



การศึกษารังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนจากสถานีวัดในประเทศไทย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษารังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนจากสถานีวัดในประเทศไทย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

A STUDY OF MONTHLY AVERAGE DAILY GLOBAL SOLAR RADIATION FROM
MEASURING STATIONS IN THAILAND



By

MR. Worapan KANCHANACHAT

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for Master of Science (PHYSICS)

Department of PHYSICS

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2021

Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ การศึกษารังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนจากสถานี
วัดในประเทศไทย
โดย วรพันธุ์ การชนะชาติ
สาขาวิชา ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)
พิจารณาเห็นชอบโดย
..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อิสระ มะศิริ)
..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.เสริม จันทร์ฉาย)
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรทิพย์ ไตะสิงห์)
..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(อาจารย์ ดร.ประนอมกร ชูศรี)

630720021 : พิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : แบบจำลองที่ใช้การเรียนรู้แบบเครื่องกล รังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือน

นาย วรพันธุ์ การชนะชาติ: การศึกษารังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนจากสถานีวัดในประเทศไทย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย

ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนมีความสำคัญในการนำมาใช้ออกแบบและประเมินประสิทธิภาพเทคโนโลยีที่ใช้เปลี่ยนรูปพลังงานจากดวงอาทิตย์ที่มีการใช้งานแบบระยะยาว ดังนั้น ในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยจึงได้รวบรวมข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนแบบระยะยาวจากเครือข่ายสถานีวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ 38 สถานีของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในระหว่างปี 2002 ถึง 2020 เพื่อนำมาศึกษาลักษณะสถิติจากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า ประเทศไทยมีศักยภาพด้านรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนค่อนข้างสูงโดยมีค่าประมาณ 18 เมกะจูลต่อตารางเมตร นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้พัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนด้วยแบบจำลองที่ใช้การเรียนรู้แบบเครื่องกลโดยใช้ข้อมูลการวัดภาคพื้นดินที่ 4 สถานีของมหาวิทยาลัยศิลปากรในภูมิภาคหลักของประเทศตั้งแต่ปี 2018-2020 เพื่อหาแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับกรณีพื้นที่ที่มีชุดข้อมูลอยู่อย่างจำกัด จากนั้นทำการทดสอบความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง พบว่า แบบจำลองถดถอยเชิงเส้นในตัวเองร่วมกับตัวแปรภายนอก (Autoregressive with exogenous input model, ARX) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพดีกว่าแบบจำลองอื่น ๆ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในรูปของรากที่สองของค่าเบี่ยงเบนกำลังสองเฉลี่ย (root mean square difference, RMSD) และค่าความเอนเอียงเฉลี่ย (mean bias difference, MBD) เท่ากับ 10.24% และ 3.83% ตามลำดับ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้นำแบบจำลอง ARX ไปคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ 38 สถานีทั่วประเทศ โดยพัฒนาจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมและข้อมูลอุตุนิยมิวิทยาเพื่อให้มีข้อมูลครอบคลุมทั้ง 38 สถานี ผลจากการทดสอบแบบจำลอง พบว่า ค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่คำนวณได้จากแบบจำลอง ARX และที่ได้จากเครือข่ายสถานีวัด 38 สถานีทั่วประเทศมีความสอดคล้องกันดีมากโดยมีค่าความคลาดเคลื่อนในรูป RMSD และ MBD เท่ากับ 6.10% และ -0.78% ตามลำดับ

630720021 : Major (PHYSICS)

Keyword : Machine learning model; Monthly average daily global solar radiation

MR. WORAPAN KANCHANACHAT : A STUDY OF MONTHLY AVERAGE DAILY GLOBAL SOLAR RADIATION FROM MEASURING STATIONS IN THAILAND THESIS ADVISOR : PROFESSOR DR. SERM JANJAI

Monthly average daily global solar radiation data are very important for designing and evaluating of the performance the solar energy technologies, which require long-term solar radiation data. Therefore, this study aims to carry out a statistical analysis of the monthly average daily global solar radiation collected at the solar radiation network consisting of 38 stations of The Department of Alternative Energy Development and Efficiency (DEDE) mostly over the period from 2002 to 2020. The statistical result shows that Thailand has a high monthly average daily global solar radiation potential, which is approximately 18 MJ/m^2 . In addition, to obtain a model that is suitable for using in the case of limited data, the machine learning models based on ground-based measurements at four stations of silpakorn university, located in main regions of Thailand over the period from 2018 to 2018 were developed. After that the validation of the model using the data in 2020 was performed. The results demonstrate that all models provide reason good comparison but the Autoregressive with exogenous input model (ARX) model delivers the best result with a discrepancy in terms of Root Mean Square Difference (RMSD) and Mean Bias Difference (MBD) of 10.24% and 3.83%, respectively. It showed that the ARX model can be used for short periods of training and testing data. Then, the ARX model based on satellite images and meteorological data was applied for calculating the monthly average daily global solar radiation of 38 stations period the year of 2020. Finally, the validation for 38 stations was performed and the results showed the good agreement between the calculation and the measurement with the RMSD and the MBD of 6.10% and -0.78%, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ศาสตราจารย์ ดร.เสริมจันทร์ฉาย อาจารย์ที่ปรึกษาหลักและผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรทิพย์ โต๊ะสิงห์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษา ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการวิจัย ซึ่งผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง และผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อิสระ มะศิริ อาจารย์ ดร.ประนมกร ชูศรี ที่ร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์และนักวิจัยห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากรที่ให้อภัยให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือ คำปรึกษา และคำแนะนำต่าง ๆ

สุดท้าย คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา ครูอาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน เพื่อตอบแทนบุญคุณที่ช่วยให้ผู้วิจัยบรรลุเป้าหมายในการศึกษาและประสบความสำเร็จ การศึกษาครั้งนี้

นาย วรพันธุ์ การชนะชาติ



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ดวงอาทิตย์.....	3
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างดวงอาทิตย์กับโลก	4
2.3 การบอกตำแหน่งปรากฏของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า	6
2.3.1 ระบบที่ใช้ระนาบในแนวระดับอ้างอิง.....	7
2.3.2 ระบบที่ใช้ระนาบศูนย์สูตรอ้างอิง	8
2.4 รังสีจากดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก	13
2.4.1 รังสีจากดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายชั่วโมง.....	13
2.4.2 รังสีจากดวงอาทิตย์นอกชั้นบรรยากาศโลกรายวัน	14
2.5 รังสีรวมจากดวงอาทิตย์เมื่อส่งผ่านมายังชั้นบรรยากาศโลก	16
2.6 การหาค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลก.....	19

2.6.1	วัดด้วยเครื่องวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์	19
2.6.2	การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	20
2.6.2.1	แบบจำลองเอมไพริคัล.....	21
2.6.2.2	แบบจำลองกึ่งเอมไพริคัล	21
2.6.2.3	แบบจำลองที่ใช้การเรียนรู้แบบเครื่องกล	22
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
บทที่ 3	การดำเนินการวิจัยและผล.....	31
3.1	ศึกษาลักษณะทางสถิติของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ของเครือข่ายสถานีวัด 38 สถานีของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน	31
3.1.1	การวัดและบันทึกข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์	31
3.1.2	ผลการศึกษาลักษณะทางสถิติของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือน.....	35
3.2	การพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ 4 สถานีในภูมิภาคหลักของมหาวิทยาลัยศิลปากร	74
3.2.1	รวบรวมข้อมูลจากการวัดภาคพื้นดิน	74
3.2.1.1	ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์	76
3.2.1.2	ข้อมูลปริมาณเมฆ.....	77
3.2.1.3	ข้อมูลปริมาณโอโซน ฝุ่นละออง และปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ.....	78
3.2.1.4	ข้อมูลรังสีจากดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก	79
3.2.2	การดำเนินการพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ 4 สถานีในภูมิภาคหลักของประเทศไทย.....	80
3.2.3	การทดสอบแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ 4 สถานีในภูมิภาคหลักของมหาวิทยาลัยศิลปากร	80
3.3	การพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของเครือข่ายสถานีวัด 38 สถานีของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน	86

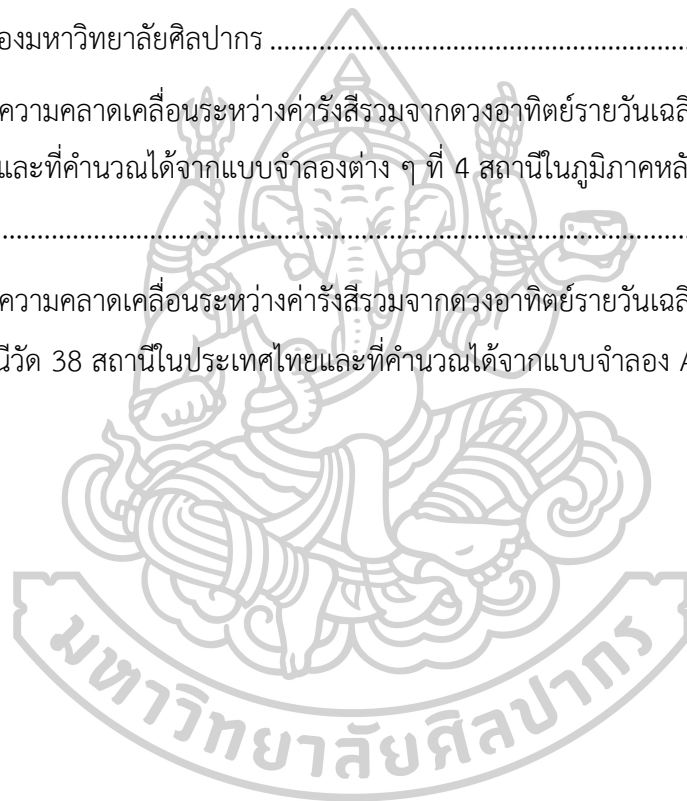
3.3.1 การรวบรวมข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียมและอุตุนิยมวิทยา.....	86
3.3.1.1 ข้อมูลเมฆจากภาพถ่ายดาวเทียม	86
3.3.1.2 ข้อมูลปริมาณโอโซนจากภาพถ่ายดาวเทียม.....	89
3.3.1.3 ข้อมูลปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูลอุตุนิยมวิทยา.....	90
3.3.1.4 ข้อมูลปริมาณฝุ่นละอองในบรรยากาศจากข้อมูลอุตุนิยมวิทยา	91
3.3.2 การดำเนินการพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่เครือข่ายสถานีวัด 38 สถานีของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน	91
3.3.3 การทดสอบแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ 38 สถานีของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน	92
บทที่ 4 สรุป.....	95
รายการอ้างอิง	98
ภาคผนวก.....	102
ประวัติผู้เขียน	140



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 รายชื่อและที่ตั้งเครือข่ายสถานีวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ในประเทศไทยจำนวน 38 สถานี	32
ตารางที่ 2 รูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองที่ใช้การเรียนรู้แบบเครื่องกล (machine learning models) ที่ใช้สำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ 4 สถานีในภูมิภาคหลักของมหาวิทยาลัยศิลปากร	82
ตารางที่ 3 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากการวัดภาคพื้นดินและที่คำนวณได้จากแบบจำลองต่าง ๆ ที่ 4 สถานีในภูมิภาคหลักของมหาวิทยาลัยศิลปากร	84
ตารางที่ 4 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากเครือข่ายสถานีวัด 38 สถานีในประเทศไทยและที่คำนวณได้จากแบบจำลอง ARX.....	92



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 รังสีจากดวงอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ	4
รูปที่ 2 วงโคจรรอบของโลกรอบดวงอาทิตย์	5
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่จริงและเคลื่อนที่ปรากฏของทรงกลมท้องฟ้า	6
รูปที่ 4 ลักษณะท้องฟ้าที่ผู้สังเกตเห็น	7
รูปที่ 5 การบอกตำแหน่งปรากฏของดวงอาทิตย์โดยใช้ระบบระนาบในแนวระดับอ้างอิง	7
รูปที่ 6 การบอกตำแหน่งปรากฏของดวงอาทิตย์โดยใช้ระบบระนาบศูนย์สูตรอ้างอิง	8
รูปที่ 7 สามเหลี่ยมดาราศาสตร์	11
รูปที่ 8 การขึ้น-ตกของดวงอาทิตย์	15
รูปที่ 9 การบอกปริมาณโอโซนรวมตลอดทั้งแนวตั้งในบรรยากาศ	17
รูปที่ 10 เครื่องวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์แบบเทอร์โมโพล์หรือไพราโนมิเตอร์แบบเทอร์โมโพล์	20
รูปที่ 11 โครงสร้างทั่วไปของโครงข่ายประสาทเทียม	23
รูปที่ 12 เครือข่ายสถานีวัดที่กระจายตามพื้นที่ต่าง ๆ ในประเทศไทย	32
รูปที่ 13 เครื่องวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ที่ผลิตโดยบริษัท Kipp & Zonen รุ่น CM 11	34
รูปที่ 14 เครื่องบันทึกสัญญาณศักย์ไฟฟ้าของบริษัท Yokogawa รุ่น DC100 (a) และรุ่น GM10 (b)	35
รูปที่ 15 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีเชียงราย	36
รูปที่ 16 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีแม่ฮ่องสอน	36
รูปที่ 17 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีเชียงใหม่ (สันทราย)	37
รูปที่ 18 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีน่าน	37
รูปที่ 19 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีเกษตรหลวงอินทนนท์	38

รูปที่ 20 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีแม่สะเรียง	38
รูปที่ 21 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีลำปาง	39
รูปที่ 22 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีแพร่.....	39
รูปที่ 23 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีตาก (ดอยมูเซอ)	40
รูปที่ 24 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีพิษณุโลก	40
รูปที่ 25 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีเพชรบูรณ์.....	41
รูปที่ 26 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีนครสวรรค์	41
รูปที่ 27 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีหนองคาย	42
รูปที่ 28 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีเลย	42
รูปที่ 29 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีนครพนม	43
รูปที่ 30 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีขอนแก่น	43
รูปที่ 31 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีอุบลราชธานี (สว่างวี ระวงศ์).....	44
รูปที่ 32 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีร้อยเอ็ด	44
รูปที่ 33 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีนครราชสีมา.....	45
รูปที่ 34 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีสุรินทร์	45
รูปที่ 35 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีลพบุรี	46
รูปที่ 36 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีกาญจนบุรี (ทองผา ภูมิ)	46
รูปที่ 37 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีกาญจนบุรี.....	47
รูปที่ 38 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีกรุงเทพมหานคร	47
รูปที่ 39 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีสระแก้ว (อรัญ ประเทศ).....	48
รูปที่ 40 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีปราจีนบุรี	48

รูปที่ 41 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีชลบุรี	49
รูปที่ 42 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีตราด	49
รูปที่ 43 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีประจวบคีรีขันธ์	50
รูปที่ 44 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีประจวบคีรีขันธ์ (หนองพลับ)	50
รูปที่ 45 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีชุมพร	51
รูปที่ 46 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีระนอง	51
รูปที่ 47 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีสุราษฎร์ธานี (เกาะสมุย).....	52
รูปที่ 48 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีสุราษฎร์ธานี (พุนพิน)	52
รูปที่ 49 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีภูเก็ต	53
รูปที่ 50 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีตรัง	53
รูปที่ 51 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีสงขลา (หาดใหญ่) ..	54
รูปที่ 52 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีนราธิวาส	54
รูปที่ 53 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีเชียงราย	55
รูปที่ 54 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีแม่ฮ่องสอน	56
รูปที่ 55 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีเชียงใหม่ (สันทราย).....	56
รูปที่ 56 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีน่าน.....	57
รูปที่ 57 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีเกษตรหลวงอินทนนท์	57
รูปที่ 58 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีแม่สะเรียง .	58
รูปที่ 59 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีลำปาง	58

รูปที่ 60 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีแพร่.....	59
รูปที่ 61 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีตาก (โดย มุเซอ).....	59
รูปที่ 62 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีพิษณุโลก ...	60
รูปที่ 63 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีเพชรบูรณ์ .	60
รูปที่ 64 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีนครสวรรค์	61
รูปที่ 65 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีหนองคาย..	61
รูปที่ 66 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีเลย.....	62
รูปที่ 67 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีนครพนม ...	62
รูปที่ 68 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีขอนแก่น ...	63
รูปที่ 69 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีอุบลราชธานี (สว่างวีระวงศ์).....	63
รูปที่ 70 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีร้อยเอ็ด	64
รูปที่ 71 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีนครราชสีมา	64
รูปที่ 72 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีสุรินทร์	65
รูปที่ 73 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีลพบุรี	65
รูปที่ 74 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีกาญจนบุรี (ทองผาภูมิ)	66
รูปที่ 75 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีกาญจนบุรี.	66
รูปที่ 76 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานี กรุงเทพมหานคร	67
รูปที่ 77 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีสระแก้ว (อรัญประเทศ).....	67
รูปที่ 78 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีปราจีนบุรี..	68

รูปที่ 79 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีชลบุรี	68
รูปที่ 80 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีตราด	69
รูปที่ 81 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานี ประจวบคีรีขันธ์	69
รูปที่ 82 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานี ประจวบคีรีขันธ์ (หนองพลับ)	70
รูปที่ 83 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีชุมพร	70
รูปที่ 84 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีระนอง	71
รูปที่ 85 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีสุราษฎร์ธานี (เกาะสมุย).....	71
รูปที่ 86 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีสุราษฎร์ธานี (พุนพิน).....	72
รูปที่ 87 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีภูเก็ต	72
รูปที่ 88 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีตรัง	73
รูปที่ 89 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีสงขลา (หาดใหญ่).....	73
รูปที่ 90 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีนราธิวาส...74	
รูปที่ 91 ตำแหน่งที่ตั้งของ 4 สถานีที่ตั้งหลักของแต่ละภูมิภาคในประเทศไทย	75
รูปที่ 92 เครื่องวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ที่ 4 สถานีในภูมิภาคหลักของประเทศไทย	76
รูปที่ 93 เครื่องถ่ายภาพท้องฟ้าที่ 4 สถานีในภูมิภาคหลักของประเทศไทย	77
รูปที่ 94 ตัวอย่างภาพถ่ายท้องฟ้าที่ได้จากเครื่องถ่ายภาพท้องฟ้า	78
รูปที่ 95 เครื่องเซ็นโพรโตมิเตอร์ที่ 4 สถานีในภูมิภาคหลักของประเทศไทย	79
รูปที่ 96 โครงสร้างของแบบจำลอง NARX สำหรับใช้ในการคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวัน เฉลี่ยต่อเดือนที่ 4 สถานีในภูมิภาคหลักของมหาวิทยาลัยศิลปากร	83

รูปที่ 97 โครงสร้างของแบบจำลอง ANN สำหรับใช้ในการคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวัน
เฉลี่ยต่อเดือนที่ 4 สถานีในภูมิภาคหลักของมหาวิทยาลัยศิลปากร84

รูปที่ 98 ดาวเทียมฮิมวาริ87

รูปที่ 99 ตัวอย่างภาพถ่ายดาวเทียมที่หาพิกัดตรงตามแผนที่ประเทศไทย87

รูปที่ 100 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนของเมฆ บรรยากาศ และพื้นผิวโลก กับ
ระดับความเทา88

รูปที่ 101 ดาวเทียมออร่า89



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

รังสีจากดวงอาทิตย์เมื่อเคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศลงมาตกกระทบที่พื้นผิวโลก ประกอบด้วย รังสีตรง (direct solar radiation) และรังสีกระจาย (diffuse solar radiation) ผลรวมของรังสีทั้งสองเรียกว่า รังสีรวม (global solar radiation) โดยส่วนใหญ่จะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงแสงสว่าง และรังสีอินฟราเรด (Yildiz, 2018) ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังสามารถนำมาใช้ทดแทนพลังงานจากทรัพยากรธรรมชาติที่มีแนวโน้มลดลงและกำลังจะหมดไปในอนาคต การนำรังสีรวมจากดวงอาทิตย์มาใช้ประโยชน์ต้องผ่านกระบวนการเปลี่ยนรูปพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีต่าง ๆ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์และเครื่องอบแห้งพืชผลทางการเกษตร เป็นต้น การออกแบบและประเมินสมรรถนะเทคโนโลยีดังกล่าวจำเป็นต้องทราบข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือน (Ozoegwu, 2019; Weiss et al., 2001) ในพื้นที่นั้น ๆ

วิธีการพื้นฐานในการได้มาซึ่งข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ที่นิยมกันโดยทั่วไป คือ การติดตั้งเครื่องวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์หรือเครื่องไพรานอมิเตอร์ (pyranometer) แต่เนื่องจากเครื่องวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์และอุปกรณ์บันทึกข้อมูลมีราคาค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงทำให้ไม่สามารถติดตั้งให้ครอบคลุมทุกพื้นที่ได้ ด้วยเหตุนี้นักวิจัยในหลายประเทศจึงพยายามนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ โดยแบบจำลองที่นักวิจัยนิยมนำมาคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือน ได้แก่ แบบจำลองแอมไพริคัล (empirical model) แบบจำลองกึ่งแอมไพริคัล (semi-empirical model) และแบบจำลองที่ใช้การเรียนรู้แบบเครื่องกล (machine learning model) (Inman et al., 2013; Janjai et al., 2011; Ozoegwu, 2019)

จากการศึกษา พบว่า แบบจำลองแอมไพริคัลเป็นแบบจำลองที่ใช้งานได้เฉพาะพื้นที่ (Badescu, 1999; Zabara, 1986) แบบจำลองกึ่งแอมไพริคัลเป็นแบบจำลองที่ค่อนข้างยุ่งยาก ซับซ้อนต่อการใช้งาน (Janjai et al., 2011) และแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเป็นแบบจำลองที่ต้องใช้ชุดข้อมูลในการเรียนรู้จำนวนมากเพื่อให้สามารถคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนได้อย่างแม่นยำ (Garza-Ulloa, 2018; Yadav & Chandel, 2015) แต่ในทางปฏิบัติหลาย ๆ พื้นที่มักพบปัญหาด้านเครื่องวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์เกิดเหตุขัดข้องเนื่องจากถูกติดตั้งอยู่กลางแจ้ง เป็นเวลานานทำให้ข้อมูลบางช่วงเวลาขาดหายไป ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง

เมื่อนำไปใช้งาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงจะทำการศึกษาลักษณะทางสถิติของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนจากข้อมูลการวัดภาคพื้นดินของเครือข่ายสถานีวัด 38 สถานีในประเทศไทยของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) และพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ 4 สถานีในภูมิภาคหลักของประเทศไทยจากสถานีวัดของมหาวิทยาลัยศิลปากรโดยใช้แบบจำลองที่ใช้การเรียนรู้แบบเครื่องกล จากนั้นนำแบบจำลองที่ดีที่สุดไปทดสอบกับข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่เครือข่ายสถานีวัด 38 สถานี ทั้งนี้เพื่อให้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเป็นกรณีศึกษาสำหรับพื้นที่ที่ต้องการคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนแต่มีชุดข้อมูลอยู่อย่างจำกัดและเป็นประโยชน์สำหรับการประยุกต์ใช้งานที่เกี่ยวข้องด้านรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาลักษณะทางสถิติของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนจากข้อมูลการวัดภาคพื้นดินของเครือข่ายสถานีวัด 38 สถานีของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน
- 2) เพื่อพัฒนาและทดสอบความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนในประเทศไทย

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาลักษณะทางสถิติของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนจากข้อมูลการวัดภาคพื้นดินของเครือข่ายสถานีวัด 38 สถานีในประเทศไทยและทำการพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนโดยใช้แบบจำลองที่ใช้การเรียนรู้แบบเครื่องกล

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การดำเนินงานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ ผู้วิจัยจำเป็นต้องมีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับรังสีจากดวงอาทิตย์ ดังนั้น ในบทนี้ผู้วิจัยจึงจะกล่าวถึง ทฤษฎีเกี่ยวกับรังสีจากดวงอาทิตย์ รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศ โดยอาศัยตำรา เรียนและบทความวิจัยจากฐานข้อมูลต่าง ๆ เพื่อนำความรู้ที่ได้ไปใช้เป็นแนวทางสำหรับการดำเนินงานวิจัย ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ สามารถเรียบเรียงได้ดังต่อไปนี้

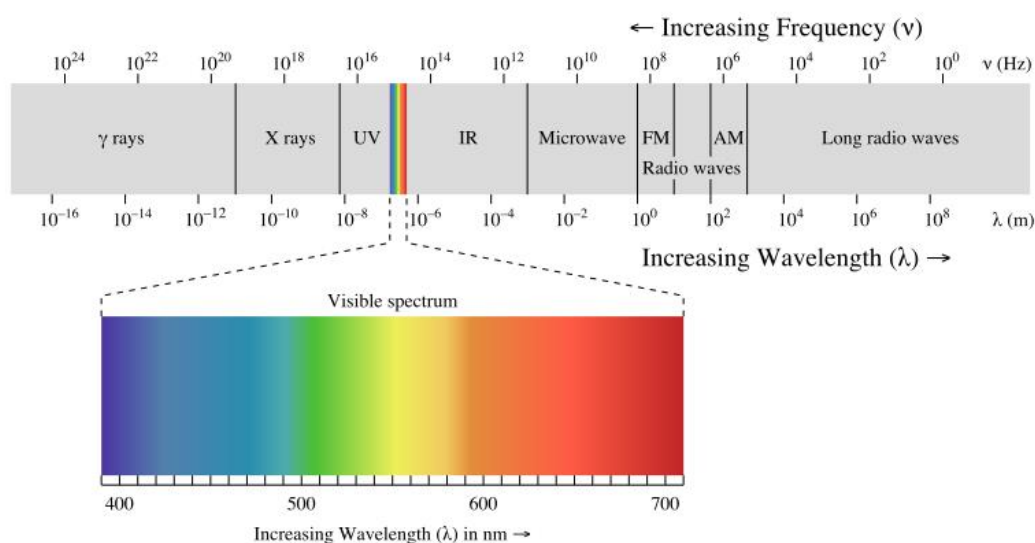
2.1 ดวงอาทิตย์

ในช่วงปลายทศวรรษที่ 1930 ฮานส์ เอ เบธ (Hans A. Beethe) และชาร์ล แอล คริตช์ฟิลด์ (Charles L. Critchfield) (Bethe & Critchfield, 1983) ได้เสนอแนวคิดว่าการกำเนิดพลังงานภายในดวงอาทิตย์เกิดจากการรวมตัวของกลุ่มก๊าซและฝุ่นที่เคลื่อนที่เข้าหากันด้วยแรงดึงดูด เมื่อเวลาผ่านไปมวลสารมากขึ้นแรงโน้มถ่วงระหว่างมวลสารจึงมากขึ้นตามกฎแรงโน้มถ่วงของนิวตัน (Newton's law of universal gravitation) มวลสารเมื่อถูกกดทับด้วยแรงโน้มถ่วงจะทำให้บริเวณใจกลางของมวลสารมีความดันและอุณหภูมิสูง เป็นผลให้อิเล็กตรอนของไฮโดรเจนซึ่งเป็นธาตุพื้นฐานที่มีมากที่สุดนอกภาพหลุดออกจากวงโคจรกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ ดังนั้น อะตอมของไฮโดรเจนจึงเหลือเพียงแค่นิวเคลียส โดยปกตินิวเคลียส 2 นิวเคลียสจะผลัดกันตามแรงคูลอมบ์ (Coulomb's force) เนื่องจากมีประจุบวกเหมือนกัน แต่ที่บริเวณใจกลางของดวงอาทิตย์มีความดันสูงทำให้นิวเคลียสทั้งสองอยู่ใกล้กันมากจนกระทั่งสามารถเอาชนะแรงคูลอมบ์และเกิดกระบวนการหลอมนิวเคลียสของไฮโดรเจนให้กลายเป็นฮีเลียม ซึ่งเรียกว่า ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน (nuclear fusion) ผลจากแรงโน้มถ่วงอันมหาศาลและอัตราการหมุนรอบตัวเองค่อนข้างช้าจึงทำให้อุณหภูมิมีลักษณะเป็นรูปทรงกลม โดยมีธาตุส่วนใหญ่เป็นไฮโดรเจน (91.2%) และฮีเลียม (8.7%) (Yildiz, 2018)

ระหว่างการเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน ดวงอาทิตย์จะปลดปล่อยพลังงานออกมาอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave) ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยเริ่มต้นเป็นรังสีความยาวคลื่นสั้นในช่วงรังสีแกมมา เมื่อรังสีแกมมาเคลื่อนที่มายังผิวของดวงอาทิตย์ ต้องใช้ระยะเวลาอันยาวนาน อีกทั้งยังเคลื่อนที่ไปชนกับอนุภาคอื่น ๆ จนพลังงานลดน้อยลง ทำให้อุณหภูมิ

แม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกจากผิวดวงอาทิตย์มีหลากหลายความยาวคลื่นตั้งแต่รังสีแกมมาจนถึงคลื่นวิทยุ ซึ่งโดยทั่วไปเรียกว่า รังสีจากดวงอาทิตย์หรือรังสีอาทิตย์ (solar radiation)

กลุ่มก๊าซนอกจากจะถือกำเนิดเป็นดวงอาทิตย์แล้วยังมีกลุ่มก๊าซบางส่วนแยกตัวออกไปจากจุดศูนย์กลางของกลุ่มก๊าซเดิม ถือกำเนิดเป็นดาวเคราะห์และดวงจันทร์ของดาวเคราะห์ ซึ่งมวลของดวงอาทิตย์คิดเป็น 98% ของมวลดาวเคราะห์บริวารทั้งหมด ดาวเคราะห์และดวงจันทร์ของดาวเคราะห์จึงโคจรรอบดวงอาทิตย์เกิดเป็นระบบสุริยะ

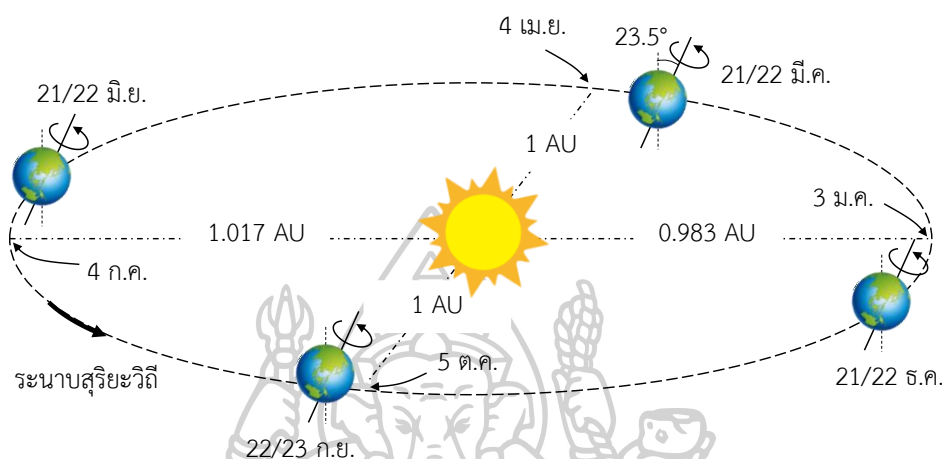


รูปที่ 1 รังสีจากดวงอาทิตย์ที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ

2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างดวงอาทิตย์กับโลก

โลกเป็นดาวเคราะห์ที่อยู่ห่างจากดวงอาทิตย์ลำดับที่ 3 ซึ่งเป็นดาวเคราะห์ดวงเดียวที่มีสิ่งมีชีวิตอาศัยอยู่ เนื่องจากมีชั้นบรรยากาศและระยะห่างจากดวงอาทิตย์ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต วงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์เป็นลักษณะวงรี (ellipse) ตามกฎของเคปเลอร์ (Kepler's laws) ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยมีดวงอาทิตย์อยู่ที่จุดโฟกัสหนึ่งของวงรี และมีระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 1 หน่วยดาราศาสตร์ (astronomical unit, AU) หรือ 1.495×10^{11} เมตร เมื่อมองจากบริเวณขั้วโลกเหนือจะเห็นการเคลื่อนที่ของโลกรอบดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ในทิศทวนเข็มนาฬิกาไปพร้อม ๆ กับหมุนรอบตัวเองจากทิศตะวันออกไปทิศตะวันตกและเอียงทำมุมตั้งฉากกับระนาบการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ที่เรียกว่า ระนาบสุริยวิถี (ecliptic plane) ผลจากการโคจร

ของโลกรอบดวงอาทิตย์เป็นวงรีทำให้ระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ในแต่ละวันเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา กล่าวคือ ถ้าโลกโคจรห่างจากดวงอาทิตย์ระยะน้อยที่สุดค่ารังสีจากดวงอาทิตย์จะสูงและถ้าโลกโคจรรอห่างเป็นระยะทางมากที่สุดค่ารังสีจากดวงอาทิตย์จะลดลง



รูปที่ 2 วงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ (Iqbal, 1983)

ดังนั้น การคำนวณรังสีจากดวงอาทิตย์ในช่วงเวลาต่าง ๆ จึงจำเป็นต้องทำการปรับแก้ค่าแฟคเตอร์สำหรับปรับแก้ผลจากการแปรค่าระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ (eccentricity correction factor) ของวันในรอบปี ซึ่งจะขึ้นอยู่กับกฎกำลังสองผกผัน (inverse square law) (Iqbal, 1983) ดังสมการ 2.1

$$E_0 = \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \quad (2.1)$$

เมื่อ E_0 คือ ค่าแฟคเตอร์สำหรับปรับแก้ผลจากการแปรค่าระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ (-)

r คือ ระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ (เมตร)

r_0 คือ ระยะทางเฉลี่ยระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ เท่ากับ 1.495×10^{11} (เมตร)

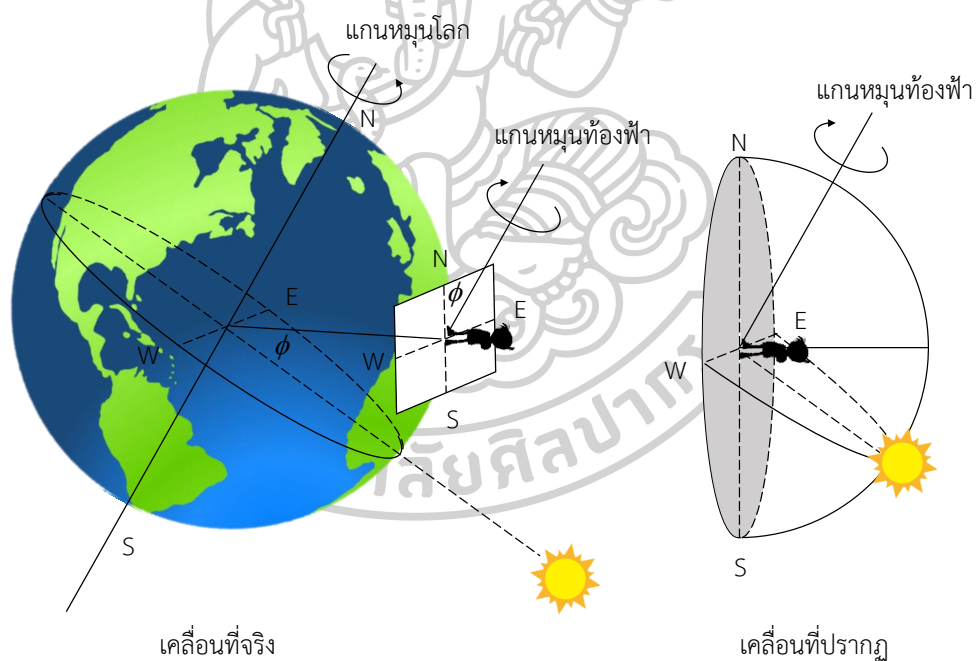
จากความรู้ทางดาราศาสตร์เราสามารถหาค่า r_0 และ r ได้ ดังนั้น เราจึงสามารถหาค่า E_0 ในแต่ละวันขณะโคจรรอบดวงอาทิตย์ได้ โดยอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์ที่เสนอโดยดักฟีและเบคแมน (Duffie & Beckman, 1991) ดังสมการ

$$E_0 = 1 + 0.033 \cos \left[\frac{2\pi d_n}{365} \right] \quad (2.2)$$

เมื่อ d_n คือ ลำดับของวันในรอบปี มีค่าอยู่ระหว่าง 1 (ในวันที่ 1 มกราคม) ถึง 365 (ในวันที่ 31 ธันวาคม)

2.3 การบอกตำแหน่งปรากฏของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า

แกนโลกหมุนจากทิศตะวันตกไปทิศตะวันออก ทำให้ผู้สังเกตที่อยู่บนโลกเห็นวัตถุบนท้องฟ้าเคลื่อนที่จากทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตก อีกทั้งวัตถุเหล่านั้นอยู่ห่างจากโลกมาก ๆ รวมถึงกระจกตาของมนุษย์เป็นลักษณะทรงกลมทำให้ได้รับแสงที่มาจากบรรยากาศทุกทิศทุกทาง ดังนั้น เราจึงเห็นท้องฟ้าเป็นครึ่งทรงกลม โดยมีวัตถุบนท้องฟ้าติดอยู่ที่ผิวครึ่งทรงกลม เรียกทรงกลมนี้ว่า ทรงกลมท้องฟ้า (celestial sphere)

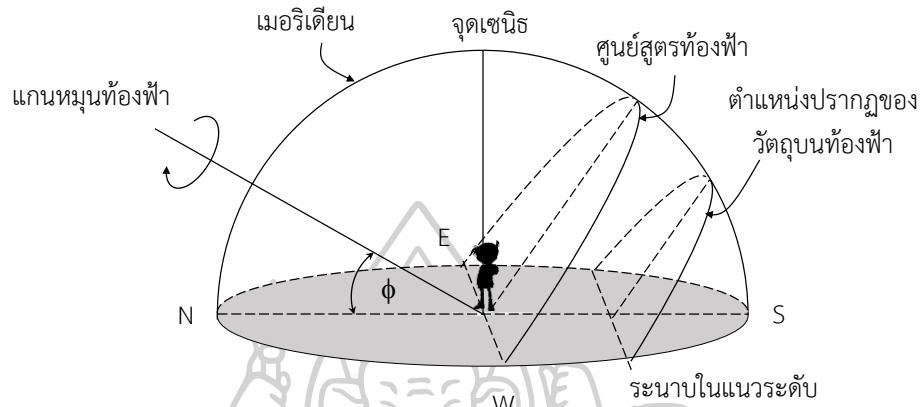


รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่จริงและเคลื่อนที่ปรากฏของทรงกลมท้องฟ้า

(เสริม จันทร์ฉาย, 2557)

ถ้าขยายเส้นศูนย์สูตรของโลกออกไปพบทรงกลมท้องฟ้า วงกลมใหญ่ที่ปรากฏบนทรงกลมท้องฟ้าเรียกว่า เส้นศูนย์สูตรท้องฟ้า (celestial equator) ถ้าให้ผู้สังเกตเป็นจุดศูนย์กลางของทรงกลมท้องฟ้า วงกลมใหญ่ที่อยู่รอบผู้สังเกตเรียกว่า เส้นขอบฟ้าหรือระนาบในแนวระดับ (horizon)

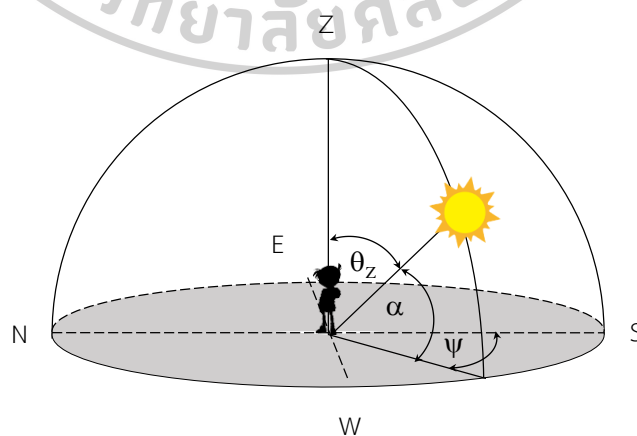
โดยแกนหมุนของทรงกลมท้องฟ้าจะทำมุมกับระนาบในแนวระดับเท่ากับละติจูด (ϕ) ของผู้สังเกต จุดที่อยู่ตรงศีรษะของผู้สังเกต เรียกว่า จุดเซนิธ (zenith) และเส้นที่ลากผ่านจากทิศเหนือผ่านจุดเซนิธ ไปยังทิศใต้ เรียกว่า เส้นเมริเดียน (meridian)



รูปที่ 4 ลักษณะท้องฟ้าที่ผู้สังเกตเห็น (เสริม จันทร์ฉาย, 2557)

การบอกตำแหน่งปรากฏของวัตถุหรือดวงอาทิตย์บนท้องฟ้าสามารถบอกได้ 2 ระบบ ได้แก่ ระบบที่ใช้ระนาบในแนวระดับอ้างอิง (horizontal system) และระบบที่ใช้ระนาบศูนย์สูตรอ้างอิง (equatorial system)

2.3.1 ระบบที่ใช้ระนาบในแนวระดับอ้างอิง หรือระบบอาซิมุท-อัลติจูด เป็นระบบที่ใช้บอกตำแหน่งปรากฏของดวงอาทิตย์โดยใช้มุม 2 มุม ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การบอกตำแหน่งปรากฏของดวงอาทิตย์โดยใช้ระบบระนาบในแนวระดับอ้างอิง (เสริม จันทร์ฉาย, 2557)

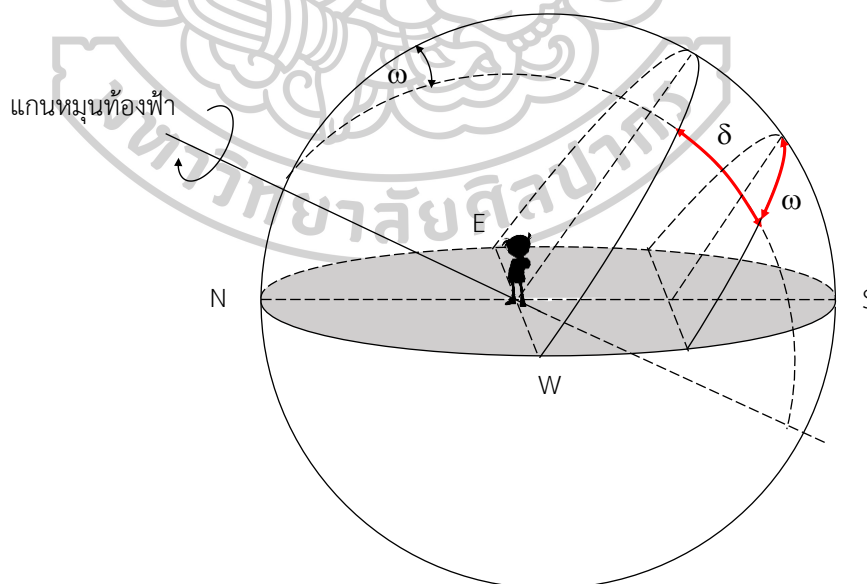
1) มุมอาซิมุท (azimuth, ψ) เป็นมุมที่วัดจากทิศใต้ไปยังเงาบนระนาบในแนวระดับที่เชื่อมระหว่างผู้สังเกตกับดวงอาทิตย์ โดยกำหนดว่า ถ้าเงาดังกล่าวอยู่ด้านตะวันออกมุมอาซิมุทมีค่าเป็นบวกและด้านทิศตะวันตกมีค่าเป็นลบ ดังนั้น $-180 < \psi < 180$ องศา

2) มุมอัลติจูด (altitude, α) เป็นมุมเงย ณ ตำแหน่งเส้นตรงที่เชื่อมต่อระหว่างผู้สังเกตกับดวงอาทิตย์ มีค่าจาก 0 ถึง 90 องศา สำหรับมุมที่อยู่ระหว่างผู้สังเกตกับดวงอาทิตย์เรียกว่า มุมเซนิธ (zenith angle, θ_z) ซึ่งสามารถใช้บอกตำแหน่งดวงอาทิตย์ได้เช่นกัน โดยที่

$$\theta_z = 90^\circ - \alpha \quad (2.3)$$

การบอกตำแหน่งปรากฏของดวงอาทิตย์โดยใช้ระบบอาซิมุท-อัลติจูด มีข้อดี คือ เข้าใจง่าย แต่มีข้อเสีย คือ ค่ามุมทั้งสองจะเปลี่ยนแปลงทุกเวลาตั้งแต่ดวงอาทิตย์ขึ้นจนตก อีกทั้งยังเปลี่ยนแปลงตามวันในรอบปี ถ้าผู้สังเกตอยู่ที่ตำแหน่งละติจูดต่างกันจะสังเกตเห็นดวงอาทิตย์ในขณะเวลาเดียวกัน มีค่ามุมอาซิมุทและมุมอัลติจูดแตกต่างกัน

2.3.2 ระบบที่ใช้ระนาบศูนย์สูตรอ้างอิง เป็นระบบที่ใช้มุมหรือส่วนโค้งของทรงกลมท้องฟ้าเป็นตัวบอกตำแหน่งปรากฏของดวงอาทิตย์ ดังนี้



รูปที่ 6 การบอกตำแหน่งปรากฏของดวงอาทิตย์โดยใช้ระบบระนาบศูนย์สูตรอ้างอิง (เสริม จันทร์ฉาย, 2557)

