



การประมาณค่าความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนโดยใช้แบบจำลองเออาร์เอกซีในภูมิภาคหลัก
ของประเทศไทย



โดย
นางสาวเพชรรัตน์ พุ่มพวง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2565

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การประมาณค่าความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนโดยใช้แบบจำลองเออาร์เอกซีใน
ภูมิภาคหลักของประเทศไทย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

AN ESTIMATION OF MONTHLY AVERAGE DAILY GLOBAL SOLAR RADIATION
USING THE ARX APPROACH IN THE MAIN REGIONS OF THAILAND.



By
MISS Patcharat POOMPUANG

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Science PHYSICS
Department of PHYSICS
Silpakorn University
Academic Year 2022
Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ การประมาณค่าความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนโดยใช้
แบบจำลองเออาร์เอกซีในภูมิภาคหลักของประเทศไทย
โดย นางสาวเพชรรัตน์ พุ่มพวง
สาขาวิชา ฟิสิกส์ แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กรทิพย์ โต๊ะสิงห์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นรงค์ ฉิมพาลี)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพนมกร ชูศรี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กรทิพย์ โต๊ะสิงห์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อิศระ มะศิริ)

640720028 : ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : รังสีอาทิตย์, รังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน, แบบจำลองถดถอยของตัวเองร่วมกับตัวแปรภายนอก

นางสาว เพชรรัตน์ พุ่มพวง: การประมาณค่าความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนโดยใช้แบบจำลองเออาร์เอกซ์ในภูมิภาคหลักของประเทศไทย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กรทิพย์ ไตะสิงห์

การศึกษานี้ ผู้วิจัยได้นำเสนอวิธีการสำหรับคำนวณค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนโดยใช้วิธีการซึ่งมีชื่อว่า การถดถอยของตัวเองร่วมกับตัวแปรภายนอก (AutoRegressive with exogenous variable, ARX) สำหรับภูมิภาคหลักของประเทศไทย กระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้ สำหรับเดือนมกราคม ใน ปี ค.ศ. 2018 ที่สถานีนครปฐม สมการสำหรับทำนายค่าความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนจะถูกสร้างจากข้อมูลรังสีอาทิตย์และตัวแปรภายนอกของปี ค.ศ. 2017 และ 2018 ในที่นี้ผู้วิจัยได้เลือกตัวแปรภายนอกคือค่าปริมาณไอน้ำรายวันเฉลี่ยต่อเดือน ปริมาณโอโซนรายวันเฉลี่ยต่อเดือน ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองรายวันเฉลี่ยต่อเดือน ค่าดัชนีเมฆรายวันเฉลี่ยต่อเดือน และรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือน ทั้งนี้เนื่องจากรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนแปรเชิงเส้นกับตัวแปรดังกล่าวโดยตรง ตัวแปรภายนอกเหล่านี้ได้มาจากการวัดหรือคำนวณของเดือนนั้น จากนั้นผู้วิจัยจะใช้สมการดังกล่าวทำนายค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของเดือนมกราคม ปี ค.ศ. 2018 และตัวแปรภายนอกของเดือนนั้น สำหรับเดือนอื่น ๆ ของปี ค.ศ. 2018 ที่สถานีนครปฐม จะดำเนินการคล้ายกับกระบวนการที่ใช้กับเดือนมกราคมที่สถานีนครปฐม สำหรับปีอื่น ๆ ได้แก่ ปี ค.ศ. 2019 2020 2021 และ 2022 ของสถานีนครปฐม ใช้วิธีการเช่นเดียวกับปี ค.ศ. 2018 ของสถานีนครปฐม สุดท้ายผู้วิจัยจะใช้กระบวนการที่เหมือนกับสถานีนครปฐมนำไปใช้กับสถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี และสถานีสงขลา ในการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองเออาร์เอกซ์ ผู้วิจัยทำการเปรียบเทียบค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัด ผลที่ได้พบว่า ค่าที่ได้จากแบบจำลองเออาร์เอกซ์มีส่วนใหญ่ใกล้เคียงกับค่าจากการวัด โดยมีความแตกต่างในรูป RMSD และ MBD อยู่ในช่วง 1.71% ถึง 10.93%, -2.94% ถึง 3.49% ตามลำดับ สำหรับสถานีนครปฐม, ในช่วง 6.30% ถึง 12.91%, -4.98% ถึง 3.85% ตามลำดับ สำหรับสถานีเชียงใหม่, ในช่วง 3.40% ถึง 14.65%, -3.62% ถึง 7.69% ตามลำดับ สำหรับสถานีอุบลราชธานี และในช่วง 3.57% ถึง 8.42%, -3.02% ถึง 5.23% ตามลำดับ สำหรับสถานีสงขลา ผู้วิจัยสรุปว่าแบบจำลองเออาร์เอกซ์สามารถใช้คำนวณค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ 4 สถานีได้โดยให้ผลค่อนข้างดี เนื่องจากทั้ง 4 สถานี ตั้งอยู่ในภูมิภาคหลักของประเทศไทย ดังนั้นแบบจำลองเออาร์เอกซ์

จึงสามารถใช้คำนวณค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนในภูมิภาคหลักของประเทศไทยได้อย่างมีประสิทธิภาพเพียงพอ



640720028 : Major PHYSICS

Keyword : Solar radiation, Monthly average daily global solar radiation, AutoRegressive with eXogenous variable (ARX) model

MISS Patcharat POOMPUANG : An estimation of monthly average daily global solar radiation using the ARX approach in the main regions of Thailand. Thesis advisor : Assistant Professor Dr. Korntip Tohsing

This study presents a method for calculating monthly average daily global solar radiation using an approach called AutoRegressive with eXogeneous variable (ARX) in the main regions of Thailand. The approach is described as follows. For January, 2018 at Nakhon Pathom station, an equation for predicting the monthly average daily global solar radiation was created from the data of 2017 and 2018 and then used for predicting the monthly average daily global solar radiation of 2018 at Nakhon Pathom station. In this study the exogenous variables of each month were selected to be a monthly average daily precipitable water, a monthly average daily total ozone column, a monthly average daily aerosol optical depth, a monthly average daily cloud index and a monthly average daily extraterrestrial solar radiation. The selection is based on the reason that these variables affect directly monthly average daily global solar radiation. These exogenous variables were measured or calculated for January, 2018. The input variables of the developed equation were prepared and used to calculate the solar radiation for January of 2018. For the other months of the year 2018, the procedures are similar to that of January in 2018 at Nakhon Pathom station. Then, the procedures similar to that of Nakhon Pathom station in 2018 were used to calculate the monthly average daily global solar radiation of 2019, 2020, 2021 and 2022 for Nakhon Pathom station. Finally, the procedures similar to that of Nakhon Pathom station were used for Chiang Mai, Ubon Ratchathani and Songkla stations for 2018, 2019, 2020, 2021, 2022. To validate the results from ARX, the monthly average daily global solar radiation obtained from ARX were compared to that of the measurements. It was found that the derived values from the ARX and those obtained from the measurements were in reasonable agreement with the discrepancy in terms of root mean square difference (RMSD) and mean bias difference (MBD) in range of 1.71% to 15.15%, -6.46% to 3.49%, respectively for Nakhon Pathom station, 6.30% to

12.91%, -4.98% to 3.85%, respectively for Chiang Mai station, 3.40% to 14.65%, -3.62% to 7.69%, respectively for Ubon Ratchathani and 3.57% to 8.42%, -3.02% to 5.23%, respectively for Songkla station. We concluded that the ARX model could be used to obtain a monthly average daily global solar radiation at the four stations with reasonable accuracy. As the four stations are situated the main regions of Thailand, therefore the ARX approach is efficient enough for calculating monthly average daily global solar radiation for all main regions of Thailand.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาในระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต ในหัวข้อเรื่อง การประมาณค่าความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนโดยใช้แบบจำลองเออาร์เอกซ์ในภูมิภาคหลักของประเทศไทย โดยผู้วิจัยได้รับทุนผู้ช่วยนักวิจัยจากคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรทิพย์ โต้ะสิงห์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และศาสตราจารย์ ดร.เสริม จันทรฉาย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้คำแนะนำทางด้านวิชาการ พร้อมทั้งจัดหาทุนวิจัย เครื่องมือและข้อมูลที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อิสระ มะศิริ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประนอมกร ชูศรี ที่ได้เสียสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้เป็นอย่างสูง

นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณคณาจารย์และนักวิจัยภายในห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือ และคอยให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์จนบรรลุตามเป้าหมายและประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ คุณประโยชน์จากวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยขอมอบให้บิดา มารดา รวมทั้งคณาจารย์ ผู้มีพระคุณทุกท่าน เพื่อตอบแทนพระคุณที่ได้ช่วยให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในงานวิจัยครั้งนี้

นางสาว เพชรรัตน์ พุ่มพวง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฅ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ทฤษฎี.....	3
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	22
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย ผล และการอภิปรายผล.....	24
3.1 การศึกษาการวัดและรวบรวมข้อมูลความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีวัด 4 แห่งในภูมิภาคหลักของประเทศไทย.....	24
3.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติของความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีวัด 4 แห่ง ในภูมิภาคหลักของประเทศไทย.....	28
3.3 การพัฒนาและทดสอบแบบจำลองรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนโดยใช้ข้อมูลที่ทำการวัดใน ภูมิภาคหลักของประเทศไทย.....	31
บทที่ 4 สรุป.....	53
ภาคผนวก ก.....	55

ภาคผนวก ข.....	77
ภาคผนวก ค.....	89
ภาคผนวก ง.....	98
รายการอ้างอิง.....	105
ประวัติผู้เขียน.....	107



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 รายละเอียดของข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ในช่วงปี ค.ศ. 1995-2022	25
ตารางที่ 2 รายละเอียดช่องรับสัญญาณของดาวเทียม Himawari-8 (SSP: sub satellite point) ..	36
ตารางที่ 3 สมการทางคณิตศาสตร์จากแบบจำลองเออาร์เอกซ์ของสถานีเชียงใหม่	42
ตารางที่ 4 สมการทางคณิตศาสตร์จากแบบจำลองเออาร์เอกซ์ของสถานีอุบลราชธานี	43
ตารางที่ 5 สมการทางคณิตศาสตร์จากแบบจำลองเออาร์เอกซ์ของสถานีนครปฐม	44
ตารางที่ 6 สมการทางคณิตศาสตร์จากแบบจำลองเออาร์เอกซ์ของสถานีสงขลา	45
ตารางที่ 7 ความแตกต่างในรูป RMSD และ MBD ของค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนจาก แบบจำลองเออาร์เอกซ์และจากการวัดภาคพื้นดินที่ 4 สถานีในภูมิภาคหลักของประเทศไทย	51



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 ชนิดของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลก.....	4
รูปที่ 2 การบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์ โดยใช้ระนาบในแนวระดับอ้างอิง	5
รูปที่ 3 การบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์โดยใช้ระนาบศูนย์สูตรอ้างอิง.....	6
รูปที่ 4 รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนระนาบในแนวระดับ	8
รูปที่ 5 การแปรค่าของอุณหภูมิและความดันตามความสูงของบรรยากาศมาตรฐาน.....	11
รูปที่ 6 การบอกปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ	13
รูปที่ 7 การบอกปริมาณโอโซน	14
รูปที่ 8 เครื่องวัดรังสีรวมแบบโรบิตซ์ของกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน.....	16
รูปที่ 9 เครื่องวัดรังสีรวมแบบโฟโตโวลตาอิก ที่ผลิตโดยบริษัทคิปป์แอนด์โซนเนส (Kipp&Zonen). 17	
รูปที่ 10 เครื่องวัดรังสีรวมแบบเทอร์โมไฟล์ที่ผลิตโดยบริษัทคิปป์แอนด์โซนเนส	17
รูปที่ 11 ตัวอย่างโครงข่ายประสาทเทียม.....	19
รูปที่ 12 วงโคจรของดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาแบบโคจรผ่านขั้วโลก เมื่อ N เป็นขั้วโลกเหนือ และ S เป็นขั้วโลกใต้.....	21
รูปที่ 13 วงโคจรของดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาแบบอยู่ตำแหน่งเดิมเมื่อเทียบกับพื้นผิวโลก.....	22
รูปที่ 14 เครื่องไพราโนมิเตอร์ รุ่น CM21 บริษัท Kipp&Zonen ของสถานีเชียงใหม่	26
รูปที่ 15 เครื่องไพราโนมิเตอร์ รุ่น CM11 บริษัท Kipp&Zonen ของสถานีอุบลราชธานี	26
รูปที่ 16 เครื่องไพราโนมิเตอร์ รุ่น CM21 บริษัท Kipp&Zonen ของสถานีนครปฐม	27
รูปที่ 17 เครื่องไพราโนมิเตอร์ รุ่น CM21 บริษัท Kipp&Zonen ของสถานีสงขลา.....	27
รูปที่ 18 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีเชียงใหม่ในช่วงปี ค.ศ. 1995-2022	28
รูปที่ 19 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีอุบลราชธานีในช่วงปี ค.ศ. 1995-2022 ...	29
รูปที่ 20 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีนครปฐมในช่วงปี ค.ศ. 1995-2022	29

รูปที่ 21 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีสงขลาในช่วงปี ค.ศ. 1995-2022	30
รูปที่ 22 เครื่องเซ็นโพโตมิเตอร์ ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่	32
รูปที่ 23 เครื่องเซ็นโพโตมิเตอร์ ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง จังหวัดอุบลราชธานี.....	32
รูปที่ 24 เครื่องเซ็นโพโตมิเตอร์ ซึ่งติดตั้งอยู่ที่คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัด นครปฐม.....	33
รูปที่ 25 เครื่องเซ็นโพโตมิเตอร์ ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา .	33
รูปที่ 26 เครือข่าย Aerosol Robotic Network หรือ AERONET	34
รูปที่ 27 ดาวเทียม OMI/AURA.....	35
รูปที่ 28 ตัวอย่างภาพถ่ายที่ได้จากดาวเทียม Himawari-8.....	37
รูปที่ 29 ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่ครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทยในรูปแบบของ satellite Projection...	38
รูปที่ 30 ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่ทำการหาพิกัดแล้วในรูปแบบ cylindrical projection.....	38
รูปที่ 31 ตัวอย่างแผนภาพแสดงตัวแปรอินพุทและตัวแปรเอาต์พุทของแบบจำลองเออาร์เอกซ์	40
รูปที่ 32 การเปรียบเทียบความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองเออาร์เอกซ์และ จากการวัดที่สถานีเชียงใหม่ของปี ค.ศ. (a) 2018 (b) 2019 (c) 2020 (d) 2021 (e) 2022	47
รูปที่ 33 การเปรียบเทียบรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองเออาร์เอกซ์และจากการวัดที่ สถานีอุบลราชธานีของปี ค.ศ. (a) 2018 (b) 2019 (c) 2020 (d) 2021 (e) 2022.....	48
รูปที่ 34 การเปรียบเทียบความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองเออาร์เอกซ์และ จากการวัดที่สถานีนครปฐมของปี ค.ศ. (a) 2018 (b) 2019 (c) 2020 (d) 2021 (e) 2022	49
รูปที่ 35 การเปรียบเทียบความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองเออาร์เอกซ์และ จากการวัดที่สถานีสงขลาของปี ค.ศ. (a) 2018 (b) 2019 (c) 2020 (d) 2021 (e) 2022.....	50

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

รังสีอาทิตย์ (solar radiation) เป็นพลังงานที่ปล่อยออกมาจากดวงอาทิตย์ โดยรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบขอบบนของบรรยากาศเรียกว่า รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (extraterrestrial solar radiation) ซึ่งประกอบด้วยช่วงรังสีคลื่นสั้น ส่วนใหญ่ตั้งแต่ความยาวคลื่น 0.3 - 3.0 ไมโครเมตร รังสีอาทิตย์ที่เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศมาถึงพื้นผิวโลกจะถูกลดทอนโดย 2 กระบวนการหลักคือ การกระเจิงและการดูดกลืนโดยองค์ประกอบต่าง ๆ ในบรรยากาศ เช่น โมเลกุลอากาศของก๊าซต่าง ๆ อนุภาคฝุ่นละออง และเมฆ โดยรังสีที่เหลือจะพุ่งตรงมาถึงพื้นผิวโลก เรียกว่า รังสีตรง (direct radiation) ส่วนรังสีที่เกิดจากการกระเจิงโดยองค์ประกอบต่าง ๆ ของบรรยากาศ เรียกว่า รังสีกระจาย (diffuse radiation) และเรียกผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจายว่า รังสีรวม (global radiation) โดยข้อมูลรังสีอาทิตย์หรือรังสีรวมที่มีในปัจจุบันสามารถหาได้จากการวัดภาคพื้นดินด้วยเครื่องวัดรังสีอาทิตย์หรือเครื่องไพราโนมิเตอร์ (pyranometer) ที่ใช้ในการวัดรังสีรวมและรังสีกระจาย โดยการวัดรังสีกระจายจะต้องติดตั้งวงแหวนหรือลูกบอลสำหรับบังในส่วนตรงของรังสีตรง และเครื่องไพเฮลิโอมิเตอร์ (pyrheliometer) ที่ใช้ในการวัดรังสีตรง ซึ่งรังสีอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญของโลกและสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ทั้งยังสามารถนำไปพัฒนาวางแผนระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบทำความร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ การอบแห้ง หรือการประยุกต์ทางด้านเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์อื่น ๆ

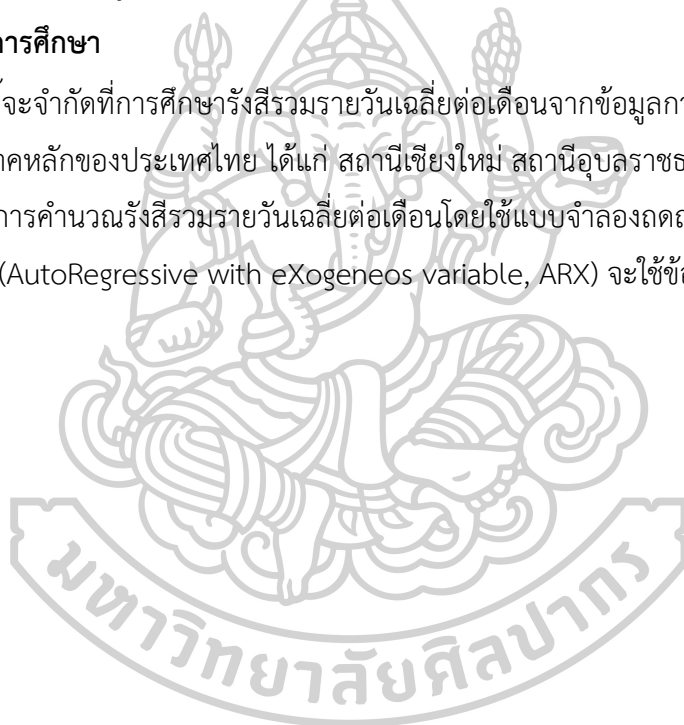
ในปัจจุบันประเทศไทยมีการวัดข้อมูลรังสีอาทิตย์โดยใช้เครื่องมือดังกล่าว แต่เนื่องจากเครื่องวัดรังสีอาทิตย์และอุปกรณ์บันทึกข้อมูลมีราคาค่อนข้างแพง ทำให้ไม่สามารถติดตั้งครอบคลุมได้ทั่วทุกพื้นที่ จึงจำเป็นต้องมีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการคำนวณหาข้อมูลรังสีอาทิตย์ในบริเวณหรือพื้นที่ที่ไม่ได้มีการวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงจะทำการพัฒนาและทดสอบวิธีสำหรับประมาณค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนโดยใช้การถดถอยของตัวเองร่วมกับตัวแปรภายนอก (AutoRegressive with eXogeneous variable, ARX) หรือเออาร์เอกซ์ซึ่งใช้ข้อมูลรังสีอาทิตย์จากสถานีวัด 4 แห่งในภูมิภาคหลักของประเทศไทย ได้แก่ ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่ ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง จังหวัดอุบลราชธานี มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม และศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา โดยจะใช้ข้อมูล 6 ปี ในปี ค.ศ. 2017-2022 ทั้งนี้เพื่อให้ได้แบบจำลองที่สามารถนำไปคำนวณความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน สำหรับพื้นที่ที่มีชุดข้อมูลอย่างจำกัด เพื่อให้ได้ข้อมูลรังสีอาทิตย์สำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านพลังงานต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ศึกษาการวัดและรวบรวมข้อมูลความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนจาก 4 สถานีในภูมิภาคหลักของประเทศไทย ได้แก่ สถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี สถานีนครปฐม และสถานีสงขลา
- 2) วิเคราะห์ลักษณะทางสถิติของความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของ 4 สถานีในภูมิภาคหลักของประเทศไทย
- 3) พัฒนาและทดสอบแบบจำลองรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองถดถอยของตัวเองร่วมกับตัวแปรภายนอก (AutoRegressive with eXogeneous variable, ARX) สำหรับใช้ใน 4 ภูมิภาคหลักของประเทศไทย

1.3 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้จะจำกัดที่การศึกษารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนจากข้อมูลการวัดภาคพื้นดินที่สถานีวัดใน 4 ภูมิภาคหลักของประเทศไทย ได้แก่ สถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี สถานีนครปฐม และสถานีสงขลา การคำนวณรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนโดยใช้แบบจำลองถดถอยของตัวเองร่วมกับตัวแปรภายนอก (AutoRegressive with eXogeneous variable, ARX) จะใช้ข้อมูลที่มีการวัดทั้ง 4 แห่งดังกล่าว



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีเกี่ยวกับรังสีอาทิตย์และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตามรายละเอียดดังนี้

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 รังสีอาทิตย์ (ดัดแปลงจาก Iqbal, 1983)

รังสีอาทิตย์ (solar radiation) เป็นพลังงานที่ปล่อยออกมาจากดวงอาทิตย์ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ รังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบขอบบนของบรรยากาศเรียกว่า รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (extraterrestrial solar radiation) ซึ่งประกอบด้วยช่วงคลื่นสั้นตั้งแต่ 290-3000 นาโนเมตร ถึง 97 เพอร์เซ็นต์ ส่วนของรังสีนอกโลกที่ผ่านชั้นบรรยากาศมาถึงผิวโลกจะถูกกระเจิงและดูดกลืนโดยโมเลกุลของก๊าซต่าง ๆ อนุภาคฝุ่น และเมฆที่อยู่ในชั้นบรรยากาศ รังสีดวงอาทิตย์สามารถแบ่งตามคุณสมบัติและช่วงคลื่นต่าง ๆ ได้ดังนี้

1) แสงสว่าง (visible radiation)

แสงสว่างเป็นรังสีที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ช่วงสเปกตรัมของแสงสว่างต่ำสุด เริ่มตั้งแต่ 360 ถึง 400 นาโนเมตร

2) รังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet radiation)

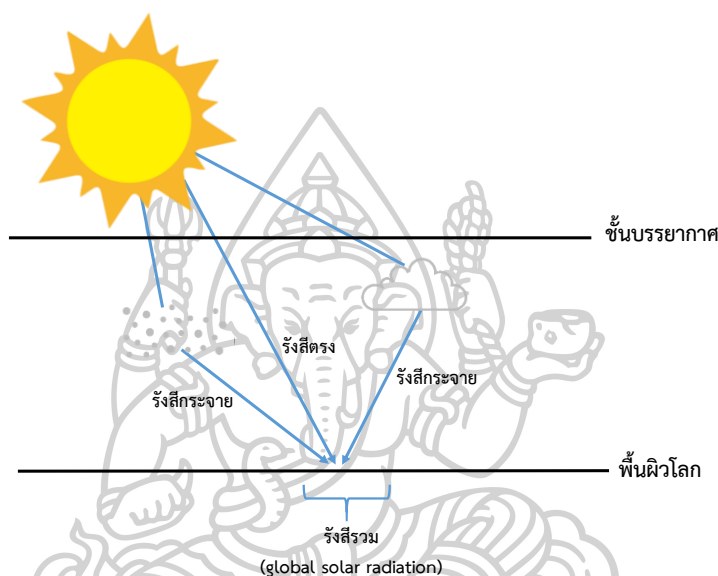
เป็นรังสีที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า แบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้

- UV-A: 315-400 นาโนเมตร ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตมากนัก ความเข้มที่ผิวพื้นไม่ขึ้นกับปริมาณโอโซนในบรรยากาศ
- UV-B: 280-315 นาโนเมตร มีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตมาก ความเข้มที่ผิวพื้นขึ้นกับปริมาณโอโซนในบรรยากาศ ความเข้มขึ้นกับความยาวคลื่น
- UV-C: 100-280 นาโนเมตร ถูกดูดกลืนโดยบรรยากาศของโลกทั้งหมดไม่พบที่ผิวพื้นโลก

3) รังสีอินฟราเรด (infrared radiation, IR) หรือรังสีความร้อน เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.78-1,000 ไมโครเมตร สามารถแบ่งได้เป็น 3 ช่วงความยาวคลื่น ดังนี้ รังสีอินฟราเรดใกล้ (near infrared radiation, NIR) ซึ่งมีความยาวคลื่น 0.78-3.0 ไมโครเมตร รังสีอินฟราเรดกลาง (middle infrared radiation) มีความยาวคลื่น 3.0-50 ไมโครเมตร และรังสีอินฟราเรดไกล (far infrared radiation) มีความยาวคลื่น 50-1,000 ไมโครเมตร รังสีอินฟราเรดซึ่งอยู่ในช่วงของแสงที่สายตามองไม่เห็นแต่สามารถรับรู้ในรูปความร้อน โดยรังสีอินฟราเรดมีคุณสมบัติทางกายภาพเช่นเดียวกับคลื่นแสงที่ตามองเห็นได้ทุกประการ เช่น การหักเห การสะท้อน การดูดกลืน หรือการส่งผ่านตัวกลาง

2.1.2 ชนิดของรังสีอาทิตย์ (Iqbal, 1983)

เมื่อรังสีอาทิตย์เคลื่อนผ่านบรรยากาศมายังพื้นผิวโลก รังสีดังกล่าวจะถูกโมเลกุลอากาศ ฝุ่นละออง และเมฆกระเจิงและดูดกลืน โดยรังสีที่เหลือจะพุ่งตรงมาถึงพื้นผิวโลก ซึ่งจะเรียกว่า รังสีตรง (direct radiation) ส่วนรังสีที่เกิดจากการกระเจิงโดยองค์ประกอบต่าง ๆ ของบรรยากาศจะเรียกว่า รังสีกระเจาย (diffuse radiation) และเรียกผลรวมระหว่างรังสีตรงและรังสีกระเจายว่า รังสีรวม (global radiation) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ชนิดของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลก

2.1.3 ปริมาณของรังสีอาทิตย์ (ดัดแปลงจาก Iqbal, 1983)

ในงานด้านรังสีอาทิตย์จะเกี่ยวข้องกับปริมาณของรังสีอาทิตย์ที่สำคัญ ดังนี้

1) รังสีที่ช่วงเวลาหนึ่ง (irradiance) หรือความเข้มรังสีอาทิตย์หมายถึง พลังงานของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่ 1 หน่วยที่ช่วงเวลาหนึ่ง มีหน่วยเป็นจูลวินาทีต่อตารางเมตร หรือวัตต์ต่อตารางเมตร

2) รังสีในช่วงเวลา (irradiation) หมายถึงปริมาณของพลังงานของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่ในช่วงเวลาที่กำหนด ตัวอย่างเช่น ถ้าเป็นช่วงเวลา 1 ชั่วโมงก็จะเรียกว่า รังสีรายชั่วโมง (hourly irradiation) ซึ่งมีหน่วยเป็นต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง หรือกรณีที่เป็นช่วงเวลา 1 วันก็จะเรียกว่า รังสีรายวัน (daily irradiation) ซึ่งมีหน่วยเป็นจูลต่อตารางเมตรต่อวัน

3) รังสีในมุมตัน (radiance) หรือเรเดียนรังสีอาทิตย์หมายถึง พลังงานที่ได้รับจากรังสีอาทิตย์ที่เดินทางเข้ามาใน 1 หน่วยมุมตันต่อ 1 หน่วยพื้นที่ที่ตั้งฉากกับมุมตัน มีหน่วยเป็นจูลต่อตารางเมตรต่อสเตอเรเดียน

2.1.4 การบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์ (ดัดแปลงจาก Iqbal, 1983)

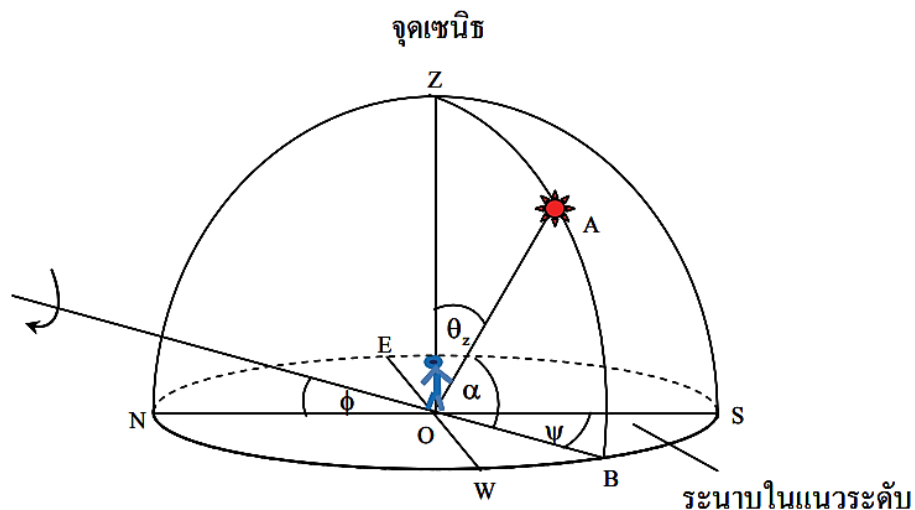
ในการคำนวณรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนระนาบต่าง ๆ ทั้งที่อยู่นอกบรรยากาศโลกและที่พื้นผิวโลก จำเป็นต้องรู้ตำแหน่งของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า ในการบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์จะพิจารณาว่าท้องฟ้าเป็นครึ่งหนึ่งของทรงกลม ที่เรียกว่า ทรงกลมท้องฟ้า โดยมีผู้สังเกตเป็นศูนย์กลาง เนื่องจากท้องฟ้ามีขนาดใหญ่มาก ดังนั้นการบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์จึงใช้มุมเพียง 2 มุม หรือใช้ส่วนโค้ง (arc) ของทรงกลมท้องฟ้า 2 ส่วนโค้งก็สามารถระบุตำแหน่งได้ในงานด้านรังสีอาทิตย์สามารถบอกตำแหน่งดวงอาทิตย์ได้ 2 ระบบ ดังนี้

ก) ระบบที่ใช้ระนาบในแนวระดับอ้างอิง (horizontal system) ระบบนี้จะอาศัยมุม 2 มุม ในการบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์ ดังรูปที่ 2

- มุมอาซิมุท (azimuth, ψ) เป็นมุมที่วัดจากทิศใต้ไปยังเงาระนาบในแนวระดับที่เชื่อมระหว่างผู้สังเกตกับดวงอาทิตย์ โดยกำหนดว่า ถ้าเงาดังกล่าวอยู่ด้านตะวันออกมุมอาซิมุทมีค่าเป็นบวก และด้านทิศตะวันตกมีค่าเป็นลบ ดังนั้น $-180 < \psi < 180$ องศา

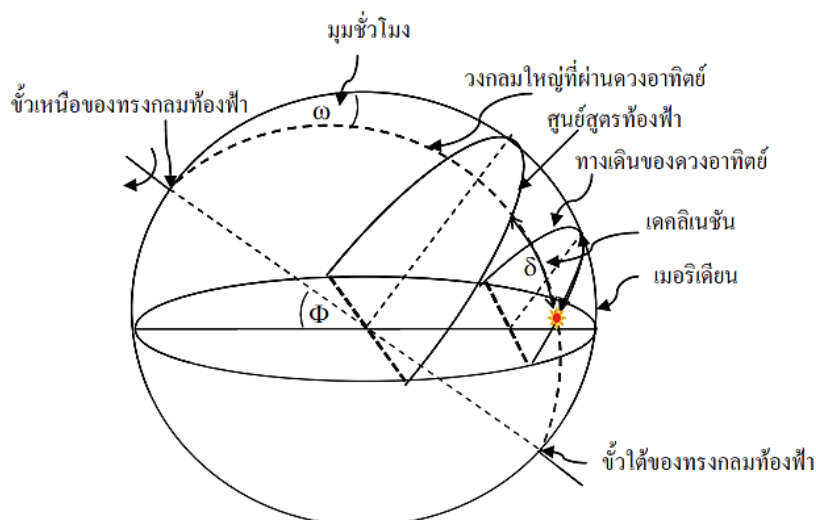
- มุมอัลติจูด (altitude, α) มุมเงย ณ ตำแหน่งเส้นตรงที่เชื่อมต่อระหว่างผู้สังเกตกับดวงอาทิตย์ มีค่าจาก 0 ถึง 90 องศา สำหรับมุมที่อยู่ระหว่างผู้สังเกตกับดวงอาทิตย์เรียกว่า มุมเซนิธ (zenith angle, θ_z) ซึ่งสามารถใช้บอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์ได้เช่นกัน โดยที่

$$\theta_z = 90 - \alpha \quad (2.1)$$



รูปที่ 2 การบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์ โดยใช้ระนาบในแนวระดับอ้างอิง

ข) ระบบที่ใช้ระนาบศูนย์สูตรอ้างอิง (equatorial system) เป็นระบบที่ใช้มุมหรือส่วนโค้งของทรงกลมท้องฟ้าในการบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์โดยใช้ระนาบศูนย์สูตรอ้างอิง

- เดคลิเนชัน (declination, δ) เป็นส่วนโค้งของวงกลมใหญ่ (great circle) ที่ผ่านขั้วทั้งสองของทรงกลมท้องฟ้าระหว่างเส้นศูนย์สูตรท้องฟ้ากับทางเดินของดวงอาทิตย์ มีค่าอยู่ระหว่าง $-23\frac{1}{2} < \delta < 23\frac{1}{2}$ องศา ถือว่ามีค่าคงที่ในแต่ละวันและมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามวันในรอบปี การเปลี่ยนแปลงนี้เขียนเป็นสูตรได้ดังนี้ (Iqbal, 1983)

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (d_n + 284) \right] \quad (2.2)$$

เมื่อ δ คือ มุมเดคลิเนชัน (องศา)

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

- มุมชั่วโมง (hour angle, ω) เป็นมุมที่ขั้วของทรงกลมท้องฟ้า (celestial pole) หรือส่วนโค้งของทรงกลมท้องฟ้าระหว่างเส้นเมริเดียน (meridian) ของผู้สังเกตกับวงกลมใหญ่ที่ลากผ่านดวงอาทิตย์และขั้วทั้งสองของทรงกลมท้องฟ้า มีค่าเป็นบวกเมื่อดวงอาทิตย์อยู่ทางตะวันออกของเมริเดียน และเป็นลบเมื่ออยู่ทางตะวันตกของเมริเดียน โดยสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมชั่วโมงกับเวลาดวงอาทิตย์ได้ดังสมการ (Iqbal, 1983)

$$\omega = 15(12 - ST) \quad (2.3)$$

เมื่อ ω คือ มุมชั่วโมงของดวงอาทิตย์ (องศา)

ST คือ เวลาดวงอาทิตย์ (ชั่วโมง)

เวลาดวงอาทิตย์ (solar time) สามารถคำนวณได้จากเวลามาตรฐานท้องถิ่น (local standard time) (Iqbal, 1983)

$$ST = LST + 4(L_s - L_{loc}) + E_t \quad (2.4)$$

เมื่อ	ST	คือ เวลาดวงอาทิตย์ (ชั่วโมง:นาที)
	LST	คือ เวลามาตรฐานท้องถิ่น (ชั่วโมง:นาที)
	L_s	คือ ลองจิจูดมาตรฐาน (องศา)
	L_{loc}	คือ ลองจิจูดของตำแหน่งที่ต้องการคำนวณ (องศา)
	E_t	คือ ความแตกต่างระหว่างเวลาดวงอาทิตย์กับเวลาดวงอาทิตย์เฉลี่ย (นาที)

ค่าของ $4(L_s - L_{loc})$ มีหน่วยเป็นนาทีและค่าของ L_s และ L_{loc} เป็นลบเมื่ออยู่ทางตะวันออกของกรีนิช และเป็นบวกเมื่ออยู่ทางตะวันตกของกรีนิช

เวลาดวงอาทิตย์และเวลาดวงอาทิตย์เฉลี่ยมีความแตกต่างกันตามรอบปี โดยค่าความแตกต่างนี้สามารถแทนได้ด้วยสมการเวลา ดังนี้ (Iqbal, 1983)

$$E_t = 229.18(0.000075 + 0.001868\cos\Gamma - 0.03207\sin\Gamma - 0.014615\cos2\Gamma - 0.04089\sin2\Gamma) \quad (2.5)$$

เมื่อ	E_t	คือ ความแตกต่างระหว่างเวลาดวงอาทิตย์กับเวลาดวงอาทิตย์เฉลี่ย (นาที)
	Γ	คือ มุมวัน (day angle) (เรเดียน) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\Gamma = 2\pi(d_n - 1)/365 \quad (2.6)$$

2.1.5 รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก

ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (extraterrestrial solar radiation) เป็นข้อมูลสำคัญสำหรับการออกแบบแผงโซลาร์เซลล์ เพื่อใช้ในคววมเทียมและยานอวกาศต่าง ๆ นอกจากนี้ยังเป็นข้อมูลพื้นฐานในการคำนวณรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลก โดยรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกมีช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 0.3 – 12.5 ไมโครเมตร ซึ่งผลรวมพลังงานที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ จากสเปกตรัมรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกจะได้ค่าคงตัวรังสีอาทิตย์ (solar constant) เท่ากับ 1,366.1 วัตต์ต่อตารางเมตร

