



การศึกษาลักษณะเชิงภูมิอากาศของรังสีรวมในภูมิภาคหลักของประเทศไทย

โดย

นางสาวกนกวรรณ รุ่งหทัยธรรม



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2

ภาควิชาฟิสิกส์

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาลักษณะเชิงภูมิอากาศของรังสีรวมในภูมิภาคหลักของประเทศไทย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2

ภาควิชาฟิสิกส์

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

A STUDY OF CLIMATOLOGICAL CHARACTERISTICS OF GLOBAL SOLAR
RADIATION IN THE MAIN REGIONS OF THAILAND



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Science PHYSICS
Department of PHYSICS
Academic Year 2024
Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ	การศึกษาลักษณะเชิงภูมิอากาศของรังสีรวมในภูมิภาคหลักของประเทศไทย
โดย	นางสาวกนกวรรณ รุ่งหทัยธรรม
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กรทิพย์ โต๊ะสิงห์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันท์ฉาย

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กรกช ชื่นจิรกุล)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประนมกร ชูศรี)
..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กรทิพย์ โต๊ะสิงห์)
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันท์ฉาย)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อิสระ มะศิริ)

660720006 : ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2

คำสำคัญ : รังสีรวม, รังสีอาทิตย์, ลักษณะทางภูมิศาสตร์, ดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศ, แบบจำลอง

นางสาว กนกวรรณ รุ่งหทัยธรรม: การศึกษาลักษณะเชิงภูมิอากาศของรังสีรวมในภูมิภาคหลักของประเทศไทย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กรทิพย์ โต๊ะสิงห์

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาลักษณะเชิงภูมิอากาศระยะยาวของรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนใน 4 ภูมิภาคหลักของประเทศไทย ได้แก่ สถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี สถานีนครปฐม และสถานีสงขลา ผลจากการศึกษาพบว่า ตลอดระยะเวลา 30 ปี สถานีเชียงใหม่ สถานีนครปฐม และสถานีสงขลา แนวโน้มของรังสีรวมมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่สำหรับสถานีอุบลราชธานี มีแนวโน้มของรังสีรวมลดลงเล็กน้อย จากนั้นทำการวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติของดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศ (clearness index) ในประเทศไทย พบว่าส่วนใหญ่มีสภาพท้องฟ้าแบบมีเมฆปกคลุมบางส่วนไปจนถึงท้องฟ้าแจ่มใส นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้ทำการพัฒนาแบบจำลองอย่างง่ายซึ่งเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งดวงอาทิตย์ สำหรับประมาณค่าความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน โดยใช้ข้อมูลจาก 4 สถานีวัดในภูมิภาคหลัก เพื่อนำไปทำนายค่าความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนในพื้นที่อื่น ๆ ของประเทศไทย จากนั้นทำการทดสอบแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น โดยใช้ข้อมูลจาก 4 สถานีหลักที่กล่าวมาข้างต้นและอีก 10 สถานีเพิ่มเติม ได้แก่ สถานีราชบุรี สถานีบุรีรัมย์ สถานีนครศรีธรรมราช สถานีสตูล สถานีชัยภูมิ สถานีอุทัยธานี สถานีพะเยา สถานีตาก สถานีอุดรธานี และสถานีรายงานดอยอินทนนท์ ผลการทดสอบพบว่าค่าความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดมีค่าความแตกต่างในรูปของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง (root mean square difference, RMSD) ในช่วง 4.87% – 13.82% และความเอนเอียงเฉลี่ย (mean bias difference, MBD) อยู่ในช่วง -0.01% – 2.47% จากผลของการวิจัยนี้ สรุปได้ว่าการวิเคราะห์ลักษณะของรังสีรวมในประเทศไทยและการพัฒนาแบบจำลอง สามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับวางแผนด้านพลังงานแสงอาทิตย์ของประเทศไทยได้

660720006 : Major PHYSICS

Keyword : Global solar radiation, Solar radiation, Climatological Characteristic, Clearness index, Model

MISS Kanokwan RUNGHATHAITHUM : A study of climatological characteristics of global solar radiation in the main regions of Thailand Thesis advisor : Assistant Professor Korntip Tohsing, Ph.D.

In this research, a long-term climatological characteristics of the monthly average daily global solar radiation at 4 main regions of Thailand, namely Chiang Mai, Ubon Ratchathani, Nakhon Pathom, and Songkhla were investigated. The results over a 30-year period showed that the global solar radiation trends at Chiang Mai, Nakhon Pathom, and Songkhla slightly increased, while the Ubon Ratchathani exhibited a slightly decreasing trend. A statistical analysis of the clearness index using long-term data across Thailand revealed that most areas experienced different sky conditions ranged from partly cloudy to sunny skies. In addition, a simplified model as a function of the solar position was developed for estimating the monthly average hourly global solar radiation. This model was constructed using the data from the 4 monitoring stations and was applied to predict the global solar radiation in other regions of Thailand. The model validation using the data from 4 stations mentioned above and 10 additional stations, namely Ratchaburi, Buriram, Nakhon Si Thammarat, Satun, Chaiphum, Uthai Thani, Phayao, Tak, Udon Thani, and Doi Inthanon presented that the calculated monthly average hourly global solar radiation from the model and that obtained from the measurement delivered a root mean square difference (RMSD) ranged from 4.87% to 13.82%, and a mean bias difference (MBD) ranged from -0.01% to 2.47%. In conclusion, the analysis of the global solar radiation characteristics and the development of the model for gathering the monthly average hourly global solar radiation in this study can be effectively applied to support solar energy planning in Thailand.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ซึ่งเป็น การศึกษาลักษณะเชิงภูมิอากาศของรังสีรวมใน 4 ภูมิภาคของประเทศไทย โดยได้รับความอนุเคราะห์ ข้อมูลจากห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์และห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์บรรยากาศ ภาควิชา ฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ซึ่งข้าพเจ้าขอแสดงความขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรทิพย์ โต๊ะสิงห์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ ปฏิบัติหลัก และขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.เสริม จันทน์ฉาย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่ ได้ กรุณาให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และการสนับสนุนตลอดระยะเวลาของการดำเนินงานวิจัย ตลอดจน ช่วยส่งเสริมให้ข้าพเจ้ามีความคิดอย่างเป็นระบบและพัฒนาศักยภาพทางวิชาการอย่างต่อเนื่อง

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ได้ให้เกียรติในการประเมินผลงาน พร้อมทั้งให้ข้อเสนอแนะแก่ข้าพเจ้า ซึ่งช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์และมีคุณภาพยิ่งขึ้น

นอกจากนี้ ข้าพเจ้าขอแสดงความขอบคุณต่อคณาจารย์และบุคลากรภายในห้องปฏิบัติการ วิจัยฟิสิกส์บรรยากาศ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้การสนับสนุนและ อำนวยความสะดวกในการศึกษาค้นคว้าและดำเนินงานวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณครอบครัวที่เป็นกำลังใจสำคัญและเพื่อนนักศึกษาทุกคนที่ได้ ร่วมแลกเปลี่ยนความรู้ ความคิดเห็น และให้กำลังใจตลอดระยะเวลาของการศึกษาและอยู่เคียงข้าง ข้าพเจ้าด้วยความเข้าใจและความรัก จนข้าพเจ้าสามารถผ่านพ้นทุกอุปสรรคและดำเนินงานวิจัยฉบับนี้ จนสำเร็จลุล่วง

กนกวรรณ รุ่งหทัยธรรม

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 พื้นฐานเกี่ยวกับรังสีอาทิตย์.....	4
2.1.1 แหล่งกำเนิดรังสีอาทิตย์.....	4
2.1.2 รังสีอาทิตย์	7
2.1.3 ชนิดของรังสีอาทิตย์ที่แผ่มายังพื้นผิวโลก	8
2.2 สมบัติทางเรขาคณิตระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์.....	9
2.2.1 การเดินทางของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า.....	9
2.2.2 การบอกเวลาและตำแหน่งของดวงอาทิตย์.....	13
2.2.3 มุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ขึ้นและตกบนระนาบในแนวระดับ	18
2.2.4 แฟกเตอร์ปรับแก้ค่าระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ (eccentricity correction factor).....	19

2.3 รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (extraterrestrial solar radiation).....	19
2.3.1 ค่าคงที่สุริยะ (solar constant).....	20
2.3.2 การคำนวณรังสีนอกบรรยากาศโลกบนระนาบในแนวระดับ	21
2.3.2.1 รังสีอาทิตย์รายชั่วโมงบนระนาบในแนวระดับ.....	21
2.3.2.2 รังสีอาทิตย์รายวันบนระนาบในแนวระดับ	24
2.4 ดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศ (clearness Index)	24
2.4.1 ดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศรายชั่วโมง	25
2.4.2 ดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศรายวัน.....	25
2.4.3 ดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศรายวันเฉลี่ยต่อเดือน.....	25
2.4.4 การจำแนกสภาพท้องฟ้าตามดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศ	26
2.5 เครื่องวัดรังสีรวม.....	26
2.5.1 หลักการทำงานของเครื่องวัดรังสีรวม.....	27
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	28
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานและผลการวิจัย	33
3.1 ข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์.....	33
3.1.1 พื้นที่ศึกษาวิจัย.....	33
3.1.2 เครื่องวัดและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล	36
3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	41
3.2.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติเชิงภูมิอากาศระยะยาวของรังสีรวมจากสถานีวัด 4 แห่ง ในภูมิภาคหลักของประเทศไทย.....	41
3.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติของดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศ (clearness index) ในประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลรังสีรวมระยะยาว.....	42
3.2.3 การพัฒนาแบบจำลองสำหรับการประมาณค่ารังสีรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน.....	43
3.2.4 การทดสอบสมรรถนะของแบบจำลอง	59

3.3 ผลการดำเนินงานวิจัย	60
3.3.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติเชิงภูมิอากาศระยะยาวของรังสีรวมจากสถานีวัด 4 สถานีในภูมิภาคหลักของประเทศไทย.....	60
3.3.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติของดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศ (clearness index) ในประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลรังสีรวมระยะยาว	69
3.3.3 แบบจำลองสำหรับการประมาณค่ารังสีรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน	74
3.3.4 ผลการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองจากตัวบ่งชี้ทางสถิติ.....	74
บทที่ 4 สรุป.....	84
รายการอ้างอิง	87
ประวัติผู้เขียน	90



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 มุมที่ใช้บอกตำแหน่งดวงอาทิตย์บนระนาบในแนวระดับอ้างอิง	14
ตารางที่ 2 การจำแนกท้องฟ้าตามดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศ (Khorasanizadeh et al., 2014)	26
ตารางที่ 3 ตำแหน่งของสถานีวัดสำหรับงานวิจัย	34
ตารางที่ 4 ระยะเวลาและการแบ่งชุดข้อมูลสำหรับการสร้างแบบจำลองและทดสอบแบบจำลอง	45
ตารางที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์ a และ b สำหรับแต่ละเดือนสำหรับสถานีวัด 4 แห่ง	54
ตารางที่ 6 อัตราการเปลี่ยนแปลงแบบปีต่อปีสำหรับสถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี สถานีนครปฐม และสถานีสงขลา	63
ตารางที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์ a' a'' b' และ b'' สำหรับแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น	74
ตารางที่ 8 ผลการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองพัฒนาขึ้น	82



สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1 โครงสร้างภายในดวงอาทิตย์ (เสริม จันทรฉาย, 2560).....	5
รูปที่ 2 แผนภาพแสดงสมดุลระหว่างแรงโน้มถ่วงและแรงดันจากพลังงานฟิวชันภายในดวงอาทิตย์ ...	6
รูปที่ 3 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความยาวคลื่นในช่วงต่าง ๆ (Frauenfelder, 2021).....	6
รูปที่ 4 สเปกตรัมของรังสีอาทิตย์ที่บริเวณขอบชั้นบรรยากาศ (extraterrestrial sunlight) และที่พื้นผิวโลก (terrestrial sunlight) (Wang & Yu, 2023)	7
รูปที่ 5 แผนภาพแสดงรังสีอาทิตย์ที่ส่องผ่านมายังพื้นผิวโลก	8
รูปที่ 6 ทรวงกลมท้องฟ้า.....	10
รูปที่ 7 ลักษณะท้องฟ้าที่เราเห็นบนโลก (เสริม จันทรฉาย, 2560).....	11
รูปที่ 8 แผนภาพแสดงการหมุนของโลกและการสังเกตวัตถุบนท้องฟ้าในทรวงกลมท้องฟ้า (เสริม จันทรฉาย, 2560).....	11
รูปที่ 9 วงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์.....	12
รูปที่ 10 ทางเดินของดวงอาทิตย์บนระนาบศูนย์สูตรท้องฟ้า (เสริม จันทรฉาย, 2560).....	13
รูปที่ 11 การบอกตำแหน่งดวงอาทิตย์โดยใช้ระบบระนาบในแนวระดับอ้างอิง.....	14
รูปที่ 12 การบอกตำแหน่งดวงอาทิตย์โดยใช้ระบบระนาบศูนย์สูตรอ้างอิง (เสริม จันทรฉาย, 2560).....	15
รูปที่ 13 การแปรค่าในรอบปีของมุมเดคลิเนชัน (Padilla, 2011).....	16
รูปที่ 14 แผนที่การแบ่งเขตเวลาโลก.....	17
รูปที่ 15 การเดินทางของดวงอาทิตย์บนระนาบในแนวระดับตั้งแต่ดวงอาทิตย์ขึ้นจนถึงดวงอาทิตย์ตก (Wald, 2018).....	18
รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์.....	20
รูปที่ 17 การแปรค่าของรังสีอาทิตย์ทั้งหมด (TSI) รายวันและจุดมืด (Sunspot) รายวัน ช่วงปี ค.ศ. 1978 – 2003 (Gueymard, 2004).....	21

รูปที่ 18 แผนภาพรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกที่ตกกระทบบนระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางของรังสีอาทิตย์ (I_{0n}) กับรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกบนระนาบในแนวระดับ (I_0).....	22
รูปที่ 19 เครื่องวัดรังสีรวมหรือไพราโนมิเตอร์แบบเทอร์โมไฟล์ผลิตโดยบริษัท Kipp & Zonen	27
รูปที่ 20 การตอบสนองต่อสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ของเครื่องวัดรังสีรวม (Rodziejewicz & Rajfur, 2019)	28
รูปที่ 21 การปรับดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศให้เหมาะสมต่อการแจกแจงทางสถิติ.....	29
รูปที่ 22 การแจกแจงความถี่และความถี่สะสมของ K_t ในเมืองอลิซ ประเทศแอฟริกาใต้ ในช่วงปี ค.ศ. 2017 – 2020 (Apeh et al., 2021)	30
รูปที่ 23 การประมาณค่ารังสีอาทิตย์รายชั่วโมงโดยใช้แบบจำลองที่เลือกไว้สำหรับพื้นที่ Bambili (Yungho et al., 2024)	32
รูปที่ 24 ตำแหน่งที่ตั้งของสถานีวัด 14 แห่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยสัญลักษณ์สามเหลี่ยมสีเหลืองแสดงตำแหน่งของสถานีวัด 4 แห่งในภูมิภาคหลัก และวงกลมสีแดงแสดงสถานีวัดเพิ่มเติม 10 สถานี	35
รูปที่ 25 เครื่องไพราโนมิเตอร์ของ 14 สถานีวัดทั่วประเทศไทย.....	37
รูปที่ 26 เครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) ของบริษัท Yokogawa รุ่น DX2000.....	38
รูปที่ 27 เครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) ของบริษัท Yokogawa รุ่น GM10	38
รูปที่ 28 ตัวอย่างการแปรค่าของความเข้มรังสีรวมของสถานีเชียงใหม่ตั้งแต่ 5:00 – 19:00 ในวันที่ 13 เมษายน ค.ศ. 2024.....	39
รูปที่ 29 ตัวอย่างการแปรค่าของความเข้มรังสีรวมของสถานีอุบลราชธานีตั้งแต่ 5:00 – 19:00 ในวันที่ 13 เมษายน ค.ศ. 2024	40
รูปที่ 30 ตัวอย่างการแปรค่าของความเข้มรังสีรวมของสถานีนครปฐมตั้งแต่ 5:00 – 19:00 ในวันที่ 13 เมษายน ค.ศ. 2024.....	40
รูปที่ 31 ตัวอย่างการแปรค่าของความเข้มรังสีรวมของสถานีสงขลาตั้งแต่ 5:00 – 19:00 ในวันที่ 13 เมษายน ค.ศ. 2024	41
รูปที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนต่อรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนต่อรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนต่อรังสีอาทิตย์นอก	

บรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือน $\left(\frac{\bar{I}/\bar{H}}{\bar{I}_0/\bar{H}_0} \right)$ กับโคไซน์ของมุมชั่วโมง ($\cos \omega_i$) ตั้งแต่เดือน มกราคมจนถึงมิถุนายนสำหรับสถานีสงขลา.....	52
รูปที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนต่อรังสีรวมรายวัน เฉลี่ยต่อเดือนต่อรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนต่อรังสีอาทิตย์นอก บรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือน $\left(\frac{\bar{I}/\bar{H}}{\bar{I}_0/\bar{H}_0} \right)$ กับโคไซน์ของมุมชั่วโมง ($\cos \omega_i$) ตั้งแต่เดือน กรกฎาคมจนถึงธันวาคมสำหรับสถานีสงขลา.....	53
รูปที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ a และมุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตกของแต่ละเดือนของ สถานีเชียงใหม่.....	55
รูปที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ b และมุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตกของแต่ละเดือนของ สถานีเชียงใหม่.....	55
รูปที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ a และมุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตกของแต่ละเดือนของ สถานีอุบลราชธานี.....	56
รูปที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ b และมุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตกของแต่ละเดือนของ สถานีอุบลราชธานี.....	56
รูปที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ a และมุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตกของแต่ละเดือนของ สถานีนครปฐม.....	57
รูปที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ b และมุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตกของแต่ละเดือนของ สถานีนครปฐม.....	57
รูปที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ a และมุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตกของแต่ละเดือนของ สถานีสงขลา.....	58
รูปที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ b และมุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตกของแต่ละเดือนของ สถานีสงขลา.....	58
รูปที่ 48 การแปรค่าระยะยาวของรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (เส้นสีดำ) และค่าเฉลี่ยรายปี (เส้นสี แดง) ของสถานีเชียงใหม่.....	61
รูปที่ 49 การแปรค่าระยะยาวของรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (เส้นสีดำ) และค่าเฉลี่ยรายปี (เส้นสี แดง) ของสถานีอุบลราชธานี.....	61

รูปที่ 50 การแปรค่าระยะยาวของรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (เส้นสีดำ) และค่าเฉลี่ยรายปี (เส้นสีแดง) ของสถานีนครปฐม	62
รูปที่ 51 การแปรค่าระยะยาวของรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (เส้นสีดำ) และค่าเฉลี่ยรายปี (เส้นสีแดง) ของสถานีสงขลา.....	62
รูปที่ 52 อัตราการเปลี่ยนแปลงแบบปีต่อปีสำหรับสถานีเชียงใหม่	65
รูปที่ 53 อัตราการเปลี่ยนแปลงแบบปีต่อปีสำหรับสถานีอุบลราชธานี	65
รูปที่ 54 อัตราการเปลี่ยนแปลงแบบปีต่อปีสำหรับสถานีนครปฐม	65
รูปที่ 55 อัตราการเปลี่ยนแปลงแบบปีต่อปีสำหรับสถานีสงขลา	66
รูปที่ 56 แนวโน้มการแปรค่าระยะยาวของรังสีรวมเฉลี่ยรายปีของสถานีเชียงใหม่	67
รูปที่ 57 แนวโน้มการแปรค่าระยะยาวของรังสีรวมเฉลี่ยรายปีของสถานีอุบลราชธานี	67
รูปที่ 58 แนวโน้มการแปรค่าระยะยาวของรังสีรวมเฉลี่ยรายปีของสถานีนครปฐม	68
รูปที่ 59 แนวโน้มการแปรค่าระยะยาวของรังสีรวมเฉลี่ยรายปีของสถานีสงขลา	68
รูปที่ 60 การแจกแจงความถี่สะสม (f) ของดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศรายวัน (K_T) สำหรับสถานีเชียงใหม่ เมื่อ $\bar{K}_T$ เป็นดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศรายวันเฉลี่ยต่อเดือน	70
รูปที่ 61 การแจกแจงความถี่สะสม (f) ของดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศรายวัน (K_T) สำหรับสถานีอุบลราชธานี เมื่อ $\bar{K}_T$ เป็นดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศรายวันเฉลี่ยต่อเดือน	71
รูปที่ 62 การแจกแจงความถี่สะสม (f) ของดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศรายวัน (K_T) สำหรับสถานีนครปฐม เมื่อ $\bar{K}_T$ เป็นดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศรายวันเฉลี่ยต่อเดือน	72
รูปที่ 63 การแจกแจงความถี่สะสม (f) ของดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศรายวัน (K_T) สำหรับสถานีสงขลา เมื่อ $\bar{K}_T$ เป็นดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศรายวันเฉลี่ยต่อเดือน	73
รูปที่ 64 ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองและการวัดของสถานีเชียงใหม่.....	75
รูปที่ 65 ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองและการวัดของสถานีอุบลราชธานี.....	75
รูปที่ 66 ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองและการวัดของสถานีนครปฐม.....	76

รูปที่ 67 ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองและการวัดของสถานี สงขลา.....	76
รูปที่ 68 ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองและการวัดของสถานี ราชบุรี.....	77
รูปที่ 69 ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองและการวัดของสถานี บุรีรัมย์	77
รูปที่ 70 ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองและการวัดของสถานี นครศรีธรรมราช.....	78
รูปที่ 71 ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองและการวัดของสถานีสตูล	78
รูปที่ 72 ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองและการวัดของสถานี ชัยภูมิ.....	79
รูปที่ 73 ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองและการวัดของสถานี อุทัยธานี.....	79
รูปที่ 74 ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองและการวัดของสถานี พะเยา	80
รูปที่ 75 ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองและการวัดของสถานีตาก	80
รูปที่ 76 ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองและการวัดของสถานี อุดรธานี	81
รูปที่ 77 ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองและการวัดของสถานีโดย อินทนนท์ กองทัพอากาศ	81

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ดวงอาทิตย์มีการถ่ายเทพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ ตั้งแต่ช่วงรังสีคลื่นสั้นไปจนถึงรังสีคลื่นยาว ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.3 - 3.0 ไมโครเมตร โดยการถ่ายเทพลังงานดังกล่าวมีทั้งในรูปรังสีและแสงสว่าง ซึ่งสามารถเรียกโดยทั่วไปว่า รังสีอาทิตย์ ซึ่งการแผ่รังสีอาทิตย์บริเวณนอกชั้นบรรยากาศโลกจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,366.1 วัตต์ต่อตารางเมตร สามารถเรียกค่าการแผ่รังสีดังกล่าวว่า ค่าคงที่สุริยะ (solar constant) เมื่อรังสีอาทิตย์เคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศมายังพื้นผิวโลกจะถูกองค์ประกอบต่าง ๆ ในบรรยากาศ เช่น โมเลกุลของอากาศ ฝุ่น ละออง และเมฆ กระเจิงและดูดกลืน โดยรังสีที่เหลือและพุ่งตรงมายังพื้นผิวโลก เรียกว่า รังสีตรง (direct radiation) เป็นรังสีอาทิตย์ที่ทะลุผ่านชั้นบรรยากาศลงสู่พื้นผิวโลก โดยไม่เกิดอันตรกิริยากับอะตอมของธาตุใด ๆ ในชั้นบรรยากาศและตกกระทบบนผิวรับรังสีด้วยทิศทางที่แน่นอน ส่วนรังสีอาทิตย์ที่เกิดจากการกระเจิงโดยองค์ประกอบต่าง ๆ ทางบรรยากาศ เรียกว่า รังสีกระจาย (diffuse radiation) เป็นรังสีที่เกิดการชนกับอะตอมของธาตุต่าง ๆ ในชั้นบรรยากาศ ทำให้เกิดการกระจายของแสง ทำให้รังสีดังกล่าวมีทิศทางเปลี่ยนแปลงไป และสามารถเรียกผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจายโดยทั่วไปว่า รังสีอาทิตย์หรือรังสีรวม (global radiation) ซึ่งรังสีอาทิตย์นี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาสภาพภูมิอากาศและสภาพของระบบนิเวศทางธรรมชาติได้ หรือสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่มีใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ดังนั้นการศึกษาและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติที่เกี่ยวกับความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ส่องมายังพื้นผิวโลกในแต่ละพื้นที่ รวมไปถึงลักษณะการแปรค่าในช่วงเวลาต่าง ๆ ของความเข้มรังสีอาทิตย์จึงมีความสำคัญอย่างมากในการดำรงชีวิตของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ

ในปัจจุบันพลังงานจากรังสีอาทิตย์สามารถนำไปใช้ในการผลิตพลังงานในการดำรงชีวิตของมนุษย์อย่างแพร่หลาย ซึ่งพลังงานจากรังสีอาทิตย์ที่นำมาใช้งานส่วนใหญ่นำมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าและผลิตความร้อน โดยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานทางเลือกที่มีความยั่งยืนและสามารถใช้ได้อย่างไม่จำกัด และไม่ก่อเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การนำพลังงานแสงอาทิตย์ไปประยุกต์ใช้สามารถแบ่งเป็น การนำความร้อนจากแสงอาทิตย์มาใช้งานโดยตรง เช่น ระบบการผลิตน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ ตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ และเตาพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น และการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เพื่อการผลิตไฟฟ้า เป็นการผลิตไฟฟ้าโดยอาศัยพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้มาจากแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ โดยใช้วิธีการโฟโตโวลตาอิก (photovoltaic) ในการ

เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงโดยใช้เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) ในการประยุกต์พลังงานแสงอาทิตย์แสงอาทิตย์ไปใช้งานด้านต่าง ๆ ที่กล่าวมา จำเป็นต้องทราบความเข้มรังสีอาทิตย์ที่บริเวณนั้น ๆ ซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้เครื่องวัดรังสีรวมหรือเครื่องไพราโนมิเตอร์ (pyranometer) และในงานด้านพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้กล่าวมาในข้างต้น ส่วนใหญ่ต้องการข้อมูลรังสีรวมเป็นรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน แต่โดยทั่วไปแล้วข้อมูลที่ถูกบันทึกและรายงานจะเป็นค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน ทำให้มีนักวิจัยในพื้นที่ต่าง ๆ นำเสนอการคำนวณค่ารังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนในบริเวณที่ทำการศึกษาคือข้อมูลรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่มีอยู่ แต่สำหรับประเทศไทยยังมีงานวิจัยในเรื่องนี้น้อย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูลรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่สถานีวัด 4 แห่งในภูมิภาคหลักของประเทศไทย ซึ่งติดตั้งโดยห้องปฏิบัติการฟิสิกส์บรรยากาศ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร สำหรับนำมาใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติของพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลระยะยาวเป็นเวลา 30 ปี และทำการพัฒนาแบบจำลองสำหรับประมาณค่ารังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนสำหรับประเทศไทย จากนั้นทำการทดสอบแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น โดยใช้ข้อมูลจากสถานีวัดทั้ง 4 แห่งในภูมิภาคหลักและจากสถานีวัดเพิ่มเติมอีก 10 แห่งทั่วประเทศ เพื่อนำแบบจำลองที่ได้ไปใช้คำนวณหาความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนในบริเวณอื่น ๆ ที่ไม่ได้มีการวัดและนำข้อมูลนี้ไปประยุกต์ใช้สำหรับอุปกรณ์หรือเทคโนโลยีต่าง ๆ ในงานด้านพลังงานแสงอาทิตย์ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1) เพื่อศึกษาลักษณะทางสถิติเชิงภูมิอากาศระยะยาวของรังสีรวมจากข้อมูลจากสถานีวัดใน 4 ภูมิภาคหลักของประเทศไทย
- 2) เพื่อศึกษาลักษณะทางสถิติของดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศ (clearness index) ในประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลรังสีรวมระยะยาว
- 3) เพื่อพัฒนาแบบจำลองรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนอย่างง่าย โดยใช้ข้อมูลจากสถานีวัด 4 ภูมิภาคหลักของประเทศไทยและทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองกับข้อมูลจากสถานีวัด 14 สถานีทั่วประเทศไทย

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

งานวิจัยนี้มีการใช้ข้อมูลจากสถานีวัด 4 ภูมิภาคหลักของประเทศไทย ในช่วงปี ค.ศ. 1995 - 2024 ในการวิเคราะห์ลักษณะเชิงภูมิอากาศระยะยาวของรังสีอาทิตย์ในประเทศไทยและใช้ในการ

พัฒนาแบบจำลองรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน (ค.ศ. 1995 – 2023) และทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น (ค.ศ. 2024) ได้แก่

1. ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่
2. ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง จังหวัดอุบลราชธานี
3. ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา
4. ลานทดลองพลังงานแสงอาทิตย์ ดาดฟ้าอาคารวิทยาศาสตร์ 1 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม

และผู้วิจัยจะใช้ข้อมูลเพิ่มเติมจากสถานีวัดอีก 10 แห่งทั่วประเทศไทยของปี ค.ศ. 2024 ในการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลอง ได้แก่

1. สถานีอุตุนิยมวิทยาราชบุรี จังหวัดราชบุรี
2. สถานีอุตุนิยมวิทยาสตึก จังหวัดบุรีรัมย์
3. สถานีอุตุนิยมวิทยาอุทกฉวาง จังหวัดนครศรีธรรมราช
4. สถานีอุตุนิยมวิทยาสตูล จังหวัดสตูล
5. สถานีอุตุนิยมวิทยาอุทัยธานี จังหวัดอุทัยธานี
6. สถานีอุตุนิยมวิทยาพะเยา จังหวัดพะเยา
7. สถานีอุตุนิยมวิทยาตาก จังหวัดตาก
8. สถานีอุตุนิยมวิทยาอุดรธานี จังหวัดอุดรธานี
9. สถานีรายงานดอยอินทนนท์ กองทัพอากาศ อุทยานแห่งชาติดอยอินทนนท์ จังหวัดเชียงใหม่
10. สถานีอุตุนิยมวิทยาชัยภูมิ จังหวัดชัยภูมิ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

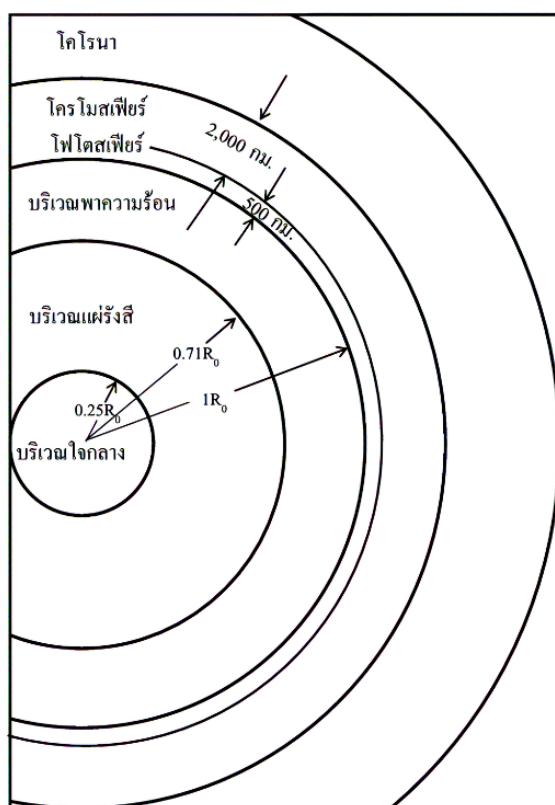
ในบทนี้จะกล่าวถึงพื้นฐานทางทฤษฎีและองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับรังสีอาทิตย์ โดยเนื้อหาในบทนี้จะครอบคลุมพื้นฐานเกี่ยวกับรังสีอาทิตย์ สมบัติทางเรขาคณิตระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ รังสีนอกบรรยากาศโลก ดัชนีความเข้มใสของบรรยากาศ อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดรังสีอาทิตย์ และงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งล้วนเป็นองค์ประกอบสำคัญในการพัฒนารอบแนวคิดและการวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัยนี้ โดยรายละเอียดในแต่ละหัวข้อมีดังนี้

2.1 พื้นฐานเกี่ยวกับรังสีอาทิตย์

ปรากฏการณ์ทางธรรมชาติต่าง ๆ ตลอดจนถึงรูปแบบสภาพอากาศและฤดูกาลเป็นผลมาจากการโคจรของโลกรอบแหล่งกำเนิดรังสีอาทิตย์หรือดวงอาทิตย์ ทำให้รังสีที่ตกกระทบบนพื้นผิวโลกแตกต่างกันออกไป รายละเอียดในการทำความเข้าใจผลการเปลี่ยนแปลงรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกแสดงดังต่อไปนี้

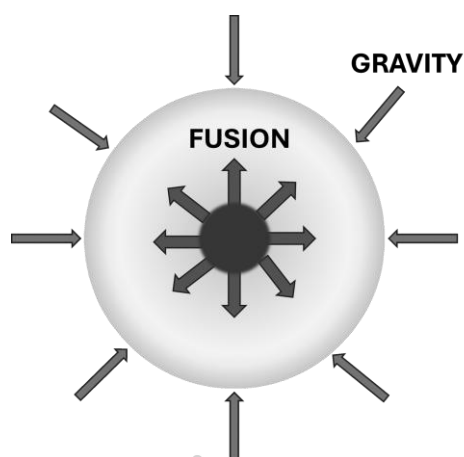
2.1.1 แหล่งกำเนิดรังสีอาทิตย์

ดวงอาทิตย์เป็นดาวฤกษ์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 ล้านกิโลเมตรหรือประมาณ 109 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของโลก และมีมวลเท่ากับ 1.989×10^{30} กิโลกรัม หรือประมาณ 3 แสนเท่าของมวลโลก และพบว่าองค์ประกอบทางเคมีของดวงอาทิตย์มีมวลสาร 70.67% ของดวงอาทิตย์เป็นไฮโดรเจน และ 27.43% เป็นฮีเลียม ส่วนที่เหลือเป็นคาร์บอน ไนโตรเจน ออกซิเจน และโลหะต่าง ๆ โครงสร้างถูกแบ่งออกเป็นหลายชั้น ประกอบไปด้วยบริเวณใจกลาง (core) บริเวณแผ่รังสี (radiative zone) บริเวณพาความร้อน (convective zone) และบรรยากาศ โดยบรรยากาศบริเวณชั้นนอกสุดเรียกว่า โคโรนา (corona) ดังแสดงในรูปที่ 1



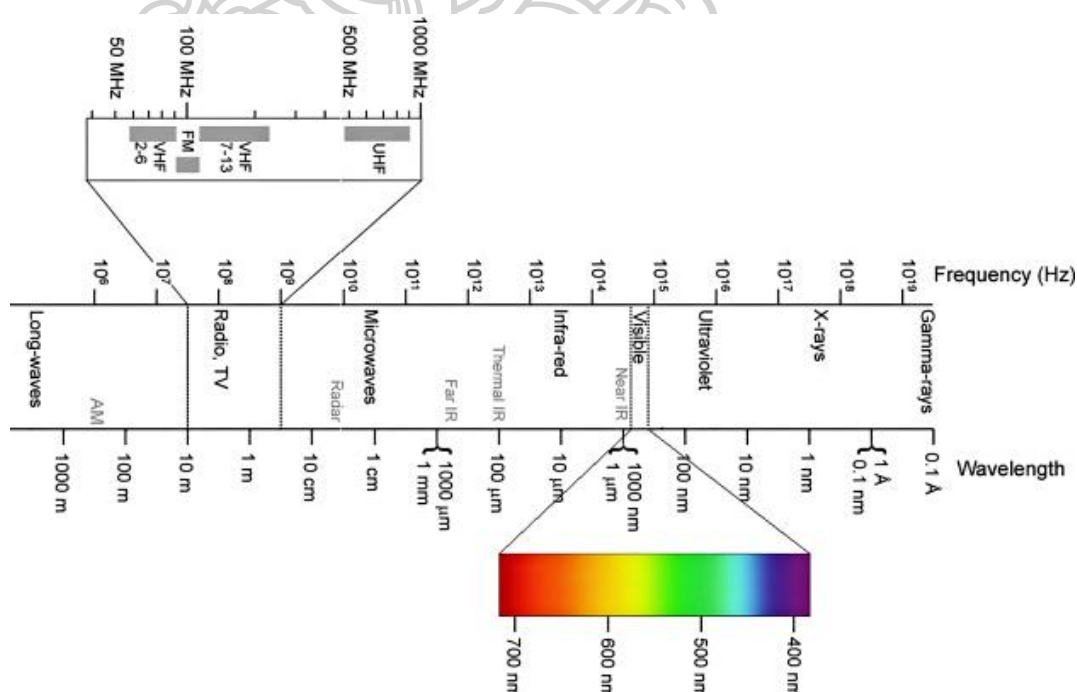
รูปที่ 1 โครงสร้างภายในดวงอาทิตย์ (เสริม จันทร์ฉาย, 2560)

