองกับกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $I_{SC}$ ).....                                                                                 | 109 |
| 4.1.3   | ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณฝุ่นละอองกับกำลังไฟฟ้า ( $P_{Out}$ ) .....                                                                                      | 111 |
| 4.1.4   | ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณฝุ่นละอองกับประสิทธิภาพสูญเสียของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta_{Loss}$ ) .....                                                     | 114 |
| 4.1.5   | ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณฝุ่นละอองกับประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta$ ).....                                                                    | 117 |
| 4.1.6   | สรุปผลการทดลอง.....                                                                                                                                             | 121 |
| 4.2     | การสร้างแบบจำลองประมาณค่ารังสีอาทิตย์โดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิตามวิทยาร่วมกับข้อมูลดัชนีคุณภาพอากาศ .....                                                            | 122 |
| 4.2.1   | สัมประสิทธิ์ตัวแปรสำหรับการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ .....                                                                                                        | 122 |
| 4.2.2   | การประมาณค่ารังสีอาทิตย์และการวัดผลทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์                                                                                             | 126 |
| 4.2.2.1 | ผลการประมาณค่ารังสีอาทิตย์จากแบบจำลองคณิตศาสตร์.....                                                                                                            | 126 |
| 4.2.2.2 | การวัดประสิทธิภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ .....                                                                                                                 | 129 |
| 4.2.2.3 | สรุปผลการสร้างแบบจำลอง.....                                                                                                                                     | 140 |

|                                              |     |
|----------------------------------------------|-----|
| บทที่ 5 สรุปและอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ ..... | 141 |
| 5.1 สรุปและอภิปรายผล .....                   | 141 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ .....                         | 142 |
| บรรณานุกรม.....                              | 2   |
| ประวัติผู้เขียน .....                        | 13  |



## สารบัญตาราง

|                                                                                                                            | หน้า |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ตาราง 1 จังหวัดที่มีสถานีวัดรังสีดวงอาทิตย์ [10].....                                                                      | 3    |
| ตาราง 2 มาตรฐานฝุ่นละอองในบรรยากาศโดยทั่วไปของประเทศไทย .....                                                              | 35   |
| ตาราง 3 ระบบการตรวจวัดฝุ่นละอองในบรรยากาศ อ้างอิงตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อม<br>แห่งชาติ และ ประกาศกรมควบคุมมลพิษ ..... | 35   |
| ตาราง 4 เกณฑ์ของดัชนีคุณภาพอากาศของประเทศไทย .....                                                                         | 37   |
| ตาราง 5 เกณฑ์ของดัชนีคุณภาพอากาศของประเทศไทย (ต่อ).....                                                                    | 38   |
| ตาราง 6 ค่าความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศที่เทียบเท่ากับค่าดัชนีคุณภาพอากาศ .....                                          | 39   |
| ตาราง 7 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณฝุ่นละอองกับแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ( $V_{OC}$ ) .....                                 | 81   |
| ตาราง 8 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณฝุ่นละอองกับกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $I_{SC}$ ).....                                    | 81   |
| ตาราง 9 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณฝุ่นละอองกับกำลังไฟฟ้าจ่ายออก ( $P_{out}$ ) .....                                  | 81   |
| ตาราง 10 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณฝุ่นละอองกับประสิทธิภาพ ( $\eta$ ).....                                           | 82   |
| ตาราง 11 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณฝุ่นละอองกับประสิทธิภาพสูญเสีย ( $\eta_{Loss}$ ) .....                            | 82   |
| ตาราง 12 รายชื่อสถานีวัดรังสีอาทิตย์ภาคเหนือ .....                                                                         | 85   |
| ตาราง 13 รายชื่อสถานีอุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ .....                                                                           | 86   |
| ตาราง 14 รายชื่อสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศภาคเหนือ .....                                                                      | 86   |
| ตาราง 15 การแปลความหมายค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ .....                                                                     | 102  |
| ตาราง 16 แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ( $V_{OC}$ ) .....                                                                            | 108  |
| ตาราง 17 กระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $I_{SC}$ ).....                                                                               | 110  |
| ตาราง 18 กำลังไฟฟ้าจ่ายออก ( $P_{out}$ ).....                                                                              | 112  |
| ตาราง 19 ประสิทธิภาพสูญเสียของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta_{Loss}$ ).....                                                    | 115  |
| ตาราง 20 ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta$ ) .....                                                                 | 117  |

|                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ตาราง 21 ปริมาณรังสีอาทิตย์ปรากฏที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Radiation).....                | 119 |
| ตาราง 22 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรและค่านัยสำคัญทางสถิติ .....                               | 122 |
| ตาราง 23 สมการประมาณค่ารังสีอาทิตย์ (DEV.).....                                             | 123 |
| ตาราง 24 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการเปรียบเทียบรังสีอาทิตย์ .....                  | 130 |
| ตาราง 25 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรสำหรับแบบจำลอง ภาคเหนือของประเทศไทย...             | 131 |
| ตาราง 26 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรสำหรับแบบจำลอง ภาคเหนือของประเทศไทย (ต่อ)<br>..... | 132 |
| ตาราง 27 การทดสอบทางสถิติและการวัดประสิทธิภาพแบบจำลองรังสีอาทิตย์ จ.เชียงใหม่.....          | 133 |
| ตาราง 28 การทดสอบทางสถิติและการวัดประสิทธิภาพแบบจำลองรังสีอาทิตย์ จ.เชียงราย.....           | 134 |
| ตาราง 29 การทดสอบทางสถิติและการวัดประสิทธิภาพแบบจำลองรังสีอาทิตย์ จ.แม่ฮ่องสอน ....         | 135 |
| ตาราง 30 การทดสอบทางสถิติและการวัดประสิทธิภาพแบบจำลองรังสีอาทิตย์ จ.น่าน.....               | 136 |
| ตาราง 31 การทดสอบทางสถิติและการวัดประสิทธิภาพแบบจำลองรังสีอาทิตย์ จ.แพร่.....               | 137 |
| ตาราง 32 การทดสอบทางสถิติและการวัดประสิทธิภาพแบบจำลองรังสีอาทิตย์ จ.ตาก.....                | 138 |
| ตาราง 33 การทดสอบทางสถิติและการวัดประสิทธิภาพแบบจำลองรังสีอาทิตย์ จ.พิษณุโลก .....          | 140 |



## สารบัญรูปภาพ

|                                                                                                  | หน้า |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ภาพประกอบ 1 ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์รายเดือน [6] .....                                           | 2    |
| ภาพประกอบ 2 โครงสร้างดวงอาทิตย์ [16] .....                                                       | 7    |
| ภาพประกอบ 3 ช่วงความยาวคลื่นจากการแผ่รังสี [18] .....                                            | 8    |
| ภาพประกอบ 4 ผลของรังสีจากดวงอาทิตย์ต่อบรรยากาศ [19] .....                                        | 9    |
| ภาพประกอบ 5 ชนิดรังสีอาทิตย์ [20] .....                                                          | 11   |
| ภาพประกอบ 6 เฮลิโอกราฟ [22] .....                                                                | 12   |
| ภาพประกอบ 7 ไพรานอมิเตอร์ [23] .....                                                             | 12   |
| ภาพประกอบ 8 ไพเรลิโอมิเตอร์ [23] .....                                                           | 13   |
| ภาพประกอบ 9 เครื่องวัดแสงแดดแบบแคมป์เบลสโตกส์ [25] .....                                         | 14   |
| ภาพประกอบ 10 กระจาดฟ้าโค้งยาว [24] .....                                                         | 14   |
| ภาพประกอบ 11 กระจาดฟ้าตรง [24] .....                                                             | 15   |
| ภาพประกอบ 12 กระจาดฟ้าตรง [24] .....                                                             | 15   |
| ภาพประกอบ 13 การเปรียบเทียบแผ่นขนาดต่างๆ [32] .....                                              | 29   |
| ภาพประกอบ 14 Global ozone ซึ่งได้รับข้อมูลจากอุปกรณ์ OMI ติดตั้งบนดาวเทียม Aura [34] 33          |      |
| ภาพประกอบ 15 การกระจายของข้อมูลและเส้นกราฟถดถอย [39] .....                                       | 40   |
| ภาพประกอบ 16 Strong positive correlation and Weak positive correlation [43] .....                | 44   |
| ภาพประกอบ 17 Strong negative correlation and Weak negative correlation [43] .....                | 44   |
| ภาพประกอบ 18 Moderate negative correlation and No correlation [43] .....                         | 45   |
| ภาพประกอบ 19 ส่วนที่เหลือจากเส้นตรงที่เหมาะสม [44] .....                                         | 48   |
| ภาพประกอบ 20 การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่คำนวณได้จากสมการกำลังสองและค่าที่วัดได้จริง[45]<br>..... | 50   |

|                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ภาพประกอบ 21 กราฟการกระจายข้อมูลแนวโน้มการเป็นเชิงเส้นของสมการกำลังสอง [45].....                                                            | 50 |
| ภาพประกอบ 22 พารามิเตอร์ในการตรวจสอบค่าทางสถิติ [45].....                                                                                   | 51 |
| ภาพประกอบ 23 เปรียบเทียบระหว่างค่าที่คำนวณได้จากสมการที่พัฒนากับค่าที่วัดได้ [46] .....                                                     | 52 |
| ภาพประกอบ 24 ผลลัพธ์ทางสถิติของค่าสหสัมพันธ์ [46].....                                                                                      | 52 |
| ภาพประกอบ 25 สหสัมพันธ์ของตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา [47].....                                                                                  | 53 |
| ภาพประกอบ 26 การกระจายระหว่างรังสีดวงอาทิตย์รายวันโดยการประมาณโดยใช้พารามิเตอร์ทาง<br>อุตุนิยมวิทยาและการวัดรังสีดวงอาทิตย์รายวัน[47] ..... | 54 |
| ภาพประกอบ 27 แบบจำลองที่ใช้พารามิเตอร์เดียว[48].....                                                                                        | 55 |
| ภาพประกอบ 28 แบบจำลองที่ใช้หลายพารามิเตอร์เดียว[48] .....                                                                                   | 55 |
| ภาพประกอบ 29 การตรวจสอบแบบจำลองด้วยวิธีทางสถิติ[48].....                                                                                    | 55 |
| ภาพประกอบ 30 การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่วัดได้จริงกับค่าที่ประมาณการจากแบบจำลอง[49].                                                        | 56 |
| ภาพประกอบ 31 การตรวจสอบทางสถิติของแบบจำลองต่างๆ[49] .....                                                                                   | 56 |
| ภาพประกอบ 32 การตรวจสอบแบบจำลองทั้ง 11 แบบ ด้วยวิธีการวัดค่าทางสถิติ .....                                                                  | 57 |
| ภาพประกอบ 33 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองกับค่าที่วัดได้จริง .....                                                                  | 57 |
| ภาพประกอบ 34 เซลล์แสงอาทิตย์ .....                                                                                                          | 66 |
| ภาพประกอบ 35 หลอดทั้งสแตนฮาลเจน .....                                                                                                       | 67 |
| ภาพประกอบ 36 ดิน.....                                                                                                                       | 67 |
| ภาพประกอบ 37 เครื่องบดละเอียดแบบปั่นแห้งและแบบเปียก .....                                                                                   | 68 |
| ภาพประกอบ 38 เครื่องควบคุมการเขย่าตะแกรงร่อน .....                                                                                          | 68 |
| ภาพประกอบ 39 ตะแกรงร่อนสแตนเลส .....                                                                                                        | 69 |
| ภาพประกอบ 40 เครื่องชั่งน้ำหนัก.....                                                                                                        | 69 |
| ภาพประกอบ 41 เครื่องทดสอบประสิทธิภาพระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์.....                                                                 | 70 |
| ภาพประกอบ 42 เครื่องวัดความเข้มแสงอาทิตย์.....                                                                                              | 70 |
| ภาพประกอบ 43 เครื่องวัดแสง.....                                                                                                             | 71 |

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ภาพประกอบ 44 ลักษณะภายนอกของห้องแสงอาทิตย์เทียม .....                                      | 72 |
| ภาพประกอบ 45 ลักษณะภายในของห้องแสงอาทิตย์เทียม .....                                       | 72 |
| ภาพประกอบ 46 ผลการจำลองค่าความสว่าง.....                                                   | 73 |
| ภาพประกอบ 47 ห้องแสงอาทิตย์เทียม .....                                                     | 74 |
| ภาพประกอบ 48 ผุ่นละอองจากดินอันเนื่องมาจากการขนส่ง .....                                   | 75 |
| ภาพประกอบ 49 ผุ่นละอองจากดินอันเนื่องมาจากการขนส่งในกระบวนการก่อสร้าง .....                | 75 |
| ภาพประกอบ 50 ขนาดของตะแกรงคัดแยกตามมาตรฐานของ ASTM E11 [62].....                           | 76 |
| ภาพประกอบ 51 การบดละเอียดแบบปั่นแห้งและการคัดแยกขนาดผุ่น.....                              | 77 |
| ภาพประกอบ 52 ผุ่นตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการคัดแยกขนาด.....                                   | 77 |
| ภาพประกอบ 53 การชั่งน้ำหนักผุ่นตัวอย่าง.....                                               | 78 |
| ภาพประกอบ 54 ลำดับการทดลองผุ่นละออง.....                                                   | 79 |
| ภาพประกอบ 55 การใช้เครื่องมือวัดในห้องแสงอาทิตย์เทียม .....                                | 80 |
| ภาพประกอบ 56 ผุ่นขนาดต่างๆ ที่ปรากฏบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ .....                              | 80 |
| ภาพประกอบ 57 รายชื่อจังหวัดที่มีจำนวนวันที่คุณภาพอากาศเกินค่ามาตรฐาน ปี 2564 – 2565 ..84   |    |
| ภาพประกอบ 58 รังสีอาทิตย์รวมเฉลี่ยรายเดือนของสถานีวัด จ.เชียงใหม่ ปี 2548 – 2564.....      | 87 |
| ภาพประกอบ 59 อัตราส่วนรังสีอาทิตย์รวมรายเดือนของสถานีวัด จ.เชียงใหม่ ปี 2548 - 2564 ....   | 87 |
| ภาพประกอบ 60 รังสีอาทิตย์รวมเฉลี่ยรายเดือนของสถานีวัด จ.เชียงราย ปี 2548 – 2564.....       | 88 |
| ภาพประกอบ 61 อัตราส่วนรังสีอาทิตย์รวมรายเดือนของสถานีวัด จ.เชียงราย ปี 2548 - 2564.....    | 88 |
| ภาพประกอบ 62 รังสีอาทิตย์รวมเฉลี่ยรายเดือนของสถานีวัด จ.แม่ฮ่องสอน ปี 2548 – 2564 .....    | 89 |
| ภาพประกอบ 63 อัตราส่วนรังสีอาทิตย์รวมรายเดือนของสถานีวัด จ.แม่ฮ่องสอน ปี 2548 - 2564 ..... | 89 |
| ภาพประกอบ 64 รังสีอาทิตย์รวมเฉลี่ยรายเดือนของสถานีวัด จ.แพร่ ปี 2548 – 2564.....           | 90 |
| ภาพประกอบ 65 อัตราส่วนรังสีอาทิตย์รวมรายเดือนของสถานีวัด จ.แพร่ ปี 2548 - 2564 .....       | 90 |
| ภาพประกอบ 66 รังสีอาทิตย์รวมเฉลี่ยรายเดือนของสถานีวัด จ.น่าน ปี 2548 – 2564.....           | 91 |
| ภาพประกอบ 67 อัตราส่วนรังสีอาทิตย์รวมรายเดือนของสถานีวัด จ.น่าน ปี 2548 - 2564.....        | 91 |

|              |                                                                                                           |     |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ภาพประกอบ 68 | รังสีอาทิตย์รวมเฉลี่ยรายเดือนของสถานีวัด จ.ตาก ปี 2548 – 2564 .....                                       | 92  |
| ภาพประกอบ 69 | อัตราส่วนรังสีอาทิตย์รวมรายเดือนของสถานีวัด จ.ตาก ปี 2548 - 2564.....                                     | 92  |
| ภาพประกอบ 70 | รังสีอาทิตย์รวมเฉลี่ยรายเดือนของสถานีวัด จ.พิษณุโลก ปี 2548 – 2564 .....                                  | 93  |
| ภาพประกอบ 71 | อัตราส่วนรังสีอาทิตย์รวมรายเดือนของสถานีวัด จ.พิษณุโลก ปี 2548 - 2564 ...                                 | 93  |
| ภาพประกอบ 72 | รังสีอาทิตย์รวมเฉลี่ยรายเดือนทั้ง 7 จังหวัด ปี 2548 – 2564 .....                                          | 94  |
| ภาพประกอบ 73 | อัตราส่วนรังสีอาทิตย์รวมรายเดือนทั้ง 7 จังหวัด ปี 2548 – 2564.....                                        | 94  |
| ภาพประกอบ 74 | เว็บไซต์บริการข้อมูลสถิติอุตุวิทยา กรมอุตุนิยมวิทยา.....                                                  | 100 |
| ภาพประกอบ 75 | เว็บไซต์บริการข้อมูลสถิติคุณภาพอากาศ กรมควบคุมมลพิษ.....                                                  | 101 |
| ภาพประกอบ 76 | เว็บไซต์บริการข้อมูลปริมาณไอน้ำในอากาศ จาก A E R O N E T .....                                            | 101 |
| ภาพประกอบ 77 | ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองการประมาณค่ารังสีอาทิตย์.....                                                      | 103 |
| ภาพประกอบ 78 | การวัดประสิทธิภาพแบบจำลองประมาณค่ารังสีอาทิตย์โดยวิธีการทางสถิติ .....                                    | 105 |
| ภาพประกอบ 79 | ผลกระทบของขนาดและปริมาณฝุ่นละอองต่อแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ( $V_{OC}$ ).....                                  | 108 |
| ภาพประกอบ 80 | ผลกระทบของขนาดและปริมาณฝุ่นละอองต่อกำลังไฟฟ้าจ่ายออกเทียบกับแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์..... | 109 |
| ภาพประกอบ 81 | ผลกระทบของขนาดและปริมาณฝุ่นละอองต่อกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $I_{SC}$ ).....                                    | 110 |
| ภาพประกอบ 82 | ผลกระทบของขนาดและปริมาณฝุ่นละอองต่อกระแสไฟฟ้าลัดวงจรเทียบกับแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์..... | 111 |
| ภาพประกอบ 83 | ผลกระทบของขนาดและปริมาณฝุ่นละอองต่อกำลังไฟฟ้าจ่ายออก ( $P_{Out}$ ).....                                   | 112 |
| ภาพประกอบ 84 | สมการสำหรับประมาณค่าการลดลงของกำลังไฟฟ้าจ่ายออก .....                                                     | 113 |
| ภาพประกอบ 85 | ผลกระทบของขนาดและปริมาณฝุ่นละอองต่อกำลังไฟฟ้าจ่ายออกเทียบกับกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ .....  | 114 |
| ภาพประกอบ 86 | ผลกระทบของขนาดและปริมาณฝุ่นละอองต่อกำลังไฟฟ้าสูญเสีย.....                                                 | 115 |
| ภาพประกอบ 87 | สมการสำหรับประมาณค่าการลดลงของประสิทธิภาพการสูญเสีย.....                                                  | 116 |
| ภาพประกอบ 88 | ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้รับผลกระทบจากขนาดและปริมาณ .....                                    | 118 |
| ภาพประกอบ 89 | รังสีอาทิตย์ที่ปรากฏที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ .....                                                           | 120 |

|                                                                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ภาพประกอบ 90 สมการการลดลงของรังสีอาทิตย์ที่ปรากฏที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ .....                                                                   | 120 |
| ภาพประกอบ 91 สมการการลดลงของรังสีอาทิตย์ที่ปรากฏที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (ต่อ) .....                                                             | 121 |
| ภาพประกอบ 92 Line fit plot Chiang Mai model.....                                                                                              | 124 |
| ภาพประกอบ 93 Line fit plot Chiang Rai model.....                                                                                              | 124 |
| ภาพประกอบ 94 Line fit plot Mae Hong Son model.....                                                                                            | 124 |
| ภาพประกอบ 95 Line fit plot Nan model.....                                                                                                     | 125 |
| ภาพประกอบ 96 Line fit plot Phare model.....                                                                                                   | 125 |
| ภาพประกอบ 97 Line fit plot Tak model.....                                                                                                     | 125 |
| ภาพประกอบ 98 Line fit plot Phitsanulok model.....                                                                                             | 126 |
| ภาพประกอบ 99 ความสัมพันธ์ระหว่างรังสีอาทิตย์ที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ จังหวัดเชียงใหม่ .....   | 126 |
| ภาพประกอบ 100 ความสัมพันธ์ระหว่างรังสีอาทิตย์ที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ จังหวัดเชียงราย.....    | 127 |
| ภาพประกอบ 101 ความสัมพันธ์ระหว่างรังสีอาทิตย์ที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ จังหวัดแม่ฮ่องสอน ..... | 127 |
| ภาพประกอบ 102 ความสัมพันธ์ระหว่างรังสีอาทิตย์ที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ จังหวัดน่าน .....       | 127 |
| ภาพประกอบ 103 ความสัมพันธ์ระหว่างรังสีอาทิตย์ที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ จังหวัดแพร่.....        | 128 |
| ภาพประกอบ 104 ความสัมพันธ์ระหว่างรังสีอาทิตย์ที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ จังหวัดตาก.....         | 128 |
| ภาพประกอบ 105 ความสัมพันธ์ระหว่างรังสีอาทิตย์ที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ จังหวัดพิษณุโลก.....    | 128 |
| ภาพประกอบ 106 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ จังหวัดเชียงใหม่ .....        | 132 |

|                                                                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ภาพประกอบ 107 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ จังหวัดเชียงราย.....    | 134 |
| ภาพประกอบ 108 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ จังหวัดแม่ฮ่องสอน ..... | 135 |
| ภาพประกอบ 109 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ จังหวัดน่าน .....       | 136 |
| ภาพประกอบ 110 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ จังหวัดแพร่.....        | 137 |
| ภาพประกอบ 111 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ จังหวัดตาก.....         | 138 |
| ภาพประกอบ 112 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ จังหวัดพิษณุโลก.....    | 139 |



## บทที่ 1

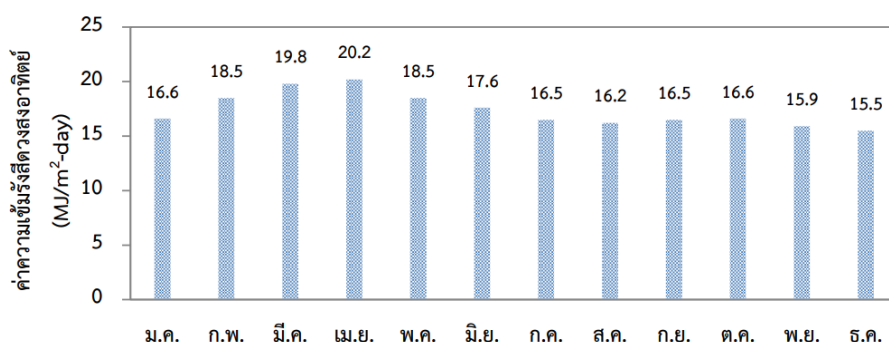
### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

สำนักงานพลังงานสากล (The International Energy Agency: IEA) [1] รายงานการลดลงของต้นทุนการผลิตและความสามารถในการเข้าถึงของแหล่งพลังงานหมุนเวียน (Renewable energy resources) อีกทั้งยังมีกำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้นจากโครงการสนับสนุนใหม่ๆ ทำให้การผลิตไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานหมุนเวียนเติบโตขึ้นถึง 5% ในขณะที่การใช้พลังงานหมุนเวียนทั่วโลกจะเพิ่มขึ้น 1% ช่วยลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั่วโลกได้ถึง 8% ในปี 2020 เทียบกับปีที่ผ่านมาโดยเฉพาะแหล่งพลังงานสะอาดที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมจากธรรมชาติ เช่น แสงแดด ลม น้ำ และ ความร้อนใต้พิภพ และแหล่งพลังงานที่มนุษย์สร้างขึ้นได้เอง เช่น พลังงานจากขยะ พลังงานชีวภาพ และ พลังงานชีวมวล ดังนั้นการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับแหล่งพลังงานหมุนเวียนเพื่อการผลิตไฟฟ้าจึงเป็นหัวข้อที่นักวิจัยทั่วโลกให้ความสนใจเป็นอย่างยิ่ง [2-4]

สำหรับประเทศไทยก็ให้ความสนใจเกี่ยวกับการเพิ่มขีดความสามารถการใช้พลังงานจากแหล่งพลังงานหมุนเวียน โดยได้มีแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก (AEDP2018) และแผนพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้า (PDP2018) [5] ที่มุ่งเน้นการสร้างความมั่นคงและความยั่งยืนด้านพลังงาน ทั้งในด้านการผลิตกำลังไฟฟ้าและแหล่งพัฒนาพลังงานทดแทนโดยคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ทั้งด้านเศรษฐกิจ สังคม และสิ่งแวดล้อม ซึ่งพลังงานแสงอาทิตย์ถือเป็นพลังงานทดแทนที่รัฐบาลมีนโยบายในการส่งเสริมและลงทุนในการพัฒนาพลังงานหมุนเวียนเพื่อใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าของประเทศเพื่อรองรับการเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศ โดยในปี 2036 มีเป้าหมายในการติดตั้งเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ที่ 6,000 MW ซึ่งปัจจุบันกระทรวงพลังงาน โดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานได้มีการส่งเสริมและสนับสนุนการติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ไปแล้วทั้งสิ้น 3,250 MW ยังคงเหลืออีก 2,750 MW ที่ต้องดำเนินการตามเป้าหมายภายใต้แผนพัฒนาทั้ง 2 โดยเฉพาะแผนพัฒนากำลังการผลิตไฟฟ้า ซึ่งมีนโยบายที่มุ่งเน้นและส่งเสริมให้อาคารบ้านเรือน อาคารธุรกิจ หรือแม้กระทั่งโรงงานอุตสาหกรรม ให้สามารถติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อการจำหน่ายและใช้เองได้อย่างเสรี อย่างไรก็ตาม การติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีความรู้และเข้าใจเกี่ยวกับศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ที่แม่นยำของพื้นที่ จะทำให้การติดตั้งและใช้งานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่าต่อการลงทุนมากยิ่งขึ้น สำหรับกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ได้ดำเนินโครงการพัฒนาปรับปรุงแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากภาพถ่ายดาวเทียมสำหรับประเทศไทยในปี

พ.ศ. 2560 โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณค่าความเข้ม รังสีดวงอาทิตย์จากข้อมูล ภาพถ่ายดาวเทียมที่เก็บข้อมูลเป็นเวลา 15 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2544 – 2558 ครอบคลุมพื้นที่ทั่วประเทศ พบว่ามีศักยภาพแตกต่างกันตามพื้นที่ และขึ้นอยู่กับอิทธิพลของลมมรสุม ตะวันออกเฉียงเหนือและลมมรสุมตะวันออกเฉียงใต้ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ส่วนใหญ่กระจายตัว ในช่วง  $17 - 20 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$  [6] ดังแสดงในภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์รายเดือน [6]

จากการคำนวณค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยตลอดทั้งปีของประเทศไทยพบว่ามีค่า เท่ากับ  $17.6 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$  ซึ่งมีค่าต่ำกว่าผลการศึกษาที่ผ่านมาในปี พ.ศ. 2542 และ ปี พ.ศ. 2553 ที่มีค่า ความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ย  $18.2$  และ  $18.0 \text{ MJ/m}^2\text{-day}$  ตามลำดับ สำหรับค่าความเข้มรังสีดวง อาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา นั้น อาจเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศที่ แตกต่างกันไปตามลักษณะภูมิประเทศและปัจจัยต่างๆ ตามธรรมชาติ เช่น ฤดูกาล อุณหภูมิ ความชื้น สัมพัทธ์ ความกดอากาศ ปริมาณเมฆ ปริมาณน้ำฝน ความเร็วลม ทิศทางลม เป็นต้น [7, 8] ซึ่งจะเห็น ได้ว่าปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ล้วนส่งผลต่อการคำนวณค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญทำให้ การประเมินศักยภาพเทคโนโลยีด้านพลังงานทดแทนที่อาศัยรังสีดวงอาทิตย์จึงเข้ามามีบทบาทสำคัญ ในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้า โดยมีความจำเป็นที่ต้องดำเนินการหาค่าความเข้มรังสีดวง อาทิตย์ โดยการติดตั้งเครื่องมือวัดค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ เช่น ไพราโนมิเตอร์ในสถานที่ต่างๆ เพื่อให้ได้ข้อมูลปริมาณความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เชิงพื้นที่ แต่เนื่องจากต้นทุนในการติดตั้งอุปกรณ์ ตรวจวัดพลังงานมีราคาค่อนข้างสูง และยังต้องมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ด้วยเหตุนี้การติดตั้งไพรา โมิเตอร์นี้จึงไม่ได้มีการติดตั้งเพื่อวัดค่าปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ในหลายส่วนของโลกโดยเฉพาะใน ประเทศที่กำลังพัฒนาเพราะขาดแคลนเครื่องมือ ดังนั้นข้อมูลการแผ่รังสีแสงอาทิตย์สำหรับหลายส่วน ของประเทศจึงได้มาจากแบบจำลองการแผ่รังสีดวงอาทิตย์แทน [7, 9] สำหรับประเทศไทยฐานข้อมูล

ค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์รวมจะได้จากสถานีวัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ โดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) ที่ดำเนินการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์เพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลด้านพลังงานแสงอาทิตย์ภายในประเทศ ณ ปัจจุบันมีสถานีวัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์จำนวน 38 สถานี ในพื้นที่ประมาณ 32 จังหวัด จากทั้งหมด 77 จังหวัด [9] ดังแสดงในตาราง 1

ตาราง 1 จังหวัดที่มีสถานีวัดรังสีดวงอาทิตย์ [10]

| ภูมิภาค               | จังหวัดที่มีสถานีวัดรังสีดวงอาทิตย์                                        |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| ภาคกลาง               | กรุงเทพฯ, ลพบุรี, นครสวรรค์                                                |
| ภาคเหนือ              | พิษณุโลก, เพชรบูรณ์, น่าน, แพร่, เชียงราย, เชียงใหม่ 4, แม่ฮ่องสอน 2       |
| ภาคใต้                | ระนอง, ชุมพร, สุราษฎร์ธานี 2, สงขลา, ตรัง, ภูเก็ต, นราธิวาส                |
| ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ | เลย, หนองคาย, นครพนม, นครราชสีมา, ขอนแก่น, ร้อยเอ็ด, สุรินทร์, อุบลราชธานี |
| ภาคตะวันออก           | ประจวบคีรีขันธ์ 2, ตราด, ชลบุรี, ปราจีนบุรี,                               |
| ภาคตะวันตก            | กาญจนบุรี 2, ตาก, สระแก้ว                                                  |

ซึ่งหากต้องการจัดตั้งระบบพยากรณ์ที่มีความแม่นยำสูง ประเทศไทยจึงมีความจำเป็นที่จะต้องจัดตั้งสถานีวัดเพิ่มเติมเพื่อให้เกิดข้อมูลที่ครอบคลุมทุกจังหวัดทั่วประเทศหรือมากกว่า โดยเฉพาะจังหวัดในภาคตะวันออกเฉียงเหนือซึ่งถือเป็นภูมิภาคที่มีศักยภาพด้านพลังงานแสงอาทิตย์สูงสุด จากตาราง 1 แสดงให้เห็นได้ว่า มีเพียง 32 จังหวัดที่มีสถานีวัดความเข้มรังสีอาทิตย์สำหรับเป็นฐานข้อมูลที่ใช้ประโยชน์ด้านพลังงานทดแทนเท่านั้น [10] อย่างไรก็ตาม ค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ยังสามารถคำนวณได้จากตัวแปรต่างๆ ทางสภาพอากาศโดยอาศัยข้อมูลจากอุตุนิยมวิทยาที่มีครอบคลุมในทุกๆ จังหวัด [7, 8] อีกหนึ่งปัจจัยทางสภาพแวดล้อมซึ่งอาจจะมีผลกระทบต่อปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ทั่วโลกอย่างมีนัยสำคัญคือปัจจัยด้านฝุ่นละอองที่ฟุ้งกระจายล่องลอยในอากาศมีทั้งที่เป็นของแข็งและของเหลวรายงานสถานการณ์คุณภาพอากาศโลก พ.ศ. 2562 [11] รายงานคุณภาพอากาศของโลก ซึ่งเผยให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของมลพิษทางอากาศ (PM2.5) ในช่วงปีที่ผ่านมาที่เพิ่มสูงขึ้นอันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ เช่น การเกิดไฟป่า การขยายตัวของโรงงานอุตสาหกรรม หรือแม้กระทั่งการเผาเศษวัสดุทางการเกษตร และมลพิษที่ได้รับจากการขยายตัวของเมืองอย่างรวดเร็วในภูมิภาคต่างๆ จากอดีตถึงปัจจุบันมีนักวิจัยในหลายประเทศที่พยายามประยุกต์ใช้ข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาเพื่อหาค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ อาทิเช่น เมื่อปี 2018

นักวิจัยชาวโมร็อกโก ได้นำข้อมูลอุณหภูมิของอากาศ ความยาวนานของแสงแดด มาพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณหาค่าปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ภายในประเทศโมร็อกโก [12] และในปี 2021 นักวิจัยอียิปต์และชาวซาอุดีอาระเบีย ได้นำข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาที่สำคัญ เช่น อุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด ความยาวนานของแสงแดด และความชื้นสัมพัทธ์มาประยุกต์ใช้สมการทางคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณหาค่าปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ภายในประเทศ [13, 14] ซึ่งจากงานวิจัยดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าการใช้ข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาประกอบการประมาณค่าปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ให้ค่าความแม่นยำเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จริง และยังมีงานวิจัยบางส่วนที่ได้ค้นพบว่าปริมาณฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศยังส่งผลอย่างมีนัยสำคัญเช่นกันต่อปริมาณรังสีอาทิตย์

สำหรับประเทศไทยได้มีนักวิจัยได้ศึกษาแบบจำลองสำหรับคำนวณค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์โดยอาศัยข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยาเช่นกัน แต่เนื่องจากในช่วงที่ผ่านมาสภาพภูมิอากาศภายในประเทศไทยมีการเปลี่ยนแปลงไปมาก รวมไปถึงปัญหาด้านฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศที่ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมภายในประเทศ จึงอาจส่งผลให้ความแม่นยำจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อ้างอิงจากฐานข้อมูลอุตุนิยมวิทยาเดิมลดลง ซึ่งจากการศึกษาดังกล่าวพบว่ายังไม่มีการใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาร่วมกับข้อมูลปริมาณฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศในการประมาณค่ารังสีอาทิตย์มาก่อน ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะพัฒนาและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ โดยอาศัยข้อมูลจากสภาพภูมิอากาศของอุตุนิยมวิทยาร่วมกับข้อมูลปริมาณฝุ่นละอองในอากาศ

## 1.2 ความมุ่งหมายของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดและปริมาณฝุ่นละอองต่อปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ปรากฏบนพื้นผิวแผงเซลล์แสงอาทิตย์และประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในห้องปฏิบัติการ

1.2.2 เพื่อสังเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการประมาณค่าปริมาณรังสีอาทิตย์ที่เหมาะสมโดยใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาร่วมกับข้อมูลปริมาณฝุ่นละอองในอากาศ

1.2.3 เพื่อทดสอบและวัดผลการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอโดยใช้พื้นที่การศึกษาในประเทศไทย โดยเปรียบเทียบค่าความถูกต้องและความแม่นยำกับปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ปรากฏจริงจากสถานีตรวจวัดรังสีอาทิตย์มาตรฐานของประเทศ

### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.3.1 ใช้ข้อมูลจากอุตุนิยมวิทยาและสถานีวัดคุณภาพอากาศภาคเหนือของประเทศไทย
- 1.3.2 ใช้ข้อมูลค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์จากสถานีวัดรังสีดวงอาทิตย์จากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน
- 1.3.3 เปรียบเทียบค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับค่าที่วัดได้จริงจากสถานีวัดรังสีดวงอาทิตย์จากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน
- 1.3.4 ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 100 ไมครอน

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณฝุ่นละอองที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ปรากฏบนพื้นผิวแผงเซลล์แสงอาทิตย์และประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์
- 1.4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการประมาณค่าปริมาณรังสีอาทิตย์โดยใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาร่วมกับข้อมูลปริมาณฝุ่นละอองในอากาศ
- 1.4.3 ค่าความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เทียบกับสถานีวัดรังสีดวงอาทิตย์



## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการสร้างแบบจำลองสำหรับการประมาณค่าปริมาณรังสีอาทิตย์โดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิจากดาวเทียมร่วมกับข้อมูลปริมาณฝนละอองในอากาศนั้น ผู้วิจัยได้ดำเนินการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับแนวคิดหลักการ ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้เป็นแนวทางในการวิจัยดังนี้

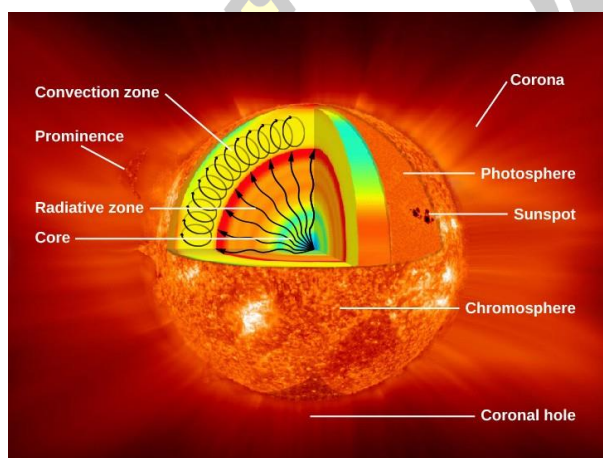
#### 2.1 ทฤษฎีรังสีอาทิตย์

##### 2.1.1 ดวงอาทิตย์ [7, 8, 15]

ดวงอาทิตย์เป็นศูนย์กลางของระบบสุริยะจักรวาล โลกเป็นดาวเคราะห์ดวงหนึ่ง ซึ่งเป็นบริวารของ ดวงอาทิตย์ ดวงอาทิตย์มีอิทธิพลต่อโลกและความเป็นอยู่ของมนุษย์มาก ที่สำคัญคือ ดวงอาทิตย์ทำให้สภาพภูมิศาสตร์ของโลกแตกต่างกัน คือ เขตร้อน เขตอบอุ่น เขตหนาว ดวงอาทิตย์ทำให้เกิดการหมุนเวียนของกระแสอากาศ ซึ่งได้แก่ ลม การหมุนเวียนของกระแสน้ำในมหาสมุทร กระแสน้ำอุ่น กระแสน้ำเย็น นอกจากนี้ ดวงอาทิตย์ทำให้เกิดวัฏจักรของน้ำซึ่งมีผลต่อชีวิตและสิ่งแวดล้อม ดวงอาทิตย์นอกจากจะให้แสงสว่างแก่โลกแล้ว ยังให้พลังงานแก่โลกอีกด้วย ดวงอาทิตย์ถือศูนย์กลางของระบบสุริยะ (Solar system) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 Mkm มีโลกและดาวเคราะห์อื่นๆ เป็นบริวาร โดยดวงอาทิตย์จะแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ อยู่ห่างจากโลกประมาณ 150 Mkm หรือ 1 AU (Astronomical Unit) มีมวลประมาณ  $1.9 \times 10^{30}$  kg มีรัศมีประมาณ 695,500 km ประกอบขึ้นจากมวลสารของไฮโดรเจน 70.67% ฮีเลียม 27.43% และส่วนที่เหลือเป็นคาร์บอน ไนโตรเจน ออกซิเจน และโลหะต่างๆ ผิวของดวงอาทิตย์ที่เรามองเห็นได้มีอุณหภูมิประมาณ  $5,500^{\circ}\text{C}$  นักดาราศาสตร์วัดอุณหภูมิผิวดาวฤกษ์ในหน่วยของเคลวิน ซึ่ง  $1\text{ K}$  เท่ากับ  $1^{\circ}\text{C}$  เท่ากับ  $1.8^{\circ}\text{F}$  แต่จุดเริ่มต้นของเคลวินและองศาเซลเซียสแตกต่างกัน โดยเคลวินเริ่มที่  $0\text{ K}$  แต่องศาเซลเซียสเริ่มที่  $-273.15^{\circ}\text{C}$

ดังนั้นอุณหภูมิที่ผิวดวงอาทิตย์มีค่าประมาณ  $5,800\text{ K}$  และอุณหภูมิที่แกนกลางของดวงอาทิตย์สูงถึงประมาณ  $15\text{ MK}$  พลังงานของดวงอาทิตย์มาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน ซึ่งเกิดที่แกนกลางของดวงอาทิตย์ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันคือการรวมกันของอะตอมของธาตุเบาได้อะตอมใหม่ที่มีมวลน้อยกว่ามวลรวมของอะตอมเริ่มต้น และมวลที่หายไปนั้นถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานซึ่งโครงสร้างของดวงอาทิตย์จากภายในสู่ภายนอก ประกอบด้วยบริเวณใจกลาง (Core) บริเวณแผ่รังสี (Radiative zone) บริเวณพาความร้อน (Convective zone) และส่วนของ บรรยากาศโดยบรรยากาศชั้นล่างสุดของดวงอาทิตย์คือ โฟโตสเฟียร์ (Photosphere) ถัดมาเป็น บรรยากาศชั้นกลาง

ของดวงอาทิตย์คือ โครโมสเฟียร์ (Chromosphere) และบรรยากาศชั้นบนสุดคือ โคโรนา (Corona) พลังงานที่เกิดจากดวงอาทิตย์จะแผ่ออกสู่อวกาศโดยรอบในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความยาวคลื่นต่างๆ ซึ่งอยู่ในรูปของรังสีและแสงสว่าง เรียกว่า รังสีอาทิตย์ (Solar radiation) พลังงานรวมของรังสีทั้งหมดที่แผ่จากดวงอาทิตย์จะมีค่าเท่ากับ  $3.854 \times 10^{26} \text{ W}$  โดยลักษณะโครงสร้างของดวงอาทิตย์แสดงดังภาพประกอบ 2



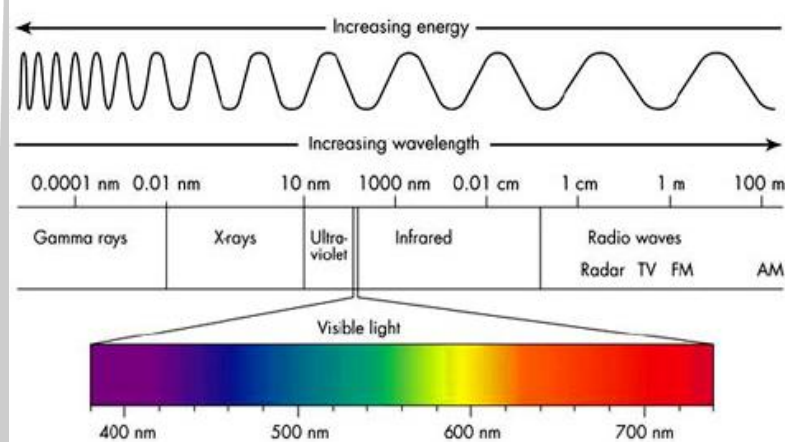
ภาพประกอบ 2 โครงสร้างดวงอาทิตย์ [16]

### 2.1.2 การแผ่รังสีอาทิตย์

การแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์นอกชั้นบรรยากาศโลกจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $1,353 \text{ W/m}^2$  โดยมีค่าการแผ่รังสีเฉลี่ยอยู่ระหว่าง  $1,350 - 1,440 \text{ W/m}^2$  ค่าการแผ่รังสีดังกล่าวเราเรียกว่า ค่าคงที่สุริยะ (Solar Constant) คือค่าอัตราการตกกระทบของพลังงานแสงอาทิตย์ต่อหน่วยพื้นที่ในทิศทางตั้งฉากกับดวงอาทิตย์นอกชั้นบรรยากาศโลกและจะมีค่าแตกต่างกันออกไปในแต่ละเดือน โดยมีค่าแปรผันไปตามช่วงความยาวคลื่นของรังสีซึ่งอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบไปด้วยรังสีช่วงคลื่นยาว ได้แก่ รังสีอินฟราเรด (Infrared) จนถึงรังสีช่วงคลื่นสั้น ได้แก่ รังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet)

รังสีจากดวงอาทิตย์เป็นพลังงานรูปหนึ่ง ซึ่งเป็นได้ทั้งอนุภาคหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ถ้าเป็นอนุภาค จะอธิบายในรูปโฟตอน ที่สามารถเคลื่อนที่ไปได้โดยไม่ต้องอาศัยตัวพา จึงสามารถที่จะเคลื่อนที่ผ่านสุญญากาศมายังโลกได้ แต่ถ้ามีสถานะเป็นคลื่นการเคลื่อนที่ขึ้นลงอย่างรวดเร็วในรูปแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นต่างๆกัน ทำให้เกิดพลังงานขึ้น จากสูตร  $E = hf$  หรือ พลังงานเท่ากับ ความถี่  $\times$  ความยาวคลื่น โดยรังสีของดวงอาทิตย์จะประกอบด้วยคลื่นที่มีความยาวคลื่นต่างกัน คลื่นสั้น (Short wave) ได้แก่ รังสีแกมมา รังสีเอ็กซ์ และรังสีอัลตราไวโอเลต หรือ UV ซึ่งเป็นช่วงคลื่นที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตา ช่วงคลื่นที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาอยู่ในช่วง  $0.4 -$

0.7  $\mu\text{m}$  โดยจะเห็นเป็นสีรุ้งเมื่อแสงกระทบตัวกลางหรือบรรยากาศแล้วเกิดการกระเจิงออกมาเป็นสีม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง แสด แดง ต่อมาจะเป็นช่วงคลื่นที่ยาวขึ้นได้แก่ อินฟราเรด ไมโครเวฟ (คลื่นความร้อน) และช่วงคลื่นที่ยาวขึ้นได้แก่ เรดาร์ วิทยุ FM วิทยุคลื่นสั้น AM และวิทยุคลื่นยาว [17] พลังงานแสงอาทิตย์ที่เดินทางมายังโลกนั้น ต้องผ่านบริเวณสุญญากาศ ทำให้การถ่ายเทความร้อนจากดวงอาทิตย์มายังโลกทำได้ด้วยการแผ่รังสีเท่านั้น ด้วยเหตุนี้ พลังงานที่โลกได้รับจากดวงอาทิตย์จึงอยู่ในรูปรังสี โดยมีขนาดคลื่นต่างๆ กัน ดังแสดงในภาพประกอบ 3

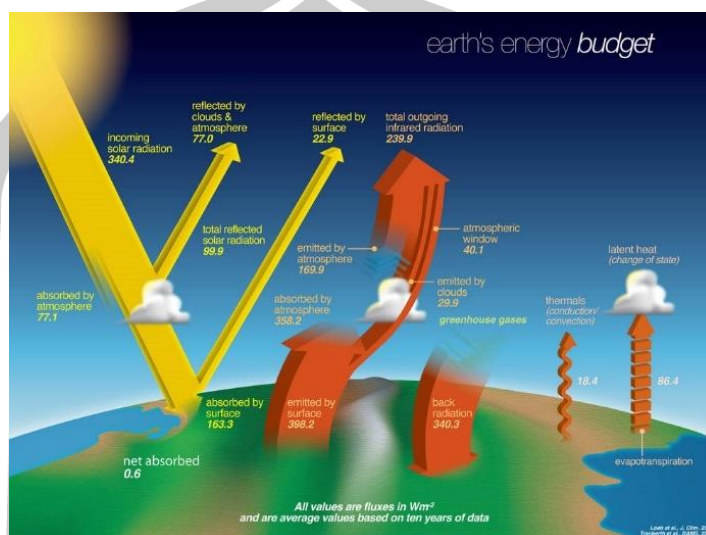


ภาพประกอบ 3 ช่วงความยาวคลื่นจากการแผ่รังสี [18]

ซึ่งการแผ่ รังสีเป็นวิธีการหนึ่งในการเคลื่อนย้ายพลังงานจากที่หนึ่งไปสู่อีกที่หนึ่ง ช่วงคลื่นจากการแผ่รังสีมีตั้งแต่สั้นที่สุด คือ รังสีคอสมิกที่มีความยาวคลื่นช่วงสั้น จนถึงรังสีที่ยาวมากๆ เช่น คลื่นวิทยุและคลื่นเสียงที่มีความยาวคลื่นเป็นกิโลเมตร รังสีจากดวงอาทิตย์แบ่งตามความยาวคลื่นออกเป็น 3 กลุ่มด้วยกัน ได้แก่

1. รังสีอุลตราไวโอเลต เป็นรังสีคลื่นสั้นมากที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่าช่วงคลื่นสีม่วง คือ อยู่ในช่วงคลื่น ตั้งแต่ 0.1 - 0.4  $\mu\text{m}$  ประมาณ 9% ของพลังงานแสงอาทิตย์ทั้งหมดที่บรรยากาศของโลกได้รับจะตกอยู่ในช่วงคลื่นนี้
2. แสง เป็นรังสีคลื่นสั้นที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าอยู่ในช่วงคลื่นตั้งแต่ 0.4 - 0.7  $\mu\text{m}$  ประมาณ 41% ของพลังงานจากดวงอาทิตย์ทั้งหมดที่บรรยากาศของโลกได้รับจะตกอยู่ในช่วงคลื่นนี้ แบ่งออกได้เป็นแถบสี ม่วง (0.4 - 0.42) คราม (0.42 - 0.44) น้ำเงิน (0.44 - 0.49) เขียว (0.49 - 0.57) เหลือง (0.57 - 0.59) แสด (0.59 - 0.61) และแดง (0.61 - 0.7) หรือก็คือแถบของสีรุ้ง
3. รังสีอินฟราเรด เป็นรังสีคลื่นสั้นที่อยู่ในช่วงคลื่นตั้งแต่ 0.7 - 4.0  $\mu\text{m}$  ประมาณ 50% ของพลังงานจากดวงอาทิตย์ทั้งหมดที่บรรยากาศของโลกได้รับจะตกอยู่ในช่วงคลื่นนี้ รังสีจากดวงอาทิตย์

ทั้งหมด ดังกล่าวล้วนเป็นรังสีคลื่นสั้น นอกจากแสงแล้วรังสีช่วงอื่นไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ดังแสดงในภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 ผลของรังสีจากดวงอาทิตย์ต่อบรรยากาศ [19]

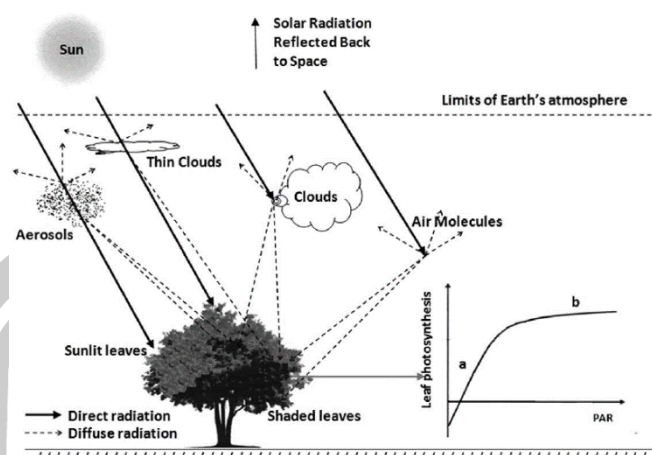
ความเข้มรังสีแสงอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกนั้นจะน้อยกว่านอกชั้นบรรยากาศ เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกดูดกลืนโดยอะตอมและโมเลกุลของก๊าซ โดยช่วงอัลตราไวโอเล็ตถูกดูดกลืนด้วยอะตอมของออกซิเจน ไนโตรเจน และโมเลกุลของออกซิเจน ( $O_2$ ), โอโซน ( $O_3$ ) และโมเลกุลของไนโตรเจน ( $N_2$ ) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของบรรยากาศ ทำให้แสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านบรรยากาศจนถึงพื้นโลกแทบจะไม่มีคลื่นช่วงอัลตราไวโอเล็ต ช่วงแสงอินฟราเรดจะถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลของน้ำ ( $H_2O$ ) และโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) ซึ่งเกิดขึ้นในชั้นล่างของบรรยากาศภายในระยะทาง 50 km จากพื้นโลกเป็นช่วงชั้นบรรยากาศที่มี  $H_2O$  และ  $CO_2$  อยู่มาก พลังงานแสงช่วงอินฟราเรดที่ถูกดูดกลืนเกือบทั้งหมด ทำให้บรรยากาศร้อนหรือทำให้พลังงานจลน์ของโมเลกุลอากาศสูงขึ้นและทำให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้นด้วย รายละเอียดการเปลี่ยนแปลงของรังสีจากดวงอาทิตย์ของแต่ละชั้นบรรยากาศในโลกมีดังนี้ รังสีจากดวงอาทิตย์ที่ผ่านเข้ามาในบรรยากาศของโลกจะมีการเปลี่ยนแปลงทั้งในด้านปริมาณและคุณภาพ แตกต่างกันไปในแต่ละชั้นบรรยากาศของโลกเมื่อรังสีผ่านเข้าใกล้ชั้นบรรยากาศของโลก เมโซสเฟียร์ คือประมาณ 80 km จากพื้นโลก พกรังสีคลื่นสั้นมากๆ ที่เป็นอันตรายต่อชีวิต เช่น รังสีคอสมิก รังสีแกมมา และรังสีเอ็กซ์ จะถูกดูดซับไว้เกือบหมด รวมทั้งบางส่วนของรังสีอัลตราไวโอเล็ตด้วย เมื่อมาถึงชั้นล่างของเมโซสเฟียร์ และชั้นสเตรโตสเฟียร์ระดับประมาณ 15 - 55 km จากพื้นโลก ซึ่งเป็นชั้นของโอโซน รังสีอัลตราไวโอเล็ตก็จะถูกดูดซับไว้เกือบหมดก่อนที่จะผ่านเข้ามาสู่บรรยากาศชั้นโทรโปสเฟียร์ซึ่งเป็นชั้นที่อยู่ใกล้พื้นโลกมากที่สุด และในชั้น

โทรโปสเฟียร์นี้ ไอน้ำในอากาศและคาร์บอนไดออกไซด์ก็จะดูดซับรังสี อินฟราเรดบางช่วงไว้ ทำให้คุณภาพของพลังงานจากดวงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงไป รังสีคลื่นสั้นช่วง  $0.1 - 4.0 \mu\text{m}$  ที่แผ่มาถึงผิวบรรยากาศของโลกดังได้กล่าวไว้แล้วนั้น จะมีช่วงที่ตกมาถึงพื้นโลกจริง ๆ ก็เพียงช่วงคลื่นระหว่าง  $0.31 - 2.50 \mu\text{m}$  เท่านั้น โดยรังสีที่ต่ำกว่า  $0.31 \mu\text{m}$  ที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตจะถูกแถบของโอโซนในบรรยากาศดูดซับไว้เกือบหมด ส่วนช่วงคลื่นที่ยาวกว่า  $2.5 \mu\text{m}$  จะถูกไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ดูดซับไว้ ประมาณครึ่งหนึ่งของพลังงานจากดวงอาทิตย์ที่เข้ามาถึงพื้นผิวโลกจึงอยู่ในช่วงคลื่นอินฟราเรดที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าได้

### 2.1.3 ชนิดรังสีอาทิตย์

รังสีอาทิตย์บนพื้นโลกที่ได้ผ่านกระบวนการดูดกลืนและการแผ่รังสีอาทิตย์โดยก๊าซในบรรยากาศของโลก เป็นผลให้สเปกตรัมแสงอาทิตย์เปลี่ยนไปโมเลกุลของก๊าซ ผุ่นละอองและเมฆ ทำให้รังสีอาทิตย์กระจุกกระจายและสะท้อนในชั้นบรรยากาศและบนพื้นผิวของโลกทั้งนี้ เราสามารถแบ่งประเภทของรังสี แสงอาทิตย์ตามทิศทางของแสงที่อยู่บนพื้นโลกได้ดังนี้ [7]

1. รังสีตรง (Direct Radiation) เป็นรังสีที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรงและตกบนผิวรับแสงบนพื้นโลกด้วยทิศทางที่แน่นอน ณ เวลาหนึ่งเวลาใด ซึ่งทิศของรังสีตรงอยู่ในแนวลำแสงที่ขีดเส้นตรงจากดวงอาทิตย์ รังสีตรงมีทิศทางแน่นอนและมีลำแสงขนาน สามารถรวมแสงหรือโฟกัสรังสีตรงได้
2. รังสีกระจาย (Diffuse Radiation) เป็นรังสีอาทิตย์ส่วนที่ถูกสะท้อนและกระจาย โดยก๊าซและ ผุ่น ละอองรวมถึงวัตถุต่างๆ ที่อยู่ในทางเดินของแสงก่อนตกกระทบผิวรับแสง รังสีกระจายนี้มาจากทุกทิศทางใน ท้องฟ้าจึงไม่สามารถรวมแสงหรือโฟกัสรังสีกระจายได้
3. รังสีรวม (Global Radiation) เป็นผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจายซึ่งจำกัดเฉพาะคลื่นสั้น (ไม่เกิน 4 ไมโครเมตร) ไม่รวมพลังงานคลื่นยาวจากการแผ่รังสีของพื้นโลกและบรรยากาศ โดยกรณีผิวรับแสงเป็นพื้นเอียง (Incline plane) รังสีรวมจะประกอบด้วยรังสีตรงจากท้องฟ้า รังสีกระจายจากท้องฟ้าและรังสี กระจายจากพื้นโลก อาคารบ้านเรือน ซึ่งเกิดจากส่วนที่สะท้อนกลับจากพื้นโลก ในกรณีนี้เรียกว่ารังสีรวมแต่กรณีผิวรับแสงเป็นพื้นแนวราบ (horizontal plane) รังสีรวมบนพื้นราบประกอบด้วยรังสีตรงและ รังสีกระจายที่มาจากครึ่งทรงกลมท้องฟ้า ไม่มีรังสีกระจายที่มาจากพื้นโลก เรียกรังสีรวมบนพื้นแนวราบว่ารังสีรวมทั้งหมดนี้แสดงในภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 ชนิดรังสีอาทิตย์ [20]

#### 2.1.4 ปริมาณรังสีอาทิตย์

ในงานด้านรังสีอาทิตย์จะเกี่ยวข้องกับปริมาณของรังสีอาทิตย์ที่สำคัญดังนี้ [21]

1. รังสีที่ขณะเวลาหนึ่ง (Irradiance) หรือความเข้มรังสีอาทิตย์ หมายถึง พลังงานของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่ 1 หน่วยที่ขณะเวลาหนึ่ง มีหน่วยเป็นจูลต่อ วินาทีต่อตารางเมตร หรือ วัตต์ต่อตารางเมตร
2. รังสีในช่วงเวลา(irradiation) หมายถึงปริมาณของพลังงานของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่ในช่วงเวลาที่กำหนด ตัวอย่างเช่น ช่วงเวลา 1 ชั่วโมง เรียกว่ารังสีรายชั่วโมง (Hourly irradiation) ซึ่งมีหน่วยเป็นจูลต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง หรือกรณีที่เป็นช่วงเวลา 1 วัน เรียกว่ารังสีรายวัน (Daily irradiation) ซึ่งมีหน่วยเป็น  $J/m^2/day$
3. รังสีในมุมตัน (Radiance) หรือเรเดียนรังสีอาทิตย์ หมายถึงพลังงานที่ได้รับจากรังสีอาทิตย์ที่เดินทางเข้ามาใน 1 หน่วยมุมตันต่อ 1 หน่วยพื้นที่ที่ตั้งฉากกับมุมตัน มีหน่วยเป็นจูลต่อตารางเมตรต่อสเตอเรเดียน

#### 2.1.5 เครื่องมือวัดรังสีอาทิตย์

ในงานแต่ละอย่างจะใช้ข้อมูลรังสีอาทิตย์แตกต่างกัน สำหรับในงานด้านระบบพลังงานรังสีอาทิตย์แบบรวมแสง (Solar concentrating system) จะต้องการข้อมูลรังสีตรง ทั้งนี้เพราะระบบดังกล่าวจะใช้ประโยชน์จากรังสีตรง สำหรับระบบที่ใช้ประโยชน์จากรังสีรวม เช่น ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์สุริยะ ระบบทำน้ำร้อนพลังงานรังสีอาทิตย์ และระบบอบแห้งพลังงานรังสีอาทิตย์ ผู้ออกแบบระบบดังกล่าวต้องการข้อมูลรังสีรวม นอกจากนี้การแปลงข้อมูลรังสีรวมบนระนาบในแนวระดับให้เป็นค่ารังสีรวมบนระนาบเอียง จำเป็นต้องใช้ข้อมูลรังสีกระจายบนระนาบในแนวระดับ ดังนั้น

การวัดรังสีอาทิตย์จึงแบ่งได้เป็นการวัดรังสีตรง รังสีกระจาย และรังสีรวม โดยการวัดรังสีดังกล่าวต้องใช้อุปกรณ์วัดที่แตกต่างกัน [7]

1. เฮลิโอกราฟ (Heliograph) เป็นอุปกรณ์ที่วัดชั่วโมงแสงอาทิตย์ โดยอุปกรณ์ประกอบด้วยลูกบอลคริสตัลขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และหลังลูกบอลคริสตัลจะเป็นกระดาษที่จะเกิดรอยไหม้ เมื่อลูกบอลได้รับแสงอาทิตย์ ลักษณะตามภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 เฮลิโอกราฟ [22]

2. ไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer) เป็นอุปกรณ์ที่จะวัดการแผ่รังสีอาทิตย์บนพื้นที่ราบในช่วงสเปกตรัม  $0.3 - 3 \mu\text{m}$  ไพรานอมิเตอร์จะวัดรังสีอาทิตย์จากทุกทิศทาง เมื่อแสงอาทิตย์ตกกระทบที่เทอร์โมคัปเปิล ความร้อนที่ได้จะถูกเปลี่ยนเป็นไฟฟ้าและแปลงค่าผ่านสมการ (รวมค่า correction ของอุปกรณ์) ให้เป็นหน่วย  $\text{W/m}^2$  ซึ่งอุปกรณ์นี้ใช้สำหรับการวัดรังสีรวม และรังสีกระจาย โดยเฉพาะการใช้งานในโรงไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์ ลักษณะตามภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 ไพรานอมิเตอร์ [23]

3. ไพเรลิโอมิเตอร์ (Pyrheliometer) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดความเข้มแสงอาทิตย์ แบบรังสีตรง โดยอุปกรณ์นี้จะมีระบบติดตามดวงอาทิตย์ เมื่อแสงอาทิตย์ส่งผ่านช่องแสงเทอร์โมคัปเปิล จะทำหน้าที่เปลี่ยนความร้อนที่ได้รับจากแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าสัญญาณที่ได้จะถูกเปลี่ยนจากสูตรให้เป็นค่าการวัดในหน่วย  $W/m^2$  ลักษณะตามภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 ไพเรลิโอมิเตอร์ [23]

## 2.2 การคำนวณรังสีอาทิตย์จากข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา

การหาค่ารังสีอาทิตย์สามารถคำนวณได้จากข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ ความยาวนานของแสงแดด ปริมาณเมฆ และอุณหภูมิอากาศ ทั้งนี้เพราะข้อมูลเหล่านี้มีความสัมพันธ์ทางสถิติกับค่ารังสีอาทิตย์ และข้อมูลสภาพอากาศดังกล่าวสามารถหาได้จากสถานีอุตุนิยมวิทยาประจำจังหวัดต่างๆ ภายในประเทศ โดยผู้วิจัยได้นำเสนอการคำนวณค่ารังสีอาทิตย์จากอุตุนิยมวิทยาดังนี้

- การคำนวณค่ารังสีอาทิตย์จากความยาวนานแสงแดด
- การคำนวณค่ารังสีอาทิตย์จากปริมาณเมฆ
- การคำนวณค่ารังสีอาทิตย์จากอุณหภูมิอากาศ

### 2.2.1 การคำนวณค่ารังสีอาทิตย์จากความยาวนานแสงแดด

เครื่องมือที่สถานีอุตุนิยมวิทยาใช้ในการวัดความยาวนานของแสงแดดในแต่ละวันคือ เครื่องวัดความยาวนานแสงแดดแบบแคมป์เบลสโตกส์ (Campbell-Stokes Recorder) ซึ่งความยาวนานของแสงแดดสามารถบ่งบอกได้ถึงการที่รังสีอาทิตย์ตกกระทบกับพื้นผิวโลกใน 1 วัน มีระยะเวลานานเพียงใด ในภาพประกอบ 9 แสดงเครื่องวัดความยาวนานของแสงแดด [7, 8, 24]



ภาพประกอบ 9 เครื่องวัดแสงแดดแบบแคมป์เบลล์-สโตกส์ [25]