ก) รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายชั่วโมง

ปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ช่วงเวลาหนึ่ง (solar irradiance) นอกบรรยากาศโลกที่ตกกระทบบนระนาบซึ่งตั้งฉากกับทิศทางของรังสีอาทิตย์ จะขึ้นกับระยะห่างระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ ดังสมการ

$$I_{on} = I_{sc}(r_o/r)^2$$

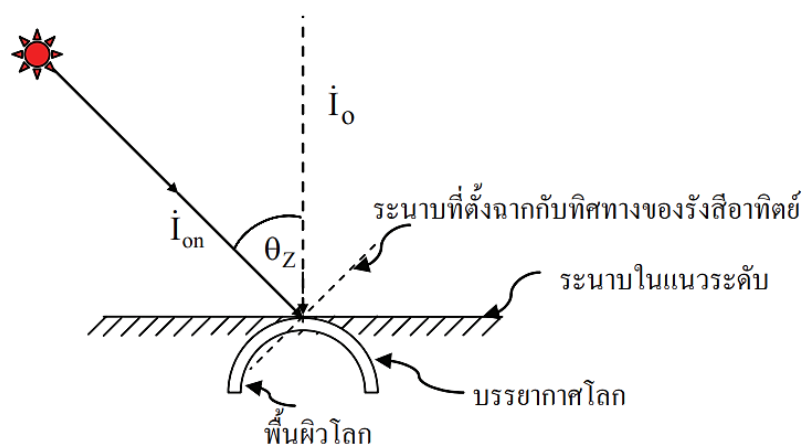
หรือ

$$I_{on} = I_{sc}E_0 \quad (2.7)$$

- เมื่อ i_{on} คือ รังสีอาทิตย์ที่ขณะเวลาหนึ่งซึ่งตกกระทบระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางของรังสี (วัดต่อตารางเมตร)
- i_{sc} คือ ค่าคงตัวรังสีอาทิตย์ (1,366.1 วัดต่อตารางเมตร)
- r_o คือ ระยะทางเฉลี่ยระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ (1.46×10^8 กิโลเมตร)
- r คือ ระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ที่เวลาใด ๆ (กิโลเมตร)
- E_o คือ แฟกเตอร์สำหรับแก้ผลการแปรค่าของระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ (-)

กรณีระนาบในแนวระดับ รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบขณะเวลาหนึ่งบนระนาบดังกล่าวจะเขียนได้ดังสมการ

$$i_o = i_{sc} E_o \cos \theta_z \quad (2.8)$$



รูปที่ 4 รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนระนาบในแนวระดับ

แทน $\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega$ ในสมการ (2.8)

$$i_o = i_{sc} E_o (\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega) \quad (2.9)$$

กรณีที่เราต้องการหาปริมาณของรังสีอาทิตย์ dI_o ที่ตกกระทบในช่วงเวลา dt เราสามารถเขียนสมการ (2.8) ใหม่ในรูปสมการ

$$dI_o = i_{sc} E_o \cos \theta_z dt \quad (2.10)$$

เมื่อ dt เป็นช่วงเวลาซึ่งมีหน่วยเป็นชั่วโมง และ i_{sc} เป็นค่าคงตัวรังสีอาทิตย์โดยคิดปริมาณพลังงานในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง ($4,917.96 \times 10^3$ จูลต่อตารางเมตร) จากสมการ (2.10) จะเห็นว่า $\cos \theta_z$ ขึ้นกับมุมชั่วโมง (ω) เพื่อความสะดวกในการหา I_o เราจะแปลง dt ให้อยู่ในรูปของ $d\omega$ โดยอาศัยความจริง

ที่ว่า เมื่อโลกหมุนครบรอบ ซึ่งใช้เวลา 24 ชั่วโมง มุมชั่วโมงจะเปลี่ยนไป 2π เรเดียน หรือเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{2\pi}{24} \quad (2.11)$$

หรือ
$$dt = \left(\frac{12}{\pi}\right) d\omega \quad (2.12)$$

เมื่อแทน dt จากสมการ (2.12) และแทนค่า $\cos\theta_z$ ในสมการ (2.10) จะได้

$$dt = \left(\frac{12}{\pi}\right) I_{sc} E_0 (\sin\delta \sin\phi + \cos\delta \cos\phi \cos\omega) d\omega \quad (2.13)$$

ค่าพลังงานของรังสีอาทิตย์ในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง จะหาได้โดยการอินทิเกรต dI_0 ในช่วงเวลา 1 ชั่วโมงดังสมการ

$$I_0 = \left(\frac{12}{\pi}\right) I_{sc} E_0 \int_{\omega_i - \frac{\pi}{24}}^{\omega_i + \frac{\pi}{24}} (\sin\delta \sin\phi + \cos\delta \cos\phi \cos\omega) d\omega \quad (2.14)$$

โดย ω_i เป็นมุมชั่วโมงที่กึ่งกลางชั่วโมงนั้น ผลจากการอินทิเกรตจะได้

$$I_0 = I_{sc} E_0 \left[\sin\delta \sin\phi + \left(\frac{24}{\pi}\right) \sin\left(\frac{\pi}{24}\right) \cos\delta \cos\phi \cos\omega_i \right] \quad (2.15)$$

เนื่องจาก $\left(\frac{24}{\pi}\right) \sin\left(\frac{\pi}{24}\right) = 0.9972 \approx 1$

ดังนั้นสมการ (2.15) จึงเขียนได้ดังนี้

$$I_0 = I_{sc} E_0 (\sin\delta \sin\phi + \cos\delta \cos\phi \cos\omega_i) \quad (2.16)$$

อาศัยสมการ $\cos\omega_{sr} = -\frac{\sin\delta \sin\phi}{\cos\delta \cos\phi}$ และแทน ω_{sr} ด้วย ω_{ss} เราสามารถเขียนสมการ (2.16) ในรูปใหม่ได้ดังนี้

$$I_0 = I_{sc} E_0 [\cos\delta \cos\phi (\cos\omega_i - \cos\omega_{ss})] \quad (2.17)$$

ข) รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวัน

ค่ารังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันจะได้ออกมาจากการอินทิเกรตสมการ (2.10) ตั้งแต่ดวงอาทิตย์ขึ้นจนถึงดวงอาทิตย์ หรือ

$$H_0 = \int_{t_{sr}}^{t_{ss}} I_0 dt \quad (2.18)$$

เมื่อ H_0 คือ รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันบนระนาบในแนวระดับ (จุดต่อตารางเมตรต่อวัน)

I_0	คือ รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก rays ชั่วโมงบนระนาบในแนวระดับ (จุดต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)
t	คือ เวลา (ชั่วโมง)
t_{sr}	คือ เวลาที่ดวงอาทิตย์ขึ้น (นาฬิกา)
t_{ss}	คือ เวลาที่ดวงอาทิตย์ตก (นาฬิกา)

2.1.6 ความสัมพันธ์ของรังสีอาทิตย์กับตัวแปรทางบรรยากาศ

รังสีอาทิตย์ที่เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศมายังพื้นผิวโลก จะถูกองค์ประกอบต่าง ๆ ในชั้นบรรยากาศลดทอนไปโดย 2 กระบวนการหลักคือ การกระเจิง (scatter) และการดูดกลืน (absorb) ในการหาปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกจำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับองค์ประกอบต่าง ๆ ในชั้นบรรยากาศโลก ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

องค์ประกอบของบรรยากาศโลก บรรยากาศโลกสามารถแบ่งตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามความสูงได้ 4 ชั้น (Andrews, 2010) ดังนี้

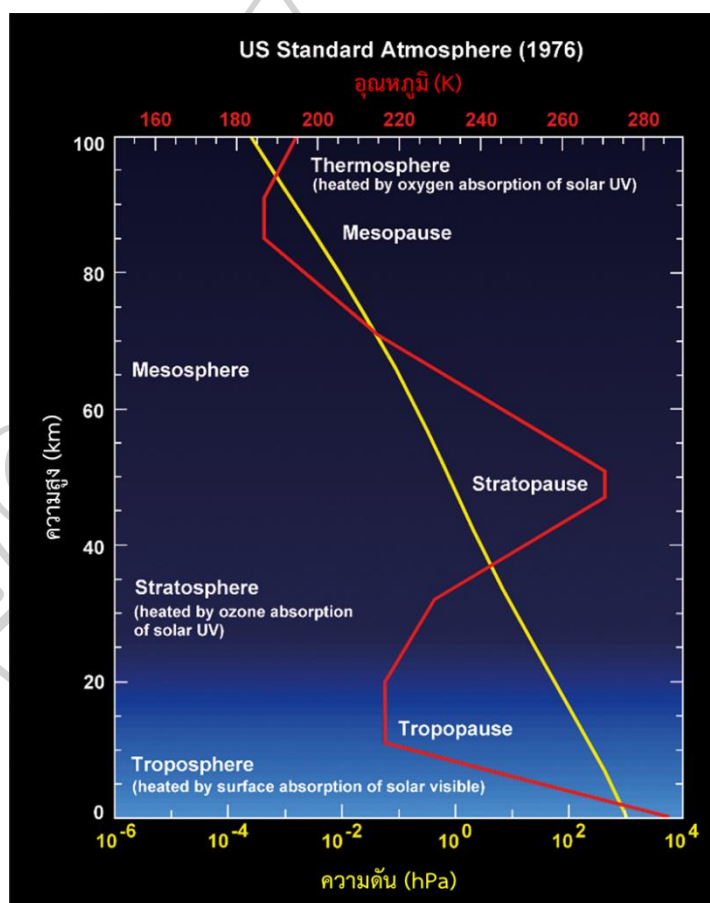
1) โทรโปสเฟียร์ (troposphere) เป็นบรรยากาศชั้นแรก ซึ่งมีความสูงจากพื้นผิวโลกขึ้นไปประมาณ 16-18 กิโลเมตร ที่บริเวณศูนย์สูตร และ 8-10 กิโลเมตร ที่บริเวณขั้วโลก มวลอากาศ 80% ของบรรยากาศโลกทั้งหมดจะอยู่ในโทรโปสเฟียร์ โดยเมฆ ไอน้ำ และฝุ่นละออง (aerosols) ส่วนใหญ่จะอยู่ในบรรยากาศชั้นนี้ พลังงานส่วนใหญ่ที่บรรยากาศชั้นนี้ได้รับจะได้อาจจากการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของบรรยากาศชั้นนี้ที่สำคัญ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และฝุ่นละออง องค์ประกอบเหล่านี้มีปริมาณมากที่บริเวณใกล้พื้นผิวโลก และค่าลดลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้บรรยากาศบริเวณใกล้พื้นผิวโลกจึงมีอุณหภูมิสูงสุด แล้วค่อย ๆ ลดลงตามความสูง โดยอุณหภูมิที่ส่วนบนของโทรโปสเฟียร์ หรือ โทรโปพอส (tropopause) จะมีค่าประมาณ 217 เคลวิน ความแตกต่างของอุณหภูมิที่พื้นผิวกับส่วนบนของโทรโปสเฟียร์ทำให้เกิดการไหลเวียนของอากาศในแนวตั้ง ซึ่งช่วยพาความร้อนจากพื้นผิวโลกขึ้นไปสู่บรรยากาศชั้นนี้ด้วย

2) สตราโตสเฟียร์ (stratosphere) เป็นบรรยากาศที่อยู่ถัดขึ้นไปจากโทรโปสเฟียร์จนถึงที่ระดับความสูงประมาณ 50 กิโลเมตรจากพื้นโลก อุณหภูมิของอากาศในบรรยากาศชั้นนี้จะเพิ่มตามความสูง โดยมีค่าสูงสุดประมาณ 270 เคลวิน ที่ความสูง 50 กิโลเมตร ทั้งนี้เนื่องจากโอโซนในบรรยากาศชั้นนี้ดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ตทำให้บรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ฝุ่นละอองที่เกิดจากการระเบิดของภูเขาไฟสามารถขึ้นมาถึงชั้นนี้ได้

3) เมโซสเฟียร์ (mesosphere) เป็นบรรยากาศที่อยู่สูงขึ้นไปจากสตราโตสเฟียร์ถึงที่ระดับความสูงประมาณ 80-90 กิโลเมตรจากพื้นผิวโลก อุณหภูมิของอากาศจะลดลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น เนื่องจากอยู่ห่างจากพื้นผิวโลกมาก ทำให้บรรยากาศชั้นนี้ได้รับพลังงานจากพื้นผิวโลกน้อย

4) เทอร์โมสเฟียร์ (thermosphere) เป็นบรรยากาศชั้นบนสุด โดยอยู่ถัดจากเมโซสเฟียร์ขึ้นไป ไม่สามารถบอกรอบเขตได้แน่นอน โดยความหนาแน่นของมวลสารของเทอร์โมสเฟียร์จะค่อย ๆ ลดลงจนเป็นส่วนหนึ่งของมวลสารที่กระจายอยู่เล็กน้อยในอวกาศ

โดยทั่วไปจะเรียกบรรยากาศชั้นโทรโปสเฟียร์ว่าเป็นบรรยากาศชั้นล่าง เรียกบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์และเมโซสเฟียร์ว่าเป็นบรรยากาศชั้นกลาง และเรียกบรรยากาศชั้นเทอร์โมสเฟียร์ว่าเป็นบรรยากาศชั้นบน โดยในงานด้านรังสีอาทิตย์จะนิยามกำหนดส่วนบนสุดของบรรยากาศ (top of atmosphere, TOA) อยู่ที่ความสูงประมาณ 100 กิโลเมตร (Saha et al., 2008) โดยการแปรค่าของอุณหภูมิและความดันตามความสูงของชั้นบรรยากาศแต่ละชั้น แสดงได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การแปรค่าของอุณหภูมิและความดันตามความสูงของบรรยากาศมาตรฐาน (Bilings et al., 1976)

2.1.6.1 การลดทอนรังสีอาทิตย์ของฝุ่นละอองในบรรยากาศ

ฝุ่นละออง (aerosol) หมายถึงอนุภาคของแข็งหรือของเหลวที่แขวนลอยอยู่ในบรรยากาศ ทั้งนี้รวมถึงควันจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงต่าง ๆ ฝุ่นที่ฟุ้งกระจายจากพื้นดินหรือทะเลทราย ละอองเกลือจากน้ำทะเล ละอองเกสรดอกไม้ และละอองของเหลวของสารเคมีต่าง ๆ โดยทั่วไปฝุ่นละอองส่วนใหญ่จะอยู่ในบรรยากาศชั้นโทรโปสเฟียร์มีขนาดตั้งแต่ 0.1 – 1,000 ไมโครเมตร (Iqbal, 1983)

เนื่องจากความสามารถในการลดทอนรังสีอาทิตย์ของฝุ่นละอองเกิดได้ทั้งจากกระบวนการดูดกลืนและการกระเจิง การแยกสัดส่วนของรังสีอาทิตย์ที่ลดลงจากแต่ละกระบวนการทำได้ยาก ดังนั้น Ångström (1929) จึงเสนอให้บอกความสามารถในการลดทอนรังสีอาทิตย์ของฝุ่นละออง โดยใช้ความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง (aerosol optical dept, AOD) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของสัมประสิทธิ์ความขุ่นมัว (turbidity coefficient) และตัวเลขยกกำลังของความยาวคลื่น (wavelength exponent) ตามสมการ (Ångström, 1929)

$$\tau'_{\text{aer},\lambda} = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (2.19)$$

- เมื่อ $\tau'_{\text{aer},\lambda}$ คือ ความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง (-)
 β คือ สัมประสิทธิ์ความขุ่นมัวของบรรยากาศของอังสตรอม (Angstrom's turbidity coefficient) (-)
 α คือ ตัวเลขยกกำลังของอังสตรอม (Angstrom's wavelength exponent) (-)
 λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีอาทิตย์ (ไมโครเมตร)

ค่า β จะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของปริมาณฝุ่นละออง หรือจำนวนอนุภาคของฝุ่นละอองต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของอากาศ กล่าวคือ ถ้า β มีค่ามาก ความหนาแน่นของฝุ่นละอองในบรรยากาศจะมีค่ามากด้วย สำหรับ α จะมีความสัมพันธ์กับขนาดของฝุ่นละอองแบบผกผัน กล่าวคือ ถ้า α มีค่าน้อย ฝุ่นละอองจะมีขนาดใหญ่ และ α มีค่ามาก ฝุ่นละอองจะมีขนาดเล็ก โดยฝุ่นละอองทั่วไปจะมีค่า $\alpha = 1.3 \pm 0.5$

ถ้าพิจารณาในด้านของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์ สามารถเขียนสมการสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์ของฝุ่นละออง โดยอาศัยสมการของอังสตรอม (Ångström, 1929) ได้ดังนี้

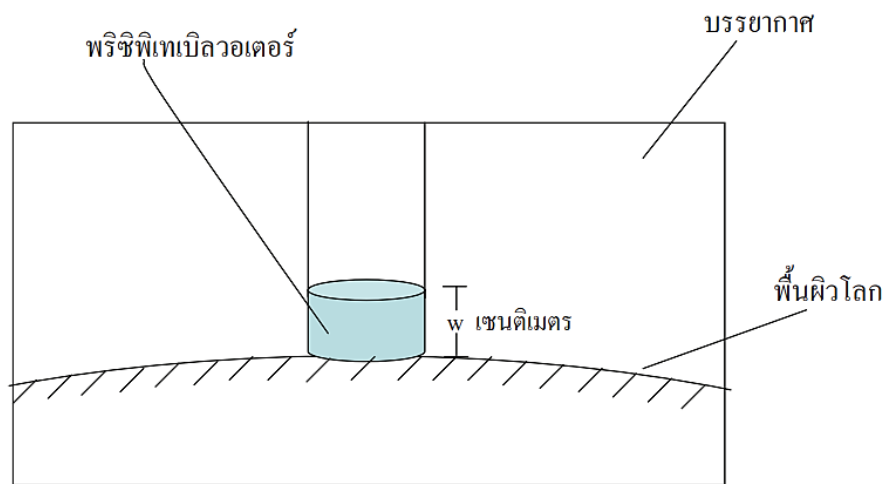
$$\tau_{\text{aer},\lambda} = \exp(-\beta \lambda^{-\alpha} m_a) \quad (2.20)$$

- เมื่อ $\tau_{\text{aer},\lambda}$ คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่น λ ของฝุ่นละออง (-)
 m_a คือ มวลอากาศ (-)

2.1.6.2 การลดทอนรังสีอาทิตย์ของไอน้ำในบรรยากาศ

ไอน้ำเกิดจากการระเหยของน้ำ ซึ่งส่วนใหญ่ระเหยจากทะเลและมหาสมุทร นอกจากนี้ยังเกิดจากการระเหยของน้ำผิวดิน และการคายน้ำของพืช ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจะขึ้นกับสภาพภูมิอากาศ โดยในเขตศูนย์สูตรจะมีไอน้ำสูงกว่าบริเวณเขตละติจูดปานกลางและเขตละติจูดสูง

วิธีการบอกปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ นิยมบอกในรูปของพรีซิพิเทเบิลวอเตอร์ (precipitable water) ซึ่งเป็นความสูงของน้ำในคอลัมน์ของอากาศ ถ้าสมมติว่าทำให้ไอน้ำทั้งหมดในคอลัมน์ของอากาศกับพื้นผิวโลกซึ่งมีพื้นที่ฐาน 1 หน่วยควบแน่นกลายเป็นน้ำที่พื้นผิวโลก โดยมีหน่วยเป็นเซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 การบอกปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ

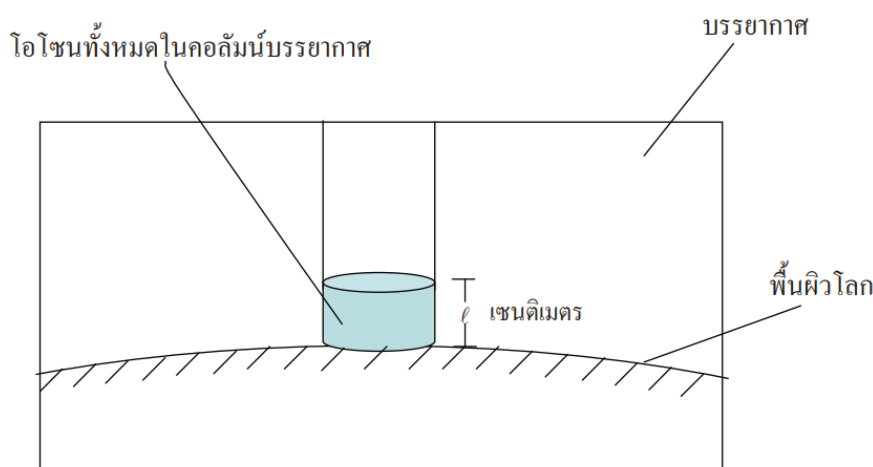
ไอน้ำจะดูดกลืนรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ เป็นแถบความยาวคลื่น (wavelength band) โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นรังสีอินฟราเรด ปริมาณของรังสีอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืนจะขึ้นกับปริมาณไอน้ำในบรรยากาศและมวลอากาศที่รังสีอาทิตย์เดินทางผ่าน ผลของการดูดกลืนนี้สามารถแสดงได้ในรูปของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ของไอน้ำ (spectral transmittance) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของสเปกตรัมรังสีอาทิตย์นอกโลกต่อสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลก ดังสมการ (Leckner, 1978)

$$\tau_{w\lambda} = \exp[-0.2385k_{w\lambda}w m_r / (1 + 20.07k_{w\lambda}w m_r)^{0.45}] \quad (2.21)$$

- เมื่อ $\tau_{w\lambda}$ คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่น λ ของไอน้ำ (-)
- $k_{w\lambda}$ คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีอาทิตย์ที่ของไอน้ำ (เซนติเมตร⁻¹)
- m_r คือ มวลอากาศ (-)

2.1.6.3 การลดทอนรังสีอาทิตย์ของโอโซนในบรรยากาศ

โอโซนส่วนใหญ่จะอยู่ในบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ และมีอยู่เล็กน้อยในบรรยากาศชั้นโทรโปสเฟียร์ ในการบอกปริมาณของโอโซนจะคล้ายกับการบอกปริมาณไอน้ำ ซึ่งจะนิยมบอกในรูปความสูงของโอโซนที่อยู่ในคอลัมน์ของบรรยากาศที่มีพื้นที่ฐาน 1 หน่วย โดยสมมติว่านำโอโซนที่อยู่ในคอลัมน์ของอากาศนั้นทั้งหมดมารวมกันที่พื้นผิวโลกที่อุณหภูมิและความดันปกติ (ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียสและความดัน 101.325 กิโลปาสกาล) และบอกปริมาณโอโซนเป็นความสูงของโอโซนในคอลัมน์นั้นในหน่วยเซนติเมตร (รูปที่ 7) และจะเรียกปริมาณโอโซนที่วัดได้ว่า โอโซนทั้งหมดในคอลัมน์บรรยากาศ (total ozone column, TOC) (Frederick, 2008)



รูปที่ 7 การบอกปริมาณโอโซน

นอกจากนี้เรายังสามารถบอกปริมาณโอโซนในหน่วยดอบสัน (Dobson Unit) หรือ DU ซึ่งเท่ากับปริมาณโอโซนในรูปของปริมาณโอโซนทั้งหมดในคอลัมน์บรรยากาศเป็นเซนติเมตรคูณด้วย 1000 หรือ

$$1 \text{ DU} = 1000 \times \text{ปริมาณโอโซนทั้งหมดในคอลัมน์บรรยากาศเป็นเซนติเมตร}$$

โอโซนสามารถดูดกลืนรังสีเป็นแถบความยาวคลื่น ที่สำคัญคือ แถบฮาร์ทลีย์ (Hartley band) ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 0.22-0.295 ไมโครเมตร ในช่วงความยาวคลื่นนี้โอโซนจะดูดกลืนรังสีอาทิตย์ได้สูงมาก นอกจากนี้ยังมีแถบอื่น ๆ ที่สามารถดูดกลืนรังสีอาทิตย์ได้เล็กน้อย ได้แก่ แถบฮักกินส์ (Huggins band) ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 0.32 - 0.36 ไมโครเมตร และแถบแชปปูสซ์ (Chappuis band) ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.45 - 0.65 ไมโครเมตร จากแถบการดูดกลืนเหล่านี้ทำให้อัตราการดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตบี (0.28-0.32 ไมโครเมตร) ส่วนใหญ่ถูกดูดกลืนโดย โอโซน และในช่วงความยาวคลื่นแสงสว่างถูกดูดกลืนโดยโอโซนเล็กน้อย

2.1.6.4 การลดทอนรังสีอาทิตย์ของเมฆในบรรยากาศ

เมฆมีผลสำคัญต่อการลดลงของรังสีอาทิตย์ที่ผานบรรยากาศมายังพื้นผิวโลก โดยเมฆสามารถกระเจียรังสีอาทิตย์บางส่วนออกไปนอกบรรยากาศและบางส่วนลงมาถึงพื้นผิวโลกในรูปของรังสีกระจาย โดยทั่วไปเมฆจะดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ตและแสงสว่างน้อยมากแต่จะดูดกลืนมากในช่วงความยาวคลื่นรังสีอินฟราเรด (Paltridge & Platt, 1976)

สมบัติเชิงแสงของเมฆที่สำคัญ ได้แก่ ความลึกเชิงแสงและสัมประสิทธิ์การกระเจียรังสีซึ่งพิจารณารังสีที่ตกกระทบครั้งแรก (single scattering albedo) สมบัติเหล่านี้จะขึ้นกับสมบัติขององค์ประกอบของเมฆที่สำคัญ ได้แก่ สถานะของน้ำ และขนาดของละอองน้ำ

2.1.7 การหาปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกในสภาพท้องฟ้าทั่วไป

2.1.7.1 การวัดด้วยเครื่องมือวัดภาคพื้นดิน

เครื่องวัดรังสีรวม (pyranometer) เป็นอุปกรณ์พื้นฐานในงานด้านพลังงานรังสีอาทิตย์ ในอดีตที่ผ่านมานักวิทยาศาสตร์ได้ทำการพัฒนาเครื่องวัดรังสีรวมขึ้นมาหลายแบบ โดยแบบหลัก ๆ มีดังนี้

1) เครื่องวัดรังสีรวมแบบโรบิตซ์ (Robitzsch 15pyranometer)

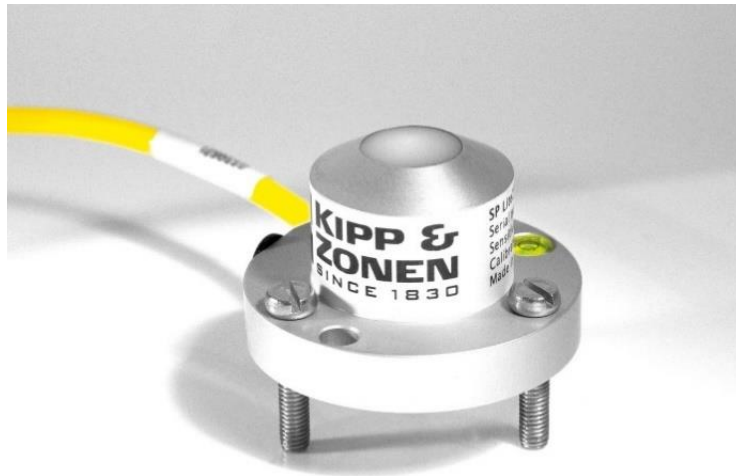
เครื่องวัดแบบนี้จะมีแผ่นรับรังสีเป็นโลหะ 2 แผ่น โดยแผ่นหนึ่งทาสีขาวและอีกแผ่นทาสีดำ เมื่อรังสีอาทิตย์ตกกระทบแผ่นรับรังสีทั้งสอง แผ่นสีดำจะดูดกลืนรังสีอาทิตย์ได้มากกว่าแผ่นสีขาว ทำให้แผ่นสีดำขยายตัวมากกว่าแผ่นสีขาว แรงที่เกิดจากการขยายดังกล่าวจะใช้ขับเคลื่อนปากกาให้บันทึกสัญญาณลงบนกระดาษซึ่งเคลื่อนที่ด้วยระบบโซลาน สัญญาณที่บันทึกได้สามารถแปลงกลับมาเป็นค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ได้โดยการสอบเทียบกับอุปกรณ์ที่สามารถวัดค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ได้โดยตรง ข้อดีของเครื่องวัดรังสีรวมแบบนี้คือ ทำงานได้โดยไม่ต้องใช้ไฟฟ้า จึงสามารถติดตั้งใช้งานในสถานีซึ่งไม่มีแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า แต่ก็มีข้อด้อยคือ ผลการวัดมีความคลาดเคลื่อนสูง ทั้งนี้เพราะการทำงานของเครื่องจะขึ้นกับอุณหภูมิแวดล้อมซึ่งโดยทั่วไปเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา และการขยายตัวของแผ่นรับรังสีไม่สามารถตอบสนองการเปลี่ยนแปลงที่รวดเร็วของความเข้มรังสีอาทิตย์ได้ นอกจากนี้ ข้อมูลที่บันทึกได้แต่ละวันจะเป็นกราฟช่วงสั้น ซึ่งไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงของรังสีอาทิตย์ช่วงสั้นอันเกิดจากเมฆได้ ค่าที่ได้จากการวัดจะหาได้จากการรวมพื้นที่ใต้กราฟและแปลงกลับมาเป็นค่ารังสีรายวันซึ่งจะมีความคลาดเคลื่อน 10-30% ลักษณะของเครื่องวัดรังสีรวมแบบโรบิตซ์แสดงไว้ในรูปที่ 8



รูปที่ 8 เครื่องวัดรังสีรวมแบบโรบิตซ์ของกรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน

2) เครื่องวัดรังสีรวมแบบโฟโตโวลตาอิก (photovoltaic pyranometer)

เนื่องจากสารกึ่งตัวนำที่มีรอยต่อแบบพีเอ็น (P-N junction) จะเกิดศักย์ไฟฟ้าเมื่อรังสีอาทิตย์ตกกระทบ ดังนั้นจึงได้มีการนำสารดังกล่าวมาใช้เป็นเซนเซอร์ของเครื่องวัดรังสีรวม โดยเครื่องวัดจะประกอบด้วยตัวรับรังสีที่เป็นแผ่นกระจายรังสีด้านบนและมีสารกึ่งตัวนำอยู่ด้านล่าง เมื่อรังสีอาทิตย์ตกกระทบแผ่นดังกล่าว รังสีอาทิตย์จะถูกกระจายผ่านลงมาตกลงบนสารกึ่งตัวนำและเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น ค่ากระแสที่ได้นี้สามารถแปลงให้เป็นค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ โดยอาศัยการสอบเทียบกับเครื่องวัดรังสีอาทิตย์มาตรฐาน เนื่องจากการเกิดกระแสไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำนี้เป็นไปตามหลักการโฟโตโวลตาอิก ดังนั้นเราจึงเรียกเครื่องวัดรังสีรวมแบบนี้ว่า เป็นแบบโฟโตโวลตาอิก โดยทั่วไปเครื่องวัดรังสีรวมแบบโฟโตโวลตาอิกจะมีการตอบสนองต่อรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ในช่วงประมาณ 0.4-1.1 ไมโครเมตร ซึ่งแคบกว่าช่วงความยาวคลื่นของสเปกตรัมรังสีรวม ทำให้ไม่สามารถวัดรังสีอาทิตย์ได้ครอบคลุมช่วงความยาวคลื่นกว้าง (0.3-3.0 ไมโครเมตร) ลักษณะของเครื่องวัดรังสีรวมแบบโฟโตโวลตาอิก แสดงได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 เครื่องวัดรังสีรวมแบบโฟโตโวลตาอิก ที่ผลิตโดยบริษัทคิปป์แอนด์โซนเนส (Kipp&Zonen)

3) เครื่องวัดรังสีรวมแบบเทอร์โมไพล์ (thermopile pyranometer)

เครื่องวัดรังสีอาทิตย์แบบนี้จะมีตัวรับรังสีแบบนี้จะมีตัวรับรังสีที่ทำด้วยเทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) จำนวนมากที่ต่อกันแบบอนุกรมซึ่งเรียกว่า เทอร์โมไพล์ (thermopile) โดยมีแผ่นรับรังสีสีดำปิดด้านบน เพื่อไม่ให้รังสีอาทิตย์ตกกระทบเทอร์โมไพล์โดยตรง และมีโดมแก้วครอบด้านบนเพื่อป้องกันตัวรับรังสีจากฝนหรือสิ่งสกปรก เครื่องวัดรังสีรวมแบบนี้โดยทั่วไปจะมีลักษณะดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 เครื่องวัดรังสีรวมแบบเทอร์โมไพล์ที่ผลิตโดยบริษัทคิปป์แอนด์โซนเนส

เมื่อรังสีอาทิตย์ตกกระทบแผ่นรังสี แผ่นดังกล่าวจะถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นไปยังเทอร์โมไพล์ ทำให้เทอร์โมไพล์มีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วของเทอร์โมไพล์ ค่าของศักย์ไฟฟ้างกล่าวสามารถนำมาคำนวณเป็นค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ได้โดยการสอบเทียบกับเครื่องวัดรังสีอาทิตย์มาตรฐาน ข้อดีของเครื่องวัดรังสีรวมเทอร์โมไพล์คือ สามารถตอบสนองต่อสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ส่วนใหญ่ในช่วง 0.3-3.0 ไมโครเมตร ได้เท่ากัน นอกจากนี้ยังสามารถทำงานโดยไม่ขึ้นกับสภาพแวดล้อมมากนัก และมีความละเอียดถูกต้องในการวัดค่อนข้างสูง แต่มีราคาค่อนข้างแพง

ในการคำนวณหาค่าความเข้มรังสีรวม สามารถหาได้จากสมการ

$$I = \frac{V}{S} \quad (2.22)$$

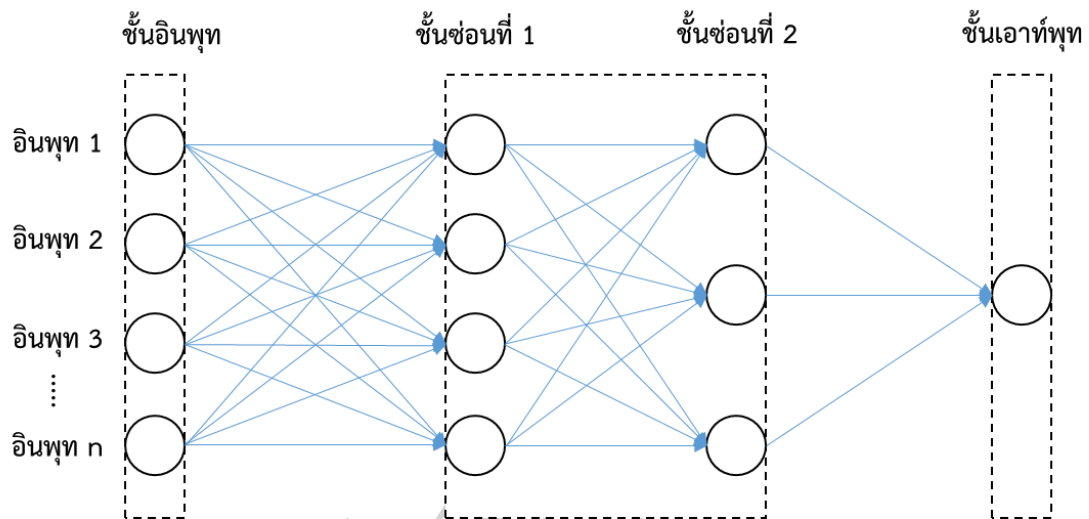
เมื่อ	I	คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ (วัตต์ต่อตารางเมตร)
	V	คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าของหัววัดรังสีอาทิตย์ (โวลต์)
	S	คือ ค่าสภาพการตอบสนอง (sensitivity) ของหัววัดรังสีอาทิตย์ (ไมโครโวลต์ต่อวัตต์ต่อตารางเมตร)

โดยค่าสภาพตอบสนองของหัววัดรังสีอาทิตย์จะเป็นค่าที่ได้มาพร้อมกับหัววัดรังสีอาทิตย์ที่มาจากโรงงานผู้ผลิต โดยทั่วไปค่าสภาพตอบสนองจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อใช้งานไปเป็นระยะเวลาหนึ่ง เพื่อให้การวัดข้อมูลรังสีอาทิตย์มีความถูกต้องแม่นยำ ควรมีการสอบเทียบเครื่องวัดรังสีอาทิตย์เพื่อให้ได้ค่ามาตรฐานอย่างน้อยปีละ 1 ครั้ง

2.1.7.2 การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1) แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN)

โครงข่ายประสาทเทียมเป็นระบบทางคณิตศาสตร์ที่เขียนอยู่ในรูปโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สามารถจำลองการทำงานของระบบทางฟิสิกส์หรือระบบวิศวกรรมต่าง ๆ โดยเลียนแบบการทำงานของสมองมนุษย์และสามารถนำมาใช้คำนวณหาค่าปริมาณรังสีอาทิตย์ได้ มีงานวิจัยได้นำแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมจากโปรแกรมเวก้า (Weka) (Yadav & Chandel, 2015) มาใช้ในการคำนวณค่ารังสีอาทิตย์ โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งประกอบไปด้วยชั้นอินพุท ชั้นซ่อนสองชั้น และชั้นเอาต์พุท ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 ตัวอย่างโครงข่ายประสาทเทียม

โดยเอาต์พุทที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมสามารถเขียนในรูปสมการดังนี้

$$y = f(b + \sum_i^n w_i x_i) \quad (2.23)$$

เมื่อ y คือ เอาต์พุทของโครงข่ายประสาทเทียม
 b คือ ตัวแปรบอกความเอนเอียง
 x_i คือ ตัวแปรอินพุทที่ i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)
 w_i คือ ค่าตัวถ่วงน้ำหนักสำหรับตัวแปรอินพุทที่ i

2) แบบจำลองถดถอยของตัวเองร่วมกับตัวแปรภายนอกหรือแบบจำลองเออาร์เอกซ์ (Autoregressive with eXogenous input model, ARX) เป็นแบบจำลองที่ใช้ค่าเอาต์พุทที่เกิดขึ้นในอดีตร่วมกับตัวแปรภายนอกที่มีผลกับระบบ (exogenous) หรือค่าอินพุท (input) มาพยากรณ์ค่าของเอาต์พุทในอนาคต (Ljung, 1987) ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$y(t) = a_1 y(t-1) + \dots + a_{n_a} y(t-n_a) + b_1 u(t-n_k) + \dots + b_{n_b} u(t-n_b-n_k+1) + e(t) \quad (2.24)$$

เมื่อ $y(t)$ คือ ค่าเอาต์พุทที่เวลา t
 $y(t-1) \dots y(t-n_a)$ คือ ค่าเอาต์พุทที่เกิดขึ้นในอดีตย้อนหลังเวลา t ไป 1 ค่าจนถึงเวลา t ที่ n_a ค่า
 $u(t-n_k) \dots u(t-n_b-n_k+1)$ คือ ค่าตัวแปรภายนอกที่มีผลกับระบบหรือค่าอินพุทที่เวลา $t-n_k$ ไปจนถึงเวลา $t-n_b-n_k+1$