ดวงอาทิตย์เป็นวัตถุทรงกลมก๊าซที่มีแรงโน้มถ่วงภายในตัวเอง (self-gravitating body) โดยมีองค์ประกอบหลักเป็นก๊าซไฮโดรเจน ตั้งอยู่บริเวณศูนย์กลางของระบบสุริยะ โดยมีระยะห่างจากโลกเฉลี่ยประมาณ 1.495×10^{11} เมตร บริเวณภายในแกนกลางของดวงอาทิตย์ พบว่าแรงโน้มถ่วงจะสร้างแรงดันที่สูงมาก จนก่อให้เกิดกระบวนการนิวเคลียร์ฟิวชัน (nuclear fusion) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนไฮโดรเจนให้กลายเป็นฮีเลียม ในกระบวนการนี้ มวลบางส่วนของไฮโดรเจนจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานตามสมการของไอน์สไตน์ ($E = mc^2$) โดยพลังงานที่ได้จะถูกปลดปล่อยออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าปริมาณมหาศาล (Widén & Munkhammar, 2019) จากปฏิกิริยาดังกล่าวพบว่า พลังงานที่เกิดจากบริเวณแกนกลางและถ่ายเทออกมาที่ผิวของดวงอาทิตย์ จะส่งผลให้ดวงอาทิตย์อยู่ในสภาวะสมดุล (hydrostatic equilibrium) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพแสดงสมดุลระหว่างแรงโน้มถ่วงและแรงดันจากพลังงานฟิวชันภายในดวงอาทิตย์

จากกระบวนการดังกล่าว ดวงอาทิตย์ให้กำเนิดพลังงานออกมาซึ่งเป็นการถ่ายเทจากบริเวณแกนกลางไปยังผิวของดวงอาทิตย์ ผ่านบรรยากาศ และออกสู่อวกาศโดยรอบ พลังงานที่ปล่อยออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นกว้าง แบ่งออกช่วง ๆ โดยแต่ละช่วงแสดงดังรูปที่ 3 ครอบคลุมตั้งแต่คลื่นวิทยุ (radiowaves) ไปจนถึงรังสีแกมมา (gamma rays)

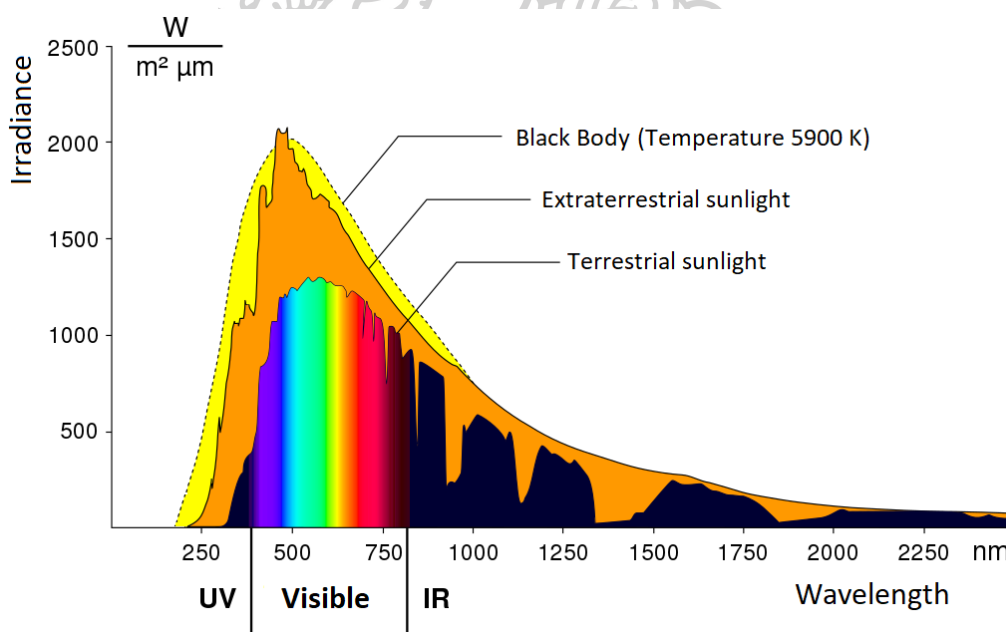


รูปที่ 3 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความยาวคลื่นในช่วงต่าง ๆ (Frauenfelder, 2021)

2.1.2 รังสีอาทิตย์

รังสีอาทิตย์ (solar radiation) เป็นพลังงานจากดวงอาทิตย์ที่แผ่ออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยพลังงานประมาณ 99% ของพลังงานของรังสีอาทิตย์จะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 0.15 – 4.0 ไมโครเมตร ซึ่งประกอบไปด้วย อัลตราไวโอเลตใกล้ (near ultraviolet) แสงที่ตามองเห็น (visible) และอินฟราเรดใกล้ (near infrared) โดยพลังงานของรังสีอาทิตย์จะมีค่าสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 0.5 ไมโครเมตร ในช่วงของแสงที่ตามองเห็น (0.4 - 0.7 ไมโครเมตร) (Bhatia, 2014)

รังสีอาทิตย์ส่วนใหญ่ที่เข้าถึงพื้นผิวโลกมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 300 – 2500 นาโนเมตร ซึ่งครอบคลุมรังสีอัลตราไวโอเลต (< 380 นาโนเมตร) แสงที่ตามองเห็นได้ (380 – 780 นาโนเมตร) และแสงอินฟราเรดใกล้ (> 780 นาโนเมตร) ดังแสดงในรูปที่ 4 และเมื่อรังสีดังกล่าวเดินทางมายังพื้นผิวโลก จะเกิดปฏิกิริยสัมพันธ์กับชั้นบรรยากาศในรูปแบบการดูดกลืน การกระเจิง และการสะท้อนกับองค์ประกอบต่าง ๆ ในบรรยากาศ เช่น โมเลกุลของอากาศ ฝุ่นละออง ไอน้ำ และเมฆ ทำให้พลังงานบางส่วนสูญเสียไปในระหว่างการเคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศ ส่งผลทำให้ปริมาณความเข้มของรังสีอาทิตย์ที่ส่องผ่านมายังพื้นผิวโลกมีปริมาณลดลง

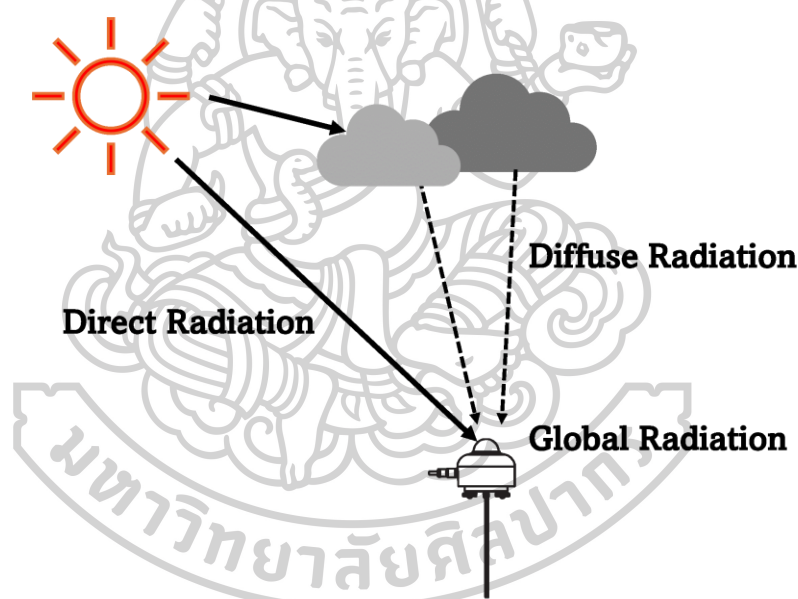


รูปที่ 4 สเปกตรัมของรังสีอาทิตย์ที่บริเวณขอบชั้นบรรยากาศ (extraterrestrial sunlight) และที่พื้นผิวโลก (terrestrial sunlight) (Wang & Yu, 2023)

สเปกตรัมของรังสีอาทิตย์จะประกอบไปด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ตประมาณ 3% – 5% แสงที่ตามองเห็นเท่ากับ 42% – 43% และรังสีอินฟราเรดใกล้เคียงเท่ากับ 52% – 55% ดังแสดงในรูปที่ 4 (Wang & Yu, 2023)

2.1.3 ชนิดของรังสีอาทิตย์ที่แผ่มายังพื้นผิวโลก

รังสีอาทิตย์สามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศมายังพื้นผิวโลก รังสีดังกล่าวจะถูกลดทอนความเข้มผ่านกระบวนการต่าง ๆ เช่น การดูดกลืน การสะท้อน และการกระเจิง ในชั้นบรรยากาศโลกส่งผลทำให้พลังงานที่ถึงพื้นโลกมีปริมาณลดลงจากค่าคงที่สุริยะ (solar constant) ซึ่งโดยเฉลี่ยมีค่าประมาณ 1,366.1 วัตต์ต่อตารางเมตร ทั้งนี้เราสามารถจำแนกรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นโลกได้เป็น 3 ส่วน (รูปที่ 5)



รูปที่ 5 แผนภาพแสดงรังสีอาทิตย์ที่ส่องผ่านมายังพื้นผิวโลก

- รังสีตรง (direct radiation) คือ รังสีที่เหลือที่พุ่งตรงมายังพื้นผิวโลก โดยไม่เกิดอันตรกิริยาใด ๆ กับอะตอมของธาตุต่าง ๆ ในชั้นบรรยากาศ มีทิศทางที่แน่นอนอยู่ในแนวลำแสงของดวงอาทิตย์
- รังสีกระจาย (diffuse radiation) คือ รังสีที่เกิดการกระเจิงกับอะตอมของธาตุต่าง ๆ ในชั้นบรรยากาศ ทำให้รังสีมาจากทุกทิศทางในท้องฟ้า
- รังสีรวม (global radiation) คือ ผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจาย

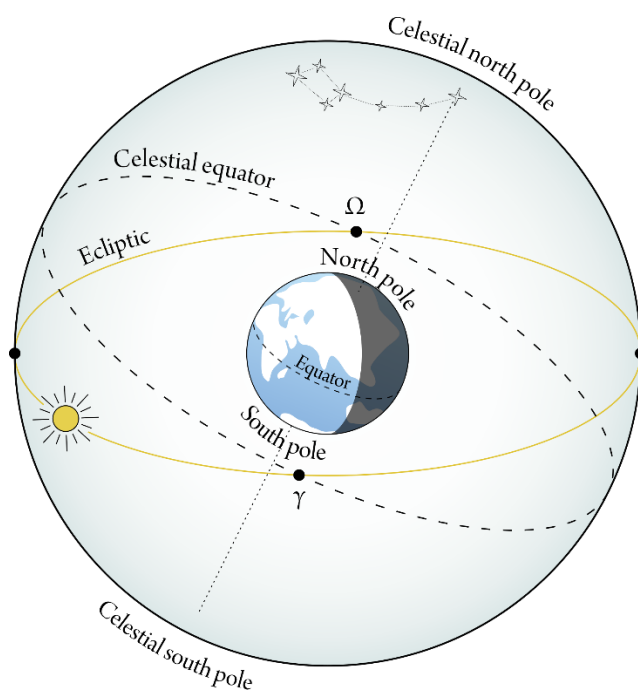
โดยลักษณะของรังสีตรงและรังสีกระจายในแต่ละวันของแต่ละพื้นที่ จะมีความไม่แน่นอนแตกต่างกันไปตามสภาพภูมิอากาศในแต่ละวันและแต่ละพื้นที่

2.2 สมบัติทางเรขาคณิตระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์

การโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ ใช้เวลาประมาณ 1 ปี ในการโคจรครบ 1 รอบ โดยเรขาคณิตของรังสีอาทิตย์ส่งผลต่อรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกและที่พื้นผิวโลกในช่วงความยาวคลื่นกว้าง ทำให้ปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ได้รับในละติจูดต่าง ๆ บนโลกแตกต่างกันออกไปตามการเปลี่ยนแปลงในแต่ละฤดูกาล ดังนั้นความรู้เกี่ยวกับสมบัติทางเรขาคณิตของรังสีอาทิตย์จึงเป็นสิ่งสำคัญสำหรับในงานวิจัยนี้ ซึ่งรายละเอียดแสดงดังต่อไปนี้

2.2.1 การเดินทางของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า

โลกเป็นสมาชิกของระบบสุริยะ (solar system) ที่มีดวงอาทิตย์เป็นศูนย์กลาง และโคจรรอบดวงอาทิตย์ แต่สิ่งที่ปรากฏในแต่ละวัน ทำให้เรารู้สึกว่าดวงอาทิตย์เคลื่อนที่รอบตัวเราจากทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตก แต่ในความเป็นจริงดวงอาทิตย์จะโคจรรอบศูนย์กลางของกาแล็กซีของเรา ใช้เวลาประมาณ 250 ล้านปีต่อรอบ และเมื่อเทียบกับการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ ซึ่งใช้เวลา 1 ปี ทำให้เราไม่สามารถสังเกตได้ว่าดวงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่ง และเนื่องจากโลกหมุนรอบตัวเอง ใช้เวลา 24 ชั่วโมงต่อรอบ จากทิศตะวันตกไปยังทิศตะวันออก ดังนั้นเราจึงเห็นดวงอาทิตย์และดวงดาวต่าง ๆ บนท้องฟ้าเคลื่อนที่ทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตก

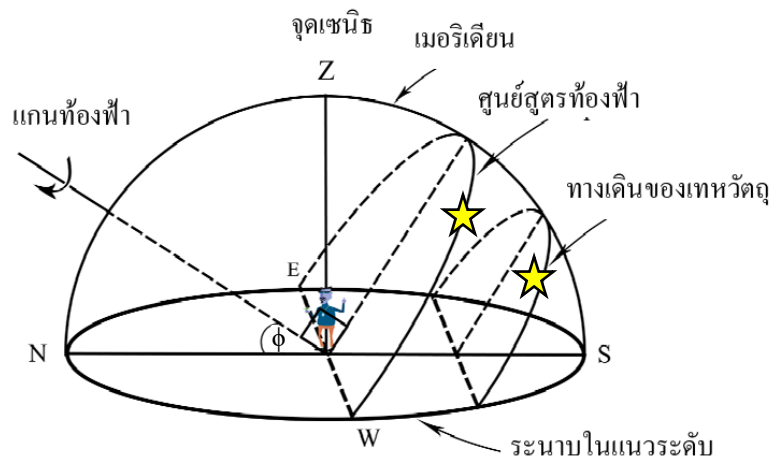


รูปที่ 6 ทรงกลมท้องฟ้า

(ที่มา: <https://www.subpng.com/png-2mp4li/>)

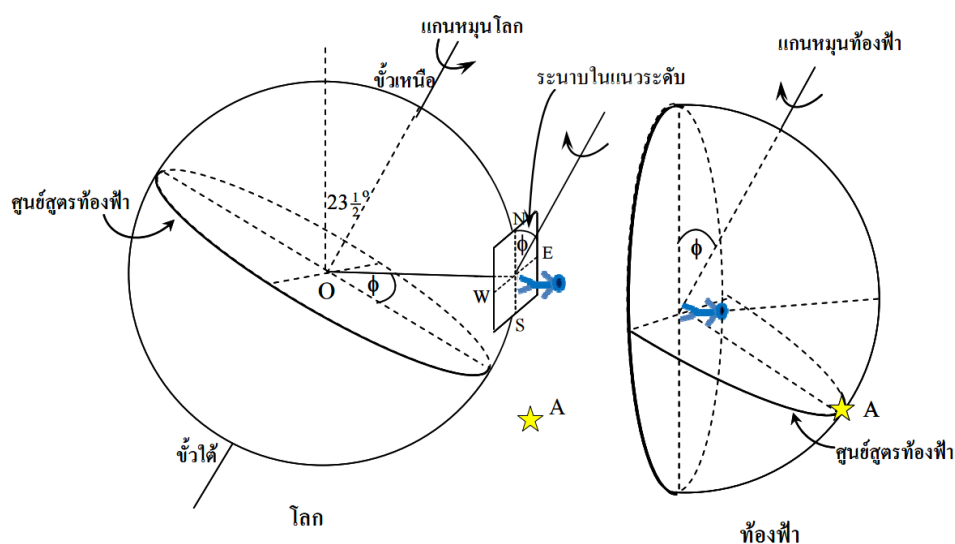
สายตาของมนุษย์ที่สังเกตอยู่บนโลกไม่อาจสามารถแยกแยะระยะห่างระหว่างดวงอาทิตย์หรือดวงดาวต่าง ๆ ได้ ทำให้เราเห็นว่าดาวทุกดวงอยู่ห่างจากเราเท่ากันหมดและเนื่องจากเรารับรู้แสงที่กระเจิงมาจากบรรยากาศทุกทิศทางว่ามีแหล่งกำเนิดห่างจากเราเท่ากันหมด ทำให้เราจึงมองเห็นท้องฟ้าเป็นรูปครึ่งทรงกลม หรือสามารถเรียกทรงกลมนี้ได้ว่า ทรงกลมท้องฟ้า (celestial sphere) ดังแสดงในรูปที่ 6

ถ้าเราสังเกตที่บริเวณศูนย์สูตร (equator) พบว่าขณะที่โลกหมุนรอบตัวเอง เราจะสังเกตเห็นว่าดวงดาวหรือดวงอาทิตย์จะเคลื่อนที่จากทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตกในระนาบที่ขนานกับระนาบศูนย์สูตรของโลก เราจะเรียกระนาบดังกล่าวมา ระนาบศูนย์สูตรท้องฟ้า (celestial equator) ดังรูปที่ 7 แต่อย่างไรก็ตาม หากเราไม่ได้อยู่ที่บริเวณศูนย์สูตรก็จะเห็นการเคลื่อนที่ดังกล่าวเช่นเดียวกับกรณีที่อยู่บริเวณศูนย์สูตร ซึ่งเป็นผลมาจากระยะทางบนโลกมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับระยะทางจากโลกถึงดวงอาทิตย์หรือดวงดาวต่าง ๆ



รูปที่ 7 ลักษณะท้องฟ้าที่เราเห็นบนโลก (เสริม จันทรฉาย, 2560)

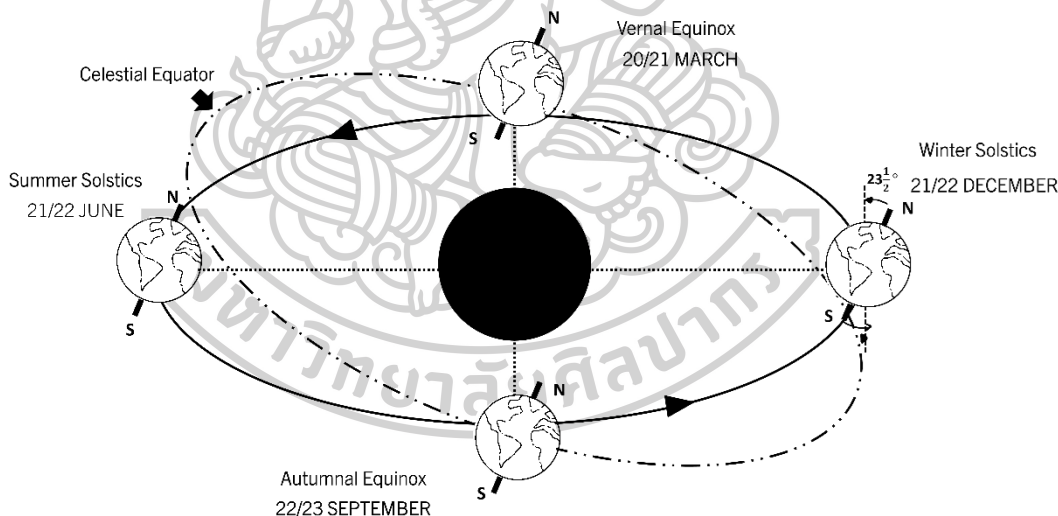
จากรูปที่ 7 ระนาบที่ผู้สังเกตยืนอยู่จะเรียกว่า ระนาบในแนวระดับ (horizontal plane) โดยแกนหมุนท้องฟ้าจะอยู่บนระนาบ NZS เมื่อทำมุมกับระนาบในแนวระดับจะเท่ากับมุมละติจูด (ϕ) ของผู้สังเกต และจุดที่อยู่บริเวณเหนือตรงศีรษะจะเรียกว่า จุดเซนธิ์ (Z) ส่วนเส้นที่ลากผ่านทางทิศเหนือ (N) ผ่านจุดเซนธิ์ไปยังทิศใต้ (S) เรียกว่า เส้นเมริเดียน (meridian) และระนาบศูนย์สูตรท้องฟ้าจะอยู่ในแนวทิศตะวันออก – ทิศตะวันตก ตั้งฉากกับแกนหมุนของทรงกลมท้องฟ้า เช่นเดียวกันกับแกนหมุนของโลกที่ตั้งฉากกับระนาบศูนย์สูตรของโลก ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 แผนภาพแสดงการหมุนของโลกและการสังเกตวัตถุบนท้องฟ้าในทรงกลมท้องฟ้า (เสริม จันทรฉาย, 2560)

การเคลื่อนที่ของโลกโคจรรอบดวงอาทิตย์เป็นวงรีโดยที่แกนของโลกเอียง $23\frac{1}{2}^{\circ}$ กับแนวตั้งฉากระนาบวงโคจร โดยทั่วไปพบว่าตำแหน่งดวงอาทิตย์จะอยู่คงที่เมื่อเทียบกับบรรนาบศูนย์สูตรโลก เนื่องจากดาวฤกษ์อยู่ไกลมาจากโลกจนทำให้ไม่สามารถสังเกตการเคลื่อนที่ในช่วงเวลาสั้น ๆ ได้

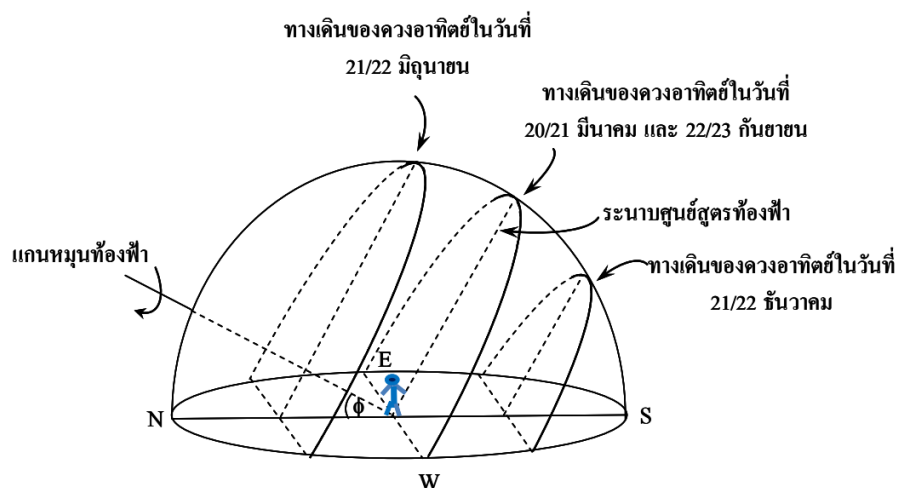
ขณะที่โคจรรอบดวงอาทิตย์ โลกก็หมุนรอบตัวเองเช่นเดียวกัน โดยโคจรในทิศทางเดียวกับการโคจรรอบดวงอาทิตย์ หรือโคจรจากทิศตะวันตกไปยังทิศตะวันออก โดยที่ลักษณะแกนโลกเอียงทำมุม $23\frac{1}{2}^{\circ}$ และจากรูปที่ 9 พบว่าในวันที่ 21/22 มิถุนายน โลกจะหันขั้วโลกเหนือเอียงเข้าหาดวงอาทิตย์มากที่สุด จึงเป็นวันเริ่มต้นของฤดูร้อนในซีกโลกเหนือ ซึ่งจะมีช่วงเวลากลางวันยาวนานกว่ากลางคืน และวันที่ 22/23 กันยายน โลกหันบริเวณศูนย์สูตรเข้าหาดวงอาทิตย์และจะช่วงเริ่มต้นของฤดูใบไม้ร่วง มีเวลากลางวันและกลางคืนยาวนานเท่ากัน และในวันที่ 21/22 ธันวาคม โลกจะหันขั้วโลกเหนือออกจากดวงอาทิตย์มากที่สุด เป็นวันที่เริ่มฤดูหนาวของซีกโลกเหนือ มีช่วงเวลากลางคืนยาวนานกว่าเวลากลางวัน และในวันที่ 20/21 มีนาคม โลกจะหันบริเวณเส้นศูนย์สูตรเข้าหาดวงอาทิตย์ เป็นช่วงเริ่มต้นของฤดูใบไม้ผลิ ซึ่งมีช่วงเวลากลางวันและกลางคืนยาวนานเท่ากัน



รูปที่ 9 วงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์

การเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ที่เรามองเห็นบนท้องฟ้าจะเป็นดังรูปที่ 10 ซึ่งเห็นได้ว่าดวงอาทิตย์มีการเคลื่อนที่บนแนวระนาบศูนย์สูตรท้องฟ้า ในวันที่ 21/22 มิถุนายน ดวงอาทิตย์มีการเคลื่อนที่ไปทางเหนือสุด และวันที่ 21/22 ธันวาคม ดวงอาทิตย์จะเคลื่อนที่ในทางใต้สุด และการเดินทางของดวงดาวต่าง ๆ บนท้องฟ้ารวมไปถึงดวงอาทิตย์จะขนานกับบรรนาบศูนย์สูตรท้องฟ้า และ

เนื่องจากระนาบศูนย์สูตรท้องฟ้าทำมุมตั้งฉากกับแกนหมุนท้องฟ้าและแกนหมุนดังกล่าวทำมุมกับระนาบในแนวระดับ ซึ่งมีค่าเท่ากับ ละติจูด ดังนั้นจึงทำให้ระนาบทางเดินของดวงอาทิตย์ที่ละติจูดต่าง ๆ จึงแตกต่างกันออกไป



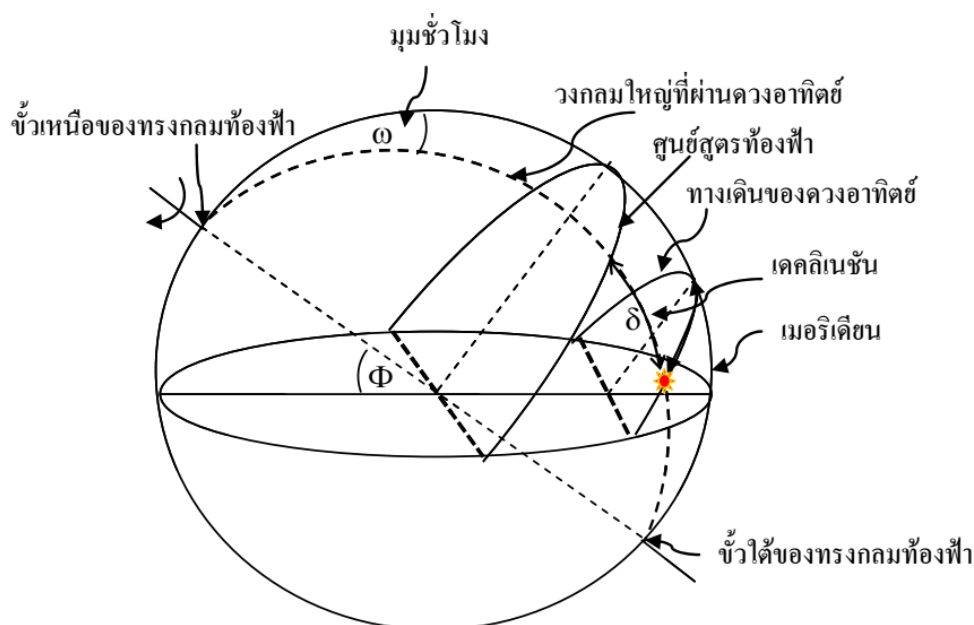
รูปที่ 10 ทางเดินของดวงอาทิตย์บนระนาบศูนย์สูตรท้องฟ้า (เสริม จันทรฉาย, 2560)

2.2.2 การบอกเวลาและตำแหน่งของดวงอาทิตย์

การคำนวณตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่แผ่รังสีออกมาตกกระทบบนระนาบต่าง ๆ ทำให้สามารถบอกถึงปริมาณรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกและในพื้นที่ผิวโลกได้ โดยการบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์จะพิจารณาว่าท้องฟ้ามีลักษณะเป็นครึ่งทรงกลมหรือที่เรียกว่า ทรงกลมท้องฟ้า โดยกำหนดให้ผู้สังเกตอยู่ตำแหน่งจุดศูนย์กลาง โดยการบอกตำแหน่งดวงอาทิตย์บนท้องฟ้ามี 2 ระบบดังนี้

1. ระบบระนาบในแนวระดับอ้างอิง (horizontal system) เป็นระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตั้งแต่พระอาทิตย์ขึ้นจนถึงพระอาทิตย์ตกและเปลี่ยนแปลงไปตามวันในรอบปี ระบบนี้จะอาศัยมุม 2 มุมในการบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 11 และตารางที่ 1

อาทิตย์กับเส้นเมริเดียนจะเรียกว่า มุมชั่วโมง (hour angle, ω) ดังแสดงในรูปที่ 12 และสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) และสมการที่ (3) ตามลำดับ



รูปที่ 12 การบอกตำแหน่งดวงอาทิตย์โดยใช้ระบบระนาบศูนย์สูตรอ้างอิง (เสริม จันทรฉาย, 2560)

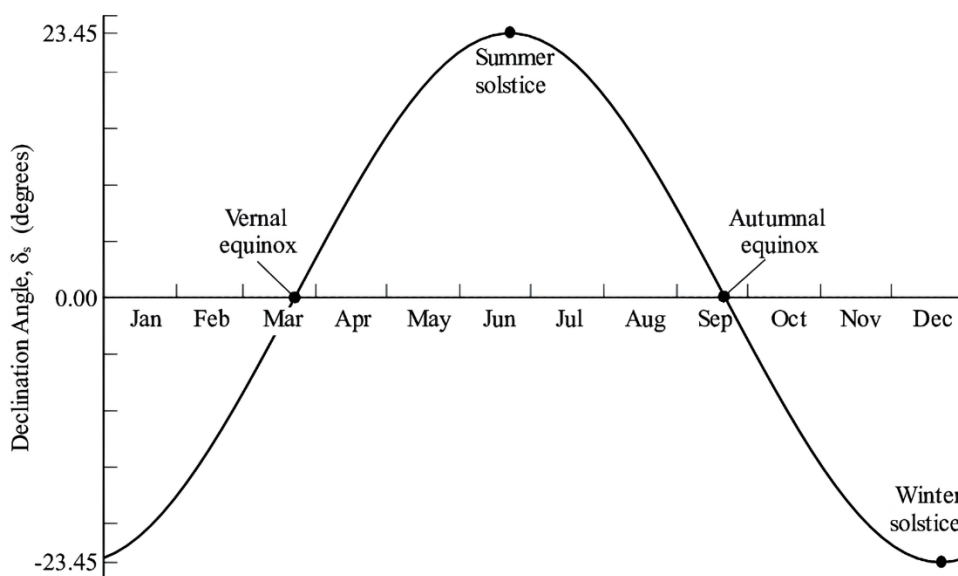
การคำนวณเดคลิเนชัน (δ) พบว่าการแปรค่าจะอยู่ระหว่าง -23.45° ในวันที่ 21 ธันวาคม จนถึง 23.45° ในวันที่ 21 มิถุนายน และพบว่าการแปรค่าในรอบปีของมุมเดคลิเนชันจะเป็นไปดังรูปที่ 13 และสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\delta = \left(\begin{aligned} &0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.070257 \sin \Gamma - 0.006758 \cos 2\Gamma \\ &+ 0.000907 \sin 2\Gamma - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma \end{aligned} \right) (180 / \pi) \quad (1)$$

โดยที่ Γ คือ มุมวัน (day angle) (เรเดียน) สามารถคำนวณได้จากสมการ

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

เมื่อ d_n คือ จำนวนวันในรอบปี โดยเริ่มจากวันที่ 1 มกราคม เป็น $d_n = 1$ และวันสุดท้ายเป็นวันที่ 31 ธันวาคม มีค่า $d_n = 365$ โดยคิดว่าเดือนกุมภาพันธ์มีจำนวน 28 วัน



รูปที่ 13 การแปรค่าในรอบปีของมุมเดคลิเนชัน (Padilla, 2011)

กรณีการคำนวณมุมชั่วโมง (ω) สามารถคำนวณได้จากการเปลี่ยนแปลงของเวลาดวงอาทิตย์ (solar time, ST) ซึ่งโลกหมุนรอบตัวเองครบรอบใช้เวลา 24 ชั่วโมง (360 องศา) ดังนั้นจะได้ว่าดวงอาทิตย์เคลื่อนที่เป็น 15 องศาต่อชั่วโมง จึงสามารถคำนวณหามุมชั่วโมงดวงอาทิตย์ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\omega = 15(12 - ST) \quad (3)$$

โดยที่ ω คือ มุมชั่วโมงของดวงอาทิตย์ (องศา)
ST คือ เวลาของดวงอาทิตย์ (ชั่วโมง)

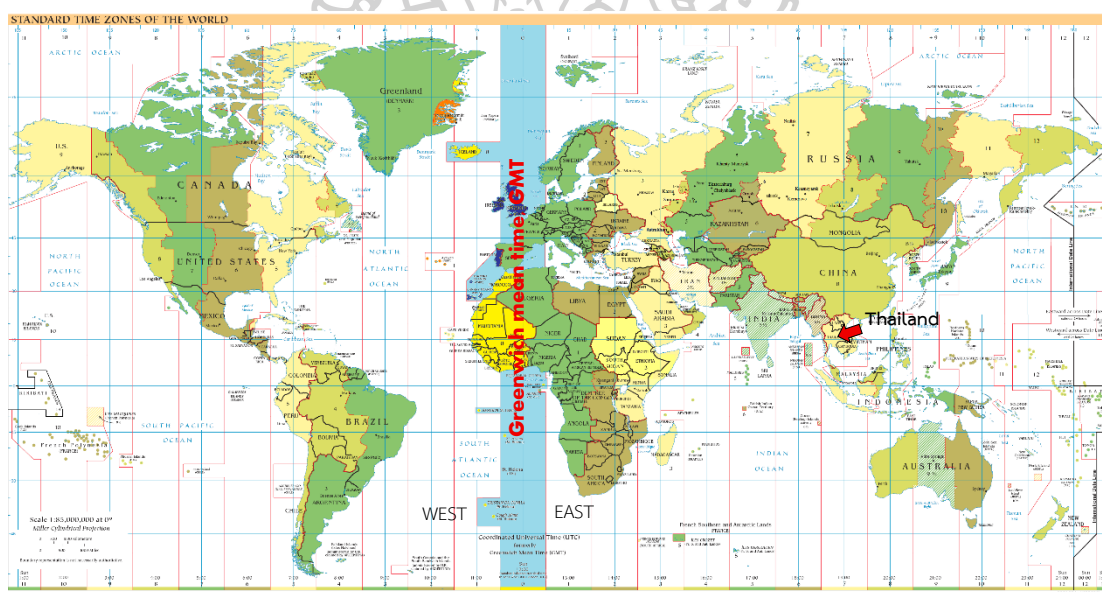
เวลาของดวงอาทิตย์ (ST) สามารถคำนวณได้จากเวลาตามนาฬิกาที่เราใช้ใน ชีวิตประจำวันหรือสามารถเรียกอีกแบบหนึ่งว่า เวลามาตรฐานท้องถิ่น (local standard time, LST) สมการเวลาและผลต่างระหว่างลองจิจูดมาตรฐานกับลองจิจูดของตำแหน่งที่ต้องการ โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

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

เมื่อ LST คือ เวลามาตรฐานท้องถิ่น (ชั่วโมง:นาฬิกา)

- L_s คือ ลองจิจูดมาตรฐานท้องถิ่น (องศา)
 L_{loc} คือ ลองจิจูดของตำแหน่งที่ต้องการ (องศา)
 E_t คือ สมการเวลา (Equation of time) (นาทิต)

การบอกเวลาบนโลกถูกแบ่งเวลาออกเป็นโซนต่าง ๆ โดยอ้างอิงจากเวลากรีนิช (Greenwich mean time, GMT) หรือที่เส้นเมริเดียนแรก (prime meridian) ซึ่งมีลองจิจูดเท่ากับ 0 องศา ดังแสดงในรูปที่ 14 โดยแต่ละโซนจะกำหนดเส้นลองจิจูดมาตรฐาน (standard longitude, L_s) ขึ้นมา เพื่อใช้เป็นเกณฑ์อ้างอิงสำหรับการคำนวณเวลามาตรฐานท้องถิ่น (local standard time, LST) ในแต่ละโซน ซึ่งจะใช้เวลาเดียวกันภายในโซนเดียวกัน โดยทั่วไปพบว่า ค่าของ L_s และ L_{loc} เป็นบวก เมื่ออยู่ทางตะวันตกของกรีนิช และจะเป็นลบเมื่ออยู่ทางตะวันออกของกรีนิช ดังนั้น ประเทศไทยอยู่ทางตะวันออกของกรีนิช จึงมีค่า L_s และ L_{loc} เป็นลบ



รูปที่ 14 แผนที่การแบ่งเขตเวลาโลก

(ที่มา: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16806017>)