1) มุมเดคลิเนชัน (declination angle, δ) เป็นผลจากการเอียงของแกนหมุนของโลก หาได้จากระยะเชิงมุมทางเหนือหรือใต้ศูนย์สูตรท้องฟ้า ขึ้นหรือลงไปตามเส้นแนวตำแหน่งปรากฏของดวงอาทิตย์ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง +23.5 ถึง -23.5 องศา ในรอบ 1 ปี โดยวันที่ 21 มิถุนายน ซึ่งเป็นวันที่ซีกโลกเหนือหันเข้าหาดวงอาทิตย์มากที่สุดจะมีค่ามุมเดคลิเนชันเท่ากับ 23.5 องศา วันที่ 21 มีนาคม และ 22 กันยายน จะมีค่ามุมเดคลิเนชันเท่ากับ 0 องศา และวันที่ 21 ธันวาคม ซึ่งเป็นวันที่ซีกโลกเหนือหันออกจากดวงอาทิตย์มากที่สุดจะมีค่ามุมเดคลิเนชันเท่ากับ -23.5 องศา ถือว่ามีค่าคงที่ในแต่ละวันและมีค่าเปลี่ยนแปลงตามวันในรอบปี การเปลี่ยนแปลงนี้ ดัฟฟีและเบคแมน (Duffie & Beckman, 1991) ได้แสดงความสัมพันธ์เป็นสมการทางคณิตศาสตร์ ดังสมการที่ 2.4

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (d_n + 284) \right] \quad (2.4)$$

เมื่อ δ คือ มุมเดคลิเนชัน (องศา)
 d_n คือ ลำดับของวันในรอบปี มีค่าอยู่ระหว่าง 1 (ในวันที่ 1 มกราคม) ถึง 365 (ในวันที่ 31 ธันวาคม)

2) มุมชั่วโมง (hour angle, ω) เป็นมุมที่ใช้บอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้าในช่วงเวลาต่าง ๆ โดยวัดจากเส้นเมริเดียนไปจนถึงวงกลมที่ผ่านตำแหน่งของดวงอาทิตย์ดังแสดงในรูปที่ 6 มีค่าเป็นบวกเมื่อดวงอาทิตย์อยู่ทางทิศตะวันออกของเมริเดียนและเป็นลบเมื่ออยู่ทางทิศตะวันตกของเมริเดียน เนื่องจากการหมุนรอบตัวเองของโลก 1 รอบ (360 องศา) ใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง หรือเคลื่อนที่ 1 องศาใช้เวลา 4 นาที ดังนั้น มุมชั่วโมงจึงมีค่าอยู่ระหว่าง -180 ถึง 180 องศา ซึ่งมีค่าเป็นลบในช่วงเวลาก่อนเที่ยงวันและมีค่าเป็นบวกในช่วงเวลาหลังเที่ยงวัน (Iqbal, 1983) ดังสมการที่ 2.5

$$\omega = 15(12 - ST) \quad (2.5)$$

เมื่อ ω คือ มุมชั่วโมงของดวงอาทิตย์ (องศา)
 ST คือ เวลาที่ใช้ดวงอาทิตย์เป็นเกณฑ์ (ชั่วโมง)

สำหรับเวลาดวงอาทิตย์ (solar time, ST) เป็นเวลาที่ใช้ดวงอาทิตย์เป็นเกณฑ์ แต่เนื่องจากช่วงเวลาที่ผู้สังเกตบนโลกเห็นดวงอาทิตย์ใน 1 วันมีความยาวนานของวันไม่เท่ากัน ดังนั้น การใช้เวลาของดวงอาทิตย์จึงไม่สะดวกในการเปรียบเทียบเหตุการณ์ต่าง ๆ นักวิทยาศาสตร์จึงได้มีการกำหนดเวลาที่สม่ำเสมอขึ้น โดยนำเวลาของดวงอาทิตย์ในวันที่ 1 มกราคม ปี ค.ศ. 1900 มาแบ่งเป็น 86,400 ส่วน เรียก 1 ส่วนว่า 1 วินาที เรียกเวลานี้ว่า เวลาดวงอาทิตย์เฉลี่ย (solar mean time) และเนื่องจากประเทศส่วนใหญ่ตกอยู่ภายใต้อำณานิคมของประเทศอังกฤษ จึงได้มีการกำหนดเวลาดวงอาทิตย์เฉลี่ย ณ เมืองกรีนิช ประเทศอังกฤษ เป็นเวลาสากลหรือเวลากรีนิช (Greenwich mean time, GMT) และแบ่งให้เวลาในแต่ละประเทศเป็นเขต ๆ เทียบกับเวลากรีนิช โดยในแต่ละเขตจะมีเส้นลองจิจูดมาตรฐาน (standard longitude, L_s) เส้นลองจิจูดนี้จะห่างจากกรีนิชเป็นเวลาจำนวนเท่าของ 15 องศา เช่น เส้นลองจิจูดมาตรฐานของประเทศไทยเท่ากับ 105 องศา (15×7) นั่นคือ เวลาของประเทศไทยจะเร็วกว่าเวลาของกรีนิช 7 ชั่วโมง (GMT+7) เวลาในแต่ละเขตมีชื่อเรียกโดยทั่วไปว่า เวลามาตรฐานท้องถิ่น (local standard time, LST) ซึ่งเป็นเวลาที่อ่านได้จากนาฬิกา (clock time) เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ ST กับ LST (Iqbal, 1983) ได้ดังนี้

$$ST = LST + 4(L_s - L_{loc}) + E_t \quad (2.6)$$

เมื่อ LST คือ เวลามาตรฐานท้องถิ่นหรือเวลาที่อ่านได้จากนาฬิกา (ชั่วโมง:นาที)
 L_s คือ เส้นลองจิจูดมาตรฐาน (องศา)
 L_{loc} คือ ลองจิจูดของตำแหน่งที่ต้องการคำนวณ (องศา)
 E_t คือ สมการเวลา (นาที)

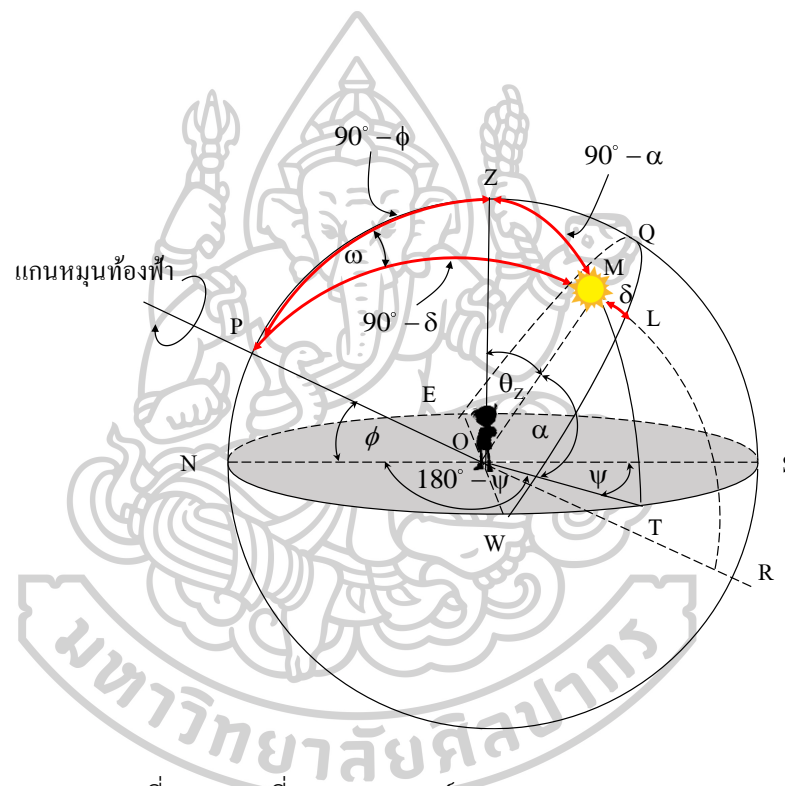
ค่า $4(L_s - L_{loc})$ มีหน่วยเป็น นาที และค่าของ L_s และ L_{loc} จะมีค่าเป็นลบเมื่อตำแหน่งที่ต้องการคำนวณอยู่ทางตะวันออกของกรีนิชและเป็นบวกเมื่ออยู่ทางตะวันตกของกรีนิช สำหรับค่า E_t นั้นสามารถคำนวณหาได้จากสมการเวลา (equation of time) (Iqbal, 1983) ดังนี้

$$E_t = 229.18(0.000075 + 0.001868\cos\Gamma - 0.032077\sin\Gamma - 0.014615\cos 2\Gamma - 0.04089\sin 2\Gamma) \quad (2.7)$$

เมื่อ Γ คือ มุมวัน (เรเดียน) ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.8

$$\Gamma = \frac{2\pi(d_n - 1)}{365} \quad (2.8)$$

เนื่องจากงานด้านรังสีจากดวงอาทิตย์ส่วนใหญ่มักนิยมบอกตำแหน่งปรากฏของดวงอาทิตย์โดยใช้มุมเซนนิธ ซึ่งมุมเซนนิธมีความสัมพันธ์กับมุมอัลติจูด ($\theta_z = 90^\circ - \alpha$) จากที่กล่าวข้างต้นว่า การบอกตำแหน่งปรากฏของดวงอาทิตย์โดยใช้มุมอัลติจูดนั้นมีข้อเสียถ้าผู้สังเกตอยู่ตำแหน่งละติจูดแตกต่างกัน แต่ระบบศูนย์สูตรนั้นมีสูตรคำนวณที่แน่นอน เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างระบบอาซิมุท-อัลติจูดและระบบศูนย์สูตรโดยใช้สามเหลี่ยมดาราศาสตร์ (astronomical triangle) ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 7 สามเหลี่ยมดาราศาสตร์ (Chauvenet, 1960)

จากรูปที่ 7 สามเหลี่ยม PZM เป็นสามเหลี่ยมบนผิวทรงกลมท้องฟ้า โดยมีด้านทั้งสามเป็นส่วนหนึ่งของทรงกลมท้องฟ้าที่มีจุดศูนย์กลาง O ร่วมกัน เนื่องจากส่วนโค้ง PL มีขนาดเชิงมุม 90° และ $LM = \delta$ ดังนั้น $PM = 90^\circ - \delta$ ทำนองเดียวกันส่วนโค้ง TZ มีขนาดเชิงมุม 90° และส่วนโค้ง $TM = \alpha$ ดังนั้น $ZM = 90^\circ - \alpha$ เราสามารถใช้วิธีเดียวกันพิสูจน์ได้ว่าส่วนโค้ง $PM = 90^\circ - \phi$ รวมถึงระนาบ ZON กับระนาบ ZOT ทำมุมกันเท่ากับ $180^\circ - \psi$ ดังนั้น มุม $PZM = 180^\circ - \psi$

จากความสัมพันธ์ระหว่างมุมกับด้านของสามเหลี่ยม PZM สามารถแสดงความสัมพันธ์ตามกฎของโคไซน์ (law of cosines) ได้ดังนี้

$$\cos ZM = \cos PZ \cos PM + \sin PZ \sin PM \cos MPZ \quad (2.9)$$

แทนค่ามุมและด้านต่าง ๆ

$$\cos(90^\circ - \alpha) = \cos(90^\circ - \phi) \cos(90^\circ - \delta) + \sin(90^\circ - \phi) \sin(90^\circ - \delta) \cos \omega \quad (2.10)$$

จากเอกลักษณ์ตรีโกณมิติและ $\theta_z = 90^\circ - \alpha$ จะได้

$$\cos \theta_z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (2.11)$$

หรือ

$$\sin \alpha = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (2.12)$$

ในการคำนวณหาสูตรสำหรับคำนวณ ψ เราจะเริ่มพิจารณาความสัมพันธ์ของมุมและด้านของสามเหลี่ยม PZM อีกครั้งหนึ่ง แต่จะใช้กฎของไซน์ (law of sines) ซึ่งเขียนได้ดังนี้

$$\frac{\sin PZM}{\sin PM} = \frac{\sin \omega}{\sin(90^\circ - \alpha)} \quad (2.13)$$

แทนค่ามุมและด้านต่าง ๆ ในสมการที่ 2.13 จะได้

$$\frac{\sin(180^\circ - \psi)}{\sin(90^\circ - \delta)} = \frac{\sin PZM}{\sin MZ} \quad (2.14)$$

หรือ

$$\frac{\sin \psi}{\cos \delta} = \frac{\sin \omega}{\cos \alpha}$$

จัดสมการใหม่ จะได้

$$\sin \psi = \frac{\sin \omega \cos \delta}{\cos \alpha} \quad (2.15)$$

จะได้

$$\psi = \sin^{-1} \left[\frac{\sin \omega \cos \delta}{\cos \alpha} \right] \quad (2.16)$$

2.4 รังสีจากดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก

รังสีจากดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (extraterrestrial solar radiation) เป็นตัวแปรสำคัญในการคำนวณพลังงานที่ดวงอาทิตย์แผ่ออกมาทั้งหมด รวมถึงพลังงานรังสีที่ผ่านชั้นบรรยากาศลงมายังพื้นผิวโลก โดยทั่วไปเรียกค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ทุกความยาวคลื่นที่ตกกระทบตั้งฉากกับพื้นที่ 1 หน่วยในขณะเวลาหนึ่งที่ส่วนบนของชั้นบรรยากาศโลก (top of atmosphere, TOA) ว่า ค่าคงที่รังสีจากดวงอาทิตย์ (solar constant, I_{sc}) จากข้อมูลการวัดโดยใช้ดาวเทียม พบว่า ค่าคงที่รังสีจากดวงอาทิตย์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,366.1 วัตต์ต่อตารางเมตร (เสริม จันทร์ฉาย, 2557)

2.4.1 รังสีจากดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายชั่วโมง

ค่ารังสีจากดวงอาทิตย์รายชั่วโมงนอกบรรยากาศโลกบนระนาบในแนวระดับจะขึ้นกับระยะห่างระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ (Iqbal, 1983) ดังสมการที่ 2.17

$$I_0 = I_{sc} E_0 \cos \theta_z \quad (2.17)$$

เมื่อ I_0 คือ ค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ที่ขณะเวลาหนึ่งนอกบรรยากาศโลก (วัตต์ต่อตารางเมตร)

I_{sc} คือ ค่าคงที่รังสีจากดวงอาทิตย์ (วัตต์ต่อตารางเมตร)

กรณีที่เราต้องการหาค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ dI_0 ที่ตกกระทบในช่วงเวลา dt เราสามารถเขียนสมการที่ 2.17 ใหม่ในรูปสมการ

$$dI_0 = I_{sc} E_0 \cos \theta_z dt \quad (2.18)$$

จากสมการที่ 2.18 จะพบว่า $\cos \theta_z$ มีหน่วยเป็น เรเดียน ซึ่งไม่สามารถทำการหาอนุพันธ์ได้เนื่องจาก dt มีหน่วยเป็น เวลา ดังนั้นเราต้องแปลง dt ให้อยู่ในรูปที่มีหน่วยเป็น เรเดียน โดยอาศัยความสัมพันธ์ที่ว่า เมื่อโลกรอบตัวเองครบ 1 รอบจะใช้เวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งวงกลม 1 รอบ มีค่า 2π เรเดียน หรือเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{2\pi}{24}$$

$$dt = \left(\frac{12}{\pi} \right) d\omega$$

แทน dt และ $\cos \theta_z$ จากสมการที่ 2.11 ลงในสมการ 2.18 จะได้

$$dI_0 = I_{sc} E_0 (\sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos\omega) \left(\frac{12}{\pi}\right) d\omega$$

ค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ที่ระยะเวลาหนึ่งนอกบรรยากาศโลกจะหาได้โดยการอินทิเกรต dt ในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง ดังสมการ

$$\int dI_0 = \left(\frac{12}{\pi}\right) I_{sc} E_0 \int_{\omega_1 - \frac{\pi}{24}}^{\omega_1 + \frac{\pi}{24}} (\sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos\omega) d\omega$$

ผลจากการอินทิเกรตจะได้

$$I_0 = \left(\frac{12}{\pi}\right) I_{sc} E_0 \left[\sin\phi \sin\delta + \left(\frac{24}{\pi}\right) \sin\left(\frac{\pi}{24}\right) \cos\phi \cos\delta \cos\omega_1 \right]$$

พิจารณา $\left(\frac{24}{\pi}\right) \sin\left(\frac{\pi}{24}\right) = 0.9972$ หรือประมาณ 1 ดังนั้น

$$I_0 = \left(\frac{12}{\pi}\right) I_{sc} E_0 [\sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos\omega_1] \quad (2.19)$$

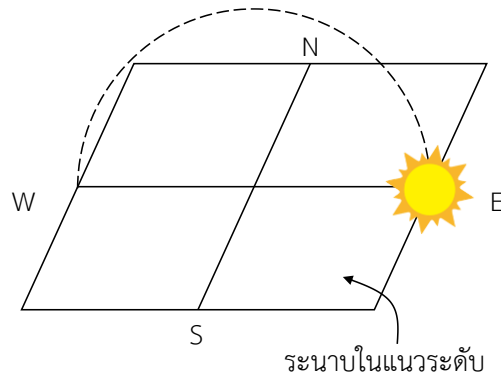
เมื่อ ω_1 คือ มุมชั่วโมงที่กึ่งกลางชั่วโมง (องศา)

2.4.2 รังสีจากดวงอาทิตย์นอกชั้นบรรยากาศโลกรายวัน

เมื่อต้องการทราบค่ารังสีจากดวงอาทิตย์รายวัน สามารถทำได้โดยรวมหรืออินทิเกรต รังสีจากดวงอาทิตย์รายชั่วโมงตั้งแต่ชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ขึ้น (sunrise, ω_{sr}) ถึงชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตก (sunset, ω_{ss}) (Iqbal, 1983)

$$\int_{\omega_{sr}}^{\omega_{ss}} dI_0 = \left(\frac{12}{\pi}\right) I_{sc} E_0 \int_{\omega_{sr}}^{\omega_{ss}} (\sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos\omega) d\omega$$

เนื่องจากการขึ้นของดวงอาทิตย์ในช่วงเช้าจะสมมาตรกับช่วงเย็น ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 การขึ้น-ตกของดวงอาทิตย์

ดังนั้น มุมชั่วโมงที่ตำแหน่งสมมาตรจึงเท่ากับ $2\omega_{sr}$ หรือ $2\omega_{ss}$

$$\begin{aligned} H_0 &= \left(\frac{12}{\pi}\right) I_{sc} E_0 2 \int_0^{\omega_{ss}} (\sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \cos\omega) d\omega \\ &= \left(\frac{24}{\pi}\right) I_{sc} E_0 \omega_{ss} (\sin\delta \sin\phi + \cos\delta \cos\phi \sin\omega_{ss}) \end{aligned}$$

ถ้าต้องการแปลงหน่วยเรเดียนเป็น องศา ทำได้โดยคูณแฟคเตอร์ $\frac{\pi}{180}$ จะได้

$$H_0 = \frac{24}{\pi} I_{sc} E_0 \left[\frac{\pi}{180} \omega_{ss} (\sin\delta \sin\phi + \cos\delta \cos\phi \sin\omega_{ss})\right] \quad (2.20)$$

เมื่อ H_0 คือ รังสีจากดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันบนระนาบในแนวระดับ (จุลต่อตารางเมตรต่อวัน)

I_{sc} คือ ค่าคงที่รังสีจากดวงอาทิตย์ (จุลต่อตารางเมตร)

ω_{ss} คือ มุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตก (องศา)

มุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ขึ้นหรือตกสามารถคำนวณหาได้โดยใช้สมการที่ 2.12 โดยแทนค่ามุมอัลติจูดของดวงอาทิตย์เป็น 0 องศา จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \sin(0) &= \sin\delta \sin\phi + \cos\delta \cos\phi \cos\omega_{ss} \\ \omega_{ss} &= \cos^{-1}(-\tan\delta \tan\phi) \end{aligned} \quad (2.21)$$

เมื่อนำมุมชั่วโมงที่ตำแหน่งสมมาตร $2\omega_{ss}$ หารด้วยอัตราการเดินทางที่ของดวงอาทิตย์ (15 องศาต่อชั่วโมง) จะได้สมการสำหรับคำนวณช่วงเวลาของดวงอาทิตย์ที่อยู่เหนือระนาบในแนวระดับหรือความยาวนานของวัน (Iqbal, 1983) ดังนี้

$$S_0 = \frac{2}{15} |\cos^{-1}(-\tan \delta \tan \phi)| \quad (2.22)$$

เมื่อ S_0 คือ ความยาวนานของวัน (ชั่วโมง)

สำหรับค่ารังสีจากดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (\bar{H}_0) คือ

$$\bar{H}_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_{0i} \quad (2.23)$$

เมื่อ \bar{H}_0 คือ ค่ารังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (จุดต่อตารางเมตรต่อวัน)

N คือ จำนวนวันที่ในเดือนที่ต้องการคำนวณ (-)

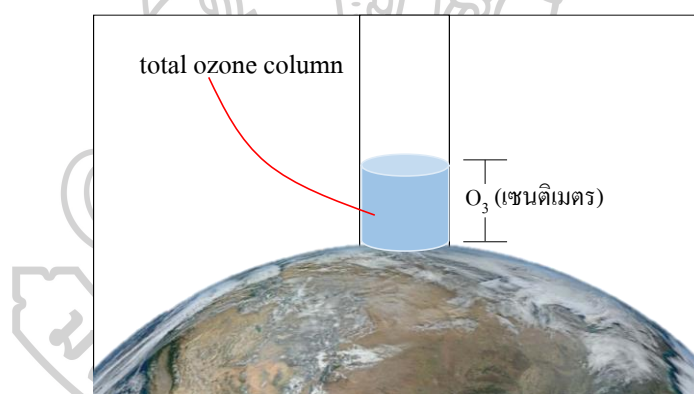
2.5 รังสีรวมจากดวงอาทิตย์เมื่อส่งผ่านมายังชั้นบรรยากาศโลก

พลังงานที่แผ่ออกมาจากดวงอาทิตย์ประกอบด้วย พลังงานที่อยู่ในรูปอนุภาคและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งอนุภาคส่วนใหญ่ไม่สามารถเคลื่อนที่ลงมายังพื้นผิวโลกได้ เนื่องจากถูกสนามแม่เหล็กโลกกักไว้ด้วยแรงลอเรนซ์ (Olga & Norma, 2018) ทำให้อนุภาคเกิดการเคลื่อนที่ตามกฎมือขวาแบบเกลียวกลมตามเส้นแรงแม่เหล็กและเกิดการสะท้อนกลับไปกลับมา จนอนุภาคบางส่วนหลุดออกจากสนามแม่เหล็กโลก บางส่วนเข้ามาภายในโลกที่ขั้วแม่เหล็กเกิดการชนกับโมเลกุลอากาศเกิดเป็นแสงเหนือ-แสงใต้ หรือ ออโรรา (Aurora)

หลังจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือรังสีจากดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศลงมาถึงพื้นผิวโลกจะถูกลดทอน (extinction) โดยตัวแปรทางบรรยากาศ เช่น โอโซน ฝุ่นละออง ไอน้ำ เมฆ และก๊าซต่าง ๆ เกิดเป็นรังสีกระจาย ส่วนรังสีจากดวงอาทิตย์ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางเรียกว่า รังสีตรง ผลรวมของรังสีทั้งสองเรียกว่า รังสีรวม (Notton, 2017) รายละเอียดตัวแปรทางบรรยากาศต่าง ๆ ที่มีผลในการลดทอนรังสีจากดวงอาทิตย์มีดังนี้

1) การลดทอนรังสีจากดวงอาทิตย์เนื่องจากโอโซน

โอโซน (ozone) เป็นก๊าซในบรรยากาศชนิดหนึ่งที่ประกอบด้วยอะตอมของออกซิเจน 3 อะตอม มีสูตรโมเลกุลเป็น O_3 ซึ่งส่วนใหญ่มีกระบวนการเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ อาทิ เช่น เกิดจากรังสีจากดวงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ตและปรากฏการณ์ฟ้าผ่า ดังนั้น โอโซนจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญในการดูดกลืนรังสีจากดวงอาทิตย์ในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ต โอโซนส่วนมากจะกระจายตัวอย่างหนาแน่นประมาณ 85-90% อยู่ในชั้นบรรยากาศที่ช่วงระดับความสูงประมาณ 20 จนถึง 30 กิโลเมตรจากพื้นผิวโลก โดยทั่วไปการบอกผลของปริมาณโอโซนที่มีผลต่อการลดทอนรังสีจากดวงอาทิตย์มักนิยมบอกในรูปความหนาของโอโซนรวมตลอดทั้งแนวตั้งในบรรยากาศ (total ozone column) โดยสมมติว่านำโอโซนรวมตลอดแนวตั้งมารวมกันที่ผิวโลกที่บริเวณ 15 องศาเซลเซียสและที่ความกดอากาศ 1 บรรยากาศ แล้ววัดความสูงเป็นหน่วยเซนติเมตร หรือหน่วยด็อบสัน (Dobson, DU) ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 การบอกปริมาณโอโซนรวมตลอดทั้งแนวตั้งในบรรยากาศ (เสริม จันทร์ฉาย, 2557)

การตรวจวัดปริมาณโอโซนในบรรยากาศสามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น การตรวจวัดบนภาคพื้นดินด้วยเครื่องซันโฟโตมิเตอร์ (sunphotometer) หรือการตรวจวัดโดยใช้ดาวเทียม เช่น ดาวเทียมออรา (AURA) ขององค์การนาซา (NASA) เป็นต้น

2) การลดทอนรังสีจากดวงอาทิตย์เนื่องจากเมฆ

เมฆ (clouds) เกิดจากการควบแน่นของไอน้ำที่ระเหยจากแหล่งน้ำบนพื้นผิวโลก เคลื่อนที่ผ่านชั้นความสูงเหนือระดับควบแน่นพบกับมวลอากาศเย็นในบรรยากาศ กลายเป็นละอองน้ำ (water droplet) หรืออาจเป็นเกล็ดน้ำแข็ง (ice crystal) ขนาดเล็กเกาะกลุ่มรวมกัน โดยมีฝุ่นเป็น

แกนกลาง เมฆเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ส่งผ่านชั้นบรรยากาศลงมาตกกระทบบนพื้นผิวโลกกล่าวคือ ถ้าปริมาณเมฆปกคลุมทั่วท้องฟ้าจะทำให้ค่ารังสีจากดวงอาทิตย์มีค่าน้อย ในทางกลับกันถ้าท้องฟ้าไม่มีเมฆค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์จะมีค่าสูง การบอกปริมาณของเมฆสามารถบอกได้ในรูปของปริมาณเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้า (clouds cover) ซึ่งสามารถตรวจวัดโดยใช้สายตาของเจ้าหน้าที่อุตุนิยมวิทยา การตรวจวัดด้วยเครื่องถ่ายภาพท้องฟ้า (sky view) การตรวจวัดด้วยเรดาร์และดาวเทียมต่าง ๆ

3) การลดทอนรังสีจากดวงอาทิตย์เนื่องจากฝุ่นละออง

ฝุ่นละออง (aerosols) เป็นอนุภาคของแข็งหรือของเหลวที่แขวนลอยอยู่ในชั้นบรรยากาศ มีกระบวนการเกิดทั้งจากธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ ฝุ่นละอองที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ได้แก่ ฝุ่นละอองที่มาจากเปลือกโลก (crustal aerosol) และฝุ่นละอองที่มีแหล่งกำเนิดมาจากทะเล (maritime aerosol) สำหรับฝุ่นละอองที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ส่วนใหญ่มีแหล่งกำเนิดมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงของโรงงานอุตสาหกรรมและยานพาหนะต่าง ๆ ฝุ่นละอองมีผลต่อรังสีจากดวงอาทิตย์ เนื่องจากเป็นตัวลดทอนรังสีตรงและเป็นตัวเพิ่มรังสีกระจาย การตรวจวัดปริมาณฝุ่นละอองในบรรยากาศ สามารถทำได้หลายแบบ เช่น ใช้เครื่องชั้นโฟโตมิเตอร์ ซึ่งเป็นเครื่องวัดที่วัดฝุ่นละอองในรูปของค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง (aerosol optical depth, AOD) หรือคำนวณจากค่าทัศนวิสัย (visibility) หรือค่าระยะทางที่ไกลที่สุดซึ่งสามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า

4) การลดทอนรังสีจากดวงอาทิตย์เนื่องจากไอน้ำและก๊าซต่าง ๆ

ไอน้ำในบรรยากาศ (precipitable water) หมายถึง น้ำที่อยู่ในสถานะก๊าซซึ่งแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างโมเลกุลของก๊าซอื่น ๆ ในชั้นบรรยากาศ โดยส่วนใหญ่ไอน้ำจะกระจายตัวตามระบบนิเวศต่าง ๆ ทั้งพื้นดิน บรรยากาศ และเหนือพื้นมหาสมุทร ที่ระดับความสูงระหว่าง 2 กิโลเมตรเหนือพื้นผิวโลก ไอน้ำมีคุณสมบัติในการดูดกลืนและคายพลังงานรังสีจากดวงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นรังสีความร้อนหรือรังสีอินฟราเรด เพื่อให้อุณหภูมิพื้นผิวโลกไม่ร้อนหรือหนาวเกินไป ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศสามารถบอกได้เช่นเดียวกับปริมาณโอโซนในบรรยากาศ โดยสมมติให้ไอน้ำตลอดทั้งแนวตั้งในบรรยากาศควบแน่นกลายเป็นน้ำที่พื้นผิวโลกและวัดความสูงของน้ำในหน่วยเซนติเมตร นอกจากนี้ในชั้นบรรยากาศยังมีก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) และไนโตรเจนออกไซด์ (NO_2) ที่มีส่วนช่วยในการลดทอนรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ให้ลดน้อยลงได้อีกด้วย

รังสีจากดวงอาทิตย์เมื่อถูกลดทอนโดยตัวแปรทางบรรยากาศและลงมาตกกระทบบนพื้นผิวโลก โดยส่วนใหญ่จะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงแสงสว่าง (38%) และรังสีอินฟราเรด (53%) (Yildiz, 2018) จากกฎการศึกษาการแผ่รังสีของพลังค์ (Planck's law) ดังสมการ

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.24)$$

เมื่อ	E	คือ	พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (จูล)
	h	คือ	ค่าคงที่ของพลังค์ มีค่าเท่ากับ 6.625×10^{-34} (จูลวินาที)
	c	คือ	ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ 2.99×10^8 (เมตรต่อวินาที)
	λ	คือ	ความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (เมตร)

ความสัมพันธ์ของสมการ 2.24 แสดงให้เห็นว่า พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแปรผกผันกับความยาวคลื่น ดังนั้น รังสีจากดวงอาทิตย์ที่ส่งผ่านมายังพื้นผิวโลกส่วนใหญ่จึงไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม โดยพลังงานรังสีจากดวงอาทิตย์ที่เคลื่อนที่มาตกกระทบต่อพื้นที่ต่อหน่วยเวลา เรียกว่า ความเข้มรังสีจากดวงอาทิตย์ (irradiance) ในหน่วย วัตต์ต่อตารางเมตร และเรียกผลรวมของพลังงานรังสีจากดวงอาทิตย์ที่เคลื่อนที่มาตกกระทบต่อพื้นที่ต่อหน่วยเวลา เรียกว่า ค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ (irradiation) มีหน่วยเป็น จูลต่อตารางเมตร

2.6 การหาค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลก

ค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์ที่ส่งผ่านชั้นบรรยากาศลงมาตกกระทบที่พื้นผิวโลกจะมีค่าเปลี่ยนแปลงขึ้นกับมุมตกกระทบและตัวแปรทางบรรยากาศต่าง ๆ (Notton, 2017) ทำให้รังสีรวมจากดวงอาทิตย์ในแต่ละพื้นที่มีค่าที่แตกต่างกัน วิธีการพื้นฐานในการได้มาซึ่งรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ที่นิยมกันโดยทั่วไปมีวิธีการ ดังนี้

2.6.1 วัดด้วยเครื่องวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์

เครื่องวัดที่นิยมใช้ในการตรวจวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์พื้นที่ต่าง ๆ ที่นิยมในปัจจุบันคือ เครื่องวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์แบบเทอร์โมไพล์หรือไพราโนมิเตอร์แบบเทอร์โมไพล์ (thermopile pyranometer) ดังแสดงในรูปที่ 10 ซึ่งเป็นเครื่องวัดที่เปลี่ยนพลังงานรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยตัวรับแสงที่เป็นโลหะ 2 ชนิดเชื่อมกันแบบอนุกรมที่

เรียกว่า เทอร์โมไพล์ (thermopile) เมื่อรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ตกกระทบที่โลหะด้านหนึ่งจะเกิดความร้อนทำให้พลังงานของอิเล็กตรอนในโลหะสูงกว่าอีกด้านหนึ่ง จากนั้นระบบจะพยายามปรับเข้าสู่สมดุลโดยอิเล็กตรอนจะแพร่จากด้านที่มีพลังงานสูงไปยังด้านที่มีพลังงานต่ำกว่าจึงเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้น โดยตัวรับแสงดังกล่าวถูกบรรจุอยู่ในโดมแก้วที่มีหน้าที่ป้องกันตัวรับแสงจากฝนและฝุ่นใต้โดมแก้วจะมีจานกลมสีขาวที่มีหน้าที่ป้องกันรังสีที่สะท้อนจากพื้นดิน



รูปที่ 10 เครื่องวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์แบบเทอร์โมไพล์หรือไพราโนมิเตอร์แบบเทอร์โมไพล์

ข้อดีของเครื่องวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์แบบเทอร์โมไพล์ คือ ตอบสนองรังสีจากดวงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่น 0.3 ถึง 3.0 ไมโครเมตร ซึ่งจะครอบคลุมในช่วงความยาวคลื่นยาวที่ใช้งานทั่วไป และข้อมูลที่ได้มีความแม่นยำ แต่มีข้อเสีย คือ ข้อมูลจะไม่ครอบคลุมทุกพื้นที่และมีราคาค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง

2.6.2 การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) เป็นการนำความสัมพันธ์ของระบบที่ศึกษามาแสดงให้อยู่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ จากนั้นนำรูปแบบสมการที่ได้ไปคำนวณหรือพยากรณ์ระบบในช่วงเวลาที่สนใจ จากการศึกษาพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นักวิจัยในหลาย ๆ ประเทศทั่วโลกนิยมนำมาคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ ได้แก่ แบบจำลองแอมไพริคัล (empirical model) แบบจำลองกึ่งแอมไพริคัล (semi-empirical model) และแบบจำลองที่ใช้การเรียนรู้แบบเครื่องกล (machine learning models) โดยแต่ละแบบจำลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.6.2.1 แบบจำลองเอมไพริคัล เป็นแบบจำลองที่คำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ โดยอาศัยความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นจากวิธีการทางสถิติ (statistical analysis) (Hassan et al., 2016) ซึ่งส่วนใหญ่แบบจำลองเอมไพริคัลจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรังสีรวมจากดวงอาทิตย์กับมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ ในอดีตที่ผ่านมานักวิจัยหลายประเทศได้เสนอแบบจำลองเอมไพริคัลสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์หลายแบบจำลอง สำหรับประเทศไทย จันทร์ฉายและคณะ (Janjai et al., 2011) ได้ทดสอบความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง เฮารวิทซ์ (Haurwitz, 1946) โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลการวัดที่สถานีเชียงใหม่ อุบลราชธานี นครปฐม และสงขลา พบว่า ค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์ที่ได้จากการวัดต่างจากค่าที่ได้จากแบบจำลอง 10% โดยรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองดังกล่าวแสดงได้ดังนี้

$$I = 1,098 \cos \theta_z \exp(-0.057 / \cos \theta_z) \quad (2.25)$$

เมื่อ I คือ รังสีรวมจากดวงอาทิตย์บนระนาบในแนวระดับรายชั่วโมง (วัดต่อตารางเมตร)
 θ_z คือ มุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ (องศา)

2.6.2.2 แบบจำลองกึ่งเอมไพริคัล เป็นแบบจำลองที่คำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ โดยอาศัยความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นจากวิธีการทางสถิติและมีหลักการทางฟิสิกส์เข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งทำให้การคำนวณมีความยุ่งยากซับซ้อนหลายขั้นตอน สำหรับกรณีของแบบจำลองกึ่งเอมไพริคัลสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ จันทร์ฉายและคณะ (Janjai et al., 2011) ได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลรังสีรวมซึ่งวัดที่สถานีเชียงใหม่ อุบลราชธานี นครปฐม และสงขลา จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ที่ได้จากการวัดร่วมกับข้อมูลปริมาณไอน้ำ ข้อมูลปริมาณโอโซนและสมบัติเชิงแสงของฝุ่นละอองตามสมการ

$$I = A_1 \exp(-B_1 m_a) \quad (2.26)$$

$$\text{โดยที่ } A_1 = 0.778227 E_0 I_{sc} (\cos \theta_z)^{1.198932} \quad (2.27)$$

$$B_1 = -0.106634 + 0.337373\beta + 0.009181\alpha - 0.009852w + 0.482012O_3 \quad (2.28)$$

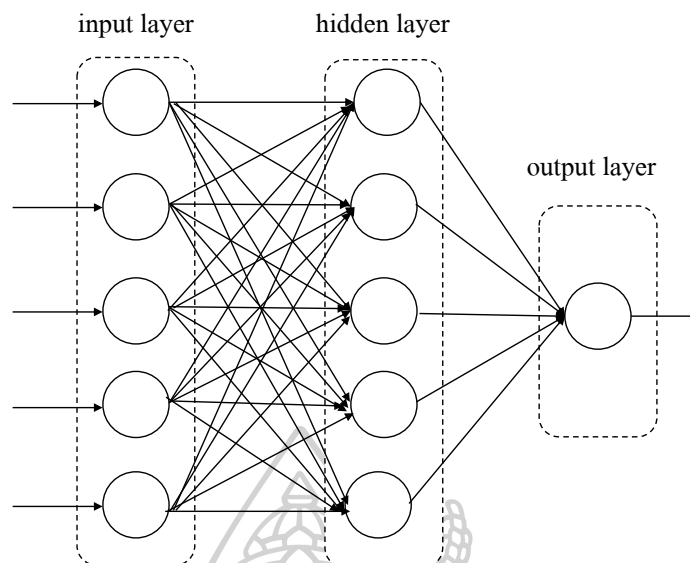
เมื่อ I คือ รังสีรวมจากดวงอาทิตย์บนระนาบในแนวระดับรายชั่วโมง (วัดต่อตารางเมตร)

E_0	คือ	ค่าแฟคเตอร์สำหรับปรับแก้ผลจากการแปรค่าระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ (-)
I_{sc}	คือ	ค่าคงที่รังสีจากดวงอาทิตย์ (วัตต์ต่อตารางเมตร)
m_a	คือ	มวลอากาศ (-)
β	คือ	สัมประสิทธิ์ความชุ่มชื้นของบรรยากาศของอังกstrom (-)
α	คือ	ตัวเลขกำลังของอังกstrom (-)
w	คือ	ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ (เซนติเมตร)
O_3	คือ	ปริมาณโอโซนในบรรยากาศ (เซนติเมตร)

2.6.2.3 แบบจำลองที่ใช้การเรียนรู้แบบเครื่องกล เป็นแบบจำลองประเภทที่ จะคำนึงถึงตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตของระบบเท่านั้น โดยไม่สนใจกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในระบบของแบบจำลอง (Ríos-Moreno et al., 2007) ตัวอย่างของแบบจำลองที่ใช้การเรียนรู้แบบเครื่องกล มีดังนี้

(1) แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม เป็นการออกแบบให้คอมพิวเตอร์สามารถเรียนรู้และจดจำข้อมูลต่าง ๆ โดยเลียนแบบการทำงานมาจากโครงข่ายไฟฟ้าชีวภาพ (bioelectric network) ในสมองของมนุษย์ โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่นิยมในปัจจุบันเป็นโครงสร้างแบบเพอร์เซปตรอนหลายชั้น (multi-layer perceptron) และมีการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ (back propagation algorithm) ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ดังแสดงในรูปที่ 11 ได้แก่ ชั้นอินพุต (input layer) หรือชั้นนำเข้าข้อมูล ชั้นคำนวณผลลัพธ์หรือชั้นซ่อน (hidden layer) และชั้นแสดงผลลัพธ์หรือชั้นเอาต์พุต (output layer) (Bosch et al., 2008; Yadav & Chandel, 2015) ซึ่งเป็นกระบวนการเดียวกับการทำงานของสมองมนุษย์

สำหรับหลักการคำนวณเอาต์พุตของโครงข่ายประสาทเทียมในคอมพิวเตอร์เริ่มจากการนำเข้าข้อมูลอินพุต (x_i) ที่ชั้นอินพุตแล้วนำค่าถ่วงน้ำหนัก (w_i) คูณกับค่าอินพุตในแต่ละโหนดที่เชื่อมโยงเข้ามาจากทางด้านซ้าย แล้วบวกกับค่าความเอนเอียง (θ_i) จากนั้นนำค่าผลบวกส่งผ่านไปยังฟังก์ชันกระตุ้น g แบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear activation function g) ในรูปฟังก์ชันซิกมอยด์ (sigmoid) เพื่อเรียนรู้และจดจำค่าถ่วงน้ำหนักแล้วนำไปคำนวณหาค่าเอาต์พุต y_i ที่โหนด (node) ลำดับถัดไป (Ozoegwu, 2019)



รูปที่ 11 โครงสร้างทั่วไปของโครงข่ายประสาทเทียม (Leal et al., 2011)

ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของสมการทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

$$y_i = g\left(\sum_j w_j x_j + \theta_i\right) \quad (2.29)$$

การสร้างโครงข่ายประสาทเทียมสามารถแบ่งได้ 2 วิธี วิธีแรก คือ การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ขึ้นเองเพื่อให้โครงข่ายประสาทเทียมทำงานตามที่ผู้ออกแบบเขียนไว้ (Yadav et al., 2014) สำหรับวิธีการที่สองเป็นการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปของโครงข่ายประสาทเทียม เช่น โปรแกรมวิวก้า (WEKA) ที่พัฒนาโดยมหาวิทยาลัยไวคาโต (Waikato) ประเทศนิวซีแลนด์ (Bouckaert et al., 2010) เมื่อเปรียบเทียบจาก 2 วิธีการแล้ว วิธีที่หนึ่งผู้ใช้งานต้องมีความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมและการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ส่วนวิธีที่สองเป็นวิธีการที่สะดวก ใช้งานง่าย รวมถึงลดข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการเขียนโปรแกรม แต่มีข้อเสีย คือ ผู้ใช้งานจะไม่ทราบถึงรายละเอียดหรือหลักการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมเท่าที่ควร

(2) **แบบจำลองถดถอยเชิงเส้นในตัวเองหรือแบบจำลองเออาร์ (Autoregressive model, AR)** เป็นแบบจำลองที่ใช้ค่าเอาต์พุตที่เกิดขึ้นในอดีตมาพยากรณ์ค่าเอาต์พุตในอนาคต (Ljung, 1987) โดยสามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$y(t) = a_1 y(t-1) + a_2 y(t-2) + \dots + a_{n_a} y(t-n_a) + e(t) \quad (2.30)$$

- เมื่อ $y(t)$ คือ ค่าเอาต์พุตที่เวลา t
 $(t-1)$ คือ ค่าที่เกิดขึ้นในอดีตย้อนหลัง t ไป 1 ค่า
 a คือ สัมประสิทธิ์ของค่าเอาต์พุต
 n_a คือ จำนวนค่าของเอาต์พุตในอดีตย้อนหลังไป n ค่า
 $e(t)$ คือ ความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง

(3) แบบจำลองถดถอยเชิงเส้นในตัวเองร่วมกับตัวแปรภายนอกหรือแบบจำลองเออาร์เอกซ์ (Autoregressive with exogenous input model, ARX) เป็นแบบจำลองที่ใช้ค่าเอาต์พุตที่เกิดขึ้นในอดีตร่วมกับตัวแปรภายนอกที่มีผลกับระบบ (exogenous) หรือค่าอินพุต (input) มาพยากรณ์ค่าของเอาต์พุตในอนาคต (Ljung, 1987) ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$y(t) = a_1 y(t-1) + \dots + a_{n_a} y(t-n_a) + b_1 u(t-1) + \dots + b_{n_b} u(t-n_b - n_k + 1) + e(t) \quad (2.31)$$

- เมื่อ $u(t)$ คือ ค่าตัวแปรภายนอกที่มีผลกับระบบหรือค่าอินพุตที่เวลา t
 b คือ สัมประสิทธิ์ของค่าอินพุต
 n_b คือ จำนวนค่าของอินพุตในอดีตย้อนหลังไป n ค่า
 n_k คือ ลำดับค่าเริ่มต้นของอินพุต

(4) แบบจำลองพิจารณาค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนหรือแบบจำลองเอ็มเอ (moving average, MA) เป็นแบบจำลองที่พยากรณ์ค่าเอาต์พุตในอนาคตโดยใช้ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน (moving average) ของเอาต์พุตที่เกิดขึ้นในอดีต (Ljung, 1987) ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$y(t) = e(t) + c_1 e(t-1) + \dots + c_{n_c} e(t-n_c) \quad (2.32)$$