สำหรับเครื่องวัดความยาวนานแสงแดดแบบแคมป์เบลล์-สโตกส์ (Campbell-Stokes Recorder) ประกอบด้วยลูกแก้วกลมเป็นรูป sphere ตั้งอยู่ที่ฐาน มีโครง (Bowl) สำหรับสอด กระดาษอบน้ำยาเคมี เมื่อพลังงานแผ่ความร้อนจากดวงอาทิตย์ส่องมาถูกลูกแก้ว จะทำให้รวมเป็น จุดโฟกัส เผาไหม้กระดาษเป็นทางยาว ความกว้างและความลึกของรอยไหม้ขึ้นอยู่กับความแรง (ความ เข้ม) ของแสงแดดกระดาษจะมีสีน้ำเงิน เมื่อรังสีอาทิตย์ตกกระทบลูกแก้ว รังสีตรงจะถูกลูกแก้วซึ่งทำ หน้าที่เหมือน เลนส์นูนรวมแสงไปตกกระทบบนกระดาษไวแสง ถ้ารังสีตรงมีความเข้มสูงกว่า  $120 \text{ W/m}^2$  กระดาษไวแสงก็จะไหม้เป็นทางตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ เมื่อรวมระยะทาง ที่กระดาษ ไวแสงไหม้ จะสามารถหาช่วงเวลาที่มืดหรือความยาวนานแสงแดดได้ และที่กระดาษจะมีเส้นแบ่ง เครื่องหมายออกเป็นชั่วโมงกระดาษที่ใช้ มี 3 แบบคือ

1. กระดาษโค้งยาว คือกระดาษโค้งยาวที่จะใส่ช่องล่าง ใช้ตั้งแต่ เมษายน - กันยายน



ภาพประกอบ 10 กระดาษโค้งยาว [24]

2. กระจาดตรง คือกระจาดตรงที่จะใส่ช่องกลาง ใช้ตั้งแต่ กันยายน - ตุลาคม และมีนาคม - เมษายน



ภาพประกอบ 11 กระจาดตรง [24]

3. กระจาดโค้งสั้น คือกระจาดโค้งสั้นที่จะใส่ช่องบน ใช้ตั้งแต่ ตุลาคม - กุมภาพันธ์ การตั้งเส้นเที่ยงวัน ซึ่งเปลี่ยนไปตาม Equation of time และไม่ใช่เวลา 12.00 น. จุดโฟกัสจะเผาไหม้ตรงกลางของเครื่องพอดี้ ก็ต่อเมื่อดวงอาทิตย์ผ่านเมอร์เดียน



ภาพประกอบ 12 กระจาดตรง [24]

ในปี 1919 นักวิจัยคนแรกที่ทำงานวิจัยเกี่ยวกับความยาวนานของแสงแดดคือ คิมบอลล์ ที่แสดงให้เห็นว่าความยาวนานแสงแดดมีความสัมพันธ์อย่างเป็นระบบกับค่าเข้มรังสีอาทิตย์ ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$\overline{H} = \overline{H}_c \left( 0.25 + 0.75 \frac{\overline{S}}{\overline{S}_0} \right) \quad 2.1$$

เมื่อ  $\overline{H}$  คือ รังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน ( $\text{J}/\text{m}^2/\text{day}$ )

$\overline{H}_c$  คือ รังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆ ( $\text{J}/\text{m}^2/\text{day}$ )

$\overline{S}$  คือ ความยาวนานแสงแดดรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (ชั่วโมง)

$\overline{S}_0$  คือ ความยาวนานของวันเฉลี่ยต่อเดือน (ชั่วโมง)

ต่อมาในปี 1924 อังสตรอม ได้ทำการวัดค่ารังสีอาทิตย์และความยาวนานแสงแดดที่เมืองสตอกโฮล์ม ประเทศสวีเดน แล้วนำข้อมูลที่ได้อาวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณทั้งสอง ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$\overline{H} = \overline{H}_c \left( \alpha + (1 - \alpha) \frac{\overline{S}}{\overline{S}_o} \right) \quad 2.2$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ ค่าคงที่เอมไพริคัล หรือ ค่าคงที่เชิงประจักษ์

ในปี 1940 นักวิจัยชื่อ 프리สกอตต์ ได้เสนอแบบจำลองของความสัมพันธ์ระหว่างรังสีรวมกับความยาวนานแสงแดดขึ้นใหม่ โดยใช้ข้อมูลจากการวัดในประเทศออสเตรเลีย โดยแทนที่จะใช้รังสีรวมเทียบกับรังสีในวันที่ ท้องฟ้าปราศจากเมฆ เขาใช้รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกเป็นตัวเปรียบเทียบ เนื่องจากการคำนวณรังสีอาทิตย์โดยใช้แบบจำลองของอังสตรอมจำเป็นต้องรู้ค่ารังสีอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนในวันที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆ  $\overline{H}_c$  ซึ่งต้องทำการคำนวณหาหรือหาจากการคัดเลือกข้อมูลที่ได้จากการวัดซึ่งมีความยุ่งยาก สำหรับผลลัพธ์แสดงในสมการที่ 2.3

$$\frac{\overline{H}}{\overline{H}_o} = 0.25 + 0.54 \frac{\overline{S}}{\overline{S}_o} \quad 2.3$$

เมื่อ  $\overline{H}_o$  คือ รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือน ( $\text{J/m}^2/\text{day}$ )

เนื่องจากสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองในสมการ 2.3 จะแปรค่าไปตามแหล่งที่มาของ ข้อมูลที่ใช้สร้างแบบจำลอง ดังนั้นจึงนิยมเขียนสมการดังกล่าวให้อยู่ในรูปทั่วไปดังนี้

$$\frac{\overline{H}}{\overline{H}_o} = a_1 + b_1 \frac{\overline{S}}{\overline{S}_o} \quad 2.4$$

โดยที่  $a_1$  และ  $b_1$  เป็นสัมประสิทธิ์เอมไพริคัลของแบบจำลองซึ่งนิยมเรียกว่า สัมประสิทธิ์ของอังสตรอม (Angstrom coefficient) และเรียกสมการที่ 2.4 ว่าแบบจำลอง อังสตรอม – 프리สกอตต์ (Angstrom – Prescott model)

ในปี ค.ศ. 2004 J. Almorox และ C. Hontoria ศึกษาการคำนวณค่ารังสีอาทิตย์จากสถานีอุตุนิยมวิทยา 16 สถานี ณ ประเทศสเปน โดยนำสมการของอังสตรอมและเพรสคอตต์มาศึกษาสำหรับสมการถดถอย ดังต่อไปนี้

## 1. สมการเส้นตรง

$$\frac{H}{H_o} = a + b \left( \frac{S}{S_o} \right) \quad 2.5$$

## 2. สมการกำลังสอง

$$\frac{H}{H_o} = a + b \left( \frac{S}{S_o} \right) + c \left( \frac{S}{S_o} \right)^2 \quad 2.6$$

## 3. สมการกำลังสาม

$$\frac{H}{H_o} = a + b \left( \frac{S}{S_o} \right) + c \left( \frac{S}{S_o} \right)^2 + d \left( \frac{S}{S_o} \right)^3 \quad 2.7$$

## 4. สมการลอการิทึม

$$\frac{H}{H_o} = a + b \log \left( \frac{S}{S_o} \right) \quad 2.8$$

## 5. สมการเอกซ์โพเนนเชียล

$$\frac{H}{H_o} = a + b \exp \left( \frac{S}{S_o} \right) \quad 2.9$$

ในปี ค.ศ. 2011 Huashan Li และคณะได้ศึกษาการประมาณค่ารังสีอาทิตย์จาก แบบจำลองของอังสตรอมโดยใช้ความยาวนานแสงแดด สำหรับสถานีอุตุนิยมวิทยา Changdu, Geer, Lasa และ Naqu ประเทศจีน โดยศึกษาในช่วงปี ค.ศ. 1994-2008 เป็นเวลา 15 ปี โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\frac{H}{H_o} = 0.2295 + 0.6443 \left( \frac{S}{S_o} \right) \quad 2.10$$

$$\frac{H}{H_o} = 0.2223 + 0.6529 \left( \frac{S}{S_o} \right) \quad 2.11$$

สำหรับกรณีประเทศไทย เอกซ์เซล เป็นนักวิจัยคนแรกที่ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีอาทิตย์กับความยาวนานแสงแดด โดยใช้ข้อมูลจากการวัดที่ กรุงเทพฯ และจังหวัดเชียงใหม่ ต่อมา กฤษณพงศ์ กีรติกร และกีรติกรและ ศิริประยุกต์ ได้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีอาทิตย์กับความยาวนานแสงแดดจากข้อมูลวัดของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีและสถานีวัดของกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน และได้เสนอสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณทั้งสองของสถานีต่างๆ หลังจากนั้น หิรัญลาภและคณะ ได้นำข้อมูลรังสีอาทิตย์และความยาวนานแสงแดด

จากกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงานมาทำการวิเคราะห์เพิ่มเติม พร้อมทั้งได้เสนอแบบจำลองของความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีอาทิตย์กับ ความยาวนานแสงแดดอีกครั้งหนึ่ง

## 2.2.2 การคำนวณค่ารังสีอาทิตย์จากปริมาณเมฆ

เมฆ เกิดจากการรวมตัวหรือเกาะกลุ่มของไอน้ำ ลอยตัวอยู่ในชั้นบรรยากาศที่เราสามารถมองเห็นได้ เมฆจะเกิดการควบแน่นและตกลงมาเป็นฝน ละอองน้ำ และเกล็ดน้ำแข็ง ไอน้ำที่ควบแน่นเป็นละอองน้ำ (โดยปกติแล้วจะมีขนาด 0.01 mm.) หรือเป็นเกล็ดน้ำแข็ง ซึ่งเมื่อเกาะตัวกันเป็นกลุ่มจะเห็นเป็นก้อนเมฆ ก้อนเมฆนี้สะท้อนคลื่นแสงในแต่ละความยาวคลื่นในช่วงที่ตามองเห็นได้ในระดับที่เท่าๆ กัน จึงทำให้เรามองเห็นก้อนเมฆนั้นเป็นสีขาว แต่ก็สามารถมองเห็นเป็นสีเทาหรือสีดำ ถ้าหากเมฆนั้นมีความหนาแน่นสูงมากจนแสงผ่านไม่ได้ เมื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศพบว่าเมฆเป็นปัจจัยที่สำคัญยิ่งต่อสภาพภูมิอากาศและระบบภูมิอากาศซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของวัฏจักรน้ำจากอากาศสู่พื้นดินของทั้งโลก นอกจากนั้นเมฆยังส่งผลต่อการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนและพลังงานแสงอาทิตย์ระหว่างบรรยากาศ พื้นผิวดิน วัฏจักรของน้ำ และสิ่งมีชีวิต ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของเมฆเพียงเล็กน้อย จึงส่งผลต่อสภาพอากาศมากกว่าก๊าซเรือนกระจก หรือละอองอากาศ และปริมาณของเมฆยังมีผลต่อความเข้มของรังสีอาทิตย์ ซึ่งสามารถคำนวณความเข้มรังสีอาทิตย์ในสภาพท้องฟ้าเมฆได้โดยอาศัยทฤษฎีการถ่ายเทรังสี เมื่อรู้ตำแหน่ง ขนาด และสมบัติทางฟิสิกส์ต่างๆ ของเมฆ [7, 8]

ในปี 1919 นักวิจัยชื่อคิมบอลล์ ได้แสดงให้เห็นว่าค่ารังสีอาทิตย์มีความสัมพันธ์กับปริมาณเมฆ และต่อมาในปี 1956 นักวิจัยชื่อแบลค ได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ระหว่างค่ารังสีอาทิตย์และปริมาณเมฆโดยใช้ข้อมูลจากส่วนต่างๆ ของโลกและได้เสนอแบบจำลองดังสมการที่ 2.12

$$\frac{\overline{H}}{\overline{H}_0} = 0.803 - 0.340\overline{C}_1 - 0.458\overline{C}_1^2 \quad 2.12$$

เมื่อ  $\overline{H}$  คือ รังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน ( $\text{J/m}^2/\text{day}$ )  
 $\overline{H}_0$  คือ รังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆ ( $\text{J/m}^2/\text{day}$ )  
 $\overline{C}_1$  คือ ปริมาณเมฆในช่วงเวลากลางวันเฉลี่ยต่อเดือนเมื่อแบ่งท้องฟ้าเป็น 10 ส่วน โดยให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 1

เบลคได้ทำการคำนวณความเข้มรังสีอาทิตย์ตามสถานี อุตุนิยมวิทยาที่มีการสังเกตการณ์ ปริมาณเมฆทั่วโลก แล้วนำผลที่ได้มาสร้างคอนทัวร์ (contour) ซึ่งแสดงการกระจายตามพื้นที่ของรังสี อาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนทั่วโลก หลังจากนั้นนักวิจัย อีกหลายคนได้ทำการสร้างแบบจำลองซึ่ง แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีอาทิตย์กับ ปริมาณเมฆโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากสถานี อุตุนิยมวิทยาในประเทศต่างๆ สำหรับกรณีประเทศไทย นักวิจัยหลายคนได้สร้างแบบจำลองของ ความสัมพันธ์ในลักษณะดังกล่าว แต่เนื่องจากงานวิจัยเหล่านี้ดำเนินการมานานแล้ว ประกอบกับ สภาพแวดล้อมของประเทศไทย ในช่วง 30 ปี ที่ผ่านมามีเปลี่ยนแปลงไปมาก ดังนั้น เพ็ญพร นิ่มนวล และ ศาสตราจารย์ดร.เสริม จันทน์ฉาย จึงได้ทำการสร้างแบบจำลองของความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสี อาทิตย์กับปริมาณเมฆขึ้น ใหม่โดยใช้ข้อมูลรังสีรวมที่ได้จากเครือข่ายสถานีวัดรังสีอาทิตย์ของกรม พัฒนาพลังงาน ทดแทนและอนุรักษ์พลังงานจำนวน 24 สถานี และปริมาณเมฆซึ่งสังเกตการณ์ที่ สถานีเดียวกัน จำนวน 4 - 8 ปี [7, 8]

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = a_2 + b_2 \bar{C}$$

2.13

ค่า  $a_1$  และ  $b_2$  เป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับแต่ละสถานี

ต่อมาศาสตราจารย์ดร.เสริม จันทน์ฉาย และคณะ ได้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในการ ตรวจสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองดังกล่าว ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แสดงว่าอัตราส่วน ระหว่างรังสีอาทิตย์ต่อรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกกับปริมาณเมฆมีความสัมพันธ์กันมาก มีค่าอยู่ใ้ วง 0.7 - 1.0

### 2.2.3 การคำนวณค่ารังสีอาทิตย์จากอุณหภูมิอากาศ

รังสีอาทิตย์ที่ผ่านบรรยากาศลงมายังพื้นโลกบางส่วนจะถูกองค์ประกอบต่างๆ ของ บรรยากาศดูดกลืน ส่วนที่เหลือจะเดินทางมาถึงพื้นผิวโลกและถูกพื้นผิวโลกดูดกลืน จากนั้นจะ กระเจิงผ่านบรรยากาศและถูกองค์ประกอบของบรรยากาศดูดกลืนอีกครั้งหนึ่ง ก่อนเดินทางออกไปสู่อวกาศภายนอก รังสีอาทิตย์ที่ถูกพื้นผิวโลกดูดกลืนจะทำให้พื้นผิวโลกมีอุณหภูมิ สูงขึ้นและแผ่รังสี อินฟราเรดออกไปสู่บรรยากาศและบางส่วนถูกบรรยากาศดูดกลืนอีก การดูดกลืนรังสีของบรรยากาศ จะทำให้อุณหภูมิของบรรยากาศเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความร้อนที่พื้นผิวโลกยังถ่ายเทไปสู่อากาศโดยการพาความร้อนด้วย จากการถ่ายเทพลังงานดังกล่าวจะเห็นว่าปริมาณของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบ พื้นผิวโลกจะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของอากาศ สิ่งแวดล้อม เนื่องจากอุณหภูมิของอากาศ แวดล้อมมีการวัดที่สถานีอุตุนิยมวิทยาทุกแห่ง

ดังนั้น นักวิจัยจึงได้พยายามใช้ประโยชน์จากข้อมูลอุณหภูมิอากาศร่วมกับข้อมูลของตัวแปรทาง เนื่องมาจากเป็นข้อมูลอุณหภูมิอากาศและตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยาอื่นๆ มีการตรวจวัดอยู่เป็นประจำ งานวิจัยต่างๆ จึงสนใจศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลอุณหภูมิอากาศและตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยาอื่นๆ กับรังสีอาทิตย์เพื่อนำข้อมูลที่มีอยู่ไปใช้อย่างมีประสิทธิภาพอุตุนิยมวิทยาอื่นๆ เพื่อคำนวณค่ารังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเพื่อใช้ในงานด้านการเกษตรต่างๆ เช่น การจำลองแบบการเติบโตของพืช เป็นต้น สุพิต และแวณ คาพเพล ได้เสนอแบบจำลองสำหรับคำนวณค่ารังสีรวมรายวันจากค่าสูงสุดและต่ำสุดของอุณหภูมิอากาศแวดล้อมรายวันร่วมกับค่าปริมาณเมฆรายวัน ซึ่งสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้ [7, 8]

$$H = H_o \left[ a_3 (T_{\max} - T_{\min})^{1/2} + b_3 (1 - c)^{1/2} \right] + c_3 \quad 2.14$$

|       |            |                                                                               |
|-------|------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| เมื่อ | $H$        | คือ รังสีรวมรายวัน ( $\text{J/m}^2/\text{day}$ )                              |
|       | $H_o$      | คือ รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวัน ( $\text{J/m}^2/\text{day}$ )            |
|       | $T_{\max}$ | คือ ค่าสูงสุดของอุณหภูมิอากาศแวดล้อมรายวัน (องศาเซลเซียส)                     |
|       | $T_{\min}$ | คือ ค่าต่ำสุดของอุณหภูมิอากาศแวดล้อมรายวัน (องศาเซลเซียส)                     |
|       | $C$        | คือ ปริมาณเมฆรายวันเมื่อแบ่งท้องฟ้าเป็น 10 ส่วน โดยให้ค่ามีค่าระหว่าง 0 ถึง 1 |

$a_3, b_3$  และ  $c_3$  คือ สัมประสิทธิ์เอมไพริคัลของแบบจำลองซึ่งมีค่าขึ้นกับสถานีอุตุนิยมวิทยาที่นำข้อมูลมาใช้ในการสร้างแบบจำลอง

บริสโทว์และแคมเบลล์ ได้เสนอแบบจำลองสำหรับ คำนวณค่ารังสีรวมรายวันจากค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศสูงสุดและต่ำสุดรายวัน ตามสมการ

$$H = a_4 H_o \left[ 1 - \exp \left( -b_4 (\Delta t)^{C_4} \right) \right] \quad 2.15$$

|        |                                                 |      |
|--------|-------------------------------------------------|------|
| โดยที่ | $\Delta t = T_{\max} - T_{\min}$                | 2.16 |
| เมื่อ  | $a_4, b_4$ และ $C_4$ เป็นสัมประสิทธิ์เอมไพริคัล |      |

## 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของบรรยากาศต่อรังสีอาทิตย์

รังสีดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก เมื่อเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศลงมายังพื้นโลกของเรา จะถูกลดทอนความเข้ม ในรูปของการกระเจิงและดูดกลืนโดยเมฆและองค์ประกอบต่างๆ ในบรรยากาศ เช่น ฝุ่นละออง โอโซน ไอน้ำ และโมเลกุลก๊าซต่างๆ ของอากาศ การลดรังสีดวงอาทิตย์ (Attenuation of solar radiation) การสูญเสียพลังงานการแผ่รังสีซึ่งเดินทางผ่านบรรยากาศของโลกเข้ามา การสูญเสียนี้เกิดขึ้นเนื่องจากการกระจาย (Scattering) รังสีโดยโมเลกุลของอากาศ โดยการเลือกดูดกลืนรังสีบางอย่าง (Selective absorption) ของโมเลกุลบางชนิด และโดยการดูดกลืนและกระจายของอนุภาคในบรรยากาศ (Aerosols) ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการลดลงของรังสีอาทิตย์จากบรรยากาศต่างๆ ดังนี้

### 2.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลอากาศต่อการลดลงของรังสีอาทิตย์

การลดลงของรังสีอาทิตย์เนื่องจากโมเลกุลอากาศจะเป็นการกระเจิงโดยทฤษฎีการกระเจิงรังสีอาทิตย์ของโมเลกุลอากาศถูกนำเสนอโดย ลอร์ดเรย์ลีห์ (Lord Rayleigh) กล่าวคือเมื่อรังสีอาทิตย์ที่ผ่านบรรยากาศมายังพื้นผิวโลกจะถูกโมเลกุลของอากาศกระเจิงโดยบางส่วนจะเดินทางกลับขึ้นไปในอวกาศและบางส่วนจะลงมาสู่พื้นผิวโลกซึ่งรังสีอาทิตย์ที่ถูกการกระเจิงจะเรียกว่า รังสีกระเจิง ซึ่งลอร์ดเรย์ลีห์ได้นำเสนอทฤษฎีเกี่ยวกับคำนวณการกระเจิงแสงของวัตถุทรงกลมเล็กๆ ซึ่งสามารถนำมาใช้ได้กับกรณีของรังสีอาทิตย์ที่ถูกกระเจิงโดยโมเลกุลของก๊าซต่างๆ ในบรรยากาศโลกได้ เพื่อเป็นเกียรติกับลอร์ดเรย์ลีห์ จึงตั้งชื่อเรียกการกระเจิงแสงโดยโมเลกุลอากาศนี้ว่าการกระเจิงแบบเรย์ลีห์ (Rayleigh scattering) เนื่องจากการกระเจิงรังสีอาทิตย์ของโมเลกุลอากาศ ทำให้รังสีอาทิตย์ที่มาถึงพื้นผิวโลกลดลง ดังนั้นจึงบอกสมบัติของโมเลกุลอากาศซึ่งลดทอนรังสีอาทิตย์จากการกระเจิงในรูปของความถี่เชิงแสง จากทฤษฎีของลอร์ดเรย์ลีห์ ความถี่เชิงแสงของโมเลกุลอากาศที่เป็นผลมาจากการกระเจิงรังสีอาทิตย์จะมีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่นของรังสีอาทิตย์ [7, 26] ดังแสดงในสมการที่ 2.17

$$\tau'_{R\lambda} = 0.008735\lambda^{-4.08} \quad (2.17)$$

$\tau'_{R\lambda}$  คือ ความถี่เชิงแสงที่เกิดจากการกระเจิงรังสีอาทิตย์ของโมเลกุลอากาศ (-)  
 $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีอาทิตย์ ( $\mu m$ )

ต่อมา เลคนอร์ ได้เสนอการคำนวณการลดลงของรังสีอาทิตย์จากการกระเจิง โดยโมเลกุลอากาศ ที่นอกจากจะขึ้นกับความถี่เชิงแสงแล้วยังขึ้นกับมวลอากาศอีกด้วย ซึ่งแสดง ความสัมพันธ์ ในรูปของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์ (Transmittance) ได้แสดงในสมการที่ 2.18

$$\tau_{R\lambda} = \exp(0.008735\lambda^{-4.08}m_a) \quad (2.18)$$

$\tau_{R\lambda}$  คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์ที่เกิดจากการกระเจิงโดยโมเลกุลอากาศ (-)  
 $m_a$  คือ มวลอากาศ (-)

### 2.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างไอน้ำต่อการลดลงของรังสีอาทิตย์

ไอน้ำในบรรยากาศมีได้ทั้ง 3 สถานะ ได้แก่ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ส่วนใหญ่จะอยู่ในบรรยากาศตั้งแต่พื้นผิวโลกจนถึงที่ระดับความสูงประมาณ 2 km การลดทอนรังสีอาทิตย์เนื่องจากไอน้ำส่วนมากจะเกิดจากการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นรังสีอินฟราเรด โดยที่เมื่อรังสีอาทิตย์เดินทางผ่านบรรยากาศจะถูกไอน้ำดูดกลืนและกระเจิง ทำให้รังสีอาทิตย์ที่มาถึงพื้นโลกมีปริมาณลดลงโดยการลดลงของรังสีอาทิตย์ซึ่งเกิดจากการกระเจิงของโมเลกุลไอน้ำมีน้อยมากเมื่อเทียบการดูดกลืน ทำให้การคำนวณรังสีอาทิตย์ที่ผ่านบรรยากาศโดยทั่วไปจะพิจารณาเฉพาะผลจากการดูดกลืนเท่านั้น โดยทั่วไปไอน้ำจะดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ในแถบความยาวคลื่นโดยส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นรังสีอินฟราเรด ปริมาณของรังสีอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืนจะขึ้นกับปริมาณ ไอน้ำในบรรยากาศและมวลอากาศที่รังสีอาทิตย์เดินทางผ่าน ทั้งนี้สมการหาปริมาณไอน้ำจากข้อมูลอุตุนิยมวิทยาผิวพื้นมีหลายสมการ ขึ้นอยู่กับพื้นที่นั้นๆ สำหรับกรณีในประเทศไทย ศาสตราจารย์ดร.เสริม จันทรฉาย และคณะ ได้ศึกษาวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไอน้ำที่ได้จากข้อมูลตรวจอากาศชั้นบนกับข้อมูลอุณหภูมิตั้งแต่ความชื้นสัมพัทธ์ และความดันไอน้ำอิ่มตัว [7, 26] ซึ่งจากการศึกษาดังกล่าวได้ผลการจำลองในรูปสมการดังนี้

$$w = 0.8933 \exp\left(\frac{0.1715rh \cdot p_{vs}}{T'}\right) \quad (2.19)$$

เมื่อ  $w$  คือ ปริมาณไอน้ำ (cm)  
 $rh$  คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศแวดล้อม (%)  
 $T'$  คือ อุณหภูมิของอากาศแวดล้อม (K)  
 $p_{vs}$  คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว (mbar)

การคำนวณหาปริมาณไอน้ำในบรรยากาศครอบคลุมพื้นที่ประเทศ ประเทศไทยโดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิตั้งแต่ความชื้นสัมพัทธ์ที่ได้จากสถานีอุตุนิยมวิทยาในประเทศไทย จากนั้นจะนำปริมาณไอน้ำ

ดังกล่าวมาคำนวณเป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของโอโซนในช่วงความยาวคลื่นดาวเทียม และในช่วงความยาวคลื่นกว้างดังแสดงในสมการต่อไปนี้

- ช่วงความยาวคลื่นดาวเทียม

$$\alpha' = 1 - \frac{\int_{0.55}^{0.9} I_{0\lambda} \tau_{o\lambda} d\lambda}{\int_{0.55}^{0.9} I_{0\lambda} d\lambda} \quad (2.20)$$

- ช่วงความยาวคลื่นกว้าง

$$\alpha = 1 - \frac{\int_{0.3}^{3.0} I_{0\lambda} \tau_{o\lambda} d\lambda}{\int_{0.3}^{3.0} I_{0\lambda} d\lambda} \quad (2.21)$$

เมื่อ

$\alpha'$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของโอโซนในช่วงความยาวคลื่นดาวเทียม (-)

$\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของโอโซนในช่วงความยาวคลื่นกว้าง (-)

$I_{0\lambda}$  คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก ( $\text{W/m}^2\text{-}\mu\text{m}$ )

$\tau_{o\lambda}$  คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ (Spectral transmittance) ของโอโซน (-)

### 2.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างโอโซนต่อการลดลงของรังสีอาทิตย์

การลดลงของรังสีอาทิตย์เนื่องจากโอโซนเป็นการดูดกลืนโดยส่วนใหญ่ โอโซนมีสูตรทางเคมีว่า  $\text{O}_3$  โดยที่โอโซนในชั้นบรรยากาศส่วนใหญ่จะอยู่ในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ และมีอยู่เล็กน้อยในบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ ซึ่งโอโซนในบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์นี้จะเกิดจากโรงงานอุตสาหกรรม เกิดจากฟ้าผ่า และโอโซนในชั้นสตราโตสเฟียร์จะเกิดจากปฏิกิริยาโฟโตดิสโซซิเอชัน (Photodissociation) ของโมเลกุลของออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) พิจารณาในด้านโครงสร้างของโอโซนแล้วทำให้ทราบว่าโอโซนสามารถดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่มากที่สุดคือแถบฮาร์ตลีย์ (Hartley band) อยู่ในช่วงความยาวคลื่น  $0.22 - 0.295 \mu\text{m}$  และนอกจากนี้ยังมีแถบอื่นๆ ที่สามารถดูดกลืนรังสีอาทิตย์ได้เล็กน้อย ได้แก่ แถบฮักกินส์ (Huggins band) อยู่ในช่วงความยาวคลื่น  $0.32 - 0.36 \mu\text{m}$  และแถบแชปปุสซ์ (Chappuis band) อยู่ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่  $0.45 - 0.65 \mu\text{m}$  จากแถบการดูดกลืนเหล่านี้ทำให้อัตราการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ตบี ( $0.28 - 0.32 \mu\text{m}$ ) ส่วนใหญ่ถูกดูดกลืนโดยโอโซนและในช่วงความยาวคลื่นแสงสว่างถูกดูดกลืนโดยโอโซนเล็กน้อย [7, 8, 26]

### 2.3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเมฆต่อการลดลงของรังสีอาทิตย์

การลดลงของรังสีอาทิตย์เนื่องจากเมฆจะเป็นได้ทั้งการกระเจิงและการดูดกลืนเมฆจะโดยเมฆ จะดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ต และแสงสว่างน้อยมากและดูดกลืนมากในช่วงความยาวคลื่นรังสีอินฟราเรด ซึ่งเมฆ คือประกอบด้วยหยดน้ำ เล็กๆ (Water droplet) หรือ ผลึกน้ำแข็ง (Ice crystal) หรือทั้ง 2 อย่างผสมกัน เมฆมีความสูงได้ เป็น 3 ระดับ ได้แก่ เมฆชั้นต่ำ เมฆชั้นกลาง และเมฆชั้นสูง โดยเมฆชั้นต่ำจะอยู่ที่ความสูงน้อยกว่า 2 km จากพื้นผิวโลก ส่วนเมฆชั้นกลางจะอยู่ที่ความสูง 2 - 7 km สำหรับเมฆชั้นสูงจะอยู่สูงกว่า 7 กิโลเมตรขึ้นไป นอกจากนี้ยังมีเมฆที่มีโครงสร้างในแนวดิ่ง หรือเมฆคิวมูโลนิมบัส (Cumulonimbus) [26]

### 2.3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างฝุ่นละอองในอากาศต่อการลดลงของรังสีอาทิตย์

การลดลงของรังสีอาทิตย์เนื่องจากฝุ่นละอองจะเกิดได้ทั้งการกระเจิงและการดูดกลืนโดยทั่วไป บรรยากาศจะมีฝุ่นละอองอยู่เสมอ เมื่อรังสีอาทิตย์เดินทางผ่านจะถูกฝุ่นละอองกระเจิงทำให้เกิดรังสีกระจาย และบางส่วนจะถูกฝุ่นละอองดูดกลืน สัดส่วนของการกระเจิงและการดูดกลืนจะขึ้นกับชนิดของฝุ่นละออง เช่น ฝุ่นละอองที่เกิดจากการสันดาปของเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งมีคาร์บอนดำ (Black carbon) เป็นองค์ประกอบจะดูดกลืนรังสีอาทิตย์ได้ถึง 20% ส่วนฝุ่นละอองจากทะเลทรายจะดูดกลืนรังสีอาทิตย์น้อยกว่า 5% เนื่องจากความสามารถในการลดทอนรังสีอาทิตย์ของฝุ่นละอองสามารถเกิดได้ทั้งจาก กระบวนการดูดกลืนและการกระเจิง จึงทำให้การแยกสัดส่วนของรังสีอาทิตย์ที่ลดลงจากแต่ละกระบวนการนั้นทำได้ยาก ด้วยเหตุนี้ นักวิจัยอย่างอังสตรอม (Angstrom) จึงได้คิดสัมประสิทธิ์ความขุ่นมัวของบรรยากาศของอังสตรอม ( $\beta$ ) ขึ้น โดยค่า  $\beta$  จะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของปริมาณฝุ่นละอองหรือจำนวนอนุภาคของฝุ่นละอองต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของอากาศ กล่าวคือ ถ้า  $\beta$  มีค่ามาก ความหนาแน่นของฝุ่นละอองในบรรยากาศจะมีค่ามากด้วย ทั้งนี้วิธีการหาสัมประสิทธิ์ความขุ่นมัวของบรรยากาศของอังสตรอมสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การใช้เซ็นโฟโตมิเตอร์ (Sunphoto meter) วัดสเปกตรัมรังสีตรงของดวงอาทิตย์ในสภาพที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆ การหาค่าสัมประสิทธิ์ความขุ่นมัวของอังสตรอมจากความเข้มรังสีตรงในช่วงความยาว คลื่นกว้าง และการหาค่าสัมประสิทธิ์ความขุ่นมัวของอังสตรอมจากข้อมูลทัศนวิสัย ทั้งนี้ฝุ่นละอองมักทำให้อากาศขุ่นมัวซึ่งมีผลต่อทัศนวิสัย กล่าวคือ ถ้าบรรยากาศขุ่นมัวมากทัศนวิสัยก็จะมีค่าต่ำ แต่ในทางกลับกันถ้าอากาศบริสุทธิ์ซึ่งหมายถึงมีฝุ่นละอองน้อยทัศนวิสัยก็จะมีค่ามาก หรือสามารถมองเห็นวัตถุที่อยู่ไกลๆ ได้ ดังนั้นนักวิจัยหลายๆ ท่านจึงได้เสนอแบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความขุ่นมัวของอังสตรอมกับค่าทัศนวิสัย ส่วนกรณีประเทศไทย ศาสตราจารย์ดร.เสริม จันทน์ฉาย และคณะ ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความขุ่นมัวของอังสตรอมกับทัศนวิสัย โดยผลจากการศึกษาพบว่าปริมาณทั้งสองมีความสัมพันธ์กันตามสมการ ดังนี้ [7, 26]

$$\beta = 0.589 - 0.068vis + 0.0019vis^2 \quad (2.20)$$

เมื่อ  $\beta$  คือ สัมประสิทธิ์ความขุ่นมัวของออสโตรอม  
 $vis$  คือ ทักษณวิสัยของการมองเห็น (km)

ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของรังสีอาทิตย์จากฝุ่นละออง ( $D_{aer}$ ) เกิดจากกระบวนการ หนึ่งของการส่งผ่านรังสีที่เกิดจากรูปทรงของฝุ่นละอองในบรรยากาศ โดยที่รูปทรงที่มีความสมมาตร สูงจะมีการกระเจิงได้ดี ส่วนรูปทรงที่มีความขรุขระสูงจะทำให้เกิดการดูดกลืนได้ดี สำหรับองค์ประกอบของบรรยากาศทั่วไปจะมีปริมาณฝุ่นละอองที่มีลักษณะรูปทรงต่างๆ กัน รวมกันอยู่จำนวนมาก เมื่อนำผลจากการกระเจิงและการดูดกลืนเนื่องจากฝุ่นละอองนี้มารวมกันจะได้เป็นการลดทอนของรังสีอาทิตย์เนื่องจากฝุ่นละออง ซึ่งมีสมการดังนี้ [27]

$$D_{aer} = D_{ab} + D_{sc} \quad (2.21)$$

เมื่อ  $D_{aer}$  คือสัมประสิทธิ์การลดลงของรังสีอาทิตย์เนื่องจากฝุ่นละออง  
 $D_{ab}$  คือสัดส่วนของรังสีอาทิตย์ที่ลดลงเมื่อถูกดูดกลืนโดยฝุ่นละออง  
 $D_{sc}$  คือสัดส่วนของรังสีอาทิตย์ที่ลดลงเมื่อถูกกระเจิงโดยฝุ่นละออง

การหาสัดส่วนของรังสีอาทิตย์ที่ลดลงเมื่อถูกดูดกลืนโดยฝุ่นละออง ( $D_{ab}$ ) และสัดส่วนรังสีอาทิตย์ที่ลดลงเมื่อถูกกระเจิงโดยฝุ่นละออง ( $D_{sc}$ ) โดยใช้ข้อมูล Single scattering albedo ที่ได้จากการถ่ายภาพการวัดฝุ่นละอองขององค์การนาซา (NASA) มาเป็นอินพุตสำหรับการคำนวณจากนั้นจะนำค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของรังสีอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืนและกระเจิงที่ได้ มาคำนวณเป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนและการกระเจิงรังสีอาทิตย์ของฝุ่นละออง เพื่อนำไปใช้ในแบบจำลองสำหรับคำนวณค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จากข้อมูลดาวเทียม ตามสมการที่ 2.22 – 2.23

$$\rho_{aer} = D_{sc} D_{aer} \quad (2.22)$$

$$\alpha_{aer} = D_{ab} D_{aer} \quad (2.23)$$

เมื่อ  $D_{sc}$  คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิงรังสีอาทิตย์ของฝุ่นละออง  
 $\alpha_{sc}$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของฝุ่นละออง

สำหรับฝุ่นละอองประเภทที่มีการดูดกลืนแสงมากจะเป็นฝุ่นละอองที่เรียกว่า “Black carbon” สาเหตุการเกิดส่วนหนึ่งมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ โดยหากมีองค์ประกอบของ Black carbon ในบรรยากาศมากจะทำให้เกิดการลดทอนแสงจากฝุ่นละอองโดยการดูดกลืนเพิ่มขึ้น [26]

## 2.4 ทฤษฎีฝุ่นละอองในบรรยากาศ

ฝุ่นละออง เป็นสารที่มีความหลากหลายทางด้านกายภาพ และองค์ประกอบอาจมีสภาพเป็นของแข็งหรือของเหลว ฝุ่นละอองที่มีอยู่ในบรรยากาศรอบๆ ตัวเรามีขนาดตั้งแต่  $0.002 \mu\text{m}$  (เป็นกลุ่มของโมเลกุลที่มองด้วยตาเปล่าไม่เห็นต้องใช้กล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน) ไปจนถึงฝุ่นที่ขนาดใหญ่กว่า  $500 \mu\text{m}$  (ฝุ่นที่มองเห็นด้วยตาเปล่ามีขนาดตั้งแต่  $50 \mu\text{m}$  ขึ้นไป) ฝุ่นละอองที่แขวนลอยอยู่ในอากาศได้นานจะเป็นฝุ่นละอองขนาดเล็ก (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่ำกว่า  $10 \mu\text{m}$ ) เนื่องจากมีความเร็วในการตกตัวต่ำ และจะแขวนลอยอยู่ในอากาศได้นานมากขึ้น หากมีแรงกระทำจากภายนอกเข้ามามีส่วนเกี่ยวข้อง เช่น การไหลเวียน ของอากาศ กระแสลม เป็นต้น ฝุ่นละอองที่มีขนาดใหญ่ (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใหญ่กว่า  $100 \mu\text{m}$ ) อาจแขวนลอยอยู่ในบรรยากาศได้เพียง 2-3 นาที แต่ฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็ก โดยเฉพาะขนาดเล็กกว่า  $0.5 \mu\text{m}$  อาจแขวนลอยอยู่ในอากาศได้นานเป็นปี

ฝุ่นละอองในบรรยากาศอาจแยกได้เป็นฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นและแพร่กระจายสู่บรรยากาศจากแหล่งกำเนิดโดยตรงและฝุ่นละอองซึ่งเกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาต่างๆ ในบรรยากาศ เช่นการรวมตัวด้วยปฏิกิริยาทางฟิสิกส์ หรือปฏิกิริยาทางเคมี หรือปฏิกิริยาเคมีแสง (Photochemical reaction) ฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะมีชื่อเรียกต่างกันไปตามลักษณะการรวมตัวฝุ่นละออง เช่น คิวบิก หมอกน้ำค้าง เป็นต้น ฝุ่นละอองอาจเกิดจากธรรมชาติ เช่น ฝุ่นดิน ทราย หรือเกิดจากควันดำจากท่อไอเสียรถยนต์การจราจร และการอุตสาหกรรม ฝุ่นที่ถูกสูดเข้าไปในระบบทางเดินหายใจ ทำให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพ รบกวนการมองเห็น และทำให้สิ่งต่างๆ สกปรกเสียหายได้ในบริเวณที่ปกอาศัย ปริมาณฝุ่นละออง 30% เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ส่วนบริเวณที่อยู่อาศัยใกล้ถนนฝุ่นละออง 70 - 90% เกิดจากการกระทำของมนุษย์และพบว่าฝุ่นละอองมีสารตะกั่วและสารประกอบโบไมด์สูงกว่าบริเวณนอกเมือง อันเนื่องมาจากมลพิษที่เกิดจากยานพาหนะ ฝุ่นละอองเมื่อแยกตามขนาด พบว่า 60% โดยประมาณ จะเป็นฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า  $10 \mu\text{m}$  ฝุ่นประเภทนี้เกิดจากรถประจำทางและรถบรรทุกที่ใช้เครื่องยนต์ดีเซลบางส่วนมาจากโรงงานอุตสาหกรรมส่วนมากจะพบอยู่ทั่วไปในเขตเมืองเขตอุตสาหกรรม และเขตกึ่งชนบท หากพบในปริมาณที่สูงจะมีผลต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนเนื่องจากมีขนาดเล็กพอที่จะเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจส่วนล่างและถูกมอดของมนุษย์ได้เป็นผลให้เกิดโรคทางเดินหายใจโรคปอดต่างๆ เกิดการระคายเคืองและทำลายเยื่อหุ้มปอด หากได้รับในปริมาณมากและเป็นเวลานานจะเกิดการสะสม ทำให้เกิดพังผืดและเป็นแผลได้ ทำให้การทำงานของปอดลดลง ความรุนแรงขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของฝุ่นละอองนั้น ส่วนฝุ่นขนาดใหญ่อีกประมาณ 40% ที่

เหลือเกิดจากการก่อสร้างและการฟุ้งกระจายของฝุ่นจากพื้นที่ว่างเปล่า ฝุ่นประเภทนี้ไม่มีผลต่อสุขภาพอนามัยมากนักเพียงแต่จะก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อทางเดินหายใจส่วนต้น และอาจเป็นเพียงการรบกวนและก่อให้เกิดความรำคาญเท่านั้น ประเทศไทยได้กำหนดมาตรฐานฝุ่นละอองในบรรยากาศไว้ 3 ประเภท คือ ค่าเฉลี่ยฝุ่นละอองรวม หรือ TSP โดยกำหนดให้ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมง ต้องไม่เกิน  $330 \mu\text{g} / \text{m}^3$  และค่าเฉลี่ยใน 1 ปี ต้องไม่เกิน  $100 \mu\text{g} / \text{m}^3$  ส่วนค่าเฉลี่ยฝุ่น PM10 ใน 24 ชั่วโมง ต้องไม่เกิน  $120 \mu\text{g} / \text{m}^3$  และใน 1 ปี ต้องไม่เกิน  $50 \mu\text{g} / \text{m}^3$  และค่าเฉลี่ยฝุ่น PM2.5 ใน 24 ชั่วโมง ต้องไม่เกิน  $50 \mu\text{g} / \text{m}^3$  และใน 1 ปี ต้องไม่เกิน  $25 \mu\text{g} / \text{m}^3$  [28, 29]

#### 2.4.1 แหล่งกำเนิดฝุ่นละออง

แหล่งกำเนิดฝุ่นละอองในบรรยากาศ โดยทั่วไปจะแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. ฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ (Natural Particle) ซึ่งเกิดจากกระแสลมที่พัดผ่านตามธรรมชาติ ทำให้เกิดฝุ่นได้แก่ ดิน ทราย หิน ละอองไอน้ำ เขม่าควันจากไฟป่า และฝุ่นเกลือจากทะเล เป็นต้น

2. ฝุ่นละอองที่เกิดจากกิจกรรมที่มนุษย์สร้างขึ้น (Man made Particle) ได้แก่ ฝุ่นจากการคมนาคมขนส่งและการจราจร เช่น ฝุ่นดินทรายที่ฟุ้งกระจายในถนนขณะที่รถยนต์วิ่งผ่านฝุ่นดินทรายที่หล่นจากการบรรทุกขนส่งการกองวัสดุสิ่งของบนทางเท้า หรือบนเส้นทางการจราจร รถบรรทุกหิน ดิน ทราย ซีเมนต์หรือวัสดุที่ทำให้เกิดฝุ่น หรือดินโคลนที่ติดอยู่ที่ล้อรถ ขณะวิ่งจะมีฝุ่นตกอยู่บนถนน แล้วกระจายตัวอยู่ในอากาศ ไอเสียจากรถยนต์จากเครื่องยนต์ดีเซลที่ปล่อยเขม่า ฝุ่น ควันดำออกมา ถนนที่สกปรก มีดินทรายตกค้างอยู่มาก หรือมีกองวัสดุข้างถนนเมื่อรถวิ่งผ่านจะทำให้เกิดฝุ่นปลิวอยู่ในอากาศ การก่อสร้างถนนใหม่หรือการปรับปรุงผิวจราจรทำให้เกิดฝุ่นมาก และฝุ่นที่เกิดจากยางรถยนต์และผ้าเบรก ฝุ่นจากการก่อสร้าง เช่น ฝุ่นจากการสร้างถนน/อาคาร การปรับปรุงผิวการจราจร การรื้อถอนอาคารและสิ่งก่อสร้างต่างๆ เป็นต้นผลกระทบของฝุ่นละอองต่อสภาพบรรยากาศทั่วไป

ฝุ่นละอองจะลดความสามารถในการมองเห็น เนื่องจากฝุ่นละอองในบรรยากาศทั้งที่เป็นของแข็ง และของเหลวสามารถดูดซับและหักเหแสงได้ ทำให้ทัศนวิสัยในการมองเห็นเสื่อมลงทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขนาด ความหนาแน่น และองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองนั้น ผลกระทบของฝุ่นละอองต่อวัตถุและสิ่งก่อสร้างฝุ่นละอองในบรรยากาศสามารถทำอันตรายต่อวัตถุและสิ่งก่อสร้างได้ เช่น การสึกกร่อนของโลหะ การทำลายผิวหน้าของสิ่งก่อสร้าง หินอ่อน หรือวัตถุอื่นๆ เช่น รั้วเหล็ก หลังคาสังกะสีรูปปั้น การเสื่อมคุณภาพของผลงานทางศิลปะ ความสกปรกของวัตถุ เป็นต้น ผลกระทบของฝุ่นละอองต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ฝุ่นละอองที่มีขนาดใหญ่ก่อให้เกิดปัญหาหาลพิษหรือเหตุเดือดร้อนรำคาญ ส่วนฝุ่นละอองที่สามารถเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจของมนุษย์ได้มีขนาดเล็กกว่า  $10 \mu\text{m}$  ฝุ่นละอองขนาดเล็กเหล่านี้ เมื่อเข้าสู่ระบบทางเดินหายใจ จะเกาะตัวหรือตกตัวได้ในส่วนต่างๆ

ของระบบทางเดินหายใจ ก่อให้เกิดการระคายเคืองและทำลายเนื้อเยื่อของอวัยวะนั้นๆ เช่นเนื้อเยื่อปอด ซึ่งหากได้รับในปริมาณมากหรือในเวลานาน จะสามารถสะสมในเนื้อเยื่อปอด เกิดเป็นพังผืดหรือแผลขึ้นได้และทำให้การทำงานของปอดเสื่อมประสิทธิภาพลงทำให้หลอดลมอักเสบ เกิดหอบหืด ฤๅลมโป่งพอง และโอกาสเกิดโรคระบบทางเดินหายใจเนื่องจากติดเชื้อเพิ่มขึ้นได้ [30, 31]

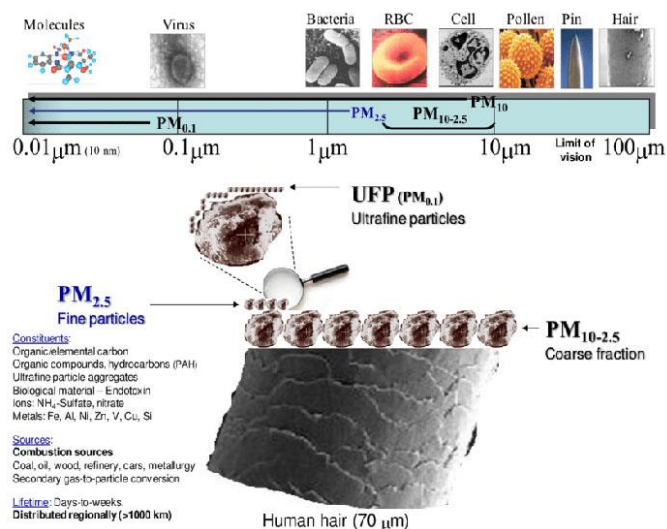
#### 2.4.2 ประเภทฝุ่นละอองในอากาศ

1. ฝุ่นปฐมภูมิ (Primary Emission Particulate Matter) เกิดจากการปล่อยของแหล่งกำเนิดโดยตรง เช่น ฝุ่นจากถนน ฝุ่นเกล็ดจากทะเล ฝุ่นจากกระแสนลม ที่พัดผ่าน ชี้นำ เหมะควันไฟ

2. ฝุ่นทุติยภูมิ (Secondary Emission Particulate Matter) เกิดจากปฏิกิริยาต่างๆ ในบรรยากาศหลังจากที่ฝุ่นถูกปล่อยออกจากแหล่งกำเนิดได้ระยะหนึ่ง ฝุ่นประเภทนี้อาจเป็นอนุภาคใหม่หรือเป็นอนุภาคเดิมที่มีองค์ประกอบเพิ่มขึ้น สารที่เป็นองค์ประกอบหลักคือ ซัลเฟตไนเตรทและคาร์บอนอินทรีย์ โดยซัลเฟตและไนเตรทในบรรยากาศเกือบทั้งหมด เป็น Secondary Emission โดยมีก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์และไนโตรเจนไดออกไซด์เป็นสารเริ่มต้นปฏิกิริยาของฝุ่นทุติยภูมิกล่าวคือ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์เมื่อถูกปล่อยสู่บรรยากาศจะถูกออกซิไดซ์เป็นกรดซัลฟูริก ทำให้เริ่มจับตัวเป็นฝุ่นขนาดเล็กจากกระบวนการ Nucleation และเพิ่มขนาดเม็ดฝุ่นจากกระบวนการ Coagulation และ Condensation ปฏิกิริยาต่างๆ ทั้งในวัฏภาคก๊าซและในกลุ่มเมฆล้วนเป็นส่วนสำคัญ ที่ทำให้ซัลเฟตจับตัวเป็นเม็ดฝุ่นใหม่และยังมีส่วนทำให้สารอินทรีย์จับกันเป็นเม็ดฝุ่นใหม่ ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อระดับของการจับกันเป็นเม็ดฝุ่นใหม่ ได้แก่ ปริมาณของ Precursor สภาพบรรยากาศ และปฏิกิริยาของ Precursor กับอนุภาคฝุ่นที่มีอยู่ในกลุ่มเมฆหรือละอองหมอก [28]

ทั้งนี้แหล่งกำเนิดฝุ่นทุติยภูมิเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงทำให้เกิดฝุ่นควัน การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลจากโรงไฟฟ้าโรงงานอุตสาหกรรม การก่อสร้างการเผาขยะมูลฝอย และการเผาในที่โล่ง PM2.5 สามารถลอยอยู่ในอากาศได้เป็นวันถึงหลายสัปดาห์และลอยไปไกลจากแหล่งกำเนิดได้ถึง 100 – 1,000 km ซึ่งขึ้นอยู่กับ ปัจจัยที่มีผลต่อระยะทางและเวลา ได้แก่ 1. ความเร็วลม 2. ความกดอากาศ 3. ความชื้น 4. สภาพอากาศ 5. แหล่งกำเนิดฝุ่นละออง และ 6. ขนาดของฝุ่น [29]

ภาพประกอบ 13 แสดงการเปรียบเทียบฝุ่นขนาดต่างๆ



ภาพประกอบ 13 การเปรียบเทียบฝุ่นขนาดต่างๆ [32]

#### 2.4.3 ผลกระทบของฝุ่นละอองในอากาศ

มลพิษทางอากาศมีผลกระทบต่อมนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อม สำหรับผลกระทบจากอนุภาคฝุ่นละอองในอากาศ สามารถสรุปเป็นประเด็นได้ดังนี้

1. ผลกระทบของอนุภาคฝุ่นในอากาศที่มีต่อสุขภาพ ความรุนแรงของผลกระทบจะขึ้นอยู่กับปริมาณและระยะเวลาที่สัมผัส หากมลพิษอนุภาคฝุ่นเข้าไปสะสมในร่างกายในปริมาณที่พอจะทำให้ร่างกายแสดงอาการเป็นพิษออกมาในรูปการเจ็บป่วยแบบต่างๆ เช่น ทำให้เกิดอาการระคายเคืองตา หากหายใจเอาอนุภาคฝุ่นเข้าไปในระบบทางเดินหายใจ อนุภาคขนาดใหญ่กว่า  $15\text{ }\mu\text{m}$  จะถูกดักจับบริเวณระบบทางเดินหายใจส่วนต้น ในส่วนของจมูกและลำคอ ทำให้เกิดการระคายเคือง แสบจมูก ไอ จาม มีเสมหะ ซึ่งแสดงว่าร่างกายกำลังขับออกมา ส่วนอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กกว่า  $10\text{ }\mu\text{m}$  หรือฝุ่น  $\text{PM}_{10}$  สามารถแทรกตัวลึกถึงระบบทางเดินหายใจส่วนล่างเข้าไปในเนื้อเยื่อปอด ทำให้เกิดการสะสมของฝุ่นในถุงลมปอด และสารพิษที่เกาะบนฝุ่นจะทำปฏิกิริยากับเซลล์ส่งผลให้การทำงานของปอดเสื่อมลง กลุ่มเสี่ยงที่ได้รับผลกระทบจากอนุภาคฝุ่นในอากาศ ได้แก่ เด็ก ผู้สูงอายุ และผู้มีโรคประจำตัวเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจ เช่น โรคปอด โรคหืด ปริมาณฝุ่นในอากาศมีความสัมพันธ์กับคุณภาพอากาศและผลกระทบต่อสุขภาพ เช่น เมื่อปริมาณฝุ่น  $\text{PM}_{10}$  ในอากาศอยู่ในระดับต่ำคุณภาพอากาศ (AQI) จะอยู่ในเกณฑ์คุณภาพดี และไม่มีผลกระทบต่อสุขภาพ แต่เมื่อความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศ รวมถึงปริมาณฝุ่น  $\text{PM}_{10}$  เพิ่มขึ้น ดัชนีคุณภาพอากาศก็เพิ่มตามด้วย

2. ผลกระทบของอนุภาคฝุ่นต่อสภาพบรรยากาศทั่วไป อนุภาคที่แขวนลอยในอากาศมีลักษณะเป็นของแข็งและของเหลวสามารถดูดซับและหักเหแสงได้ นอกจากนี้ขนาด ความหนาแน่น และองค์ประกอบทางเคมีของอนุภาคฝุ่น ยังมีอิทธิพลต่อทัศนวิสัย และลดความสามารถในการ

มองเห็น ดังเหตุการณ์ที่มักปรากฏในช่วงที่มีหมอกควันมาก เครื่องบินไม่สามารถขึ้นลงได้ ทำให้ทัศนวิสัยการมองเห็นขณะขับรถอยู่ในระดับใกล้ เป็นต้น

3. ผลกระทบของอนุภาคฝุ่นต่อวัตถุและสิ่งก่อสร้าง เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของอนุภาคฝุ่นแต่ละชนิดส่งผลต่อวัตถุและสิ่งก่อสร้างในระดับที่ต่างกัน เช่น ทำให้สกปรกเลอะเทอะ ทำลายผิวหน้าของสิ่งก่อสร้าง รวมถึงทำให้โลหะสึกกร่อนได้ด้วย

4. ผลกระทบของอนุภาคฝุ่นต่อสิ่งแวดล้อม พบว่าสารพิษบางชนิดที่เกาะบนฝุ่น ส่งผลกระทบในหลายรูปแบบ อาทิ ทำลายโครงสร้างภายนอกและภายในของใบ ทำให้ใบมีสีซีด เนื่องจากคลอโรฟิลล์ถูกทำลาย ทำให้ต้นไม้และพืชผักเหี่ยวเฉา ทำให้ทะเลสาบและกระแสน้ำเป็นกรด เปลี่ยนแปลงสมดุลของสารอาหารที่มีอยู่ในน้ำ ทำลายสารอาหารที่มีอยู่บนพื้นดิน มีผลกระทบต่อความหลากหลายของระบบนิเวศ

5. ผลกระทบของอนุภาคฝุ่นต่อระบบเศรษฐกิจ ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการทำมาหาความสะอาด ทำให้สภาพคล่องทางเศรษฐกิจลดลง เนื่องจากความเชื่อมั่นของนักท่องเที่ยวลดลง ไม่กล้าเดินทางมาท่องเที่ยวเพราะปริมาณอนุภาคฝุ่นในอากาศอยู่ในระดับที่ไม่ปลอดภัยต่อสุขภาพ เครื่องบินไม่สามารถร่อนลงจอดสนามบินได้ ส่งผลให้นักท่องเที่ยวบางส่วนเลี่ยงไปท่องเที่ยวแหล่งอื่น เช่น จังหวัดชายทะเล เป็นต้น [28, 33]

#### 2.4.4 การตรวจติดตามชั้นบรรยากาศด้วยดาวเทียม

ในช่วงทศวรรษที่ 1930 เป็นต้นมา ได้มีการนำเทคนิคการใช้ข้อมูลดาวเทียมมาช่วยในการศึกษาค่าความเข้มข้นรังสีดวงอาทิตย์ที่พื้นผิวโลก เช่น ในประเทศออสเตรเลีย Dr.Nunez แห่งมหาวิทยาลัย Tasmania ได้พัฒนาการใช้ข้อมูลดาวเทียมในการคำนวณค่าความเข้มข้นรังสีดวงอาทิตย์ ซึ่งมีผลงานตั้งแต่ช่วงปลายทศวรรษ 1970 ต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน ในงานวิจัย Dr.Nunez ได้ใช้ข้อมูลดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา GMS ทำการศึกษาค่าความเข้มข้นรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกในบริเวณเขตร้อนของมหาสมุทรแปซิฟิก ซึ่งครอบคลุมพื้นที่บางส่วนของประเทศไทย ฟิลิปปินส์ อินโดนีเซีย และภาคเหนือของประเทศออสเตรเลีย ตามโครงการ Tropical Ocean Global Atmosphere (TOGA) ในโครงการดังกล่าว Dr.Nunez ได้พัฒนาแบบจำลองเชิงฟิสิกส์ซึ่งใช้ค่าความเข้มข้นรังสีดวงอาทิตย์ในเขตร้อนได้ดี จากการวิจัยพบว่าฝุ่นละอองในอากาศจะดูดกลืนและกระเจิงรังสีดวงอาทิตย์โดยฝุ่นละอองบริเวณกรุงเทพมหานคร มีผลทำให้รังสีดวงอาทิตย์ลดลง 19%

ตั้งแต่ปี 2000 เป็นต้นมา องค์การนาซา (NASA) ของประเทศสหรัฐอเมริกา ได้จัดตั้งเครือข่ายเครื่อง Sunphoto meter ทั่วโลก และเรียกเครือข่ายดังกล่าวว่า AERONET (Aerosol Robotic Network) ซึ่งปัจจุบันมีสถานีทั้งหมด 655 แห่ง โดยมีเป้าหมายเพื่อศึกษาสมบัติเชิงแสง (Optical properties) ปริมาณและชนิด รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของฝุ่นทั่วโลก โดย MODIS (MOD

erate resolution Imaging Spectrometer (MODIS)) เป็นเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งอยู่บนดาวเทียม TERRA/AQUA มีแถบสเปกตรัมถึง 36 แถบสเปกตรัม ใช้ในการสำรวจโลกทั้งระดับใน Regional scale และ Global scale แบบ Multi-temporal series ในการศึกษาทางด้านสิ่งแวดล้อมต่างๆ มีการนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาวิจัยด้านดิน มหาสมุทร และชั้นบรรยากาศ เป็นต้น

ภาพถ่ายในระบบ MODIS มีความกว้าง หรือ Swath ประมาณ 2,330 km. และสามารถบันทึกข้อมูลครอบคลุมพื้นที่ทั่วโลกได้ภายใน 2 วัน ข้อมูลที่ได้รับประกอบด้วย 36 ช่วงคลื่น ระหว่าง 0.4 -14 mm. โดยมีความละเอียดเชิงพื้นที่ที่แตกต่างกันไปในแต่ละช่วงคลื่น โดยช่วงคลื่นที่ 1 - 2 มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 250 m. ช่วงคลื่น 3-7 มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 500 เมตร และช่วงคลื่น 8 - 36 มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 1,000 m. โดยข้อมูลนั้นมีหลายประเภท ซึ่งการดำเนินงานครั้งนี้เลือกใช้ข้อมูลความลึกเชิงแสงของละอองลอยจากผลิตภัณฑ์ MOD04 และ ข้อมูลค่าการสะท้อนพื้นผิว (Surface Reflectance) จากผลิตภัณฑ์ MOD09

MOD04 ให้ข้อมูลค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอยในบรรยากาศ (Aerosol Optical Depth: AOD) ซึ่ง AOD เป็นตัวบ่งชี้ถึงระดับการดูดกลืนแสง และการกระจายแสงอาทิตย์อันเนื่องมาจากละอองลอยที่มีขนาดหลากหลายตั้งแต่เล็กกว่า  $1\ \mu\text{m}$  ซึ่งจะมีการกระจายแสงแบบเรย์เล เหมือนโมเลกุลของแก๊ส แต่ละอองในบรรยากาศที่มีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคแสงที่มองเห็นได้บางชนิดสามารถดูดกลืนแสงได้ดีและกระจายแสงได้ไม่รอบทิศ เช่น ควันที่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวล ละอองเถ้าจากการระเบิดของภูเขาไฟ ควันจากโรงงานอุตสาหกรรม ละอองซัลเฟตจากทะเล สารระเหยออร์แกนิกจากป่าเขตร้อน เป็นต้น โดยข้อมูลละอองลอยในอากาศซึ่งครอบคลุมพื้นที่ทวีป และมหาสมุทร ซึ่งละอองลอยมีตั้งแต่ขนาดละเอียด (มลพิษในอากาศ) ไปจนถึงขนาดหยาบ และถูกนำมาใช้ในการศึกษาการแพร่กระจายของละอองลอย และฝุ่นละอองอย่างแพร่หลาย

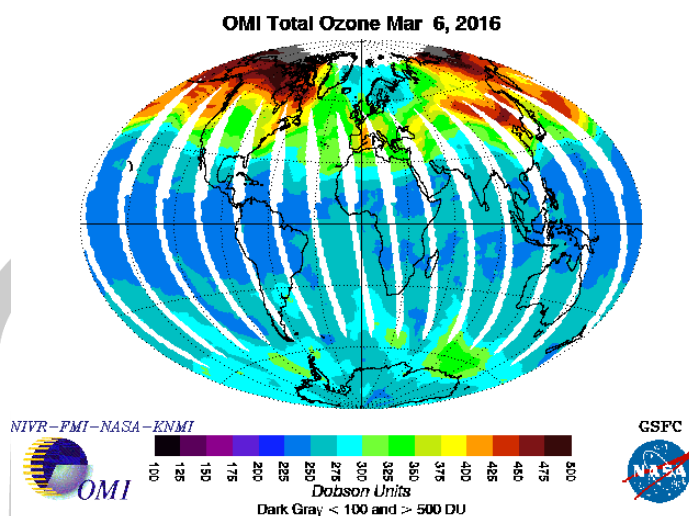
MOD09 ให้ข้อมูลค่าสะท้อนพื้นผิว ซึ่งค่าสะท้อนพื้นผิวมีความสัมพันธ์กับรูปแบบของละอองลอย โดยค่าการสะท้อนพื้นผิวของแต่ละแบนด์ ทำการวัดที่ระดับพื้นผิวโลกซึ่งจะไม่มีค่าการกระเจิงและการดูดซับในชั้นบรรยากาศรวมอยู่ MOD09 ถูกออกแบบมาโดยเจาะจงที่การสะท้อนพื้นผิวดิน มีเป้าหมายเพื่อลบอิทธิพลของก๊าซต่างๆ ในชั้นบรรยากาศ และค่าผกผันของละอองลอย โดยอัลกอริทึมของ MOD09 นี้รับมาจากข้อมูล aerosol ในกระบวนการเก็บรวบรวมข้อมูลในบรรยากาศชั้นล่าง ส่วนค่าการสะท้อนได้รับค่าการแผ่รังสีจากบรรยากาศชั้นบน อัลกอริทึมทั้ง MOD04 และ MOD09 ใช้เทคนิคอัตราส่วนช่วงคลื่น เพื่อให้ได้ค่าการสะท้อนพื้นผิวในช่วงคลื่นที่ตามองเห็น ทั้ง MOD04 และ MOD09 จะให้ค่า AOD ใน 3 แบนด์ โดย MOD04 รับค่า AOD ในแบนด์  $0.49\ \mu\text{m}$  และ  $0.66\ \mu\text{m}$  และยังหาค่าสำหรับแบนด์  $0.55\ \mu\text{m}$  ซึ่งเป็นแบนด์ที่ใช้มากในหลายๆ โมเดลในชั้นบรรยากาศ และถูกใช้บ่อยในการหาโมเดลด้านภูมิอากาศ โดยอัลกอริทึมนี้ใช้ความสัมพันธ์ที่ชัดเจนบนการสะท้อนพื้นผิวในช่วงอินฟราเรดใกล้ เพื่ออนุมานการสะท้อนพื้นผิวสำหรับช่วงความยาวคลื่นสีฟ้าและสีแดง

ซึ่งนำไปสู่การคำนวณค่า AOD และคุณสมบัติละอองลอย โดยข้อมูลทั้ง 2 ครอบคลุมพื้นที่บริเวณกว้าง และดาวเทียมโคจรผ่านประเทศไทยทุกวัน [34]