โลกเคลื่อนที่รอบดวงอาทิตย์เป็นลักษณะวงรี ทำให้ความเร็วในการเคลื่อนที่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในวงโคจรมีค่าไม่คงที่ โดยพบว่าตำแหน่งที่อยู่ใกล้ดวงอาทิตย์ โลกจะโคจรด้วยความเร็วที่เร็วกว่าตำแหน่งอื่น ๆ ทำให้เวลาดวงอาทิตย์เป็นเวลาที่ไม่นานเท่าเสมอ ต่อมาได้มีนักวิทยาศาสตร์ได้กำหนดเวลาที่สม่ำเสมอขึ้น โดยนำเวลาดวงอาทิตย์ในวันที่ 1 มกราคม ปี ค.ศ. 1900 แบ่งเป็น

86,400 ส่วน ซึ่งพบว่า 1 ส่วนเป็น 1 วินาที และเรียกเวลานี้ว่า เวลาดวงอาทิตย์เฉลี่ย (solar mean time) (Bernard R. et al., 1980; Smart, 1971)

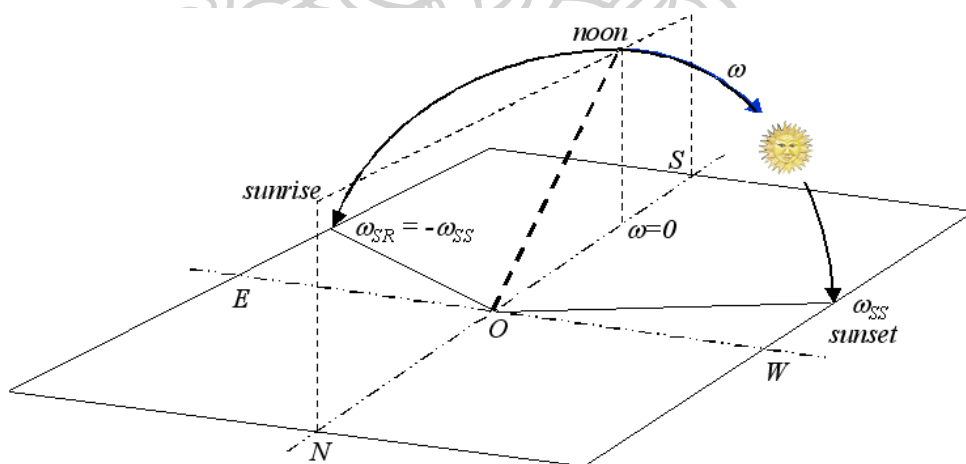
ความคลาดเคลื่อนระหว่างเวลาดวงอาทิตย์กับเวลาดวงอาทิตย์เฉลี่ย สามารถคำนวณจากสมการเวลา (equation of time, E_t) ซึ่งเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้

$$E_t = 229.18(0.000075 + 0.001868 \cos \Gamma - 0.032077 \sin \Gamma - 0.014615 \cos 2\Gamma - 0.04089 \sin 2\Gamma) \quad (5)$$

ดังนั้นหากทราบเวลาตามนาฬิกาหรือเวลามาตรฐานท้องถิ่น ก็จะสามารถคำนวณหาเวลาของดวงอาทิตย์ (สมการที่ (4)) และสามารถนำมาใช้เพื่อหาตำแหน่งของมุมชั่วโมงของดวงอาทิตย์ (สมการที่ (3)) ได้เช่นกัน

2.2.3 มุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ขึ้นและตกบนระนาบในแนวระดับ

การพิจารณาการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์บนระนาบในแนวระดับ ดังแสดงในรูปที่ 15 สามารถคำนวณหามุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ขึ้นและดวงอาทิตย์ตกได้ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 15 การเดินทางของดวงอาทิตย์บนระนาบในแนวระดับตั้งแต่ดวงอาทิตย์ขึ้นจนถึงดวงอาทิตย์ตก (Wald, 2018)

มุมชั่วโมงขณะที่ดวงอาทิตย์ขึ้น (sunrise hour angle, ω_{sr}) สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\omega_{sr} = \cos^{-1}(-\tan \delta \tan \phi) \quad (6)$$

และเนื่องจากการเดินทางของดวงอาทิตย์บนระนาบในแนวระดับมีลักษณะสมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 15 ดังนั้นในช่วงเช้าและช่วงบ่ายมีความสมมาตรกัน ทำให้มุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตก (sunset hour angle, ω_{ss}) มีค่าเท่ากับมุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ขึ้น แต่มีเครื่องหมายตรงข้ามกัน

2.2.4 แฟคเตอร์ปรับแก้ค่าระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ (eccentricity correction factor)

การโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ในลักษณะวงรี ส่งผลให้ระยะห่างระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ด้วยเหตุนี้ความเปลี่ยนแปลงดังกล่าว จึงส่งผลต่อความเข้มของรังสีอาทิตย์ที่โลกได้รับ เพื่อให้การประเมินรังสีอาทิตย์มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น จึงมีการนำแฟคเตอร์ปรับแก้ค่าระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ หรือ eccentricity correction factor (E_0) มาเพื่อช่วยปรับค่ารังสีอาทิตย์ให้เพิ่มขึ้นหรือลดลงตามตำแหน่งของโลกในวงโคจร

แฟคเตอร์ปรับแก้ค่าระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ (E_0) สามารถคำนวณได้จากสมการเอมไพริคัล (Spencer, 1971) ดังต่อไปนี้

$$E_0 = 1.000110 + 0.034221 \cos \Gamma + 0.001280 \sin \Gamma + 0.000719 \cos 2\Gamma + 0.000077 \sin 2\Gamma \quad (7)$$

โดยที่ Γ คือ มุมวัน (day angle) ซึ่งคำนวณจากสมการที่ (2)

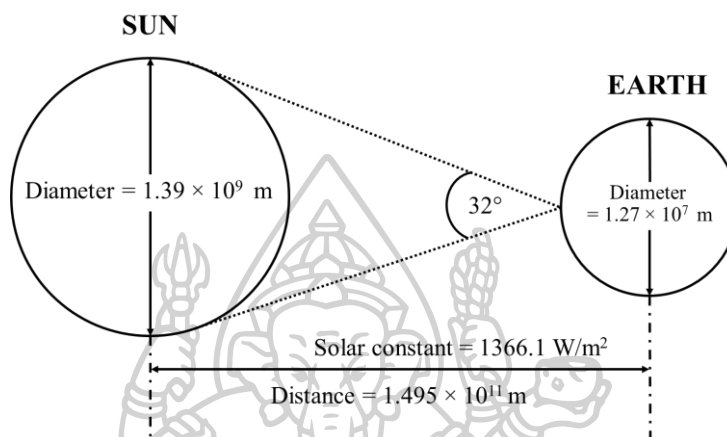
จากที่กล่าวมาข้างต้น เราสามารถนำค่าแฟคเตอร์ปรับแก้ค่าระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ (E_0) มาคำนวณค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนโลก ณ เวลาต่าง ๆ ในรอบปีได้อย่างแม่นยำมากขึ้น หรือสามารถนำมาคำนวณค่ารังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (extraterrestrial solar radiation) ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

2.3 รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (extraterrestrial solar radiation)

รังสีที่แผ่ออกมาจากดวงอาทิตย์ในทุกช่วงความยาวคลื่นส่งผ่านมายังขอบชั้นบรรยากาศโลก (top of the atmosphere, TOA) โดยยังไม่มี การลดทอนจากองค์ประกอบต่าง ๆ ทางบรรยากาศ เช่น ฝุ่นละออง เมฆ ไอน้ำ โอโซน และอื่น ๆ เป็นค่ารังสีอาทิตย์ก่อนเข้ามายังชั้นบรรยากาศโลก จะเรียกรังสีดังกล่าวว่า รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (extraterrestrial solar radiation) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

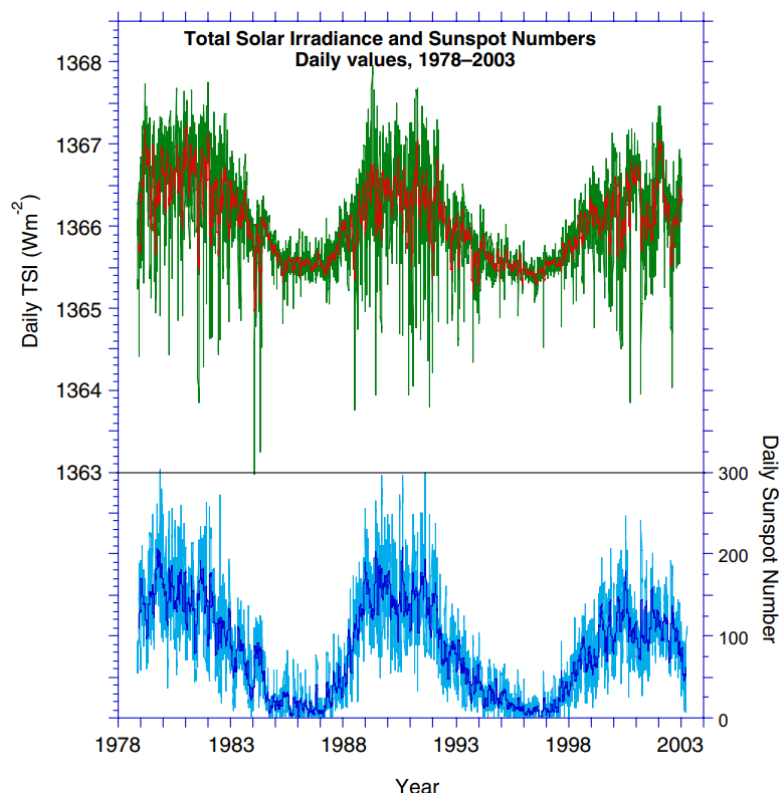
2.3.1 ค่าคงที่สุริยะ (solar constant)

โลกโคจรรอบดวงอาทิตย์โดยที่วงโคจรมีลักษณะไม่เป็นวงกลม ทำให้ระยะห่างระหว่างโลกถึงดวงอาทิตย์มีค่าไม่เท่ากันตลอดเวลา มีการเปลี่ยนแปลงประมาณ 1.7% (Duffie et al., 2020) โดยมีระยะห่างเฉลี่ยระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ประมาณ 1.495×10^{11} เมตร ดังแสดงในรูปที่ 16



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์

พลังงานของรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกทุกช่วงความยาวคลื่นที่ตกกระทบตั้งฉากกับพื้นที่ 1 หน่วย ต่อ 1 หน่วยเวลาที่ระยะทางเฉลี่ยระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์สามารถเรียกว่า รังสีทั้งหมด (total solar irradiance หรือ TSI) และเรียกค่าเฉลี่ยระยะยาวของรังสีทั้งหมด (TSI) ว่า ค่าคงที่สุริยะ (solar constant, $\bar{I}_{sc}$) มีค่าประมาณ 1366.1 วัตต์ต่อตารางเมตร (Gueymard, 2004) ดังแสดงในรูปที่ 17 ซึ่งจะใช้ค่านี้สำหรับการคำนวณรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกในงานวิจัยรายละเอียดมีดังต่อไปนี้



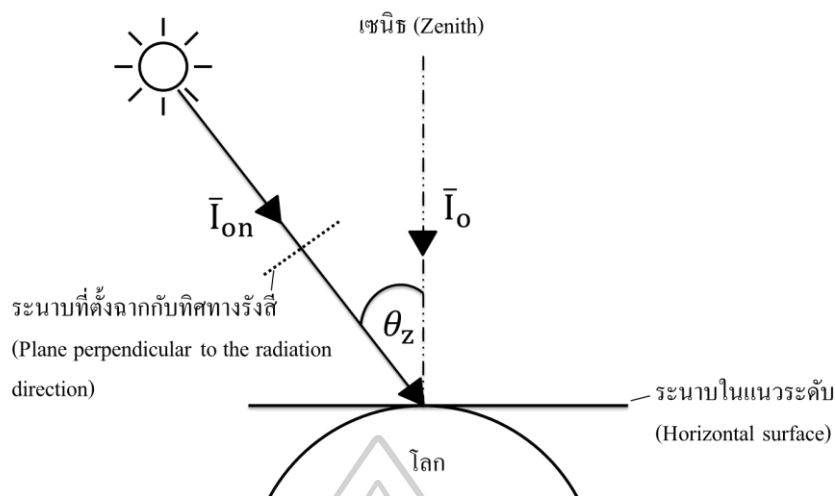
รูปที่ 17 การแปรค่าของรังสีอาทิตย์ทั้งหมด (TSI) รายวันและจุดมืด (Sunspot) รายวัน ช่วงปี ค.ศ. 1978 – 2003 (Gueymard, 2004)

2.3.2 การคำนวณรังสีนอกบรรยากาศโลกบนระนาบในแนวระดับ

การคำนวณรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกมีความสำคัญอย่างมาก สำหรับการนำไปใช้งานด้านรังสีอาทิตย์และด้านพลังงาน ซึ่งรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ ที่ทำให้ระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โดยในงานวิจัยนี้ จะทำการคำนวณรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกบนระนาบในแนวระดับ 2 กรณี ได้แก่ กรณีรายชั่วโมงและกรณีรายวัน

2.3.2.1 รังสีอาทิตย์รายชั่วโมงบนระนาบในแนวระดับ

ในวันหนึ่งโลกได้รับรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกบนระนาบ (extraterrestrial irradiance) ที่ตั้งฉากกับทิศทางของรังสีอาทิตย์ ดังแสดงในรูปที่ 18 ซึ่งรังสีดังกล่าวจะขึ้นกับระยะห่างระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์



รูปที่ 18 แผนภาพรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกที่ตกกระทบบนระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางของรังสีอาทิตย์ (I_{on}) กับรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกบนระนาบในแนวระดับ (I_o)

ดังนั้นจะได้ว่า

$$I_{on} = I_{sc} \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 = I_{sc} E_0 \quad (8)$$

ส่วนรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกสำหรับกรณีของระนาบในแนวระดับ (I_o) ดังรูปที่ 18 สามารถเขียนได้สมการต่อไปนี้

$$I_o = I_{on} \cos \theta_z \quad (9)$$

นำสมการที่ (8) แทนในสมการที่ (9) จะได้

$$I_o = I_{sc} E_0 \cos \theta_z \quad (10)$$

เมื่อ I_o คือ รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกที่ขณะเวลาหนึ่งซึ่งตั้งฉากกับทิศทางของรังสีอาทิตย์ (วัดต่อตารางเมตร)

I_{on} คือ รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกที่ขณะเวลาหนึ่งบนระนาบในแนวระดับ (วัดต่อตารางเมตร)

I_{sc} คือ ค่าคงที่สุริยะ (1366.1 วัดต่อตารางเมตร)

- r_0 คือ ระยะทางเฉลี่ยระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ (1.495×10^{11} เมตร)
 r คือ ระยะทางระหว่างกับดวงอาทิตย์ที่เวลาใด ๆ (เมตร)
 E_0 คือ แพลเตอร์ปรับแก้ผลของระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ (-)
 θ_z คือ มุมเซนธิธของดวงอาทิตย์ (องศา)

และสำหรับในกรณีการหาค่ารังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายชั่วโมงบนระนาบในแนวระดับ (I_0) สามารถใช้สมการดังต่อไปนี้

$$I_0 = I_{sc} E_0 [\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega_i] \quad (11)$$

โดยที่ I_{sc} เป็นค่าคงที่สุริยะโดยคิดปริมาณพลังงานในช่วงเวลา 1 ชั่วโมง ($1366.1 \times 3.6 = 4917.96 \times 10^3$ จูลต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง) (Iqbal, 1983)

การใช้งานด้านรังสีอาทิตย์และด้านพลังงานบางส่วน เราต้องการที่จะทราบค่ารังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน ($\bar{I}_0$) โดยสามารถคำนวณได้จากการนำค่า I_0 ของชั่วโมงเดียวกันตั้งแต่วันแรกของเดือนจนถึงวันสุดท้ายของเดือนมารวมกัน แล้วหารด้วยจำนวนวันทั้งหมดของเดือนนั้น ๆ ซึ่งเขียนได้ดังสมการ

$$\bar{I}_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{oi} \quad (12)$$

- โดยที่ $\bar{I}_0$ คือ รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน (จูลต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)
 I_{oi} คือ รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายชั่วโมงของวันที่ i (จูลต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)
 N คือ จำนวนวันของเดือนที่พิจารณา

2.3.2.2 รังสีอาทิตย์รายวันบนระนาบในแนวระดับ

การหาค่ารังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวัน (H_o) สามารถหาได้จากการอินทิเกรตค่าของรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศรายชั่วโมง ดังสมการที่ (11) ตั้งแต่พระอาทิตย์ขึ้นจนถึงพระอาทิตย์ตก สามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$H_o = \int_{t_{sr}}^{t_{ss}} I_o dt \quad (13)$$

เมื่อ H_o คือ รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันบนระนาบในแนวระดับ (จุลต่อตารางเมตรต่อวัน)

I_o คือ รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายชั่วโมงบนระนาบในแนวระดับ (จุลต่อตารางเมตรต่อวัน)

t คือ เวลา (ชั่วโมง)

t_{sr} คือ เวลาที่ดวงอาทิตย์ขึ้น (นาฬิกา)

t_{ss} คือ เวลาที่ดวงอาทิตย์ตก (นาฬิกา)

และสำหรับกรณีของรังสีนอกบรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือน ($\bar{H}_o$) สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\bar{H}_o = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_{oi} \quad (14)$$

เมื่อ $\bar{H}_o$ คือ รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (จุลต่อตารางเมตรต่อวัน)

H_{oi} คือ รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันของวันที่ i (จุลต่อตารางเมตรต่อวัน)

N คือ จำนวนวันในเดือนต้องการพิจารณา

2.4 ดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศ (clearness Index)

ดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศ (clearness index) เป็นตัวแปรที่สามารถใช้บอกระดับความแจ่มใสของบรรยากาศบนท้องฟ้า โดยเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณของรังสีรวมที่มาถึงพื้นผิวโลก (global solar radiation) ที่วัดบนเครื่องมือวัดภาคพื้นดิน ต่อปริมาณของรังสีอาทิตย์นอก

บรรยากาศโลก (extraterrestrial solar radiation) ที่คำนวณจากข้อหัว 2.3 สามารถแบ่งค่าดังกล่าวออกเป็น 3 กรณี ดังนี้

2.4.1 ดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศรายชั่วโมง

กรณีสำหรับการคำนวณค่าดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศรายชั่วโมง (k_T) สามารถหาได้จากอัตราส่วนของรังสีรวมรายชั่วโมงต่อรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายชั่วโมง ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

$$k_T = \frac{I}{I_0} \quad (15)$$

โดยที่ I คือ ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมง (จุลต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง) และ I_0 คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายชั่วโมง (จุลต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)

2.4.2 ดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศรายวัน

เราสามารถนิยามดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศในแต่ละวัน (K_T) ได้ ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างรังสีรวมรายวันต่อรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวัน ได้ดังสมการ

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (16)$$

โดยที่ H คือ ความเข้มรังสีรวมรายวัน (จุลต่อตารางเมตรต่อวัน) และ H_0 คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวัน (จุลต่อตารางเมตรต่อวัน)

2.4.3 ดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศรายวันเฉลี่ยต่อเดือน

กรณีดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศรายวันเฉลี่ยต่อเดือน ($\bar{K}_T$) ซึ่งเป็นสัดส่วนระหว่างรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนกับรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือน ดังสมการ

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{H_0} \quad (17)$$

โดยที่ $\bar{H}$ คือ ความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (จุลต่อตารางเมตรต่อวัน) และ $\bar{H}_0$ คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (จุลต่อตารางเมตรต่อวัน)

การหาค่าดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการประเมินศักยภาพของพลังงาน วิเคราะห์รูปแบบของสภาพอากาศ หรือใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองด้านรังสีอาทิตย์ต่าง ๆ

2.4.4 การจำแนกสภาพท้องฟ้าตามดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศ

การจำแนกระดับความแจ่มใสของท้องฟ้าในบรรยากาศสามารถจำแนกตามดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศ ดังตารางที่ 2 ซึ่งในงานวิจัยจะใช้หลักเกณฑ์ดังกล่าวมาใช้ในการวิเคราะห์

ตารางที่ 2 การจำแนกท้องฟ้าตามดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศ (Khorasanizadeh et al., 2014)

สภาพท้องฟ้า	ดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศ
ท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆ (cloudy)	$0 < K_t < 0.2$
ท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมบางส่วน (partly cloudy)	$0.2 \leq K_t < 0.6$
ท้องฟ้าแจ่มใส (sunny)	$0.6 \leq K_t < 0.75$
ท้องฟ้าแจ่มใสมาก (very sunny)	$0.75 \leq K_t < 1.0$

2.5 เครื่องวัดรังสีรวม

เครื่องมือที่ใช้สำหรับวัดความเข้มของรังสีอาทิตย์หรือรังสีรวม (global solar radiation) ที่ตกกระทบบนพื้นผิวโลกจากมุมมองของครึ่งทรงกลมท้องฟ้า (hemisphere) ในทุกทิศทาง ซึ่งเครื่องมือดังกล่าวมีชื่อว่า ไพราโนมิเตอร์ (pyranometer) เป็นเครื่องวัดพื้นฐานในงานด้าน ต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นทางอุตุนิยมวิทยาหรือทางด้านพลังงานหมุนเวียน (renewable energy) ต่างก็จำเป็นที่จะต้องทราบค่าความเข้มของรังสีรวมที่ตกกระทบบน บริเวณนั้น ๆ เพื่อใช้ในการประเมินสภาพอากาศ หรือการประเมินศักยภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าด้านพลังงานแสงอาทิตย์ โดยเครื่องวัดดังกล่าว แสดงดังรูปที่ 19 ซึ่งเป็นเครื่องวัดแบบเทอร์โมไพร์ที่เป็นชนิดเดียวกับที่ผู้วิจัยใช้ในงานวิจัยครั้งนี้



รูปที่ 19 เครื่องวัดรังสีรวมหรือไพราโมมิเตอร์แบบเทอร์โมไพล์ผลิตโดยบริษัท Kipp & Zonen

2.5.1 หลักการทำงานของเครื่องวัดรังสีรวม

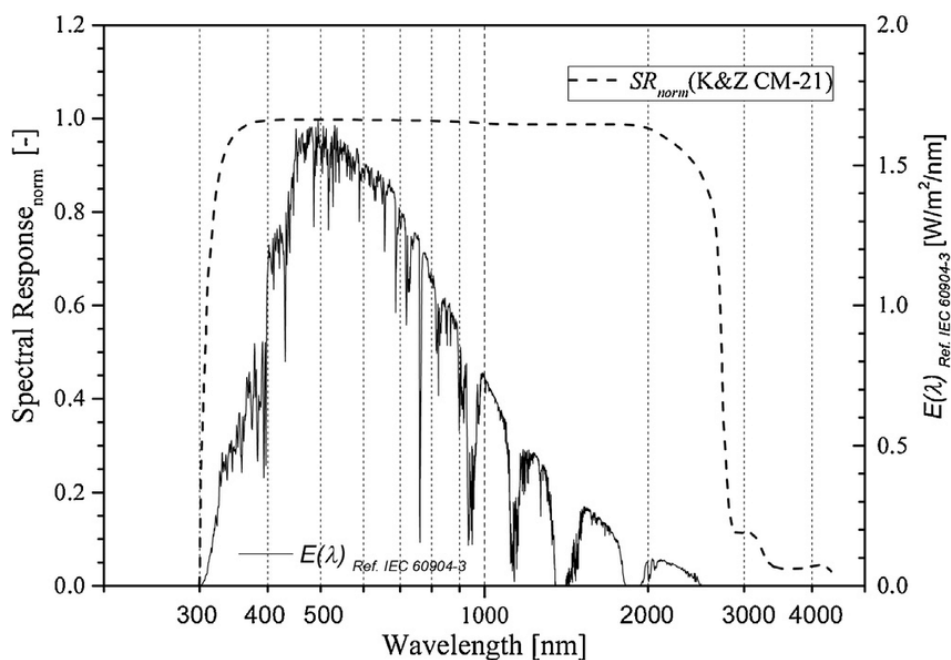
เครื่องวัดรังสีรวมแบบเทอร์โมไพล์จะมีตัวรับรังสีที่ทำด้วยเทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) จำนวนมากต่อกันแบบอนุกรมเรียกว่า เทอร์โมไพล์ (thermopile) และมีโดมแก้วครอบ 2 ชั้น เพื่อป้องกันไม่ให้รังสีอาทิตย์ตกกระทบโดยตรง เมื่อพลังงานแสงอาทิตย์เข้าสู่เครื่องวัดจะถูกดูดกลืนโดยแผ่นรับรังสีสีดำที่อยู่ตรงกลางทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความร้อนที่เกิดขึ้นจากแผ่นดูดซับจะถ่ายเทไปยังภายในตัวเครื่อง ทำให้เกิดความต่างของอุณหภูมิสร้างเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้า (voltage) ขึ้น ซึ่งสามารถนำมาคำนวณเป็นค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$E_{\downarrow \text{solar}} = \frac{V_{\text{output}}}{S} \quad (18)$$

เมื่อ	$E_{\downarrow \text{solar}}$	คือ ความเข้มรังสีรวมที่ตกกระทบ (วัตต์ต่อตารางเมตร)
	V_{output}	คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)
	S	คือ สภาพไวรังสี (sensitivity) หรือค่าการตอบสนอง (responsivity) ของเครื่องวัด (โวลต์ต่อวัตต์ต่อตารางเมตร)

โดยตัวอย่างค่าการตอบสนองของเครื่องวัดรังสีรวม รุ่น CM21 ของบริษัท KIPP&ZONEN แสดงดังรูปที่ 20 ซึ่งพบว่าค่าการตอบสนองเครื่องวัดสามารถตอบสนองครอบคลุมสเปกตรัมของรังสีอาทิตย์ในช่วงประมาณ 0.3 – 3.0 ไมครอน ตั้งแต่ย่าน UVB ไปจนถึง Mid-

infrared ซึ่งมีความละเอียดสูงในการวัด ดังนั้นเครื่องวัดดังกล่าวจึงได้รับความนิยมอย่างมากในการศึกษางานด้านอุตุนิยมวิทยา งานด้านวิจัยเกี่ยวกับฟิสิกส์บรรยากาศ หรือใช้สำหรับการประเมินการผลิตพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากโซลาร์เซลล์อีกด้วย



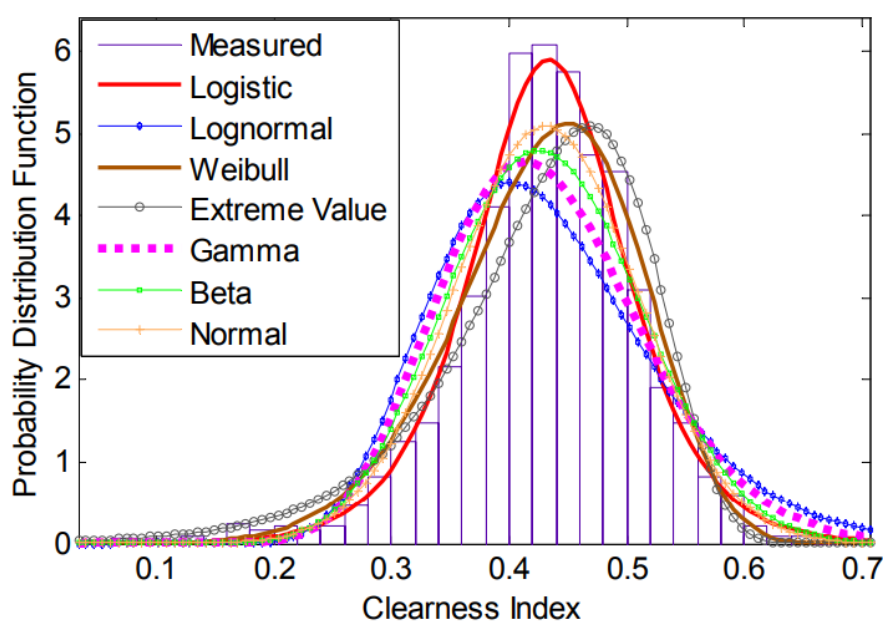
รูปที่ 20 การตอบสนองต่อสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ของเครื่องวัดรังสีรวม (Rodziewicz & Rajfur, 2019)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พลังงานแสงอาทิตย์ถูกนำมาใช้ประโยชน์มากมายในชีวิตประจำวัน ทำให้การศึกษาด้านรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นผิวโลกจึงเป็นเรื่องที่ได้รับความนิยม ซึ่งปัจจุบันมีนักวิทยาศาสตร์หรือนักวิจัยมากมายที่มีการนำเสนองานเกี่ยวกับรังสีอาทิตย์ ดังนี้

เสริม จันทร์ฉาย และ ชังเซ็ง (2532) เลียงจินดาถาวร ทำการวิเคราะห์ข้อมูลพลังงานแสงอาทิตย์ ทั้งรังสีกระจาย รังสีรวม และชั่วโมงที่มีแดด ซึ่งวัดได้ในช่วง 5 ปี (พ.ศ. 2525 – 2529) ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี ผู้วิจัยได้นำข้อมูลดังกล่าวมาสร้างกราฟลักษณะการกระจายของดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศ (clearness index) ขึ้น พบว่าลักษณะของค่าดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศมีความแตกต่างกับความมาตรฐานของ Liu และ Jordan (1960) อย่างมีนัยสำคัญ

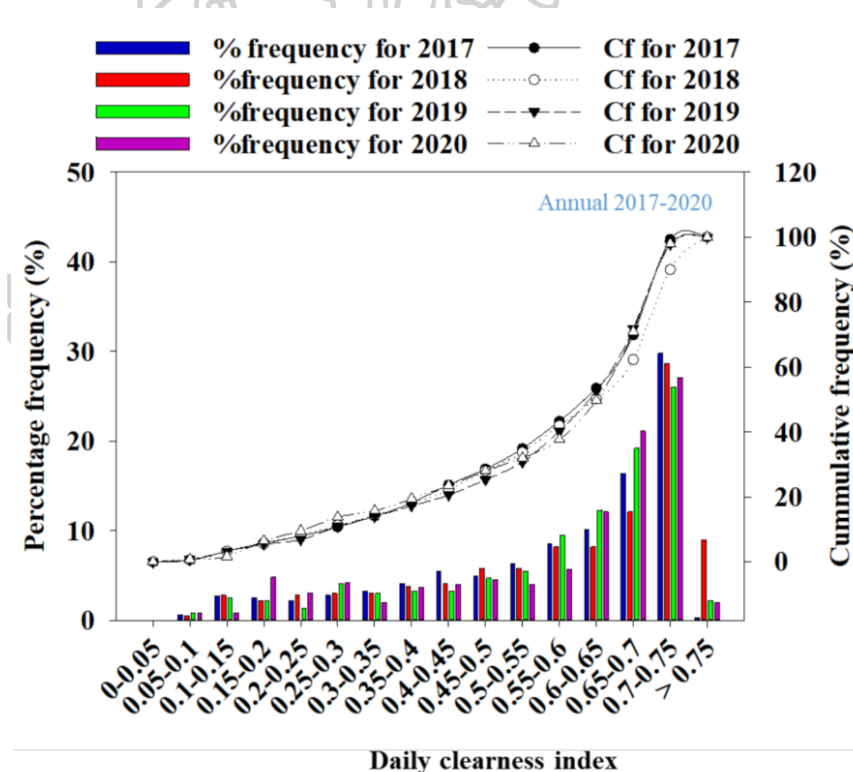
T.R. Ayodele และ A.S.O. Ogunjuyigbe (2015) ทำการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนโดยใช้การกระจายทางสถิติของดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศ โดยผู้วิจัยนำข้อมูลรังสีรวมเป็นระยะเวลา 8 ปี (ค.ศ. 2000-2007) ในเมืองอโบิดัน ประเทศไนจีเรีย มาใช้เพื่อกำหนดพารามิเตอร์ของการแจกแจงความน่าจะเป็นที่เหมาะสมสำหรับดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศมากที่สุด จากนั้นนำพารามิเตอร์ที่คำนวณได้มาใช้ในการทำนายรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนในอนาคตสำหรับปีถัดไป (ค.ศ. 2008) ผลการศึกษาพบว่า การกระจายแบบลอจิสติกเหมาะสมที่สุดสำหรับดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศของเมืองอโบิดัน ประเทศไนจีเรีย ดังแสดงในรูปที่ 21 และวิธีการดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการทำนายรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน โดยมีค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (root mean square error, RMSE) โดยรวมเท่ากับ 0.383 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน ค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์ความคลาดเคลื่อน (mean absolute error, MAE) เท่ากับ 0.295 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน ค่าเฉลี่ยของค่าสัมบูรณ์เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (mean absolute percentage error, MAPE) เท่ากับ 2% และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.967



รูปที่ 21 การปรับดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศให้เหมาะสมต่อการแจกแจงทางสถิติ
(Ayodele & Ogunjuyigbe, 2015)

Özge Ayvazoğluyüksel และ Ümmühan Başaran Filik (2017) ทำการศึกษาแบบจำลองทั้งหมด 6 แบบจำลอง เพื่อประมาณค่ารังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน จากค่ารังสีรวมรายวันในพื้นที่ชานัคคาเล (Çanakkale) ซึ่งตั้งอยู่ทางตะวันตกเฉียงเหนือของประเทศตุรกี พบว่าแบบจำลองที่มีความแม่นยำที่สุดคือแบบจำลองของ Collares-Pereira และ Rabl ที่ปรับปรุงโดย Gueymard (CPRG) ซึ่งแนะนำให้นำมาใช้เพื่อประมาณค่ารังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยรายเดือนในพื้นที่อื่น ๆ ที่มีภูมิอากาศคล้ายกับภาคตะวันตกเฉียงเหนือของตุรกี

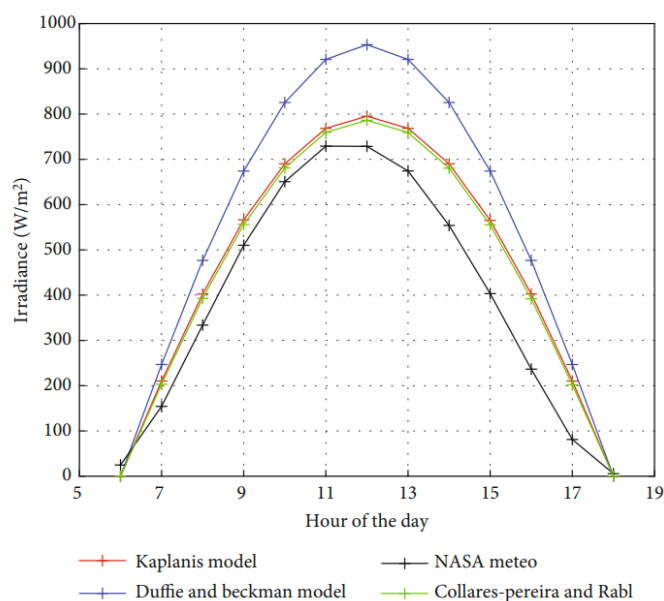
Mohammed Benchrifra และคณะ (2021) พบว่า การใช้งานด้านพลังงานแสงอาทิตย์จำเป็นต้องใช้ข้อมูลของค่ารังสีอาทิตย์รายชั่วโมง แต่สำหรับในหลาย ๆ พื้นที่ ข้อมูลการวัดนี้ไม่สามารถหาได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นไปที่การสร้างฐานข้อมูลของรังสีอาทิตย์แบบรายชั่วโมง ซึ่งสำหรับการหาค่ารังสีรวมรายชั่วโมง (I_h) ปรับปรุงจากแบบจำลองของ Collares-Pereira โดยทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์ให้เหมาะสมกับประเทศโมร็อกโก ผลลัพธ์การทดสอบแบบจำลองกับค่าที่วัดจริงมีค่า (Relative Mean Bias Error, RMBE) ไม่เกิน -1.9%



รูปที่ 22 การแจกแจงความถี่และความถี่สะสมของ K_t ในเมืองอลิซ ประเทศแอฟริกาใต้ ในช่วงปี ค.ศ. 2017 – 2020 (Apeh et al., 2021)

Oliver O. Apeh และคณะ (2021) ได้ทำการวิเคราะห์ลักษณะของรังสีรวมและดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศ (clearness index, K_t) ในเมืองอลิช ประเทศแอฟริกาใต้ เนื่องจากโรงไฟฟ้าถ่านหินในประเทศแอฟริกาใต้มีอายุการใช้งานยาวนาน ทำให้จำเป็นต้องการตัดไฟตามเวลาที่กำหนด ดังนั้นการใช้ทรัพยากรพลังงานแสงอาทิตย์แบบโฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic, PV) กำลังเป็นที่ได้รับความสนใจในประเทศแอฟริกาใต้ โดยเฉพาะเมืองอลิช ซึ่งเป็นเมืองที่ได้รับแสงแดดตลอดทั้งปี จึงเหมาะสมอย่างยิ่งต่อการผลิตพลังงานจากแสงอาทิตย์ โดยผู้วิจัยใช้ข้อมูลรังสีรวมรายชั่วโมงของช่วงปี ค.ศ. 2017 – 2020 มาแปลงเป็น K_t เพื่อใช้สำหรับการจำแนกสภาพท้องฟ้าแบบรายวัน และมีการวิเคราะห์ความถี่สะสมของค่า K_t รายวันในแต่ละเดือน ดังแสดงในรูปที่ 22 ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า เมื่อพิจารณาจากความถี่สะสมของค่า K_t พบว่าสภาพท้องฟ้าจะประกอบไปด้วยวันที่ท้องฟ้ามีเมฆมาก 11.72% วันที่มีเมฆบางส่วน 57% และวันที่ท้องฟ้าแจ่มใส 31.28% ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า เมืองอลิชเป็นพื้นที่ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตพลังงานจากแสงอาทิตย์ เนื่องจากมีความถี่ของท้องฟ้าแจ่มใสและมีเมฆบางในระดับที่ค่อนข้างสูง ($K_t > 0.40$)