- เมื่อ c คือ ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยระหว่างค่าอินพุตกับค่าเอาต์พุต
 n_c คือ จำนวนค่าความคลาดเคลื่อนของอินพุตในอดีตย้อนหลังไป n ค่า

(5) แบบจำลองเออาร์แม็ก (Autoregressive Moving Average with eXogenous input model, ARMAX) เป็นแบบจำลองที่พยากรณ์ค่าเอาต์พุตในอนาคตโดยใช้รูปแบบของแบบจำลอง ARX กับ MA มาประยุกต์ร่วมกัน (Ljung, 1987) ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$y(t) = a_1 y(t-1) + \dots + a_{n_a} y(t-n_a) + b_1 u(t-1) + \dots + b_{n_b} u(t-n_b - n_k + 1) + e(t) + c_1 e(t-1) + \dots + c_{n_c} e(t-n_c) \quad (2.33)$$

(6) แบบจำลองพิจารณาความเคลื่อนไหวของเอาต์พุตหรือแบบจำลองโออี (OE, Output Error) เป็นแบบจำลองที่ใช้ค่าผลต่างหรือความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าเอาต์พุตกับค่าอินพุตที่เกิดขึ้นในอดีตมาพยากรณ์ค่าเอาต์พุตในอนาคต (Ljung, 1987) ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$y(t) = (b_1 u(t-1) - a_1 y(t-1)) + \dots + (b_{n_b} u(t-n_b - n_k + 1) - a_{n_a} y(t-n_a)) + e(t) \quad (2.34)$$

(7) แบบจำลองบอกซ์-เจนกินส์ หรือ อาร์รีแม็ก (Box-Jenkins or Autoregressive Integrated Moving Average with eXogenous input model, BJ) เป็นแบบจำลองผสมระหว่างรูปแบบของแบบจำลอง ARMAX และ OE เพื่อพยากรณ์ค่าของเอาต์พุตในอนาคต (Ljung, 1987) ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$y(t) = (b_1 u(t-1) - a_1 y(t-1)) + \dots + (b_{n_b} u(t-n_b - n_k + 1) - a_{n_a} y(t-n_a)) + (c_1 e(t-1) - a_1 y(t-1)) + \dots + (c_{n_c} e(t-n_c) - a_{n_a} y(t-n_a)) \quad (2.35)$$

(8) แบบจำลองถดถอยเชิงเส้นในตัวเองร่วมกับตัวแปรภายนอกแบบไม่เชิงเส้นหรือแบบจำลองเอ็นเออาร์เอกซ์ (Nonlinear Autoregressive with eXogenous input model, NARX) เป็นแบบจำลองที่พยากรณ์ค่าเอาต์พุตในอนาคตโดยใช้แบบจำลอง ARX ผสมกับแบบจำลอง ANN (Ljung, 2011) โครงสร้างของแบบจำลอง NARX ทั่วไปจะประกอบด้วย 1 ชั้นอินพุต 1 ชั้นซ่อน และ 1 ชั้นเอาต์พุต ซึ่งจะใช้หลักการคำนวณเอาต์พุตและโครงสร้างของแบบจำลองเช่นเดียวกับแบบจำลอง ANN แต่จะใช้ฟังก์ชันกระตุ้น φ แบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยฟังก์ชันการเรียนรู้แบบเวฟเล็ต (wavelet) เพื่อเรียนรู้และนำค่าถ่วงน้ำหนักไปคำนวณชั้นเอาต์พุตที่โหนด

ถัดไป (Adnan & Mustafa, 2015; Nanda et al., 2016) โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตได้ดังสมการที่ 2.36 (Kaloop et al., 2015)

$$y_i = \varphi \left(\frac{\sum_i w_i x_i - \theta_i}{\alpha_i} \right) \quad (2.36)$$

เมื่อ α_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์เวฟเล็ต (wavelet coefficient)

การหาค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ (system identification) ของแบบจำลองที่ใช้การเรียนรู้แบบเครื่องกลในโปรแกรม MATLAB เพื่อสร้างแบบจำลองแล้วนำไปพยากรณ์เอาต์พุตที่เราสนใจ ซึ่งระเบียบวิธีการที่นิยม คือ วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least squares method) (Ljung, 1995) โดยเริ่มจากพิจารณาสมการที่ 2.31 ซึ่งเป็นแบบจำลอง ARX ที่อยู่ในรูปสมการแบบการถดถอยเชิงเส้น (linear regression) ที่มีอินพุตและเอาต์พุตค่าเดียว (single input single output, SISO) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการแบบเมทริกซ์ (Ljung, 1995) โดยกำหนดให้ ตัวแปรถดถอยแต่ละตัวบรรจุอยู่ในคอลัมน์เมทริกซ์ซึ่งแทนด้วย $\varphi(t)$ และสัมประสิทธิ์ของตัวแปรถดถอยบรรจุอยู่ในคอลัมน์เมทริกซ์ที่แทนด้วย θ ดังนี้

$$\varphi(t) = \begin{bmatrix} -y(t-1) \\ \vdots \\ -y_{n_a}(t-n_a) \\ u_1(t-1) \\ \vdots \\ u_{n_b}(t-n_b-n_k+1) \end{bmatrix} \quad \text{และ} \quad \theta = \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_{n_a} \\ b_1 \\ \vdots \\ b_{n_b} \end{bmatrix}$$

$$\text{หรือ} \quad y(t) = \theta \varphi(t) + e(t, \theta) \quad (2.37)$$

เนื่องจากคอลัมน์เมทริกซ์ของ $\varphi(t)$ มีมิติเป็น $[1 \times n]$ และ θ มีมิติเป็น $[1 \times n]$ ซึ่งไม่สามารถกระทำร่วมกันได้ตามกฎทางคณิตศาสตร์ ดังนั้นจึงใช้คุณสมบัติเมทริกซ์แบบสลับเปลี่ยน (transpose) และเขียนสมการที่ 2.37 ใหม่ได้เป็น

$$y(t) = \theta^T \varphi(t) + e(t, \theta) \quad (2.38)$$

การหาค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองจะอาศัยความสัมพันธ์จากความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (mean square error) หรือ $V_n(\theta)$ ระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าที่ได้จากแบบจำลอง เพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่มีผลรวมของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยมีค่าต่ำที่สุด

$$V_n(\theta) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n e^2(t, \theta) \quad (2.39)$$

แทนสมการ 2.38 ลงใน 2.39 จะได้

$$\begin{aligned} V_n(\theta) &= \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n [y(t) - \theta \varphi^T(t)]^2 \\ &= \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n [y^2(t) - 2y(t)\theta \varphi^T(t) + (\theta \varphi^T(t))^2] \\ &= \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n y^2(t) - \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n 2y(t)\theta \varphi^T(t) + \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (\theta \varphi^T(t))^2 \end{aligned}$$

เงื่อนไขที่ทำให้ $V_n(\theta)$ มีค่าน้อยที่สุด ทำได้โดยการหาอนุพันธ์อันดับหนึ่งเท่ากับศูนย์ ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \theta} (V_n(\theta)) &= 0 \\ 0 &= \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n y^2(t) - \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n 2y(t)\theta \varphi^T(t) + \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (\theta \varphi^T(t))^2 \right] \end{aligned}$$

เนื่องจาก $\frac{\partial \varphi^T(t)\theta}{\partial \theta} = \varphi(t)$

$$0 = -\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n 2y(t)\varphi(t) + \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n 2\theta \varphi^T(t)\varphi(t)$$

$$\sum_{t=1}^n \theta \varphi^T(t)\varphi(t) = \sum_{t=1}^n y(t)\varphi(t)$$

จะได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์บรรจู่อยู่ใน θ_n^{LS} สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\theta_n^{LS} = \left[\sum_{t=1}^n \varphi^T(t)\varphi(t) \right]^{-1} \sum_{t=1}^n y(t)\varphi(t) \quad (2.40)$$

ระเบียบวิธีการดังกล่าวเมื่อนำไปใช้กับระบบที่มีการพิจารณาค่าอินพุทหลายค่าและเอาท์พุทค่าเดียว (multiple input single output, MISO) ซึ่งมีกระบวนการที่ซับซ้อนและยุ่งยากขึ้น อาจจะ

ทำให้เกิดความผิดพลาดระหว่างการคำนวณ ดังนั้น ในปี 1988 เลนนาร์ต ลุง (Lennart Ljung) อาจารย์คณิตศาสตร์ประจำสถาบันเทคโนโลยีลินเชอปปิง (Linköping Institute of Technology) ประเทศสวีเดน (Moler & Little, 2020) ได้พัฒนาการหาค่าสัมประสิทธิ์ให้สามารถปฏิบัติการได้รวดเร็วและแม่นยำขึ้นบนโปรแกรมสำเร็จรูปในคอมพิวเตอร์ โดยปรากฏในฟังก์ชันที่ชื่อว่า system identification toolbox ในโปรแกรมแมทแลป (MATLAB) (Ljung, 2011)

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การนำพลังงานจากดวงอาทิตย์มาประยุกต์ใช้งานด้านการออกแบบและประเมินประสิทธิภาพเทคโนโลยีที่ใช้เปลี่ยนรูปพลังงานจากดวงอาทิตย์ให้อยู่ในรูปพลังงานไฟฟ้าหรือพลังงานความร้อนที่ต้องการ ผู้ใช้งานจำเป็นต้องทราบข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือน ซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้เครื่องวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์หรือไพราโนมิเตอร์ แต่เนื่องจากรังสีรวมจากดวงอาทิตย์มักพบปัญหาเกี่ยวกับค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงในการดูแลรักษาและการซ่อมบำรุง ทำให้นักวิจัยทั้งในและต่างประเทศให้ความสนใจและศึกษาวิธีการคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับงานวิจัยต่าง ๆ ที่สำคัญสามารถสรุปได้ดังนี้

Ozoegwu (2019) ได้ทำการรวบรวมงานวิจัยสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนโดยใช้แบบจำลองเอมไพริคัล พบว่า แบบจำลองเอมไพริคัลมีข้อจำกัดใช้งานได้เฉพาะพื้นที่ ยกตัวอย่างเช่น Zabara (1986) ได้นำแบบจำลองเอมไพริคัลที่พัฒนาโดย (Angstrom, 1924) มาคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนในพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศกรีซ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์และรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือนกับสัดส่วนของความยาวนานแสงแดดและความยาวนานของวันรายวันเฉลี่ยต่อเดือนอยู่ในรูปสมการเชิงเส้นยกกำลังสาม (cubic) Badescu (1999) ได้ศึกษาแบบจำลองเอมไพริคัลที่พัฒนาโดย Black (1956) ในพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศโรมาเนีย พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์และรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือนกับปริมาณเมฆปกคลุมท้องฟ้ารายวันเฉลี่ยต่อเดือนมีความสัมพันธ์กันทั้งแบบเชิงเส้น (linear) แบบเชิงเส้นยกกำลังสอง (quadratic) และแบบเชิงเส้นยกกำลังสาม

ด้วยเหตุนี้จึงมีนักวิจัยในหลาย ๆ ประเทศพัฒนาแบบจำลองเพื่อให้สามารถคำนวณรังสีจากดวงอาทิตย์ได้โดยไม่มีข้อจำกัดด้านพื้นที่และง่ายต่อการใช้งาน เช่น แบบจำลองที่ใช้การเรียนรู้แบบเครื่องกล (machine learning models) ยกตัวอย่างเช่น

Bosch และคณะ (2008) ได้เสนอแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซปตรอนหลายชั้นและมีการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับในพื้นที่ที่ความซับซ้อนด้านสภาพภูมิอากาศทางตอนใต้ของประเทศสเปนจำนวน 12 เมือง โดยใช้ข้อมูลตัวแปรทางบรรยากาศ ตำแหน่งดาราศาสตร์ และตำแหน่งภูมิศาสตร์จำนวน 1 เมืองมาทำการฝึกสอนแบบจำลองเพื่อนำไปทดสอบกับอีก 11 เมือง ผลที่ได้ พบว่า แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสามารถคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันที่มีความแตกต่างด้านสภาพภูมิอากาศได้ค่อนข้างแม่นยำ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองที่อยู่ในรูปของรากที่สองของค่าเบี่ยงเบนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) และค่าเบี่ยงเบนจากความเอนเอียงเฉลี่ย (MBE) มีค่าอยู่ระหว่าง 5-7.5% และ -1.2-2.1% ตามลำดับ

Yadav และ Chandel (2015) ได้นำแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบสำเร็จรูป ชื่อว่า วีโก้ ที่พัฒนาโดย Bouckaert และคณะ (2010) มหาวิทยาลัยไวกาโต ประเทศนิวซีแลนด์ มาพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ที่สร้างจากตัวแปรทางบรรยากาศแตกต่างกัน 5 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองที่สร้างจาก อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม ความยาวนานของแสงแดด ตำแหน่งละติจูด-ลองจิจูด ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล ดัชนีความแจ่มใสบรรยากาศ และรังสีจากดวงอาทิตย์นอกชั้นบรรยากาศโลก ในพื้นที่รัฐหิมาจัลประเทศทางตะวันตกของประเทศอินเดียรวมทั้งหมด 26 เมือง โดยใช้ข้อมูลย้อนหลังตั้งแต่ปี 1986-2000 ของ 22 เมือง เป็นชุดข้อมูลในการสร้างแบบจำลองและใช้ข้อมูลปี 2001 ของ 4 เมือง เป็นชุดข้อมูลในการทดสอบแบบจำลอง จากการศึกษาพบว่าแบบจำลองทั้ง 5 แบบจำลองสามารถคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัด

Kalooop และคณะ (2015) ได้เปรียบเทียบหาแบบจำลอง ARX ที่มีความเหมาะสมสำหรับคำนวณอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีวัดที่มีความแตกต่างทางสภาพภูมิอากาศจำนวน 18 สถานีในเขตภูมิภาคสามเหลี่ยมปากแม่น้ำไนล์ ประเทศอียิปต์ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960 ถึง 2009 โดยใช้ระเบียบวิธีการหาสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่แตกต่างกัน 3 วิธี ได้แก่ วิธีความคลาดเคลื่อนกำลังสองน้อยที่สุด (least mean square) วิธีโครงข่ายประสาทเทียม (artificial neural network) และวิธีแบบเวฟเล็ต (wavelet) จากการศึกษา พบว่า ระเบียบวิธีการทั้ง 3 สามารถ

คำนวณอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนได้ค่อนข้างแม่นยำ รวมถึงแบบจำลอง ARX ยังสามารถสร้างแบบจำลองที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้ชุดข้อมูลที่สร้างและทดสอบจำนวนมาก

Niu และ O'Neill (2017) ได้เปรียบเทียบแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ ได้แก่ แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมและแบบจำลองที่ใช้การเรียนรู้แบบเครื่องกลต่าง ๆ เช่น แบบจำลอง ARX และแบบจำลอง ANN ผลจากการเปรียบเทียบ พบว่า แบบจำลอง ARX สามารถคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์โดยไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลเพื่อสร้างแบบจำลองจำนวนมากเหมือนแบบจำลอง ANN

Silva และ Brito (2018) ได้ศึกษาแบบจำลอง ARX สำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับพื้นที่และเวลา โดยใช้ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ที่วัดด้วยเครื่องไพราโนมิเตอร์จำนวน 17 เครื่องที่กระจายตามพื้นที่ต่าง ๆ บนหมู่เกาะฮาวาย ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งข้อมูลจากเครื่องวัดจำนวน 3 เครื่องจะเป็นข้อมูลอินพุทเพื่อทำการสร้างแบบจำลอง ส่วน 14 เครื่องที่เหลือจะใช้เป็นข้อมูลในการทดสอบแบบจำลอง จากผลการศึกษา พบว่า แบบจำลอง ARX สามารถคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ที่มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับพื้นที่และเวลาได้ค่อนข้างดี

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า แบบจำลองแอมไพริคัลเป็นแบบจำลองที่ใช้งานเฉพาะพื้นที่และแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมต้องใช้ข้อมูลในการสร้างแบบจำลองจำนวนมากเพื่อให้สามารถคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนได้อย่างแม่นยำ แต่หลาย ๆ พื้นที่มักประสบปัญหาด้านเครื่องวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์เกิดเหตุขัดข้องทำให้ข้อมูลบางช่วงเวลาขาดหายไป ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองเมื่อนำไปใช้งาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนโดยใช้แบบจำลองที่ใช้การเรียนรู้แบบเครื่องกลที่ปรากฏบนโปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB และโปรแกรม WEKA เพื่อเปรียบเทียบหาแบบจำลองที่สามารถสร้างแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนได้อย่างแม่นยำโดยใช้ชุดข้อมูลที่มีอยู่อย่างจำกัด

สำหรับกรณีประเทศไทยการศึกษารังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนจากสถานีวัดมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษารังสีดังกล่าวตามละเอียดที่จะกล่าวในบทต่อไป

บทที่ 3 การดำเนินการวิจัยและผล

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนในประเทศไทย โดยแบ่งการศึกษาเป็น 3 ส่วน ส่วนแรก ศึกษาลักษณะทางสถิติของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของเครือข่ายสถานีวัด 38 สถานีของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) ส่วนที่สอง พัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ 4 สถานีในภูมิภาคหลักของประเทศไทยจากสถานีวัดของมหาวิทยาลัยศิลปากร และส่วนสุดท้าย นำแบบจำลองที่ดีที่สุดจากงานส่วนที่ 2 ไปทดสอบกับข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนจากเครือข่ายสถานีวัด 38 สถานี เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าว ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิจัยตามรายละเอียดต่อไปนี้

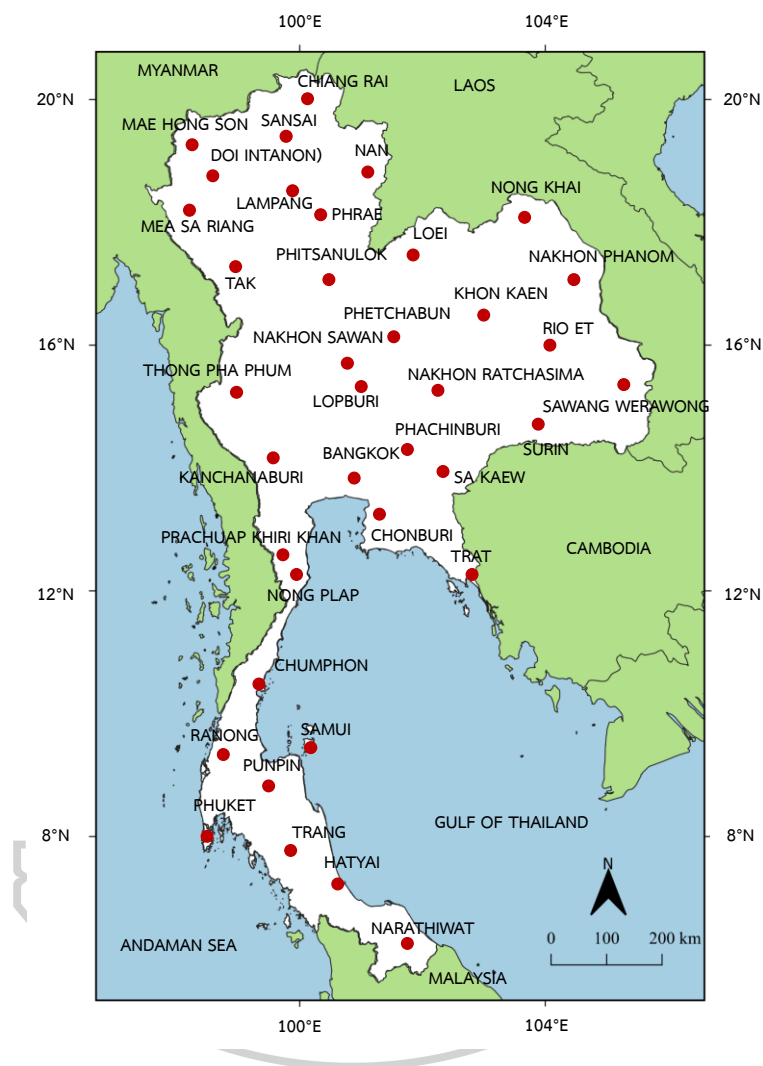
3.1 ศึกษาลักษณะทางสถิติของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ของเครือข่ายสถานีวัด 38 สถานีของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน

ธรรมชาติของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์เมื่อเคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศลงมาตกกระทบที่พื้นผิวโลกจะมีการแปรค่าหรือเปลี่ยนแปลงขึ้นกับมุมตกกระทบและตัวแปรทางบรรยากาศต่าง ๆ โดยทั่วไป มุมดังกล่าวจะมีค่าขึ้นกับเวลาในรอบวัน ฤดูกาลในรอบปี รวมถึงขึ้นกับตำแหน่งละติจูดของพื้นที่ต่าง ๆ บนโลกด้วย ซึ่งวิธีการพื้นฐานในการได้มาซึ่งข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์สามารถทำได้โดยการติดตั้งเครื่องวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติเพื่อที่จะนำไปใช้ในการศึกษาหรือพัฒนาแบบจำลองต่อไป ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเริ่มจากการศึกษา ลักษณะทางสถิติของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของเครือข่ายสถานีวัด 38 สถานีในประเทศไทย ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิจัยโดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1.1 การวัดและบันทึกข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ร่วมกับห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์บรรยากาศ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้เริ่มทำการศึกษารังสีรวมจากดวงอาทิตย์ โดยจัดตั้งเครือข่ายเครื่องวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์กระจายตามพื้นที่ต่าง ๆ ทั่วประเทศ เมื่อ พ.ศ. 2544 จำนวน 25 สถานี จากนั้นได้มีการติดตั้งเครือข่ายเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ทั่วประเทศ

จนในปัจจุบัน พ.ศ. 2564 มีเครือข่ายสถานีวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ทั้งหมด 38 สถานี โดยตำแหน่งที่ตั้งของสถานีวัดดังกล่าวแสดงในรูปที่ 12 และตารางที่ 1



รูปที่ 12 เครือข่ายสถานีวัดที่กระจายตามพื้นที่ต่าง ๆ ในประเทศไทย

ตารางที่ 1 รายชื่อและที่ตั้งเครือข่ายสถานีวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ในประเทศไทยจำนวน 38 สถานี

ลำดับ	สถานี	ละติจูด	ลองจิจูด
1	เชียงใหม่ (CHIANG RAI)	20.08	99.88
2	แม่ฮ่องสอน (MAE HONG SON)	19.48	97.95
3	เชียงใหม่ (สันทราย) (SANSAI)	18.83	98.88
4	น่าน (NAN)	18.72	100.75

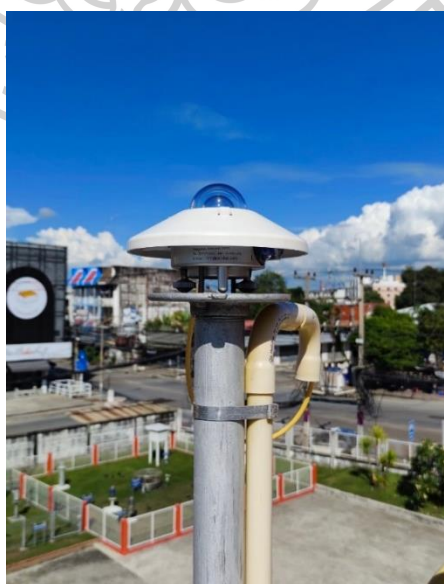
ตารางที่ 1 (ต่อ)

ลำดับ	สถานี	ละติจูด	ลองจิจูด
5	เชียงใหม่ (เกษตรหลวงอินทนนท์) (DOI INTANON)	18.49	98.67
6	แม่ฮ่องสอน (แม่สะเรียง) (MEA SA RIANG)	18.18	97.93
7	ลำปาง (LAMPANG)	18.28	99.51
8	แพร่ (PHRAE)	18.06	100.06
9	ตาก (ดอยมูเซอ) (TAK)	16.80	98.90
10	พิษณุโลก (PHITSANULOK)	16.78	100.27
11	เพชรบูรณ์ (PHETCHABUN)	16.43	101.15
12	นครสวรรค์ (NAKHON SAWAN)	15.67	100.12
13	หนองคาย (NONG KHAI)	17.87	102.72
14	เลย (LOEI)	17.40	101.00
15	นครพนม (NAKHON PHANOM)	16.97	104.73
16	ขอนแก่น (KHON KAEN)	16.19	102.80
17	อุบลราชธานี (สว่างวีระวงศ์) (SAWANG WERAWONG)	15.28	105.14
18	ร้อยเอ็ด (RIO ET)	16.07	103.00
19	นครราชสีมา (NAKHON RATCHASIMA)	14.97	102.08
20	สุรินทร์ (SURIN)	14.88	103.50
21	ลพบุรี (LOPBURI)	14.83	100.62
22	กาญจนบุรี (ทองผาภูมิ) (THONG PHA PHUM)	14.73	98.63
23	กาญจนบุรี (เมือง) (KANCHANABURI)	14.02	99.53
24	กรุงเทพมหานคร (BANGKOK)	13.75	100.52
25	สระแก้ว (อรัญประเทศ) (SA KAEW)	13.82	102.34
26	ปราจีนบุรี (PHACHINBURI)	13.97	101.70
27	ชลบุรี (CHONBURI)	13.37	100.98
28	ตราด (TRAT)	11.77	102.88
29	ประจวบคีรีขันธ์ (PRACHUAP KHIRI KHAN)	11.83	99.88
30	ประจวบคีรีขันธ์ (หนองพลับ) (NONG PHLAP)	12.59	99.73
31	ชุมพร (CHUMPHON)	10.40	99.18

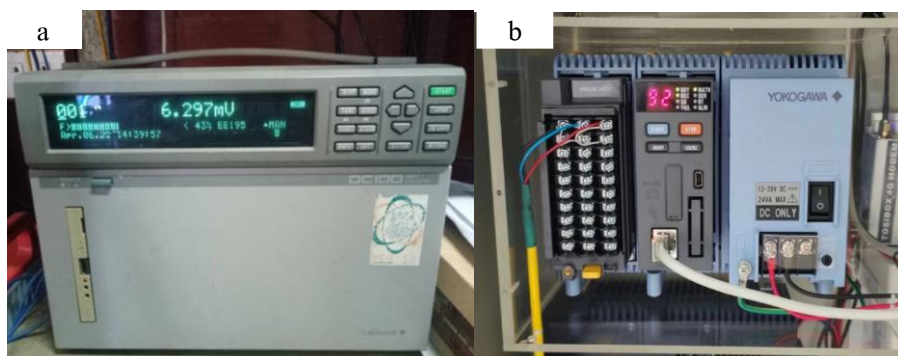
ตารางที่ 1 (ต่อ)

ลำดับ	สถานี	ละติจูด	ลองจิจูด
32	ระนอง (RANONG)	9.98	98.62
33	สุราษฎร์ธานี (เกาะสมุย) (SAMUI)	9.47	100.05
34	สุราษฎร์ธานี (พุนพิน) (PUN PIN)	9.13	99.15
35	ภูเก็ต (PHUKET)	8.13	98.30
36	ตรัง (TRANG)	7.52	99.62
37	สงขลา (หาดใหญ่) (HATYAI)	6.92	100.43
38	นราธิวาส (NARATHIWAT)	6.40	101.82

ผู้วิจัยจะนิยามสถานีที่ทำการวัดทั้ง 38 สถานีดังกล่าวว่า เครือข่ายสถานีวัด เนื่องจากเป็นการวัดและบันทึกข้อมูลอย่างต่อเนื่องหลายปี รวมทั้งใช้ระบบการวัดที่เป็นเครือข่ายเดียวกันทั้งหมด กล่าวคือ ใช้เครื่องวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ที่ผลิตโดยบริษัท คิปป์แอนด์โซนเนส (Kipp & Zonen) รุ่น CM11 (รูปที่ 13) และบันทึกสัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องวัดทุก ๆ 1 วินาทีแล้วบันทึกค่าสัญญาณศักย์ไฟฟ้าให้เป็นตัวเลขโดยช่วงแรกบันทึกด้วยเครื่องบันทึกสัญญาณ (data logger) ของบริษัท โยโกกาวา (Yokogawa) รุ่น DC100 ดังแสดงในรูปที่ 14 (a) และต่อมาบันทึกด้วยเครื่องบันทึกสัญญาณของบริษัท Yokogawa รุ่น GM10 ดังแสดงในรูปที่ 14 (b)



รูปที่ 13 เครื่องวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ที่ผลิตโดยบริษัท Kipp & Zonen รุ่น CM 11



รูปที่ 14 เครื่องบันทึกสัญญาณศักย์ไฟฟ้าของบริษัท Yokogawa รุ่น DC100 (a) และรุ่น GM10 (b)

สัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์สามารถแปลงให้อยู่ในรูปความเข้มรังสีรวมจากดวงอาทิตย์โดยใช้ความสัมพันธ์ ดังนี้

$$I = \frac{V}{S} \quad (3.1)$$

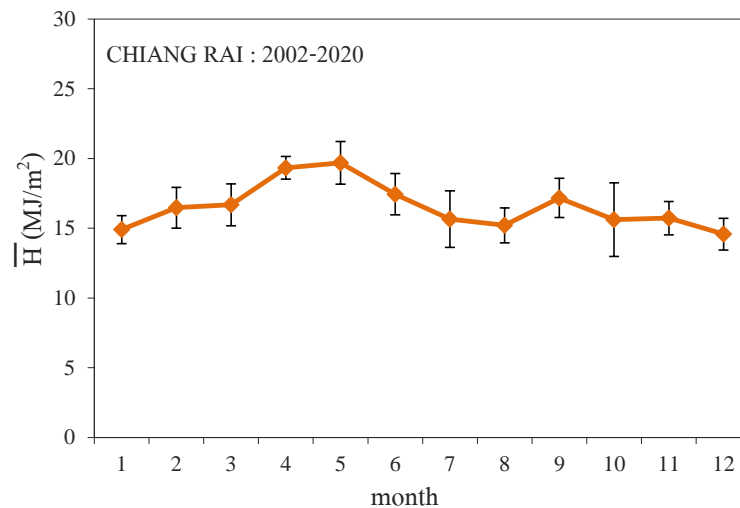
เมื่อ I คือ ความเข้มรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ (วัตต์ต่อตารางเมตร)
 V คือ สัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ (โวลต์)
 S คือ ค่าตอบสนองของเครื่องวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ (sensitivity) (โวลต์ต่อวัตต์ต่อตารางเมตร)

จากสมการที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าสัญญาณศักย์ไฟฟ้าจะถูกหารด้วยค่าตอบสนองของเครื่องวัด ซึ่งค่าดังกล่าวจะได้จากทางบริษัทผู้ผลิตและสามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับการใช้งาน ดังนั้นจึงต้องทำการสอบเทียบ (calibration) เครื่องวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์อย่างสม่ำเสมอเพื่อให้ได้ค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์ถูกต้องแม่นยำและเป็นไปตามมาตรฐาน

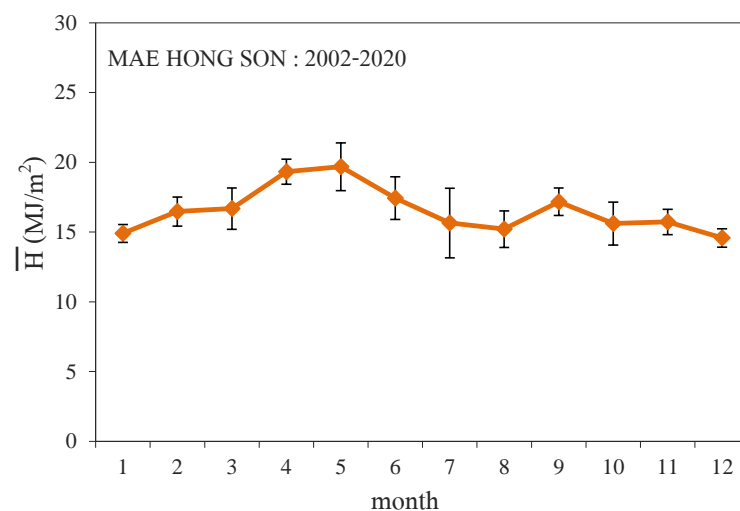
3.1.2 ผลการศึกษาลักษณะทางสถิติของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือน

เนื่องจากข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนมีความสำคัญในการนำมาใช้ออกแบบและประเมินสมรรถนะเทคโนโลยีต่าง ๆ เช่น เซลล์แสงอาทิตย์และเครื่องอบแห้งพืชผลทางการเกษตร ดังนั้น ผู้วิจัยจึงนำข้อมูลความเข้มรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ที่ผ่านกระบวนการแปลงแล้วรายวินาทีมาเฉลี่ยเป็นรายนาที่และรายชั่วโมง ตามลำดับ ในหน่วย วัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2) จากนั้นรวมค่าเฉลี่ยรายชั่วโมงทั้งหมดตลอดทั้งวันในแต่ละวันเพื่อแปลงให้เป็นรังสีรวมจาก

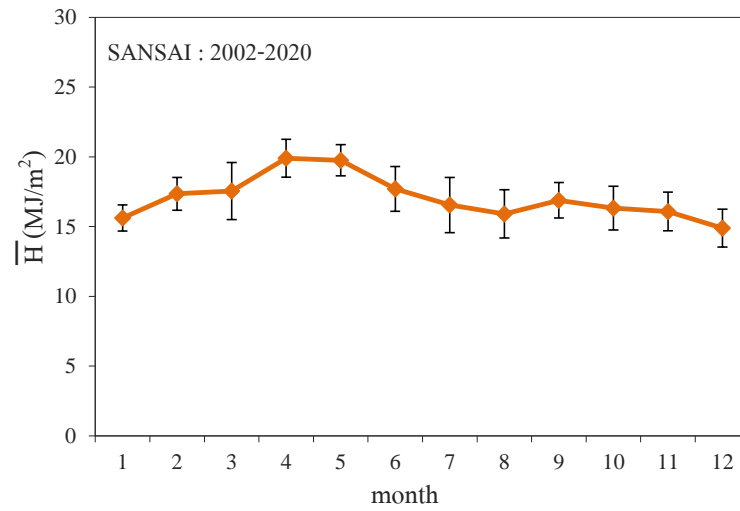
ดวงอาทิตย์เฉลี่ยรายวันในหน่วย เมกะจูลต่อตารางเมตร (MJ/m^2) แล้วนำค่ารังสีรายวันมาเฉลี่ยเป็นข้อมูลรายวันเฉลี่ยต่อเดือนเพื่อศึกษาการแปรค่าและการแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนแบบระยะยาวของแต่ละสถานี (ส่วนใหญ่ในช่วงปี ค.ศ. 2002 ถึง 2020) ดังแสดงในภาคผนวก ก สำหรับผลการวิเคราะห์การแปรค่าตามเวลาในรอบปีที่ได้แสดงดังรูปที่ 15-52



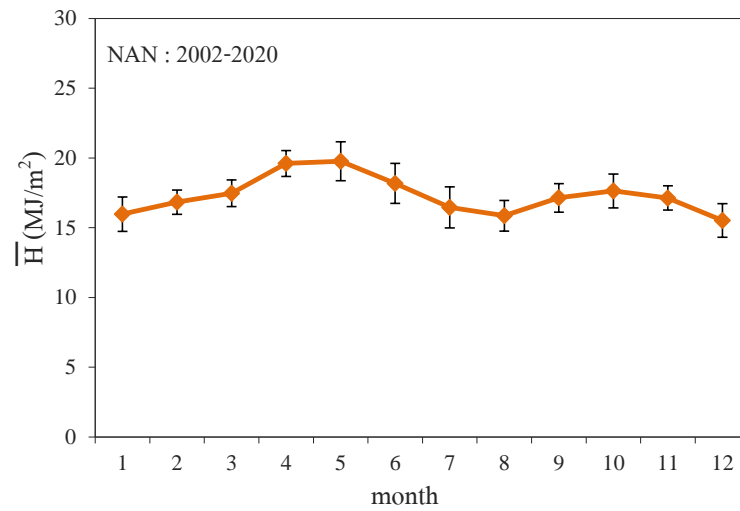
รูปที่ 15 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีเชียงใหม่



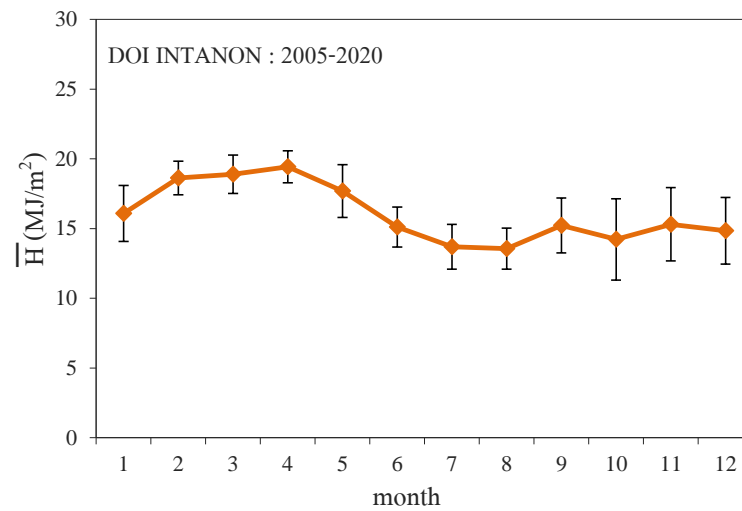
รูปที่ 16 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีแม่ฮ่องสอน



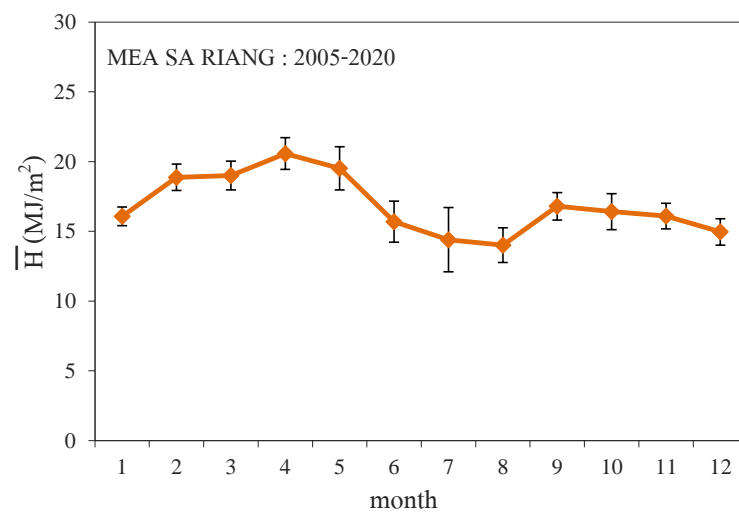
รูปที่ 17 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีเชียงใหม่ (สันทราย)



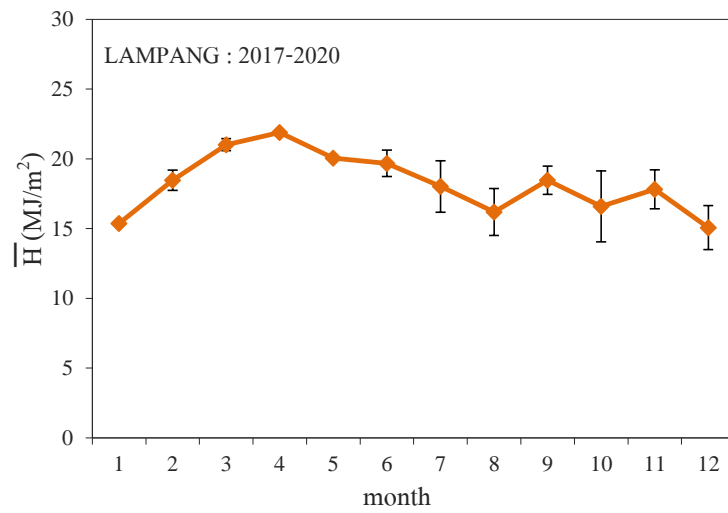
รูปที่ 18 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีน่าน



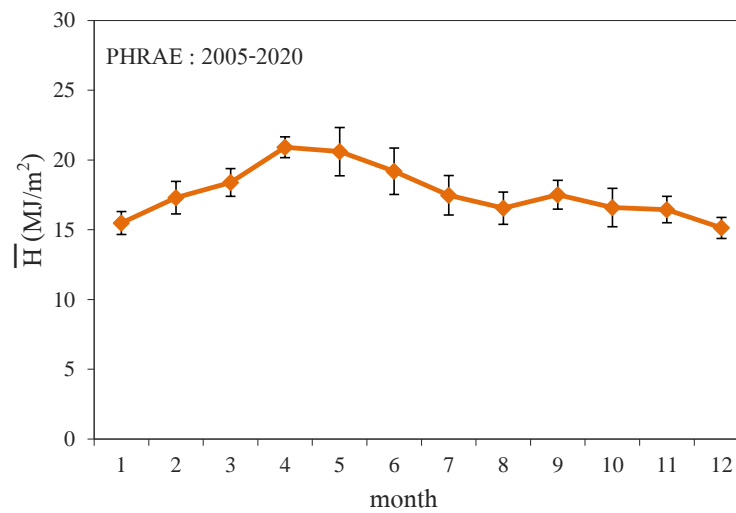
รูปที่ 19 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีเกษตรหลวงอินทนนท์



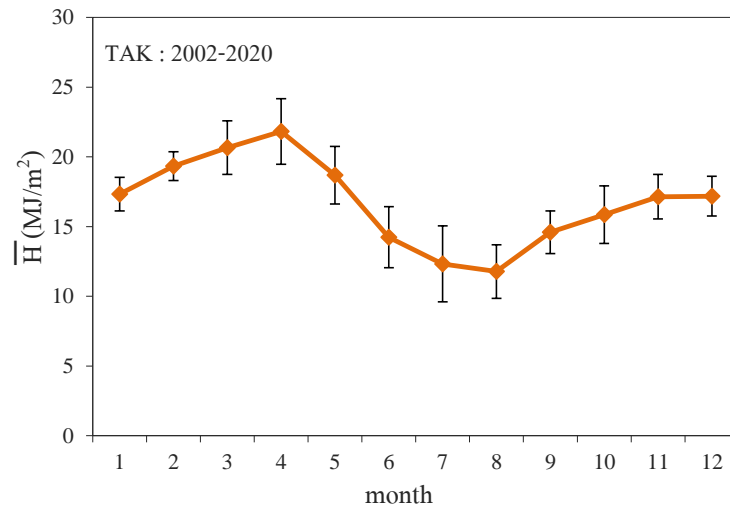
รูปที่ 20 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีแม่สะเรียง



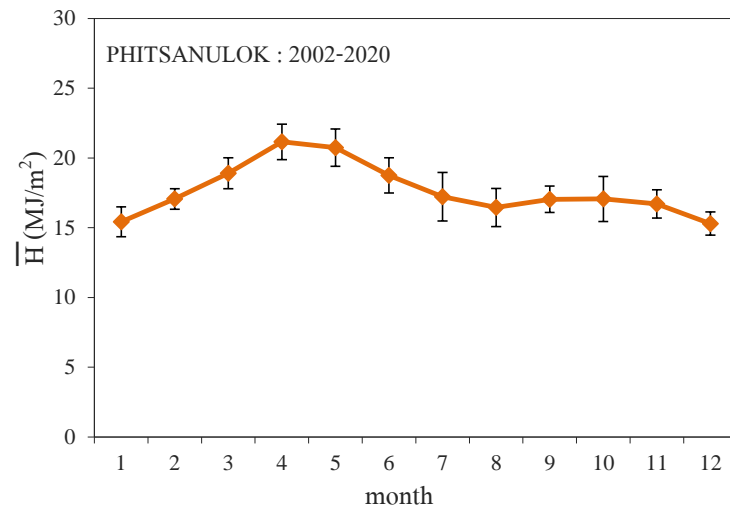
รูปที่ 21 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีลำปาง



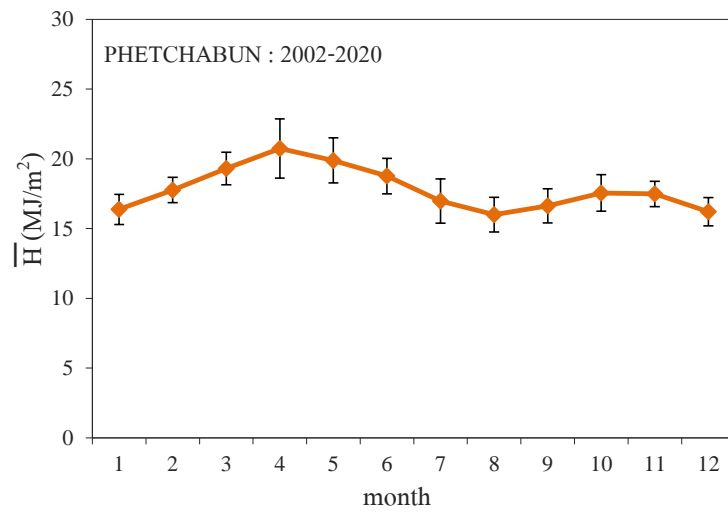
รูปที่ 22 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีแพร่