#### 2.4.5 การตรวจติดตามก๊าซโอโซนโดยภาพถ่ายดาวเทียม

การสำรวจโอโซนในชั้นบรรยากาศด้วยดาวเทียม เริ่มขึ้นอย่างจริงจังในปี 1978 เมื่อสหรัฐฯได้ส่งดาวเทียม Nimbus 7 เพื่อการสำรวจโอโซนและส่วนประกอบอื่นที่เกี่ยวข้องในชั้นบรรยากาศประกอบ ด้วยอุปกรณ์รับรู้สามชนิด คือ Stratospheric Aerosol Measurement II (SAM II), Solar Backscatter Ultraviolet (SBUV) และที่สำคัญที่สุด Total Ozone Monitoring System (TOMS) สหรัฐฯ ได้ส่งดาวเทียมเพื่อสังเกตโอโซนตั้งแต่ปี 1978 แต่ไม่มีรายงานการลดลงของโอโซนที่ขั้วโลกใต้จนกระทั่งปี 1985 ข้อมูลชั้นบรรยากาศบริเวณแอนตาร์กติกาในช่วงเดือนที่วัดค่าได้ต่ำสุดที่ได้รับมานั้นถูกตัดทิ้งไป เนื่องจากค่าที่วัดได้มีค่าต่ำมากจนถูกพิจารณาว่าเป็นความผิดพลาดของอุปกรณ์รับรู้ หลังจากที่มีข่าวการลดลงของโอโซนอย่างรุนแรงจากวงการวิทยาศาสตร์ในปี 1985 ข้อมูลเก่าๆ จากอุปกรณ์รับรู้ TOMS ทั้งหมดถูกนำมาใช้ใหม่โดยศูนย์การบินอวกาศกอดดาร์ด (Goddard Space Flight Center, GSFC) องค์การนาซา (NASA) ตั้งแต่นั้น TOMS จึงกลายเป็นอุปกรณ์รับรู้ที่ดีที่สุดสำหรับการวิเคราะห์และการตรวจติดตาม มหันตภัยในชั้นบรรยากาศหลัง Nimbus-7 ในปี 1978 เป็นต้นมา TOMS ถูกนำไปติดตั้งกับดาวเทียมของรัสเซีย Meteor-3 (สิงหาคม ปี 1991 -พฤศจิกายน ปี 1994) Adeos ของญี่ปุ่น (กรกฎาคม ปี 1996 – มิถุนายน ปี 1997) และล่าสุด Earth Probe ของสหรัฐฯ (กรกฎาคม ปี 1996 – ธันวาคม ปี 2005) ทำให้อุปกรณ์รับรู้ TOMS เป็นหนึ่งในอุปกรณ์ที่ข้อมูลถูกนำมาวิเคราะห์ปริมาณโอโซนบ่อยครั้งและต่อเนื่องที่สุด

ข้อมูลจาก TOMS สิ้นสุดลงในปี 2005 อุปกรณ์รับรู้อีกหลายหลายชนิดได้รับการพัฒนาด้วยเทคโนโลยีสูงขึ้นเพื่อการวัดปริมาณโอโซนในชั้นบรรยากาศแทนที่ TOMS หนึ่งในนั้นคือ Ozone Monitoring Instrument (OMI) ติดตั้งบนดาวเทียม Aura ซึ่งเป็นดาวเทียมที่มีภารกิจในการสำรวจชั้นบรรยากาศเป็นการเฉพาะ ถูกยิงเข้าสู่โคจรเมื่อวันที่ 21 กรกฎาคม ปี 2004 ดังแสดงในภาพประกอบ 14 นอกจากการวัดปริมาณโอโซนในบรรยากาศแล้ว OMI ได้รับการออกแบบมาให้สามารถวัดส่วนประกอบอื่นๆ ในบรรยากาศด้วย เช่น ไนโตรเจนไดออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ โบรมีนไดออกไซด์ คลอรีนไดออกไซด์ และสารแขวนลอยที่ทำลายชั้นโอโซน และก่อให้เกิดโอโซนระดับพื้นดิน [34]



ภาพประกอบ 14 Global ozone ซึ่งได้รับข้อมูลจากอุปกรณ์ OMI ติดตั้งบนดาวเทียม Aura [34]

#### 2.4.6 การตรวจวัดฝุ่นละอองในอากาศ

การตรวจวัดสารมลพิษอากาศในสถานประกอบการนั้นจะมีวิธีแตกต่างไปจากการตรวจวัดสารมลพิษอากาศจากปล่องและวิธีการตรวจวัดในบรรยากาศ โดยการเก็บตัวอย่างอากาศนั้นจะทำภายในโรงงานซึ่งเป็นสภาพแวดล้อมที่คนงานทำงานและได้รับสัมผัสกับสารมลพิษอากาศจริงๆ เป็นการเก็บตัวอย่างที่เรียกว่า Personal Sampling จะเป็นอากาศที่คนงานหายใจเข้าไป โดยจะเป็นอากาศบริเวณระหว่างช่วงอกถึงศีรษะ เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้เก็บตัวอย่างจะเป็นปั๊มเก็บตัวอย่างขนาดเล็กที่ไว้ดูดอากาศ โดยผ่านกระดาศกรองหรือตัวกลางที่ดูดซับมลพิษได้ โดยติดตั้งปั๊มไว้ที่ตัวคนงาน ระยะเวลาเก็บตัวอย่างจะเท่ากับเวลาที่คนงานปฏิบัติงานคือ 8 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำตัวอย่างอากาศไปวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณสารมลพิษต่อไป โดยวิธีการนี้ใช้อ้างอิงในการเก็บตัวอย่างอากาศและวิธีการวิเคราะห์นั้นอ้างอิงมาจากวิธีการของ The National Institute of Occupational Safety and Health หรือ NIOSH และ Occupational Safety and Health Administration หรือ OSHA ของประเทศสหรัฐอเมริกา

การตรวจวัดปริมาณฝุ่นละอองในบรรยากาศทั่วไป ที่มีขนาดอนุภาคตั้งแต่  $100\ \mu\text{m}$  ลงมา (Suspended Particulate ;TSP), ฝุ่นละอองที่มีขนาดอนุภาคตั้งแต่  $10\ \mu\text{m}$  ลงมา (PM<sub>10</sub>) หรือฝุ่นละอองที่มีขนาดอนุภาคตั้งแต่  $2.5\ \mu\text{m}$  ลงมา (PM<sub>2.5</sub>) ในช่วงระยะเวลาการตรวจวัด 24 ชั่วโมง โดยใช้เครื่องมือเก็บตัวอย่างชนิด High Volume Air Sampler ตัวอย่างอากาศจะถูกดูดผ่านหัวคัดเลือกขนาดฝุ่นในแต่ละขนาดด้วยอัตราการระหว่าง  $40 - 60\ \text{m}^3 / \text{h}$  เป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง ( $\pm 1$  ชั่วโมง) อย่างต่อเนื่อง ซึ่งอนุภาคฝุ่นละอองที่ถูกดูดผ่านหัวคัดเลือกขนาดฝุ่นแต่ละขนาดจะลงมาติดอยู่บนกระดาศกรองที่ผ่านการชั่งน้ำหนักมาแล้ว จากนั้นนำมาหาปริมาณฝุ่นละอองโดยวิธีการหาค่า

ความแตกต่างของน้ำหนักระดาษกรองระหว่างก่อนและหลังการเก็บตัวอย่าง แล้วคำนวณหาค่าความเข้มข้นเป็นหน่วยน้ำหนักต่อปริมาณอากาศที่สภาวะมาตรฐาน (25 °C 760 mmHg) การตรวจวัดฝุ่นในสถานประกอบการ มี 2 แบบคือ Total dust NIOSH 0500 และ Respirable Dust NIOSH 0600 วิธีการตรวจวัดคุณภาพอากาศในบรรยากาศ ประกอบด้วยวิธีการตรวจวัดที่เป็นวิธีมาตรฐาน (Reference Method) และวิธีเทียบเท่า (Equivalent Method) โดยการตรวจวัดฝุ่นละอองในบรรยากาศ มีวิธีการดังนี้

1. เครื่องตรวจวัดคุณภาพอากาศที่ได้รับการรับรองให้ใช้เป็นเครื่องอ้างอิงได้ (Reference Method) วิธีการตรวจวัดตามระบบกราวิเมตริก (Gravimetric method) เป็นระบบที่เก็บตัวอย่างอากาศโดยดูดอากาศผ่านแผ่นกรอง โดยเครื่องเก็บตัวอย่างชนิดไฮโวลุ่ม (High Volume Air Sampler) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกรองฝุ่นละอองขนาด  $0.3 \mu m$  ได้ 99% แล้วหาน้ำหนักฝุ่นจากแผ่นกรองนั้นตามมาตรฐานต่อไป ระบบกราวิเมตริก (Gravimetric) ซึ่งเป็น Federal Reference Method (FRM) ตามที่ US EPA กำหนด ซึ่งหน่วยงานของรัฐมักจะใช้ในสถานี่ตรวจวัดต่างๆ ข้อเสียคือ ราคาแพงและใช้เวลาในการตรวจวัดค่อนข้างนาน ไม่ได้อ่านค่าที่เป็น Real time ได้

2. เครื่องตรวจวัดคุณภาพอากาศที่ได้รับการรับรองเทียบเท่ากับเครื่องอ้างอิง (Equivalent Method) ปัจจุบันประเทศไทยกำหนดเทคนิควิธีเทียบเท่ากับวิธีมาตรฐานอ้างอิง หรือ Equivalent method ดังนี้ ระบบ Beta ray/beta gauge attenuation, ระบบ Tapered Element Oscillating Microbalance (TEOM) และ ระบบ Dichotomous และระบบการกระเจิงของแสง (Light Scattering) ข้อดีกว่าแบบแรกคือสามารถได้ค่าตรวจวัดเร็วกว่า เช่น เป็นรายชั่วโมงหรือเร็วกว่านั้น แต่ก็ยังมีราคาค่อนข้างสูงเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเครื่องมือตรวจวัดคุณภาพอากาศมีราคาแพง และมีการติดตั้งในบางพื้นที่

3. เครื่องตรวจวัดคุณภาพอากาศด้วยเซนเซอร์ขนาดเล็ก หลักการทำงานของเครื่องวัดฝุ่นขนาดเล็ก เป็นการวัดทางอ้อมโดยอาศัยคุณสมบัติการกระเจิงของแสงที่ส่องผ่านสารอนุภาคขนาดต่าง หรือที่เรียกกันว่า Scatter จากนั้นจะมีเซนเซอร์วัดตรวจจับว่ามีการกระเจิงแสงมากน้อยแค่ไหน หากมีการกระเจิงแสงมากก็แสดงว่ามีค่าปริมาณฝุ่นที่สูง และจะประมวลผล ออกมาเป็นความเข้มข้นของสารอนุภาคขนาดต่างๆ โดยมีราคาและคุณภาพที่หลากหลาย ซึ่งข้อดีของเครื่องวัดคุณภาพอากาศขนาดเล็ก คือ ง่าย ราคาถูกกว่าเครื่องวัดมาตรฐาน เครื่องเซนเซอร์ขนาดเล็กจะถูกออกแบบและสอบเทียบให้ใช้งานภายในอาคาร ดังนั้น ในการนำมาประกอบเป็นเครื่องตรวจวัดคุณภาพอากาศเพื่อนำไปใช้งานนอกอาคาร ซึ่งจะมีปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมภายนอกครอบงำ ค่าที่ได้จากการวัดเป็นอย่างมาก เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์แรงและทิศทางลม [35, 36]

ตาราง 2 มาตรฐานฝุ่นละอองในบรรยากาศโดยทั่วไปของประเทศไทย

| มลพิษทางอากาศ | ความเข้มข้น<br>(มิลลิกรัม/ลูกบาศก์เมตร) |                | วิธีตรวจวัดมาตรฐาน |
|---------------|-----------------------------------------|----------------|--------------------|
|               | ค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมง                    | ค่าเฉลี่ย 1 ปี |                    |
| TSP           | 0.33                                    | 0.10           | GHV                |
| PM10          | 0.12                                    | 0.05           | GHV                |
| PM2.5         | 0.05                                    | 0.025          | FRM                |

ตาราง 3 ระบบการตรวจวัดฝุ่นละอองในบรรยากาศ อ้างอิงตามประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ และ ประกาศกรมควบคุมมลพิษ

| พารามิเตอร์                              | ข้อมูลการตรวจวัด | ระบบมาตรฐานอ้างอิง                                                                        | ระบบอื่นที่เห็นชอบ      |
|------------------------------------------|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| ฝุ่นละอองรวมขนาดไม่เกิน 100 $\mu m$ ลงมา | 24 ชั่วโมง       | ระบบกราวิเมตริก (Gravimetric)                                                             |                         |
| ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 $\mu m$          | 1 ชั่วโมง        | ระบบกราวิเมตริก (Gravimetric)                                                             | - Beta ray              |
|                                          | 24 ชั่วโมง       | (Gravimetric)                                                                             | - TEOM<br>- Dichotomous |
| ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 $\mu m$         | 1 ชั่วโมง        | ระบบกราวิเมตริก (Gravimetric) ซึ่งเป็น Federal Reference Method (FRM) ตามที่ US EPA กำหนด | - Beta ray              |
|                                          | 24 ชั่วโมง       | (Gravimetric) ซึ่งเป็น Federal Reference Method (FRM) ตามที่ US EPA กำหนด                 | - TEOM<br>- Dichotomous |

#### 2.4.7 ดัชนีคุณภาพอากาศ

ดัชนีคุณภาพอากาศ (Air Quality Index : AQI) เป็นการรายงานข้อมูลคุณภาพอากาศในรูปแบบที่ง่ายต่อความเข้าใจของประชาชนทั่วไป เพื่อเผยแพร่ประชาสัมพันธ์ให้สาธารณชนได้รับทราบถึงสถานการณ์มลพิษทางอากาศในแต่ละพื้นที่ว่าอยู่ในระดับใด มีผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยหรือไม่ ดัชนีคุณภาพอากาศ 1 ค่า ใช้เป็นตัวแทนค่าความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศ 6 ชนิด ได้แก่

1. ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน  $2.5\ \mu\text{m}$  (PM2.5) เป็นฝุ่นที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน  $2.5\ \mu\text{m}$  เกิดจากการเผาไหม้ทั้งจากยานพาหนะ การเผาวัสดุการเกษตร ไฟป่า และกระบวนการอุตสาหกรรม สามารถเข้าไปถึงถุงลมในปอดได้ เป็นผลทำให้เกิดโรคในระบบทางเดินหายใจ และโรคปอดต่างๆ หากได้รับในปริมาณมากหรือเป็นเวลานานจะสะสมในเนื้อเยื่อปอด ทำให้การทำงานของปอดเสื่อมประสิทธิภาพลง ทำให้หลอดลมอักเสบ มีอาการหอบหืด

2. ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน  $10\ \mu\text{m}$  (PM10) เป็นฝุ่นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 10 ไมครอน เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง การเผาในที่โล่ง กระบวนการอุตสาหกรรม การบด การม่ หรือ การทำให้เป็นผงจากการก่อสร้าง ส่งผลกระทบต่อสุขภาพเนื่องจากเมื่อหายใจเข้าไปสามารถเข้าไปสะสมในระบบทางเดินหายใจ

3. ก๊าซโอโซน ( $\text{O}_3$ ) เป็นก๊าซที่ไม่มีสีหรือมีสีฟ้าอ่อน มีกลิ่นฉุน ละลายน้ำได้เล็กน้อย เกิดขึ้นได้ทั้งในระดับบรรยากาศชั้นที่สูงจากผิวโลก และระดับชั้นบรรยากาศผิวโลกที่ใกล้พื้นดิน ก๊าซโอโซนที่เป็นสารมลพิษทางอากาศคือก๊าซโอโซนในชั้นบรรยากาศผิวโลก เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างก๊าซออกไซด์ของไนโตรเจน และสารประกอบอินทรีย์ระเหยง่าย โดยมีแสงแดดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา มีผลกระทบต่อสุขภาพ โดยก่อให้เกิดการระคายเคืองตาและระคายเคืองต่อระบบทางเดินหายใจและเยื่อต่างๆ ความสามารถในการทำงานของปอดลดลง เหนื่อยเร็ว โดยเฉพาะในเด็ก คนชรา และคนที่เป็นโรคปอดเรื้อรัง

4. ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ( $\text{CO}$ ) เป็นก๊าซที่ไม่มีสี กลิ่น และรส เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ก๊าซนี้สามารถสะสมอยู่ในร่างกายได้โดยจะไปรวมตัวกับฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดงได้ดีกว่าออกซิเจนประมาณ 200-250 เท่า เมื่อหายใจเข้าไปทำให้ก๊าซชนิดนี้จะไปแย่งจับกับฮีโมโกลบินในเลือด เกิดเป็นคาร์บอกซีฮีโมโกลบิน ( $\text{CoHb}$ ) ทำให้การลำเลียงออกซิเจนไปสู่เซลล์ต่างๆ ของร่างกายลดน้อยลง ส่งผลให้ร่างกายเกิดอาการอ่อนเพลีย และหัวใจทำงานหนักขึ้น

5. ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ ( $\text{NO}_2$ ) เป็นก๊าซที่ไม่มีสีและกลิ่น ละลายน้ำได้เล็กน้อย มีอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ หรือเกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงต่างๆ อุตสาหกรรมบางชนิด เป็นต้น ก๊าซนี้มีผลต่อระบบการมองเห็นและผู้ที่มีการหอบหืดหรือ โรคเกี่ยวกับทางเดินหายใจ

6. ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ( $\text{SO}_2$ ) เป็นก๊าซที่ไม่มีสี หรืออาจมีสีเหลืองอ่อนๆ มีรสและกลิ่นที่ระดับความเข้มข้นสูง เกิดจากธรรมชาติและการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีกำมะถัน (ซัลเฟอร์) เป็นส่วนประกอบ สามารถละลายน้ำได้ดี สามารถรวมตัวกับสารมลพิษอื่นแล้วก่อตัวเป็นอนุภาคฝุ่นขนาดเล็กได้ ก๊าซนี้มีผลกระทบโดยตรงต่อสุขภาพ ทำให้เกิดการระคายเคืองต่อเยื่อตา ผิวหนัง และระบบทางเดินหายใจ หากได้รับเป็นเวลานานๆ จะทำให้เป็นโรคหลอดลมอักเสบเรื้อรังได้

ดัชนีคุณภาพอากาศของประเทศไทยแบ่งเป็น 5 ระดับ คือ ตั้งแต่ 0 ถึง 201 ขึ้นไป ซึ่งแต่ละระดับจะใช้สีเป็นสัญลักษณ์เปรียบเทียบกับระดับของผลกระทบต่อสุขภาพอนามัย โดยดัชนีคุณภาพอากาศ 100 จะมีค่าเทียบเท่ากับมาตรฐานคุณภาพอากาศในบรรยากาศโดยทั่วไป หากดัชนีคุณภาพอากาศมีค่าสูงเกินกว่า 100 แสดงว่าค่าความเข้มข้นของมลพิษทางอากาศมีค่าเกินมาตรฐานและคุณภาพอากาศในวันนั้นจะเริ่มมีผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชน [37]

ตาราง 4 เกณฑ์ของดัชนีคุณภาพอากาศของประเทศไทย

| AQI       | ความหมาย                | สีที่ใช้ | คำอธิบาย                                                                                                                                                                                                                                |
|-----------|-------------------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0 - 25    | คุณภาพอากาศดีมาก        | ฟ้า      | คุณภาพอากาศดีมาก เหมาะสำหรับกิจกรรมกลางแจ้งและการท่องเที่ยว                                                                                                                                                                             |
| 26 - 50   | คุณภาพอากาศดี           | เขียว    | คุณภาพอากาศดี สามารถทำกิจกรรมกลางแจ้งและการท่องเที่ยวได้ตามปกติ                                                                                                                                                                         |
| 51 - 100  | ปานกลาง                 | เหลือง   | ประชาชนทั่วไป : สามารถทำกิจกรรมกลางแจ้งได้ตามปกติ<br>ผู้ที่ต้องดูแลสุขภาพเป็นพิเศษ : หากมีอาการเบื้องต้น เช่น ไอ หายใจลำบาก ระคายเคืองตา ควรลดระยะเวลาการทำกิจกรรมกลางแจ้ง                                                              |
| 101 - 200 | เริ่มมีผลกระทบต่อสุขภาพ | ส้ม      | ประชาชนทั่วไป : ควรเฝ้าระวังสุขภาพ ถ้ามีอาการเบื้องต้น เช่น ไอ หายใจลำบาก ระคายเคืองตา ควรลดระยะเวลาการทำกิจกรรมกลางแจ้ง หรือใช้อุปกรณ์ป้องกันตนเองหากมีความจำเป็น<br>ผู้ที่ต้องดูแลสุขภาพเป็นพิเศษ : ควรลดระยะเวลาการทำกิจกรรมกลางแจ้ง |

ตาราง 5 เกณฑ์ของดัชนีคุณภาพอากาศของประเทศไทย (ต่อ)

| AQI        | ความหมาย                | สีที่ใช้ | คำอธิบาย                                                                                                                                                             |
|------------|-------------------------|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 101 – 200  | เริ่มมีผลกระทบต่อสุขภาพ | ส้ม      | หรือใช้อุปกรณ์ป้องกันตนเองหากมีความจำเป็น ถ้ามีอาการทางสุขภาพ เช่น ไอ หายใจลำบาก ตาอักเสบ แน่นหน้าอก ปวดศีรษะ หัวใจเต้นไม่เป็นปกติ คลื่นไส้ อ่อนเพลีย ควรปรึกษาแพทย์ |
| 201 ขึ้นไป | มีผลกระทบต่อสุขภาพ      | แดง      | ทุกคนควรหลีกเลี่ยงกิจกรรมกลางแจ้ง หลีกเลี่ยงพื้นที่ที่มีมลพิษทางอากาศสูง หรือใช้อุปกรณ์ป้องกันตนเองหากมีความจำเป็น หากมีอาการทางสุขภาพควรปรึกษาแพทย์                 |

การคำนวณดัชนีคุณภาพอากาศรายวันของสารมลพิษทางอากาศแต่ละประเภทคำนวณจากค่าความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศจากข้อมูลผลการตรวจวัดคุณภาพอากาศ โดยมีระดับของค่าความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศที่เทียบเท่ากับค่าดัชนีคุณภาพอากาศที่ระดับต่างๆ ดัง (ตารางที่ 2) การคำนวณดัชนีคุณภาพอากาศภายในช่วงระดับ ดังสมการที่ 2.24

$$I = \frac{I_j - I_i}{X_j - X_i} (X - X_i) + I_i \quad 2.24$$

กำหนดให้

$I$  = ค่าดัชนีย่อยคุณภาพอากาศ

$X$  = ความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศจากการตรวจวัด

$X_i, X_j$  = ค่าต่ำสุด, สูงสุด ของช่วงความเข้มข้นสารมลพิษที่มีค่า  $X$

$I_i, I_j$  = ค่าต่ำสุด, สูงสุด ของช่วงดัชนีคุณภาพอากาศที่ตรงกับช่วงความเข้มข้น  $X$  จากค่าดัชนี

ย่อยที่คำนวณได้ สารมลพิษทางอากาศประเภทใดมีค่าดัชนีสูงสุด จะใช้เป็นดัชนีคุณภาพอากาศ (AQI) ณ ช่วงเวลานั้น

ตาราง 6 ค่าความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศที่เทียบเท่ากับค่าดัชนีคุณภาพอากาศ

| AQI            | PM <sub>2.5</sub><br>$\mu g / m^3$ | PM <sub>10</sub><br>$\mu g / m^3$ | O <sub>3</sub><br>(ppb)   | CO<br>(ppm) | NO <sub>2</sub><br>(ppb) | SO <sub>2</sub><br>(ppb) |
|----------------|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|-------------|--------------------------|--------------------------|
|                | เฉลี่ย 24 ชั่วโมงต่อเนื่อง         |                                   | เฉลี่ย 8 ชั่วโมงต่อเนื่อง |             | เฉลี่ย 1 ชั่วโมง         |                          |
| 0 - 25         | 0 - 25                             | 0 - 50                            | 0 - 35                    | 0 - 4.4     | 0 - 60                   | 0 - 100                  |
| 26 - 50        | 26 - 37                            | 51 - 80                           | 36 - 50                   | 4.5 - 6.4   | 61 - 106                 | 101 - 200                |
| 51 - 100       | 38 - 50                            | 81 - 120                          | 51 - 70                   | 6.5 - 9.0   | 107 - 170                | 201 - 300                |
| 101 - 200      | 51 - 90                            | 121 - 180                         | 71 - 120                  | 9.1 - 30.0  | 171 - 340                | 301 - 400                |
| มากกว่า<br>200 | 91 ขึ้นไป                          | 181 ขึ้นไป                        | 121 ขึ้นไป                | 30.1 ขึ้นไป | 341 ขึ้นไป               | 401 ขึ้นไป               |

ช่วงเวลาเฉลี่ย และหน่วยสารมลพิษทางอากาศที่ใช้ในการคำนวณ

PM<sub>2.5</sub> เฉลี่ย 24 ชั่วโมงต่อเนื่อง :  $\mu g / m^3$

PM<sub>10</sub> เฉลี่ย 24 ชั่วโมงต่อเนื่อง :  $\mu g / m^3$

O<sub>3</sub> เฉลี่ย 8 ชั่วโมงต่อเนื่อง : ส่วนในล้านส่วน หรือ ppb หรือ 1/1,000,000,000

CO เฉลี่ย 8 ชั่วโมงต่อเนื่อง : ส่วนในล้านส่วน หรือ ppm หรือ 1/1,000,000

NO<sub>2</sub> เฉลี่ย 1 ชั่วโมง : ส่วนในล้านส่วน หรือ ppb หรือ 1/1,000,000,000

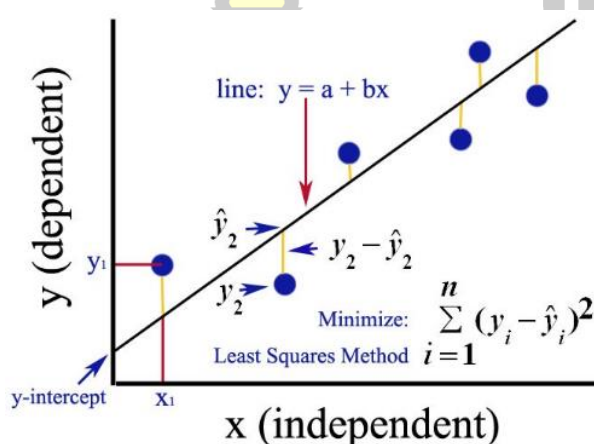
SO<sub>2</sub> เฉลี่ย 1 ชั่วโมง : ส่วนในล้านส่วน หรือ ppb หรือ 1/1,000,000,000

## 2.5 วิธีการทางสถิติสำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อการพยากรณ์

การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) และการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation Analysis) เป็นการศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของตัวแปร วัตถุประสงค์หลักของการวิเคราะห์การถดถอยคือ ต้องทำการประมาณค่าของตัวแปรตัวหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า ตัวแปรตาม (Dependent Variable) นิยมเขียนแทนด้วย Y โดยอาศัยความรู้จากตัวแปรอื่น ซึ่งเรียกว่า ตัวแปรอิสระ (Independent Variable) นิยมเขียนแทนด้วย X หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งว่า เราใช้ความรู้ หรือสารสนเทศจาก X เป็นเกณฑ์ในการประมาณ Y ถ้าใช้ตัวแปร X เพียงตัวแปรเดียวในการประมาณ Y และความสัมพันธ์ของ Y และ X เป็นเชิงเส้นตรง เราเรียกว่า การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression) [38]

### 2.5.1 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นเชิงเดียว (Simple Linear Regression Analysis)

ในการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นเชิงเดียว (Simple Linear Regression Analysis) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ 1 ตัว กับตัวแปรตาม 1 ตัว คือตัวแปร X และ Y ที่มีความสัมพันธ์กันในลักษณะเชิงเส้น (Linear) โดยมีสมการถดถอยคือ  $Y = \alpha + \beta x$  ในที่นี้คือ Y คือค่าเฉลี่ยของ Y (ไม่ใช่ค่า Y แต่ละค่า) เนื่องจากในการวิเคราะห์การถดถอยอย่างง่ายนั้น ตัวแปร X จะถูกกำหนดค่าไว้ก่อนและค่า Y จะเปลี่ยนแปลงไปตามตัวแปร X เนื่องจากค่า X ค่าหนึ่งจะมีค่า Y ที่เป็นคู่ของค่า X หลายๆ ค่า และเมื่อนำค่า X และ Y ทั้งหมดไปพล็อตบนแกน X, Y แล้วลากเส้นเชื่อมระหว่างจุดที่ปรากฏ เส้นกราฟที่ได้นั้นจะเป็นเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของตัวแปร X กับตัวแปร Y ซึ่งก็คือ เส้นกราฟถดถอย (Regression Line) [38]



ภาพประกอบ 15 การกระจายของข้อมูลและเส้นกราฟถดถอย [39]

จากสมการเส้นตรง  $Y = \alpha + \beta x$  ซึ่ง  $\alpha$  และ  $\beta$  เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าจึงจะต้องการประมาณค่า  $a$  และ  $b$  จากข้อมูล  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$  เพื่อให้ได้เส้นตรงที่เข้ากับข้อมูลได้ดีที่สุด มีวิธีการที่เป็นที่นิยมใช้คือ วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least squares method) วิธีนี้จะให้ค่าประมาณ  $a$  และ  $b$  ที่ทำให้ความแตกต่างของค่าตัวแปรตามกับค่าที่คาดคะเนได้จากสมการถดถอยมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งจะแทนค่าของ  $a$  และ  $b$  ด้วยค่า  $a$  และ  $b$  โดยที่  $a$  ก็คือค่าคงที่ (Constant) เป็นค่าที่เส้นกราฟถดถอยตัดกับแกน Y ส่วน  $b$  เป็นความชัน (Slope) ของเส้นกราฟ ซึ่งแสดงถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของ Y เมื่อ X เปลี่ยนแปลง เรียกส่วนนี้ว่า สัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) หรือสัมประสิทธิ์การพยากรณ์ โดยเขียนความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการได้ดังนี้

$$\text{สมการในรูปของประชากร} \quad Y = \alpha + \beta x + \varepsilon \quad (2.25)$$

$$\text{สมการในรูปของตัวอย่าง} \quad y = a + bx + e \quad (2.26)$$

สมการทำนายผล

$$y = a + bx$$

(2.27)

เมื่อ

Y คือ ค่าของตัวแปรตาม (จะใช้สัญลักษณ์ y สำหรับค่าที่ได้จากตัวอย่าง และใช้ค่า y สำหรับค่าประมาณหรือตัวทำนาย)

X คือ ค่าของตัวแปรอิสระ (จะใช้สัญลักษณ์ x สำหรับค่าที่ได้จากตัวอย่าง และสำหรับค่าประมาณหรือตัวทำนาย)

$\alpha$  คือ ค่าคงที่ (Constant) ของสมการถดถอย (จะใช้สัญลักษณ์ a สำหรับค่าที่ได้จากตัวอย่าง และ สำหรับค่าประมาณหรือตัวทำนาย) โดยที่  $\alpha$  หรือ a จะเป็นจุดตัด (Intercept) แกน y ของสมการ

$\beta$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) ของตัวแปรอิสระ X (จะใช้สัญลักษณ์ b สำหรับค่าที่ได้จากตัวอย่าง และสำหรับค่าประมาณหรือตัวทำนาย) โดยที่ค่า  $\beta$  หรือ b จะแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า x ต่อค่า y ดังนี้ คือถ้าค่า x เปลี่ยนไป 1 หน่วย จะทำให้ค่า y เปลี่ยนไป b หน่วย

$\varepsilon$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อน (Error or Residual) ระหว่างค่า Y และค่า y (จะใช้สัญลักษณ์ e สำหรับค่าที่ได้จากตัวอย่าง)

### 2.5.2 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Linear Regression Analysis)

การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นที่ทำหน้าที่พยากรณ์ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป กับตัวแปรตาม 1 ตัว ในการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณนั้นจะต้องหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Correlation Coefficient) เพื่อให้ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นจำนวนทั้ง 3 ตัวกับตัวแปรตามว่ามีความสัมพันธ์กันเช่นใด สำหรับการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ จะต้องหาสมการถดถอยเพื่อใช้ในการพยากรณ์ของตัวแปรตาม (Y) และหาค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน รวมทั้งหาค่าสหสัมพันธ์พหุคูณ (Multiple Correlation) เพื่อหาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงที่เป็นไปได้สูงสุดระหว่างตัวแปรอิสระหรือตัวแปรต้นกับตัวแปรตาม [38] โดยเขียนความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการได้ดังนี้

สมการในรูปของประชากร

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots \beta_k X_k + \varepsilon$$

(2.28)

สมการในรูปของตัวอย่าง

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots b_k x_k + e$$

(2.29)

สมการทำนายผล  $\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots b_kx_k$  (2.30)

เมื่อ

$X_i$  คือ ค่าของตัวแปรอิสระแต่ละตัว (ใช้สัญลักษณ์  $X_i$  สำหรับค่าที่ได้จากตัวอย่าง และสำหรับค่าประมาณหรือตัวทำนาย)

$Y$  คือ ค่าของตัวแปรตาม (ใช้สัญลักษณ์  $y$  สำหรับค่าที่ได้จากตัวอย่าง และใช้ค่า  $y$  สำหรับค่าประมาณหรือตัวทำนาย)

$k$  คือจำนวนตัวแปรอิสระในสมการถดถอย

$\beta_0$  คือ ค่าคงที่ (Constant) ของสมการถดถอย (จะใช้สัญลักษณ์  $b_0$  สำหรับค่าที่ได้จากตัวอย่าง และสำหรับค่าประมาณหรือตัวทำนาย) โดยที่  $\beta_0$  หรือ  $b_0$  เป็นจุดตัด (Intercept) แกน  $y$  ของสมการ

$\beta_i$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) ของตัวแปรอิสระ  $X_i$  แต่ละตัว (ใช้สัญลักษณ์  $b_i$  สำหรับค่าที่ได้จากตัวอย่าง และสำหรับค่าประมาณหรือตัวทำนาย) โดยที่ค่า  $\beta_i$  หรือ  $b_i$  จะแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า  $x_i$  ต่อค่า  $y$  ดังนี้ คือ ถ้าค่า  $x_i$  เปลี่ยนไป 1 หน่วย ทำให้ค่า  $y$  เปลี่ยนไป  $b_i$  หน่วย

$\varepsilon$  คือ ค่าความคลาดเคลื่อน (Error or Residual) ระหว่างค่า  $Y$  และค่า  $y$  (ใช้สัญลักษณ์  $e$  สำหรับค่าที่ได้จากตัวอย่าง)

### 2.5.3 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation Analysis) เป็นการศึกษาระดับหรือขนาดของความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างตัวแปรสองตัวแปร (ตัวแปร  $x$  และ  $y$ ) ว่ามีมากน้อยเพียงใด และมีทิศทางความสัมพันธ์อย่างไร เมื่อ  $x$  เป็นตัวแปรอิสระ และ  $y$  เป็นตัวแปรตาม ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อย่างง่าย (Simple correlation coefficient) ของข้อมูลกลุ่มตัวอย่าง นิยมเขียนแทนด้วย  $r$  โดยวัดออกมาเป็นตัวเลขที่มีค่าอยู่ระหว่าง -1 กับ 1 ดังนั้นเมื่อรวบรวมข้อมูลของตัวแปร  $x$  และ  $y$  มาจำนวน  $n$  คู่ คือ  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$  [39] คำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จากข้อมูลได้ดังนี้

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.31)$$

หรือ

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx} \times S_{yy}}} \quad (2.32)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} S_{xy} &= \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \sum (xy) - \frac{\sum x \sum y}{n} \\ S_{xx} &= \sum (x_i - \bar{x})^2 = \sum (x_i - \bar{x})(x_i - \bar{x}) = \sum (x^2) - \frac{(\sum x)^2}{n} \\ S_{yy} &= \sum (y_i - \bar{y})^2 = \sum (y_i - \bar{y})(y_i - \bar{y}) = \sum (y^2) - \frac{(\sum y)^2}{n} \end{aligned}$$

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็นค่าที่แสดงว่าตัวแปร  $x$  มีอิทธิพลต่อตัวแปร  $y$  มากน้อยเพียงใด โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แสดงด้วย  $r^2$  โดยที่  $0 \leq r^2 \leq 1$  สรุปได้ดังนี้ [40, 41]

1. ช่วงความสัมพันธ์ระหว่าง -1 ถึง +1 สำหรับตัวแปรสองตัวคือ  $X$  และ  $Y$
2. ความสัมพันธ์ของ 0 (ตัวแปรที่ไม่สัมพันธ์กัน) บ่งชี้ว่าไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปร
3. ความสัมพันธ์เชิงบวกใกล้เคียงกับ +1 บ่งชี้ถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นเชิงบวก
4. ความสัมพันธ์ของ 1 บ่งชี้ถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นที่สมบูรณ์แบบ
5. ความสัมพันธ์เชิงลบใกล้เคียงกับ -1 บ่งชี้ถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นเชิงลบ
6. ความสัมพันธ์ของ -1 บ่งชี้ถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นผกผันที่สมบูรณ์แบบ
7. ถ้า  $r$  มีค่าใกล้ 1 แสดงว่า ตัวแปรสองตัวนั้นมีความสัมพันธ์กันมาก และมีทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ถ้า  $x$  มีค่ามาก  $y$  จะมีค่ามากด้วย
8. ถ้า  $r$  มีค่าใกล้ -1 แสดงว่า ตัวแปรสองตัวนั้นมีความสัมพันธ์กันมาก แต่มีทิศทางตรงข้ามกัน กล่าวคือ ถ้า  $x$  มีค่ามาก  $y$  จะมีค่าน้อย หรือ  $x$  มีค่าน้อย  $y$  จะมีค่ามาก
9. ถ้า  $r$  จะเข้าใกล้ 0 แสดงว่า  $x$  และ  $y$  มีความสัมพันธ์กันน้อย

การแปลความหมายค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์โดยทั่วไปนิยมใช้สัญลักษณ์ ( $r$ ) แทนสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของกลุ่มการบอกระดับหรือขนาดของความสัมพันธ์จะใช้ตัวเลขของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ หากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเข้าใกล้ -1 หรือ +1 แสดงถึงการมีความสัมพันธ์กันในระดับสูง แต่หากมีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงถึง การมีความสัมพันธ์กันในระดับน้อย หรือไม่มีเลย สำหรับการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ [42] สหสัมพันธ์โดยทั่วไปอาจใช้เกณฑ์ดังนี้ซึ่งอาจกำหนดได้ดังนี้

## ค่าสหสัมพันธ์

0.90 – 1.00

0.70 – 0.90

0.50 – 0.70

0.30 – 0.50

0.00 – 0.30

## ความหมาย

มีความสัมพันธ์กันมากที่สุด

มีความสัมพันธ์กันในระดับสูง

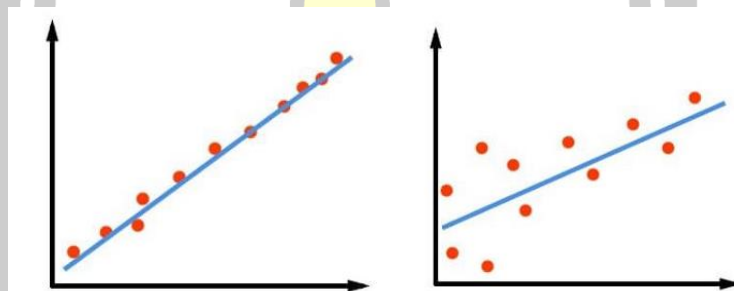
มีความสัมพันธ์กันในระดับปานกลาง

มีความสัมพันธ์กันในระดับต่ำ

มีความสัมพันธ์กันในระดับต่ำมาก

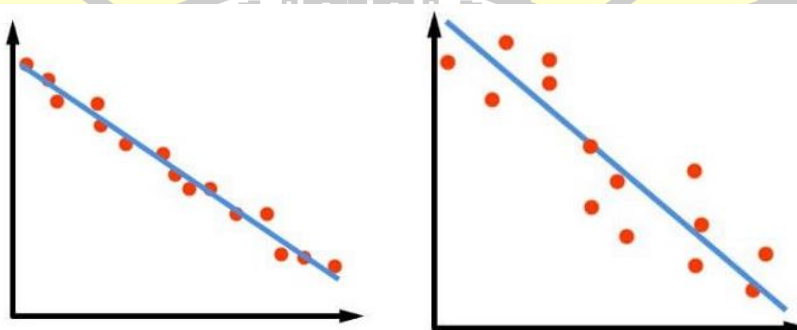
ลักษณะความสัมพันธ์ของตัวแปร 2 ตัว ที่แสดงถึงเฉพาะสหสัมพันธ์เชิงเส้นตรง สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

1. สหสัมพันธ์เชิงบวก (Positive Correlations) ซึ่งหมายความว่า เมื่อตัวแปรตัวหนึ่งเพิ่มหรือลดลงอีกตัวแปรหนึ่งก็จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงไปด้วย



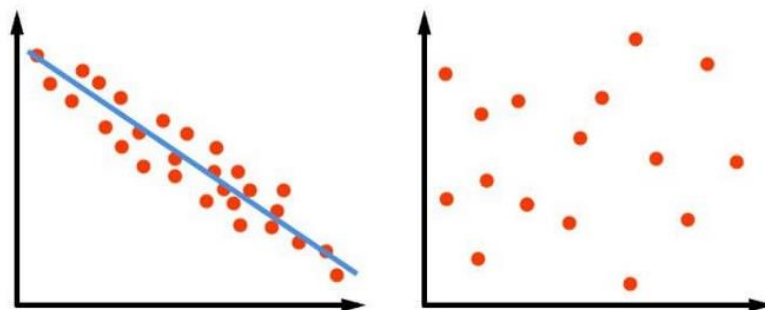
ภาพประกอบ 16 Strong positive correlation and Weak positive correlation [43]

2. สหสัมพันธ์เชิงลบ (Negative Correlations) หมายถึงเมื่อตัวแปรตัวหนึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงอีกตัวหนึ่งจะมีค่าเพิ่มหรือลดลงตรงข้ามเสมอ



ภาพประกอบ 17 Strong negative correlation and Weak negative correlation [43]

3. สหสัมพันธ์เป็นศูนย์ (Zero Correlations) หมายถึงตัวแปรสองตัวไม่มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน



ภาพประกอบ 18 Moderate negative correlation and No correlation [43]

#### 2.5.4 วิธีการคัดเลือกตัวแปร

การคัดเลือกตัวแปรในแต่ละวิธีนั้นจะมีความแตกต่างกันออกไปทั้งในวิธีการคัดเลือกตัวแปรและ ขั้นตอนในการคัดเลือกตัวแปร การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณ มีวัตถุประสงค์ในการพยากรณ์หรือทำนายตัวแปรที่ต้องการศึกษาด้วยการสร้างสมการพยากรณ์ โดยมีตัวแปรเกณฑ์ (Y) ที่เป็นตัวแปรต่อเนื่องเพียง 1 ตัว และตัวแปรพยากรณ์ (X) หลายตัวแปร ซึ่งเป็นข้อมูลในการวัดระดับมาตราส่วน หรือระดับช่วงหรือถ้าบางตัวแปรเป็นข้อมูลในระดับนามบัญญัติ หรือเรียงลำดับ ต้องปรับให้เป็นตัวแปรหุ่นก่อนทำการวิเคราะห์จากหลักการของการวิเคราะห์ถดถอยพหุคูณที่ใช้ตัวแปรพยากรณ์หลายตัวในการทำนายตัวแปรเกณฑ์ตัวเดียว ทำให้ตัวแปรพยากรณ์บางตัวที่ไม่มีส่วนในการอธิบายการผันแปรต่อตัวแปรเกณฑ์ไม่มีความสำคัญต่อสมการพยากรณ์ ดังนั้นวิธีการคัดเลือกตัวแปรพยากรณ์จึงมีความจำเป็นเพื่อให้ได้สมการพยากรณ์ที่ดีที่สุด

1. วิธีการเลือกแบบคัดเลือกเข้า (Enter Selection) วิธีการนี้จะเป็นการเลือกตัวแปรพยากรณ์เข้าสมการด้วยการวิเคราะห์เพียงขั้นตอนเดียว ซึ่งเป็นการคัดเลือกโดยใช้วิจารณ์ญาณของผู้วิจัยเองว่าจะคัดเลือกตัวแปรพยากรณ์ใดบ้างเข้าสมการ เริ่มตั้งแต่การคัดเลือกตัวแปรพยากรณ์มาศึกษา เมื่อคัดเลือกและเก็บข้อมูลแล้วทำการวิเคราะห์สถิติพื้นฐานและสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแต่ละคู่ก่อนและใช้สถิติพื้นฐานโดยเฉพาะค่าความแปรปรวนหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานกับค่าทดสอบนัยสำคัญของสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเกณฑ์กับตัวแปรพยากรณ์และระหว่างตัวแปรพยากรณ์ด้วยกันในการคัดเลือกควรคัดเลือกตัวแปรที่มีความแปรปรวนมากๆ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเกณฑ์กับตัวแปรพยากรณ์มีค่าสูงๆ และมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ระหว่างตัวแปรพยากรณ์ด้วยกันมีค่าน้อยและไม่มีความสำคัญทางสถิติ เมื่อคัดเลือกแล้วจะใช้ตัวแปรพยากรณ์ทุกตัวที่เลือกวิเคราะห์พร้อมๆ กันทุกตัวแปรเข้าสมการหมด

2. วิธีการเลือกแบบก้าวหน้า (Forward Selection) วิธีการนี้จะเป็นการเลือกตัวแปรพยากรณ์ที่มีสหสัมพันธ์กับตัวแปรตามสูงที่สุดเข้าสมการก่อน ส่วนตัวแปรที่เหลือจะมีการคำนวณหาสหสัมพันธ์แบบแยกส่วน (Partial Correlation) โดยเป็นความสัมพันธ์เฉพาะตัวแปรที่เหลือตัวนั้นกับตัวแปรตาม โดยขจัดอิทธิพลของตัวแปรอื่นๆ ออก ถ้าตัวแปรใดมีความสัมพันธ์กันสูงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติก็จะนำเข้าสมการต่อไป จะทำแบบนี้จนกระทั่งสหสัมพันธ์แบบแยกส่วนระหว่างตัวแปรอิสระที่ไม่ได้นำเข้าสมการแต่ละตัวกับตัวแปรตามมีความสัมพันธ์กันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ก็จะหยุดการคัดเลือกและได้สมการถดถอยที่มีสัมประสิทธิ์การพยากรณ์สูงสุด เช่น มีตัวแปรอิสระ 5 ตัวคือ  $X_1 - X_5$  โดยมีตัวแปรตาม  $y$  เริ่มแรกจะคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r_{xy}$ ) ระหว่างตัวแปร  $y$  กับตัวแปร  $x$  ทั้ง 5 ตัว ที่ละตัว แล้วเลือกตัวแปร  $X_i$  ที่มีค่า  $|r_{xy}|$  สูงสุด สมมติว่าตัวแปรที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มากที่สุดคือ  $X_2$  จึงได้ตัวแปร  $X_2$  เข้าสมการเป็นตัวแรก จากนั้นนำตัวแปรอิสระที่เหลือคือ  $X_1, X_3 - X_5$  หาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กับตัวแปร  $y$  ตัวแปรใดมีนัยสำคัญก็จะคัดเลือกตัวนั้นเข้าสมการ สมมติตัวแปรที่มีนัยสำคัญได้แก่  $X_1$  กับ  $X_5$  ส่วน  $X_3$  กับ  $X_4$  ไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้นจะได้สมการถดถอยคือ  $y = \beta_0 + \beta_1 \cdot 1 + \beta_2 \cdot 2 + \beta_5 \cdot 5$  จุดอ่อนของวิธีการนี้คือ อาจทำให้ได้ตัวแปรอิสระเข้าอยู่ในสมการถดถอยมากเกินไป ทั้งที่สามารถตัดออกไปได้จำนวนหนึ่ง

3. วิธีการเลือกแบบถอยหลัง (Backward Selection) วิธีการนี้เป็นการนำตัวแปรพยากรณ์ทั้งหมดเข้าสมการ จากนั้นก็จะค่อยๆ ขจัดตัวแปรพยากรณ์ออกทีละตัว โดยจะหาสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรพยากรณ์ที่อยู่ในสมการแต่ละตัวกับตัวแปรตาม เมื่อขจัดตัวแปรพยากรณ์อื่นๆ ออกแล้ว หากทดสอบค่าสหสัมพันธ์แล้วพบว่าไม่มีนัยสำคัญทางสถิติก็จะขจัดออกจากสมการแล้วดำเนินการทดสอบตัวแปรที่เหลืออยู่ในสมการต่อไป จนกระทั่งสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรพยากรณ์แต่ละตัวกับตัวแปรตาม เมื่อขจัดตัวแปรอิสระอื่นๆ ออกแล้วพบว่าไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ จะหยุดการคัดเลือกและได้สมการถดถอยที่มีสัมประสิทธิ์การพยากรณ์สูงสุด เริ่มจากสมการแรกจะตัดตัวแปรอิสระตัวที่มีสัมประสิทธิ์ถดถอยที่ทดสอบด้วย  $t$  หรือ Partial F-test แล้วไม่มีนัยสำคัญออกก่อน จากนั้นตรวจสอบว่าควรตัดตัวแปรใดออกจากสมการอีกหรือไม่ โดยอาจจะไม่มีการตัดตัวแปรออกก็เป็นไปได้ หากตัวแปรอิสระทั้งหมดที่อยู่ในสมการมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม หรือ อาจจะตัดออก 1 ตัวถ้าหากพบว่าตัวแปรนั้นไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม ทำเช่นนี้เรื่อยๆ ไปจนไม่สามารถตัดตัวแปรอิสระตัวใดออกจากสมการได้ จะได้สมการถดถอยที่เหมาะสมและให้ค่าสัมประสิทธิ์ ของการตัดสินใจพหุคูณสูงสุดแต่วิธีนี้มีข้อเสียที่มีความคลาดเคลื่อนมากกว่าวิธีการคัดเลือกเพิ่ม

4. วิธีการคัดเลือกแบบขั้นตอน (Stepwise Selection) การคัดเลือกแบบนี้เป็นการผสมผสานระหว่างวิธีการคัดเลือกตัวแปรพยากรณ์ทั้งแบบก้าวหน้าและแบบถอยหลังเข้าด้วยกัน ในขั้นแรกจะเลือกตัวแปรที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กับตัวแปรตามสูงที่สุดเข้าสมการก่อนจากนั้นก็ทดสอบตัวแปรที่ไม่ได้อยู่ในสมการว่ามีตัวแปรใดบ้างมีสิทธิ์เข้ามาอยู่ในการสมการด้วยวิธีการคัดเลือก

แบบก้าวหน้า (Forward Selection) และขณะเดียวกันก็จะทดสอบตัวแปรที่อยู่ในสมการด้วยว่า ตัวแปรพยากรณ์ที่อยู่ในสมการตัวใดมีโอกาสที่จะถูกขจัดออกจากสมการด้วยวิธีการคัดเลือกแบบถอยหลัง (Backward Selection) โดยจะกระทำการคัดเลือกผสมทั้งสองวิธีนี้ในทุกขั้นตอนจนกระทั่งไม่มีตัวแปรใดที่ถูกขจัดออกจากสมการและไม่มีตัวแปรใดที่จะถูกนำเข้าสู่สมการกระบวนการก็จะยุติและได้สมการถดถอยที่มีสัมประสิทธิ์การพยากรณ์สูงสุด เพื่อเป็นการแก้จุดอ่อนทั้งสองวิธี เป็นวิธีที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย โดยเริ่มต้นใช้หลักการของวิธี Forward นำตัวแปรอิสระเข้าสู่สมการครั้งละตัว โดยนำตัวแปรอิสระที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามสูงสุดและมีนัยสำคัญทดสอบด้วย  $t$  หรือ  $F$  เข้าสู่สมการก่อน จากนั้นทำการคัดเลือกตัวแปรอิสระตัวที่ 2 เข้าสู่สมการ โดยวิธี Forward เช่นเดิมซึ่งจะหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์บางส่วนระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระที่เหลือเพื่อคัดเลือก ตัวแปรอิสระตัวที่มีสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงสุดและมีนัยสำคัญเข้าสู่สมการ จากนั้นเลือกตัวแปรอิสระตัวที่ 3 ด้วยวิธี Forward และในขณะเดียวกันก็จะใช้หลักการของ Backward ในการตรวจสอบว่าควรตัดตัวแปรใดที่อยู่ในสมการถดถอยออกบ้าง จะกระทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนกระทั่งไม่สามารถเลือกตัวแปรอิสระใดเข้าสู่สมการและไม่สามารถตัดตัวแปรอิสระใดออกจากสมการได้อีก [41]

ข้อจำกัดของการวิเคราะห์สหสัมพันธ์

1. ตัวแปรสองตัวสามารถมีความสัมพันธ์ที่ต่ำมากแม้ว่าจะมีความสัมพันธ์ที่ไม่เชิงเส้นที่แข็งแกร่งก็ตาม
2. ความสัมพันธ์อาจเป็นหน่วยวัดที่ไม่น่าเชื่อถือเมื่อมีค่าผิดปกติในข้อมูล
3. ความสัมพันธ์อาจไม่ได้หมายความว่าสาเหตุ ซึ่งอาจเป็นความสัมพันธ์ที่ทำให้เกิดความเข้าใจผิด

#### 2.5.5 แบบจำลองถดถอยเชิงเส้นตรงแบบฉบับ (The Classical Linear Regression Model) [44]

ในการถดถอยเชิงเดี่ยวซึ่งเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองตัว โดยตัวแปรตามจะขึ้นอยู่กับตัวแปรอิสระที่เป็นตัวกำหนด สิ่งที่ต้องการคือการประมาณค่าพารามิเตอร์ของการถดถอยของประชากร สำหรับวิธีการประมาณพารามิเตอร์ที่นิยมนำมาใช้กันมากที่สุดคือ วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Method of Least Square: LS) วิธีกำลังสองน้อยที่สุดแบบธรรมดา (OLS) ถูกนำเสนอโดย Friedrich Gauss นักคณิตศาสตร์ชาวเยอรมัน โดยมีแนวคิดคือ ถ้าเส้นสมการในความเป็นจริง (Real Line) คือ  $E(y) = \beta_0 + \beta_1 x$  สมการดังกล่าวจะสามารถใช้แทนสมการที่แสดงความสัมพันธ์  $E(y) = \beta_0 + \beta_1 x + \mu_i$  ได้ดีก็ต่อเมื่อผลรวมของความคลาดเคลื่อน  $\sum \mu_i^2$  มีค่าต่ำที่สุด แต่เนื่องจาก  $\mu_i$  เป็นตัวแปรสุ่มที่วัดค่าไม่ได้ ดังนั้นจึงพิจารณาจากผลรวมกำลังสองของค่าประมาณของ

ความคลาดเคลื่อน (Error)  $\sum e_i^2$  มีค่าต่ำที่สุดแทน พิจารณาจาก แบบจำลอง Stochastic Specification หรือ PRF

$$Y_i = \beta_1 + \beta_2 x_i + \mu_i \quad (2.33)$$

เนื่องจาก PRF ไม่สามารถสังเกตค่าได้โดยตรง สิ่งที่ทำได้คือประมาณสมการถดถอยจากข้อมูลตัวอย่าง (The Sample Regression Function หรือ SRF) โดยจะได้

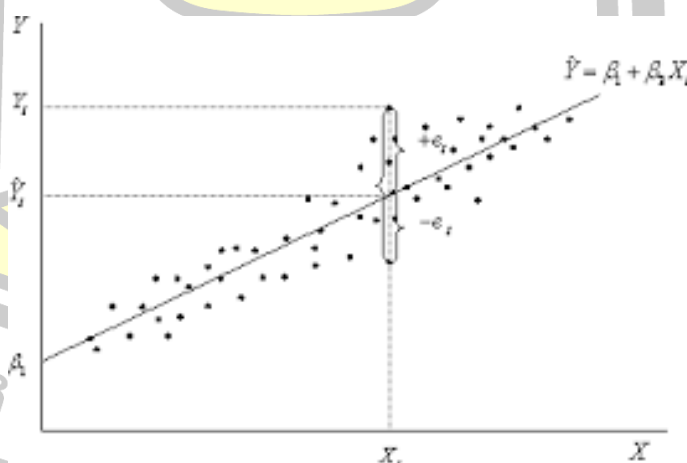
$$Y_i = \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 x_i + e_i \quad (2.34)$$

$$= \hat{Y}_i + e_i \quad (2.35)$$

โดยที่  $\hat{\beta}_1$  และ  $\hat{\beta}_2$  คือค่าประมาณที่อาศัยข้อมูลจากการสังเกตหรือตัวอย่างและเป็นตัวประมาณค่าของ  $\beta_1$  และ  $\beta_2$  และ  $\hat{Y}_i$  คือค่าที่ประมาณได้ของ  $Y_i$  จากสมการดังกล่าว สำหรับ  $e_i$  คือพจน์คลาดเคลื่อนหรือส่วนที่เหลือ (Residual Form) จากสมการ 2.28 แสดงในรูปส่วนที่เหลือจะได้

$$e_i = Y_i - \hat{Y}_i = Y_i - \hat{\beta}_1 - \hat{\beta}_2 x_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.36)$$

จากคำจำกัดความของ  $\hat{Y}_i$  และพิจารณาจากภาพประกอบ 19



ภาพประกอบ 19 ส่วนที่เหลือจากเส้นตรงที่เหมาะสม [44]

จากภาพประกอบ 19 มีข้อสังเกต 3 ประการ

1. การพิจารณาว่าเส้นสมการประมาณค่าใดเป็นเส้นสมการที่เหมาะสมที่สุด จะพิจารณาจากระยะห่างระหว่างค่าสังเกต (สนใจเฉพาะค่า  $Y$ ) จากกลุ่มตัวอย่างกับเส้นสมการประมาณค่าที่สมมติว่าเหมาะสมกับข้อมูลมากที่สุด (Assumed Best Fitted Line) ไม่ใช่ระยะห่างระหว่างค่าสังเกตจากกลุ่มตัวอย่างกับเส้นสมการจริง (True Line) ที่เป็นเช่นนี้เพราะเส้นสมการจริงเป็นเส้นสมการในอุดมคติซึ่งไม่สามารถทราบตำแหน่งที่แท้จริงได้

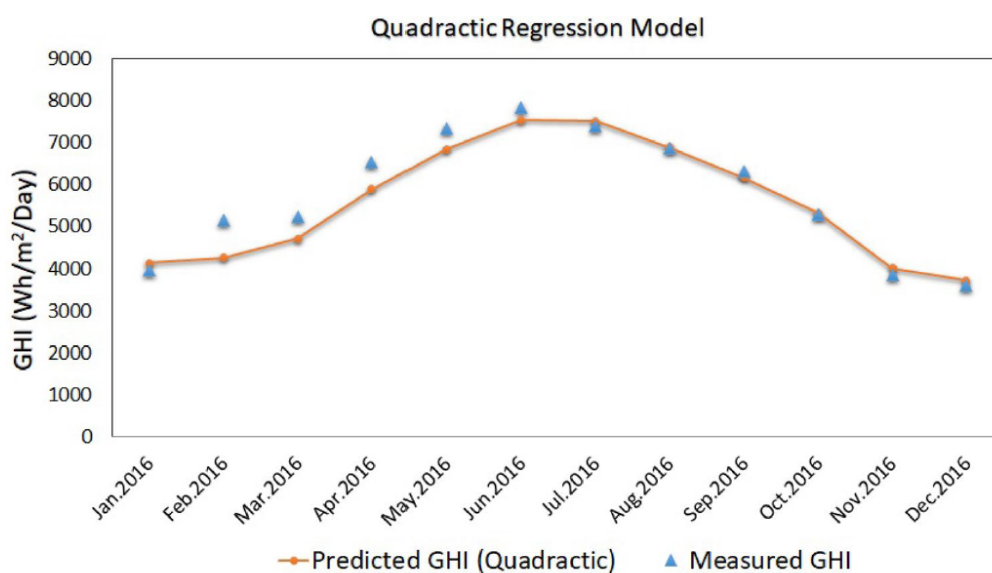
2. ระยะห่างระหว่างค่าสังเกต  $Y_i$  กับค่าประมาณจากสมการ  $\hat{Y}_i$  คือระยะทางที่วัดจากจุดพิกต์ของค่าสังเกตมายังเส้นสมการประมาณค่าตามแนวตั้งฉากกับแกน  $X$  หรือ  $e_i = Y_i - \hat{Y}_i$  เมื่อ  $i = 1, 2, \dots, n$  ถ้าจุดพิกต์อยู่เหนือเส้นสมการที่ประมาณได้จะถือว่า มีค่าเป็นบวก และถ้าจุดพิกต์อยู่ใต้สมการที่ประมาณได้  $e_i$  มีค่าเป็นลบ

3. สำหรับเส้นสมการที่ผ่านไปในกลุ่มของค่าสังเกตและเป็นสมการที่ประมาณได้ที่ดีนั้น หมายถึงจะต้องเป็นสมการที่อาศัยข้อมูลจากทุกค่าสังเกตทุกจุดและต้องสนใจทั้งค่าบวกและค่าลบ พิจารณาจากรูปจะเห็นว่า ส่วนที่เหลือวัดได้จากระยะทางตามแนวตั้ง โดยค่าของ  $\hat{\beta}_1$ ,  $\hat{\beta}_2$  ที่แตกต่างกันจะให้เส้นตรงที่แตกต่างกันและจะให้เซตของส่วนที่เหลือที่แตกต่างกันไปด้วย ดังนั้นผลรวมกำลังสองของส่วนที่เหลือ (Residual Sum Square: RSS) จึงเป็นฟังก์ชันของ  $\hat{\beta}_1$  และ  $\hat{\beta}_2$  การประมาณ  $\hat{\beta}_1$  และ  $\hat{\beta}_2$  และ  $\sigma^2$  ตามแนวคิดของวิธีกำลังสองน้อยที่สุดจะต้องเลือก SRF หรือ  $\hat{\beta}_1$  และ  $\hat{\beta}_2$  ที่ทำให้ผลรวมกำลังสองของส่วนที่เหลือ (RSS) มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

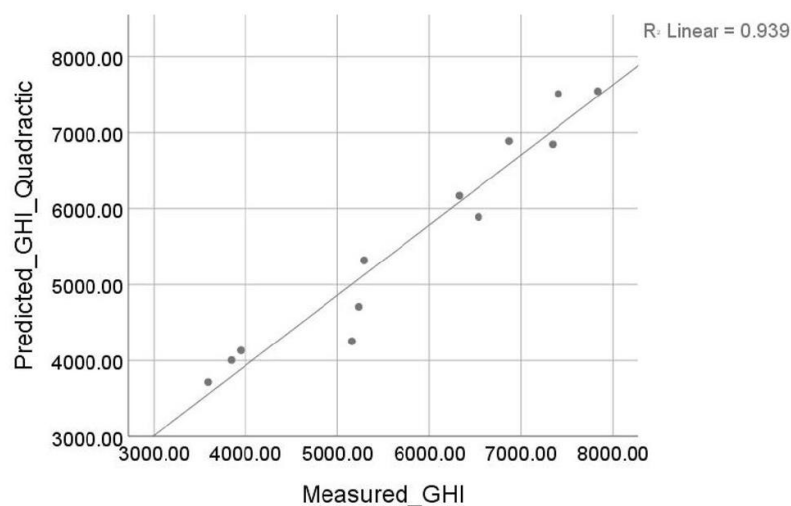
## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. นักวิจัยชื่อ Sheik Mujabar and Rao Chintaginjala Venkateswara [45] ได้นำเสนอการสร้างและตรวจสอบแบบจำลองการถดถอยบางตัว (สมการเชิงเส้น สมการกำลังสอง และสมการลอการิทึม) สำหรับการประมาณค่ารังสีดวงอาทิตย์รายเดือนในเขตอุตสาหกรรมของเมืองจูเบลประเทศซาอุดีอาระเบีย ในการศึกษาได้มีการพัฒนาแบบจำลองสมการถดถอยสามแบบ ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์อุตุนิยมวิทยาที่สำคัญ เช่น อุณหภูมิแวดล้อม ชั่วโมงแสงแดด และความชื้นสัมพัทธ์ เพื่อประเมินศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ของเมืองอุตสาหกรรม จากการทดสอบพบว่าสมการถดถอยที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ ) สูงสุดตามลำดับคือคือสมการกำลังสอง สมการเชิงเส้น สมการลอการิทึม มีค่าเท่ากับ 0.962, 0.945 และ 0.939 สำหรับสมการถดถอยที่ให้ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนดการตัดสินใจ ( $R^2$ ) สูงสุดตามลำดับคือคือสมการกำลังสอง สมการเชิงเส้น สมการลอการิทึม มีค่าเท่ากับ 0.925, 0.894 และ 0.882 ตามลำดับ โดยสมการกำลังสองมีค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาด

สัมบูรณ์ (MAPE) น้อยที่สุดคือ 6.17% ส่วนสมการที่มีค่าเฉลี่ยของร้อยละความผิดพลาดสัมบูรณ์มากที่สุดคือ สมการลอการิทึมซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.4%



ภาพประกอบ 20 การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่คำนวณได้จากสมการกำลังสองและค่าที่วัดได้จริง[45]