$u(t)$	คือ ค่าตัวแปรอินพุทที่เวลา t ค่า
a	คือ สัมประสิทธิ์ของค่าเอาต์พุท
b	คือ สัมประสิทธิ์ของค่าอินพุท
n_a	คือ จำนวนค่าของเอาต์พุทในอดีตที่ย้อนหลังไป n_a ค่า
n_b	คือ จำนวนค่าของอินพุทในอดีตที่ย้อนหลังไป n_b ค่า
n_k	คือ ลำดับค่าเริ่มต้นของอินพุท
$e(t)$	คือ ความคลาดเคลื่อนของเอาต์พุท

3) การใช้แบบจำลองเอมไพริคัล (empirical model) เป็นแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีอาทิตย์กับตัวแปรทางบรรยากาศ เช่น ความยาวนานแสงแดด ปริมาณเมฆ และอุณหภูมิอากาศ ในอดีตที่ผ่านมา นักวิจัยต่าง ๆ ได้เสนอแบบจำลองเอมไพริคัลสำหรับคำนวณรังสีรวมหลายแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลจากบริเวณต่าง ๆ ของโลก

2.1.7.3 การใช้ข้อมูลดาวเทียม

ดาวเทียมที่ใช้กันในปัจจุบันมีหลายชนิด เช่น ดาวเทียมสื่อสาร ดาวเทียมสำรวจทรัพยากรและดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา เป็นต้น ข้อมูลดาวเทียมที่เหมาะสมกับการใช้ในการคำนวณค่ารังสีอาทิตย์คือข้อมูลจากดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา ทั้งนี้เพราะดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาจะบันทึกภาพของโลกและเมฆที่ปกคลุมบริเวณต่าง ๆ ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลก โดยทั่วไปดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท ดังนี้

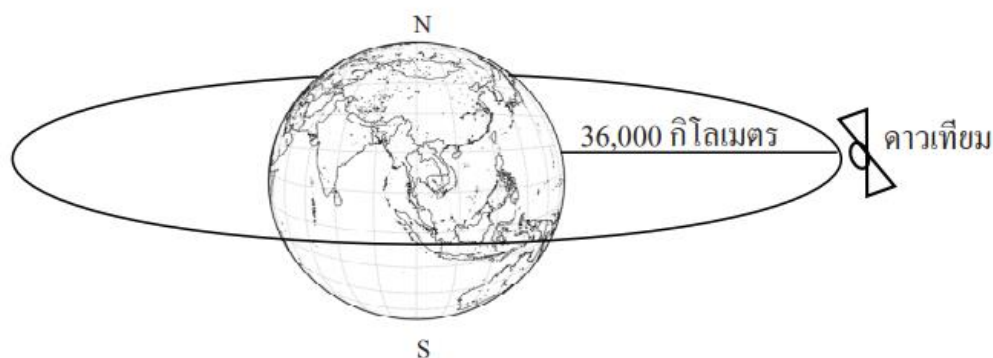
1) ดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาแบบโคจรผ่านขั้วโลก (polar orbiting satellite)

ดาวเทียมประเภทนี้เป็นดาวเทียมที่มีวงโคจรอยู่ในแนวขั้วโลก (รูปที่ 12) เนื่องจากขณะที่ดาวเทียมโคจรจากขั้วโลกเหนือไปยังขั้วโลกใต้ โลกจะหมุนรอบตัวเองจากทิศตะวันตกไปทิศตะวันออก ดังนั้นใน 1 วัน ดาวเทียมจึงสามารถบันทึกภาพครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของพื้นผิวโลก ดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาประเภทนี้ที่สำคัญ ได้แก่ ดาวเทียม NOAA ของสหรัฐอเมริกาและดาวเทียม FY1 ของจีน ดาวเทียมดังกล่าวมีวงโคจรสูงจากพื้นผิวโลกเพียง 850 กิโลเมตร ทำให้ข้อมูลที่ได้มีความละเอียดเชิงพื้นที่สูง แต่ดาวเทียมเหล่านี้จะโคจรผ่านพื้นที่หนึ่ง ๆ 1-2 ครั้งต่อวันเท่านั้น ข้อมูลที่ได้จึงไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้หาค่ารังสีอาทิตย์ที่ต้องการความต่อเนื่อง



รูปที่ 12 วงโคจรของดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาแบบโคจรผ่านขั้วโลก เมื่อ N เป็นขั้วโลกเหนือ และ S เป็นขั้วโลกใต้

2) ดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาแบบอยู่ตำแหน่งเดิมเมื่อเทียบกับพื้นผิวโลก (geostationary satellite) ดาวเทียมประเภทนี้จะอยู่เหนือเส้นศูนย์สูตรของโลกประมาณ 36,000 กิโลเมตร (รูปที่ 13) และโคจรในทิศเดียวกับการหมุนรอบตัวเองของโลกด้วยความเร็วเชิงมุมเท่ากับโลกทำให้ดาวเทียมเสมือนอยู่กับที่เมื่อเทียบกับพื้นผิวโลก ดาวเทียมจึงสามารถบันทึกภาพสถานะของบรรยากาศของโลก ณ ตำแหน่งเดิมได้ทุกชั่วโมงตลอดวัน เนื่องจากสัญญาณภาพที่ได้จะเป็นภาพของสถานะของบรรยากาศครอบคลุมพื้นที่เพียงซีกหนึ่งของโลก ดังนั้นองค์การอุตุนิยมวิทยาโลกจึงได้ประสานงานกับประเทศต่าง ๆ ให้มีดาวเทียมประเภทนี้กระจายกันอยู่รอบโลก เพื่อให้สามารถสังเกตการณ์สถานะทางอุตุนิยมวิทยาครอบคลุมพื้นที่ทั่วโลก ดาวเทียมดังกล่าวในปัจจุบัน ได้แก่ GOES-13, GOES-15, METEOSAT-10, MTSAT-1R และ FY-2D โดยดาวเทียมที่ให้ข้อมูลครอบคลุมพื้นที่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ รวมถึงพื้นที่ประเทศไทย คือดาวเทียมชุด MTSAT ของประเทศญี่ปุ่น และดาวเทียมชุด FY-2 ของประเทศจีน เนื่องจากดาวเทียมจะบันทึกภาพโลกได้ 1-4 ภาพต่อชั่วโมง ซึ่งสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของเมฆได้ ดังนั้นข้อมูลดาวเทียมเหล่านี้จึงเหมาะสมในการนำมาใช้คำนวณค่ารังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลก



รูปที่ 13 วงโคจรของดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาแบบอยู่ตำแหน่งเดิมเมื่อเทียบกับพื้นผิวโลก

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันนักวิจัยหลายประเทศได้พยายามหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีอาทิตย์กับตัวแปรทางบรรยากาศอื่น ๆ ในรูปของแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ นักวิจัยจึงได้พัฒนาแบบจำลองให้สามารถใช้งานได้ทุกพื้นที่โดยใช้แบบจำลองที่จัดอยู่ในประเภทการเรียนรู้แบบเครื่องกล (machine learning) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่อาศัยการเรียนรู้ของข้อมูลตัวอย่าง (training) และสามารถนำมาใช้ประมาณค่าของข้อมูลตัวอย่างที่อาจจะเกิดขึ้นในอนาคตได้ โดยงานวิจัยต่าง ๆ ที่สำคัญสามารถสรุปได้ดังนี้

Premalatha และ Naveen (2018) ได้สร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม 6 แบบจำลองโดยใช้ตัวแปรอินพุททั้งหมด 6 ตัวแปร อินพุทที่เป็นไปได้ 32 ชุด ในการประมาณค่ารังสีรวมในประเทศอินเดีย แบบจำลอง ANN-2 (อินพุท 2 ตัวแปร) ทำนายรังสีอาทิตย์ได้แม่นยำที่สุดด้วยการรวมกันของข้อมูลอินพุทระหว่างผลต่างของอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดกับรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวัน โดยมีค่าทางสถิติ relative root mean square error (RRMSE) ต่ำสุดที่ 3.96% โดยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสามารถใช้ทำนายรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนได้อย่างแม่นยำสำหรับพื้นที่ที่ไม่มีสถานีวัด (Premalatha & Naveen, 2018)

Peng และคณะ (2019) ได้ทำการประมาณค่ารังสีรวมในประเทศจีนด้วยวิธีการโครงข่ายประสาทเทียม หรือ ANN โดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Himawari-8 และข้อมูลการวัดภาคพื้นดิน ในปี ค.ศ. 2016 พบว่า ค่ารังสีรวมโดยการประมาณจากข้อมูลดาวเทียมโดยใช้แบบจำลอง ANN เทียบกับข้อมูลการวัดภาคพื้นดินมีความสอดคล้องกันดี โดยมีค่า R^2 และ root mean square error (RMSE) เท่ากับ 0.90 และ 88.86 Wm^{-2} ตามลำดับ สำหรับค่ารังสีรวมเฉลี่ยรายชั่วโมงและ 0.96 และ 24.46 Wm^{-2} ตามลำดับ สำหรับค่ารังสีรวมเฉลี่ยรายวัน (Peng et al., 2020)

Niu และ O'Neill (2017) ได้เปรียบเทียบแบบจำลองสำหรับรังสีรวม ได้แก่ แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมและแบบจำลองที่ใช้การเรียนรู้แบบเครื่องกลต่าง ๆ เช่น แบบจำลองจำแนกข้อมูลด้วยเวกเตอร์ (support vector machine, SVM) แบบจำลอง ARX และแบบจำลอง ANN ผลจากการเปรียบเทียบ พบว่า แบบจำลอง ARX สามารถคำนวณรังสีรวมโดยไม่จำเป็นต้องใช้ข้อมูลเพื่อสร้างแบบจำลองจำนวนมากเหมือนแบบจำลอง ANN (Niu & O'Neill, 2017)

Silva และ Brito (2018) ได้ศึกษาแบบจำลอง ARX สำหรับคำนวณรังสีรวมที่มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับพื้นที่และเวลา โดยใช้ข้อมูลรังสีรวมที่วัดด้วยเครื่องไพราโนมิเตอร์จำนวน 17 เครื่องที่กระจายตามพื้นที่ต่าง ๆ บนหมู่เกาะฮาวาย ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งข้อมูลจากเครื่องวัดจำนวน 3 เครื่องจะเป็นข้อมูลอินพุตเพื่อทำการสร้างแบบจำลอง ส่วน 14 เครื่องที่เหลือจะใช้เป็นข้อมูลในการทดสอบแบบจำลอง จากผลการศึกษา พบว่า แบบจำลอง ARX สามารถคำนวณรังสีรวมที่มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับพื้นที่และเวลาได้ค่อนข้างดี (Silva & Brito, 2018)

Silva และคณะ (2022) ได้เสนอวิธีการประมาณค่ารังสีอาทิตย์โดยใช้แบบจำลอง ARX และ ARXMAX โดยแบบจำลองจะใช้รังสีรวมที่พื้นผิวโลกเป็นข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่ได้จากแบบจำลองคือ รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก รังสีอินฟราเรดในแนวระดับ รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกในแนวระดับ รังสีตรงและรังสีกระจาย พบว่าแบบจำลอง ARX สามารถคำนวณข้อมูลรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก รังสีอินฟราเรดในแนวระดับ และรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกในแนวระดับได้มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยเท่ากับ 2.51% 1.40% และ 7.15% ตามลำดับ (Silva et al., 2022)

จากการศึกษาวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า แบบจำลอง ARX สามารถประมาณค่ารังสีอาทิตย์ได้อย่างแม่นยำ มีความเหมาะสมในการนำไปพัฒนาแบบจำลองสำหรับประมาณค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาแบบจำลองสำหรับประมาณค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนโดยใช้แบบจำลอง ARX ที่สถานีในภูมิภาคหลักของประเทศไทย โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการศึกษาและผลงานวิจัยในบทถัดไป

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย ผล และการอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้ แบ่งการดำเนินงานออกเป็น 3 ส่วน ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัย โดยส่วนที่หนึ่งคือการศึกษาการวัดและรวบรวมข้อมูลความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนจากสถานีวัด 4 แห่งในภูมิภาคหลักของประเทศไทย ได้แก่ ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่ ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง จังหวัดอุบลราชธานี มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม และศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา ส่วนที่สองคือการวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติของความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของ 4 สถานีหลัก และส่วนสุดท้ายคือการพัฒนาและทดสอบแบบจำลองรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนโดยใช้ข้อมูลที่ทำการวัดในภูมิภาคหลักของประเทศไทย โดยแต่ละส่วนมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

3.1 การศึกษาการวัดและรวบรวมข้อมูลความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีวัด 4 แห่งในภูมิภาคหลักของประเทศไทย

ผู้วิจัยได้ศึกษาการวัดรังสีอาทิตย์ในประเทศไทย พบว่าข้อมูลที่เป็นการวัดระยะยาว คือ เครือข่ายการวัดของมหาวิทยาลัยศิลปากร โดยการวัดในภาคเหนือที่จังหวัดเชียงใหม่ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่จังหวัดอุบลราชธานี ภาคกลางที่จังหวัดนครปฐม และภาคใต้ที่จังหวัดสงขลา สถานีที่ทำการวัดจะติดตั้งเครื่องวัดแบบเทอร์โมไพล์ (thermopile) รุ่น CM11 และ CM21 ผลิตโดยบริษัทคิปป์แอนด์โซนเนซ (Kipp&Zonen) โดยตำแหน่งที่ตั้ง ช่วงเวลาที่ใช้ข้อมูลและวัตถุประสงค์ของการใช้ข้อมูล แสดงดังตารางที่ 3.1 และลักษณะของเครื่องไพโรมิเตอร์ในแต่ละสถานี แสดงดังรูปที่ 14-17 เครื่องวัดนี้เป็นเครื่องวัดรังสีรวมแบบเทอร์โมไพล์ (thermopile pyranometer) สามารถตอบสนองสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ส่วนใหญ่ในช่วง 0.3-3.0 ไมโครเมตร โดยเมื่อรังสีอาทิตย์ตกกระทบแผ่นรับรังสี แผ่นดังกล่าวจะถ่ายเทความร้อนไปยังเทอร์โมไพล์ ทำให้เทอร์โมไพล์มีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วของเทอร์โมไพล์ ค่าศักย์ไฟฟ้างกล่าวสามารถนำมาคำนวณเป็นค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ได้โดยอาศัยค่าการตอบสนอง (sensitivity) ของเครื่องวัดที่ได้จากการสอบเทียบกับเครื่องวัดรังสีอาทิตย์มาตรฐาน โดยเครื่องวัดรังสีรวมแบบเทอร์โมไพล์มีคุณสมบัติที่สำคัญ ดังนี้

- 1) หัววัดรังสีรวม มาตรฐานระดับ World Secondary Standard (ISO 9060: 1990) แบบเทอร์โมไพล์
- 2) สามารถวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ได้ในช่วงความยาวคลื่น 285 – 2,800 นาโนเมตร

- 3) สามารถทำงานหรือวัดค่าได้สูงสุด (maximum operational irradiance) ที่ 4,000 วัตต์ต่อตารางเมตร
- 4) เวลาของการตอบสนอง (response time (95%)) มีความไวในการวัดค่า ที่น้อยกว่า 5 วินาที และ (response time (63%)) มีความไวในการวัดค่า ที่น้อยกว่า 1.7 วินาที
- 5) ทำงานในช่วงอุณหภูมิ (operating and storage temperature range) ที่ -40 ถึง 80 องศาเซลเซียส

จากนั้นผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลจากการวัดแต่ละสถานี ซึ่งพื้นฐานเป็นข้อมูลเฉลี่ยราย 10 นาที ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1995-2022 (ถึงแม้ว่าสถานีนครปฐมจะวัดตั้งแต่ปี ค.ศ. 1987 ถึงปัจจุบัน แต่ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์จะใช้ข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม ปี ค.ศ. 1995- ธันวาคม ปี ค.ศ. 2022) ตามรายละเอียดในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 รายละเอียดของข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์ในช่วงปี ค.ศ. 1995-2022

ลำดับ	สถานี	ตำแหน่ง	
		ละติจูด (°N)	ลองจิจูด (°E)
1	ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่	18.78	98.98
2	ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ตอนล่าง จังหวัดอุบลราชธานี	15.25	104.87
3	สถานีนครปฐม	13.82	100.04
4	ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัด สงขลา	7.18	100.60



รูปที่ 14 เครื่องไพราโนมิเตอร์ รุ่น CM21 บริษัท Kipp&Zonen ของสถานีเชียงใหม่



รูปที่ 15 เครื่องไพราโนมิเตอร์ รุ่น CM11 บริษัท Kipp&Zonen ของสถานีอุบลราชธานี



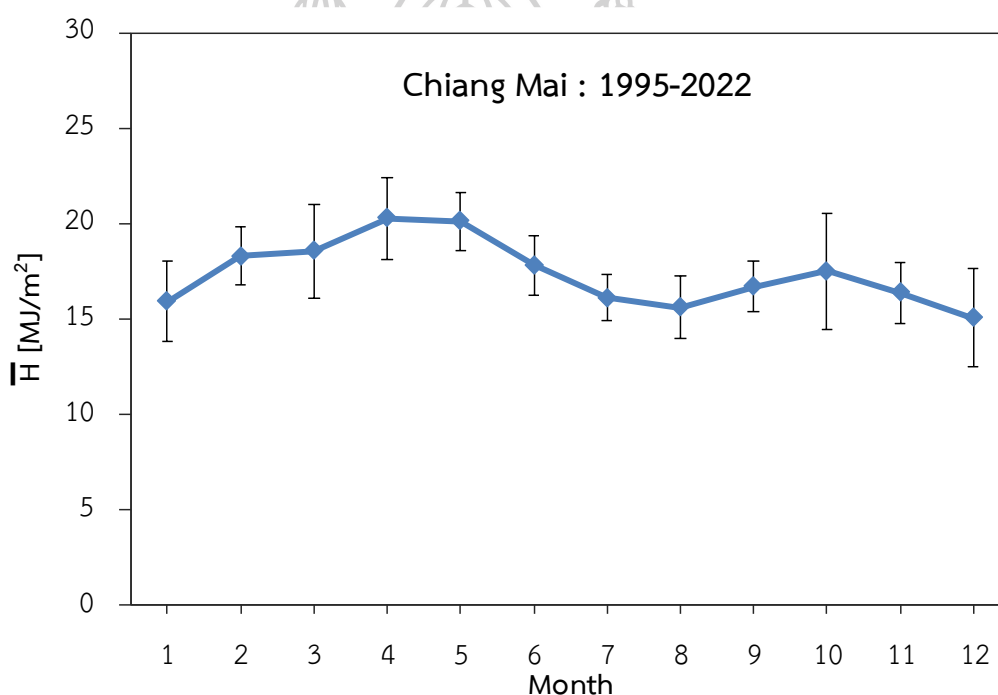
รูปที่ 16 เครื่องไพราโนมิเตอร์ รุ่น CM21 บริษัท Kipp&Zonen ของสถานีนครปฐม



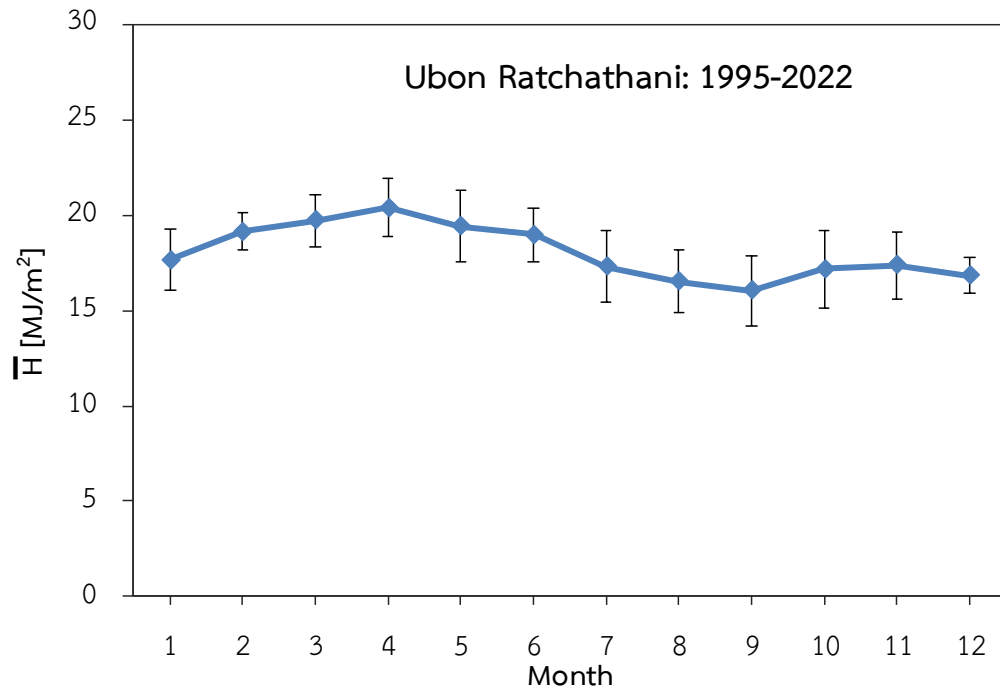
รูปที่ 17 เครื่องไพราโนมิเตอร์ รุ่น CM21 บริษัท Kipp&Zonen ของสถานีสงขลา

3.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติของความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีวัด 4 แห่งในภูมิภาคหลักของประเทศไทย

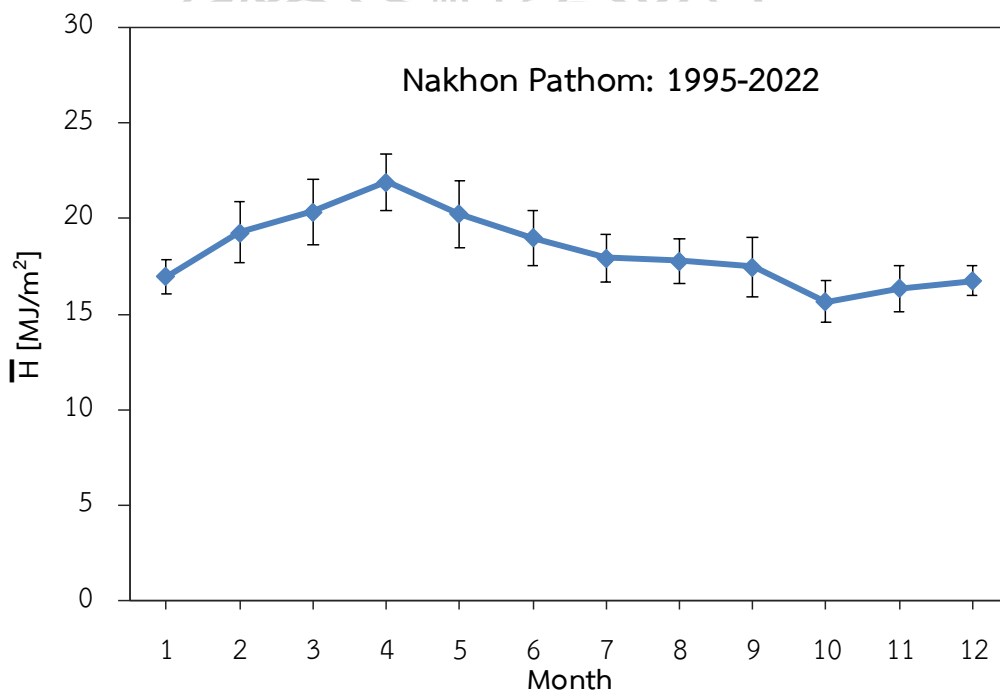
ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีวัด 4 แห่งในรูปของอนุกรมเวลาของค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน โดยดำเนินการดังนี้ นำข้อมูลความเข้มรังสีรวมราย 10 นาที มาแปลงเป็นรายชั่วโมง จากนั้นรวมค่ารายชั่วโมงทั้งหมดตลอดทั้งวันในแต่ละวันเพื่อแปลงให้เป็นรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนในหน่วยเมกะจูลต่อตารางเมตร (MJ/m^2) แล้วนำค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนมาเขียนกราฟการแปรค่าระหว่างค่าความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนกับเวลาในแต่ละสถานี (กรณีของสถานีนครปฐมจะใช้ข้อมูลปี ค.ศ. 1995-2022 เพื่อจะได้เปรียบเทียบกับสถานีอื่น ๆ) โดยผลที่ได้แสดงในรูปที่ 18-21



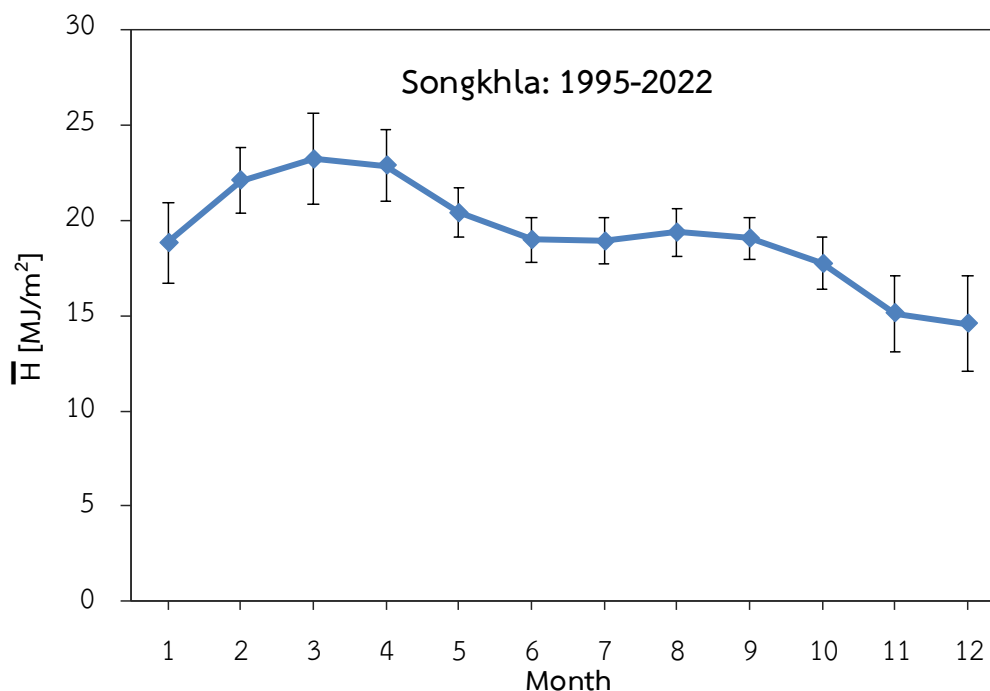
รูปที่ 18 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีเชียงใหม่ในช่วงปี ค.ศ. 1995-2022 (เส้นแนวตั้งแสดงการแปรค่า \bar{H} จากค่าเฉลี่ย $\pm 1\text{SD}$ เมื่อ SD คือค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน)



รูปที่ 19 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีอุบลราชธานีในช่วงปี ค.ศ. 1995-2022



รูปที่ 20 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีนครปฐมในช่วงปี ค.ศ. 1995-2022



รูปที่ 21 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีสงขลาในช่วงปี ค.ศ. 1995-2022

จากกราฟการแปรค่าของค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนกับเดือนต่าง ๆ พบว่า การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน สำหรับสถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี และสถานีนครปฐม มีลักษณะการแปรค่าที่คล้ายกัน กล่าวคือค่าความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนมีการแปรค่าค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตั้งแต่เดือนมกราคมและมีค่าสูงสุดเดือนเมษายน จากนั้นมีค่าลดลงเล็กน้อยจนถึงเดือนกันยายนและเดือนสิงหาคมหรือตุลาคม ทั้งนี้ขึ้นกับสถานี และค่อย ๆ เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แล้วจึงลดลงอีกครั้งจนถึงช่วงปลายปี สำหรับสถานีสงขลาจะมีลักษณะการแปรค่าแตกต่างจากภาคอื่น ๆ โดยมีค่าความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนค่อนข้างสูง เนื่องจากภาคใต้มีตำแหน่งละติจูดที่ต่ำ ลักษณะสภาพอากาศมีค่าสูงเกือบทั้งปี เมื่อเฉลี่ยค่าความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนทั้ง 4 สถานี พบว่าประเทศไทยมีศักยภาพด้านพลังงานรังสีรวมค่อนข้างสูง โดยค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายวันเฉลี่ยระยะยาวของสถานีเชียงใหม่มีค่าเท่ากับ 17.36 เมกะจูลต่อตารางเมตร สถานีอุบลราชธานีมีค่าเท่ากับ 18.03 เมกะจูลต่อตารางเมตร สถานีนครปฐมมีค่าเท่ากับ 18.31 เมกะจูลต่อตารางเมตร และสถานีสงขลามีค่าเท่ากับ 19.24 เมกะจูลต่อตารางเมตร เมื่อพิจารณาข้อมูลจากทั้ง 4 สถานีวัด พบว่า ค่าความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนมีค่าเท่ากับ 18.24 เมกะจูลต่อตารางเมตร

3.3 การพัฒนาและทดสอบแบบจำลองรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนโดยใช้ข้อมูลที่ทำการวัดใน ภูมิภาคหลักของประเทศไทย

หลังจากการวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติของความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีวัด 4 สถานีหลักในประเทศไทย ผู้วิจัยได้ดำเนินการพัฒนาและทดสอบแบบจำลองสำหรับคำนวณค่าความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน โดยมีขั้นตอนดังนี้

ในการพัฒนาแบบจำลองเออาร์เอกซ์ ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมข้อมูลตัวแปรอินพุทและตัวแปรเอาต์พุท โดยประกอบด้วยตัวแปรต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- ความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากการวัดภาคพื้นดิน (\bar{H})

ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนจากเครื่องไพราโนมิเตอร์ รุ่น CM11 และ CM21 ทั้ง 4 สถานีหลัก ดังรายละเอียดที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 3.1 ในช่วงปี ค.ศ. 2017-2022 โดยข้อมูลที่ใช้สำหรับพัฒนาแบบจำลองมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- ใช้ข้อมูลปี ค.ศ. 2017 และ 2018, ในการสร้างสมการ time series ของปี ค.ศ. 2018
- ใช้ข้อมูลปี ค.ศ. 2018 และ 2019, ในการสร้างสมการ time series ของปี ค.ศ. 2019
- ใช้ข้อมูลปี ค.ศ. 2019 และ 2020, ในการสร้างสมการ time series ของปี ค.ศ. 2020
- ใช้ข้อมูลปี ค.ศ. 2020 และ 2021, ในการสร้างสมการ time series ของปี ค.ศ. 2021
- ใช้ข้อมูลปี ค.ศ. 2021 และ 2022, ในการสร้างสมการ time series ของปี ค.ศ. 2022

ในการทำนายค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนจะใช้ exogenous variables ซึ่งมีดังนี้

1) ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง (aerosol optical dept, AOD) เป็นการวัดค่าการส่งผ่านของรังสีอาทิตย์ที่ส่องผ่านฝุ่นละอองลงมายังพื้นผิวโลก ค่า AOD นี้ สามารถบ่งบอกให้ทราบถึงปริมาณรังสีตรงจากดวงอาทิตย์ที่ถูกขวางกั้นโดยอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในอากาศก่อนที่จะส่งลงมาถึงพื้นดิน ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ใช้ค่า AOD ที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร ที่ทำการวัดด้วยเครื่องเซนโฟโตมิเตอร์ (sunphotometer) ยี่ห้อ Cimel รุ่น CE-318 ซึ่งติดตั้งอยู่ที่สถานีวัดทั้ง 4 แห่ง ดังแสดงในรูปที่ 22-25 ข้อมูลจากเครื่องวัดดังกล่าวจะถูกประมวลผลโดยเครือข่าย Aerosol Robotic Network หรือ AERONET และสามารถดาวน์โหลดข้อมูลดังกล่าวผ่านเว็บไซต์ <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/> ขององค์การนาซ่า (NASA) ประเทศสหรัฐอเมริกา แสดงดังรูปที่ 26 ซึ่งเป็นข้อมูลทั้งแบบรายชั่วโมงและรายวัน โดยผู้วิจัยได้นำค่ารายวันมาคำนวณหาค่า \overline{AOD} และใช้เป็นอินพุทของแบบจำลอง



รูปที่ 22 เครื่องซันโฟโตมิเตอร์ ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่



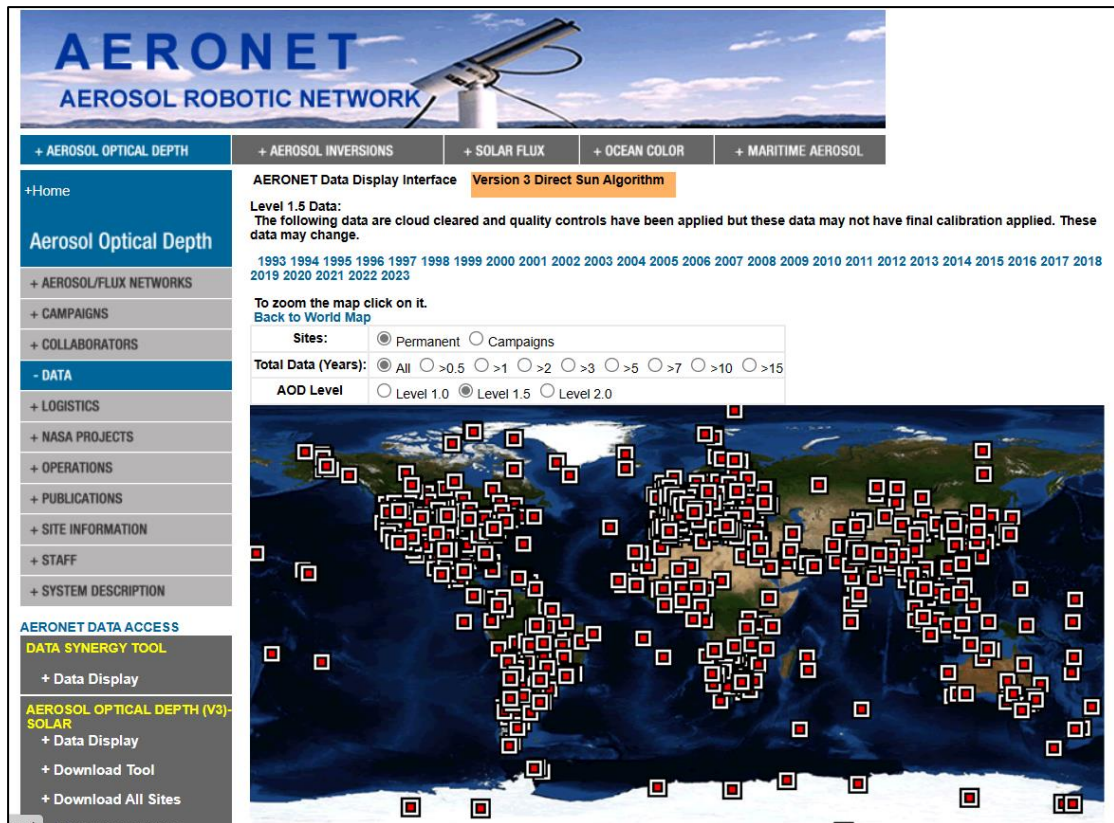
รูปที่ 23 เครื่องซันโฟโตมิเตอร์ ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง จังหวัดอุบลราชธานี



รูปที่ 24 เครื่องชั้นโฟโตมิเตอร์ ซึ่งติดตั้งอยู่ที่คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม



รูปที่ 25 เครื่องชั้นโฟโตมิเตอร์ ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ศูนย์อู่ศูนย์มหาวิทยาลัยภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา



รูปที่ 26 เครือข่าย Aerosol Robotic Network หรือ AERONET

2) ปริมาณไอน้ำในรูปของ precipitable water รายวันเฉลี่ยต่อเดือน (\bar{W})

ไอน้ำในบรรยากาศ (precipitable water) หมายถึง น้ำที่อยู่ในสถานะก๊าซซึ่งแทรกตัวอยู่ในช่องว่างระหว่างโมเลกุลของก๊าซอื่น ๆ ในชั้นบรรยากาศ โดยส่วนใหญ่ไอน้ำจะกระจายตัวตามระบบนิเวศต่าง ๆ ทั้งพื้นดิน บรรยากาศ และเหนือพื้นมหาสมุทรที่ระดับความสูงระหว่าง 2 กิโลเมตรเหนือพื้นผิวโลก ไอน้ำมีคุณสมบัติในการดูดกลืนพลังงานรังสีจากดวงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นรังสีความร้อนหรือรังสีอินฟราเรด เพื่อให้อุณหภูมิจนพื้นผิวโลกไม่ร้อนหรือหนาวจนเกินไป ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยใช้ค่า \bar{W} จากเครื่องชั้นโฟโตมิเตอร์ของเครือข่าย AERONET

3) ปริมาณโอโซนในรูปของ total ozone column รายวันเฉลี่ยต่อเดือน (\bar{O}_3)

โอโซนเป็นตัวแปรที่สำคัญในการดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ต โอโซนส่วนมากจะกระจายตัวอย่างหนาแน่นประมาณ 85-90% อยู่ในชั้นบรรยากาศที่ระดับความสูงประมาณ 20 ถึง 30 กิโลเมตรจากพื้นผิวโลก โดยทั่วไปการบอกปริมาณโอโซนที่มีผลต่อการลดทอนความเข้มรังสีอาทิตย์มักนิยมบอกในรูปความหนาของโอโซนรวมตลอดทั้งแนวตั้งในบรรยากาศ (total ozone column) โดยสมมติว่านำโอโซนรวมตลอดแนวตั้งมารวมกันที่พื้นผิวโลกที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียสและที่ความกดอากาศ 1 บรรยากาศ แล้ววัดความสูงในหน่วยเซนติเมตรหรือหน่วยดอบสัน (Dobson, DU)

โดยผู้วิจัยได้ดาวน์โหลดข้อมูล O_3 จากดาวเทียม OMI/AURA ผ่านทางเว็บไซต์ <https://avdc.gsfc.nasa.gov/pub/data/satellite/Aura/OMI/V03/L2OVP/OMTO3> การวัดปริมาณโอโซนรวมด้วยดาวเทียมเป็นการวัดด้วยเซนเซอร์ระยะไกลเหนือชั้นบรรยากาศโลกขององค์การ NASA ประโยชน์ของการตรวจวัดด้วยดาวเทียม คือให้ข้อมูลเชิงพื้นที่ที่ดีและช่วยให้ทราบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ดาวเทียม Aura เริ่มดำเนินการตรวจวัดครั้งแรกเมื่อปี 2004 และยังคงใช้งานจนถึงปัจจุบัน ดาวเทียมดังกล่าว ได้ติดตั้งเครื่องวัดที่ชื่อว่า OMI (Ozone Monitoring Instrument) เพื่อใช้สำหรับวัดค่าปริมาณโอโซนรายวันทั่วโลก หลักการทำงานของเครื่องวัด OMI ได้รับการพัฒนาและปรับปรุงให้เป็นหัววัดที่มีมุมมองกว้าง สามารถวัดการกระเจิงของรังสีอาทิตย์ขณะใด ๆ ได้เป็นระยะทางตามแนวนอน 2,600 กิโลเมตร และมี spatial resolution เท่ากับ 1 องศาละติจูด x 1 องศาลองจิจูด ลักษณะของดาวเทียม Aura แสดงดังรูปที่ 27