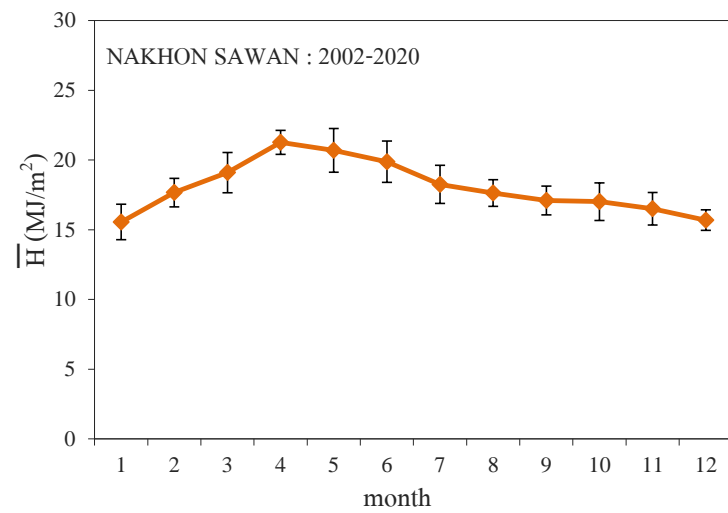
รูปที่ 23 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีตาก (ดอยมูเซอ)



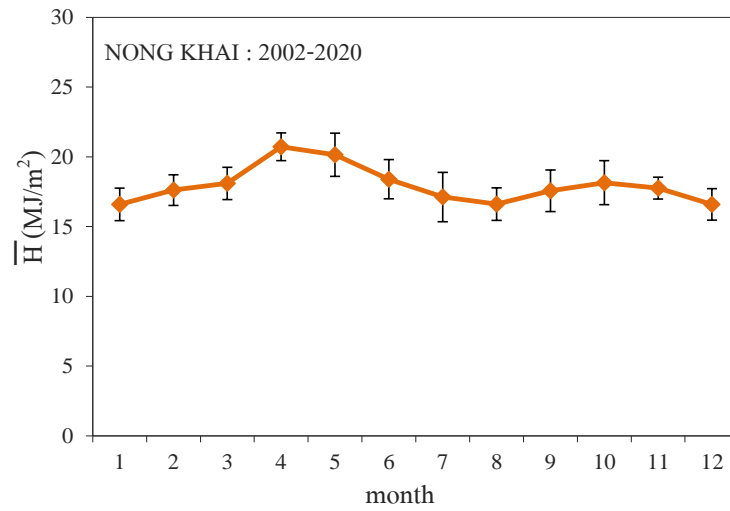
รูปที่ 24 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีพิษณุโลก



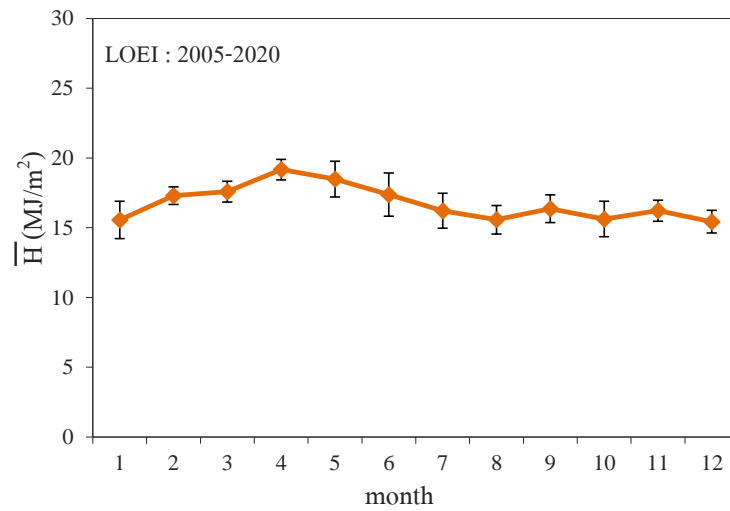
รูปที่ 25 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีเพชรบูรณ์



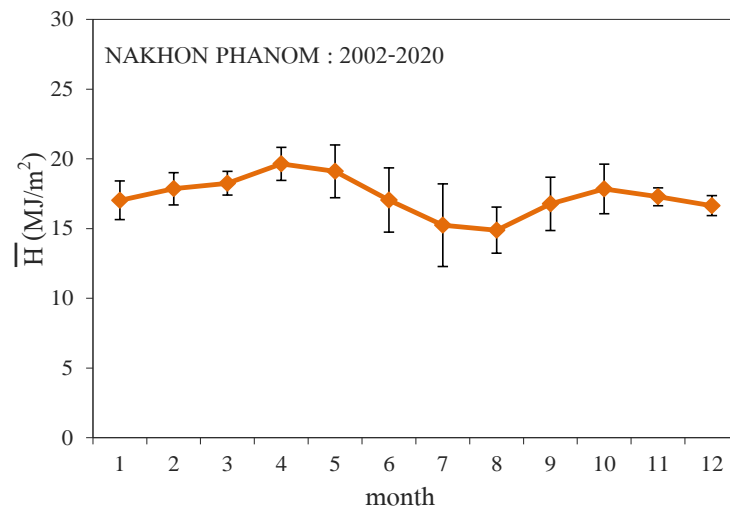
รูปที่ 26 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีนครสวรรค์



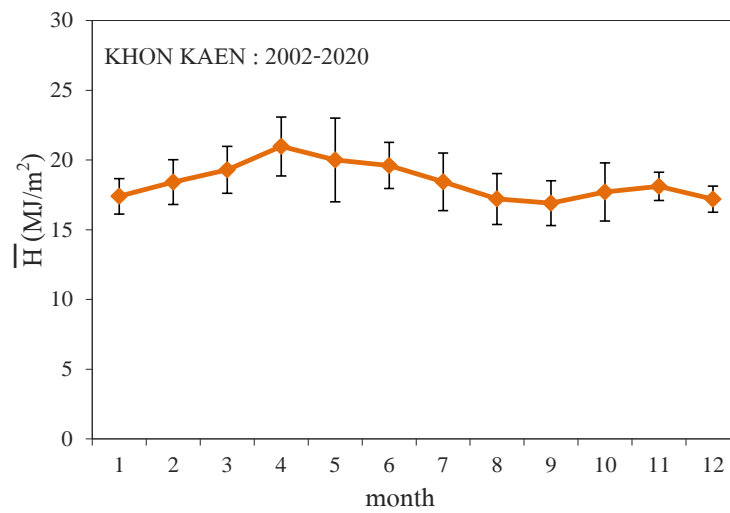
รูปที่ 27 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีหนองคาย



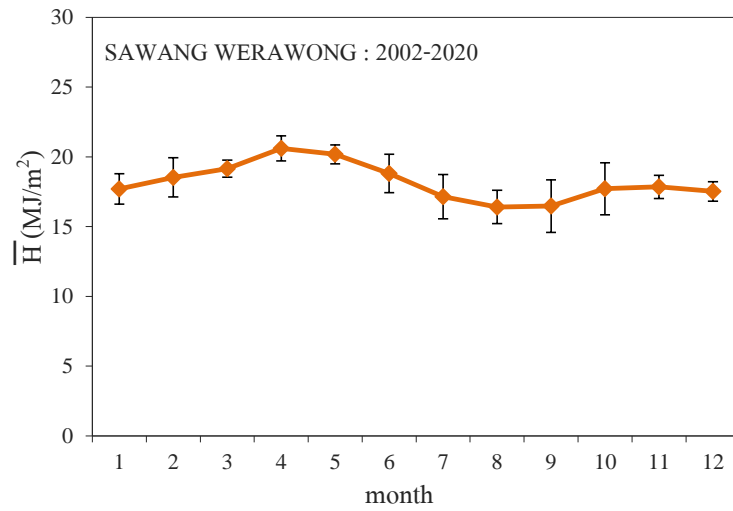
รูปที่ 28 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีเลย



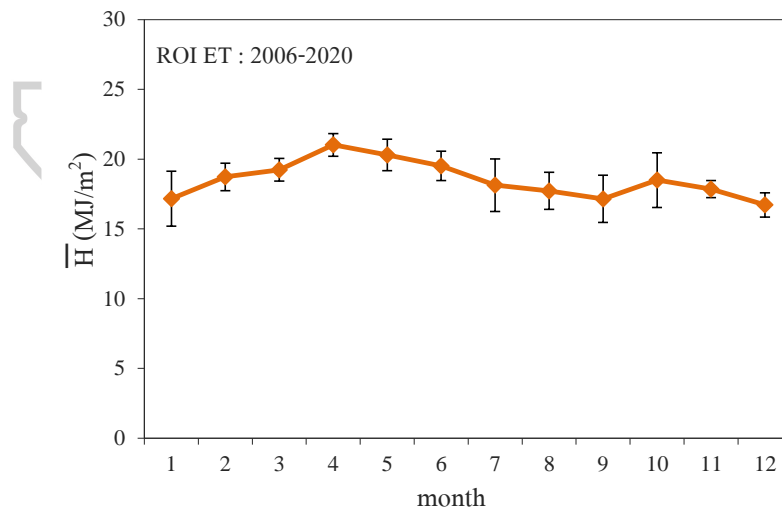
รูปที่ 29 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีนครพนม



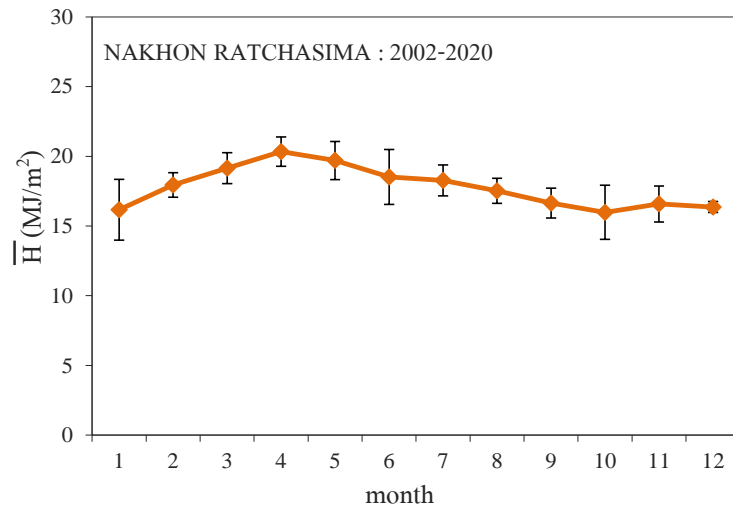
รูปที่ 30 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีขอนแก่น



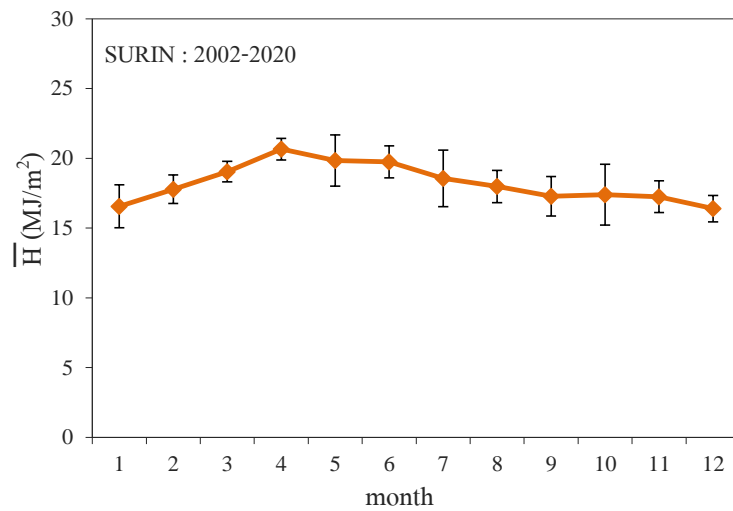
รูปที่ 31 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีอุบลราชธานี (สว่างวีระวงศ์)



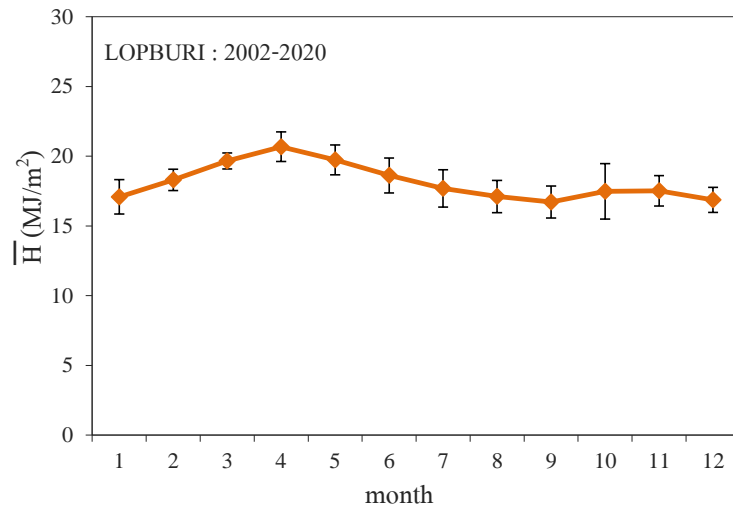
รูปที่ 32 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีร้อยเอ็ด



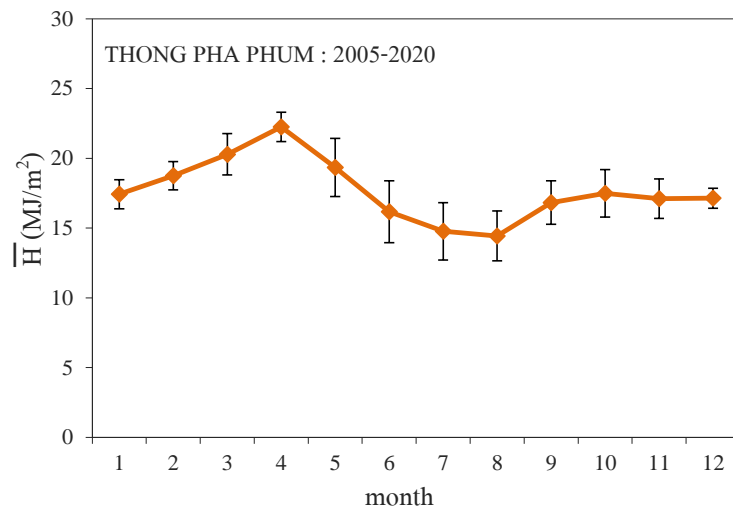
รูปที่ 33 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีนครราชสีมา



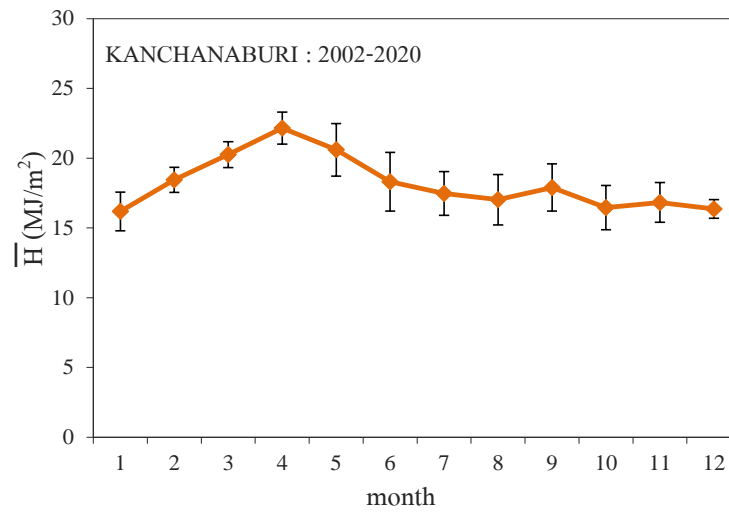
รูปที่ 34 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีสุรินทร์



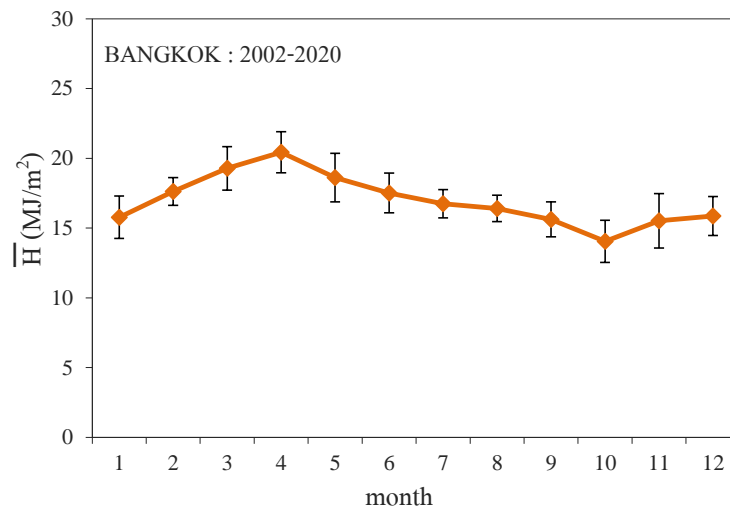
รูปที่ 35 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีลพบุรี



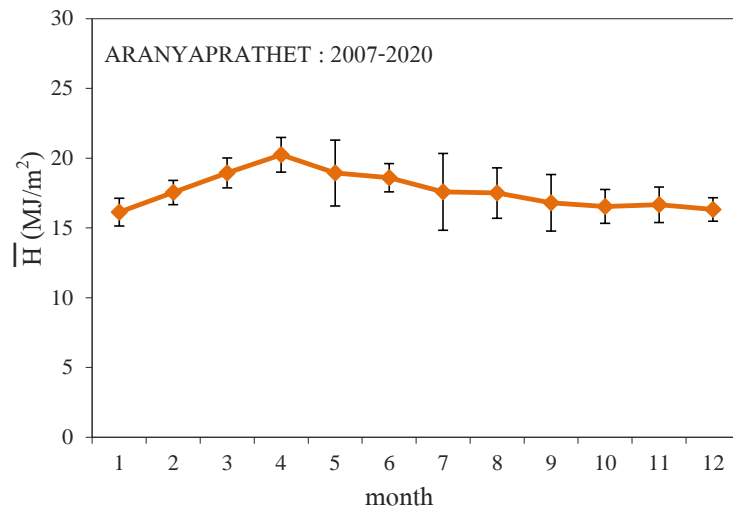
รูปที่ 36 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีกาญจนบุรี (ทองผาภูมิ)



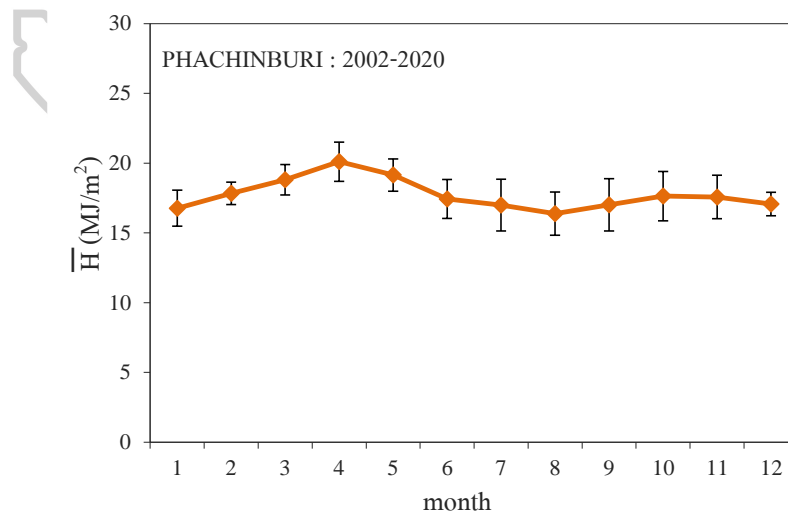
รูปที่ 37 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีกาญจนบุรี



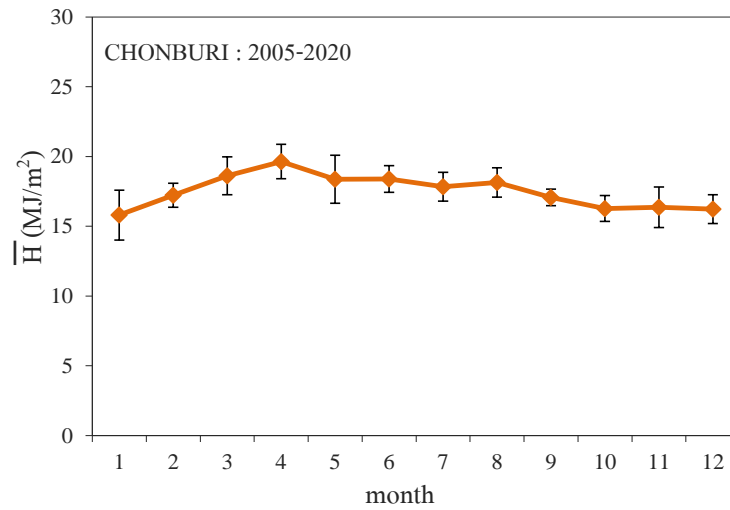
รูปที่ 38 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีกรุงเทพมหานคร



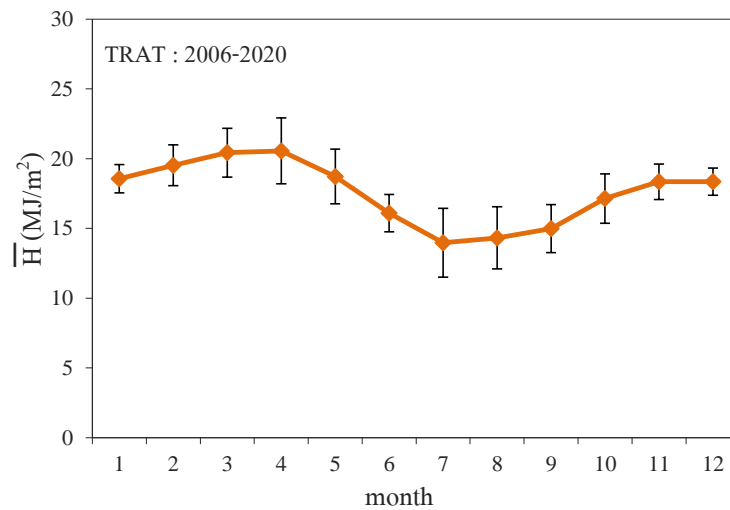
รูปที่ 39 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีสระแก้ว (อรัญประเทศ)



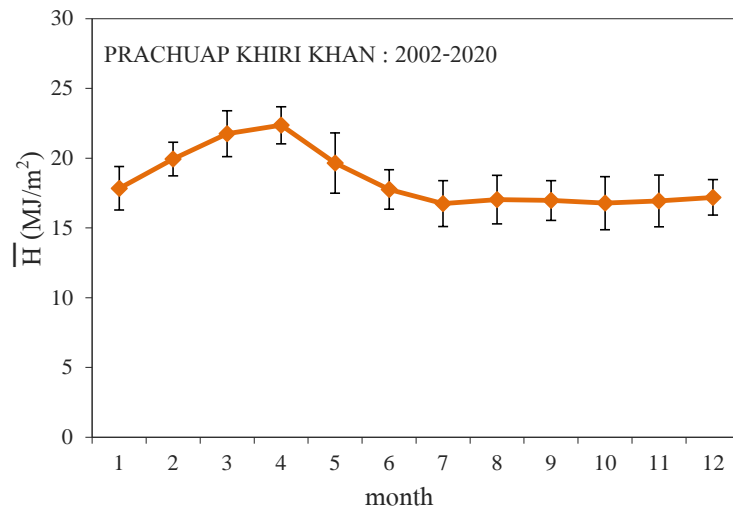
รูปที่ 40 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีปราจีนบุรี



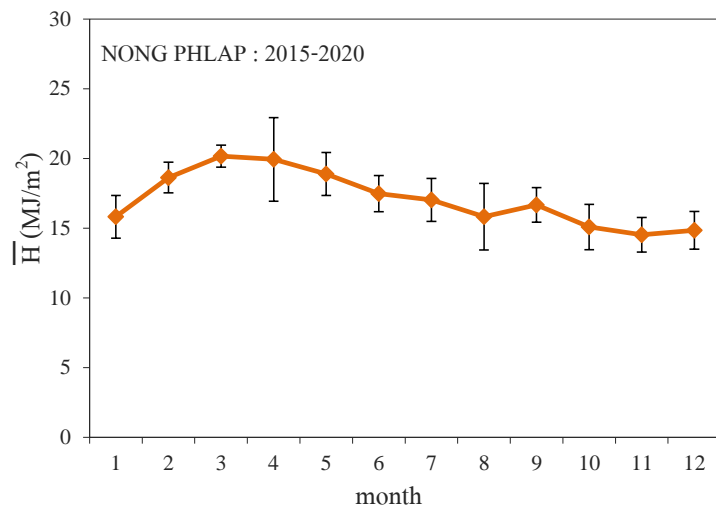
รูปที่ 41 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีชลบุรี



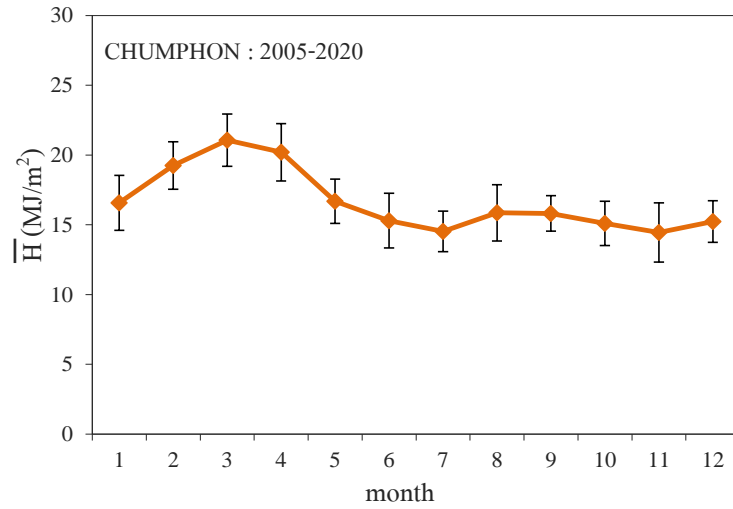
รูปที่ 42 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีตราด



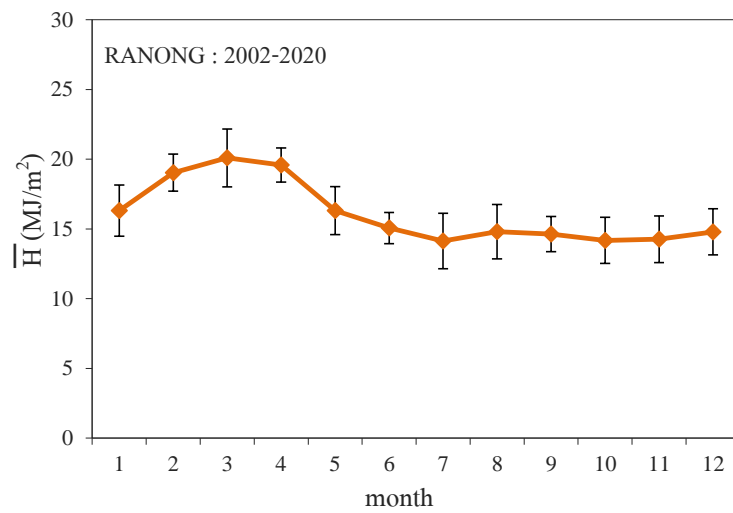
รูปที่ 43 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีประจวบคีรีขันธ์



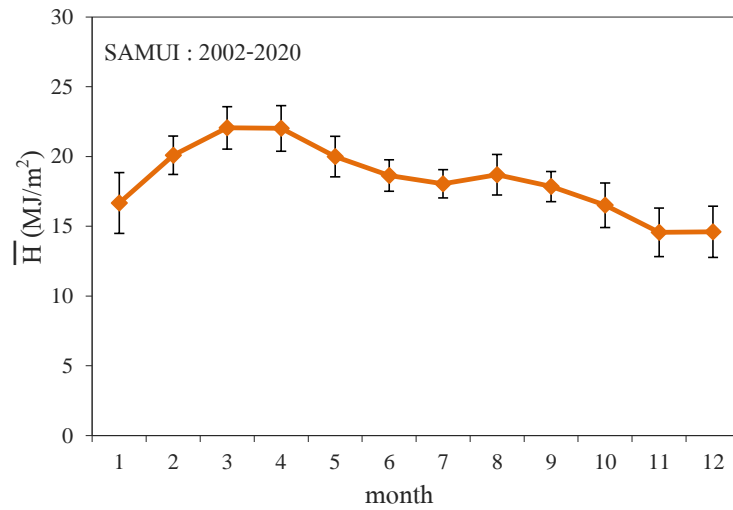
รูปที่ 44 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีประจวบคีรีขันธ์
(หนองพลับ)



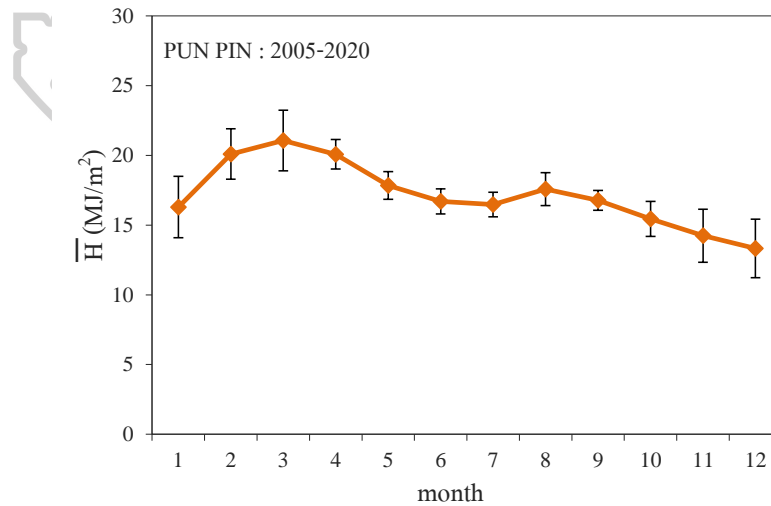
รูปที่ 45 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีชุมพร



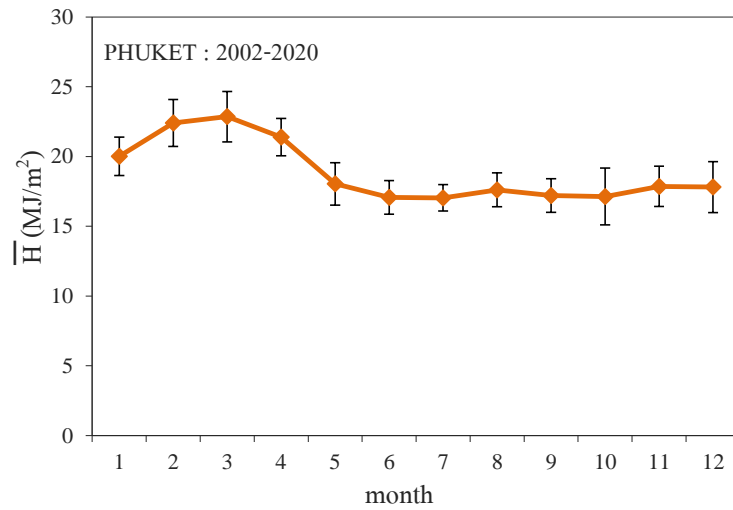
รูปที่ 46 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีระนอง



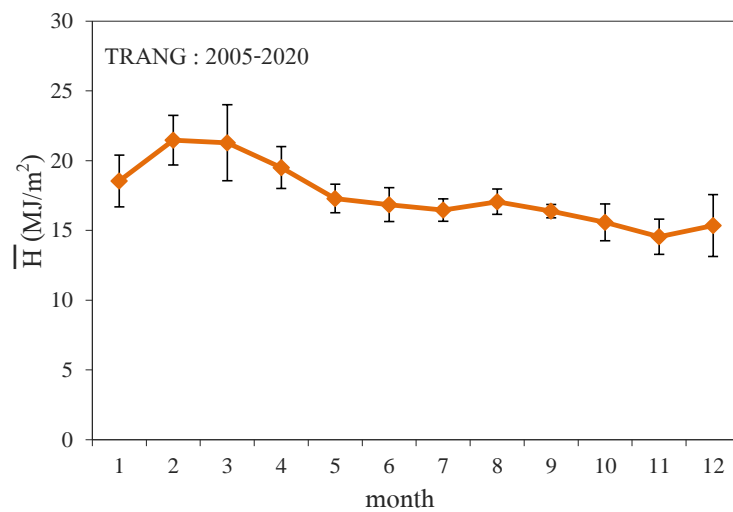
รูปที่ 47 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีสุราษฎร์ธานี (เกาะสมุย)



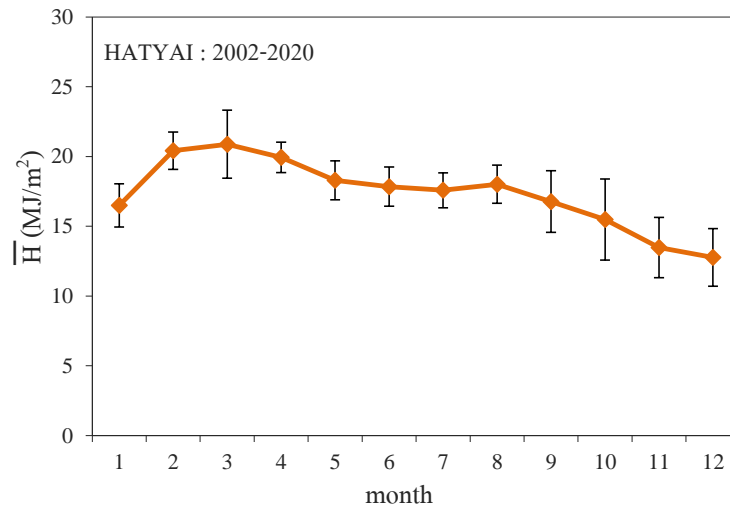
รูปที่ 48 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีสุราษฎร์ธานี (พุนพิน)



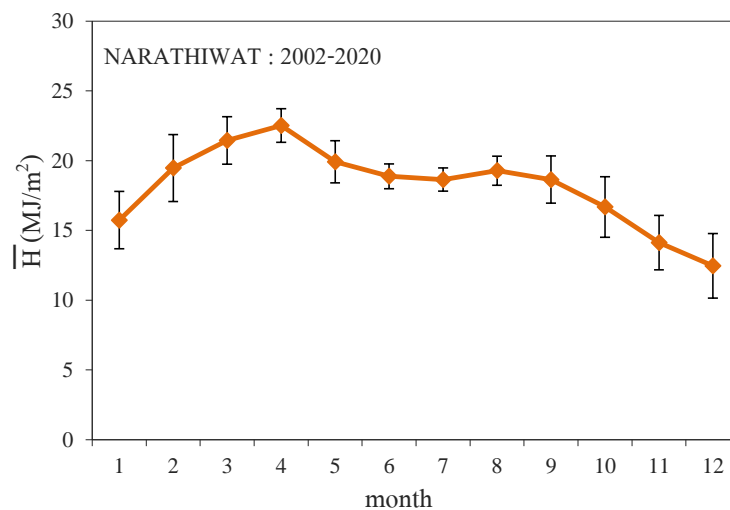
รูปที่ 49 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีภูเก็ต



รูปที่ 50 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีตรัง



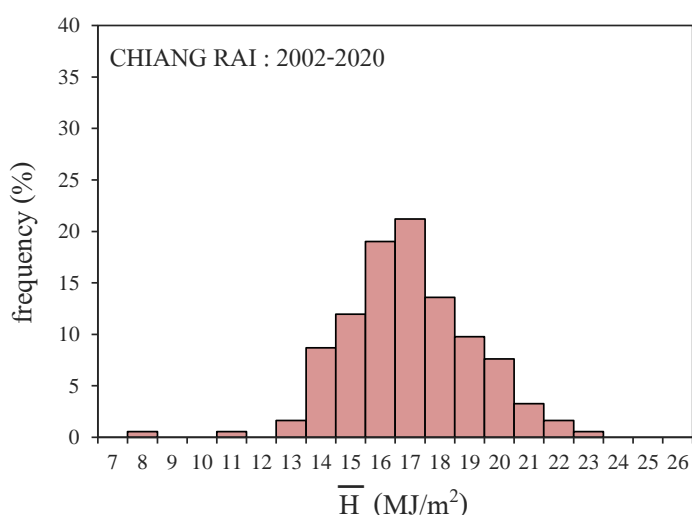
รูปที่ 51 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีสงขลา (หาดใหญ่)



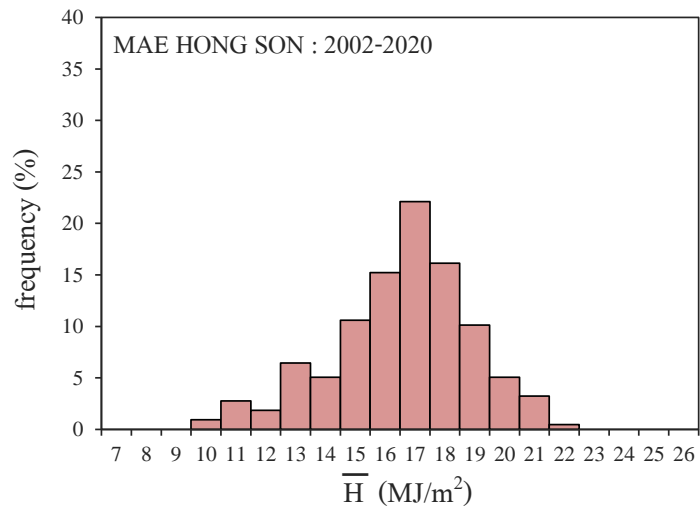
รูปที่ 52 การแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีนราธิวาส

ประเทศไทยซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และตั้งอยู่บริเวณเหนือเส้นศูนย์สูตร ทำให้มีลักษณะภูมิอากาศต่างกันเล็กน้อยเป็นผลให้รังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนในภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคกลาง มีลักษณะการแปรค่าคล้ายกัน กล่าวคือค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์จะเพิ่มขึ้นจากเดือนมกราคมไปถึงค่าสูงสุดในเดือนเมษายนหรือพฤษภาคม เนื่องจากเป็นช่วงเดือนที่ดวงอาทิตย์อยู่ในแนวตั้งฉากกับประเทศไทยทำให้ได้รับพลังงานจากดวงอาทิตย์มากที่สุด และรังสีรวมจากดวงอาทิตย์จะลดลงแล้วเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม ซึ่งเป็นช่วงเดือนที่ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ทำให้มีฝนและเมฆมาก จากนั้นกราฟจะลดลงจนถึงค่าต่ำสุดในเดือนธันวาคม เนื่องจากเดือนธันวาคมดวงอาทิตย์ทำมุมเอียงกับแนวเส้นปกติมากที่สุดไปทางทิศใต้ รวมถึงได้รับอากาศหนาวเย็นจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ สำหรับภาคใต้ลักษณะกราฟจะแตกต่างจากภาคอื่น ๆ ทั้งนี้เนื่องจากมีอากาศร้อนและฝนตกตลอดทั้งปี อย่างไรก็ตาม เมื่อทำศึกษาการเฉลี่ยค่ารังสีทั้ง 38 สถานี พบว่า ประเทศไทยมีศักยภาพด้านพลังงานรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ค่อนข้างสูง (ประมาณ 18 เมกะจูลต่อตารางเมตร)

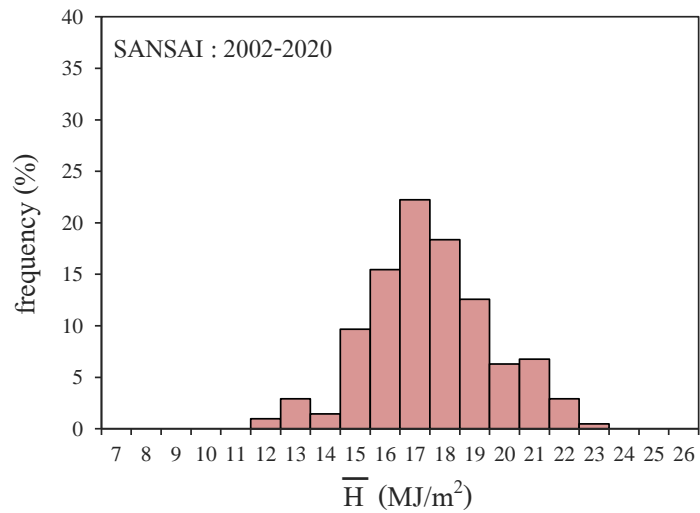
นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้ทำการวิเคราะห์การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือน ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 53-90



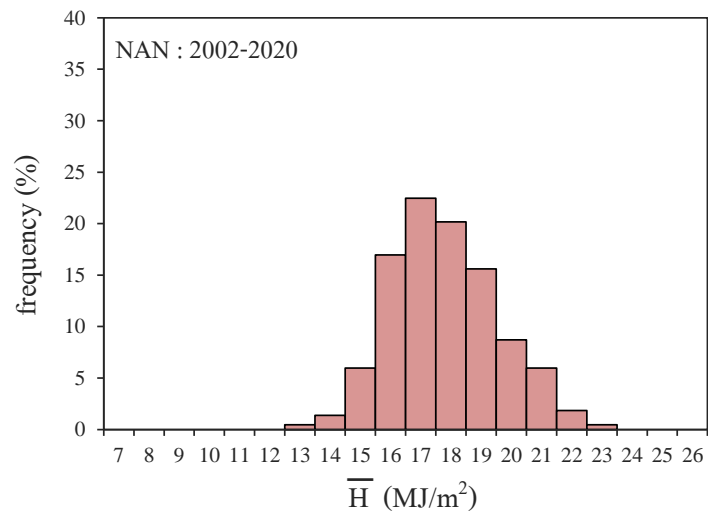
รูปที่ 53 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีเชียงใหม่



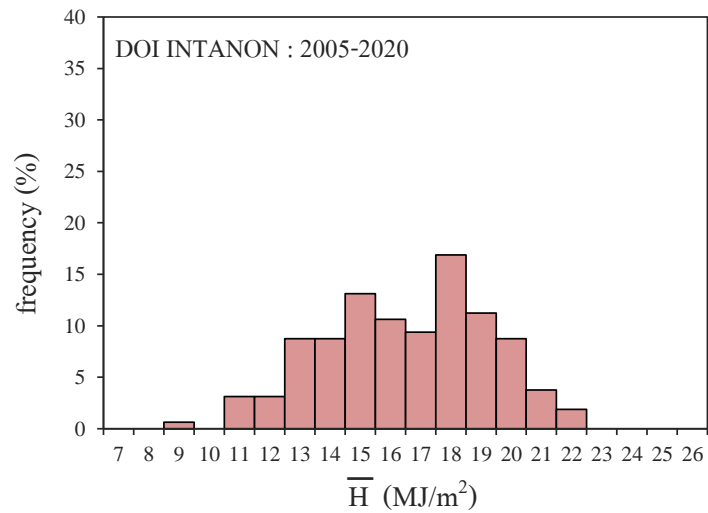
รูปที่ 54 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีแม่ฮ่องสอน



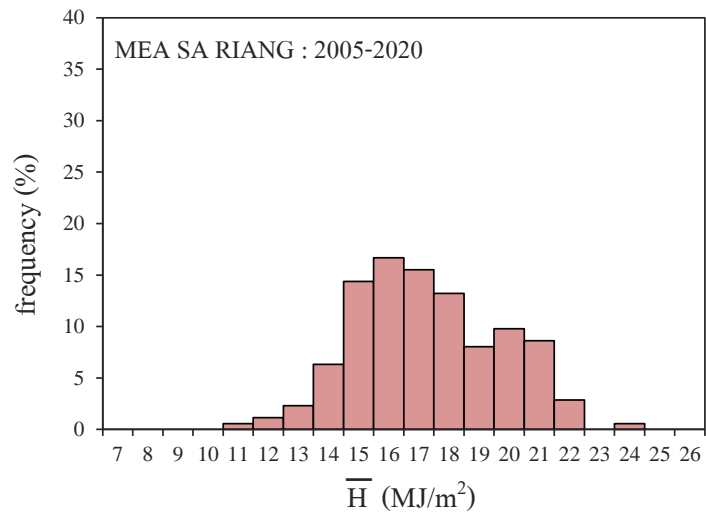
รูปที่ 55 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีเชียงใหม่ (สันทราย)



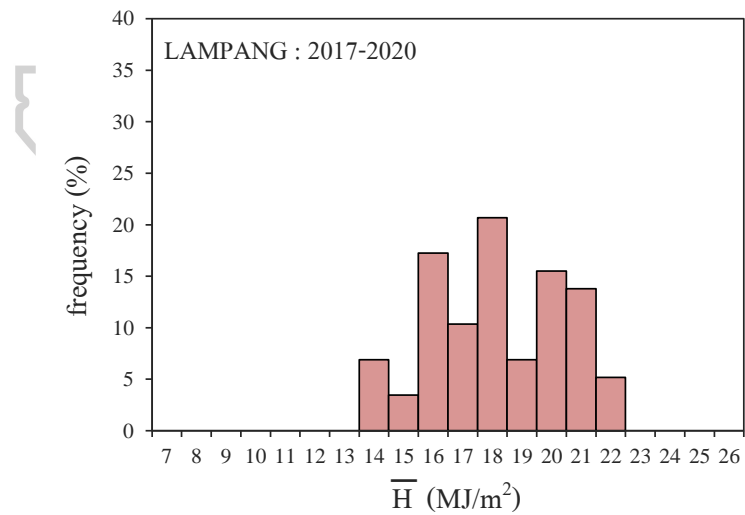
รูปที่ 56 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีน้ำ