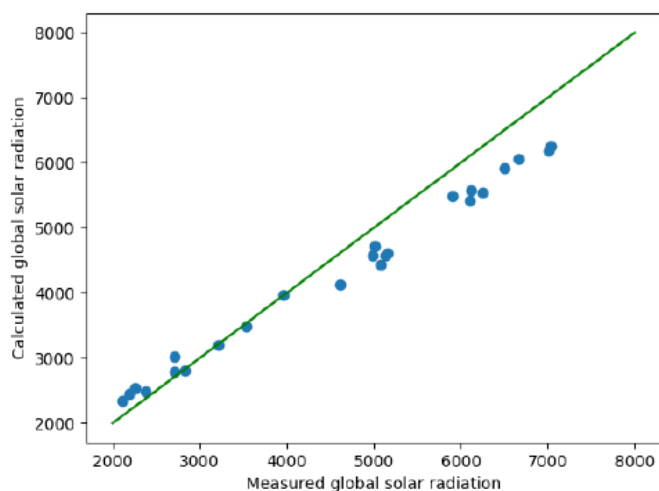
ภาพประกอบ 21 กราฟการกระจายข้อมูลแนวโน้มการเป็นเชิงเส้นของสมการกำลังสอง [45]

| Statistical parameters                    | Empirical models |           |             |
|-------------------------------------------|------------------|-----------|-------------|
|                                           | Linear           | Quadratic | Logarithmic |
| Correlation coefficient ( $r$ )           | 0.945            | 0.962     | 0.939       |
| Coefficient of determination ( $R^2$ )    | 0.894            | 0.925     | 0.882       |
| Root-mean-square error (RMSE)             | 469.81           | 393.73    | 494.17      |
| Mean bias error (MBE)                     | 2.05E-02         | 5.82E-05  | -1.9696     |
| Mean absolute bias error (MABE)           | 391.66           | 313.85    | 423.04      |
| Mean absolute percentage error (MAPE) (%) | 7.89             | 6.17      | 8.4         |

ภาพประกอบ 22 พารามิเตอร์ในการตรวจสอบค่าทางสถิติ [45]

2. กลุ่มนักวิจัยชื่อ Badr Benamrou, Ouardouz Mustapha, Imane Allaouzi and Mohamed Ben Ahmed [46] ได้นำเสนอการสร้างและตรวจสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้ง 11 สมการ เพื่อหาแบบจำลองที่ดีที่สุด สำหรับการประมาณค่ารังสีอาทิตย์ของเมือง Al Hoceima ของประเทศโมร็อกโก โดยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นประกอบไปด้วย แบบจำลองที่อาศัยความยาวนานของแสงแดด ประกอบไปด้วยแบบจำลองของ Angstrom-Prescott แบบจำลองของ Ögelman, Ecevit and Tasdemiroglu แบบจำลองของ Samuel แบบจำลองของ Almorox and Hantoria และแบบจำลองของ Bakirci ส่วนแบบจำลองที่อาศัยอุณหภูมิอากาศประกอบไปด้วย แบบจำลองของ Hargreaves แบบจำลองของ Chen แบบจำลองของ Pandey and Katiyar ส่วนแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเป็นแบบจำลองที่อาศัยความยาวนานของแสงแดด ใช้ข้อมูลตั้งแต่ปี ค.ศ. 2010 – 2015 และเปรียบเทียบกับรังสีอาทิตย์ที่วัดได้ในปี ค.ศ. 2016 – 2017 ผลการศึกษาพบว่าสมการที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้น (สมการที่ 11) เพื่อประมาณค่ารังสีอาทิตย์โดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิตามปี ค.ศ. 2010 - 2015 มีค่าใกล้เคียงกับรังสีอาทิตย์ที่วัดได้จริงในปี ค.ศ. 2016 – 2017 โดยมีค่า RMSE = 468.76 ค่า MAPE = 8.12 และ  $R^2 = 0.92$  ซึ่งเป็นสมการที่ดีที่สุดสำหรับการประมาณค่ารังสีอาทิตย์ของเมือง Al hoceima ประเทศโมร็อกโก

พหุ ประถมศึกษา



ภาพประกอบ 23 เปรียบเทียบระหว่างค่าที่คำนวณได้จากสมการที่พัฒนามกับค่าที่วัดได้ [46]

| Model                                                                                                                                               | RMSE          | MAPE        | R <sup>2</sup> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-------------|----------------|
| 1. $\frac{H}{H_0} = 0,488 + 0,184 \cdot \frac{S}{S_0}$                                                                                              | 527,86        | 8,67        | 0,898          |
| 2. $\frac{H}{H_0} = -0,0451 - 1,225 \cdot \frac{S}{S_0} - 0,5787 \cdot (\frac{S}{S_0})^2$                                                           | 502           | 8,39        | 0,908          |
| 3. $\frac{H}{H_0} = 0,877 - 3,256 \cdot \frac{S}{S_0} + 6,524 \cdot (\frac{S}{S_0})^2 - 3,686 \cdot (\frac{S}{S_0})^3$                              | <b>496,1</b>  | <b>8,34</b> | <b>0,91</b>    |
| 4. $\frac{H}{H_0} = 0,267 \cdot \exp[0,965 \cdot \frac{S}{S_0}]$                                                                                    | 510,87        | 8,49        | 0,904          |
| 5. $\frac{H}{H_0} = 0,657 \cdot (\frac{S}{S_0})^{0,622}$                                                                                            | 536,35        | 8,76        | 0,89           |
| 6. $\frac{H}{H_0} = 0,3056 + 0,636 \cdot \log(\frac{S}{S_0})$                                                                                       | 520,73        | 8,6         | 0,901          |
| 7. $\frac{H}{H_0} = 0,169 \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5}$                                                                                          | 607,9         | 11,1        | 0,865          |
| 8. $\frac{H}{H_0} = 0,0771 + 0,339 \cdot \log(T_{max} - T_{min})$                                                                                   | 597,8         | 10,2        | 0,869          |
| 9. $\frac{H}{H_0} = 0,985 - 0,481 \cdot \frac{T_{max}}{T_{min}} + 0,114 \cdot (\frac{T_{max}}{T_{min}})^2$                                          | 560,18        | 9,31        | 0,88           |
| 10. $\frac{H}{H_0} = 2,38 - 2,61 \cdot \frac{T_{max}}{T_{min}} + 1,157 \cdot (\frac{T_{max}}{T_{min}})^2 - 0,164 \cdot (\frac{T_{max}}{T_{min}})^3$ | 583,58        | 9,51        | 0,87           |
| 11. $\frac{H}{H_0} = 3,167 + \cos(\frac{S}{S_0} + 131,93) - 1,31 \cdot \cos(2 \cdot \frac{S}{S_0} + 131,9) + 1,67$                                  | <b>468,76</b> | <b>8,12</b> | <b>0,92</b>    |

ภาพประกอบ 24 ผลลัพธ์ทางสถิติของค่าสหสัมพันธ์ [46]

3. กลุ่มนักวิจัยชื่อ Nedjma Abdelhafidi, Nour El Islam Bachari and Zohra Abdelhafidi [47] ได้ศึกษาวิธีการประมาณค่ารังสีอาทิตย์ภายในประเทศแอลจีเรีย โดยใช้การวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณแบบเป็นขั้นตอน โดยการเลือกความสัมพันธ์ที่ดีที่สุด โดยใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาของสถานีโอแรนย้อนหลัง 29 ปี ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1986 – 2014 ซึ่งประกอบไปด้วย การ

ระเหยของน้ำ อุณหภูมิอากาศ ความเร็วลม ทิศนวิสัย เมฆปกคลุม ระยะเวลาแสงแดด อัตราส่วนแสงแดด และรังสีดวงอาทิตย์ทั่วโลก ในการทำนายรังสีดวงอาทิตย์ทั่วโลก ซึ่งใช้เทคนิค PCA แบบหลายมิติและแบบขั้นตอน วิธี MLR ของโปรแกรม MATLAB เพื่อเลือกตัวแปรสหสัมพันธ์ที่เพิ่มเป็นตัวทำนายในสมการถดถอย

|            | Temp (C) | Vis (km) | Evap (mm)     | Win (m/s) | Clo (Octa) | ss (h/day) | S             | K             |
|------------|----------|----------|---------------|-----------|------------|------------|---------------|---------------|
| Temp (C)   | 1        | -0.0306  | <b>0.8303</b> | 0.1152    | -0.2034    | 0.4037     | 0.1743        | -0.1349       |
| Vis (km)   |          | 1        | -0.2888       | 0.1750    | -0.1283    | 0.1653     | 0.1872        | 0.0903        |
| Evap (mm)  |          |          | 1             | -0.0232   | -0.0383    | 0.1876     | -0.0104       | -0.2242       |
| Win (m/s)  |          |          |               | 1         | 0.1680     | 0.0400     | -0.0361       | -0.1830       |
| Clo (Octa) |          |          |               |           | 1          | -0.7494    | -0.7517       | -0.5889       |
| ss (h/day) |          |          |               |           |            | 1          | <b>0.9251</b> | <b>0.6099</b> |
| S          |          |          |               |           |            |            | 1             | <b>0.8247</b> |
| K          |          |          |               |           |            |            |               | 1             |

ภาพประกอบ 25 สหสัมพันธ์ของตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา [47]

สถานการณ์แรกใช้ชุดข้อมูลภูมิอากาศทั้งหมด แต่สถานการณ์สุดท้ายใช้ชุดย่อยสามชุด ได้แก่ วันที่มีแดดจัด วันที่มีเมฆเป็นบางส่วน และมีเมฆมาก ที่เป็นผลลัพธ์ของขั้นตอนการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณที่มีความเหมาะสม การจัดหมวดหมู่นี้ได้มาโดยใช้คุณสมบัติทางสถิติบางอย่างที่ผู้วิจัยพิจารณาว่าเป็นเกณฑ์การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณแบบขั้นตอนจะใช้เพื่อให้พอดีกับข้อมูลรังสีดวงอาทิตย์ทั่วโลกโดยใช้ตัวแปรอุตุนิยมวิทยาเป็นตัวทำนาย ใช้วิธีการเลือกตัวแปรตามเทคนิค PCA เพื่อให้ได้ชุดย่อยของตัวทำนายที่จะรวมอยู่ในแบบจำลองการถดถอยของข้อมูลรังสีดวงอาทิตย์ทั่วโลก ซึ่งสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับการประมาณค่ารังสีอาทิตย์มีดังนี้

สมการวันที่มีแดดจ้า

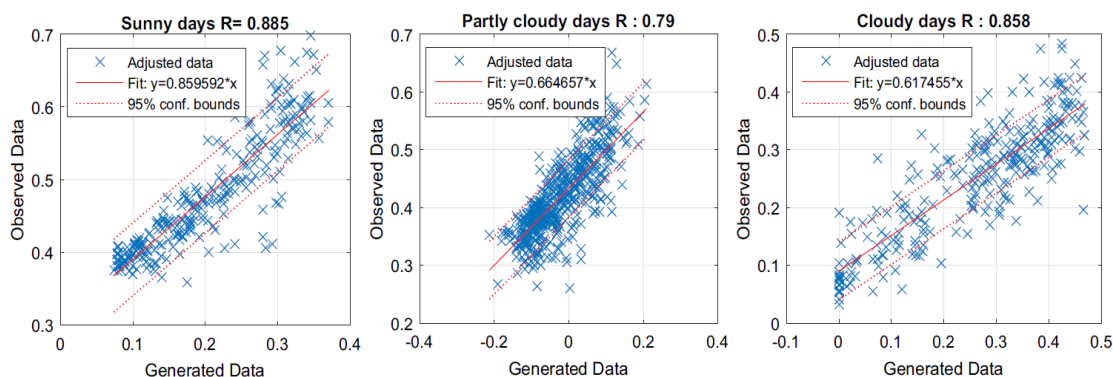
$$K_{sun} = 0.3044 - 0.056Clo + 0.85S + (-0.054 + 0.0041Clo)ss.$$

สมการวันที่มีเมฆบางส่วน

$$K_{par} = 0.4329 - 0.0442Clo + 0.612S + (-0.051 + 0.0035Clo)ss.$$

สมการวันที่มีเมฆมาก

$$K_{clou} = 0.09 - 0.0137Clo + 0.6173ss.$$



ภาพประกอบ 26 การกระจายระหว่างรังสีดวงอาทิตย์รายวันโดยการประมาณโดยใช้พารามิเตอร์ทางอุตุนิยมวิทยาและการวัดรังสีดวงอาทิตย์รายวัน[47]

4. นักวิจัยชื่อ Hairuniza Ahmed Kutty, Muhammad Hazim Masral and Parvathy Rajendran [48] ได้นำเสนอวิธีการประมาณค่ารังสีอาทิตย์ในประเทศมาเลเซีย ด้วยแบบจำลองการถดถอยแบบจำลองนี้ได้รับการพัฒนาโดยอิงตามพารามิเตอร์ทางอุตุนิยมวิทยาต่างๆ จากอุตุนิยมวิทยาภายในประเทศของปี ค.ศ. 2013 ประกอบไปด้วย อุณหภูมิ เมฆที่ปกคลุม ปริมาณน้ำฝน ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม ความดันและความเร็วลมกระโชก โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอย รวมไปถึงการวิเคราะห์ผลกระทบของพารามิเตอร์การทำนายแต่ละรายการเพื่อระบุพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการประมาณค่าการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ทั่วโลก นอกจากนี้แบบจำลองที่เสนอจะถูกเปรียบเทียบกับแง่ของความคลาดเคลื่อนกำลังสองของราก (RMSE) ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (MBE) และสัมประสิทธิ์ของการกำหนด ( $R^2$ ) กับแบบจำลองอื่นๆ ในสมการที่ 1 – 7 จะอยู่ในรูปแบบของแบบจำลองพารามิเตอร์เดียว ส่วนสมการที่ 8 – 12 จะอยู่ในรูปแบบหลายพารามิเตอร์

โดยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีค่า RMSE มีตั้งแต่ 0.429 - 1.774%,  $R^2$  ตั้งแต่ 0.942 - 0.992 และ MBE ตั้งแต่ -0.1571 - 0.6025% ในแบบจำลองที่ 12 เป็นแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยใช้หลายพารามิเตอร์ประกอบด้วยอุณหภูมิ ความกดอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณน้ำฝน และความเร็วลม ให้ความแม่นยำสูงสุดที่  $R^2$  เท่ากับ 0.9884 โดยทั่วไปเมฆปกคลุมส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการประมาณการการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ทั่วโลก อย่างไรก็ตามเมฆปกคลุมในมาเลเซียไม่มีอิทธิพลเพียงพอเมื่อรวมไว้ในแบบจำลองหลายพารามิเตอร์ แม้ว่าทำงานได้ดีในแบบจำลองการทำนายแบบพารามิเตอร์เดียว

TABLE 2: Single-parameter PM equations.

| PM | Equation                                                                                                                                                            |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | $Y = 213.243 + 18.672 \cos(901554.887T) + 13.732 \sin(17.845T)$                                                                                                     |
| 2  | $Y = 267.782 + \frac{2.473 \sin(1.506 \times 10^5 C)}{C} - 169.159C - 17.668 \tan^{-1}(\sin 219.461C)$                                                              |
| 3  | $Y = 207.566 + \frac{1.514}{\cos(1961943.716R)} + 16.482 \cos(2.576 + 975194.98R)$                                                                                  |
| 4  | $Y = 953.936 + 8.536 \cos(78081.727RH) + 20.787 \cos^{-1}(\cos(78081.727RH))$<br>$+ 1.316 \cos^{-1}(\cos(80773993.418RH)) \cos^{-1}(\cos(78233.941RH)) - 956.722RH$ |
| 5  | $Y = 1622.347W + 1999.162 \sin(2.254 - W) - 3597.764 - 0.732 (1.9766W)^{W^2} \sin^{-1}(\sin - 3044.045W)$                                                           |
| 6  | $Y = 204.545 + 15.2199 \cos(-0.0899P) + 10.546 \cos(\tan^{-1}(8.115 \cos(206.438P) \cos(9.763P))) - 26.078 \sin(\cos(12.527P))$                                     |
| 7  | $Y = 208.035 + 11.505 \sin(91370.597G) - 24.358 \cos(2990.397G)$                                                                                                    |

ภาพประกอบ 27 แบบจำลองที่ใช้พารามิเตอร์เดียว[48]

TABLE 4: Equations for multiple-parameter PMs.

| PM | Equation                                                                                                                |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 8  | $Y = 2310278.115 (\sqrt{R}) - 9.452T - 27602.401 (C) (R) - 279229.399 (RH) (R) - 2292541.353 \tan^{-1}(\sin(\sqrt{R}))$ |
| 9  | $Y = T \sin(T) + 188.456 (T) (\sqrt{R}) + 108.365 (C) (W)^2 - 11284.827 (C) (\sqrt{R})$                                 |
| 10 | $Y = 2709.379 + 130.465W + 11.298T + 4.49791T \log(R) - 2918.485(RH)$                                                   |
| 11 | $Y = 162.533 + 302019.617R + 19.675 \sin(T) - 118.049C - 351920.43 (R) (RH)$                                            |
| 12 | $Y = 46327.0656R + 0.0286P + 0.011 (131.713)^W - 12.813T - 3137.320 (RH) - 1831839.527 (RH)^2$                          |

ภาพประกอบ 28 แบบจำลองที่ใช้หลายพารามิเตอร์เดียว[48]

TABLE 5: RMSE, MBE, and  $R^2$  of multiple-parameter PMs.

| PM | RMSE (%) | MBE (%) | $R^2$  |
|----|----------|---------|--------|
| 8  | 1.7431   | 0.6025  | 0.9520 |
| 9  | 1.5492   | 0.3090  | 0.9621 |
| 10 | 1.2130   | 0.2679  | 0.9768 |
| 11 | 2.0228   | 0.4691  | 0.9354 |
| 12 | 0.8561   | 0.2822  | 0.9884 |

ภาพประกอบ 29 การตรวจสอบแบบจำลองด้วยวิธีทางสถิติ[48]

5. นักวิจัยชื่อ Kacem Gairaa and Yahia Bakelli [49] ได้ดำเนินการเปรียบเทียบสมการสำหรับประมาณค่ารังสีอาทิตย์โดยใช้ข้อมูลสภาพอากาศจากอุตุนิยมหาวิทยาลัยของเมืองการ์ตาเบีย ประเทศแอลจีเรีย สำหรับสมการที่นำมาประยุกต์ใช้ในการประมาณค่ารังสีอาทิตย์ประกอบไปด้วยแบบจำลองของ Angstrom-Prescott แบบจำลองสมการกำลังสอง (O'gelman et al.'s) แบบจำลองลอการิทึม (Ampratwum et al.'s) แบบจำลองเอกซ์โพเนนเชียล (Almorox et al.'s Model) แบบจำลอง Abdalla's Model แบบจำลอง Ojosu and Komolafe's แบบจำลอง Hargreaves et al.'s ทั้ง 7 แบบจำลองจะใช้ข้อมูลทางอุตุนิยมหาวิทยาลัยคือ ระยะเวลายาวนานของแสงแดด อุณหภูมิ

อากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ จากผลการวิจัยพบว่าแบบจำลองที่ให้ความแม่นยำสูงสุดที่ใช้ตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยาเพียงระยะความยาวนานของแสงแดดตัวแปรเดียวคือ แบบจำลองสมการกำลังสองของ O'gelman et al.'s มีค่า CC เท่ากับ 0.787 ค่า RMSE เท่ากับ 0.0451 และ ค่า MBE เท่ากับ -0.0007 ส่วนแบบจำลอง ส่วนแบบจำลองที่ให้ความแม่นยำสูงสุดที่ใช้ทั้งระยะความยาวนานของแสงแดด อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์คือ ) แบบจำลอง Abdalla's Model แบบจำลอง Ojoso and Komolafe's มีค่า CC ที่ 0.898 และ 0.892 ตามลำดับ และช่วงข้อผิดพลาดสัมพัทธ์อยู่ระหว่าง -0.289 % ถึง 0.639 %

TABLE 6: Comparison between measured and estimated monthly global solar radiation (Wh/m<sup>2</sup>).

|           | Measured | Linear  | e (%)  | Quadratic | e (%)  | Logarithmic | e (%)  | Exponential | e (%)  |
|-----------|----------|---------|--------|-----------|--------|-------------|--------|-------------|--------|
| January   | 3871     | 3879.75 | -0.226 | 3924.54   | -1.383 | 4054.48     | -4.74  | 3812.38     | 1.514  |
| February  | 4842     | 4768.92 | 1.509  | 4746.43   | 1.974  | 5229.17     | -7.996 | 4693.99     | 3.057  |
| March     | 5926     | 5836.64 | 1.508  | 5863.69   | 1.051  | 6176.79     | -4.232 | 5735.38     | 3.217  |
| April     | 7339     | 7346.01 | -0.096 | 7393.31   | -0.74  | 7779.2      | -5.998 | 7261.09     | 1.062  |
| May       | 7745     | 7745.06 | -0.001 | 7809.96   | -0.839 | 8203.51     | -5.92  | 7617.16     | 1.651  |
| June      | 7812     | 7826.41 | -0.184 | 7930.14   | -1.512 | 8239.29     | -5.47  | 7699.28     | 1.443  |
| July      | 7503     | 7492.63 | 0.138  | 7484.43   | 0.248  | 7985.6      | -6.432 | 7437.93     | 0.867  |
| August    | 7090     | 7224.91 | -1.903 | 7377.84   | -4.06  | 7576.91     | -6.868 | 7191.04     | -1.425 |
| September | 6036     | 6024.21 | 0.195  | 6054.37   | -0.304 | 6371.7      | -5.562 | 5898.47     | 2.278  |
| October   | 4824     | 4821.02 | 0.062  | 4869.69   | -0.947 | 5128.76     | -6.318 | 4737.96     | 1.784  |
| November  | 4030     | 4026.13 | 0.096  | 3978.2    | 1.285  | 4224.29     | -4.821 | 3963.04     | 1.662  |
| December  | 3437     | 3427.06 | 0.289  | 3626.54   | -5.515 | 3728.76     | -8.489 | 3349.42     | 2.548  |

ภาพประกอบ 30 การเปรียบเทียบระหว่างค่าที่วัดได้จริงกับค่าที่ประมาณการจากแบบจำลอง[49]

TABLE 7: Annual validation of different models.

|                   | a     | b     | c        | d        | CC    | RMSE   | MBE      |
|-------------------|-------|-------|----------|----------|-------|--------|----------|
| Linear            | 0.420 | 0.363 |          |          | 0.785 | 0.0453 | -0.0012  |
| Quadratic         | 0.403 | 0.446 | -0.0737  |          | 0.787 | 0.0451 | -0.0007  |
| Logarithmic       | 0.701 | 0.106 |          |          | 0.627 | 0.0792 | 0.0281   |
| Exponential       | 0.264 | 0.198 |          |          | 0.763 | 0.0511 | -0.0182  |
| Abdalla           | 0.519 | 0.357 | -0.0018  | -0.00126 | 0.898 | 0.0429 | -0.00059 |
| Ojoso et al.      | 0.449 | 0.358 | -0.00445 | -0.00619 | 0.892 | 0.0443 | -0.00068 |
| Hargreaves et al. | 0.261 | 0.115 |          |          | 0.431 | 0.0883 | -0.00073 |

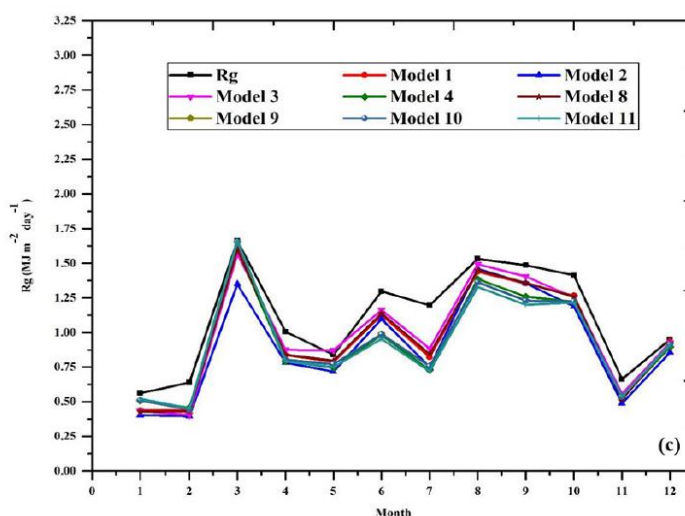
ภาพประกอบ 31 การตรวจสอบทางสถิติของแบบจำลองต่างๆ[49]

6. กลุ่มนักวิจัยชื่อ Shaban G. Gouda, Zakia Hussein, Shuai Luo, Panpan Wang, Hongliang Cao and Qiaoxia Yuan [50] ได้ศึกษาและนำเสนอแบบจำลองสำหรับประมาณค่ารังสีอาทิตย์ ที่มินักวิจัยพัฒนามาแล้วทั้งหมด 7 รูปแบบ และแบบจำลองที่คณะวิจัยนำเสนอใหม่ 4 รูปแบบ เพื่อเปรียบเทียบรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยรายวัน และรายเดือนในเมืองหวู่ฮั่น ประเทศจีน โดยใช้ข้อมูลจากอุตุนิยมวิทยาที่ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2006 – 2011 แบบจำลองที่ถูกนำมาใช้ในการประมาณค่ารังสีอาทิตย์ทั้ง 7 รูปแบบมีดังนี้ 1. แบบจำลองของ Angstrom-Prescott 2. แบบจำลองของ Bahel 3. แบบจำลองของ Chen and Li 4. แบบจำลองของ Ododo 5. แบบจำลองของ Li Huashan 6.

แบบจำลองของ Li และ 7. แบบจำลองของ Badescu ส่วนแบบจำลองที่กลุ่มนักวิจัยพัฒนาขึ้นมาใหม่ ทั้ง 4 รูปแบบ เพื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองรุ่นเดิมประกอบด้วย แบบจำลองที่พัฒนาจากสมการถดถอยในแบบจำลองที่ 8 ใช้ตัวแปรอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew point temperature) แบบจำลองที่ 9 ใช้ตัวแปรความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) แบบจำลองที่ 10 ใช้ตัวแปรอุณหภูมิจุดน้ำค้าง ร่วมกับความชื้นสัมพัทธ์ และแบบจำลองที่ 11 ใช้ตัวแปรอุณหภูมิจุดน้ำค้าง, ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิเฉลี่ย ผลการวิจัยปรากฏว่าลักษณะทางอุตุนิยมวิทยาที่สำคัญต่อการประมาณค่ารังสีอาทิตย์ที่เมืองห้วยอัน ประเทศจีน คือระยะเวลาแสงแดดเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการประมาณค่ารังสีอาทิตย์ รวมไปถึงอุณหภูมิจุดน้ำค้างยังส่งผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ แบบจำลอง Chen และ Li ที่เป็นแบบจำลองรุ่นเดิมยังให้ผลลัพธ์ในการประมาณค่ารังสีดวงอาทิตย์ได้แม่นยำที่สุด ส่วนแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นและให้ผลลัพธ์ในการประมาณค่ารังสีดวงอาทิตย์ได้แม่นยำที่สุด คือแบบจำลองที่ 8 ที่เป็นแบบจำลองพัฒนามาจากสมการถดถอยและใช้ตัวแปรอุณหภูมิจุดน้ำค้างในการคำนวณ

| Models | RMSE ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ) | MABE ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ) | $U_{95}$ | $r$    |
|--------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|----------|--------|
| 1      | 0.1645                                       | 0.1378                                       | 0.3711   | 0.9721 |
| 2      | 0.2222                                       | 0.1993                                       | 0.4797   | 0.9634 |
| 3      | 0.1469                                       | 0.1225                                       | 0.3400   | 0.9729 |
| 4      | 0.2121                                       | 0.1773                                       | 0.4792   | 0.9478 |
| 5      | 0.3927                                       | 0.3009                                       | 1.1100   | 0.5326 |
| 6      | 0.3633                                       | 0.2700                                       | 0.9747   | 0.5610 |
| 7      | 0.7384                                       | 0.5024                                       | 1.9640   | 0.2050 |
| 8      | 0.1612                                       | 0.1382                                       | 0.3589   | 0.9761 |
| 9      | 0.2077                                       | 0.1703                                       | 0.4742   | 0.9457 |
| 10     | 0.2085                                       | 0.1703                                       | 0.4771   | 0.9444 |
| 11     | 0.2259                                       | 0.1829                                       | 0.5206   | 0.9307 |

ภาพประกอบ 32 การตรวจสอบแบบจำลองทั้ง 11 แบบ ด้วยวิธีการวัดค่าทางสถิติ



ภาพประกอบ 33 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองกับค่าที่วัดได้จริง

7. กลุ่มนักวิจัยชื่อ Hussein A.Kazem, Miqdam T.Chaichan, Ali H.A.Al-Waeli and K.Sopian [51] ได้ศึกษาผลของฝุ่นละอองและวิธีการทำความสะอาดที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยวและผลึกรวม ซึ่งเป็นการศึกษาเชิงทดลองภายในอาคาร โดยการศึกษาดังกล่าวได้นำวิธีการตรวจสอบผลกระทบของแต่ละส่วนประกอบมาแยกกันซึ่งเกี่ยวกับประสิทธิภาพของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์และโพลีคริสตัลไลน์ การศึกษาได้สรุปเรื่องฝุ่นมีผลกระทบต่อโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์และผลกระทบของฝุ่นจะแตกต่างกันไปในแต่ละภูมิภาคขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของฝุ่นและผลกระทบของฝุ่นบนโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ยังแตกต่างกันไปตามประเภทและเทคโนโลยีของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ โดยวัตถุประสงค์หลักของการศึกษานี้ได้การศึกษาทดลองเพื่อตรวจสอบผลกระทบขององค์ประกอบฝุ่นและวิธีการทำความสะอาดที่แตกต่างกันต่อประสิทธิภาพของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ทั้งสองโมดูลที่ใช้เทคโนโลยีผลึกแบบโมโนคริสตัลไลน์และโพลีคริสตัลไลน์ โดยฝุ่นละอองที่นำมาใช้ในการทดสอบครั้งนี้ เป็นการเก็บตัวอย่างจากสถานที่ 5 แห่งของประเทศโอมาน โดยตัวอย่างฝุ่นละอองถูกเก็บเป็นเวลาสองเดือนและใช้ในการทดลองในอาคาร

สำหรับประเด็นที่มีผลต่อการศึกษเกี่ยวกับเรื่องผลของฝุ่นและวิธีการทำความสะอาดที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์แบบผลึกเดี่ยวและผลึกรวม มีดังต่อไปนี้

1. การสัมผัสกับสภาวะภายนอกทำให้เกิดการสะสมของฝุ่น ส่งผลให้พลังงานที่ผลิตได้เสื่อมสภาพตามสัดส่วนที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาการสัมผัสและตำแหน่งทางภูมิศาสตร์
2. สภาพอากาศอื่นๆ เช่น การแผ่รังสีอาทิตย์ ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ สามารถช่วยให้ฝุ่นเพิ่มผลกระทบต่อการสูญเสียผลผลิตได้
3. การเสื่อมสภาพของประสิทธิภาพของโมดูลของเซลล์แสงอาทิตย์ ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของฝุ่น ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามตำแหน่งทางภูมิศาสตร์และกิจกรรมโดยรอบของมนุษย์
4. การสะสมของเถ้า (จากการเผาเชื้อเพลิงฟอสซิล) บนพื้นผิวของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้เกิดการสูญเสียผลผลิตที่ใหญ่ที่สุด

5. มุมเอียงของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์มีอิทธิพลที่สำคัญในปริมาณฝุ่นที่สะสม ผลการวิจัยพบว่า การปนเปื้อน  $5 \text{ g/m}^2$  บนโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ ทำให้กำลังการผลิตลดลง 12%, 6%, 6%, 7%, 3%, 4% และ 4% สำหรับเถ้า แคลเซียมคาร์บอเนต หินปูน ซีเมนต์ กำมะถัน ชีลื้อย และดินสีน้ำตาล ตามลำดับ สำหรับโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโพลีคริสตัลไลน์ ที่ปนเปื้อนเดียวกัน ( $5 \text{ g/m}^2$ ) การเสื่อมสภาพที่วัดได้คือ 5%, 4%, 4%, 1%, 2% และ 2% สำหรับเถ้า หินปูน ชีลื้อย ซิลิคอนคาร์ไบด์สีดำ และซิลิกาเจล ตามลำดับ และผลการศึกษาจะช่วยให้สามารถระบุชนิดของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีที่สุดที่สามารถใช้ได้ในแต่ละสถานที่ที่ทำการศึกษา

8. กลุ่มนักวิจัยชื่อ HoussainZitouni, Ahmed Alami Merrouni, Mohammed Regragui, Abdellatif Bouaichi, Charaf Hajjaj, Abdellatif Ghennioui and Badr Ikken [52] ได้ศึกษาเชิงทดลองเกี่ยวกับผลกระทบของความสกปรกต่อประสิทธิภาพของระบบไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ โดยพื้นที่ที่ทำการศึกษเป็นพื้นที่ติดตั้งระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์บนพื้นที่ทะเลทราย แต่ในเชิงลักษณะภูมิประเทศดังกล่าวจะมีเรื่องลักษณะเฉพาะจากการที่มีฝุ่นและละอองลอยที่สามารถเกาะอยู่บนพื้นที่ผิวรังสีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ทำให้ประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ลดลงอย่างมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักคือการศึกษาเพื่อวัดและทำความเข้าใจกับผลกระทบของคราบของฝุ่นละอองที่มีต่อประสิทธิภาพของระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดโมโนคริสตัลไลน์ขนาด 16.56 kWp โดยไม่มีการทำความสะอาดเป็นระยะเวลา 6 เดือนที่ศูนย์วิจัยกรีนเอ็นเนอจีพาร์ของโรงงานแห่งหนึ่งที่ตั้งอยู่ทางตอนใต้ของโมร็อกโก ซึ่งพื้นที่ดังกล่าวมีภูมิอากาศแบบกึ่งแห้งแล้ง นอกจากนี้ได้ทำการวิเคราะห์ทางเคมีขององค์ประกอบของฝุ่นเพื่อให้มีแนวคิดเกี่ยวกับแหล่งกำเนิดการปล่อยละอองลอย

ผลการศึกษาพบว่าพลังงานสะสมที่เปื้อนหลังจาก 6 เดือนอยู่ที่ประมาณ 124 kWh พลังงานที่ลดลงโดยเฉลี่ยต่อวันอยู่ที่ 2.7 124 kWh/day ในช่วงที่แห้งแล้ง และ 0.07 124 kWh ในช่วงที่มีฝน ตกอัตราความสกปรกในแต่ละวันอยู่ที่ 0.32% ต่อวัน และ 0.02% ต่อวัน ในฤดูแล้งและฤดูฝนตามลำดับ สำหรับการวิเคราะห์ทางเคมีของฝุ่นละออง ผลลัพธ์ของ XRD แสดงให้เห็นว่ามีฝุ่นของซิลิกอน อลูมิเนียม แคลเซียม เหล็ก ซึ่งอาจมาจากสถานที่ก่อสร้างใกล้เคียง นอกจากนี้ยังมีฝุ่นพวกโพแทสเซียม แมกนีเซียม และฟอสฟอรัสที่อาจมาจากเหมืองแร่ฟอสเฟต

9. กลุ่มนักวิจัยชื่อ Makbul A.M.Ramli, Eka Prasetyono, Ragil W.Wicaksana, Novie A.Windarko, Khaled Sedraoui and Yusuf A.Al-Turki [53] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการตรวจสอบการลดลงของกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์เนื่องจากการสะสมของฝุ่นและสภาพอากาศ ซึ่งการศึกษานี้ดำเนินการศึกษาทดลองในเมืองสุราบายา ประเทศอินโดนีเซีย เกี่ยวกับผลกระทบของปัจจัยด้านฝุ่นละอองและสภาพอากาศต่อการลดลงของกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์จากพื้นผิวของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งการสะสมของฝุ่นและการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศนั้น ส่งผลต่อปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ได้รับจากพื้นผิวแผงเซลล์แสงอาทิตย์และมีผลอย่างมากต่อประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ โมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ต้องสัมผัสกับสภาพอากาศภายนอกและเชื่อมต่อกับระบบการวัดที่พัฒนาขึ้นโดยใช้แบบจำลองตามกฎเพื่อระบุสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน จากนั้นใช้แบบจำลองตามกฎ แบบจำลองการแผ่รังสีอาทิตย์บนท้องฟ้าที่รวมตำแหน่งดวงอาทิตย์ และแบบจำลองอุณหภูมิของแผงเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อประเมินกำลังขับเซลล์แสงอาทิตย์และการทดสอบยังดำเนินการโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARM Cortex-M4 STM32F407 เป็นตัวควบคุมดิจิทัลแบบสแตนด์อโลน ติดตั้ง

เซ็นเซอร์แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ และความชื้นเพื่อวัดกำลังเอาต์พุตของเซลล์แสงอาทิตย์แบบเรียลไทม์ ในระบบนี้มีการตรวจสอบความชื้นเพื่อระบุสภาพที่มีฝุ่นมาก มีเมฆมาก และมีฝนตก

ซึ่งจากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่ามีข้อผิดพลาดในการทำนายผลของเอาต์พุตกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ตามแบบจำลองคือ 3.6% เมื่อเทียบกับการตรวจวัดจริงภายใต้สภาพพื้นผิวที่สะอาด จากนั้นจึงวิเคราะห์ผลกระทบของการสะสมของฝุ่นและสภาพอากาศ ที่มีผลต่อกำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์หลังการสัมผัสเป็นเวลา 1 – 4 สัปดาห์ โดยผลการวิจัยพบว่าการสะสมของฝุ่นเป็นเวลา 2 สัปดาห์ทำให้กำลังไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง 10.8% ในความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 52.24% ผลการทดลองภายใต้สภาวะฝนตกพบว่ามีกำลังไฟฟาลดลงมากกว่า 40% ในความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 76.32% และกำลังไฟฟาลดลงในสภาวะที่มีเมฆมากมากกว่า 45% ในความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 60.45% สังเกตการศึกษานี้พบว่าสภาพแวดล้อมในท้องถิ่น เช่น ฝุ่น ฝน และเมฆบางส่วน ส่งผลกระทบต่อการลดลงของกำลังไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ได้อย่างมีนัยสำคัญ

10. กลุ่มนักวิจัยชื่อ Ivana Radonjić, Tomislav Pavlović, Dragoljub Mirjanić and Lana Pantić [54] ได้ศึกษาและทดลองเกี่ยวกับผลกระทบของซีลล้อยต่อประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งความสกปรกที่เกิดขึ้นที่พื้นผิวแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้ประสิทธิภาพลดลง เนื่องจากปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ส่งมายังพื้นที่รับแสงน้อยลง ซึ่งบทความนี้นำเสนอผลการศึกษาดทดลองกลางแจ้งของประเทศเซอร์เบียเกี่ยวกับผลกระทบของซีลล้อยที่สะสมในช่วงฤดูร้อนบนพื้นผิวโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ที่ติดตั้งไว้ที่มุม 0 องศา (แนวนอน) และที่มุมที่เหมาะสม 32 องศา แผงเซลล์แสงอาทิตย์ส่วนมากถูกติดตั้งบนหลังคามักตั้งอยู่ใกล้ปล่องไฟและส่วนใหญ่ใช้สำหรับการให้ความร้อนกับเชื้อเพลิงฟอสซิล ซีลล้อยจะสะสมอยู่บนแผงเซลล์แสงอาทิตย์ทำให้เกิดการลดลงของประสิทธิภาพการทำงานของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและทดลองเป็นระยะเวลา 168 วัน ซึ่งการลดลงของกำลังไฟฟ้าสูงสุด (การลดลงของพลังงานของโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์มากที่สุดเนื่องจากการปนเปื้อนของซีลล้อย) ทั้งสำหรับโมดูลที่ติดตั้งในแนวนอนและโมดูลที่ติดตั้งอย่างเหมาะสมที่สุด เนื่องจากการสะสมของซีลล้อยถูกวัดในวันที่ 45 ของการวัดการลดลงของกำลังไฟฟ้าสูงสุดของโมดูลที่ติดตั้งในแนวนอนคือ 87.2% และโมดูลที่ติดตั้งตามการตั้งค่าที่เหมาะสมที่สุด 30.6% สำหรับซีลล้อยที่ตรวจพบเชิงพื้นที่เมื่อนำมาวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของซีลล้อยโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน อนุภาคของซีลล้อยโดยทั่วไปมีรูปร่างเป็นทรงกลม มีโครงสร้างเป็นรูพรุน และอนุภาคจำนวนมากที่สุดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 – 50  $\mu\text{m}$

11. กลุ่มนักวิจัยชื่อ Hussein A.Kazem and Miqdam T.Chaichan[55] ได้ดำเนินการวิเคราะห์เชิงทดลองเกี่ยวกับผลกระทบของคุณสมบัติทางกายภาพของฝุ่นต่อโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ซึ่งได้ทำการศึกษาและทดสอบในทางตอนเหนือของประเทศโอมาน ซึ่งการสะสมของฝุ่นบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์จะส่งผลต่อการลดลงของการส่องผ่านแสงอาทิตย์ที่กระทบกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ลดลง โดยแหล่งที่มาหลักของฝุ่นละออง คือทรายที่ลมพัดตามสภาพแวดล้อมและอนุภาคดินจากพื้นดิน สำหรับอนุภาคฝุ่นหยาบมีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 2 ไมโครเมตร คุณสมบัติทางกายภาพของฝุ่น เช่น ความถ่วงจำเพาะ รูปร่างของอนุภาค คุณสมบัติพื้นผิว ปริมาณความชื้น และขนาดเกรนเฉพาะนั้นแตกต่างกันไปตามสถานที่ทั่วโลก ความแตกต่างเหล่านี้เกิดจากสภาพภูมิประเทศ ธรณีวิทยา และสิ่งแวดล้อมของแต่ละภูมิภาค น้ำหนักและรูปร่างของอนุภาคฝุ่นมีผลอย่างมากต่อพฤติกรรมและการสะสมตัวและประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับในการศึกษาครั้งนี้ได้นำตัวอย่างฝุ่น 6 ตัวอย่างที่เก็บได้นานกว่า 3 เดือนจากสถานที่ 6 แห่งในทางตอนเหนือของประเทศโอมาน โดยฝุ่นดังกล่าวได้ถูกประเมินคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคฝุ่นส่วนใหญ่อยู่ระหว่าง 2 – 63  $\mu\text{m}$  ซึ่งการสะสมของฝุ่นบนโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์นั้นแตกต่างกันไปตามสถานที่ โดยผลการวิจัยระบุว่าไม่มีการสูญเสียด้านกำลังไฟฟ้าที่มีนัยสำคัญที่เกิดจากความเข้มข้นของมวลพื้นผิวต่ำของฝุ่น (น้อยกว่า 1  $\text{g}/\text{m}^2$ ) บนโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์ การสูญเสียประสิทธิภาพสูงสุดรายวันถูกวัดและเปรียบเทียบกับจากงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้สรุปว่าการสูญเสียประสิทธิภาพคือ 0.05% ซึ่งมีขนาดเล็กน้อยเมื่อเทียบกับประเทศเพื่อนบ้าน อย่างไรก็ตามผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าผลผลิตของกำลังไฟฟ้าจากโมดูลเซลล์แสงอาทิตย์จะลดลงถึง 35 - 40% หลังจากสัมผัสกับสภาพอากาศเป็นเวลานานกว่า 3 เดือนขึ้นไป

## 12. ชาคริต โชติอมรศักดิ์ และดวงนา ลากใหญ่ [56]

ได้ตรวจสอบผลกระทบทางตรงของละอองลอยต่อการแผ่รังสีดวงอาทิตย์และ ผลกระทบทางอ้อมต่อตัวแปรสภาพภูมิอากาศในภาคเหนือของประเทศไทย โดยใช้แบบจำลองควบคุมอุตุนิยมวิทยา-เคมี WRF-Chem ในช่วงฤดูหมอกควัน (กุมภาพันธ์-เมษายน) ค.ศ. 2013 โดยประมวลผลแบบจำลอง WRF-Chem แยกเป็น 2 กรณีที่แตกต่างกัน คือกรณีที่ไม่นับผลกระทบของละอองลอย กับกรณีที่คิดผลกระทบทั้งทางตรงและทางอ้อมของละอองลอยจากการเผาชีวมวล

ผลการศึกษาพบว่าละอองลอยจากการเผาชีวมวลส่งผลให้ความเข้มการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ลงมายังพื้นผิวโลกลดลง โดยค่าเฉลี่ยทั้งพื้นที่เดือนกุมภาพันธ์ มีนาคม เมษายน ลดลง 1.0  $\text{W}/\text{m}^2$  1.0  $\text{W}/\text{m}^2$  และ 1.2  $\text{W}/\text{m}^2$  ตามลำดับ และบางพื้นที่ลดลงมากถึง 9.0-14.9  $\text{W}/\text{m}^2$  การลดลงของรังสีคลื่นสั้นจากดวงอาทิตย์ไม่ส่งผลต่ออุณหภูมิ อากาศชัดเจน โดยความแตกต่างของการจำลองอุณหภูมิ

ในกรณีที่มีและไม่มีละอองลอยจากการเผาชีวมวลอยู่ในช่วงไม่เกิน  $\pm 0.1$  °C ละอองลอยจากการเผาชีวมวลสามารถทำหน้าที่เป็นแกนควบแน่นของเมฆและส่งผลกระทบทางอ้อมต่อคุณสมบัติและการก่อตัวของเมฆ จากการนี้พบว่าละอองลอยจากการเผาชีวมวลส่งผลให้เมฆมีการก่อตัวน้อยกว่าปกติ ประกอบกับในช่วงดังกล่าวเป็นฤดูแล้งซึ่งมีปริมาณไอน้ำในอากาศน้อยทำให้เมฆที่ก่อตัวในสภาวะที่มีแกนควบแน่นอยู่เป็นจำนวนมากขนาดของหยดน้ำในเมฆมีขนาดเล็ก ส่งผลให้ศักยภาพในการเกิดฝนลดลง นอกจากนี้ละอองลอยจำนวนมากในช่วงฤดูหมอกควันสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์ทำให้พลังงานที่จะมาอุ่นพื้นผิวโลกลดลง ส่งผลให้ความสูงผสมหรือความสูงชั้น PBL และความเร็วลมลดลง ทำให้ฝุ่นละอองจากการเผาชีวมวลมีศักยภาพในการแพร่กระจายขึ้นในแนวตั้งลดลง ก่อให้เกิดการสะสมฝุ่นละอองลอยบริเวณใกล้พื้นผิวโลก จากผลการศึกษาครั้งนี้คาดว่าจะมีบทบาทที่สำคัญต่อการเปิดโลกทัศน์ทางการวิจัยและการประยุกต์ความสัมพันธ์เกี่ยวกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพอากาศและภูมิอากาศในพื้นที่ ภาคเหนือของประเทศไทย

13. กลุ่มนักวิจัยชื่อ Dongyu Jia, Liwei Yang, Tao Lv, Weiping Liu, Xiaoqing Gao and Jiaxin Zhou [57] ได้นำเสนอการประเมินโมเดล Machine learning สำหรับการทำนายการกระจายรังสีดวงอาทิตย์ภายใต้สภาพอากาศ/มลภาวะต่างๆ โดยนำแบบจำลอง Machine learning models ที่ใช้กันทั่วไป 3 แบบสำหรับการทำนายการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ทั่วโลกและแบบกระจายได้รับการประเมินใน 8 เมืองของประเทศจีน ซึ่งแสดงถึงสภาพภูมิอากาศและมลพิษที่แตกต่างกัน ตามผลลัพธ์; เกี่ยวกับค่า nRMSE, nMAE, nMBE และ R ตำแหน่งชายฝั่งทะเล (เช่น เซี่ยงไฮ้ กวางโจว ฯลฯ) ได้รับค่าที่สูงกว่าตำแหน่งในทะเล (เช่น หลานโจวและอู่ฮั่น) ยิ่งไปกว่านั้น การใช้ Support vector machine มีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบจำลองอื่นๆ ในทุกสถานที่ ไม่ว่าพื้นที่ศึกษาจะแห้งแล้ง กึ่งแห้งแล้ง กึ่งชื้น หรือชื้น ตามด้วยการใช้ Generalized linear modeling และ การใช้ Random forest นอกจากนี้ เมื่อทำการประเมินค่า SVM ในสถานที่ต่างๆ ภายใต้สภาพอากาศและมลภาวะที่แตกต่างกัน พบว่าความแม่นยำของการทำนายการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์นั้นสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับสภาพอากาศและระดับสถานะมลพิษ โดยทั่วไปข้อผิดพลาดในการทำนายการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ทั่วโลกจะเป็นไปตามระดับสภาพอากาศ ข้อผิดพลาดในการทำนายเพิ่มขึ้นเมื่อระดับสภาพอากาศเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ระหว่างระดับสถานะมลพิษกับการทำนายรังสีดวงอาทิตย์ทั่วโลกมีความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้น

สำหรับผลการทำนายการแพร่กระจายของรังสีดวงอาทิตย์ กฎการแปรผันที่มีสภาพอากาศและระดับมลพิษต่างกัมนั้นแทบไม่ต่างไปจากกฎการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ทั่วโลก ความน่าจะเป็นที่จะเกิดข้อผิดพลาดสูงสุดของการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ทั่วโลกและการแผ่รังสีดวงอาทิตย์แบบกระจายปรากฏที่ระดับมลพิษ 5 และ 1 ตามลำดับ โดยรวมแล้ว แบบจำลอง Support vector machine

แสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือในการทำนายการแผ่รังสีภายใต้มลภาวะเล็กน้อยและสภาพอากาศที่คงที่ สิ่งนี้มีความสำคัญในสถานที่ที่มีข้อมูลอุตุนิยมวิทยาน้อย และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเลือกตำแหน่งทางภูมิศาสตร์สำหรับการก่อสร้างสถานีไฟฟ้าโซลาร์เซลล์ได้

14. กลุ่มนักวิจัยชื่อ Marcel Hamda Soulouknga, Ousmane Coulibaly, Serge Yamigno Doka and Timoleon Crepin Kofane [58] ได้ทำการศึกษาวิธีการประเมินรังสีดวงอาทิตย์ทั่วโลกจากข้อมูลอุตุนิยมวิทยาในเขตอาฮีเลียนของชาด ซึ่งในการศึกษามุ่งเน้นไปที่การประเมินรังสีดวงอาทิตย์ทั่วโลกในระดับแนวนอน การคาดคะเนขั้นสุริยะทำขึ้นโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากความสัมพันธ์ของ Angstrom–Prescott, Allen and Sabbagh โมเดลต่างๆ ที่นำเสนอได้ถูกนำมาใช้โดยใช้โปรแกรม MATLAB และ Excel แบบจำลองได้รับการประเมินโดยใช้ MPE, NSE, RMSE และ MBE ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองของ Angstrom–Prescott เหมาะสมที่สุดสำหรับการคำนวณการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ทั่วโลกในพื้นที่มองโก โดยมีค่า 5.887 กิโลวัตต์ชั่วโมง/ตร.ม. สำหรับที่ตั้งของเมือง Bokoro แบบจำลอง Allen ได้รับการดัดแปลงมากที่สุดสำหรับการคำนวณการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ทั่วโลก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.872 กิโลวัตต์ชั่วโมง/ตร.ม. ในทางกลับกัน แบบจำลอง Sabbagh เหมาะสมสำหรับพื้นที่เมือง Abeche, N’Djamena, Ati และ Moussoro โดยมีค่าตามลำดับที่ 6.354, 5.742, 5.523 และ 6.126 กิโลวัตต์ชั่วโมง/ตร.ม. ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าเขตเมือง Sahelian ของชาด มีศักยภาพแสงอาทิตย์ที่ดีและเหมาะสมสำหรับการใช้ประโยชน์จากระบบพลังงานแสงอาทิตย์

15. กลุ่มนักวิจัยชื่อ Seohui Park, Minso Shin, Jungho Im, Chang-Keun Song, Myungje Choi, Jhoon Kim, Seungun Lee, Rokjin Park, Jiyoung Kim, Dong-Won Lee, and Sang-Kyun Kim [59] ได้ศึกษาการประมาณค่าความเข้มข้นของฝุ่นละอองในระดับพื้นดินโดยใช้การทำงานร่วมกันของการสำรวจดาวเทียมและแบบจำลองตามกระบวนการในเกาหลีใต้ ในการศึกษาี้ เรารวมผลิตภัณฑ์ที่ได้จากดาวเทียมหลายรายการรวมถึง AOD กับพารามิเตอร์ทางอุตุนิยมวิทยาตามแบบจำลอง (เช่น อุณหภูมิจุดน้ำค้าง ความเร็วลม ความดันพื้นผิว ความสูงของชั้นขอบเขตของดาวเคราะห์ และความชื้นสัมพัทธ์) และพารามิเตอร์การปล่อยก๊าซ (เช่น NO, NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, ละอองอินทรีย์ปฐมภูมิ (POA) และ HCHO) เพื่อประเมินความเข้มข้นของ PM ที่พื้นผิวในเกาหลีใต้ แมชชีนเลิร์นนิงในป่าแบบสุ่ม (RF) ใช้เพื่อประเมินความเข้มข้นของ PM<sub>10</sub> และ PM<sub>2.5</sub> ด้วยพารามิเตอร์ทั้งหมด 32 ตัวสำหรับปี 2558-2559 ผลลัพธ์แสดงว่าแบบจำลองที่ใช้ RF ให้ประสิทธิภาพที่ดี โดยมีค่า R<sup>2</sup> เท่ากับ 0.78 และ 0.73 และค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยรูด (RMSEs) เท่ากับ 17.08 และ 8.25  $\mu\text{g m}^{-3}$  สำหรับ PM<sub>10</sub> และ PM<sub>2.5</sub> ตามลำดับ โดยเฉพาะอย่าง

ยิ่ง แบบจำลองที่นำเสนอประสบความสำเร็จในการประเมินความเข้มข้นของ PM สูง AOD ถูกระบุว่ามีความสำคัญที่สุดในการประมาณความเข้มข้นของ PM ในระดับพื้นดิน รองลงมาคือความเร็วลม การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ และอุณหภูมิจุดน้ำค้าง การใช้ข้อมูลละอองที่ได้มาจากเซ็นเซอร์ดาวเทียมระบุตำแหน่ง (เช่น Geostationary Ocean Colour Imager, GOCI) ส่งผลให้มีความแม่นยำในการประมาณค่าความเข้มข้นของ PM สูงขึ้นเล็กน้อยกว่าจากระบบเซ็นเซอร์ที่โคจรรอบขั้วโลก (เช่น Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) แบบจำลอง RF ที่นำเสนอให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าวิธีการแบบอิงกระบวนการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการปรับปรุงการประเมินแบบจำลองแบบอิงกระบวนการต่ำเกินไป (เช่น GEOS-Chem และ Community Multiscale Air Quality Modeling System, CMAQ)

16. กลุ่มนักวิจัยชื่อ Chunxiao Zhang, Chao Shen, Qianru Yang, Shen Wei, Guoquan Lv and Cheng Sun [60] ได้ดำเนินการตรวจสอบผลกระทบการลดทอนของมลพิษทางอากาศต่อรังสีดวงอาทิตย์ในระดับภูมิภาค เนื่องจากมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา ความเข้มข้นสูงของฝุ่นละอองในอากาศจึงลดปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ส่องมาถึงโลกได้อย่างมาก และการลดลงนี้มีผลโดยตรงต่อการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในอาคาร ในการหาปริมาณผลกระทบจากการลดทอนนี้ ข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาในอดีตที่รวบรวมจาก 5 ภูมิภาค ได้แก่ ปักกิ่ง เทียนจิน จีหนาน ซื่ออัน และเจิ้งโจว ในประเทศจีนระหว่างปี 2014 - 2016 ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความใส (สะท้อนรังสีที่มีอยู่) และอากาศ ดัชนีคุณภาพ(สะท้อนระดับมลพิษ) ผลการวิเคราะห์พบว่าดัชนีคุณภาพอากาศที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ดัชนีความโปร่งลดลง และวันที่มีแดดจะให้อัตราการลดลงที่สูงกว่าวันที่มีเมฆมาก สำหรับภูมิภาคทั้ง 5 การลดทอนของดัชนีความโปร่งใสรายเดือนแสดงให้เห็นค่าที่สูงขึ้นในฤดูหนาวมากกว่าในฤดูร้อน อย่างไรก็ตาม การลดทอนรังสีดวงอาทิตย์รายเดือนมีแนวโน้มตรงกันข้าม เนื่องจากระดับความสูงของดวงอาทิตย์ที่สูงขึ้นในฤดูร้อน นอกจากนี้ ภูมิภาคต่างๆ มีอัตราส่วนการลดทอนรังสีดวงอาทิตย์ต่อปีแตกต่างกัน โดยเทียนจินให้ค่าสูงสุดที่ 6.56% ( $651.17 \text{ MJ/m}^2$ ) ตามมาด้วยปักกิ่ง (3.92%,  $410.08 \text{ MJ/m}^2$ ), ซื่ออัน (4.94%,  $510.42 \text{ MJ/m}^2$ ), เจิ้งโจว (3.99%,  $427.64 \text{ MJ/m}^2$ ) และจีหนาน (2.69%,  $284.66 \text{ MJ/m}^2$ )

17. กลุ่มนักวิจัยชื่อ Liwei Yang, Xiaoqing Gao, Zhenchao Li and Dongyu Jia [61] ได้ศึกษาผลกระทบเชิงปริมาณของมลพิษทางอากาศต่อโลกรายวันระดับภูมิภาคและการแพร่กระจายของรังสีดวงอาทิตย์ภายใต้สภาวะท้องฟ้าแจ่มใส มลพิษทางอากาศเป็นหนึ่งในปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่ส่งผลต่อการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่มาถึงโลก พื้นผิวภายใต้สภาพท้องฟ้าที่ชัดเจน (ไม่มีเมฆ) โดยในงานนี้ 6 เมืองทั่วไปที่มีมลพิษร้ายแรง อยู่ในภาคเหนือ, ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ, ภาคตะวันออก,

ภาคกลาง, ภาคตะวันตกเฉียงใต้ และภาคใต้ของจีน ได้แก่ กรุงปักกิ่ง, เลียนหยาง, เซี่ยงไฮ้, หู่อ๋าน, เหวินเจียง และกว่างโจว ได้รับอิทธิพลของมลพิษทางอากาศของรังสีดวงอาทิตย์ทั่วโลกและการแพร่กระจาย (Rs และ Rd) ภายใต้สภาพท้องฟ้าแจ่มใสได้รับการวิเคราะห์เชิงปริมาณ จากข้อมูลอุตุนิยมวิทยารายวันย้อนหลังตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2557 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2563 ซึ่งผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนการลดทอน Rs สูงสุดของ 6 เมืองข้างต้นปรากฏในฤดูใบไม้ผลิ ฤดูใบไม้ร่วง ฤดูหนาว ฤดูร้อน ฤดูใบไม้ร่วง และฤดูหนาวตามลำดับ จากปี 2014 ถึงปี 2020 การลดทอนของ Rs ที่เกิดจากมลพิษทางอากาศ ( $AQI > 100$ ) มากที่สุดในปักกิ่ง (6.03%) รองลงมาคือ เซี่ยงไฮ้ (4.21%) เหวินเจียง (4.15%) เลียนหยาง (3.28%) และอู่ฮั่น (3.14%) ขณะที่กว่างโจว (1.32%) มีการลดทอนสัมพัทธ์น้อยที่สุด มีการเพิ่มขึ้นมากที่สุดในปักกิ่ง (16.21%) ตามมาด้วยเซี่ยงไฮ้ (8.78%) เหวินเจียง (8.13%) เลียนหยาง (7.76%) และกว่างโจว (5.96%) ในขณะที่หุ่ฮั่น (2.57%) มีการเพิ่มขึ้นสัมพัทธ์น้อยที่สุด



### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินการวิจัย

สำหรับวิธีการดำเนินการวิจัยที่นำเสนอในบทนี้ เป็นการนำเสนอวิธีการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและความเข้มข้นของฝุ่นละอองที่ส่งผลกระทบต่อรังสีอาทิตย์รวมถึงประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจะเป็นข้อมูลที่สนับสนุนการประมาณค่ารังสีอาทิตย์ จากการใช้ข้อมูลจากอุตุนิยมวิทยาร่วมกับข้อมูลดัชนีคุณภาพอากาศ โดยมีวิธีการดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณของฝุ่นละอองที่ส่งผลกระทบต่อรังสีอาทิตย์ที่ปรากฏบนพื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์
2. การสร้างแบบจำลองประมาณค่ารังสีอาทิตย์ โดยใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาร่วมกับข้อมูลดัชนีคุณภาพอากาศ

#### 3.1 การหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณของฝุ่นละอองที่ส่งผลกระทบต่อรังสีอาทิตย์ที่ปรากฏบนพื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

##### 3.1.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

##### 3.1.1.1 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Panel)

เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Panel) ยี่ห้อ Solar best tech รุ่น CNSDPV80M 80W 5BB ชนิดผลึกเดี่ยว กำลังไฟฟ้า 80 วัตต์ ประสิทธิภาพ 15.32% ขนาด 670x760x30 มม. จำนวน 1 แผง



ภาพประกอบ 34 เซลล์แสงอาทิตย์

### 3.1.1.2 หลอดทังสเตนฮาโลเจน (Tungsten halogen lamp)

หลอดทังสเตนฮาโลเจน ยี่ห้อ OSRAM รุ่น DECOSTAR 51S #44870 WFL 50W 12V 36° GU5.3 ปริมาณแสง 680 Lumen อุณหภูมิแสง 2,950 k จำนวน 80 หลอด



ภาพประกอบ 35 หลอดทังสเตนฮาโลเจน

### 3.1.1.3 ดิน (Soil)

ดินที่เกิดจากกระบวนการก่อสร้างใกล้กับถนน ที่ผ่านการบดละเอียดจนกลายเป็นฝุ่นโดยเครื่องบดดินละเอียดแบบแห้ง มีขนาดความละเอียดตั้งแต่  $32\ \mu m$  ขึ้นไป



ภาพประกอบ 36 ดิน

#### 3.1.1.4 เครื่องบดละเอียดแบบปั่นแห้งและแบบเปียก (Planetary Ball Mill)

เครื่องบดละเอียดแบบปั่นแห้งและแบบเปียก รุ่น Planetary ball milling apparatus of Retsch, PM-400 สำหรับบดดินอย่างละเอียด



ภาพประกอบ 37 เครื่องบดละเอียดแบบปั่นแห้งและแบบเปียก

#### 3.1.1.5 เครื่องควบคุมการเขย่าตะแกรงร่อน (Sieve control)

เครื่องควบคุมการเขย่าตะแกรงร่อน ยี่ห้อ Retsch รุ่น Sieve Shaker AS 200 control



ภาพประกอบ 38 เครื่องควบคุมการเขย่าตะแกรงร่อน

### 3.1.1.6 ตะแกรงร่อนสแตนเลส (Test sieve)

ตะแกรงร่อนสแตนเลส ยี่ห้อ/รุ่น wire mesh sieve retsch GmbH 38 – 106 Micron



ภาพประกอบ 39 ตะแกรงร่อนสแตนเลส

### 3.1.1.7 เครื่องชั่งน้ำหนัก (Weight scale)

เครื่องชั่งน้ำหนัก ยี่ห้อ/รุ่น Ohaus PA2102 ชั่งได้ในหน่วย mg, g, ct, oz, dwt, tical, tola, mommes, baht, grain, mesghal, Newton, ozt, teals, pc, % ความละเอียดตศนิยม 2 ตำแหน่ง



ภาพประกอบ 40 เครื่องชั่งน้ำหนัก

### 3.1.1.8 เครื่องทดสอบประสิทธิภาพระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (Solar PV testing)

เครื่องทดสอบประสิทธิภาพระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ยี่ห้อ Seaward รุ่น PV150 ที่ระดับ 1000V 15A ตามมาตรฐานยุโรป IEC 62446 และมาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้า ระบบการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ติดตั้งบนหลังคา ตามมาตรฐานของวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์



ภาพประกอบ 41 เครื่องทดสอบประสิทธิภาพระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

### 3.1.1.9 เครื่องวัดความเข้มแสงอาทิตย์ (Irradiance meter)

เครื่องวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ ยี่ห้อ Seaward รุ่น Solar Survey 200R Irradiance Meter ค่าความเข้มแสง (Irradiance) ค่าอุณหภูมิบรรยากาศ (Ambient temperature) ค่าอุณหภูมิใต้แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Panel temperature)



ภาพประกอบ 42 เครื่องวัดความเข้มแสงอาทิตย์

### 3.1.1.10 เครื่องวัดแสง (Lux meter)

เครื่องวัดแสง ยี่ห้อ Fluke รุ่น 941 ช่วงการวัดแสง: 20/200/2,000/20,000/200,000 ลักซ์ (lux) หรือ 20/200/2,000/20,000 ฟุต-แคนเดิล (FC, foot candles)



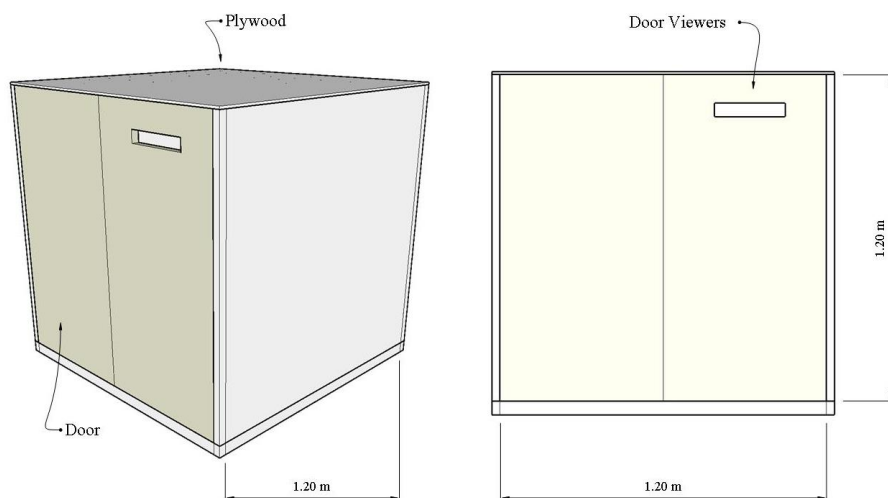
ภาพประกอบ 43 เครื่องวัดแสง

### 3.1.2 วิธีการทดลองและการเก็บผลการทดลอง

ในขั้นตอนการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณของฝุ่นละอองที่ส่งผลกระทบต่อรังสีอาทิตย์ที่ปรากฏบนพื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นผลกระทบต่อคุณลักษณะทางไฟฟ้าของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ได้แก่ แรงดันเปิดวงจร ( $V_{oc}$ ) กระแสลัดวงจร ( $I_{sc}$ ) กำลังไฟฟ้าจ่ายออก ( $P_{out}$ ) สำหรับวิธีการทดลองจะแบ่งออกเป็นขั้นตอนการสร้างห้องทดลองหรือห้องแสงอาทิตย์เทียมและขั้นตอนการเตรียมฝุ่นละอองจากดิน รวมไปถึงขั้นตอนในการทดสอบขนาดและปริมาณของฝุ่นละอองจากดิน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