Edickson Bobo Yungho และคณะ (2024) ทำการการประมาณค่ารังสีอาทิตย์และอุณหภูมิจากแบบจำลองต่าง ๆ และนำมาใช้ในการคำนวณหาผลผลิตของพลังงานแบบรายปีของแผงเซลล์แสงอาทิตย์ (PV) ในเมือง Bambili ประเทศแคเมอรูน (Cameroon) และสำหรับการประมาณค่ารังสีอาทิตย์ ได้ใช้แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ ได้แก่ แบบจำลอง Angstrom–Prescott แบบจำลองของ Kaplanis แบบจำลองของ Duffie and Beckman และ แบบจำลองของ Collares-Pereira and Rabl ผลลัพธ์ที่ได้พบว่าแบบจำลองของ Collares-Pereira and Rabl มีข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จาก NASA ดังแสดงในรูปที่ 23



รูปที่ 23 การประมาณค่ารังสีอาทิตย์รายชั่วโมงโดยใช้แบบจำลองที่เลือกไว้สำหรับพื้นที่ Bambili (Yungho et al., 2024)

อย่างไรก็ตาม สำหรับประเทศไทยยังไม่มีการวิเคราะห์ลักษณะเชิงภูมิอากาศระยะของ รังสีรวม รวมไปถึงการกระจายของดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศโดยใช้ข้อมูลระยะยาว ผู้วิจัยจึง ดำเนินการศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะดังกล่าว ในอดีตมีนักวิจัยหลาย ๆ ท่านนำเสนอแบบจำลองการ ประมาณค่ารังสีรวมในประเทศไทย แต่แบบจำลองส่วนใหญ่มีความซับซ้อน ซึ่งต้องการอินพุทของ องค์ประกอบบรรยากาศต่าง ๆ แต่ข้อมูลเหล่านี้ไม่ได้มีอยู่ทั่วไป จึงทำให้การนำแบบจำลองไปใช้มี ความยุ่งยาก ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงจะทำการพัฒนาแบบจำลองอย่างง่ายที่อาศัยเฉพาะตำแหน่งของ ดวงอาทิตย์และข้อมูลรังสีรวมขึ้น เพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้ง่ายยิ่งขึ้น สำหรับการประยุกต์ใช้ ทางด้านพลังงานและด้านอื่น ๆ ต่อไป

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานและผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเกี่ยวกับรังสีอาทิตย์หรือรังสีรวมในประเทศไทย ซึ่งวิธีการดำเนินงานต่าง ๆ และผลการวิจัยที่ได้จะถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้ ส่วนแรก ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติเชิงภูมิอากาศระยะยาว 30 ปีของรังสีรวมจากสถานีวัด 4 แห่งที่ตั้งอยู่ในภูมิภาคหลักของประเทศไทย ส่วนที่สอง ทำการวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติของดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศ (clearness index) ในประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลรังสีรวมระยะยาว และส่วนสุดท้ายทำการพัฒนาแบบจำลองสำหรับประมาณค่ารังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนรวมทั้งทดสอบแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเพื่อให้ตรงกับวัตถุประสงค์ในงานวิจัย ผู้วิจัยจึงทำการดำเนินงานโดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 ข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์

การศึกษาทางด้านรังสีอาทิตย์จำเป็นต้องอาศัยข้อมูลรังสีอาทิตย์หรือรังสีรวมเป็นปัจจัยพื้นฐานในการวิเคราะห์และพัฒนาแบบจำลองต่าง ๆ โดยข้อมูลของรังสีรวมจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะทางภูมิอากาศเฉพาะแต่ละพื้นที่ ดังนั้นผู้วิจัยจึงดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลจากสถานีวัดรังสีอาทิตย์ในภูมิภาคหลักของประเทศไทย 4 สถานี เป็นระยะเวลายาวนานถึง 30 ปี (ค.ศ. 1995 – 2024) เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับนำมาวิเคราะห์ลักษณะเชิงสถิติของรังสีรวมในประเทศไทย และนำมาพัฒนาแบบจำลองสำหรับประมาณค่ารังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน โดยใช้ข้อมูลจากสถานีวัดเพิ่มเติมที่กระจายอยู่ทั่วประเทศอีก 10 สถานี รวมเป็นทั้งหมด 14 สถานี โดยรายละเอียดของพื้นที่ที่ทำการศึกษาและเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย มีดังนี้

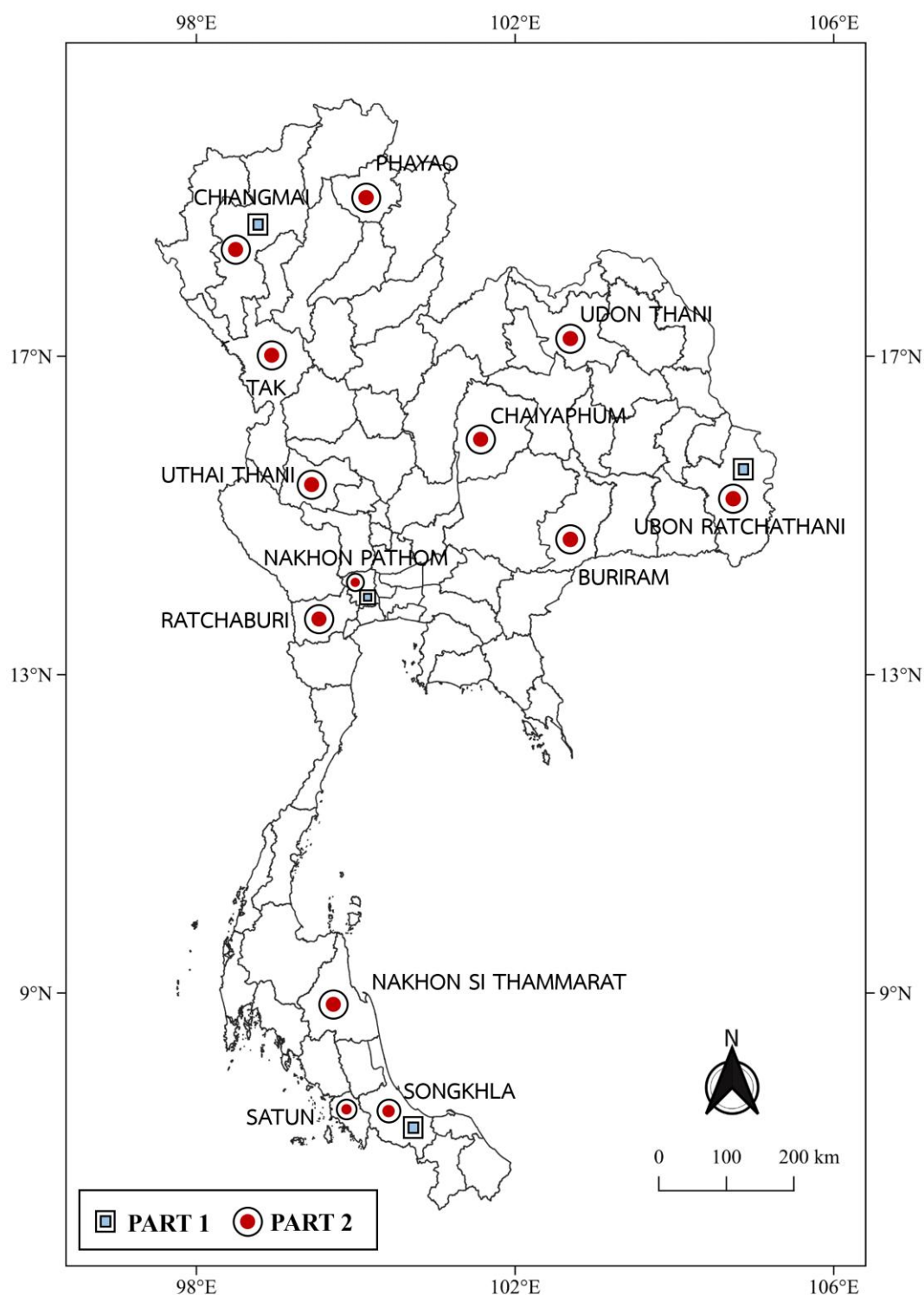
3.1.1 พื้นที่ศึกษาวิจัย

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยทำการเก็บรวบรวมข้อมูลความเข้มรังสีรวม ซึ่งทำการวัดโดยห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์และห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์บรรยากาศ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ข้อมูลที่ทำการเก็บรวบรวมสำหรับใช้ในงานวิจัยมีทั้งหมด 14 สถานีวัดทั่วประเทศ และถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ในส่วนที่หนึ่ง ผู้วิจัยทำการเก็บรวบรวมข้อมูลความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงและรายวันจากสถานีวัด 4 แห่งในภูมิภาคหลักของประเทศไทย ในช่วงปี ค.ศ. 1995 – 2024 เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติระยะยาวและใช้สำหรับพัฒนาแบบจำลอง โดยตำแหน่งของสถานีวัดทั้ง 4 แห่งแทนด้วยสัญลักษณ์สี่เหลี่ยมสีฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 24 และส่วนที่สอง ผู้วิจัยทำการเก็บข้อมูลความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงและรายวันเพิ่มอีก 10

สถานี รวมทั้งหมดเป็น 14 สถานี (สัญลักษณ์วงกลมสีแดงในรูปที่ 24) ในปี ค.ศ. 2024 สำหรับการทดสอบสมรรถนะแบบจำลอง โดยตำแหน่งของแต่ละสถานีแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตำแหน่งของสถานีวัดสำหรับงานวิจัย

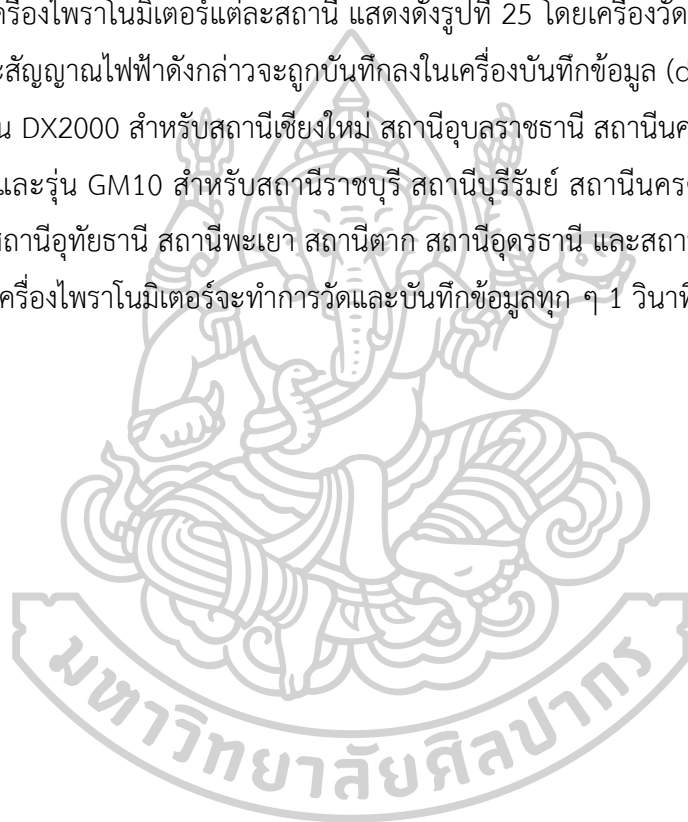
ลำดับที่	ชื่อสถานี	ละติจูด (°N)	ลองจิจูด (°E)
1	ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่	18.78	98.98
2	ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง จังหวัดอุบลราชธานี	15.25	100.04
3	ลานทดลองพลังงานแสงอาทิตย์ ดาดฟ้าอาคาร วิทยาศาสตร์ 1 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย ศิลปากร จังหวัดนครปฐม	13.82	100.60
4	ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัด สงขลา	7.20	104.87
5	สถานีอุตุนิยมวิทยาราชบุรี จังหวัดราชบุรี	13.49	99.79
6	สถานีอุตุนิยมวิทยาสตึก จังหวัดบุรีรัมย์	15.23	103.25
7	สถานีอุตุนิยมวิทยาอุทกฉวาง จังหวัด นครศรีธรรมราช	8.42	99.51
8	สถานีอุตุนิยมวิทยาสตูล จังหวัดสตูล	6.65	100.09
9	สถานีอุตุนิยมวิทยาชัยภูมิ จังหวัดชัยภูมิ	15.81	102.03
10	สถานีอุตุนิยมวิทยาอุทัยธานี จังหวัดอุทัยธานี	15.37	100.04
11	สถานีอุตุนิยมวิทยาพะเยา จังหวัดพะเยา	19.19	99.88
12	สถานีอุตุนิยมวิทยาตาก จังหวัดตาก	16.88	99.14
13	สถานีอุตุนิยมวิทยาอุดรธานี จังหวัดอุดรธานี	17.38	102.81
14	สถานีรายงานดอยอินทนนท์ กองทัพอากาศ อุทยาน แห่งชาติดอยอินทนนท์ จังหวัดเชียงใหม่	18.59	98.49

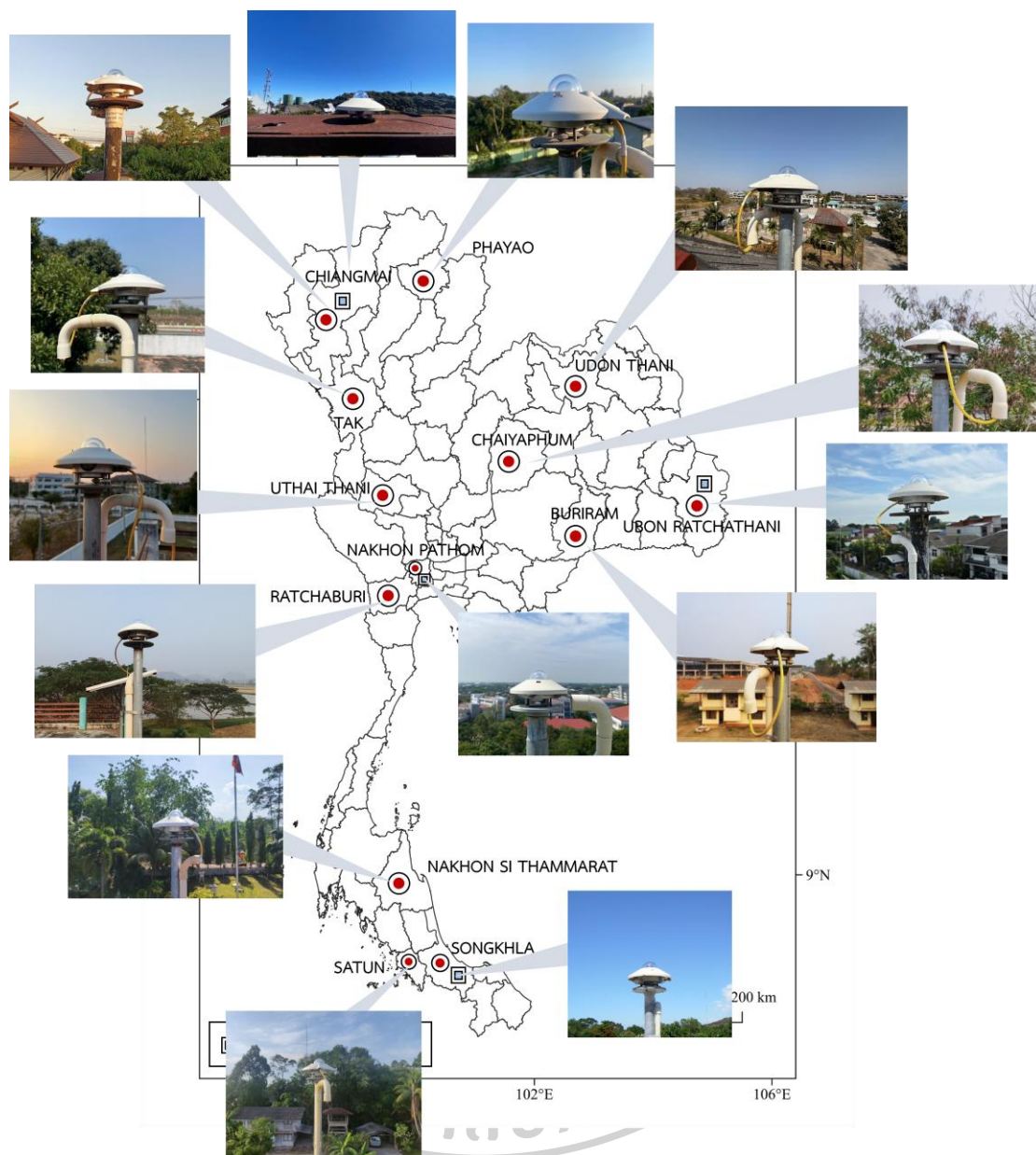


รูปที่ 24 ตำแหน่งที่ตั้งของสถานีวิจัย 14 แห่งที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยสัญลักษณ์สามเหลี่ยมสีแดงแสดงตำแหน่งของสถานีวิจัย 4 แห่งในภูมิภาคหลัก และวงกลมสีแดงแสดงสถานีวิจัยเพิ่มเติม 10 สถานี

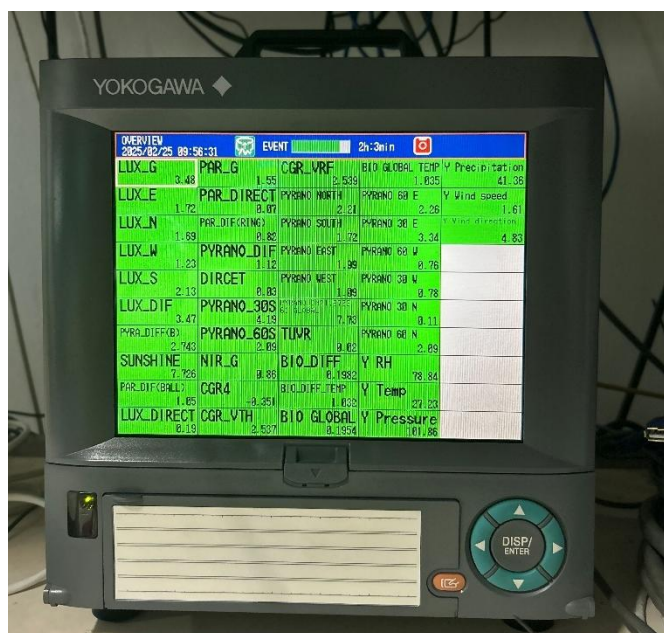
3.1.2 เครื่องวัดและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล

ผู้วิจัยทำการเก็บรวบรวมข้อมูลรังสีรวมจากสถานีวัดต่าง ๆ ทั่วประเทศไทย ซึ่งใช้เครื่องวัดที่ได้มาตรฐานทำให้ได้ข้อมูลที่มีความแม่นยำและเชื่อถือได้สำหรับนำมาวิเคราะห์และพัฒนาแบบจำลอง โดยเครื่องวัดรังสีรวมหรือเครื่องไพราโนมิเตอร์ (pyranometer) เป็นเครื่องวัดที่ผลิตโดยบริษัท KIPP&ZONEN รุ่น CM 21 สำหรับสถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี สถานีนครปฐม และสถานีสงขลา และรุ่น CMP 11 สำหรับสถานีราชบุรี สถานีบุรีรัมย์ สถานีนครศรีธรรมราช สถานีสตูล สถานีชัยภูมิ สถานีอุทัยธานี สถานีพะเยา สถานีตาก สถานีอุดรธานี และสถานีรายงานดอยอินทนนท์ ตัวอย่างของเครื่องไพราโนมิเตอร์แต่ละสถานี แสดงดังรูปที่ 25 โดยเครื่องวัดมีเอาต์พุตเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าและสัญญาณไฟฟ้าง่ายๆจะถูกรับบันทึกลงในเครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) ของบริษัท Yokogawa รุ่น DX2000 สำหรับสถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี สถานีนครปฐม และสถานีสงขลา (ดังรูปที่ 26) และรุ่น GM10 สำหรับสถานีราชบุรี สถานีบุรีรัมย์ สถานีนครศรีธรรมราช สถานีสตูล สถานีชัยภูมิ สถานีอุทัยธานี สถานีพะเยา สถานีตาก สถานีอุดรธานี และสถานีรายงานดอยอินทนนท์ (ดังรูปที่ 27) เครื่องไพราโนมิเตอร์จะทำการวัดและบันทึกข้อมูลทุก ๆ 1 วินาที

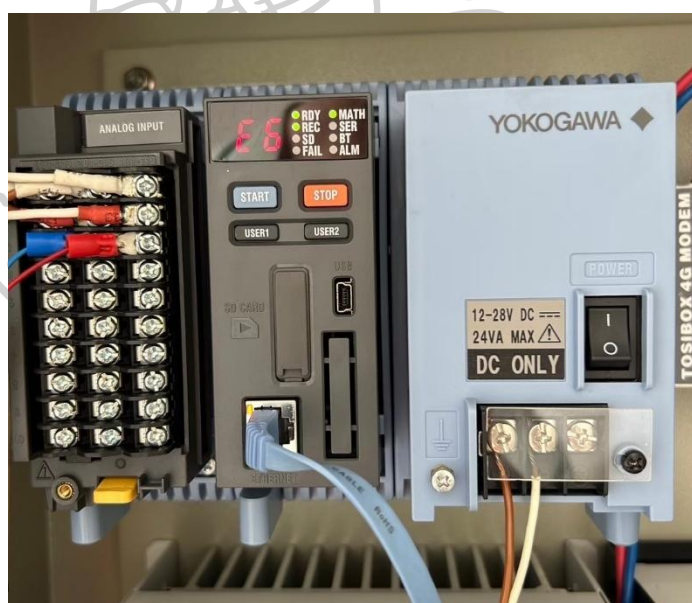




รูปที่ 25 เครื่องไพราโนมิเตอร์ของ 14 สถานีวัดทั่วประเทศไทย



รูปที่ 26 เครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) ของบริษัท Yokogawa รุ่น DX2000

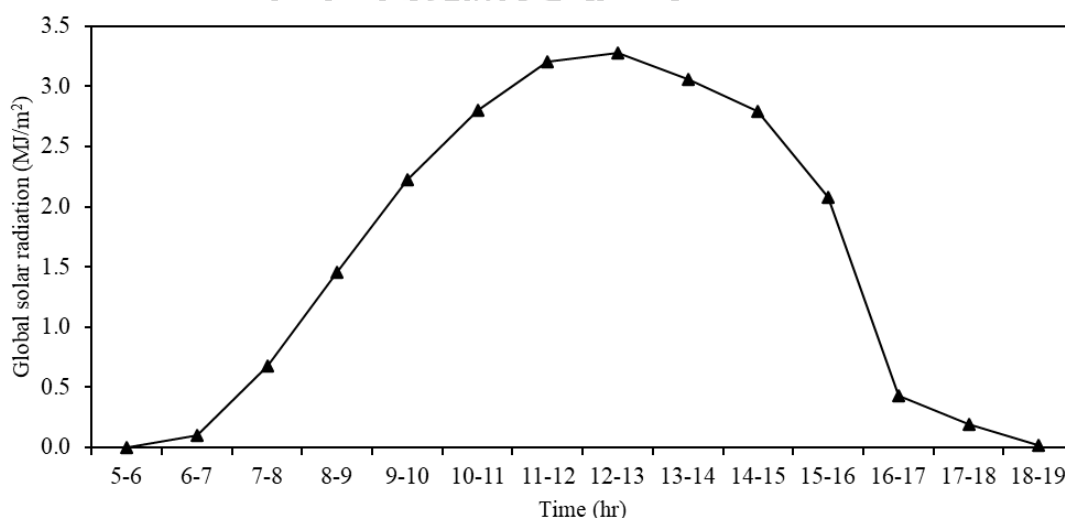


รูปที่ 27 เครื่องบันทึกข้อมูล (data logger) ของบริษัท Yokogawa รุ่น GM10

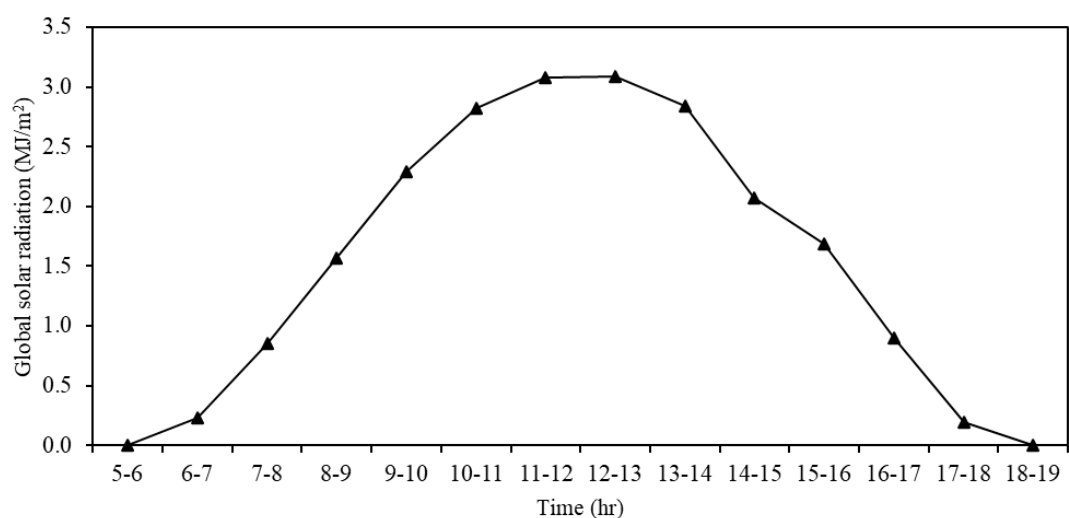
ข้อมูลสัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องไพราโนมิเตอร์จะถูกแปลงไปเป็นความเข้มรังสีรวมรายวินาที โดยอาศัยค่าการตอบสนองของหัววัด (sensitivity) ดังสมการที่ (18) หลังจากนั้นนำค่าดังกล่าวมาเฉลี่ยเป็นรายชั่วโมงในหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตร ต่อมาผู้วิจัยต้องการข้อมูลรายชั่วโมงในหน่วยเมกะจูลต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ($\text{MJ/m}^2 / \text{hr}$) จึงทำการแปลงโดยใช้สมการดังนี้

$$I (\text{MJ/m}^2 / \text{hr}) = \frac{I_{\text{aveg}} (\text{W} / \text{m}^2) \times 3600}{1,000,000} \quad (19)$$

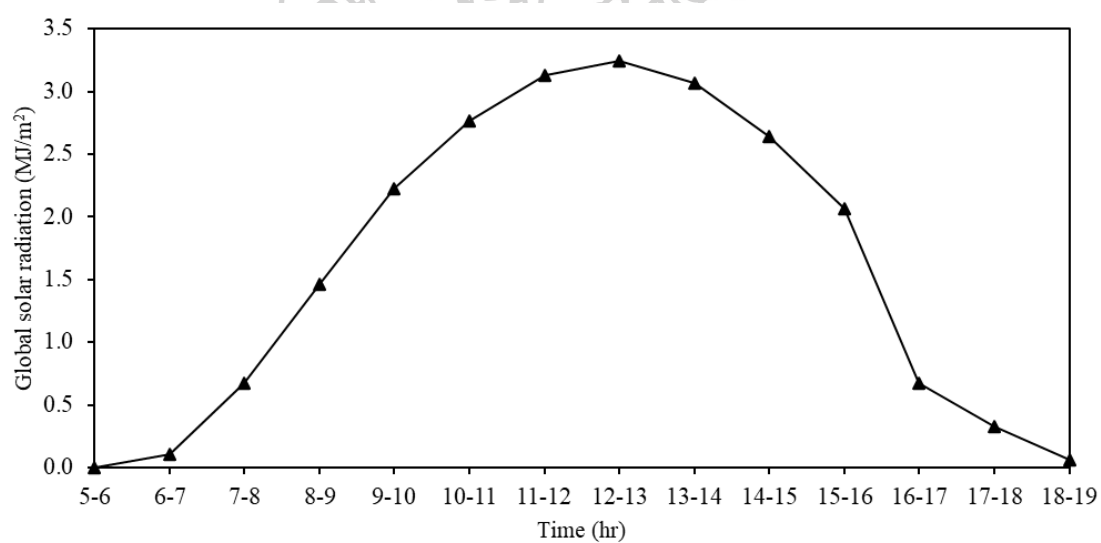
การนำค่ารายชั่วโมงเฉลี่ยมาคูณกับ 3,600 และหารด้วย 1,000,000 จะได้ออกมาเป็นความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงในหน่วยของเมกะจูลต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ($\text{MJ/m}^2 / \text{hr}$) จากนั้นรวมความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงตลอดทั้งวัน ทำให้ได้รังสีรวมรายวันในหน่วยเมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน ($\text{MJ/m}^2 / \text{day}$) โดยลักษณะของข้อมูลความเข้มรังสีรวมจะมีการแปรค่าตลอดทั้งวันแบบระฆังคว่ำในกรณีท้องฟ้าแจ่มใส ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 28 – 31



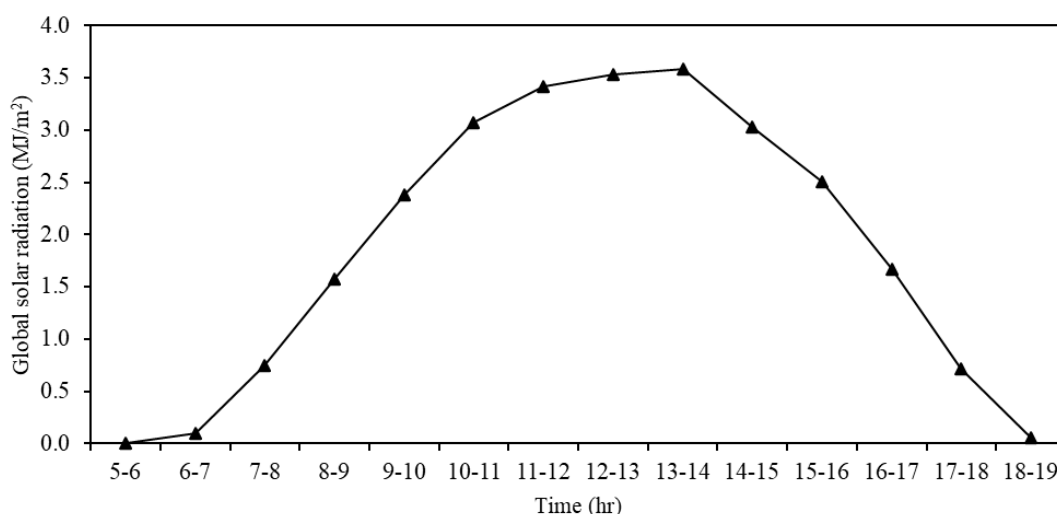
รูปที่ 28 ตัวอย่างการแปรค่าของความเข้มรังสีรวมของสถานีเชียงใหม่ตั้งแต่ 5:00 – 19:00 ในวันที่ 13 เมษายน ค.ศ. 2024



รูปที่ 29 ตัวอย่างการแปรค่าของความเข้มรังสีรวมของสถานีอุบลราชธานีตั้งแต่ 5:00 – 19:00 ในวันที่ 13 เมษายน ค.ศ. 2024



รูปที่ 30 ตัวอย่างการแปรค่าของความเข้มรังสีรวมของสถานีนครพนมตั้งแต่ 5:00 – 19:00 ในวันที่ 13 เมษายน ค.ศ. 2024



รูปที่ 31 ตัวอย่างการแปรค่าของความเข้มรังสีรวมของสถานีสงขลาตั้งแต่ 5:00 – 19:00 ในวันที่ 13 เมษายน ค.ศ. 2024

3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในส่วนของการดำเนินงานวิจัยจะถูกแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ การวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติเชิงภูมิอากาศระยะยาวของรังสีรวมจากสถานีวัด 4 แห่งในภูมิภาคหลักของประเทศไทย และการวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติของดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศ (clearness index) ในประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลรังสีรวมระยะยาว ส่วนต่อมาเป็นการพัฒนาแบบจำลองสำหรับการประมาณค่ารังสีรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน และสุดท้ายเป็นการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติเชิงภูมิอากาศระยะยาวของรังสีรวมจากสถานีวัด 4 แห่งในภูมิภาคหลักของประเทศไทย

ในการดำเนินงานวิจัย ข้อมูลความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนและค่าเฉลี่ยรายปีจากสถานีวัด 4 แห่งที่ตั้งอยู่ในภูมิภาคหลักของประเทศไทย ถูกนำมาเขียนกราฟกับปี โดยแกน x เป็นค่าความเข้มรังสีรวมในหน่วยเมกะจูลต่อตารางเมตร แกน y เป็นปี (ค.ศ. 1995 – 2024) เพื่อนำมาศึกษาวิเคราะห์ลักษณะของความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนและค่าเฉลี่ยรายปีของตลอด 30 ปี ต่อมาทำการนำค่าความเข้มรังสีรวมเฉลี่ยรายปีมาคำนวณอัตราการเปลี่ยนแปลงแบบปีต่อปี เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มรังสีรวมเมื่อเทียบกับปีก่อนหน้า ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Growth rate}_n (\%) = \frac{(Y_{\text{year}_n} - Y_{\text{year}_{n-1}})}{Y_{\text{year}_{n-1}}} \times 100 \quad (20)$$

โดยที่	Growth rate_n	คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงแบบปีต่อปี (%)
	Y_{year_n}	คือ ความเข้มรังสีรวมเฉลี่ยรายปีในปีที่ n (เมกะจูลต่อตารางเมตร)
	$Y_{\text{year}_{n-1}}$	คือ ความเข้มรังสีรวมเฉลี่ยรายปีในปีที่ n - 1 (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

ค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงแบบปีต่อปีจากการคำนวณถูกนำมาเขียนกราฟกับความเข้มรังสีรวมเฉลี่ยรายปีและปี รวมทั้งแสดงการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ยของอัตราการเปลี่ยนแปลงตลอดทั้ง 30 ปี เพื่อวิเคราะห์ว่าแต่ละปีมีค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงมากน้อยเพียงใด

ต่อมาผู้วิจัยทำการหาอัตราการเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยในระยะยาวตลอดช่วง 30 ปีที่ผ่าน มาจากการเขียนกราฟ โดยให้แกน x เป็นปี และแกน y เป็นความเข้มรังสีรวมเฉลี่ยรายปี ต่อมาทำการพิทข้อมูลที่ได้ให้เป็นสมการเส้นตรง และนำค่าความชันหรืออัตราการเปลี่ยนแปลงของความเข้มรังสีรวมเฉลี่ยรายปีต่อปีเทียบกับค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีรวมระยะยาวตลอดช่วงเวลาที่ศึกษา เพื่อวิเคราะห์แนวโน้มการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของปริมาณรังสีรวมเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีรวมระยะยาว 30 ปี ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{Growth rate (\% per year)} = \frac{\text{Slope}}{\text{the average annual global solar radiation}} \times 100 \quad (21)$$

เมื่อ	Growth rate	คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของแต่ละปี (% ต่อปี)
	Slope	คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของความเข้มรังสีรวมเฉลี่ยรายปีต่อปี (เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อปี)

3.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติของดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศ (clearness index) ในประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลรังสีรวมระยะยาว

ผู้วิจัยทำการคำนวณหาดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศของทั้ง 4 สถานีวัดในภูมิภาคหลักของประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลในช่วงปี ค.ศ. 1995 – 2024 จากสมการที่ (16) และสมการที่ (17) ต่อมาทำการนำค่าที่ได้มาแสดงผล โดยเขียนกราฟที่มีแกน x เป็นค่าดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศรายวัน (K_T) และแกน y เป็นความถี่สะสม (f) ซึ่งดัดแปลงมาจาก Liu และ Jordan (1960) โดยค่า

ดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศที่ได้จะสามารถบ่งบอกถึงลักษณะทางภูมิศาสตร์และสภาพอากาศของแต่ละพื้นที่ที่ทำการศึกษาได้

3.2.3 การพัฒนาแบบจำลองสำหรับการประมาณค่ารังสีรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน

ในการประยุกต์ใช้งานด้านพลังงานแสงอาทิตย์ เช่น การประเมินศักยภาพของแผงเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้า การทราบค่ารังสีรวมรายวันอาจไม่เพียงพอต่อการประยุกต์ใช้งานและจำเป็นที่จะต้องทราบค่ารายชั่วโมงด้วย แต่โดยทั่วไปข้อมูลรายชั่วโมงดังกล่าวไม่สามารถหาได้หรือตำแหน่งที่มีการวัดอาจจะมีข้อมูลขาดหายไป ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการพัฒนาแบบจำลองเพื่อนำไปใช้สำหรับประมาณค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ในบริเวณต่าง ๆ หรือที่ขาดหายไป ซึ่งแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้จะเป็นแบบจำลองอย่างง่ายและไม่จำเป็นต้องใช้ตัวแปรทางบรรยากาศที่เกี่ยวข้องมาช่วยสร้างแบบจำลอง ซึ่งจะทำให้ได้แบบจำลองที่นำไปใช้งานง่าย