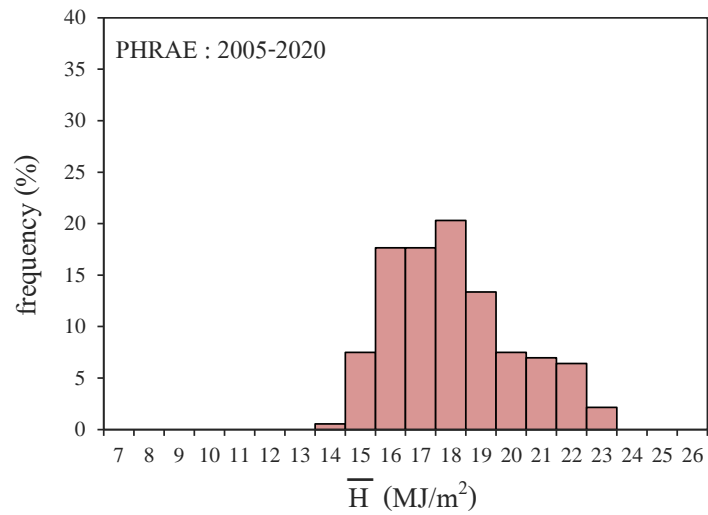
รูปที่ 57 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานี
เกษตรหลวงอินทนนท์



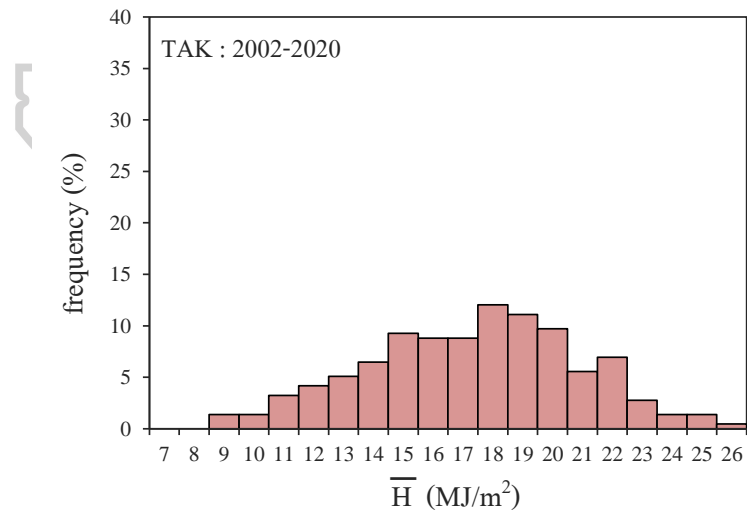
รูปที่ 58 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีแม่สะเรียง



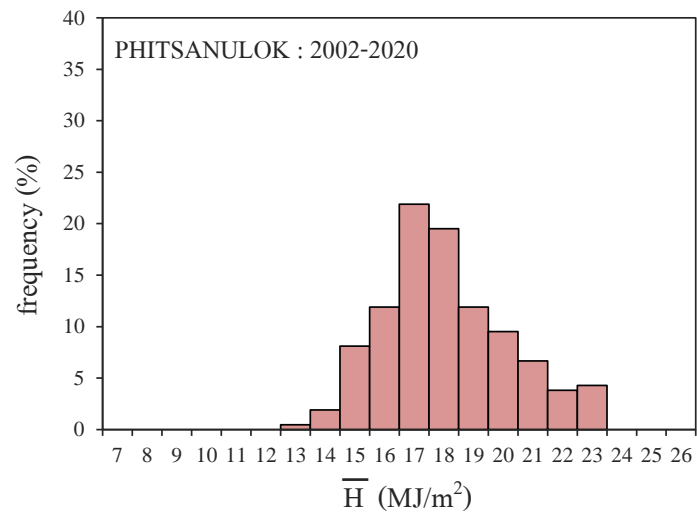
รูปที่ 59 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีลำปาง



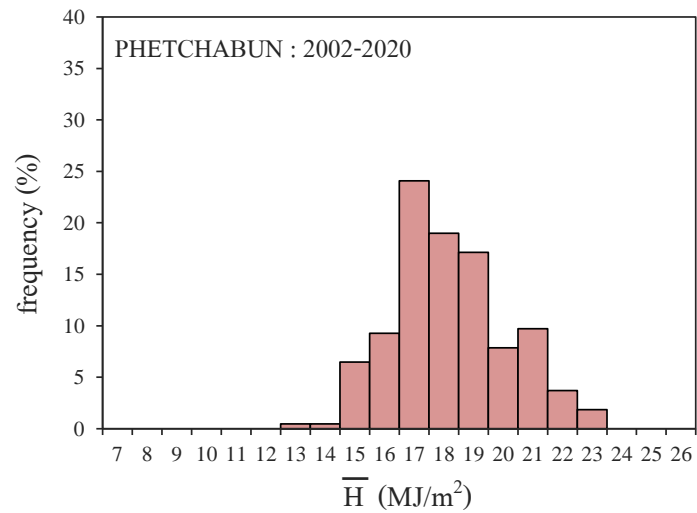
รูปที่ 60 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีแพร์



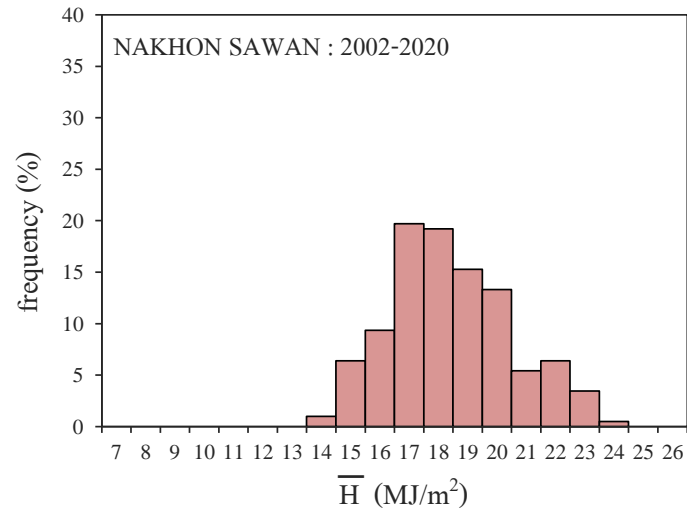
รูปที่ 61 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีตาก (ดอยมูเซอ)



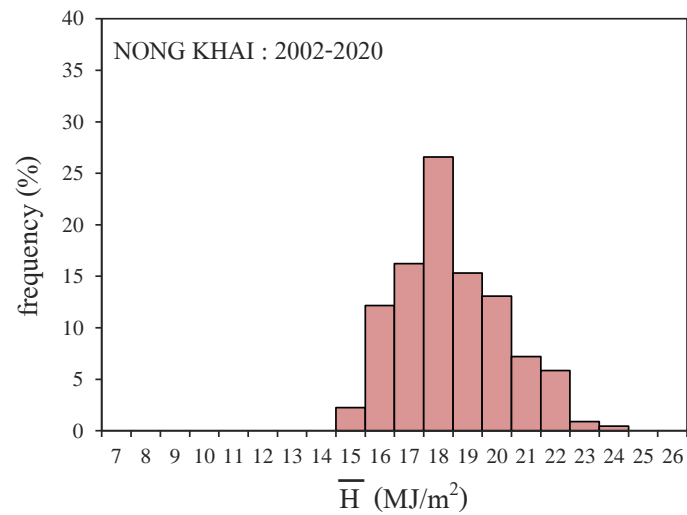
รูปที่ 62 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีพิษณุโลก



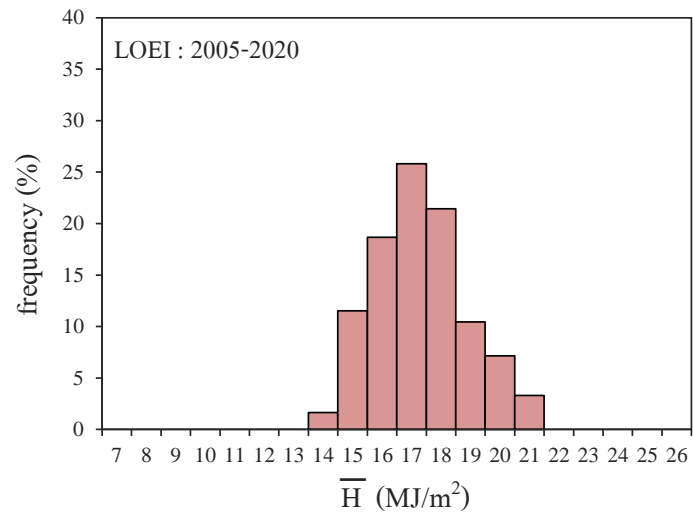
รูปที่ 63 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีเพชรบูรณ์



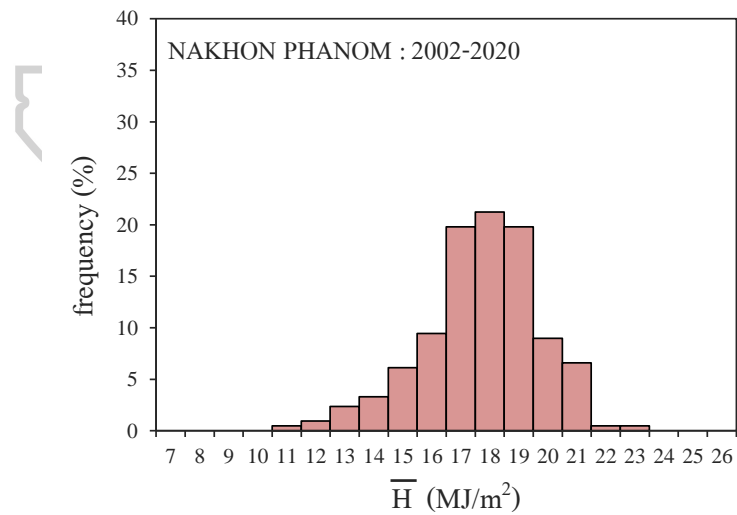
รูปที่ 64 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีนครสวรรค์



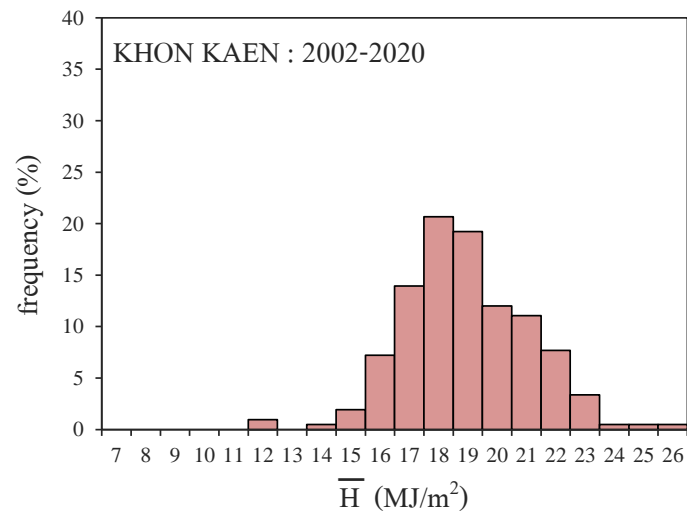
รูปที่ 65 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีหนองคาย



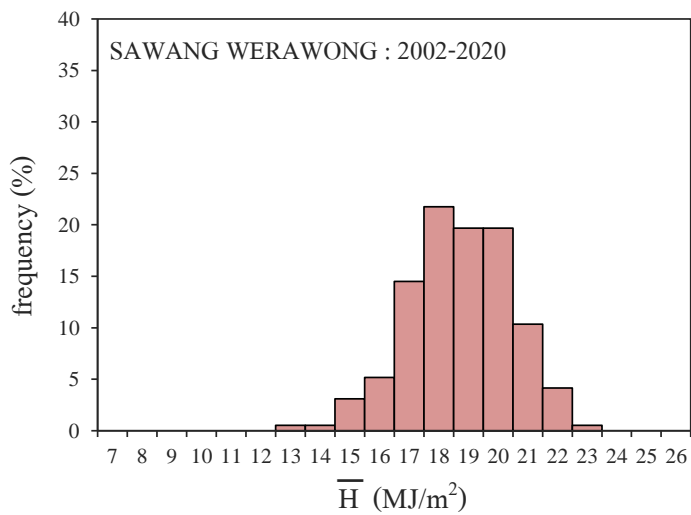
รูปที่ 66 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีเลย



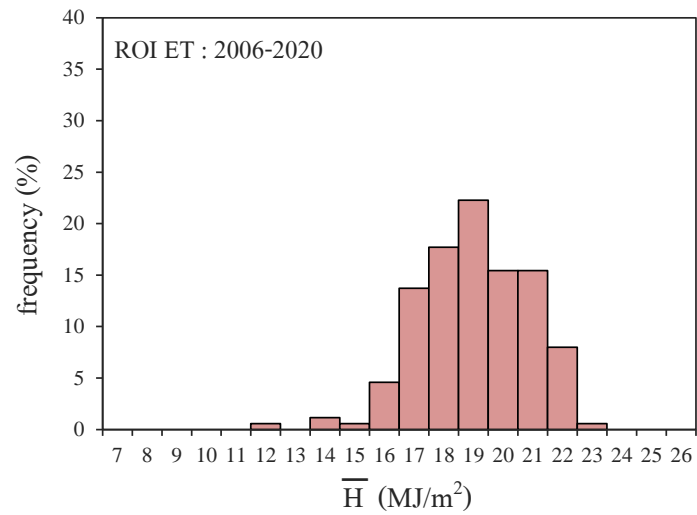
รูปที่ 67 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีนครพนม



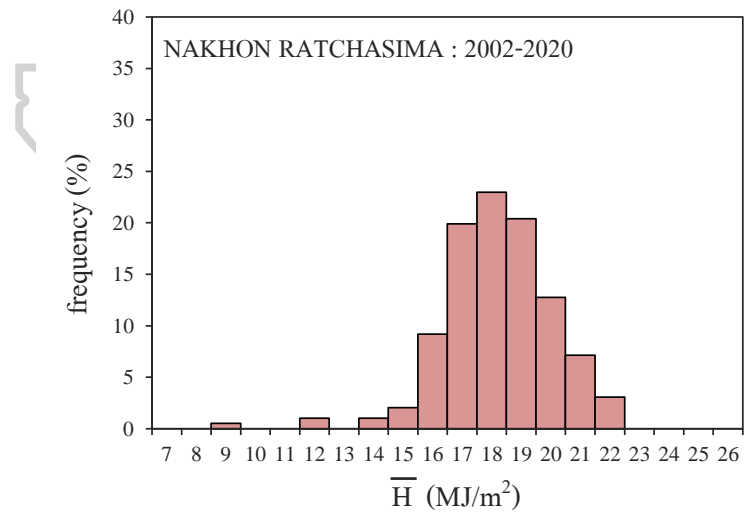
รูปที่ 68 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีขอนแก่น



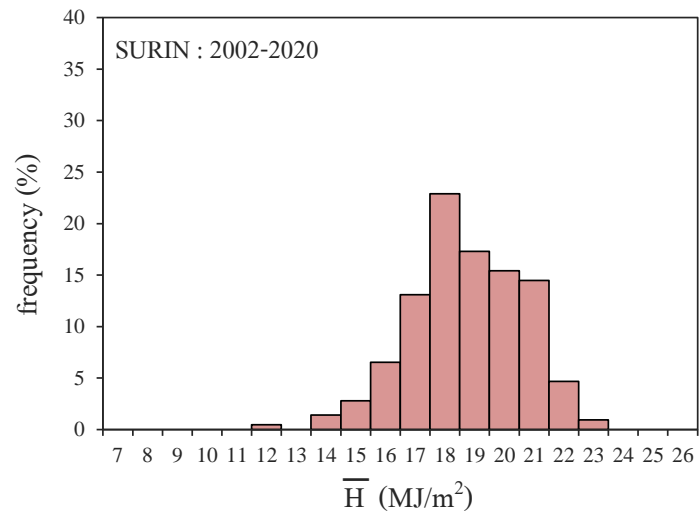
รูปที่ 69 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีอุบลราชธานี (สว่างวีระวงศ์)



รูปที่ 70 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีร้อยเอ็ด



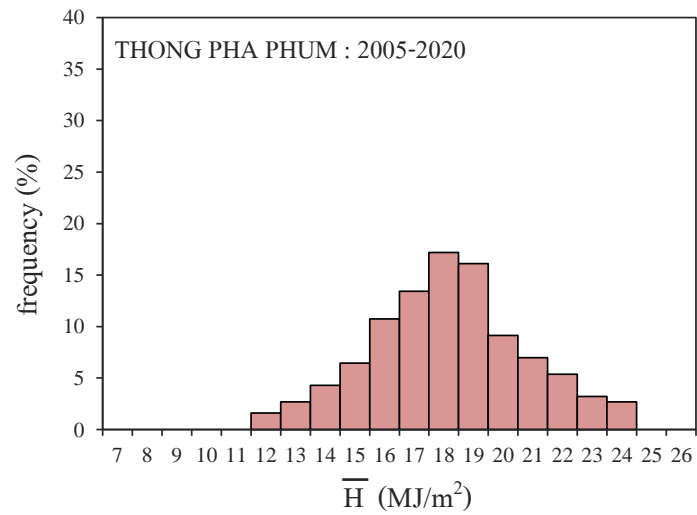
รูปที่ 71 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีนครราชสีมา



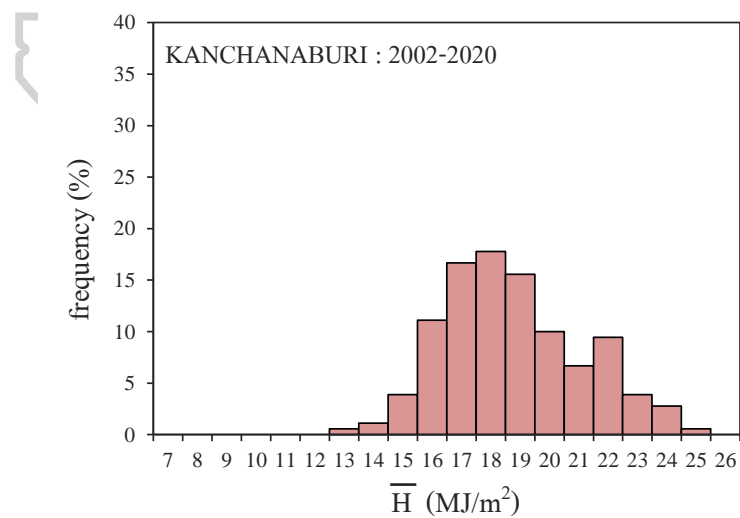
รูปที่ 72 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีสุรินทร์



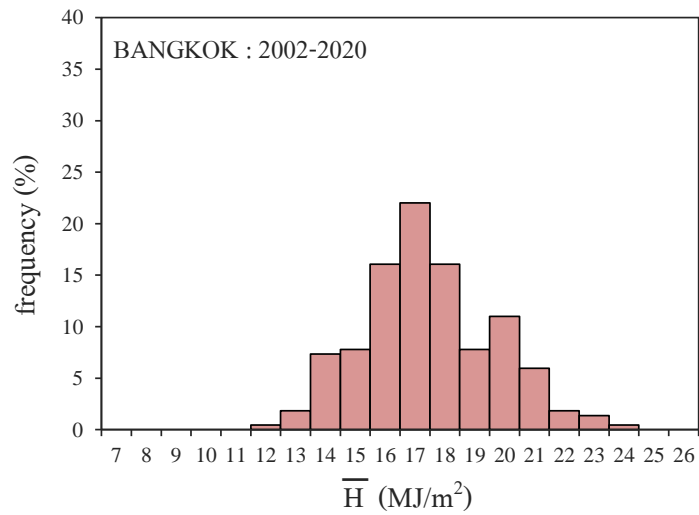
รูปที่ 73 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีลพบุรี



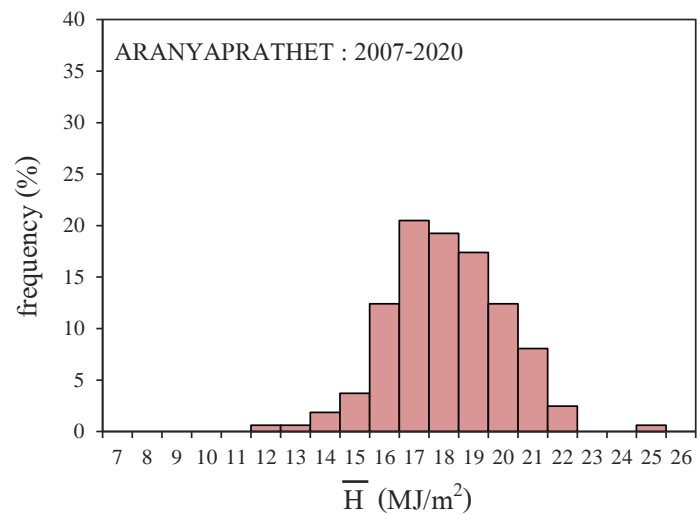
รูปที่ 74 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีกาญจนบุรี (ทองผาภูมิ)



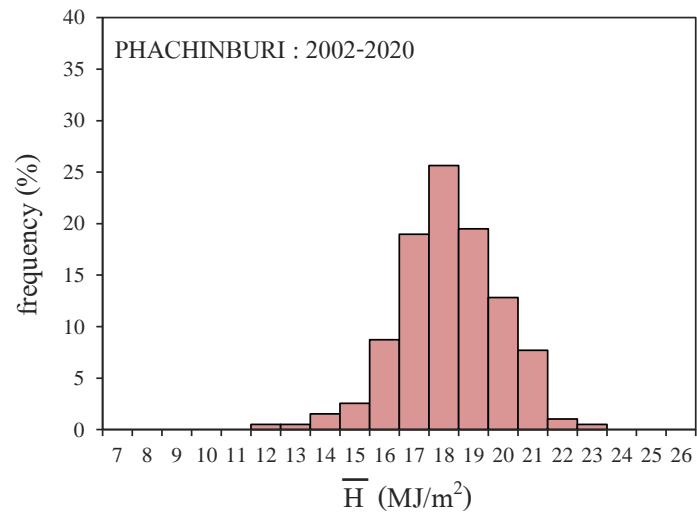
รูปที่ 75 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีกาญจนบุรี



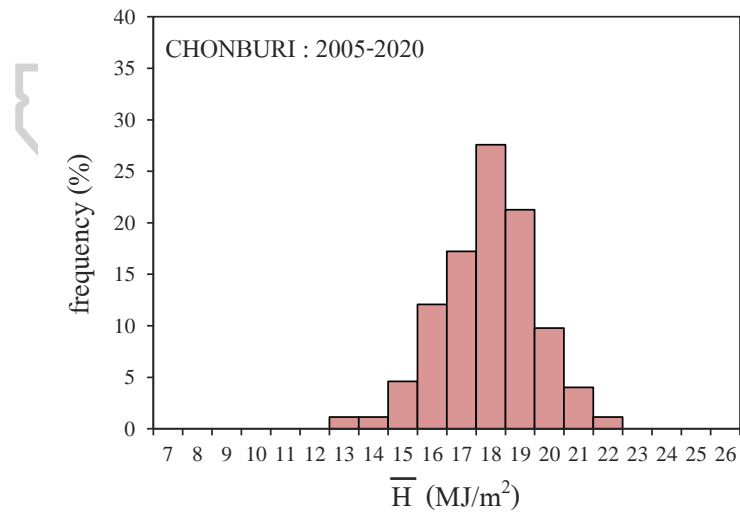
รูปที่ 76 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานี กรุงเทพมหานคร



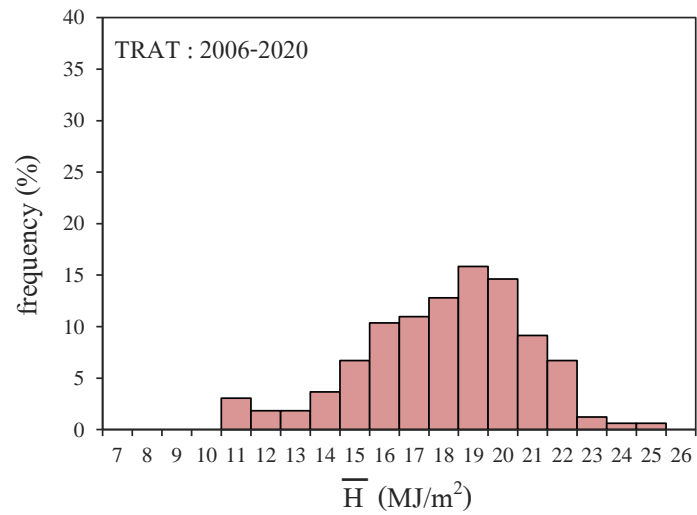
รูปที่ 77 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีสระแก้ว (อรัญประเทศ)



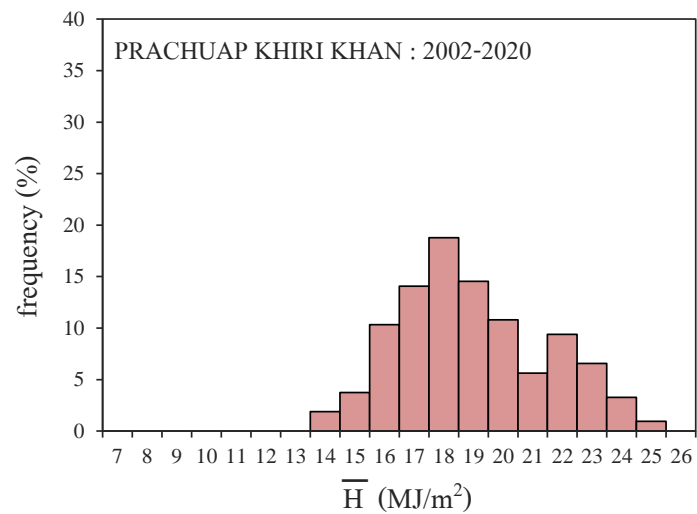
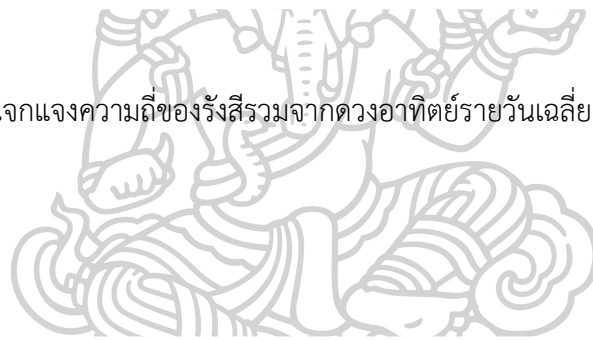
รูปที่ 78 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีปราจีนบุรี



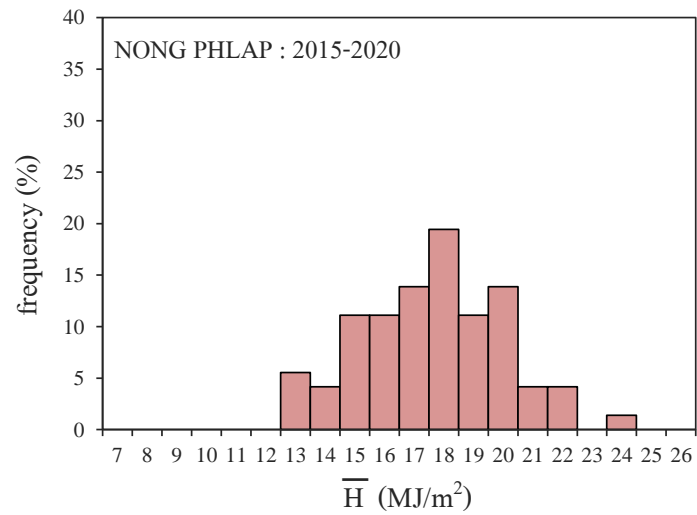
รูปที่ 79 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีชลบุรี



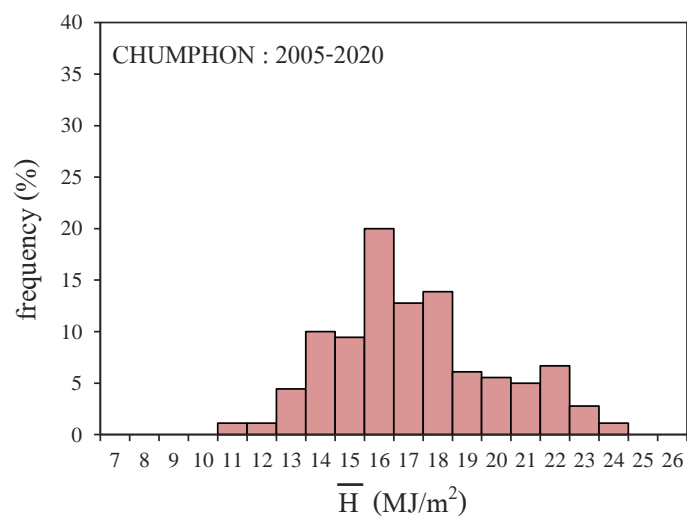
รูปที่ 80 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีตราด



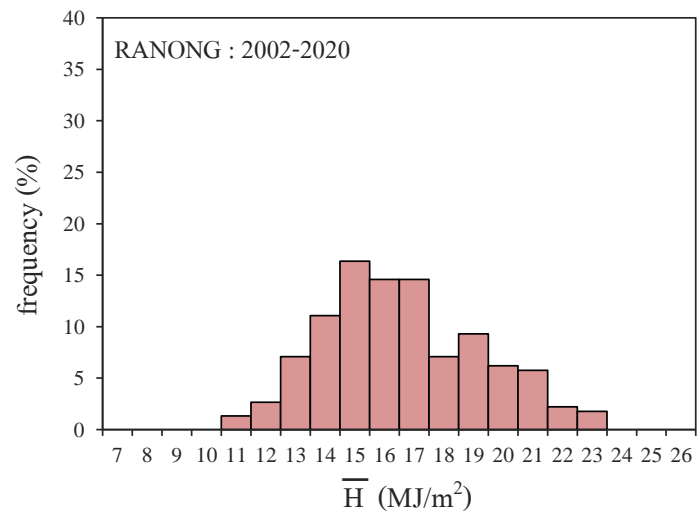
รูปที่ 81 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานี
ประจวบคีรีขันธ์



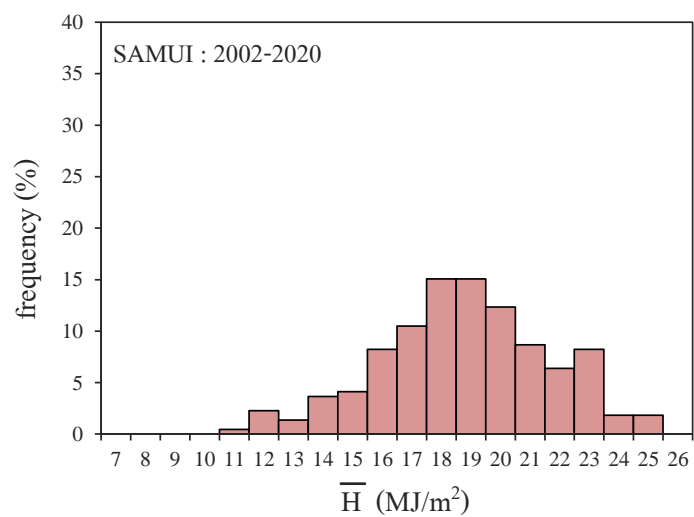
รูปที่ 82 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานี
ประจวบคีรีขันธ์ (หนองพลับ)



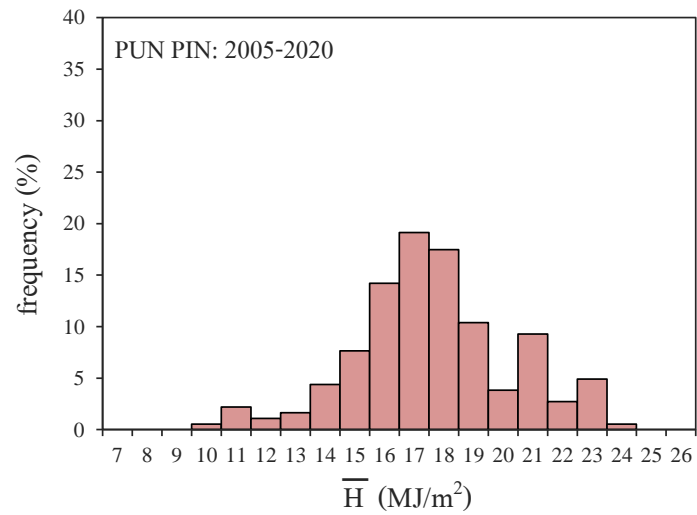
รูปที่ 83 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีชุมพร



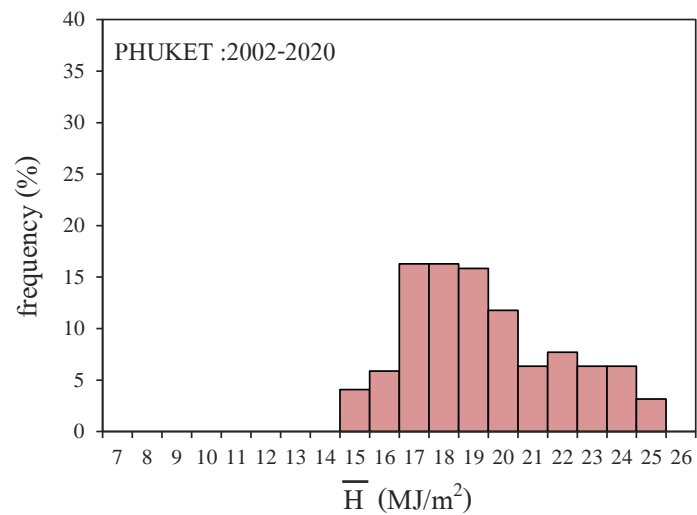
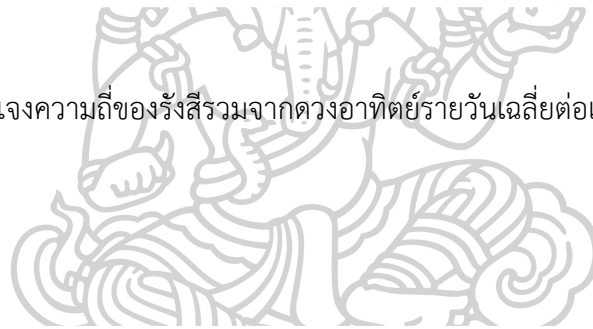
รูปที่ 84 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีระนอง



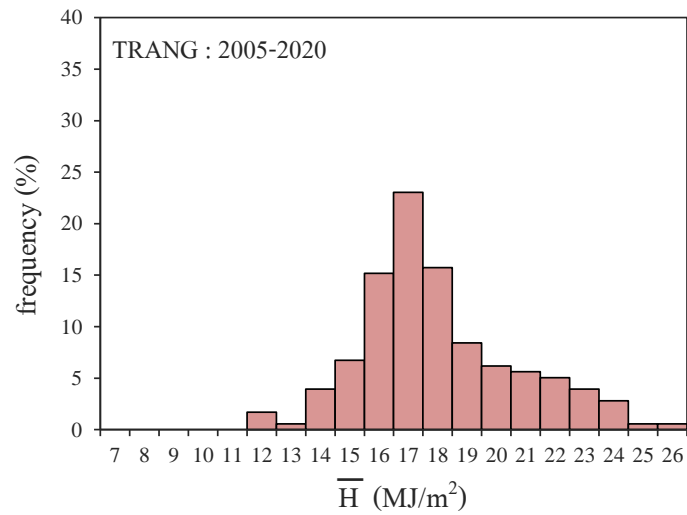
รูปที่ 85 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีสุราษฎร์ธานี (เกาะสมุย)



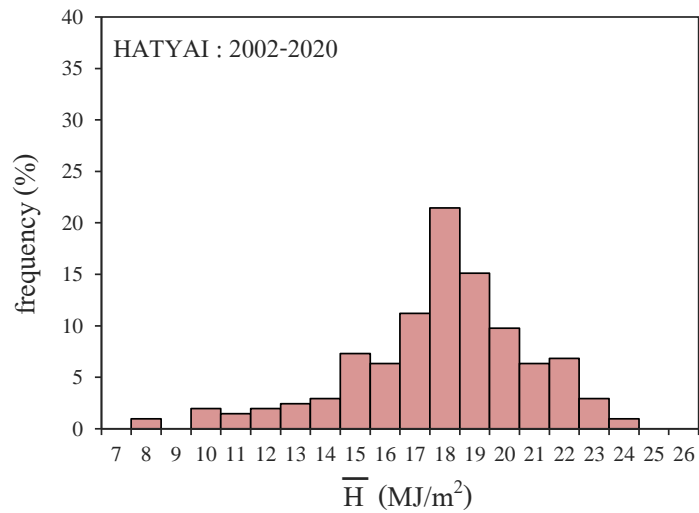
รูปที่ 86 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีสุราษฎร์ธานี (พุนพิน)



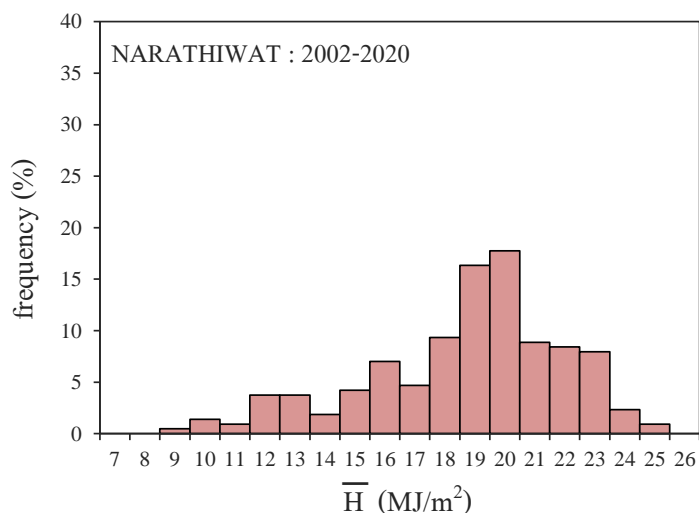
รูปที่ 87 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีภูเก็ต



รูปที่ 88 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีตรัง



รูปที่ 89 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีสงขลา (หาดใหญ่)



รูปที่ 90 การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีนราธิวาส

ผลจากการวิเคราะห์การแจกแจงความถี่ของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนพบว่า ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคกลาง มีลักษณะคล้ายกัน คือ กราฟการแจกแจงความถี่มีลักษณะค่อนข้างสมมาตร สำหรับภาคใต้กราฟจะเบ้ไปทางค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่มีค่าสูง

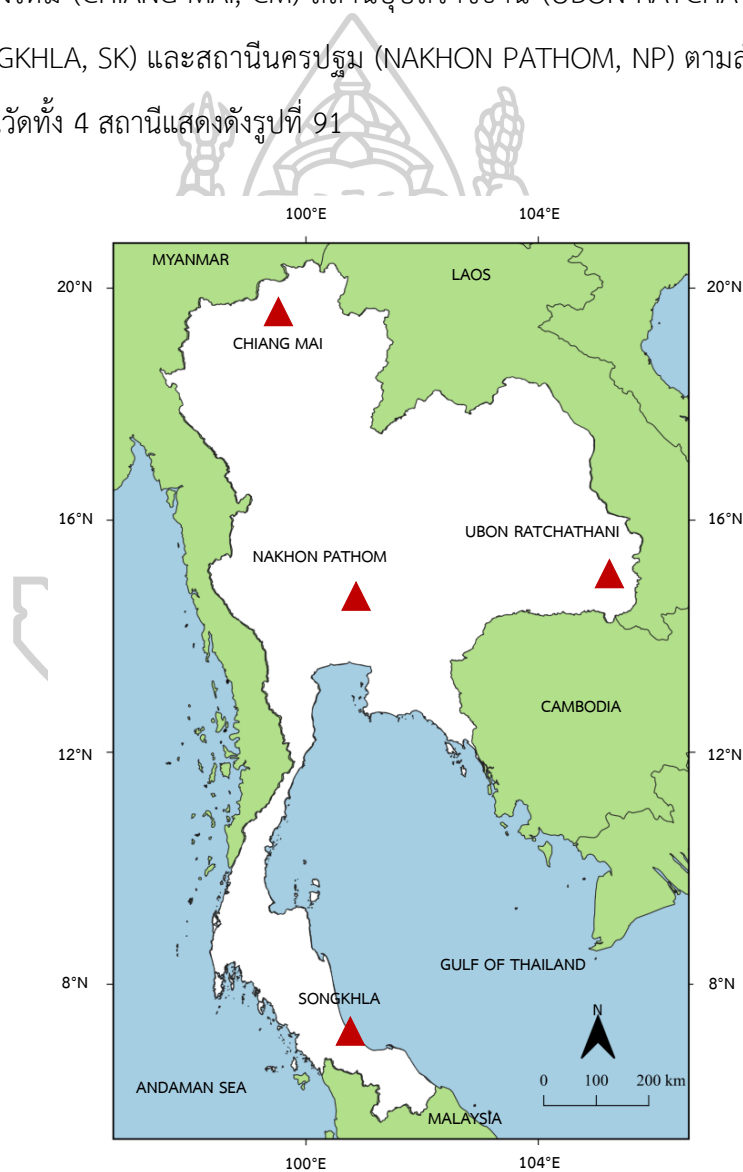
3.2 การพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ 4 สถานี ในภูมิภาคหลักของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การดำเนินงานวิจัยเพื่อพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ 4 สถานีในภูมิภาคหลักของมหาวิทยาลัยศิลปากร ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลจากการวัดภาคพื้นดินสำหรับนำมาใช้พัฒนาและทดสอบแบบจำลอง โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 รวบรวมข้อมูลจากการวัดภาคพื้นดิน

ลักษณะภูมิประเทศของประเทศไทยสามารถแบ่งออกเป็น 4 ภาคหลักตามลักษณะภูมิอากาศ ได้แก่ ภาคเหนือ ภาคกลาง ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคใต้ ดังนั้น ห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์บรรยากาศ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากรจึงได้ดำเนินการติดตั้ง

เครื่องวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์และเครื่องวัดตัวแปรทางบรรยากาศต่าง ๆ ที่มีผลต่อการแปรค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์ไว้ที่ 4 ภูมิภาคดังกล่าว ได้แก่ ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่ (18.78°N, 98.98°E) ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี (15.25°N, 104.87°E) ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา (7.2°N, 100.6°E) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม (13.82°N, 100.04°E) ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดให้ 4 สถานีวัดดังกล่าวเป็นตัวแทนสถานีหลักของแต่ละภูมิภาคในประเทศไทยและเรียกชื่อของแต่ละสถานีอย่างย่อว่า สถานีเชียงใหม่ (CHIANG MAI, CM) สถานีอุบลราชธานี (UBON RATCHATHANI, UB) สถานีสงขลา (SONGKHLA, SK) และสถานีนครปฐม (NAKHON PATHOM, NP) ตามลำดับ โดยตำแหน่งที่ตั้งของสถานีวัดทั้ง 4 สถานีแสดงดังรูปที่ 91



รูปที่ 91 ตำแหน่งที่ตั้งของ 4 สถานีที่ตั้งหลักของแต่ละภูมิภาคในประเทศไทย

3.2.1.1 ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์

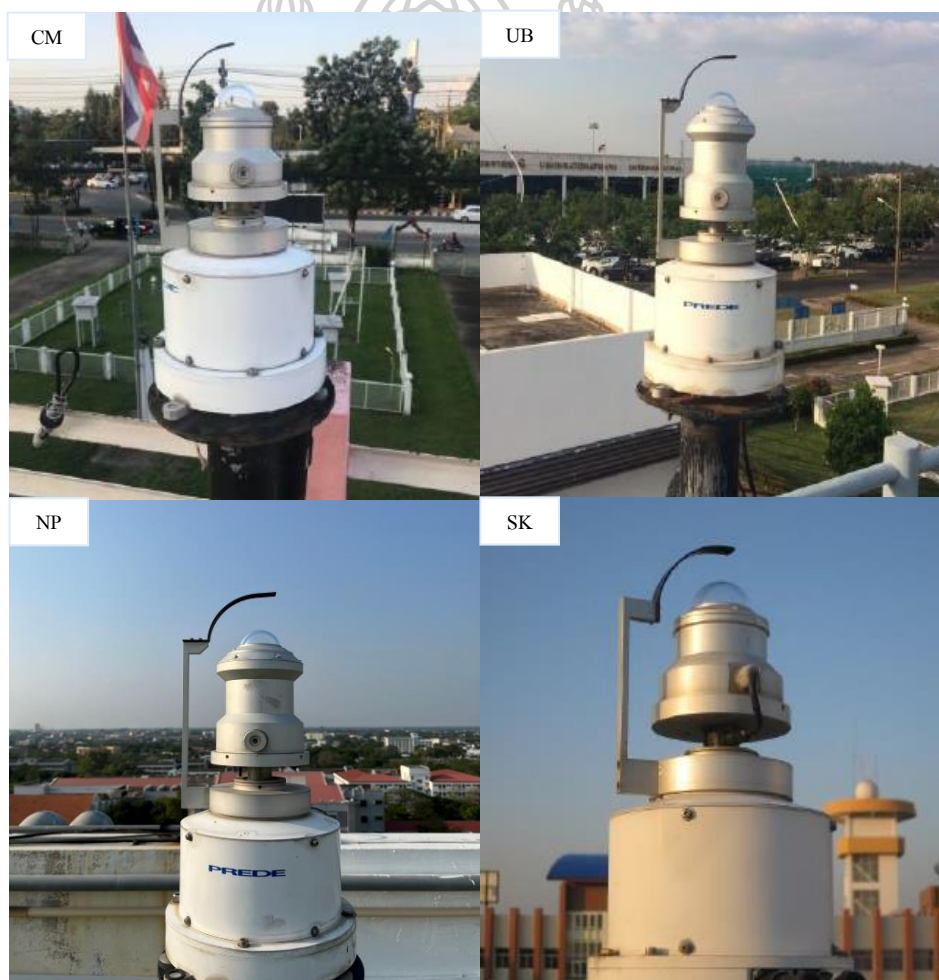
ผู้วิจัยจะใช้ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ที่ได้จากเครื่องวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ผลิตโดยบริษัท Kipp&Zonen รุ่น CM 21 ที่ติดตั้งอยู่บนดาดฟ้าของอาคารทั้ง 4 สถานี ดังแสดงในรูปที่ 92 และบันทึกสัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องวัดทุก ๆ 1 วินาทีด้วยเครื่องบันทึกสัญญาณของบริษัท Yokogawa รุ่น DX2000 โดยข้อมูลที่ได้ใน 1 วินาทีในหน่วย วัดต่อตารางเมตร จะนำมาเฉลี่ยเป็นข้อมูลรายวันเฉลี่ยต่อเดือนในหน่วย เมกะจูลต่อตารางเมตร เพื่อใช้ในการพัฒนาและทดสอบความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง



รูปที่ 92 เครื่องวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ที่ 4 สถานีในภูมิภาคหลักของประเทศไทย

3.2.1.2 ข้อมูลปริมาณเมฆ

เมฆมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับสถานที่และเวลาค่อนข้างสูง ดังนั้น ในงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยจึงจะใช้ข้อมูลปริมาณเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้า (cloud cover) ด้วยเครื่องถ่ายภาพท้องฟ้า (sky view) ยี่ห้อ เพรด (PREDE) รุ่น PVS-100 ที่ติดตั้งอยู่ 4 สถานีหลัก ดังแสดงในรูปที่ 93 เครื่องถ่ายภาพท้องฟ้าดังกล่าวจะถ่ายภาพครึ่งทรงกลมท้องฟ้าอัตโนมัติทุก 1 นาที ทั้งนี้ ผู้วิจัยจะนำภาพถ่ายทุก 1 นาทีที่ได้มาประมาณปริมาณเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้าด้วยสายตา แล้วแบ่งปริมาณเมฆในท้องฟ้าออกเป็น 10 ส่วนตามเกณฑ์จำแนกของอุตุนิยมหาวิทยาลัย โดยตัวอย่างภาพถ่ายที่ได้จากเครื่องถ่ายภาพท้องฟ้าแสดงดังรูปที่ 94



รูปที่ 93 เครื่องถ่ายภาพท้องฟ้าที่ 4 สถานีในภูมิภาคหลักของประเทศไทย



รูปที่ 94 ตัวอย่างภาพถ่ายท้องฟ้าที่ได้จากเครื่องถ่ายภาพท้องฟ้า

3.2.1.3 ข้อมูลปริมาณโอโซน ฝุ่นละออง และปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมาองค์การนาซา ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้จัดตั้งโครงการการตรวจวัดและเก็บบันทึกข้อมูลปริมาณฝุ่นละอองในบรรยากาศในเครือข่ายการวัดที่ชื่อว่า เครือข่ายแอโรเน็ต (aerosol robotic network, AERONET) กระจายตามพื้นที่ต่าง ๆ ทั่วโลกทั้ง บริเวณภาคพื้นดิน ชายฝั่ง และหมู่เกาะต่าง ๆ โดยใช้เครื่องเซ็นโฟโตมิเตอร์ (sunphotometer) รุ่น CE-318 ที่ผลิตโดยบริษัท ซีเมล อิเล็กทรอนิกส์ (CIMEL Electronique) ประเทศฝรั่งเศส (แสดงดังรูปที่ 95) เนื่องจากเครื่องวัดดังกล่าวสามารถทำการตรวจวัดได้อย่างแม่นยำและถือว่าเป็นเครื่องวัดมาตรฐานอ้างอิงสำหรับนำมาสอบเทียบและตรวจสอบความถูกต้องกับข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม (Gong, 2018) หลักการทำงานของเครื่องเซ็นโฟโตมิเตอร์ คือ จะทำการตรวจวัดทุก ๆ 15 นาที เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณฝุ่นละอองในบรรยากาศรายชั่วโมง โดยมีช่องสัญญาณ 8 ช่วงความยาวคลื่น ได้แก่ 340, 380, 440, 500, 675, 870, 940 และ 1020 นาโนเมตร ข้อมูลที่ได้แต่ละความยาวคลื่นจะถูกนำไปคำนวณหาปริมาณฝุ่นละอองที่อยู่ในรูปของค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง (aerosol optical depth, AOD) โดยองค์การนาซา นอกจากนี้ เครื่องวัดดังกล่าวยังสามารถตรวจวัดข้อมูลซึ่งนำมาหาปริมาณโอโซนและไอน้ำในบรรยากาศได้ ทั้งนี้ AERONET ได้เปิดบริการให้ผู้ที่สนใจทั่วไปสามารถเข้าถึงฐานข้อมูลได้ง่ายบนเว็บไซต์ <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/> ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยจะดาวน์โหลดข้อมูลทั้ง 3 ตัวแปรของ 4 สถานีหลักบนเว็บไซต์ดังกล่าว โดยจะเลือกใช้ที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร เนื่องจากเป็นค่าที่นิยมใช้ในงานด้านรังสีรวมจากดวงอาทิตย์



รูปที่ 95 เครื่องชั้นโฟโตมิเตอร์ที่ 4 สถานีในภูมิภาคหลักของประเทศไทย

3.2.1.4 ข้อมูลรังสีจากดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก

รังสีจากดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศเป็นค่าคงที่ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,366.1 วัตต์ต่อตารางเมตร (เสริม จันทรฉาย, 2557) เนื่องจากไม่มีผลจากการลดทอนจากตัวแปรต่าง ๆ ในชั้นบรรยากาศของโลก แต่ผลจากลักษณะสัณฐานของโลกที่เกือบเป็นทรงกลมและโคจรรอบดวงอาทิตย์เป็นวงรีทำให้ค่าดังกล่าวมีการแปรค่าขึ้นกับตำแหน่งละติจูดของพื้นที่และเวลาในรอบปี โดยการแปรค่าอยู่ระหว่าง 1,319 ถึง 1,430 วัตต์ต่อตารางเมตร ซึ่งตำแหน่งละติจูดเป็นค่าเฉพาะพื้นที่และเวลาในรอบปีสามารถใช้สมการทางคณิตศาสตร์คำนวณได้ ดังนั้นสมการสำหรับใช้คำนวณรังสีจากดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.16 ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2

3.2.2 การดำเนินการพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ 4 สถานีในภูมิภาคหลักของประเทศไทย

หลังจากรวบรวมข้อมูลที่นำมาใช้พัฒนาและทดสอบแบบจำลอง ได้แก่ ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ (H) รังสีจากดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (H_0) ปริมาณเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้า (C) ปริมาณโอโซน (O_3) ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง (AOD) และปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ (W) โดยข้อมูลที่ทำการวัดแตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลาของแต่ละเครื่องวัดในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยจะนำข้อมูลมาเฉลี่ยเป็นข้อมูลรายวันเฉลี่ยต่อเดือน เพื่อนำมาใช้พัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือน จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 2 ชุด โดยชุดแรกผู้วิจัยได้เลือกใช้ข้อมูลที่รวบรวมจากสถานีนครปฐมสำหรับใช้ในการพัฒนาแบบจำลองจำนวน 2 ปี ตั้งแต่ปี 2018-2019 ส่วนข้อมูลชุดที่สองเป็นข้อมูลที่ใช้สำหรับทดสอบความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองในแต่ละสถานี โดยใช้ข้อมูลปี 2020 จำนวน 1 ปี

ในการพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ 4 สถานีในภูมิภาคหลักในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยจะใช้ตัวแปรอินพุตต่าง ๆ ได้แก่ รังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือน (\bar{H}) ปริมาณเมฆปกคลุมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (\bar{C}) รังสีจากดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (\bar{H}_0) ปริมาณโอโซนรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (\bar{O}_3) ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (\bar{AOD}) และปริมาณไอน้ำรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (\bar{W}) จากนั้นผู้วิจัยจะเปรียบเทียบแบบจำลองที่มีความเหมาะสมที่สุด โดยเลือกใช้แบบจำลอง ANN แบบเพอร์เซปตรอนหลายชั้นและมีการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับที่ปรากฏในโปรแกรมสำเร็จรูป WEKA รวมทั้งแบบจำลอง ARX แบบจำลอง ARMAX แบบจำลอง OE แบบจำลอง Box-Jenkins และแบบจำลอง NARX ที่ปรากฏในโปรแกรมสำเร็จรูป MATLAB โดยรายละเอียดของแบบจำลองต่าง ๆ แสดงไว้ในหัวข้อที่ 2.6 บทที่ 2

3.2.3 การทดสอบแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ 4 สถานีในภูมิภาคหลักของมหาวิทยาลัยศิลปากร

ในทางปฏิบัติการพยากรณ์หรือประมาณค่าสิ่งที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคตได้อย่างแม่นยำสมบูรณ์นั้นเป็นไปได้ยาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีตัวชี้วัดที่ใช้บ่งชี้ทางสถิติที่ช่วยในการตัดสินใจ โดยตรวจสอบความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือน ในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้ค่าทางสถิติที่แสดงค่าความคลาดเคลื่อนดังต่อไปนี้

1) ค่ารากที่สองของค่าเบี่ยงเบนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Difference, RMSD) สามารถคำนวณได้ดังนี้ (Gueymard, 2014)

$$\text{RMSD} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{H}_{i,\text{model}} - \bar{H}_{i,\text{measured}})^2}{N}}}{\frac{\sum_{i=1}^N \bar{H}_{i,\text{measured}}}{N}} \times 100\% \quad (3.2)$$

เมื่อ	RMSD	คือ	ค่ารากที่สองของค่าเบี่ยงเบนกำลังสองเฉลี่ย (%)
	$\bar{H}_{i,\text{model}}$	คือ	ค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลอง (เมกะจูลต่อตารางเมตร)
	$\bar{H}_{i,\text{measured}}$	คือ	ค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากการวัด (เมกะจูลต่อตารางเมตร)
	N	คือ	จำนวนข้อมูลทั้งหมด (-)

เนื่องจากการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนแบบ RMSD มีการยกกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณและการวัด ดังนั้น RMSD จึงมีค่าเป็นบวกเสมอ โดยแบบจำลองที่ดีต้องได้ค่า RMSD ใกล้เคียงกับศูนย์

2) ค่าความเอนเอียงเฉลี่ย (Mean Bias Difference, MBD) สามารถคำนวณได้ดังนี้ (Gueymard, 2014)

$$\text{MBD} = \frac{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{H}_{i,\text{model}} - \bar{H}_{i,\text{measured}})}{N}}{\frac{\sum_{i=1}^N \bar{H}_{i,\text{measured}}}{N}} \times 100\% \quad (3.3)$$

เมื่อ MBD คือ ค่าความเอนเอียงเฉลี่ย (%)

ค่าความคลาดเคลื่อนที่อยู่ในรูป MBD มีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 ถ้าค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าข้อมูลดังกล่าวมีค่าจากการคำนวณมากกว่าการวัด และถ้าค่าเข้าใกล้ -1 แสดงว่าข้อมูลที่ได้จากการวัด

มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยแบบจำลองที่ดีจะต้องมีค่า MBD เข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งหมายความว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองไม่มีความเอนอียงไปด้านใดด้านหนึ่งมากนัก

ผลจากการวิเคราะห์หารูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองที่ใช้การเรียนรู้แบบเครื่องกลด้วยโปรแกรม MATLAB ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ 4 สถานีหลักในงานวิจัยครั้งนี้ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองที่ใช้การเรียนรู้แบบเครื่องกล (machine learning models) ที่ใช้สำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ 4 สถานีในภูมิภาคหลักของมหาวิทยาลัยศิลปากร

แบบจำลอง	รูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์
ARX	$\begin{aligned} \bar{H}(t) = & -0.201\bar{H}(t-1) + 0.005\bar{H}(t-2) + 0.424\bar{H}(t-3) + 0.034\bar{H}(t-4) \\ & -1.243\bar{C}(t) - 0.030\bar{C}(t-1) + 1.188\bar{H}_0(t) - 0.220\bar{H}_0(t-1) - \\ & 0.142\bar{O}_3(t) + 0.118\bar{O}_3(t-1) + 4.012\overline{AOD}(t) + 2.104\overline{AOD}(t-1) \\ & -1.182\bar{W}(t) - 0.986\bar{W}(t-1) \end{aligned} \quad (3.4)$
ARMAX	$\begin{aligned} \bar{H}(t) = & -0.013\bar{H}(t-1) + 0.014\bar{H}(t-2) + 0.513\bar{H}(t-3) - 1.309\bar{C}(t-1) \\ & + 0.570\bar{H}_0(t-1) - 0.003\bar{O}_3(t-1) + 1.492\overline{AOD}(t-1) \\ & - 0.998\bar{W}(t-1) + \bar{e}(t) - 0.938\bar{e}(t-1) \end{aligned} \quad (3.5)$
OE	$\begin{aligned} \bar{H}(t) = & (-1.452\bar{C}(t) - 0.043\bar{H}(t-1)) + (2.250\bar{H}_0(t) + 0.952\bar{H}(t-1)) \\ & + (-0.089\bar{O}_3(t) - 0.807\bar{H}(t-1)) + (6.555\overline{AOD}(t) - 0.776\bar{H}(t-1)) \\ & + (-1.540\bar{W}(t) - 0.962\bar{H}(t-1)) \end{aligned} \quad (3.6)$
Box-Jenkins	$\begin{aligned} \bar{H}(t) = & -1.030\bar{C}(t) + 0.400\bar{H}_0(t) + 0.062\bar{O}_3(t) - 3.893\overline{AOD}(t) \\ & - 1.267\bar{W}(t) + (0.962\bar{e}(t-1) + 0.835\bar{H}(t-1)) \end{aligned} \quad (3.7)$

เมื่อ \bar{H} คือ รังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือน (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

\bar{C} คือ ปริมาณเมฆปกคลุมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (-)

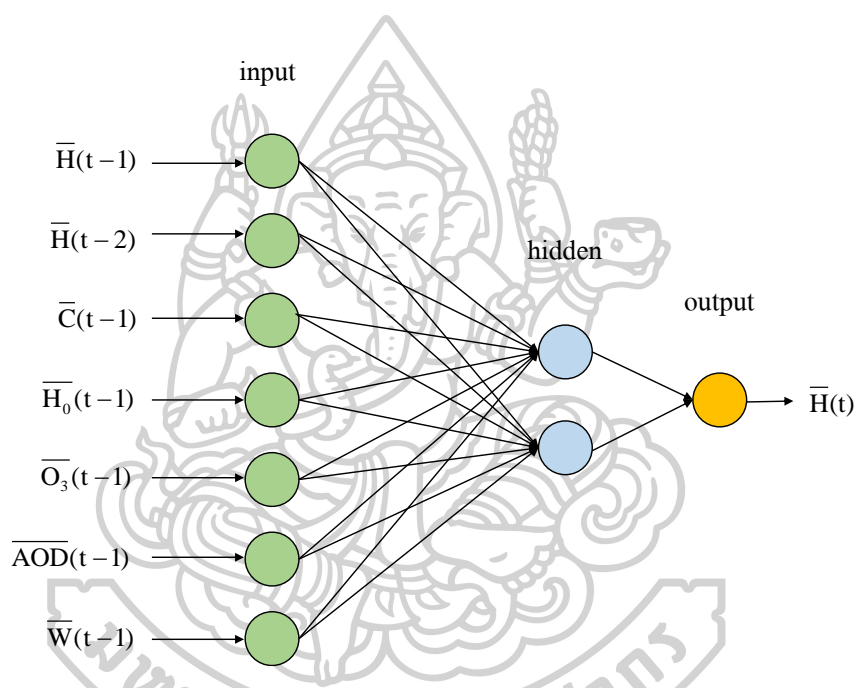
\bar{H}_0 คือ รังสีจากดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

\bar{O}_3 คือ ปริมาณโอโซนรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (ดีอบสัน)

\overline{AOD} คือ ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (-)

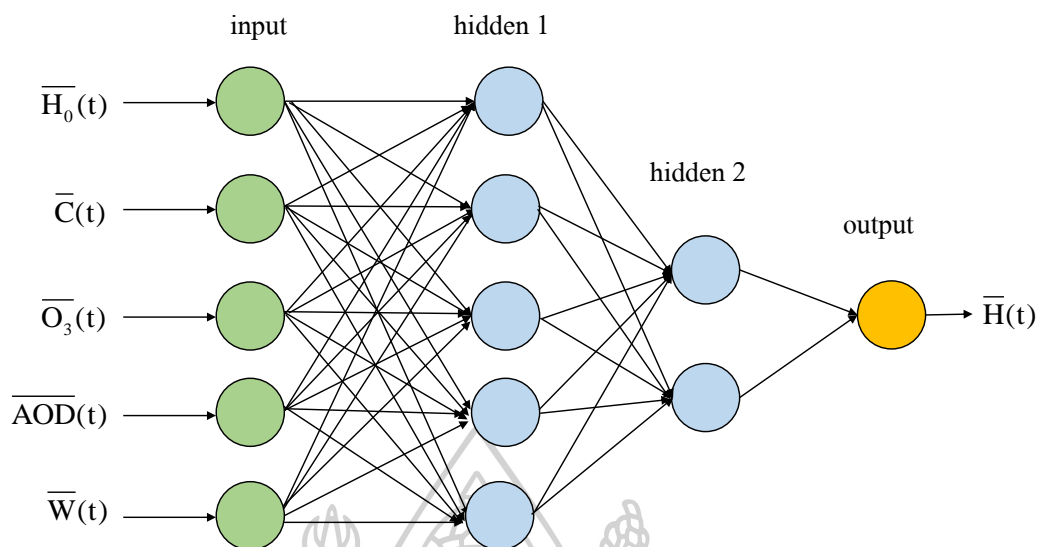
\bar{W} คือ ปริมาณไอน้ำรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (เซนติเมตร)

โครงสร้างของแบบจำลอง NARX ที่เหมาะสมประกอบด้วยชั้นทั้งหมด 3 ชั้น โดยชั้นแรกเป็นชั้นของข้อมูลตัวแปรอินพุทที่มีทั้งหมด 7 ตัวแปร โดยตัวแปรแต่ละตัวรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนและตัวแปรทางบรรยากาศในอดีตที่มีผลต่อการแปรค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์ที่เวลา t ใด ๆ ชั้นที่ 2 เป็นชั้นซ่อนมีจำนวน 2 โหนด และชั้นสุดท้ายเป็นชั้นของตัวแปรเอาต์พุท ดังแสดงในรูปที่ 96



รูปที่ 96 โครงสร้างของแบบจำลอง NARX สำหรับใช้ในการคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ 4 สถานีในภูมิภาคหลักของมหาวิทยาลัยศิลปากร

ส่วนโครงสร้างของแบบจำลอง ANN ที่เหมาะสมที่สุดจากการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม WEKA ประกอบด้วยชั้นทั้งหมด 4 ชั้น โดยชั้นแรกเป็นชั้นของข้อมูลตัวแปรอินพุทที่มีทั้งหมด 5 ตัวแปร โดยตัวแปรแต่ละตัวมีผลต่อการแปรค่าของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือน ชั้นที่ 2 และ 3 เป็นชั้นซ่อนที่มีทั้งหมด 5 โหนด และ 2 โหนด ตามลำดับ ส่วนชั้นสุดท้ายเป็นชั้นของตัวแปรเอาต์พุท ดังแสดงในรูปที่ 97



รูปที่ 97 โครงสร้างของแบบจำลอง ANN สำหรับใช้ในการคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ 4 สถานีในภูมิภาคหลักของมหาวิทยาลัยศิลปากร

ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองต่าง ๆ สำหรับใช้ในการคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ 4 สถานีในภูมิภาคหลักของประเทศไทยแสดงดังตารางที่ 3 ตารางที่ 3 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากการวัดภาคพื้นดินและที่คำนวณได้จากแบบจำลองต่าง ๆ ที่ 4 สถานีในภูมิภาคหลักของมหาวิทยาลัยศิลปากร

แบบจำลอง	สถานี	RMSD (%)	MBD (%)
ARX	เชียงใหม่	12.90	5.30
	อุบลราชธานี	15.28	8.01
	นครปฐม	6.80	2.87
	สงขลา	4.58	0.03
	รวมทุกสถานี	10.24	3.83
ARMAX	เชียงใหม่	21.44	15.54
	อุบลราชธานี	27.71	22.71
	นครปฐม	9.37	3.56
	สงขลา	4.86	1.02
	รวมทุกสถานี	11.35	4.55

ตารางที่ 3 (ต่อ)

แบบจำลอง	สถานี	RMSD (%)	MBD (%)
OE	เชียงใหม่	7.99	-0.01
	อุบลราชธานี	13.43	0.01
	นครปฐม	11.15	0.003
	สงขลา	13.15	0.02
	รวมทุกสถานี	11.60	0.01
Box-Jenkins	เชียงใหม่	18.52	17.14
	อุบลราชธานี	25.62	23.85
	นครปฐม	7.22	4.83
	สงขลา	4.76	1.87
	รวมทุกสถานี	15.21	11.25
NARX	เชียงใหม่	10.02	-2.45
	อุบลราชธานี	14.28	2.06
	นครปฐม	12.63	-3.09
	สงขลา	13.65	10.37
	รวมทุกสถานี	12.72	1.82
ANN	เชียงใหม่	14.05	11.50
	อุบลราชธานี	25.09	24.10
	นครปฐม	5.48	2.60
	สงขลา	5.32	-1.11
	รวมทุกสถานี	13.61	8.50

เมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าจริงสี่รวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากการวัดภาคพื้นดินและที่ได้จากแบบจำลองต่าง ๆ ซึ่งพัฒนาจากข้อมูลการวัดจำนวน 2 ปี (2018-2019) และทดสอบความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลการวัดจำนวน 1 ปี (2020) พบว่า แบบจำลองที่มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับนำมาใช้ในการคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ 4 สถานีในภูมิภาคหลักของมหาวิทยาลัยศิลปากร คือแบบจำลอง ARX โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนในรูป RMSD และ MBD เท่ากับ 10.24% และ 3.83%

ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าความเคลื่อนที่น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองอื่น ๆ แสดงว่าแบบจำลอง ARX ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นมีความแม่นยำค่อนข้างดีโดยไม่จำเป็นต้องใช้ชุดข้อมูลในการพัฒนาและทดสอบจำนวนมาก และสามารถนำไปใช้คำนวณที่สถานีอื่นที่มีความแตกต่างด้านสภาพภูมิอากาศได้ อีกทั้งยังง่ายต่อการใช้งาน ดังนั้น ผู้วิจัยจึงจะนำแบบจำลอง ARX ไปคำนวณหารังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนจากเครือข่ายสถานีวัด 38 สถานีของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ดังรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

3.3 การพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนของเครือข่ายสถานีวัด 38 สถานีของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน

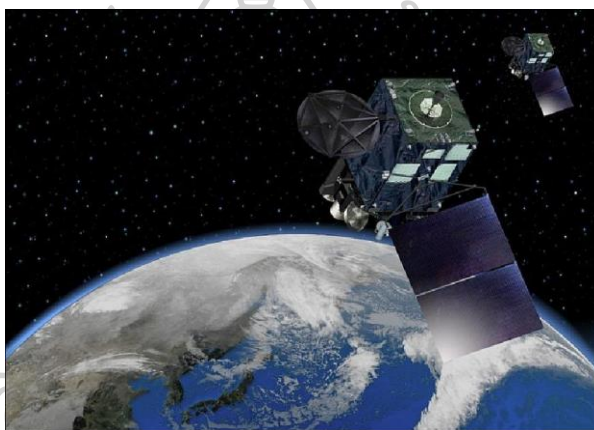
การพิจารณาข้อมูลในพื้นที่ขนาดใหญ่ระดับภูมิภาค ระดับประเทศ หรือระดับทวีป โดยมากจะนิยมข้อมูลที่ได้จากภาพถ่ายดาวเทียม เนื่องจากโดยทั่วไปข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดภาคพื้นดินส่วนใหญ่มีราคาค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง ทำให้ไม่สามารถติดตั้งเครื่องวัดให้ครอบคลุมทุกพื้นที่ได้ ดังนั้น การพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนจากเครือข่ายการวัด 38 สถานีในประเทศไทยผู้วิจัยจึงจะคำนวณหาข้อมูลตัวแปรอื่นๆต่าง ๆ สำหรับนำมาใช้พัฒนาและทดสอบแบบจำลอง ARX โดยใช้ตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา และข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียมเพื่อให้มีข้อมูลครอบคลุมทุกพื้นที่ทั้ง 38 สถานี ทั้งนี้เพราะที่เครือข่ายสถานีวัด 38 สถานีไม่มีเครื่องเซ็นเซอร์และเครื่องถ่ายภาพท้องฟ้า ผู้วิจัยจึงเสนอที่จะใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมและข้อมูลอุตุนิยมวิทยาในการหาข้อมูลดังกล่าว โดยมีรายละเอียดการดำเนินงานดังนี้

3.3.1 การรวบรวมข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียมและอุตุนิยมวิทยา

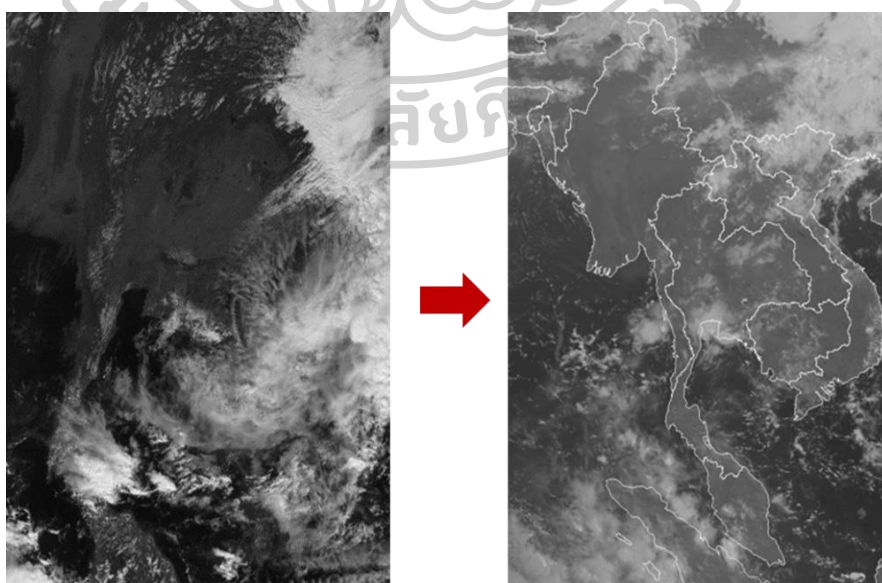
3.3.1.1 ข้อมูลเมฆจากภาพถ่ายดาวเทียม

ดาวเทียมที่ใช้กันในปัจจุบันมีหลากหลายหน้าที่ขึ้นอยู่กับการใช้งาน สำหรับดาวเทียมที่เหมาะสมสำหรับนำมาพิจารณาหาปริมาณเมฆในบรรยากาศครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทยคือ ดาวเทียมฮิมาวารี (Himawari) ซึ่งเป็นดาวเทียมที่ถูกส่งขึ้นไปเพื่อใช้งานด้านอุตุนิยมวิทยาและการบินของกรมอุตุนิยมวิทยาประเทศญี่ปุ่น ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2016 จนถึงปัจจุบัน ลักษณะของดาวเทียม Himawari แสดงดังรูปที่ 98 ดาวเทียมดังกล่าวประกอบด้วย ช่องรับสัญญาณในช่วงความยาวคลื่นแสงสว่าง และช่องรับสัญญาณในช่วงความยาวคลื่นรังสีอินฟราเรด โดยสามารถทำการบันทึกภาพทุก 1 ชั่วโมงตลอดทั้งวัน สำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะเลือกใช้ช่องรับสัญญาณในช่วงแสงสว่างเพื่อวิเคราะห์

หาปริมาณเมฆในบรรยากาศที่อยู่ในรูปของดัชนีเมฆ (cloud index, n) ภาพถ่ายดาวเทียม Himawari ที่ได้โดยทั่วไปจะเป็นข้อมูลดิจิทัล 8 บิต โดยแต่ละภาพจะประกอบด้วยหน่วยเล็ก ๆ เรียกว่า พิกเซล (pixel) ที่มีค่าเป็นระดับความเทา (gray level) ตั้งแต่ 0-255 ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมดังกล่าวจะเห็นเป็นส่วนโค้งของพื้นผิวโลก (satellite projection) (แสดงดังรูปที่ 98 ด้ายซ้าย) ทำให้ระยะทางภาพไม่แปรโดยตรงกับระยะบนพื้นผิวโลก ซึ่งไม่สะดวกในการใช้งาน ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการแปลงภาพดังกล่าวให้อยู่ในรูปภาพถ่ายแบบผิวทรงกระบอก (cylindrical projection) ซึ่งระยะบนภาพจะแปรโดยตรงกับระยะบนพื้นดิน จากนั้นนำแผนที่ประเทศไทยมาซ้อนทับเพื่อหาพิกัดของพิกเซลในข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม (ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 99 ด้านขวา)

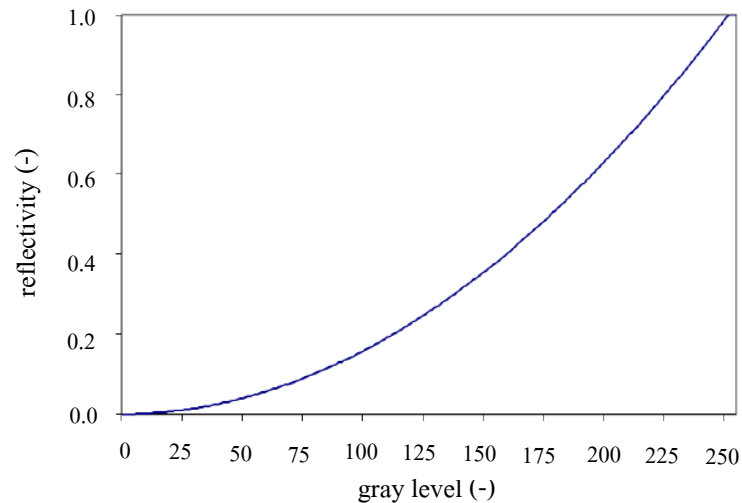


รูปที่ 98 ดาวเทียมฮิมาวารี



รูปที่ 99 ตัวอย่างภาพถ่ายดาวเทียมที่หาพิกัดตรงตามแผนที่ประเทศไทย

เนื่องจากค่าระดับความเทาไม่สามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาดัชนีเมฆในบรรยากาศได้ จึงต้องทำการแปลงค่าระดับความเทาดังกล่าวให้อยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของเมฆบรรยากาศ และพื้นผิวโลก (reflectivity, ρ_{SAT}) ซึ่งเป็นปริมาณทางฟิสิกส์ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยอาศัยตารางสอบเทียบที่ได้จากบริษัทผู้ผลิต (JMA, 2012) ดังแสดงในรูปที่ 100



รูปที่ 100 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การสะท้อนของเมฆ บรรยากาศ และพื้นผิวโลก กับระดับความเทา

เนื่องจากเครือข่ายสถานีวัด 38 สถานีไม่มีการวัดปริมาณเมฆจากเครื่องถ่ายภาพท้องฟ้า ดังนั้นผู้วิจัยจึงจะใช้ข้อมูลดัชนีเมฆจากดาวเทียมเป็นตัวบอกผลของเมฆ การคำนวณดัชนีเมฆสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้ (Cano et al., 1986)

$$n = \frac{\rho_{SAT} - \rho_{min}}{\rho_{max} - \rho_{min}} \quad (3.8)$$

- เมื่อ n คือ ดัชนีเมฆในบรรยากาศ มีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 (-)
- ρ_{SAT} คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนของเมฆ บรรยากาศ และพื้นผิวโลก (-)
- ρ_{min} คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวโลก (-)
- ρ_{max} คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนสูงสุดของเมฆ (-)

จากสมการที่ 3.8 จะเห็นได้ว่า ในกรณีที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆค่า ρ_{SAT} จะเท่ากับค่า ρ_{min} ทำให้ค่า n เท่ากับ 0 และกรณีที่พิกเซลนั้นถูกปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด ค่า ρ_{SAT} จะเท่ากับค่า ρ_{max} ทำให้ค่า n เป็น 1 ดังนั้นค่า n จึงเป็นดัชนีชี้บอกปริมาณเมฆในบรรยากาศได้

3.3.1.2 ข้อมูลปริมาณโอโซนจากภาพถ่ายดาวเทียม

เนื่องจากที่เครือข่ายสถานีวัด 38 สถานีไม่มีเครื่องวัดปริมาณโอโซน ดังนั้นผู้วิจัยจึงจะใช้ข้อมูลปริมาณโอโซนที่ได้จากดาวเทียม โดยอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณโอโซนในปัจจุบันที่สามารถตรวจวัดโอโซนครอบคลุมทุกพื้นที่บนโลกมีชื่อว่า โอมิ (Ozone Monitoring Instrument, OMI) ที่ติดตั้งบนดาวเทียมออร่า (Aura) ซึ่งเป็นดาวเทียมที่มีภารกิจในการสำรวจชั้นบรรยากาศเป็นการเฉพาะขององค์การนาซา ประเทศสหรัฐอเมริกา ถูกส่งขึ้นไปสำรวจชั้นบรรยากาศตั้งแต่ปี ค.ศ. 2004 จนถึงปัจจุบัน ลักษณะของดาวเทียม Aura แสดงดังรูปที่ 101



รูปที่ 101 ดาวเทียมออร่า

ดาวเทียมดังกล่าวประกอบด้วย ช่องรับสัญญาณในช่วงความยาวคลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ต และช่องรับสัญญาณในช่วงความยาวคลื่นแสงสว่าง การทำงานของอุปกรณ์ OMI ในการหาปริมาณโอโซนในชั้นบรรยากาศจะอาศัยการวัดรังสีในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่กระเจิงกลับจากชั้นบรรยากาศ (backscattered ultraviolet radiation) เข้าสู่เครื่องอุปกรณ์วัดบนดาวเทียมแล้วใช้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณย้อนกลับเพื่อหาปริมาณโอโซนในบรรยากาศในหน่วย ดอปสัน สำหรับข้อมูลโอโซนที่ได้จะมีความละเอียดเชิงพื้นที่ เนื่องจากดาวเทียม AURA เป็นดาวเทียมชนิดโคจรแบบ

ใกล้ขั้วโลก (polar orbiter) ทำให้ภาพครอบคลุมทุกพื้นที่ แต่ได้ภาพวันละ 1 เวลา โดยข้อมูลปริมาณโอโซนของประเทศไทยที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถเข้าถึงได้บนเว็บไซต์ขององค์การนาซาดังนี้ <https://avdc.gsfc.nasa.gov/pub/data/satellite/Aura/OMI/V03/L2OVP/OMTO3/> ซึ่งข้อมูลที่ปรากฏในเว็บไซต์ดังกล่าวมีไม่ครอบคลุมเครือข่ายสถานีวัดทั้ง 38 สถานี ดังนั้น ผู้วิจัยจึงนำข้อมูลที่ปรากฏในประเทศและประเทศใกล้เคียงมาประมาณค่าสถานีที่ไม่ปรากฏข้อมูลโดยใช้วิธีประมาณค่าแนวโน้มของข้อมูลจากพื้นที่ใกล้เคียง (interpolation)

3.3.1.3 ข้อมูลปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากข้อมูลอุตุนิยมวิทยา

เนื่องจากเครือข่ายสถานีวัด 38 สถานีไม่มีเครื่องวัดปริมาณไอน้ำ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงจะคำนวณหาปริมาณไอน้ำจากอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่ทำการตรวจวัดโดยอุตุนิยมวิทยา จากนั้นจะใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาโดย จันทรฉายและคณะ (Janjai et al., 2005) ในการคำนวณหาปริมาณไอน้ำที่อยู่ในรูป precipitable water ซึ่งเขียนได้ดังสมการ

$$W = 0.8933 \exp\left(0.1715 \frac{rhP_s}{T}\right) \quad (3.9)$$

เมื่อ	W	คือ	ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ (เซนติเมตร)
	rh	คือ	ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ (-)
	T	คือ	อุณหภูมิอากาศ (เคลวิน)
	P _s	คือ	ความดันไอน้ำอิ่มตัว (มิลลิบาร์)

โดยความดันไอน้ำอิ่มตัวสามารถคำนวณได้จาก (Pierrehumbert, 1972)

$$P_s = \exp\left(26.23 - \frac{5416}{T}\right) \quad (3.10)$$

เนื่องจากตำแหน่งที่ตั้งของสถานีที่ทำการวัดตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยาและสถานีวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์บางสถานีแตกต่างกัน เช่น สถานีวัดนครปฐมมีการตรวจวัดอุณหภูมิ ความชื้นในอากาศ และความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุตุนิยมวิทยากำแพงแสน แต่ตำแหน่งที่ตั้งของเครื่องวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ตั้งอยู่ที่มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ ซึ่งห่างกันประมาณ 30 กิโลเมตร ดังนั้น ผู้วิจัยจึงใช้วิธีการ interpolation เพื่อให้มีข้อมูลครอบคลุมทุกพื้นที่ทั้ง 38 สถานี

3.3.1.4 ข้อมูลปริมาณฝุ่นละอองในบรรยากาศจากข้อมูลอุตุนิยมวิทยา

เนื่องจากเครือข่ายสถานีวัด 38 สถานีไม่มีการวัดฝุ่นละอองโดยตรง แต่มีการวัดทัศนวิสัย ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยจึงใช้ข้อมูลเป็นตัวแทนของข้อมูลฝุ่นละออง ฝุ่นละอองในบรรยากาศมีทั้งขนาดที่สามารถมองเห็นและไม่สามารถมองเห็น โดยทั่วไปฝุ่นละอองจะทำให้บรรยากาศขุ่นมัว (turbidity) เป็นผลมาจากขนาดและความหนาแน่นของฝุ่นละอองในบรรยากาศ ซึ่งมีผลต่อการมองเห็นหรือค่าทัศนวิสัย (visibility) โดยข้อมูลทัศนวิสัยนั้นมีการตรวจวัดที่สถานีอุตุนิยมวิทยาทั่วประเทศ ซึ่งจะตรวจทุก 3 ชั่วโมง ด้วยการสังเกตที่หมายหนึ่ง ๆ และกำหนดที่หมายรอบ ๆ สถานีในระยะต่างกันตั้งแต่ 10 กิโลเมตร ถึง 15 กิโลเมตร ขึ้นกับผู้ตรวจวัด จากนั้นผู้วิจัยได้นำข้อมูลมา interpolation จากสถานีวัดใกล้เคียง

3.3.2 การดำเนินการพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่เครือข่ายสถานีวัด 38 สถานีของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน

เครื่องวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์เมื่อถูกใช้งานกลางแจ้งเป็นเวลานานอาจจะทำให้การทำงานของเครื่องวัดเกิดการขัดข้องหรือบางช่วงเวลาต้องมีการสอบเทียบเพื่อหาค่าการตอบสนองของเครื่องวัด ทำให้ข้อมูลการวัดบางช่วงเวลาขาดหายไป ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการใช้งานข้อมูลมาใช้ในการพัฒนาและทดสอบแบบจำลองที่มีความเหมาะสมสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนในพื้นที่นั้น ๆ จากผลการวิจัยในหัวข้อ 3.2 พบว่า แบบจำลอง ARX เป็นแบบจำลองที่ไม่จำเป็นต้องใช้ชุดข้อมูลเพื่อพัฒนาและทดสอบแบบจำลองจำนวนมาก ดังนั้น ในงานวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยจึงจะพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนจากเครือข่ายสถานีวัด 38 สถานีของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานโดยใช้แบบจำลอง ARX ผู้วิจัยได้ทำการแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 2 ชุด โดยชุดแรก เป็นชุดข้อมูลที่ใช้สำหรับพัฒนาแบบจำลองจำนวน 2 ปี ตั้งแต่ปี 2018-2019 ซึ่งเป็นชุดข้อมูลที่รวบรวมจากสถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี สถานีนครปฐม และสถานีสงขลา และชุดข้อมูลที่สองเป็นข้อมูลปี 2020 จำนวน 1 ปี ซึ่งรวบรวมจากเครือข่ายสถานีวัด 38 สถานีในประเทศไทยสำหรับใช้ในการทดสอบความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง

3.3.3 การทดสอบแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ 38 สถานีของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน

รูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลอง ARX ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนกับตัวแปรทางบรรยากาศต่าง ๆ ที่ได้จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมและข้อมูลอุณหภูมิมิถุนิยมวิทยาที่เป็นข้อมูลรายวันเฉลี่ยต่อเดือน ซึ่งประกอบด้วย ดัชนีเมฆ รังสีจากดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก ปริมาณโอโซนในบรรยากาศ ค่าทัศนวิสัย และปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ที่ได้จากการวิเคราะห์ผลในโปรแกรม MATLAB ในงานวิจัยครั้งนี้ แสดงดังสมการที่ 3.11

$$\begin{aligned} \bar{H}(t) = & -0.365\bar{H}(t-1)+0.0593\bar{H}(t-2)-0.018\bar{H}(t-3)-0.034\bar{H}(t-4)+0.059\bar{H}(t-5) \\ & -0.078\bar{H}(t-6)-0.004\bar{H}(t-7)+0.094\bar{H}(t-8)-29.090\bar{n}(t)+4.889\bar{n}(t-1) \\ & +0.651\bar{H}_0(t)-0.127\bar{H}_0(t-1)-0.026\bar{O}_3(t)-0.003\bar{O}_3(t-1)+1.076\bar{VIS}(t) \\ & -0.540\bar{VIS}(t-1)-0.853\bar{W}(t)+0.623\bar{W}(t-1) \end{aligned} \quad (3.11)$$

- เมื่อ \bar{H} คือ รังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือน (เมกะจูลต่อตารางเมตร)
- \bar{n} คือ ดัชนีเมฆรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (-)
- \bar{H}_0 คือ รังสีจากดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (เมกะจูลต่อตารางเมตร)
- \bar{O}_3 คือ ปริมาณโอโซนรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (ด็อบสัน)
- \bar{VIS} คือ ค่าทัศนวิสัยรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (กิโลเมตร)
- \bar{W} คือ ปริมาณไอน้ำรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (เซนติเมตร)

จากนั้นผู้วิจัยได้นำค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนจากเครือข่ายการวัดภาคพื้นดินที่ 38 สถานีในประเทศไทยมาเปรียบเทียบกับค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่คำนวณได้จากแบบจำลอง ARX ผลการเปรียบเทียบที่ได้แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากเครือข่ายสถานีวัด 38 สถานีในประเทศไทยและที่คำนวณได้จากแบบจำลอง ARX

ลำดับ	สถานี	RMSD (%)	MBD (%)
1	เชียงใหม่	2.37	-0.60

ตารางที่ 4 (ต่อ)

ลำดับ	สถานี	RMSD (%)	MBD (%)
2	แม่ฮ่องสอน	3.35	-0.37
3	เชียงใหม่ (สันทราย)	5.87	-0.71
4	น่าน	2.52	0.01
5	เชียงใหม่ (เกษตรหลวงดอยอินทนนท์)	6.14	-2.35
6	แม่ฮ่องสอน (แม่สะเรียง)	4.55	-1.79
7	ลำปาง	3.41	0.07
8	แพร่	14.51	-1.51
9	ตาก (ดอยมูเซอ)	10.55	-4.23
10	พิษณุโลก	4.69	1.61
11	เพชรบูรณ์	3.84	0.13
12	นครสวรรค์	5.52	-2.34
13	หนองคาย	2.75	0.58
14	เลย	5.75	-2.34
15	นครพนม	4.57	0.79
16	ขอนแก่น	3.70	-1.41
17	อุบลราชธานี (สว่างวีระวงศ์)	6.71	-2.59
18	ร้อยเอ็ด	5.22	1.64
19	นครราชสีมา	4.75	0.53
20	สุรินทร์	2.19	-0.75
21	ลพบุรี	4.45	0.91
22	กาญจนบุรี (ทองผาภูมิ)	8.31	-3.73
23	กาญจนบุรี (เมือง)	3.65	-1.37
24	กรุงเทพมหานคร	2.15	0.60
25	สระแก้ว (อรัญประเทศ)	5.89	-2.50
26	ปราจีนบุรี	2.84	0.66
27	ชลบุรี	10.19	-3.96
28	ตราด	7.96	-3.36

ตารางที่ 4 (ต่อ)

ลำดับ	สถานี	RMSD (%)	MBD (%)
29	ประจวบคีรีขันธ์	7.29	-2.40
30	ประจวบคีรีขันธ์ (หนองพลับ)	3.15	-0.69
31	ชุมพร	6.42	-2.83
32	ระนอง	1.67	0.67
33	สุราษฎร์ธานี (เกาะสมุย)	12.13	-2.65
34	สุราษฎร์ธานี (พุนพิน)	2.78	0.48
35	ภูเก็ต	2.98	-1.14
36	ตรัง	1.29	-0.06
36	ตรัง	1.29	-0.06
37	สงขลา (หาดใหญ่)	8.98	2.62
38	นราธิวาส	7.77	2.37
รวมทุกสถานี		6.10	-0.78

ผลที่ได้จากการทดสอบความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง ARX จะเห็นว่า ค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากเครือข่ายการวัดภาคพื้นดินกับแบบจำลอง ARX มีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี โดยมีค่า RMSD และ MBD เท่ากับ 6.10% และ -0.78% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง ARX ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นสามารถนำมาคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนได้ทุกพื้นที่ในประเทศไทย และมีความเหมาะสมสำหรับพื้นที่ที่ต้องการคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนแต่มีชุดข้อมูลอยู่อย่างจำกัด

บทที่ 4

สรุป

ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนมีความสำคัญสำหรับนำมาใช้ออกแบบ และประเมินประสิทธิภาพเทคโนโลยีที่ใช้เปลี่ยนรูปพลังงานจากดวงอาทิตย์ให้อยู่ในรูปพลังงานที่ ต้องการ ธรรมชาติของรังสีรวมจากดวงอาทิตย์มีการแปรค่าตามเวลาและตัวแปรของบรรยากาศ เป็น ผลให้รังสีรวมจากดวงอาทิตย์เป็นระบบที่ซับซ้อนและมีคุณสมบัติแบบสุ่ม ทำให้ต้องใช้ชุดข้อมูลเพื่อ พัฒนาและทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำนวนมาก แต่ในหลายพื้นที่มักประสบปัญหาชุด ข้อมูลที่มีจำนวนจำกัด ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีรวมจาก ดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่มีความเหมาะสมสำหรับพื้นที่ที่มีปัญหาด้านชุดข้อมูลอยู่อย่างจำกัด โดยทำการเก็บรวบรวมข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์และตัวแปรทางบรรยากาศในรูปรายวันเฉลี่ยต่อ เดือนจากเครือข่ายการวัด 38 สถานีของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน เพื่อนำ ข้อมูลที่ได้มาศึกษาลักษณะทางสถิติ รวมทั้งเปรียบเทียบแบบจำลองที่มีความเหมาะสมสำหรับ พื้นที่ที่มีปัญหาด้านชุดข้อมูลที่ 4 สถานีในภูมิภาคหลักของมหาวิทยาลัยศิลปากร จากนั้นนำ แบบจำลองที่ดีที่สุดไปคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนจากเครือข่ายสถานีวัด 38 สถานีของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ผลการศึกษาที่ได้สามารถสรุปเป็นข้อ ๆ ดังต่อไปนี้

1) การศึกษาลักษณะทางสถิติรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนแบบระยะยาว พบว่า ผลจากตำแหน่งทางดาราศาสตร์ ภูมิศาสตร์ และตัวแปรต่าง ๆ ทางบรรยากาศ ทำให้รังสีรวม จากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ส่งผ่านชั้นบรรยากาศลงมาตกกระทบบนผิวโลกในแต่ละพื้นที่มี ค่าแตกต่างกัน โดยแต่ละสถานีส่วนใหญ่จะมีลักษณะการแปรค่าเพิ่มขึ้นจากเดือนมกราคมไปถึง ค่าสูงสุดในเดือนเมษายนหรือพฤษภาคม จากนั้นค่าจะลดลงแล้วเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในเดือนพฤษภาคมถึง เดือนตุลาคม แล้วลดลงจนถึงค่าต่ำสุดในเดือนธันวาคม เมื่อเฉลี่ยค่าทั้ง 38 สถานี พบว่า ประเทศไทย มีศักยภาพด้านพลังงานรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ค่อนข้างสูง (ประมาณ 18 เมกะจูลต่อตารางเมตร)

2) ผู้วิจัยได้ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลการวัดภาคพื้นดินที่ 4 สถานีในภูมิภาคหลักของ มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้แก่ สถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี สถานีนครปฐม และสถานีสงขลา โดยใช้ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์จากเครื่องวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ ปริมาณเมฆปกคลุมท้องฟ้า

จากเครื่องถ่ายภาพท้องฟ้า ปริมาณโอโซน ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง และปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากเครื่องเซ็นเซอร์โฟโตมิเตอร์ และข้อมูลรังสีจากดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกซึ่งได้จากการคำนวณสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อนำมาใช้พัฒนาแบบจำลองที่ใช้การเรียนรู้แบบเครื่องกล ได้แก่ แบบจำลอง ARX แบบจำลอง ARMAX แบบจำลอง OE แบบจำลอง Box-Jenkins และแบบจำลอง NARX และแบบจำลอง ANN เพื่อเปรียบเทียบหาแบบจำลองที่มีความเหมาะสมสำหรับนำมาใช้กับพื้นที่ที่มีปัญหาด้านชุดข้อมูล ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้แบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 2 ชุด ชุดแรก ผู้วิจัยได้เลือกใช้ข้อมูลที่รวบรวมจากสถานีครปฐมสำหรับใช้ในการพัฒนาแบบจำลองจำนวน 2 ปี ตั้งแต่ปี 2018-2019 ส่วนข้อมูลชุดที่สองเป็นข้อมูลที่ใช้สำหรับทดสอบความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองในแต่ละสถานี โดยใช้ข้อมูลปี 2020 จำนวน 1 ปี จากการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนทางสถิติ พบว่าค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่คำนวณได้จากแบบจำลอง ARX และที่ได้จากการวัดภาคพื้นดินมีค่าความคลาดเคลื่อนในรูป RMSD เท่ากับ 10.24% และ MBD เท่ากับ 3.83% ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่น ๆ นั้นแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง ARX มีความเหมาะสมที่จะนำมาพัฒนาแบบจำลองเพื่อคำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสำหรับพื้นที่ที่มีชุดข้อมูลอย่างจำกัดและสามารถนำไปใช้งานกับพื้นที่ที่มีความแตกต่างทางด้านสภาพภูมิอากาศได้

3) ก่อนที่จะนำแบบจำลอง ARX ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ดีที่สุดไปประยุกต์ใช้งาน ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบแบบจำลองกับข้อมูลจากเครือข่ายสถานีวัด 38 สถานีของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน โดยรวบรวมชุดข้อมูลเพื่อพัฒนาและทดสอบแบบจำลองจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมและข้อมูลอุตุนิยมวิทยา เพื่อให้ข้อมูลครอบคลุมทุกพื้นที่ทั้ง 38 สถานีทั่วประเทศ ซึ่งประกอบด้วย ข้อมูลดัชนีเมฆจากดาวเทียม Himawari ข้อมูลโอโซนจากอุปกรณ์ OMI ที่ติดตั้งบนดาวเทียม AURA ข้อมูลฝุ่นละอองจากค่าทัศนวิสัย ข้อมูลไอน้ำซึ่งคำนวณจากอุณหภูมิอากาศและความชื้นสัมพัทธ์ซึ่งทำการตรวจวัดโดยอุตุนิยมวิทยาภาคพื้นดินทั่วประเทศ จากนั้นแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 2 ชุด โดยชุดแรก เป็นชุดข้อมูลที่ใช้สำหรับพัฒนาแบบจำลองจำนวน 2 ปี ตั้งแต่ปี 2018-2019 ซึ่งเป็นชุดข้อมูลที่รวบรวมจากสถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี สถานีนครปฐม และสถานีสงขลา และชุดข้อมูลที่สองเป็นข้อมูลปี 2020 จำนวน 1 ปี ซึ่งรวบรวมจากเครือข่ายสถานีวัด 38 สถานีของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานสำหรับใช้ในการทดสอบความคลาดเคลื่อนของแบบจำลอง จากการศึกษาพบว่า ค่ารังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จาก

แบบจำลอง ARX ของชุดข้อมูลเครือข่ายสถานีวัด 38 สถานีในประเทศไทยมีค่าความคลาดเคลื่อนในรูป RMSD และ MBD เท่ากับ 6.10% และ -0.78% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลอง ARX และที่ได้จากการวัดมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ดังนั้น แบบจำลอง ARX ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้จึงสามารถนำไปใช้คำนวณรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานด้านพลังงานและอื่น ๆ ต่อไป

ข้อเสนอแนะ ถึงแม้ในประเทศไทย กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) ได้ติดตั้งเครือข่ายสถานีวัดรังสีรวมจากดวงอาทิตย์ 38 สถานีกระจายทั่วประเทศ แต่ก็ยังไม่ครอบคลุมทั่วถึง ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเสนอแนะให้เพิ่มสถานีวัดให้ครอบคลุมทุกจังหวัด เพื่อนำข้อมูลไปใช้งานด้านพลังงานทดแทนต่าง ๆ ต่อไป



รายการอ้างอิง

- Adnan, A., & Mustafa, A. (2015). Nonlinear Identification of A Wireless Control System: Hammerstein-Wiener Modeling. *International Journal of modern Trends in Engineering and Research* 2(8), 355-363.
- Angstrom, A. (1924). Solar and terrestrial radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 50, 121-126.
- Badescu, V. (1999). Correlations to estimate monthly mean daily solar global irradiation: application to Romania. *Energy*, 24(10), 883-893.
- Bethe, H. A., & Critchfield, C. L. (1983). On the Formation of Deuterons by Proton Combination. *Physical Review*, 54(10), 862-862.
- Black, J. N. (1956). The distribution of solar radiation over the Earth's surface. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie*, 7, 165-189.
- Bosch, J. L., López, G., & Batlles, F. J. (2008). Daily solar irradiation estimation over a mountainous area using artificial neural networks. *Renewable Energy*, 33(7), 1622-1628.
- Bouckaert, R. R., Frank, E., A. H. M., Holmes, G., Pfahringer, B., Reutemann, P., & H. W. I. (2010). WEKA-Experiences with a Java Open-Source Project. *Journal of Machine Learning Research*, 11, 2533-2541.
- Cano, D., Monget, J. M., Albuison, M., Guillard, H., Regas, N., & Wald, L. (1986). A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. *Solar Energy*, 37, 31-39.
- Chauvenet, W. (1960). A manual of spherical and practical astronomy. In. Philadelphia: J.B. Lippincott.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley: Hoboken.
- e Silva, R. A., & Brito, M. (2018). Impact of network layout and time resolution on spatio-temporal solar forecasting. *Solar Energy*, 163, 329-337.
- Garza-Ulloa, J. (2018). Application of mathematical models in biomechatronics: artificial intelligence and time-frequency analysis. *Applied Biomechatronics Using Mathematical Models, 1st edn. Academic Press, London*.
- Gong, S. (2018). Evaluation of maritime aerosol optical depth and precipitable water vapor content

- from the Microtops II Sun photometer. *Optik*, 169, 1-7.
- Gueymard, C. A. (2014). 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*, 39, 1024-1034.
- Hassan, G. E., Youssef, M. E., Mohamed, Z. E., Ali, M. A., & Hanafy, A. A. (2016). New Temperature-based Models for Predicting Global Solar Radiation. *Applied Energy*, 179, 437-450.
- Haurwitz, B. (1946). Insolation in relation to cloud type. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 3(4), 123-124.
- Inman, R. H., Pedro, H. T., & Coimbra, C. F. (2013). Solar forecasting methods for renewable energy integration. *Progress in energy and combustion science*, 39(6), 535-576.
- Iqbal, M. (1983). *An introduction to solar radiation* New York: Academic Press.
- Janjai, S., Laksanaboonsong, J., Nunez, M., & Thongsathitya, A. (2005). Development of a method for generating operational solar radiation maps from satellite data for a tropical environment. *Solar Energy*, 78(6), 739-751.
- Janjai, S., Sricharoen, K., & Pattarapanitchai, S. (2011). Semi-empirical models for the estimation of clear sky solar global and direct normal irradiances in the tropics. *Applied Energy*, 88(12), 4749-4755.
- JMA. (2012). *Calibration of MTSAT*. Japan: Japan Meteorological Agency.
- Kalooop, M. R., Abdelaal, M. M., & El Shambak, H. T. (2015). Optimum ARX Model Prediction for Monthly Air Temperature Changes in Delta, Egypt. *Research Journal of Environmental Sciences*, 9(3), 137-151.
- Leal, S., Tiba, C., & Piacentini, R. (2011). Daily UV radiation modeling with the usage of statistical correlations and artificial neural networks. *Renewable Energy*, 36(12), 3337-3344.
- Ljung, L. (1987). Theory for the user. In *System Identification*. New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Ljung, L. (1995). *System identification toolbox: User's guide*: The Math Works, Inc.
- Ljung, L. (2011). *System Identification Toolbox for use with MATLAB*: The MathWorks, Inc.
- Moler, C., & Little, J. (2020). A history of MATLAB. *Proceedings of the ACM on Programming Languages*, 4, 1-67.

- Nanda, T., Sahoo, B., Beria, H., & Chatterjee, C. (2016). A wavelet-based non-linear autoregressive with exogenous inputs (WNARX) dynamic neural network model for real-time flood forecasting using satellite-based rainfall products. *Journal of Hydrology*, 539, 57-73.
- Niu, F., & O'Neill, Z. (2017). *Recurrent Neural Network based Deep Learning for Solar Radiation Prediction*. Paper presented at the In Proceedings of the 15th IBPSA Conference San Francisco, California, United States.
- Notton, G. (2017). Solar Radiation for Energy Applications. *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, 339-356.
- Olga, E. M., & Norma, B. C. (2018). *solar particle radiation storms forecasting and analysis*. Switzerland: Gewerbestrasse.
- Ozoegwu, C. G. (2019). Artificial neural network forecast of monthly mean daily global solar radiation of selected locations based on time series and month number. *Journal of Cleaner Production*, 216, 1-13.
- Pierrehumbert, C. (1972). Precipitable water statistics, Australia. Monthly statistics of precipitable water between surface and 400 mb at 2300 GMT, 1958-69. *Commonw. Bur. Meteorology, Melbourne*.
- Ríos-Moreno, G., Trejo-Perea, M., Castañeda-Miranda, R., Hernández-Guzmán, V., & Herrera-Ruiz, G. (2007). Modelling temperature in intelligent buildings by means of autoregressive models. *Automation in construction*, 16(5), 713-722.
- Toledano, C., Cachorro, V., Gausa, M., Stebel, K., Aaltonen, V., Berjón, A., . . . Blindheim, S. (2012). Overview of sun photometer measurements of aerosol properties in Scandinavia and Svalbard. *Atmospheric environment*, 52, 18-28.
- Weiss, A., Hays, C. J., Hu, Q., & Easterling, W. E. (2001). Incorporating bias error in calculating solar irradiance: implications for crop yield simulations. *Agronomy Journal*, 93(6), 1321-1326.
- Yadav, A. K., & Chandel, S. (2015). Solar energy potential assessment of western Himalayan Indian state of Himachal Pradesh using J48 algorithm of WEKA in ANN based prediction model. *Renewable Energy*, 75, 675-693.
- Yadav, A. K., Malik, H., & Chandel, S. S. (2014). Selection of most relevant input parameters using WEKA for artificial neural network based solar radiation prediction models. *Renewable and*

Sustainable Energy Reviews, 31, 509-519.

Yildiz, I. (2018). Solar Energy. *Comprehensive Energy Systems*, 1, 638-664.

Zabara, K. (1986). Estimation of the global solar radiation in Greece. *Solar & wind technology*, 3(4), 267-272.

เสริม จันทร์ฉาย. (2557). รั้งสีอาทิตย์: ศูนย์หนังสือมหาวิทยาลัยศิลปากร มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวัง
สนามจันทร์ นครปฐม.





ภาคผนวก

ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนระหว่างปี

ค.ศ. 2002 ถึง ค.ศ. 2020

ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีเชียงใหม่ราย (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2002	15.37				18.32	17.04	13.13	15.02	15.32	7.17	13.33	12.83
2003	13.72	16.47	17.41	18.20	19.87	15.41	17.17	16.54	17.70	16.79	16.97	14.36
2004	12.31	14.22	14.69	20.62	16.76	17.01	16.29	13.59	16.90	15.55	14.37	14.80
2005	14.05	13.13			19.22	15.66	18.24	13.49				
2006			17.37	19.66	18.64	19.27				17.33	17.50	15.52
2007	15.42	15.83	15.79	20.15	18.32		16.17	17.00	18.31	16.08	14.70	15.86
2008	15.08	16.68	17.31	18.89	18.41	16.93	13.82	14.13	18.50	16.59	16.81	15.25
2009	15.91	15.49	15.80	18.91	20.33	16.50	16.62	17.10	19.58	16.80	16.56	15.24
2010	14.96	15.49	14.54	19.74	21.61	19.83	17.56	16.18	17.28	13.23	16.63	13.41
2011												
2012										16.97	14.33	15.93
2013	15.33	17.41	17.30	19.30	21.54		10.31	15.90	16.43	13.75	14.93	13.50
2014	15.63	18.34	16.46	19.19	20.78	17.22	14.73	15.56	16.39	17.85	15.42	14.35
2015	15.14	17.51	15.49	20.24	21.08	19.32	16.72	14.85	16.26	16.80	15.72	13.61
2016	14.74	16.51	16.72	17.88	19.18	17.16	15.45	15.85	16.60			
2017	14.99	18.65			18.05	18.18	14.70	14.85	15.56	14.58	14.75	13.83
2018	13.85	17.06	17.24	18.36	20.15	14.91	15.03	13.35	17.05	15.62	16.37	12.83
2019	15.45	17.06	16.68	19.45	19.76	18.63	16.54	16.08	19.94	18.30	16.33	15.56
2020	16.44	17.14	20.66	20.04	22.59	18.43	17.86	13.78	15.74	16.34	16.77	16.26



ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีแม่ฮ่องสอน (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2002	15.74	18.05	16.60	20.40	17.42	14.37	9.77	12.91	15.64	17.84	14.79	15.47
2003	14.91	19.12	20.73	17.53	17.69	13.15	16.66	13.10	16.76	18.90	17.86	15.55
2004	16.25	17.82	15.55	19.45	18.71	14.59	17.07	12.57	15.09	18.80	16.23	16.08
2005	15.51	17.55	16.09	19.29	19.24	12.91	13.40	9.22	16.07	17.56	16.84	
2006		20.84	17.71	18.95	17.68	14.00	10.04	12.97		17.73	16.73	16.23
2007	16.93	17.59	15.13	18.44	15.30	16.38	11.97	14.27	16.30	16.47	14.41	15.87
2008	15.56	18.73	17.90	19.30	14.96	13.93	11.52	12.54	15.75	16.90	17.20	14.94
2009	16.68	17.05	15.57	17.74	20.50	14.63	10.77	14.23	16.38	18.13	17.41	15.31
2010	15.75	17.05	14.73	17.43	19.48	17.25	15.62	14.24	17.13	15.49	16.47	14.69
2011	15.49		16.85	17.90	18.36	13.31	16.02	12.76	14.36	16.03	16.15	
2012					18.37	12.51	10.12	11.75	15.29	16.80	15.55	15.07
2013	15.59	17.04	15.52	17.09	18.71	15.48	13.77	11.70	13.66	13.07	16.01	14.42
2014	16.09	19.11	17.27	17.68	19.17	14.66	13.03	12.12	16.22	18.50	16.81	16.20
2015	16.11	18.48	16.96	19.48	18.71	16.58	10.59	14.25	16.16	16.83	16.15	15.03
2016	15.86	17.27	16.04	18.96	19.61	15.51	13.04	12.71	15.08	18.20	16.55	15.46
2017	15.55	18.16			16.56	14.85	12.91	12.68	14.34	16.63	15.76	14.51
2018	14.58	19.07	18.91	18.71	20.19	14.15	10.51	10.14	16.34	17.50	17.02	14.51
2019	16.15	18.80	17.08	18.71	20.09	17.33	12.17	12.72	16.97	20.03	16.79	16.36
2020	17.00	16.98	16.40	18.91	21.84	17.55	17.12	12.01	16.96	15.76	17.77	15.96



ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีเชียงใหม่ (สันทราย) (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2005			19.24	18.42		14.23	15.71	12.65			16.56	12.99
2006	18.87	19.11	19.24	18.81	15.52	16.08	12.89	14.16	15.77	17.28	17.80	
2007	17.47		17.93	19.91	14.55	16.63	14.66	15.57			15.77	17.88
2008	17.00	19.28	18.56	18.06	15.67	15.01	13.56	15.18	16.42	15.28	16.71	16.73
2009	18.10	17.74	17.80	19.03	17.81	14.27	13.07	15.43	17.30	16.96	17.91	17.27
2010	16.78	20.80	18.31	19.62	19.25	17.46	16.12	13.76	17.36	14.11	17.91	17.27
2011	16.99	20.44	15.90	18.55	18.27	14.63	15.97			15.61	18.32	15.19
2012	17.05				17.35	14.44	12.64	14.80	16.48	17.67		17.15
2013	16.81	17.42	18.71	20.18	19.54	16.03	14.29	14.31				
2014			18.55	18.22	18.88	15.16	13.23	13.01	18.20	17.47		
2015	15.62	19.20	19.94	19.55	17.11	14.01	10.08	13.25	13.98	13.25	12.95	14.59
2016	16.27	17.51	21.01	21.59	19.19	11.86	12.44	12.55	12.09	11.94		13.55
2017	12.71	18.99				17.33	13.36	12.81	14.52	10.49	10.56	11.05
2018	13.04	17.67	18.02						14.04	11.79	13.16	10.53
2019	12.36	18.11	20.40	21.54	15.88	14.62	12.54	10.54	13.68	14.59	12.89	14.36
2020	16.06	17.22	20.89	19.10	20.96	14.78	14.84	11.70	12.83	8.40	13.09	14.45



ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีน้ำน่าน (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2002	15.88	15.90			18.39	19.05	14.50	15.94	16.05	18.39		
2003	17.33	18.56	18.43	19.46	20.58	16.08	19.40	16.86	17.74	18.86	18.59	16.99
2004	18.20	16.23	17.54	20.52	18.61	16.90	15.83	16.93	14.97	18.47	16.85	16.75
2005	15.51	16.70	18.45	20.22	20.20	16.28	19.07	12.92	17.25	18.67	17.16	15.55
2006	18.37	17.79	17.82	19.63	18.34	19.61	15.58	15.75	18.11	17.56	18.30	17.51
2007	17.23	16.87	17.12	20.02	17.90	19.44	19.03					16.47
2008	16.82	16.82	17.33		17.34	17.27	15.77	15.83	17.04	17.14	17.39	15.81
2009	16.95	15.90	16.41	18.19	19.04	16.81	15.98	18.16	18.46	17.82	17.14	15.66
2010	15.22	15.90	16.67	20.16	21.37	20.25	18.06	16.41	18.21	16.50	17.73	13.93
2011	15.89	15.90	16.31	18.60	18.79	16.90	16.12	15.69	15.55	16.38	18.19	15.75
2012	14.83	15.60	16.07	20.73	19.91	16.81	14.67	15.31	17.59	18.61	15.91	15.00
2013	14.89	16.66	17.52	19.21	21.23	17.65	16.64	16.16	17.12	16.47	16.06	14.91
2014	16.73	16.97	17.17	19.27	19.95	17.83	15.55	16.09	16.83	18.33	17.22	15.66
2015	15.34	17.45	16.04	20.18	21.12	19.67	16.43	17.09	17.03	17.45	17.15	13.27
2016	14.38	17.04	17.05	17.86	20.38	19.36	17.19	15.47	16.11	17.55	15.69	14.89
2017	14.22	18.77	19.30		18.37	18.63	15.23	15.69	17.44	16.40	16.05	14.71
2018	15.02	17.03	18.48	19.80	20.78	16.78	15.03	14.92	17.74	18.19	16.52	13.44
2019	15.42	16.71	18.23	21.08	20.67	20.18	16.31	15.26	18.86	19.83	17.37	16.28
2020	15.13	17.08	18.43	18.67	22.51	19.73	16.31	15.00	16.31	14.74	17.88	16.81



ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีเชียงใหม่ (เขตรหลวงอินทนนท์) (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2005			19.24	18.42		14.23	15.71	12.65			16.56	12.99
2006	18.87	19.11	19.24	18.81	15.52	16.08	12.89	14.16	15.77	17.28	17.80	
2007	17.47		17.93	19.91	14.55	16.63	14.66	15.57			15.77	17.88
2008	17.00	19.28	18.56	18.06	15.67	15.01	13.56	15.18	16.42	15.28	16.71	16.73
2009	18.10	17.74	17.80	19.03	17.81	14.27	13.07	15.43	17.30	16.96	17.91	17.27
2010	16.78	20.80	18.31	19.62	19.25	17.46	16.12	13.76	17.36	14.11	17.91	17.27
2011	16.99	20.44	15.90	18.55	18.27	14.63	15.97			15.61	18.32	15.19
2012	17.05				17.35	14.44	12.64	14.80	16.48	17.67		17.15
2013	16.81	17.42	18.71	20.18	19.54	16.03	14.29	14.31				
2014			18.55	18.22	18.88	15.16	13.23	13.01	18.20	17.47		
2015	15.62	19.20	19.94	19.55	17.11	14.01	10.08	13.25	13.98	13.25	12.95	14.59
2016	16.27	17.51	21.01	21.59	19.19	11.86	12.44	12.55	12.09	11.94		13.55
2017	12.71	18.99				17.33	13.36	12.81	14.52	10.49	10.56	11.05
2018	13.04	17.67	18.02						14.04	11.79	13.16	10.53
2019	12.36	18.11	20.40	21.54	15.88	14.62	12.54	10.54	13.68	14.59	12.89	14.36
2020	16.06	17.22	20.89	19.10	20.96	14.78	14.84	11.70	12.83	8.40	13.09	14.45



ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีลำปาง (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2017							16.65	18.12	17.58	15.07		
2018									19.59	17.90	19.40	13.25
2019	15.42	18.98	20.71			20.35	17.29	14.99	19.04	19.47	17.26	16.10
2020	15.32	17.95	21.33	21.89	20.06	19.01	20.12	15.46	17.64	13.94	16.79	15.85



ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีแพร่ (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2005	14.37	16.34	19.31	21.87	20.86		19.86	15.19	15.41	17.50	15.55	14.14
2006	17.11		18.24		18.45		16.68	15.70	18.31	16.74	17.22	15.41
2007	15.52	16.42	17.97	21.16	17.48	20.49	18.62	17.23	18.03	14.80	15.15	15.45
2008	15.26	16.56	18.67	20.33	18.49	19.91	17.33	17.80	16.98	16.89	16.69	14.89
2009	16.80	16.02	17.96	19.82	20.27	17.44	16.81	18.19	18.44	17.10	16.82	15.37
2010	15.19	18.24	17.57	21.96	22.24	21.24	18.47	16.42	18.61	15.08	17.74	14.70
2011	16.25	17.67	15.73	19.79	18.16	16.96	18.32	16.44	16.08	15.54	17.30	15.37
2012	15.06	15.93	17.61	21.26	19.49	17.29	15.15	16.17	17.16	17.37	15.67	14.79
2013	15.37	15.77	18.44	21.13	23.00	19.15	17.61	16.41	17.51	15.32	14.60	14.61
2014	16.43	17.31	18.74	20.49	21.26	18.32	16.95	17.50	17.63	17.60	16.74	15.55
2015	15.02	17.68	17.79	21.49	22.15	21.78	16.60	18.53	18.38	17.24	17.36	13.89
2016	15.06	19.25	18.65	20.62	21.88	18.65	17.79	16.32	16.02	16.65	15.75	15.29
2017	14.30	19.49	19.77		20.89	19.37	17.23	17.38	18.11	15.86	15.39	14.94
2018	16.07	18.29	18.97	20.84	21.66	16.87	15.20	15.78	17.89	17.98	16.74	14.52
2019	15.17	17.64	19.44	21.96	20.75	20.62	16.72	14.27	18.93	19.62	17.38	16.56
2020	14.84	17.00	19.42	20.21	22.74	20.79	20.29	15.46	16.71	14.26	17.08	16.70



ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีตาก (ดอยมูเซอ) (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2002	17.11	17.90	20.19	22.06	17.56	13.74	9.26	11.81	12.59	19.86	14.42	15.02
2003	18.03	20.67	19.47	23.26	18.78	11.48	15.15	13.01	12.89	17.06	19.03	18.10
2004	17.33	18.63	21.41	23.56	16.08	13.30	14.35	10.17	15.98	16.88	18.12	18.43
2005	16.52	19.90	20.61	22.38	19.36							
2006		19.47	20.51	19.89	16.51	14.93	10.63	10.72	15.78		18.63	18.30
2007	18.84	19.25	21.82	21.87		16.76	12.73	13.07	14.12	14.07	15.38	17.91
2008	18.50	19.30	19.99	19.83	15.61	14.73	12.15	14.04	13.30	14.28	16.59	17.74
2009	18.64	18.25	19.15	19.99	17.89	11.74	9.63	13.92	16.13		17.85	17.31
2010	15.82	18.25	14.01	24.11	21.15	18.98	15.96	12.22	16.06	11.90	18.09	15.81
2011	17.81	18.25	23.14	15.02	15.41	11.42	13.10	12.15	12.68	15.14	18.31	17.64
2012	17.46	18.70	19.89	22.96	17.96	11.21	10.72	9.35	14.86	18.37	14.69	19.03
2013	17.68	18.13	21.49	22.53	21.23	13.91	10.47	10.50		15.98	14.66	17.40
2014	19.76	21.12	21.32	21.18	21.13	13.57	12.81	13.81	15.38	16.86	17.86	16.93
2015	17.01	20.57	21.48	24.08	21.10	17.09	11.42	13.31	12.03	16.11	18.17	16.30
2016	17.17	20.79	21.64	24.44	21.02	14.55	13.36	11.52	13.37	14.43	17.75	16.02
2017	14.81	20.30	20.99	19.77	17.20	14.23	10.63	11.28	16.14	14.56	15.28	14.52
2018	16.70	20.35	20.68	20.92	17.84	12.37	8.06	8.57	15.58	16.43	16.86	15.57
2019	15.74	18.83	22.73	25.27	19.81	15.95	12.01	8.04	14.49	18.31	17.40	17.26
2020	17.04	18.83	22.07	21.52	20.60	16.33	19.47	14.48	16.80	13.48	19.45	19.98



ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีพิษณุโลก (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2002	15.65	16.67	17.83		20.33	19.90	15.15	17.40	16.27	17.71	16.56	15.47
2003	16.43	18.24	19.14	22.79	22.36	18.01	19.66	17.84	16.79	18.19	18.34	
2004	15.24								18.69	19.10	17.70	16.40
2005	14.42	17.63	18.88	22.01	21.40	17.89	19.13	15.83	16.71	18.26	16.90	15.66
2006	17.47	17.05	20.01	22.00						17.80	18.17	17.10
2007	16.99	17.91	19.48	21.47	18.55	19.46	19.01	16.72	16.96	16.77	15.93	15.89
2008	16.02	17.07	19.40	22.03	20.02	19.86	17.45	16.87	17.28	16.90	17.82	15.85
2009	17.03	16.67	18.99	21.63	19.42	18.30		19.03	18.36	17.27	17.62	15.18
2010	14.73	16.67	18.44	22.68	22.80	20.87	16.96	14.93	16.94	13.82	17.27	14.37
2011	16.26	16.67	16.59	19.80	19.47	16.62	17.07	16.17	16.36	17.09	17.75	16.15
2012	14.68	16.76	18.24	21.49	19.83	17.35	15.89	15.44	16.56	17.96	15.56	14.53
2013	14.55	16.85	19.10	21.12	21.66	17.93	16.67	16.74	15.77	15.85	15.07	15.37
2014	16.01	16.51	18.30	20.67	20.39	18.99	17.55	16.85	17.64	17.23	16.46	14.90
2015	14.51	16.60	17.91	20.85	22.50	20.81	17.31	18.14	17.45	16.50	16.97	13.88
2016	14.78	17.32	18.17	17.73	20.64	17.89	17.28	16.60	15.40	17.20	16.08	14.81
2017	14.31	18.84	20.46	20.73	18.56	18.65	14.32	17.05	16.47	16.04	15.36	15.12
2018		17.00	18.17	20.08	20.78	17.01	14.84	14.03	18.03	18.63	15.43	13.97
2019	14.22	17.00	19.75	22.38	21.66	19.79	16.70	13.80	18.62	19.05	16.53	15.18
2020	14.35	15.60	21.40	20.10	22.19	19.31	20.62	16.18	16.30	12.74	15.84	15.53



ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีเพชรบูรณ์ (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2002	16.64	16.78	17.61	20.85	19.54	19.78	15.65	16.27	14.70	18.40	16.95	15.51
2003	16.79	18.23	19.47	22.51	20.91	17.57	19.17	16.28	14.86	18.89	18.31	16.97
2004	15.72	17.54	20.15	21.28	18.62	17.26	17.56	16.17	17.81	19.41	18.32	16.77
2005	15.26	16.88	17.76	19.91	19.46	16.78	16.11	14.81	16.07	17.33	16.91	15.66
2006	18.12	17.97	20.22	21.82	16.20	20.24	16.52	16.26	17.44	17.64	18.31	17.46
2007	16.82	17.65	19.70	20.75	18.38	19.97	18.60	14.44	16.55	15.87	17.19	17.14
2008	16.65	17.07	20.13	20.21	17.99	18.02	17.78	15.77	16.23	16.37	17.62	16.43
2009	17.65	16.78	18.72	20.97	19.64	18.38	15.49	17.36	17.07	16.86	18.00	16.50
2010	14.81	16.78	19.41	22.60	21.13	20.31	18.33	14.87	17.69	16.86	17.45	16.05
2011	17.70	16.78	16.51	20.34	19.57	17.96	16.75	14.89	14.21	16.32	18.14	16.51
2012	15.18	18.10	18.70	20.45	18.74	17.02	16.49	14.47	16.39	19.26	17.28	16.51
2013	15.77	18.19	19.76	20.67	20.71	18.11	15.70	15.65	16.53	17.20	16.76	16.91
2014	17.94	17.44	18.89	20.97	21.31	18.46	16.10	16.94	16.06	18.06	18.10	16.09
2015	15.54	18.25	18.79	20.11	21.06	19.30	16.87	18.39	16.60	17.32	18.38	15.80
2016	14.93	18.70	18.63	12.76	20.81	18.50	17.53	16.74	15.66	17.64	17.98	16.31
2017	15.93	20.02	21.05	22.03	18.93	18.82	15.24	17.82	17.20	16.92	16.01	15.67
2018	16.15	17.44	19.95	21.01	21.11	18.18	14.96	15.33	17.74	19.78	17.44	14.88
2019	15.65	17.55	20.24	22.92	20.01	20.61	16.15	14.09	18.51	18.60	14.85	13.14
2020	17.75	19.34	21.06	21.89	23.68	21.14	21.43	17.46	18.64	14.67	18.09	17.64



ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีนครสวรรค์ (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2002	16.71	16.97	18.15	21.61	19.71	20.63	16.71	17.38	16.50	17.73	16.34	15.73
2003	17.83	18.53	19.75	22.77	21.92	18.44	19.44	19.17	16.41	18.08	17.84	16.01
2004	15.73	17.65	19.89	21.97	20.51	17.90	19.34	18.38	17.94	19.06	17.49	16.21
2005	15.18	17.36	18.54	20.31	20.08	19.44	17.62	16.20	16.88	16.48	14.46	14.57
2006	17.64	17.98	20.38	21.13	18.89	19.44	17.62	16.34	17.01	17.85	17.74	16.59
2007	15.32	16.78	18.51	20.88	18.22	21.60	19.50	17.27	17.13	16.36	16.01	16.35
2008	15.77	16.57	19.03	21.02	19.36	19.83	19.48	17.62	16.65	16.10	16.06	15.95
2009	16.41	16.97	18.80	19.88	18.63	19.27	17.00	18.36	18.15	15.57	18.29	16.41
2010	14.02	19.97	19.01	22.65	21.75	22.04	18.69	16.58	16.94	14.60	16.66	15.29
2011	16.45	16.97	15.19	19.76	19.67	17.99	18.37	17.54	17.09	17.14	17.67	16.24
2012	13.70	17.42	18.67	21.71	20.87	18.05	16.19	15.76	15.66	18.07	15.06	14.91
2013	14.81	17.12	19.63	20.59	22.01	18.92	16.89	17.61	15.39	16.94	15.19	15.61
2014	16.34	17.10	19.00	21.25	23.18	20.40	18.43	17.91	17.43	17.40	16.47	15.27
2015	13.95	17.82	18.37	21.65	22.58	20.82	17.30	18.54	17.10	16.27	16.11	14.52
2016	14.84	17.67	18.16	20.76	21.27	18.61	18.40	17.59	15.56	18.91	17.88	15.53
2017	14.33	19.19	22.14	21.72	19.09	22.74	18.63	19.06	19.23	16.79	14.85	14.58
2018	14.90	16.35	19.34		21.51	19.82	17.06	17.71	18.20	18.47	15.73	
2019	14.29											
2020	17.25	19.53	21.15	21.88	23.18	21.89	21.79	18.34	18.43	14.38	17.29	16.87



ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีหนองคาย (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2002	16.28	16.50	16.65	20.71	18.19	17.72	14.81	15.46	14.74	18.41	17.17	15.76
2003	16.59	17.65	18.00	21.48	20.94	17.18	19.45	17.58	17.60	19.73	19.73	19.73
2004	15.16	15.62	18.72	20.71	17.62	18.86	15.67	16.68	16.41	18.75	17.55	16.93
2005	15.42	16.29	16.78	19.56	19.91		18.02	14.43	16.62	19.51	17.36	15.74
2006	17.90	17.99	17.51	19.37	18.72	18.66	16.07	15.55	16.18	16.69	17.52	16.27
2007	16.50	16.91	18.46	20.71	19.16	19.94	19.58	16.04	17.01	16.86	17.19	16.50
2008	16.55	17.00	20.35	21.58	18.03	16.31	16.33	17.62	18.54	18.08	17.20	16.73
2009	18.27	18.16	17.51	21.47	20.23	19.13	16.66	19.00	19.05	18.05	18.46	16.12
2010	15.14	18.69	18.64	21.44	21.65	19.32	18.50	16.07	17.46	15.92	18.02	15.82
2011	17.87	17.12	17.33	20.46	19.76	17.15	17.07	16.37	15.93	17.34	18.20	16.83
2012	15.11	17.79	17.88	21.36	18.72	17.15	15.54	16.20	18.93			
2013			15.76	20.12	20.69	17.31	15.58	17.21	16.48	17.93	16.00	15.71
2014	18.04	17.22	17.60	19.18	21.56	17.22	15.54	17.34	17.69	19.28	17.67	15.33
2015	18.04	17.22	17.60	19.18	21.56	17.22	15.54	17.34	17.69	19.28	17.67	15.33
2016	14.56	19.07	17.80	20.22	21.69	19.78	19.01	17.28	17.03	17.99	17.16	15.91
2017	17.04	20.29	19.17	21.53	19.77	18.32	15.88	18.62	17.81	16.91	17.81	17.39
2018	16.20	17.16	19.58	20.48	22.44	17.77	16.01	15.38	19.91	20.52	18.14	16.43
2019	17.25	17.88	19.98	23.06	19.31	21.11	19.64	15.71	21.16	20.67	18.05	18.08
2020	16.78	18.60	18.49	21.21	22.88	20.95	20.28	15.69	17.52	14.71	18.67	17.95



ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีเลย (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2005			16.89	17.91	17.86	14.36	16.83	14.36	16.57	16.80	15.66	
2006		17.10	17.48	19.02	17.36	18.13	15.07	15.49	16.23	15.59	17.60	16.57
2007	16.88	17.04	18.06	19.46	16.24	19.04	18.68	15.02	15.34	14.28	15.86	15.31
2008	16.29	16.72	19.05	18.26	17.64	16.40	16.03	15.71	16.22	14.60	15.53	15.33
2009	17.23	17.06	16.45	19.06	18.16	17.59	14.81	16.68	16.87	15.80	17.00	15.09
2010	13.65	17.49	17.66	19.35	19.23	18.44	17.30	15.83	17.66	14.29	16.83	14.89
2011	17.47	16.71	16.41	18.56	18.16	16.16	16.17	14.64	14.44	14.78	17.11	16.12
2012	14.12	17.20	17.61	19.76	18.59						15.54	14.93
2013	14.33	17.35	18.15	19.88	20.44	16.88	14.89	16.67	14.94	15.65	15.01	15.57
2014	17.57	17.39	17.17	18.05	20.41	16.96	15.49	16.25	16.19	16.90	16.89	15.33
2015	15.52	17.34	16.55	18.98	20.38	20.92	15.32	17.12	16.15	16.64	16.29	14.36
2016	14.21	18.42	17.88		19.41	17.02	17.45	15.32	15.65	16.55	16.01	15.35
2017	14.81	19.02	18.27	19.61	16.87	16.41	15.41	16.73	17.23	15.04	15.44	14.10
2018	14.93	16.85	17.88	19.10	18.97	16.12	15.23	14.80	17.64	17.51	16.24	15.09
2019	15.79	17.08	18.28	20.20	17.29	17.47	16.25	13.44	17.89	16.94	15.65	16.49
2020	15.06	16.86	17.72	20.34	18.90	18.81	18.37	15.60	16.47	13.01	16.97	17.04



ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีนครพนม (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2002	17.56	17.73	17.83	21.13	22.09	15.80	14.45	16.58	15.94	19.66	17.69	16.72
2003	18.57	18.08	19.09	20.18	20.06	16.82	20.12	16.18	18.04	19.36	17.02	15.65
2004	16.03	16.06	18.85	19.71	18.72	18.76		14.29	17.53	19.17	18.45	16.85
2005	16.54	16.61	17.34	18.67	17.93					18.50	17.11	16.50
2006	18.61	18.90	17.33	18.98		19.62	12.95	13.71	18.84	17.20	16.78	16.82
2007	17.89	15.68	17.32	20.11	19.04	18.14	18.33	14.84	16.13	14.97	16.40	16.66
2008	17.03	17.01	19.24	20.14	15.22	13.79	14.26	15.01	15.93	16.35	16.84	16.04
2009	18.06	17.73	18.47	19.90	20.15	15.61	14.11	16.47	15.87	17.69	17.60	15.98
2010	15.62	17.73	18.53	18.62	17.65	17.91	17.26	14.11	16.65	15.33	16.45	16.50
2011	18.22	17.73	18.01	20.57	18.73	14.81	15.13	15.05	11.77	15.32	16.92	16.46
2012	14.83	18.64	17.85	17.50	16.05	13.68	14.24	12.85	17.67	18.74	17.35	16.90
2013	15.19	18.94	17.89	19.35	18.02	17.38	13.90	14.66	14.95	17.71	16.42	15.54
2014	17.99	16.75	18.24	17.36	20.90	13.93	12.88	14.31	16.10	18.87	18.07	16.27
2015	16.68	16.93	16.79	19.85	19.11	19.49	12.97	16.77	16.16	19.01	17.40	16.61
2016	13.88	19.89	17.80	18.16	18.66	18.20	17.46	15.18	15.64	17.50	18.04	16.57
2017	17.60	19.70	17.96	20.18	19.85	16.08	13.04	16.46	17.03	17.58	16.97	16.45
2018	17.23	18.26	18.41	20.59	20.95	16.36	10.62	11.20	19.24	20.89	18.48	17.47
2019	18.79	18.08	19.54	20.35	18.08	18.01	15.12	12.60	17.61	20.09	17.02	18.79
2020	17.14	18.75	20.21	21.90	22.59	22.42	22.28	17.63	20.65	15.08	17.33	17.45



ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีขอนแก่น (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2002		17.66	17.77	22.21	19.53	19.36	16.82	16.44	14.78	18.92	17.93	16.43
2003	20.16	20.75	21.64	25.34	24.63	21.16	22.61	20.11	18.02	21.82	20.60	18.79
2004	16.51		20.59	21.90	19.95	19.95	18.54	18.73	18.46	20.02	19.14	17.65
2005												
2006			15.49	17.48	18.17	17.19	15.16	11.96	13.84	16.10	16.42	15.34
2007	17.43	14.39	16.70	16.89	11.05	19.33	19.62	16.07	16.52	15.71	16.93	16.95
2008	17.20	17.82	20.48	20.58	18.69	19.90	18.99	17.99	15.47	17.05	16.83	16.33
2009	18.50	17.52	21.83	18.14	19.97	17.41	18.39	17.05			18.64	16.48
2010	15.63	17.52	19.69	21.97	21.10	20.92	19.33	16.65	17.44	16.57	17.85	16.63
2011	18.78	17.52	17.56	20.53	19.84	18.41	17.13	16.40	14.97	15.76	18.57	17.22
2012	15.93	19.45	19.69	20.29	20.02	17.33	18.29	16.45	17.12	19.52	17.27	17.33
2013	16.37	18.82	19.52		15.52	18.36	17.81	17.75	15.99	18.34	17.03	17.26
2014	18.66	17.66	19.13	20.16	22.14	18.74	15.64	18.63	17.90	18.84	18.08	16.62
2015	16.55	17.64	17.73	21.94	21.71	21.51	16.97	18.73	17.46	17.44	18.42	16.99
2016	15.79	20.22	19.41	20.58	21.71	19.84	18.28	18.86	16.45	17.51	18.07	16.94
2017	17.04	20.29	19.17	21.53	19.77	18.32	15.88	18.62	17.81	16.91	17.81	17.39
2018	17.43	18.08	19.98	20.89	22.75	20.40	21.65	15.07	20.04	20.87	19.09	17.43
2019	18.29	18.81	20.92	23.37	21.63	22.49	19.22	16.77		15.50	18.70	19.23
2020	18.16	20.47	20.15	22.73	21.91	22.39	21.48	17.49	18.34	14.09	18.56	18.51



ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีอุบลราชธานี (สว่างวีระวงศ์) (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2002	17.20	17.05	18.85	20.94	19.36	18.80	18.17	15.49	15.56	18.11	18.51	17.23
2003	18.61	17.95	20.25	20.95	21.06	18.87	18.17	17.05	14.05	18.81	18.48	17.13
2004	16.80	17.74	19.16	21.29	20.17	18.63	16.91	17.40	17.67	20.18	18.99	17.50
2005	16.34	17.72	18.74	19.22	20.18	18.33	16.55	14.87	15.15	18.91	16.63	16.54
2006	18.26	18.48	18.07									
2007												
2008												
2009	18.93	17.05	19.14	21.13	19.27	19.32	16.34	16.47	15.65	16.92	18.31	17.65
2010	17.42	17.05	19.91	20.60	19.08	19.54	19.21	14.50	16.89	16.18	17.06	17.83
2011	18.93	17.05	19.21	19.78	20.04	16.62	17.51	15.88	12.60	17.12	18.54	17.78
2012	16.54	19.20	19.01	19.22	20.02	16.97	16.39	16.14	17.40	19.02	17.52	17.94
2013	17.88	19.61	19.76		19.84	19.41	17.27	16.20	14.38	13.46	16.41	16.21
2014	18.71	17.05	19.22	19.07	20.64	16.12	15.22	16.88	16.09	18.78	18.61	17.37
2015	18.10	17.66	18.75	21.31	20.61	19.44	15.44	17.62	17.29	16.93	17.49	17.14
2016	14.93	19.61	18.94	20.90	19.53	19.77	19.41	17.82	16.26	17.82	18.40	16.66
2017	18.52	21.21	19.41	21.44	20.02	18.24	15.32	19.03	18.15	16.69	16.48	18.07
2018	17.74	20.43	17.96	20.43	20.89	19.01	14.35	15.40	19.04	19.93	18.37	18.00
2019	17.45	19.70	19.35	22.06	21.50	21.74	18.76	15.29	17.60	19.65	17.92	18.70
2020	18.56	20.43	19.92	20.60	20.60	20.06	19.17	16.35	19.74	14.84	17.79	18.58

ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีร้อยเอ็ด (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2006			18.23	20.38	20.19	19.61	20.31	16.74	19.27	18.76	16.73	14.56
2007	17.85		19.88	20.93	19.63	20.06	20.51	16.95	15.80	18.68	17.87	17.63
2008	17.86	18.35	20.65	21.19	18.20	19.10	18.71	18.74	16.22	18.57	17.34	17.21
2009	18.87	19.09	19.04	21.70	18.60	21.01	17.86	18.59	17.16	19.31	18.24	16.61
2010	16.50	17.84	20.24	21.64	20.55	20.36	20.50	17.57	17.98	16.91	18.16	
2011	19.03	18.82	18.65	20.94	21.14	18.26	18.49	16.86	14.00	16.22	18.23	17.13
2012	16.08	19.34	18.58	19.68	19.35	17.71	17.27		17.39	20.38	16.97	17.29
2013	11.22	18.58	19.28	19.80	20.44	18.34	17.49	16.69	15.15	19.04	17.60	16.46
2014	18.65	16.85	19.44	20.54	20.70	18.85	16.19	18.01	17.84	19.47	18.14	16.98
2015	17.42	18.39	17.71	21.85	21.88	20.35	16.40	19.84	17.27	17.97	18.12	16.94
2016	15.80	20.13	19.49	21.11	21.77	19.01	19.00	19.50	16.86	18.49	18.40	16.16
2017	17.85	20.12	18.80	22.26	19.03	18.55	16.55	18.85	15.76	18.48	17.44	16.56
2018	17.22	18.22	18.89	19.89	21.51	20.17	15.30	15.60	20.72	20.93	19.15	16.75
2019	18.07	17.72	20.28	21.74	20.76	20.30	16.14	15.78	18.83	20.96	17.64	18.08
2020	17.95	19.93	19.35	21.65	20.80	21.06	21.26	18.36	17.01	13.22	17.76	15.66



ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีนครราชสีมา (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2002	16.40	17.52	20.52	20.66	18.11	18.86	17.27	16.13	16.06	17.18	15.70	15.77
2003					20.57	11.17						
2004	15.22	17.72	19.59	21.09	19.83	18.64	18.70	18.59	16.91	18.89	17.84	17.01
2005	15.18	18.06	18.10	19.17		18.42	18.43	17.07		16.37	16.00	15.76
2006	17.90	18.18	18.68	20.27	19.29	19.34	17.41	16.91	15.68	16.80	16.48	17.05
2007	17.16	17.60	19.35	20.32	17.59	19.67	19.93	17.36	16.66	14.09	16.73	
2008	17.17	17.72	20.45	20.03	19.39	18.45	18.29	18.24	17.26	15.36	16.08	16.54
2009	18.07	17.87	18.12	21.15	19.40	18.71	18.46	17.94	16.99	16.17	17.62	16.53
2010	15.27	17.96	20.06	21.60	21.12	20.70	18.62	16.44	15.80	13.98	17.11	16.61
2011	18.08	16.81	17.11	18.88	19.69	19.20	18.45	16.39	16.01	14.26	17.79	16.59
2012	8.56	18.48	18.97	20.08	19.76	17.73	18.94	16.90	15.25	17.22	15.63	16.53
2013	15.45	17.33	18.95	19.56	20.82	18.12	16.91	16.85	14.68		14.15	16.08
2014	17.86	16.28	18.33	18.84	20.25	18.02	18.11	17.19	17.37	16.54	17.57	16.16
2015	16.69	17.63	17.78	20.92	21.96	19.69	17.35	18.90	17.50	16.59	17.12	16.45
2016	15.10	19.03	19.38		19.17	18.77	18.90	19.03	16.07	15.43	16.63	15.94
2017	15.86	19.33	19.33	21.63	18.38	19.63	16.60	17.98	17.57	15.43	13.58	15.94
2018	16.28	17.65	19.33	18.95	20.18	19.14	17.28	17.48	18.81	19.71	17.68	16.49
2019	17.18				17.03							
2020	17.50	19.87	21.52	22.15	22.05	19.01	20.99	18.46	17.69	11.72	18.16	16.32



ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีสุรินทร์ (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2002	17.71	16.79	18.67	21.35	19.19	20.28	19.42	17.19	16.66	18.78	17.69	17.20
2003	18.46	17.48	19.23	21.22	21.99	19.87	20.32	19.22	15.72	18.93	18.55	17.36
2004	15.15	17.33	19.36	21.27	20.69	18.77	19.22	18.69	17.92	20.05	18.73	17.87
2005	16.77	17.67	18.00	19.89	20.70	19.06	18.15	16.22	16.22	18.11	16.40	16.18
2006	17.89	17.83	19.33		20.95	20.72	17.24	17.27	18.66	18.01	18.02	16.79
2007	17.23	17.77	18.86	21.08	18.96	20.65	20.06	17.52	18.02	14.50	17.34	16.38
2008	16.35	17.73	20.16	20.23	18.21	20.48	20.02	19.01	16.15	16.25	15.25	15.28
2009	16.89	16.79	19.02	22.03	18.98	19.36	17.40	18.58	16.86	17.15	16.61	15.63
2010	14.92	16.79	19.93	20.86	20.59	20.13	20.65	17.24	17.54	15.39	16.15	15.17
2011	14.63	16.79	18.17	19.55	18.57	18.73	18.48	16.16	13.76	15.77	17.43	15.38
2012	13.33	16.61	18.17	20.12	20.72	17.75	19.17	17.16	16.56	18.15	14.50	14.45
2013	14.78	17.04	18.57	19.46	15.06							
2014					21.13	17.42	13.78	17.76	18.47	17.07	17.55	16.05
2015	17.04	17.41	17.82	20.71	22.91	19.88	15.69	19.61	18.21	17.22	17.56	17.06
2016	15.26	19.19	19.80	21.69	20.68	19.55	19.97	19.48	15.89	17.74	17.75	16.47
2017	17.91	19.44	19.45	20.50	16.64	20.57	17.63	19.70	18.69	17.94	16.55	17.01
2018	16.90	18.38	18.58	19.54	20.19	19.20	15.55	17.25	19.44	20.37	18.23	17.15
2019	18.57	19.51	20.18	21.22	20.38	21.66	20.32	16.92	18.46	20.21	17.99	
2020	18.35	19.60	19.55	20.50	20.65	21.41	21.15	18.73	17.95	11.51	18.20	17.31



ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีลพบุรี (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2002	17.06	17.01	18.18	20.09	19.07	19.48		15.00	15.70	18.58	18.12	16.93
2003	18.46	17.80	19.34	22.12	20.24	18.13	18.96	18.09	16.13	18.21	18.49	17.63
2004	16.27	18.81	20.11	20.63	19.96	16.47	18.28	18.60				
2005		18.31	19.35	20.10	19.70	17.71	17.41	15.99	16.13	17.47	16.60	15.74
2006	18.57	17.31	20.62	21.51			17.57	16.29	14.74	18.76		
2007	17.28	18.98	19.56	20.24	18.92	19.88	18.91	16.83	17.74	15.33	16.74	17.66
2008	18.25	19.90	20.31	22.05	19.80	19.25	19.37	17.96	17.01	17.20	16.73	16.77
2009	18.73	18.30	19.82	19.68	19.55	18.29	16.72	19.84	16.39	17.70	18.37	17.68
2010	15.29	18.83	19.78	22.35	20.91	21.35	18.98	16.85	18.61	15.63	17.58	17.74
2011	18.52	17.05		19.37		17.37	17.82	16.37	15.69	16.80	18.03	17.17
2012	14.91	18.47	19.39	19.87	19.67	16.69	17.05	16.75	16.31	20.58	16.94	
2013	16.20	17.77	19.15	20.21	21.86	18.66	16.43	17.03	15.54	17.80	16.67	17.59
2014	18.92	18.05	19.79	19.47	21.20	19.05	17.45	16.61	18.03	18.60	18.23	17.29
2015	16.67	18.62	19.01	20.89	18.02	19.79	16.57	17.95	17.45	17.48	18.27	16.83
2016	16.29	18.45	19.32	21.05	19.74	18.79		17.32	15.66	17.11	17.98	16.28
2017	15.78	19.55	20.30	21.50	18.07	18.76	16.25	18.14	17.80	16.75	15.36	15.49
2018	16.63	17.68	19.85	18.65	18.60	17.20	15.16	15.69	18.50	18.95	17.49	15.00
2019	16.95	18.42	20.07	21.71		18.34				20.00	19.95	17.98
2020	16.81	18.38	20.04	21.48	20.48	20.02	20.15	16.73	16.77	11.56	16.27	16.11



ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีกาญจนบุรี (ทองผาภูมิ) (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2005	16.08	18.43	19.29	22.39	19.02	12.69	13.82	13.03	15.07	17.42	17.40	16.01
2006	18.93	18.51	20.97	21.77	17.60	16.84	12.65	12.26	18.05			
2007	16.67	17.86	17.83	22.25	14.89	19.45	14.84	14.43	15.56	14.84	15.18	17.01
2008	17.27	17.16	19.97	21.00	16.14	16.11	14.63	14.29	16.64	18.11	16.98	17.48
2009	19.13	17.81	20.00	22.00	18.62	13.36	12.93	17.67	16.86	17.78	13.70	16.69
2010	16.92	17.81	20.15	23.34	21.86	19.79	18.74	15.08	19.07	15.09	17.31	16.73
2011	17.86		17.16	21.79	18.27	14.36	15.04	14.73	13.70	17.04	18.56	17.68
2012	17.20	19.25	20.96	23.23	18.33	13.31	14.16	12.49	15.87	19.26	17.09	17.29
2013	18.25	18.02	22.68	21.93	20.80	15.45	13.65	15.34	15.21	17.36	16.45	17.98
2014	18.95	20.12	19.78	22.67	21.90	15.67	15.03	16.66	17.79	18.49	18.13	17.16
2015	16.85	20.02	21.53	23.52	20.81	18.44	14.80	14.94	17.57	18.04	18.89	17.51
2016	18.23	18.91	19.85	23.74	20.59	15.45	16.53	15.14	15.89	18.35	18.53	16.36
2017	15.67	20.69			17.94	16.59	13.54	16.17	19.25	16.92	15.52	16.58
2018	17.21	18.77	21.25	21.26	21.34	15.43	11.47	11.50	18.06	18.84	18.11	16.12
2019	16.44	19.65	22.27	23.06	20.20	16.34	15.06	11.73	16.32	20.52	17.62	18.19
2020	17.09	18.17	20.63	19.90	21.17	19.40	19.38	15.50	18.23	14.21	17.08	18.27



ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีกาญจนบุรี (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2002	16.99	17.56								18.61	16.63	16.35
2003	17.93	19.67	20.11	24.08	18.07	14.08	16.24	14.82	14.41	16.76	18.87	17.14
2004	16.21	18.43	19.91		17.18	15.54	15.72	13.60	17.39	18.32		
2005	14.53	17.26	18.39	21.40	21.04							
2006	17.89		20.63	21.75	19.17	17.93	16.13	14.46				
2007	16.52	18.48	19.92	21.36	17.96	19.91	17.49	16.09	18.23	15.23	15.00	16.06
2008	16.15	16.79	21.16	21.50	18.99	19.59	17.74	18.19	17.33	15.69	15.81	17.05
2009	17.73	18.33	20.18	22.54	18.62	16.81	16.43	19.18	18.89	17.21	18.15	16.69
2010	15.59	19.59	20.17	23.47	22.51	21.64	20.33	17.26	20.40	15.63	15.21	15.57
2011				21.06	20.49	17.16	18.19	17.74	16.93	15.22	19.22	16.79
2012	15.17	18.35	19.36	23.28	21.01	17.07	16.72	16.65	17.09	17.83	15.04	16.86
2013	13.16	16.88	21.06	21.14	21.67	17.92	16.82	18.94	15.36			
2014	17.63	18.39		21.99	23.20	17.18	16.95	17.87	20.14	16.15	17.69	15.88
2015	16.25	18.86	19.59	22.79	22.37	20.38	18.76	18.94	18.46	17.17	17.53	16.99
2016	17.56	18.90	19.77	23.34	21.68	19.25	18.66	18.04	17.42	16.65	15.89	15.83
2017	14.39	19.66										
2018		19.06		20.29	22.21	18.94	15.38	15.12	19.31	17.43	17.09	14.94
2019	15.06	19.06	22.11	23.60	21.78							
2020	16.32	18.23	21.19	20.87	22.20	21.25	20.53	18.44	19.11	12.41	16.60	16.61



ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีกรุงเทพมหานคร (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2002				19.48	16.58	16.90	16.61	15.23	15.30	13.88	14.05	14.05
2003	19.81	17.92	19.67		19.74	18.22	15.85	16.92	13.87	15.31	15.65	16.12
2004	15.15	17.71	18.58	22.69	17.75	15.13	17.27	16.57	13.00	17.36	16.33	16.44
2005	15.44	18.19	19.19	19.67	19.08	17.98	16.10	16.52	15.29	13.91		14.07
2006	16.54	17.27	18.91	19.61	16.54	17.11	15.56	15.48	15.90	15.10	15.74	15.88
2007	15.84	19.19	19.98	18.55	16.54	17.95	15.39	15.41	15.92	13.07	16.00	16.50
2008	16.01	15.51	20.20	19.47	17.81	16.81	16.78	16.61	16.32	13.41	14.61	16.26
2009	17.09	17.98	19.73	19.81	16.62	17.35	15.60	16.64	17.32	13.91	17.32	19.59
2010	14.01	17.98	20.70	22.37	19.16	20.74	17.02	15.56	15.48	13.31	14.72	14.85
2011	17.47	17.98	13.96	18.05	18.28	15.38	17.62	16.20	15.25	13.79	17.74	17.07
2012	13.84	16.60	18.36	21.30	18.89	16.91	16.34	16.25	14.27	14.34	12.03	14.64
2013	15.67	16.48	19.76	20.03	20.47	16.41	15.07	16.90	13.76	12.84	20.43	17.41
2014	17.13	17.98	19.47	19.70	20.37	16.79	17.06	16.43	17.45	13.86	14.29	15.78
2015	16.28	18.94	18.59	21.16	20.39	19.41	18.03	17.97	16.70	12.41	13.41	14.52
2016	14.80	17.35	19.23	22.72	21.11	16.19	17.54	17.88	16.25	11.46	13.49	14.62
2017	13.73	18.52	19.13	20.29	16.32	18.49	16.84	17.32				
2018	14.35	16.46	19.20	19.45	16.56	17.46		14.53	16.74	16.01	15.33	15.04
2019	14.78	16.46	20.86	23.08	20.81	17.62	18.00	15.47	15.49	16.42	16.77	16.89
2020	15.89	18.65	21.46	20.30	20.74	19.87	18.66	17.71	16.87	12.44	15.94	15.77



ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีสระแก้ว (อรัญประเทศ) (เมกะจูลต่อตาราง
เมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2007	16.57	17.76	19.24	20.17	18.17	20.40	18.90	17.00	18.01	14.86	17.14	16.92
2008	16.12	16.51	19.46	19.90	18.54	19.49	18.75	18.90	17.73	16.51	15.17	16.36
2009	17.40	16.85	18.00	20.28	19.47	19.12	13.57	15.13	12.75	16.17	17.12	16.04
2010	14.83	17.37	19.84	21.23	20.63	19.02	18.55	16.75	17.54	15.57	16.97	15.98
2011	17.16	16.93	16.62	19.08	11.63				13.62	16.10	18.05	16.33
2012	14.30	17.35	18.71	19.99	18.89	16.61	16.97			17.44	15.85	16.87
2013	15.20	18.93	20.24	16.82		17.40	15.92	17.56	15.17	15.32	15.44	15.77
2014	17.12	16.51	19.30	20.73	20.53		17.32	17.49	17.76	16.75	17.09	15.78
2015	16.84	17.36	17.66	21.13	20.91	18.52	16.46	19.38	17.45	16.68	16.65	16.32
2016	15.52	18.76	19.32	21.88	19.65	18.63	17.66	18.70	16.30	16.30	16.15	14.80
2017	15.79	18.73	18.01	20.35	18.34	18.91	15.87	18.02	17.89	16.68	13.86	15.77
2018	15.28	17.34	18.56	19.88	19.67	17.75	14.96	14.99	17.73	18.94	17.64	16.10
2019	17.19	18.54	19.63	21.69	19.90	18.14	18.69	15.28	15.99	18.88	17.32	17.02
2020	16.59	16.60	20.46	20.17	19.81	19.16	24.99	20.81	20.39	15.34	18.76	18.44



ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีปราจีนบุรี (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2002	17.63	17.07	16.99	21.90	17.29	17.95	16.09	15.08	17.07	18.69	18.62	17.73
2003	18.80	18.54	19.77	22.42	20.67	17.87	17.30	16.01	16.13	18.55	19.68	18.35
2004	17.33	18.92	20.21	21.14	17.94	15.19	19.59	17.80	17.04	19.97	19.91	18.32
2005	16.16	18.53	19.48	19.61	19.57	16.99	16.14	16.34				15.87
2006												
2007												
2008	17.60	18.15	20.87	20.94	17.71	17.47	17.23	17.24	16.51	15.12	16.19	17.33
2009	17.47	17.07	18.75	20.74	18.30	16.70	15.71	16.84	17.46	16.55	17.99	17.43
2010	14.50	17.07	19.09	20.24	18.83	19.71	20.06	12.89	19.34	15.69	17.17	16.43
2011	19.26	18.98	16.88	20.47	20.14	15.16	14.86	15.90	11.74	17.21	19.17	17.54
2012	14.85	17.15	18.43	19.48	18.03	16.99	15.99	16.02	16.18	18.26	16.49	17.16
2013	16.36	16.46	19.39	18.68	20.80	17.85	15.95	16.90	14.59	17.27	17.12	17.31
2014	18.02	17.30	18.50	19.53	20.91	15.77	16.19	16.98	18.93	18.65	17.98	16.88
2015	16.89	17.90	17.45	20.31	19.93	18.34	16.60	18.31	17.73	18.08		16.56
2016	15.77	18.65	18.93	20.88	19.86	16.37	18.12	18.19	17.97	16.65	17.50	16.01
2017	15.74	18.49	18.10	16.43	18.42	19.57	15.78	17.74	19.19	17.49	13.51	15.86
2018	16.12	17.08	18.18	18.94	19.07	16.80	14.10	13.50	18.14	20.11	17.16	15.83
2019	16.33		19.77			19.42	18.35	15.01	16.59	19.94	17.31	17.38
2020	16.24	17.87	18.80	19.86	18.83	18.09	20.86	17.55	17.67	13.88	17.75	17.99



ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีชลบุรี (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2005			18.25			19.15	17.38			16.36	14.69	14.56
2006	17.43	16.57	18.94	18.82	16.16	17.80	18.05	17.40	16.83	17.57	17.69	16.65
2007	12.97	17.71	18.83	18.99	17.19	18.37	16.87	17.93	17.00	16.20	17.48	17.17
2008	12.57	15.86	19.10	19.01	19.40		17.98	17.68	17.01	15.90	15.76	17.32
2009	17.68	18.26	17.81	20.00	16.39	19.70	18.15	18.49	18.03	15.83	17.90	
2010	15.51	17.85	20.67	21.58	18.04	19.65	17.95	17.15	17.01	15.39	15.94	15.55
2011	17.92	16.30	14.93	17.92	18.92	16.10	18.87	18.63	17.15	16.77	18.47	16.51
2012	14.25	17.60	17.35	20.63	18.54	19.02	17.28	18.49	16.34	16.70	14.07	15.99
2013	15.54	15.70	19.65	18.37	20.87	18.13	16.05	19.00	16.16	15.60	15.95	17.43
2014	18.24	17.07	19.43	18.86	20.45	18.34	18.79	17.58	17.36	16.86	17.02	16.76
2015	17.28	17.57	18.62	20.69	19.62	18.23	18.67	19.94	17.15	15.71	16.68	16.09
2016	15.47	18.16	19.26	21.92	20.26	17.98	18.61	19.34	18.36	16.42	15.72	14.70
2017	14.94	18.20	17.43	18.64	15.20	18.02	15.63	17.68	16.83	16.22	13.18	14.47
2018		17.58								17.48	16.92	15.91
2019	15.14	16.31	19.37	20.49	17.31	17.51	19.20	15.75	16.48	17.41	16.82	16.87
2020	16.20	17.58	19.58	19.00	18.77	19.31	18.04	18.82	17.32	13.87	17.49	17.48



ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีตราด (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2006			16.64	18.96	17.98	17.18	10.68	10.90	16.12	18.86	19.73	18.61
2007	18.09	19.99	21.37	19.56	17.13	18.17	13.50	12.78	15.96	15.73	16.96	19.11
2008	18.59	17.80	20.87	21.19	16.11	16.60	15.15	16.28	13.66	17.86	15.96	18.18
2009	18.61	18.33	20.34	19.51	17.19	14.87	13.57	15.13	12.75	15.81	19.82	19.43
2010	18.63	21.12	20.70	23.14	20.72	16.28	17.33	14.68	17.76	15.10	16.66	17.85
2011	19.26	18.98	16.88	20.47	20.14	15.16	14.86	15.90	11.74	17.21	19.17	17.54
2012	16.66	18.78	20.70	20.88	15.39	14.41	15.54	15.05	14.39	18.65	18.07	19.03
2013	17.28	17.37	21.64	20.00	19.38	15.23	12.31	14.39	13.93	17.37	18.24	18.69
2014	19.66	18.64	20.85				11.79	16.98	15.47	18.45	19.61	19.19
2015	19.79	20.71	21.47	21.98	20.81	17.09	14.71	15.82	17.30	18.74	19.46	19.04
2016	19.80	21.57	21.94	24.43	18.90	17.41	11.39	15.33	14.69	13.66	18.76	16.53
2017	19.37	21.75	20.73	14.49								
2018			18.28	20.82	21.53	14.13	10.20	10.82	16.09	18.10	18.34	17.42
2019	17.47	20.23	21.56	22.95	17.62	15.05	16.42	10.20	13.68	19.40	19.06	19.52
2020	18.13	18.52	22.41	19.40	20.38	17.63	18.12	16.19	16.16	14.95	16.92	16.82



ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีประจวบคีรีขันธ์ (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2002	20.21	19.68	21.10	21.30	18.69	18.58	17.32	15.20	16.66	20.15	15.36	15.91
2003	18.90	19.79	19.54	23.75	17.76	20.44	16.57	16.48				
2004	17.15	17.15	21.89	23.35	16.64	16.58						
2005		21.77	22.36	22.64	19.93	15.49	15.38	17.13	16.85	15.82	14.73	14.82
2006	17.32	21.41	21.81	21.93	18.91	18.25			16.37	17.55	19.09	17.63
2007	17.46	21.28	22.94	20.71	17.18	19.83	15.75	16.37	17.20	14.83	17.16	17.83
2008	17.81	18.51	21.28	20.65	16.86	17.57	17.08	19.19	16.88	16.61	15.01	18.44
2009	19.16	19.68	21.93	20.86	17.45	17.26	15.02	18.05	16.52	16.86	20.18	18.32
2010	18.29	19.68	22.59	23.96	21.30	19.48	18.69	16.73	19.55	15.05	16.64	17.14
2011	17.32	19.68	16.13	22.95	20.47	16.46	17.17	17.53	14.68	16.52	18.67	16.86
2012	15.48	19.40	21.80	21.99	18.16	16.50	16.66	17.94	15.49	18.20	14.75	17.87
2013	16.87	18.37	23.16	20.70	19.19	16.97	15.15	17.24	15.14	15.50	16.61	18.97
2014	19.51	20.98	22.34	22.84	23.18	15.88	15.75	18.71	19.28	16.20	17.97	16.56
2015	19.38	20.68	21.23	23.98	22.50	18.79	17.60	17.43	17.42	18.46	15.32	16.83
2016	19.92	20.04	22.36	24.20	21.05	18.28	17.53	18.22	16.59	13.11	17.14	15.18
2017	14.21	21.22	22.21	21.44	17.75	19.40	14.13	18.89	18.66	18.16	13.86	17.22
2018	17.23	18.90	22.42	21.00	22.35	17.38	15.31	13.20	18.54	18.09	18.58	15.89
2019	16.46	21.16	22.32	24.55	21.02	16.31	18.99	13.23	15.23	19.65	17.99	19.40
2020	18.42	19.37	23.91	22.04	22.84	17.97	20.54	17.92	17.33	14.39	18.78	17.33

ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีประจวบคีรีขันธ์ (หนองพลับ) (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2015	17.07	19.84	19.82	21.81	20.42	18.25	18.36	16.40	17.10	16.22	15.06	15.75
2016	17.20	18.94	21.21	23.44	19.53	17.79	17.06	17.61	16.22	13.38	14.67	14.18
2017	13.51	19.94	20.20	21.04	16.10	19.44	15.19	18.20	18.34	16.31	12.05	14.20
2018	15.68	17.47	19.26	14.72	18.99	16.07	15.08	12.93	17.17	15.68	15.43	13.65
2019	14.52	17.63	19.52	19.14	18.30	16.17	17.85	12.75	14.60	16.21	15.18	17.20
2020	16.88	17.93	20.96	19.42	19.95	17.06	18.56	17.03	16.58	12.65	14.75	14.06



ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีชุมพร (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2005		19.76	21.59	21.34	17.67	15.28	14.71	17.09	15.58	14.24	13.38	12.43
2006	17.13	17.82	20.75	20.26	15.51	17.79	13.16	13.67	15.43	15.92	17.46	15.76
2007	16.10	21.54	21.94	21.41	16.68	17.63	13.84	16.20	16.71	11.68	15.06	16.62
2008	16.75	16.59	21.35	19.04	13.35	13.91	13.65		15.55	15.16	11.47	17.19
2009	18.36	20.48	21.14	19.23	14.81	19.70	13.98	17.78	13.83	15.97	17.34	16.90
2010	17.43	21.36	21.95	23.37	17.61	15.80	15.69	15.50	17.92	13.19	10.26	15.77
2011	14.00	19.60	15.30	22.82	17.62	13.10		16.26	14.96	15.38	16.37	14.27
2012	16.10	19.92	20.74	18.59	15.49	15.08	15.90	17.76	15.45	18.92	13.76	15.36
2013	16.07	17.53	22.78	19.75	17.53	14.15	13.94	17.46	15.41	15.69	14.01	16.61
2014	19.16	21.14	22.64	20.94	18.27	12.50	13.00	17.23	15.86	15.06	15.12	15.48
2015	19.70	20.80	22.03	20.88	18.86	14.95	15.37	15.70	16.55	15.72	13.48	14.93
2016	17.43	18.70	22.73	23.78	18.06	14.92	14.60	16.20	15.23	13.82	16.12	12.10
2017	12.25	20.04	20.69	18.48	15.32	15.29	13.34	17.21	17.27	16.06	12.72	14.31
2018	17.01	19.20	21.63	18.46	17.46	14.38	12.80	13.54	16.38	16.12		
2019	14.03	16.60	18.30	16.14	14.83	12.94	15.76	10.30	13.16	14.71		15.79
2020	16.97	16.87	21.56	18.67	18.00	17.29	18.21	15.95	17.65	13.97	15.64	14.87



ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีระนอง (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2002	16.03	18.40	20.17	19.23	15.64	14.16	15.52	12.33	14.85	16.68	12.37	13.60
2003	18.50	18.53	18.75	21.94	13.88	17.82	15.43	15.87	13.66	12.12	16.34	16.27
2004	14.46	19.25	19.74	21.70	15.44	14.26	15.28	13.27	16.76	15.73	16.12	
2005	17.99	20.47	20.51	20.50	18.49	13.86	12.65	16.49	16.14	13.49	13.39	12.23
2006	16.25	17.51	19.84	19.42	14.07	16.40	12.30	11.52	14.57	15.23	16.83	16.85
2007	16.64	20.63	19.49	18.92	15.14	15.90	11.46	13.76	13.93	10.58	14.06	16.40
2008	16.64	17.52	19.64	18.12	13.67	14.10	15.56	18.28	14.72	14.79	12.50	17.21
2009	17.67	18.40	17.59	17.25	15.90	15.58	14.74	14.95	12.95	14.27	15.64	16.29
2010	16.74	18.40	20.35	21.09	17.66	15.79	15.61	14.67	16.50	13.06	10.66	13.56
2011	13.63	18.40	14.04	19.59	17.17	13.72	13.39	16.42	13.15	14.70	15.41	14.22
2012	13.79	18.58	18.26	18.83	14.27	15.33	15.91	16.70	12.51	16.49	14.00	13.55
2013	17.05	16.13	21.91	18.20	16.25	14.00	12.35	16.24	14.93	13.24	13.08	16.02
2014	19.15	21.37	22.68	20.04	18.63	14.09	10.47	16.04	15.32	14.01	14.30	14.69
2015	17.64	20.70	20.70	19.85	18.93	15.00	14.22	14.91	14.82	16.00	12.59	14.55
2016	16.72	18.77	22.85		15.88	15.83	14.74	13.51	12.59	11.99	15.42	11.76
2017	12.06	18.76	20.06	18.97	15.53	16.36	13.10	15.37	15.22	15.21	12.43	14.79
2018	14.48	19.61	20.42	19.02	17.11	14.36	11.36	12.45	15.90	14.96	15.49	13.28
2019	16.87	20.74	22.54	20.48	17.77	14.20	17.58	11.69	14.27	14.63	15.43	16.88
2020	17.70	19.57	22.29	19.33	18.55	15.56	16.95	16.97	15.34	12.29	15.05	14.15

ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีสุราษฎร์ธานี (เกาะสมุย) (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2002	17.65	20.56	22.06	22.04		20.21	20.21	17.38	19.46	18.57	14.11	14.51
2003	18.77	19.85	21.11	24.93	19.60	19.60	18.41	20.55	16.67	19.30	17.37	15.08
2004	17.81	19.27	21.93	22.40	19.44	18.52	17.12	17.71	18.87	17.00	11.65	17.14
2005	19.49	22.44	22.51	23.04	20.45	18.33	16.86	19.59	18.76	15.37	13.50	10.47
2006	17.20		22.27	22.04	17.40	19.31	18.22	18.22	17.78	17.36	16.48	15.50
2007	15.80	22.20	21.81	22.29					18.43	13.08	14.00	16.88
2008	17.65	17.81	21.75	21.17	19.19	18.21	18.55	20.66	17.86	16.15	12.76	15.22
2009	17.72	20.52	22.68	20.08	17.18	21.42	16.88	19.19	17.01	18.15	16.26	16.30
2010	17.43	20.52	21.61	24.16	21.66	18.81	17.48	18.50	18.59	15.15	11.51	14.03
2011	12.42	20.52	16.92	23.67	20.96	18.33	18.19	18.91	17.89	17.77	15.96	13.88
2012	14.56	20.68	21.65	20.77	19.89	19.47	19.43	21.28	17.25	17.88	16.73	16.34
2013	16.96	18.89	22.68	19.92	20.22	18.03	16.72		16.80	15.78	15.29	16.18
2014	18.36	22.38	23.76	22.98	21.14	17.75	17.34		17.13	15.80	14.37	13.94
2015	16.82	20.83	22.20	21.58	22.58	16.95	19.00	18.21	17.94	15.25	12.90	15.08
2016	18.34	18.10	23.23	24.34	19.91	19.04	18.23	19.09	19.02	15.04	16.25	11.52
2017	11.79	19.01	21.33	19.01	18.43	18.99	17.60	19.35	17.93	16.93	13.12	13.75
2018	15.39	19.33	22.32	20.44	19.52	16.93	17.34	16.57	18.84	16.12	13.60	11.48
2019	13.62	20.15	22.32	22.71	21.72	17.35	19.62	15.95	15.00	18.25	15.52	15.29
2020	18.78	18.57	24.85	20.62	20.55	18.19	17.73	17.91	20.86	14.69	15.39	14.73

ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีสุราษฎร์ธานี (พุนพิน) (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2005				21.92	17.00	15.81	16.54	18.51	17.67	14.75	14.76	9.63
2006	17.25	18.44	21.29	19.30	16.68	16.82	15.76	16.30	17.80	16.64	16.73	14.56
2007	15.72	22.35	20.86		17.22	17.43	15.27	17.67	17.63	13.33	14.79	
2008	20.17	18.70	20.58	19.05	17.29	16.54	16.70	20.01	16.32	15.91	12.14	13.55
2009	17.03	21.41	20.95	19.60	17.03	18.24	16.31	17.76	15.91	16.28	15.67	16.27
2010	17.46	22.36	22.65	21.33	18.04	16.73	16.42	17.60	17.39	14.63	10.74	13.41
2011	14.59	20.38	14.17	20.93	18.99	17.14	16.03	18.05	17.50	16.23	16.08	12.13
2012	14.53	20.82	20.79	20.19	17.77	16.60	17.87	19.06	16.34	17.55	14.82	14.24
2013	16.96	18.89	22.68	19.92	20.22	18.03	16.72		16.80	15.78	15.29	16.18
2014	17.35	21.95	22.03		17.67	15.86	15.33	17.64	16.02	15.08	13.14	10.09
2015	15.92	19.46	20.34	18.42	18.35	16.21	15.76	15.60	16.16	15.68	11.39	14.45
2016	16.28	17.29	22.05	20.88	16.36	16.00	15.57	15.91	15.86	13.16	14.37	10.16
2017	10.89	17.28	19.59	18.29	17.36	18.12	17.30	17.52	17.10	16.23	11.52	13.15
2018	14.14	20.86	22.40	20.50	18.63	15.58	16.47	16.76	17.08	16.57	15.16	13.79
2019	17.24	22.45	22.36	20.24	18.29	16.54	18.41		15.81	15.62	16.76	15.52
2020	18.90	18.83	23.33	20.49	18.59	15.41	17.11	17.76	16.90	13.62	14.49	12.70



ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีภูเก็ต (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2002	20.73	23.37	23.18	21.82	19.46	18.03	18.08	16.54	18.19	18.88	16.98	17.47
2003	21.20	23.01	21.97	23.52	17.11	18.90	16.13	18.22	16.08	14.75	19.58	18.20
2004	21.56	21.96	21.41	21.53	18.55	16.01	16.26	17.01	18.51	18.53	19.53	19.81
2005	20.94	23.62	24.01	23.56	17.85	16.64	17.48	19.04	17.51	14.76	15.83	14.30
2006	19.56	22.25	22.24	20.98	17.68	16.49	15.95	16.87	19.39	18.34	20.48	19.03
2007	19.08	23.72	22.26	21.14	16.82	17.73	16.49			14.09	17.77	18.44
2008	20.43	21.13	22.63	21.27	17.74		18.07	19.50	16.77	17.88	16.30	18.45
2009	20.81	22.13	20.94	21.31	17.02	19.65	16.90	18.03	16.27	17.83	18.29	19.59
2010	20.28	23.25	23.65	22.95	19.16	16.33	16.43	16.62	17.74	14.49	14.95	14.10
2011	18.12	22.22	16.91	22.83	20.24		16.67	17.49	17.25	17.55	19.48	17.53
2012	18.04	17.26	22.42	19.98	16.60	17.95	18.05	19.05	15.95	20.17	18.15	
2013	19.75	19.22	24.11	18.53	17.65	16.43	15.36	17.90	17.14	16.96	16.68	18.30
2014	21.13	23.97	24.24	20.51	19.10	16.24	17.54	17.88	17.90	16.17	17.80	16.40
2015	20.83	22.89	24.13	22.31	21.20	16.30	16.76	15.38	16.54	18.43	17.50	20.16
2016	21.19	23.07	24.71		15.74	15.45	16.39	15.15	15.26	14.76	17.93	15.35
2017	16.91	22.45	22.92	19.98	15.15	18.37	18.60	17.73	16.30	19.55	16.21	17.72
2018	18.08	23.54	23.97	21.48	19.15	15.90	17.45	18.31	18.32	18.16	18.42	18.00
2019	19.87	24.06	23.86	21.52	18.95	17.79	18.72	17.21	19.05	19.81	19.23	20.42
2020	21.63	22.63	24.67	19.73	17.45	16.02	16.41	19.00	15.46	14.39	18.17	17.17

ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีตรัง (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2005			19.61	21.07				18.12	16.28	13.62	13.36	11.75
2006	17.77	19.57	21.02	19.08	16.10	15.90	15.15	17.54	16.42	17.13	16.36	16.31
2007	17.30	22.44	20.83	19.68	16.35	16.27	15.95	15.55	16.18	13.27	15.38	15.83
2008	17.98	20.14	20.31	18.33	16.93	15.80	16.54	18.43	16.67	15.99	11.70	14.87
2009	20.38	21.40	18.06	18.39	16.18	19.65	16.90	16.99	16.53	16.62	14.50	19.34
2010	18.78	22.76			19.62	14.95	15.56	17.16	16.44	15.28	13.07	11.72
2011	17.13	21.35	14.99	20.94	18.07	17.42	16.35	15.77	15.51	16.30	15.60	14.01
2012	15.36	17.16	18.84	17.58	17.44	18.65			15.80	17.18	15.51	14.29
2013	18.06	19.42	22.81	17.69	17.84	17.00	15.44	18.06	16.35	15.28	14.68	15.59
2014	20.33	23.24	23.67	20.33	17.91	16.95	17.24	16.44	16.78	16.08	13.42	12.72
2015	19.65	23.70	23.53	20.35	18.74	16.76	16.38	16.44	16.29	15.02	14.84	17.26
2016	20.44	21.46	24.64	22.12	17.04	17.35	16.22	16.59	17.17	14.99	14.82	17.06
2017	18.94	21.37	20.42	17.48	16.74	17.53	17.93	16.92	16.16	17.32	13.59	15.08
2018	14.97	22.79	22.61	19.80	16.28	15.55		18.09	16.85		15.60	15.71
2019	19.55	23.35	22.70	21.34	17.55	16.95	16.92	16.05	17.10		16.18	18.98
2020	21.40	21.69	25.14	18.33	16.48	15.93	17.31	17.65	15.62	13.98	14.18	15.01



ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีสงขลา (หาดใหญ่) (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2002	14.16	21.61	22.37	20.70	19.32	18.64	18.32	16.22	17.02	17.33	14.07	15.30
2003	17.11	20.18	20.20	21.68	16.46	18.03	17.08	17.65	17.63	11.96		
2004	19.81					14.60	17.69					
2005			18.65	20.64	17.30		18.10		15.41	15.09	13.02	10.21
2006	16.88		21.91	19.90	17.14	17.79	16.68	18.60	16.46	17.24	16.01	15.09
2007	15.91	21.48	21.31	19.66	18.24	17.23	18.12	19.18	17.60	15.10	14.15	14.01
2008	17.32	19.53	19.49	19.91	18.38	17.21	17.78	18.41	17.64	18.10	11.90	11.26
2009	15.47	20.41	18.29	18.68	17.42	20.33	17.64	18.77		17.07	13.67	16.41
2010	16.23	20.00	21.32	19.85	22.03	20.38	19.49	20.64	20.30	17.64	14.80	12.88
2011	17.99	21.61	13.97		20.79	19.48	19.64	18.04		15.92	14.09	12.40
2012	14.01	19.55	18.65	18.32	18.55	18.63	18.01	18.58	16.25	16.46	15.48	13.36
2013	17.04	16.83	22.26	18.21	18.07	17.34	15.84	17.32	16.81		14.59	11.72
2014	17.05	21.93	22.57	21.13	17.63	16.53	17.26	17.65	17.06	16.31	14.21	10.98
2015	17.02	21.22	23.24	20.60	19.24	17.45	17.07	16.98	17.07	16.21	14.05	15.83
2016	17.70	19.11			16.66	17.48	17.76	18.89	19.53	15.99	15.63	12.30
2017	14.10	20.46	21.74	19.69	18.05	18.39	18.81	18.41	17.31	18.13	12.22	13.22
2018	14.59	21.40	22.43	20.68	18.05	17.92	16.99	19.24	16.17	16.50	13.98	12.40
2019	16.82	21.80	23.67	21.07	18.64	17.65	17.65	14.51	9.88	7.14	7.39	9.62
2020	17.68	19.59	22.88	18.32	17.21	16.02	14.03	17.10	16.10	10.84	9.84	9.89



ข้อมูลรังสีรวมจากดวงอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อเดือนสถานีพระราชวัง (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ปี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
2002	17.45	21.62	22.95	23.39	20.05	19.89	19.70	17.87	19.12	19.92	15.21	15.91
2003	16.35	20.32	20.72	24.35	18.03	20.34	18.09	19.64	19.07	15.97	15.39	12.11
2004	16.67	20.76	21.26	22.28	20.70	17.49	19.32	18.14	20.36	14.91	16.14	14.89
2005	18.54	22.50	21.85	24.09	20.60	19.41	19.69	19.66	19.87	16.00	14.40	10.49
2006	17.49	18.34	22.42	22.56	16.22	19.05	18.07	17.87	18.91	18.68	16.41	14.03
2007	14.44	21.03	22.42	23.41	20.43	18.75	18.17	19.72	19.29	16.32	15.52	15.22
2008	17.77	18.73	20.98	22.49	19.51	19.44	19.87	21.00	19.08	18.93	11.54	11.83
2009		21.35	19.30	21.28	18.64	20.01	19.12	20.45	18.25	17.13	13.70	15.73
2010	17.24	22.17	22.97	22.88	21.20	19.21	18.49	19.99	19.86		15.26	11.61
2011	15.62	19.89	16.17	23.42	21.07	19.91	18.34	20.20	18.57	17.69	14.87	12.36
2012	14.99	21.44	21.50	21.94	19.06	18.79	17.83	20.16	18.51	18.04	17.29	12.14
2013	15.98	16.76	22.80	20.24	20.65	18.74	17.28	20.22	12.77	17.02	14.29	
2014	15.49	21.50	22.75	23.15	21.63	18.01	17.50	19.67	19.12	18.04	12.82	11.70
2015	15.16	19.33	22.46	21.83	22.44	18.04	18.60	19.11	18.81	17.19	13.75	15.81
2016	17.67	17.73	22.99	23.42	19.04	18.67	20.10	18.41	19.32	16.49	14.64	11.23
2017		18.17	21.45	21.97	18.45	18.87	18.49	19.23	19.18	17.44	12.96	11.81
2018	13.04	19.49	22.54							11.75	10.36	8.53
2019	11.04	15.33	19.71	22.70	19.55	17.14	18.77	17.44			9.88	9.73
2020	12.50	13.54	20.26	19.83	21.16	18.07	18.08	18.19	16.83	12.03	13.93	9.19



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายวรพันธุ์ การชนะชาติ
วัน เดือน ปี เกิด	12 มีนาคม 2541
วุฒิการศึกษา	ปี พ.ศ. 2558 จบการศึกษาระดับมัธยม โรงเรียนโคกสำโรงวิทยา ปี พ.ศ. 2562 จบการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา ฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี
ที่อยู่ปัจจุบัน	27/1 หมู่ 2 ตำบลวังจั่น อำเภอโคกสำโรง จังหวัดลพบุรี 15120