รูปที่ 27 ดาวเทียม OMI/AURA

4) ปริมาณเมฆในรูปของดัชนีเมฆ (cloud index) รายวันเฉลี่ยต่อเดือน (ก)

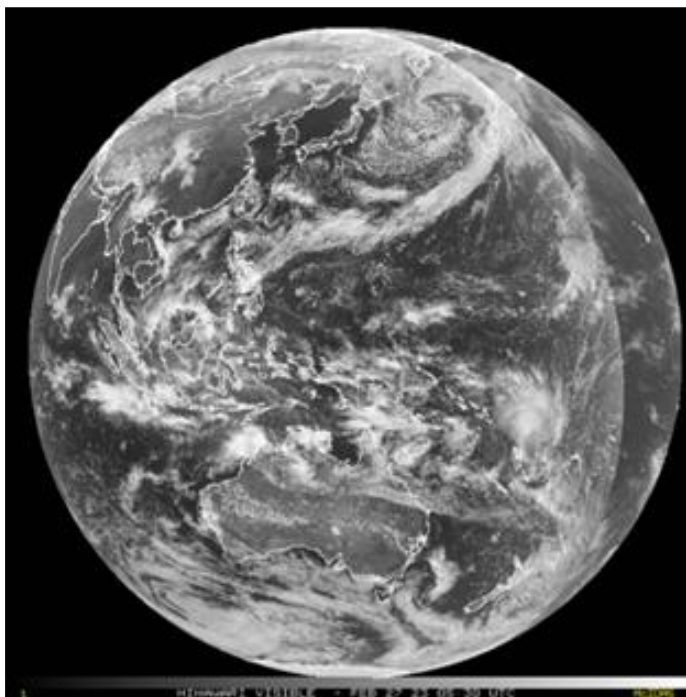
ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะใช้ค่าดัชนีเมฆเพื่อเป็นตัวบ่งบอกปริมาณเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้าในตำแหน่งสถานีวัดทั้ง 4 สถานี โดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมจากช่องสัญญาณแสงสว่าง (visible channel) ของดาวเทียมฮิมาวาริ 8 (Himawari-8) ซึ่งเป็นดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาแบบอยู่กับที่เมื่อเทียบกับตำแหน่งบนโลก (geostationary satellite) ดาวเทียมดังกล่าวอยู่เหนือเส้นศูนย์สูตรประมาณ 36,000 กิโลเมตร ที่ลองจิจูด 140°E ดาวเทียมนี้มีช่องรับสัญญาณในช่วงความยาวคลื่น

ต่าง ๆ 16 ช่องสัญญาณ โดยรายละเอียดของช่องสัญญาณของดาวเทียม Himawari-8 แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รายละเอียดช่องรับสัญญาณของดาวเทียม Himawari-8 (SSP: sub satellite point)

ความยาวคลื่น (ไมโครเมตร)	ช่องสัญญาณ	ความละเอียดเชิงพื้นที่ที่ SSP (กิโลเมตร)	ความยาวคลื่นกลาง (ไมโครเมตร)
0.47	1	1	0.47063
0.51	2	1	0.51000
0.64	3	0.5	0.63914
0.86	4	1	0.85670
1.6	5	2	1.6101
2.3	6	2	2.2568
3.9	7	2	3.8853
6.2	8	2	6.2429
6.9	9	2	6.9410
7.3	10	2	7.3467
8.6	11	2	8.5926
9.6	12	2	9.6372
10.4	13	2	10.4073
11.2	14	2	11.2395
12.4	15	2	12.3806
13.3	16	2	13.2807

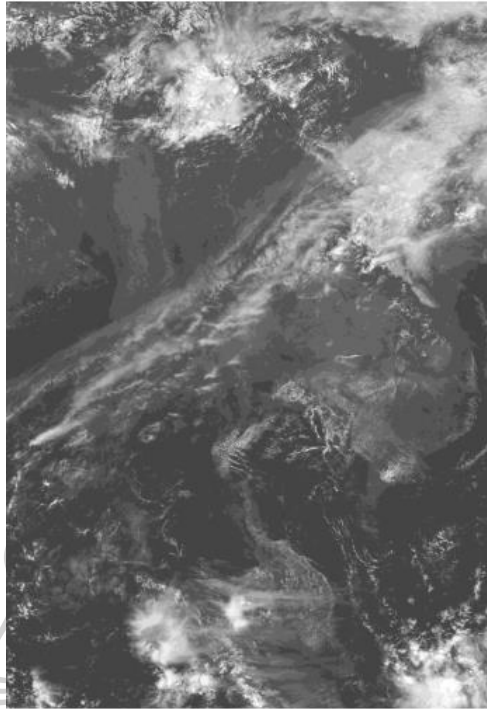
ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ใช้ข้อมูลในช่องแสงสว่างของดาวเทียม Himawari-8 ซึ่งทำการบันทึกภาพทุก ๆ 10 นาที ครอบคลุมพื้นที่ซีกหนึ่งของโลกและสามารถสังเกตเห็นกลุ่มก้อนของเมฆบนท้องฟ้าได้ ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 28



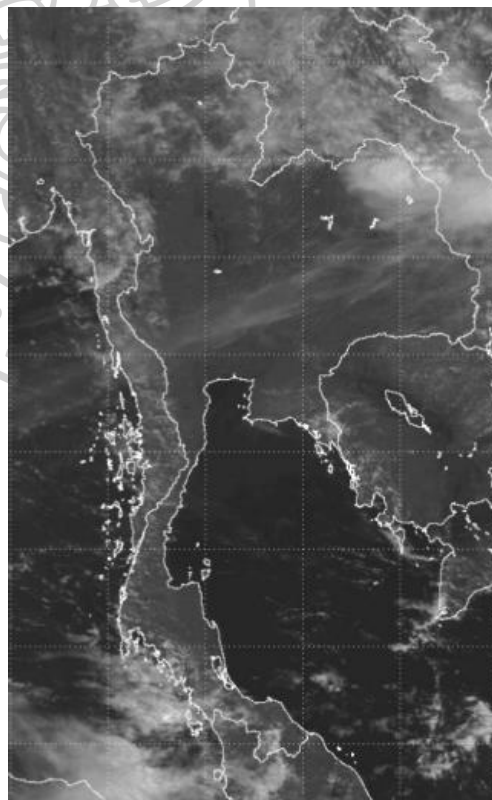
รูปที่ 28 ตัวอย่างภาพถ่ายที่ได้จากดาวเทียม Himawari-8

ผู้วิจัยนำภาพถ่ายดาวเทียมตั้งแต่เวลา 9.00-16.00 น. จากช่องสัญญาณช่องที่ 2 (ความยาวคลื่น 0.51 ไมโครเมตร) ของดาวเทียมมาใช้ในการคำนวณ ข้อมูลที่ได้จากดาวเทียมเป็นข้อมูลดิจิทัล 10 บิต สัญญาณจากภาพที่ได้จะประกอบด้วยหน่วยย่อยที่เล็กที่สุดเรียกว่า พิกเซล (pixel) โดยมีความละเอียดเชิงพื้นที่ (spatial resolution) ณ ตำแหน่งประเทศไทยขนาด 3x3 ตารางกิโลเมตร

ในการใช้งานข้อมูลภาพถ่าย Himawari-8 ผู้วิจัยใช้ส่วนของภาพถ่ายดาวเทียมที่ครอบคลุมพื้นที่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ซึ่งจะครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทย เนื่องจากภาพที่ได้จากดาวเทียมอยู่ในรูปของ satellite projection ซึ่งจะเห็นเป็นส่วนโค้งของโลกและระยะของภาพไม่ได้แปรตามระยะบนพื้นดิน ดังตัวอย่างในรูปที่ 29 จากนั้นผู้วิจัยจึงทำการตัดให้เหลือเฉพาะประเทศไทยและบางส่วนของประเทศข้างเคียง แล้วทำการแปลงให้อยู่ในรูป cylindrical projection เพื่อให้ได้ระยะบนภาพที่แปรค่าโดยตรงกับระยะบนพื้นผิวโลก จากนั้นนำพิกัดของประเทศไทยมาซ้อนทับบนภาพโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทำการปรับแผนที่ให้ตรงกับภาพถ่ายดาวเทียมโดยใช้แนวชายฝั่งและเกาะต่าง ๆ เป็นจุดอ้างอิง ซึ่งภาพที่ทำการดำเนินการแล้วแสดงในรูปที่ 30



รูปที่ 29 ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่ครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทยในรูปแบบของ satellite Projection



รูปที่ 30 ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่ทำการหาพิกัดแล้วในรูปแบบ cylindrical projection

จากนั้นทำการแปลงค่าระดับความเทาหรือ gray level ของแต่ละพิกเซลซึ่งเป็นค่าตัวเลขที่อยู่ระหว่าง 0-1023 ให้อยู่ในรูปแบบของสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีอาทิตย์พร้อมทั้งคำนวณแก้ไขผลจากมุมตกกระทบของรังสีอาทิตย์ ณ ตำแหน่งที่ต้องการนำไปใช้ในการสร้างและทดสอบแบบจำลองทำการหาสัมประสิทธิ์การสะท้อนของบรรยากาศและพื้นผิวโลก (earth-atmosphere reflectivity, ρ_{EA}) โดยการนำภาพถ่ายดาวเทียมที่ดำเนินการแล้วซึ่งได้เป็นค่า pseudo-reflectivity (ρ_{pseu}) โดยอาศัยตารางสอบเทียบของผู้ผลิตดาวเทียม

เนื่องจากค่า pseudo-reflectivity (ρ_{pseu}) เป็นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีอาทิตย์ เมื่อรังสีอาทิตย์ตกกระทบตั้งฉากกับพื้นผิวโลก แต่สภาพทั่วไปรังสีอาทิตย์จะตกกระทบผิวโลกด้วยมุมต่าง ๆ ขึ้นกับตำแหน่งและเวลา ดังนั้นจึงต้องทำการแปลงค่า pseudo-reflectivity ให้เป็นสัมประสิทธิ์การสะท้อนรังสีอาทิตย์ หรือ ρ_{EA} โดยการหารด้วยค่าโคไซน์ของมุมเซนิตดังสมการที่ 3.1

$$\rho_{EA} = \frac{\rho_{pseu}}{\cos\theta_z} \quad (3.1)$$

เมื่อ ρ_{EA} คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิงของบรรยากาศและพื้นผิวโลก (-)
 ρ_{pseu} คือ pseudo-reflectivity (-)
 θ_z คือ มุมเซนิตของดวงอาทิตย์ (องศา)

จากนั้นทำการคำนวณดัชนีเมฆ (n) ด้วยการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของบรรยากาศและพื้นผิวโลก ρ_{EA} ร่วมกับสัมประสิทธิ์การสะท้อนของผิวโลก ρ_{min} ซึ่งคัดเลือกมาจากค่า gray level ที่ต่ำสุดและสัมประสิทธิ์การสะท้อนสูงสุดของเมฆ ρ_{max} โดยคัดเลือกมาจากค่า gray level ที่มีค่าสูงสุด การคำนวณดัชนีเมฆสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้ (Cano et al., 1986)

$$n = \frac{\rho_{SAT} - \rho_{min}}{\rho_{max} - \rho_{min}} \quad (3.2)$$

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

ผู้วิจัยได้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนต่าง ๆ ดังกล่าวจากดาวเทียม Himawari-8 โดยใช้วิธีการคำนวณของ (Janjai et al., 2015) จากสมการจะเห็นได้ว่า ในกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆค่าจะเท่ากับค่า ρ_{min} ทำให้ค่า n เท่ากับ 0 และกรณีที่พิกเซลนั้นถูกปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด ค่า ρ_{SAT} จะเท่ากับค่า ρ_{max} ทำให้ค่า n เป็น 1 ดังนั้นค่า n จึงเป็นดัชนีชี้บอกปริมาณเมฆในบรรยากาศได้

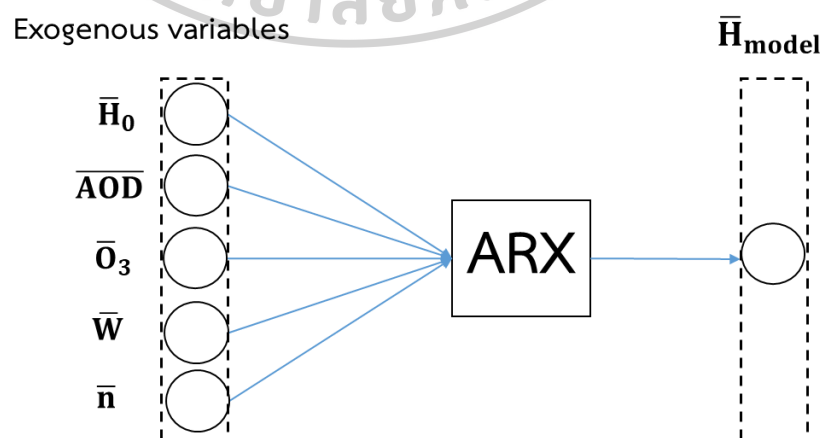
5) รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (\bar{H}_0)

สำหรับปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกสามารถคำนวณหาได้จากสมการดังต่อไปนี้ (Iqbal, 1983)

$$H_0 = \frac{24}{\pi} I_{SC} E_0 \left[\frac{\pi}{180} \omega_{ss} (\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \sin \omega_{ss}) \right] \quad (3.2)$$

เมื่อ	H_0	คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (จุดต่อตารางเมตรต่อวัน)
	I_{SC}	คือ ค่าคงที่ของรังสีอาทิตย์ (solar constant) (จุดต่อตารางเมตร)
	E_0	คือ ค่าแฟคเตอร์สำหรับแก้ผลจากการแปรค่าของระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ (-)
	δ	คือ มุมเดคลิเนชันของดวงอาทิตย์ (องศา)
	ϕ	คือ ละติจูดของตำแหน่งที่พิจารณา (องศา)
	ω_{ss}	คือ มุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตก (องศา)

เมื่อทำการจัดเตรียมอินพุตต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยทำการพัฒนาแบบจำลองเออาร์เอกซ์ โดยนำตัวแปรอินพุตในกรณีของการคำนวณความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของปี ค.ศ. 2018 ได้แก่ รังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของปี ค.ศ. 2017 ค่ารังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของปี ค.ศ. 2018 ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของปี ค.ศ. 2018 ค่าโอโซนรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของปี ค.ศ. 2018 ปริมาณไอน้ำรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของปี ค.ศ. 2018 และค่าดัชนีเมฆรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของปี ค.ศ. 2018 ใส่เข้าไปในแบบจำลองเออาร์เอกซ์ โดยตัวแปรเอาต์พุตมีเพียง 1 ตัวแปรคือ ความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (\bar{H}) ของปี ค.ศ. 2018 โดยตัวอย่างแผนภาพของตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตสำหรับแบบจำลองเออาร์เอกซ์ แสดงดังรูปที่ 31



รูปที่ 31 ตัวอย่างแผนภาพแสดงตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาต์พุตของแบบจำลองเออาร์เอกซ์

สำหรับแบบจำลองในกรณีของปี ค.ศ. 2019 2020 2021 และ 2022 ก็ดำเนินการในลักษณะที่คล้ายกันจนได้แบบจำลองเออาร์เอกซ์สำหรับคำนวณความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของทั้ง 4 สถานีวัดในภูมิภาคหลักของประเทศไทย จากนั้นผู้วิจัยได้รวมข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตจากข้อมูลดังกล่าวและคำนวณค่าความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (\bar{H}) ของปี ค.ศ. 2018-2022 โดยใช้แบบจำลองเออาร์เอกซ์ที่พัฒนาขึ้น

ถึงแม้ว่าผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาแบบจำลองคำนวณความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนโดยพิจารณาตัวแปรต่าง ๆ ทางบรรยากาศที่ส่งผลต่อความเข้มรังสีอาทิตย์แล้ว อย่างไรก็ตามผู้วิจัยจะทำการตรวจสอบความละเอียดถูกต้องของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยเปรียบเทียบค่าความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่คำนวณได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัด โดยแสดงความแตกต่างในรูปของค่ารากที่สองของความแตกต่างกำลังสองเฉลี่ย (root mean square difference, RMSD) และส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ย (mean bias difference, MBD) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{RMSD (\%)} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{H}_{i,\text{model}} - \bar{H}_{i,\text{measured}})^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{H}_{i,\text{measured}}} \times 100\% \quad (3.3)$$

$$\text{MBD (\%)} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{H}_{i,\text{model}} - \bar{H}_{i,\text{measured}})}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{H}_{i,\text{measured}}} \times 100\% \quad (3.4)$$

เมื่อ $\bar{H}_{i,\text{model}}$ คือ ค่าความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลอง (MJ/m^2)

$\bar{H}_{i,\text{measured}}$ คือ ค่าความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากการวัด (MJ/m^2)

n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด (-)

ผลจากการพัฒนาแบบจำลองเออาร์เอกซ์ ผู้วิจัยสามารถเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองเออาร์เอกซ์ กรณีของรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนสำหรับสถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี สถานีนครปฐม และสถานีสงขลา แสดงได้ดังตารางที่ 3-6 ตามลำดับ

ตารางที่ 3 สมการทางคณิตศาสตร์จากแบบจำลองเออาร์เอกซ์ของสถานีเชียงใหม่

ปี	สมการที่ใช้ทำนาย
2018	$\bar{H}(t) = 0.0295\bar{H}(t-1) + 0.0257\bar{H}(t-2) - 6.42\overline{AOD}(t) + 0.0031\bar{O}_3(t) - 1.116\bar{W}(t) - 16.18\bar{n}(t) + 0.785\bar{H}_0(t)$
2019	$\bar{H}(t) = 0.0723\bar{H}(t-1) - 2.929\overline{AOD}(t) + 0.0466\bar{O}_3(t) - 0.59\bar{W}(t) - 23.2\bar{n}(t) + 0.334\bar{H}_0(t)$
2020	$\bar{H}(t) = 0.0157\bar{H}(t-1) + 0.0135\bar{H}(t-2) - 2.64\overline{AOD}(t) + 0.0356\bar{O}_3(t) + 0.128\bar{W}(t) - 31.77\bar{n}(t) + 0.43\bar{H}_0(t)$
2021	$\bar{H}(t) = -0.156\bar{H}(t-1) + 0.0005\bar{H}(t-2) + 0.012\bar{H}(t-3) - 5.44\overline{AOD}(t) - 0.0254\bar{O}_3(t) + 0.745\bar{W}(t) - 31.65\bar{n}(t) + 0.949\bar{H}_0(t)$
2022	$\bar{H}(t) = 0.20197\bar{H}(t-1) - 10.34\overline{AOD}(t) - 0.0192\bar{O}_3(t) + 1.695\bar{W}(t) - 33.47\bar{n}(t) + 0.694\bar{H}_0(t)$

เมื่อ $\bar{H}(t)$ คือ ค่าความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของเดือนที่พิจารณา (MJ/m^2)

$\bar{H}_0(t)$ คือ ค่าความเข้มรังสีรวมนอกบรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของเดือนที่พิจารณา (MJ/m^2)

$\overline{AOD}(t)$ คือ ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของเดือนที่พิจารณา (-)

$\bar{O}_3(t)$ คือ ปริมาณโอโซนรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของเดือนที่พิจารณา (DU)

$\bar{W}(t)$ คือ ปริมาณไอน้ำรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของเดือนที่พิจารณา (cm)

$\bar{n}(t)$ คือ ดัชนีเมฆรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของเดือนที่พิจารณา (-)

t คือ เดือนปัจจุบันที่พิจารณา

t-1 คือ เวลาในอดีตย้อนหลังไป 1 เดือน

t-2 คือ เวลาในอดีตย้อนหลังไป 2 เดือน

t-3 คือ เวลาในอดีตย้อนหลังไป 3 เดือน

ตารางที่ 4 สมการทางคณิตศาสตร์จากแบบจำลองเออาร์เอ็กซ์ของสถานีอุบลราชธานี

ปี	สมการที่ใช้ทำนาย
2018	$\bar{H}(t) = -0.0803\bar{H}(t-1) - 0.1299\bar{H}(t-2) - 5.21\overline{AOD}(t) + 0.0486\bar{O}_3(t) - 2.04\bar{W}(t) - 17.48\bar{n}(t) + 0.563\bar{H}_0(t)$
2019	$\bar{H}(t) = 0.0596\bar{H}(t-1) - 2.768\overline{AOD}(t) + 0.0835\bar{O}_3(t) - 1.20\bar{W}(t) - 8.05\bar{n}(t) + 0.095\bar{H}_0(t)$
2020	$\bar{H}(t) = -0.0356\bar{H}(t-1) + 0.0319\bar{H}(t-2) - 1.225\overline{AOD}(t) - 0.007\bar{O}_3(t) + 0.406\bar{W}(t) - 35.74\bar{n}(t) + 0.694\bar{H}_0(t)$
2021	$\bar{H}(t) = -0.0305\bar{H}(t-1) - 1.398\overline{AOD}(t) + 0.002\bar{O}_3(t) - 0.199\bar{W}(t) - 20.23\bar{n}(t) + 0.569\bar{H}_0(t)$
2022	$\bar{H}(t) = 0.1016\bar{H}(t-1) - 6.98\overline{AOD}(t) + 0.0108\bar{O}_3(t) + 0.3235\bar{W}(t) - 29.29\bar{n}(t) + 0.565\bar{H}_0(t)$

- เมื่อ $\bar{H}(t)$ คือ ค่าความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของเดือนที่พิจารณา (MJ/m^2)
- $\bar{H}_0(t)$ คือ ค่าความเข้มรังสีรวมนอกบรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของเดือนที่พิจารณา (MJ/m^2)
- $\overline{AOD}(t)$ คือ ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของเดือนที่พิจารณา (-)
- $\bar{O}_3(t)$ คือ ปริมาณโอโซนรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของเดือนที่พิจารณา (DU)
- $\bar{W}(t)$ คือ ปริมาณไอน้ำรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของเดือนที่พิจารณา (cm)
- $\bar{n}(t)$ คือ ดัชนีเมฆรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของเดือนที่พิจารณา (-)
- t คือ เดือนปัจจุบันที่พิจารณา
- $t-1$ คือ เวลาในอดีตย้อนหลังไป 1 เดือน
- $t-2$ คือ เวลาในอดีตย้อนหลังไป 2 เดือน
- $t-3$ คือ เวลาในอดีตย้อนหลังไป 3 เดือน

ตารางที่ 5 สมการทางคณิตศาสตร์จากแบบจำลองเออาร์เอกซ์ของสถานีนครปฐม

ปี	สมการที่ใช้ทำนาย
2018	$\bar{H}(t) = 0.0601\bar{H}(t-1) - 2.591\overline{AOD}(t) + 0.0283\bar{O}_3(t) - 0.791\bar{W}(t) - 9.676\bar{n}(t) + 0.47\bar{H}_0(t)$
2019	$\bar{H}(t) = 0.0309\bar{H}(t-1) - 0.0487\bar{H}(t-2) - 0.0016\bar{H}(t-3) - 2.628\overline{AOD}(t) + 0.0868\bar{O}_3(t) + 0.366\bar{W}(t) - 19.54\bar{n}(t) - 0.084\bar{H}_0(t)$
2020	$\bar{H}(t) = 0.0205\bar{H}(t-1) - 0.0662\bar{H}(t-2) - 0.9265\overline{AOD}(t) + 0.021\bar{O}_3(t) - 0.294\bar{W}(t) - 24.39\bar{n}(t) + 0.486\bar{H}_0(t)$
2021	$\bar{H}(t) = 0.0675\bar{H}(t-1) + 1.52\overline{AOD}(t) + 0.0096\bar{O}_3(t) - 0.3091\bar{W}(t) - 26.32\bar{n}(t) + 0.52\bar{H}_0(t)$
2022	$\bar{H}(t) = 0.2104\bar{H}(t-1) - 0.0021\bar{H}(t-2) + 2.927\overline{AOD}(t) - 0.017\bar{O}_3(t) - 1.086\bar{W}(t) - 11.87\bar{n}(t) + 0.825\bar{H}_0(t)$

เมื่อ $\bar{H}(t)$ คือ ค่าความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของเดือนที่พิจารณา (MJ/m^2)

$\bar{H}_0(t)$ คือ ค่าความเข้มรังสีรวมนอกบรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของเดือนที่พิจารณา (MJ/m^2)

$\overline{AOD}(t)$ คือ ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของเดือนที่พิจารณา (-)

$\bar{O}_3(t)$ คือ ปริมาณโอโซนรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของเดือนที่พิจารณา (DU)

$\bar{W}(t)$ คือ ปริมาณไอน้ำรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของเดือนที่พิจารณา (cm)

$\bar{n}(t)$ คือ ดัชนีเมฆรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของเดือนที่พิจารณา (-)

t คือ เดือนปัจจุบันที่พิจารณา

t-1 คือ เวลาในอดีตย้อนหลังไป 1 เดือน

t-2 คือ เวลาในอดีตย้อนหลังไป 2 เดือน

t-3 คือ เวลาในอดีตย้อนหลังไป 3 เดือน

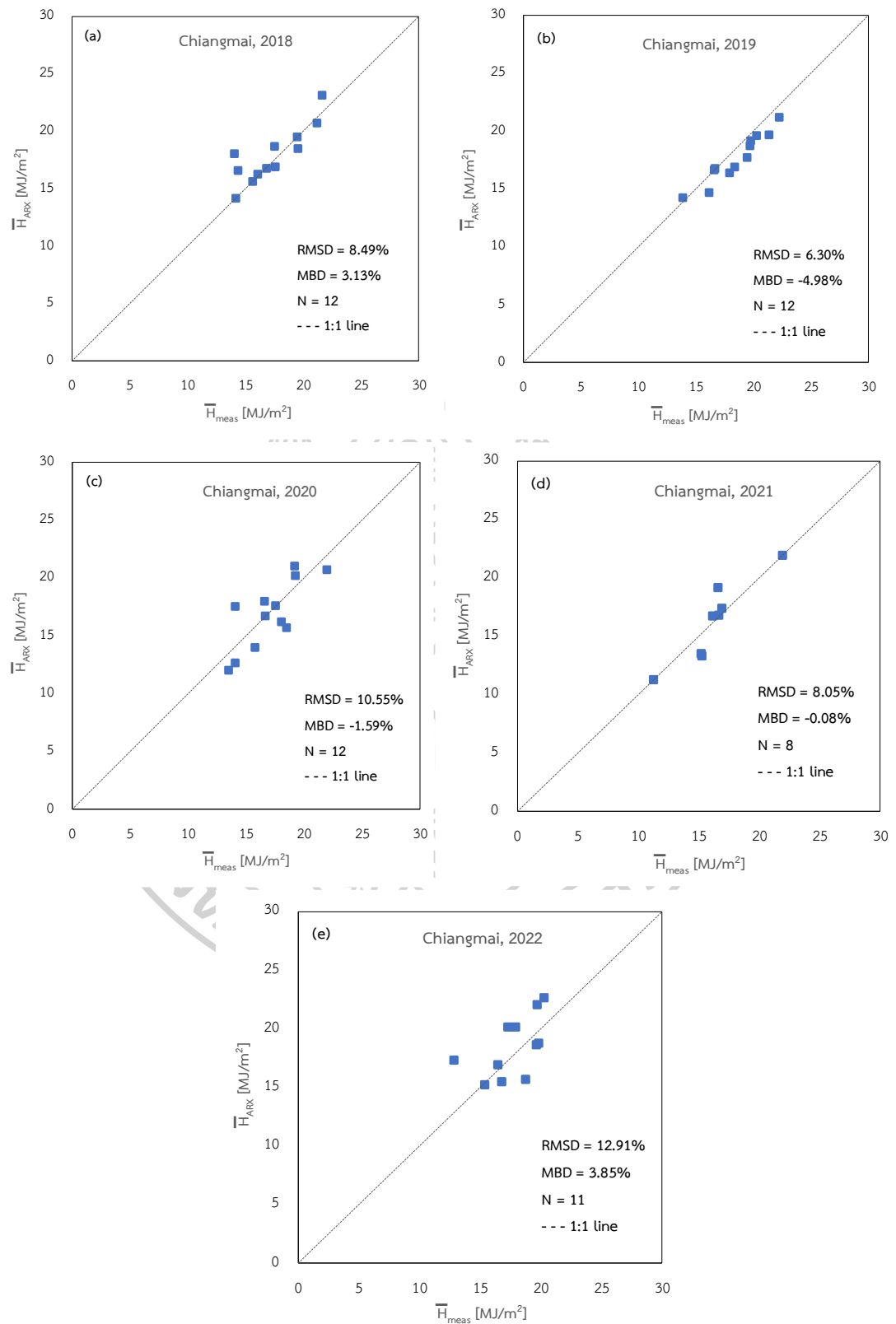
ตารางที่ 6 สมการทางคณิตศาสตร์จากแบบจำลองเออาร์เอกซ์ของสถานีสงขลา

ปี	สมการที่ใช้ทำนาย
2018	$\bar{H}(t) = 0.0634\bar{H}(t-1) + 0.1516\bar{H}(t-2) - 0.0331\bar{H}(t-3) + 1.319\overline{AOD}(t) - 0.025\bar{O}_3(t) - 1.367\bar{W}(t) + 1.041\bar{H}_0(t) - 35.66\bar{n}(t)$
2019	$\bar{H}(t) = 0.2723\bar{H}(t-1) - 0.2175\bar{H}(t-2) - 1.257\overline{AOD}(t) - 0.0605\bar{O}_3(t) + 1.963\bar{W}(t) + 0.772\bar{H}_0(t) - 25.39\bar{n}(t)$
2020	$\bar{H}(t) = 0.0335\bar{H}(t-1) + 0.0559\bar{H}(t-2) - 1.3\overline{AOD}(t) + 0.0358\bar{O}_3(t) - 0.559\bar{W}(t) + 0.536\bar{H}_0(t) - 38.77\bar{n}(t)$
2021	$\bar{H}(t) = 0.0314\bar{H}(t-1) - 0.009\bar{H}(t-2) + 0.0275\bar{H}(t-3) - 3.061\overline{AOD}(t) + 0.0224\bar{O}_3(t) + 0.346\bar{W}(t) + 0.522\bar{H}_0(t) - 31.25\bar{n}(t)$
2022	$\bar{H}(t) = 0.0098\bar{H}(t-1) - 2.41\overline{AOD}(t) - 0.0725\bar{O}_3(t) - 0.0412\bar{W}(t) + 1.163\bar{H}_0(t) - 22.4\bar{n}(t)$

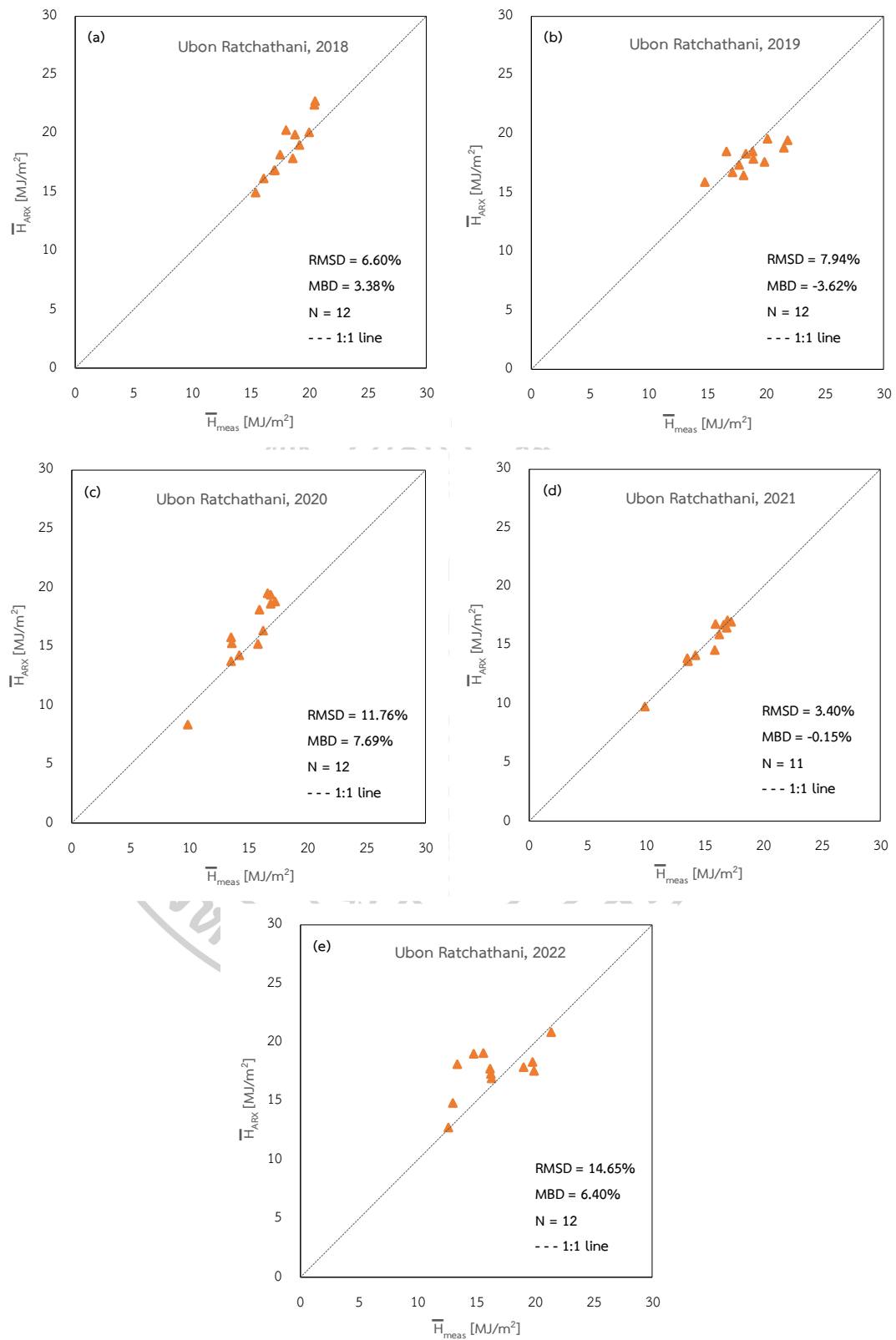
- เมื่อ $\bar{H}(t)$ คือ ค่าความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของเดือนที่พิจารณา (MJ/m^2)
- $\bar{H}_0(t)$ คือ ค่าความเข้มรังสีรวมนอกบรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของเดือนที่พิจารณา (MJ/m^2)
- $\overline{AOD}(t)$ คือ ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของเดือนที่พิจารณา (-)
- $\bar{O}_3(t)$ คือ ปริมาณโอโซนรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของเดือนที่พิจารณา (DU)
- $\bar{W}(t)$ คือ ปริมาณไอน้ำรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของเดือนที่พิจารณา (cm)
- $\bar{n}(t)$ คือ ดัชนีเมฆรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของเดือนที่พิจารณา (-)
- t คือ เดือนปัจจุบันที่พิจารณา
- t-1 คือ เวลาในอดีตย้อนหลังไป 1 เดือน
- t-2 คือ เวลาในอดีตย้อนหลังไป 2 เดือน
- t-3 คือ เวลาในอดีตย้อนหลังไป 3 เดือน

ผู้วิจัยทำการเปรียบเทียบค่าความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองเออาร์เอกซ์และจากการวัดที่สถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี สถานีนครปฐม และสถานีสงขลา ในระหว่างปี ค.ศ. 2018-2022 ผลการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 32-35 ตามลำดับ โดยความแตกต่างในรูป RMSD และ MBD ของค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองเออาร์เอกซ์และที่ได้จากการวัดของ 4 สถานี สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 7

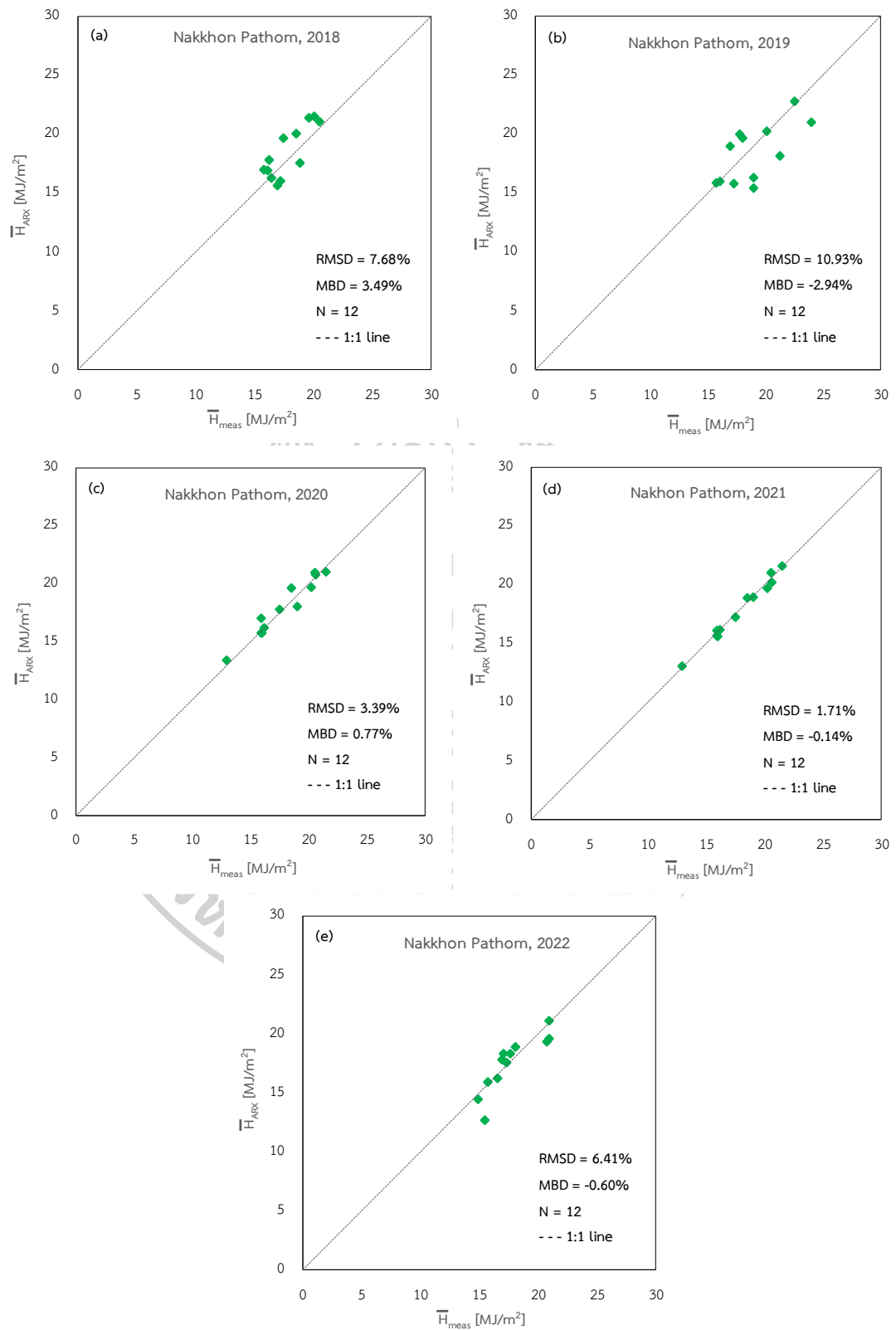




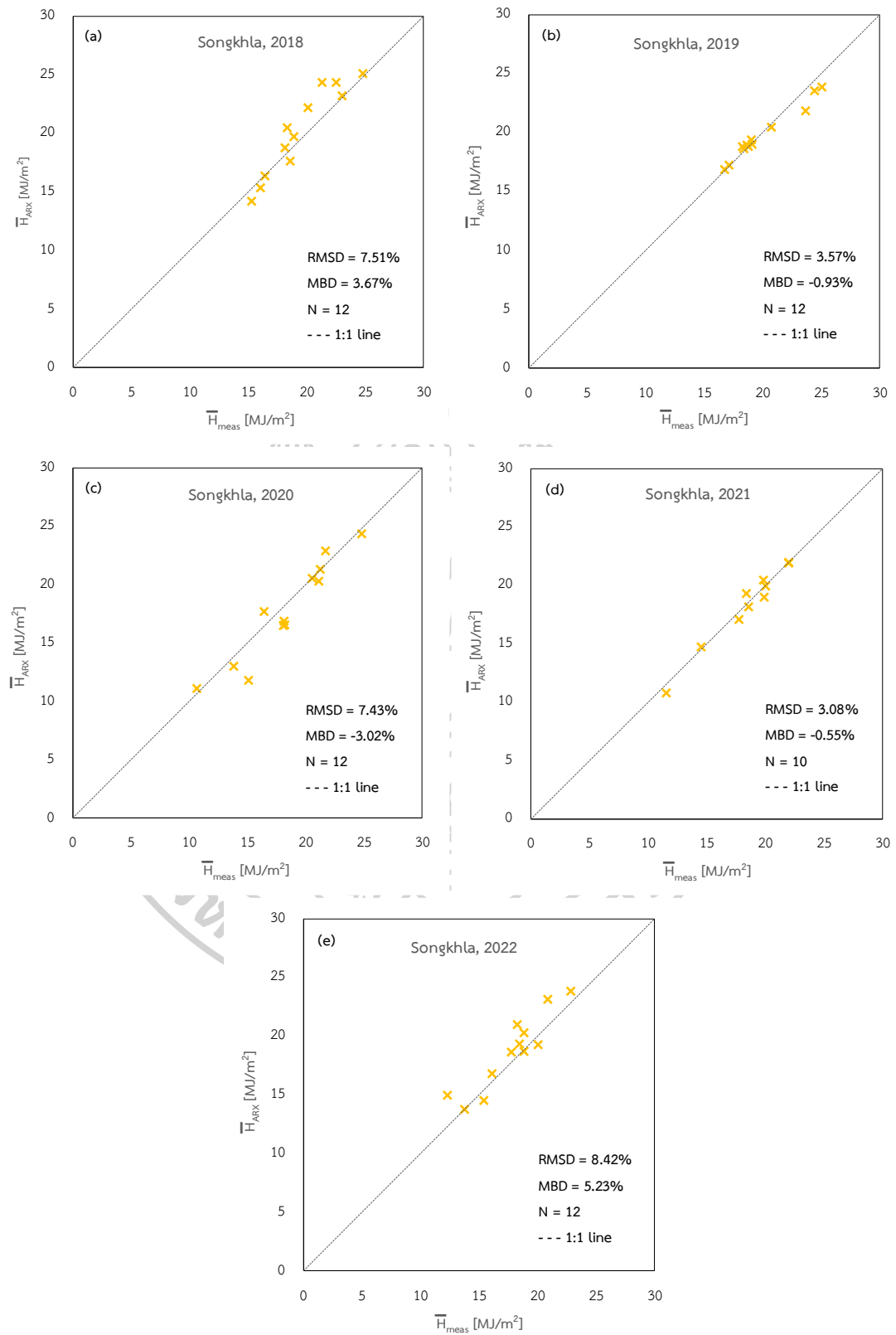
รูปที่ 32 การเปรียบเทียบความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองเออาร์เอ็กซ์และจากการวัดที่สถานีเชียงใหม่ของปี ค.ศ. (a) 2018 (b) 2019 (c) 2020 (d) 2021 (e) 2022



รูปที่ 33 การเปรียบเทียบรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองเออาร์เอ็กซ์และจากการวัดที่สถานีอุบลราชธานีของปี ค.ศ. (a) 2018 (b) 2019 (c) 2020 (d) 2021 (e) 2022



รูปที่ 34 การเปรียบเทียบความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองเออาร์เอกซ์และจากการวัดที่สถานีนครปฐมของปี ค.ศ. (a) 2018 (b) 2019 (c) 2020 (d) 2021 (e) 2022



รูปที่ 35 การเปรียบเทียบความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองเออาร์เอกซ์และจากการวัดที่สถานีสงขลาของปี ค.ศ. (a) 2018 (b) 2019 (c) 2020 (d) 2021 (e) 2022

ตารางที่ 7 ความแตกต่างในรูป RMSD และ MBD ของค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองเออาร์เอกซ์และจากการวัดภาคพื้นดินที่ 4 สถานีในภูมิภาคหลักของประเทศไทย

สถานี	ปี	RMSD (%)	MBD (%)
เชียงใหม่	2018	8.49	3.13
	2019	6.30	-4.98
	2020	10.55	-1.59
	2021	8.05	-0.08
	2022	12.91	3.85
อุบลราชธานี	2018	6.60	3.38
	2019	7.94	-3.62
	2020	11.76	7.69
	2021	3.40	-0.15
	2022	14.65	6.40
นครปฐม	2018	7.68	3.49
	2019	10.93	-2.94
	2020	3.39	0.77
	2021	1.71	-0.14
	2022	6.41	-0.60
สงขลา	2018	7.51	3.67
	2019	3.57	-0.93
	2020	7.43	-3.02
	2021	3.08	-0.55
	2022	8.42	5.23

จากผลการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองเออาร์เอกซ์ (ตารางที่ 7) พบว่า ค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองเออาร์เอกซ์กับค่าที่ได้จากการวัดมีความสอดคล้องค่อนข้างดี โดยมีค่า RMSD อยู่ในช่วง 1.71 ถึง 14.65% และ MBD อยู่ในช่วง -4.98 ถึง 7.69% แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองเออาร์เอกซ์สามารถนำไปใช้ในการประมาณค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนในพื้นที่ที่มี

ความแตกต่างทางด้านที่ตั้งและลักษณะภูมิอากาศได้ มีความเหมาะสมในพื้นที่ที่ต้องการประมาณ
ค่ารังสีอาทิตย์แต่มีจำนวนชุดข้อมูลอย่างจำกัด

นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์รายวันเฉลี่ยต่อ
เดือนจากเครือข่ายสถานีวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ 38 สถานี ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและ
อนุรักษ์พลังงาน โดยข้อมูลและผลการวิเคราะห์แสดงไว้ในภาคผนวก ข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์จาก
สถานีต่าง ๆ เหล่านี้สามารถนำไปใช้ในการประเมินศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ และประยุกต์ใช้งาน
ด้านพลังงานทดแทนต่อไป (ตามผลและวิธีการในภาคผนวก)



บทที่ 4

สรุป

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูลรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีวัด 4 แห่งในภูมิภาคหลักของประเทศไทย ได้แก่ ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่ ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง จังหวัดอุบลราชธานี มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม และศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา พบว่า รังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนในแต่ละพื้นที่ขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิอากาศ ตำแหน่งทางภูมิศาสตร์และที่ตั้ง ช่วงเวลาในรอบวัน ฤดูกาลในรอบปี และตัวแปรทางบรรยากาศ

จากการวิเคราะห์ที่ลักษณะทางสถิติรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีวัด 4 แห่งในภูมิภาคหลักของประเทศไทย ในช่วงเวลาดังตั้ง ปี ค.ศ. 1995- 2022 พบว่า การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนมีลักษณะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตั้งแต่เดือนมกราคมและมีค่าสูงสุดเดือนเมษายนหรือเดือนพฤษภาคม จากนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและค่อย ๆ ลดลงจนถึงช่วงปลายปี เมื่อเฉลี่ยค่าความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนทั้ง 4 สถานี พบว่าประเทศไทยมีศักยภาพด้านพลังงานรังสีรวมค่อนข้างสูง โดยค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายวันเฉลี่ยระยะยาวของสถานีเชียงใหม่มีค่าเท่ากับ 17.36 เมกะจูลต่อตารางเมตร สถานีอุบลราชธานีมีค่าเท่ากับ 18.03 เมกะจูลต่อตารางเมตร สถานีนครปฐมมีค่าเท่ากับ 18.31 เมกะจูลต่อตารางเมตร และสถานีสงขลามีค่าเท่ากับ 19.24 เมกะจูลต่อตารางเมตร โดยพิจารณาทั้ง 4 สถานี พบว่า มีค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนเท่ากับ 18.24 เมกะจูลต่อตารางเมตร

จากนั้นผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ 4 สถานีในภูมิภาคหลักของประเทศ โดยใช้ข้อมูลรังสีรวมจากเครื่องวัดภาคพื้นดิน หรือเครื่องไพราโนมิเตอร์ ตัวแปรทางบรรยากาศต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อความเข้มรังสีอาทิตย์ ได้แก่ ค่าความลึกเชิงแสงของฟูล์นล่อง ปริมาณไอน้ำ ปริมาณโอโซน ค่าดัชนีเมฆ และรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก ระยะเวลา 6 ปี (ปี ค.ศ. 2017-2022) เพื่อนำมาสร้างและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยผู้วิจัยใช้แบบจำลองเออาร์เอกซ์ในการสร้างแบบจำลองและเขียนในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ของแต่ละสถานีในภูมิภาคหลักของประเทศไทย และทำการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลอง เมื่อเปรียบเทียบค่าความแตกต่างทางสถิติพบว่า ค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองเออาร์เอกซ์และค่าที่ได้จากการวัดภาคพื้นดินมีความสอดคล้องกันดี โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนในรูป RMSD อยู่ในช่วง 1.71% ถึง 14.65% และ MBD อยู่ในช่วง -4.98% ถึง 7.69% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองเออาร์เอกซ์มีความเหมาะสมที่จะนำมาพัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้ในการประมาณค่าความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน

สำหรับพื้นที่ที่มีชุดข้อมูลอย่างจำกัดและสามารถนำไปใช้งานในพื้นที่อื่น ๆ ที่มีความแตกต่างทางตำแหน่งที่ตั้งและลักษณะภูมิอากาศในแต่ละภูมิภาคของประเทศไทย เพื่อการได้มาของข้อมูลรังสีรวมในการนำไปประยุกต์ใช้ด้านพลังงานอื่น ๆ ต่อไป

ข้อเสนอแนะ เนื่องจากสถานีวัดรังสีรวมทั้งประเทศมี 42 แห่ง สำหรับประเทศไทยที่มี 77 จังหวัด และพื้นที่ประมาณ 513,120 ตารางกิโลเมตร ผู้วิจัยขอเสนอแนะให้เพิ่มจำนวนสถานีวัด ซึ่งควรจะมีทุกจังหวัด เพื่อเก็บข้อมูลที่นำไปใช้ในงานที่เกี่ยวข้องต่อไป



ภาคผนวก ก

การวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติของความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของเครือข่ายสถานีวัด
ความเข้มรังสีอาทิตย์ 38 สถานี

เนื่องจากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน เป็นหน่วยงานหลักในการวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ของประเทศ ร่วมกับห้องปฏิบัติห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้เริ่มจัดตั้งสถานีวัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ชนิดสมรรถนะสูงมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 2001 โดยใช้ห้ววัดรังสีรวมที่ผลิตโดยบริษัทคิปป์แอนด์โซนเนซ (Kipp & Zonen) รุ่น CM11 และบันทึกข้อมูลโดยเครื่องบันทึกข้อมูลอัตโนมัติ (data logger) โดยในปี ค.ศ. 2001 ทำการติดตั้งสถานีวัดรังสีดวงอาทิตย์ชนิดรังสีรวม จำนวน 25 สถานี จนถึงปัจจุบันมีสถานีรวมทั้งสิ้น 38 สถานี ซึ่งเดิมควรที่จะนำข้อมูลเหล่านี้มาวิเคราะห์ เนื่องจากประเทศไทยแบ่งเขตตามภูมิอากาศทั้งหมด ได้เป็น 6 เขต ตามกรมอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันออก ภาคกลาง ภาคตะวันออกใต้ฝั่งตะวันออก และภาคใต้ฝั่งตะวันตก แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สถานีวัดความเข้มรังสีรวมจำนวน 38 สถานี แบ่งตามกรมอุตุนิยมวิทยาทั้งหมด 6 เขต

ลำดับ	สถานี	ละติจูด (°N)	ลองจิจูด (°E)
ภาคเหนือ			
1	เชียงราย	20.08	99.88
2	แม่ฮ่องสอน	19.48	97.95
3	น่าน	18.72	100.75
4	เชียงใหม่ (สันทราย)	18.83	98.88
5	เชียงใหม่ (เกษตรหลวงอินทนนท์)	18.49	98.67
6	แม่ฮ่องสอน (แม่สะเรียง)	18.18	98.67
7	ลำปาง	18.28	99.51
8	แพร่	18.06	100.06
9	ตาก (ดอยมูเซอ)	16.80	98.90
10	พิษณุโลก	16.78	100.27
11	เพชรบูรณ์	16.43	101.15

ลำดับ	สถานี	ละติจูด (°N)	ลองจิจูด (°E)
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ			
12	หนองคาย	17.87	102.72
13	เลย	17.40	101.00
14	นครพนม	16.97	104.73
15	ขอนแก่น	16.19	102.80
16	อุบลราชธานี (สว่างวีระวงศ์)	15.28	105.14
17	ร้อยเอ็ด	16.07	103.00
18	นครราชสีมา	14.97	102.08
19	สุรินทร์	14.88	103.50
ภาคตะวันออก			
20	ปราจีนบุรี	13.97	101.70
21	ตราด	11.77	102.88
22	ชลบุรี	13.37	100.98
23	สระแก้ว (อรัญประเทศ)	13.82	102.34
ภาคกลาง			
24	นครสวรรค์	15.67	100.12
25	ลพบุรี	14.83	100.62
26	กรุงเทพมหานคร	13.75	100.52
27	กาญจนบุรี (อุดุนิยมวิทยา)	14.02	99.53
28	กาญจนบุรี (ทองผาภูมิ)	14.73	98.63
ภาคใต้ฝั่งตะวันออก			
29	ประจวบคีรีขันธ์ (เมือง)	11.83	99.88
30	ประจวบคีรีขันธ์ (หนองพลับ)	12.59	99.73
31	ชุมพร	10.40	99.18
32	สุราษฎร์ธานี (พุนพิน)	9.13	99.15
33	สุราษฎร์ธานี (เกาะสมุย)	9.47	100.05
34	สงขลา	6.92	100.43
35	นราธิวาส	6.40	101.82

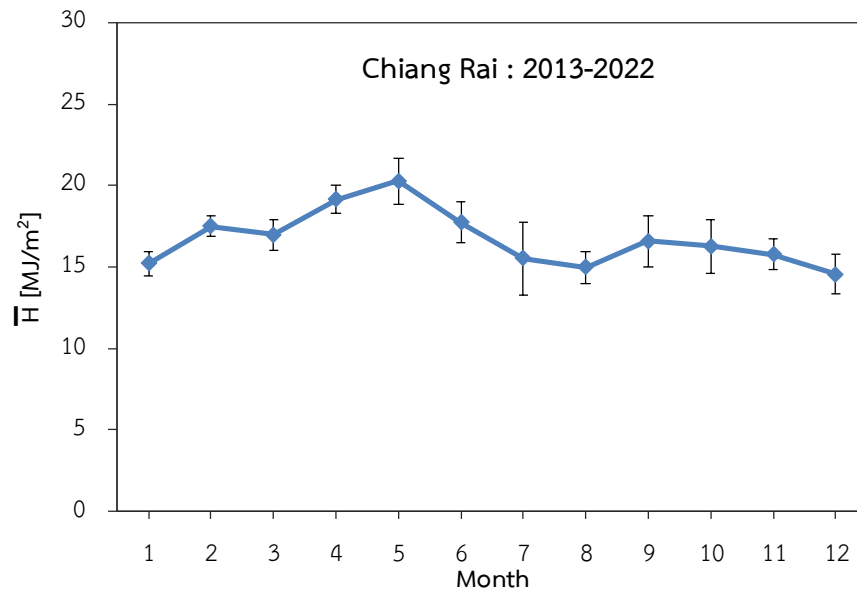
ลำดับ	สถานี	ละติจูด (°N)	ลองจิจูด (°E)
ภาคใต้ฝั่งตะวันตก			
36	ระนอง	9.98	98.62
37	ภูเก็ต	8.13	98.30
38	ตรัง	7.52	99.62

วิธีการ ผลการวิเคราะห์ และการอภิปรายผล

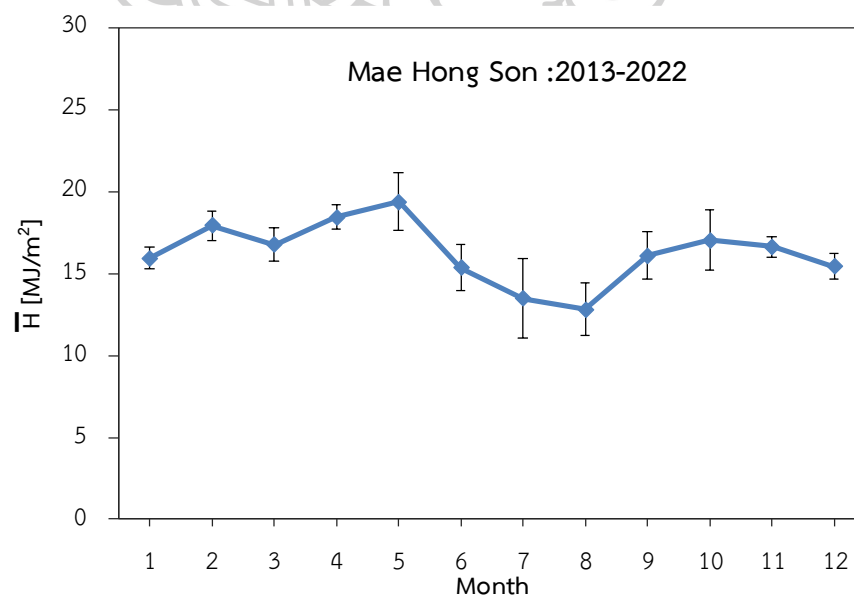
ผู้วิจัยได้นำข้อมูลความเข้มรังสีรวมที่ผ่านกระบวนการแปลงแล้วรายวินาทีมาเฉลี่ยเป็นรายนาที่และรายชั่วโมง ตามลำดับ ในหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2) จากนั้นรวมค่าเฉลี่ยรายชั่วโมงทั้งหมดตลอดทั้งวันในแต่ละวันเพื่อแปลงให้เป็นรังสีรวมเฉลี่ยรายวันในหน่วยเมกะจูลต่อตารางเมตร (MJ/m^2) แล้วนำค่ารังสีรายวันมาเฉลี่ยเป็นข้อมูลรายวันเฉลี่ยต่อเดือนและนำมาเขียนกราฟการแปรค่าระหว่างค่าความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนกับเวลาในแต่ละสถานี (ช่วงปี ค.ศ. 2013 ถึง 2022) ของ 10 ปี โดยผลที่ได้แสดงในรูปที่ 1-38

จากการวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของ 38 สถานีในประเทศไทยในช่วงเวลาตั้งแต่ ปี ค.ศ. 2013- 2022 (รูปที่ 1-38) พบว่า การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนสำหรับภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันออก และภาคกลาง มีลักษณะการแปรค่าที่คล้ายกัน กล่าวคือค่าความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนมีการแปรค่าค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตั้งแต่เดือนมกราคมและมีค่าสูงสุดเดือนเมษายนหรือเดือนพฤษภาคม จากนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและค่อย ๆ ลดลงจนถึงเดือนตุลาคมและมีค่าต่ำสุดในเดือนธันวาคม สำหรับภาคใต้จะมีลักษณะการแปรค่าแตกต่างจากภาคอื่น ๆ โดยมีค่าความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนค่อนข้างสูง เนื่องจากภาคใต้มีตำแหน่งละติจูดที่ต่ำ อากาศร้อนและมีฝนตกเกือบตลอดทั้งปี โดยภาคใต้ฝั่งตะวันออกในช่วงเดือนตุลาคมถึงเดือนกุมภาพันธ์จะมีค่าความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนค่อนข้างต่ำกว่าเดือนอื่น ๆ เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ทำให้ภาคใต้มีฝนตกชุกโดยเฉพาะภาคใต้ฝั่งตะวันออก ส่วนภาคใต้ฝั่งตะวันตกจะได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ พัดปกคลุมในช่วงเดือนพฤษภาคมจนถึงเดือนตุลาคม ทำให้มีเมฆมากและฝนตกชุก โดยเฉพาะบริเวณชายฝั่งทะเล เมื่อเฉลี่ยค่าความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนทั้ง 38 สถานี พบว่าประเทศไทยมีศักยภาพด้านพลังงานรังสีรวมค่อนข้างสูง หรือประมาณ 18 เมกะจูลต่อตารางเมตร

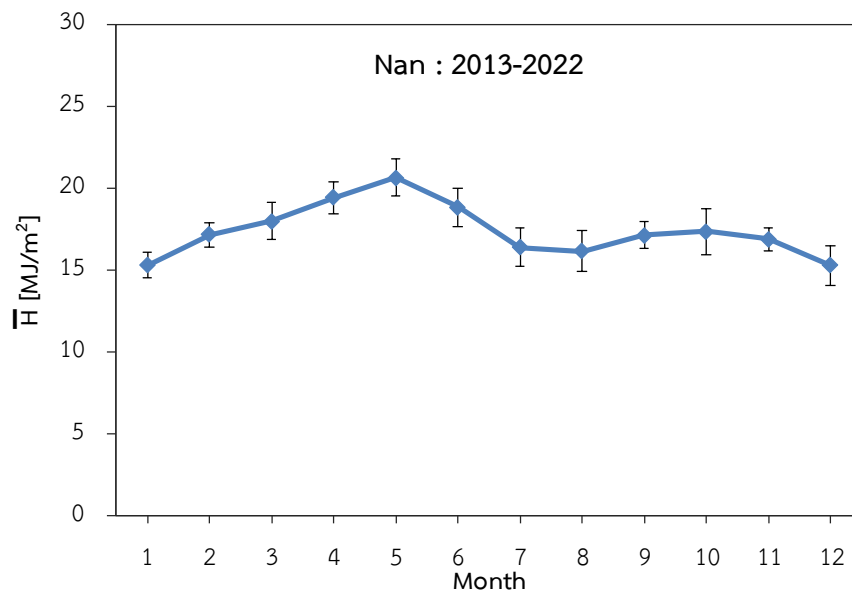
ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติของความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของเครือข่าย
สถานีวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ 38 สถานีของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน



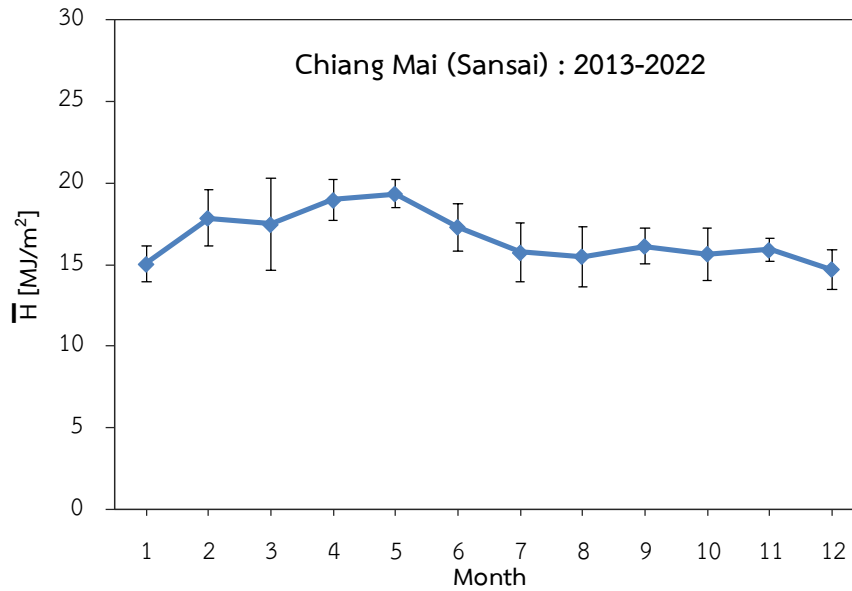
รูปที่ 1 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีเชียงใหม่ (ภาคเหนือ)
(เส้นแนวตั้งแสดงการแปรค่า \bar{H} จากค่าเฉลี่ย $\pm 1SD$ เมื่อ SD คือค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน)



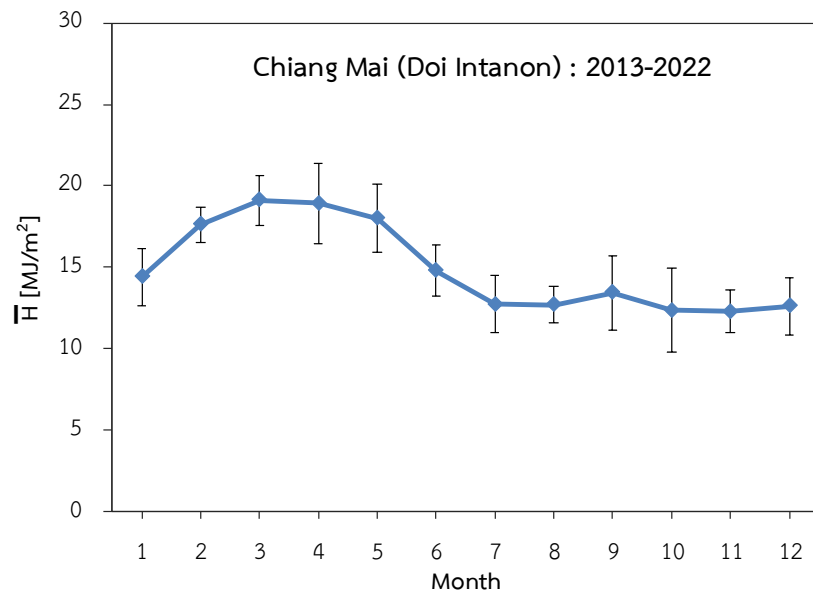
รูปที่ 2 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีแม่ฮ่องสอน (ภาคเหนือ)



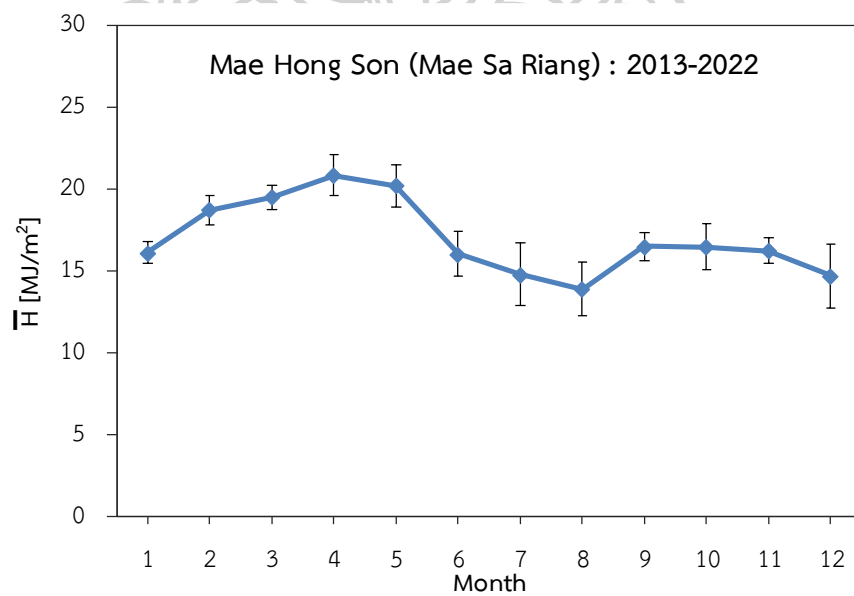
รูปที่ 3 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีน่าน (ภาคเหนือ)



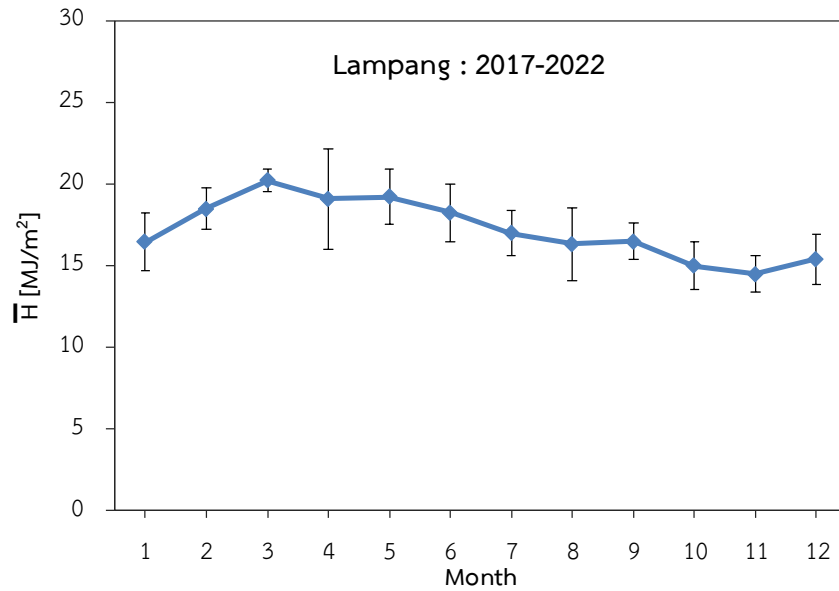
รูปที่ 4 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีเชียงใหม่ (สันทราย) (ภาคเหนือ)



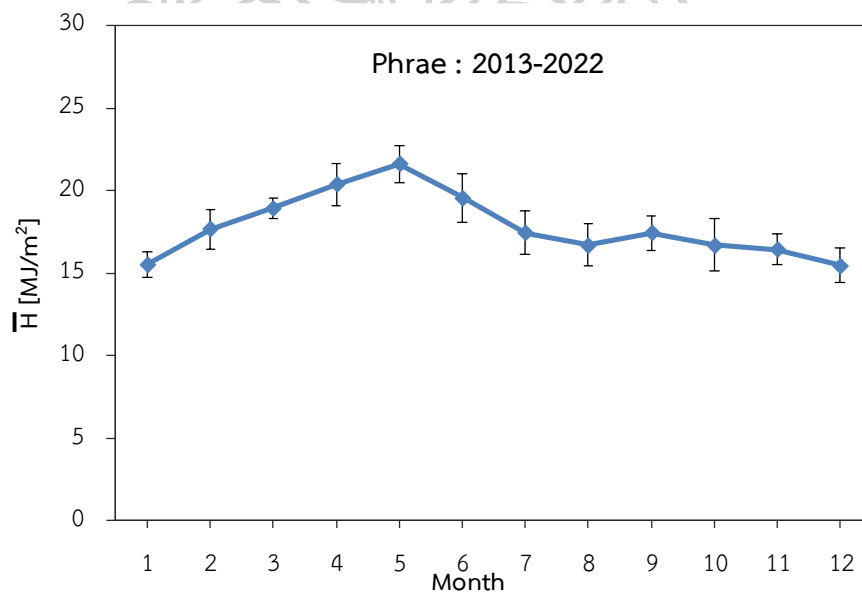
รูปที่ 5 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีเชียงใหม่ (เกษตรหลวงอินทนนท์) (ภาคเหนือ)



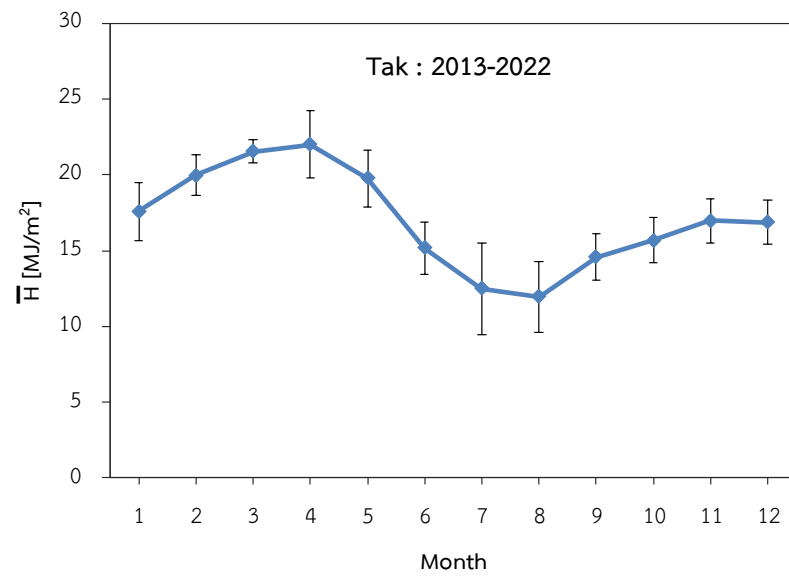
รูปที่ 6 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีแม่ฮ่องสอน (แม่สะเรียง) (ภาคเหนือ)



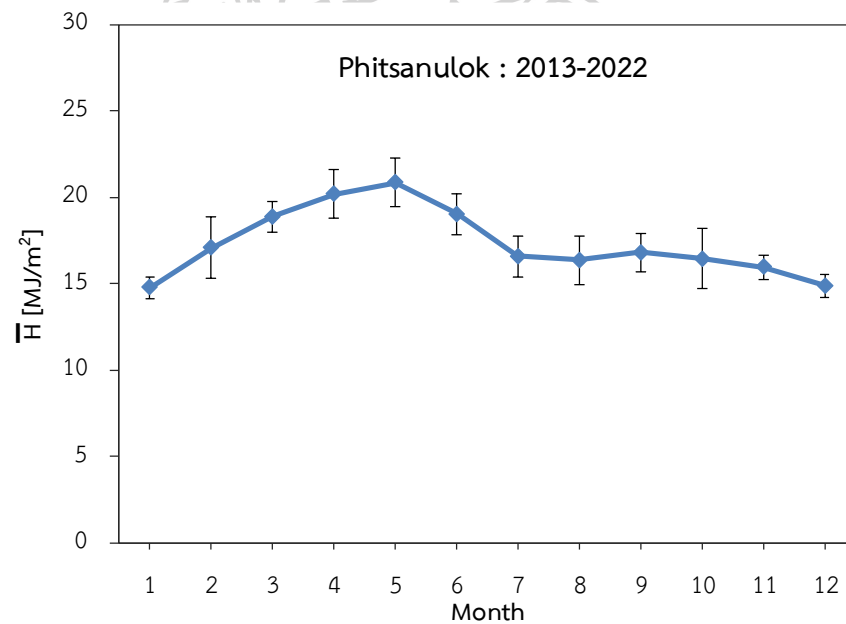
รูปที่ 7 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีลำปาง (ภาคเหนือ)



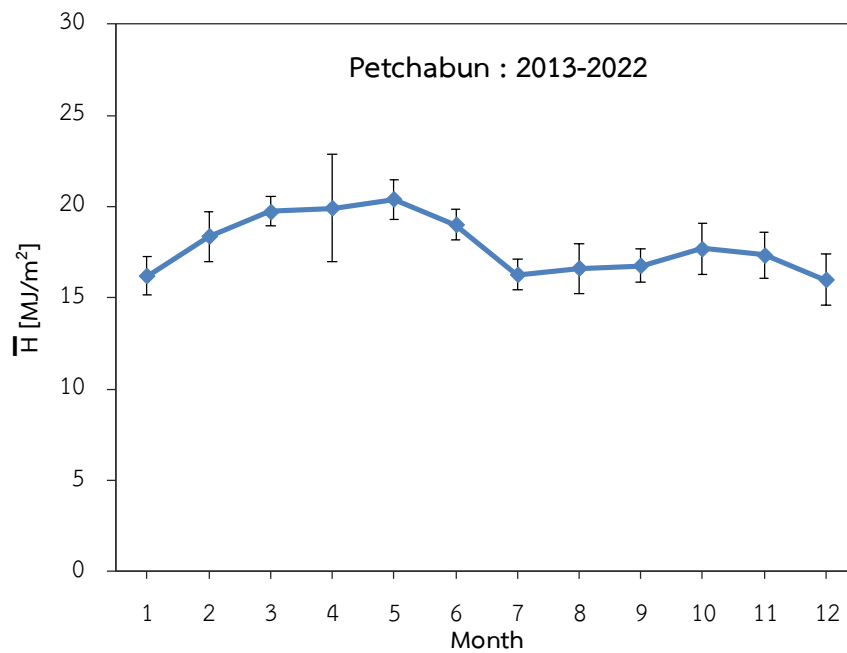
รูปที่ 8 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีแพร่ (ภาคเหนือ)