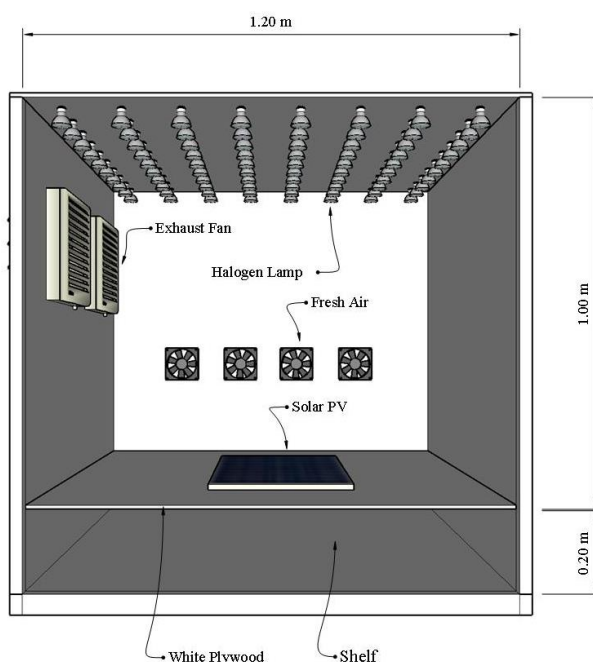
#### 3.1.2.1 การสร้างห้องแสงอาทิตย์เทียม

ผู้วิจัยดำเนินการสร้างห้องทดลองสำหรับการสร้างแสงอาทิตย์เทียมโดยมีขนาด 1.2x1.2x1.0 m. (กว้างxยาวxสูง) หรือมีปริมาตรเท่ากับ 1.44 m<sup>3</sup> เพื่อรองรับแผงเซลล์แสงอาทิตย์ขนาด ขนาด 0.67x0.76x0.03 m. (กว้างxยาวxสูง) จำนวน 1 แผง สำหรับการคำนวณแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม ผู้วิจัยคำนวณและวิเคราะห์ค่าแสงสว่างผ่านโปรแกรม DIALux evo 10.1 ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการจำลองและออกแบบการส่องสว่าง โดยใช้หลอดทังสแตนฮาโลเจนขนาด 50 W 12V จำนวน 80 หลอด เป็นแหล่งกำเนิดแสงอาทิตย์เทียม ดังแสดงในภาพประกอบ 44 - 46



ภาพประกอบ 44 ลักษณะภายนอกของห้องแสงอาทิตย์เทียม

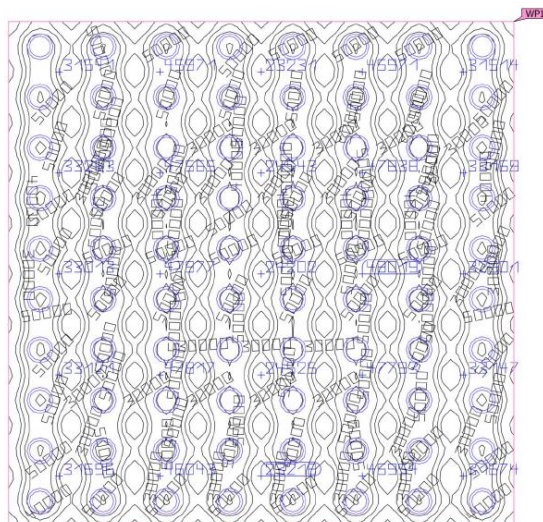
จากภาพประกอบ 44 แสดงลักษณะภายนอกของห้องแสงอาทิตย์เทียม โดยห้องทดลองสร้างจากไม้อัดที่ความหนา 10 mm. มีขนาด  $1.2 \times 1.2 \times 1.0$  m. (กว้างxยาวxสูง) มีปริมาตรเท่ากับ  $1.44 \text{ m}^3$  ภายในและภายนอกทาสีขาว พร้อมช่องสังเกตการณ์ (Door view) สำหรับตรวจสอบภายในห้องในขณะทำการทดลอง



ภาพประกอบ 45 ลักษณะภายในของห้องแสงอาทิตย์เทียม

จากภาพประกอบ 45 แสดงลักษณะภายในของห้องแสงอาทิตย์เทียม ภายในห้องติดตั้งหลอดทั้งสเตนฮาโลเจนขนาด 50 W 12 V จำนวน 8 แล้วย ละ 10 หลอด รวมทั้งหมด 80 ภายในห้องติดตั้ง

พัดลมดูดอากาศ (Exhaust fan) ขนาด 8" จำนวน 2 ชุด สำหรับระบายอากาศร้อนจากภายในห้อง  
แสงอาทิตย์เทียม และติดตั้งพัดลมเติมอากาศ (Fresh air) ขนาด 12 cm. จำนวน 4 ชุด สำหรับเติม  
อากาศดีเข้าภายในห้องแสงอาทิตย์เทียม



| Properties                                                                                            | $\bar{E}$<br>(Target)             | $E_{min}$ | $E_{max}$ | $g_1$ | $g_2$ | Index |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------|-----------|-------|-------|-------|
| Working plane (Room 1)<br>Perpendicular illuminance (adaptive)<br>Height: 0.800 m, Wall zone: 0.000 m | 39023 lx<br>( $\geq 500$ lx)<br>✓ | 15205 lx  | 52822 lx  | 0.39  | 0.29  | WP1   |

ภาพประกอบ 46 ผลการจำลองค่าความสว่าง

จากภาพประกอบ 46 แสดงผลการจำลองค่าความสว่างจากโปรแกรม DIALux evo 10.1 มี  
ค่าความสว่างสูงสุดที่ 52,822 lux และต่ำสุดที่ 15,205 lux ซึ่งมีค่าความสว่างเฉลี่ยที่ 39,023 lux  
หลอดทั้งสเตนฮาโลเจนขนาด 50 W 12 V จำนวน 80 ชุด ควบคุมการปรับค่าแสงสว่างโดยใช้สวิตช์  
หรือแสงจำนวน 10 ชุด สามารถปรับค่าได้ตั้งแต่ 100 – 1,000 W/m<sup>2</sup> สำหรับห้องแสงอาทิตย์เทียมที่  
ใช้ในการทดลองฝุ่นละอองจากดินร่วมกับแผงเซลล์แสงอาทิตย์แสดงในภาพประกอบที่ 47

พูน ปณ จิต ชีเว



ภาพประกอบ 47 ห้องแสงอาทิตย์เทียม

### 3.1.2.2 การเตรียมฝุ่น

ในขั้นตอนการเตรียมฝุ่นเพื่อใช้ในการทดลองในห้องปฏิบัติการ ผู้วิจัยได้ใช้ดินที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนย้ายในกระบวนการก่อสร้างอาคารและถนน หรือแม้กระทั่งกระบวนการคมนาคมขนส่งนำมาใช้เป็นฝุ่นละอองตัวอย่าง ซึ่งฝุ่นจากดินสามารถพบเห็นได้ทั่วไปสำหรับลักษณะของฝุ่นที่เกิดขึ้นจากดินไม่ว่าจะเป็นขนาดหรือสีของฝุ่นนั้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะของภูมิประเทศรวมถึงสภาพแวดล้อม โดยฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นจากดินนั้นจะมีผลกระทบโดยตรงต่อระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ไม่ว่าจะเป็นระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์บนหลังคา (Solar rooftop) ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์บนพื้นดิน (Solar farm) และระบบผลิตไฟฟ้าแบบทุ่นลอยน้ำ (Solar floating) ที่มีการติดตั้งในพื้นที่ที่มีการคมนาคมขนส่ง เขตพื้นที่การก่อสร้าง รวมไปถึงพื้นที่กิจกรรมทางการเกษตร สำหรับในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยใช้ตัวอย่างดินภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนครนำมาทดสอบภายในห้องทดลอง ดังแสดงในภาพประกอบที่ 48 – 49

พูน ปณ จิต ชเว



ภาพประกอบ 48 ฝุ่นละอองจากดินอันเนื่องมาจากการขนส่ง



ภาพประกอบ 49 ฝุ่นละอองจากดินอันเนื่องมาจากการขนส่งในกระบวนการก่อสร้าง

สำหรับประเทศไทยได้มีการให้ความหมายของคำว่าฝุ่นละออง หมายถึง ฝุ่นละอองรวม (Total Suspended Particulate : TSP) ซึ่งเป็นฝุ่นขนาดใหญ่ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่  $100\ \mu m$  ลงมา บางกรณีเรียกว่าฝุ่นตก (Dust fall) โดยฝุ่นละอองที่มีอยู่ในอากาศและจะตกลงสู่พื้นเบื้องล่างได้ โดยปกติแล้วฝุ่นตกเป็นอนุภาคของของแข็งที่มีขนาดเล็กมาก ไม่อาจจะมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าไปจนกระทั่งมีขนาดใหญ่ที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ส่วนฝุ่นละอองที่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า

จะมีขนาดตั้งแต่  $50\ \mu\text{m}$  ขึ้นไป สำหรับฝุ่นตกนั้นใช้ถูกใช้เป็นดัชนีที่สำคัญของมลพิษทางอากาศ ดังนั้นสำหรับการทดลองนี้ผู้วิจัยจะดำเนินการทดสอบฝุ่นละอองที่มีขนาดเล็กกว่า  $100\ \mu\text{m}$  โดยได้นำดินตัวอย่างมาทำการบดละเอียดโดยเครื่องบดละเอียดแบบปั่นแห้งและแบบเปียก (Planetary Ball Mill) และนำตัวอย่างที่ได้มาคัดแยกขนาดโดย วิธี Sieve Analysis Test ตามวิธีมาตรฐานของ ASTM E11 (American Standard Sieve Analysis) โดยใช้ตะแกรงเบอร์ 38 ( $32 - 37\ \mu\text{m}$ ), เบอร์ 63 ( $38 - 62\ \mu\text{m}$ ), เบอร์ 75 ( $63 - 74\ \mu\text{m}$ ), เบอร์ 90 ( $75 - 89\ \mu\text{m}$ ), เบอร์ 106 ( $90 - 105\ \mu\text{m}$ ) ทั้งหมด 5 ขนาด ดังแสดงในภาพประกอบ 50 - 52

| ASTM E11<br>Sieve Designation |         |                   |         |                   |         |
|-------------------------------|---------|-------------------|---------|-------------------|---------|
| Standard                      | Altern. | Standard          | Altern. | Standard          | Altern. |
| 125.00 mm                     | 5.00    | 9.50 mm           | 3/8     | 425 $\mu\text{m}$ | No.40   |
| 106.00 mm                     | 4.24    | 8.00 mm           | 5/16    | 355 $\mu\text{m}$ | No.45   |
| 100.00 mm                     | 4       | 6.70 mm           | 0.265   | 300 $\mu\text{m}$ | No.50   |
| 90.00 mm                      | 3 ½     | 6.30 mm           | ¼       | 250 $\mu\text{m}$ | No.60   |
| 75.00 mm                      | 3       | 5.60 mm           | No. 3 ½ | 212 $\mu\text{m}$ | No.70   |
| 63.00 mm                      | 2 ½     | 4.75 mm           | No. 4   | 180 $\mu\text{m}$ | No.80   |
| 53.00 mm                      | 2.12    | 4.00 mm           | No. 5   | 150 $\mu\text{m}$ | No.100  |
| 50.00 mm                      | 2       | 3.35 mm           | No. 6   | 125 $\mu\text{m}$ | No.120  |
| 45.00 mm                      | 1 ¾     | 2.80 mm           | No. 7   | 106 $\mu\text{m}$ | No.140  |
| 37.50 mm                      | 1 ½     | 2.36 mm           | No. 8   | 90 $\mu\text{m}$  | No.170  |
| 31.50 mm                      | 1 ¼     | 2.00 mm           | No.10   | 75 $\mu\text{m}$  | No.200  |
| 26.50 mm                      | 1.06    | 1.70 mm           | No.12   | 63 $\mu\text{m}$  | No.230  |
| 25.00 mm                      | 1       | 1.40 mm           | No.14   | 53 $\mu\text{m}$  | No.270  |
| 22.40 mm                      | 7/8     | 1.18 mm           | No.16   | 45 $\mu\text{m}$  | No.325  |
| 19.00 mm                      | ¾       | 1.00 mm           | No.18   | 38 $\mu\text{m}$  | No.400  |
| 16.00 mm                      | 5/8     | 850 $\mu\text{m}$ | No.20   | 32 $\mu\text{m}$  | No. 450 |
| 13.20 mm                      | 0.530   | 710 $\mu\text{m}$ | No.25   | 25 $\mu\text{m}$  | No. 500 |
| 12.50 mm                      | ½       | 600 $\mu\text{m}$ | No.30   | 20 $\mu\text{m}$  | No. 635 |
| 11.20 mm                      | 7/16    | 500 $\mu\text{m}$ | No.35   |                   |         |

ภาพประกอบ 50 ขนาดของตะแกรงคัดแยกตามมาตรฐานของ ASTM E11 [62]

พูน ปณ ทิโต ชเว



ภาพประกอบ 51 การบดละเอียดแบบปั่นแห้งและการคัดแยกขนาดฝุ่น



ภาพประกอบ 52 ฝุ่นตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการคัดแยกขนาด

สำหรับฝุ่นที่ผ่านกระบวนการคัดแยกขนาดแต่ละขนาดแล้วนั้น ต้องนำไปชั่งน้ำหนักก่อนที่จะนำฝุ่นไปทดลอง โดยปริมาณที่จะนำไปทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณของฝุ่นที่มีผลต่อพื้นผิวการรับรังสีอาทิตย์และประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์คือขนาด 1 – 5 g ซึ่งผู้วิจัยใช้เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้าที่มีความละเอียดเชิงตัวเลขในการวิจัย ดังแสดงในภาพประกอบ 53

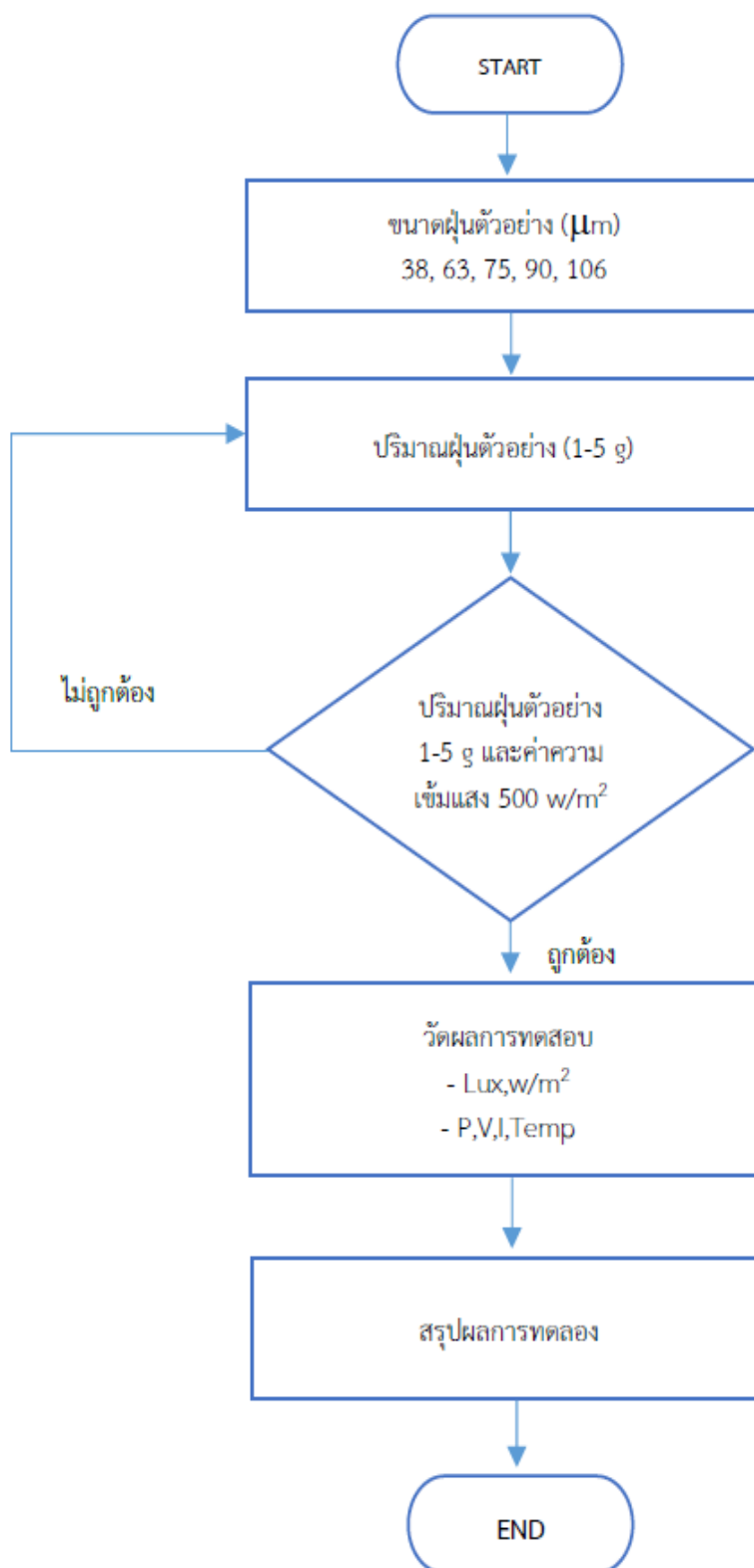


ภาพประกอบ 53 การชั่งน้ำหนักฝุ่นตัวอย่าง

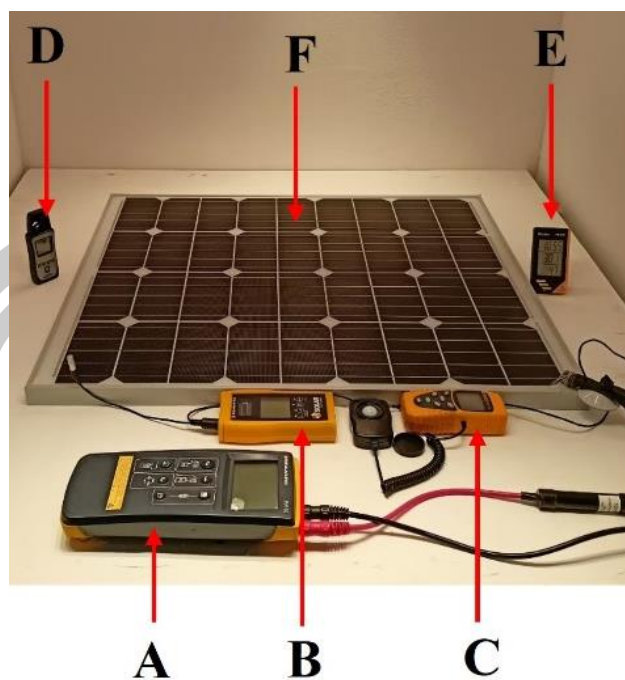
### 3.1.2.3 การทดลอง

ในการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณของฝุ่นละอองต่อปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ปรากฏบนพื้นผิวแผงเซลล์แสงอาทิตย์และประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ ผู้วิจัยดำเนินการทดสอบเปรียบเทียบคุณลักษณะทางไฟฟ้าระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีฝุ่นละอองปกคลุมและแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฝุ่นละอองปกคลุม ซึ่งทำการทดสอบที่ค่าความเข้มแสงคงที่  $500 \text{ W/m}^2$  ในสภาวะอุณหภูมิอากาศทั่วไปที่  $25^\circ\text{C}$  ใช้ฝุ่นละอองทั้งหมด 5 ขนาดคือ  $38 \mu\text{m}$  ( $32 - 37 \mu\text{m}$ ),  $63 \mu\text{m}$  ( $38 - 62 \mu\text{m}$ ),  $75 \mu\text{m}$  ( $63 - 74 \mu\text{m}$ ),  $90 \mu\text{m}$  ( $75 - 89 \mu\text{m}$ ) และ  $106 \mu\text{m}$  ( $90 - 105 \mu\text{m}$ ) ที่ฝุ่นละอองน้ำหนักตั้งแต่ 1 – 5 g ตามลำดับ โดยแสดงขั้นตอนในการทดลองดังแสดงในภาพประกอบ 54 - 56 และตารางทดลอง 7 - 11

พหุ ประจักษ์ ชีวะ

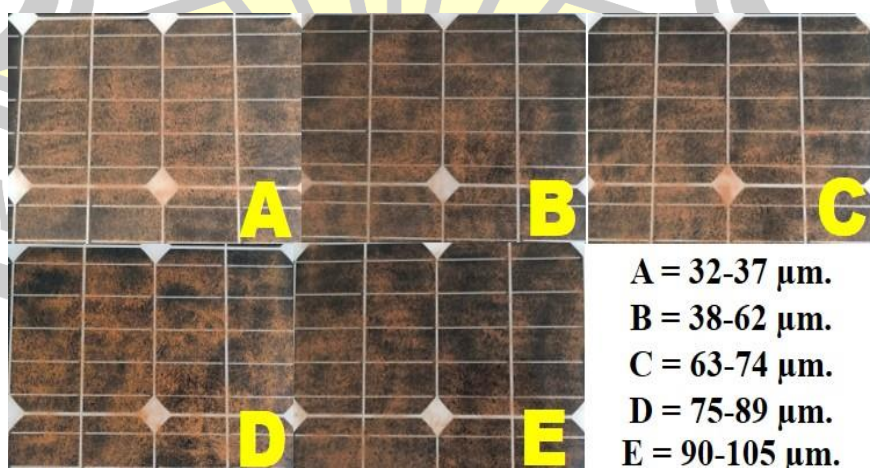


ภาพประกอบ 54 ลำดับการทดลองฝุ่นละออง



ภาพประกอบ 55 การใช้เครื่องมือวัดในห้องแสงอาทิตย์เทียม

- A = PV150 complete kit a multifunction solar PV tester
- B = Solar survey 200R irradiance meter
- C = Lux meter
- D = Anemo meter
- E = Temperature meter
- F = Monocrystalline solar cell



ภาพประกอบ 56 ผืนขนาดต่างๆ ที่ปรากฏบนแผงเซลล์แสงอาทิตย์

ตาราง 7 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณฝุ่นละอองกับแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ( $V_{OC}$ )

| ขนาดฝุ่น<br>( $\mu m$ ) | แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ( $V_{OC}$ ) |     |     |     |     | หมายเหตุ |
|-------------------------|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|----------|
|                         | 1 g                              | 2 g | 3 g | 4 g | 5 g |          |
| 32 - 37                 |                                  |     |     |     |     |          |
| 53 - 62                 |                                  |     |     |     |     |          |
| 63 - 74                 |                                  |     |     |     |     |          |
| 75 - 89                 |                                  |     |     |     |     |          |
| 90 - 105                |                                  |     |     |     |     |          |

ตาราง 8 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณฝุ่นละอองกับกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $I_{SC}$ )

| ขนาดฝุ่น<br>( $\mu m$ ) | กระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $I_{SC}$ ) |     |     |     |     | หมายเหตุ |
|-------------------------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|----------|
|                         | 1 g                            | 2 g | 3 g | 4 g | 5 g |          |
| 32 - 37                 |                                |     |     |     |     |          |
| 53 - 62                 |                                |     |     |     |     |          |
| 63 - 74                 |                                |     |     |     |     |          |
| 75 - 89                 |                                |     |     |     |     |          |
| 90 - 105                |                                |     |     |     |     |          |

ตาราง 9 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณฝุ่นละอองกับกำลังไฟฟ้าจ่ายออก ( $P_{out}$ )

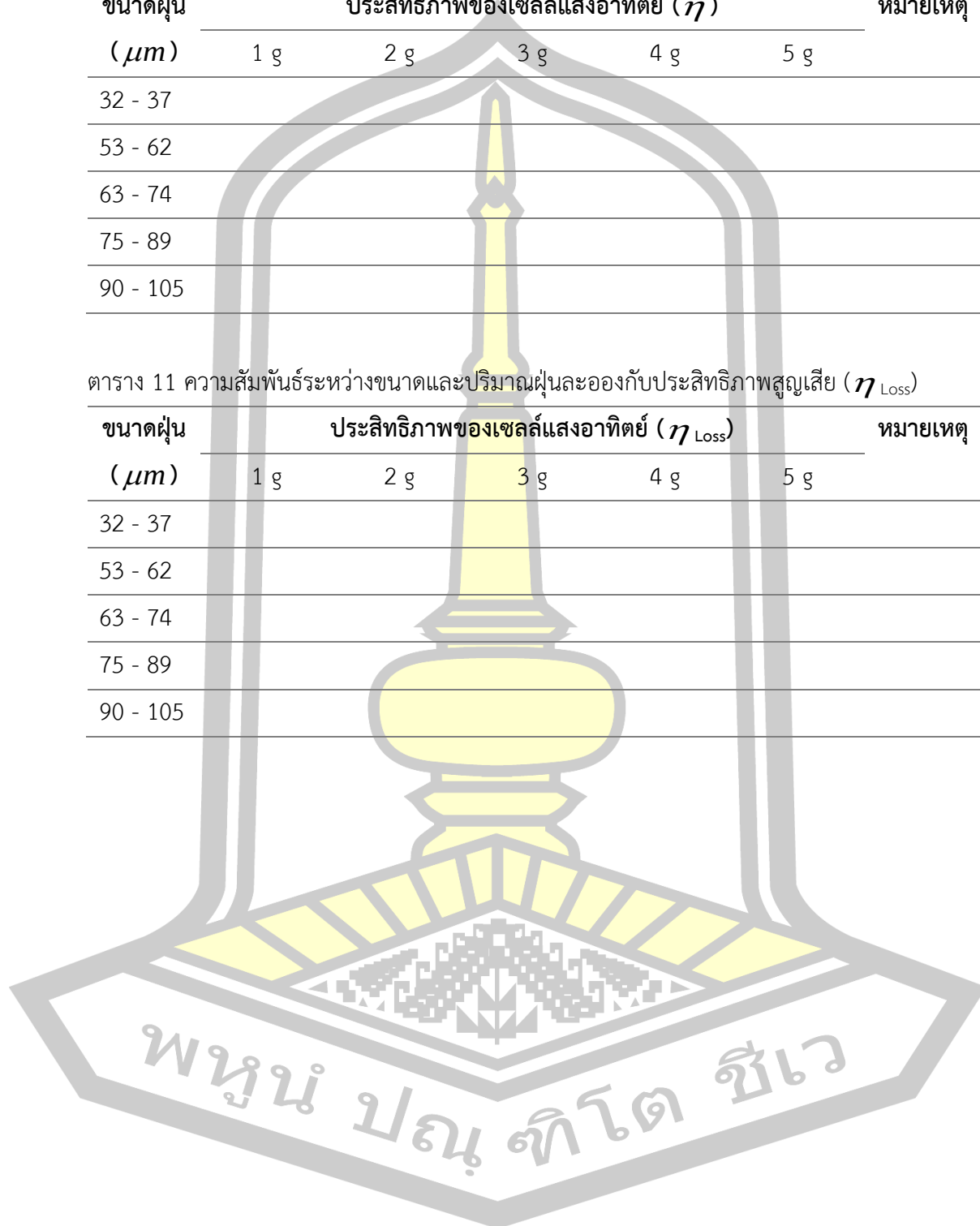
| ขนาดฝุ่น<br>( $\mu m$ ) | กำลังไฟฟ้า ( $P_{out}$ ) |     |     |     |     | หมายเหตุ |
|-------------------------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|----------|
|                         | 1 g                      | 2 g | 3 g | 4 g | 5 g |          |
| 32 - 37                 |                          |     |     |     |     |          |
| 53 - 62                 |                          |     |     |     |     |          |
| 63 - 74                 |                          |     |     |     |     |          |
| 75 - 89                 |                          |     |     |     |     |          |
| 90 - 105                |                          |     |     |     |     |          |

ตาราง 10 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณฝุ่นละอองกับประสิทธิภาพ ( $\eta$ )

| ขนาดฝุ่น<br>( $\mu m$ ) | ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta$ ) |     |     |     |     | หมายเหตุ |
|-------------------------|------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|----------|
|                         | 1 g                                      | 2 g | 3 g | 4 g | 5 g |          |
| 32 - 37                 |                                          |     |     |     |     |          |
| 53 - 62                 |                                          |     |     |     |     |          |
| 63 - 74                 |                                          |     |     |     |     |          |
| 75 - 89                 |                                          |     |     |     |     |          |
| 90 - 105                |                                          |     |     |     |     |          |

ตาราง 11 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณฝุ่นละอองกับประสิทธิภาพสูญเสีย ( $\eta_{Loss}$ )

| ขนาดฝุ่น<br>( $\mu m$ ) | ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta_{Loss}$ ) |     |     |     |     | หมายเหตุ |
|-------------------------|-------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|----------|
|                         | 1 g                                             | 2 g | 3 g | 4 g | 5 g |          |
| 32 - 37                 |                                                 |     |     |     |     |          |
| 53 - 62                 |                                                 |     |     |     |     |          |
| 63 - 74                 |                                                 |     |     |     |     |          |
| 75 - 89                 |                                                 |     |     |     |     |          |
| 90 - 105                |                                                 |     |     |     |     |          |



### 3.2 การสร้างแบบจำลองที่นำเสนอโดยงานวิจัยนี้

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 พบว่ากลุ่มตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยาที่นักวิจัยนิยมนำมาพยากรณ์หรือประมาณค่ารังสีอาทิตย์ ประกอบไปด้วย 1. อุณหภูมิอากาศ เช่น อุณหภูมิสูงสุด, ต่ำสุด, อุณหภูมิเฉลี่ย 2. ความยาวนานของแสงแดด 3. ความชื้นสัมพัทธ์ 4. ความกดอากาศ 5. ความเร็วลม 6. ปริมาณน้ำฝน 7. ปริมาณเมฆ เป็นต้น ขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศและอุตุนิยมวิทยา ของประเทศนั้นๆ ที่ทำการวิจัย

#### 3.2.1 การรวบรวมข้อมูลทางสถิติสำหรับการพัฒนาแบบจำลองรังสีอาทิตย์

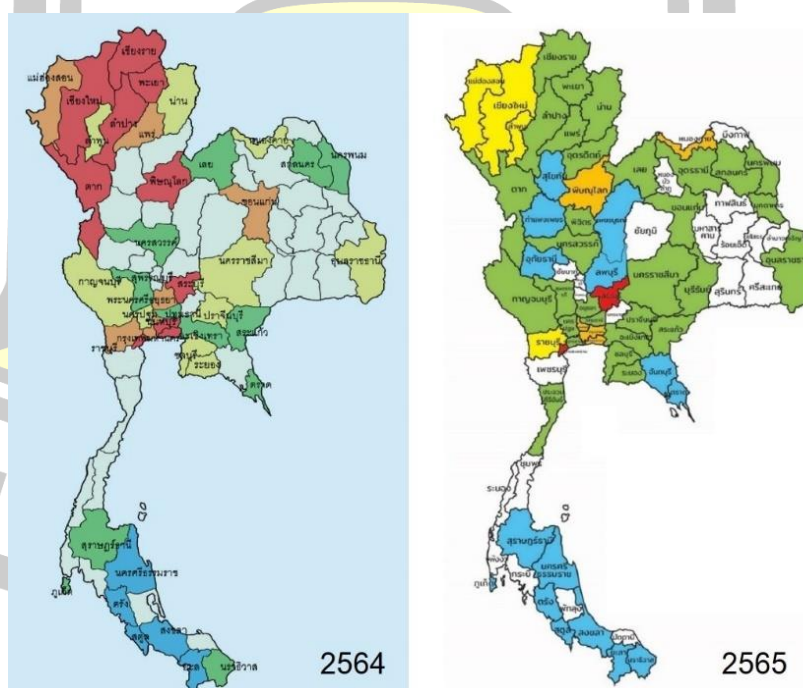
สำหรับรังสีอาทิตย์ที่เดินทางมากระทบส่วนบนของบรรยากาศโลกจะมีค่าขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์และมุมตกกระทบ โดยที่รังสีอาทิตย์ดังกล่าวหลังจากที่ผ่านชั้นบรรยากาศมายังพื้นผิวโลกรังสีอาทิตย์บางส่วนจะถูกกระเจิงด้วยโมเลกุลอากาศ เมฆ ก๊าซต่างๆ และฝุ่นละออง มีบางส่วนถูกดูดกลืนด้วยปริมาณโอโซน ก๊าซ ฝุ่นละออง และเมฆ ส่วนที่เหลือจะพุ่งตรงมาถึงพื้นผิวโลก ซึ่งจากที่กล่าวมากระบวนการดังกล่าวเรียกว่ากระบวนการดูดกลืนและการกระเจิงของรังสีอาทิตย์จากชั้นบรรยากาศโลก [63, 64] ดังนั้นรังสีรวมที่มาถึงพื้นผิวโลกในช่วงเวลาใดๆ จะขึ้นอยู่กับปริมาณเมฆ ไอน้ำ ฝุ่นละอองโอโซนและก๊าซอื่นๆ[65] โดยในกรณีของเมฆจะมีผลต่อรังสีดวงอาทิตย์มากที่สุดและมีการเปลี่ยนแปลงตามสภาวะทางอุตุนิยมวิทยาของพื้นที่นั้นๆ เช่นเดียวกันปริมาณไอน้ำจะมีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลโดยในช่วงฤดูฝนจะมีปริมาณไอน้ำมากกว่าในช่วงฤดูแล้ง และนอกจากนี้ยังมีการเปลี่ยนแปลงไปตามภูมิประเทศด้วย ไอน้ำจะถูกกลืนรังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นรังสีอินฟราเรด สำหรับปริมาณฝุ่นละอองในอากาศจะเป็นอนุภาคของแข็งที่แขวนลอยอยู่ในบรรยากาศสำหรับความหนาแน่นของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของฝุ่นละอองนั้นๆ เช่นเดียวกันกับปริมาณโอโซนจะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับตำแหน่งละติจูดและฤดูกาล โดยทั่วไปโอโซนจะถูกกลืนรังสีอาทิตย์ในช่วงรังสีอินฟราเรด เช่นเดียวกันกับในกรณีของก๊าซต่างๆ ซึ่งได้แก่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซออกซิเจน ปริมาณของก๊าซเหล่านี้จะมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาและพื้นที่ไม่มากนัก ก๊าซดังกล่าวจะถูกกลืนรังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นรังสีอินฟราเรดเช่นกัน ซึ่งจากที่กล่าวมาสามารถสรุปได้ว่าเป็นกระบวนการลดทอนรังสีอาทิตย์จากองค์ประกอบต่างๆ ของบรรยากาศ ตามกฎของบูเกอร์ (Bouguer) [66-68]ดังแสดงในสมการที่ 3.1

$$I_{n\lambda} = I_{on\lambda} e^{(-\tau_{\lambda} m_r)} \quad (3.1)$$

เมื่อ

- $I_{n\lambda}$  คือรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่น  $\lambda$  ที่ผ่านบรรยากาศมากระทบพื้นผิวโลก  
 $I_{on\lambda}$  คือรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่น  $\lambda$  ที่นอกชั้นบรรยากาศโลก  
 $\tau'_{\lambda}$  คือความลึกเชิงแสงของบรรยากาศที่ความยาวคลื่น  $\lambda$   
 $m_r$  คือมวลอากาศ

ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้เลือกพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยเป็นพื้นที่ในการศึกษา เนื่องจากพื้นที่หลายจังหวัดทางภาคเหนือมีสภาพอากาศที่ถูกปกคลุมด้วยหมอกควันและฝุ่นละออง ตามช่วงฤดูกาล อาทิเช่นช่วงเดือนพฤศจิกายน – ธันวาคม และ มกราคม – เมษายน และจะลดลง ในช่วงฤดูฝนของทุกๆ ปี โดยปัญหาการเกิดฝุ่นละอองและหมอกควันเกิดจากการจุดไฟเผาในเขตป่า เพื่อหาของป่าและล่าสัตว์ป่า และการเผาในพื้นที่เกษตรกรรมเพื่อเตรียมแปลงเพาะปลูกฤดูกาลใหม่ ส่งผลให้ควันไฟดังกล่าวกลายเป็นหมอกควันและฝุ่นละออง PM 2.5 วิฤติรุนแรงในหลายจังหวัด [69] เช่น จังหวัดเชียงราย เชียงใหม่ แม่ฮ่องสอน ที่มีระดับค่าฝุ่นเฉลี่ยสูง 100 – 550 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [70, 71] และมีจำนวนวันที่คุณภาพอากาศเกินค่ามาตรฐาน รวมไปถึงพื้นที่อื่นๆ หลาย จังหวัดในทางภาคเหนือของประเทศไทย ดังแสดงในภาพประกอบที่ 57



ภาพประกอบ 57 รายชื่อจังหวัดที่มีจำนวนวันที่คุณภาพอากาศเกินค่ามาตรฐาน ปี 2564 – 2565

ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลจังหวัดที่มีสถานีวิตรังสีอาทิตย์และอุตุนิยมวิทยา รวมไปถึงสถานีวิัดฝุ่นละอองและคุณภาพอากาศของจังหวัดในทางภาคเหนือและพบว่าจังหวัดที่มีข้อมูลดังกล่าวประกอบด้วย 7 พื้นที่ ได้แก่จังหวัดเชียงใหม่ เชียงราย แม่ฮ่องสอน น่าน แพร่ ตาก และพิษณุโลก เป็นจังหวัดที่มีข้อมูลดังกล่าวย้อนหลังตั้งแต่ปี 2555 – 2566 ซึ่งสามารถนำข้อมูลมาดำเนินการวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติของความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน จากข้อมูลอุตุนิยมวิทยาและข้อมูลดัชนีคุณภาพอากาศได้ ดังแสดงในตารางที่ 12 - 14

ตาราง 12 รายชื่อสถานีวิตรังสีอาทิตย์ภาคเหนือ

| ลำดับ | ชื่อสถานี                                                                                      | ตำแหน่ง         |                  |                 |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|-----------------|
|       |                                                                                                | ละติจูด<br>(°N) | ลองจิจูด<br>(°E) | ความสูง<br>(ม.) |
| 1     | ศูนย์บริการวิชาการที่ 7 กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ต.หนองหาร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ | 18.92           | 99.02            | 312             |
| 2     | ส่วนอุทกวิทยาที่ 2 เชียงราย ต.ริมกก อ.เมือง จ.เชียงราย                                         | 19.94           | 99.84            | 390             |
| 3     | สถานีอุตุนิยมวิทยาแม่ฮ่องสอน กรมอุตุนิยมวิทยา ต.บ้านกา อ.แม่สะเรียง จ.แม่ฮ่องสอน               | 18.17           | 97.93            | 212             |
| 4     | สถานีอุตุนิยมวิทยาแพร่ กรมอุตุนิยมวิทยา ต.นาจักร อ.เมือง จ.แพร่                                | 18.12           | 100.16           | 171             |
| 5     | สถานีตรวจอากาศเกษตรดอยมูเซอ กรมอุตุนิยมวิทยา ต.แม่ท้อ อ.เมือง จ.ตาก                            | 16.87           | 99.14            | 121             |
| 6     | สถานีอุตุนิยมวิทยาน่าน กรมอุตุนิยมวิทยา ต.คูใต้ อ.เมือง จ.น่าน                                 | 18.76           | 100.76           | 200             |
| 7     | ศูนย์บริการวิชาการที่ 8 ต.มะขามสูง อ.เมือง จ.พิษณุโลก                                          | 16.92           | 100.23           | 45              |

พหุ ประจักษ์ ชีวะ

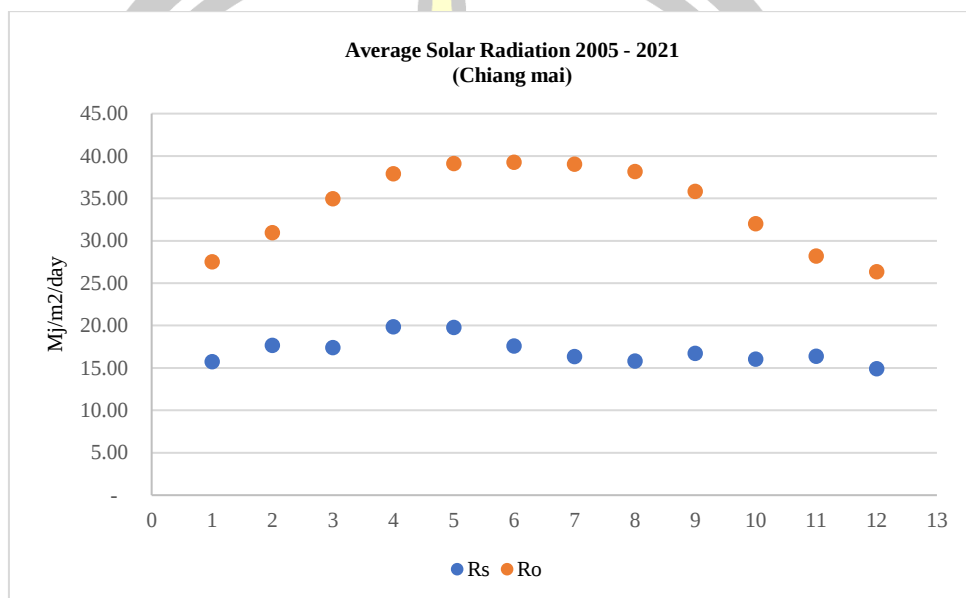
ตาราง 13 รายชื่อสถานีอุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ

| ลำดับ | ชื่อสถานี                                   | ตำแหน่ง         |                  |                 |
|-------|---------------------------------------------|-----------------|------------------|-----------------|
|       |                                             | ละติจูด<br>(°N) | ลองจิจูด<br>(°E) | ความสูง<br>(ม.) |
| 1     | ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่ | 18.47           | 98.59            | 312             |
| 2     | สถานีตรวจอากาศ จังหวัดเชียงราย              | 19.58           | 99.53            | 390             |
| 3     | สถานีตรวจอากาศแม่สะเรียง จังหวัดแม่ฮ่องสอน  | 18.17           | 97.93            | 212             |
| 4     | สถานีอุตุนิยมวิทยา จังหวัดแพร่              | 18.12           | 100.16           | 171             |
| 5     | สถานีตรวจอากาศเกษตรดอยมูเซอ จังหวัดตาก      | 16.87           | 99.14            | 121             |
| 6     | สถานีอุตุนิยมวิทยา จังหวัดน่าน              | 18.76           | 100.76           | 200             |
| 7     | สถานีอุตุนิยมวิทยา จังหวัดพิษณุโลก          | 16.47           | 100.16           | 45              |

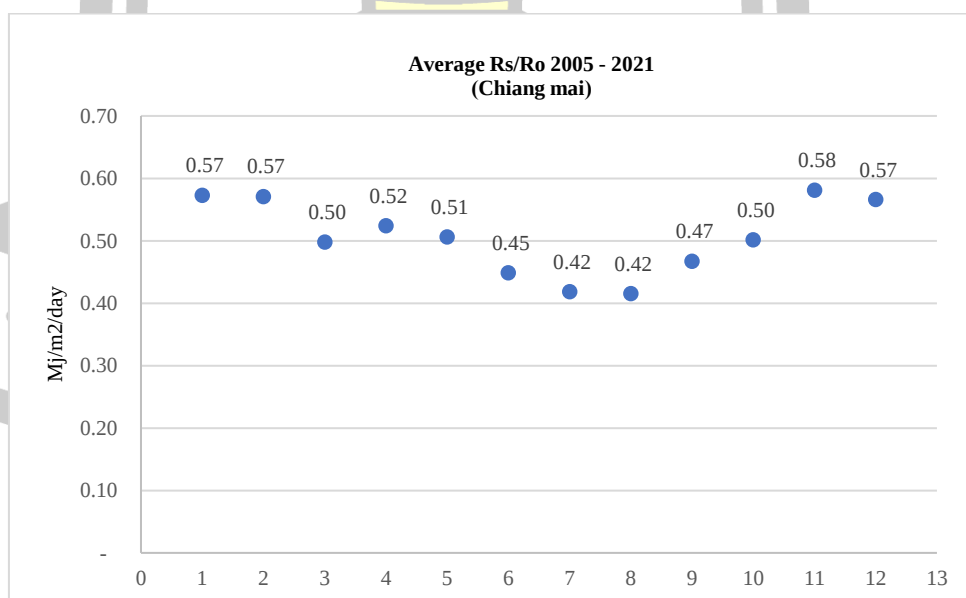
ตาราง 14 รายชื่อสถานีตรวจวัดคุณภาพอากาศภาคเหนือ

| ลำดับ | ชื่อสถานี                                                           | ตำแหน่ง         |                  |      |
|-------|---------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|------|
|       |                                                                     | ละติจูด<br>(°N) | ลองจิจูด<br>(°E) | รหัส |
| 1     | ศูนย์ราชการจังหวัดเชียงใหม่ ต.ช้างเผือก อ.เมือง จ.เชียงใหม่         | 18.83           | 98.97            | 35T  |
| 2     | โรงเรียนยุพราชวิทยาลัย ต.ศรีภูมิ อ.เมือง จ.เชียงใหม่                | 18.79           | 98.98            | 36T  |
| 3     | สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ต.เวียง อ.เมือง จ.เชียงราย   | 19.91           | 99.82            | 57T  |
| 4     | สำนักงานสาธารณสุขแม่สาย ต.เวียงพางคำ อ.แม่สาย จ.เชียงราย            | 20.42           | 99.88            | 73T  |
| 5     | สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม ต.จองคำ อ.เมือง จ.แม่ฮ่องสอน | 19.30           | 97.97            | 58T  |
| 6     | สถานีอุตุนิยมวิทยาจังหวัดแพร่ ต.นาจักร อ.เมือง จ.แพร่               | 18.13           | 100.16           | 69T  |
| 7     | ศูนย์การศึกษาออกโรงเรียน ต.แม่ปะ อ.แม่สอด จ.ตาก                     | 16.73           | 98.56            | 76T  |
| 8     | โรงพยาบาลเฉลิมพระเกียรติ ต.ห้วยโก๋น อ.เฉลิมพระเกียรติ จ.น่าน        | 19.57           | 101.08           | 75T  |
| 9     | สำนักงานเทศบาลเมืองน่าน ต.ในเวียง อ.เมือง จ.น่าน                    | 18.79           | 100.77           | 67T  |
| 10    | สวนขม่านเฉลิมพระเกียรติ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.พิษณุโลก                | 16.82           | 100.26           | 86T  |

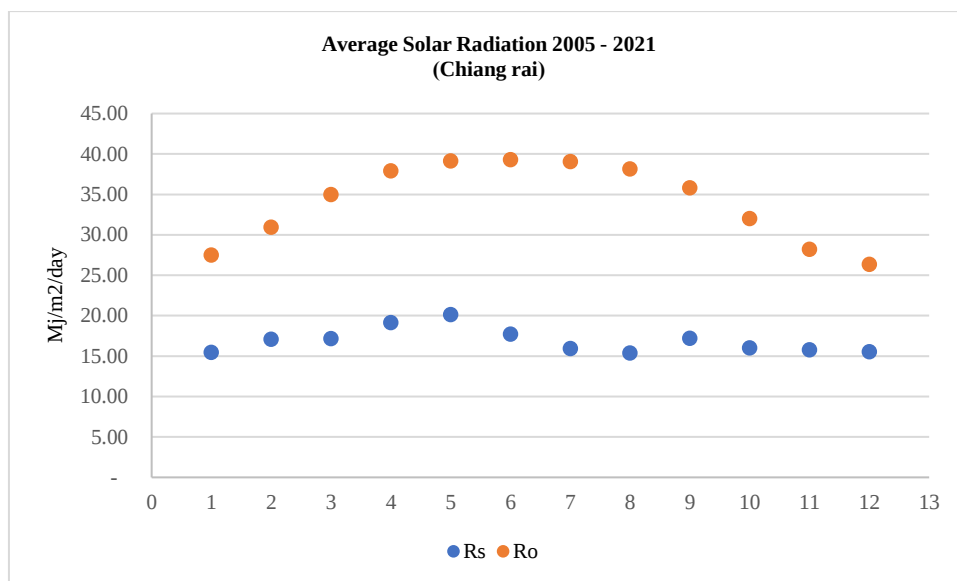
ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของความเข้มรังสีรวมเฉลี่ยรายเดือนของสถานีวัดรังสีอาทิตย์ทั้ง 7 จังหวัดในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย ตั้งแต่ปี 2548 – 2564 เพื่อตรวจสอบสัดส่วนการส่องผ่านรังสีอาทิตย์รายเดือนของสถานีวัดของภาคเหนือของประเทศไทย ดังแสดงในภาพประกอบที่ 58 - 73



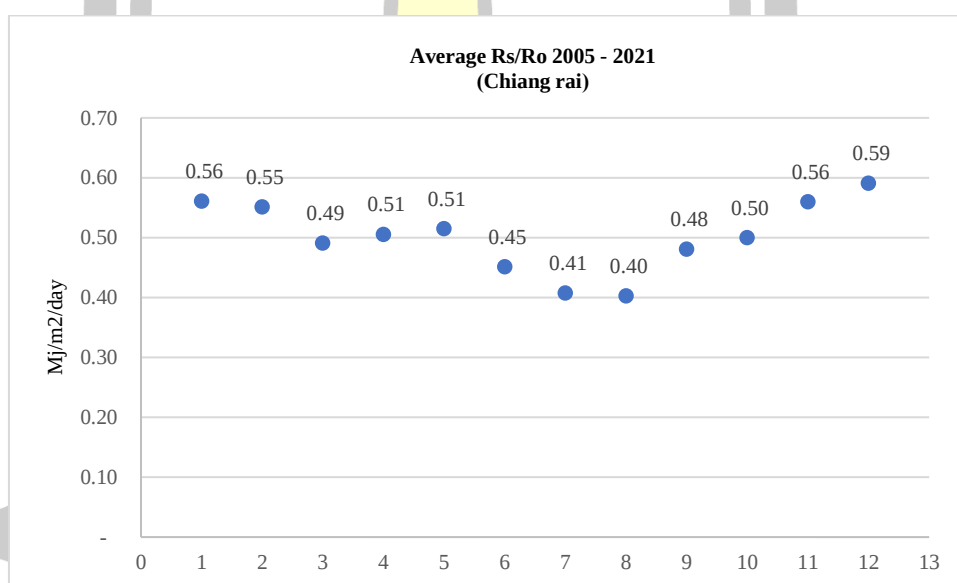
ภาพประกอบ 58 รังสีอาทิตย์รวมเฉลี่ยรายเดือนของสถานีวัด จ.เชียงใหม่ ปี 2548 – 2564



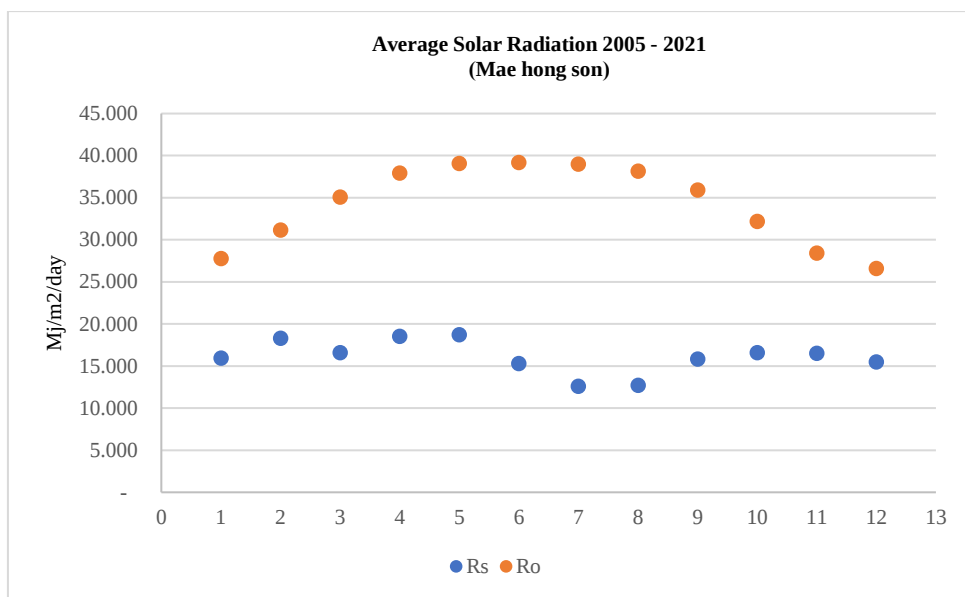
ภาพประกอบ 59 อัตราส่วนรังสีอาทิตย์รวมรายเดือนของสถานีวัด จ.เชียงใหม่ ปี 2548 - 2564



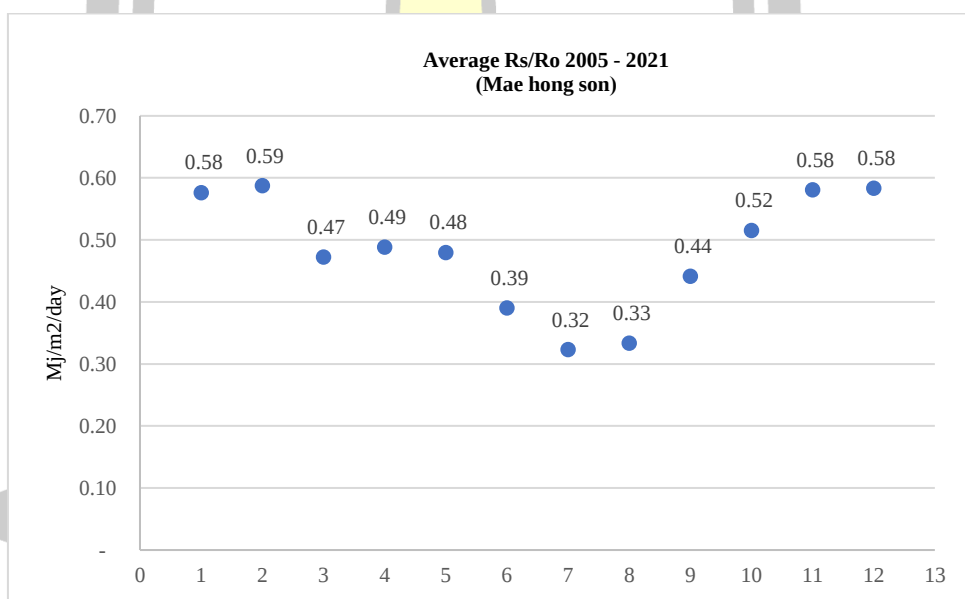
ภาพประกอบ 60 รังสีอาทิตย์รวมเฉลี่ยรายเดือนของสถานีวัด จ.เชียงราย ปี 2548 - 2564



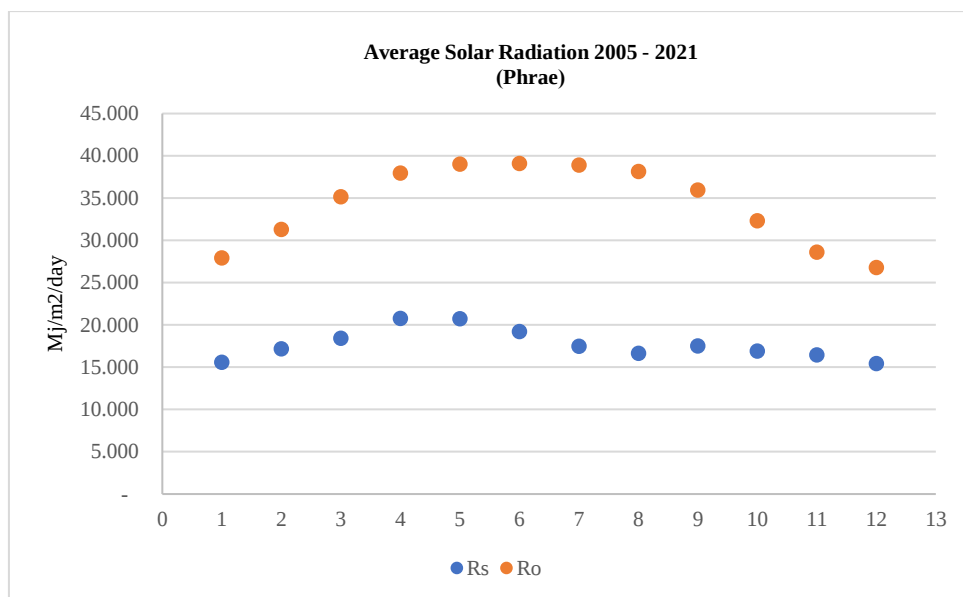
ภาพประกอบ 61 อัตราส่วนรังสีอาทิตย์รวมรายเดือนของสถานีวัด จ.เชียงราย ปี 2548 - 2564



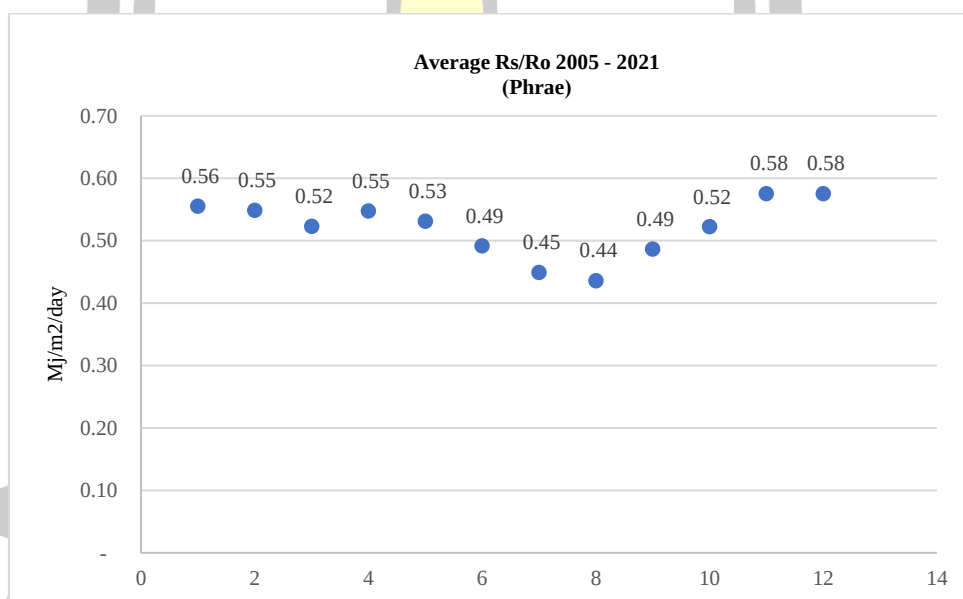
ภาพประกอบ 62 รังสีอาทิตย์รวมเฉลี่ยรายเดือนของสถานีวัด จ.แม่ฮ่องสอน ปี 2548 – 2564



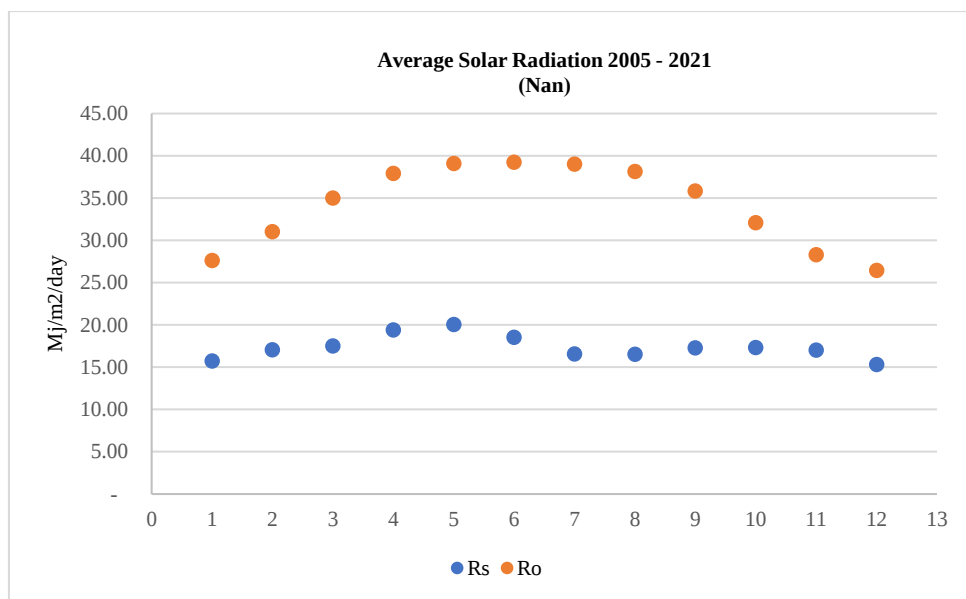
ภาพประกอบ 63 อัตราส่วนรังสีอาทิตย์รวมรายเดือนของสถานีวัด จ.แม่ฮ่องสอน ปี 2548 - 2564



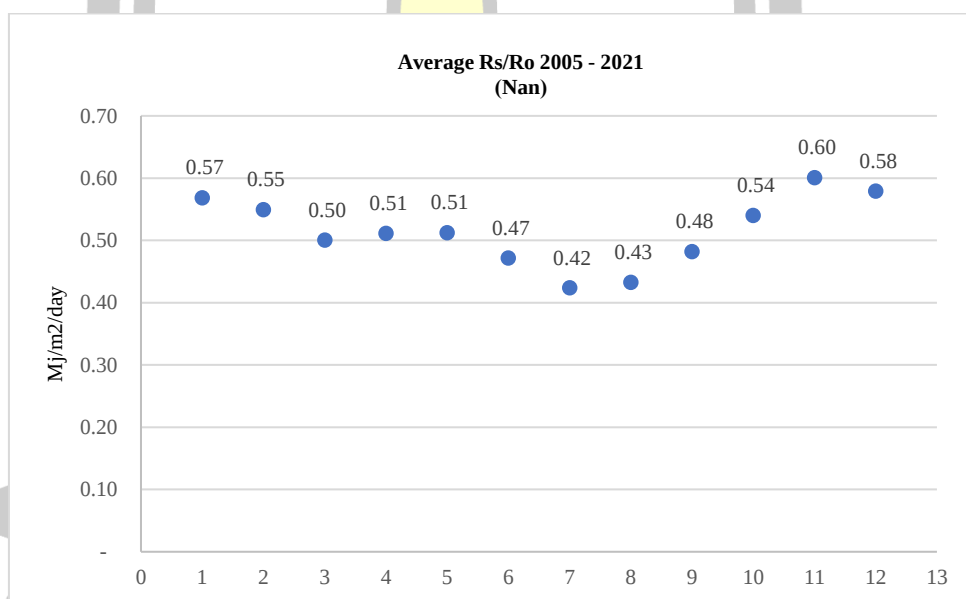
ภาพประกอบ 64 รังสีอาทิตย์รวมเฉลี่ยรายเดือนของสถานีวัด จ.แพร่ ปี 2548 - 2564



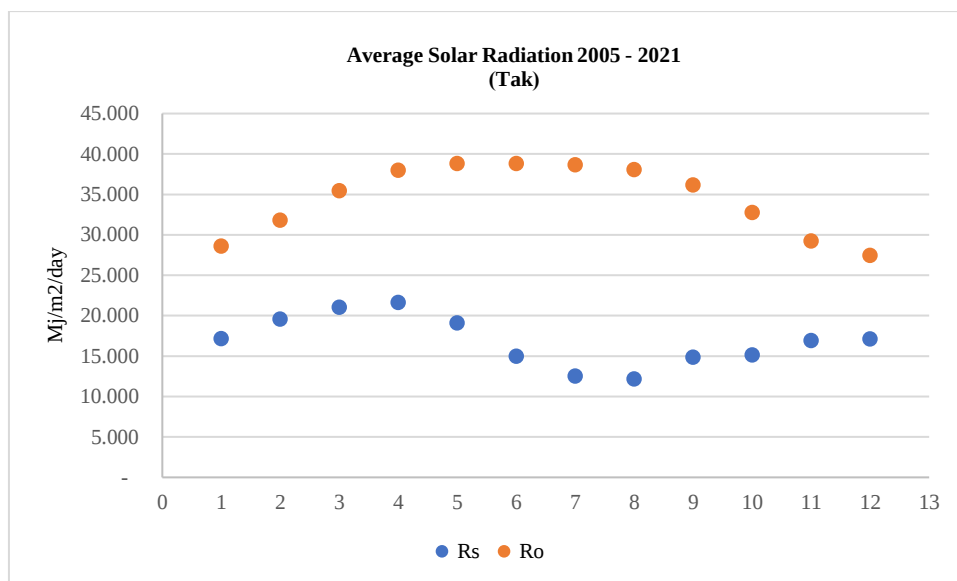
ภาพประกอบ 65 อัตราส่วนรังสีอาทิตย์รวมรายเดือนของสถานีวัด จ.แพร่ ปี 2548 - 2564