แบบจำลองสำหรับประมาณค่ารังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่จะพัฒนาขึ้นมีพื้นฐานมาจากแบบจำลองของ Collares-Pereira และ Rabl (1979) แบบจำลองนี้พิจารณาอัตราส่วนของรังสีรวมรายชั่วโมงต่อรังสีรวมรายวันกับรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายชั่วโมงต่อรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันเป็นฟังก์ชันของตำแหน่งดวงอาทิตย์ ซึ่งพิจารณาในเทอมของมุมชั่วโมงของ ดวงอาทิตย์ โดยมีรูปแบบของสมการดังนี้

$$\left(\frac{\bar{I}/\bar{H}}{\bar{I}_0/\bar{H}_0} \right) = a + b \cos \omega_i \quad (22)$$

โดย a และ b เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ นอกจากนี้ เพื่อให้แบบจำลองมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์ a และ b ถูกนำมาพิจารณาให้เป็นฟังก์ชันของมุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตกและมุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตกต่ำสุด ดังแสดงในสมการที่ (23) และสมการที่ (24)

$$a = a' \sin(\bar{\omega}_{ss} - \omega_{ss_{\min}}) + a'' \quad (23)$$

$$b = b' \sin(\bar{\omega}_{ss} - \omega_{ss_{\min}}) + b'' \quad (24)$$

เมื่อ $\bar{I}$ คือ ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

$\overline{H}$	คือ ความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (เมกะจูลต่อตารางเมตร)
$\bar{I}_0$	คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน (เมกะจูลต่อตารางเมตร) คำนวณตามสมการที่ (12)
$\overline{H}_0$	คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (เมกะจูลต่อตารางเมตร) คำนวณได้จากสมการที่ (14)
ω_i	คือ มุมชั่วโมงของดวงอาทิตย์ (องศา) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (3)
$\overline{\omega}_{ss}$	คือ มุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตกเฉลี่ย (องศา) คำนวณจากสมการที่ (6)
$\omega_{ss_{min}}$	คือ มุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตกต่ำที่สุด (องศา)
a a' a'' b b' และ b''	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง

สำหรับขั้นตอนและรายละเอียดในการสร้างแบบจำลองเพื่อประมาณค่ารังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน มีดังนี้

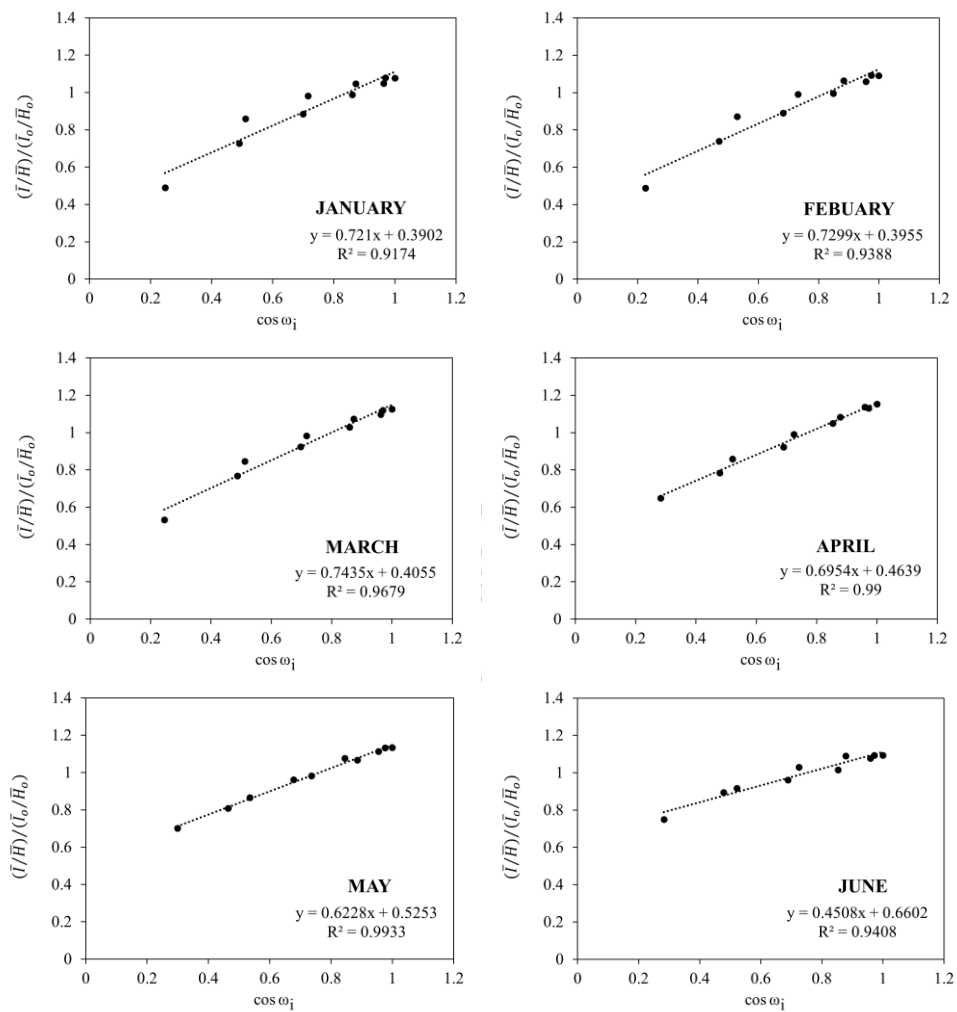
1) ผู้วิจัยทำการเก็บรวบรวมข้อมูลรังสีรวมจากสถานีวัด 14 แห่งทั่วประเทศไทย ได้แก่ สถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี สถานีนครปฐม สถานีสงขลา สถานีราชบุรี สถานีบุรีรัมย์ สถานีนครศรีธรรมราช สถานีสตูล สถานีชัยภูมิ สถานีอุทัยธานี สถานีพะเยา สถานีตาก สถานีอุดรธานี และสถานีรายงานดอยอินทนนท์ ตำแหน่งที่ตั้งของแต่ละสถานีแสดงดังตารางที่ 3

2) ข้อมูลที่เก็บรวบรวมอยู่ในช่วงปี ค.ศ. 1995 – 2024 ในหัวข้อ 3.1.1 ถูกแบ่งออกเป็น 2 ชุด ดังนี้ ข้อมูลชุดแรกใช้สำหรับการสร้างแบบจำลอง และชุดที่สองที่สองใช้สำหรับการทดสอบแบบจำลองที่สร้างขึ้น รายละเอียดช่วงข้อมูลและการนำข้อมูลไปใช้งาน แสดงดังตารางที่ 4

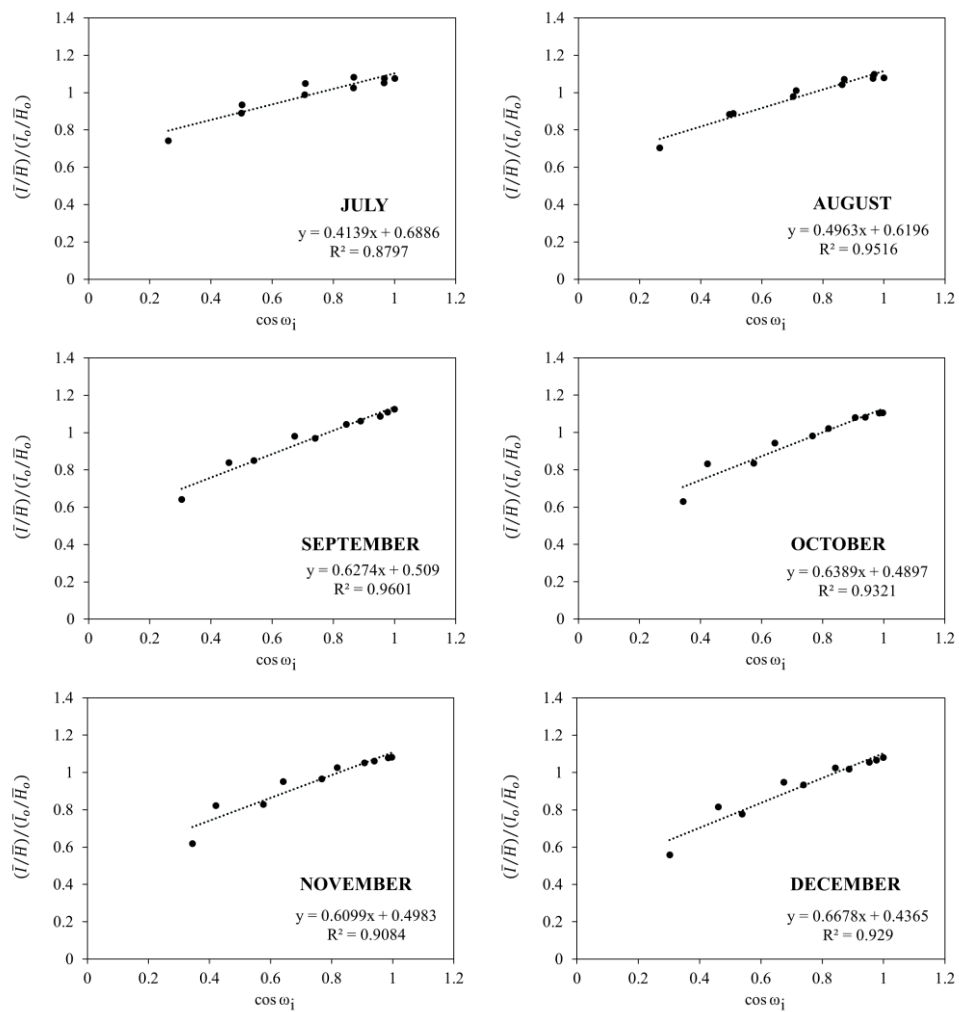
ตารางที่ 4 ระยะเวลาและการแบ่งชุดข้อมูลสำหรับการสร้างแบบจำลองและทดสอบแบบจำลอง

สถานี	ปี ค.ศ. ของข้อมูล	ประเภทข้อมูล
ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่	1995 - 2023	สร้างแบบจำลอง
	2024	ทดสอบแบบจำลอง
ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง จังหวัดอุบลราชธานี	1995 - 2023	สร้างแบบจำลอง
	2024	ทดสอบแบบจำลอง
ลานทดลองพลังงานแสงอาทิตย์ ดาดฟ้าอาคาร วิทยาศาสตร์ 1 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย ศิลปากร จังหวัดนครปฐม	1995 - 2023	สร้างแบบจำลอง
	2024	ทดสอบแบบจำลอง
ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา	1995 - 2023	สร้างแบบจำลอง
	2024	ทดสอบแบบจำลอง
สถานีอุตุนิยมวิทยาราชบุรี จังหวัดราชบุรี	2024	ทดสอบแบบจำลอง
สถานีอุตุนิยมวิทยาสตึก จังหวัดบุรีรัมย์	2024	ทดสอบแบบจำลอง
สถานีอุตุนิยมวิทยาอุทกฉวาง จังหวัดนครศรีธรรมราช	2024	ทดสอบแบบจำลอง
สถานีอุตุนิยมวิทยาสตูล จังหวัดสตูล	2024	ทดสอบแบบจำลอง
สถานีอุตุนิยมวิทยาชัยภูมิ จังหวัดชัยภูมิ	2024	ทดสอบแบบจำลอง
สถานีอุตุนิยมวิทยาอุทัยธานี จังหวัดอุทัยธานี	2024	ทดสอบแบบจำลอง
สถานีอุตุนิยมวิทยาพะเยา จังหวัดพะเยา	2024	ทดสอบแบบจำลอง
สถานีอุตุนิยมวิทยาตาก จังหวัดตาก	2024	ทดสอบแบบจำลอง
สถานีอุตุนิยมวิทยาอุดรธานี จังหวัดอุดรธานี	2024	ทดสอบแบบจำลอง
สถานีรายงานดอยอินทนนท์ กองทัพอากาศ อุทยาน แห่งชาติดอยอินทนนท์ จังหวัดเชียงใหม่	2024	ทดสอบแบบจำลอง

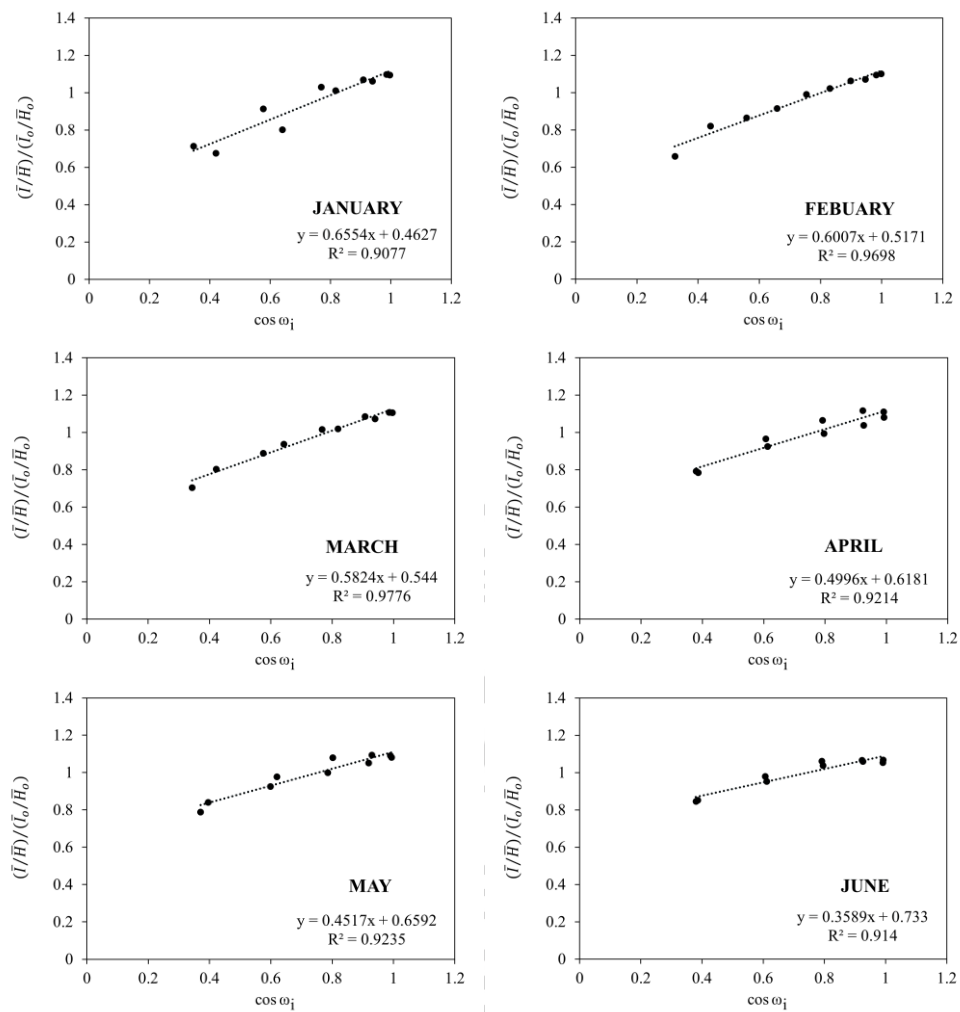
3) คำนวณหาอัตราส่วนระหว่างค่ารังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน ($\bar{I}$) กับค่ารังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน ($\bar{H}$) และอัตราส่วนระหว่างค่ารังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน ($\bar{I}_0$) ดังสมการที่ (12) กับค่ารังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือน ($\bar{H}_0$) ดังสมการที่ (14) แล้วนำค่า $\bar{I}/\bar{H}$ และ $\bar{I}_0/\bar{H}_0$ ไปเขียนกราฟกับมุมชั่วโมงของดวงอาทิตย์โดยใช้ข้อมูลของสถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี สถานีนครปฐม และสถานีสงขลา ซึ่งทำการใช้มุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตกต่ำที่สุดมีค่าเท่ากับ 81° ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ a และ b (สมการที่ (22)) ของทั้ง 12 เดือน ดังแสดงในรูปที่ 32 – 39 และตารางที่ 5



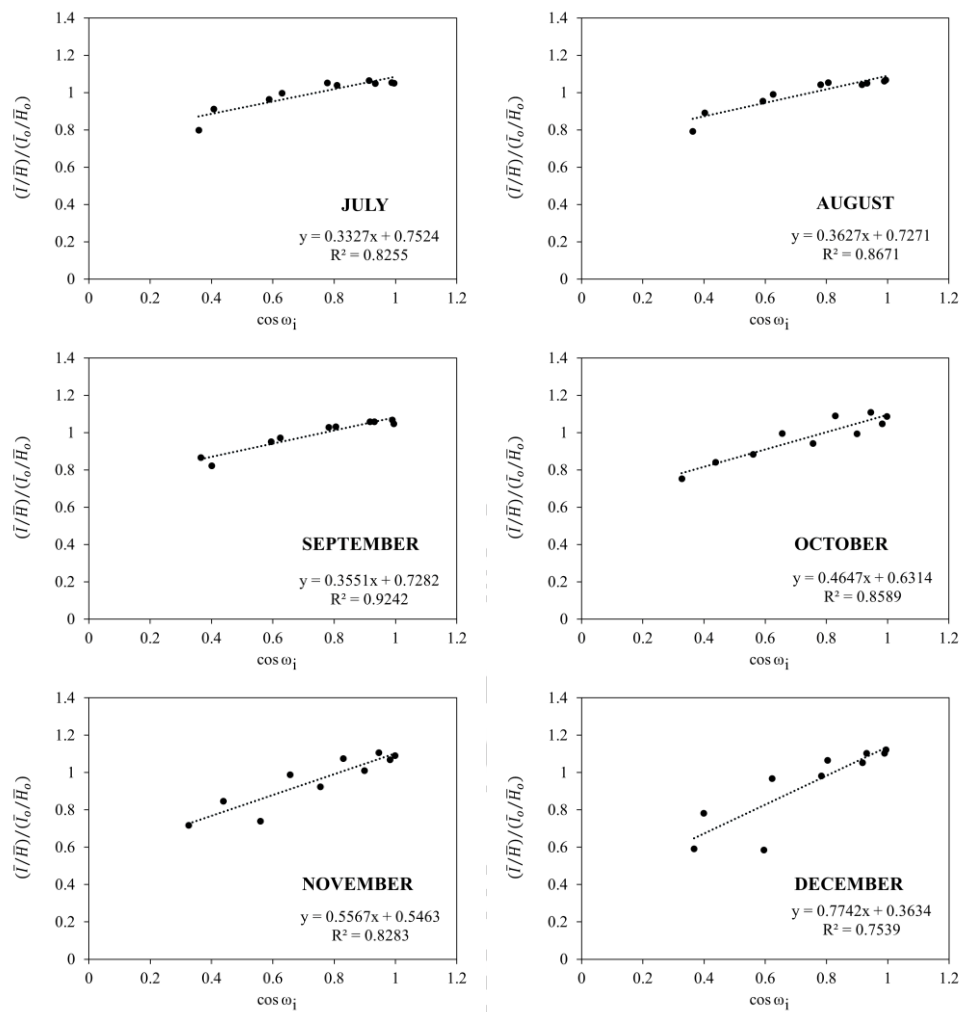
รูปที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนต่อรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนต่อรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนต่อรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือน $\left(\frac{\bar{I}/\bar{H}}{\bar{I}_o/\bar{H}_o} \right)$ กับโคไซน์ของมุมชั่วโมง ($\cos \omega_i$) ตั้งแต่เดือนมกราคมจนถึงมิถุนายนสำหรับสถานีเชียงใหม่



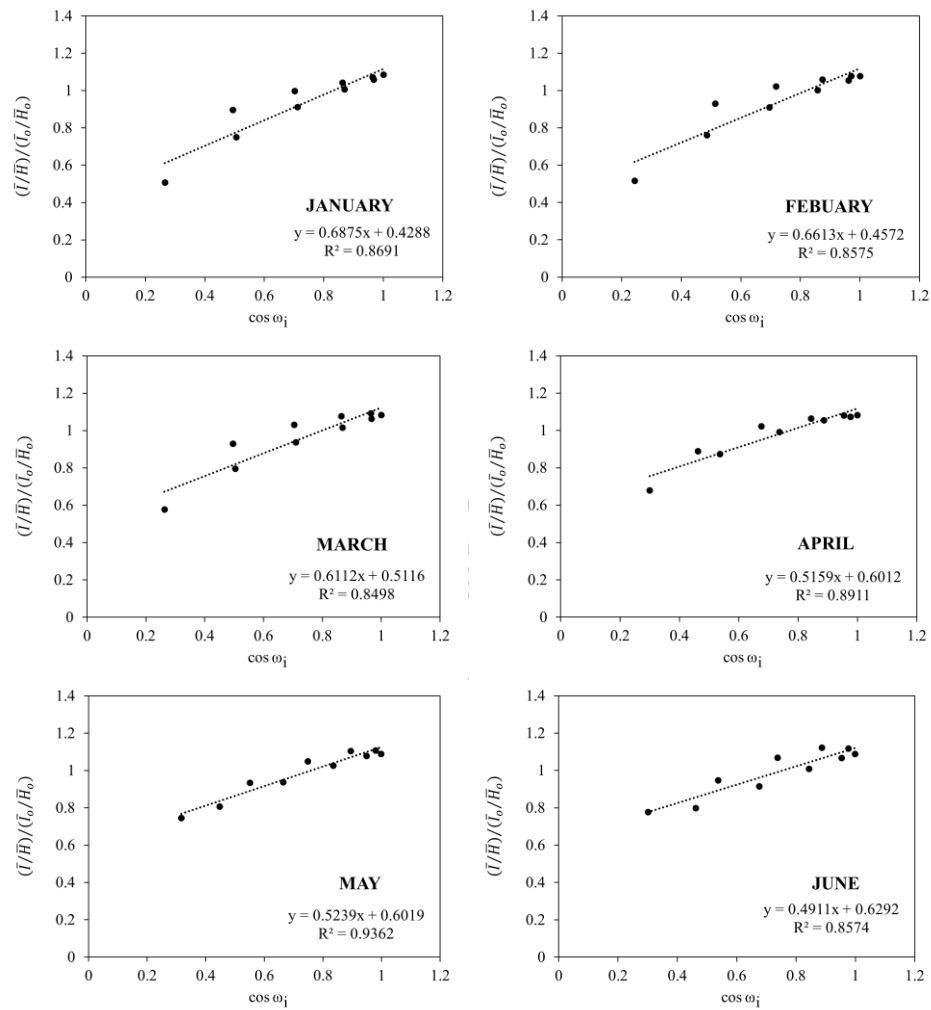
รูปที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนต่อรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนต่อรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนต่อรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือน $\left(\frac{\bar{I}/\bar{H}}{\bar{I}_o/\bar{H}_o} \right)$ กับโคไซน์ของมุมชั่วโมง $(\cos \omega_i)$ ตั้งแต่เดือนกรกฎาคมจนถึงธันวาคมสำหรับสถานีเชียงใหม่



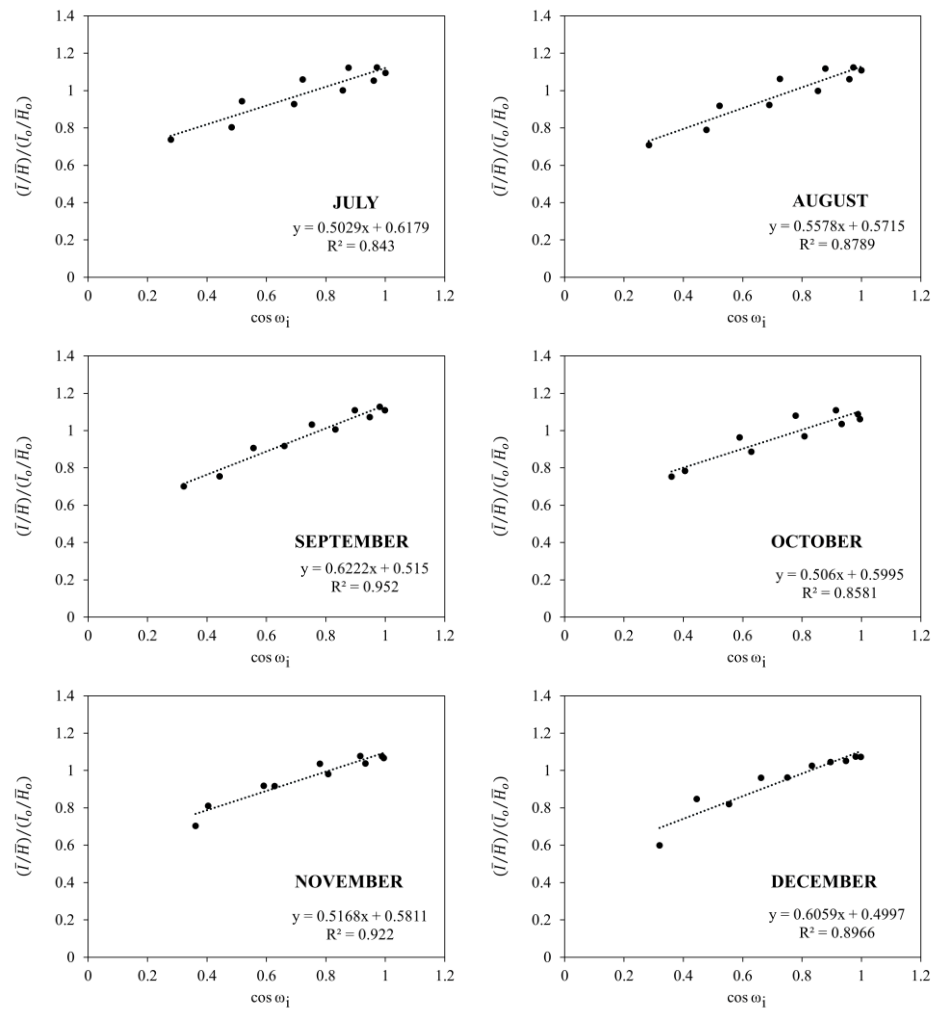
รูปที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนต่อรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนต่อรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนต่อรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือน $\left(\frac{\bar{I}/\bar{H}}{\bar{I}_0/\bar{H}_0} \right)$ กับโคไซน์ของมุมชั่วโมง ($\cos \omega_i$) ตั้งแต่เดือนมกราคมจนถึงมิถุนายนสำหรับสถานีอุบลราชธานี



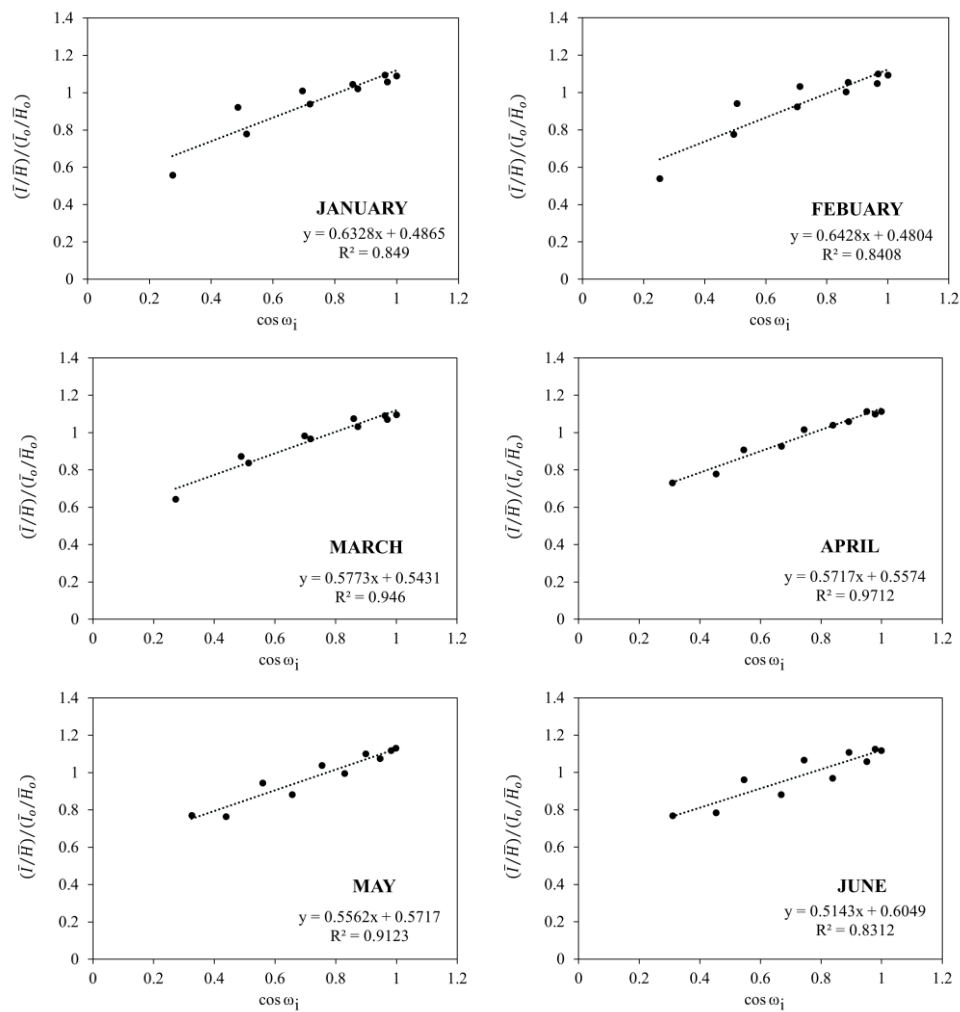
รูปที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนต่อรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนต่อรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนต่อรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือน $\left(\frac{\bar{I}/\bar{H}}{\bar{I}_o/\bar{H}_o} \right)$ กับโคไซน์ของมุมชั่วโมง ($\cos \omega_i$) ตั้งแต่เดือนกรกฎาคมจนถึงธันวาคมสำหรับสถานีอุบลราชธานี



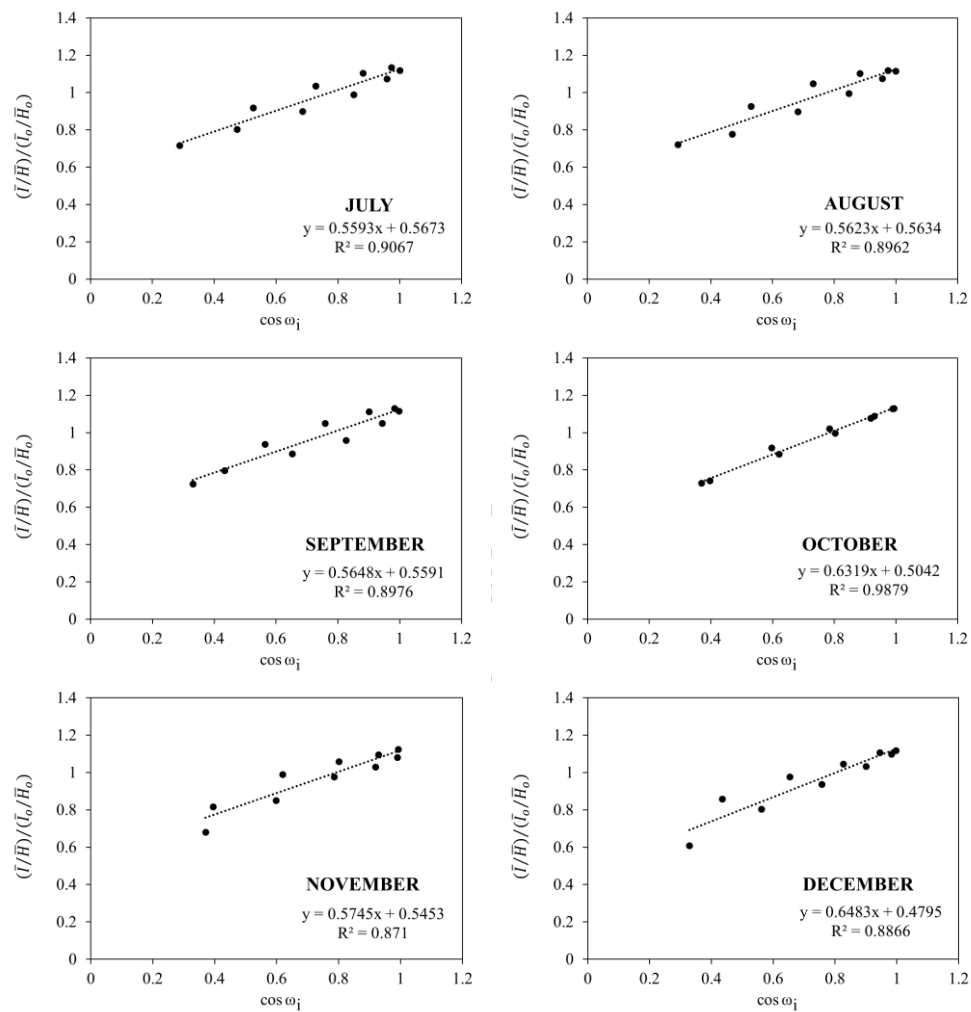
รูปที่ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนต่อรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนต่อรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนต่อรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือน $\left(\frac{\bar{I}/\bar{H}}{\bar{I}_o/\bar{H}_o} \right)$ กับโคไซน์ของมุมชั่วโมง ($\cos \omega_i$) ตั้งแต่เดือนมกราคมจนถึงมิถุนายนสำหรับสถานีนครปฐม



รูปที่ 37 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนต่อรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนต่อรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนต่อรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือน $\left(\frac{\bar{I}/\bar{H}}{\bar{I}_o/\bar{H}_o} \right)$ กับโคไซน์ของมุมชั่วโมง ($\cos \omega_i$) ตั้งแต่เดือนกรกฎาคมจนถึงธันวาคมสำหรับสถานีนครปฐม



รูปที่ 38 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนต่อรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนต่อรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนต่อรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือน $\left(\frac{\bar{I}/\bar{H}}{\bar{I}_o/\bar{H}_o} \right)$ กับโคไซน์ของมุมชั่วโมง $(\cos \omega_i)$ ตั้งแต่เดือนมกราคมจนถึงมิถุนายนสำหรับสถานีสงขลา

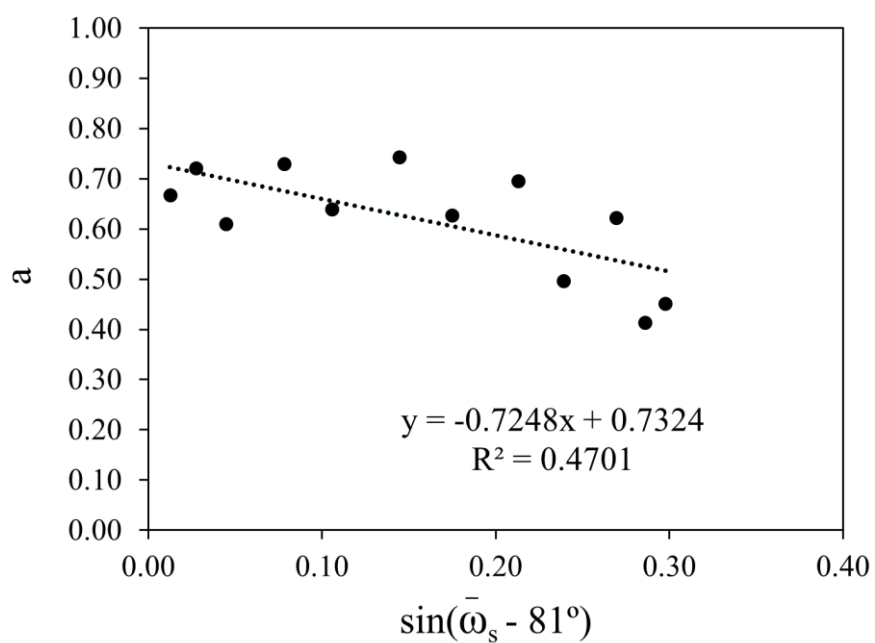


รูปที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนต่อรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนต่อรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนต่อรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันเฉลี่ยต่อเดือน $\left(\frac{\bar{I}/\bar{H}}{\bar{I}_o/\bar{H}_o} \right)$ กับโคไซน์ของมุมชั่วโมง $(\cos \omega_i)$ ตั้งแต่เดือนกรกฎาคมจนถึงธันวาคมสำหรับสถานีสงขลา