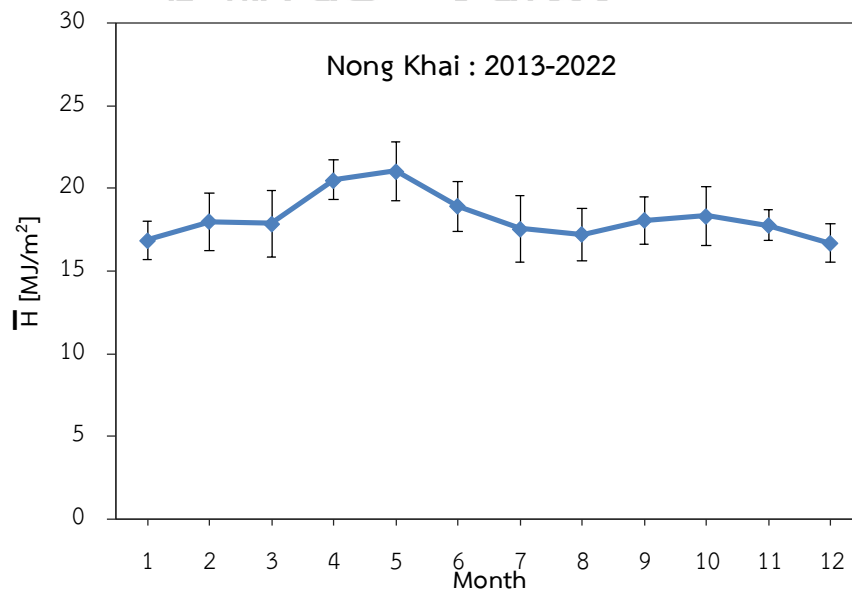
รูปที่ 9 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีตาก (ดอยมูเซอ) (ภาคเหนือ)



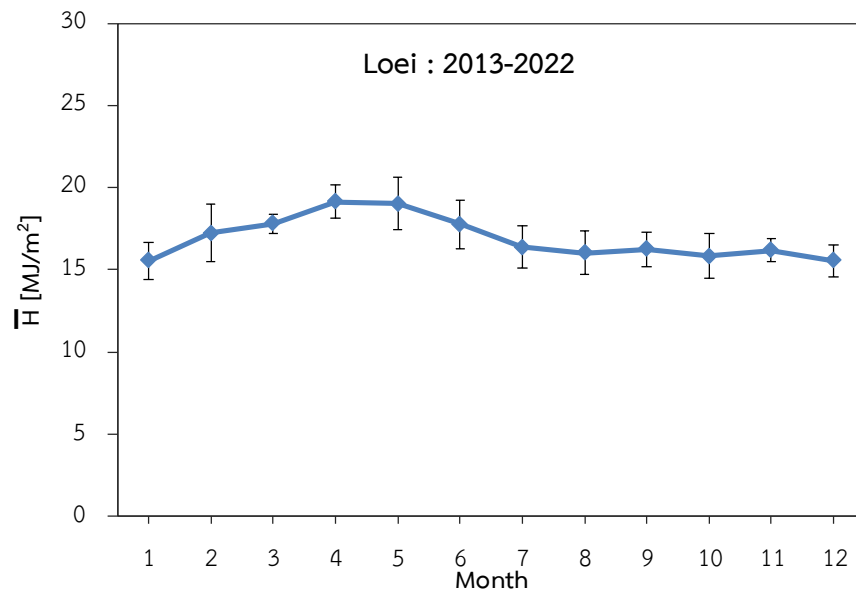
รูปที่ 10 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีพิษณุโลก (ภาคเหนือ)



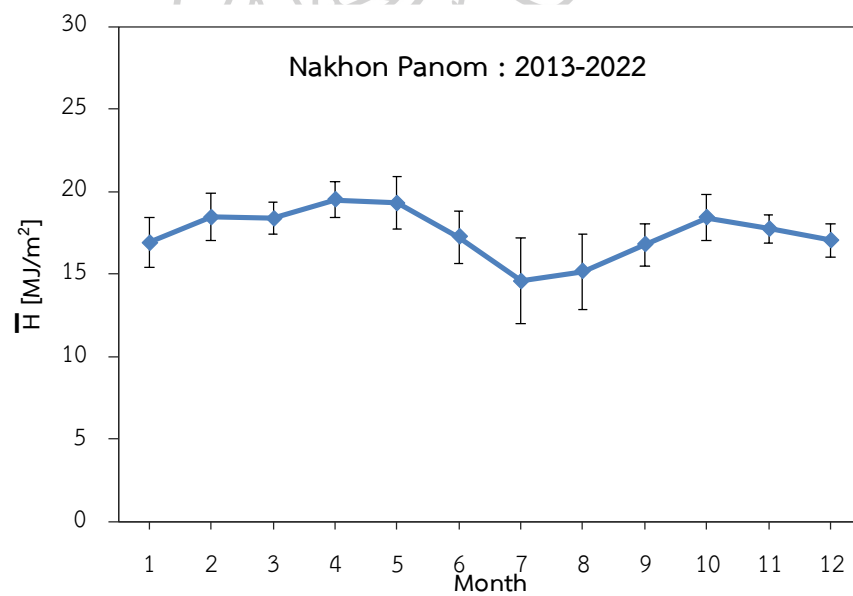
รูปที่ 11 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีเพชรบูรณ์ (ภาคเหนือ)



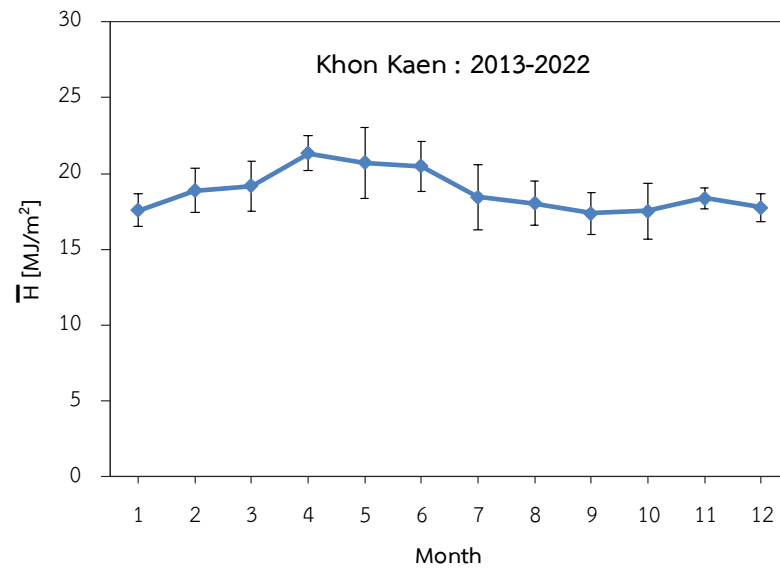
รูปที่ 12 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีหนองคาย (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ)



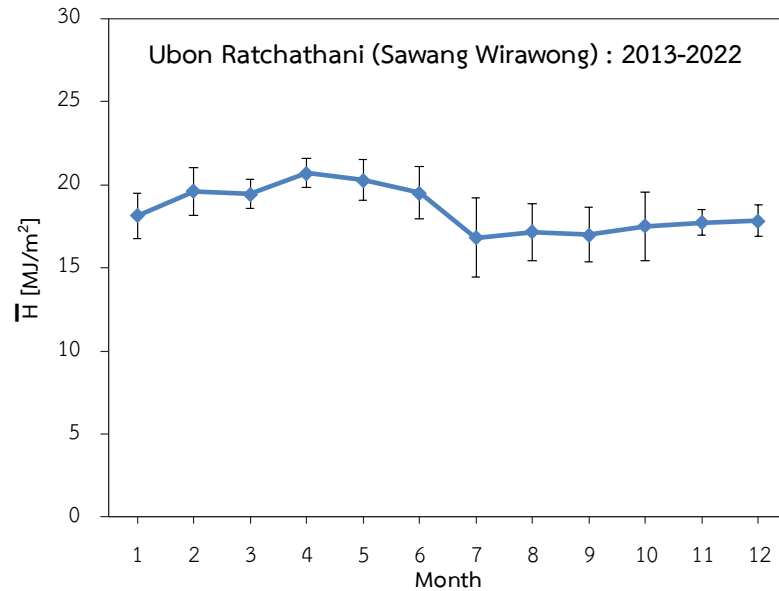
รูปที่ 13 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีเลย (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ)



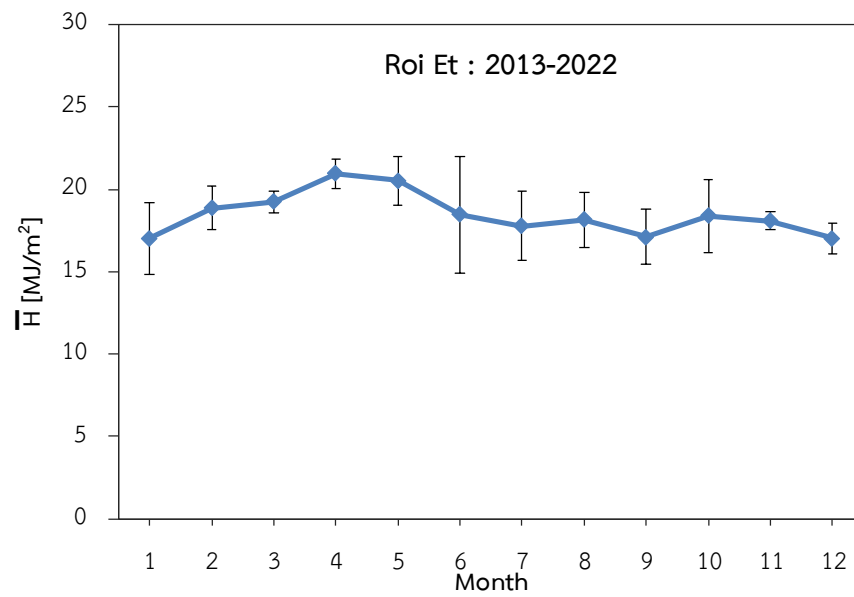
รูปที่ 14 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีนครพนม (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ)



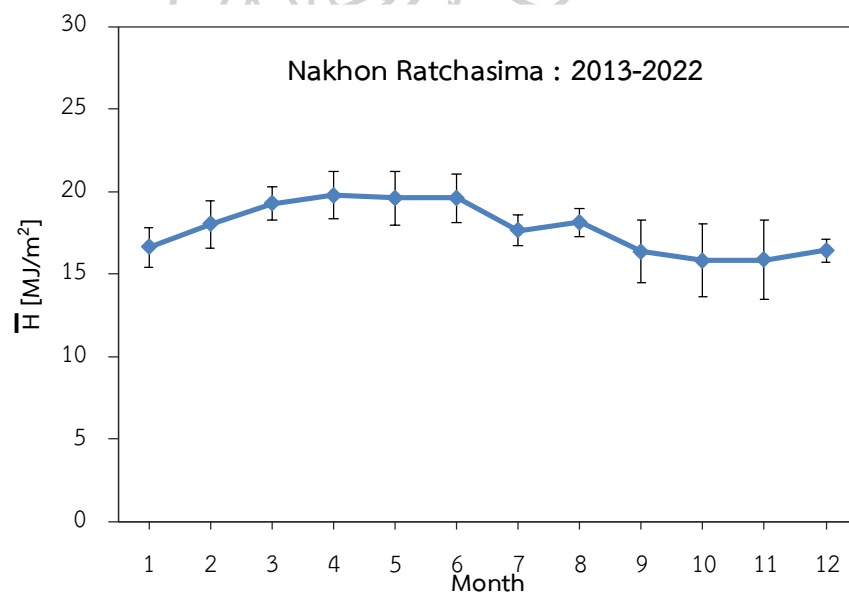
รูปที่ 15 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีขอนแก่น (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ)



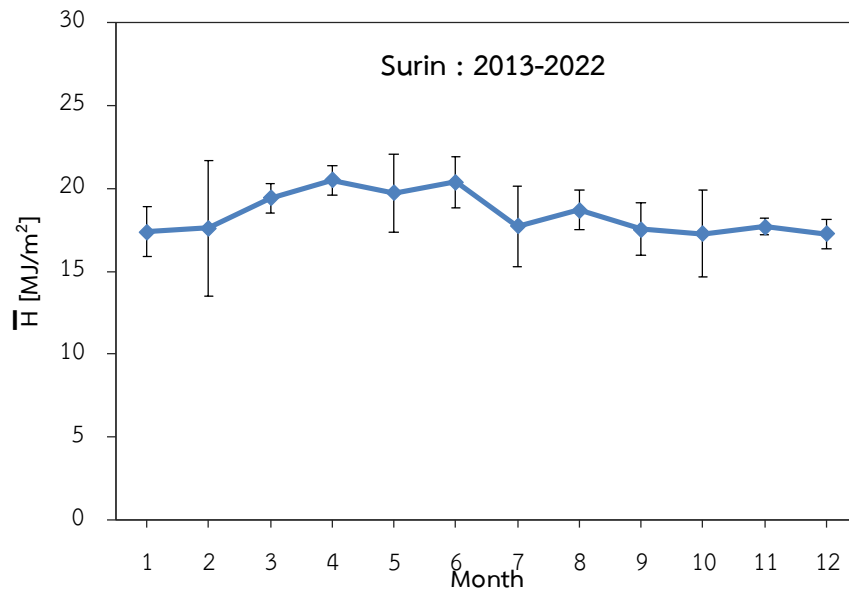
รูปที่ 16 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีอุบลราชธานี (สวางวิระวงศ์)
(ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ)



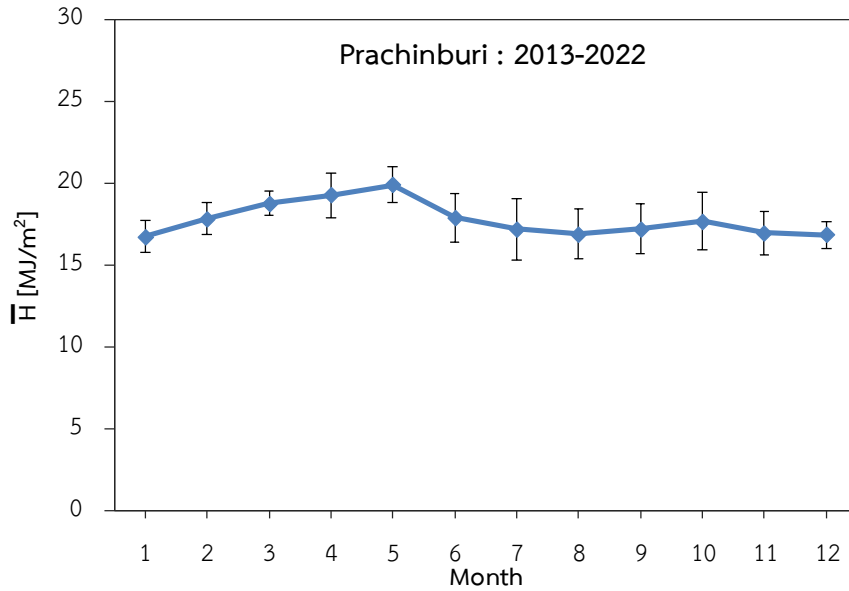
รูปที่ 17 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีร้อยเอ็ด (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ)



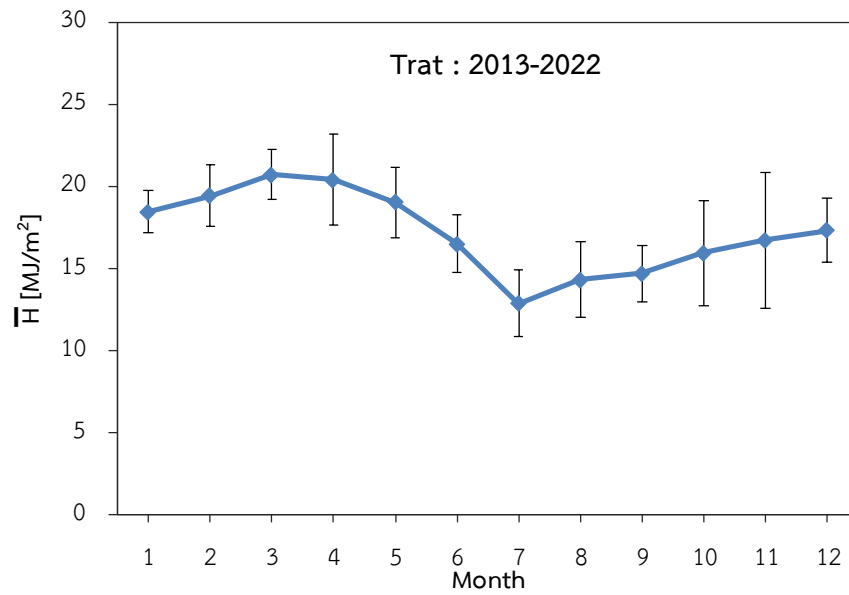
รูปที่ 18 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีนครราชสีมา (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ)



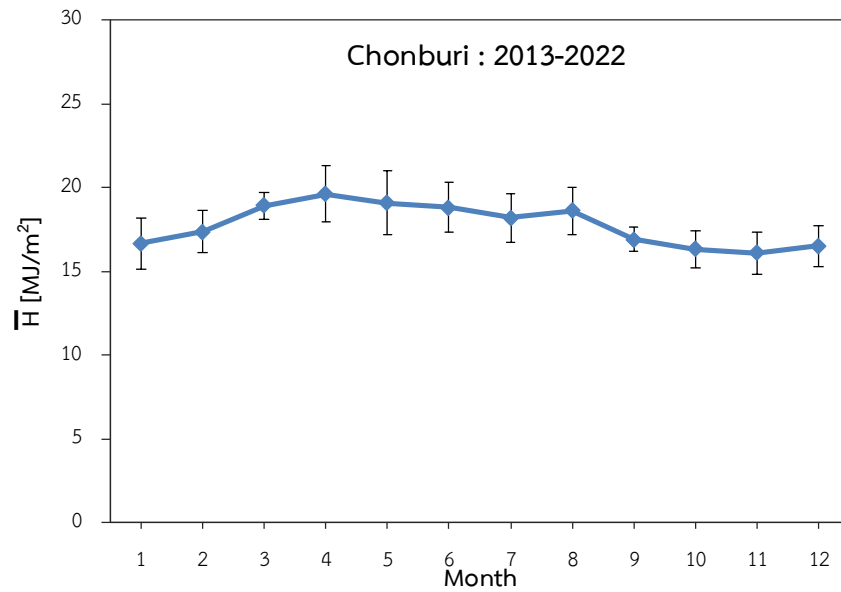
รูปที่ 19 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีสุรินทร์ (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ)



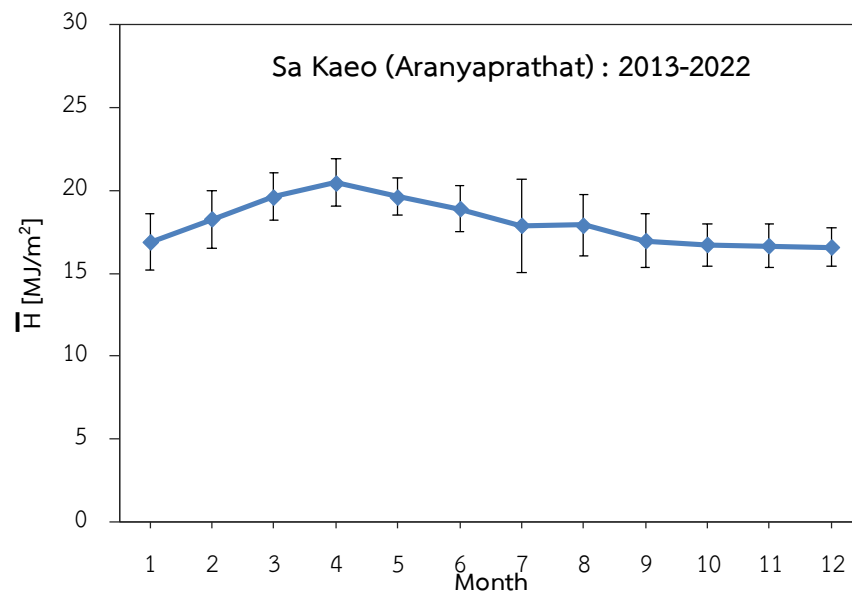
รูปที่ 20 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีปราจีนบุรี (ภาคตะวันออก)



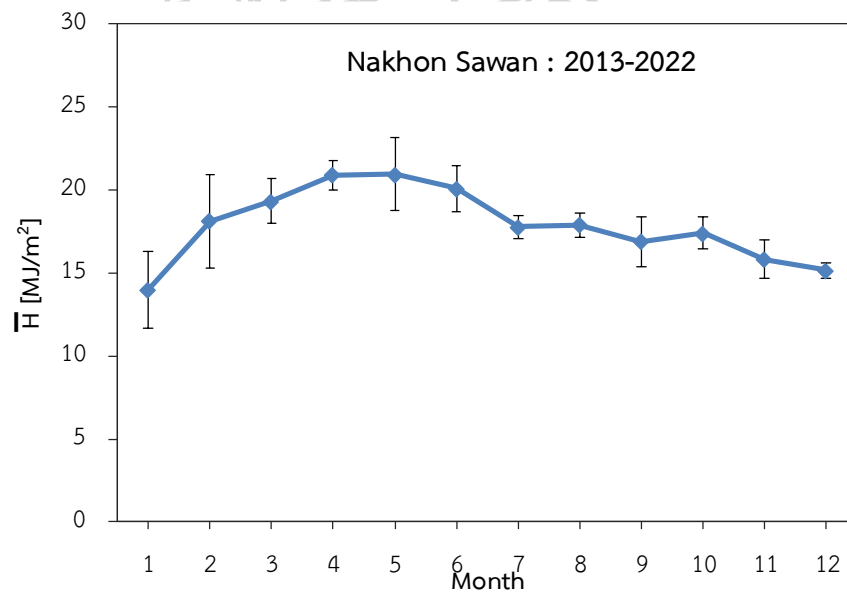
รูปที่ 21 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีตราด (ภาคตะวันออก)



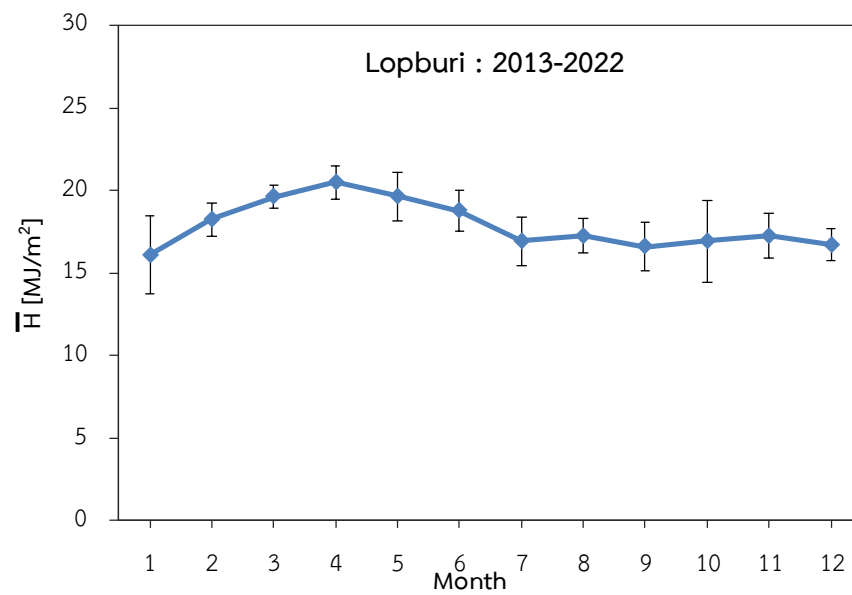
รูปที่ 22 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีชลบุรี (ภาคตะวันออก)



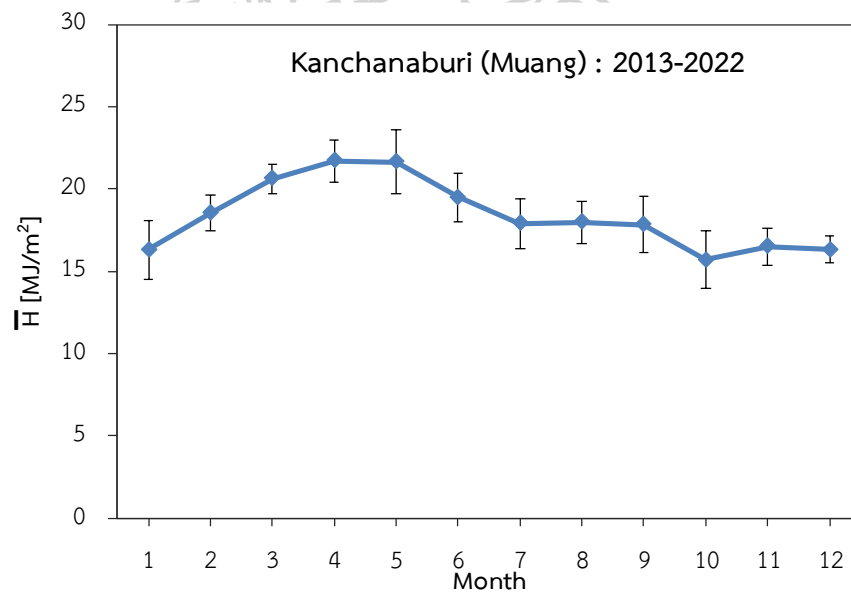
รูปที่ 23 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีสระแก้ว (อรัญประเทศ) (ภาคตะวันออก)



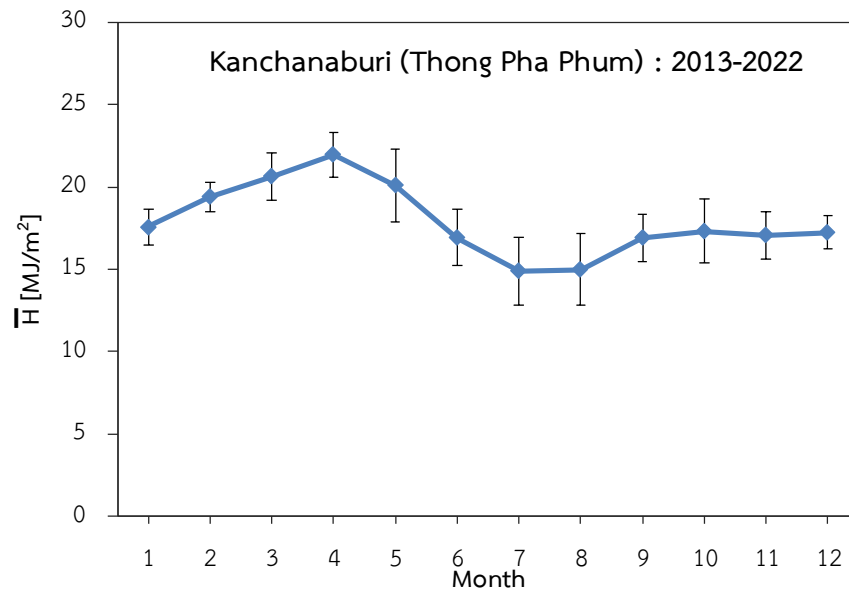
รูปที่ 24 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีนครสวรรค์ (ภาคกลาง)



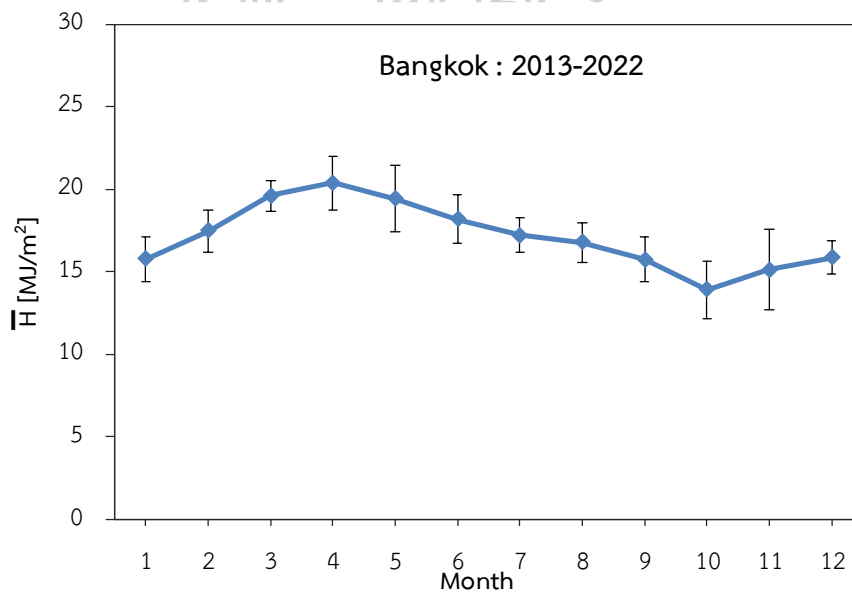
รูปที่ 25 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีลพบุรี (ภาคกลาง)



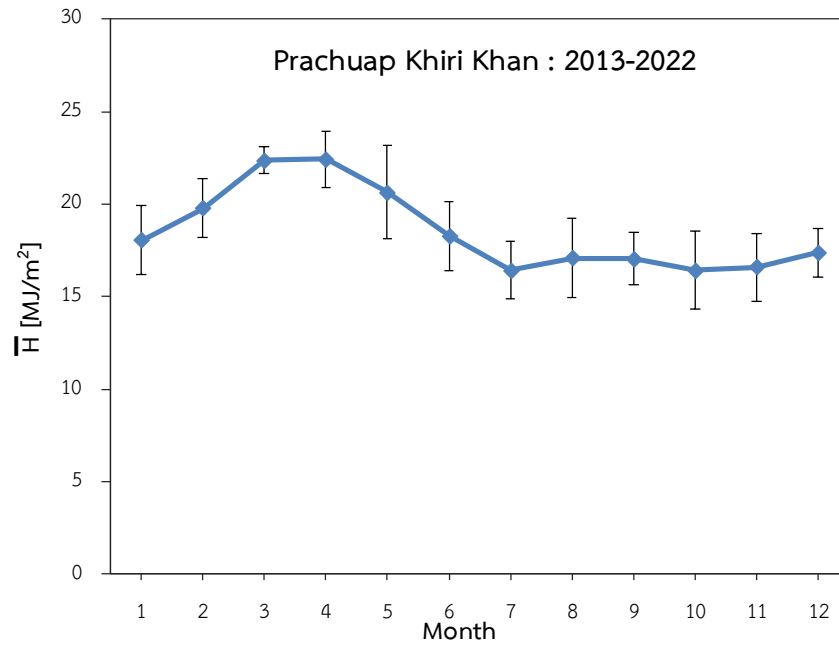
รูปที่ 26 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีกาญจนบุรี (เมือง) (ภาคกลาง)



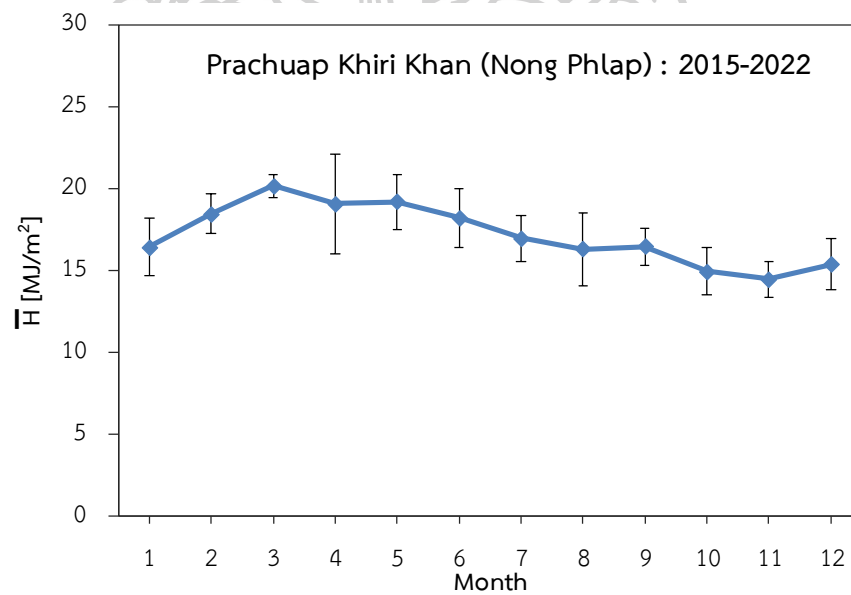
รูปที่ 27 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีกาญจนบุรี (ทองผาภูมิ) (ภาคกลาง)



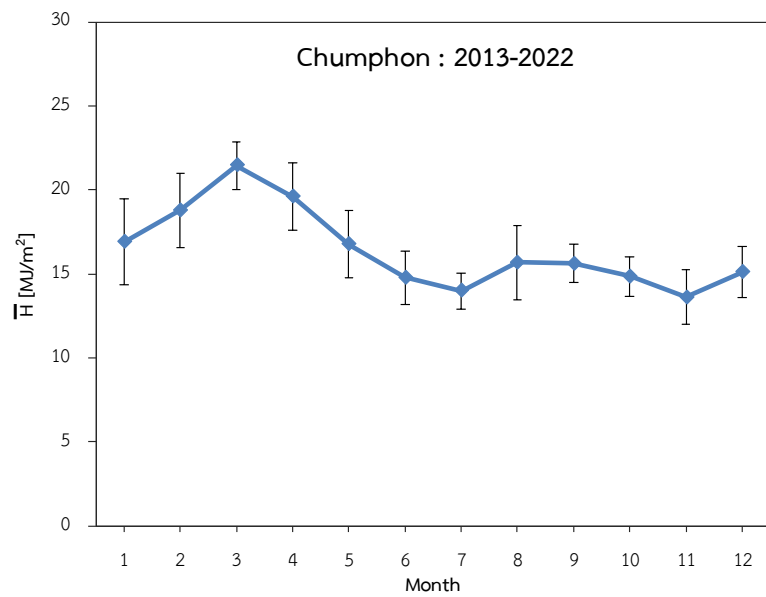
รูปที่ 28 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีกรุงเทพมหานคร (ภาคกลาง)



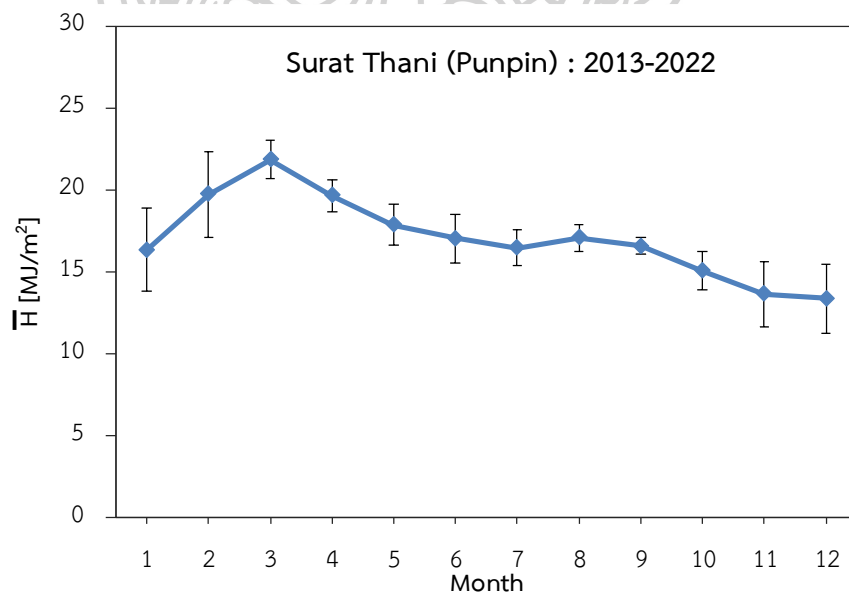
รูปที่ 29 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีประจวบคีรีขันธ์ (เมือง)
(ภาคใต้ฝั่งตะวันออก)



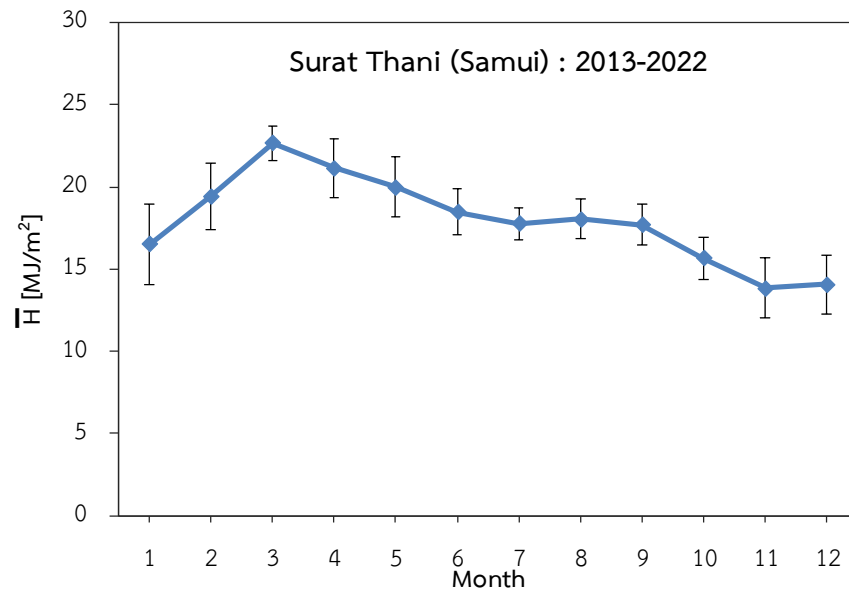
รูปที่ 30 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีประจวบคีรีขันธ์ (หนองพลับ)
(ภาคใต้ฝั่งตะวันออก)



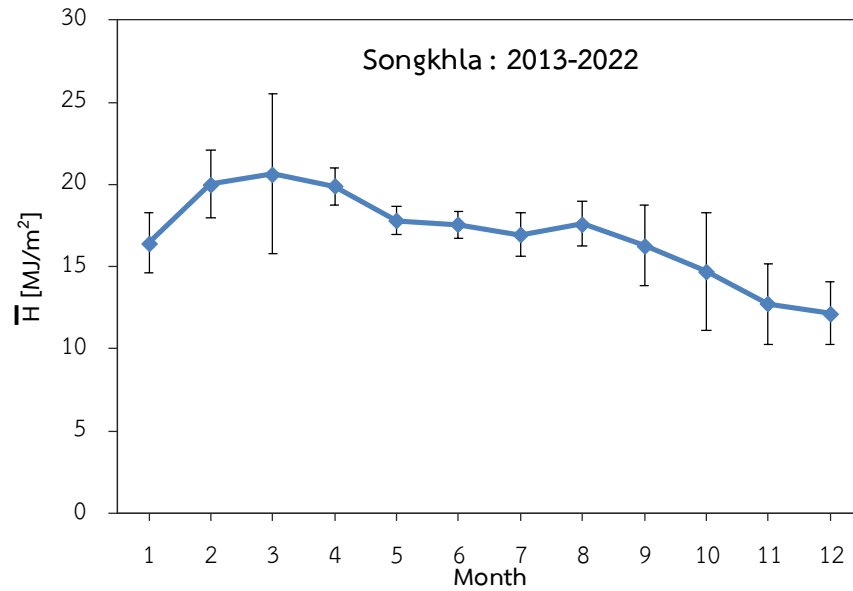
รูปที่ 31 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีชุมพร (ภาคใต้ฝั่งตะวันออก)



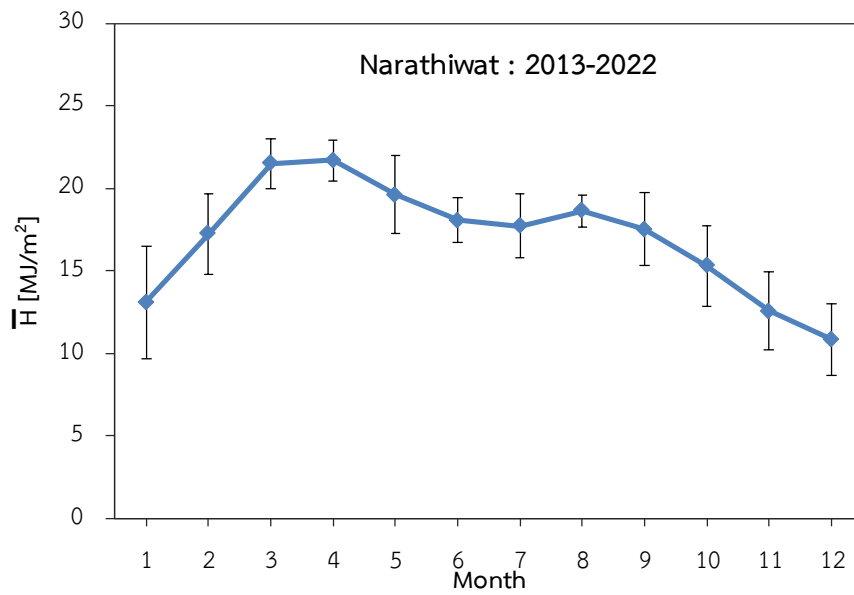
รูปที่ 32 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีสุราษฎร์ธานี (พุนพิน) (ภาคใต้ฝั่งตะวันออก)



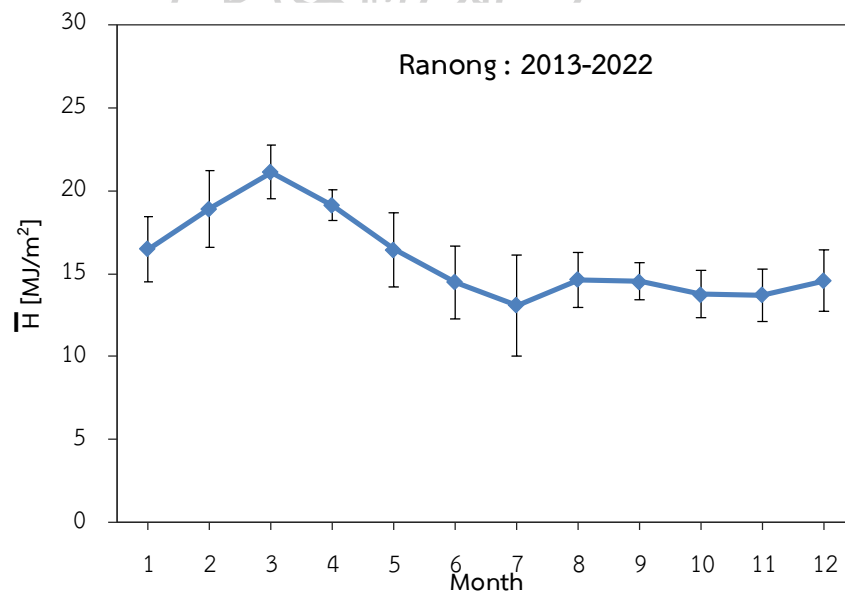
รูปที่ 33 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีสุราษฎร์ธานี (เกาะสมุย)
(ภาคใต้ฝั่งตะวันออก)



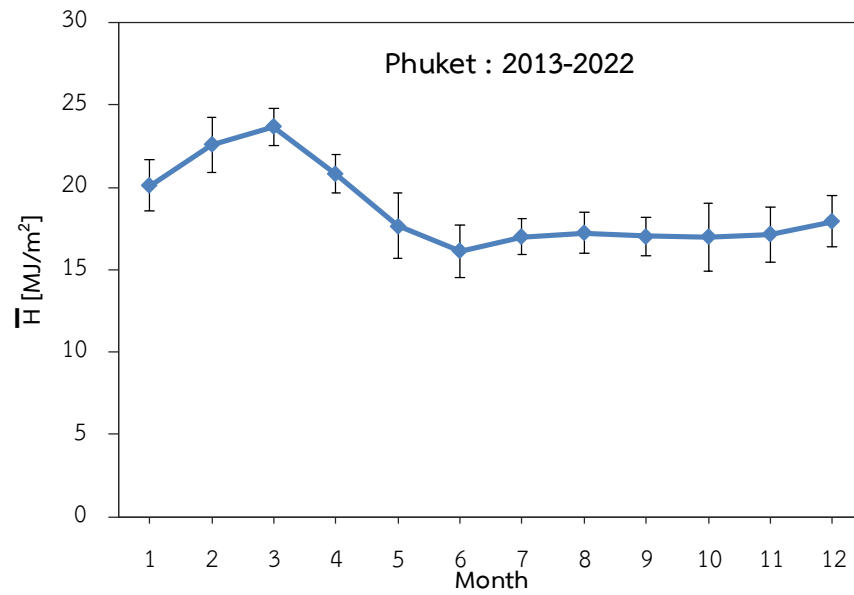
รูปที่ 34 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีสงขลา (ภาคใต้ฝั่งตะวันออก)



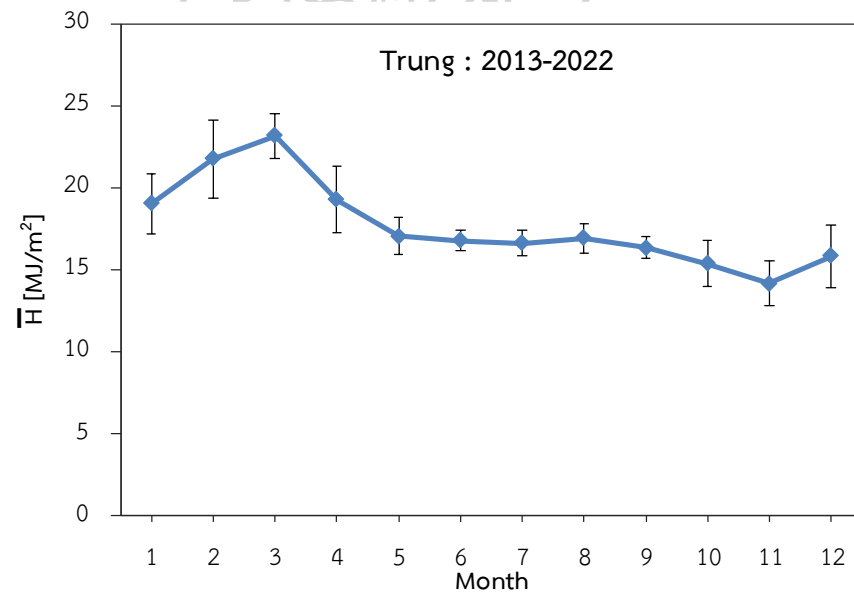
รูปที่ 35 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีนาธิวาส (ภาคใต้ฝั่งตะวันออก)



รูปที่ 36 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีระนอง (ภาคใต้ฝั่งตะวันตก)



รูปที่ 37 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีภูเก็ต (ภาคใต้ฝั่งตะวันตก)



รูปที่ 38 การแปรค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีตรัง (ภาคใต้ฝั่งตะวันตก)

ภาคผนวก ข

วิธีการประมาณค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงภายใต้สภาพท้องฟ้ามีเมฆบางส่วนที่สถานี
นครปฐมโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม*

A method for estimating hourly solar radiation under partly cloudy sky
condition at Nakhon Pathom using an artificial neural network

รังสีอาทิตย์ (solar radiation) เป็นพลังงานที่ปล่อยออกมาจากดวงอาทิตย์ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ โดยรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบขอบบรรยากาศเรียกว่า รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (extraterrestrial solar radiation) ซึ่งประกอบด้วยช่วงรังสีคลื่นสั้น ตั้งแต่ความยาวคลื่น 0.3 - 3.0 ไมโครเมตร รังสีอาทิตย์ที่เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศมาถึงพื้นผิวโลกจะถูกลดทอนโดย 2 กระบวนการหลักคือ การกระเจิงและการดูดกลืนโดยองค์ประกอบต่าง ๆ ในบรรยากาศ เช่น โมเลกุลอากาศ ฝุ่นละออง ไอน้ำและเมฆ โดยรังสีที่เหลือจะพุ่งตรงมาถึงพื้นผิวโลกเรียกว่า รังสีตรง (direct radiation) ส่วนรังสีที่เกิดจากการกระเจิงโดยองค์ประกอบต่าง ๆ ของบรรยากาศ เรียกว่า รังสีกระจาย (diffuse radiation) และเรียกรวมของรังสีตรงและรังสีกระจายเป็น รังสีรวม (global radiation) โดยข้อมูลรังสีอาทิตย์หรือรังสีรวมที่มีในปัจจุบันสามารถหาได้จากการวัดภาคพื้นดินด้วยเครื่องวัดรังสีอาทิตย์หรือเครื่องไพราโนมิเตอร์ (pyranometer) ที่ใช้ในการวัดรังสีรวมและรังสีกระจาย และเครื่องไพเฮลิโอมิเตอร์ (pyrheliometer) ที่ใช้ในการวัดรังสีตรง (เสริม จันทร์ฉาย, 2560, น. 310) รังสีอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญของโลกและสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ทั้งยังสามารถนำไปพัฒนาวางแผนระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ ระบบทำความร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ การอบแห้ง หรือการประยุกต์ทางด้านเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์อื่น ๆ ซึ่งก่อนการติดตั้งใช้งานอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังกล่าวจำเป็นต้องทราบค่าความเข้มรังสีอาทิตย์และทำการวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติของความเข้มรังสีอาทิตย์ในพื้นที่นั้น ๆ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการวัดข้อมูลรังสีอาทิตย์โดยใช้เครื่องมือดังกล่าว แต่เนื่องจากเครื่องวัดรังสีอาทิตย์และอุปกรณ์บันทึกข้อมูลมีราคาค่อนข้างแพง ทำให้ไม่สามารถติดตั้งครอบคลุมได้ทั่วทุกพื้นที่ จึงจำเป็นต้องมีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการคำนวณหาข้อมูลรังสีอาทิตย์ในบริเวณหรือพื้นที่ที่ไม่ได้มีการวัดความเข้มรังสีอาทิตย์ ยกตัวอย่างเช่น แบบจำลองเอมไพริคัล แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network หรือ ANN) จากการรวบรวมงานวิจัยที่ผ่านมา เช่น Ozegwu, 2019 ได้ทำการคำนวณความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนในพื้นที่ประเทศไนจีเรียโดยใช้วิธีการ ANN โดยใช้โปรแกรม MATLAB

*เอกสารประกอบการประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 12 (25 พฤศจิกายน พ.ศ. 2565)

แต่เนื่องจากการพัฒนาแบบจำลองในโปรแกรม MATLAB ผู้พัฒนาต้องเขียนโค้ด (code) ทำให้มีความยุ่งยาก

นอกจากนี้ Yadav et al., 2015 ได้พัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มรังสีอาทิตย์จากตัวแปรทางบรรยากาศที่แตกต่างกัน 5 แบบจำลอง ได้แก่ ข้อมูลอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (temperature) ความยาวนานแสงแดด (sunshine hours) ตำแหน่งละติจูด-ลองจิจูด (latitude-longitude) ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล (altitude) ดัชนีความแจ่มใสบรรยากาศ (clearness index) และรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (extraterrestrial radiation) ในโปรแกรมสำเร็จรูปวีเก้า (WEKA) ในพื้นที่รัฐหิมาจัลประเทศทางตะวันตกของประเทศอินเดีย โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่ปี ค.ศ. 1986-2000 ของ 22 เมือง เป็นชุดข้อมูลใช้สำหรับฝึกสอนแบบจำลอง จากนั้นนำแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นไปทดสอบกับพื้นที่อีก 4 เมืองโดยใช้ข้อมูลปี ค.ศ. 2001 จากผลการศึกษาพบว่าค่าที่ได้จากการวัดและค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ ANN ทั้ง 5 แบบจำลองมีความสอดคล้องกันดี จากการเปรียบเทียบแบบจำลองเอมไพริคัลและแบบจำลอง ANN ของ Rao et al., 2018 พบว่า แบบจำลอง ANN มีความแม่นยำมากกว่าแบบจำลองเอมไพริคัล อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้คำนวณความเข้มรังสีอาทิตย์ในพื้นที่อื่น ๆ ที่มีความแตกต่างทางลักษณะภูมิอากาศและภูมิประเทศได้ดี

โดยปริมาณเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้าจะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับเวลาและสถานที่ค่อนข้างสูงทำให้ส่งผลต่อความแม่นยำของแบบจำลอง แต่จากงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่ไม่มีการพิจารณาตัวแปรเมฆเป็นข้อมูลอินพุตโดยพิจารณาเฉพาะในกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงจะทำการพัฒนาและทดสอบแบบจำลองโดยใช้ ANN สำหรับประมาณค่ารังสีอาทิตย์ในสภาพท้องฟ้ามีเมฆบางส่วนซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีการนำมาใช้สำหรับประมาณค่ารังสีอาทิตย์ในหลายพื้นที่ โดยแบบจำลองที่จะพัฒนาขึ้นนี้ใช้ข้อมูลรังสีอาทิตย์และตัวแปรที่มีผลต่อรังสีอาทิตย์ได้แก่ ปริมาณเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้า ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง ปริมาณโอโซน และปริมาณไอน้ำ ซึ่งทำการวัดที่มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม และข้อมูลตัวแปรที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี ได้แก่ มุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ และค่ารังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก โดยจะใช้ข้อมูล 5 ปี ในปี ค.ศ. 2017-2021 ทั้งนี้เพื่อให้ได้แบบจำลองที่สามารถนำไปคำนวณความเข้มรังสีอาทิตย์ในสภาพท้องฟ้าต่าง ๆ ในพื้นที่ที่ไม่มีการวัด เพื่อให้ได้ข้อมูลรังสีอาทิตย์สำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านพลังงานต่อไป

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. ศึกษาการวัดและรวบรวมข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์ที่จังหวัดนครปฐม
2. วิเคราะห์ลักษณะทางสถิติของข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์สำหรับกรณีท้องฟ้ามีเมฆบางส่วนที่จังหวัดนครปฐม

3. พัฒนาและทดสอบแบบจำลองรังสีอาทิตย์สำหรับสภาพท้องฟ้ามีเมฆบางส่วนโดยใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

ระเบียบวิธีวิจัย

การแปรค่ารังสีอาทิตย์ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ตั้งทางภูมิศาสตร์และตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศ ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการรวบรวมข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กับค่ารังสีอาทิตย์และศึกษาการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อใช้ในการพัฒนาแบบจำลองสำหรับประมาณค่ารังสีอาทิตย์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ข้อมูลจากสถานีวัดภาคพื้นดิน

ผู้วิจัยได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลจากเครื่องมือต่าง ๆ ที่ติดตั้งไว้บนตาดฟ้าชั้น 11 อาคารวิทยาศาสตร์ 1 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม (13.82 N, 100.04°E) ในปี ค.ศ. 2017-2021 เป็นระยะเวลา 5 ปี ประกอบด้วยข้อมูลต่าง ๆ ได้แก่ ความเข้มรังสีรวม ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง ปริมาณโอโซน ปริมาณไอน้ำ มุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก และปริมาณเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้า โดยแต่ละตัวแปรมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

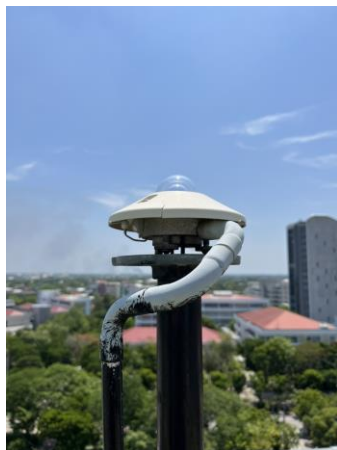
1.1 ข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์

ในงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์จากเครื่องไพราโนมิเตอร์ (pyranometer) รุ่น CMP11 ผลิตโดยบริษัทคิปป์แอนด์โซนเนส (Kipp&Zonen) (รูปที่ 1) ซึ่งเป็นเครื่องวัดรังสีรวมแบบเทอร์โมไพล์ (thermopile pyranometer) สามารถตอบสนองสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ส่วนใหญ่ในช่วง 0.3-3.0 ไมโครเมตร โดยเมื่อรังสีอาทิตย์ตกกระทบแผ่นรับรังสี แผ่นดังกล่าวจะถ่ายเทความร้อนไปยังเทอร์โมไพล์ ทำให้เทอร์โมไพล์มีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วของเทอร์โมไพล์ ค่าศักย์ไฟฟ้างกล่าวสามารถนำมาคำนวณเป็นค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ได้โดยอาศัยการตอบสนอง (sensitivity) ของเครื่องวัดที่ได้จากการสอบเทียบกับเครื่องวัดรังสีอาทิตย์มาตรฐาน

1.2 ข้อมูลสภาพท้องฟ้า

ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาสภาพท้องฟ้าที่ได้จากภาพถ่ายท้องฟ้าด้วยเครื่องถ่ายภาพท้องฟ้า (sky view) ยี่ห้อ PREDE รุ่น PSV-100 (รูปที่ 2) โดยเครื่องถ่ายภาพท้องฟ้าจะทำการถ่ายภาพครอบคลุมครึ่งทรงกลมท้องฟ้าอัตโนมัติทุก 1 นาที ในสภาพท้องฟ้าต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3 จากนั้นผู้วิจัยนำภาพถ่ายท้องฟ้าที่ได้มาประมาณปริมาณเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้าด้วยสายตา และประมาณว่าในขณะนั้นมีเมฆปกคลุมท้องฟ้ากี่ส่วนถ้าแบ่งท้องฟ้าออกเป็น 10 ส่วนตามเกณฑ์การจำแนกของอุตุนิยมวิทยา ซึ่งปริมาณเมฆจะขึ้นกับสภาพภูมิอากาศและมีการแปรค่าของปริมาณเมฆจาก 0 กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ 1-9 ส่วนสำหรับกรณีท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน จนถึง 10 ส่วนในกรณีท้องฟ้าปก

คลุมด้วยเมฆทั้งหมด โดยในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยใช้ข้อมูลปริมาณเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้า (cloud cover) 1 ส่วน ถึง 9 ส่วน โดยตัวอย่างสภาพท้องฟ้ามีเมฆบางส่วนแสดงดังรูปที่ 3(ข)



รูปที่ 1 เครื่องไพราโนมิเตอร์ รุ่น CMP11

รูปที่ 2 เครื่องถ่ายภาพท้องฟ้า (sky view)



รูปที่ 3 ตัวอย่างภาพถ่ายท้องฟ้าจากเครื่องถ่ายภาพท้องฟ้า (sky view) ก) ทัศนสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆ (clear sky) ข) ทัศนสภาพท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน (partly cloudy sky) ค) ทัศนสภาพท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด (overcast sky)

1.3 ความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง (aerosol optical depth, AOD) ปริมาณโอโซน และ ปริมาณไอน้ำ

ผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร และ ปริมาณไอน้ำที่ทำการวัดโดยเครื่องเซนโฟโตมิเตอร์ (sunphotometer) ยี่ห้อ cimel รุ่น CE-318 ซึ่งติดตั้งอยู่บนตาดฟ้าชั้น 11 มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยจะทำการประมวลผลด้วยเครือข่าย Aerosol Robotic Network หรือ AERONET และสามารถดาวน์โหลดข้อมูลดังกล่าวผ่านเว็บไซต์ <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/> ขององค์การนาซ่า (NASA) ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นข้อมูลทั้งแบบรายชั่วโมงและรายวัน



รูปที่ 4 เครื่องชั้นโฟโตมิเตอร์ ที่ติดตั้งบนดาดฟ้าชั้น 11 มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม

2. ข้อมูลตัวแปรอื่น ๆ จากทฤษฎี

การพัฒนาแบบจำลองเพื่อประมาณค่ารังสีอาทิตย์รายชั่วโมงในจังหวัดนครปฐม นอกจากข้อมูลที่ได้จากการวัดภาคพื้นดินแล้ว ผู้วิจัยยังได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลตัวแปรอื่น ๆ ซึ่งได้จากการคำนวณตามทฤษฎี ได้แก่ ปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก และมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ความเข้มรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก

ในการคำนวณหาปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกสามารถคำนวณหาได้ดังสมการต่อไปนี้

$$I_0 = I_{SC} E_0 \cos \theta_z \quad (1)$$

เมื่อ I_0 คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (วัตต์ต่อตารางเมตร)

I_{SC} คือ ค่าคงที่ของรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (วัตต์ต่อตารางเมตร)

E_0 คือ ค่าแฟคเตอร์สำหรับแก้ผลจากการแปรค่าของระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์

(-)

θ_z คือ มุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ (องศา)

2.2 มุมเซนนิธของดวงอาทิตย์

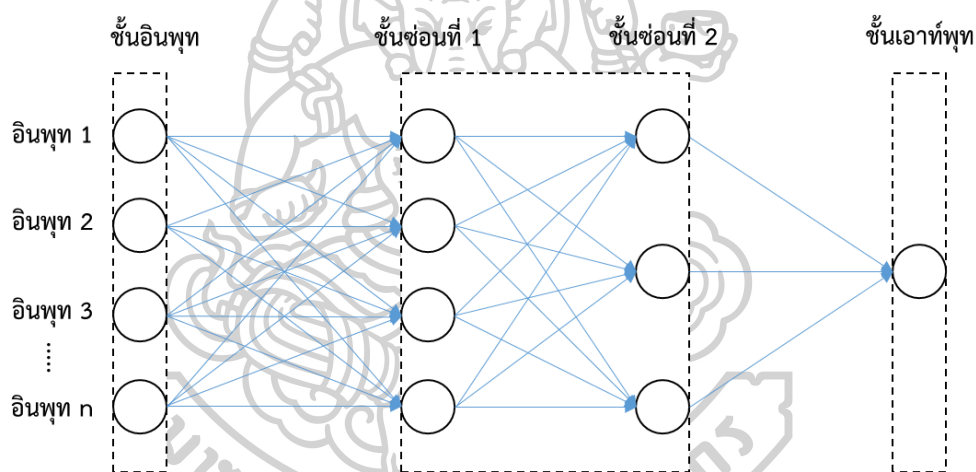
ค่ารังสีอาทิตย์ที่ผ่านมายังพื้นผิวโลกจะมีปริมาณมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งปรากฏของดวงอาทิตย์ ซึ่งเป็นผลจากระยะทางที่แสงถูกลดทอนด้วยตัวแปรในบรรยากาศ โดยมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์สามารถคำนวณได้ดังสมการ

$$\cos \theta_z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (2)$$

- เมื่อ φ คือ ละติจูด (องศา)
 δ คือ มุมเดคลิเนชัน (องศา)
 ω คือ มุมชั่วโมงของดวงอาทิตย์ (องศา)

3. โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN)

โครงข่ายประสาทเทียมเป็นระบบทางคณิตศาสตร์ที่เขียนอยู่ในรูปโปรแกรมคอมพิวเตอร์สามารถจำลองการทำงานของระบบทางฟิสิกส์หรือระบบวิศวกรรมต่าง ๆ โดยเลียนแบบการทำงานของสมองมนุษย์และสามารถนำมาใช้คำนวณหาค่าปริมาณรังสีอาทิตย์ได้ ผู้วิจัยจึงได้นำแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมจากโปรแกรมเวก้า (Weka) (Yadav et al., 2014; Yadav et al., 2015) มาใช้ในการคำนวณค่ารังสีอาทิตย์ที่จังหวัดนครปฐม โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งประกอบไปด้วยชั้นอินพุท ชั้นซ่อนสองชั้น และชั้นเอาต์พุท ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ตัวอย่างโครงข่ายประสาทเทียม

โดยเอาต์พุทที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมสามารถเขียนในรูปสมการดังนี้

$$y = f(b + \sum_i^n w_i x_i) \quad (3)$$

- เมื่อ y คือ เอาต์พุทของโครงข่ายประสาทเทียม
 b คือ ตัวแปรบอกความเอนเอียง
 x_i คือ ตัวแปรอินพุทที่ i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)
 w_i คือ ค่าตัวถ่วงน้ำหนักสำหรับตัวแปรอินพุทที่ i

4. ขั้นตอนการวิจัย

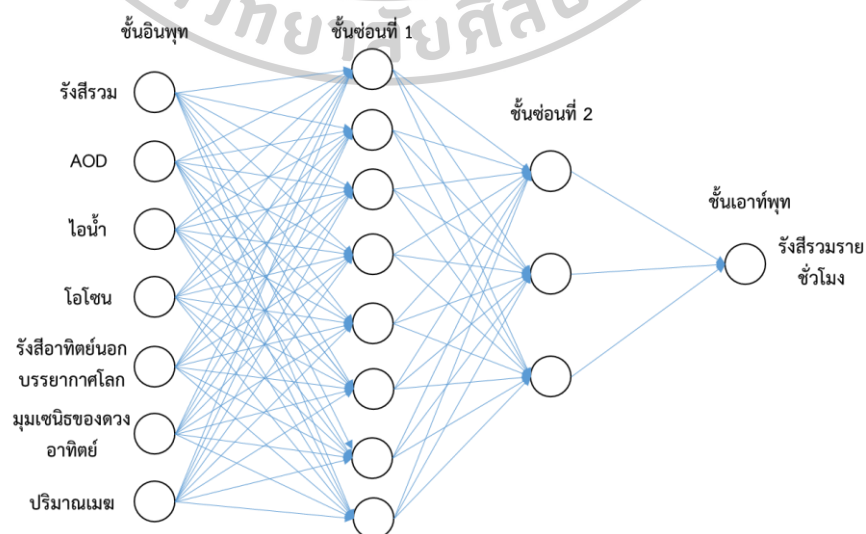
4.1 วิเคราะห์การแปรค่าความเข้มรังสีอาทิตย์

ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์การแปรค่าของความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงจากการวัด โดยนำข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงตั้งแต่วันที่ 09.00 - 17.00 น. ของแต่ละเดือน ระหว่างปี ค.ศ. 2017-2021 มาคำนวณหาค่าเฉลี่ยได้เป็นค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน แล้วนำมาเขียนกราฟการแปรค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนในแต่ละปีของจังหวัด นครปฐม

4.2 การพัฒนาแบบจำลองรังสีอาทิตย์

ขั้นตอนที่ 1 รวบรวมข้อมูลตัวแปรอินพุทที่มีความสัมพันธ์ต่อรังสีอาทิตย์ ได้แก่ รังสีรวมรายชั่วโมง ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง ปริมาณโอโซน ปริมาณไอน้ำ มุมเซนิตของดวงอาทิตย์ รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก และปริมาณเมฆ โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่ปี 2017-2021 ในช่วงเวลา 9.00-17.00 น. ในการพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

ขั้นตอนที่ 2 ทำการสร้างและฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมโดยใช้ฟังก์ชันซิกมอยด์ (sigmoid) และใช้ข้อมูลของชั้นอินพุทในปี 2017-2020 ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลรังสีรวมรายชั่วโมง ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง ปริมาณโอโซน ปริมาณไอน้ำ มุมเซนิตของดวงอาทิตย์ รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก และปริมาณเมฆ โดยชุดข้อมูลในการฝึกสอนมีจำนวนทั้งหมด 16,191 ข้อมูล จากนั้นทำการสุ่มหาชั้นซ่อนที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดสำหรับคำนวณความเข้มรังสีอาทิตย์ จากการสุ่มพบว่าแบบจำลอง ANN ในงานวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วยชั้นซ่อนจำนวนสองชั้น โดยชั้นซ่อนแรกมีแปด โหนด ชั้นที่สองมีสามโหนด และชั้นเอาต์พุทคือค่ารังสีรวมที่ได้จากแบบจำลอง แผนภาพโครงข่ายประสาทเทียมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้จำลองค่ารังสีรวมรายชั่วโมง

ขั้นตอนที่ 3 ทำการทดสอบสมรรถนะของโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้ทำการฝึกสอนแล้ว จากนั้นนำค่ารังสีรวมรายชั่วโมงที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมไปเปรียบเทียบกับค่าจากการวัดโดยใช้ข้อมูลในการทดสอบปี 2021 ซึ่งชุดข้อมูลในการทดสอบมีจำนวนทั้งหมด 1,344 ข้อมูล โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ทางสถิติ ดังนี้

(1) ค่ารากที่สองของค่าความแตกต่างกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Squared Difference, RMSD) แสดงดังสมการ

$$RMSD = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ANN_i - OBS_i)^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n OBS_i} \times 100 \quad (4)$$

(2) ส่วนเบี่ยงเบนเฉลี่ย (Mean Bias Difference, MBD) เขียนได้ดังสมการ

$$MBD = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ANN_i - OBS_i)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n OBS_i} \times 100 \quad (5)$$

(3) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient, R^2) แสดงดังสมการ

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (ANN_i - \overline{ANN})(OBS_i - \overline{OBS}))^2}{\sum_{i=1}^n (ANN_i - \overline{ANN})^2 \sum_{i=1}^n (OBS_i - \overline{OBS})^2} \quad (6)$$

เมื่อ n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

ANN_i คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จากแบบจำลอง ANN

OBS_i คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จากการวัดภาคพื้นดิน

\overline{ANN} คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยของ ANN_i

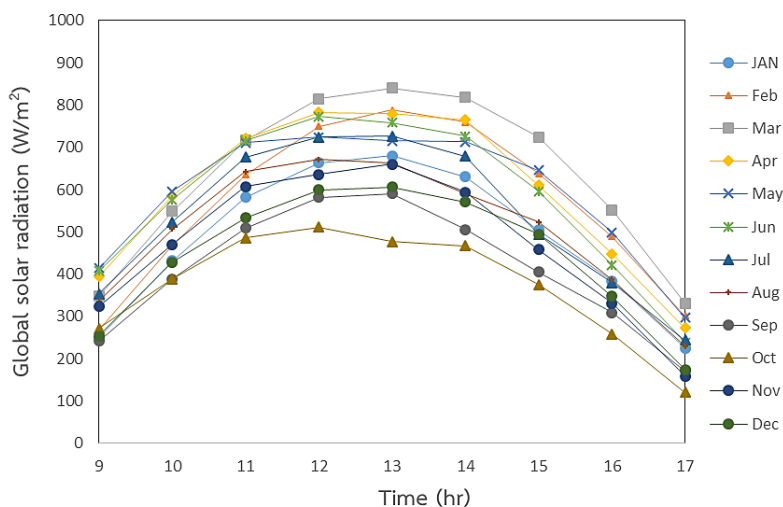
\overline{OBS} คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์เฉลี่ยของ OBS_i

ผลการวิจัย

จากการวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติ รวมถึงการพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มรังสีอาทิตย์สำหรับกรณีสภาพท้องฟ้ามีเมฆบางส่วนที่จังหวัดนครปฐม ผลการศึกษาที่ได้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การแปรค่ารังสีอาทิตย์รายชั่วโมงจากการวัดภาคพื้นดิน

ผู้วิจัยทำการเขียนกราฟการแปรค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน โดยผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 7



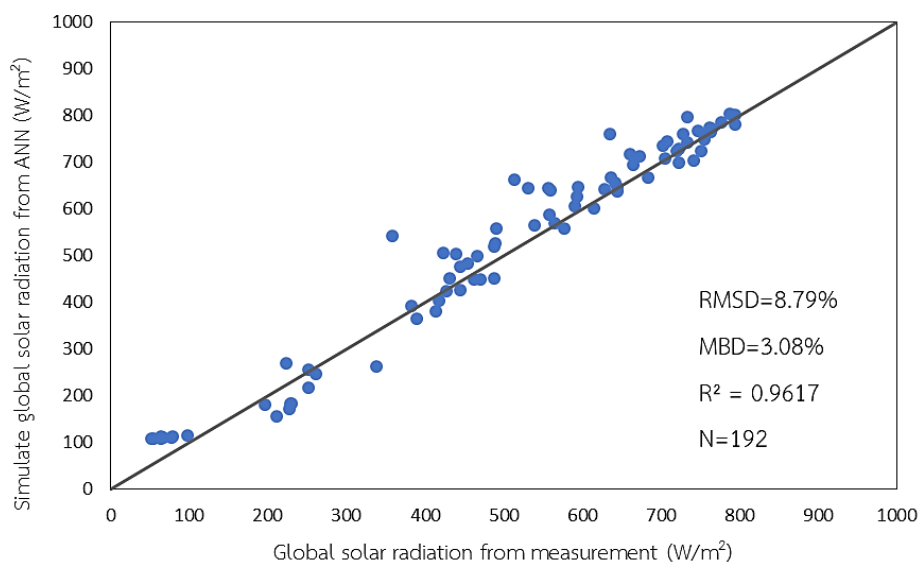
รูปที่ 7 ตัวอย่างการแปรค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนของปี ค.ศ. 2020 จังหวัดนครปฐม

จากรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ค่อยๆ เพิ่มขึ้นในช่วงเช้าและมีค่าสูงสุดในช่วงเวลาบ่ายโมงของวันจากนั้นค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จะมีค่อยๆ ลดลงในช่วงเย็น ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงในช่วงวันขึ้นอยู่กับระยะทางเดินของดวงอาทิตย์และการลดทอนโดยองค์ประกอบในบรรยากาศ และพบว่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนมีค่าสูงสุดในเดือนมีนาคมและมีค่าต่ำสุดในช่วงเดือนตุลาคม เนื่องจากเดือนมีนาคมเป็นช่วงฤดูร้อนเป็นระยะที่ทั่วโลกเหนือหันเข้าหาดวงอาทิตย์ทำให้ประเทศไทยได้รับความเข้มรังสีอาทิตย์ดวงอาทิตย์ในปริมาณสูง ส่วนเดือนตุลาคมเป็นช่วงที่มีฝนตกชุกจึงทำให้มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ต่ำ ซึ่งลักษณะการกระจายตัวดังกล่าวของรังสีอาทิตย์สามารถนำไปประเมินเพื่อติดตั้งใช้งานอุปกรณ์และเทคโนโลยีทางด้านพลังงานแสงอาทิตย์ต่อไป

2. เปรียบเทียบค่ารังสีรวมรายชั่วโมงจากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

ผู้วิจัยนำค่ารังสีรวมรายชั่วโมงที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมโดยแบ่งชุดข้อมูลฝึกสอนออกเป็น 80% (ปี ค.ศ. 2017-2020) และทดสอบ 20% (ปี ค.ศ. 2021) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป WEKA จากนั้นนำค่าที่ได้จากแบบจำลอง ANN มาเปรียบเทียบกับค่ารังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากการวัดภาคพื้นดินสำหรับปี ค.ศ. 2021 โดยผลการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 8 ซึ่งพบว่าค่าความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงที่ได้จากแบบจำลอง ANN และความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงที่ได้จากการวัดที่จังหวัดนครปฐมจำนวน 192 ข้อมูลมีความสอดคล้องกันดี โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนในรูป RMSD เท่ากับ 8.79% MBD เท่ากับ 3.08% และ R^2 เท่ากับ 0.96 ซึ่งแสดงให้เห็น

ว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่พัฒนาขึ้นสามารถคำนวณค่ารังสีอาทิตย์ภายใต้สภาพท้องฟ้ามีเมฆบางส่วนได้ดีในพื้นที่จังหวัดนครปฐม



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีรวมรายชั่วโมงที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) และค่าจากการวัด

อภิปรายผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อคำนวณค่าความเข้มรังสีรวมในจังหวัดนครปฐม โดยทำการเก็บรวบรวมข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงและตัวแปรที่ใช้ในแบบจำลองที่มีผลต่อค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ภายใต้สภาพท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2017-2021 เป็นระยะเวลา 5 ปี โดยพบว่าการแปรค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงมีค่าค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากช่วงเช้า และมีค่าสูงสุดในช่วงบ่ายโมงจากนั้นค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จะมีค่าลดลงในช่วงเย็น ซึ่งเป็นผลจากทางเดินของดวงอาทิตย์และตัวแปรทางบรรยากาศ และพบว่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนมีค่าสูงสุดในเดือนมีนาคมและมีค่าต่ำสุดในช่วงเดือนตุลาคม เนื่องจากเดือนมีนาคมเป็นช่วงฤดูร้อนเป็นระยะที่ทั่วโลกเหนือหันเข้าหาดวงอาทิตย์ทำให้ประเทศไทยได้รับความเข้มรังสีอาทิตย์ดวงอาทิตย์ในปริมาณสูง นอกจากนี้ยังเป็นช่วงเดือนที่มีเมฆปกคลุมท้องฟ้าน้อยทำให้มีความเข้มรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกสูง ส่วนเดือนตุลาคมของปี ค.ศ. 2020 มีปริมาณฝนตกชุกและมีเมฆมากตลอดทั้งเดือนจึงทำให้มีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ต่ำ

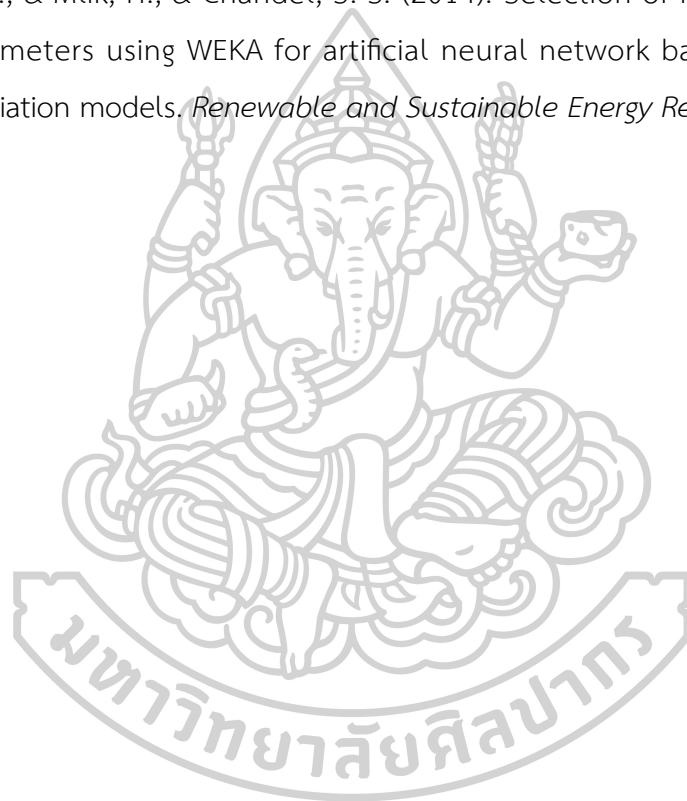
ในส่วนของการพัฒนาแบบจำลอง ผู้วิจัยพบว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเหมาะสมสำหรับคำนวณค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงของจังหวัดนครปฐม โดยประกอบด้วยชั้นอินพุทที่มีตัวแปรทั้งหมด 7 ตัวแปร ได้แก่ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง ปริมาณไอน้ำ ปริมาณโอโซน รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก มุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ และปริมาณเมฆ ชั้นซ่อนสองชั้นซ่อน และชั้นเอาต์พุทที่เป็นค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมง เมื่อนำค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดภาคพื้นดินพบว่ามี ความสอดคล้องกันดี โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนในรูปของ RMSD เท่ากับ 8.79% MBD เท่ากับ 3.08% และ R^2 เท่ากับ 0.96 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถประมาณค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ในสภาพท้องฟ้ามีเมฆบางส่วนได้ดี โดยผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Azadeh et al, 2009 ที่ใช้แบบจำลอง ANN เพื่อประมาณค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ภายใต้สภาพท้องฟ้าทั่วไปสำหรับพื้นที่ที่ต้องการศึกษา โดยประโยชน์ที่ได้จากการคำนวณค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ ในพื้นที่จังหวัดนครปฐมจะทำให้สามารถนำไปประเมินประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ในพื้นที่จังหวัดนครปฐม ซึ่งมีอยู่หลายแห่ง นอกจากนี้ยังนำไปใช้ตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์พาราโบลาโดมและใช้เป็นฐานข้อมูลในงานวิจัยด้านพลังงานแสงอาทิตย์และอูดุณิมวิทยา ซึ่งในอนาคตจะสามารถประยุกต์แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมไปใช้คำนวณค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ในพื้นที่ที่ไม่มีการวัดสำหรับภูมิภาค อื่น ๆ ในประเทศไทยได้

ข้อเสนอแนะ เนื่องจากข้อมูลตัวแปรเมฆในงานวิจัยครั้งนี้ได้จากข้อมูลการวัดภาคพื้นดิน ทำให้ข้อมูลไม่ครอบคลุมทุกพื้นที่ ดังนั้นผู้วิจัยเสนอให้ใช้ข้อมูลตัวแปรเมฆจากภาพถ่ายดาวเทียมเพื่อให้ได้ข้อมูลครอบคลุมทั่วทุกพื้นที่

เอกสารอ้างอิง

- เสริม จันทรฉาย. (2560). รังสีอาทิตย์. พิมพ์ครั้งที่ 2 (ปรับปรุง). รังสีอาทิตย์: ศูนย์หนังสือ มหาวิทยาลัยศิลปากร มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ นครปฐม.
- Azadeh, A., & Maghsoudi, A., & Sohrabkhani, S. (2009). An integrated artificial neural networks approach for predicting global radiation. *Energy Conversion and Management*, 50(6), 1497–1505.
- Ozegwu, 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.

- Rao, K. D.V., & Siva, K. & Premalatha, M., & Naveen, C. (2018). Analysis of different combinations of meteorological parameters in predicting the horizontal global solar radiation with ANN approach: A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 248–258.
- 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., & Mlik, 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 Review*, 31, 509-519.



ภาคผนวก ค**Comparison of prediction accuracy between ARX and ANN for a solar radiation system based on data from Nakhon Pathom station in Thailand***

Models of a system are important to the systems [1]. For examples, a model is needed for investigating the influence of a parameter of the system on the performance of that system. The model is also required for an optimization of the system. Modeling approach could be broadly divided in two categories: models based on physical approach and models based on machine leaning approaches [2]. For the physical approaches, modelers need to know the physical process occurring in the system. This approach has advantage in terms of knowing the physical process inside the system. However, some system parameters may be difficult to find. For the machine leaning approach, modelers do not need to know the physical process taking place in the systems, only input and output from experiments are required, making it to be easier to model. For later category, artificial neural network (ANN) and AutoRegressive with eXogenous variables (ARX) are quite popular due to their ease [3] and their accuracy [2]. Even they are in the same category, the accuracy of each approach is different. Silva et al. [4] have studied the ARX approach and ARXMAX approaches for the solar radiation system in Brazil and reported that the use of the linear models (ARX and ARMAX) to predict solar radiation data was efficient for extraterrestrial normal, infrared, and extraterrestrial horizontal radiation with the mean square error equal to 2.51%, 1.40% and 7.15%, respectively. Piri et al. [5] have compared the performance ANFIS-ARX and empirical approaches for solar radiation system in Iran and found that ANFIS and NN-ARX performed better than the empirical models in estimating daily solar radiation.

*This part of the thesis has been submitted to RAST

To the best of our knowledge, there is no published report on the performance comparison of the ANN and ARX approaches of the solar radiation system at Nakhon Pathom station, Thailand. Therefore, the aim of this work was to compare the prediction accuracy of the ANN and ARX approaches for a solar radiation system at Nakhon Pathom station in Thailand.

1. Materials and method

1.1 Materials

The main materials used in this work are various dataset. The details of each dataset are as follows

1.1.1 Global solar radiation dataset at Nakhon Pathom

In this research, the global solar radiation data measured from a pyranometer (CM21, Kipp&Zonen) was collected for the period of the year 2017-2022. This pyranometer is capable of measuring solar radiation spectrum in the range of 0.3-3.0 μm . The detector transfers heat to the thermopile causing a voltage at thermopile junction. Accuracy to the voltage, it can be used to calculate the solar radiation intensity based on the responsivity of the pyranometer with cloud be obtain by calibrating it with a standard pyranometer.

1.1.2 Aerosol optical depth (AOD) dataset

The aerosol optical depth measured by a sunphotometer (Cimel-318) at Nakhon Pathom station for the period of the year 2017-2022 was gathered. The sunphotometer belongs to our laboratory and it is a member of AERONET of NASA. The data from measurement were sent via the internet to AERONET Head Quarter for the analysis. The optical properties of aerosols data were posted on the AERONET website (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>). We downloaded the AOD at 500 nm for use in this work.

1.1.3 Water vapor dataset

In this work water vapor in terms of precipitable water was acquired. Precipitable water obtained from Cimel sunphotometer available at the AERONET website <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/> of NASA was downloaded for use in this work.

1.1.4 Ozone dataset

Ozone is an important parameter in solar ultraviolet absorption. About 85-90% of ozone is concentrated in the atmosphere at an altitude of about 20 to 30 kilometers above the Earth's surface. In general, the amount of ozone that affects solar radiation attenuation is usually expressed in terms of the total ozone column (TOC), assuming that the total ozone along the vertical is combined, at the Earth's surface at a temperature of 15 °C and a pressure of 1 atmosphere, then the height is measured in centimeters or Dobson units (Dobson, DU) representing, the amount of ozone. In this work, the amount of ozone was derived from OMI/AURA satellite.

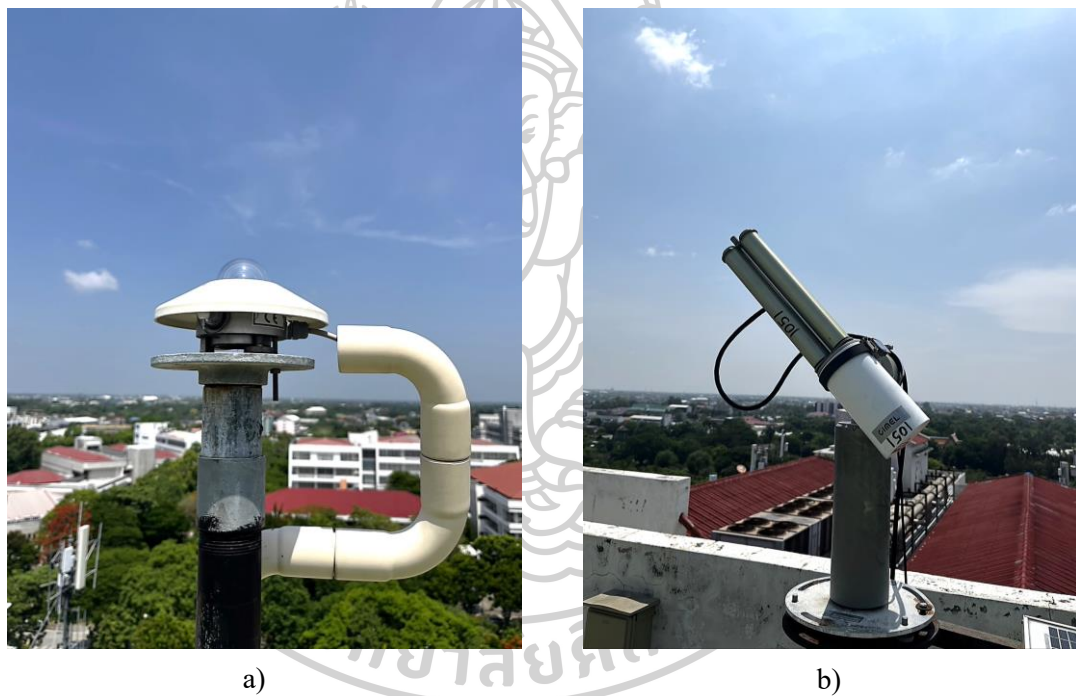


Fig. 1. a) The pyranometer for measuring global solar radiation and b) sunphotometer for deriving the AOD and water vapor at Nakhon Pathom, Thailand.

1.1.5 Cloud index dataset

We derived the cloud index from HIMAWARI-8 satellite using the method described in [6]

1.1.6 Monthly average daily extraterrestrial solar radiation (\bar{H}_0)

A daily extraterrestrial solar radiation was calculated from a method of Iqbal [7] as follows.

$$H_0 = \frac{24}{\pi} I_{SC} E_0 \left[\frac{\pi}{180} \omega_s (\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \sin \omega_s) \right] \quad (2.1)$$

and
$$\bar{H}_0 = \frac{i}{n_2 - n_1} \sum_{n_1}^{n_2} H_0 \quad (2.2)$$

- when H_0 is daily extraterrestrial solar radiation [MJ/m^2]
 \bar{H}_0 is monthly average daily extraterrestrial solar radiation [MJ/m^2]
 I_{SC} is solar constant [MJ/m^2]
 ω_s is sunset hour angle [$^\circ$]
 E_0 is eccentricity correction factor [-]
 δ is declination angle of the sun [$^\circ$]
 ϕ is latitude of the station [$^\circ$]
 i is day number [-]
 n_1 is day number at the beginning of the month [-]
 n_2 is day number at the end of the month [-]

1.2 Method

An autoregressive with exogenous variables (ARX) is a powerful tool for modeling and analyzing the behavior of dynamic systems. The ARX were based on the concept of linear time-invariant systems, which are systems that can be described by linear differential equations. In an ARX model, the input and output of a system are related by a linear equation, and it is represented by the following equation:

$$y(t) = a_1 y(t-1) + \dots + a_{n_a} y(t-n_a) + b_1 u(t-n_k) + \dots + b_{n_b} u(t-n_b-n_k+1) + e(t) \quad (2.3)$$

- When $y(t)$ is output terms in the past
 n_a is number of needed for modeling
 n_b is number of zeros
 n_k is number of input terms in the past need for modeling
 $y(t-1) \dots y(t-n_a)$ is previous outputs on which the current output depends
 $u(t-n_k) \dots u(t-n_b-n_k+1)$ is previous and delayed inputs on which the current output depends
 $e(t)$ is the error

Artificial Neural Networks (ANN) are algorithms based on brain function and are used to model complicated patterns and forecast issues. ANN algorithm accepts only numeric and structured data. In this study, there are three layers in the network architecture: the input layer, the hidden layer (more than one), and the output layer. The structure of ANN method is given in Fig. 2. [7]

For the ARX approach, it is described as follows. Firstly, prediction equation for all months of 2018 was developed from the data of 2017. The inputs of ARX namely \bar{H} and exogenous variables (\bar{W} , \bar{AOD} , \bar{n} , \bar{O}_3 , \bar{H}_0) were delivered in to the model as shown in Fig. 3. Then, the monthly average daily global solar radiation (\bar{H}) of January, 2018 using the prediction equation was estimated. Finally, the calculated \bar{H} from the ARX was compared to that from the measurement and the discrepancy in terms of RMSD and MBD was investigated [8]. For \bar{H} of February, March, ..., December, 2018, the procedure similar for January, 2018 was applied. These procedures were repeated for the year of 2019, 2020, 2021 and 2022.

In the ANN approach, the input consisting of \bar{W} , \bar{AOD} , \bar{n} , \bar{O}_3 , \bar{H}_0 from 2017 was used as a training data and the output was \bar{H} , which was used to calculate \bar{H} of all months of the year 2018. The similar procedure, the data from 2018 was applied as a training input data for obtaining the output \bar{H} of the year 2019. The similar steps were performed for consecutive year of 2020, 2021 and 2022. The accuracy of ANN was evaluated by comparing \bar{H} derived from ANN and that collected from the measurement. After that the discrepancy in terms of RMSD and MBD was estimated. Finally, the RMSD and MBD from the two approaches were compared.

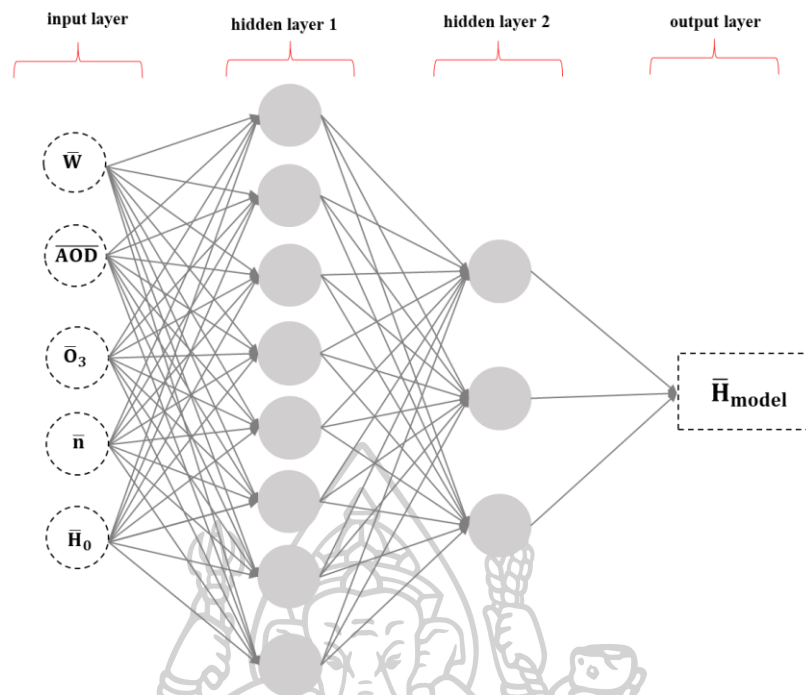


Fig. 2. The structure of ANN model.

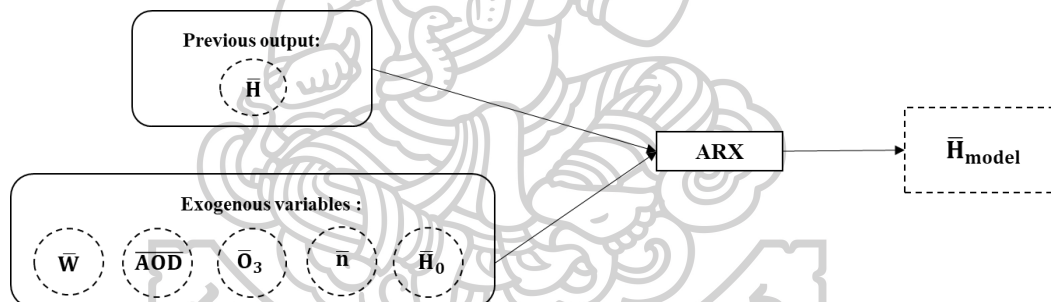


Fig. 3. The schematic diagram of ARX approach applied in this work.

2. Results and Discussion

The monthly average daily global solar radiation at Nakhon Pathom, Thailand encompassing the year 2018-2022 was predicted using the ARX and ANN. The comparisons of calculated \bar{H} and the measured \bar{H} from ARX and ANN for combined data were presented in Fig. 4. In other to compare the prediction accuracy between ARX and ANN of a solar radiation system, the discrepancy between the ARX prediction and the measurements, as same as the discrepancy between the ANN prediction and measurement in terms of RMSD and MBD of each year and the combined data were shown in Table 1.

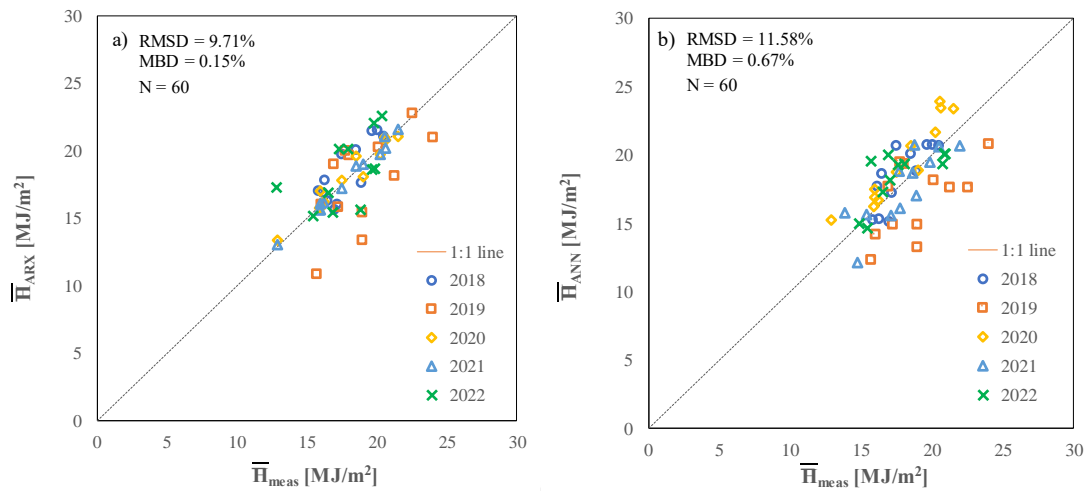


Fig. 4. Accuracy comparison of a) ARX and b) ANN.

Table 1 the discrepancy in term of RMSD and MBD from the predictions and from the measurements for ARX and ANN using data from Nakhon Pathom station in Thailand.

	Year	Discrepancy	
		RMSD (%)	MBD (%)
ARX	2018	7.68	3.49
	2019	15.15	-6.46
	2020	3.39	0.77
	2021	1.71	-0.14
	2022	6.41	-0.60
Combined data		9.71	0.15
ANN	2018	8.37	3.43
	2019	16.96	-11.71
	2020	10.45	8.78
	2021	8.21	-1.62
	2022	10.82	5.30
Combined data		11.58	0.67

From table 1, the RMSD and MBD for combined data using ARX were 9.71% and 0.15%, respectively. The ANN gives RMSD and MBD for the combined data of 11.58%

and 0.67%, respectively. It was clearly seen that ARX has RMSD and MBD less than that of ANN. This might be due to the fact that ANN required more data for training to arrive at the same accuracy as that of ARX.

3. Conclusion

In this work, the monthly average daily global solar radiation calculated from ARX and ANN approaches in Nakhon Pathom, Thailand during 2018-2022 were presented. The input variables were the monthly average daily global solar radiation in the previous year and the atmospheric parameters such as aerosols, water vapor, ozone and clouds. These input data can be obtained from both ground- and satellite-based data. The prediction accuracy in terms of RMSD and MBD between the ARX and ANN for the solar radiation system has been compared. It was found that the ARX predicted the monthly average daily global solar radiation more accurately than ANN for this system in Nakhon Pathom, Thailand. Comparing the result of the ARX, it is recommended that ARX could be used to predict the monthly average daily global solar radiation.

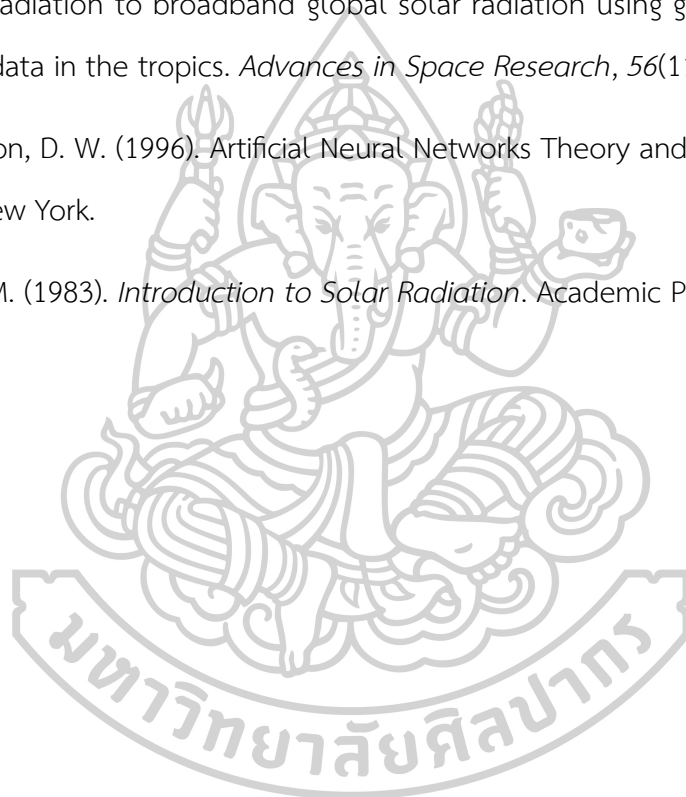
Acknowledgements

The author and co-authors of this paper would like to thank Faculty of Science, Silpakorn University for providing financial support to do this work both for the project and for the research assistance.

References

- [1] Duffie, J.A., Beckman, W.A., Blair, N. (2020). *Solar Engineering of Thermal process, Photovoltaics and wind* (5th Edition). New York, USA: John Wiley and Sons.
- [2] Pattarapanitchai, S., Janjai, S., Sirikaew, S., & Bala, B. K. (2022). Performance and ARX Modelling of a Solar Vapour Compression Refrigeration System. *Journal of Renewable Energy and Smart Grid Technology*, 17(1), 1–16.
- [3] Ljung, L. (1987). *System Identification: Theory for the user*. New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs.

- [4] Silva VLGd., Oliveira Filho D., Carlo JC and Vaz PN. (2022). An approach to solar radiation prediction using ARX and ARMAX models. *Front. Energy Res.* 10:822555.
- [5] Piri, J., & Kisi, O. (2015). Modelling solar radiation reached to the Earth using ANFIS, NN-ARX, and empirical models (Case studies: Zahedan and Bojnurd stations). *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 123, 39-47.
- [6] Janjai, S., Wattan, R., & Sripradit, A. (2015). Modeling the ratio of photosynthetically active radiation to broadband global solar radiation using ground and satellite-based data in the tropics. *Advances in Space Research*, 56(11), 2356-2364.
- [7] Patterson, D. W. (1996). *Artificial Neural Networks Theory and Application*, Printice Hall. New York.
- [8] Iqbal, M. (1983). *Introduction to Solar Radiation*. Academic Press, New York.



ภาคผนวก ง

Development of a method for calculating monthly average daily global solar radiation using the ARX approach based on data at Nakhon Pathom station during 2018-2022

Solar radiation data are usually required for designing solar energy systems [1]. As solar radiation varies according to atmospheric conditions, usually the average values of solar radiation is required. Usually design method monthly average daily solar radiation incident on collector surface per unit area in J/m^2 is needed [1]. This quantity could be obtained by converting the daily radiation on horizontal surface to the collector surface [1]. Therefore, monthly average daily global solar radiation on horizontal surface is an important quantity. Although this quantity could be obtained from measurements, the measurements are quite spare, especially in developing countries. The quantity is usually obtained using a modeling approach. A lot of models have been proposed to obtain monthly average daily global solar radiation on horizontal surface. Ångström [2] proposed a model for estimating daily solar radiation from sunshine duration data [3]. A member of scientists proposed to estimate solar irradiation from cloud cover data [4]. Many researches developed models for estimating solar irradiation from air temperature data [5]. However, the accuracy of the calculation from each model depend strongly on location under consideration. Up to now, there is no general model for estimating monthly average daily global solar radiation exists.

*This part of the thesis has been submitted to RAST

In this work, we proposed to estimate monthly average daily global solar radiation on horizontal surface \bar{H} by using the ARX approach as it is rather new and very limited work in this direction has been done. [6]

1. Materials and method

1.1. Materials

The materials used in this study are various group of data. The first group is global solar radiation data collected at Nakhon Pathom station (13.82° N, 100.04° E) during 2017-2022. The second group are monthly average daily precipitable water of all months at Nakhon Pathom station during 2017-2022. The third group is data on a monthly average daily aerosol optical depth (AOD) at 550 nm at Nakhon Pathom station for all months during 2017-2022. The fourth group is data on a monthly average daily total ozone column (O_3) at Nakhon Pathom station for all months during 2017-2022. The fifth group is the data on a monthly average daily cloud index for all months of the year 2017-2022 at Nakhon Pathom station. The last group is data on monthly average daily extraterrestrial solar radiation (H_0) at Nakhon Pathom station for all months during 2017-2022.

For the exogenous variables, we choose them to be a monthly average daily precipitable water (\bar{W}), a monthly average daily aerosol optical depth (\bar{AOD}), a monthly average daily total ozone column (\bar{O}_3), a monthly average daily cloud index (\bar{n}) and a monthly average daily extraterrestrial solar radiation (\bar{H}_0). The reason for choosing these variables because they have direct influence on the solar radiation.

2.2 Method

We proposed the model of \bar{H} as follows

$$\begin{aligned} \bar{H}(t) = & a_1\bar{H}(t-1) + a_2\bar{H}(t-2) + \dots + a_n\bar{H}(t-n_a) + b_1\bar{W}(t) + b_2\bar{AOD}(t) \\ & + b_3\bar{O}_3(t) + b_4\bar{n}(t) + b_5\bar{H}_0(t) \end{aligned} \quad (1)$$

where $\bar{H}(t)$ is monthly average daily global solar radiation of that month
 t is the actual month
 $(t - 1)$ is the quantity at one month before the actual month
 $(t - 2)$ is the quantity at two months before the actual month
 $(t - n_a)$ is the quantity at $t - n_a$ months before the actual month
 n_a is number of the output terms
 a_1, a_2, \dots, a_n are coefficients of the input terms
 b_1, b_2, \dots, b_n are coefficients of the exogenous variables

The method used in this work is described as follows. Firstly, the predicting equation of \bar{H} of the year 2018 for Nakhon Pathom station was developed from input and output data for the year 2017 and 2018. For 2018, we used only the variables of exogenous variables as input data. Secondly, ARX for the year 2018 was validated for all months of the year 2018 obtained from the predicting equation and those from the measurements. Thirdly, the predicting equation was used to estimate the monthly average daily global solar radiation. Then, the procedure for January, 2018 was use for of February, March, ..., December, 2018. Finally, the procedure was repeated for the year 2019, 2020, 2021 and 2022.

2. Results and Discussion

2.1. Modeling results

The ARX approach was implemented by using the MATLAB software. The predicting equations for 2018, 2019, 2020, 2021 and 2022 is shown in Table 1

Table 1 The predicting equations of monthly average daily global solar radiation \bar{H} for 2018, 2019, 2020, 2021 and 2022.

Year for which the predicting is used	The predicting equation
2018	$\bar{H}(t) = 0.0601\bar{H}(t-1) - 2.591\overline{AOD}(t) + 0.0283\bar{O}_3(t) - 0.791W(t) + 0.47H_0(t) - 9.676\bar{n}(t)$
2019	$\bar{H}(t) = 0.0309\bar{H}(t-1) - 0.0487\bar{H}(t-2) - 0.0016\bar{H}(t-3) - 2.628\overline{AOD}(t) + 0.0868\bar{O}_3(t) + 0.366W(t) - 0.084H_0(t) - 19.54\bar{n}(t)$
2020	$\bar{H}(t) = 0.0205\bar{H}(t-1) - 0.0662\bar{H}(t-2) - 0.9265\overline{AOD}(t) + 0.021\bar{O}_3(t) - 0.294W(t) + 0.486H_0(t) - 24.39\bar{n}(t)$
2021	$\bar{H}(t) = 0.0675\bar{H}(t-1) + 1.52\overline{AOD}(t) + 0.0096\bar{O}_3(t) - 0.3091W(t) + 0.52H_0(t) - 26.32\bar{n}(t)$
2022	$\bar{H}(t) = 0.2104\bar{H}(t-1) - 0.0021\bar{H}(t-2) + 2.927\overline{AOD}(t) - 0.0174\bar{O}_3(t) - 1.086W(t) + 0.825H_0(t) - 11.87\bar{n}(t)$

* t means the quantity of the actual month

$(t-1)$ means the quantity at one month before the actual month

$(t-2)$ means the quantity at two months before the actual month

$(t-3)$ means the quantity at three months before the actual month

3.2 Results of the validation

Comparisons between \bar{H} from ARX and that from the measurements is shown in Fig. 1.

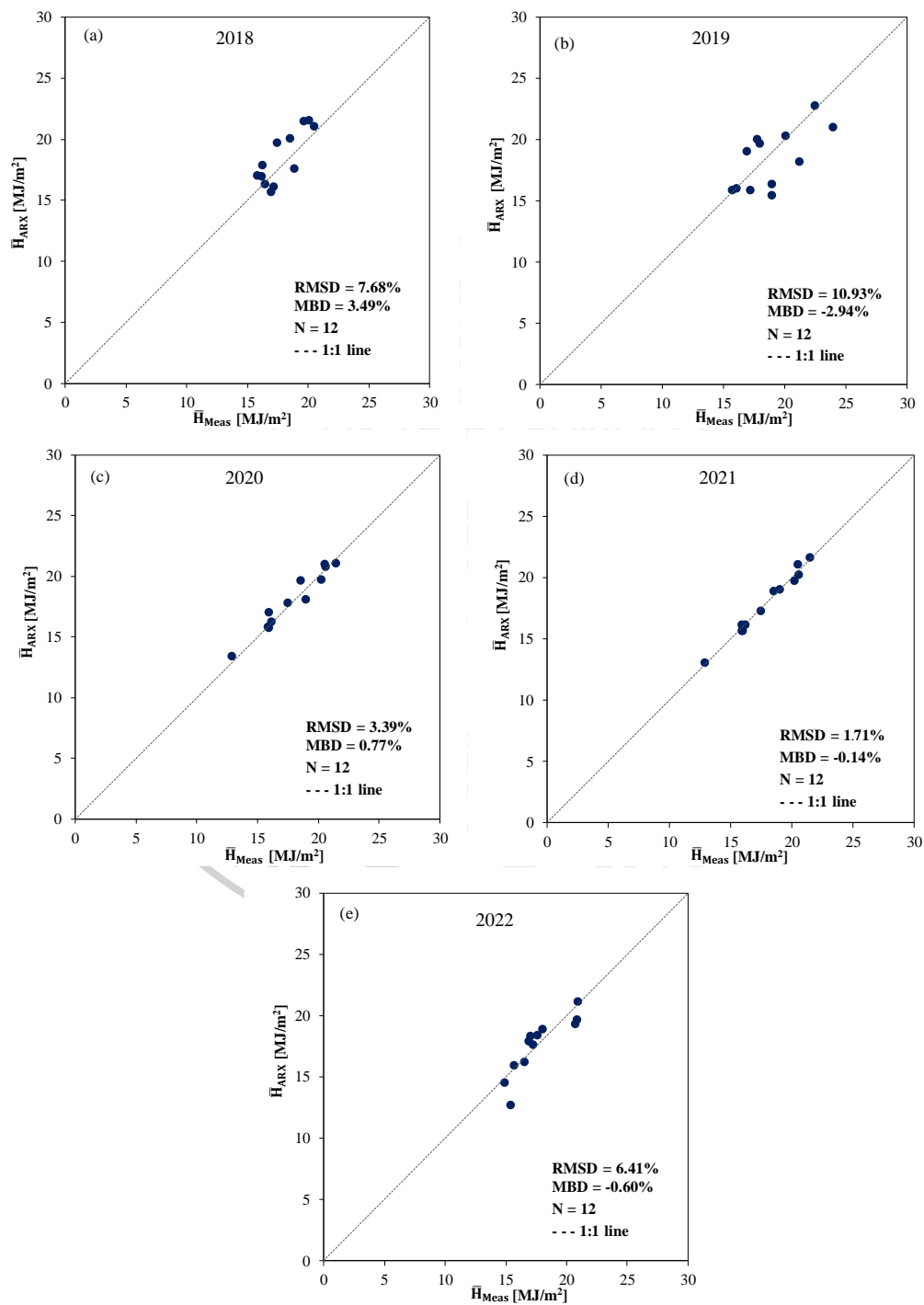


Fig. 1 Comparison of monthly average daily global solar radiation from ARX and that from the measurement for the year (a) 2018 (b) 2019 (c) 2020 (d) 2021 (e) 2022.

RMSD of the value of monthly average daily global solar radiation for all months and all station is 1.71% to 10.93% and MBD is -2.94% to 3.49%. The author researcher [6] did not predict \bar{H} . Therefore, we could not compare their results with ours. The means that the ARX model could be used to estimate monthly average daily global solar radiation with reasonable accuracy.

3. Conclusion

ARX model has been developed for estimating monthly average daily global solar radiation for all months of year 2018, 2019, 2020, 2021 and 2022 for Nakhon Pathom station in Thailand. The model could be used to estimate the solar radiation at these station with the RMSD 1.71% to 10.93% and MBD -2.94% to 3.49%. We concluded that are model performed with reasonable accuracy in estimating monthly average daily global solar radiation.

Acknowledgements

The author and co-authors of this paper would like to thank Faculty of Science, Silpakorn University for providing the funding to this work and The Faculty of Science of Silpakorn University gave also financial support to Miss Patcharat as a search assistance to this work. We would like to thank the Faculty of Science of Silpakorn University for this support.

References

- [1] Duffie, J. A., Beckman, W. A. & Blair N. (2020). *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind (5th Edition)*. New York, United States: Wiley.
- [2] Ångström, A. (1924). Solar and terrestrial radiation, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 50, 121-126.
- [3] Sahin, A. D. & Sen, Z. (2008). Solar irradiation estimation methods from sunshine and cloud cover data. In Badescu, V. (ed.) *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface*. Berlin, Springer, 145–173.

- [4] Akinoglu, B.G. (2008). Recent Advances in the Relations between Bright Sunshine Hours and Solar Irradiation. In Badescu, V. (ed.) Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface. Berlin, Springer, 115–143.
- [5] Paulescu, M. (2008). Solar irradiation via air temperature data. In Badescu V. (ed). Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface: Berlin, Springer, 175–192.
- [6] Silva VLGd., Oliveira Filho D., Carlo JC and Vaz PN. (2022). An approach to solar radiation prediction using ARX and ARMAX models. Front. Energy Res. 10:822555.



รายการอ้างอิง

- Andrews, D. G. (2010). *An introduction to atmospheric physics*: Cambridge University Press.
- Ångström, A. (1929). On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air. *Geografiska Annaler*, 11(2), 156-166.
- Billings, C., Lauber, J., Funkhouser, H., Lyman, E., & Huff, E. (1976). *NASA aviation safety reporting system*. Retrieved from
- Frederick, J. E. (2008). *Principles of atmospheric science*: Jones & Bartlett Learning.
- Iqbal, M. (1983). *An introduction to solar radiation*. New York: Academic Press.
- Leckner, B. (1978). The spectral distribution of solar radiation at the earth's surface—elements of a model. *Solar Energy*, 20(2), 143-150.
- Ljung, L. (1987). *Theory for the user. System identification*. New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Niu, F., & O'Neill, Z. (2017). *Recurrent neural network based deep learning for solar radiation prediction*. Paper presented at the Proceedings of the 15th IBPSA Conference, San Francisco, CA, USA.
- Paltridge, G. W., & Platt, C. M. R. (1976). *Radiative processes in meteorology and climatology*: Elsevier Scientific Pub. C.
- Peng, Z., Letu, H., Wang, T., Shi, C., Zhao, C., Tana, G., . . . Shang, H. (2020). Estimation of shortwave solar radiation using the artificial neural network from Himawari-8 satellite imagery over China. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 240, 106672.
- Premalatha, M., & Naveen, C. (2018). Analysis of different combinations of meteorological parameters in predicting the horizontal global solar radiation with ANN approach: A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 248-258.
- Saha, A., Mallet, M., Roger, J. C., Dubuisson, P., Piazzola, J., & Despiau, S. (2008). One year measurements of aerosol optical properties over an urban coastal site: Effect on local direct radiative forcing. *Atmospheric Research*, 90(2-4), 195-202.

- Silva, R. A., & Brito, M. (2018). Impact of network layout and time resolution on spatio-temporal solar forecasting. *Solar Energy*, 163, 329-337.
- Silva, V. L. G. d., Oliveira Filho, D., Carlo, J. C., & Vaz, P. N. (2022). An Approach to Solar Radiation Prediction Using ARX and ARMAX Models. *Frontiers in Energy Research*, 10, 110.
- 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.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	เพชรรัตน์ พุ่มพวง
วัน เดือน ปี เกิด	10 เมษายน 2541
วุฒิการศึกษา	จบการศึกษาระดับมัธยม โรงเรียนหัวไทรบำรุงราษฎร์ ปี พ.ศ. 2559 จบการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์) ปี พ.ศ. 2563
ที่อยู่ปัจจุบัน	31 หมู่ 8 ต.บ้านราม อำเภอหัวไทร จ.นครศรีธรรมราช 80170
ผลงานตีพิมพ์	1. เพชรรัตน์ พุ่มพวง, กรทิพย์ ไต้ะสิงห์และเสริม จันท์ฉาย, วิธีการประมาณค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงภายใต้สภาพท้องฟ้ามีเมฆบางส่วนที่สถานีนครปฐมโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม, การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมิกราช ครั้งที่ 12, 23 พฤศจิกายน 2565. 2. เพชรรัตน์ พุ่มพวง, วรพันธุ์ การชนะชาติ, กรทิพย์ ไต้ะสิงห์และ เสริม จันท์ฉาย, การประมาณค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนโดยใช้แบบจำลองเออาร์เอกซ์: กรณีศึกษาที่สถานีนครปฐม. การประชุมวิชาการระดับชาติวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรม (มหาวิทยาลัยแม่โจ้) ครั้งที่ 4, 27 มีนาคม 2566.