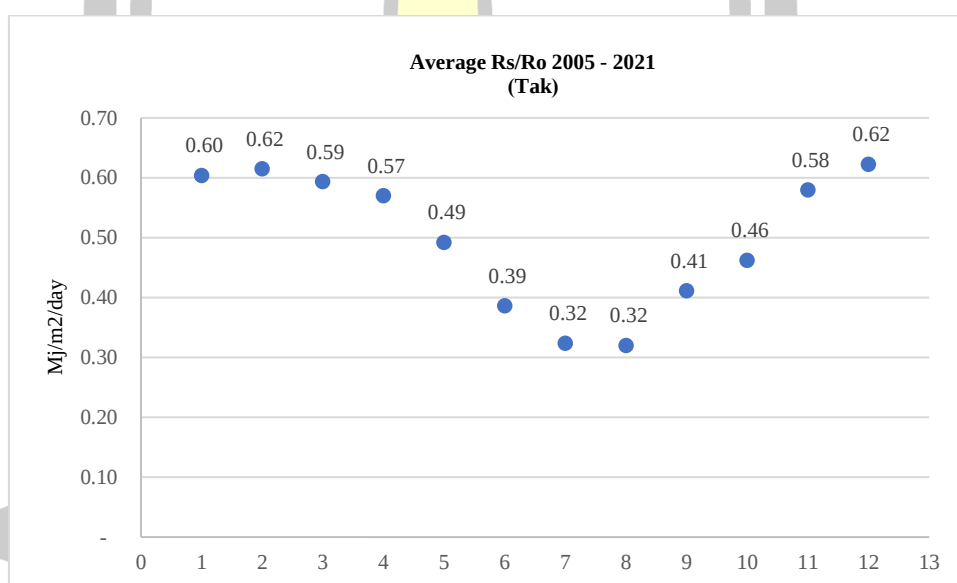
ภาพประกอบ 66 รังสีอาทิตย์รวมเฉลี่ยรายเดือนของสถานีวัด จ.น่าน ปี 2548 - 2564



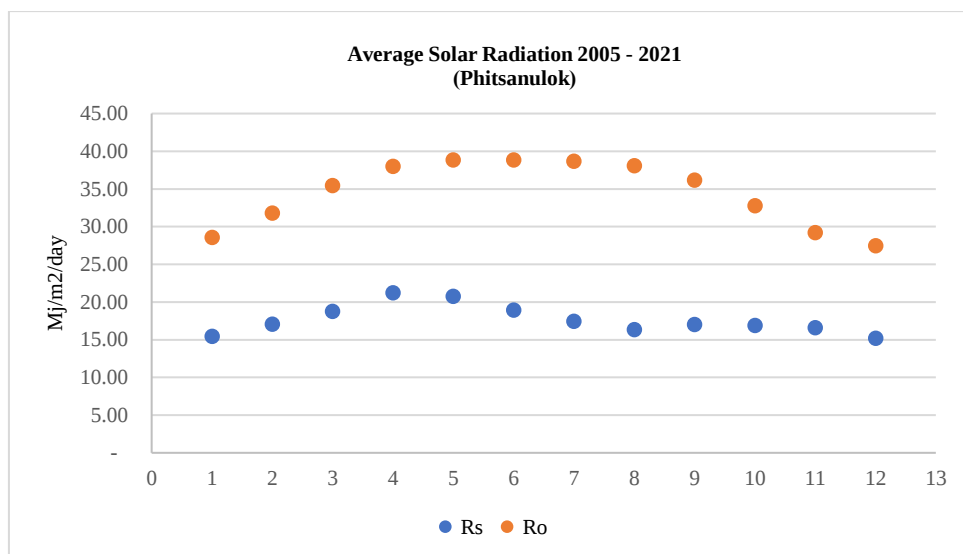
ภาพประกอบ 67 อัตราส่วนรังสีอาทิตย์รวมรายเดือนของสถานีวัด จ.น่าน ปี 2548 - 2564



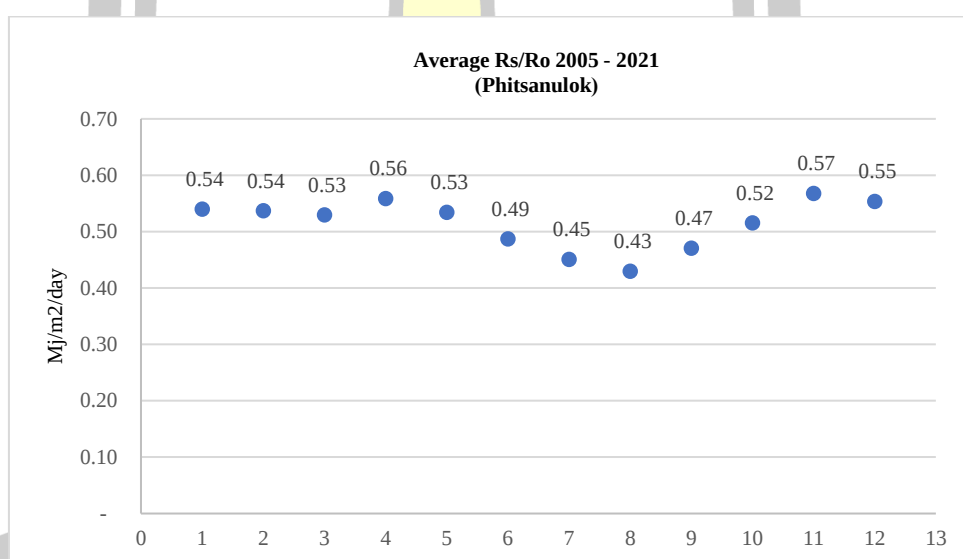
ภาพประกอบ 68 รังสีอาทิตย์รวมเฉลี่ยรายเดือนของสถานีวัด จ.ตาก ปี 2548 - 2564



ภาพประกอบ 69 อัตราส่วนรังสีอาทิตย์รวมรายเดือนของสถานีวัด จ.ตาก ปี 2548 - 2564

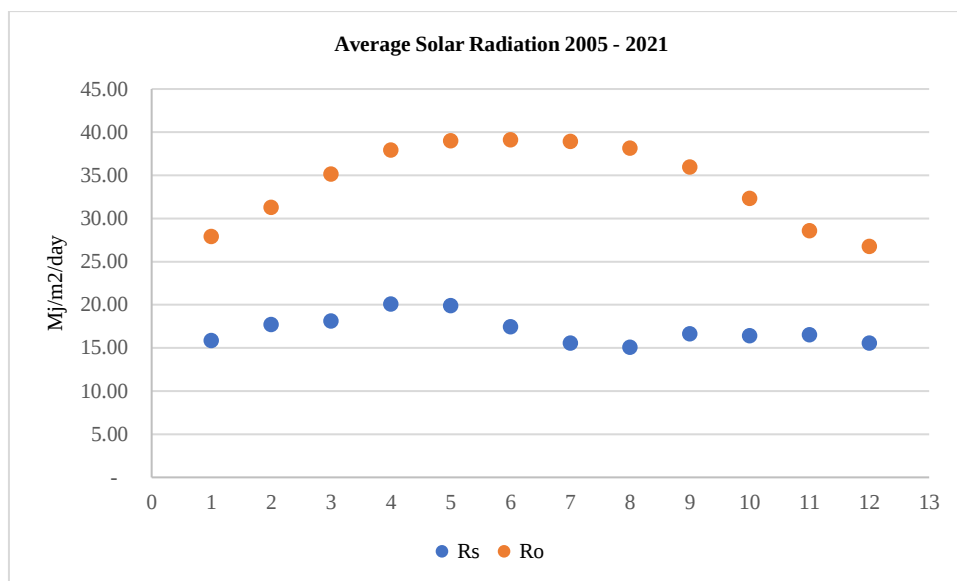


ภาพประกอบ 70 รังสีอาทิตย์รวมเฉลี่ยรายเดือนของสถานีวัด จ.พิษณุโลก ปี 2548 – 2564

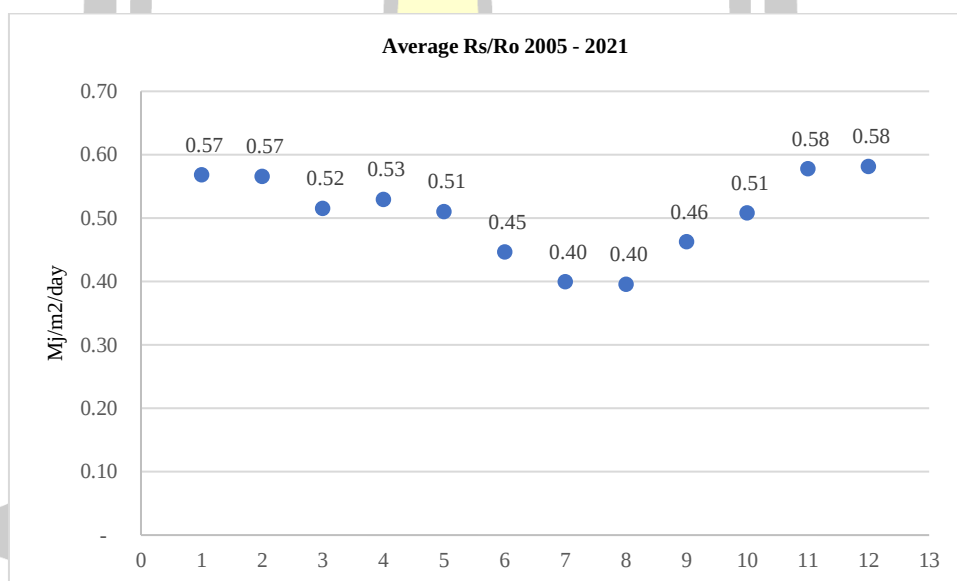


ภาพประกอบ 71 อัตราส่วนรังสีอาทิตย์รวมรายเดือนของสถานีวัด จ.พิษณุโลก ปี 2548 - 2564

พูน ปณ ทิโต ชีเว



ภาพประกอบ 72 รังสีอาทิตย์รวมเฉลี่ยรายเดือนทั้ง 7 จังหวัด ปี 2548 – 2564



ภาพประกอบ 73 อัตราส่วนรังสีอาทิตย์รวมรายเดือนทั้ง 7 จังหวัด ปี 2548 – 2564

จากข้อมูลพบว่าสัดส่วนการส่องผ่านรังสีอาทิตย์รวมรายเดือนจะเริ่มลดลงตั้งแต่เดือน พฤษภาคม - ตุลาคม โดยในเดือนกรกฎาคม - สิงหาคม มีสัดส่วนการส่องผ่านรังสีอาทิตย์รวมน้อยที่สุดในรอบปี

### 3.2.2 สมการทางคณิตศาสตร์สำหรับการพัฒนาแบบจำลองรังสีอาทิตย์

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้สมการทางคณิตศาสตร์สำหรับการพัฒนาแบบจำลองรังสีอาทิตย์ โดยอ้างอิงสมการที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการลดทอนรังสีอาทิตย์จากการกระเจิงและการดูดกลืนขององค์ประกอบต่างๆ ของบรรยากาศ ประกอบด้วยสมการที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

1. สมการการลดทอนรังสีอาทิตย์จากโมเลกุลอากาศ ทฤษฎีของลอร์ดเรย์ลีห์ (Lord Rayleigh, Rayleigh Scattering) [60, 72-74]แสดงในสมการที่ 3.2

$$\tau_r = e^{(-0.0903m_a^{0.84}(1+m_a-m_a^{1.01}))} \quad (3.2)$$

เมื่อ

$\tau_r$  คือ การลดทอนรังสีอาทิตย์จากโมเลกุลอากาศ

$m_a$  คือ มวลอากาศจากความดันที่แตกต่างของระดับความสูงของน้ำทะเล

$m_r$  คือ มวลอากาศ

$$m_a = m_r \left( \frac{p}{101.325} \right) \quad (3.3)$$

เมื่อ

$p$  คือ ความดันบรรยากาศ (กิโลปาสกาล)

ค่าความดันบรรยากาศ  $p$  ที่ระดับความสูง  $z$  จากระดับน้ำทะเลสามารถคำนวณ โดยใช้สูตรของ Lunde

$$\frac{p}{p_0} = e^{(-0.0001184z)} \quad (3.4)$$

$p_0$  คือ ความดันบรรยากาศที่ระดับน้ำทะเล (101.325 กิโลปาสกาล)

$z$  คือ ความสูงจากระดับน้ำทะเล (เมตร)

$$m_r = \frac{1}{(\cos \theta_z + 0.15(93.885 - \theta_z)^{-1.253})} \quad (3.5)$$

$\theta_z$  คือ มุมเซนธิ์ของดวงอาทิตย์ (องศา)

$$\theta_z = \cos^{-1}(\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega) \quad (3.6)$$

เมื่อ

$\varphi$  คือ มุมละติจูด (องศา)  
 $\delta$  คือ มุมละติจูด (องศา)  
 $\omega$  คือ มุมชั่วโมงของดวงอาทิตย์ (องศา)

$$\omega = 15(12 - st) \quad (3.7)$$

เมื่อ

$st$  คือ เวลาของดวงอาทิตย์ (ชั่วโมง)

$$st = localtime - 4(L_{st} - L_{loc}) + E \quad (3.8)$$

$$E = 9.87 \sin 2b - 7.53 \cos b - 1.50 \sin b \quad (3.9)$$

$$b = 360 \frac{(j-81)}{364} \quad (3.10)$$

เมื่อ

$L_{st}$  คือ ลองจิจูดมาตรฐาน (ประเทศไทยใช้ 105 E) (Standard longitude angle)

$L_{loc}$  คือ ลองจิจูดของตำแหน่งที่ต้องการคำนวณ (องศา) (Local longitude angle)

$E$  คือ ความแตกต่างระหว่างเวลาดวงอาทิตย์กับเวลาดวงอาทิตย์เฉลี่ย

$j$  คือ ลำดับจำนวนวันในรอบปี

$$\delta = 23.45 * \sin \left[ \frac{360(j+284)}{365} \right] \quad (3.11)$$

2. สมการการลดทอนรังสีอาทิตย์จากฝุ่นละอองในช่วงความยาวคลื่นกว้าง ทฤษฎีของเมชเลอร์ (Mächler Law) [26, 75]แสดงในสมการที่ 3.12

$$\tau_{are} = (0.12445\alpha - 0.0162) + (1.003 - 0.1252\alpha)e^{((- \beta m_a)(1.089\alpha + 0.5123))} \quad (3.12)$$

เมื่อ

$\tau_{are}$  คือ การลดทอนรังสีอาทิตย์จากฝุ่นละออง

$\alpha$  คือ ตัวเลขยกกำลังของอังสตรอม

$\beta$  คือ สัมประสิทธิ์ความขุ่นมัวของบรรยากาศของอังสตรอม

โดยจากสมการของเซริม จันทร์ฉาย (Serm Janjai) ได้นำเสนอการหาค่าสัมประสิทธิ์ความขุ่นมัวของอังสตรอมจากข้อมูลทัศนวิสัย [26] แสดงในสมการที่ 3.13

$$\beta = 0.589 - 0.068vis + 0.0019vis^2 \quad (3.13)$$

เมื่อ

$vis$  คือ ทัศนวิสัย (กิโลเมตร)

3. สมการการลดทอนรังสีอาทิตย์จากปริมาณไอน้ำในอากาศ ทฤษฎีของลาซิสและแฮนเซน (Lacis and Hansen) [76-78] แสดงในสมการที่ 3.14

$$\tau_w = 1 - \frac{2.4959u}{(1 + 0.79034u)^{0.638} + 6.385u} \quad (3.14)$$

เมื่อ

$$u = m_r w_{var} \quad (3.15)$$

$\tau_w$  คือ การลดทอนรังสีอาทิตย์จากปริมาณไอน้ำในอากาศ

$m_r$  คือ มวลอากาศ

$w_{var}$  คือ ปริมาณไอน้ำ (เซนติเมตร)

โดยเซริม จันทร์ฉาย (Serm Janjai) ได้นำเสนอสมการการหาปริมาณไอน้ำจากข้อมูลอุตุนิยมวิทยาผิวพื้น โดยมีการเสนอสูตรเอมไพริคัลสำหรับคำนวณปริมาณไอน้ำจากข้อมูลอุตุนิยมวิทยาผิวพื้นในบริเวณต่างๆ [64] ดังสมการที่ 3.16

$$w_{var} = 0.8933e^{\left(\frac{0.1715(rh)(pvs)}{T}\right)} \quad (3.16)$$

เมื่อ

 $rh$  คือ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ $T$  คือ อุณหภูมิแวดล้อม (เคลวิน) $pvs$  คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัว (มิลลิบาร์)

และ

$$pvs = e^{\left(26.23 - \frac{5416}{T}\right)} \quad (3.17)$$

4. สมการการลดทอนรังสีอาทิตย์จากปริมาณโอโซน ทฤษฎีของลาซิสและแฮนเซน (Lacis and Hansen) [79] แสดงในสมการที่ 3.18

$$\tau_o = 1 - \frac{0.02118u_o}{1 + 0.042u_o + 0.000323u_o^2} + \frac{1.082u_o}{(1 + 138.6u_o)^{0.805}} + \frac{0.0658u_o}{1 + (103.6u_o)^3} \quad (3.18)$$

เมื่อ

$$u_o = lm_r \quad (3.19)$$

 $\tau_o$  คือ การลดทอนรังสีอาทิตย์จากปริมาณโอโซน $m_r$  คือ มวลอากาศ $l$  คือ ปริมาณโอโซน (เซนติเมตร)

5. สมการการลดทอนรังสีอาทิตย์จากโมเลกุลของก๊าซต่างๆ ทฤษฎีของบูเกอร์ (Bouguer) [80] [81] แสดงในสมการที่ 3.20

$$\tau_g = e^{(-0.0127m_a^{0.26})} \quad (3.20)$$

เมื่อ

 $\tau_g$  คือ การลดทอนรังสีอาทิตย์จากโมเลกุลของก๊าซต่างๆ $m_a$  คือ มวลอากาศจากความดันที่แตกต่างของระดับความสูงของน้ำทะเล

6. สมการการสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนจากปริมาณเมฆปกคลุมและฝุ่นละอองในอากาศ  
แสดงในสมการที่ 3.21

$$\sigma_f = e^{-\left(1 - \frac{n_{cloud}}{10}\right)} * e^{-\left(\frac{n_{pm2.5}}{\sum_{pm2.5}}\right)} * e^{-\left(\frac{n_{pm10}}{\sum_{pm10}}\right)} \quad (3.21)$$

เมื่อ

$n_{cloud}$  คือ ปริมาณเมฆปกคลุม 1 – 10 ส่วน

$n_{pm2.5}$  และ  $n_{pm10}$  คือ ปริมาณฝุ่นละออง pm2.5 และ pm10

$\sum_{pm2.5}$  และ  $\sum_{pm10}$  คือ ผลรวมของปริมาณฝุ่นละออง pm2.5 และ pm10

7. สมการสำหรับคำนวณหารังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือน ทฤษฎี  
ของบูเกอร์ (Bouguer) [82] [83] แสดงในสมการที่ 3.22

$$R_o = \frac{24}{\pi} I_{sc} E_o \left[ \frac{\pi}{180} \omega_s \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s \right] \quad (3.22)$$

และ

$$\omega_s = \cos^{-1} (-\tan \phi \tan \delta) \quad (3.23)$$

$$E_o = 1 + 0.033 \cos \frac{360 j}{365} \quad (3.24)$$

เมื่อ

$R_o$  คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก ( $Mj/m^2/day$ )

$I_{sc}$  คือ ค่าคงที่ของรังสีอาทิตย์ (solar constant) ( $J/m^2/day$ )

$E_o$  คือ ค่าแฟกเตอร์แก้ไขจากการแปรค่าของระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์

$\delta$  คือ มุมเดคลิเนชันของดวงอาทิตย์ (องศา)

$\phi$  คือ ละติจูดของตำแหน่งที่พิจารณา (องศา)

$\omega_s$  คือ มุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตก (องศา)

### 3.2.3 ตัวแปรอิสระที่ใช้ในงานวิจัย

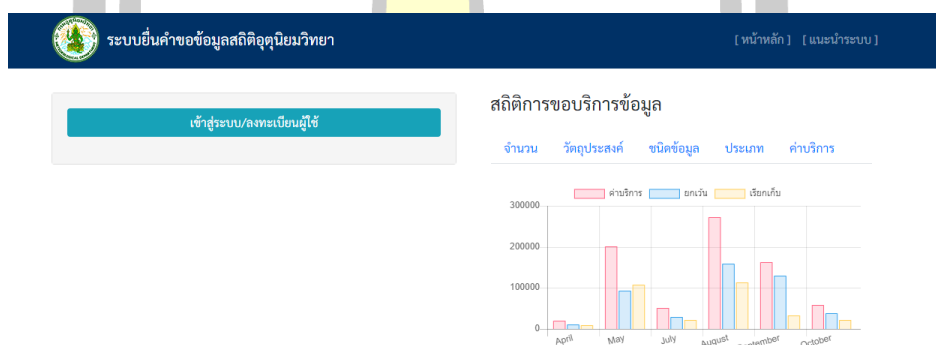
ผู้วิจัยได้ดำเนินการเก็บข้อมูลตัวแปรอิสระที่ใช้ในงานวิจัย ที่จะนำมาใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประมาณค่ารังสีอาทิตย์ แบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ

#### 1. ตัวแปรอิสระด้านภูมิประเทศ

สำหรับตัวแปรอิสระด้านภูมิประเทศประกอบด้วย 1. มุมชั่วโมงของดวงอาทิตย์ 2. มุมเดคลิเนชัน และ 3. ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบเหนือบรรยากาศ

#### 2. ตัวแปรอิสระด้านสภาพภูมิอากาศ จากกรมอุตุนิยมวิทยา

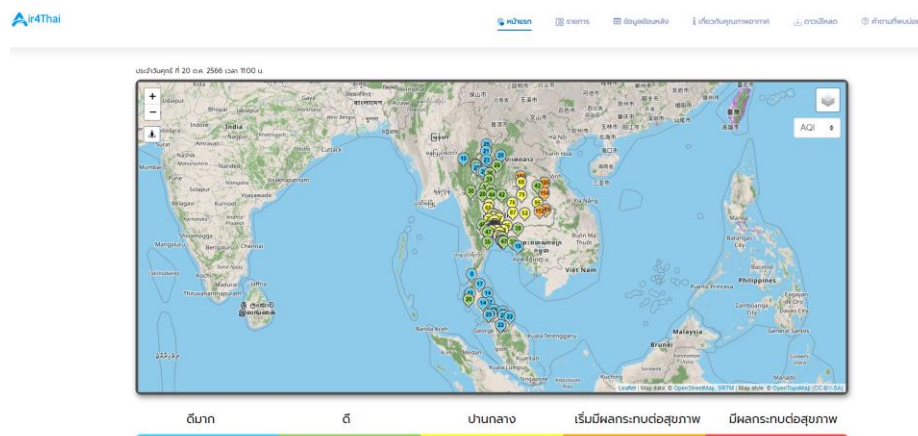
สำหรับตัวแปรอิสระด้านสภาพภูมิอากาศ จากอุตุนิยมวิทยา ผู้วิจัยได้ดำเนินการเก็บข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยาผ่านเว็บไซต์ [www.tmd.go.th](http://www.tmd.go.th) จังหวัดทางภาคเหนือของประเทศไทย ประกอบไปด้วย 1. อุณหภูมิสูงสุด/ต่ำสุด/เฉลี่ย 2. ความชื้นสัมพัทธ์ และ 3. ปริมาณเมฆ แสดงในภาพประกอบที่ 74



ภาพประกอบ 74 เว็บไซต์บริการข้อมูลสถิติอุตุนิยมวิทยา กรมอุตุนิยมวิทยา

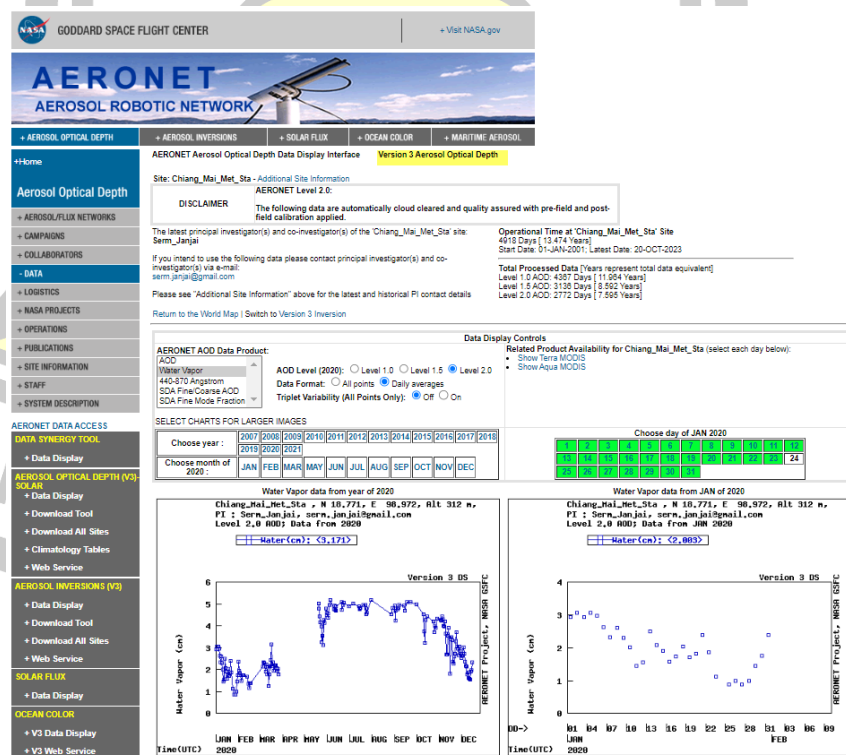
#### 3. ตัวแปรอิสระด้านคุณภาพอากาศ

- ฝุ่นละอองในอากาศ ผู้วิจัยได้ดำเนินการเก็บข้อมูลจากกรมควบคุมมลพิษผ่านเว็บไซต์ <http://air4thai.pcd.go.th> ซึ่งเป็นข้อมูลดัชนีคุณภาพอากาศ (Air Quality Index : AQI) ประกอบไปด้วย 1. ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM2.5) 2. ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน (PM10) และ 3. ก๊าซโอโซน (O<sub>3</sub>) แสดงในภาพประกอบที่ 75



ภาพประกอบ 75 เว็บไซต์บริการข้อมูลสถิติคุณภาพอากาศ กรมควบคุมมลพิษ

- ปริมาณไอน้ำในอากาศและเลขยกกำลังของอังสตรอม ผู้วิจัยได้ดำเนินการเก็บข้อมูลปริมาณไอน้ำในบรรยากาศและเลขยกกำลังของอังสตรอม ผ่านทางสหพันธ์เครือข่ายการสำรวจระยะไกลของฝนละอองภาคพื้นดิน Aerosol Robotic Network หรือ A E R O N E T เว็บไซต์ <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/> ขององค์การนาซ่า (NASA) ประเทศสหรัฐอเมริกา [84] แสดงในภาพประกอบที่ 76



ภาพประกอบ 76 เว็บไซต์บริการข้อมูลปริมาณไอน้ำในอากาศ จาก A E R O N E T

สำหรับข้อมูลทั้งหมดนี้ จะถูกนำมาเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประมาณค่ารังสีอาทิตย์ โดยการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Analysis) โดยข้อมูลรังสีอาทิตย์ที่ได้จากแบบจำลอง จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับเพื่อตรวจสอบความถูกต้องและความแม่นยำกับข้อมูลรังสีอาทิตย์รายวันในแต่ละเดือนจากเครื่องวัดรังสีอาทิตย์ (Pyranometer) จากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ภายในประเทศ โดยตัวแปรอิสระต่างๆ จะถูกนำมาหาค่าสหสัมพันธ์ (Pearson Correlation) ซึ่งเป็นวิธีทางสถิติที่นำมาใช้วิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ของข้อมูลมากที่สุดวิธีหนึ่ง ในขั้นตอนนี้จะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระที่มีผลต่อการสร้างแบบจำลองประมาณค่ารังสีอาทิตย์ โดยตัวแปรอิสระที่ได้จากอุตุนิยมวิทยา ทั้งสภาพภูมิอากาศและคุณภาพอากาศ จะถูกนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ซึ่งข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิจัยจะเป็นข้อมูลย้อนหลัง 10 ปี คือตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2555 – ธันวาคม พ.ศ. 2564 เพื่อประมาณค่ารังสีอาทิตย์ในปี พ.ศ. 2565 สำหรับตัวแปรอิสระที่จะนำมาสร้างสมการสำหรับประมาณค่ารังสีอาทิตย์ ต้องมีความสัมพันธ์กันในระดับสูง หรือมีค่าสหสัมพันธ์ ( $r$ ) ที่มีค่ามากกว่า 0.7 ตามตารางที่ 17 และสมการที่ 3.25 – 3.26

ตาราง 15 การแปลความหมายค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

| ค่าสหสัมพันธ์ | ความหมาย                        |
|---------------|---------------------------------|
| 0.90 – 1.00   | มีความสัมพันธ์กันมากที่สุด      |
| 0.70 – 0.90   | มีความสัมพันธ์กันในระดับสูง     |
| 0.50 – 0.70   | มีความสัมพันธ์กันในระดับปานกลาง |
| 0.30 – 0.50   | มีความสัมพันธ์กันในระดับต่ำ     |
| 0.00 – 0.30   | มีความสัมพันธ์กันในระดับต่ำมาก  |

$$\tau_{taa} = \tau_r + \tau_g + \tau_o + \tau_w + \sigma_f \quad (3.25)$$

$$\frac{R_{es}}{R_0} = a + b(e^{\tau_{taa}}) \quad (3.26)$$

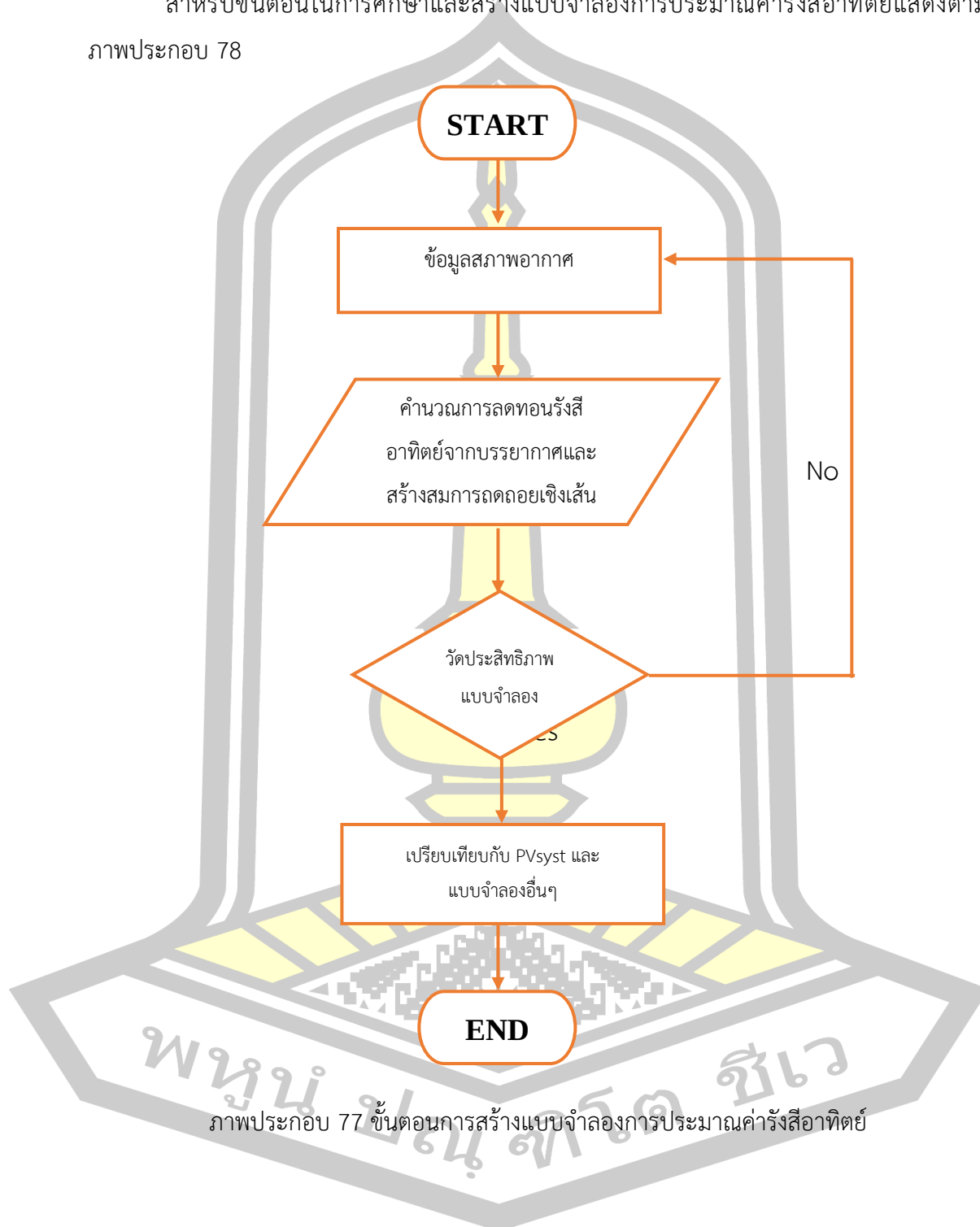
เมื่อ

$R_{es}$  คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก ( $\text{Mj/m}^2/\text{day}$ )

$R_0$  คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก ( $\text{Mj/m}^2/\text{day}$ )

$\tau_{taa}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของรังสีอาทิตย์จากบรรยากาศ

$a, b$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ตัวแปรสำหรับประมาณค่า  
 สำหรับขั้นตอนในการศึกษาและสร้างแบบจำลองการประมาณค่ารังสีอาทิตย์แสดงตาม  
 ภาพประกอบ 78



### 3.2.4 การวัดประสิทธิภาพแบบจำลองประมาณค่ารังสีอาทิตย์โดยวิธีการทางสถิติ

ในการสร้างแบบจำลองสำหรับการประมาณค่ารังสีอาทิตย์ด้วยการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นเพื่อกำหนดความแม่นยำและวัดประสิทธิภาพในการพยากรณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ข้อมูลทางสถิติที่เสนอเหล่านี้ ต้องใช้เทคนิคการประมาณค่าความผิดพลาดทางสถิติ ซึ่งการประมาณค่าความผิดพลาดจะมีประโยชน์ในการจัดเรียงแบบจำลองทางสถิติและเพื่อคัดสรรความแม่นยำของสมการพยากรณ์ ประกอบด้วยค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดสัมบูรณ์ (MAD, MAE) ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ (MAPE) [85, 86]

1. ค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Mean Absolute Deviation, Mean Absolute Error : MAD, MAE) เป็นวิธีการวัดความแม่นยำ โดยแก้ปัญหาวิธีค่าเฉลี่ยของความผิดพลาด จะพิจารณาความแตกต่างค่าจริงกับค่าพยากรณ์ ในการวัดความแม่นยำจากวิธีนี้ ยิ่งค่าที่ได้มีค่าน้อย แสดงว่าแบบจำลองมีความแม่นยำสูง[87, 88] ดังแสดงในสมการที่ 3.27

$$MAD, MAE = \frac{\sum_{t=1}^n |A_t - F_t|}{n} \quad (3.27)$$

2. ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean square error : RMSE) คือค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย เป็นการวัดความแตกต่างระหว่างค่าจริงและค่าที่ได้จากแบบจำลอง ค่า RMSE ที่ต่ำที่สุดจะแสดงถึงความแม่นยำของแบบจำลอง[88, 89] ดังแสดงในสมการที่ 3.28

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}} \quad (3.28)$$

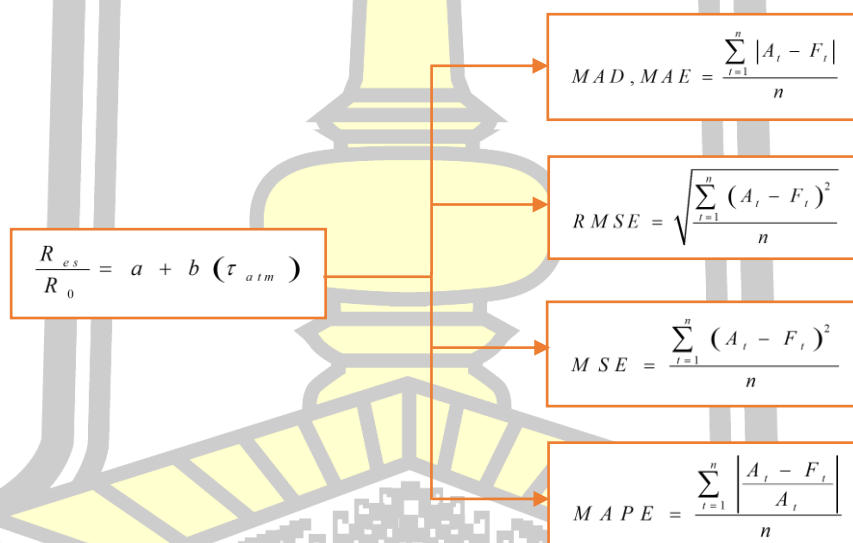
3. ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย คือค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean squared error : MSE) เป็นการวัดค่าความคลาดเคลื่อน โดยการนำค่าความคลาดเคลื่อนมายกกำลังแล้วนำไปหาค่าเฉลี่ย ในการวัดค่าความแม่นยำจากวิธีนี้ยิ่งค่าที่ได้มีค่าน้อย แสดงว่าแบบจำลองที่ได้จะมีความแม่นยำสูง[88, 90] ดังแสดงในสมการที่ 3.29

$$MSE = \frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n} \quad (3.29)$$

4. ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ (Mean absolute percentage error : MAPE) เป็นวิธีวัดความแม่นยำ โดยคำนวณเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการพยากรณ์ค่าที่ได้ต่ำจะมี ความแม่นยำสูง[91, 92] ดังแสดงในสมการที่ 3.30

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right|}{n} \quad (3.30)$$

โดยสามารถเขียนขั้นตอนการวัดประสิทธิภาพแบบจำลองประมาณค่ารังสีอาทิตย์โดยวิธีการทางสถิติดังภาพประกอบที่ 79



ภาพประกอบ 78 การวัดประสิทธิภาพแบบจำลองประมาณค่ารังสีอาทิตย์โดยวิธีการทางสถิติ

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

สำหรับในบทที่ 4 ผู้วิจัยนำเสนอผลการศึกษาและทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 นำเสนอการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณของฝุ่นละอองที่ส่งผลกระทบต่อรังสีอาทิตย์ที่ปรากฏบนพื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งประกอบไปด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณฝุ่นละอองกับแรงดันเปิดวงจร ( $V_{OC}$ ), กระแสลัดวงจร ( $I_{SC}$ ), กำลังไฟฟ้า ( $P_{Out}$ ), ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta$ ) และ ประสิทธิภาพสูญเสียของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta_{Loss}$ ) ส่วนที่ 2 นำเสนอการสร้างแบบจำลองประมาณค่ารังสีอาทิตย์โดยใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาร่วมกับข้อมูลดัชนีคุณภาพอากาศ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณของฝุ่นละอองที่ส่งผลกระทบต่อรังสีอาทิตย์ที่ปรากฏบนพื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในห้องปฏิบัติการ

ในหัวข้อที่ 4.1 ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณของฝุ่นละอองต่อปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ปรากฏบนพื้นผิวแผงเซลล์แสงอาทิตย์และประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งได้ดำเนินการทดสอบเปรียบเทียบคุณลักษณะทางไฟฟ้าระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีฝุ่นละอองจากดินปกคลุมและแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฝุ่นละอองจากดินปกคลุม ซึ่งแผงเซลล์แสงอาทิตย์เป็นแผงชนิด Mono-crystalline ขนาด 80 W มีแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรมีค่าเท่ากับ 21.60 V กระแสไฟฟ้าลัดวงจรมีค่าเท่ากับ 4.91 A มีแรงดันไฟฟ้าสูงสุดในสถานะมีภาระทางไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 18.40 V มีกระแสไฟฟ้าสูงสุดในสถานะที่มีภาระทางไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 4.40 A มีขนาดพื้นที่แผง 670x760x30 mm. ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์โดยรวมมีค่าเท่ากับ 15.32 % โดยนำมาทดสอบที่ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์คงที่ 500 W/m<sup>2</sup> ในสภาวะอุณหภูมิอากาศทั่วไปที่ 25 °C ใช้ฝุ่นละอองจากดินทั้งหมด 5 ขนาดคือ 38  $\mu m$  (32 – 37  $\mu m$ ), 63  $\mu m$  (38 – 62  $\mu m$ ), 75  $\mu m$  (63 – 74  $\mu m$ ), 90  $\mu m$  (75 – 89  $\mu m$ ) และ 106  $\mu m$  (90 – 105  $\mu m$ ) ที่ฝุ่นละอองจากดินที่มีปริมาณตั้งแต่ 1 – 5 กรัม เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณฝุ่นละอองกับแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ( $V_{OC}$ ), กระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $I_{SC}$ ), กำลังไฟฟ้า ( $P_{Out}$ ), ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta$ ) และ ประสิทธิภาพสูญเสียของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta_{Loss}$ ) โดยพิจารณาเงื่อนไขการทดลองตามสมการที่ 4.1 – 4.6 ดังแสดงในหัวข้อที่ 4.1.1 – 4.1.5

กำลังไฟฟ้าจ่ายออก ( $P_{OUT}$ )

$$P_{Out} = V_{oc} \cdot I_{sc} \quad (4.1)$$

กำลังไฟฟ้าสูงสุด ( $P_{Max}$ )

$$P_{Max} = V_{mp} \cdot I_{mp} \quad (4.2)$$

ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta_{pv}$ )

$$\eta_{pv} = \frac{P_{Max}}{G \cdot A} \cdot 100\% \quad (4.3)$$

ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ในสภาวะฝุ่นปกคลุม ( $\eta_{pv-soil}$ )

$$\eta_{pv-soil} = \frac{P_{Out}}{G \cdot A} \cdot 100\% \quad (4.4)$$

การลดลงของประสิทธิภาพแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta_{loss}$ )

$$\eta_{loss} = \frac{\eta_{pv} - \eta_{pv-soil}}{\eta_{pv}} \cdot 100\% \quad (4.5)$$

รังสีอาทิตย์ที่ปรากฏที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์  $G_{loss}$

$$G_{loss} = G(1 - \eta_{loss}) \quad (4.6)$$

เมื่อ

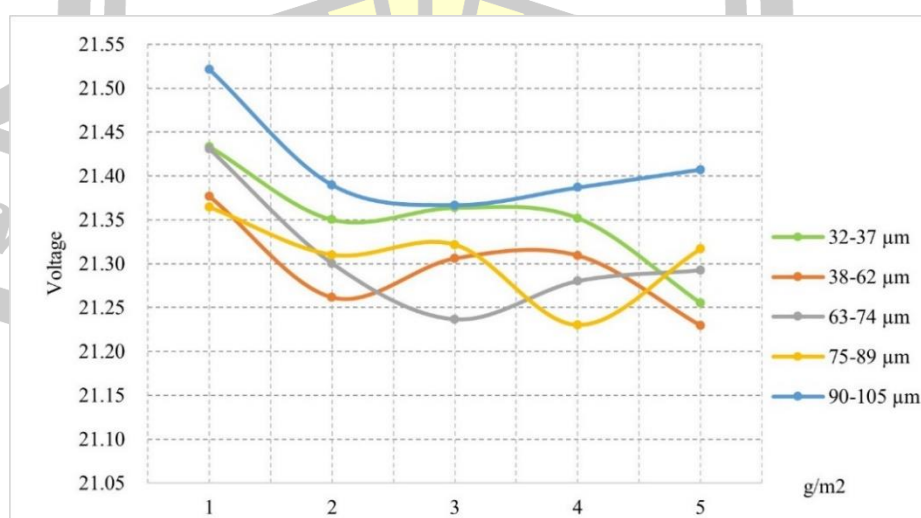
|            |   |                                                       |
|------------|---|-------------------------------------------------------|
| $V_{OC}$   | = | แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร (V)                               |
| $I_{SC}$   | = | กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (A)                                 |
| $V_{mp}$   | = | แรงดันไฟฟ้าสูงสุดในสภาวะมีภาระทางไฟฟ้า (V)            |
| $I_{mp}$   | = | กระแสไฟฟ้าสูงสุดในสภาวะมีภาระทางไฟฟ้า (A)             |
| $G$        | = | ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ( $W/m^2$ )                   |
| $G_{Loss}$ | = | รังสีอาทิตย์ที่ปรากฏที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $W/m^2$ ) |
| $A$        | = | พื้นที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $m^2$ )                   |

#### 4.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณฝุ่นละอองกับแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ( $V_{OC}$ )

ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณฝุ่นละอองกับแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ( $V_{OC}$ ) ผู้วิจัยได้นำเสนอกราฟแสดงผลกระทบของขนาดและปริมาณฝุ่นละอองต่อแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ( $V_{OC}$ ) และผลกระทบของขนาดและปริมาณฝุ่นละอองต่อกำลังไฟฟ้าจ่ายออกเทียบแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากผลการทดลองพบว่าฝุ่นละอองจากดินทั้งหมด 5 ขนาด ที่ปริมาณฝุ่นตั้งแต่ 1 – 5 กรัม มีแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรดังนี้ 1. ฝุ่นละอองจากดินขนาด 32 – 37  $\mu m$  แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรระหว่าง 21.43 – 21.26 V 2. ฝุ่นละอองจากดินขนาด 38 – 62  $\mu m$  แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรระหว่าง 21.38 – 21.23 V, 3. ฝุ่นละอองจากดินขนาด 63 – 74  $\mu m$  แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรระหว่าง 21.43 – 21.24 V, 4. ฝุ่นละอองจากดินขนาด 75 – 89  $\mu m$  แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรระหว่าง 21.36 – 21.21 V และ 5. ฝุ่นละอองจากดินขนาด 90 – 105  $\mu m$  แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรระหว่าง 21.52 – 21.37 V ดังแสดงในตารางที่ 18 และภาพประกอบ 80

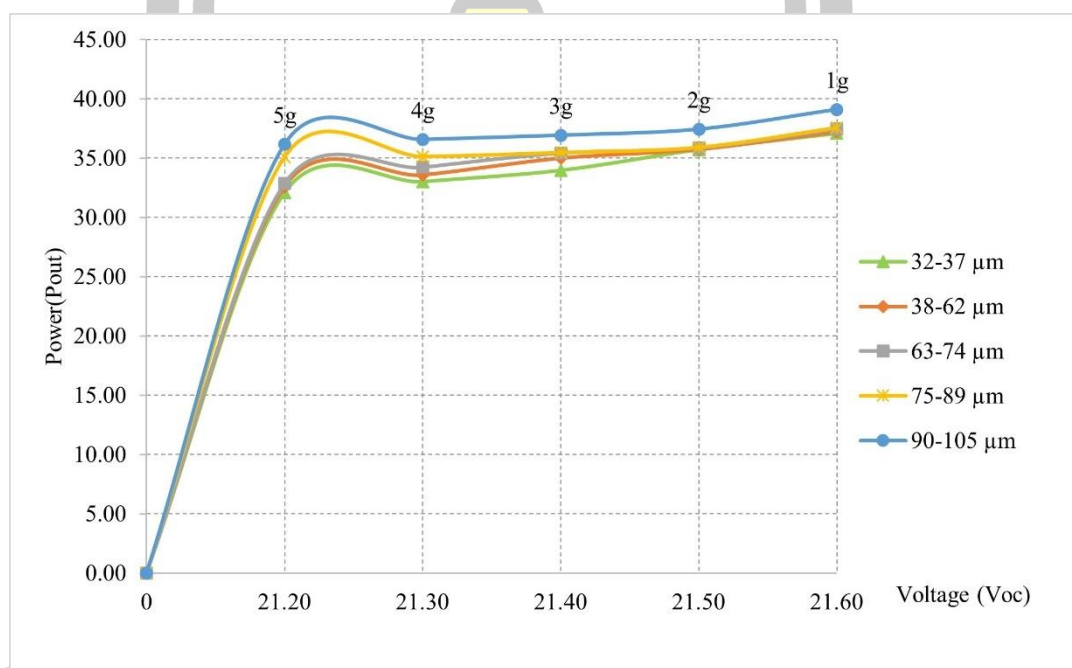
ตาราง 16 แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ( $V_{OC}$ )

| $V_{OC}$ (V) |               |               |               |               |                |       |
|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|-------|
| w            | 32-37 $\mu m$ | 38-62 $\mu m$ | 63-74 $\mu m$ | 75-89 $\mu m$ | 90-105 $\mu m$ | Avg   |
| 1            | 21.43         | 21.38         | 21.43         | 21.36         | 21.52          | 21.43 |
| 2            | 21.35         | 21.26         | 21.30         | 21.31         | 21.39          | 21.32 |
| 3            | 21.36         | 21.31         | 21.24         | 21.32         | 21.37          | 21.32 |
| 4            | 21.35         | 21.31         | 21.28         | 21.23         | 21.39          | 21.31 |
| 5            | 21.26         | 21.23         | 21.29         | 21.32         | 21.41          | 21.30 |
| Avg          | 21.35         | 21.30         | 21.31         | 21.31         | 21.41          | 21.34 |



ภาพประกอบ 79 ผลกระทบของขนาดและปริมาณฝุ่นละอองต่อแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ( $V_{OC}$ )

สำหรับภาพประกอบ 81 แสดงผลกระทบของขนาดและปริมาณฝุ่นละอองต่อกำลังไฟฟ้าจ่ายออก ( $P_{Out}$ ) เทียบกับแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ( $V_{OC}$ ) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากผลการทดลองพบว่า 1. ฝุ่นละอองจากดินขนาด  $32 - 37 \mu m$  ที่แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรระหว่าง  $21.43 - 21.26 V$  มีค่ากำลังไฟฟ้าจ่ายออกที่  $37.08 - 32.08 W$  2. ฝุ่นละอองจากดินขนาด  $38 - 62 \mu m$  ที่แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรระหว่าง  $21.38 - 21.23 V$  มีค่ากำลังไฟฟ้าจ่ายออกที่  $37.22 - 32.58 W$ , 3. ฝุ่นละอองจากดินขนาด  $63 - 74 \mu m$  ที่แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรระหว่าง  $21.43 - 21.24 V$  มีค่ากำลังไฟฟ้าจ่ายออกที่  $37.47 - 32.87 W$ , 4. ฝุ่นละอองจากดินขนาด  $75 - 89 \mu m$  ที่แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรระหว่าง  $21.36 - 21.21 V$  มีค่ากำลังไฟฟ้าจ่ายออกที่  $37.57 - 35.10 W$  และ 5. ฝุ่นละอองจากดินขนาด  $90 - 105 \mu m$  ที่แรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรระหว่าง  $21.52 - 21.37 V$  มีค่ากำลังไฟฟ้าจ่ายออกที่  $39.11 - 36.16 W$



ภาพประกอบ 80 ผลกระทบของขนาดและปริมาณฝุ่นละอองต่อกำลังไฟฟ้าจ่ายออกเทียบกับแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

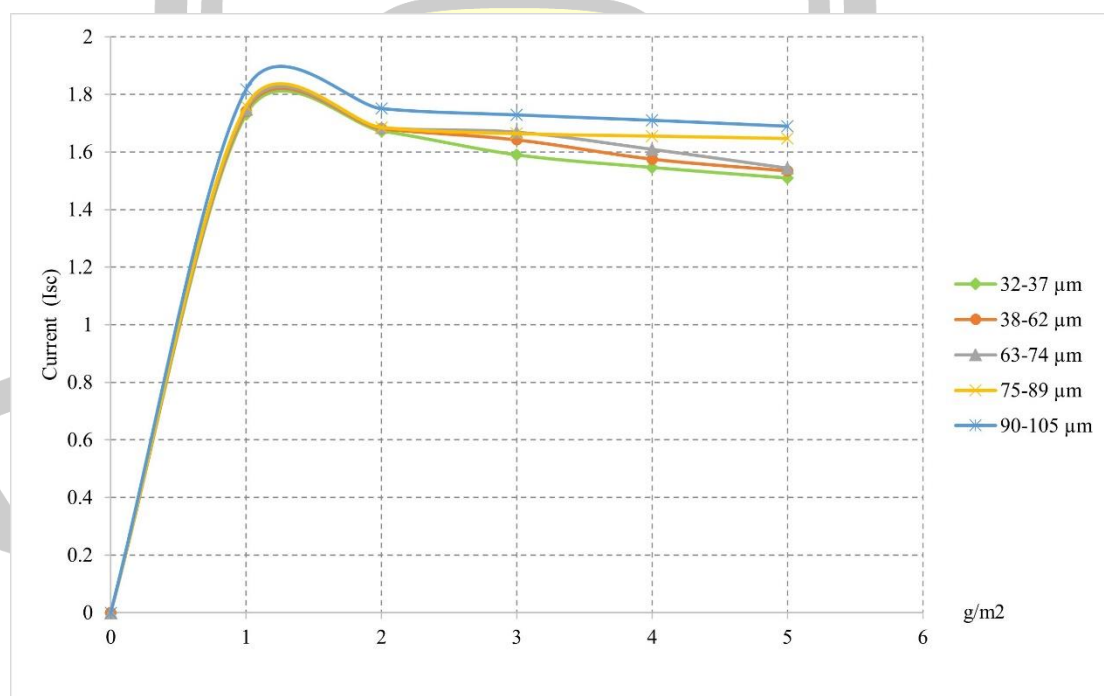
#### 4.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณฝุ่นละอองกับกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $I_{SC}$ )

ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณฝุ่นละอองกับกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $I_{SC}$ ) ผู้วิจัยได้นำเสนอกราฟแสดงผลกระทบของขนาดและปริมาณฝุ่นละอองต่อกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $I_{SC}$ ) และผลกระทบของขนาดและปริมาณฝุ่นละอองต่อกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $I_{SC}$ ) เทียบกับแรงดันไฟฟ้า

เปิดวงจร ( $V_{OC}$ ) จากผลการทดลองพบว่า 1. ฟุ้งละอองจากดินขนาด 32 – 37  $\mu m$  มีกระแสไฟฟ้าลัดวงจรระหว่าง 1.73 – 1.51 A 2. ฟุ้งละอองจากดินขนาด 38 – 62  $\mu m$  มีกระแสไฟฟ้าลัดวงจรระหว่าง 1.74 – 1.53 A, 3. ฟุ้งละอองจากดินขนาด 63 – 74  $\mu m$  มีกระแสไฟฟ้าลัดวงจรระหว่าง 1.75 – 1.54 A, 4. ฟุ้งละอองจากดินขนาด 75 – 89  $\mu m$  มีกระแสไฟฟ้าลัดวงจรระหว่าง 1.76 – 1.65 A และ 5. ฟุ้งละอองจากดินขนาด 90 – 105  $\mu m$  มีกระแสไฟฟ้าลัดวงจรระหว่าง 1.82 – 1.69 A ดังแสดงในตารางที่ 19 และภาพประกอบ 82

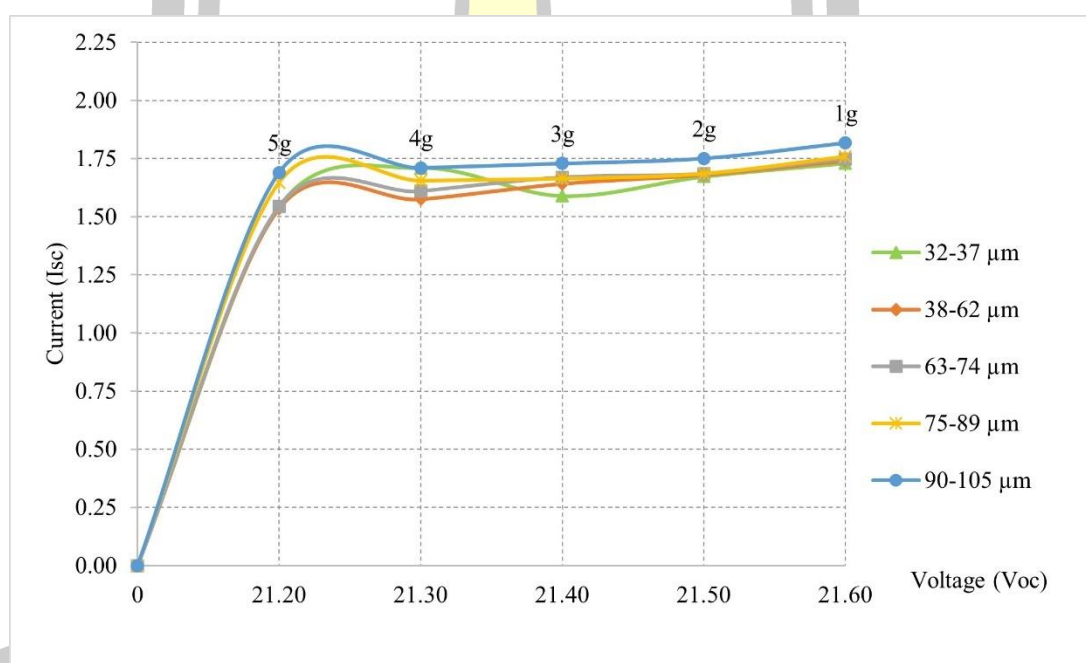
ตาราง 17 กระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $I_{SC}$ )

| $I_{SC}$ (A) |               |               |               |               |                |      |
|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|------|
| w            | 32-37 $\mu m$ | 38-62 $\mu m$ | 63-74 $\mu m$ | 75-89 $\mu m$ | 90-105 $\mu m$ | Avg  |
| 1            | 1.73          | 1.74          | 1.75          | 1.76          | 1.82           | 1.76 |
| 2            | 1.67          | 1.68          | 1.68          | 1.69          | 1.75           | 1.69 |
| 3            | 1.59          | 1.64          | 1.67          | 1.66          | 1.73           | 1.66 |
| 4            | 1.55          | 1.58          | 1.61          | 1.66          | 1.71           | 1.62 |
| 5            | 1.51          | 1.53          | 1.54          | 1.65          | 1.69           | 1.58 |
| Avg          | 1.61          | 1.63          | 1.65          | 1.68          | 1.74           | 1.66 |



ภาพประกอบ 81 ผลกระทบของขนาดและปริมาณฟุ้งละอองต่อกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $I_{SC}$ )

สำหรับภาพประกอบ 83 แสดงผลกระทบของขนาดและปริมาณฝุ่นละอองต่อกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $I_{SC}$ ) เทียบกับแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจร ( $V_{OC}$ ) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากผลการทดลองพบว่า 1. ฝุ่นละอองจากดินขนาด  $32 - 37 \mu m$  ที่กระแสไฟฟ้าลัดวงจรระหว่าง  $1.73 - 1.51 A$  มีแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรระหว่าง  $21.43 - 21.26 V$  2. ฝุ่นละอองจากดินขนาด  $38 - 62 \mu m$  ที่กระแสไฟฟ้าลัดวงจรระหว่าง  $1.74 - 1.53 A$  มีแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรระหว่าง  $21.38 - 21.23 V$ , 3. ฝุ่นละอองจากดินขนาด  $63 - 74 \mu m$  ที่กระแสไฟฟ้าลัดวงจรระหว่าง  $1.75 - 1.54 A$  มีแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรระหว่าง  $21.43 - 21.24 V$ , 4. ฝุ่นละอองจากดินขนาด  $75 - 89 \mu m$  ที่กระแสไฟฟ้าลัดวงจรระหว่าง  $1.76 - 1.65 A$  มีแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรระหว่าง  $21.36 - 21.21 V$  และ 5. ฝุ่นละอองจากดินขนาด  $90 - 105 \mu m$  ที่กระแสไฟฟ้าลัดวงจรระหว่าง  $1.82 - 1.69 A$  มีแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรระหว่าง  $21.52 - 21.37 V$



ภาพประกอบ 82 ผลกระทบของขนาดและปริมาณฝุ่นละอองต่อกระแสไฟฟ้าลัดวงจรเทียบกับแรงดันไฟฟ้าเปิดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

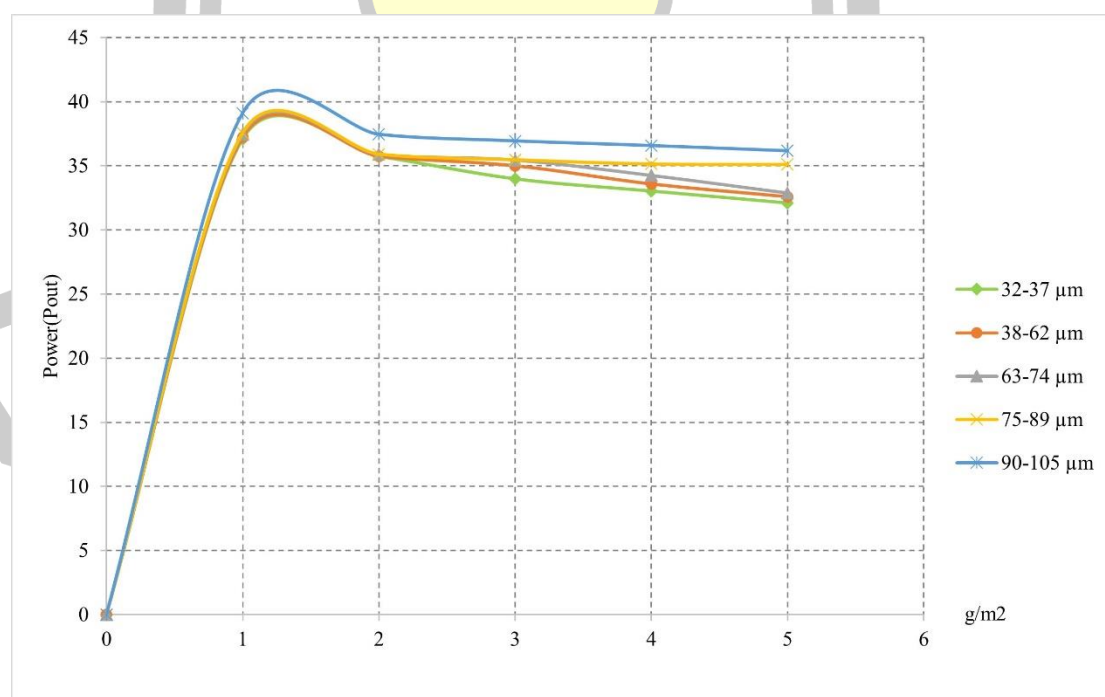
#### 4.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณฝุ่นละอองกับกำลังไฟฟ้า ( $P_{Out}$ )

ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณฝุ่นละอองกับกำลังไฟฟ้า ( $P_{Out}$ ) ผู้วิจัยได้นำเสนอกราฟแสดงผลกระทบของขนาดและปริมาณฝุ่นละอองต่อกำลังไฟฟ้า ( $P_{Out}$ ) และผลกระทบของขนาดและปริมาณฝุ่นละอองต่อกำลังไฟฟ้าจ่ายออกเทียบกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ของแผงเซลล์

แสงอาทิตย์ จากผลการทดลองพบว่า 1. ฟุ้งละอองจากดินขนาด 32 – 37  $\mu\text{m}$  มีกำลังไฟฟ้าจ่ายออกระหว่าง 37.08 – 32.08 W เฉลี่ยที่ 34.37 W ลดลง 5.63 W, 2. ฟุ้งละอองจากดินขนาด 38 – 62  $\mu\text{m}$  มีกำลังไฟฟ้าจ่ายออกระหว่าง 37.22 – 32.58 W เฉลี่ยที่ 34.82 W ลดลง 5.18 W, 3. ฟุ้งละอองจากดินขนาด 63 – 74  $\mu\text{m}$  มีกำลังไฟฟ้าจ่ายออกระหว่าง 37.47 – 32.87 W เฉลี่ยที่ 35.18 W ลดลง 4.82 W, 4. ฟุ้งละอองจากดินขนาด 75 – 89  $\mu\text{m}$  มีกำลังไฟฟ้าจ่ายออกระหว่าง 37.57 – 35.10 W เฉลี่ยที่ 35.84 W ลดลง 4.16 W และ 5. ฟุ้งละอองจากดินขนาด 90 – 105  $\mu\text{m}$  มีกำลังไฟฟ้าจ่ายออกระหว่าง 39.11 – 36.16 W เฉลี่ยที่ 37.24 W ลดลง 2.76 W ดังแสดงในตารางที่ 20 และภาพประกอบ 84

ตาราง 18 กำลังไฟฟ้าจ่ายออก ( $P_{\text{Out}}$ )

| Power(W) |                     |                     |                     |                     |                      |       |
|----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|-------|
| w        | 32-37 $\mu\text{m}$ | 38-62 $\mu\text{m}$ | 63-74 $\mu\text{m}$ | 75-89 $\mu\text{m}$ | 90-105 $\mu\text{m}$ | Avg   |
| 1        | 37.08               | 37.22               | 37.47               | 37.57               | 39.11                | 37.69 |
| 2        | 35.72               | 35.74               | 35.88               | 35.91               | 37.44                | 36.14 |
| 3        | 33.97               | 34.99               | 35.45               | 35.47               | 36.94                | 35.36 |
| 4        | 33.02               | 33.57               | 34.25               | 35.14               | 36.57                | 34.51 |
| 5        | 32.08               | 32.58               | 32.87               | 35.10               | 36.16                | 33.76 |
| Avg      | 34.37               | 34.82               | 35.18               | 35.84               | 37.24                | 35.49 |



ภาพประกอบ 83 ผลกระทบของขนาดและปริมาณฟุ้งละอองต่อกำลังไฟฟ้าจ่ายออก ( $P_{\text{Out}}$ )

สำหรับผลกระทบของขนาดและปริมาณฝุ่นละอองต่อกำลังไฟฟ้าจ่ายออกของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $P_{Out}$ ) สามารถนำมาเขียนในรูปแบบของสมการเชิงเส้นในสมการที่ 4.7 – 4.11 และภาพประกอบ 85 ได้ดังนี้