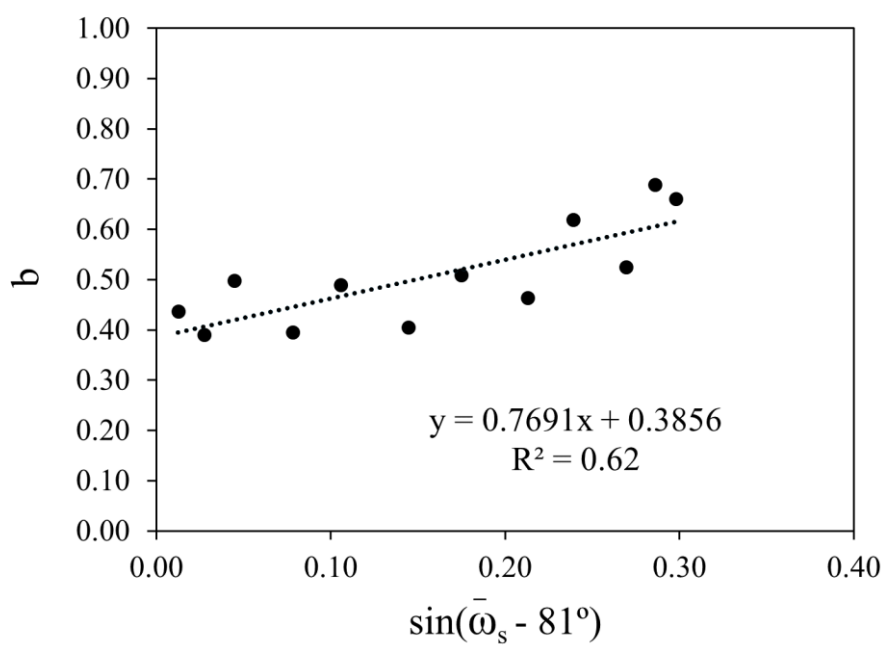
ตารางที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์ a และ b สำหรับแต่ละเดือนสำหรับสถานีวัด 4 แห่ง

เดือน	เชียงใหม่		อุบลราชธานี		นครปฐม		สงขลา	
	a	b	a	b	a	b	a	b
มกราคม	0.7210	0.3902	0.6554	0.4627	0.6875	0.4288	0.6328	0.4865
กุมภาพันธ์	0.7299	0.3955	0.6007	0.5171	0.6613	0.4572	0.6428	0.4804
มีนาคม	0.7435	0.4055	0.5824	0.5440	0.6112	0.5116	0.5773	0.5431
เมษายน	0.6954	0.4639	0.4996	0.6181	0.5159	0.6012	0.5717	0.5574
พฤษภาคม	0.6228	0.5253	0.4517	0.6592	0.5239	0.6019	0.5562	0.5717
มิถุนายน	0.4508	0.6602	0.3589	0.7330	0.4911	0.6292	0.5143	0.6049
กรกฎาคม	0.4139	0.6886	0.3327	0.7524	0.5029	0.6179	0.5593	0.5673
สิงหาคม	0.4963	0.6196	0.3627	0.7271	0.5578	0.5715	0.5623	0.5634
กันยายน	0.6274	0.5090	0.3551	0.7282	0.6222	0.5150	0.5648	0.5591
ตุลาคม	0.6389	0.4897	0.4647	0.6314	0.5060	0.5995	0.6319	0.5042
พฤศจิกายน	0.6099	0.4983	0.5567	0.5463	0.5168	0.5811	0.5745	0.5453
ธันวาคม	0.6678	0.4365	0.7742	0.3634	0.6059	0.4997	0.6483	0.4795

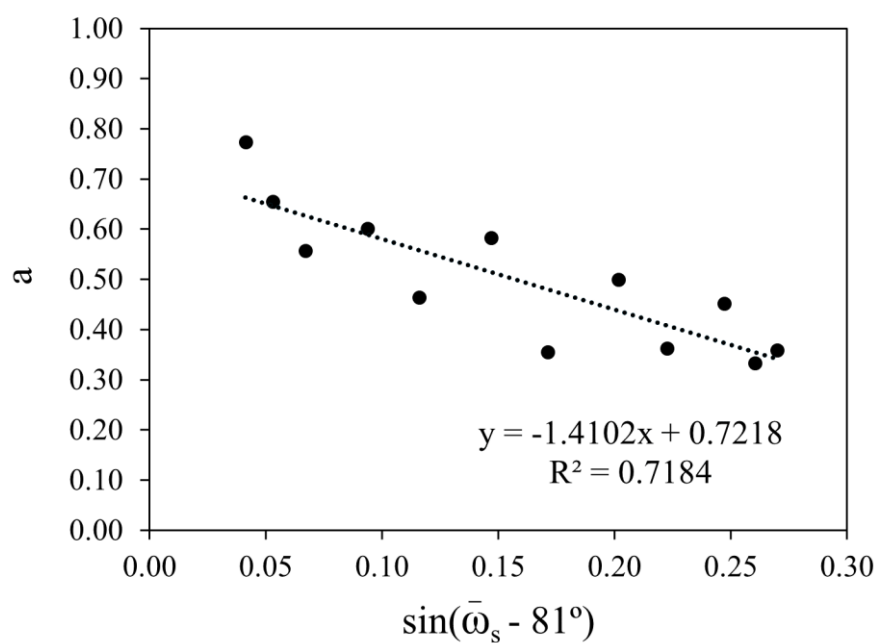
4) นำค่าสัมประสิทธิ์ a และ b ในตารางที่ 5 มาเขียนกราฟกับมุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตกเฉลี่ยและมุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตกต่ำที่สุด เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ a' a'' b' และ b'' (สมการที่ (23) และสมการที่ (24)) ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 40 – 47



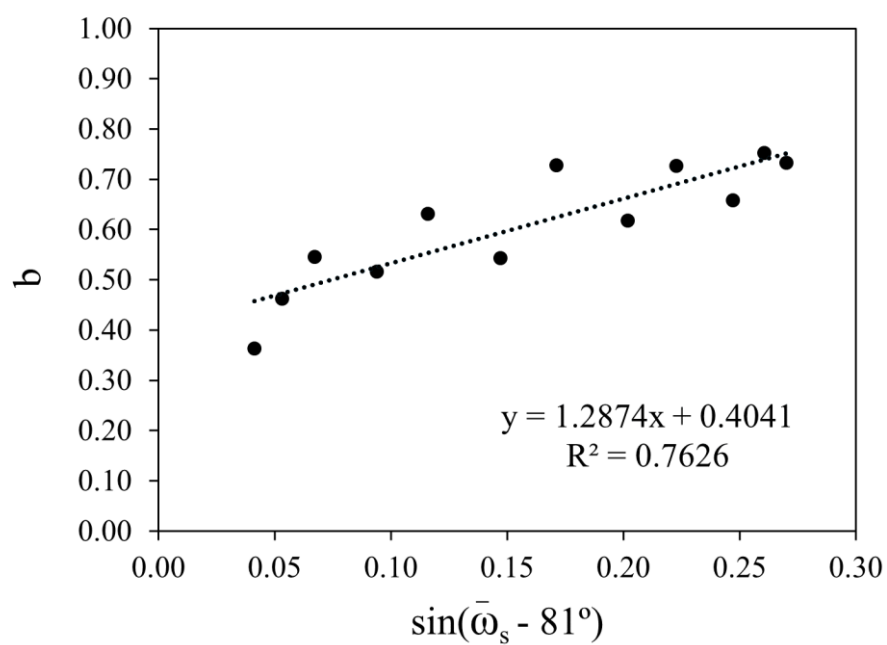
รูปที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ a และมุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตกของแต่ละเดือนของสถานีเชียงใหม่



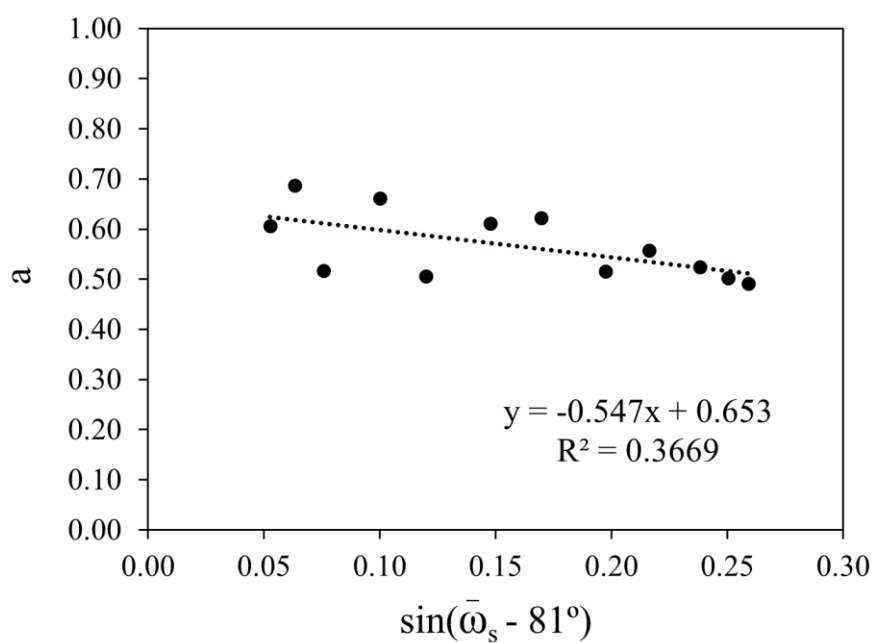
รูปที่ 41 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ b และมุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตกของแต่ละเดือนของสถานีเชียงใหม่



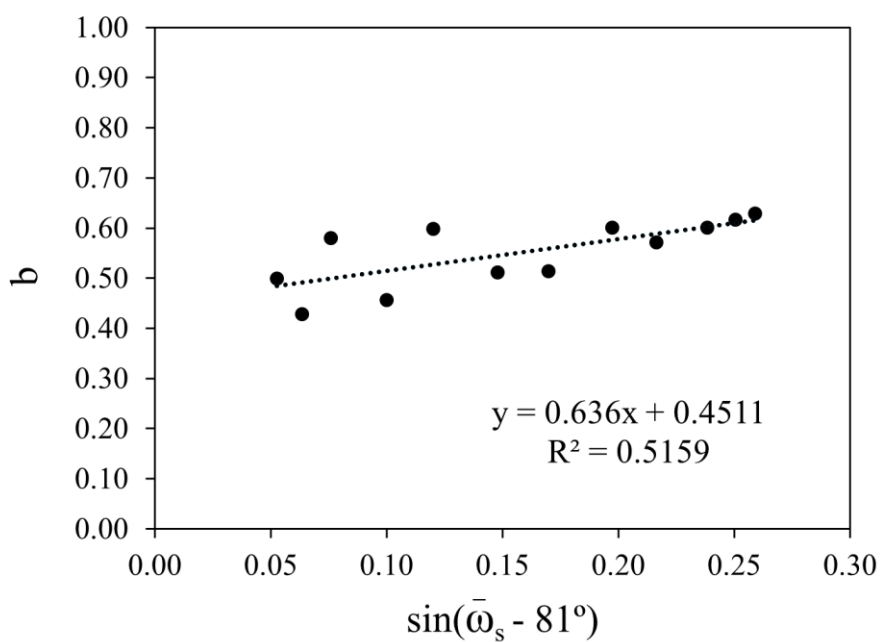
รูปที่ 42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ a และมุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตกของแต่ละเดือนของสถานีอุบลราชธานี



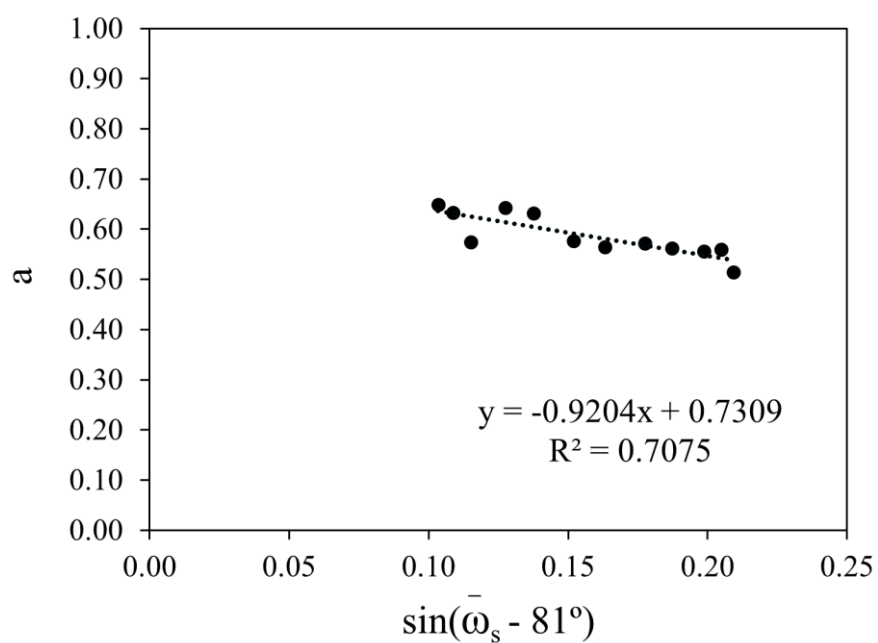
รูปที่ 43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ b และมุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตกของแต่ละเดือนของสถานีอุบลราชธานี



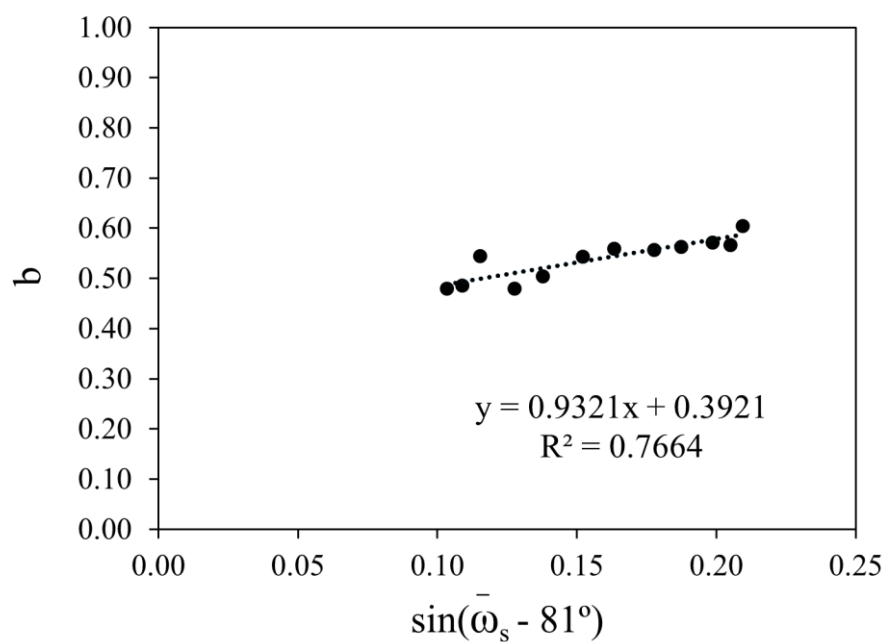
รูปที่ 44 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ a และมุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตกของแต่ละเดือนของสถานีนครปฐม



รูปที่ 45 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ b และมุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตกของแต่ละเดือนของสถานีนครปฐม



รูปที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ a และมุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตกของแต่ละเดือนของ
สถานีสงขลา



รูปที่ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ b และมุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตกของแต่ละเดือนของ
สถานีสงขลา

5) นำค่าสัมประสิทธิ์ a' a'' b' และ b'' ของทั้ง 4 สถานีวัดที่ได้จากกราฟในรูปที่ 40 – 47 มาทำการหาค่าเฉลี่ย เพื่อใช้สำหรับการทำนายค่ารังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนของ 10 สถานี ได้แก่ สถานีราชบุรี สถานีบุรีรัมย์ สถานีนครศรีธรรมราช สถานีสตูล สถานีชัยภูมิ สถานีอุทัยธานี สถานีพะเยา สถานีตาก สถานีอุดรธานี และสถานีรายงานดอยอินทนนท์

6) คำนวณค่ารังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนของทั้ง 14 สถานีในปี ค.ศ. 2024 โดยแทนค่าสัมประสิทธิ์ a' a'' b' และ b'' จากตารางที่ 7 ของสถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี สถานีนครปฐม สถานีสงขลา ลงในสมการที่ (22) – (24) สำหรับการคำนวณของ 4 สถานีในภูมิภาคหลัก และนำค่าสัมประสิทธิ์เฉลี่ยของ a' a'' b' และ b'' แทนลงในสมการที่ (22) – (24) สำหรับการคำนวณค่าความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนของ 10 สถานี

7) ขั้นตอนสุดท้าย ทำการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น โดยเขียนกราฟเปรียบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดจริง โดยแกน x เป็นค่าความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากการวัดจริง และแกน y เป็นค่าความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลอง จากนั้นคำนวณหาค่าความแตกต่างของรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดจริง โดยใช้ตัวชี้วัดทางสถิติ 2 ตัว ซึ่งรายละเอียดของตัวชี้วัดทางสถิติจะแสดงในหัวข้อถัดไป

3.2.4 การทดสอบสมรรถนะของแบบจำลอง

ผู้วิจัยทำการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากการคำนวณความแตกต่างของความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน โดยใช้ตัวชี้วัดทางสถิติ 2 ตัว คือ ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง (root mean square difference, RMSD) และค่าความเอนเอียงเฉลี่ย (mean bias difference, MBD) ซึ่งคำนวณได้ตามสมการที่ (25) และสมการที่ (26)

$$\text{RMSD} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{I}_{\text{model},i} - \bar{I}_{\text{meas},i})^2}{N}}}{\frac{\sum_{i=1}^N \bar{I}_{\text{meas},i}}{N}} \times 100\% \quad (25)$$

$$MBD = \frac{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{I}_{model,i} - \bar{I}_{meas,i})}{N}}{\frac{\sum_{i=1}^N \bar{I}_{meas,i}}{N}} \times 100\% \quad (26)$$

เมื่อ	$\bar{I}_{model,i}$	คือ ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่คำนวณจากแบบจำลอง (เมกะจูลต่อตารางเมตร)
	$\bar{I}_{meas,i}$	คือ ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากเครื่องมือวัดจริง (เมกะจูลต่อตารางเมตร)
	N	คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

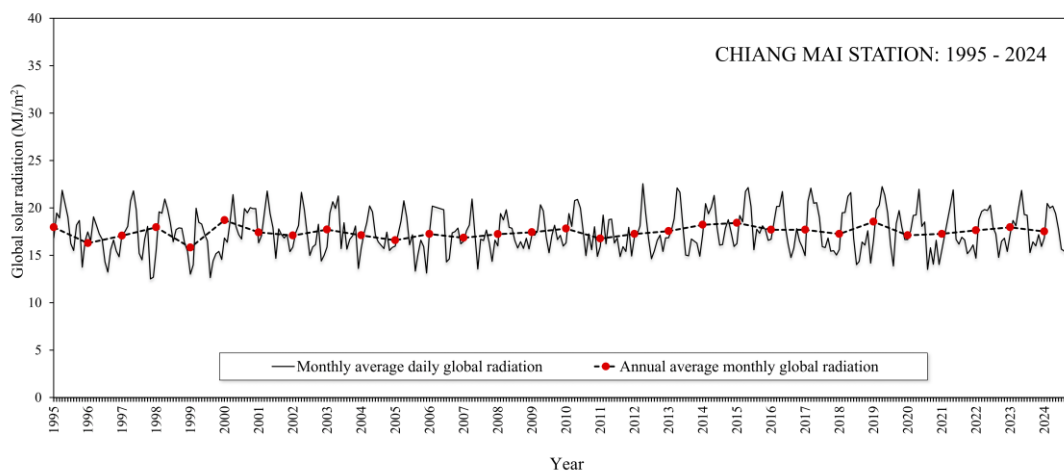
3.3 ผลการดำเนินงานวิจัย

หลังจากดำเนินการวิจัยในหัวข้อ 3.2 เรียบร้อยแล้ว ผลการดำเนินการวิจัยจะแบ่งการนำเสนอออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติเชิงภูมิอากาศระยะยาวของรังสีรวมจากสถานีวัด 4 สถานีในภูมิภาคหลักของประเทศไทย ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติของดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศ (clearness index) ในประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลรังสีรวมระยะยาวแบบจำลองสำหรับการประมาณค่ารังสีรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน และสุดท้ายเป็นผลการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากตัวบ่งชี้ทางสถิติ ซึ่งมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังนี้

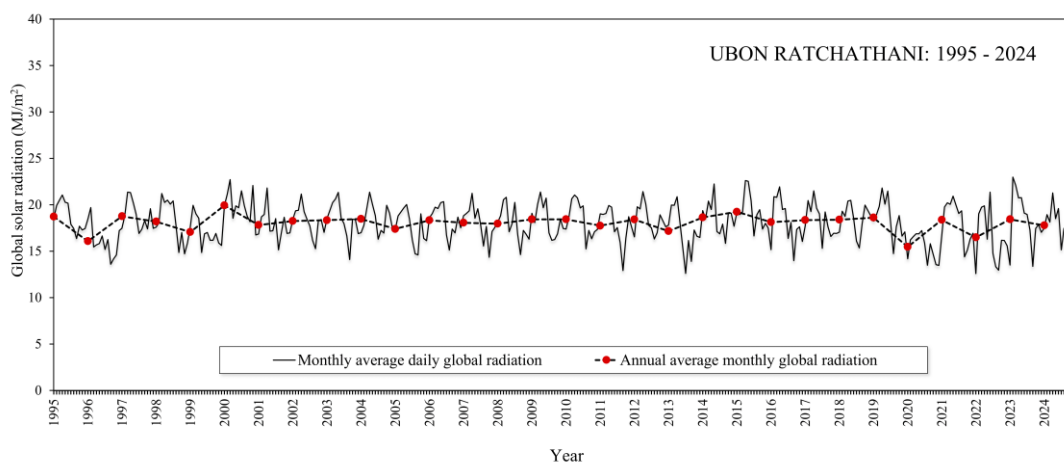
3.3.1 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติเชิงภูมิอากาศระยะยาวของรังสีรวมจากสถานีวัด

4 สถานีในภูมิภาคหลักของประเทศไทย

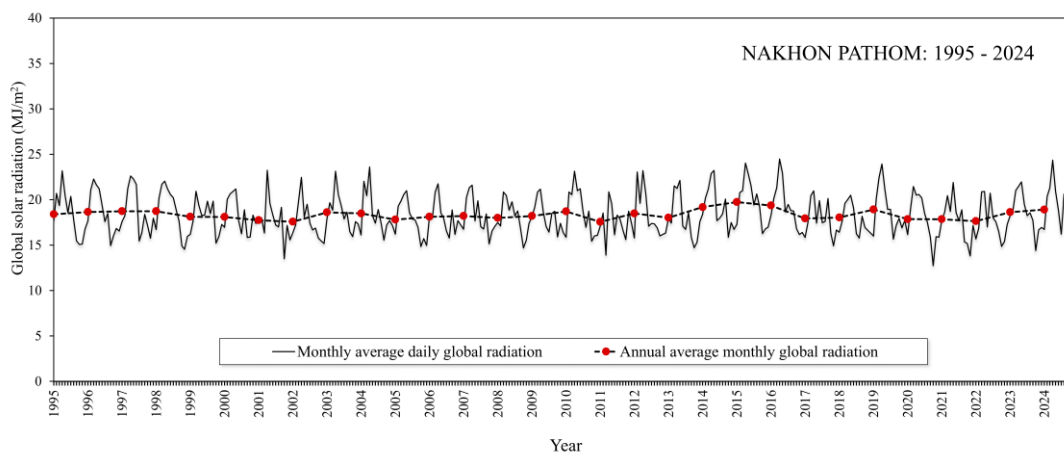
ลักษณะทางสถิติเชิงภูมิอากาศระยะยาว (climatology) ของรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนและรังสีรวมเฉลี่ยรายปีจากสถานีวัด 4 แห่งในภูมิภาคหลักของประเทศไทยในช่วงระยะเวลา 30 ปี ระหว่างปี ค.ศ. 1995 – 2024 แสดงดังรูปที่ 48 – 51



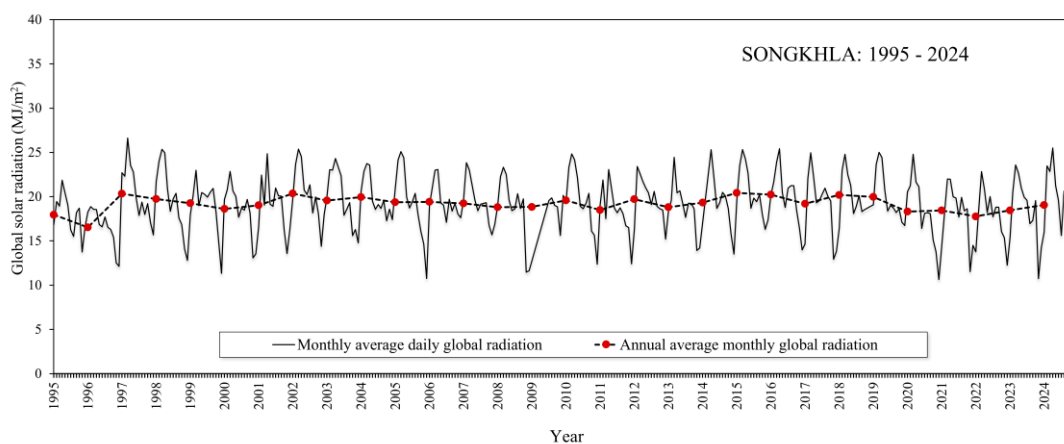
รูปที่ 48 การแปรค่าระยะยาวของรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (เส้นสีดำ) และค่าเฉลี่ยรายปี (เส้นสีแดง) ของสถานีเชียงใหม่



รูปที่ 49 การแปรค่าระยะยาวของรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (เส้นสีดำ) และค่าเฉลี่ยรายปี (เส้นสีแดง) ของสถานีอุบลราชธานี



รูปที่ 50 การแปรค่าระยะยาวของรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (เส้นสีดำ) และค่าเฉลี่ยรายปี (เส้นสีแดง) ของสถานีนครปฐม



รูปที่ 51 การแปรค่าระยะยาวของรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (เส้นสีดำ) และค่าเฉลี่ยรายปี (เส้นสีแดง) ของสถานีสงขลา

จากรูปที่ 48 – 51 พบว่าค่าความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (เส้นสีดำ) ในช่วงปี ค.ศ. 1995 – 2024 ของสถานีวัดใน 4 ภูมิภาคหลัก ได้แก่ เชียงใหม่ อุบลราชธานี นครปฐม และ สงขลา มีเป็นลักษณะคล้ายลูกคลื่นซ้ำ ๆ อย่างสม่ำเสมอตลอดระยะเวลา 30 ปี และถึงแม้ว่าทั้ง 4 สถานีจะมีฤดูกาลแบบเดียวกัน คือ ฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว แต่ลักษณะของการแปรค่าความเข้ม

รังสีอาทิตย์ในแต่ละปีมีความแตกต่างกันตามลักษณะทางภูมิศาสตร์ อิทธิพลของมรสุมในแต่ละภูมิภาค รวมทั้งองค์ประกอบต่าง ๆ ของบรรยากาศที่ส่งผลต่อลักษณะความเข้มรังสีอาทิตย์ เช่น ปริมาณเมฆ เป็นต้น

เมื่อพิจารณาค่าความเข้มของรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนตลอดทั้ง 30 ปี ของสถานี เชียงใหม่มีค่ารังสีรวมแบบรายวันเฉลี่ยต่อเดือนมากที่สุดเท่ากับ 22.57 เมกะจูลต่อตารางเมตร และน้อยสุดเท่ากับ 12.51 เมกะจูลต่อตารางเมตร สถานีอุบลราชธานีมีค่ารังสีรวมแบบรายวันเฉลี่ยต่อเดือนมากที่สุดเท่ากับ 22.98 เมกะจูลต่อตารางเมตร และน้อยสุดเท่ากับ 12.60 เมกะจูลต่อตารางเมตร สถานีนครปฐมมีค่ารังสีรวมแบบรายวันเฉลี่ยต่อเดือนมากที่สุดเท่ากับ 24.48 เมกะจูลต่อตารางเมตร และน้อยสุดเท่ากับ 12.74 เมกะจูลต่อตารางเมตร และสถานีสงขลามีค่ารังสีรวมแบบรายวันเฉลี่ยต่อเดือนมากที่สุดเท่ากับ 25.58 เมกะจูลต่อตารางเมตร และน้อยสุดเท่ากับ 10.64 เมกะจูลต่อตารางเมตร โดยค่าเฉลี่ยของรังสีรวมรายปีตลอดทั้ง 30 ปีของสถานีเชียงใหม่มีค่าเท่ากับ 17.44 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน สถานีอุบลราชธานีมีค่าเท่ากับ 18.05 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน สถานีนครปฐมมีค่าเท่ากับ 18.34 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน และสถานีสงขลามีค่าเท่ากับ 19.17 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน

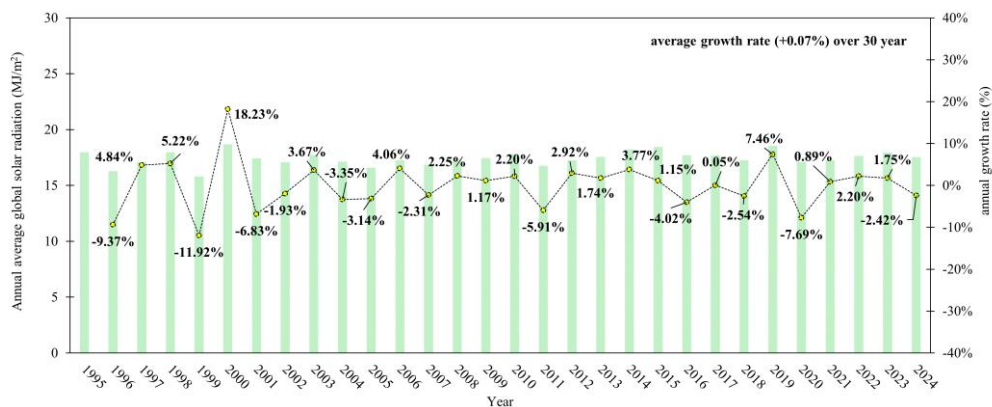
ผลการวิเคราะห์อัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีรวมแบบปีต่อปี ผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 6 และรูปที่ 52 – 55

ตารางที่ 6 อัตราการเปลี่ยนแปลงแบบปีต่อปีสำหรับสถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี สถานีนครปฐม และสถานีสงขลา

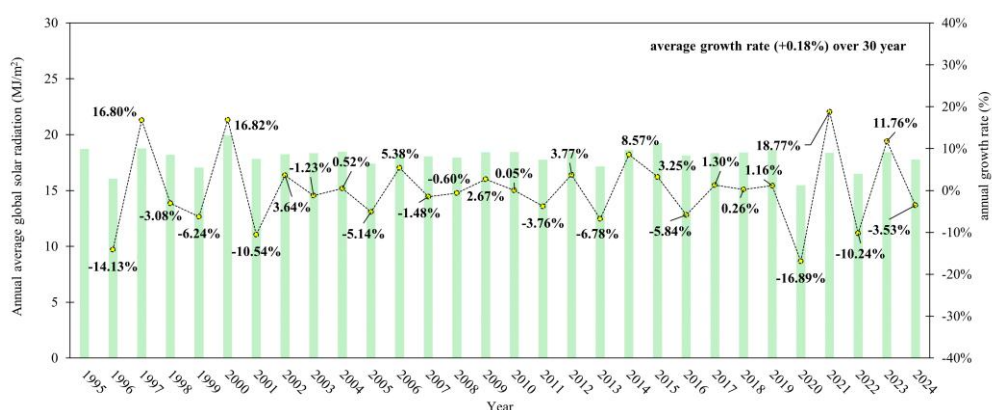
ช่วงปี	อัตราการเปลี่ยนแปลงแบบปีต่อปี (%)			
	สถานีเชียงใหม่	สถานีอุบลราชธานี	สถานีนครปฐม	สถานีสงขลา
1995 – 1996	-9.37	-14.13	1.42	-8.00
1996 – 1997	4.84	16.80	0.44	23.05
1997 – 1998	5.22	-3.08	-0.04	-2.93
1998 – 1999	-11.92	-6.24	-3.24	-2.42
1999 – 2000	18.23	16.82	-0.06	-3.38
2000 – 2001	-6.83	-10.54	-2.01	2.24
2001 – 2002	-1.93	3.64	-0.95	6.98
2002 – 2003	3.67	-1.23	5.92	-3.92

ตารางที่ 6 (ต่อ) อัตราการเปลี่ยนแปลงแบบปีต่อปีสำหรับสถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี สถานีนครปฐม และสถานีสงขลา

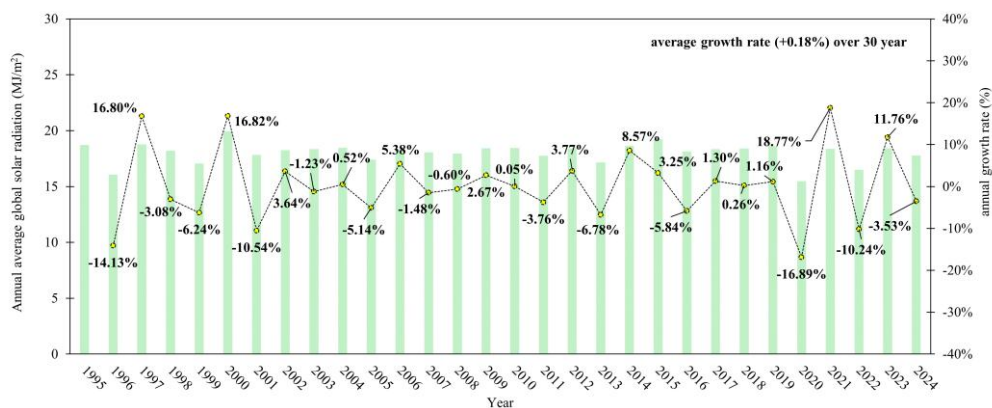
ช่วงปี	อัตราการเปลี่ยนแปลงแบบปีต่อปี (%)			
	สถานีเชียงใหม่	สถานีอุบลราชธานี	สถานีนครปฐม	สถานีสงขลา
2003 – 2004	-3.35	0.52	-0.66	2.06
2004 – 2005	-3.14	-5.14	-3.71	-2.94
2005 – 2006	4.06	5.38	1.84	0.19
2006 – 2007	-2.31	-1.48	0.46	-0.90
2007 – 2008	2.25	-0.60	-1.18	-2.25
2008 – 2009	1.17	2.67	1.15	0.22
2009 – 2010	2.20	0.05	2.79	3.98
2010 – 2011	-5.91	-3.76	-6.16	-5.66
2011 – 2012	2.92	3.77	5.29	6.63
2012 – 2013	1.74	-6.78	-2.53	-4.60
2013 – 2014	3.77	8.57	6.44	2.75
2014 – 2015	1.15	3.25	2.94	5.77
2015 – 2016	-4.02	-5.84	-1.95	-1.02
2016 – 2017	0.05	1.30	-7.34	-5.12
2017 – 2018	-2.54	0.26	0.57	5.24
2018 – 2019	7.46	1.16	4.85	-1.08
2019 – 2020	-7.69	-16.89	-5.59	-8.36
2020 – 2021	0.89	18.77	-0.08	0.78
2021 – 2022	2.20	-10.24	-1.14	-3.71
2022 – 2023	1.75	11.76	5.59	3.88
2023 – 2024	-2.42	-3.53	1.52	3.26
ค่าเฉลี่ย	0.07	0.18	0.16	0.37



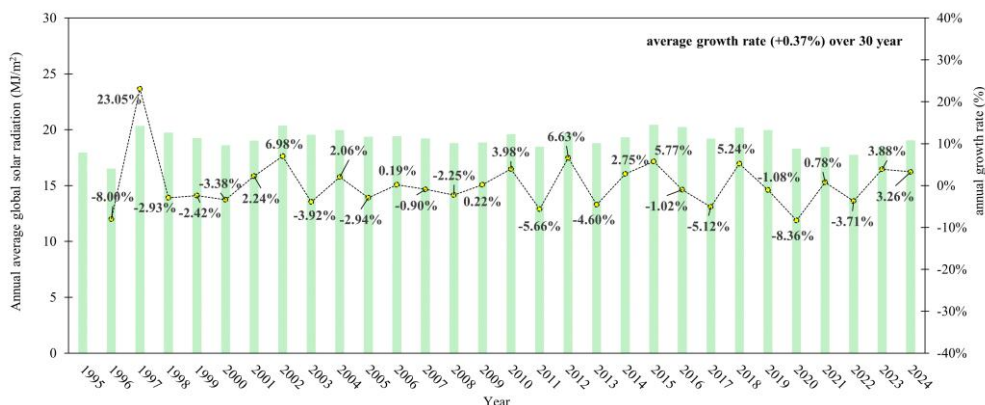
รูปที่ 52 อัตราการเปลี่ยนแปลงแบบปีต่อปีสำหรับสถานีเชียงใหม่



รูปที่ 53 อัตราการเปลี่ยนแปลงแบบปีต่อปีสำหรับสถานีอุบลราชธานี



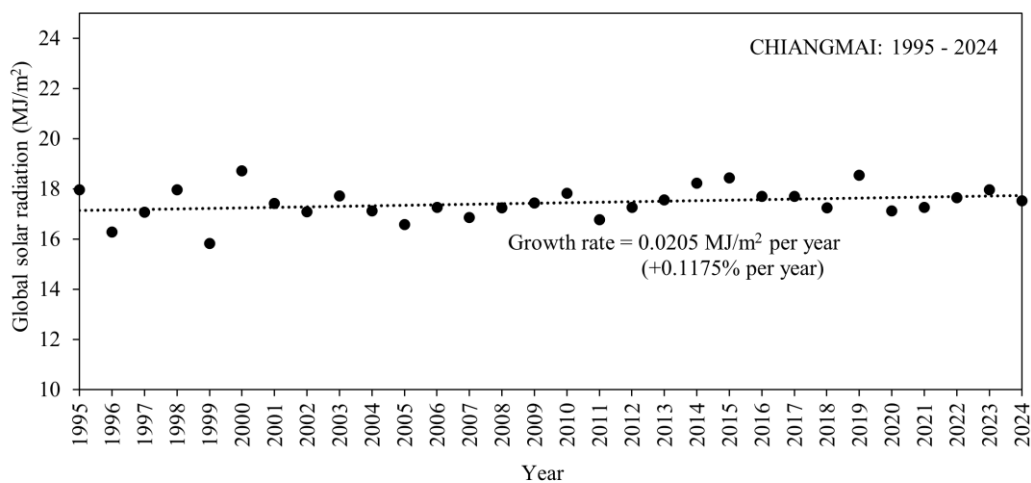
รูปที่ 54 อัตราการเปลี่ยนแปลงแบบปีต่อปีสำหรับสถานีนครพนม



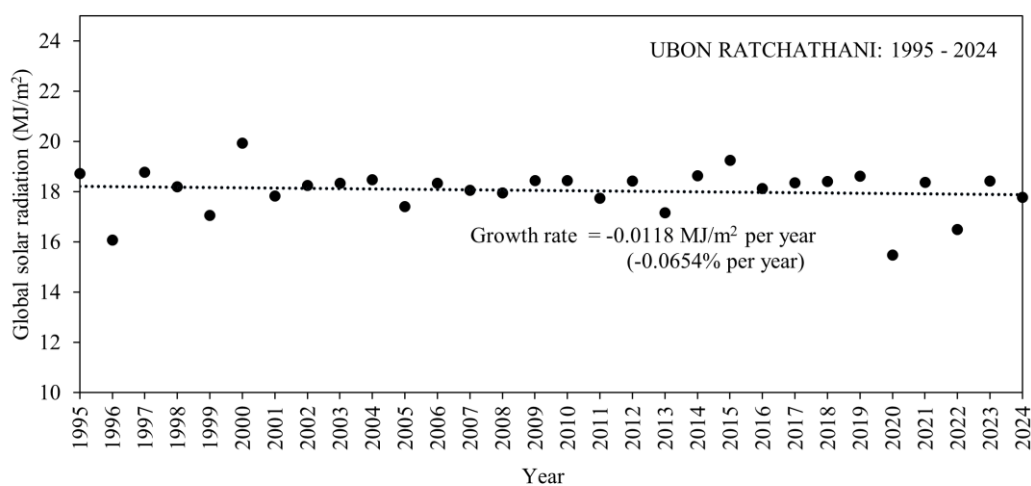
รูปที่ 55 อัตราการเปลี่ยนแปลงแบบปีต่อปีสำหรับสถานีสงขลา

ผลการวิเคราะห์จากตารางที่ 5 และรูปที่ 52 – 55 แสดงให้เห็นว่า สถานีเชียงใหม่มีอัตราเปลี่ยนแปลงในช่วง 11.92% – 18.23% สถานีอุบลราชธานีมีอัตราเปลี่ยนแปลงในช่วง -16.89% – 18.77% สถานีนครปฐมมีอัตราเปลี่ยนแปลงในช่วง -7.34% – 6.44% และสถานีสงขลา มีอัตราเปลี่ยนแปลงในช่วง -8.36% – 23.05% ในแต่ละปีจะมีความผันผวนทั้งในทิศทางบวกและลบ ซึ่งอาจเป็นผลจากสภาพอากาศทำให้ส่งผลต่อปริมาณรังสีอาทิตย์ในแต่ละปี และพบว่าจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ (climate change) เช่น ปรากฏการณ์เอลนีโญ (El Niño) หรือ ลานีญา (La Niña) หรือปริมาณฝุ่นละอองส่งผลให้รังสีอาทิตย์มีการลดลงและเพิ่มขึ้นสูงอย่างมีนัยสำคัญในบางปีเมื่อเทียบกับปีก่อนหน้า อย่างไรก็ตาม ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงแบบปีต่อปีเป็นบวกในทุกสถานี โดยสถานีเชียงใหม่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.07% สถานีอุบลราชธานีมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.18% สถานีนครปฐมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.16% และสถานีสงขลา มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.37% จากตัวเลขดังกล่าว สะท้อนให้เห็นถึงแนวโน้มของศักยภาพพลังงานแสงอาทิตย์ในระยะยาว มีแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นในแต่ละช่วงปีเล็กน้อยตลอด 30 ปีที่ผ่านมา

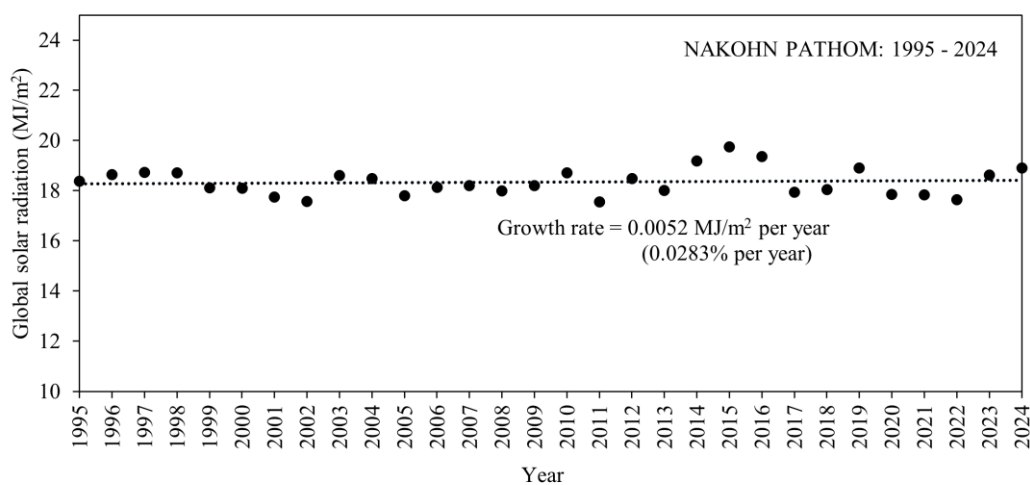
ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติเชิงภูมิอากาศของรังสีรวมเฉลี่ยรายปี เพื่อศึกษาแนวโน้มของค่าความเข้มรังสีรวมตลอดระยะเวลา 30 ปีของสถานีวัดทั้ง 4 แห่งในภูมิภาคหลักของประเทศไทย มีลักษณะการแปรค่าแสดงดังรูปที่ 56 – 59 สำหรับสถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี สถานีนครปฐม และสถานีสงขลา ตามลำดับ



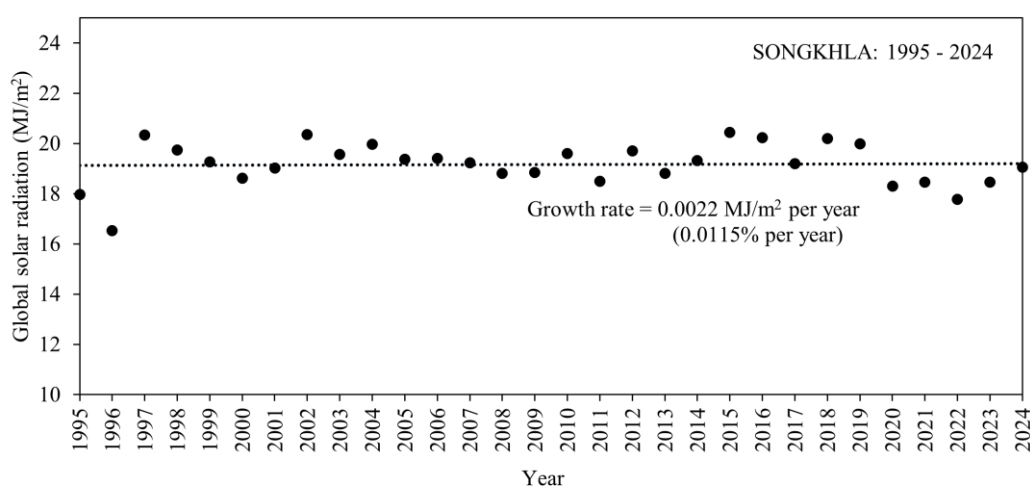
รูปที่ 56 แนวโน้มการแปรค่าระยะยาวของรังสีรวมเฉลี่ยรายปีของสถานีเชียงใหม่



รูปที่ 57 แนวโน้มการแปรค่าระยะยาวของรังสีรวมเฉลี่ยรายปีของสถานีอุบลราชธานี



รูปที่ 58 แนวโน้มการแปรค่าระยะยาวของรังสีรวมเฉลี่ยรายปีของสถานีนครปฐม



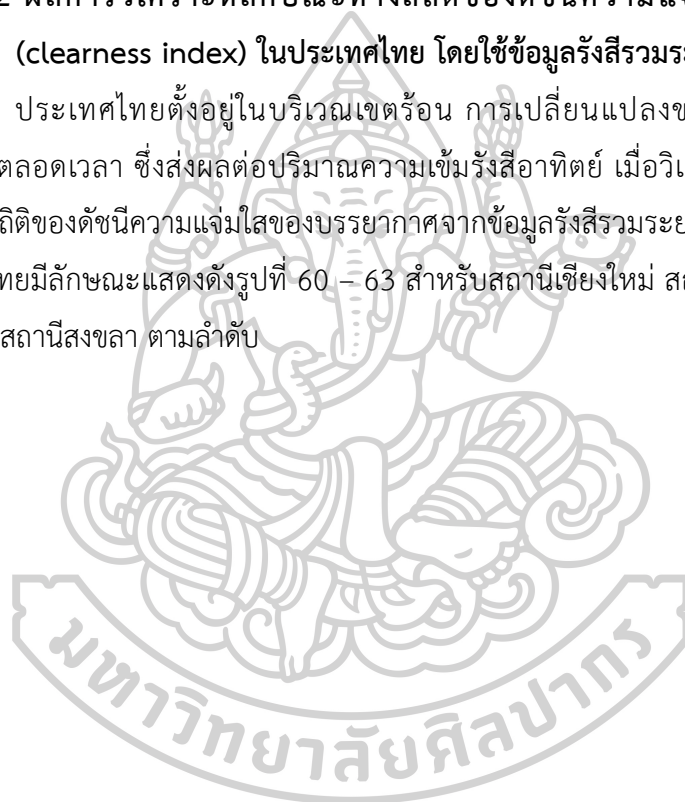
รูปที่ 59 แนวโน้มการแปรค่าระยะยาวของรังสีรวมเฉลี่ยรายปีของสถานีสงขลา

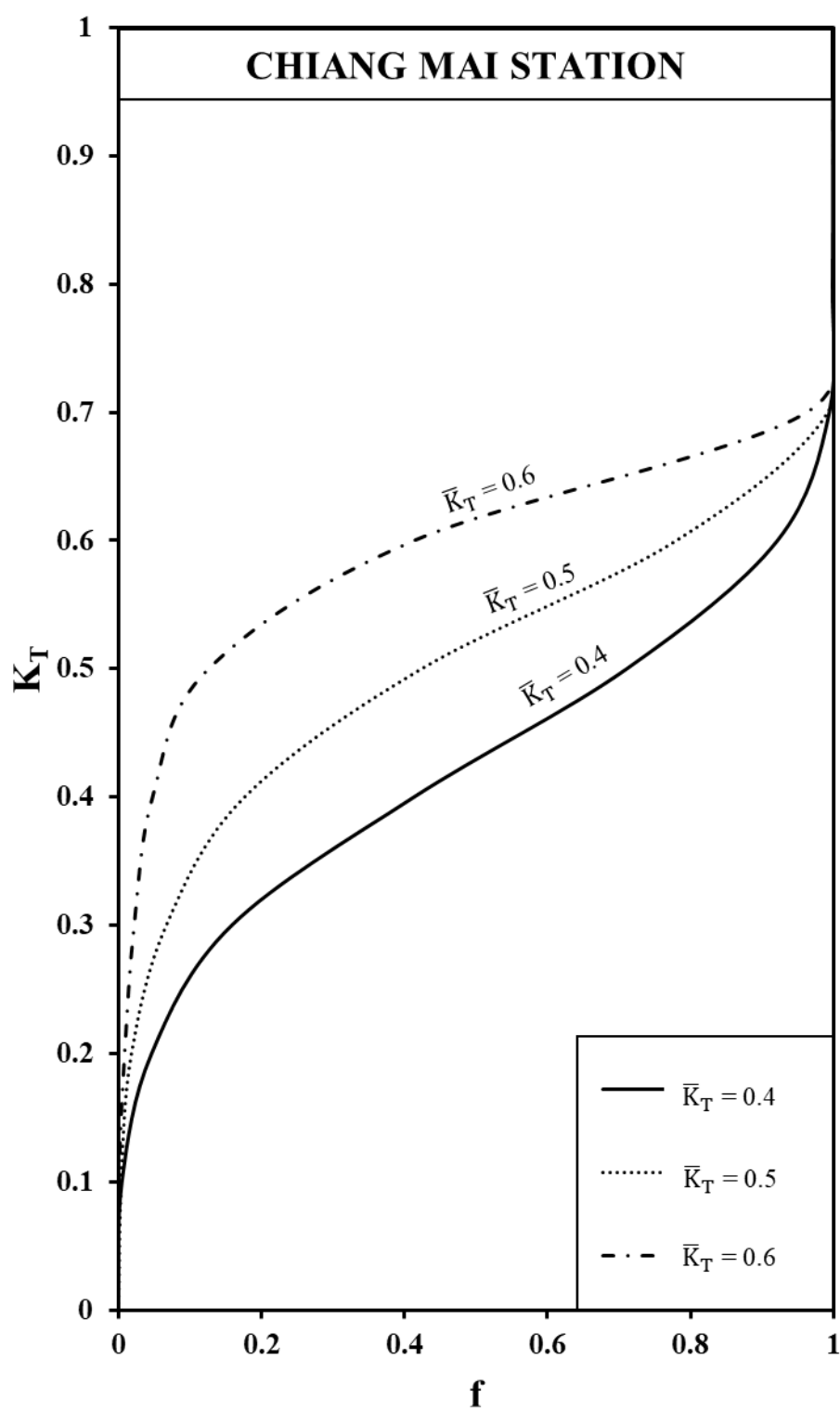
จากรูปที่ 56 – 59 พบว่า แนวโน้มระยะยาวของความเข้มรังสีรวมเฉลี่ยรายปีมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อพิจารณาจากความชันของกราฟหรืออัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีรวมเฉลี่ยรายปีต่อปี พบว่าสถานีเชียงใหม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีรวมเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 0.0205 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อปี สถานีนครปฐมมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีรวมเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 0.0052 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อปี และสถานีสงขลามีการเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีรวมเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 0.0022 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อปี แต่สำหรับของสถานีอุบลราชธานีพบว่ามีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย

โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีรวมเฉลี่ยรายปีเท่ากับ -0.0118 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อปี และเมื่อทำการคำนวณเทียบอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีรวมเฉลี่ยรายปีต่อปีกับค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีรวมเฉลี่ยรายปี 30 ปี พบว่าสถานีเชียงใหม่มีความเข้มรังสีรวมเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 0.1175 % ต่อปี เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยความเข้มรังสีรวมเฉลี่ยรายปีตลอด 30 ปี สถานีอุบลราชธานีมีความเข้มรังสีรวมเฉลี่ยรายปีเท่ากับ -0.0654 % ต่อปี สถานีนครปฐมมีความเข้มรังสีรวมเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 0.0283 % ต่อปี และสถานีสงขลามีความเข้มรังสีรวมเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 0.0022 % ต่อปี

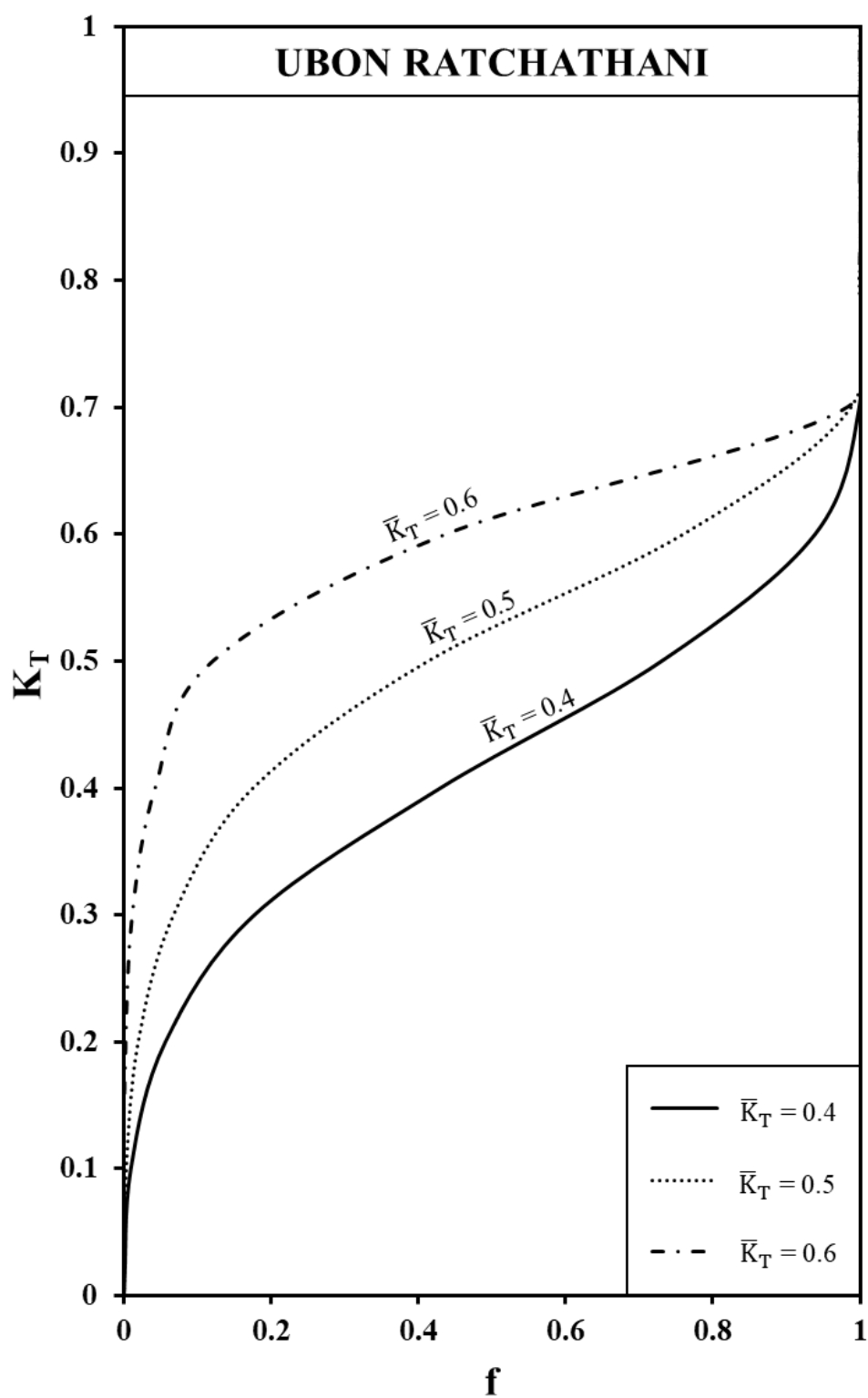
3.3.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติของดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศ (clearness index) ในประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลรังสีรวมระยะยาว

ประเทศไทยตั้งอยู่ในบริเวณเขตร้อน การเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ซึ่งส่งผลต่อปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์ เมื่อวิเคราะห์การแปรค่าและลักษณะทางสถิติของดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศจากข้อมูลรังสีรวมระยะยาวใน 4 ภูมิภาคหลักของประเทศไทยมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 60 – 63 สำหรับสถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี สถานีนครปฐม และสถานีสงขลา ตามลำดับ

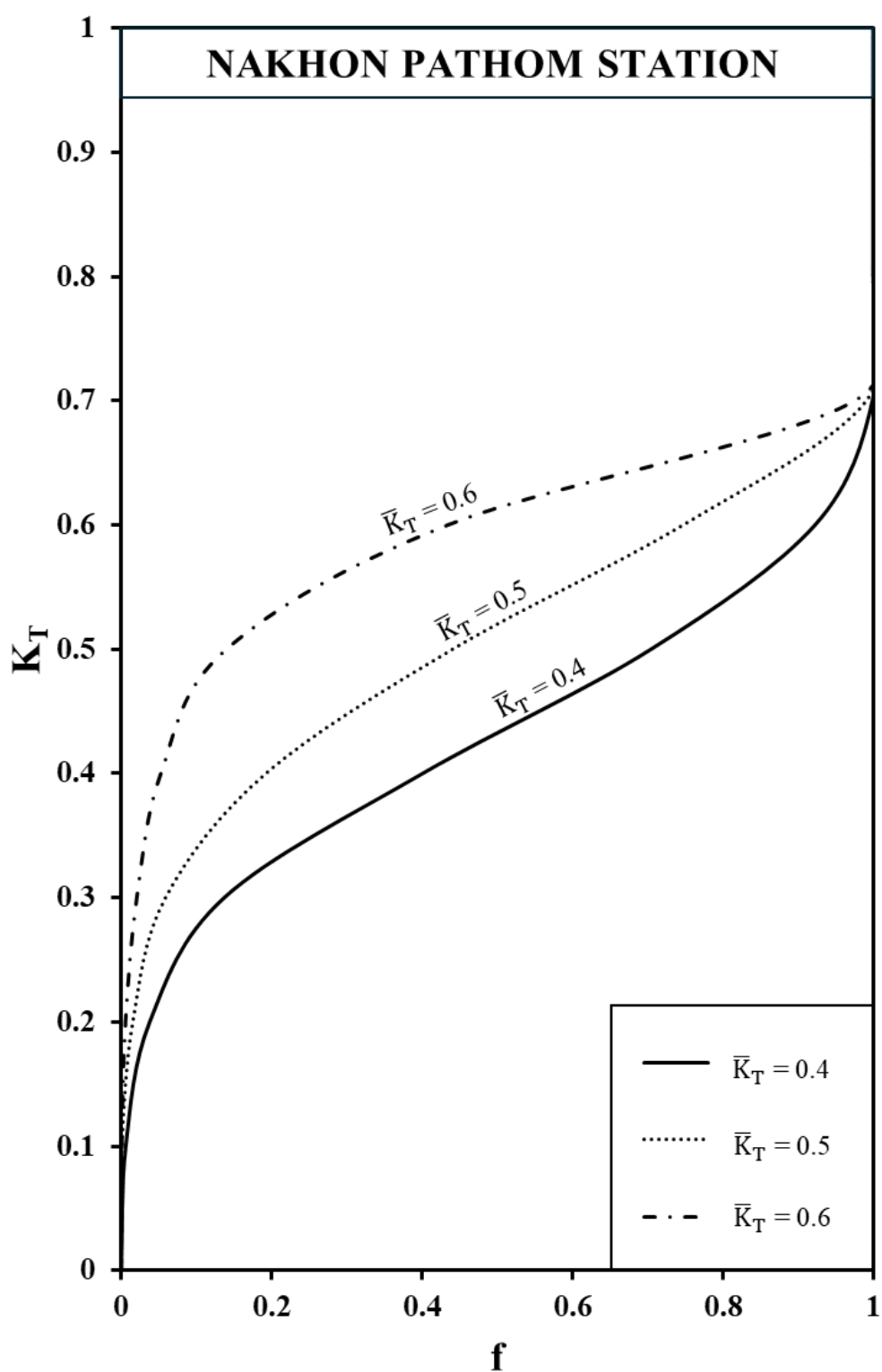




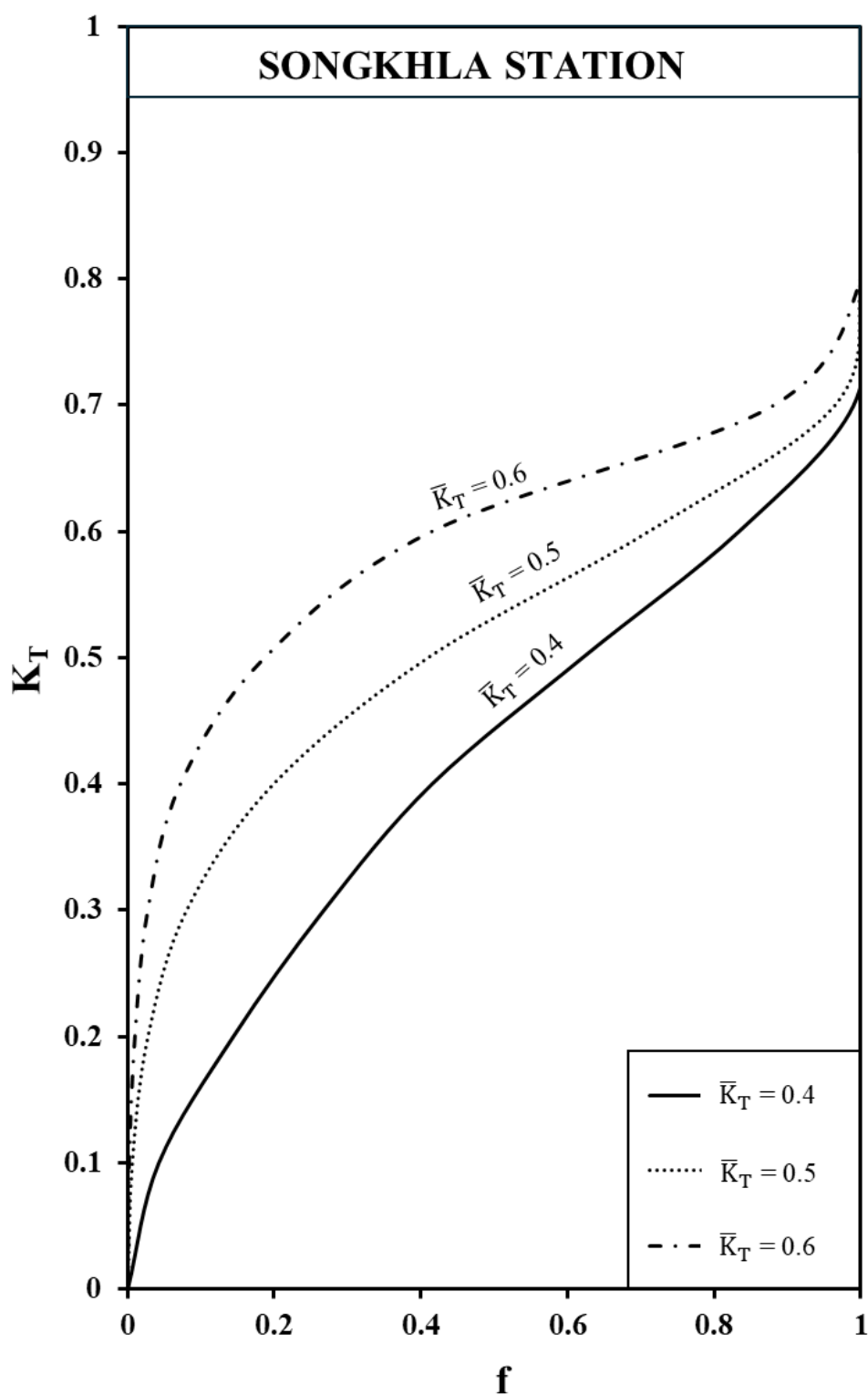
รูปที่ 60 การแจกแจงความถี่สะสม (f) ของดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศรายวัน (K_T) สำหรับสถานีเชียงใหม่ เมื่อ $\bar{K}_T$ เป็นดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศรายวันเฉลี่ยต่อเดือน



รูปที่ 61 การแจกแจงความถี่สะสม (f) ของดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศรายวัน (K_T) สำหรับสถานีอุบลราชธานี เมื่อ $\bar{K}_T$ เป็นดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศรายวันเฉลี่ยต่อเดือน



รูปที่ 62 การแจกแจงความถี่สะสม (f) ของดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศรายวัน (K_T) สำหรับ
สถานีนครปฐม เมื่อ $\bar{K}_T$ เป็นดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศรายวันเฉลี่ยต่อเดือน



รูปที่ 63 การแจกแจงความถี่สะสม (f) ของดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศรายวัน (K_T) สำหรับ สถานีสงขลา เมื่อ $\bar{K}_T$ เป็นดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศรายวันเฉลี่ยต่อเดือน

ผลการแจกแจงความถี่สะสมของค่าดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศในรูปที่ 60 – 63 พบว่า ดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศแบบวันเฉลี่ยต่อเดือน ($\bar{K}_T$) ของประเทศไทยทั้ง 30 ปี จะมีค่าอยู่ในช่วง 0.4 – 0.6 เหมือนกันทั้ง 4 สถานี ซึ่งค่าดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศนี้ บ่งชี้ได้ว่าส่วนใหญ่มีสภาพอากาศที่มีเมฆบางส่วน (partly cloudy) ไปจนถึงแจ่มใส (sunny) ขณะที่ค่าดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศแบบรายวัน (K_T) จะมีความแตกต่างกันออกไปตามลักษณะทางภูมิอากาศของแต่ละพื้นที่ ซึ่งแปรค่าไปถึง 0.8

3.3.3 แบบจำลองสำหรับการประมาณค่ารังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน

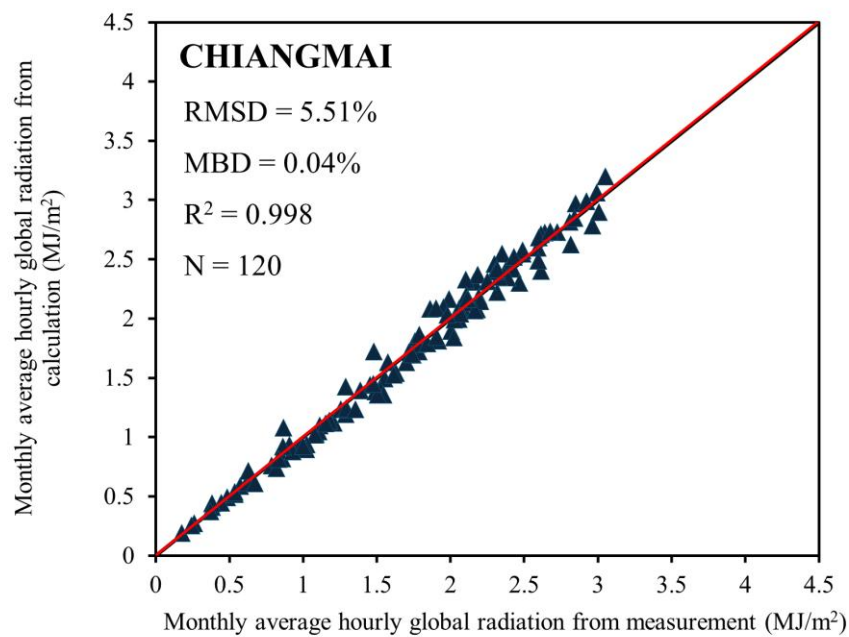
แบบจำลองสำหรับประมาณค่ารังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นมีรูปแบบตามสมการที่ (22) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ a' a'' b' และ b'' ที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลรังสีรวมและตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่มุมต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์ a' a'' b' และ b'' สำหรับแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

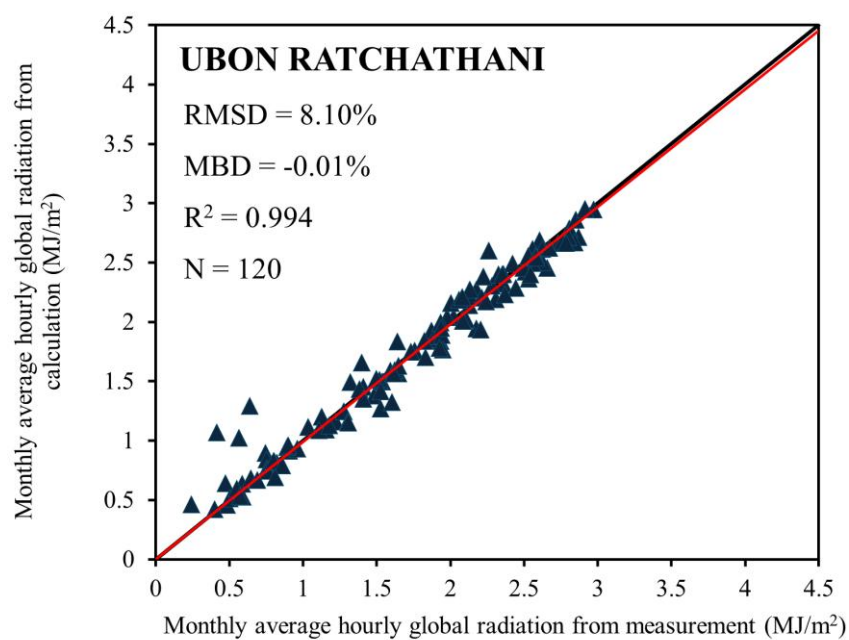
สถานี	a'	a''	b'	b''
เชียงใหม่	-0.7248	0.7324	0.7691	0.3856
อุบลราชธานี	-1.4102	0.7218	1.2874	0.4041
นครปฐม	-0.5470	0.6530	0.6360	0.4511
สงขลา	-0.9204	0.7309	0.9321	0.3921
ค่าเฉลี่ย	-0.9006	0.7095	0.9061	0.4082

3.3.4 ผลการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองจากตัวบ่งชี้ทางสถิติ

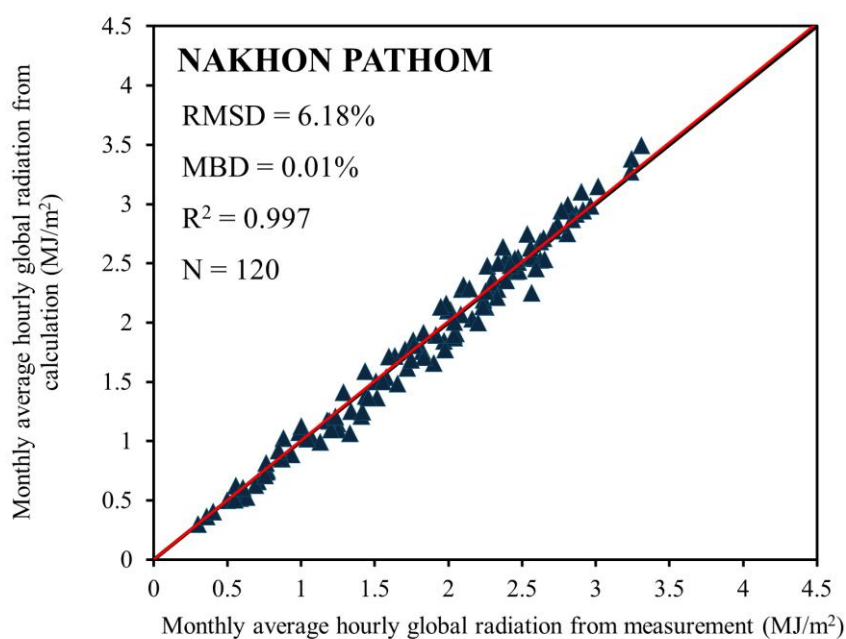
ก่อนที่จะนำแบบจำลองที่สร้างขึ้นไปใช้งาน ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบแบบจำลองโดยเปรียบเทียบความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับค่าที่ได้จากการวัดจากทั้ง 14 สถานีวัดทั่วประเทศไทย โดยผลการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 64 – 77 โดยมีค่า RMSD และ MBD ของการทดสอบแบบจำลอง แสดงดังตารางที่ 8



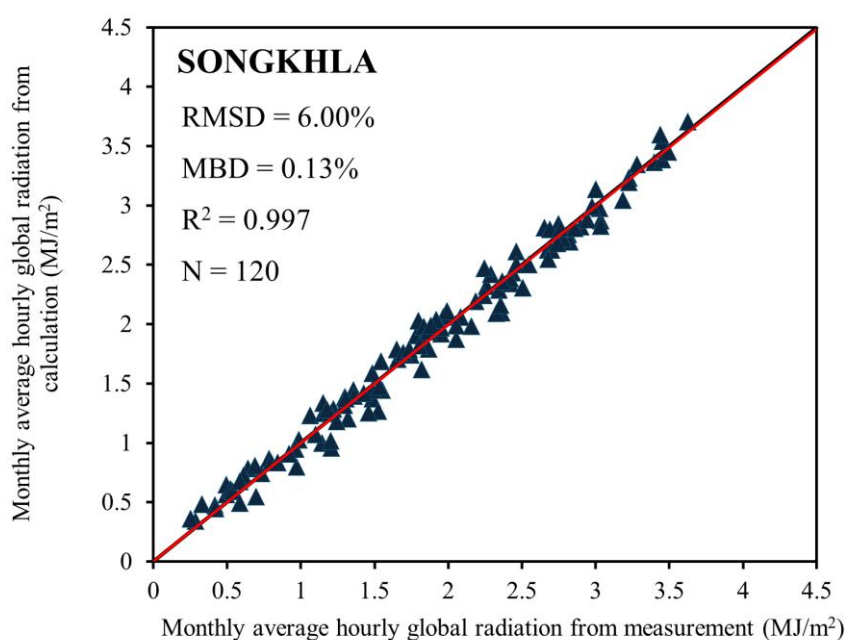
รูปที่ 64 ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองและการวัดของสถานี เชียงใหม่