สมการเชิงเส้นสำหรับฝุ่นละอองขนาด  $32 - 37 \mu m$

$$y = -1.269x + 38.18 \quad (4.7)$$

สมการเชิงเส้นสำหรับฝุ่นละอองขนาด  $38 - 62 \mu m$

$$y = -1.1443x + 38.253 \quad (4.8)$$

สมการเชิงเส้นสำหรับฝุ่นละอองขนาด  $63 - 74 \mu m$

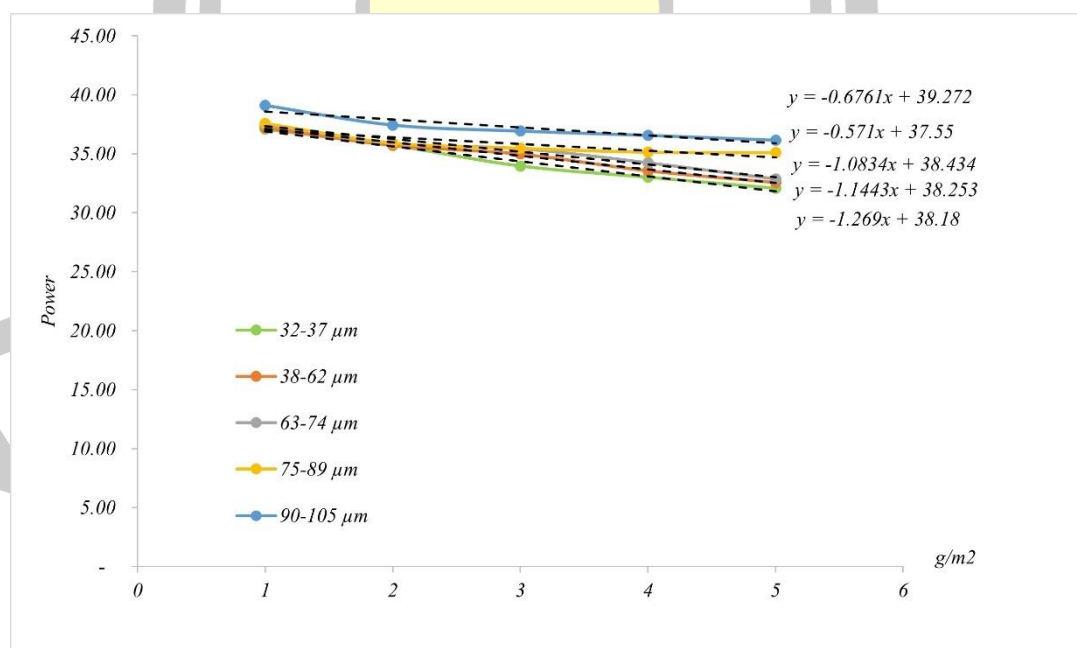
$$y = -1.0834x + 38.434 \quad (4.9)$$

สมการเชิงเส้นสำหรับฝุ่นละอองขนาด  $75 - 89 \mu m$

$$y = -0.571x + 37.55 \quad (4.10)$$

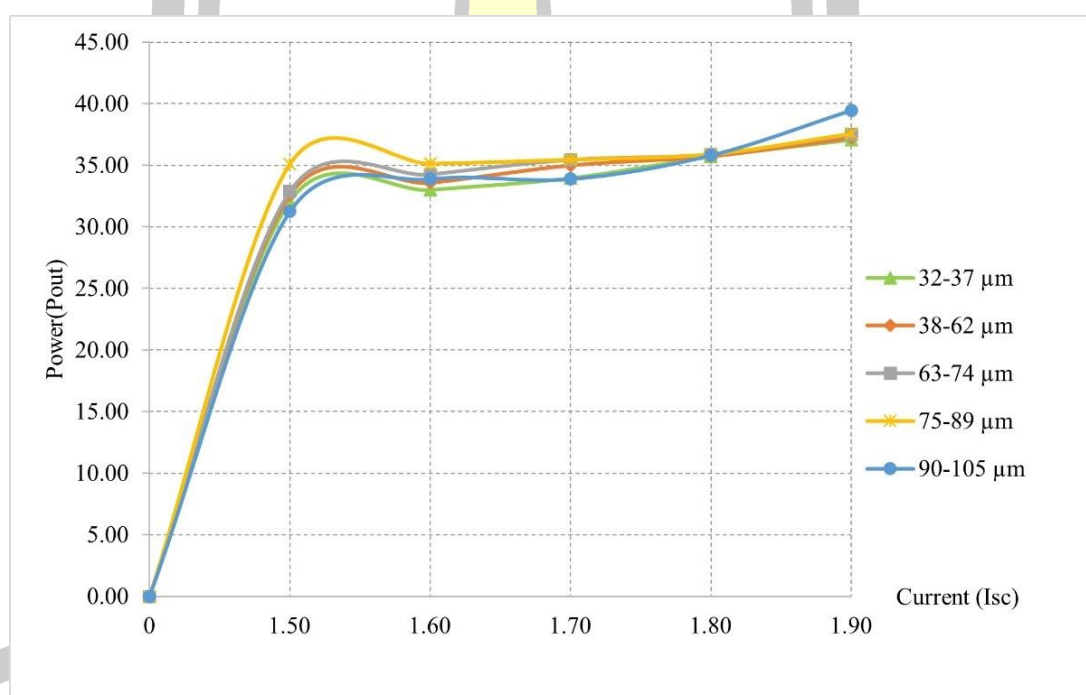
สมการเชิงเส้นสำหรับฝุ่นละอองขนาด  $90 - 105 \mu m$

$$y = -0.6761x + 39.272 \quad (4.11)$$



ภาพประกอบ 84 สมการสำหรับประมาณค่าการลดลงของกำลังไฟฟ้าจ่ายออก

ในภาพประกอบ 86 แสดงผลกระทบบของขนาดและปริมาณฝุ่นละอองต่อกำลังไฟฟ้าจ่ายออก ( $P_{Out}$ ) เทียบกับกระแสไฟฟ้าลัดวงจร ( $I_{SC}$ ) ของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ จากผลการทดลองพบว่า 1. ฝุ่นละอองจากดินขนาด  $32 - 37 \mu m$  ที่กระแสไฟฟ้าลัดวงจรระหว่าง  $1.73 - 1.51 A$   $\mu m$  มีกำลังไฟฟ้าจ่ายออกระหว่าง  $37.08 - 32.08 W$  2. ฝุ่นละอองจากดินขนาด  $38 - 62 \mu m$  ที่กระแสไฟฟ้าลัดวงจรระหว่าง  $1.74 - 1.53 A$  กำลังไฟฟ้าจ่ายออกระหว่าง  $37.22 - 32.58 W$ , 3. ฝุ่นละอองจากดินขนาด  $63 - 74 \mu m$  ที่กระแสไฟฟ้าลัดวงจรระหว่าง  $1.75 - 1.54 A$  มีกำลังไฟฟ้าจ่ายออกระหว่าง  $37.47 - 32.87 W$ , 4. ฝุ่นละอองจากดินขนาด  $75 - 89 \mu m$  ที่กระแสไฟฟ้าลัดวงจรระหว่าง  $1.76 - 1.63 A$  มีกำลังไฟฟ้าจ่ายออกระหว่าง  $37.57 - 35.10 W$  และ 5. ฝุ่นละอองจากดินขนาด  $90 - 105 \mu m$  ที่กระแสไฟฟ้าลัดวงจรระหว่าง  $1.82 - 1.69 A$  มีกำลังไฟฟ้าจ่ายออกระหว่าง  $39.11 - 36.16 W$



ภาพประกอบ 85 ผลกระทบบของขนาดและปริมาณฝุ่นละอองต่อกำลังไฟฟ้าจ่ายออกเทียบกับกระแสไฟฟ้าลัดวงจรของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

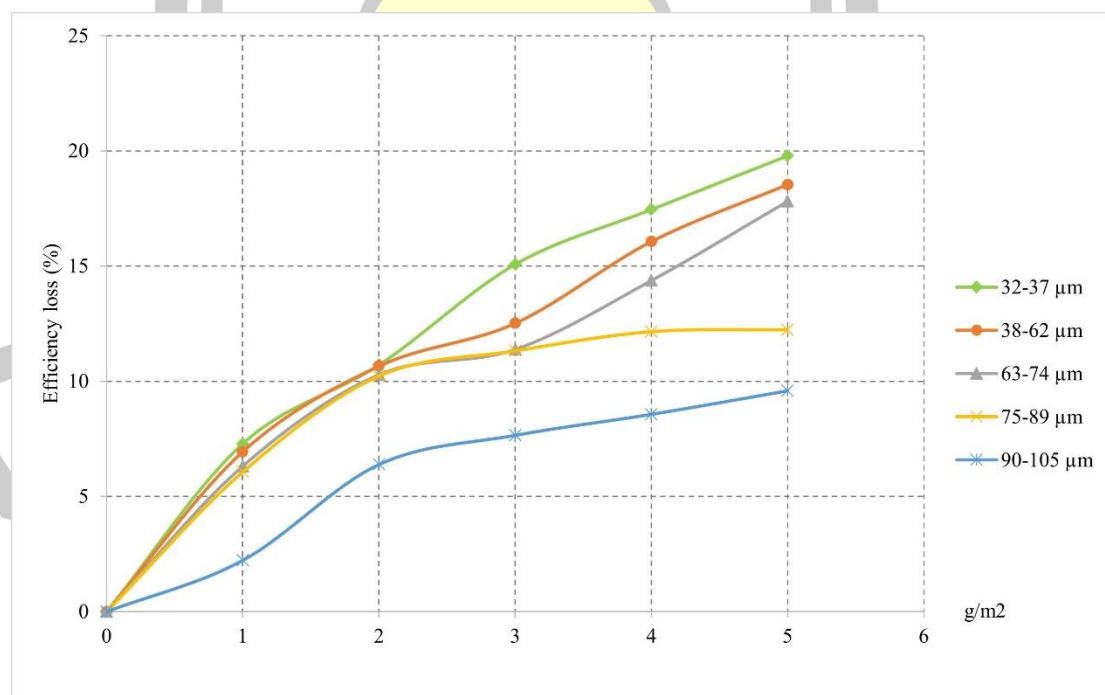
#### 4.1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณฝุ่นละอองกับประสิทธิภาพสูญเสียของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta_{Loss}$ )

ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณฝุ่นละอองกับประสิทธิภาพสูญเสียของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta_{Loss}$ ) ผู้วิจัยได้นำเสนอกราฟแสดงผลกระทบบของขนาดและปริมาณฝุ่นละอองต่อ

ประสิทธิภาพสูญเสียของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta_{Loss}$ ) จากผลการทดลองพบว่า 1. ฟุ้งละอองจากดินขนาด 32 – 37  $\mu m$  มีประสิทธิภาพสูญเสียระหว่าง 7.30 – 19.79 % เฉลี่ยที่ 14.07 %, 2. ฟุ้งละอองจากดินขนาด 38 – 62  $\mu m$  มีประสิทธิภาพสูญเสียระหว่าง 6.95 – 18.55 % เฉลี่ยที่ 12.95 %, 3. ฟุ้งละอองจากดินขนาด 63 – 74  $\mu m$  มีประสิทธิภาพสูญเสียระหว่าง 6.32 – 17.82 % เฉลี่ยที่ 12.04 %, 4. ฟุ้งละอองจากดินขนาด 75 – 89  $\mu m$  มีประสิทธิภาพสูญเสียระหว่าง 6.07 – 12.25 % เฉลี่ยที่ 10.41% และ 5. ฟุ้งละอองจากดินขนาด 90 – 105  $\mu m$  มีประสิทธิภาพสูญเสียระหว่าง 2.23 – 9.59 % เฉลี่ยที่ 6.89 % ดังแสดงในตารางที่ 21 และภาพประกอบ 87

ตาราง 19 ประสิทธิภาพสูญเสียของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta_{Loss}$ )

| Efficiency loss (%) |               |               |               |               |                |       |
|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|-------|
| w                   | 32-37 $\mu m$ | 38-62 $\mu m$ | 63-74 $\mu m$ | 75-89 $\mu m$ | 90-105 $\mu m$ | Avg   |
| 1                   | 7.30          | 6.95          | 6.32          | 6.07          | 2.23           | 5.77  |
| 2                   | 10.71         | 10.66         | 10.29         | 10.23         | 6.39           | 9.66  |
| 3                   | 15.08         | 12.52         | 11.39         | 11.33         | 7.66           | 11.59 |
| 4                   | 17.46         | 16.07         | 14.38         | 12.16         | 8.57           | 13.73 |
| 5                   | 19.79         | 18.55         | 17.82         | 12.25         | 9.59           | 15.60 |
| Avg                 | 14.07         | 12.95         | 12.04         | 10.41         | 6.89           | 11.27 |



ภาพประกอบ 86 ผลกระทบของขนาดและปริมาณฟุ้งละอองต่อกำลังไฟฟ้าสูญเสียของแผงเซลล์แสงอาทิตย์

สำหรับการแสดงผลกระทบของขนาดและปริมาณฝุ่นละอองต่อประสิทธิภาพสูญเสียของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta_{\text{Loss}}$ ) สามารถนำมาเขียนในรูปแบบของสมการเชิงเส้นในสมการที่ 4.12 – 4.16 และภาพประกอบ 88 ได้ดังนี้

สมการเชิงเส้นสำหรับฝุ่นละอองขนาด 32 – 37  $\mu\text{m}$

$$y = 3.823x + 2.1649 \quad (4.12)$$

สมการเชิงเส้นสำหรับฝุ่นละอองขนาด 38 – 62  $\mu\text{m}$

$$y = 3.4847x + 2.0799 \quad (4.13)$$

สมการเชิงเส้นสำหรับฝุ่นละอองขนาด 63 – 74  $\mu\text{m}$

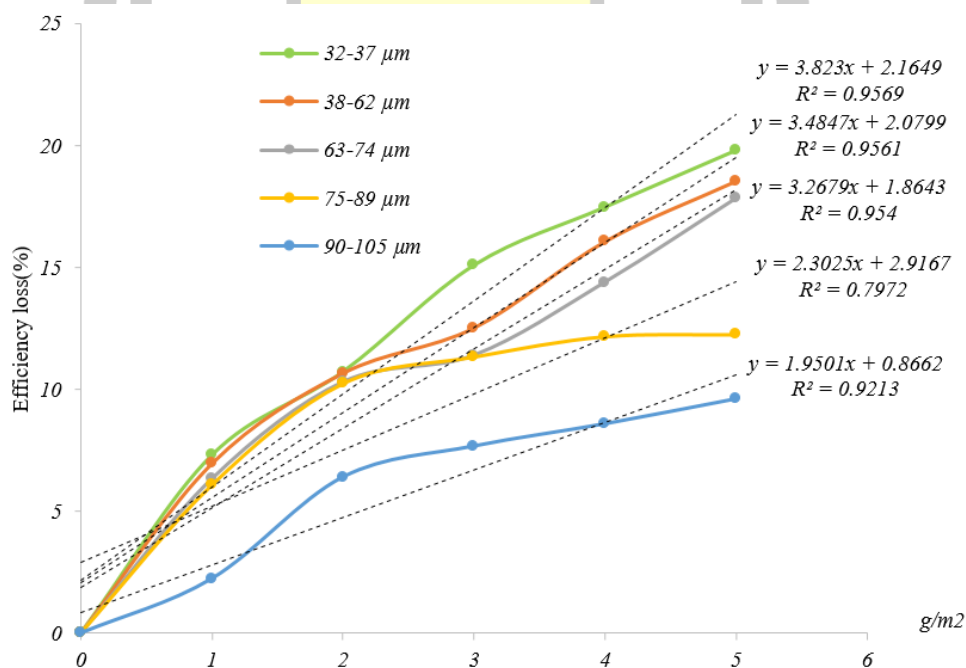
$$y = 3.2679x + 1.8643 \quad (4.14)$$

สมการเชิงเส้นสำหรับฝุ่นละอองขนาด 75 – 89  $\mu\text{m}$

$$y = 2.3025x + 2.9167 \quad (4.15)$$

สมการเชิงเส้นสำหรับฝุ่นละอองขนาด 90 – 105  $\mu\text{m}$

$$y = 1.9501x + 0.8662 \quad (4.16)$$



ภาพประกอบ 87 สมการสำหรับประมาณค่าการลดลงของประสิทธิภาพการสูญเสีย

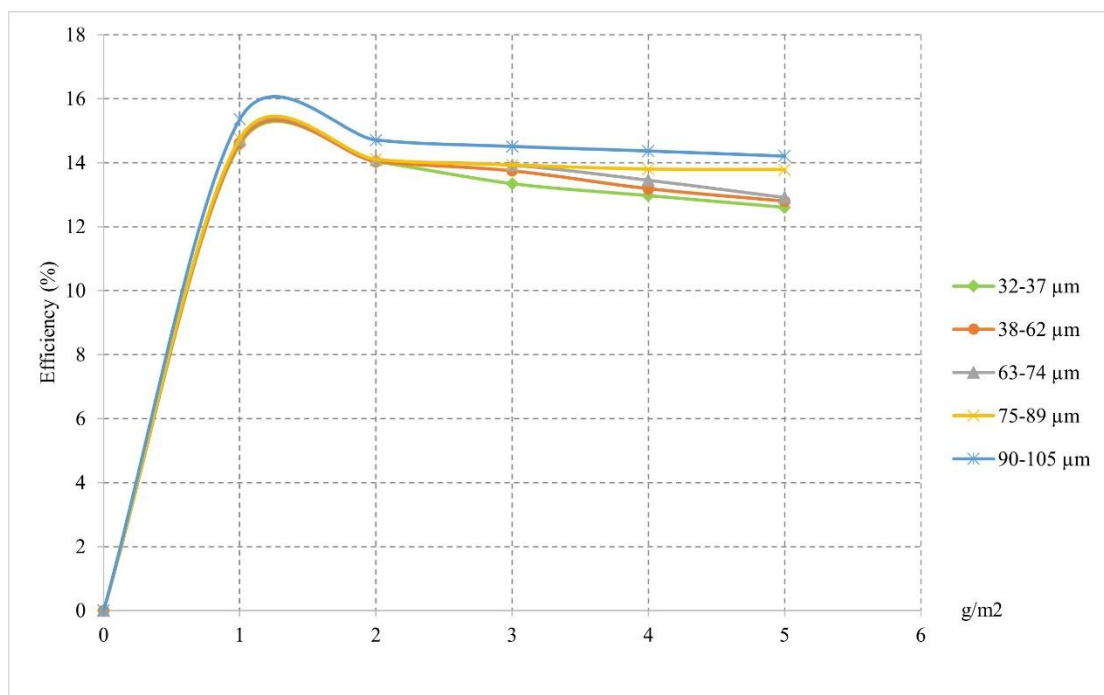
#### 4.1.5 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณฝุ่นละอองกับประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta$ )

ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณฝุ่นละอองกับประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta$ ) ตามสมการที่ 4.4 แผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีการคำนวณที่ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ 500 W/m<sup>2</sup> และอุณหภูมิแวดล้อม 25 องศาเซลเซียส มีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 15.71 % และจากผลการทดลองพบว่า 1. ฝุ่นละอองจากดินขนาด 32 – 37  $\mu\text{m}$  มีประสิทธิภาพระหว่าง 14.56 – 12.60 % เฉลี่ยที่ 13.50 % ลดลง 2.21 %, 2. ฝุ่นละอองจากดินขนาด 38 – 62  $\mu\text{m}$  มีประสิทธิภาพระหว่าง 14.62 – 12.80 % เฉลี่ยที่ 13.68 % ลดลง 2.03 %, 3. ฝุ่นละอองจากดินขนาด 63 – 74  $\mu\text{m}$  มีประสิทธิภาพระหว่าง 14.72 – 12.91 % เฉลี่ยที่ 13.82 % ลดลง 1.89 %, 4. ฝุ่นละอองจากดินขนาด 75 – 89  $\mu\text{m}$  มีประสิทธิภาพระหว่าง 14.76 – 13.79 % เฉลี่ยที่ 14.08 % ลดลง 1.64 % และ 5. ฝุ่นละอองจากดินขนาด 90 – 105  $\mu\text{m}$  มีประสิทธิภาพระหว่าง 15.36 – 14.20 % เฉลี่ยที่ 14.63 % ลดลง 1.08 % ดังแสดงในตารางที่ 22 และภาพประกอบ 89

ตาราง 20 ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ( $\eta$ )

| Efficiency (%) |                     |                     |                     |                     |                      |       |
|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|-------|
| w              | 32-37 $\mu\text{m}$ | 38-62 $\mu\text{m}$ | 63-74 $\mu\text{m}$ | 75-89 $\mu\text{m}$ | 90-105 $\mu\text{m}$ | Avg   |
| 1              | 14.56               | 14.62               | 14.72               | 14.76               | 15.36                | 14.80 |
| 2              | 14.03               | 14.04               | 14.09               | 14.10               | 14.71                | 14.19 |
| 3              | 13.34               | 13.74               | 13.92               | 13.93               | 14.51                | 13.89 |
| 4              | 12.97               | 13.19               | 13.45               | 13.80               | 14.36                | 13.55 |
| 5              | 12.60               | 12.80               | 12.91               | 13.79               | 14.20                | 13.26 |
| Avg            | 13.50               | 13.68               | 13.82               | 14.08               | 14.63                | 13.94 |

พหุ ประสิทธิภาพ



ภาพประกอบ 88 ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้รับผลกระทบจากขนาดและปริมาณจากฝุ่นละออง

ในการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณของฝุ่นละอองต่อปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ปรากฏบนพื้นผิวแผงเซลล์แสงอาทิตย์และประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งได้ดำเนินการทดสอบเปรียบเทียบคุณลักษณะทางไฟฟ้าระหว่างแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่ไม่มีฝุ่นละอองจากดินปกคลุมและแผงเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีฝุ่นละอองจากดินปกคลุมพบว่า 1. ฝุ่นขนาด 32 - 37  $\mu\text{m}$  (อนุภาคละเอียด) มีค่ารังสีอาทิตย์ลดลงอยู่ระหว่าง 401.06 - 463.52  $\text{W/m}^2$  เฉลี่ยที่ 429.67  $\text{W/m}^2$  2. ฝุ่นขนาด 38 - 62  $\mu\text{m}$  มีค่ารังสีอาทิตย์ลดลงอยู่ระหว่าง 407.26 - 465.25  $\text{W/m}^2$  เฉลี่ยที่ 435.25  $\text{W/m}^2$  3. ฝุ่นขนาด 63 - 74  $\mu\text{m}$  มีค่ารังสีอาทิตย์ลดลงอยู่ระหว่าง 410.90 - 468.39  $\text{W/m}^2$  เฉลี่ยที่ 439.80  $\text{W/m}^2$  4. ฝุ่นขนาด 75 - 89  $\mu\text{m}$  มีค่ารังสีอาทิตย์ลดลงอยู่ระหว่าง 438.77 - 469.63  $\text{W/m}^2$  เฉลี่ยที่ 447.96  $\text{W/m}^2$  และ 5. ฝุ่นขนาด 90 - 105  $\mu\text{m}$  (อนุภาคหยาบ) มีค่ารังสีอาทิตย์ลดลงอยู่ระหว่าง 452.03 - 488.84  $\text{W/m}^2$  เฉลี่ยที่ 465.55  $\text{W/m}^2$  ดังแสดงในตารางที่ 23

ตาราง 21 ปริมาณรังสีอาทิตย์ปรากฏที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Radiation)

| <b>Solar Radiation (<math>W/m^2</math>)</b> |                                 |                                 |                                 |                                 |                                  |               |
|---------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------|
| <b>w</b>                                    | <b>32-37 <math>\mu m</math></b> | <b>38-62 <math>\mu m</math></b> | <b>63-74 <math>\mu m</math></b> | <b>75-89 <math>\mu m</math></b> | <b>90-105 <math>\mu m</math></b> | <b>Avg</b>    |
| 1                                           | 463.52                          | 465.25                          | 468.39                          | 469.63                          | 488.84                           | 471.13        |
| 2                                           | 446.44                          | 446.70                          | 448.54                          | 448.84                          | 468.04                           | 451.71        |
| 3                                           | 424.60                          | 437.40                          | 443.07                          | 443.37                          | 461.70                           | 442.03        |
| 4                                           | 412.70                          | 419.64                          | 428.08                          | 439.20                          | 457.14                           | 431.35        |
| 5                                           | 401.06                          | 407.26                          | 410.90                          | 438.77                          | 452.03                           | 422.00        |
| <b>Avg</b>                                  | <b>429.67</b>                   | <b>435.25</b>                   | <b>439.80</b>                   | <b>447.96</b>                   | <b>465.55</b>                    | <b>443.64</b> |

สามารถนำมาเขียนในรูปแบบของสมการเชิงเส้นสำหรับการลดลงของรังสีอาทิตย์ที่ปรากฏที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ ในสมการที่ 4.17 – 4.22 และภาพประกอบ 90 - 92 ได้ดังนี้

สมการเชิงเส้นสำหรับฝุ่นละอองขนาด 32 – 37  $\mu m$

$$y = -15.868x + 477.27 \quad (4.17)$$

สมการเชิงเส้นสำหรับฝุ่นละอองขนาด 38 – 62  $\mu m$

$$y = -14.304x + 478.16 \quad (4.18)$$

สมการเชิงเส้นสำหรับฝุ่นละอองขนาด 63 – 74  $\mu m$

$$y = -13.543x + 480.43 \quad (4.19)$$

สมการเชิงเส้นสำหรับฝุ่นละอองขนาด 75 – 89  $\mu m$

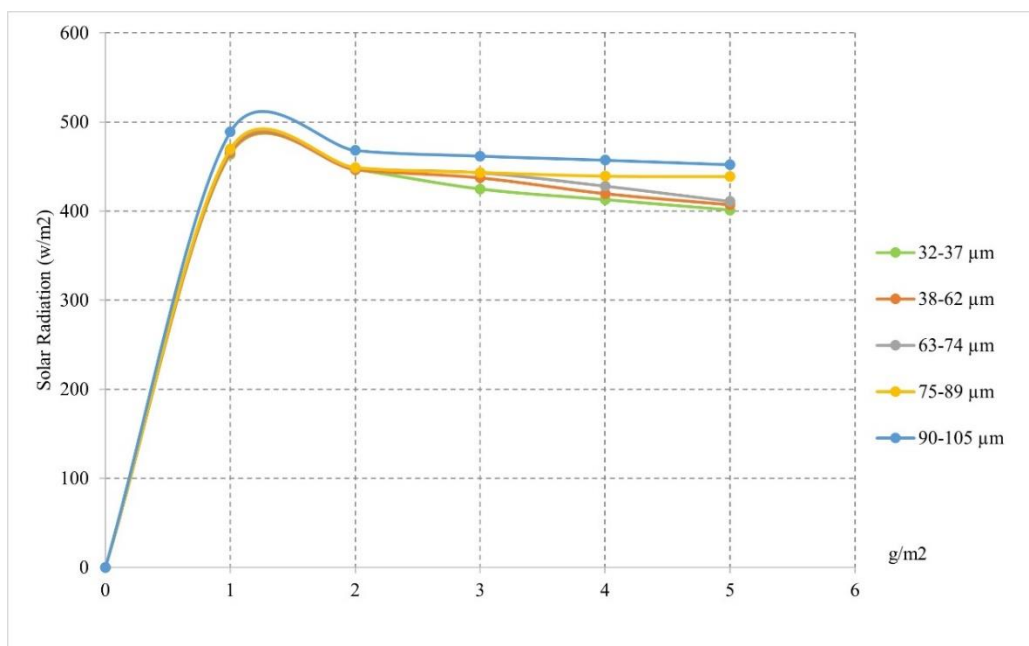
$$y = -7.1376x + 469.37 \quad (4.20)$$

สมการเชิงเส้นสำหรับฝุ่นละอองขนาด 90 – 105  $\mu m$

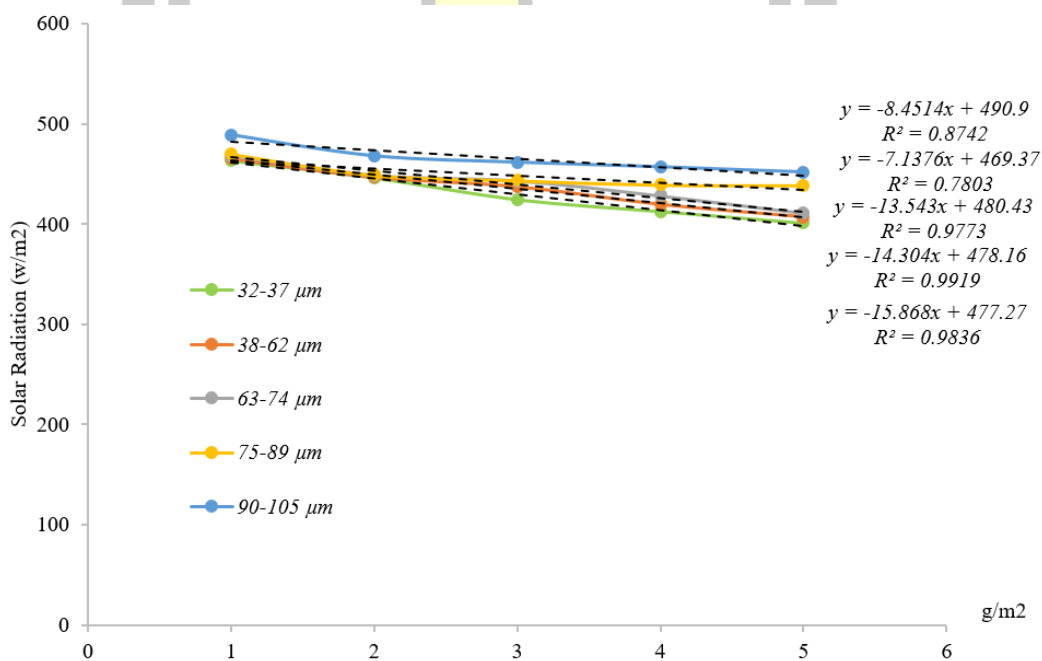
$$y = -8.4514x + 490.9 \quad (4.21)$$

สมการเชิงเส้นสำหรับฝุ่นละอองรวมขนาดไม่เกิน 105  $\mu m$

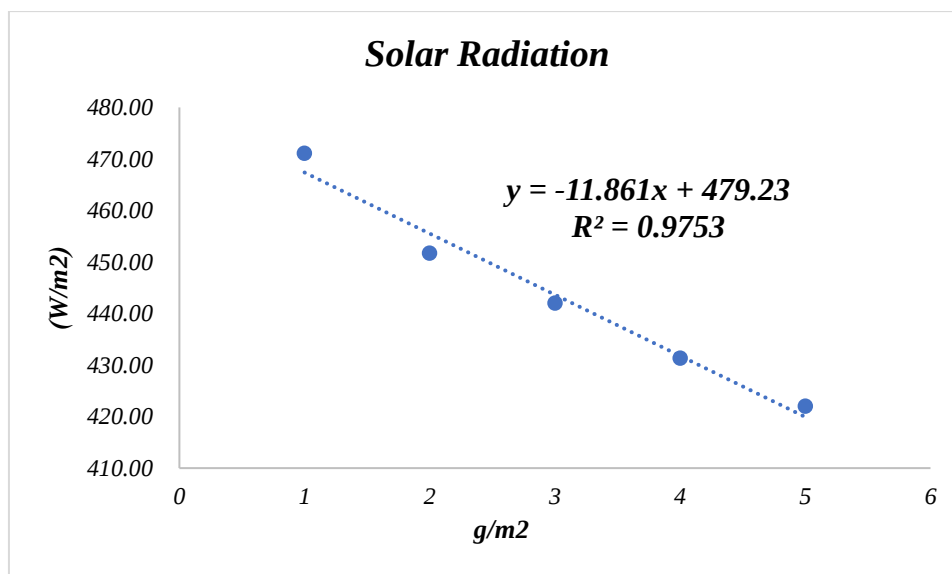
$$y = -11.861x + 479.23 \quad (4.22)$$



ภาพประกอบ 89 รังสีอาทิตย์ที่ปรากฏที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพประกอบ 90 สมการการลดลงของรังสีอาทิตย์ที่ปรากฏที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์



ภาพประกอบ 91 สมการการลดลงของรังสีอาทิตย์ที่ปรากฏที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ (ต่อ)

#### 4.1.6 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณของฝุ่นละอองที่ส่งผลกระทบต่อรังสีอาทิตย์ที่ปรากฏบนพื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในห้องปฏิบัติการ พบว่า 1. ฝุ่นขนาด 32 - 37  $\mu m$  ประสิทธิภาพลดลงอยู่ระหว่าง 12.60 - 14.56% เฉลี่ยที่ 13.50% มีค่ารังสีอาทิตย์ลดลงอยู่ระหว่าง 401.06 - 463.52  $W/m^2$  เฉลี่ยที่ 429.67  $W/m^2$  2. ฝุ่นขนาด 38 - 62  $\mu m$  ประสิทธิภาพลดลงอยู่ระหว่าง 12.80 - 14.62% เฉลี่ยที่ 13.68% มีค่ารังสีอาทิตย์ลดลงอยู่ระหว่าง 407.26 - 465.25  $W/m^2$  เฉลี่ยที่ 435.25  $W/m^2$  3. ฝุ่นขนาด 63 - 74  $\mu m$  ประสิทธิภาพลดลงอยู่ระหว่าง 12.91 - 14.72% เฉลี่ยที่ 13.82% มีค่ารังสีอาทิตย์ลดลงอยู่ระหว่าง 410.90 - 468.39  $W/m^2$  เฉลี่ยที่ 439.80  $W/m^2$  4. ฝุ่นขนาด 75 - 89  $\mu m$  ประสิทธิภาพลดลงอยู่ระหว่าง 13.79 - 14.76% เฉลี่ยที่ 14.08% มีค่ารังสีอาทิตย์ลดลงอยู่ระหว่าง 438.77 - 469.63  $W/m^2$  เฉลี่ยที่ 447.96  $W/m^2$  และ 5. ฝุ่นขนาด 90 - 105  $\mu m$  ประสิทธิภาพลดลงอยู่ระหว่าง 14.20 - 15.36% เฉลี่ยที่ 14.63% มีค่ารังสีอาทิตย์ลดลงอยู่ระหว่าง 452.03 - 488.84  $W/m^2$  เฉลี่ยที่ 465.55  $W/m^2$

## 4.2 การสร้างแบบจำลองประมาณค่ารังสีอาทิตย์โดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิตั้งแต่ปี 2555 – 2564 ของ คุณภาพอากาศ

### 4.2.1 สัมประสิทธิ์ตัวแปรสำหรับการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์

จากข้อมูลในบทที่ 3 ผู้วิจัยได้ดำเนินการรวบรวมข้อมูลทางสถิติตั้งแต่ปี 2555 – 2564 ของ รังสีอาทิตย์รายเดือนและสภาพอากาศรายเดือนจาก 7 จังหวัดในทางภาคเหนือของประเทศไทย เพื่อนำมาสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ตามสมการที่ 3.25 – 3.27 จำนวน และใช้ข้อมูลในปี 2565 สำหรับทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรและค่านัยสำคัญทางสถิติ ดังแสดงในตารางที่ 22

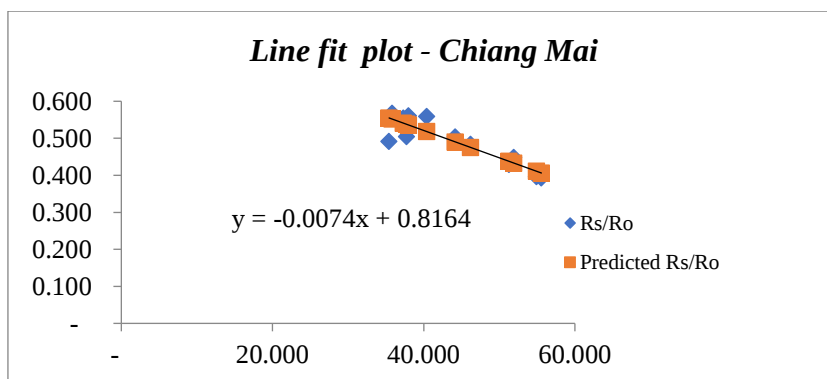
ตาราง 22 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรและค่านัยสำคัญทางสถิติ

| Area         | Correlation | Coefficients |         | Significance |
|--------------|-------------|--------------|---------|--------------|
|              |             | a            | b       |              |
| Chiang Mai   | -0.8942     | 0.8164       | -0.0074 | 8.74E-05     |
| Chiang Rai   | -0.8578     | 0.8353       | -0.0075 | 3.59E-04     |
| Mae Hong Son | -0.8453     | 0.8104       | -0.0070 | 5.35E-04     |
| Nan          | -0.7911     | 0.7639       | -0.0057 | 2.18E-03     |
| Phare        | -0.8842     | 0.8499       | -0.0066 | 1.34E-04     |
| Tak          | -0.9805     | 1.1184       | -0.0138 | 2.17E-08     |
| Phitsanulok  | -0.8565     | 0.7470       | -0.0052 | 3.74E-04     |

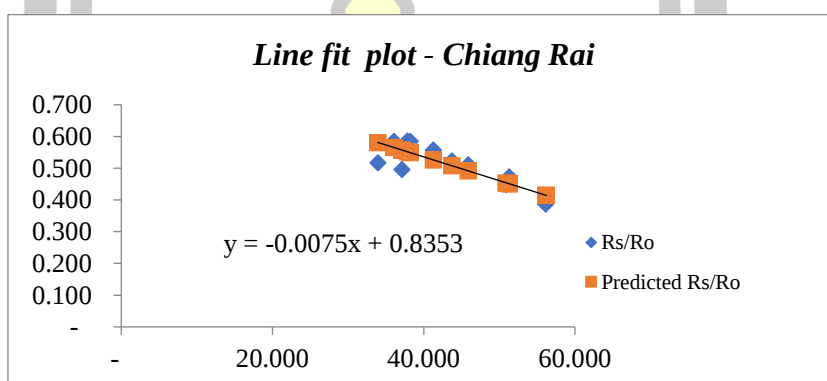
ผู้วิจัยนำเสนอผลการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับการประมาณค่ารังสีอาทิตย์ (DEV) จากการใช้สมการการลดลงของรังสีอาทิตย์จากบรรยากาศในบทที่ 3 โดยใช้ข้อมูลจากอุณหภูมิตั้งแต่ปี 2555 – 2564 ซึ่งประกอบด้วย อุณหภูมิเฉลี่ย ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณเมฆปกคลุม ส่วนข้อมูลคุณภาพอากาศประกอบไปด้วย ปริมาณฝุ่นละออง PM<sub>2.5</sub> ปริมาณฝุ่นละออง PM<sub>10</sub> ปริมาณโอโซนและนำเสนอแผนภาพการกระจายตัวแบบเชิงเส้นที่มีความสมบูรณ์ (Line fit plot) เพื่อแสดงลักษณะของเส้นถดถอย ดังแสดงในตารางที่ 23 และ ภาพประกอบที่ 92 – 98

ตาราง 23 สมการประมาณค่ารังสีอาทิตย์ (DEV.)

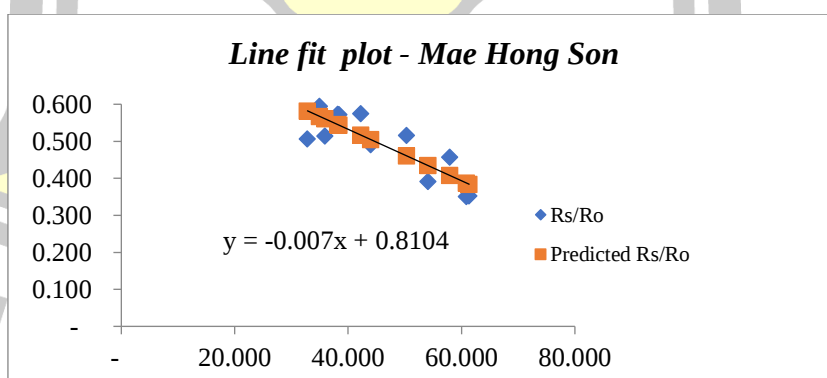
| Area         | Model                                                                                    |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Chiang Mai   | $\frac{R_{es}}{R_0} = 0.8164 - 0.0074e^{(\tau_r + \tau_g + \tau_w + \tau_0 + \sigma_f)}$ |
| Chiang Rai   | $\frac{R_{es}}{R_0} = 0.8353 - 0.0075e^{(\tau_r + \tau_g + \tau_w + \tau_0 + \sigma_f)}$ |
| Mae Hong Son | $\frac{R_{es}}{R_0} = 0.8104 - 0.0070e^{(\tau_r + \tau_g + \tau_w + \tau_0 + \sigma_f)}$ |
| Nan          | $\frac{R_{es}}{R_0} = 0.7639 - 0.0057e^{(\tau_r + \tau_g + \tau_w + \tau_0 + \sigma_f)}$ |
| Phare        | $\frac{R_{es}}{R_0} = 0.8499 - 0.0066e^{(\tau_r + \tau_g + \tau_w + \tau_0 + \sigma_f)}$ |
| Tak          | $\frac{R_{es}}{R_0} = 1.1184 - 0.0138e^{(\tau_r + \tau_g + \tau_w + \tau_0 + \sigma_f)}$ |
| Phitsanulok  | $\frac{R_{es}}{R_0} = 0.7470 - 0.0052e^{(\tau_r + \tau_g + \tau_w + \tau_0 + \sigma_f)}$ |



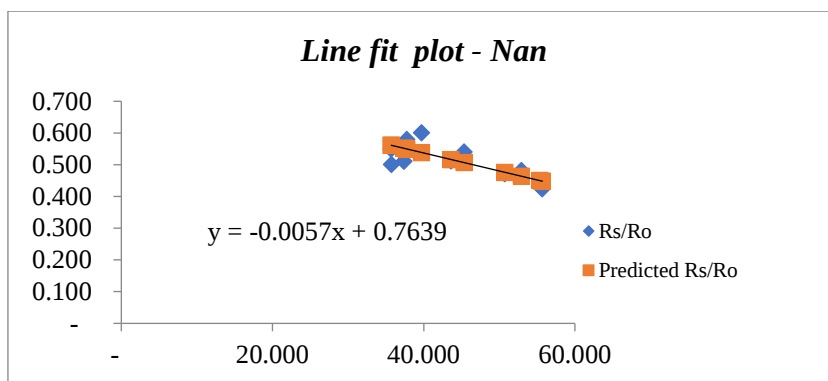
ภาพประกอบ 92 Line fit plot Chiang Mai model



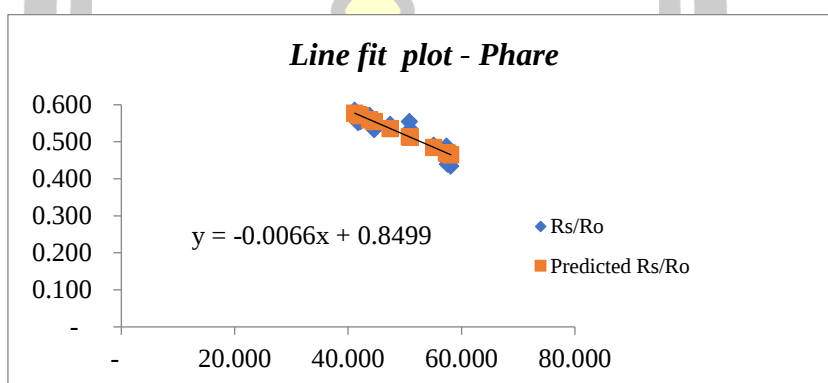
ภาพประกอบ 93 Line fit plot Chiang Rai model



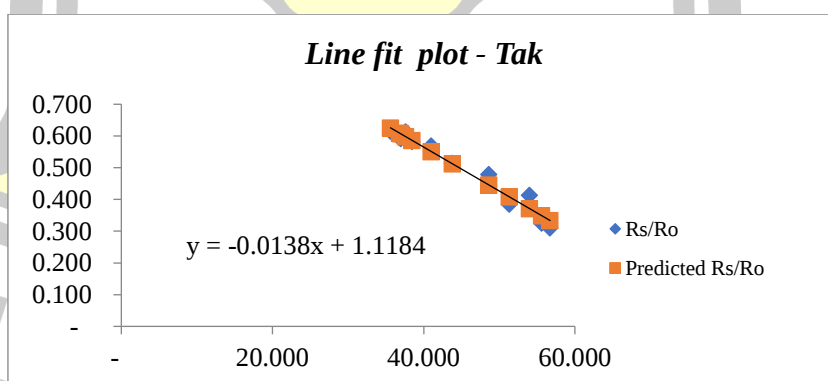
ภาพประกอบ 94 Line fit plot Mae Hong Son model



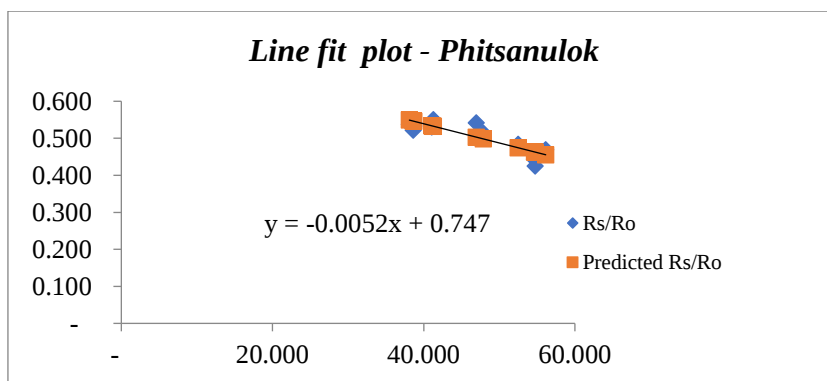
ภาพประกอบ 95 Line fit plot Nan model



ภาพประกอบ 96 Line fit plot Phare model



ภาพประกอบ 97 Line fit plot Tak model

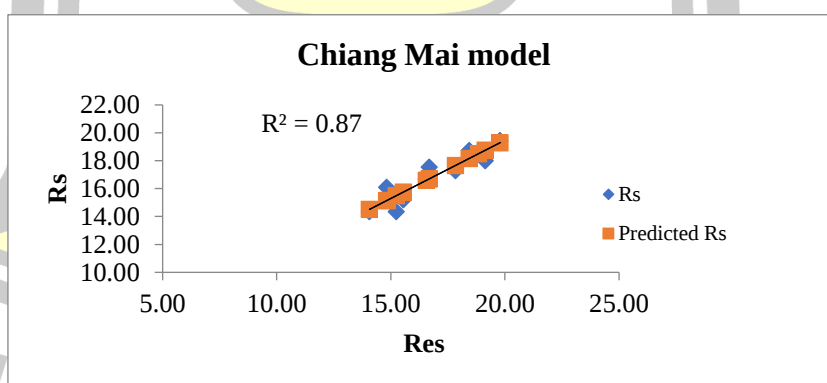


ภาพประกอบ 98 Line fit plot Phitsanulok model

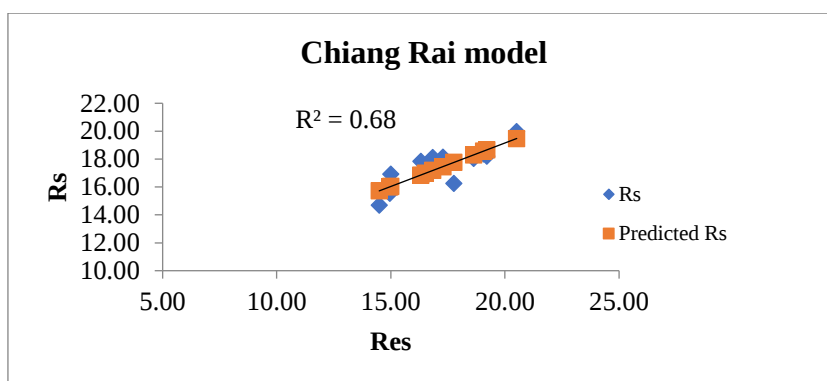
#### 4.2.2 การประมาณค่ารังสีอาทิตย์และการวัดผลทางสถิติของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

##### 4.2.2.1 ผลการประมาณค่ารังสีอาทิตย์จากแบบจำลองคณิตศาสตร์

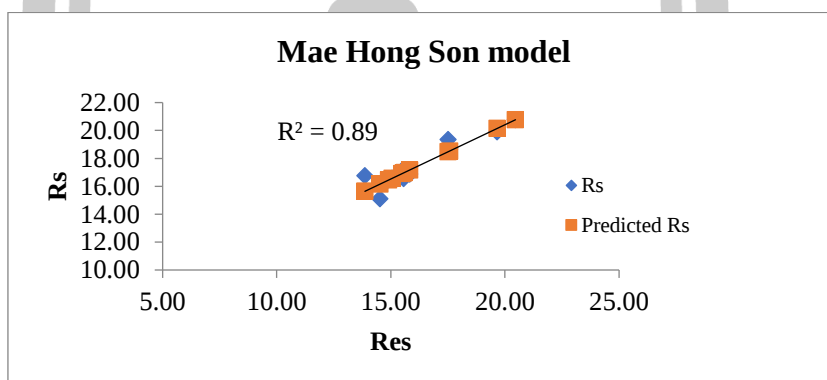
ผู้วิจัยนำเสนอผลการประมาณค่ารังสีอาทิตย์จากแบบจำลองคณิตศาสตร์ โดยการใช้สมการจากตารางที่ 23 ที่สร้างขึ้นจากตัวแปรต่างๆ ในบทที่ 3 เมื่อ  $R_{es}$  คือรังสีอาทิตย์ที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบที่ 1 - 2 และ  $R_s$  คือปริมาณรังสีอาทิตย์รายเดือนที่ตรวจวัดได้จากสถานีวัดรังสีอาทิตย์จากจังหวัดต่างๆ ประจำปี 2565 นำมาเปรียบเทียบเพื่อหาความสัมพันธ์ของทั้ง 2 ค่า ดังแสดงในภาพประกอบที่ 99 - 106



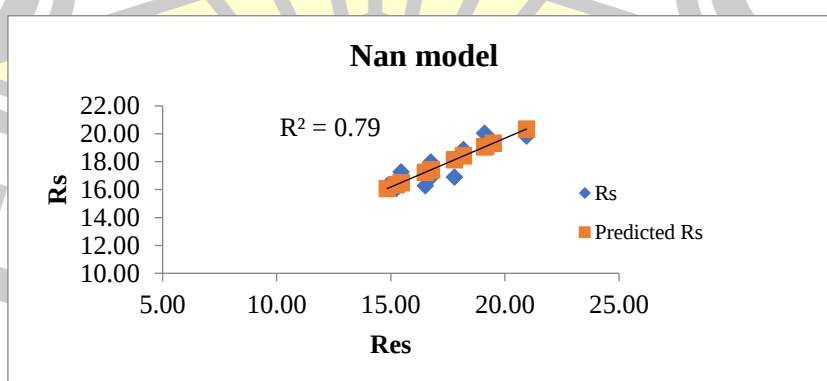
ภาพประกอบ 99 ความสัมพันธ์ระหว่างรังสีอาทิตย์ที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ จังหวัดเชียงใหม่



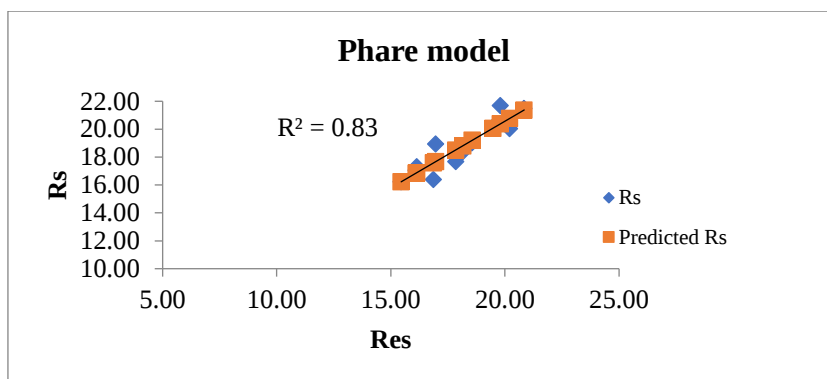
ภาพประกอบ 100 ความสัมพันธ์ระหว่างรังสีอาทิตย์ที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ จังหวัดเชียงราย



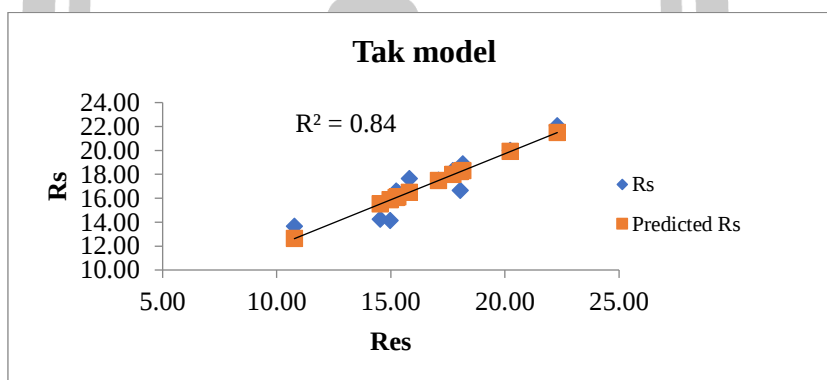
ภาพประกอบ 101 ความสัมพันธ์ระหว่างรังสีอาทิตย์ที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ จังหวัดแม่ฮ่องสอน



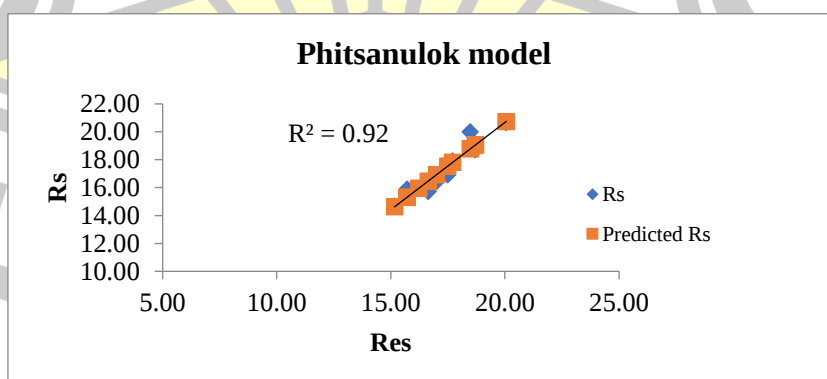
ภาพประกอบ 102 ความสัมพันธ์ระหว่างรังสีอาทิตย์ที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ จังหวัดน่าน



ภาพประกอบ 103 ความสัมพันธ์ระหว่างรังสีอาทิตย์ที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ จังหวัดแพร่



ภาพประกอบ 104 ความสัมพันธ์ระหว่างรังสีอาทิตย์ที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ จังหวัดตาก



ภาพประกอบ 105 ความสัมพันธ์ระหว่างรังสีอาทิตย์ที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ จังหวัดพิษณุโลก

#### 4.2.2.2 การวัดประสิทธิภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการวัดประสิทธิภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ผู้วิจัยได้นำเสนอการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เทียบกับข้อมูลรังสีอาทิตย์จากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ประจำปี 2565 และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อื่นๆ ที่ใช้ข้อมูลจากอุตุนิยมิวิทยา และการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในการเปรียบเทียบความแม่นยำ รวมไปถึงการใช้เครื่องมือทางสถิติเพื่อกำหนดความแม่นยำและวัดประสิทธิภาพในการพยากรณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ประกอบด้วย ค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดสัมบูรณ์ (MAD, MAE) ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (MSE) ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดสัมบูรณ์ (MAPE) และกำหนดให้

Model 1 คือ แบบจำลองของ Ångström–Prescott เป็นแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของระยะความยาวนานของแสงแดดระหว่างวันกับปริมาณรังสีรวมของอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกรายเดือน

Model 2 คือ แบบจำลองของ El-Metwally เป็นแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของระยะความยาวนานของแสงแดดระหว่างวันกับปริมาณรังสีรวมของอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกรายเดือน

Model 3 - 4 คือ แบบจำลองของ Badescu เป็นแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเมฆปกคลุมกับปริมาณรังสีรวมของอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกรายเดือน

Model 5 คือ แบบจำลองของ Hargreaves เป็นแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด กับปริมาณรังสีรวมของอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกรายเดือน

Model 6 คือ แบบจำลองของ Allen เป็นแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด และสัดส่วนของความดันของบรรยากาศกับปริมาณรังสีรวมของอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกรายเดือน

Model 7 คือ แบบจำลองของ Chen and Li เป็นแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของระยะความยาวนานของแสงแดดระหว่างวัน อุณหภูมิสูงสุด - ต่ำสุด กับปริมาณรังสีรวมของอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกรายเดือน

Model 8 คือ แบบจำลองของ El-Sebaai เป็นแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของระยะความยาวนานของแสงแดดระหว่างวัน ความชื้นสัมพัทธ์ กับปริมาณรังสีรวมของอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกรายเดือน

PVsyst คือโปรแกรมออกแบบและวิเคราะห์ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

DEV คือ แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากการลดทอนรังสีอาทิตย์จากบรรยากาศ

$R_s$  คือปริมาณรังสีอาทิตย์รายเดือนจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์จังหวัดต่างๆ ปี 2565

ดังแสดงในตารางที่ 24 - 26

ตาราง 24 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการเปรียบเทียบรังสีอาทิตย์

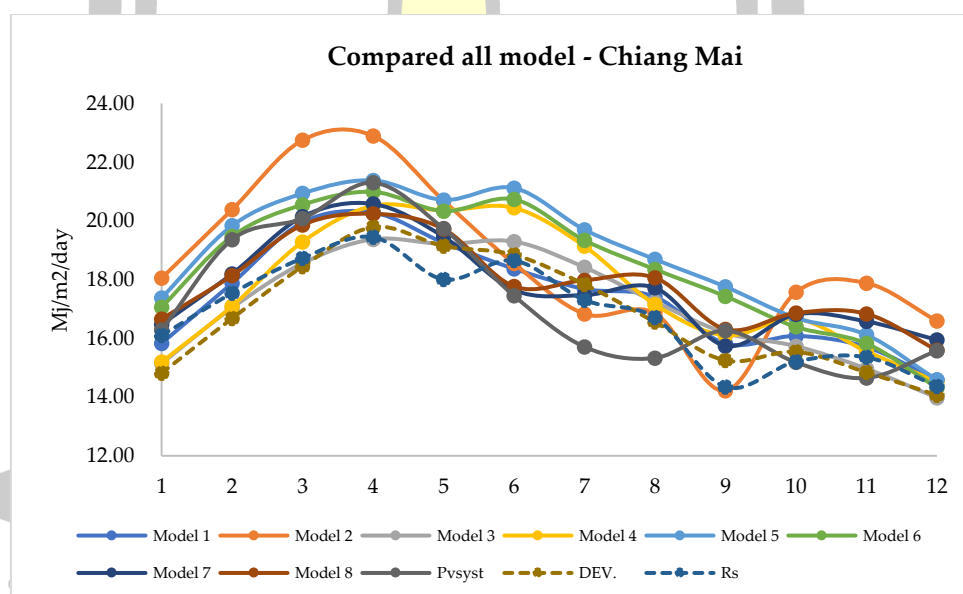
| Items                     | Model                                                                                |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Ångström-Prescott [93] | $\frac{R_s}{R_0} = a + b \left( \frac{S}{S_0} \right)$                               |
| 2. El-Metwally [94]       | $\frac{R_s}{R_0} = a^{(1/S/S_0)}$                                                    |
| 3. Badescu [95]           | $\frac{R_s}{R_0} = a + eCloud$                                                       |
| 4. Badescu [95]           | $\frac{R_s}{R_0} = a + eCloud + fCloud^2$                                            |
| 5. Hargreaves [96]        | $\frac{R_s}{R_0} = a(T_{\max} - T_{\min})^{0.5}$                                     |
| 6. Allen [97]             | $\frac{R_s}{R_0} = a \left( \frac{p}{p_0} \right)^{0.5} (T_{\max} - T_{\min})^{0.5}$ |
| 7. Chen and Li [98]       | $\frac{R_s}{R_0} = a + b \left( \frac{S}{S_0} \right) + cT_{\max} + dT_{\min}$       |
| 8. El-Sebaai [99]         | $\frac{R_s}{R_0} = a + b \left( \frac{S}{S_0} \right) + gRh$                         |

ตาราง 25 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรสำหรับแบบจำลอง ภาคเหนือของประเทศไทย

| Location     | Models    | a       | b      | c       | d      | e       | f       | g      | h       |
|--------------|-----------|---------|--------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|
| Chiang Mai   | Model 1   | 0.3297  | 0.3061 | -       | -      | -       | -       | -      | -       |
|              | Model 2   | 0.7180  | -      | -       | -      | -       | -       | -      | -       |
|              | Model 3   | 0.5897  | -      | -       | -      | -0.0197 | -       | -      | -       |
|              | Model 4   | 0.5231  | -      | -       | -      | 0.0245  | -0.0050 | -      | -       |
|              | Model 5   | 0.1600  | -      | -       | -      | -       | -       | -      | -       |
|              | Model 6   | 0.1700  | -      | -       | -      | -       | -       | -      | -       |
|              | Model 7   | 0.5580  | 0.4839 | -0.0177 | 0.0116 | -       | -       | -      | -       |
|              | Model 8   | -0.0190 | 0.4570 | -       | -      | -       | -       | 0.0038 | -       |
|              | Model DEV | 0.8164  | -      | -       | -      | -       | -       | -      | -0.0074 |
| Chiang Rai   | Model 1   | 0.3019  | 0.3557 | -       | -      | -       | -       | -      | -       |
|              | Model 2   | 0.7180  | -      | -       | -      | -       | -       | -      | -       |
|              | Model 3   | 0.5941  | -      | -       | -      | -0.0217 | -       | -      | -       |
|              | Model 4   | 0.5000  | -      | -       | -      | 0.0303  | 0.0060  | -      | -       |
|              | Model 5   | 0.1600  | -      | -       | -      | -       | -       | -      | -       |
|              | Model 6   | 0.1700  | -      | -       | -      | -       | -       | -      | -       |
|              | Model 7   | 0.5353  | 0.6720 | -0.027  | 0.0179 | -       | -       | -      | -       |
|              | Model 8   | -0.3605 | 0.5798 | -       | -      | -       | -       | 0.0070 | -       |
|              | Model DEV | 0.8353  | -      | -       | -      | -       | -       | -      | -0.0075 |
| Mae Hong Son | Model 1   | -       | -      | -       | -      | -       | -       | -      | -       |
|              | Model 2   | 0.7180  | -      | -       | -      | -       | -       | -      | -       |
|              | Model 3   | 0.5965  | -      | -       | -      | -0.0247 | -       | -      | -       |
|              | Model 4   | 0.5382  | -      | -       | -      | 0.0213  | -0.0052 | -      | -       |
|              | Model 5   | 0.1600  | -      | -       | -      | -       | -       | -      | -       |
|              | Model 6   | 0.1700  | -      | -       | -      | -       | -       | -      | -       |
|              | Model 7   | -       | -      | -       | -      | -       | -       | -      | -       |
|              | Model 8   | -       | -      | -       | -      | -       | -       | -      | -       |
|              | Model DEV | 0.8104  | -      | -       | -      | -       | -       | -      | -0.0070 |
| Nan          | Model 1   | -       | -      | -       | -      | -       | -       | -      | -       |
|              | Model 2   | 0.7180  | -      | -       | -      | -       | -       | -      | -       |
|              | Model 3   | 0.5900  | -      | -       | -      | -0.0190 | -       | -      | -       |
|              | Model 4   | 0.5160  | -      | -       | -      | 0.0300  | -0.0050 | -      | -       |
|              | Model 5   | 0.1600  | -      | -       | -      | -       | -       | -      | -       |
|              | Model 6   | 0.1700  | -      | -       | -      | -       | -       | -      | -       |
|              | Model 7   | -       | -      | -       | -      | -       | -       | -      | -       |
|              | Model 8   | -       | -      | -       | -      | -       | -       | -      | -       |
|              | Model DEV | 0.7639  | -      | -       | -      | -       | -       | -      | -0.0057 |
| Phare        | Model 1   | -       | -      | -       | -      | -       | -       | -      | -       |
|              | Model 2   | 0.7180  | -      | -       | -      | -       | -       | -      | -       |
|              | Model 3   | 0.7509  | -      | -       | -      | -0.0344 | -       | -      | -       |
|              | Model 4   | 0.2567  | -      | -       | -      | 0.1243  | -0.0123 | -      | -       |
|              | Model 5   | 0.1600  | -      | -       | -      | -       | -       | -      | -       |
|              | Model 6   | 0.1700  | -      | -       | -      | -       | -       | -      | -       |
|              | Model 7   | -       | -      | -       | -      | -       | -       | -      | -       |
|              | Model 8   | -       | -      | -       | -      | -       | -       | -      | -       |
|              | Model DEV | 0.8499  | -      | -       | -      | -       | -       | -      | -0.0066 |

ตาราง 26 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรสำหรับแบบจำลอง ภาคเหนือของประเทศไทย (ต่อ)

| Location    | Models    | a      | b      | c      | d       | e       | f       | g      | h       |
|-------------|-----------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|--------|---------|
| Tak         | Model 1   | -      | -      | -      | -       | -       | -       | -      | -       |
|             | Model 2   | 0.7180 | -      | -      | -       | -       | -       | -      | -       |
|             | Model 3   | 0.7267 | -      | -      | -       | -0.0512 | -       | -      | -       |
|             | Model 4   | 0.6258 | -      | -      | -       | 0.0030  | -0.0058 | -      | -       |
|             | Model 5   | 0.1600 | -      | -      | -       | -       | -       | -      | -       |
|             | Model 6   | 0.1700 | -      | -      | -       | -       | -       | -      | -       |
|             | Model 7   | -      | -      | -      | -       | -       | -       | -      | -       |
|             | Model 8   | -      | -      | -      | -       | -       | -       | -      | -       |
|             | Model DEV | 1.1184 | -      | -      | -       | -       | -       | -      | -0.0138 |
| Phitsanulok | Model 1   | 0.3748 | 0.2386 | -      | -       | -       | -       | -      | -       |
|             | Model 2   | 0.7180 | -      | -      | -       | -       | -       | -      | -       |
|             | Model 3   | 0.6291 | -      | -      | -       | -0.0214 | -       | -      | -       |
|             | Model 4   | 0.3731 | -      | -      | -       | 0.0813  | -0.0092 | -      | -       |
|             | Model 5   | 0.1600 | -      | -      | -       | -       | -       | -      | -       |
|             | Model 6   | 0.1700 | -      | -      | -       | -       | -       | -      | -       |
|             | Model 7   | 0.3177 | 0.2103 | 0.0040 | -0.0026 | -       | -       | -      | -       |
|             | Model 8   | 0.4701 | 0.2023 | -      | -       | -       | -       | -0.001 | -       |
|             | Model DEV | 0.7470 | -      | -      | -       | -       | -       | -      | -0.0052 |

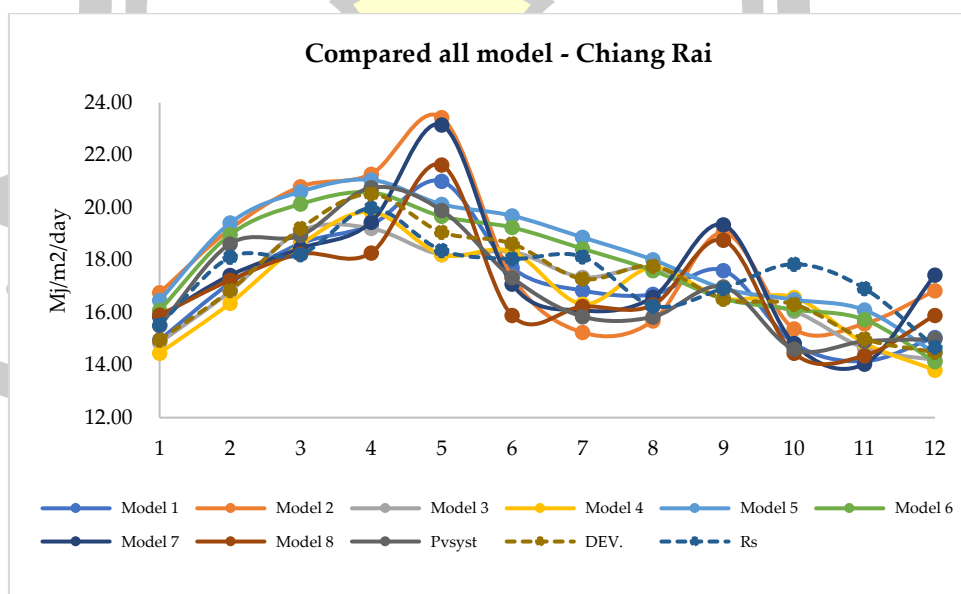


ภาพประกอบ 106 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ จังหวัดเชียงใหม่

ตาราง 27 การทดสอบทางสถิติและการวัดประสิทธิภาพแบบจำลองรังสีอาทิตย์ จ.เชียงใหม่

| Items   | MAE/MAD | MSE   | RMSE  | MAPE   |
|---------|---------|-------|-------|--------|
| Model 1 | 0.683   | 0.648 | 0.805 | 4.095  |
| Model 2 | 1.909   | 5.364 | 2.316 | 11.249 |
| Model 3 | 0.696   | 0.715 | 0.846 | 4.284  |
| Model 4 | 1.082   | 1.673 | 1.294 | 6.40   |
| Model 5 | 1.929   | 4.426 | 2.104 | 11.401 |
| Model 6 | 1.595   | 3.177 | 1.782 | 9.420  |
| Model 7 | 1.086   | 1.381 | 1.175 | 6.603  |
| Model 8 | 1.171   | 1.576 | 1.255 | 7.180  |
| PVsyst  | 1.249   | 1.929 | 1.389 | 7.367  |
| DEV     | 0.570   | 0.459 | 0.677 | 3.454  |

จากภาพประกอบที่ 106 และตารางที่ 27 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ และแสดงการทดสอบทางสถิติและการวัดประสิทธิภาพแบบจำลองรังสีอาทิตย์ จ.เชียงใหม่ พบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น (DEV) มีค่าการวัดผลทางสถิติเข้าใกล้ 0 มากที่สุด มีค่า MAE, MSE, RMSE และ MAPE เท่ากับ 0.570, 0.459, 0.677 และ 3.454 ตามลำดับ มีแนวโน้มที่สามารถคำนวณปริมาณรังสีอาทิตย์รายเดือนได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง และเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความแม่นยำสูงสุด ส่วนแบบจำลองที่มีความแม่นยำลำดับถัดมาคือ แบบจำลองที่ 1 (Model 1)



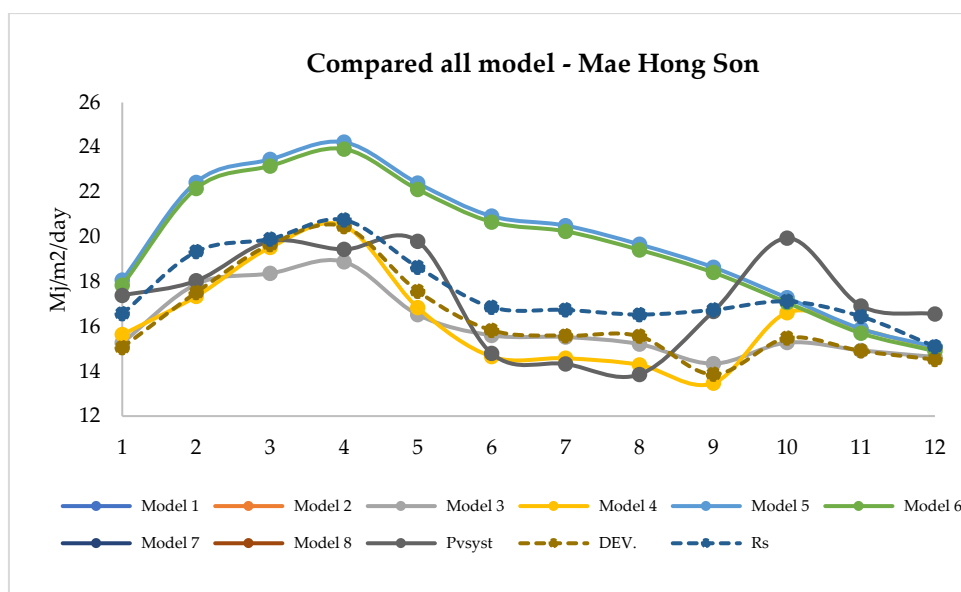
ภาพประกอบ 107 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เทียบกับ  
ข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ จังหวัดเชียงราย

ตาราง 28 การทดสอบทางสถิติและการวัดประสิทธิภาพแบบจำลองรังสีอาทิตย์ จ.เชียงราย

| Items   | MAE/MAD | MSE   | RMSE  | MAPE   |
|---------|---------|-------|-------|--------|
| Model 1 | 1.182   | 2.350 | 1.533 | 6.720  |
| Model 2 | 1.954   | 5.226 | 2.286 | 11.174 |
| Model 3 | 0.941   | 1.267 | 1.126 | 5.440  |
| Model 4 | 0.973   | 1.397 | 1.182 | 5.710  |
| Model 5 | 1.167   | 1.787 | 1.337 | 6.603  |
| Model 6 | 0.995   | 1.250 | 1.118 | 5.692  |
| Model 7 | 1.746   | 4.981 | 2.232 | 10.111 |
| Model 8 | 1.171   | 1.576 | 1.255 | 7.180  |
| PVsyst  | 1.051   | 2.020 | 1.421 | 5.905  |
| DEV     | 0.923   | 1.107 | 1.052 | 5.298  |

จากภาพประกอบที่ 107 และตารางที่ 28 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ และแสดงการทดสอบทางสถิติและการวัดประสิทธิภาพแบบจำลองรังสีอาทิตย์ จ.เชียงราย พบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น (DEV) มีค่าการวัดผลทางสถิติเข้าใกล้ 0 มากที่สุด โดยมีค่า MAE, MSE, RMSE และ MAPE เท่ากับ 0.923, 1.107, 1.052 และ 5.298 ตามลำดับ มีแนวโน้มที่สามารถคำนวณปริมาณรังสีอาทิตย์รายเดือนได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง และเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความแม่นยำสูงสุด ส่วนแบบจำลองที่มีความแม่นยำลำดับถัดมาคือ แบบจำลองที่ 3 (Model 3)

พูน ปณ ทิโต ชีเว



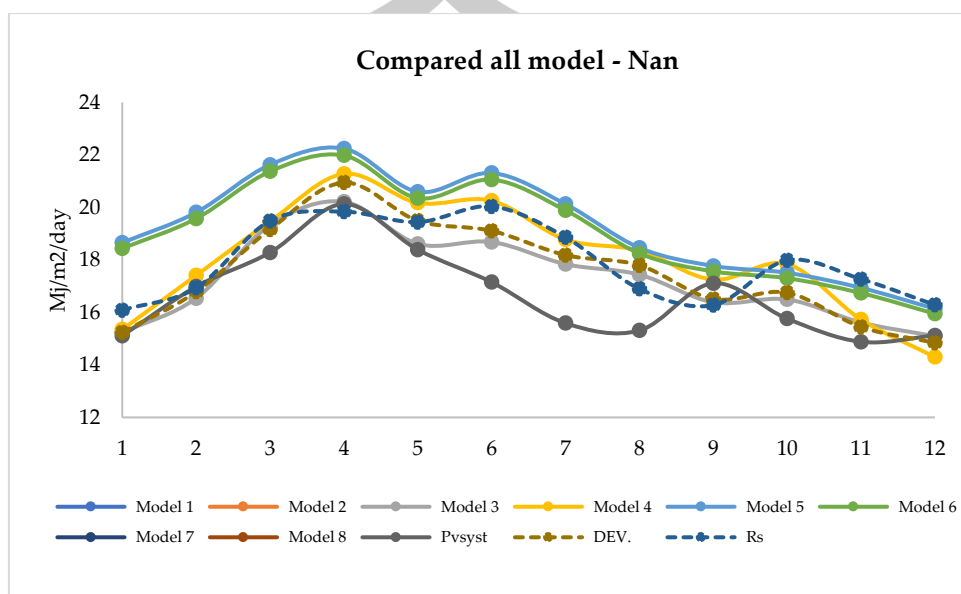
ภาพประกอบ 108 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ จังหวัดแม่ฮ่องสอน

ตาราง 29 การทดสอบทางสถิติและการวัดประสิทธิภาพแบบจำลองรังสีอาทิตย์ จ.แม่ฮ่องสอน

| Items   | MAE/MAD | MSE   | RMSE  | MAPE   |
|---------|---------|-------|-------|--------|
| Model 1 | -       | -     | -     | -      |
| Model 2 | -       | -     | -     | -      |
| Model 3 | 1.522   | 2.545 | 1.595 | 8.617  |
| Model 4 | 1.327   | 2.847 | 1.687 | 7.920  |
| Model 5 | 2.413   | 7.917 | 2.814 | 13.421 |
| Model 6 | 2.239   | 6.731 | 2.594 | 12.477 |
| Model 7 | -       | -     | -     | -      |
| Model 8 | -       | -     | -     | -      |
| PVsyst  | 1.390   | 2.750 | 1.658 | 8.086  |
| DEV     | 1.227   | 1.987 | 1.410 | 7.141  |

จากภาพประกอบที่ 108 และตารางที่ 29 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ และแสดงการทดสอบทางสถิติและการวัดประสิทธิภาพแบบจำลองรังสีอาทิตย์ จ.แม่ฮ่องสอน พบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น (DEV) มีค่าการวัดผลทางสถิติเข้าใกล้ 0 มากที่สุด โดยมีค่า MAE, MSE, RMSE และ MAPE เท่ากับ 1.227, 1.987, 1.410 และ 7.141 ตามลำดับ มีแนวโน้มที่สามารถคำนวณปริมาณรังสีอาทิตย์ราย

เดือนได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง และเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความแม่นยำสูงสุด ส่วนแบบจำลองที่มีความแม่นยำลำดับถัดมาคือ แบบจำลองที่ 4 (Model 4)



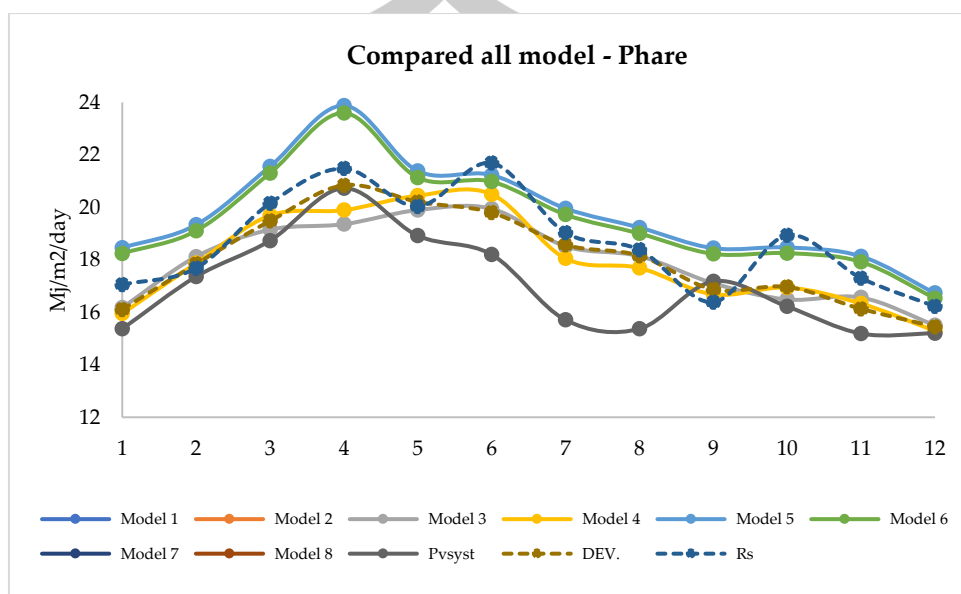
ภาพประกอบ 109 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ จังหวัดน่าน

ตาราง 30 การทดสอบทางสถิติและการวัดประสิทธิภาพแบบจำลองรังสีอาทิตย์ จ.น่าน

| Items   | MAE/MAD | MSE   | RMSE  | MAPE  |
|---------|---------|-------|-------|-------|
| Model 1 | -       | -     | -     | -     |
| Model 2 | -       | -     | -     | -     |
| Model 3 | 0.831   | 0.942 | 0.970 | 4.654 |
| Model 4 | 0.818   | 1.070 | 1.034 | 4.720 |
| Model 5 | 1.474   | 2.898 | 1.702 | 8.243 |
| Model 6 | 1.346   | 2.323 | 1.524 | 7.557 |
| Model 7 | -       | -     | -     | -     |
| Model 8 | -       | -     | -     | -     |
| PVsyst  | 1.495   | 3.159 | 1.777 | 8.257 |
| DEV     | 0.811   | 0.933 | 0.966 | 4.582 |

จากภาพประกอบที่ 109 และตารางที่ 30 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ และแสดงการทดสอบทางสถิติและการวัดประสิทธิภาพแบบจำลองรังสีอาทิตย์ จ.น่าน พบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น (DEV) มีค่าการวัดผลทางสถิติเข้าใกล้ 0 มากที่สุด โดยมีค่า MAE, MSE, RMSE และ MAPE เท่ากับ 0.811, 0.933, 0.966 และ 4.582 ตามลำดับ มีแนวโน้มที่สามารถคำนวณปริมาณรังสีอาทิตย์รายเดือนได้

ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง และเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความแม่นยำสูงสุด ส่วนแบบจำลองที่มีความแม่นยำลำดับถัดมาคือ แบบจำลองที่ 3 (Model 3)



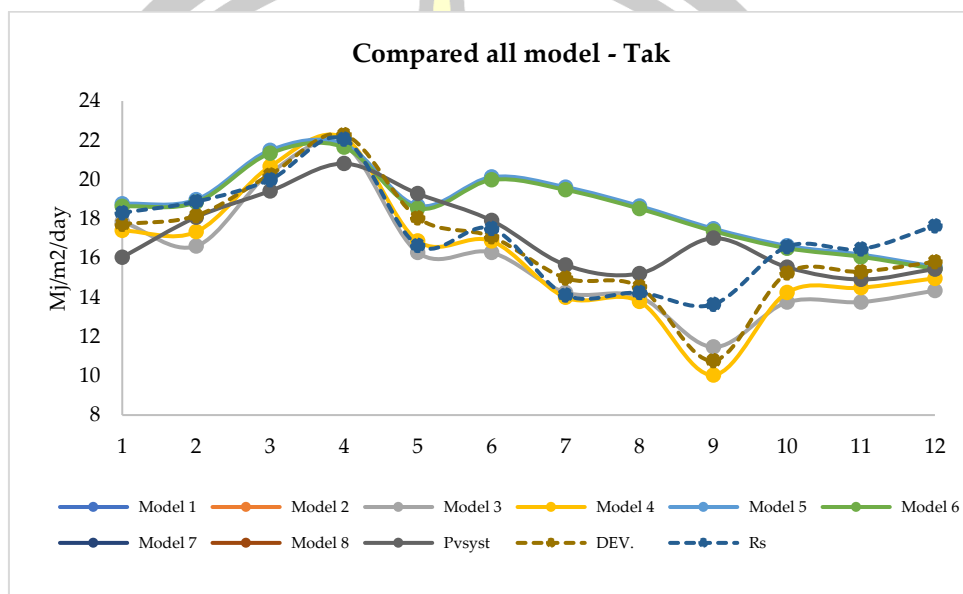
ภาพประกอบ 110 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ จังหวัดแพร่

ตาราง 31 การทดสอบทางสถิติและการวัดประสิทธิภาพแบบจำลองรังสีอาทิตย์ จ.แพร่

| Items   | MAE/MAD | MSE   | RMSE  | MAPE  |
|---------|---------|-------|-------|-------|
| Model 1 | -       | -     | -     | -     |
| Model 2 | -       | -     | -     | -     |
| Model 3 | 0.976   | 1.451 | 1.204 | 5.105 |
| Model 4 | 0.901   | 1.073 | 1.036 | 4.780 |
| Model 5 | 1.191   | 1.785 | 1.336 | 6.411 |
| Model 6 | 1.037   | 1.345 | 1.160 | 5.551 |
| Model 7 | -       | -     | -     | -     |
| Model 8 | -       | -     | -     | -     |
| PVsyst  | 1.814   | 4.383 | 2.093 | 9.623 |
| DEV     | 0.797   | 0.975 | 0.987 | 4.237 |

จากภาพประกอบที่ 110 และตารางที่ 31 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ และแสดงการทดสอบทางสถิติและการวัดประสิทธิภาพแบบจำลองรังสีอาทิตย์ จ.แพร่ พบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น (DEV) มีค่า

การวัดผลทางสถิติเข้าใกล้ 0 มากที่สุด โดยมีค่า MAE, MSE, RMSE และ MAPE เท่ากับ 0.797, 0.975, 0.987 และ 4.237 ตามลำดับ มีแนวโน้มที่สามารถคำนวณปริมาณรังสีอาทิตย์รายเดือนได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง และเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความแม่นยำสูงสุด ส่วนแบบจำลองที่มีความแม่นยำลำดับถัดมาคือ แบบจำลองที่ 4 (Model 4)

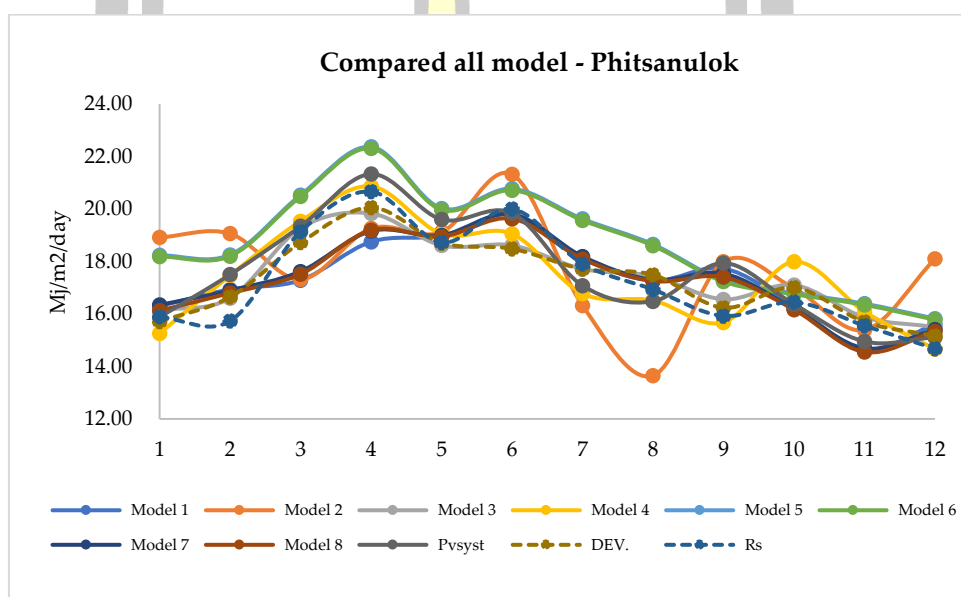


ภาพประกอบ 111 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ จังหวัดตาก

ตาราง 32 การทดสอบทางสถิติและการวัดประสิทธิภาพแบบจำลองรังสีอาทิตย์ จ.ตาก

| Items   | MAE/MAD | MSE   | RMSE  | MAPE   |
|---------|---------|-------|-------|--------|
| Model 1 | -       | -     | -     | -      |
| Model 2 | -       | -     | -     | -      |
| Model 3 | 1.356   | 3.180 | 1.783 | 8.094  |
| Model 4 | 1.267   | 2.816 | 1.678 | 7.790  |
| Model 5 | 1.928   | 6.876 | 2.622 | 12.567 |
| Model 6 | 1.878   | 6.479 | 2.545 | 12.234 |
| Model 7 | -       | -     | -     | -      |
| Model 8 | -       | -     | -     | -      |
| PVsyst  | 1.552   | 3.153 | 1.776 | 9.501  |
| DEV     | 0.995   | 1.555 | 1.247 | 6.228  |

จากภาพประกอบที่ 111 และตารางที่ 32 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ และแสดงการทดสอบทางสถิติและการวัดประสิทธิภาพแบบจำลองรังสีอาทิตย์ จ.ตาก พบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น (DEV) มีค่าการวัดผลทางสถิติเข้าใกล้ 0 มากที่สุด โดยมีค่า MAE, MSE, RMSE และ MAPE เท่ากับ 0.995, 1.555, 1.247 และ 6.228 ตามลำดับ มีแนวโน้มที่สามารถคำนวณปริมาณรังสีอาทิตย์รายเดือนได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง และเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความแม่นยำสูงสุด ส่วนแบบจำลองที่มีความแม่นยำลำดับถัดมาคือ แบบจำลองที่ 4 (Model 4)



ภาพประกอบ 112 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ จังหวัดพิษณุโลก



ตาราง 33 การทดสอบทางสถิติและการวัดประสิทธิภาพแบบจำลองรังสีอาทิตย์ จ.พิษณุโลก

| Items   | MAE/MAD | MSE   | RMSE  | MAPE   |
|---------|---------|-------|-------|--------|
| Model 1 | 0.851   | 1.166 | 1.080 | 4.948  |
| Model 2 | 1.863   | 4.751 | 2.180 | 11.172 |
| Model 3 | 0.560   | 0.448 | 0.670 | 3.257  |
| Model 4 | 0.678   | 0.733 | 0.856 | 3.980  |
| Model 5 | 1.430   | 2.405 | 1.551 | 8.388  |
| Model 6 | 1.380   | 2.263 | 1.504 | 8.099  |
| Model 7 | 0.767   | 0.865 | 0.930 | 4.480  |
| Model 8 | 0.743   | 0.835 | 0.914 | 4.320  |
| PVsyst  | 0.676   | 0.828 | 0.910 | 4.036  |
| DEV     | 0.492   | 0.394 | 0.628 | 2.806  |

จากภาพประกอบที่ 112 และตารางที่ 33 แสดงการเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เทียบกับข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ และแสดงการทดสอบทางสถิติและการวัดประสิทธิภาพแบบจำลองรังสีอาทิตย์ จ.พิษณุโลก พบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น (DEV) มีค่าการวัดผลทางสถิติเข้าใกล้ 0 มากที่สุด โดยมีค่า MAE, MSE, RMSE และ MAPE เท่ากับ 0.492, 0.394, 0.628 และ 2.806 ตามลำดับ มีแนวโน้มที่สามารถคำนวณปริมาณรังสีอาทิตย์รายเดือนได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง และเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความแม่นยำสูงสุด ส่วนแบบจำลองที่มีความแม่นยำลำดับถัดมาคือ แบบจำลองที่ 3 (Model 3)

#### 4.2.2.3 สรุปผลการสร้างแบบจำลอง

จากการดำเนินการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประมาณค่ารังสีอาทิตย์สำหรับจังหวัดทางภาคเหนือของประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลจากอุตุนิยมวิทยา และข้อมูลดัชนีคุณภาพอากาศ 10 ปีย้อนหลังตั้งแต่ปี 2555 – 2564 สำหรับการประมาณค่ารังสีอาทิตย์ในปี 2565 ซึ่งจากผลการดำเนินการวิจัยแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยอาศัยการลดทอนรังสีอาทิตย์จากสภาพบรรยากาศ (DEV) สามารถประมาณค่าปริมาณรังสีอาทิตย์รายเดือนได้อย่างแม่นยำเมื่อเทียบกับโปรแกรมสำเร็จรูปและแบบจำลองคณิตศาสตร์อื่นๆ และเมื่อนำมาวัดผลการทดสอบทางสถิติพบว่ามีค่า MAE, MSE, RMSE และ MAPE เข้าใกล้ 0 ซึ่งบ่งชี้ได้ว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถคำนวณปริมาณรังสีอาทิตย์รายเดือนได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง

## บทที่ 5

### สรุปและอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

ในการทดลองและนำเสนอแบบจำลองสำหรับการประมาณค่ารังสีอาทิตย์โดยใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาร่วมกับข้อมูลดัชนีคุณภาพอากาศ ดังแสดงในบทที่ 4 ผู้วิจัยได้นำเสนอผลการศึกษาและทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 เป็นการนำเสนอการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณของฝุ่นละอองที่ส่งผลกระทบต่อรังสีอาทิตย์ที่ปรากฏบนพื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในห้องปฏิบัติการ ซึ่งประกอบไปด้วย การหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณฝุ่นละอองกับแรงดันเปิดวงจร กระแสลัดวงจร กำลังไฟฟ้าจ่ายออก ประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ประสิทธิภาพสูญเสียของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ และรังสีอาทิตย์ที่ปรากฏที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ และส่วนที่ 2 เป็นการนำเสนอการสร้างแบบจำลองประมาณค่ารังสีอาทิตย์โดยใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาร่วมกับข้อมูลดัชนีคุณภาพอากาศ สามารถสรุปและอภิปรายผล และมีข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยดังนี้

#### 5.1 สรุปและอภิปรายผล

5.1.1 การทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดและปริมาณของฝุ่นละอองที่ส่งผลกระทบต่อรังสีอาทิตย์ที่ปรากฏบนพื้นผิวของเซลล์แสงอาทิตย์และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในห้องปฏิบัติการ โดยนำมาทดสอบที่ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์คงที่  $500 \text{ W/m}^2$  ในสภาวะอุณหภูมิอากาศทั่วไปที่  $25^\circ\text{C}$  ใช้ฝุ่นละอองจากดินทั้งหมด 5 ขนาดคือ  $38 \mu\text{m}$  ( $32 - 37 \mu\text{m}$ ),  $63 \mu\text{m}$  ( $38 - 62 \mu\text{m}$ ),  $75 \mu\text{m}$  ( $63 - 74 \mu\text{m}$ ),  $90 \mu\text{m}$  ( $75 - 89 \mu\text{m}$ ) และ  $106 \mu\text{m}$  ( $90 - 105 \mu\text{m}$ ) ที่ฝุ่นละอองจากดินที่มีปริมาณตั้งแต่ 1 – 5 กรัม ผลการทดลองพบว่าการสะสมของฝุ่นจากดินขนาดต่าง ๆ ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ ดังนี้ 1. ฝุ่นขนาด  $32 - 37 \mu\text{m}$  (อนุภาคละเอียด) ประสิทธิภาพลดลงอยู่ระหว่าง 12.60 – 14.56% มีค่ารังสีอาทิตย์ลดลงอยู่ระหว่าง  $401.06 - 463.52 \text{ W/m}^2$  2. ฝุ่นขนาด  $38 - 62 \mu\text{m}$  ประสิทธิภาพลดลงอยู่ระหว่าง 12.80 – 14.62% มีค่ารังสีอาทิตย์ลดลงอยู่ระหว่าง  $407.26 - 465.25 \text{ W/m}^2$  3. ฝุ่นขนาด  $63 - 74 \mu\text{m}$  ประสิทธิภาพลดลงอยู่ระหว่าง 12.91 – 14.72% มีค่ารังสีอาทิตย์ลดลงอยู่ระหว่าง  $410.90 - 468.39 \text{ W/m}^2$  4. ฝุ่นขนาด  $75 - 89 \mu\text{m}$  ประสิทธิภาพลดลงอยู่ระหว่าง 13.79 – 14.76% มีค่ารังสีอาทิตย์ลดลงอยู่ระหว่าง  $438.77 - 469.63 \text{ W/m}^2$  และ 5. ฝุ่นขนาด  $90 - 105 \mu\text{m}$  (อนุภาคหยาบ) ประสิทธิภาพลดลงอยู่ระหว่าง 14.20 – 15.36% มีค่ารังสีอาทิตย์ลดลงอยู่ระหว่าง  $452.03 - 488.84 \text{ W/m}^2$  โดย

ฝุ่นละอองจากดินที่มีขนาดเล็ก (อนุภาคละเอียด) เมื่อมีการเพิ่มปริมาณการยึดเกาะที่แผงเซลล์แสงอาทิตย์ จะสามารถลดทอนการส่งผ่านรังสีอาทิตย์ได้สูงกว่าฝุ่นละอองขนาดใหญ่ (อนุภาคหยาบ)

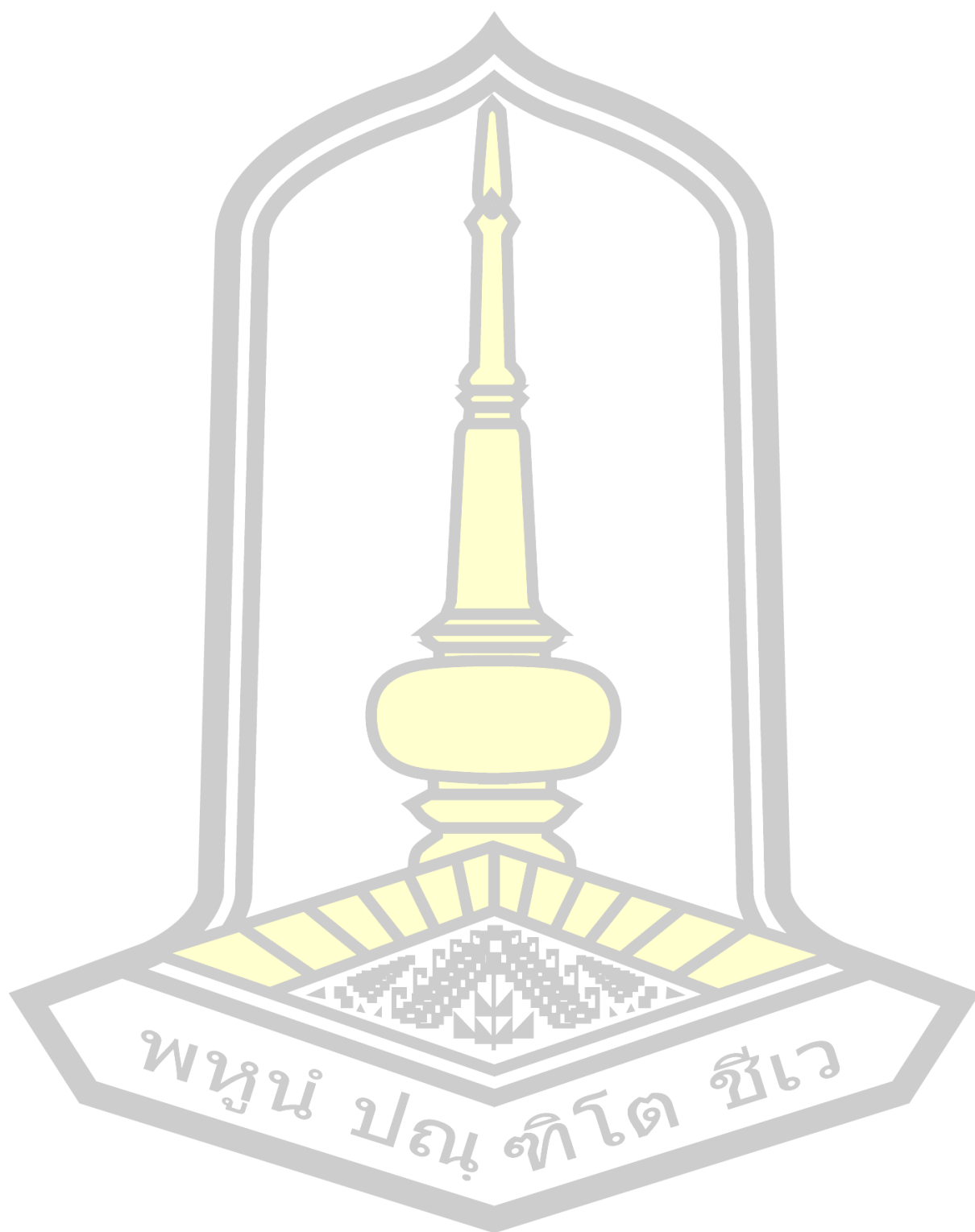
5.1.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประมาณค่ารังสีอาทิตย์ พบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น (DEV) โดยอาศัยสมการการลดทอนรังสีอาทิตย์จากบรรยากาศซึ่งประกอบไปด้วยไอน้ำในบรรยากาศ ปริมาณโอโซน โมเลกุลอากาศ ปริมาณฝุ่นละออง และก๊าซต่างๆ ปริมาณเมฆ ปริมาณฝุ่นละออง PM<sub>2.5</sub> ปริมาณฝุ่นละออง PM<sub>10</sub> สามารถใช้ประมาณค่ารังสีอาทิตย์รายเดือนได้แม่นยำสูงสุดเมื่อเทียบกับโปรแกรมสำเร็จรูปและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อื่นๆ โดยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น (DEV) เมื่อใช้ประมาณค่าปริมาณรังสีอาทิตย์รายเดือนของ จ.เชียงใหม่ มีค่า MAE, MSE, RMSE และ MAPE เท่ากับ 0.570, 0.459, 0.677 และ 3.454 ตามลำดับ จ.เชียงราย มีค่า MAE, MSE, RMSE และ MAPE เท่ากับ 0.923, 1.107, 1.052 และ 5.298 ตามลำดับ จ.แม่ฮ่องสอน มีค่า MAE, MSE, RMSE และ MAPE เท่ากับ 1.227, 1.987, 1.410 และ 7.141 ตามลำดับ จ.น่าน มีค่า MAE, MSE, RMSE และ MAPE เท่ากับ 0.811, 0.933, 0.966 และ 4.582 ตามลำดับ จ.แพร่ มีค่า MAE, MSE, RMSE และ MAPE เท่ากับ 0.797, 0.975, 0.987 และ 4.237 ตามลำดับ จ.ตาก มีค่า MAE, MSE, RMSE และ MAPE เท่ากับ 0.995, 1.555, 1.247 และ 6.228 ตามลำดับ จ.พิษณุโลก มีค่า MAE, MSE, RMSE และ MAPE เท่ากับ 0.492, 0.394, 0.628 และ 2.806 ตามลำดับ

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การใช้ฝุ่นละอองจากดินในห้องทดลองที่มีขนาดเล็กกว่า 32  $\mu\text{m}$  หรือใช้ฝุ่นละอองขนาด 2.5 และ 10  $\mu\text{m}$  อาจนำไปสู่ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงที่สำคัญต่อการสร้างสมการการลดลงของรังสีอาทิตย์ที่แม่นยำได้

5.2.2 ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการที่ผู้วิจัยนำเสนอค่อนข้างมีข้อจำกัดด้านข้อมูล เนื่องจากบางจังหวัดในประเทศไทยยังไม่มีข้อมูลปริมาณโอโซน ซึ่งต้องดำเนินการค้นหาปริมาณโอโซนจากเว็บไซต์ <https://avdc.gsfc.nasa.gov>

5.2.3 ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการที่ผู้วิจัยนำเสนอ หากใช้ข้อมูลรายวันในการสร้างแบบจำลองอาจจะส่งผลให้แบบจำลองมีความแม่นยำสูงขึ้น



## บรรณานุกรม

- [1] The International Energy Agency. "Impacts of COVID-19 pandemic on the global energy system." <https://www.iea.org/> (accessed.
- [2] M. Sati and M. Verma, "Fundamentals of energy: its potentials and achievements," Renewable Energy and Green Technology. CRC Press, pp. 1-12, 2021.
- [3] V. Chand, "Conservation of energy resources for sustainable development: A big issue and challenge for future," Environmental Concerns and Sustainable Development: Volume 1: Air, Water and Energy Resources, pp. 293-315, 2020.
- [4] K. K. Jaiswal et al., "Renewable and sustainable clean energy development and impact on social, economic, and environmental health," Energy Nexus, vol. 7, p. 100118, 2022.
- [5] Ministry of Energy, "Alternative Energy Development Plan 2018," 2018.
- [6] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, "Solar resource maps of Thailand," 2017.
- [7] Serm Janjai, Solar Radiation. 500: Silpakorn University: Department of Physics, 2017.
- [8] Serm Janjai, Solar Drying Technology. Silpakorn University: Department of Physics, 2017.
- [9] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. "Solar intensity." (accessed.
- [10] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. "Solar Radiation Potential Year 2017." (accessed.
- [11] W. A. Quality, "World Air Quality Report 2019," 2019. [Online]. Available: <https://www.greenpeace.org/static/planet4-thailand-stateless/2020/02/91ab34b8-2019-world-air-report.pdf>
- [12] R. C. V. Sheik Mujabar, "Empirical models for estimating the global solar radiation of Jubail Industrial City, the Kingdom of Saudi Arabia," SN Applied Sciences, 2021.

- [13] A. M. S. a. H. A. S. A. Samy A khalil, "Comparative and Evaluate of Empirical Models for Estimation Global Solar Radiation in Al-Baha, KSA," Earth Science & Climatic Change, 2018.
- [14] C. Ekici, "Total Global Solar Radiation Estimation Models and Applications: A review," International Journal of Innovative Technology and Interdisciplinary Sciences, 2019.
- [15] Serm janjai, "Global luminous efficacy models on vertical surfaces for general sky," Veridian E-journal Science and Technology Silpakorn University, vol. 5, no. 6, pp.: 37-Field: Physical Science, 2018.
- [16] C. Hero. "The Structure and Composition of the Sun."  
<https://www.coursehero.com/study-guides/astronomy/the-structure-and-composition-of-the-sun/> (accessed.
- [17] ชลธิศ อุไรฤกษ์กุล, Earth and Atmosphere System, 2562. [Online]. Available: <http://doh.hpc.go.th/data/air/atmoshereSystem.pdf>.
- [18] J. W. Films. "Solar Radiation Standards."  
[https://www.johnsonwindowfilms.com/dealer/articles/RB\\_SRstandards.html](https://www.johnsonwindowfilms.com/dealer/articles/RB_SRstandards.html) (accessed.
- [19] Joe Atkinson. "Earth's energy budget."  
<https://www.nasa.gov/feature/langley/what-is-earth-s-energy-budget-five-questions-with-a-guy-who-knows> (accessed.
- [20] K. D. Kanniah, J. Beringer, P. North, and L. Hutley, "Control of atmospheric particles on diffuse radiation and terrestrial plant productivity: A review," Progress in Physical Geography, vol. 36, no. 2, pp. 209-237, 2012.
- [21] iEnergyGuru. "Solar Radiation." (accessed.
- [22] W. Commons. "Heliografo."  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Heliografo.jpg> (accessed.
- [23] H. T. Sensors. "Pyranometers." <https://www.hukseflux.com/> (accessed.
- [24] ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ. "เครื่องมือตรวจอากาศผิวพื้น."  
<http://www.cmmet.tmd.go.th/instrument/instruments.php> (accessed.

- [25] Kuriositas. "The Campbell–Stokes Sunshine Recorder."  
<https://www.kuriositas.com/2011/02/campbellstokes-sunshine-recorder.html>  
 (accessed).
- [26] L. Buakhao and S. Janjai, "A study of optical properties of aerosols at Lopburi province by using a spectroradiometer modified for measuring spectral direct radiation," Silpakorn University, 2019.
- [27] มหาวิทยาลัยศิลปากร, "โครงการปรับปรุงแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์จากภาพถ่ายดาวเทียมสำหรับประเทศไทย ปี 2560," 2561. [Online]. Available: <http://e-lib.dede.go.th/mm-data/BibA11494.pdf>
- [28] กรมอนามัยและกรมควบคุมโรค, แนวทางการเฝ้าระวังพื้นที่เสี่ยงจากมลพิษทางอากาศ กรณีฝุ่นละอองขนาดเล็ก. โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด, 2558.
- [29] กรมควบคุมมลพิษ, คู่มือการตรวจวัดฝุ่นละอองในบรรยากาศ. 2546.
- [30] กรมควบคุมมลพิษ. "มลพิษอากาศ." <https://datacenter.deqp.go.th/knowledge/>  
 (accessed).
- [31] กรมควบคุมมลพิษ, "โครงการศึกษาแหล่งกำเนิดและแนวทางการจัดการฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอนในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล," 2561.
- [32] R. B. Urch, "Controlled Human Exposures to Concentrated Ambient Fine Particles and Ozone: Individual and Combined Effects on Cardiorespiratory Outcomes.," Doctor of Philosophy, Environment & Health, Centre for Environment, University of Toronto, 2010.
- [33] สำนักงานสิ่งแวดล้อมภาคที่ 12. "ฝุ่นละอองในบรรยากาศ."  
<http://www.mnre.go.th/attachment/iu/download.php> (accessed).
- [34] มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, "รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการติดตามตรวจสอบและเฝ้าระวังคุณภาพอากาศ (การประเมินสถานการณ์คุณภาพอากาศของประเทศไทย)," 2559. [Online]. Available: <http://www.oic.go.th/FILEWEB/CABINFOCENTER3/DRAWER056/GENERAL/DATA000/00000726.PDF>
- [35] Tasatec. "Ambient air monitor." (accessed).
- [36] กรมควบคุมมลพิษ, คู่มือการตรวจวัดมลพิษทางอากาศจากปล่องปล่อยทิ้งอากาศเสีย ฉบับที่ 2. บริษัท รีปรีน จำกัด, 2562.
- [37] A. q. a. n. m. bureau. "Air quality index." (accessed).

- [38] สุทิน ชนะบุญ, สถิติและการวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยเบื้องต้น. 2560.
- [39] วรวิทย์ จันทรสุวรรณ. "การวิเคราะห์การถดถอยและสหสัมพันธ์ด้วยโปรแกรม MS Excel." [https://web.rmutp.ac.th/woravith/?page\\_id=8206](https://web.rmutp.ac.th/woravith/?page_id=8206) (accessed.
- [40] ชลิตา ตระกูลสุนทร. "สหสัมพันธ์และการวิเคราะห์การถดถอย." <http://pws.npru.ac.th/chalida/data/files> (accessed.
- [41] J. Forjan. "Correlation." <https://analystprep.com/cfa-level-1-exam/quantitative-methods/correlation/> (accessed.
- [42] ชุศรี วงศ์รัตน์, เทคนิคการใช้สถิติเพื่อการวิจัย. ศูนย์หนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
- [43] Modupeola Alade. "Correlation, Regression and Probability." <https://medium.com/gitgirl/correlation-regression-and-probability-f4c40f94e062> (accessed.
- [44] เรียงชัย ต้นสุชาติ. "การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเดียว." [http://lms.mju.ac.th/courses/159/locker/Econometrics2/content\\_con/bfiles/2.htm](http://lms.mju.ac.th/courses/159/locker/Econometrics2/content_con/bfiles/2.htm) (accessed.
- [45] S. Mujabar and R. Chintaginjala Venkateswara, "Empirical models for estimating the global solar radiation of Jubail Industrial City, the Kingdom of Saudi Arabia," SN Applied Sciences, vol. 3, no. 1, p. 95, 2021/01/11 2021, doi: 10.1007/s42452-020-04043-9.
- [46] B. Benamrou, O. Mustapha, I. Allaouzi, and M. B. Ahmed, "Empirical models for estimating the global solar radiation based on air temperature and sunshine duration," presented at the Proceedings of the 3rd International Conference on Smart City Applications, Tetouan, Morocco, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3286606.3286856>.
- [47] N. Abdelhafidi, N. E. I. Bachari, and Z. Abdelhafidi, "Estimation of solar radiation using stepwise multiple linear regression with principal component analysis in Algeria," Meteorology and Atmospheric Physics, vol. 133, no. 2, pp. 205-216, 2021/04/01 2021, doi: 10.1007/s00703-020-00739-0.
- [48] H. Ahmed Kutty, M. H. Masral, and P. Rajendran, "Regression Model to Predict Global Solar Irradiance in Malaysia," International Journal of Photoenergy, vol. 2015, p. 347023, 2015/12/31 2015, doi: 10.1155/2015/347023.

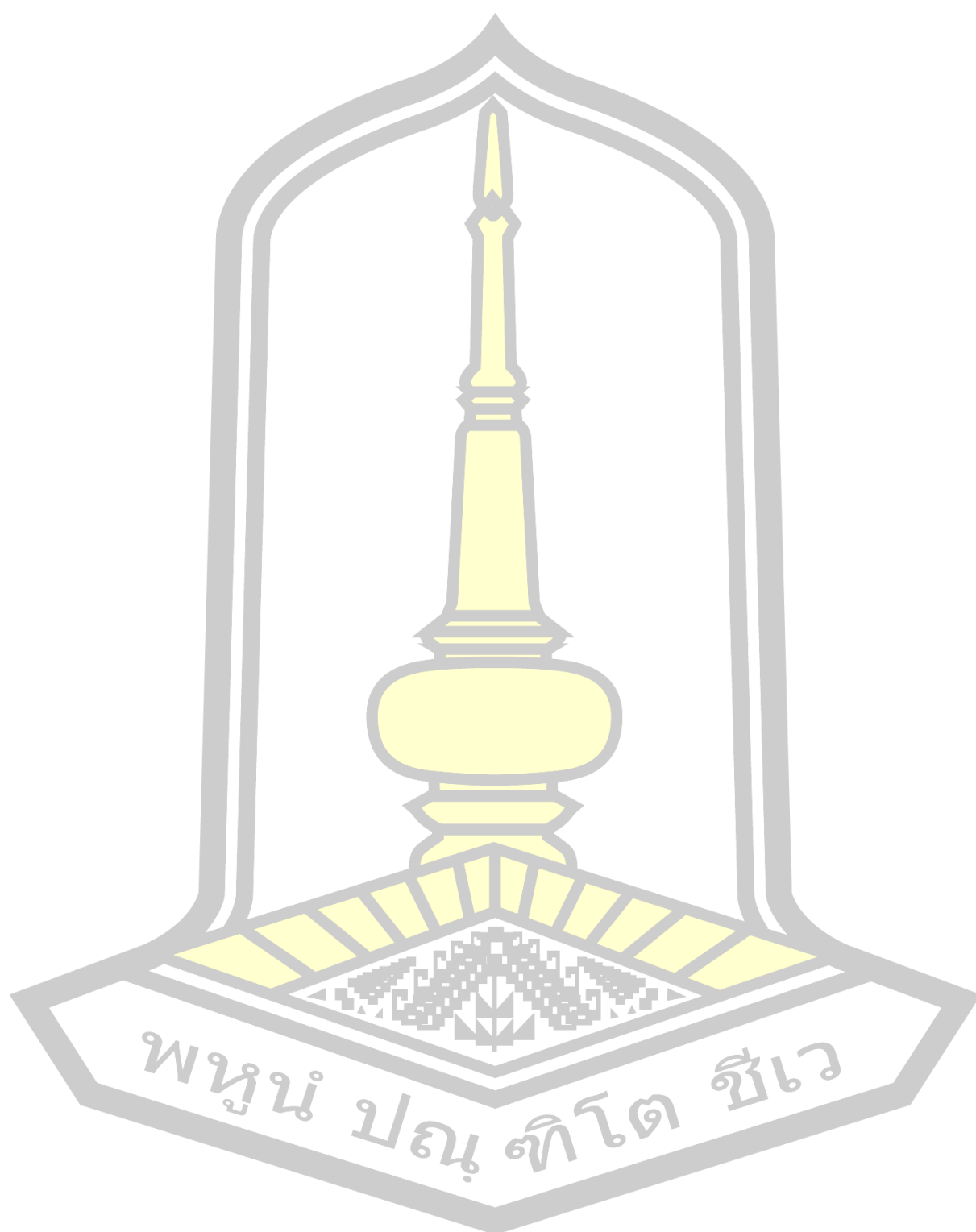
- [49] K. Gairaa and Y. Bakelli, "A Comparative Study of Some Regression Models to Estimate the Global Solar Radiation on a Horizontal Surface from Sunshine Duration and Meteorological Parameters for Ghardaïa Site, Algeria," *ISRN Renewable Energy*, vol. 2013, p. 754956, 2013/06/04 2013, doi: 10.1155/2013/754956.
- [50] S. G. Gouda, Z. Hussein, S. Luo, P. Wang, H. Cao, and Q. Yuan, "Empirical models for estimating global solar radiation in Wuhan City, China," *The European Physical Journal Plus*, vol. 133, no. 12, p. 517, 2018/12/17 2018, doi: 10.1140/epjp/i2018-12333-2.
- [51] H. A. Kazem, M. T. Chaichan, A. H. A. Al-Waeli, and K. Sopian, "Effect of dust and cleaning methods on mono and polycrystalline solar photovoltaic performance: An indoor experimental study," *Solar Energy*, vol. 236, pp. 626-643, 2022/04/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.03.009>.
- [52] H. Zitouni et al., "Experimental investigation of the soiling effect on the performance of monocrystalline photovoltaic systems," *Energy Procedia*, vol. 157, pp. 1011-1021, 2019/01/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.268>.
- [53] M. A. M. Ramli, E. Prasetyono, R. W. Wicaksana, N. A. Windarko, K. Sedraoui, and Y. A. Al-Turki, "On the investigation of photovoltaic output power reduction due to dust accumulation and weather conditions," *Renewable Energy*, vol. 99, pp. 836-844, 2016/12/01/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.063>.
- [54] I. Radonjić, T. Pavlović, D. Mirjanić, and L. Pantić, "Investigation of fly ash soiling effects on solar modules performances," *Solar Energy*, vol. 220, pp. 144-151, 2021/05/15/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.03.046>.
- [55] H. A. Kazem and M. T. Chaichan, "Experimental analysis of the effect of dust's physical properties on photovoltaic modules in Northern Oman," *Solar Energy*, vol. 139, pp. 68-80, 2016/12/01/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.09.019>.
- [56] ชาคกริต โขติอมรศักดิ์, ดวงนภา ลาภใหญ่, "ผลกระทบของละอองลอยจากการเผาชีวมวลต่อการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ และสภาพภูมิอากาศในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย : กรณีศึกษา ช่วงฤดูหมอกควันปี ค.ศ. 2013," *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, vol. 23, no. 3, pp. 1268-1283, 2019.

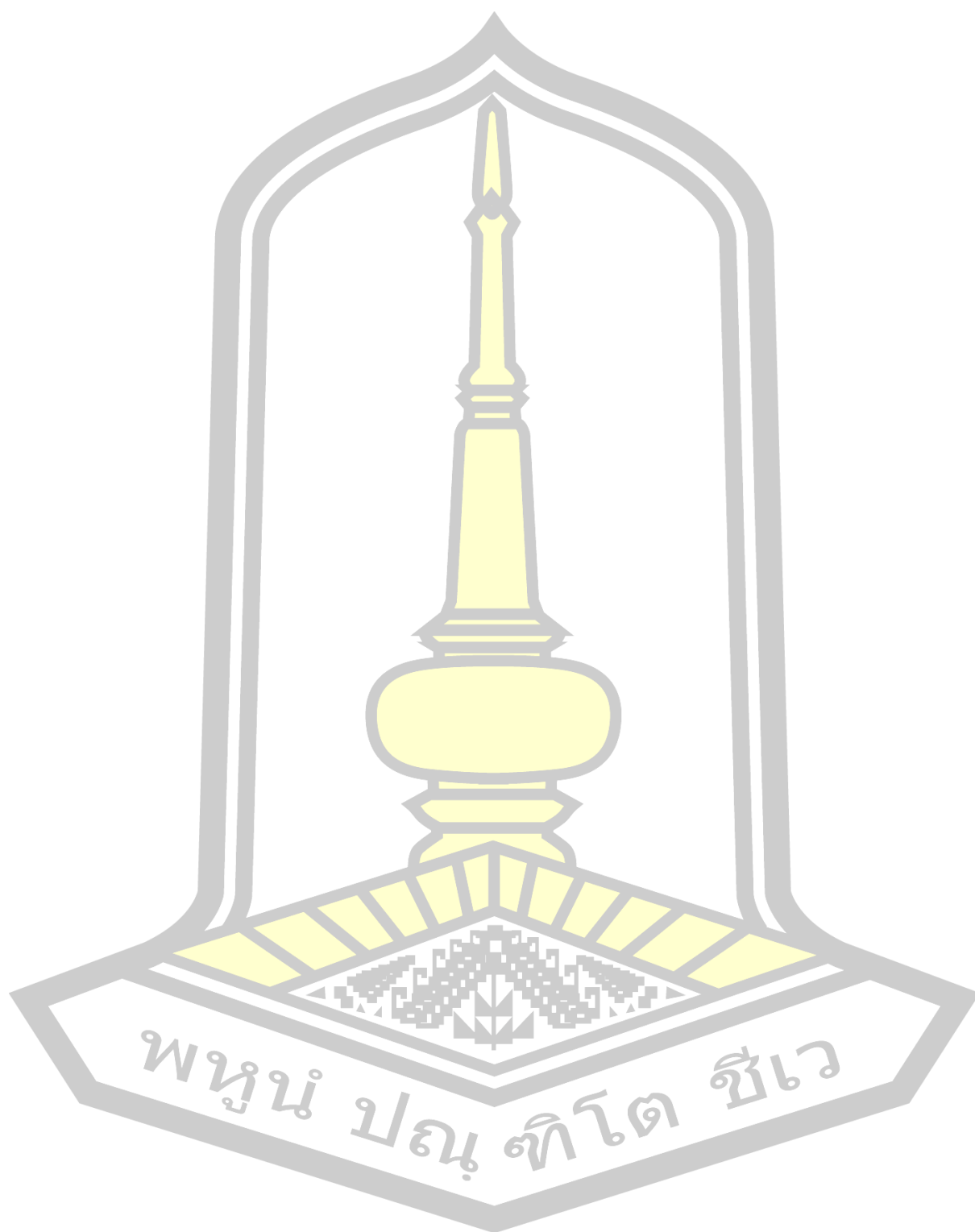
- [57] D. Jia, L. Yang, T. Lv, W. Liu, X. Gao, and J. Zhou, "Evaluation of machine learning models for predicting daily global and diffuse solar radiation under different weather/pollution conditions," *Renewable Energy*, vol. 187, pp. 896-906, 2022/03/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.002>.
- [58] M. H. Soulouknga, O. Coulibaly, S. Y. Doka, and T. C. Kofane, "Evaluation of global solar radiation from meteorological data in the Sahelian zone of Chad," *Renewables: Wind, Water, and Solar*, vol. 4, no. 1, p. 4, 2017/08/07 2017, doi: 10.1186/s40807-017-0041-0.
- [59] S. Park et al., "Estimation of ground-level particulate matter concentrations through the synergistic use of satellite observations and process-based models over South Korea," *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 19, no. 2, pp. 1097-1113, 2019, doi: 10.5194/acp-19-1097-2019.
- [60] C. Zhang, C. Shen, Q. Yang, S. Wei, G. Lv, and C. Sun, "An investigation on the attenuation effect of air pollution on regional solar radiation," *Renewable energy*, vol. 161, pp. 570-578, 2020.
- [61] L. Yang, X. Gao, Z. Li, and D. Jia, "Quantitative effects of air pollution on regional daily global and diffuse solar radiation under clear sky conditions," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 1935-1948, 2022/11/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.12.081>.
- [62] pamalyne. "Standard Sieves,Woven wire Sieve series ASTM E:11." <https://pamalyne.com/> (accessed).
- [63] A. Madhlopa, *Principles of solar gas turbines for electricity generation*. Springer, 2018.
- [64] S. Janjai, "A method for estimating direct normal solar irradiation from satellite data for a tropical environment," *Solar energy*, vol. 84, no. 9, pp. 1685-1695, 2010.
- [65] W. Chanalert, K. Tohsing, S. Janjai, and Y. Panjainam, "Mapping solar irradiation from ground-and satellite-based data over Thailand using a simple semi-empirical model," *Science, Engineering and Health Studies*, pp. 22020002-22020002, 2022.
- [66] W. KANCHANACHAT and S. Janjai, "A study of monthly average daily global solar radiation from measuring stations in Thailand," *Silpakorn University*, 2022.

- [67] P. LAIWARIN and S. Janjai, "A study of solar ultraviolet radiation under clear sky condition measured at stations situated in main regions of Thailand," Silpakorn University, 2020.
- [68] R. Wattan and S. Janjai, "An investigation of the performance of 14 models for estimating hourly diffuse irradiation on inclined surfaces at tropical sites," *Renewable Energy*, vol. 93, pp. 667-674, 2016.
- [69] P. Sakunkoo et al., "Human health risk assessment of PM<sub>2.5</sub>-bound heavy metal of anthropogenic sources in the Khon Kaen Province of Northeast Thailand," *Heliyon*, vol. 8, no. 6, 2022.
- [70] F. Hermayurisca, "The health impact assessment of particulate matter (PM 2.5) in Thailand," 2021.
- [71] S. Niampradit et al., "The elemental characteristics and human health risk of PM<sub>2.5</sub> during haze episode and non-haze episode in Chiang Rai province, Thailand," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19, no. 10, p. 6127, 2022.
- [72] M. Iqbal, *An introduction to solar radiation*. Elsevier, 2012.
- [73] A. Razzak, Z. Uddin, M. J. Iqbal, and K. Alam, "Calculation of urban solar radiation based on simulation and fitting of ASHRAE model constants," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 15, no. 5, p. 451, 2022.
- [74] J. Canada, J. Pinazo, and J. Bosca, "Determination of Angstrom's turbidity coefficient at Valencia," *Renewable energy*, vol. 3, no. 6-7, pp. 621-626, 1993.
- [75] E. Mächler, M. Osathanunkul, and F. Altermatt, "Shedding light on eDNA: neither natural levels of UV radiation nor the presence of a filter feeder affect eDNA-based detection of aquatic organisms," *PloS one*, vol. 13, no. 4, p. e0195529, 2018.
- [76] E. W. Helbling, V. Villafane, M. Ferrario, and O. Holm-Hansen, "Impact of natural ultraviolet radiation on rates of photosynthesis and on specific marine phytoplankton species," *Marine Ecology Progress Series*, pp. 89-100, 1992.
- [77] Y. Zhang, M. Sivakumar, S. Yang, K. Enever, and M. Ramezaniapour, "Application of solar energy in water treatment processes: A review," *Desalination*, vol. 428, pp. 116-145, 2018.

- [78] O. V. Ekechukwu and B. Norton, "Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology," *Energy conversion and management*, vol. 40, no. 6, pp. 615-655, 1999.
- [79] A. A. Lacis and J. Hansen, "A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere," *Journal of Atmospheric Sciences*, vol. 31, no. 1, pp. 118-133, 1974.
- [80] P. C. Mouli, S. V. Mohan, and S. J. Reddy, "A study on major inorganic ion composition of atmospheric aerosols at Tirupati," *Journal of hazardous materials*, vol. 96, no. 2-3, pp. 217-228, 2003.
- [81] R. Y. Abe, "Characterization of aerosol sources with potential post-emission particle-size transitions," 2015.
- [82] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*. John Wiley & Sons, 2013.
- [83] M. H. Soulouknga, A. Dandoussou, and N. Djongyang, "Empirical Models for the Evaluation of Global Solar Radiation for the Site of Abeche in the Province of Ouaddaï, in Chad," *Smart Grid and Renewable Energy*, vol. 13, no. 10, pp. 223-234, 2022.
- [84] The National Aeronautics and Space Administration.  
<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/> (accessed.
- [85] D. Mayer and D. Butler, "Statistical validation," *Ecological modelling*, vol. 68, no. 1-2, pp. 21-32, 1993.
- [86] J. C. Chang and S. R. Hanna, "Air quality model performance evaluation," *Meteorology and Atmospheric Physics*, vol. 87, no. 1-3, pp. 167-196, 2004.
- [87] C. J. Willmott and K. Matsuura, "Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance," *Climate research*, vol. 30, no. 1, pp. 79-82, 2005.
- [88] C. A. Gueymard, "A review of validation methodologies and statistical performance indicators for modeled solar radiation data: Towards a better bankability of solar projects," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 39, pp. 1024-1034, 2014.

- [89] T. Chai and R. R. Draxler, "Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?—Arguments against avoiding RMSE in the literature," *Geoscientific model development*, vol. 7, no. 3, pp. 1247-1250, 2014.
- [90] N. N. Prasad and J. N. Rao, "The estimation of the mean squared error of small-area estimators," *Journal of the American statistical association*, vol. 85, no. 409, pp. 163-171, 1990.
- [91] U. Khair, H. Fahmi, S. Al Hakim, and R. Rahim, "Forecasting error calculation with mean absolute deviation and mean absolute percentage error," in *Journal of physics: conference series*, 2017, vol. 930, no. 1: IOP Publishing, p. 012002.
- [92] A. De Myttenaere, B. Golden, B. Le Grand, and F. Rossi, "Mean absolute percentage error for regression models," *Neurocomputing*, vol. 192, pp. 38-48, 2016.
- [93] M. Iziomon and H. Mayer, "Assessment of some global solar radiation parameterizations," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 64, no. 15, pp. 1631-1643, 2002.
- [94] M. El-Metwally, "Sunshine and global solar radiation estimation at different sites in Egypt," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 67, no. 14, pp. 1331-1342, 2005.
- [95] V. Badescu, "Correlations to estimate monthly mean daily solar global irradiation: application to Romania," *Energy*, vol. 24, no. 10, pp. 883-893, 1999.
- [96] A. Bandyopadhyay, A. Bhadra, N. Raghuwanshi, and R. Singh, "Estimation of monthly solar radiation from measured air temperature extremes," *Agricultural and forest meteorology*, vol. 148, no. 11, pp. 1707-1718, 2008.
- [97] G. H. Hargreaves and Z. A. Samani, "Estimating potential evapotranspiration," *Journal of the irrigation and Drainage Division*, vol. 108, no. 3, pp. 225-230, 1982.
- [98] J. L. Chen and G. S. Li, "Estimation of monthly average daily solar radiation from measured meteorological data in Yangtze River Basin in China," *International journal of climatology*, vol. 33, no. 2, pp. 487-498, 2013.
- [99] A. El-Sebaei, A. Al-Ghamdi, F. Al-Hazmi, and A. S. Faidah, "Estimation of global solar radiation on horizontal surfaces in Jeddah, Saudi Arabia," *Energy Policy*, vol. 37, no. 9, pp. 3645-3649, 2009.





## ประวัติผู้เขียน

|                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ชื่อ                 | นายประกายแก้ว บุตรราช                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| วันเกิด              | 18 มีนาคม 2529                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| สถานที่เกิด          | จังหวัดมหาสารคาม                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| สถานที่อยู่ปัจจุบัน  | 718 หมู่ 5 ต.ธาตุนาเวง อ.เมือง จ.สกลนคร 47000                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| ตำแหน่งหน้าที่การงาน | วิศวกรไฟฟ้า ระดับปฏิบัติการ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| สถานที่ทำงานปัจจุบัน | มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร<br>680 ถ.นิตโย ต.ธาตุเชิงชุม อ.เมือง จ.สกลนคร 47000                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| ประวัติการศึกษา      | พ.ศ. 2547 ประกาศนียบัตรวิชาชีพ (ปวช.) สาขาไฟฟ้ากำลัง<br>วิทยาลัยเทคนิคมหาสารคาม<br>พ.ศ. 2549 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาไฟฟ้ากำลัง<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น<br>พ.ศ. 2552 วศ.บ. (วิศวกรรมไฟฟ้า)<br>มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น<br>พ.ศ. 2562 วศ.ม. (การจัดการวิศวกรรมและเทคโนโลยี)<br>มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดสกลนคร<br>พ.ศ. 2566 ประ.ด. (วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์)<br>มหาวิทยาลัยมหาสารคาม |

พูน ปณ จิต ชีวะ