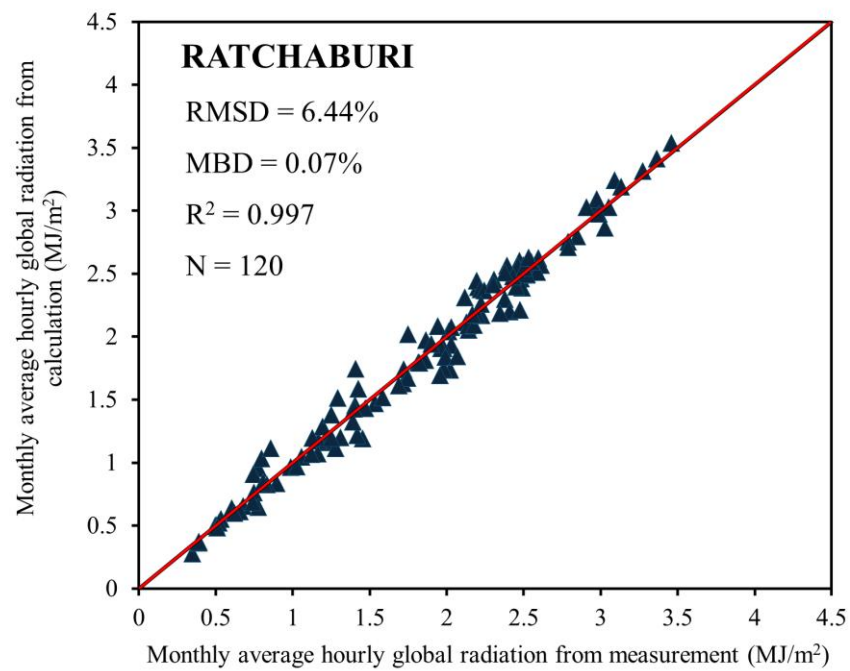
รูปที่ 65 ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองและการวัดของสถานี อุบลราชธานี



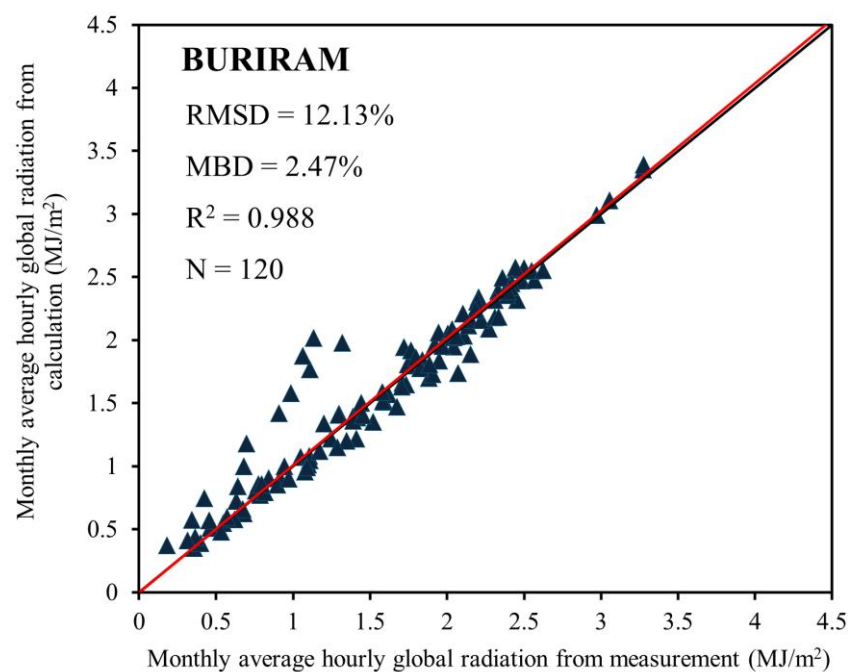
รูปที่ 66 ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองและการวัดของสถานี นครปฐม



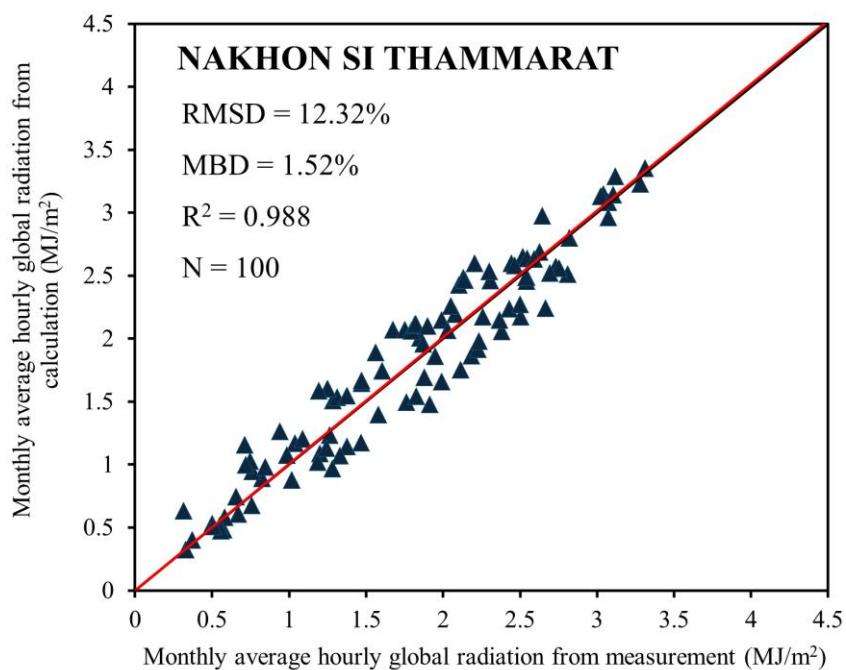
รูปที่ 67 ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองและการวัดของสถานี สงขลา



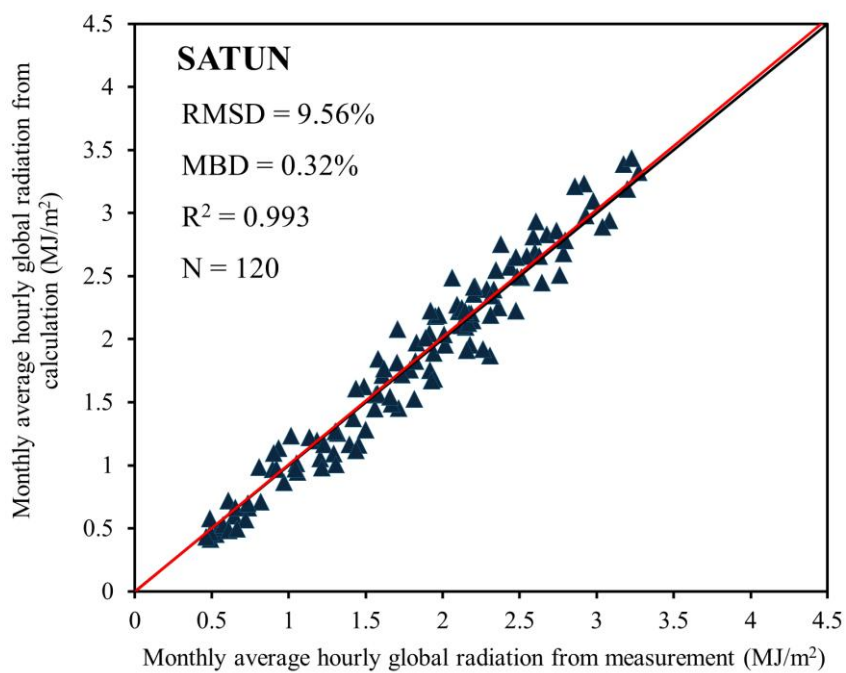
รูปที่ 68 ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองและการวัดของสถานี
ราชบุรี



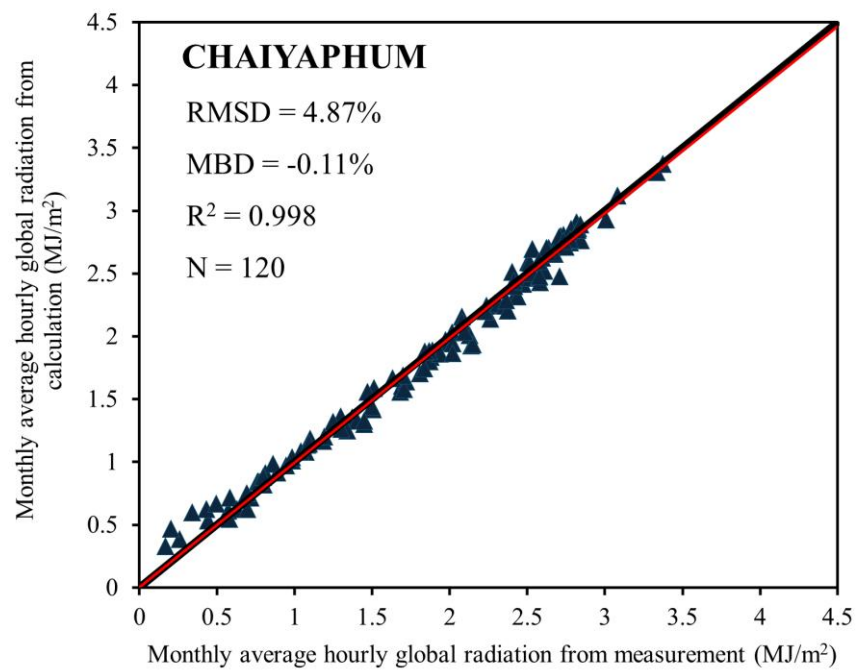
รูปที่ 69 ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองและการวัดของสถานี
บุรีรัมย์



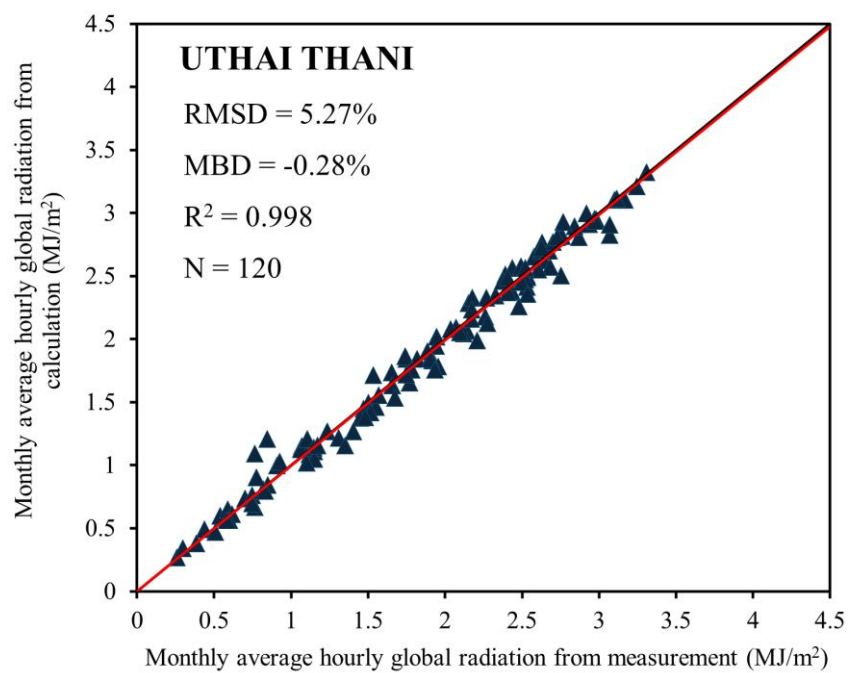
รูปที่ 70 ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองและการวัดของสถานี นครศรีธรรมราช



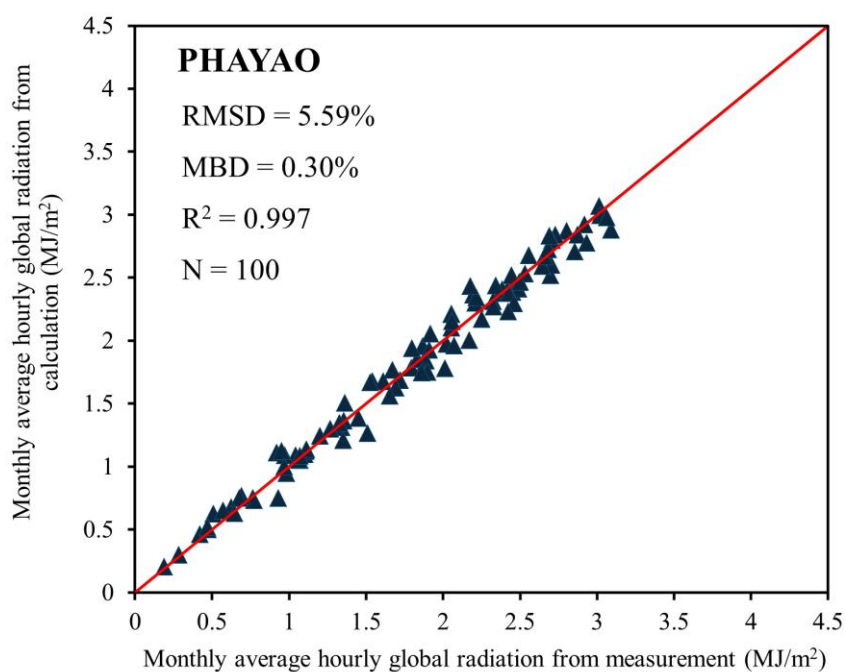
รูปที่ 71 ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองและการวัดของสถานีสตูล



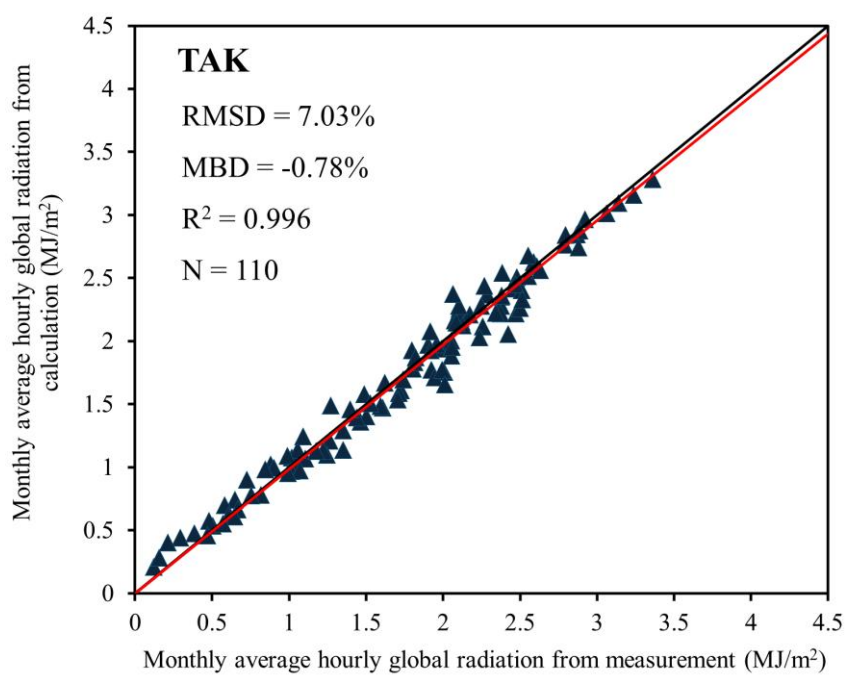
รูปที่ 72 ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองและการวัดของสถานีชัยภูมิ



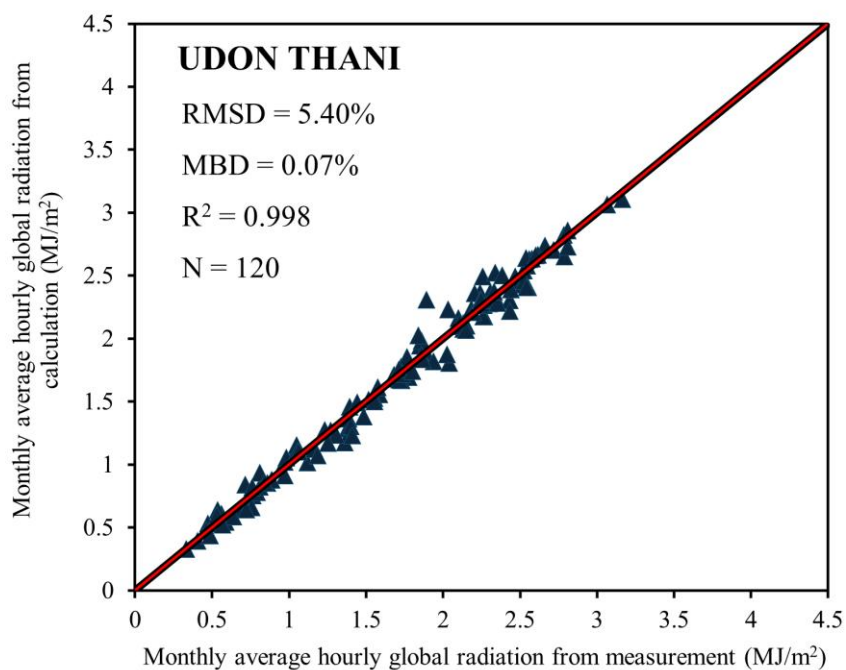
รูปที่ 73 ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองและการวัดของสถานีอุทัยธานี



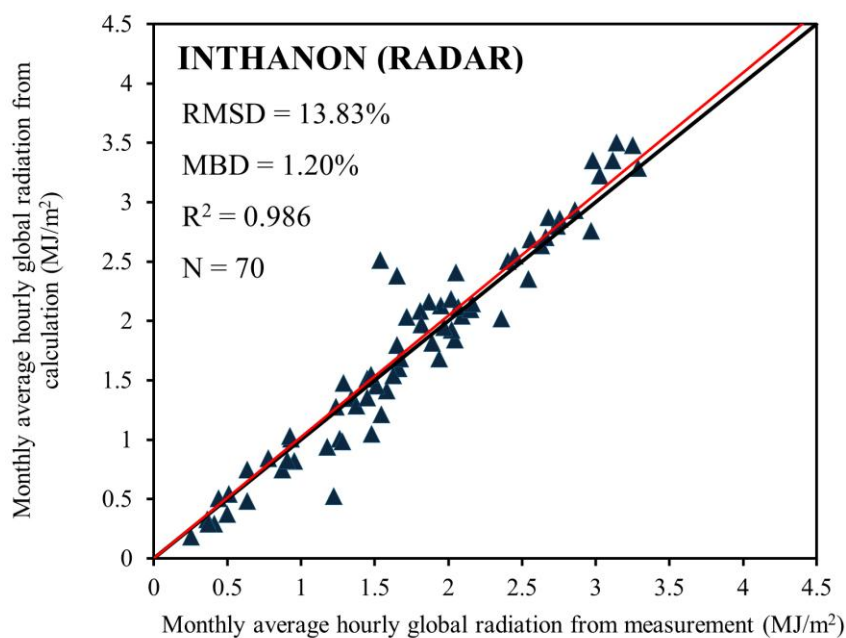
รูปที่ 74 ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองและการวัดของสถานีพะเยา



รูปที่ 75 ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองและการวัดของสถานีตาก



รูปที่ 76 ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองและการวัดของสถานีอุดรธานี



รูปที่ 77 ความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ได้จากแบบจำลองและการวัดของสถานีโดยอินทนนท์ กองทัพอากาศ

จากผลการเปรียบเทียบในรูปที่ 64 – 77 พบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยมีพื้นฐานมาจากแบบจำลองของ Collares-Pereira และ Rabl (1979) สามารถประมาณค่ารังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนสำหรับประเทศไทยได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัด ซึ่งสังเกตจากเส้นแนวโน้ม (สีแดง) มีลักษณะเกือบทับกับเส้นแบ่งครึ่งกราฟ (สีดำ) เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) ของการเปรียบเทียบจากสถานีวัด 14 สถานี พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.986 ถึง 0.998 ซึ่งมีค่าที่เข้าใกล้ 1 แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีของข้อมูลทั้งสองชุด

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองพัฒนาขึ้น

สถานี	RMSD (%)	MBD (%)	R^2
ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่	5.51	0.04	0.998
ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนล่าง จังหวัดอุบลราชธานี	8.10	-0.01	0.994
ลานทดลองพลังงานแสงอาทิตย์ ดาดฟ้าอาคารวิทยาศาสตร์ 1 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม	6.18	0.01	0.997
ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา	6.00	0.13	0.997
สถานีอุตุนิยมวิทยาราชบุรี จังหวัดราชบุรี	6.44	0.07	0.997
สถานีอุตุนิยมวิทยาสตึก จังหวัดบุรีรัมย์	12.13	2.47	0.988
สถานีอุตุนิยมวิทยาอุทกฉวาง จังหวัดนครศรีธรรมราช	12.32	1.52	0.988
สถานีอุตุนิยมวิทยาสตูล จังหวัดสตูล	9.56	0.32	0.993
สถานีอุตุนิยมวิทยาชัยภูมิ จังหวัดชัยภูมิ	4.87	-0.11	0.998
สถานีอุตุนิยมวิทยาอุทัยธานี จังหวัดอุทัยธานี	5.27	-0.28	0.998
สถานีอุตุนิยมวิทยาพะเยา จังหวัดพะเยา	5.59	0.30	0.997
สถานีอุตุนิยมวิทยาตาก จังหวัดตาก	7.03	-0.78	0.996
สถานีอุตุนิยมวิทยาอุดรธานี จังหวัดอุดรธานี	5.40	0.07	0.998
สถานีรายงานดอยอินทนนท์ กองทัพอากาศ อุทยานแห่งชาติ ดอยอินทนนท์ จังหวัดเชียงใหม่	13.83	1.20	0.986

เมื่อพิจารณาความแตกต่างของค่าความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่คำนวณได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากเครื่องวัดของทั้ง 14 สถานี ดังตารางที่ 8 พบว่ามีค่าความแตกต่างใน

รูปของ RMSD ไม่เกิน 13.82% และ MBD อยู่ในช่วง -0.01% – 2.47% ซึ่งค่า RMSD มีค่าค่อนข้างน้อย สามารถบ่งบอกว่าข้อมูลมีการกระจายตัวน้อย ค่ารังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองกับการวัดมีค่าใกล้เคียงกัน ขณะที่ค่า MBD จากสถานีอุบลราชธานี สถานีอุทัยธานี และสถานีตากมีค่าติดลบ แสดงให้เห็นว่าค่าความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนมีความเอนเอียงไปด้านค่าที่ได้จากการวัดมากกว่า แต่ในสถานีอื่น ๆ มีค่า MBD เป็นบวกสามารถบ่งบอกว่าข้อมูลมีความเอนเอียงไปในทางด้านค่าที่คำนวณมากกว่าค่าที่ได้จากการวัด อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลการเปรียบเทียบและตัวชี้วัดทางสถิติที่กล่าวมาแล้วแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้ประมาณค่าความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนในพื้นที่อื่น ๆ ของประเทศไทยได้ และสามารถนำข้อมูลรังสีรวมนี้ไปประยุกต์ใช้ในงานด้านพลังงานแสงอาทิตย์และอื่น ๆ ต่อไป และสำหรับในสถานีที่มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงอย่างมีนัยสำคัญ ผู้วิจัยพบว่าเป็นผลมาจากสภาพแวดล้อมภายนอกที่ไปกระทบกับห้ววัด ทำให้การวัดค่าอาจมีการผิดเพี้ยนไปบางในแต่ละช่วงเวลาของข้อมูล



บทที่ 4

สรุป

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยทำการเก็บรวบรวมข้อมูลความเข้มรังสีรวมจากสถานีวัด 4 แห่งในภูมิภาคหลักของประเทศไทยในช่วงปี ค.ศ. 1995 – 2024 รวมเป็นระยะเวลา 30 ปี และอีก 10 สถานีที่กระการกระจายอยู่ทั่วประเทศไทย เพื่อนำมาวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติเชิงภูมิอากาศระยะยาวของรังสีรวมจากข้อมูลวัดของสถานีใน 4 ภูมิภาคหลักของประเทศไทย และใช้สำหรับศึกษาลักษณะทางสถิติของดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศ (clearness index) ในประเทศไทย ซึ่งสามารถบ่งชี้ถึงสภาพท้องฟ้าในบริเวณดังกล่าว และสุดท้ายนำมาใช้สำหรับการพัฒนาแบบจำลองรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนและทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จากการวัดที่สถานีต่าง ๆ เหล่านี้

สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติเชิงภูมิอากาศระยะยาวของรังสีรวมจากข้อมูลวัดของสถานีใน 4 ภูมิภาคหลักของประเทศไทย ผลการวิเคราะห์พบว่าลักษณะการแปรค่าความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของทั้ง 4 สถานี มีความคล้ายคลึงกัน โดยจะมีลักษณะเป็นวัฏจักรตลอดทั้ง 30 ปี ทั้งนี้เป็นผลมาจากความเข้มรังสีรวมรายวันเฉลี่ยต่อเดือนที่มีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล โดยจะมีค่าสูงในช่วงฤดูร้อนและลดลงในช่วงฤดูฝนและฤดูหนาว เมื่อพิจารณาแนวโน้มตลอดระยะเวลา 30 ปี พบว่า สถานีเชียงใหม่ สถานีนครปฐม และสถานีสงขลา มีค่าความเข้มรังสีรวมเฉลี่ยรายปีเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนสถานีอุบลราชธานีมีค่าลดลงเล็กน้อย โดยค่าความเข้มรังสีรวมเฉลี่ยรายปีของทั้ง 30 ปี สำหรับสถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี สถานีนครปฐม และ สถานีสงขลา มีค่าเท่ากับ 17.44 18.05 18.34 และ 19.17 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน ตามลำดับ และพบว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีรวมแบบปีต่อปีของสถานีเชียงใหม่อยู่ในช่วง 11.92% – 18.23% สถานีอุบลราชธานีมีอัตราเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง -16.89% – 18.77% สถานีนครปฐมมีอัตราเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง -7.34% – 6.44% และสถานีสงขลา มีอัตราเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง -8.36% – 23.05% โดยในแต่ละช่วงปีจะมีความผันผวนที่เพิ่มขึ้นและลดลงเป็นผลมาจากสภาพอากาศที่ส่งผลต่อปริมาณรังสีอาทิตย์ในแต่ละปี และพบว่ารังสีอาทิตย์ที่มีการลดลงและเพิ่มขึ้นสูงในบางปี อาจเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศ (climate change) เช่น ปรากฏการณ์เอลนีโญ (El Niño) หรือลานีญา (La Niña) หรือปริมาณฝุ่นละอองในแต่ละพื้นที่ของแต่ละปี อย่างไรก็ตาม ค่าเฉลี่ยการเปลี่ยนแปลงแบบปีต่อปีเป็นบวกในทุกสถานี โดยสถานีเชียงใหม่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.07% สถานีอุบลราชธานีมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.18% สถานีนครปฐมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.16% และสถานีสงขลา มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.37% ซึ่งจะเห็นว่าแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นในแต่ละช่วงปีมีค่าเล็กน้อยมากตลอด 30 ปีที่ผ่านมา เมื่อพิจารณาความเข้มรังสีรวมเฉลี่ยรายปีของสถานีเชียงใหม่มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.0205 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อ

ปี หรือ 5.694 วัดต่อตารางเมตรต่อปี สถานีนครปฐมมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.0052 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อปี หรือ 1.444 วัดต่อตารางเมตรต่อปี สถานีอุบลราชธานีมีค่าลดลงเท่ากับ 0.0118 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อปี หรือ 3.278 วัดต่อตารางเมตรต่อปี และสถานีสงขลามีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ 0.0022 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อปี หรือ 0.611 วัดต่อตารางเมตรต่อปี เมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยของความเข้มรังสีรวมเฉลี่ยรายปีตลอด 30 ปี พบว่าแต่ละสถานีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นและลดลงเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยตลอดทั้ง 30 ปี ดังนี้ สถานีเชียงใหม่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 0.1175 % ต่อปี สถานีอุบลราชธานีมีแนวโน้มลดลง -0.0654 % ต่อปี สถานีนครปฐมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 0.0283 % ต่อปี และสถานีสงขลามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 0.0115 % ต่อปี จากตัวเลขดังกล่าวพบว่าการเพิ่มขึ้นและลดลงในระยะยาวมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากในทุกสถานีเช่นกัน

ในส่วนของผลการศึกษาลักษณะของดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศ ซึ่งเป็นอัตราส่วนของรังสีรวมต่อรังสีนอกบรรยากาศโลก โดยใช้ข้อมูลรังสีรวมระยะยาว 30 ปีของ 4 สถานีวัดในภูมิภาคหลัก ผลการวิเคราะห์พบว่าค่าดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศแบบเฉลี่ยรายเดือน ($\bar{K}_t$) มีค่าส่วนใหญ่เท่ากับ 0.4 0.5 และ 0.6 ซึ่งบ่งบอกได้ว่าสภาพท้องฟ้าส่วนใหญ่เป็นท้องฟ้าที่มีเมฆปกคลุมบางส่วนและท้องฟ้าแจ่มใส ขณะที่ดัชนีความแจ่มใสของบรรยากาศรายวัน (K_T) แปรค่าไปจนถึง 0.8 แตกต่างกันไปตามลักษณะสภาพภูมิอากาศของแต่ละพื้นที่

ส่วนสุดท้ายในงานวิจัยนี้ เป็นการนำค่าความเข้มรังสีรวมในช่วงปี ค.ศ. 1995 – 2023 ของสถานีวัด 4 แห่งในภูมิภาคหลักของประเทศไทย ได้แก่ สถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี สถานีนครปฐม และสถานีสงขลา มาสร้างแบบจำลองสำหรับประมาณค่ารังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่มีความแม่นยำและใช้งานง่าย เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่อื่น ๆ ของประเทศไทย จากนั้นผู้วิจัยทำการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น โดยใช้ข้อมูลของสถานีวัด 14 แห่งทั่วประเทศไทย ในปี ค.ศ. 2024 ผลการทดสอบพบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถประมาณค่ารังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากเครื่องไพราโนมิเตอร์ โดยมีค่า RMSD ต่ำกว่า 14% และ MBD อยู่ในช่วง -0.01% – 2.47%

จากผลการวิจัยในงานนี้พบว่า การศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะเชิงสถิติของภูมิอากาศของรังสีรวมในประเทศไทยจากสถานีวัดใน 4 ภูมิภาคหลัก สามารถแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของรังสีรวม ซึ่งสามารถนำไปใช้สำหรับการวางแผนและการจัดการพลังงานแสงอาทิตย์ในประเทศไทยได้ และสามารถนำแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นไปประมาณค่ารังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนในพื้นที่อื่น ๆ ของประเทศไทยสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ ตลอดจนนำมาใช้เติมเต็มข้อมูลที่ขาดหายไปได้

ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

ในงานวิจัยนี้ทำการสร้างแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลจากสถานีวัด 4 แห่งในภูมิภาคหลักของประเทศไทย ซึ่งเป็นข้อมูลระยะยาว ทำให้แบบจำลองประมาณค่ารังสีรวมได้แม่นยำ อย่างไรก็ตามหากต้องการให้แบบจำลองมีความแม่นยำมากขึ้นควรเพิ่มจำนวนชุดข้อมูลหรืออาจเพิ่มจำนวนสถานีวัดลงไปใน การสร้างแบบจำลอง นอกจากนี้ ในงานวิจัยนี้ทำการสร้างแบบจำลองจาก 4 สถานีวัดเพื่อทำนายที่อื่น ๆ ในประเทศไทย ดังนั้นหากผู้สนใจที่จะนำแบบจำลองไปใช้งาน ควรเลือกพื้นที่ที่มีลักษณะใกล้เคียงกับตัวแทนของสถานีวัด 4 ที่ในภูมิภาคหลักของประเทศไทย เพื่อให้การประมาณค่ารังสีอาทิตย์รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนในพื้นที่ที่ต้องการได้อย่างแม่นยำมากยิ่งขึ้น



รายการอ้างอิง

- Apeh, O. O., Overen, O. K., & Meyer, E. L. (2021). Monthly, Seasonal and Yearly Assessments of Global Solar Radiation, Clearness Index and Diffuse Fractions in Alice, South Africa. *Sustainability*, 13(4), 2135. <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/4/2135>
- Ayodele, T., & Ogunjuyigbe, A. (2015). Prediction of monthly average global solar radiation based on statistical distribution of clearness index. *Energy*, 90, 1733-1742.
- Ayvazoğlu, Ö., & Filik, Ü. B. (2017). Estimation of monthly average hourly global solar radiation from the daily value in Çanakkale, Turkey. *Journal of Clean Energy Technologies*, 5(5), 389-393.
- Benchirifa, M., Tadili, R., Idrissi, A., Essalhi, H., & Mechagrane, A. (2021). Development of new models for the estimation of hourly components of solar radiation: tests, comparisons, and application for the generation of a solar database in Morocco. *International Journal of Photoenergy*, 2021(1), 8897818.
- Bernard R., Menguy G., & M., S. (1980). *Le Rayonnement Solaire: Conversation Thermique et Applications. Technique & Documentation*. Paris.
- Bhatia, S. (2014). *Advanced renewable energy systems, (Part 1 and 2)*. CRC Press.
- Collares-Pereira, M., & Rabl, A. (1979). The average distribution of solar radiation- correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. *Solar energy*, 22(2), 155-164.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., & Blair, N. (2020). *Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind*. John Wiley & Sons.
- Frauenfelder, R. (2021). Remote Sensing in Geology. In D. Alderton & S. A. Elias (Eds.), *Encyclopedia of Geology (Second Edition)*. Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102908-4.00170-3>
- Gueymard, C. A. (2004). The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models. *Solar energy*, 76(4), 423-453.
- Iqbal, M. (1983). *An introduction to solar radiation*. Elsevier.

- Khorasanizadeh, H., Aghaei, A., Ehteram, H., Dehghani Yazdeli, R., & Hataminasar, N. (2014). Attaining optimum tilts of flat solar surfaces utilizing measured solar data: case study for Ilam, Iran. *Iranica Journal of Energy & Environment*, 5(3).
- Liu, B. Y., & Jordan, R. C. (1960). The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar energy*, 4(3), 1-19.
- Padilla, R. (2011). Simplified Methodology for Designing Parabolic Trough Solar Power Plants.
- Rodziewicz, T., & Rajfur, M. (2019). Numerical procedures and their practical application in PV modules analyses. Part I: air mass.
- Smart, W. M. (1971). *Spherical Astronomy*. Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- Spencer, J. (1971). Fourier series representation of the position of the sun. *Search*, 2(5), 172.
- Wald, L. (2018). *BASICS IN SOLAR RADIATION AT EARTH SURFACE*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36149.93920>
- Wang, L., & Yu, J. (2023). Principles of photocatalysis. In *Interface science and technology* (Vol. 35, pp. 1-52). Elsevier.
- Widén, J., & Munkhammar, J. (2019). *Solar radiation theory*. Uppsala University.
- Yungho, E. B., Nfah, E. M., & Ecladore, T. T. A. (2024). Determination of PV module potential using estimates of hourly irradiance and temperature for Bambili. *International Journal of Photoenergy*, 2024(1), 7987760.
- เสริม จันทร์ฉาย. (2560). รังสีอาทิตย์ = *Solar radiation* / เสริม จันทร์ฉาย (พิมพ์ครั้งที่ 2 (ปรับปรุง) ed.). หน่วยวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- เสริม จันทร์ฉาย, & ชังเซ็ง เลียงจินดาถาวร. (2532). ลักษณะสถิติของพลังงานแสงอาทิตย์ของ กรุงเทพฯ. เอกสารประชุมวิชาการประจำปี ครั้งที่ 27 ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 30 มกราคม - 1 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2532 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพฯ.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล

กนกวรรณ รุ่งหทัยธรรม

วุฒิการศึกษา

พ.ศ. 2561 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนวิสุทธรังสี โครงการพัฒนาศักยภาพวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์ ภาษาอังกฤษ

พ.ศ. 2565 สำเร็จการศึกษาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม

พ.ศ. 2566 ศึกษาต่อระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม

ผลงานตีพิมพ์

กนกวรรณ รุ่งหทัยธรรม, กรทิพย์ โต๊ะสิงห์, และเสริม จันทร์ฉาย (2568). แบบจำลองสำหรับประมาณค่าความเข้มรังสีรวมรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ 4 ภูมิภาคหลักในประเทศไทย. Proceedings ในการประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์วิจัย ครั้งที่ 16 วันที่ 27 - 28 กุมภาพันธ์ พ.ศ.

2568 มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม. หน้า 700 - 709.

Kanokwan Runghathaithum, Korntip Tohsing, and Serm Janjai.

(2025). Simplified Models for Obtaining Monthly Average Hourly Global Solar Radiation from Daily Radiation Data at Four Main Regions in Thailand. Accepted for poster presentation in the 20th Siam Physics Congress (SPC 2025).

12-13 June 2025. at Pullman Khon Kaen Raja Orchid, Khon Kaen.

รางวัลที่ได้รับ

ได้รับรางวัล Good Oral Presentation ในการประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์วิจัย ครั้งที่ 16 วันที่ 27-28 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2568
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม