



การศึกษารังสีสุทธิในประเทศไทย

โดย

นางสาวชุตินันท์ เพิ่มวงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แบบ 1.1

ภาควิชาฟิสิกส์

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษารังสีสุทธิในประเทศไทย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แบบ 1.1

ภาควิชาฟิสิกส์

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

A STUDY OF NET RADIATION IN THAILAND



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

หัวข้อ	การศึกษารังสีสุทธีในประเทศไทย
โดย	นางสาวชุติมณฑน์ เพิ่มวงศ์
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ แบบ 1.1
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รุ่งรัตน์ วัฒนา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปรัชญาดุษฎีบัณฑิต

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

พิจารณาเห็นชอบโดย

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพนธ์ ชูศรี)
.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รุ่งรัตน์ วัฒนา)
.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย)

.....ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อิศระ มะศิริ)
.....ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุมาลย์ บรรเทง)
.....ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมเจตน์ ภัทรพานิชชัย)

650730007 : ฟิสิกส์ แบบ 1.1

คำสำคัญ : รังสีสุทธิ, แผนที่รังสีสุทธิ, แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม, รังสีขาเข้า, รังสีขาออก

นางสาว ชุติมณฑน์ เพิ่มวงศ์: การศึกษารังสีสุทธิในประเทศไทย อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รุ่งรัตน์ วัฒนา

รังสีสุทธิ (Net radiation: R_n) คือผลต่างระหว่างรังสีขาลง (Downwelling radiation) และรังสีขาขึ้น (Upwelling radiation) ณ ที่บริเวณพื้นผิวโลกโดยจะพิจารณารวมกันทั้งรังสีคลื่นสั้น (Shortwave radiation) และรังสีคลื่นยาว (Longwave radiation) โดยรังสีสุทธินี้เป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของภาวะโลกร้อน ถูกใช้เป็นพลังงานสำคัญในเทคโนโลยีการอบแห้ง และยังเป็นตัวแปรสำคัญในการคำนวณค่าการคายระเหยอ้างอิง (Reference evapotranspiration: ET_0) ของพืชไร่พืชสวนที่เป็นบริเวณกว้างเพื่อดูการสูญเสียน้ำขึ้นสู่บรรยากาศซึ่งจะใช้เป็นแนวทางในการบริหารจัดการน้ำของกรมชลประทาน ดังนั้นค่ารังสีสุทธิที่มีความถูกต้องแม่นยำจะเป็นประโยชน์ต่อการบริหารจัดการน้ำในพื้นที่การเกษตรโดยเฉพาะประเทศไทยที่พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ทำการเกษตร แต่เนื่องจากประเทศไทยไม่มีสถานีสำหรับการวัดค่ารังสีสุทธิครอบคลุมทุกพื้นที่ของประเทศไทย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการสร้างแบบจำลองสำหรับการประมาณค่ารังสีสุทธิ โดยใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาเป็นหลักโดยเริ่มจากการใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาภาคพื้นดิน ซึ่งประกอบด้วย รังสีคลื่นสั้นขาลง (Downwelling shortwave radiation: S_d) ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity: RH) และอุณหภูมิอากาศสูงสุด-ต่ำสุด (Maximum-Minimum temperature: T_{max}, T_{min}) มาทำการประมาณค่ารังสีสุทธิที่พื้นผิวโดยใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network: ANN) โดยใช้จำนวนชั้นซ่อน (Hidden layer) ทั้งหมด 2 ชั้น ชั้นแรก 8 โหนด ชั้นที่สอง 3 โหนด โดยผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองเมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่ารังสีสุทธิที่ได้จากการวัดจาก 4 สถานีหลักซึ่งประกอบไปด้วย ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่ (CM: 18.77°N, 98.96°E) สถานีอุตุนิยมวิทยาอุบลราชธานี อำเภอสว่างวีรวงศ์ จังหวัดอุบลราชธานี (UB: 15.24°N, 105.02°E) สถานีอุตุนิยมวิทยานครปฐม จังหวัดนครปฐม (NP: 14.01°N, 99.96°E) และศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา (SK: 7.41°N, 100.62°E) โดยผลการเปรียบเทียบแสดงอยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error: RMSE) และค่าความเอนเอียงเฉลี่ย (Mean Bias Error: MBE) ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้ $R^2=0.98$ RMSE=14.5% และ MBE=-2.2% แต่เนื่องจากข้อมูลอุตุนิยมวิทยาที่วัดภาคพื้นยังไม่ครอบคลุมทุกพื้นที่ในประเทศไทย ผู้วิจัยจึงทำการพัฒนาแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Terra/Aqua และฐานข้อมูล NCEP/NCAR เนื่องจากเป็นแหล่งข้อมูลที่ไม่มีค่าใช้จ่ายและสามารถดาวน์โหลดได้เอง อีกทั้งยังครอบคลุมข้อมูลทางบรรยากาศที่มีผลต่อค่ารังสีสุทธิ ซึ่งตัวแปรที่ผู้วิจัย

เลือกใช้ประกอบด้วย รังสีคลื่นสั้นขาหลง (S_d) ผลต่างอุณหภูมิการส่องสว่างระหว่างช่องสัญญาณ 31 และ 32 ที่ได้จาก MODIS (WP) ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้บอกถึงปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ โดยหาก WP มีค่าใกล้เคียง 0 หมายถึงบรรยากาศมีไอน้ำน้อย ตัวแปรถัดมาคือความชื้นสัมพัทธ์ (RH) อุณหภูมิอากาศ (T_{air}) และปริมาณเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้า (C) โดยผู้วิจัยสร้างแบบจำลองให้อยู่ในรูปแบบจำลองเชิงเส้นหลายตัวแปร จากนั้นนำผลจากแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับข้อมูลรังสีสุทธีที่ได้จากการวัดทั้งสี่สถานีหลักพบว่ามีค่า $R^2=0.96$ $RMSE=21.6\%$ และ $MBE=-6.4\%$ ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ในกรณีที่ใช้ตัวแปรอื่นพูดเป็นข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม จากนั้นนำแบบจำลองนี้มาทำการสร้างแผนที่การกระจายตัวของรังสีสุทธีในพื้นที่ของประเทศไทย พบว่ารังสีสุทธีมีลักษณะการแปรค่าตามฤดูกาล ซึ่งลักษณะการแปรค่าดังกล่าวนี้สอดคล้องกับข้อมูลวัดเป็นอย่างดี



650730007 : Major PHYSICS

Keyword : Net radiation, Net radiation map, Artificial Neural Network, Downwelling radiation, Upwelling radiation

MISS Chutimon PHOEMWONG : A study of net radiation in Thailand Thesis advisor : Assistant Professor Rungrat Wattan, Ph.D.

Net radiation (R_n) is the difference between downwelling and upwelling radiation at the Earth's surface, including both shortwave and longwave radiation. Net radiation is an important variable in the study of global warming, plays a key role as an energy source in drying technologies, and is essential for estimating reference evapotranspiration over agricultural areas. This information can be used for water management planning in irrigation systems. Therefore, accurate net radiation data is very useful, especially for countries like Thailand, where most areas are agricultural. However, Thailand lacks a nationwide network of net radiation measurement stations. Therefore, this study aims to develop a model for estimating net radiation using mainly meteorological data. The first part of the study uses ground-based meteorological data, including downwelling shortwave radiation (S_d), relative humidity (RH), and maximum and minimum air temperatures (T_{max}, T_{min}), to estimate surface net radiation using an Artificial Neural Network (ANN) model. The model consists of two hidden layers with 8 and 3 nodes, respectively. The results were compared with measured net radiation from four main stations: Northern Meteorological Center, Chiang Mai (CM: 18.77°N, 98.96°E), Ubon Ratchathani Meteorological Station, Sawang Wirawong District (UB: 15.24°N, 105.02°E), Nakhon Pathom Meteorological Station (NP: 14.01°N, 99.96°E), and Southern East Coast Meteorological Center, Songkhla (SK: 7.41°N, 100.62°E). The model's performance was evaluated using the coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), and mean bias error (MBE), which were: $R^2 = 0.98$, RMSE = 14.5%, and MBE = -2.2%, respectively. Since ground-based meteorological data is not available for all areas of Thailand, the researcher further developed models using satellite data. The selected satellites were Terra/Aqua and NCEP/NCAR, as they are freely accessible and provide comprehensive atmospheric data related to net radiation. The selected variables included: downwelling shortwave radiation (S_d), the brightness temperature

difference between MODIS channels 31 and 32 (WP), relative humidity (RH), air temperature (T_{air}), and cloud cover (C). Multiple linear regression models were created. When compared with net radiation measured at the four main stations, the model results were: $R^2 = 0.96$, RMSE = 21.6%, and MBE = -6.4%, which are acceptable errors for satellite-based input data. Finally, this model was used to create maps of net radiation distribution across Thailand. The maps show seasonal variation in net radiation, mainly influenced by downwelling shortwave radiation, and the patterns agree well with measured data.



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง "การศึกษารังสีสุทธีในประเทศไทย" ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความร่วมมือและแรงสนับสนุนจากหลายภาคส่วนที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง ผู้เขียนขอแสดงความขอบคุณอย่างสุดซึ้งซึ่งต่อทุกท่านที่มีส่วนช่วยเหลือและสนับสนุนตลอดระยะเวลาการศึกษาและการทำวิจัยที่ผ่านมา

ผู้เขียนขอขอบพระคุณครอบครัวที่เป็นกำลังใจสำคัญและอยู่เคียงข้างในทุกช่วงเวลาของความยากลำบาก เป็นทั้งผู้รับฟังและแรงผลักดันที่ทำให้ผู้เขียนไม่ย่อท้อตลอดระยะเวลาสามปีของการศึกษา ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดความรู้ แนวคิด และทักษะต่าง ๆ อันมีคุณค่า ซึ่งมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาทางวิชาการของผู้เขียนจนสามารถดำเนินงานวิจัยฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วง ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ในห้องปฏิบัติการทุกคน ที่ร่วมแบ่งปันประสบการณ์ให้กำลังใจ และผ่านช่วงเวลาแห่งความท้าทายมาด้วยกัน ทำให้การทำวิจัยไม่รู้สึกโดดเดี่ยว ขอขอบคุณ Solar Lab ที่เป็นพื้นที่แห่งการเรียนรู้ ทดลอง และพัฒนาตนเองอย่างต่อเนื่อง จนผู้เขียนสามารถเติบโตและเป็นเวอร์ชันที่ดีขึ้นของตนเองในวันนี้ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือด้านเอกสารและการประสานงานต่าง ๆ ซึ่งมีส่วนช่วยให้กระบวนการเรียนเป็นไปอย่างราบรื่นและท้ายที่สุด ผู้เขียนขอขอบคุณตนเองที่ไม่ยอมแพ้ต่ออุปสรรค และมีความมุ่งมั่นพากเพียรจนสามารถฟันฝ่าช่วงเวลาที่ยากลำบากมาได้ แม้อาจไม่สมบูรณ์แบบ แต่ก็เต็มเปี่ยมด้วยความตั้งใจและความพยายามอย่างแท้จริง

ชุตินันท์ เพิ่มวงศ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ฌ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎี.....	5
2.1.1 เทคโนโลยีสำรวจระยะไกล (Remote sensing).....	5
2.1.2 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network model; ANN model).....	7
2.1.3 รังสีคลื่นสั้น.....	12
2.1.4 รังสีคลื่นยาว.....	14
2.1.5 รังสีสุทธิ.....	15
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
บทที่ 3 ข้อมูลและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	24
3.1 ข้อมูล.....	24

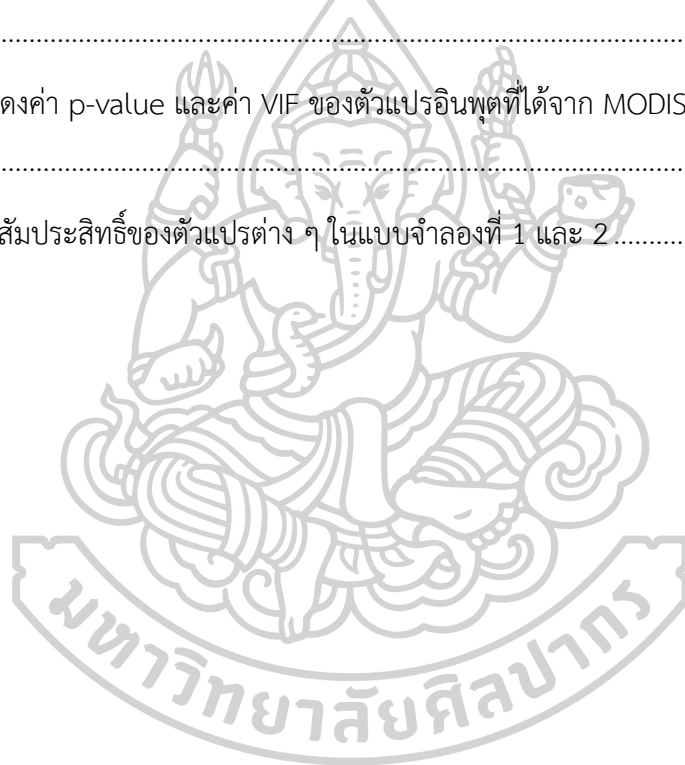
3.1.1 ข้อมูลรังสีสุทธีที่ได้จากการวัด.....	25
3.1.2 ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา.....	4
3.1.3 ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม.....	4
3.1.3.1 ข้อมูลจาก MODIS	5
3.1.3.2 ข้อมูลจาก NCEP/NCAR	11
3.2 การดำเนินงาน.....	12
3.2.1 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับประมาณค่ารังสีสุทธี.....	12
3.2.2 แบบจำลองเอมไพริคัล (Empirical model) สำหรับประมาณค่ารังสีสุทธี	14
บทที่ 4 ผลและการอภิปรายผล.....	16
4.1 ลักษณะทางสถิติของรังสีสุทธี.....	16
4.1.1 การแปรค่ารังสีสุทธีรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน	16
4.1.2 การแปรค่ารังสีสุทธีรายวันเฉลี่ยต่อเดือน.....	25
4.1.3 การแปรค่ารังสีสุทธีเฉลี่ยรายปี.....	27
4.2 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับประมาณค่ารังสีสุทธี	28
4.2.1 ตัวแปรอินพุตในแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม.....	28
4.2.2 การสร้างและทดสอบแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม.....	30
4.3 แบบจำลองเอมไพริคัลสำหรับประมาณค่ารังสีสุทธีโดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม.....	34
4.3.1 ตัวแปรอินพุตจากข้อมูล MODIS และ NCEP/NCAR	34
4.3.2 การวิเคราะห์ตัวแปรสำหรับสร้างแบบจำลอง.....	38
4.3.3 การทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองเอมไพริคัลสำหรับประมาณค่ารังสีสุทธี.....	40
4.4 แผนที่รังสีสุทธี.....	43
4.4.1 แผนที่รังสีสุทธีรายวันเฉลี่ยต่อเดือน	43
4.4.2 แผนที่รายวันเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาว.....	53
4.4.3 รังสีสุทธีรายปี.....	55

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย.....	57
รายการอ้างอิง.....	58
ภาคผนวก.....	61
ภาคผนวก ก. การแปลค่าจำนวนโหนดและจำนวนชั้นซ่อน	62
ภาคผนวก ข. เปรียบเทียบข้อมูลภาคพื้นดินและข้อมูลดาวเทียม	78
ประวัติผู้เขียน.....	82



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้ใน LUT เพื่อหาค่าฟังก์ชันการส่งผ่านของบรรยากาศ.....	6
ตารางที่ 2 รายละเอียดของตัวแปร S_d และ WP ที่ได้จาก MODIS	10
ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ทางอุตุนิยมวิทยาที่ใช้ในแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม	28
ตารางที่ 4 ค่าสถิติของตัวแปรอินพุตประกอบด้วยค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน	36
ตารางที่ 5 แสดงค่า p-value และค่า VIF ของตัวแปรอินพุตที่ได้จาก MODIS และฐานข้อมูล NCEP/NCAR.....	38
ตารางที่ 6 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในแบบจำลองที่ 1 และ 2	40



สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1 ระบบการทำงานของการทำงานของสารสำรวจระยะไกล ระบบ Passive (ภาพถ่าย) ระบบ Active (ภาพ ขาว) (Ornelas, 2016).....	6
รูปที่ 2 องค์ประกอบของเซลล์ประสาทของมนุษย์ (เสริม จันทน์ฉาย, 2014)	8
รูปที่ 3 จุดเชื่อมต่อที่เรียกว่าซินแนปส์ของเซลล์ประสาทมนุษย์ (เสริม จันทน์ฉาย, 2014).....	8
รูปที่ 4 โครงสร้างการทำงานของเซลล์ประสาทเทียม 1 เซลล์ (เสริม จันทน์ฉาย, 2014)	9
รูปที่ 5 โครงสร้างของระบบโครงข่ายประสาทเทียม (เสริม จันทน์ฉาย, 2014).....	10
รูปที่ 6 รูปแบบการฝึกสอนแบบจำลองแบบย้อนกลับ (เสริม จันทน์ฉาย, 2014).....	11
รูปที่ 7 ความยาวคลื่นแต่ละช่วงของรังสีอาทิตย์ (รังสีคลื่นสั้น)	12
รูปที่ 8 ตัวอย่างเครื่องวัดรังสีคลื่นสั้น.....	14
รูปที่ 9 ตัวอย่างเครื่องวัดรังสีคลื่นยาว	15
รูปที่ 10 ลักษณะของเครื่องวัดรังสีสุทธีซึ่งประกอบไปด้วย 4 เซนเซอร์	16
รูปที่ 11 ลักษณะเครื่องมือวัดรังสีสุทธีและตำแหน่งที่ตั้ง ภาคเหนือติดตั้งที่จังหวัดเชียงใหม่ (CM) ภาค ตะวันออกเฉียงเหนือติดตั้งที่จังหวัดอุบลราชธานี (UB) ภาคกลางติดตั้งที่จังหวัดนครปฐม (NP) และ ภาคใต้ติดตั้งที่จังหวัดสงขลา (SK).....	26
รูปที่ 12 ตัวอย่างการเก็บรวบรวมข้อมูลรังสีสุทธี	1
รูปที่ 13 ตัวอย่างการติดตั้งเครื่องวัดมาตรฐานเพื่อทำการสอบเทียบ	1
รูปที่ 14 ตัวอย่างกราฟการสอบเทียบเซนเซอร์วัดรังสีคลื่นสั้นของสถานีนครปฐม	2
รูปที่ 15 ตัวอย่างกราฟการสอบเทียบเซนเซอร์วัดรังสีคลื่นสั้นขาขึ้นสถานีนครปฐม	2
รูปที่ 16 ตัวอย่างการกราฟสอบเทียบเซนเซอร์วัดรังสีคลื่นยาวของสถานีนครปฐม	3
รูปที่ 17 ตัวอย่างกราฟการสอบเทียบเซนเซอร์วัดรังสีคลื่นยาวขาขึ้นสถานีนครปฐม	3
รูปที่ 18 ตัวอย่างข้อมูลรังสีคลื่นสั้นของรายสามชั่วโมงที่ได้จาก MODIS โดยในตัวอย่างนี้มีรหัสภาพ คือ h27v06 ที่เวลา 06.00 UTC. หรือ 13.00 น.	6

รูปที่ 19 ตัวอย่างข้อมูลรังสีคลื่นสั้นขาหลงราย 3 ชั่วโมงที่ได้จาก MODIS ในวันที่ 1 มกราคม ค.ศ. 2020 เวลา 13.00 น.	7
รูปที่ 20 ลักษณะภาพถ่ายดาวเทียมของค่าอุณหภูมิการส่องสว่าง ช่องสัญญาณที่ 31	8
รูปที่ 21 ลักษณะภาพถ่ายดาวเทียมของค่าอุณหภูมิการส่องสว่าง ช่องสัญญาณที่ 32	9
รูปที่ 22 ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิการส่องสว่างระหว่างช่องสัญญาณที่ 31 และ 32 ของวันที่ 1 มกราคม ค.ศ. 2020	9
รูปที่ 23 เว็บไซต์สำหรับการดาวน์โหลดข้อมูล NCEP/NCAR.....	11
รูปที่ 24 โครงสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ประมาณค่ารังสีสุทธิในงานวิจัยนี้.....	13
รูปที่ 25 ค่ารังสีคลื่นสั้นขาหลง (DS) รังสีคลื่นสั้นขาขึ้น (US) รังสีคลื่นยาวขาหลง (DL) รังสีคลื่นยาวขาขึ้น (UL) และรังสีสุทธิ (NET) รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาวที่สถานีเชียงใหม่	17
รูปที่ 26 ค่ารังสีคลื่นสั้นขาหลง (DS) รังสีคลื่นสั้นขาขึ้น (US) รังสีคลื่นยาวขาหลง (DL) รังสีคลื่นยาวขาขึ้น (UL) และรังสีสุทธิ (NET) รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาวที่สถานีอุบลราชธานี	19
รูปที่ 27 ค่ารังสีคลื่นสั้นขาหลง (DS) รังสีคลื่นสั้นขาขึ้น (US) รังสีคลื่นยาวขาหลง (DL) รังสีคลื่นยาวขาขึ้น (UL) และรังสีสุทธิ (NET) รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาวที่สถานีนครปฐม	21
รูปที่ 28 ค่ารังสีคลื่นสั้นขาหลง (DS) รังสีคลื่นสั้นขาขึ้น (US) รังสีคลื่นยาวขาหลง (DL) รังสีคลื่นยาวขาขึ้น (UL) และรังสีสุทธิ (NET) รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาวที่สถานีสงขลา.....	23
รูปที่ 29 การแปรค่ารังสีสุทธิรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีเชียงใหม่ระหว่างปี ค.ศ. 2017-2024...	25
รูปที่ 30 การแปรค่ารังสีสุทธิรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีอุบลราชธานีระหว่างปี ค.ศ. 2017-2024	25
รูปที่ 31 การแปรค่ารังสีสุทธิรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีนครปฐมระหว่างปี ค.ศ. 2017-2024 ..	25
รูปที่ 32 การแปรค่ารังสีสุทธิรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีสงขลาระหว่างปี ค.ศ. 2017-2024.....	26
รูปที่ 33 การแปรค่ารังสีสุทธิเฉลี่ยรายปีโดยแสดงค่าระหว่างปี ค.ศ. 2017-2024 ของสถานีเชียงใหม่ อุบลราชธานี นครปฐม และสงขลา.....	27
รูปที่ 34 ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีสุทธิที่ได้จากจากวัด (R_{n_Obs}) ในแนวกแน X และรังสีสุทธิที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (R_{n_mod}) ในแนวกแน Y ของทั้ง 4 สถานีในประเทศไทย	31

รูปที่ 35 การเปรียบเทียบค่ารังสีสุทธิจากแบบจำลองโคจรข่ายประสาทเทียมกับค่ารังสีสุทธิที่ได้จากการวัด (รวมข้อมูลจากทั้ง 4 สถานี).....	33
รูปที่ 36 ลักษณะการกระจายตัวของตัวแปรอินพุตที่ได้จาก MODIS และ ฐานข้อมูล NCEP/NCAR 35	
รูปที่ 37 กราฟการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีสุทธิที่ได้จากการวัด ($R_{n_obs} [MJ / m^2]$) และค่ารังสีสุทธิที่ได้จากแบบจำลอง ($R_{n_mod} [MJ / m^2]$) โดยกราฟ (a) คือแบบจำลองที่ 1 และ กราฟ (b) คือแบบจำลองที่ 2	41
รูปที่ 38 กราฟการเปรียบเทียบระหว่างรังสีสุทธิที่ได้จากการวัด (เส้นสีดำ) และรังสีสุทธิที่ได้จากแบบจำลองที่ 1 (เส้นสีแดง) แบบจำลองที่ 2 (เส้นสีน้ำเงิน).....	42
รูปที่ 39 แผนที่รังสีสุทธิรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของปี ค.ศ. 2017.....	44
รูปที่ 40 แผนที่รังสีสุทธิรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของปี ค.ศ. 2018.....	45
รูปที่ 41 แผนที่รังสีสุทธิรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของปี ค.ศ. 2019.....	46
รูปที่ 42 แผนที่รังสีสุทธิรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของปี ค.ศ. 2020.....	47
รูปที่ 43 แผนที่รังสีสุทธิรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของปี ค.ศ. 2021.....	48
รูปที่ 44 แผนที่รังสีสุทธิรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของปี ค.ศ. 2022.....	49
รูปที่ 45 แผนที่รังสีสุทธิรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของปี ค.ศ. 2023.....	50
รูปที่ 46 แผนที่รังสีสุทธิรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของปี ค.ศ. 2024.....	51
รูปที่ 47 ค่ารังสีสุทธิรายวันเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาว	54
รูปที่ 48 ค่ารังสีสุทธิเฉลี่ยรายปี	56

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและปัญหา

ค่าการคายระเหย (Evapotranspiration: ET) ถือเป็นปัจจัยสำคัญในการบริหารจัดการน้ำเพื่อการเกษตร เนื่องจากสามารถใช้เป็นตัวชี้วัดความต้องการน้ำของพืชในแต่ละช่วงการเจริญเติบโต ช่วยให้เกษตรกรสามารถวางแผนการใช้น้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ลดการใช้น้ำเกินจำเป็น และช่วยประหยัดต้นทุนการผลิต โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีปัญหาการขาดแคลนน้ำหรือประสบภัยแล้งบ่อยครั้ง เช่น ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย การทราบค่าการคายระเหยอย่างแม่นยำยิ่งช่วยให้สามารถจัดสรรทรัพยากรน้ำได้เหมาะสมกับความต้องการของพืชในแต่ละฤดู นำไปสู่การเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรอย่างยั่งยืน นอกจากนี้ ค่าการคายระเหยยังเป็นดัชนีที่สะท้อนถึงผลกระทบจากปัจจัยภูมิอากาศ เช่น อุณหภูมิ ลม ความชื้น และรังสีอาทิตย์ จึงสามารถใช้ติดตามแนวโน้มและปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้อย่างทัน่วงที อีกทั้งยังมีบทบาทสำคัญในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำในระดับลุ่มน้ำหรืออ่างเก็บน้ำ โดยช่วยประเมินสมดุลน้ำและวางแผนการปล่อยน้ำให้สอดคล้องกับความต้องการใช้น้ำจริงของภาคเกษตรกรรมแต่เนื่องจากไม่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดค่าการคายระเหยทุกพื้นที่การเกษตรของประเทศไทย แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงเป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการหาค่าการคายระเหยในพื้นที่ที่ขาดแคลนเครื่องมือหรือพื้นที่ห่างไกล แบบจำลองการคายระเหยอ้างอิง (ET_0) มีการพัฒนาความแม่นยำของแบบจำลองไว้หลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็นแบบจำลองการคายระเหยแบบเอมไพริคัล ซึ่งใช้ตัวแปรอินพุตเป็นข้อมูลอุตุนิยมวิทยา (Al-Ghobari et al., 2018; Alexandris and Kerkides, 2003) หรือมีการพัฒนาวิธีการโดยใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเข้ามาช่วยในการประมาณค่าการคายระเหยโดยใช้พารามิเตอร์ทางบรรยากาศ (Kumar et al., 2011) ส่วนใหญ่แล้วค่าที่นำมาใช้ในแบบจำลองเหล่านี้มักเป็นข้อมูลอุตุนิยมวิทยา เช่น อุณหภูมิอากาศ หรือความชื้นสัมพัทธ์ ถัดมาได้มีการเพิ่มใช้ตัวแปรรังสีในส่วน of รังสีอาทิตย์และรังสีความร้อนที่ได้จากภาพถ่ายดาวเทียมเข้ามาช่วยในการประมาณค่าการคายระเหย (Chen and Liu, 2020) ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีตัวแปรทางด้านรังสีเข้ามานั้นค่าการคายระเหยที่ได้จากการประมาณมีค่าแม่นยำมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่มีวิธีการพัฒนาแบบจำลองการคายระเหยอีกหลายรูปแบบซึ่งส่วนใหญ่แล้วจะนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการวัด หรือ

เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากแบบจำลองมาตรฐานซึ่งเป็นที่ยอมรับอย่างแบบจำลองการคายระเหย Penman-Monteith (Allen et al., 1998) ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{(T + 273)} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

โดย ET_0 คือค่าการระเหยอ้างอิง [$mm / time$]

Δ คือ Slope of saturation vapor pressure curve [-]

G คือ ฟลักซ์ความร้อนในดิน [$MJ / m^2 \cdot time$]

γ คือ Psychrometric constant [$kPa^\circ C^{-1}$]

T คืออุณหภูมิอากาศ [$^\circ C$]

e_s คือความดันอิ่มตัว [kPa]

e_a คือความดันไอที่แท้จริง [kPa]

u_2 คือความเร็วลมที่ระดับความสูงเหนือพื้นผิว 2 เมตร [$m / time$]

R_n คือค่ารังสีสุทธิ [$MJ / m^2 \cdot time$]

ค่ารังสีสุทธินี้เป็นตัวแปรสำคัญที่บ่งบอกถึงพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำที่บริเวณพื้นผิวน้ำสู่บรรยากาศหรือกล่าวได้ว่าเป็นพลังงานที่เหลื่ออยู่และถูกใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ของพืชและวัฏจักรทางธรรมชาติ ดังนั้นความแม่นยำของค่ารังสีสุทธิจึงส่งผลถึงความแม่นยำของแบบจำลองการคายระเหยด้วย แต่เนื่องจากค่ารังสีสุทธิไม่มีเครื่องมือวัดที่ติดตั้งกันอย่างแพร่หลายครอบคลุมทุกพื้นที่ เพราะเครื่องมือวัดมีราคาค่อนข้างสูงและต้องอาศัยการสอบเทียบประจำปีเพื่อความแม่นยำในการวัด นักวิจัยจึงสนใจใช้แบบจำลองในการประมาณค่ารังสีสุทธิเพื่อแก้ไขปัญหาการขาดแคลนข้อมูลโดยใช้ข้อมูลพารามิเตอร์ทางอุตุนิยมวิทยาที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดโดยทั่วไปมาเป็นตัวแปรอินพุต ซึ่งแบบจำลองที่ว่านี้มีหลายรูปแบบ เช่น แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks model) โดยมีข้อดีคือสามารถวิเคราะห์และหาความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างตัวแปรได้ดี และสามารถวิเคราะห์ข้อมูลจำนวนมากได้อย่างมีประสิทธิภาพ ข้อเสียคือผู้ใช้งานจำเป็นต้องมีความรู้ทางด้านโครงสร้างของแบบจำลอง จำนวนชั้นซ่อน จำนวนโหนด และจำนวนรอบในการฝึกสอนที่ดี

ที่สุด อีกทั้งข้อมูลที่ใช้ในแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมนี้จำเป็นต้องมีจำนวนมากพอเพื่อใช้ในการฝึกสอนและทดสอบแบบจำลอง แบบจำลองอีกหนึ่งแบบที่ง่ายและเป็นที่ยอมรับในกรณีที่มีข้อมูลจากการทดลองหรือข้อมูลจากการวัดคือ แบบจำลองเอมไพริคัล (Empirical model) มีข้อดีคือเป็นแบบจำลองที่หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามอย่างตรงไปตรงมาและนำเสนอความสัมพันธ์ในรูปแบบของสมการทางคณิตศาสตร์ โดยนักวิจัยสามารถนำสมการที่ได้จากการหาความสัมพันธ์นี้ไปใช้งานกับตัวแปรต้นชุดอื่น ๆ ได้ ข้อเสียของแบบจำลองชนิดนี้คือตัวแปรทั้งสองจำเป็นต้องมีความสัมพันธ์กันที่ชัดเจน ค่าสัมประสิทธิ์ที่อยู่ในแบบจำลองนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามแต่ละชุดข้อมูล นักวิจัยจึงจำเป็นต้องมีการหาค่าสัมประสิทธิ์ใหม่ในกรณีที่มีการเปลี่ยนชุดข้อมูล ด้วยเหตุนี้การเลือกใช้แบบจำลองสำหรับประมาณค่ารังสีสุทธีจึงต้องเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งาน ดังนั้นในงานวิจัยนี้สนใจที่จะศึกษาค่ารังสีสุทธีในพื้นที่ประเทศไทยโดยศึกษาลักษณะทางสถิติของรังสีสุทธี พร้อมทั้งสร้างและทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองสำหรับประมาณค่ารังสีสุทธี

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาการแปรค่าของรังสีสุทธีที่ได้จากข้อมูลวัด
2. ประมาณค่ารังสีสุทธีจากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมโดยใช้ข้อมูลอุตุนิมวิทยาเป็นข้อมูลอินพุต
3. สร้างแบบจำลองเพื่อประมาณค่ารังสีสุทธีโดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมและข้อมูลจากฐานข้อมูลเป็นข้อมูลอินพุต
4. สร้างแผนที่รังสีสุทธีจากแบบจำลองเพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัวเชิงพื้นที่ของรังสีสุทธี

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาค่ารังสีสุทธีและพัฒนาแบบจำลองเพื่อประมาณค่ารังสีสุทธีในพื้นที่ประเทศไทยโดยอ้างอิงจากข้อมูลวัดที่ 4 สถานีหลักซึ่งประกอบด้วย ศูนย์อุตุนิมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่ (CM: 18.77°N, 98.96°E) สถานีอุตุนิมวิทยาอุบลราชธานี อำเภอสว่างวีรวงศ์ จังหวัดอุบลราชธานี (UB: 15.24°N, 105.02°E) สถานีอุตุนิมวิทยานครปฐม จังหวัดนครปฐม (NP: 14.01°N, 99.96°E) และศูนย์อุตุนิมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา (SK: 7.41°N,

100.62°E) ระหว่างช่วงปี ค.ศ. 2017-2024 โดยใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาและข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม
เป็นข้อมูลอินพุต



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษารังสีสุทธิ (Net radiation) จำเป็นต้องอาศัยความรู้จากหลายสาขาวิชา ทั้งด้านฟิสิกส์ของรังสี ดาราศาสตร์ อุตุนิยมวิทยา วิทยาการเทคโนโลยีสำรวจระยะไกล ตลอดจนเทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลและการสร้างแบบจำลองเชิงตัวเลข โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของประเทศไทยที่ยังขาดแคลนเครื่องมือวัดรังสีสุทธิในหลายพื้นที่ ความเข้าใจในหลักการพื้นฐานของการแผ่รังสีพฤติกรรมของรังสีคลื่นสั้นและคลื่นยาว ตลอดจนการคำนวณค่าพลังงานสุทธิที่ผิวโลกจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ในบทนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอทฤษฎีและหลักการพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาและประเมินค่ารังสีสุทธิ รวมถึงงานวิจัยก่อนหน้านี้ ซึ่งช่วยเสริมสร้างความเข้าใจในระบบพลังงานของโลก และเป็นรากฐานสำคัญในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประมาณค่ารังสีสุทธิในประเทศไทย โดยจะเริ่มจากเทคโนโลยีสำรวจระยะไกลซึ่งเป็นเครื่องมือสำคัญในการเก็บข้อมูลรังสี จากนั้นจึงกล่าวถึงแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม รังสีคลื่นสั้น รังสีคลื่นยาว และสุดท้ายคือทฤษฎีของรังสีสุทธิที่เป็นหัวใจหลักของการวิจัยในครั้งนี้

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 เทคโนโลยีสำรวจระยะไกล (Remote sensing)

การสำรวจข้อมูลระยะไกล (Remote sensing) คือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแขนงหนึ่งที่ใช้บันทึกคุณลักษณะของวัตถุ หรือปรากฏการณ์ต่าง ๆ จากการสะท้อนแสงหรือการแผ่รังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic energy) โดยถ้าวัตถุหรือสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน จะมีลักษณะการสะท้อนแสงหรือการแผ่รังสีเฉพาะตัวและจากคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทำให้ได้มาซึ่งข้อมูลใน 3 ลักษณะ คือ

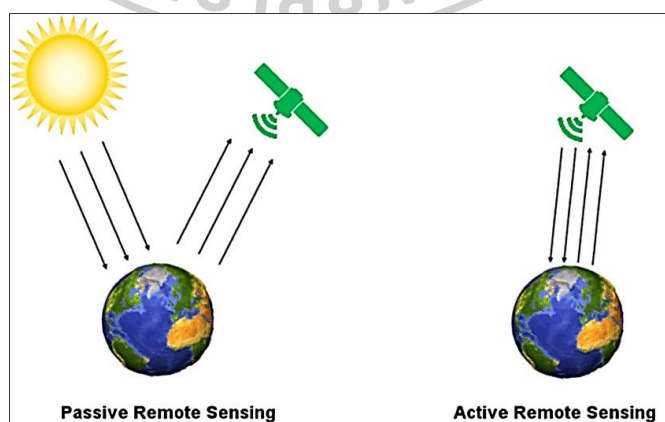
1. ช่วงคลื่น (Spectral)
2. รูปทรงสัณฐานของวัตถุบนพื้นโลก (Spatial)
3. การเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา (Temporal)

รีโมตเซนซิงจึงเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในการจำแนกและเข้าใจวัตถุหรือสภาพแวดล้อมต่าง ๆ จากลักษณะเฉพาะตัวในการสะท้อนแสงหรือแผ่รังสีโดยสามารถจำแนกออกเป็นสองรูปแบบแบ่งตามแหล่งกำเนิดพลังงานที่ก่อให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมี 2 กลุ่มใหญ่ คือ

2.1.1 Passive remote sensing เป็นระบบที่ใช้กันกว้างขวางตั้งแต่เริ่มแรกจนถึงปัจจุบัน โดยมีแหล่งพลังงานที่เกิดตามธรรมชาติ คือ ดวงอาทิตย์ ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดพลังงาน ระบบนี้จะรับและบันทึกข้อมูลได้ส่วนใหญ่ในเวลากลางวัน และมีข้อจำกัดด้านสภาวะอากาศ ไม่สามารถรับข้อมูลได้ในฤดูฝน หรือเมื่อมีเมฆ หมอก และฝน

2.1.2 Active remote sensing เป็นระบบที่แหล่งพลังงานถูกสร้างขึ้นในตัวเครื่องมือสำรวจ เช่น ช่วงคลื่นไมโครเวฟที่สร้างในระบบเรดาร์ แล้วส่งพลังงานนั้นไปยังพื้นที่เป้าหมาย ระบบนี้สามารถทำการรับและบันทึกข้อมูลได้โดยไม่มีข้อจำกัดด้านเวลา หรือ ด้านสภาวะอากาศ คือสามารถรับส่งสัญญาณได้ทั้งกลางวันและกลางคืน อีกทั้งยังสามารถทะลุผ่านกลุ่มเมฆ หมอก ฝนได้ในทุกฤดูกาล ในช่วงแรกระบบ Passive remote sensing ได้รับการพัฒนามาก่อน และยังคงใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ส่วนระบบ Active remote sensing มีการพัฒนาจากวงการทหาร แล้วจึงเผยแพร่เทคโนโลยีนี้ต่อกิจการพลเรือน ในช่วงหลังการสำรวจในด้านนี้ได้รับความสนใจมากขึ้น โดยเฉพาะกับประเทศในเขตร้อนที่มีปัญหาเมฆ หมอก ปกคลุมอยู่เป็นประจำ

ภาพแสดงการทำงานของระบบ Passive และ Active remote sensing สามารถได้จากรูปที่ 1



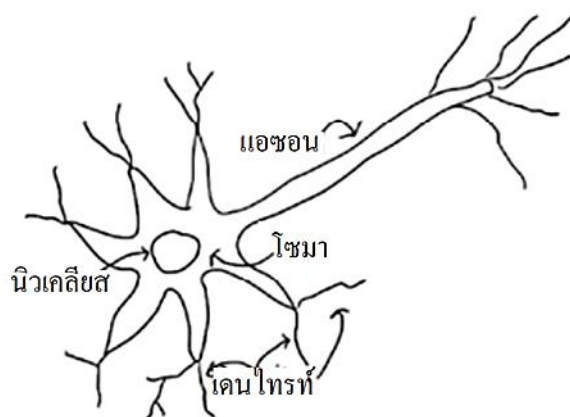
รูปที่ 1 ระบบการทำงานของ การสำรวจระยะไกล ระบบ Passive (ภาพถ่าย) ระบบ Active (ภาพถ่าย) (Ornelas, 2016)

ดาวเทียมสำรวจทรัพยากรหรือดาวเทียมอุตุนิยมวิทยาก็เป็นเทคโนโลยีสำรวจระยะไกลด้วยเช่นเดียวกัน โดยนิยมใช้ระบบ Passive remote sensing จะมีความละเอียด รัศมีวงโคจร และลักษณะการโคจรที่แตกต่างกันออกไปซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามลักษณะการโคจร คือ 1) ดาวเทียมค้างฟ้า (Geostationary satellite) มีลักษณะคืออยู่ที่ตำแหน่งคงที่เหนือเส้นศูนย์สูตร โคจรรอบโลกพร้อมการหมุนรอบตัวเองของโลก เช่น Himawari, GOES ข้อดีคือเหมาะกับการสังเกตการณ์ต่อเนื่อง เช่น พยากรณ์อากาศแบบเรียลไทม์ ภาพที่ได้มีความถี่มาก (ทุก 10 นาที) แต่ข้อเสียคือความละเอียดเชิงพื้นที่ต่ำ มองเห็นเฉพาะพื้นที่ใกล้เส้นศูนย์สูตร และ 2) ดาวเทียมขั้วโลก (Polar-orbiting satellite) มีลักษณะโคจรรอบโลกในแนวเหนือ-ใต้ ผ่านบริเวณขั้วโลกทุกวงโคจร เช่น (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer: MODIS) (Terra/Aqua), Landsat ข้อดีของดาวเทียมชนิดนี้คือความละเอียดเชิงพื้นที่สูงเหมาะกับการเก็บข้อมูลภาพทั่วโลกในรอบหลายวัน แต่ข้อเสียคือไม่สามารถสังเกตตำแหน่งเดิมตลอดเวลา ไม่เหมาะกับการเฝ้าระวังแบบเรียลไทม์ ดังนั้นนักวิจัยที่ต้องการใช้ข้อมูลดาวเทียมจึงจำเป็นต้องเลือกชนิดของดาวเทียมให้เหมาะสมกับความต้องการทางด้านการใช้งาน

2.1.2 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network model; ANN model)

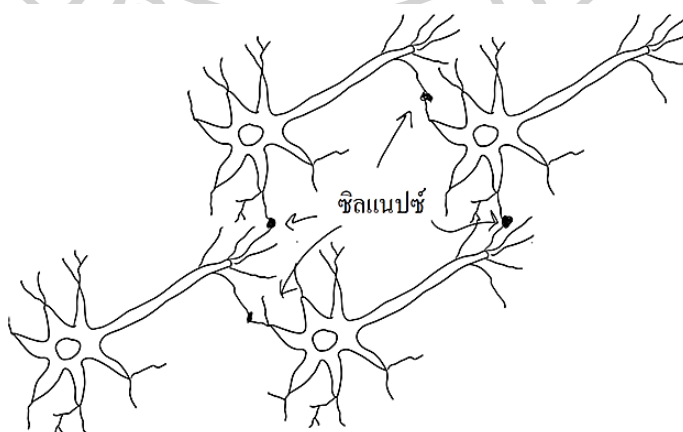
โครงข่ายประสาทเทียมหรือ ANN เป็นระบบทางคณิตศาสตร์ที่เขียนในรูปของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งสามารถจำลองการทำงานของระบบทางฟิสิกส์โดยเลียนแบบการทำงานของเซลล์สมองของมนุษย์ โดยทั่วไปโครงข่ายประสาทเทียมจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาต์พุตผ่านหน่วยย่อยที่เรียกว่า นิวรอน (Neuron) โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวจะได้มาจากการฝึกสอนด้วยข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่ทราบค่า จากนั้นจะนำโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้รับการฝึกสอนไปหาค่าเอาต์พุตของระบบจากอินพุตชุดใหม่ได้ ข้อดีของการใช้งานโครงข่ายประสาทเทียมคือไม่จำเป็นต้องสร้างสมการความสัมพันธ์ในรูปแบบฟังก์ชันต่าง ๆ ดังนั้นการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียมจึงเหมาะสมกับระบบตัวแปรที่อินพุตและเอาต์พุตมีความสัมพันธ์กันอย่างซับซ้อนซึ่งไม่สามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ได้โดยตรง โดยองค์ประกอบของเซลล์

ประสาทของมนุษย์ ซึ่งประกอบด้วย เดรนไทรท์ นิวเคลียส โซมา และแอสซอน สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 2



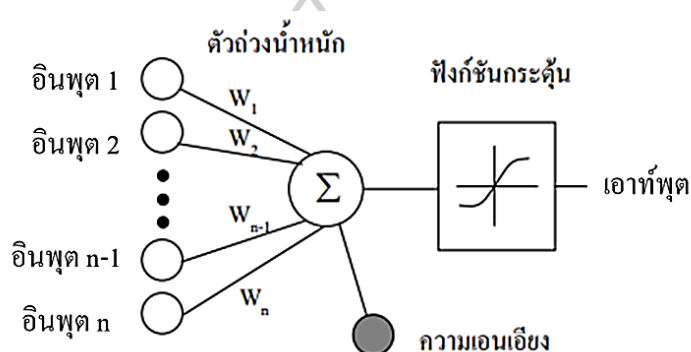
รูปที่ 2 องค์ประกอบของเซลล์ประสาทของมนุษย์ (เสริม จันทร์ฉาย, 2014)

จากรูปที่ 2 แสดงองค์ประกอบของเซลล์ประสาทของมนุษย์ ซึ่งมีหน้าที่และการทำงานที่แตกต่างกันดังนี้ โซมาจะทำหน้าที่รับสัญญาณไฟฟ้าจากนิวรอนข้างเคียงผ่านทางเดนไดรต์และทำการประมวลผลข้อมูลด้วยนิวเคลียส จากนั้นจะส่งออกสัญญาณเอาต์พุตผ่านทางแอสซอนไปยังนิวรอนตัวอื่น ๆ ผ่านจุดเชื่อมต่อที่เรียกว่า ซิลแนปส์ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 จุดเชื่อมต่อที่เรียกว่าซิลแนปส์ของเซลล์ประสาทมนุษย์ (เสริม จันทร์ฉาย, 2014)

จากระบบการทำงานของโครงข่ายประสาทมนุษย์นี้นำมาพัฒนาเป็นระบบประสาทเทียมโดยอาศัยหลักการทำงานที่คล้ายคลึงกัน โดยประสาทเทียม 1 หน่วยจะรับข้อมูลอินพุตเข้ามาแล้วคูณด้วยตัวถ่วงน้ำหนัก (W_i) (เมื่อ i คือจำนวนตัวแปรอินพุตซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 1 2 3....n) เมื่อได้ผลคูณของตัวแปรอินพุตแต่ละตัวออกมาแล้วจะทำการหาผลรวมของผลคูณนั้นและบวกด้วยตัวแปรบอกความเอนเอียง (Bias parameter) จากนั้นส่งต่อไปยังฟังก์ชันกระตุ้น (Activate function) และจะได้เอาต์พุตออกมา ซึ่งกระบวนการทำงานของประสาทเทียม 1 หน่วยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4 และเอาต์พุตของระบบสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการได้ดังสมการ (2)



รูปที่ 4 โครงสร้างการทำงานของเซลล์ประสาทเทียม 1 เซลล์ (เสริม จันทรฉาย, 2014)

$$y = f\left(b + \sum_i w_i x_i\right) \quad (2)$$

เมื่อ y คือ เอาต์พุตของประสาทเทียม

b คือ ตัวแปรบอกความเอนเอียง

x_i คือ ตัวแปรอินพุตที่ i เมื่อ $(i=1,2,3,...n)$

w_i คือ ค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับตัวแปรอินพุตที่ i

ส่วนของฟังก์ชันกระตุ้นเป็นฟังก์ชันในการคำนวณเพื่อทำนายค่าของข้อมูลเอาต์พุต (Output) รูปแบบที่นิยมมากที่สุดและมีประโยชน์คือแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชันสมการเส้นตรง (Non-linear function) เนื่องจากปัญหาโดยทั่วไปมีลักษณะเป็นแบบสมการเส้นตรงน้อยมาก ฟังก์ชันกระตุ้นทำหน้าที่ในการตัดสินใจว่านิวรอนควรจะถูกกระตุ้นหรือไม่ โดยดูค่าผลรวมของข้อมูลอินพุต (Input) และค่าถ่วงน้ำหนัก ฟังก์ชันกระตุ้นจะถูกนำไปใช้ทั้งโหนดที่อยู่ในชั้นซ่อน (Hidden node)

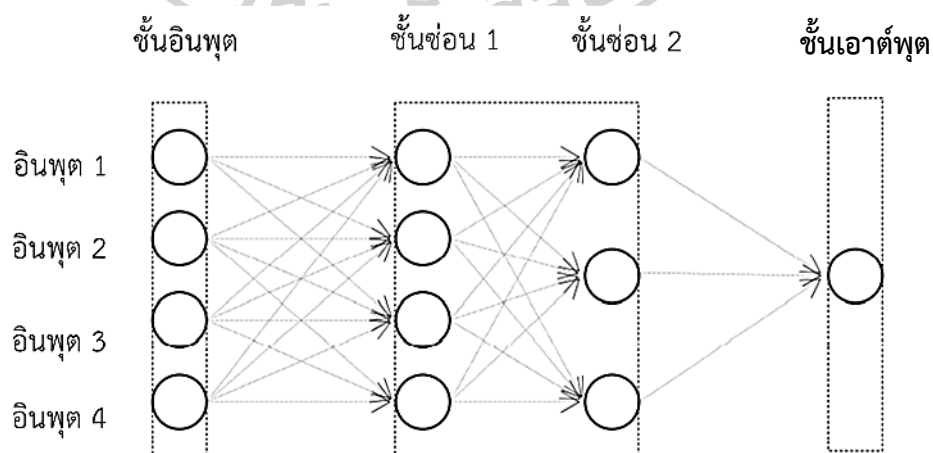
และโหนดในชั้นข้อมูลเอาต์พุต (Output node) ซึ่งทั้งสองโหนดอาจใช้ฟังก์ชันกระตุ้นที่เหมือนหรือต่างกันก็ได้ แต่ส่วนมากจะใช้ฟังก์ชันแบบไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากในโหนดซ่อนจะมีการคำนวณแบบการรวมเชิงเส้น (Linear combination) ถ้าฟังก์ชันกระตุ้นของโหนดซ่อนมีการคำนวณแบบเชิงเส้นอีกจะเป็นการทำงานซ้ำซ้อนกับการคำนวณแบบการรวมเชิงเส้นในชั้นข้อมูลเอาต์พุต ฟังก์ชันกระตุ้นจะมีหลากหลายรูปแบบ ดังต่อไปนี้

1. ฟังก์ชันกระตุ้นแบ่งค่า (Threshold activation function) ฟังก์ชันนี้เรียกอีกชื่อว่า ฟังก์ชัน ไบนารีสเตป (Binary step function) ซึ่งจะพิจารณาค่าข้อมูลอินพุตว่ามากกว่าหรือน้อยกว่าค่าแบ่งที่กำหนดไว้หรือไม่ เพื่อส่งค่าต่อไปยังชั้นถัดไป

2. ฟังก์ชันกระตุ้นซิกมอยด์ (Sigmoid activation function) เป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่มีลักษณะเป็นตัวเอส “S-curve” หรือเรียกว่า “Sigmoid curve” จะมีค่าระหว่าง 0 และ 1 ฟังก์ชันนี้จะใช้เมื่อต้องการทำนายความน่าจะเป็น (Probability) ของข้อมูลเอาต์พุต

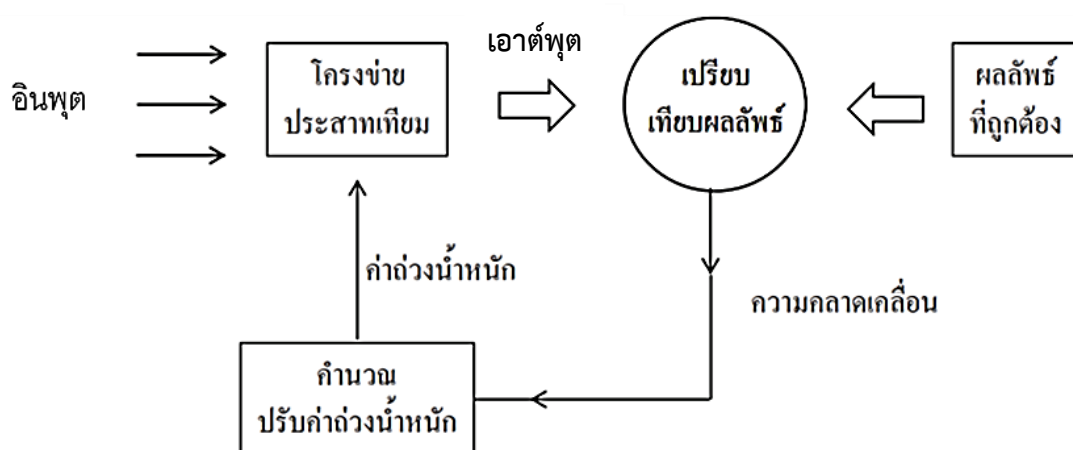
การเลือกใช้ฟังก์ชันกระตุ้นนั้นขึ้นอยู่กับงานหรือเงื่อนไขของเอาต์พุตที่ผู้วิจัยต้องการ โดยงานในด้านรังสีอาทิตยนั้นจะนิยมใช้ฟังก์ชันซิกมอยด์เป็นฟังก์ชันกระตุ้นเนื่องจากเป็นงานทางการทำนายหรือการประมาณค่า

เมื่อนำเซลล์ประสาทเทียมแต่ละตัวมาต่อกันจะได้โครงสร้างของระบบโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 5



รูปที่ 5 โครงสร้างของระบบโครงข่ายประสาทเทียม (เสริม จันทรฉาย, 2014)

ส่วนของการฝึกสอนแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมจะมีการเรียนรู้และปรับตัวต่อสิ่งเร้าต่าง ๆ เช่นเดียวกับสมองมนุษย์ กล่าวคือต้องมีการเรียนรู้ก่อนนำไปใช้งาน การเรียนรู้ดังกล่าวเกิดจากการฝึกสอนด้วยข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่ทราบค่าโดยวิธีการฝึกสอนที่นิยมใช้กันคือ การฝึกสอนแบบย้อนกลับ (Back propagation algorithm) ซึ่งมีขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 รูปแบบการฝึกสอนแบบจำลองแบบย้อนกลับ (เสริม จันทรฉาย, 2014)

การฝึกสอนแบบย้อนกลับสามารถทำได้โดยการป้อนข้อมูลอินพุตเข้าไปในโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อให้ระบบคำนวณเอาต์พุตที่เป็นผลลัพธ์ออกมา จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่คำนวณได้กับผลลัพธ์เป้าหมายซึ่งเป็นค่าที่ต้องการ หลังจากนั้นคำนวณหาความคลาดเคลื่อน (Error) ส่งย้อนกลับเข้าไปในระบบเพื่อปรับค่าถ่วงน้ำหนักแล้วทำการคำนวณผลลัพธ์ใหม่และจะทำซ้ำเช่นนี้จนกระทั่งค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้จึงหยุดทำการฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียมจะจดจำค่าถ่วงน้ำหนักสุดท้ายไปใช้งานเพื่อจำลองแบบโดยใช้ข้อมูลอินพุตชุดใหม่

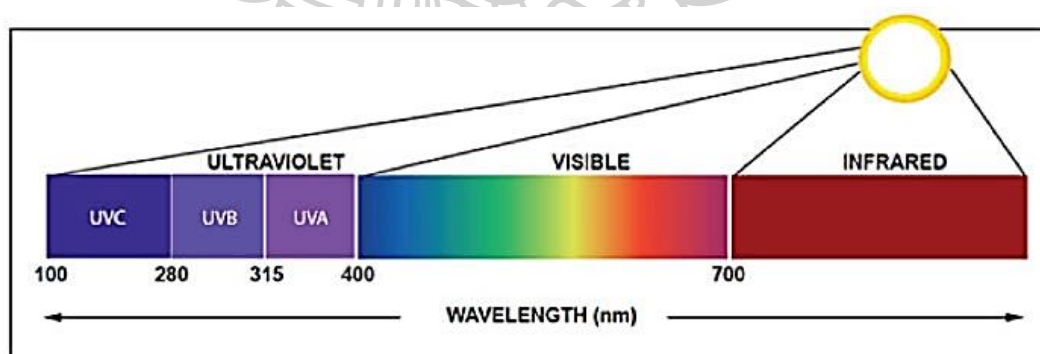
การสร้างโครงข่ายประสาทเทียมสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

- 1) ออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมและเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ตามทีออกแบบไว้ โดยวิธีนี้ผู้ใช้งานจะต้องเข้าใจกลไกการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมเป็นอย่างดีรวมถึงการมีความรู้ทางด้านการเขียนโปรแกรมด้วย

2) โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม เช่น โปรแกรม Weka โดยวิธีนี้ผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาคอมพิวเตอร์ แต่ต้องรู้วิธีการป้อนข้อมูลเข้าไปในโปรแกรมก็จะสามารถใช้งานโครงข่ายประสาทเทียมในการแก้ปัญหาได้

2.1.3 รังสีคลื่นสั้น

รังสีคลื่นสั้น (Shortwave radiation) คือพลังงานจากดวงอาทิตย์ที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 0.25–4.0 ไมโครเมตร (μm) โดยสามารถแบ่งออกเป็นสามช่วงหลัก ได้แก่ รังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet, UV: 0.2–0.4 μm) ซึ่งมีพลังงานสูง แม้จะมีปริมาณน้อยแต่มีผลต่อกระบวนการเคมีในชั้นบรรยากาศ เช่น การสลายโอโซน รังสีที่ตามองเห็นได้ (Visible light: 0.4–0.7 μm) ซึ่งเป็นพลังงานส่วนใหญ่ที่ดวงอาทิตย์ส่งมายังโลก และมีบทบาทสำคัญต่อการสังเคราะห์แสงของพืช และ รังสีอินฟราเรดใกล้ (Near-infrared: 0.7–4.0 μm) ซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าแต่มีอิทธิพลต่อการเพิ่มอุณหภูมิของพื้นผิวโลกผ่านการดูดกลืนพลังงาน ความสำคัญของรังสีคลื่นสั้นมีบทบาทในการควบคุมสมดุลพลังงานของโลก กระตุ้นการเกิดกระบวนการทางฟิสิกส์และชีวภาพ เช่น การระเหย การเกิดลม และการสร้างอาหารของพืช โดยเราเรียกรังสีอาทิตย์ที่เคลื่อนที่จากบรรยากาศลงมายังพื้นโลกว่า รังสีคลื่นสั้นขาลง (Downwelling shortwave radiation: S_d)



รูปที่ 7 ความยาวคลื่นแต่ละช่วงของรังสีอาทิตย์ (รังสีคลื่นสั้น)

ที่มา : <https://www.scimath.org/article-chemistry/item/12349-2021-07-01-05-38-39>

ปริมาณรังสีที่พื้นผิวโลกได้รับจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น มุมตกกระทบของแสง (ซึ่งเปลี่ยนตามเวลาและฤดูกาล) ความหนาแน่นของเมฆหรือฝุ่นในบรรยากาศ และลักษณะของพื้นผิวโลก เช่น

น้ำ พื้นดิน หรือพืชพรรณ ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวหรืออัลบิโด (Albedo) แตกต่าง กัน โดยพื้นผิวสีอ่อนจะสะท้อนแสงได้ดี เช่น หิมะ จะสะท้อนรังสีออกไปมาก ขณะที่พื้นผิวสีเข้มและ ขึ้น เช่น น้ำลึกหรือป่าไม้ จะดูดกลืนพลังงานไว้มากกว่า ส่งผลต่ออุณหภูมิและกระบวนการเปลี่ยนรูป พลังงานในระบบภูมิอากาศโลกโดยตรง ซึ่งผลคูณระหว่างค่ารังสีคลื่นสั้นขาลงกับอัลบิโดนั้นแสดงถึง ปริมาณรังสีคลื่นสั้นขาขึ้น (Upwelling shortwave radiation: S_u) ซึ่งสามารถแสดงได้ตามสมการ

$$S_u = \alpha \cdot S_d \quad (3)$$

เมื่อ S_u คือ รังสีคลื่นสั้นขาขึ้น

S_d คือ รังสีคลื่นสั้นขาลง

α คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิว

ในส่วนของการวัดรังสีคลื่นสั้นนั้นใช้เครื่องมือที่มีชื่อว่า Pyranometer โดยทั่วไป ประกอบด้วย โคมแก้วครึ่งวงกลม ที่ทำหน้าที่ป้องกันฝุ่น ลม และความชื้น และสามารถส่งผ่านรังสี คลื่นสั้นได้ดี ภายในมีเซนเซอร์รับรังสี ทำจากเทอร์โมไพล์ (Thermopile) ที่ทำงานตามหลักการของ ความต่างศักย์ที่เกิดจากความร้อน (Seebeck effect) เมื่อรับรังสี ตัวเครื่องจะวัดความต่างอุณหภูมิ ระหว่างจุดที่รับรังสีกับจุดอ้างอิง ออกมาเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อคำนวณค่ารังสีที่ตกกระทบ โดยเครื่อง Pyranometer นี้ มีหลายรุ่นหลายราคาแยกตามบริษัทผู้ผลิต เช่น Hukseflux SR20-D2 และ Kipp & Zonen SMP10 แต่ทุกรุ่นต้องมีการสอบเทียบประจำปีเพื่อหาค่าการตอบสนองของตัวเครื่อง (Sensitivity) และอาศัยการดูแลอย่างใกล้ชิดเพื่อความแม่นยำของข้อมูลวัด ภาพตัวอย่างแสดง เครื่องวัดรังสีคลื่นสั้น (Pyranometer) สามารถแสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ตัวอย่างเครื่องวัดรังสีคลื่นสั้น

2.1.4 รังสีคลื่นยาว

รังสีคลื่นยาว (Longwave radiation) คือพลังงานรังสีที่แผ่ออกมาจากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่าและต่ำกว่าดวงอาทิตย์ เช่น พื้นผิวโลก เมฆ และชั้นบรรยากาศ โดยมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 4–100 ไมโครเมตร (μm) ซึ่งอยู่ในย่านอินฟราเรดกลางถึงไกล (Mid to far infrared) รังสีชนิดนี้เกิดจากการที่พื้นผิวโลกดูดกลืนพลังงานจากรังสีคลื่นสั้นของดวงอาทิตย์และปล่อยพลังงานส่วนหนึ่งกลับออกมาในรูปของรังสีความร้อนตามกฎของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ (Stefan-Boltzmann Law) ตามสมการ

$$L = \epsilon \sigma T^4 \quad (4)$$

เมื่อ L คือ รังสีคลื่นยาวที่ปลดปล่อยออกมา

ϵ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีของวัตถุเทา

σ คือ ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ (มีค่าประมาณ $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$)

T คือ อุณหภูมิของวัตถุนั้น ๆ ในหน่วยเคลวิน

โดยพลังงานที่ปล่อยจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของวัตถุนั้น ๆ รังสีคลื่นยาวมีบทบาทสำคัญในการควบคุมสมดุลพลังงานของโลกและอุณหภูมิของบรรยากาศ โดยเฉพาะปรากฏการณ์การเรือนกระจก (Greenhouse effect) ซึ่งเกิดจากก๊าซในบรรยากาศ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และมีเทน

ดูดกลืนรังสีคลื่นยาวที่แผ่จากพื้นผิวโลก (Upwelling longwave radiation: L_u) แล้วปล่อยกลับลง
มาอีกครั้งเรียกรังสีคลื่นยาวส่วนนี้ว่ารังสีคลื่นยาวขาลง (Downwelling longwave radiation: L_d)
ทำให้โลกอบอุ่นขึ้นกว่าที่ควรจะเป็นตามสมดุลพลังงานธรรมชาติ ปริมาณรังสีคลื่นยาวที่ปล่อยออกมา
จากพื้นผิวและบรรยากาศดูดกลืนหรือแผ่กลับลงมายังผิวโลกนั้น ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความชื้น และ
คุณสมบัติการแผ่รังสีของพื้นผิวและชั้นบรรยากาศ ซึ่งทั้งหมดนี้มีผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลง
ภูมิอากาศและแบบจำลองพลังงานของโลก

เครื่องมือวัดรังสีคลื่นยาวมีชื่อว่า Pyradiometer โดยจะวัดเฉพาะรังสีในช่วงความยาวคลื่น
ประมาณ 4 – 100 ไมโครเมตร (μm) ซึ่งเป็นช่วงรังสีอินฟราเรดที่แผ่จากเมฆ ไอน้ำ และก๊าซเรือน
กระจกในชั้นบรรยากาศและรังสีที่แผ่ออกมาจากพื้นผิวโลก ตัวเครื่องประกอบด้วยโดมินฟราเรด ที่
ทำจากวัสดุโปร่งแสงเฉพาะสำหรับคลื่นยาว (เช่น ซิลิกอนหรือเยอรมาเนียม) เซนเซอร์เทอร์โมไพล์ที่
ตรวจจับความต่างอุณหภูมิจากรังสีอินฟราเรด และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิของตัวเครื่อง (Thermistor
หรือ PT100) เพื่อใช้ในการคำนวณค่ารังสี โดยในท้องตลาดก็มีการจัดจำหน่ายเครื่องมือชนิดนี้ในราคา
ที่แตกต่างกันออกไปตามแต่บริษัทผู้ผลิต ซึ่งเครื่องมือวัดรังสีคลื่นยาวสามารถแสดงตัวอย่างได้ตามรูปที่ 9



รูปที่ 9 ตัวอย่างเครื่องมือวัดรังสีคลื่นยาว

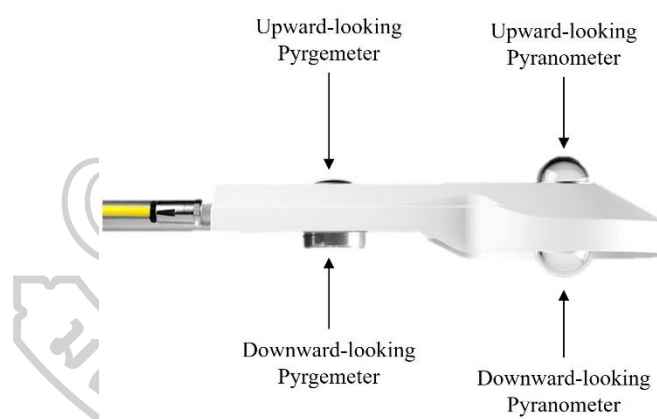
2.1.5 รังสีสุทธิ

รังสีสุทธิ (Net radiation: R_n) คือ ผลต่างระหว่างรังสีขาลงและรังสีขาขึ้นโดยพิจารณา
รวมทั้งรังสีคลื่นสั้นและรังสีคลื่นยาวโดยรังสีคลื่นสั้นมีที่มาจากรังสีอาทิตย์มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง
0.25-4.0 ไมโครเมตร และรังสีคลื่นยาวที่มาจากการแผ่รังสีของพื้นผิวโลกและบรรยากาศตามกฎการ

แผ่รังสีของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ โดยจะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 4-100 ไมโครเมตร ซึ่งสมการมาตรฐานในการคำนวณรังสีสุทธิสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$R_n = (S_d - S_u) + (L_d - L_u) \quad (5)$$

เมื่อ R_n คือ รังสีสุทธิ S_d คือ รังสีคลื่นสั้นขาลง S_u คือ รังสีคลื่นสั้นขาขึ้น L_d คือ รังสีคลื่นยาวขาลง และ L_u คือ รังสีคลื่นยาวขาขึ้น สังเกตจากสมการ (5) จะพบว่ารังสีสุทธิมีทั้งหมด 4 องค์ประกอบดังที่กล่าวไปข้างต้น ดังนั้นเครื่องมือที่ใช้วัดรังสีสุทธินี้จะมีทั้งหมด 4 เซนเซอร์ มีราคาและความเหมาะสมทางด้านการใช้งานที่แตกต่างกัน เช่น model: CNR4 จากบริษัทผู้ผลิต Kipp & Zonen ในประเทศเนเธอร์แลนด์ เป็นตัวเลือกที่เหมาะสม โดยลักษณะของเครื่องมือแสดงไว้ในรูปที่ 10



Kipp & Zonen model CNR4

รูปที่ 10 ลักษณะของเครื่องวัดรังสีสุทธิซึ่งประกอบไปด้วย 4 เซนเซอร์

เครื่องมือวัดเหล่านี้ในประเทศไทยไม่ได้มีการติดตั้งหรือทำการวัดภาคสนามกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากปัญหาทางด้านราคาที่สูงโดยมีราคาอยู่ระหว่าง 200,000-250,000 บาท และต้องทำการสอบเทียบและดูแลรักษาอย่างสม่ำเสมอเพื่อคุณภาพของข้อมูลวัด ด้วยเหตุนี้ข้อมูลวัดรังสีสุทธิจึงถือว่าเป็นข้อมูลที่ขาดแคลน ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ประมาณ

ค่ารังสีสุทธิในพื้นที่ที่ไม่มีเครื่องมือวัด โดยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองสำหรับประมาณค่ารังสีสุทธิอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสามารถศึกษาต่อได้ในหัวข้อถัดไป

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษารังสีสุทธิมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการทำความเข้าใจสมดุลพลังงานของโลก การระเหยของน้ำ ความชื้นในดิน และกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช ซึ่งล้วนมีผลต่อการวางแผนด้านการเกษตรและการจัดการทรัพยากรน้ำ อย่างไรก็ตาม ในหลายประเทศรวมถึงประเทศไทย การวัดค่ารังสีสุทธิในพื้นที่จริงยังประสบปัญหาขาดแคลนสถานีวัดและอุปกรณ์เฉพาะทาง ทำให้ไม่สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่และเชิงเวลาของรังสีสุทธิได้อย่างครอบคลุม ด้วยเหตุนี้ นักวิจัยจึงให้ความสนใจในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อประมาณค่ารังสีสุทธิในพื้นที่ที่ไม่มีข้อมูลวัดโดยตรง โดยแบบจำลองเหล่านี้มีความหลากหลาย ทั้งในรูปแบบของสมการเอมไพริคัลที่ใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาเป็นตัวแปร และแบบจำลองที่ประยุกต์ใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ เช่น โครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนได้ดี นอกจากนี้ การใช้ข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียมยังช่วยเพิ่มขีดความสามารถของแบบจำลองให้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องในเชิงพื้นที่และเวลา ในหัวข้อนี้ ผู้วิจัยได้นำเสนอผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประมาณค่ารังสีสุทธิ โดยแบ่งตามประเภทของแบบจำลองและแนวทางที่ใช้ เพื่อเป็นฐานความรู้ในการพัฒนาแบบจำลองในงานวิจัยนี้ต่อไป

เริ่มจากปี ค.ศ. 1967 Davies (1967) ได้ศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างรังสีสุทธิ (net radiation, R_n) ในช่วงกลางวัน กับรังสีอาทิตย์ (Solar radiation, Q) โดยรวบรวมข้อมูลจากสถานีตรวจวัด 3 แห่งในแอฟริกาตะวันตก และอีก 14 แห่งทั่วโลก ผลการวิเคราะห์พบว่าสามารถประมาณค่า R_n ได้จาก Q ผ่านสมการ $R_n = 0.612Q - 28$ สำหรับแอฟริกาตะวันตก และ $R_n = 0.617Q - 24$ สำหรับสถานีทั่วโลก โดยค่ารังสีทั้งหมดแสดงในหน่วย Gram calories ต่อวัน พื้นที่ศึกษาเหล่านี้มี Albedo อยู่ในช่วง 0.20–0.30 ซึ่งเป็นค่าการสะท้อนแสงที่พบได้ทั่วไปในภูมิประเทศหลากหลายชนิด จากการวิเคราะห์พบว่าโดยเฉลี่ย รังสีสุทธิคิดเป็นประมาณ 55% ของรังสีอาทิตย์ แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่ค่อนข้างคงที่ระหว่างพลังงานที่เข้าสู่พื้นผิวโลกกับพลังงานที่สะสมอยู่หลังจากหักลบรังสีสะท้อนกลับและรังสีจากพื้นผิวแล้ว นอกจากนี้ ยังได้ประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความร้อน (Heating coefficient, b) ซึ่งอยู่ในช่วง 0.14 ถึง 0.30 ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการจำลองพลังงานและการถ่ายเทความ

ร้อนในระบบภูมิอากาศ อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษานี้ไม่สอดคล้องกับผลลัพธ์บางส่วนจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการทบทวนวิธีการหรือเงื่อนไขที่ใช้ในแต่ละพื้นที่ ผลในครั้งนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินค่าการระเหยของน้ำ และศักยภาพการคายระเหย (Potential evapotranspiration) ได้ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่ขาดข้อมูลรังสีสุทธิโดยตรง ทั้งนี้ สมการที่ง่ายและข้อมูลที่ใช้ในการพัฒนาความสัมพันธ์ดังกล่าว ทำให้สามารถนำไปใช้ในแบบจำลองหรือระบบเตือนภัยที่ต้องการความรวดเร็วในการคำนวณได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Linacre (1968) มีการพัฒนาแบบจำลองเพื่อประมาณค่ารังสีสุทธิจากสมมติฐานต่าง ๆ ซึ่งให้ระดับความแม่นยำที่ลดลงแต่มีความง่ายในการใช้งานเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ยังพบว่าเมฆมีบทบาทสองด้านต่อรังสีสุทธิ กล่าวคือเมฆจะทำให้ค่ารังสีสุทธิลดลง เมื่อเมฆมีค่ามากกว่า $0.02 \text{ cal/cm}^2/\text{min}$ แต่ค่ารังสีสุทธิจะเพิ่มขึ้นเมื่อต่ำกว่าค่าดังกล่าว

Linacre (1969) เปรียบเทียบแบบจำลองใหม่ในการประมาณรังสีสุทธิตายวันหรือรายสัปดาห์ที่ตกกระทบไร่อ้อยในแอฟริกาใต้กับสมการของ Penman ซึ่งต้องการข้อมูลมากกว่า พบว่าแบบจำลองดังกล่าวให้ผลใกล้เคียงกับสมการของ Penman ทั้งในไร่อ้อยและสนามหญ้าที่ได้รับน้ำอย่างดี แม้แบบจำลองใหม่จะมีแนวโน้มประมาณค่ารังสีน้อยกว่าความเป็นจริงเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากค่า Albedo ที่ต่ำกว่า 0.25 จากนั้นมีการเสนอให้ปรับแบบจำลองใหม่ให้เรียบง่ายขึ้นโดยการใช้ค่าคงที่ Angstrom อย่างไรก็ตาม สมการที่ใช้กับพื้นดินมักประเมินรังสีสุทธิเกินจริง ซึ่งอาจเกิดจากอุณหภูมิผิวดินสูงกว่าอุณหภูมิอากาศ นอกจากนี้ ยังพบว่าความผิดพลาดส่วนหนึ่งอาจมาจากการเปลี่ยนแปลงของ Albedo และอุณหภูมิหลังฝนตก ในบางกรณีสามารถใช้สมการที่อ้างอิงกับรังสีรวมและอุณหภูมิ ซึ่งสามารถประมาณค่าเหล่านี้ได้จากข้อมูลอัลบิโด ละติจูด ระดับความสูง และระยะทางจากชายฝั่งด้านเหนือลม

ถัดมา Hu et al. (2012) มีการศึกษาลักษณะของรังสีสุทธิในช่วงคลื่น $0.3\text{--}10 \mu\text{m}$ ที่เมืองลาซาและไห่เป่ย์ ซึ่งตั้งอยู่บนที่ราบสูงทิเบต โดยใช้ข้อมูลการวัดรังสีภาคพื้นดินในระยะยาว พบว่ารังสีสุทธิตายวันเฉลี่ยต่อเดือนมีค่าสูงสุดในช่วงเดือนพฤษภาคมและลดลงต่ำสุดในฤดูหนาว ซึ่งมีแนวโน้มสอดคล้องกับทางเดินดวงอาทิตย์ ค่ารังสีสุทธิเฉลี่ยรายปีเท่ากับ $0.92 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ที่ลาซา และ $0.66 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ที่ไห่เป่ย์ ผลการวิเคราะห์พบว่ารังสีสุทธิมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับรังสีอาทิตย์คลื่นกว้าง

โดยแบบจำลองเชิงเส้นที่พัฒนาเพื่อประมาณค่ารังสีสุทธิจากรังสีคลื่นกว้างให้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าจริงที่วัดได้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เพียง 2.8% และ 3.8% ที่ลาซาและไห่เป่ย์ ตามลำดับ แบบจำลองนี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับพื้นที่อื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ยังพบว่าเงื่อนไขของเมฆซึ่งพิจารณาจากค่า Clearness index ส่งผลต่อความแม่นยำของการประมาณค่ารังสีสุทธิ โดยสถานะที่มีเมฆมากทำให้ผลแม่นยำยิ่งขึ้น สำหรับปัจจัยอัลบีโดของพื้นผิว แม้จะมีผลเพียงเล็กน้อยในการปรับปรุงความแม่นยำของแบบจำลอง แต่โดยทั่วไปการใช้รังสีคลื่นกว้างเพียงตัวแปรเดียวก็สามารถสร้างแบบจำลองที่นำไปใช้ได้อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในกรณีที่ไม่มีข้อมูลอัลบีโด

นอกจากแบบจำลองที่ใช้รังสีอาทิตย์เป็นตัวแปรอินพุตแล้วยังมีการพัฒนาโดยใช้พารามิเตอร์ทางอุตุนิยมวิทยาเข้ามาร่วมด้วย เช่น Jiang et al. (2015) พัฒนาแบบจำลองสำหรับประมาณรังสีสุทธิ ในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งมีความสำคัญต่อการวิจัยและการประยุกต์ใช้ทางวิทยาศาสตร์หลายด้าน เนื่องจากการประมาณค่ารังสีสุทธิจากดาวเทียมทำได้ยาก โดยเฉพาะจากผลกระทบของเมฆต่อรังสีคลื่นยาว นักวิจัยจึงเสนอแนวทางใช้แบบจำลองเอมไพริคัลที่อาศัยข้อมูลรังสีคลื่นสั้นร่วมกับข้อมูลอื่น ๆ โดยได้พัฒนาแบบจำลองใหม่ และประเมินประสิทธิภาพเทียบกับแบบจำลองที่มีอยู่ 7 แบบ โดยใช้ข้อมูลจากสถานีวัด 326 แห่งทั่วโลก ในช่วงปี ค.ศ. 1991–2010 ข้อมูลพารามิเตอร์ทางอุตุนิยมวิทยานำมาจาก MERRA และข้อมูลจากการรับรู้ระยะไกล การประมาณค่าดำเนินการทั้งแบบ Global mode (ใช้ข้อมูลทั้งหมด) และแบบ Conditional mode (แบ่งข้อมูลตามค่าอัลบีโด และดัชนีพรรณพืช) นอกจากนี้ยังวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อความแม่นยำของการประมาณค่า เช่น อัลบีโด อุณหภูมิอากาศ และ ดัชนีพรรณพืช ผลการเปรียบเทียบพบว่าแบบจำลองใหม่ให้ค่า RMSE ประมาณ 40 W/m^2 ใน Global mode และระหว่าง $18.2\text{--}54.0 \text{ W/m}^2$ ใน Conditional mode โดยสรุปแล้ว แบบจำลองใหม่มีความแม่นยำสูงกว่าแบบจำลองเชิงเส้นที่มีอยู่ และพบว่าการใช้รังสีคลื่นสั้นสุทธิมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้รังสีคลื่นสั้นขาเข้าเพียงอย่างเดียวในเกือบทุกแบบจำลอง

Peng et al. (2021) ศึกษาการประมาณค่ารังสีสุทธิบริเวณผิวน้ำมหาสมุทร ซึ่งมีความสำคัญต่อการทำความเข้าใจสมดุลความร้อนของโลกและปฏิสัมพันธ์ระหว่างอากาศกับทะเล โดยใช้ข้อมูลรังสีรวมและข้อมูลอุตุนิยมวิทยาจากทุ่นลอย 66 แห่งทั่วโลก พบว่าปัจจัยที่ควบคุมรังสีสุทธิแตกต่างกันตามสัดส่วนระยะเวลากลางวัน หากระยะเวลากลางวันมากกว่า 40% รังสีสุทธิมักถูกควบคุมโดยรังสีคลื่นสั้นขาลง แต่หากน้อยกว่าหรือเท่ากับ 40% จะถูกควบคุมโดยรังสีคลื่นยาวขาลง จากผลนี้จึง

พัฒนาแบบจำลองเอมไพริคัลสองชุด โดยใช้รังสีคลื่นสั้นหรือรังสีคลื่นยาวเป็นตัวแปรหลักตามกรณีที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น แบบจำลองทั้งสองผ่านการตรวจสอบกับข้อมูลวัดจริงและให้ผลความแม่นยำสูงโดยมีค่าความสัมพันธ์กับข้อมูลวัดสูงและมีความคลาดเคลื่อนน้อย อย่างไรก็ตาม แบบจำลองยังมีข้อจำกัดในพื้นที่ชายฝั่งและละติจูดสูง รวมถึงในสภาพที่ระยะเวลากลางวันสั้นมาก แบบจำลองง่ายและให้ความแม่นยำสูง จึงมีศักยภาพในการใช้งานจริงอย่างกว้างขวาง

นอกจากแบบจำลองที่มีการพัฒนาแล้วยังมีการใช้ปัญญาประดิษฐ์ ได้แก่ แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม เข้ามาประมาณค่ารังสีสุทธิ เช่น Ferreira et al. (2011) นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network model: ANN model) เพื่อประมาณค่ารังสีสุทธิที่ผิวพื้น โดยใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา เช่น ความเร็วและทิศทางลม อุณหภูมิพื้นดินและอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ ความชื้นดิน จากนั้นเปรียบเทียบกับแบบจำลองเชิงเส้น ซึ่งใช้รังสีคลื่นสั้นขาลงเป็นตัวแปรอินพุตและตรวจสอบความแม่นยำของทั้งสองแบบจำลองกับค่ารังสีสุทธิที่วัดได้จริง พบว่าแบบจำลอง ANN ให้ค่าความคลาดเคลื่อน (RMSE) อยู่ในช่วง 6.54 ถึง 48.75 W/m² และมีค่าสหสัมพันธ์ (R²) ระหว่าง 0.92 ถึง 0.98 ส่วนแบบจำลองเชิงเส้นมีค่า RMSE อยู่ระหว่าง 34.10 ถึง 39.48 W/m² และ R² ระหว่าง 0.96 ถึง 0.97 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง ANN สามารถให้ผลลัพธ์ที่เทียบเท่าหรือดีกว่าแบบจำลองเชิงเส้น โดยเฉพาะในบางกรณี ผู้วิจัยยังระบุว่าการใช้ ANN เพื่อประมาณค่ารังสีสุทธียังไม่เคยถูกนำเสนอมาก่อน และจากผลการทดลอง พบว่าแบบจำลอง ANN เป็นเครื่องมือที่มีศักยภาพสูงในการพยากรณ์รังสีสุทธิ โดยใช้ข้อมูลจากสถานีอุตุนิยมวิทยาที่สามารถหาได้ง่าย

Ojo et al. (2021) ใช้ข้อมูลรังสีสุทธิและอุณหภูมิอากาศจากสถานีอุตุนิยมวิทยาไนจีเรียในช่วงปี ค.ศ. 1983–2013 เพื่อพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multilayer Perceptron, MLP) โดยใช้สามวิธี ได้แก่ Gradient Descent, Conjugate Gradient และ BFGS เพื่อทำนายค่ารังสีสุทธิจากชุดข้อมูลอุณหภูมิแทนการใช้วิธีเชิงสถิติแบบเดิม การศึกษาใช้ข้อมูลจากสถานีอุตุนิยมวิทยา 16 แห่งใน 4 ภูมิภาคหลักของไนจีเรีย พบว่าอุณหภูมิต่ำสุดมีผลต่อค่ารังสีสุทธิมากกว่าอุณหภูมิสูงสุด และส่งผลให้ภูมิภาคที่มีอากาศร้อนมีรังสีสุทธิมากกว่าภูมิภาคที่มีอากาศแห้ง การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองด้วย Index of agreement (d_r) พบว่าแบบจำลอง MLP-BFGS ให้ผลดีที่สุด โดยมีค่า d_r สูงสุดถึง 0.91 ในภูมิภาคที่มีอากาศกึ่งแห้ง และมีค่าความ

คลาดเคลื่อนต่ำสุด (RMSE) อยู่ในช่วง 7.92–12.91 W/m² ในทุกสภาพอากาศ สรุปได้ว่าแบบจำลอง MLP ร่วมกับวิธีการ BFGS สามารถพยากรณ์ค่ารังสีสุทธิในไนจีเรียได้แม่นยำกว่าแบบจำลองทางสถิติ

ข้อจำกัดของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมคือผู้วิจัยจะต้องศึกษาและแปรค่าจำนวนชั้นซ่อนและจำนวนโหนดที่ดีที่สุดในแต่ละชั้นซ่อนออกมาก่อนจะทำการฝึกสอน และอีกข้อจำกัดหนึ่งที่สำคัญสำหรับการใช้งานแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมนี้คือจำนวนข้อมูลที่นำมาใช้ในการสร้างและทดสอบแบบจำลองต้องมีมากในระดับหนึ่งเพื่อให้แบบจำลองนั้นสามารถหารูปแบบความสัมพันธ์ได้ โดยปัญหาการขาดแคลนข้อมูลนี้นักวิจัยจึงสนใจใช้ข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียม โดยข้อดีของภาพถ่ายดาวเทียมคือมีข้อมูลที่ต่อเนื่องและครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้าง บางแหล่งข้อมูลเปิดให้สามารถดาวน์โหลดข้อมูลได้ฟรี เช่น ในปี ค.ศ. 2010 มีงานวิจัยของ Bisht and Bras (2010) นำเสนอวิธีการประมาณค่ารังสีสุทธิทั้งแบบเรียลไทม์และรายวันภายใต้ทุกสภาพอากาศ โดยใช้ข้อมูลจาก MODIS บนดาวเทียม Terra โดยใช้วิธีของ Bisht et al. (2005) สำหรับช่วงท้องฟ้าปราศจากเมฆ และขยายวิธีนี้สำหรับช่วงที่มีเมฆ โดยใช้ข้อมูลจากผลิตภัณฑ์ MOD06_L2 เช่น อุณหภูมิยอดเมฆ สัดส่วนเมฆ ค่าการแผ่รังสีของเมฆ ความหนาของเมฆ และอุณหภูมิพื้นดิน วิธีนี้ถูกทดสอบในพื้นที่ Southern Great Plains (SGP) ตลอดปี ค.ศ. 2006 ซึ่งพบว่าในช่วงเวลาที่ดาวเทียมเคลื่อนที่ผ่านมีเพียง 24% ของเวลากลางวันและ 9% ของเวลากลางคืนที่มีเมฆไม่เกิน 75% ของพื้นที่ที่ทำการศึกษา ผลการเปรียบเทียบกับการวัดภาคพื้นดินแสดงให้เห็นว่า ค่ารังสีสุทธิที่ประมาณได้มีค่าแตกต่างจากการวัดโดยมีค่า RMSE เท่ากับ 37 W/m² (เรียลไทม์) และ 38 W/m² (ค่าเฉลี่ยรายวัน) จุดเด่นของวิธีนี้คือสามารถใช้งานได้โดยอาศัยเพียงข้อมูลจากดาวเทียม โดยไม่ต้องใช้ข้อมูลจากสถานีวัดภาคพื้นดิน จึงมีศักยภาพในการประเมินสมดุลพลังงานของพื้นผิวในระดับโลกได้

ในปี ค.ศ. 2011 Bisht and Bras (2011) ใช้วิธีของ Bisht and Bras (2010) เพื่อประมาณค่ารังสีที่พื้นผิวโลก (Surface Radiation Budget: SRB) และองค์ประกอบต่าง ๆ โดยอาศัยเฉพาะข้อมูลจากดาวเทียมภายใต้ทุกสภาพอากาศ (ทั้งท้องฟ้าโปร่งและมีเมฆ) โดยไม่ต้องใช้ข้อมูลภาคพื้นเฉพาะพื้นที่ ผลการศึกษาใช้ข้อมูลจากดาวเทียม Aqua และ Terra ในปี ค.ศ. 2006 และครอบคลุม 7 สถานีของเครือข่าย SRB และ 21 สถานีของ Atmospheric Radiation Measurement (ARM) ในบริเวณ Southern Great Plains ของสหรัฐอเมริกา งานวิจัยนี้ประเมินค่ารังสีขาขึ้นและขาลง ทั้งคลื่นสั้นและคลื่นยาว รวมถึงค่ารังสีสุทธิที่ช่วงเวลาใด ๆ และรายวัน โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลวัด

ภาคพื้นดิน พบว่าค่า RMSE ของรังสีสุทธิเฉลี่ยรายวันอยู่ที่ 52.42 W/m^2 และรังสีคลื่นสั้นสุทธิเฉลี่ยรายวันอยู่ที่ 52.21 W/m^2 แม้จะสามารถสร้างแผนที่ SRB รายวันและรายเดือนได้ทั่วสหรัฐฯ แต่การใช้ข้อมูลจากดาวเทียมที่โคจรแบบขั้วโลก มีข้อจำกัดในการประเมินรอบวันของรังสีสุทธิ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการประเมินรังสีสุทธิจากข้อมูลสำรวจระยะไกลเพียงเท่านั้น

ปี ค.ศ. 2014 มีงานวิจัยของ Hou et al. (2014) ได้นำเสนอวิธีการประเมินรังสีสุทธิเฉลี่ยรายวัน (Daily Average Net Radiation: DANR) ภายใต้สภาพท้องฟ้าโปร่ง โดยใช้ข้อมูลจากดาวเทียม MODIS เพียงอย่างเดียว เพื่อให้สามารถคำนวณ DANR ได้ในพื้นที่ขนาดใหญ่และหลากหลายทางภูมิประเทศโดยไม่ต้องพึ่งพาข้อมูลภาคพื้นดิน วิธีการนี้ใช้แบบจำลองไซน์ซอยดอล (Sinusoidal model) ที่ปรับปรุงแล้ว เพื่อประมาณค่ารังสีคลื่นสั้นขาออกจากข้อมูลดาวเทียมในช่วงเวลาหนึ่ง และประมาณค่ารังสีคลื่นสั้นขาขึ้นจากค่าอัลบิโดของพื้นผิวที่ได้จาก MODIS ส่วนรังสีคลื่นยาวขาออกจากข้อมูลอุณหภูมิอากาศ 4 ช่วงเวลาจาก MOD07_L2 และ MYD07_L2 ขณะที่รังสีคลื่นยาวขาขึ้นได้จากอุณหภูมิผิวดินและสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีจาก MOD11_L2 เมื่อนำค่ารังสีสุทธิไปเปรียบเทียบกับข้อมูลวัดจริงจากพื้นที่เกษตรกรรมและทุ่งหญ้าในเมืองงอวีของประเทศจีน พบว่า RMSE ของรังสีสุทธิเฉลี่ยรายวันอยู่ที่ 37 และ 40 W/m^2 ตามลำดับซึ่งอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้เมื่อเทียบกับวิธีการอื่นจากดาวเทียม จึงสรุปได้ว่าวิธีนี้สามารถใช้ศึกษาสมดุลพลังงานรังสีและการคายระเหยในระดับภูมิภาคได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ปี ค.ศ. 2015 Wang et al. (2015) ได้ปรับปรุงวิธีการประมาณค่ารังสีสุทธิคลื่นสั้นที่พื้นผิว (Surface Shortwave Net Radiation: SSNR) รายวัน โดยใช้ข้อมูลจาก MODIS บนดาวเทียม Terra และ Aqua และเปรียบเทียบกับข้อมูลวัดจริงจาก 7 สถานีในเครือข่าย Surface Radiation Budget Network รวมถึงเปรียบเทียบกับ SSNR ที่มีอยู่ ได้แก่ CERES, NARR และ ERA-Interim ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ค่าที่ได้จาก MODIS ซึ่งถูกปรับขนาดความละเอียดพื้นที่ให้เหมาะสมกับข้อมูลภาคพื้น มีความแม่นยำสูงสุด โดยมีค่า RMSE เท่ากับ 23.1 W/m^2 และมีค่า bias เท่ากับ -6.7 W/m^2 เมื่อเทียบกับสถานีวัดกับฐานข้อมูล CERES มี RMSE ใกล้เคียงกัน (24.2 W/m^2) แต่มี bias เป็นบวก ส่วนข้อมูลจาก NARR และ ERA-Interim มีแนวโน้มประเมินค่าสูงเกินจริงและมีความไม่แน่นอนสูงกว่า การวิเคราะห์รายเดือนให้ค่าที่แม่นยำกว่ารายวัน และสามารถประเมินค่า SSNR

รายเดือนได้อย่างแม่นยำที่สุด ($RMSE = 11.6 \text{ W/m}^2$) ซึ่งดีกว่าข้อมูลจาก CERES ประมาณ 2.4 W/m^2

เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องของความละเอียดของภาพถ่ายดาวเทียม แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นส่วนใหญ่จะมีค่าความคลาดเคลื่อนที่สูงกว่าแบบจำลองที่สร้างจากข้อมูลวัดภาคพื้นดิน แต่ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะทำการแบ่งงานวิจัยออกเป็นสองส่วนหลัก ส่วนที่ 1 คือประมาณค่ารังสีสุทธิโดยใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม เลือกข้อมูลอินพุตเป็นข้อมูลอุตุนิยมวิทยาประกอบไปด้วย อุณหภูมิอากาศสูงสุด-ต่ำสุด ค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และค่ารังสีอาทิตย์ โดยใช้ข้อมูลระหว่างปี ค.ศ. 2017-2023 ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกรายงานไว้ในหัวข้อ ผลและการวิเคราะห์ผล ส่วนที่ 2 สร้างแบบจำลองโดยอาศัยแบบจำลองเอมไพริคัลรวมเข้ากับข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมและฐานข้อมูลเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่บริเวณกว้าง มาทำการประมาณค่ารังสีสุทธิในพื้นที่ประเทศไทยเพื่อดูการกระจายตัวเชิงพื้นที่ของรังสีสุทธิในประเทศไทย รวมไปถึงการแปรค่าตามช่วงเวลาหรือฤดูกาลของรังสีสุทธิในรอบปี โดยผู้วิจัยใช้ข้อมูลทางบรรยากาศเป็นข้อมูลอินพุตเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อในแง่ของการบริหารจัดการน้ำในอนาคต



บทที่ 3

ข้อมูลและวิธีการดำเนินงานวิจัย

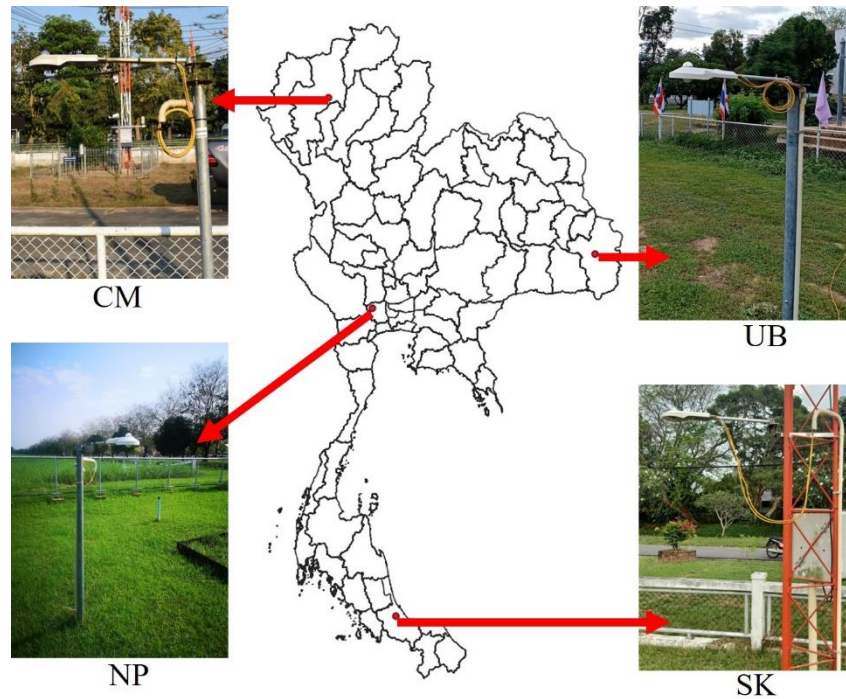
จากบทที่ 2 ที่ได้นำเสนอแนวคิด ทฤษฎี และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าการประมาณค่ารังสีสุทธีในพื้นที่ที่ไม่มีการวัดโดยตรงนั้นสามารถดำเนินการได้ผ่านการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม โดยเฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับข้อมูลอุตุนิยมวิทยาและข้อมูลจากดาวเทียม ซึ่งมีความครอบคลุมเชิงพื้นที่และมีความต่อเนื่องเชิงเวลา เพื่อตอบโจทย์วัตถุประสงค์ของการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยจึงได้วางแผนดำเนินงานโดยแบ่งออกเป็นสองแนวทางหลัก ได้แก่ การพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมจากข้อมูลภาคพื้นดิน และการสร้างแบบจำลองเอมไพริคัลร่วมกับข้อมูลจาก MODIS และฐานข้อมูล NCEP/NCAR ในกระบวนการนี้ ข้อมูลที่นำมาใช้ถือเป็นองค์ประกอบพื้นฐานและสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากความถูกต้อง ครบถ้วน และความสอดคล้องของข้อมูลมีผลต่อประสิทธิภาพของแบบจำลองอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น ในหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงรายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ ประเภทข้อมูล แหล่งที่มา ช่วงเวลาที่ครอบคลุม และวิธีการ ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์และสร้างแบบจำลองในขั้นตอนต่อไป

3.1 ข้อมูล

การพัฒนาแบบจำลองเพื่อประมาณค่ารังสีสุทธีในงานวิจัยนี้จำเป็นต้องใช้ข้อมูลที่มีความหลากหลายและครอบคลุมทั้งในเชิงพื้นที่และเวลา โดยแบ่งออกเป็นข้อมูลภาคพื้นดินและข้อมูลจากดาวเทียม ซึ่งแต่ละประเภทมีคุณลักษณะและจุดเด่นที่ต่างกัน ข้อมูลภาคพื้นดินให้ความแม่นยำสูงแต่ครอบคลุมพื้นที่จำกัด ขณะที่ข้อมูลจากดาวเทียมสามารถเข้าถึงพื้นที่กว้างและต่อเนื่องในระยะยาว เพื่อให้การดำเนินการวิจัยเป็นไปตามวัตถุประสงค์อย่างครบถ้วน ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลจากหลายแหล่ง โดยคัดเลือกเฉพาะข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือ ครอบคลุมช่วงเวลาตั้งแต่ปี ค.ศ. 2017 ถึง ค.ศ. 2024 และอยู่ในรูปแบบที่สามารถนำไปประมวลผลเชิงพื้นที่และเวลาได้ รายละเอียดของข้อมูลแต่ละประเภทมีดังนี้

3.1.1 ข้อมูลรังสีสุทธิที่ได้จากการวัด

งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลรังสีสุทธิที่ได้จากการวัดในการสร้างและทดสอบแบบจำลองไม่ว่าจะเป็นแบบจำลอง ANN หรือแบบจำลองเอมไพริคัลก็ตาม โดยเครื่องวัดรังสีสุทธิคือ เน็ตเรดิโอมิเตอร์ (Net radiometer) รุ่น CNR4 จากบริษัท Kipp & Zonen ที่ติดตั้งโดยห้องปฏิบัติการฟิสิกส์บรรยากาศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม ซึ่งมีการติดตั้งไว้ทั้งหมด 4 สถานีตามภูมิภาคหลักของประเทศไทยประกอบด้วย ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่ (18.78°N, 98.97°E; CM) สถานีอุตุนิยมวิทยาอุบลราชธานี อำเภอสว่างวีรวงศ์ จังหวัดอุบลราชธานี (15.24°N, 105.02°E; UB) สถานีอุตุนิยมวิทยานครปฐม อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม (14.01°N, 99.97°E; NP) และศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา (7.18°N, 100.60°E; SK) โดยลักษณะเครื่องมือวัดรังสีสุทธิและตำแหน่งที่ติดตั้งแสดงไว้ในรูปที่ 11 โดยนอกจากเครื่องมือวัดแล้วยังมีระบบบันทึกข้อมูลอัตโนมัติด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล YOKOGAWA Datalogger รุ่น FX1012 โดยทำการบันทึกค่าสัญญาณศักย์ไฟฟ้าของแต่ละเซนเซอร์ออกมาเป็นรายวินาที รวมไปถึงเซนเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิที่อยู่ภายในเครื่องด้วย จากนั้นนำข้อมูลสัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่ได้มาคำนวณเป็นค่ารังสีในหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตร โดยใช้ค่าความไวในการตอบสนองของแต่ละเซนเซอร์ (Sensitivity) ซึ่งสมการสำหรับใช้คำนวณแสดงไว้ในสมการ (6) ถึง (9)



รูปที่ 11 ลักษณะเครื่องมือวัดรังสีสุริยและตำแหน่งที่ตั้ง ภาคเหนือติดตั้งที่จังหวัดเชียงใหม่ (CM) ภาคตะวันออกเฉียงเหนือติดตั้งที่จังหวัดอุบลราชธานี (UB) ภาคกลางติดตั้งที่จังหวัดนครปฐม (NP) และภาคใต้ติดตั้งที่จังหวัดสงขลา (SK)

$$S_d = \frac{V_{sd}}{C_{sd}} \quad (6)$$

$$S_u = \frac{V_{su}}{C_{su}} \quad (7)$$

$$L_d = \frac{V_{ld}}{C_{ld}} + \sigma T^4 \quad (8)$$

$$L_u = \frac{V_{lu}}{C_{lu}} + \sigma T^4 \quad (9)$$

เมื่อ S_d , S_u , L_d , และ L_u คือค่ารังสีคลื่นสั้นขาหลง รังสีคลื่นสั้นขาขึ้น รังสีคลื่นยาวขาหลง และรังสีคลื่นยาวขาขึ้น ในหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตร ตามลำดับ

V_{sd} , V_{su} , V_{ld} , และ V_{lu} คือค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้มาจากเซนเซอร์ทั้ง 4 เซนเซอร์ ในหน่วยโวลต์

C_{sd} , C_{su} , C_{ld} , และ C_{lu} คือค่าความไวในการตอบสนองของทั้ง 4 เซนเซอร์

sd su ld และ lu คือสัญลักษณ์ที่ใช้แทนสัญญาณจากเซนเซอร์รังสีคลื่นสั้นขาหลง-ขาขึ้น และ เซนเซอร์รังสีคลื่นยาวขาหลง-ขาขึ้น ตามลำดับ

T คือค่าอุณหภูมิที่ได้จากเครื่องมือวัดในหน่วยเคลวิน

σ คือค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)

เมื่อได้ข้อมูลรังสีคลื่นสั้นขาหลง-ขาขึ้น และรังสีคลื่นยาวขาหลง-ขาขึ้น รายวินาทีออกมาแล้วทำการคำนวณค่ารังสีสุทธิออกมาโดยใช้สมการ (5) จะได้ค่ารังสีสุทธิรายวินาทีออกมา ทำการเฉลี่ยค่ารังสีสุทธิรายวินาทีออกมาเป็นรายชั่วโมง ทำการเก็บรวบรวมรังสีสุทธิรายชั่วโมงไว้ในรูปแบบของตาราง ซึ่งจะแสดงตัวอย่างของตารางเก็บข้อมูลของรังสีสุทธิตามรูปที่ 12 โดยจากรูปที่ 12 ตัวอย่างของตารางการเก็บข้อมูลรังสีสุทธิโดยในกรอบสีแดงด้านบนแสดงรายละเอียดของข้อมูลในตารางซึ่งประกอบด้วยชื่อของข้อมูล เดือน ปี และสถานที่เก็บข้อมูล กรอบสีม่วงที่ถัดลงมาแสดงจำนวนเวลาในรอบวันตลอด 24 ชั่วโมง กรอบสีเขียวอ่อนแนวตั้งทางด้านซ้ายแสดงวันในรอบ 1 เดือน กรอบสีเหลืองแนวตั้งทางด้านขวาจะแสดงผลรวมของรังสีสุทธิในทุก ๆ ชั่วโมงของรอบวัน กรอบสีส้มแนวตั้งที่ถัดออกมาแสดงค่ารังสีสุทธิรายวันในหน่วยเมกะจูลต่อตารางเมตรที่คำนวณมาจากกรอบสีเหลืองที่อยู่ด้านหน้า และกรอบสีเขียวเข้มแนวนอนด้านล่างแสดงค่ารังสีสุทธิรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน ซึ่งตารางแบบนี้จะมีทุกเดือนและทุกสถานที่ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2017 ถึง ค.ศ. 2024

MONTH:	YEAR:	Net radiation (W/m2)																								CHANG MAI
		JUNE												STATION :												
		2020																								
Date	D-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-0	Total	M/m2
1	-42.8725	-47.4159	-46.3908	-39.8647	-42.3788	-43.3881	-40.1606	165.4978	325.7619	489.2318	493.7043	580.1514	127.8034	146.5012	609.7186	374.9384	285.2196	101.3585	-28.1293	-31.3962	-39.6197	-46.3875	-44.9983	-44.9355	3231.92	11.6349
2	-33.9104	-28.205	-39.7186	-34.9485	-44.6428	-8.37527	163.5075	341.3166	466.1623	546.2576	722.4077	514.7533	673.7617	406.5539	320.2348	146.0093	116.1256	-23.2407	-54.0774	-45.5883	-46.981	-42.9989	-43.375	3936.64	14.1719	
3	-40.2377	-45.1031	-43.6419	-34.9828	-43.7389	-42.1807	-3.0477	147.7578	306.0979	475.3081	570.3359	539.7563	723.3351	489.8652	536.4888	319.4019	324.2604	87.91907	-34.613	-41.1141	-36.1234	-31.6594	-31.297	-26.319	4066.46	14.6392
4	-25.1848	-28.2134	-26.3378	-33.8985	-24.413	-3.70838	90.50732	120.1825	296.4091	312.1144	691.4413	555.2267	671.6113	489.8521	500.3831	193.6131	20.24947	-20.45848	-32.6857	-41.6605	-34.8692	-25.7884	-34.537	-27.899	10.8716	10.8716
5	-27.6141	-30.6118	-34.4248	-34.2646	-36.702	-39.4638	-8.29968	99.06664	69.06664	62.6556	300.9491	324.6486	574.3012	684.8287	630.2625	30.71219	76.02712	27.7425	-28.6491	-41.6003	-44.8303	-42.6157	-35.6848	-31.998	8.94959	8.94959
6	-41.3901	-40.7005	-36.5112	-38.2384	-39.256	-20.3922	6.472165	147.3747	322.8638	464.4607	414.1271	480.5524	657.591	600.598	464.7527	58.86456	47.06862	6.571433	-31.4609	-35.3799	-39.4934	-37.1955	-38.9313	-37.554	3234.75	11.6452
7	-39.1478	-40.7985	-41.3339	-42.4687	-42.8044	-44.0861	-0.37641	129.1422	302.5984	475.1963	392.5976	636.2803	621.3838	601.3658	513.5541	158.6333	129.6221	43.19342	-19.1342	-25.8944	-29.4349	-28.4222	-33.565	-33.565	2377.35	12.2187
8	-44.7587	-43.0759	-29.9922	-18.6695	-30.7414	-21.9817	-14.2904	47.79339	227.2385	190.0864	156.2946	281.555	446.6946	485.2942	308.3071	403.2286	204.0209	5.60096	-22.8608	-40.3977	-30.7912	-16.7378	-27.4798	-28.121	2559.35	9.27847
9	-21.2252	-36.3217	-31.683	-34.5349	-46.0098	-44.9098	-18.865	177.8482	284.5587	496.0666	574.8825	598.6774	626.5754	693.9754	635.6546	343.2929	306.4697	136.0096	-12.0614	-44.2609	-40.7913	-31.7686	-31.7455	-24.484	4188.3	15.0778
10	-33.2363	-38.4097	-32.0631	-18.8829	-19.4082	-30.691	2.883596	173.0028	209.8252	294.7617	387.0419	649.4674	511.3237	883.0467	567.2837	186.5063	232.5618	53.40443	-5.44818	-20.8387	-36.6219	-35.7292	-39.088	-35.610	3600.06	12.9602
11	-40.4276	-37.1811	-21.698	-15.3869	-22.1075	-45.4106	1.860925	226.2522	335.0111	571.9523	515.1187	474.9897	486.3268	414.7636	434.8738	272.1506	8.972181	374.5811	-40.5049	-38.8138	-45.4075	-47.8585	-46.156	-34.2052	12.3138	12.3138
12	-43.8473	-44.2903	-43.2864	-44.0386	-44.9397	-41.9912	-11.8264	156.9301	343.8961	467.6072	496.928	515.7618	482.8842	346.366	326.1823	774.5738	272.1506	8.972181	374.5811	-40.5049	-38.8138	-45.4075	-47.8585	-46.156	3405.35	11.8992
13	-43.2383	-44.3818	-43.5956	-44.2441	-41.1144	-32.77	14.4025	105.3073	376.0742	537.4558	546.175	537.7473	470.5067	607.2384	364.6786	213.618	141.3431	72.55037	-16.845	-36.5015	-40.3406	-33.416	-36.824	-30.864	3542.85	12.7542
14	-27.2362	-29.4971	-32.2033	-26.9507	-31.9221	-37.6221	-31.15988	90.39596	232.1651	348.6597	237.4685	407.0348	465.1	140.6274	67.39725	21.92715	-12.1222	-2.04732	-20.7241	-32.5749	-27.8229	-30.3939	-33.7017	-36.228	1628.87	5.86394
15	-37.7355	-35.3441	-34.7803	-25.0812	-22.7744	-23.3538	11.69602	105.647	212.8134	314.3162	194.8413	382.9566	470.9664	558.6497	471.9423	128.5272	262.824	14.88778	1.169164	-25.2846	-23.2846	-24.743	-22.7917	-20.185	2336.12	8.28765
16	-24.4881	-20.942	-22.6018	-24.8134	-26.9147	-22.0936	25.26302	65.5673	145.4568	313.4465	608.345	141.9511	99.01068	111.3139	174.2487	48.5552	243.2414	29.94261	-6.76928	-30.5596	-35.7073	-33.5669	-25.3874	-25.655	2346.16	8.44619
17	-21.6939	-23.8062	-21.8228	-17.5119	-17.4351	-15.7203	8.086608	68.65212	237.3406	247.5524	276.5517	224.0515	410.8805	276.0149	71.23451	99.89828	25.04847	58.15438	17.36005	-19.8078	-17.0193	-23.7498	-24.0734	-27.763	1780.22	6.40879
18	-26.308	-19.4774	-19.1328	-17.5465	-18.9092	-15.6577	2.37819	26.89715	47.57962	106.8051	231.1137	303.6145	304.6182	221.2197	271.3938	171.9381	64.47076	13.51956	-9.09688	-18.205	-38.6538	-31.9641	-17.668	-26.34	1506.56	5.42364
19	-25.5335	-22.3324	-21.8386	-19.5229	-22.3796	-22.9377	11.66568	44.35397	131.46	167.7987	151.0545	216.2157	394.7074	295.9652	346.1606	433.3648	254.313	118.8344	6.00775	-18.0712	-14.8355	-20.4152	-26.6523	-38.129	2409.8	8.67529
20	-38.8457	-25.8186	-26.3966	-29.5925	-33.2471	-29.6783	12.53342	148.6814	212.8471	208.365	420.3159	441.6231	438.0508	577.0578	604.7774	507.7802	188.4236	24.41787	1.063415	-23.6714	-25.0613	-41.9823	-44.4945	-43.953	3390.15	12.204
21	-39.2846	-29.9487	-38.31	-39.8566	-42.266	-46.701	-21.0423	171.2155	275.0688	489.5684	455.8073	572.0033	597.5016	604.2577	376.3361	349.6409	225.3669	66.1229	39.1634	-38.2059	-16.8335	-32.931	-41.2884	-45.708	3640.9	13.1072
22	-45.2488	-40.0487	-41.2558	-44.0514	-43.5271	-32.8653	-3.02458	83.69868	300.046	510.8459	649.991	472.6239	385.044	393.1155	531.2955	513.305	314.314	33.3937	-14.5746	-37.4131	-30.1537	-31.7561	-26.981	-30.534	3996.2	14.0623
23	-28.8796	-34.0608	-39.3948	-41.1861	-39.298	-34.7631	-13.2283	126.2155	276.9336	504.0576	618.1484	723.6178	673.292	487.4566	468.2875	281.7658	87.7505	28.5033	-10.3602	-16.0846	-19.7067	-16.5963	-15.725	-15.329	3897.24	14.0304
24	-19.6693	-27.2802	-23.2075	-27.0794	-15.8217	-12.8132	-5.60531	69.34277	171.3644	202.0831	234.8926	309.8009	364.5783	404.1215	496.9248	317.0093	7.004402	52.94299	-12.3352	-26.3712	-22.7093	-24.6296	-30.7209	-25.788	2356.24	8.4824
25	-23.1779	-23.382	-26.9479	-28.7794	-32.6253	-37.8108	-0.77898	50.28255	170.3777	282.0177	412.91	588.7596	411.9716	111.8607	200.9849	160.8696	46.19723	28.83457	-8.26298	-27.7776	-23.8509	-22.2828	-33.1902	-26.406	2148.9	7.73606
26	-26.836	-21.9333	-20.7835	-21.055	-22.0246	-22.7718	-8.70267	53.99821	230.4717	232.9187	439.4183	536.3841	370.9591	332.7291	337.9889	186.1136	117.194	28.6941	-23.6571	-27.4415	-27.2445	-15.3846	-9.35636	-11.866	2599.75	9.29975
27	-10.5798	-10.3864	-9.59154	-10.7095	-11.903	-11.7802	-5.47664	13.74385	68.23936	154.4609	150.7774	340.6081	268.8764	312.712	252.9914	323.6057	194.96	38.73948	-19.8742	-29.9104	-19.7859	-16.1102	-20.914	-1874.96	6.74995	6.74995
28	-18.2503	-26.2301	-14.6423	-28.2263	-35.6777	-4.64637	105.5437	151.5173	313.7023	435.0917	568.8935	372.0778	386.0054	510.2097	446.6916	444.4012	306.9072	154.8736	-16.1645	-43.083	-30.1268	-28.2004	-42.1503	-47.731	3675.64	13.2323
29	-36.5718	-22.2889	-30.9171	-32.7412	-42.9093	-21.6154	-4.9095	239.2185	518.5916	551.78	714.7664	616.4272	646.4423	429.9348	414.7166	316.2725	78.34069	1.96242	-43.3782	-42.1138	-42.1138	-41.777	-41.975	3456.31	15.6474	
30	-43.0217	-42.5788	-42.511	-42.387	-42.6903	-43.4943	-22.3166	154.3238	345.8855	438.4906	577.2454	723.4506	575.7889	527.4954	265.0427	444.9585	273.4101	120.3437	-2.42475	-34.715	-38.739	-41.3844	-40.5006	-39.742	3620.2	13.2162
AVR	-32.3531	-32.1995	-30.9467	-30.3332	-32.2388	-32.2003	-27.8152	107.6568	244.512	355.5146	419.166	473.5246	473.4221	453.7289	568.7313	285.1763	178.8428	57.87336	-13.2808	-33.4364	-32.0813	-31.9552	-32.5652	-33.1627	3048.974	10.97631

รูปที่ 12 ตัวอย่างการเก็บรวบรวมข้อมูลรังสีสุริยะ

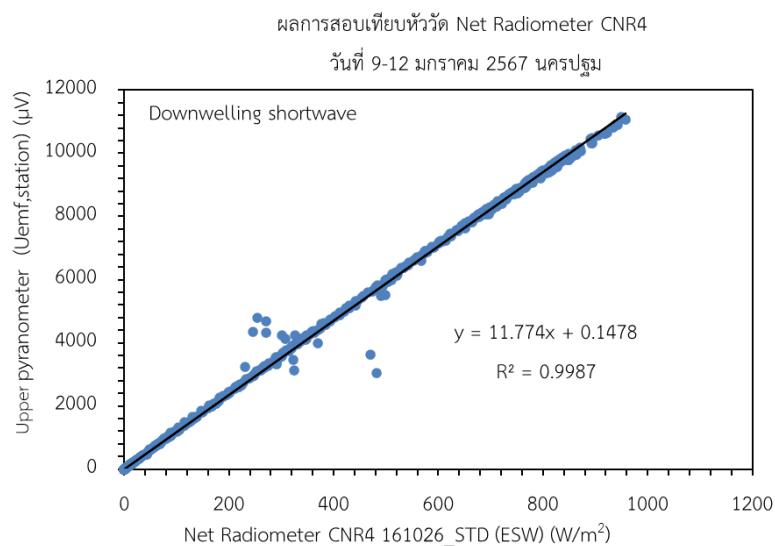
จากสมการ (6) ถึง (9) สังเกตได้ว่าจะมีค่าความไวต่อการตอบสนองของเซนเซอร์ที่จำเป็นจะต้องมีการสอบเทียบเพื่อปรับค่าดังกล่าวให้ถูกต้องเพื่อความแม่นยำในการคำนวณค่ารังสีสุทธิเนื่องจากเครื่องวัดรังสีสุทธิต้องติดตั้งไว้ในพื้นที่กลางแจ้งตลอดเวลาทำให้ประสิทธิภาพของเซนเซอร์มีการเสื่อมสภาพ ค่าความไวต่อการตอบสนองของเซนเซอร์ของเครื่องวัดรังสีสุทธิจึงมีการเปลี่ยนแปลงตามอายุการใช้งานด้วย ดังนั้นจึงต้องทำการสอบเทียบเพื่อหาค่าความไวต่อการตอบสนองของเซนเซอร์ โดยขั้นตอนการสอบเทียบนั้นทำได้โดยการติดตั้งเครื่องวัดมาตรฐานคู่กับเครื่องวัดรังสีสุทธิที่ประจำอยู่ที่สถานี จากนั้นทำการเก็บรวบรวมข้อมูล 2-5 วันขึ้นอยู่กับสภาพอากาศของสถานีนั่น ตัวอย่างการติดตั้งเครื่องมือในการสอบเทียบแสดงได้ดังรูปที่ 13



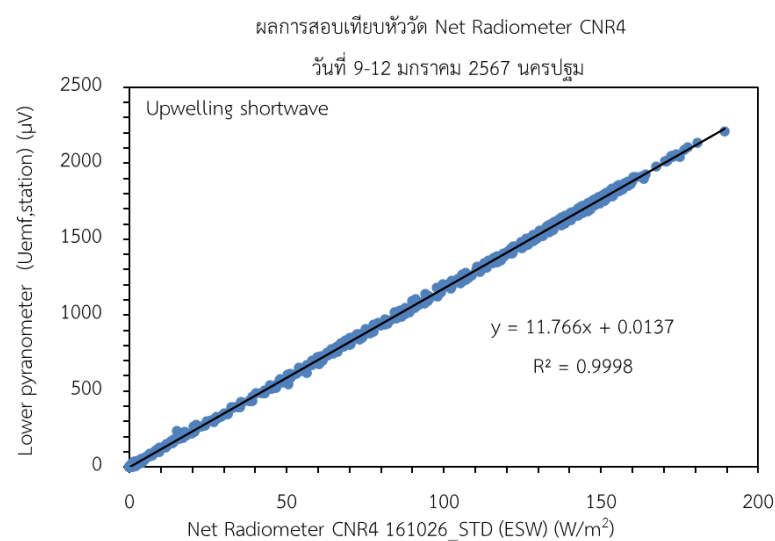
รูปที่ 13 ตัวอย่างการติดตั้งเครื่องวัดมาตรฐานเพื่อทำการสอบเทียบ

จากนั้นนำค่าสัญญาณศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากทั้งสองเครื่องมาทำการเฉลี่ยเป็นรายนาที่ คำนวณค่าสัญญาณของหัววัดมาตรฐานออกมาในหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตรโดยใช้ค่าความไวต่อการตอบสนองของหัววัดมาตรฐาน จากนั้นทำการเขียนกราฟเปรียบเทียบค่ารังสีที่ได้จากหัววัดมาตรฐานในหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตร (ในแนวแกน X) เทียบกับค่าศักย์ไฟฟ้าในหน่วยไมโครโวลต์จากเครื่องวัดประจำสถานี (ในแนวแกน Y) คำนวณค่าความไวในการตอบสนองของเซนเซอร์ได้จากค่าความชันของกราฟ

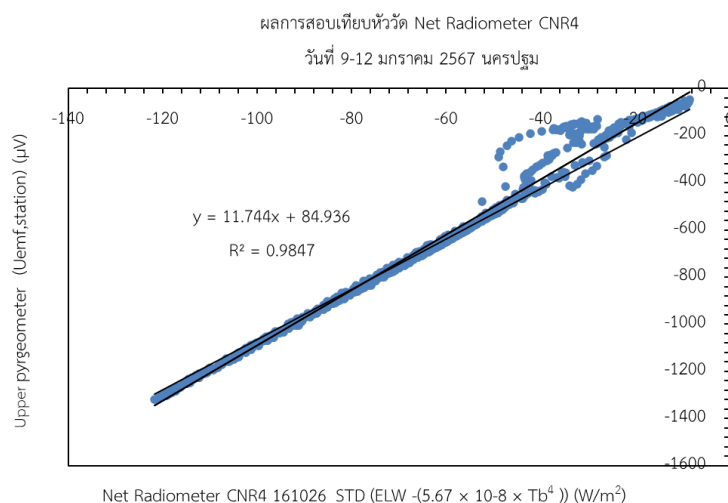
โดยจะพิจารณาแยกออกมาเป็น 4 เซนเซอร์ ซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างกราฟการสอบเทียบได้ดังรูปที่ 14-17



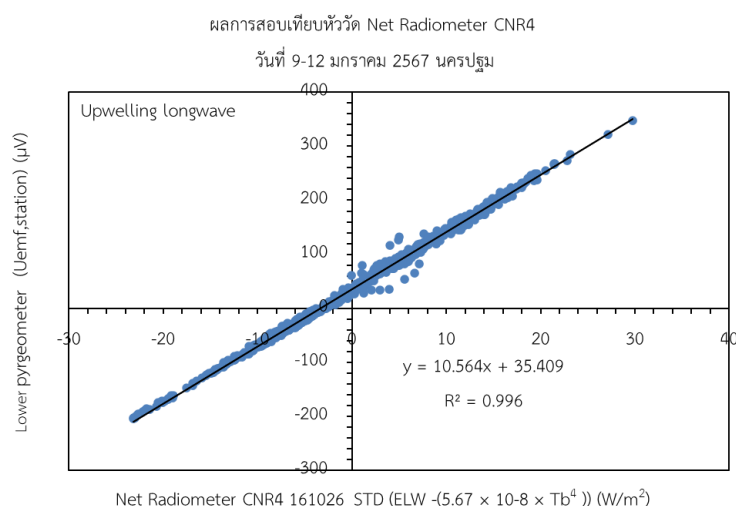
รูปที่ 14 ตัวอย่างกราฟการสอบเทียบเซนเซอร์วัดรังสีคลื่นสั้นขาลงสถานีนครปฐม



รูปที่ 15 ตัวอย่างกราฟการสอบเทียบเซนเซอร์วัดรังสีคลื่นสั้นขาขึ้นสถานีนครปฐม



รูปที่ 16 ตัวอย่างการกราฟสอบเทียบเซนเซอร์วัดรังสีคลื่นยาวขาลงสถานีนครปฐม



รูปที่ 17 ตัวอย่างกราฟการสอบเทียบเซนเซอร์วัดรังสีคลื่นยาวขาขึ้นสถานีนครปฐม

จากกราฟทั้ง 4 กราฟ (รูปที่ 14-17) แสดงค่าความไวต่อการตอบสนองของเซนเซอร์ทั้ง 4 เซนเซอร์ของเครื่องวัดรังสีสุทธิของสถานีนครปฐม โดยค่าดังกล่าวแสดงอยู่ในรูปของความชัน ซึ่งจะมีกราฟในลักษณะนี้ทั้งหมด 4 สถานีที่มีเครื่องวัดติดตั้งอยู่ประกอบด้วย สถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี สถานีนครปฐม และสถานีสงขลา โดยข้อมูลที่มีการกระจายในบางส่วนนั้นเกิดจากสิ่งรบกวนรอบข้าง ไม่ว่าจะเป็นการบดบังแสงโดยผู้คนและสิ่งมีชีวิต

3.1.2 ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาเป็นข้อมูลอินพุตหลักในการพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อใช้ในการทำนายค่ารังสีสุทธิต่พื้นผิวโลก โดยชุดข้อมูลอุตุนิยมวิทยาที่นำมาใช้นั้นประกอบด้วยตัวแปรสำคัญ ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) และข้อมูลอุณหภูมิอากาศทั้งค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดในแต่ละวัน (T_{max}, T_{min}) ซึ่งตัวแปรเหล่านี้ได้รับการคัดเลือกโดยอ้างอิงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต โดยเฉพาะงานวิจัยของ Geraldo-Ferreira และคณะเมื่อปี ค.ศ. 2011 (Geraldo-Ferreira et al., 2011) ซึ่งได้แสดงให้เห็นว่าตัวแปรดังกล่าวมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับค่ารังสีสุทธิ และสามารถนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อประมาณค่ารังสีสุทธิได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับแหล่งที่มาของข้อมูลอุตุนิยมวิทยาในงานวิจัยนี้ได้มีการประสานงานและขอรับการสนับสนุนข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยาซึ่งเก็บรวบรวมข้อมูลอุตุนิยมวิทยาทั่วประเทศไทยไว้รวมไปถึง สถานีอุตุนิยมวิทยาที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ที่มีการติดตั้งเครื่องวัดรังสีสุทธิไว้ เพื่อให้มั่นใจว่าข้อมูลอินพุตที่ใช้ในการฝึกสอนมีความสอดคล้องกับข้อมูลรังสีสุทธิที่ใช้เป็นข้อมูลเป้าหมาย (Target data) โดยข้อมูลที่ได้นั้นอยู่ในรูปแบบของข้อมูลรายวัน (Daily data) ครอบคลุมช่วงเวลาตั้งแต่ปี ค.ศ. 2017 ถึงปี ค.ศ. 2023 ซึ่งมีข้อมูลมากพอสำหรับการฝึกสอนและทดสอบแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

3.1.3 ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม

งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลทางบรรยากาศจากภาพถ่ายดาวเทียมที่ครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทยเป็นตัวแปรอินพุตในแบบจำลองเอมไพริคัลส่วนที่ 2 เพื่อประมาณค่ารังสีสุทธิ โดยข้อมูลดาวเทียมที่ผู้วิจัยเลือกมานั้นมีทั้งหมด 2 ส่วนคือ ข้อมูลจาก MODIS บนดาวเทียม Terra และ Aqua และส่วนที่ 2 คือข้อมูล NCEP/NCAR Reanalysis 1 และ 2 ซึ่งข้อมูลแต่ละส่วนมีลักษณะและกระบวนการได้มาดังต่อไปนี้

3.1.3.1 ข้อมูลจาก MODIS

การศึกษานี้ใช้ข้อมูลจาก MODIS ทั้งหมด 2 ตัวแปร โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการประมาณค่ารังสีสุทธิที่ผ่านมาในอดีตตัวแปรที่สำคัญและส่งผลต่อค่ารังสีสุทธิอย่างเห็นได้ชัดคือค่ารังสีอาทิตย์ ซึ่งฐานข้อมูล MODIS นี้มีข้อมูลรังสีอาทิตย์หรือเรียกอีกอย่างว่ารังสีคลื่นสั้นขาลงโดยมีรหัสผลิตภัณฑ์คือ MCD18A1 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ระดับ 3 (Level 3) ที่รวมข้อมูลจากดาวเทียม Terra และ Aqua เพื่อให้ข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณรังสีคลื่นสั้นที่ตกลงสู่พื้นผิวโลกราย 3 ชั่วโมง (Downwelling Shortwave Radiation: DSR) โดยมีความละเอียดเชิงพื้นที่ 1 กิโลเมตร และให้ข้อมูลทุก 3 ชั่วโมงในแต่ละวัน (เวลา UTC: 00:00, 03:00, 06:00, 09:00, 12:00, 15:00, 18:00, 21:00) ซึ่งแน่นอนว่าค่า DSR นี้ได้จากชุดแบบจำลอง Radiative Transfer Model โดยมีลักษณะแสดงไว้ดังสมการ

$$DSR = S_0 \cdot \mu_0 \cdot T(\mu_0, \tau_c, A_s) \quad (10)$$

เมื่อ S_0 คือ ค่าคงที่รังสีอาทิตย์ (ประมาณ 1366.1 W/m^2)

μ_0 คือ $\cos \theta_s$ ค่าโคไซน์ของเซนซของดวงอาทิตย์ (Solar zenith angle)

τ_c คือความลึกเชิงแสงของเมฆ (Cloud optical thickness)

A_s คือค่าการสะท้อนของพื้นผิว (Surface albedo)

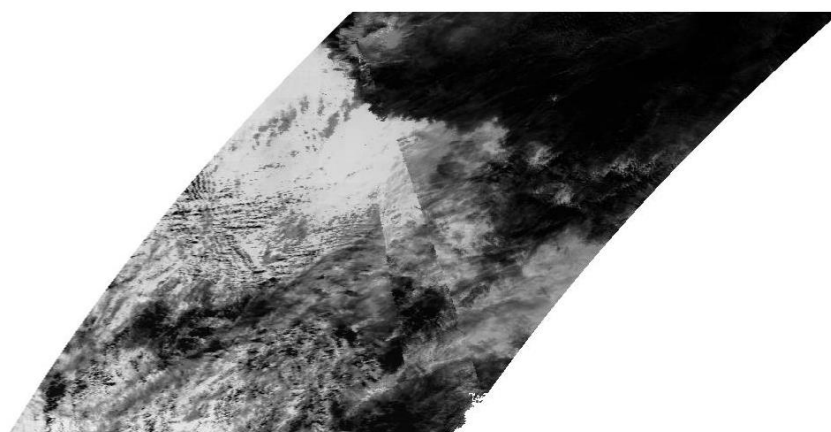
T คือ ค่าฟังก์ชันการส่งผ่าน (Transmittance function)

โดยค่าฟังก์ชันการส่งผ่านได้จาก Look-Up Table (LUT) ที่อาศัย MODIS surface irradiance algorithm ซึ่งเป็นตารางที่เก็บรวบรวมพารามิเตอร์ต่าง ๆ เอาไว้ โดยพารามิเตอร์ที่ใช้สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1

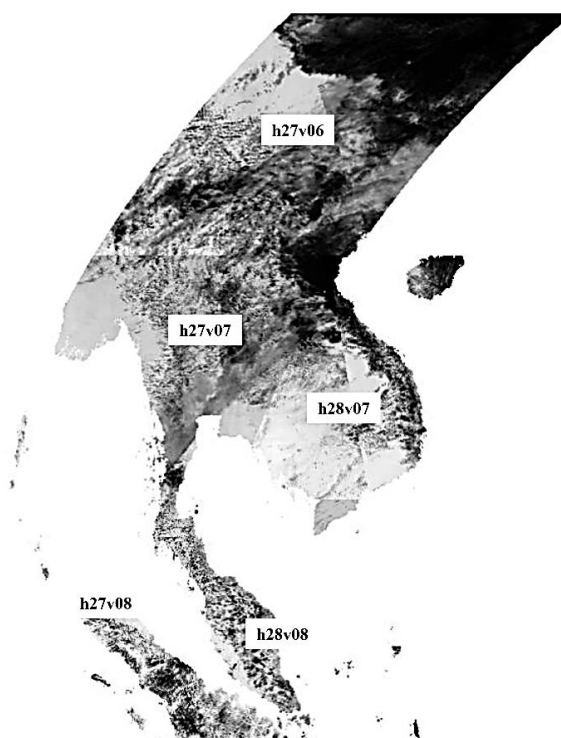
ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้ใน LUT เพื่อหาค่าฟังก์ชันการส่งผ่านของบรรยากาศ

พารามิเตอร์	แหล่งข้อมูล (MODIS Product)	รายละเอียด
Cloud optical thickness	MOD06, MYD06	ความลึกเชิงแสงของเมฆ
Surface albedo	MCD43	ค่าการสะท้อนแสงของพื้นดิน
Water vapor	MOD05, MYD05	ความชื้นในชั้นบรรยากาศ
Solar zenith angle	Geometry info	มุมเซนนิซของดวงอาทิตย์
Aerosol optical depth	MOD04, MYD04	ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง

ผลลัพธ์คือค่าประมาณ DSR (W/m^2) ในแต่ละ pixel ทุก 3 ชั่วโมง ความละเอียด 1 กิโลเมตร เนื่องจากข้อมูลเหล่านี้มีความละเอียดสูง ดังนั้นหนึ่งภาพถ่ายของดาวเทียมจะไม่ครอบคลุมพื้นที่ประเทศ โดยตัวอย่างภาพถ่ายหนึ่งภาพจะแสดงไว้ในรูปที่ 18 ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกภาพถ่ายที่ครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทยซึ่งประกอบไปด้วย 5 ภาพ มีรหัสภาพ (Title) ดังต่อไปนี้ h27v06, h27v07, h27v08, h28v07 และ h28v08 และเมื่อนำมาประกอบกันแล้วจะครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทยทั้งหมดซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 19



รูปที่ 18 ตัวอย่างข้อมูลรังสีคลื่นสั้นกลางรายสามชั่วโมงที่ได้จาก MODIS โดยในตัวอย่างนี้มีรหัสภาพคือ h27v06 ที่เวลา 06.00 UTC. หรือ 13.00 น.



รูปที่ 19 ตัวอย่างข้อมูลรังสีคลื่นสั้นขาลงราย 3 ชั่วโมงที่ได้จาก MODIS ในวันที่ 1 มกราคม ค.ศ. 2020 เวลา 13.00 น.

ข้อมูล *DSR* จะมีวันละ 8 เวลาแต่ผู้วิจัยเลือกใช้ที่เวลา 0:00, 3:00, 6:00, 9:00, และ 12:00 UTC หรือหากเปลี่ยนเป็นเวลาไทยจะคือ 7.00, 10.00, 13.00, 16.00, และ 19.00 น. ซึ่งเป็นช่วงเวลาในตอนกลางวัน จากนั้นทำการคำนวณค่า *DSR* ณ เวลาที่หายไปคือ 8.00, 9.00, 11.00, 12.00, 14.00, 15.00, 17.00, และ 18.00 น. โดยใช้สมการ Weighting interpolation (Emmendorfer and Dimuro, 2021) ซึ่งสามารถแสดงได้ตามสมการ (11) และ (12)

$$R_{x+1} = \left(\frac{2}{3}R_x + \frac{1}{3}R_y \right) \quad (11)$$

$$R_{y-1} = \left(\frac{1}{3}R_x + \frac{2}{3}R_y \right) \quad (12)$$

เมื่อ R_x และ R_y คือค่า *DSR* ที่ได้จาก MODIS ที่ตำแหน่ง x และ y ตามลำดับ R_{x+1} และ R_{y-1} คือค่า *DSR* ที่ต้องการคำนวณที่ตำแหน่ง $x+1$ และ $y-1$ ตามลำดับ โดยเมื่อเรียงค่ารังสีอาทิตย์ตามเวลาสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้ R_x , R_{x+1} , R_{y-1} , และ R_y เมื่อทำการ Interpolation เรียบร้อยแล้วจะได้

ค่า DSR รายชั่วโมงออกมา จากนั้นทำการรวมและคำนวณออกมาเป็นค่ารายวันในหน่วยเมกะจูลต่อตารางเมตร (MJ/m^2)

ตัวแปรที่สองที่ได้จาก MODIS คือผลต่างของอุณหภูมิการส่องสว่างระหว่างช่องสัญญาณ 31 และ 32 (WP) ซึ่งก่อนหน้านี้ตัวแปรนี้ถูกใช้ในการศึกษาองค์ประกอบทางบรรยากาศอย่าง เช่น การศึกษาฝุ่น (Albugami et al., 2018; Yue et al., 2017) ซึ่ง WP เป็นตัวแปรที่ใช้บอกปริมาณไอน้ำในบรรยากาศเนื่องจากว่าช่องสัญญาณที่ 32 มีความคลื่นอยู่ในช่วง 10.780–11.280 ไมครอน (μm) ซึ่งมีความไวต่อไอน้ำมากกว่าช่องสัญญาณที่ 31 (11.770–12.270 μm) ดังนั้นผลต่างระหว่างทั้งสองช่องสัญญาณจึงเป็นตัวบอกว่าบรรยากาศมีอากาศชื้นหรืออากาศแห้ง โดยหากยังผลต่างมีค่าใกล้เคียง 0 มากนั้นหมายถึงอากาศนั้นเป็นอากาศแห้ง โดยข้อผิดพลาดที่นำมาคำนวณค่า WP คือ MOD09CMG มีความละเอียดประมาณ 5.6x5.6 กิโลเมตร (km) ต่อพิกเซล เป็นข้อมูลรายวัน และเลือกใช้ช่องสัญญาณที่ 31 และ 32 โดยสามารถคำนวณได้ตามสมการ

$$WP = |0.01 \cdot BT_{31} - 0.01 \cdot BT_{32}| \quad (13)$$

เมื่อ BT_{31} และ BT_{32} คือค่าอุณหภูมิการส่องสว่างที่ช่องสัญญาณ 31 และ 32 ที่ได้จาก MODIS มีหน่วยเป็นเคลวิน ตามลำดับ 0.01 คือค่า Scale factor ใช้สำหรับปรับแก้ค่า ตัวอย่างภาพถ่ายดาวเทียมช่องสัญญาณ 31 และ 32 แสดงได้ดังรูปที่ 20 ถึง 21

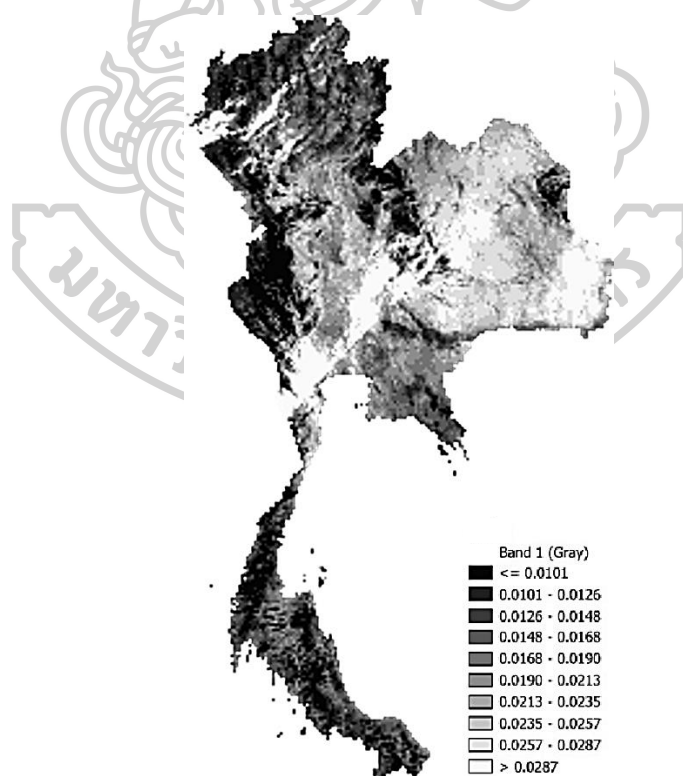


รูปที่ 20 ลักษณะภาพถ่ายดาวเทียมของค่าอุณหภูมิการส่องสว่าง ช่องสัญญาณที่ 31



รูปที่ 21 ลักษณะภาพถ่ายดาวเทียมของค่าอุณหภูมิการส่องสว่าง ช่องสัญญาณที่ 32

จากรูปที่ 20 และ 21 แสดงตัวอย่างภาพถ่ายดาวเทียมในวันที่ 1 มกราคม ค.ศ. 2020 โดยรูปที่ 20 แสดงภาพในช่องสัญญาณที่ 31 และรูปที่ 21 แสดงภาพในช่องสัญญาณที่ 32 ซึ่งภาพทางด้านซ้ายคือภาพที่ได้จาก MODIS และภาพทางขวาเป็นภาพที่ตัดเฉพาะพื้นที่ประเทศไทย จากนั้นนำภาพที่ได้นี้มาคำนวณหาค่า WP โดยใช้สมการ (13) ตัวอย่างผลลัพธ์แสดงได้ในรูปที่ 22



รูปที่ 22 ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิการส่องสว่างระหว่างช่องสัญญาณที่ 31 และ 32 ของวันที่ 1 มกราคม ค.ศ. 2020

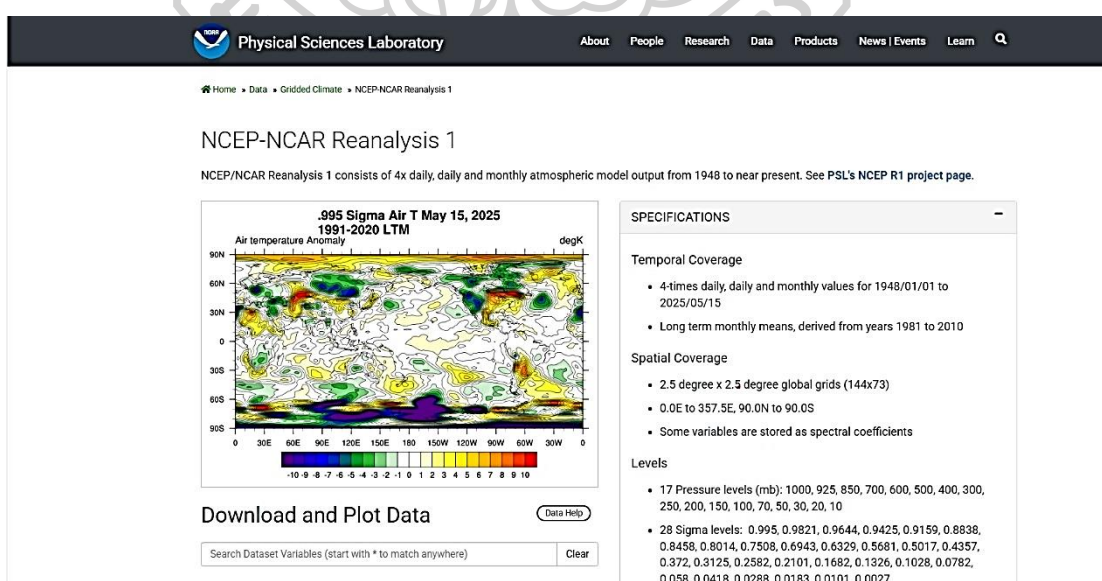
จากรายละเอียดทั้งหมดที่กล่าวไปในข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าในงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลจาก MODIS ทั้งหมด 2 ตัวแปร คือค่ารังสีคลื่นสั้นขาหลัง (S_d) และผลต่างอุณหภูมิการส่องสว่างระหว่างช่องสัญญาณ 31 และ 32 (WP) ทั้งสองตัวแปรถูกทำให้เป็นข้อมูลรายวันทั้งหมดและเก็บรวบรวมข้อมูลในช่วงเวลา ค.ศ. 2017-2024 รายละเอียดตัวแปรแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 รายละเอียดของตัวแปร S_d และ WP ที่ได้จาก MODIS

Product name	SDS name	Description	Units	Valid range	Scale factor
MCD18A1	GMT_0000_DSR	Total DSR at GMT 00:00	W/m ²	0 to 1400	N/A
	GMT_0300_DSR	Total DSR at GMT 03:00	W/m ²	0 to 1400	N/A
	GMT_0600_DSR	Total DSR at GMT 06:00	W/m ²	0 to 1400	N/A
	GMT_0900_DSR	Total DSR at GMT 09:00	W/m ²	0 to 1400	N/A
	GMT_1200_DSR	Total DSR at GMT 12:00	W/m ²	0 to 1400	N/A
MOD09CMG	Brightness	Band 31 Brightness			
	Temperature	Temperature			
	Band 31	(10.780-11.280 μ m)	Kelvin	1 to 40000	0.01
	Brightness	Band 32 Brightness			
	Temperature	Temperature			
	Band 32	(11.770-12.270 μ m)	Kelvin	1 to 40000	0.01

3.1.3.2 ข้อมูลจาก NCEP/NCAR

ข้อมูล NCEP/NCAR Reanalysis เป็นชุดข้อมูลสภาพอากาศระยะยาวทางด้านอุตุนิยมวิทยา ภูมิอากาศ และการวิจัยเชิงวิทยาศาสตร์ในระดับโลก รวมถึงงานด้านเกษตร น้ำ และพลังงานด้วย โดยเฉพาะในกรณีที่ไม่มีข้อมูลวัดภาคสนามครบถ้วน ซึ่งข้อดีของข้อมูล NCEP/NCAR คือมีข้อมูลต่อเนื่องตั้งแต่ปี ค.ศ. 1948 – ปัจจุบัน โดยมีทั้งข้อมูลรายเดือน รายวัน รายชั่วโมงที่ระดับความสูงต่าง ๆ ครอบคลุมทั่วโลก มีความละเอียดอยู่ที่ประมาณ 250 km ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่สามารถเลือกใช้งานได้หลากหลาย เช่น อุณหภูมิพื้นผิว (Surface temperature) ปริมาณรังสีคลื่นยาว (Longwave radiation) ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) อุณหภูมิอากาศ (Air temperature) ความดัน (Pressure) ปริมาณฝน (Precipitation) ลม (Wind) และอื่น ๆ อีกมากมาย สำหรับในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยเลือกตัวแปรที่มีผลต่อค่ารังสีสุทธิ (อ้างอิงตัวแปรจากงานวิจัยที่มีมาก่อนหน้า) ซึ่งประกอบไปด้วยค่าความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ค่าอุณหภูมิอากาศที่พื้นผิว (T_{air}) ค่าอุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด รายวัน (T_{max} , T_{min}) ค่ารังสีคลื่นยาวสุทธิ (NLWR) ปริมาณเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้า (C) และปริมาณน้ำฝนรายวัน (P) โดยทุกตัวแปรจะทำการดาวน์โฮลดที่ระดับความสูงที่พื้นผิวโลก (ที่ความดันบรรยากาศ 1000 hPa) ระหว่างช่วงปี ค.ศ. 2017-2024 ผ่านเว็บไซต์ <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html> โดยรูปภาพหน้าเว็บไซต์แสดงไว้ในรูปที่ 23



รูปที่ 23 หน้าเว็บไซต์สำหรับการดาวน์โฮลดข้อมูล NCEP/NCAR

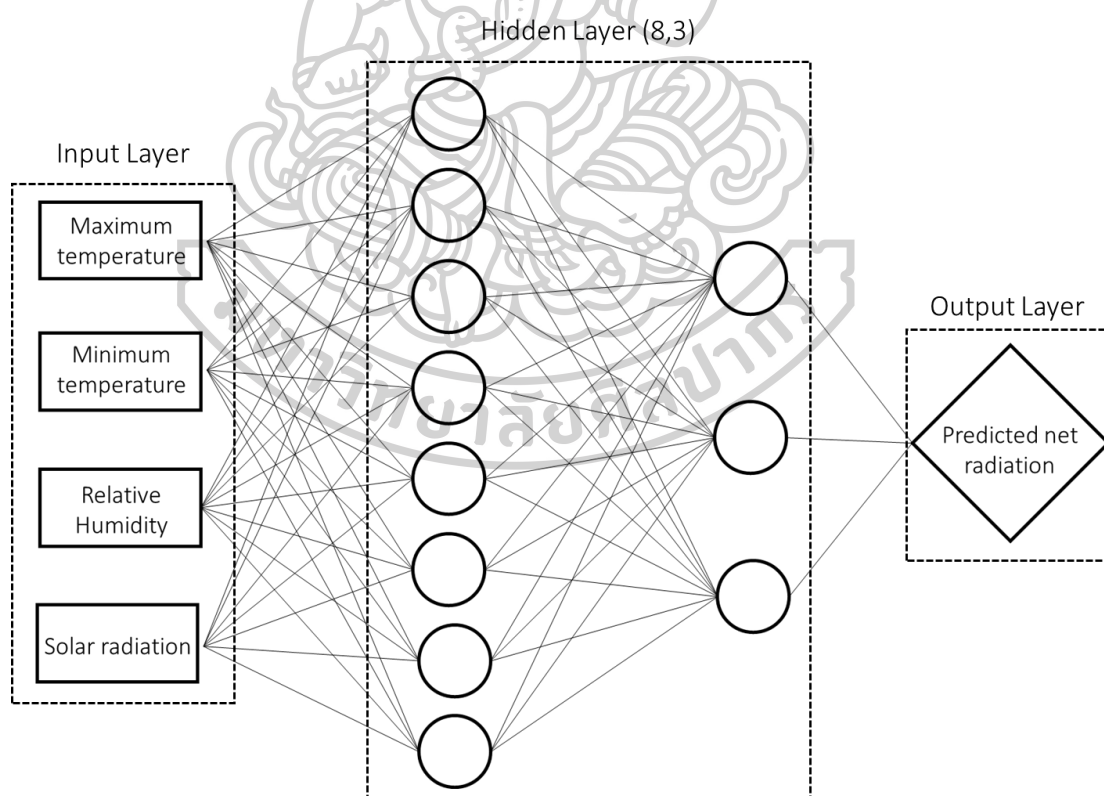
3.2 การดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองสำหรับประมาณค่ารังสีสุทธิ โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือ แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (ANN model) โดยใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาที่วัดภาคพื้นดิน และส่วนที่ 2 คือ แบบจำลองเอมไพริคัลเพื่อประมาณค่ารังสีสุทธิจากตัวแปรทางบรรยากาศที่ได้จากภาพถ่ายดาวเทียมและฐานข้อมูล NCEP/NCER

3.2.1 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับประมาณค่ารังสีสุทธิ

ขั้นตอนแรกของการดำเนินงานวิจัย ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาจากสถานีตรวจวัดที่มีการติดตั้งเครื่องมือวัดรังสีสุทธิ โดยตัวแปรที่เลือกใช้ประกอบด้วยค่ารังสีคลื่นสั้นขาหลง (S_d) ซึ่งเป็นพลังงานจากดวงอาทิตย์ที่เข้าสู่พื้นผิวโลก ความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศ (RH) ที่ส่งผลต่อการแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างพื้นผิวและบรรยากาศ และค่าอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดรายวัน (T_{max} , T_{min}) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการควบคุมกระบวนการพลังงานพื้นผิวและการระเหย ทั้งนี้ ข้อมูลเหล่านี้จะถูกจัดเรียงและตรวจสอบให้มีเวลาที่ตรงกัน ทั้งในส่วนของวัน เดือน และปี โดยพิจารณาเฉพาะช่วงเวลาระหว่างปี ค.ศ. 2017 ถึง 2023 เพื่อให้สอดคล้องกับช่วงเวลาที่มีการติดตั้งและบำรุงรักษาเครื่องมือวัดอย่างต่อเนื่อง หลังจากรวบรวมข้อมูลแล้ว ผู้วิจัยได้ดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลในแต่ละวันอย่างละเอียด และทำการตัดข้อมูลในวันที่มีค่าผิดปกติออกจากชุดข้อมูลทั้งหมด เช่น วันที่ค่ารังสีคลื่นสั้นขาหลงสูงกว่าค่ารังสีอาทิตย์ที่นอกบรรยากาศโลก ซึ่งเป็นไปไม่ได้ในทางกายภาพ หรือวันที่ค่ารังสีสุทธิมีค่าสูงกว่ารังสีอาทิตย์ รวมถึงวันที่มีข้อมูลไม่ครบตลอดทั้งวัน หรือช่วงที่เครื่องมือวัดชำรุดและอยู่ในระหว่างการสอบเทียบ ซึ่งอาจส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของข้อมูล เมื่อได้ชุดข้อมูลผ่านการควบคุมคุณภาพเรียบร้อยแล้ว จะทำการแบ่งข้อมูลออกเป็นสองส่วนหลัก โดยข้อมูลส่วนแรกในช่วงปี ค.ศ. 2017–2021 จะใช้เป็นชุดข้อมูลสำหรับการฝึกสอนแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อให้แบบจำลองสามารถเรียนรู้และหาความสัมพันธ์เชิงสถิติระหว่างตัวแปรอุตุนิยมวิทยากับค่ารังสีสุทธิที่วัดได้ ซึ่งโครงสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วยจำนวนชั้นซ่อน 2 ชั้น โดยชั้นแรกมี 8 โหนดและชั้นที่สองมี 3 โหนด (ส่วนของการศึกษาจำนวนชั้นซ่อนและจำนวนโหนดที่ดีที่สุดผู้วิจัยแทรกไว้ในส่วนของภาคผนวก) โดยมีโครงสร้างของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 24 สำหรับข้อมูล

ในช่วงปี ค.ศ. 2022–2023 จะใช้เป็นชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น โดยแบบจำลองที่ได้จะนำไปทดสอบกับข้อมูลในช่วงหลังเพื่อตรวจสอบความถูกต้องในการประมาณค่ารังสีสุทธิ ทั้งนี้ ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองจะนำมาเปรียบเทียบกับค่ารังสีสุทธิที่ได้จากการวัดจริงจากเครื่องมือวัด เพื่อประเมินความแม่นยำและประสิทธิภาพของแบบจำลองโดยใช้ตัวชี้วัดทางสถิติ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination; R^2) ซึ่งแสดงถึงระดับของความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าที่แบบจำลองประมาณได้กับค่าจริง ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error; $RMSE$) ที่แสดงขนาดของความคลาดเคลื่อนในภาพรวม และค่าความเอนเอียงเฉลี่ย (Mean Bias Error; MBE) ที่แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มในการประเมินค่าต่ำกว่าหรือสูงกว่าค่าจริง โดยการคำนวณทั้ง 3 ค่าดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากสมการ (14) ถึง (16)



รูปที่ 24 โครงสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ประมาณค่ารังสีสุทธิในงานวิจัยนี้

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (R_{n_mod} - R_{n_Obs})^2}{\sum_{i=1}^n (R_{n_Obs} - \overline{R_{n_Obs}})^2} \quad (14)$$

$$RMSE (\%) = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_{n_mod} - R_{n_Obs})^2}}{\frac{\sum_{i=1}^n R_{n_Obs}}{n}} \times 100 \quad (15)$$

$$MBE (\%) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_{n_mod} - R_{n_Obs})}{\frac{\sum_{i=1}^n R_{n_Obs}}{n}} \times 100 \quad (16)$$

เมื่อ R_{n_Obs} คือค่ารังสีสุทธิที่ได้จากการวัด

R_{n_mod} คือค่ารังสีสุทธิที่ได้จากแบบจำลอง

$\overline{R_{n_Obs}}$ คือค่ารังสีสุทธิที่ได้จากการวัดเฉลี่ย

n คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด

3.2.2 แบบจำลองเอมไพริคัล (Empirical model) สำหรับประมาณค่ารังสีสุทธิ

ผู้วิจัยได้ทำการสร้างแบบจำลองเอมไพริคัลสำหรับประมาณค่ารังสีสุทธิโดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมและฐานข้อมูล NCEP/NCAR ซึ่งตัวแปรอินพุตประกอบไปด้วย ค่ารังสีคลื่นสั้นขาลง (S_g) และค่าผลต่างอุณหภูมิการส่องสว่างระหว่างช่องสัญญาณ 31 และ 32 (WP) ที่ได้จาก MODIS ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ค่าอุณหภูมิอากาศสูงสุด-ต่ำสุด (T_{max}, T_{min}) อุณหภูมิอากาศรายวัน (T_{air}) ค่ารังสีคลื่นยาวสุทธิ ($NLWR$) ปริมาณเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้า (C) และปริมาณน้ำฝน (P) ที่ได้จาก NCEP/NCAR จากนั้นนำตัวแปรเหล่านี้มาหาความสัมพันธ์กับค่ารังสีสุทธิซึ่งพิจารณาตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับค่ารังสีสุทธิอย่างมีนัยสำคัญโดยสังเกตจากค่า p-value ที่จะต้องมีค่าไม่เกิน 0.05 และพิจารณาค่าตัวแปรที่ไม่มีความสัมพันธ์ทับซ้อนกับตัวแปรอินพุตด้วยตนเองโดยพิจารณาจากค่า

Variance Inflation Factor (VIF) ซึ่งจะต้องมีค่าไม่เกิน 10 โดยหากมีค่าเกิน 10 นั้นหมายความว่าตัวแปรอินพุตนั้นมีความสัมพันธ์กับตัวแปรอินพุตอื่น ๆ เป็นอย่างมากโดยมีค่า R^2 ประมาณ 0.99 สำหรับสมการที่ใช้คำนวณค่า VIF สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$VIF_i = \frac{1}{1 - R_i^2} \quad (17)$$

เมื่อ VIF_i คือค่า Variance Inflation Factor ของตัวแปรที่ i

R_i^2 คือค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเมื่อพิจารณาตัวแปร i นั้นเทียบกับตัวแปรอิสระตัวอื่น ๆ

จากนั้นตัดตัวแปรที่อยู่นอกเกณฑ์ออกและนำตัวแปรที่เหลือมาทำการสร้างแบบจำลองเอมไพริคัล โดยแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด ชุดแรกสำหรับสร้างแบบจำลอง (ข้อมูลในช่วงปี ค.ศ. 2017-2021) และชุดที่ 2 สำหรับทดสอบแบบจำลอง (ข้อมูลช่วงปี ค.ศ. 2022-2024) หลังจากนั้นทำการสร้างและทดสอบแบบจำลองด้วยตัวแปรที่เลือก และทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองโดยนำผลลัพธ์ที่ได้จากข้อมูลชุดที่ 2 มาเปรียบเทียบกับข้อมูลวัด และทำการคำนวณพารามิเตอร์ทางสถิติ คือ R^2 $RMSE$ และ MBE ตามสมการ (14)-(16) จากนั้นเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดมาสร้างแผนที่การกระจายของรังสีสุทธีในพื้นที่ประเทศไทยและศึกษาลักษณะการแปรค่าเชิงพื้นที่และเวลาในแต่ละฤดูกาล สุดท้ายทำการสรุปผลการดำเนินงาน

บทที่ 4

ผลและการอภิปรายผล

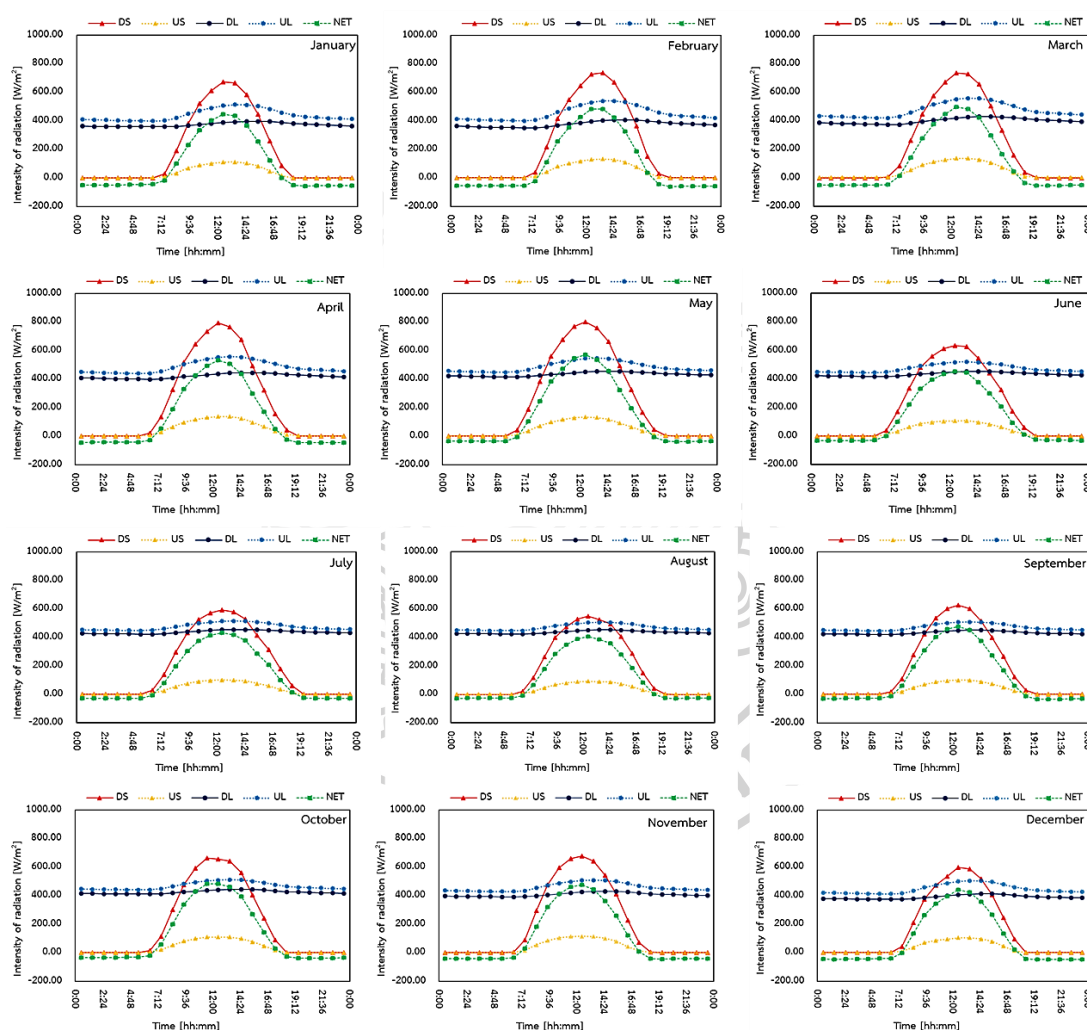
จากขั้นตอนการรวบรวมและเตรียมข้อมูลจากหลากหลายแหล่งตามที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ผู้วิจัยได้นำข้อมูลเหล่านั้นเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์และพัฒนาแบบจำลองเพื่อประมาณค่ารังสีสุทธิในพื้นที่ประเทศไทย โดยมุ่งเน้นการประเมินลักษณะการแปรผันของรังสีสุทธิทั้งในเชิงเวลาและพื้นที่ ตลอดจนสร้างและประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเมื่อเทียบกับข้อมูลที่วัดได้จริง เนื้อหาในบทนี้จะนำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูลเป็นลำดับขั้น เริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์ลักษณะทางสถิติของข้อมูลรังสีสุทธิที่ได้จากสถานีตรวจวัดในประเทศไทย ซึ่งครอบคลุมทั้งค่ารายชั่วโมง รายวัน และรายปี ผลลัพธ์การประมาณค่ารังสีสุทธิจากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมและแบบจำลองเอมไพริคัล และสุดท้ายผลลัพธ์ของการประยุกต์ใช้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมาสร้างแผนที่รังสีสุทธิเพื่อศึกษาการกระจายตัวเชิงพื้นที่ของรังสีสุทธิในพื้นที่ประเทศไทย

4.1 ลักษณะทางสถิติของรังสีสุทธิ

4.1.1 การแปรค่ารังสีสุทธิรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้เก็บรวบรวมข้อมูลรังสีสุทธิจากเครื่องมือวัดเน็ตเรดิโอมิเตอร์ซึ่งติดตั้งอยู่ ณ สถานีอุตุนิยมวิทยาทั้ง 4 แห่งที่เคยกล่าวไปก่อนหน้านี้ ข้อมูลที่ได้ประกอบด้วยองค์ประกอบของรังสีทั้ง 4 ส่วน ได้แก่ รังสีคลื่นสั้นขาลง รังสีคลื่นสั้นขาขึ้น รังสีคลื่นยาวขาลง และรังสีคลื่นยาวขาขึ้น ซึ่งถูกรวบรวมในรูปแบบรายชั่วโมงตลอดช่วงระยะเวลาตั้งแต่ปี ค.ศ. 2017 จนถึง 2024 ข้อมูลดิบเหล่านี้ได้ถูกจัดเก็บและบันทึกในรูปแบบตารางอย่างเป็นระบบ จากนั้นผู้วิจัยได้นำข้อมูลทั้ง 4 องค์ประกอบมาคำนวณค่ารังสีสุทธิ โดยใช้สมการพื้นฐานของพลังงานสุทธิที่พื้นผิวโลก ซึ่งพิจารณาจากสมดุลระหว่างรังสีขาเข้าและรังสีขาออก ทั้งในส่วนของการคลื่นสั้นและคลื่นยาว เพื่อให้มั่นใจว่าข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์มีคุณภาพและความน่าเชื่อถือ ผู้วิจัยได้ดำเนินการควบคุมคุณภาพข้อมูล (Quality control) อย่างรอบคอบ โดยตัดข้อมูลที่แสดงค่าผิดปกติหรือค่าที่อยู่นอกช่วงความเป็นไปได้ทางฟิสิกส์ออกจากชุดข้อมูล ก่อนนำมาวิเคราะห์ต่อไป

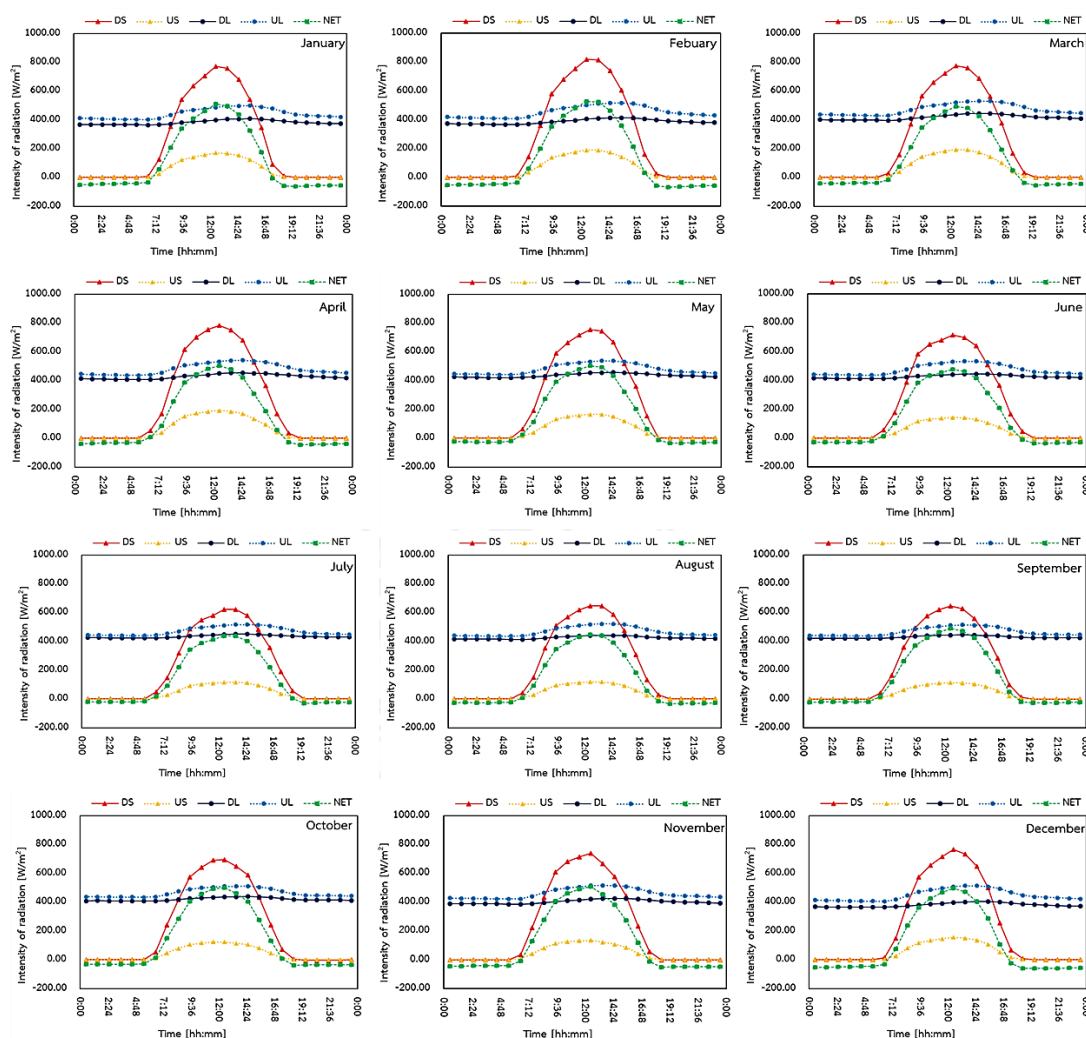
หลังจากผ่านกระบวนการกรองข้อมูลแล้ว ข้อมูลรังสีแต่ละองค์ประกอบ รวมถึงค่ารังสีสุทธิ ถูกนำมาคำนวณเป็นรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนในระยะยาว (Long-term monthly hourly average) จากนั้นจึงทำการเขียนกราฟแสดงค่ารังสีรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน สำหรับแต่ละสถานีตรวจวัด เพื่อใช้ในการวิเคราะห์แนวโน้มการแปรผันของรังสีสุทธิในระดับรายชั่วโมง และระบุช่วงเวลาที่มีการรับพลังงานจากรังสีสูงสุด-ต่ำสุดในแต่ละเดือน ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 25 ถึง 28



รูปที่ 25 ค่ารังสีคลื่นสั้นขาลง (DS) รังสีคลื่นสั้นขาขึ้น (US) รังสีคลื่นยาวขาลง (DL) รังสีคลื่นยาวขาขึ้น (UL) และรังสีสุทธิ (NET) รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาวที่สถานีเชียงใหม่

จากรูปที่ 25 ซึ่งแสดงลักษณะการแปรค่ารายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาวขององค์ประกอบรังสีที่สถานีเชียงใหม่ ได้แก่ รังสีคลื่นสั้นขาลง (DS) รังสีคลื่นสั้นขาขึ้น (US) รังสีคลื่นยาวขาลง (DL)

รังสีคลื่นยาวขาขึ้น (UL) และรังสีสุทธิ (NET) สามารถสรุปลักษณะการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของวัน ได้ดังนี้ รังสีคลื่นสั้นขาลง (DS) แสดงลักษณะชัดเจนของการเพิ่มขึ้นตั้งแต่เช้าประมาณ 07:00 น. จนมีค่าสูงสุดในช่วง 12:00–13:00 น. และลดลงจนเกือบเป็นศูนย์หลัง 18:00 น. โดยแปรผันตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์และความยาวนานในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล รังสีคลื่นสั้นขาขึ้น (US) มีลักษณะการแปรค่าคล้าย DS แต่ค่าต่ำกว่าอย่างมาก ซึ่งเป็นผลมาจากการสะท้อนกลับของรังสีจากพื้นผิวโลก โดยมีลักษณะสูงขึ้นในช่วงกลางวันและลดลงในช่วงเย็นเช่นเดียวกับ DS ถัดมารังสีคลื่นยาวขาลง (DL) มีค่าตลอด 24 ชั่วโมง แสดงให้เห็นถึงการแผ่รังสีจากชั้นบรรยากาศสู่พื้นผิวโลก ซึ่งได้รับอิทธิพลจากองค์ประกอบของบรรยากาศ เช่น ไอน้ำ เมฆ และความชื้น ค่าจะสูงขึ้นเล็กน้อยในช่วงกลางวัน และต่ำลงในเวลากลางคืน โดยลักษณะการเปลี่ยนแปลงจะอยู่ในช่วงที่แคบกว่ารังสีคลื่นสั้น รังสีคลื่นยาวขาขึ้น (UL) เป็นรังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิวดิน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิผิวดินโดยตรง โดยมีค่าสูงสุดในช่วงบ่าย (13:00–14:00 น.) และลดลงในช่วงกลางคืน ซึ่งบอกถึงพลังงานความร้อนที่แผ่ออกจากพื้นในแต่ละช่วงของวัน และสุดท้าย รังสีสุทธิ (NET) ซึ่งคำนวณจากสมการ (5) ที่แสดงไว้ในส่วนต้น พบว่าค่าจะเริ่มเพิ่มขึ้นในช่วงเช้าประมาณ 07:00 น. มีค่าสูงสุดในช่วงก่อนเที่ยงถึงบ่ายโมง (11:00–13:00 น.) จากนั้นค่าจะลดลงตามลำดับจนมีค่าเป็นลบในช่วงค่ำถึงกลางคืน ซึ่งแสดงถึงการสูญเสียพลังงานจากพื้นผิวโลกสู่บรรยากาศ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าช่วงปลายฤดูร้อนและต้นฤดูฝน โดยเฉพาะในช่วงเดือนพฤษภาคม มีค่ารังสีสุทธิรายชั่วโมงสูงสุดในช่วงกลางวันราว 12:00–13:00 น. เนื่องจากดวงอาทิตย์อยู่ใกล้จุดสูงสุดในรอบปี ทำให้มุมตกกระทบของแสงมีค่าสูงสุด ประกอบกับมีเมฆน้อย ส่งผลให้พลังงานสุทธิที่พื้นผิวโลกได้รับมีค่าสูงอย่างชัดเจน และค่ารังสีสุทธิต่ำที่สุดในช่วงกลางคืน (00:00–06:00 น. หรือหลัง 18:00–24.00 น.) จะสังเกตชัดในช่วงเดือนธันวาคม ซึ่งเป็นฤดูหนาวของประเทศไทย โดยเฉพาะที่สถานีเชียงใหม่จะมีการรับพลังงานในช่วงกลางวันเก็บสะสมไว้มาก ทำให้การแผ่รังสีความร้อนออกจากพื้นผิวมีค่ามาก ประกอบกับช่วงเวลากลางคืนไม่มีรังสีคลื่นสั้นมาส่งผลให้ค่ารังสีสุทธิกลายเป็นลบอย่างเด่นชัด

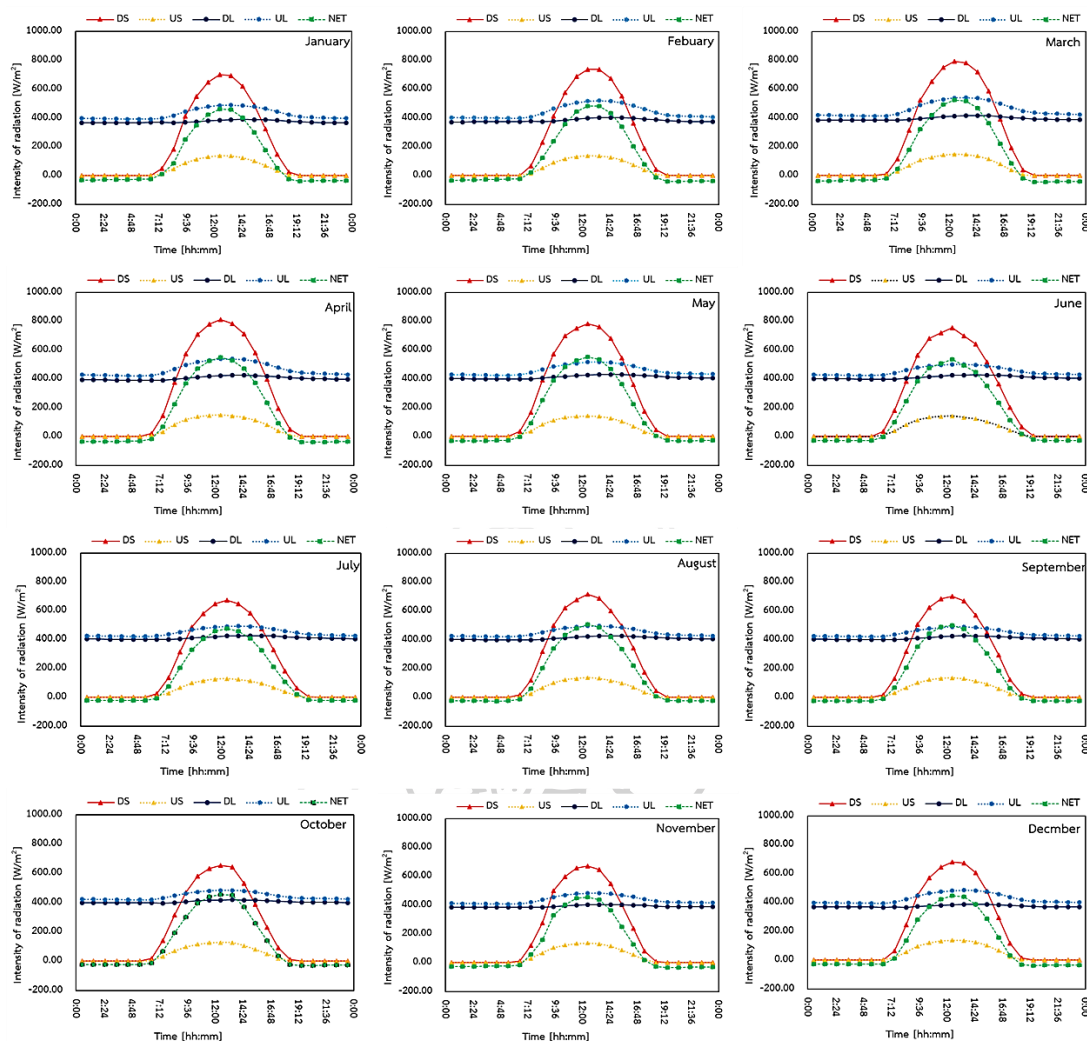


รูปที่ 26 ค่ารังสีคลื่นสั้นขาลง (DS) รังสีคลื่นสั้นขาขึ้น (US) รังสีคลื่นยาวขาลง (DL) รังสีคลื่นยาวขาขึ้น (UL) และรังสีสุทธิ (NET) รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาวที่สถานีอุบลราชธานี

จากรูปที่ 26 พบว่า การแปรค่ารายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน ขององค์ประกอบรังสีที่สถานีอุบลราชธานี โดยรวมมีลักษณะคล้ายคลึงกับสถานีเชียงใหม่ (รูปที่ 25) แต่มีความแตกต่างในบางประเด็นที่น่าสนใจ โดยสามารถสรุปได้ดังนี้ ค่ารังสีคลื่นสั้นขาลง (DS) ของสถานีอุบลราชธานีจะเพิ่มขึ้นตั้งแต่ประมาณ 06:00–07:00 น. และมีค่าสูงสุดในช่วงประมาณ 12:00–13:00 น. ลักษณะเช่นนี้สอดคล้องกับสถานีเชียงใหม่ อย่างไรก็ตามค่าสูงสุดในช่วงปลายฤดูร้อนของสถานีอุบลราชธานีมีค่าต่ำกว่าสถานี CM เล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากปริมาณเมฆที่มากในฤดูฝน เนื่องจากภาคตะวันออกเฉียงเหนือได้รับผลกระทบจากร่องมรสุม ถัดมารังสีคลื่นสั้นขาขึ้น (US) มีลักษณะเปลี่ยนแปลงตามรังสีคลื่นสั้นขาลง เช่นเดียวกับที่สถานีเชียงใหม่ โดยมีค่าที่ต่ำกว่าชัดเจนตามลักษณะ

การสะท้อนกลับจากพื้นผิว ความแตกต่างของระหว่างสถานีเชียงใหม่ และ สถานีอุบลราชธานี ไม่เด่นชัดนักเมื่อสังเกตจากกราฟ แต่ค่ารังสีที่สะท้อนขึ้นนั้นอาจขึ้นอยู่กับอิทธิพลจากความชื้นในดินหรือชนิดพืชพรรณที่ทั้งสองพื้นที่มีลักษณะที่แตกต่างกัน ถัดมารังสีคลื่นยาวขาลง (DL) สถานีอุบลราชธานีมีค่า DL ที่สูงกว่าเชียงใหม่เล็กน้อยในบางเวลา โดยเฉพาะในฤดูฝนและฤดูหนาว ซึ่งอาจสะท้อนถึงปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่มากกว่าในเดือนที่มีเมฆฝน ความแตกต่างนี้อาจมีผลต่อสมดุลพลังงานในช่วงกลางวันด้วย ในส่วนของรังสีคลื่นยาวขาขึ้น (UL) ที่สถานีอุบลราชธานีมีพฤติกรรมสอดคล้องกับ DL และมีการแปรค่ารายชั่วโมงที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิพื้นผิวเช่นเดียวกับสถานีเชียงใหม่ โดยค่าจะสูงขึ้นในช่วงกลางวัน และลดลงในช่วงกลางคืน และสุดท้ายค่ารังสีสุทธิ (NET) ที่สถานีอุบลราชธานีมีลักษณะคล้ายกับที่สถานีเชียงใหม่ โดยมีค่าสูงสุดในช่วงกลางวัน (12:00–13:00 น.) และติดลบในช่วงเวลากลางคืน อย่างไรก็ตามความแตกต่างที่สังเกตได้คือค่าสูงสุดของ NET ในช่วงปลายฤดูร้อนของสถานีอุบลราชธานีมีค่าต่ำกว่าสถานีเชียงใหม่ อาจเนื่องจากมีเมฆมาก ค่าต่ำสุดของ NET ในช่วงกลางคืนมีแนวโน้มที่จะมีค่าติดลบน้อยกว่าสถานีเชียงใหม่ สะท้อนถึงความสามารถของบรรยากาศในภาคอีสานที่อาจกักเก็บความร้อนได้ดีกว่าในบางเดือน ซึ่งสัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงกว่า



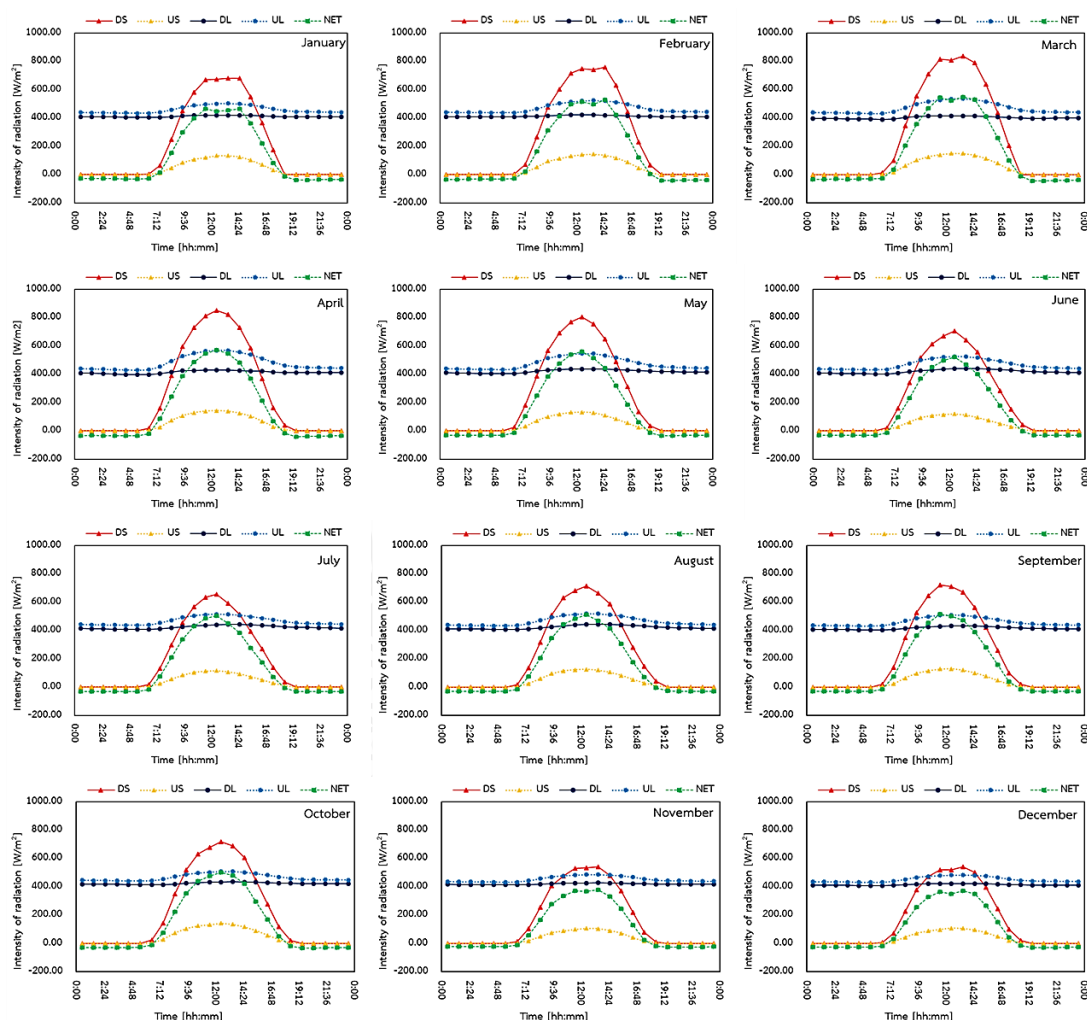


รูปที่ 27 ค่ารังสีคลื่นสั้นขาลง (DS) รังสีคลื่นสั้นขาขึ้น (US) รังสีคลื่นยาวขาลง (DL) รังสีคลื่นยาวขาขึ้น (UL) และรังสีสุทธิ (NET) รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาวที่สถานีนครปฐม

จากรูปที่ 27 แสดงการแปรค่าขององค์ประกอบของรังสีต่าง ๆ รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีนครปฐม รังสีคลื่นสั้นขาลง (DS) มีลักษณะการแปรค่าสอดคล้องกับสองสถานีที่ผ่านมา โดยมีค่าสูงสุดในช่วงกลางวันราว 12:00 น. และต่ำที่สุดในช่วงกลางคืน โดยเฉพาะในช่วงฤดูร้อน (เมษายน-พฤษภาคม) ค่า DS จะขึ้นสูง เนื่องจากดวงอาทิตย์มีมุมตกกระทบใกล้ตั้งฉากกับพื้นผิวโลก ในภาคกลาง ในขณะที่ฤดูฝนและฤดูหนาว ค่าจะลดลงอย่างชัดเจนจากผลของเมฆและการลดลงของรังสีดวงอาทิตย์ รังสีคลื่นสั้นขาขึ้น (US) มีค่าแปรตาม DS อย่างชัดเจน แต่มีค่าต่ำกว่าตลอดทั้งวัน เป็นผลจากการสะท้อนกลับของรังสีคลื่นสั้นที่พื้นผิว ซึ่งในพื้นที่ภาคกลางอาจประกอบด้วยพื้นดินหรือสิ่งปลูกสร้างที่มี Albedo ไม่สูงมาก สำหรับรังสีคลื่นยาวขาลง (DL) มีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับ

สถานีอื่น โดยเฉพาะในช่วงเวลากลางคืน ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ $300\text{--}400\text{ W/m}^2$ ซึ่งสูงกว่าสถานี เชียงใหม่และอุบลราชธานีเล็กน้อย สะท้อนถึงความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงกว่าและอุณหภูมิอากาศที่อาจสูงกว่า ต่อมารังสีคลื่นยาวขาขึ้น (UL) มีลักษณะคล้าย DL โดยจะสูงสุดในช่วงกลางวัน และลดลงในช่วง กลางคืน การเปลี่ยนแปลงตลอดวันแสดงความสัมพันธ์กับอุณหภูมิผิวดินซึ่งได้รับผลกระทบจากการ สะสมพลังงานในเวลากลางวัน และสุดท้ายรังสีสุทธิ (NET) ที่สถานีนครปฐมมีค่าสูงสุดในช่วงกลางวัน โดยเฉพาะช่วง 11:00–13:00 น. และมีค่าติดลบในช่วงกลางคืน ลักษณะการแปรค่าคล้ายคลึงกับทั้ง สถานีเชียงใหม่และอุบลราชธานี แต่มีข้อแตกต่างที่สำคัญคือ ค่าสูงสุดของ NET ที่สถานีนครปฐมใน ปลายฤดูร้อนมีแนวโน้มสูงกว่าทั้งสองสถานีเล็กน้อย สะท้อนถึงปริมาณรังสีสุทธิที่ได้รับในช่วงเวลา กลางวันอันเนื่องมาจากตำแหน่งทางภูมิศาสตร์และสภาพภูมิอากาศที่เอื้ออำนวยต่อการรับพลังงาน ดวงอาทิตย์





รูปที่ 28 ค่ารังสีคลื่นสั้นขาลง (DS) รังสีคลื่นสั้นขาขึ้น (US) รังสีคลื่นยาวขาลง (DL) รังสีคลื่นยาวขาขึ้น (UL) และรังสีสุทธิ (NET) รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาวที่สถานีสงขลา

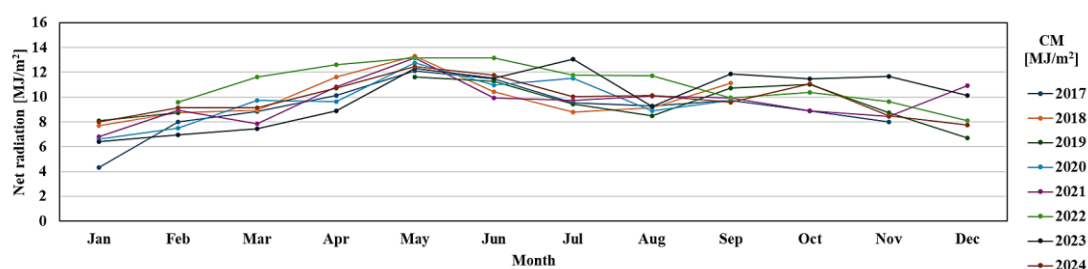
จากรูปที่ 28 แสดงลักษณะการแปรค่าขององค์ประกอบรังสีต่าง ๆ รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีสงขลาพบว่า รังสีคลื่นสั้นขาลง (DS) ที่สถานีสงขลา มีลักษณะการแปรค่า โดยจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตั้งแต่เวลาประมาณ 06:00–07:00 น. จนมีค่าสูงสุดในช่วง 12:00–13:00 น. และค่อย ๆ ลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ในช่วงเวลา 18:00–19:00 น. ลักษณะการเปลี่ยนแปลงนี้เกิดขึ้นสม่ำเสมอในทุกเดือน โดยค่าสูงสุดของ DS สูงสองช่วงในรอบปี ได้แก่ ช่วงเดือนมีนาคม–เมษายน และช่วงเดือนสิงหาคม–ตุลาคม ซึ่งเป็นผลจากการที่พื้นที่อยู่ในเขตละติจูดต่ำได้รับแสงอาทิตย์ด้วยมุมตกกระทบในแนวตั้งฉากสองครั้งต่อปี (อิทธิพลจากทางเดินปรากฏของดวงอาทิตย์เหนือศูนย์สูตร) ต่อมารังสีคลื่นสั้นขาขึ้น (US) จะแปรผันตาม DS โดยเริ่มสูงขึ้นในช่วงเวลาเช้าและลดลงหลังเที่ยง ลักษณะกราฟมี

การแปรค่าคล้ายกันแต่ค่าต่ำกว่าชัดเจน เนื่องจากเป็นพลังงานสะท้อนจากพื้นดิน โดยอัตราส่วนระหว่าง US ต่อ DS บ่งบอกถึงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวที่สถานีนั่น ๆ ที่จะไม่เปลี่ยนแปลงมากในช่วงวันแต่จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปมากตามฤดูกาล รังสีคลื่นยาวขาลง (DL) มีค่าตลอดทั้ง 24 ชั่วโมง โดยมีค่าสูงในช่วงกลางคืน (00:00–06:00 น.) และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงกลางวัน (ประมาณ 10:00–14:00 น.) ค่ารังสี DL มีแนวโน้มสูงกว่าสถานีนอื่น ๆ ซึ่งสอดคล้องกับความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงและปริมาณไอน้ำในบรรยากาศที่หนาแน่นกว่าสถานีนอื่น ๆ ซึ่งเป็นตัวช่วยแผ่รังสีอินฟราเรดกลับสู่พื้นดินในเวลากลางคืน ในส่วนของรังสีคลื่นยาวขาขึ้น (UL) มีค่าตลอด 24 ชั่วโมงเช่นกัน โดยมีแนวโน้มต่ำในช่วงกลางคืน (โดยเฉพาะหลัง 00:00 น.) และค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 07:00 น. มีค่าสูงสุดในช่วง 13:00–14:00 น. สอดคล้องกับอุณหภูมิพื้นผิวที่สูงที่สุดในช่วงบ่ายก่อนที่จะแสงแดดจะลดลง และสุดท้ายรังสีสุทธิ (NET) ที่สถานีสงขลาเริ่มมีค่าบวกในช่วงเช้า (07:00 น.) เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และมีค่าสูงสุดในช่วง 11:00–13:00 น. จากนั้นจะลดลงจนกลายเป็นค่าติดลบในช่วงเย็น (หลัง 18:00 น.) และติดลบตลอดช่วงกลางคืน อย่างไรก็ตามค่าลบในช่วงกลางคืนของสงขลาจะมีค่าติดลบน้อยกว่าสถานีเชียงใหม่ แสดงถึงการสูญเสียพลังงานสุทธิที่น้อยลง อันเนื่องมาจากความชื้นในบรรยากาศที่สูง ซึ่งช่วยกักเก็บและแผ่รังสีกลับลงมาได้ดี

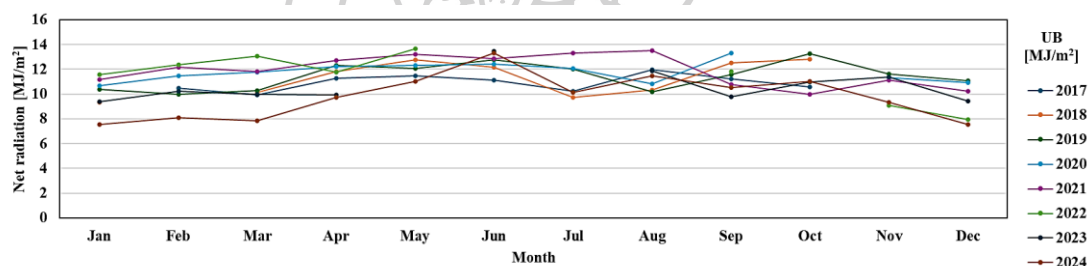


4.1.2 การแปรค่ารังสีสุทธิตายวันเฉลี่ยต่อเดือน

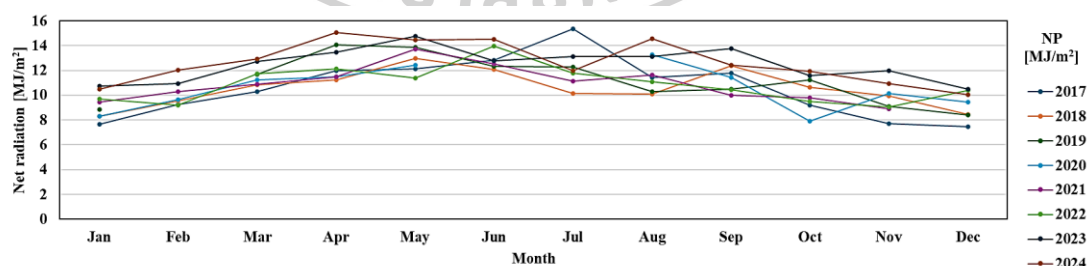
นอกจากค่ารังสีสุทธิตายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนที่ผู้วิจัยศึกษาการแปรค่าแล้ว ผู้วิจัยได้นำข้อมูลรังสีสุทธิตายชั่วโมงมาหาผลรวมและแปลงให้เป็นค่ารังสีสุทธิตายวันในหน่วยเมกะจูลต่อตารางเมตร (MJ/m^2) จากนั้นทำการเฉลี่ยตลอดทั้งเดือนและเขียนกราฟแสดงการแปรค่ารังสีสุทธิตายวันเฉลี่ยต่อเดือนของแต่ละปีจาก 4 สถานีหลัก ผลที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 29 ถึง 32



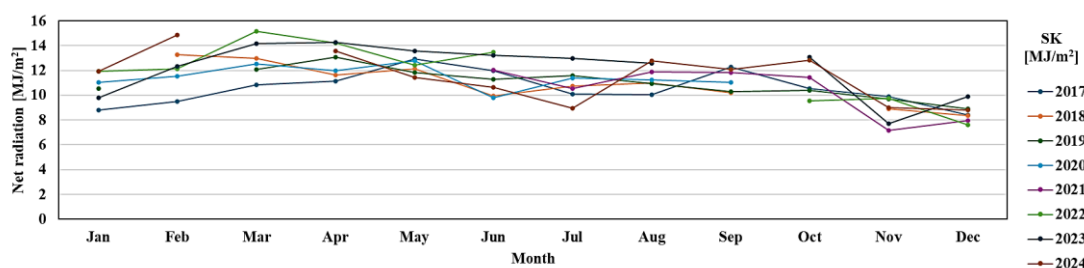
รูปที่ 29 การแปรค่ารังสีสุทธิตายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีเชียงใหม่ระหว่างปี ค.ศ. 2017-2024



รูปที่ 30 การแปรค่ารังสีสุทธิตายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีอุบลราชธานีระหว่างปี ค.ศ. 2017-2024



รูปที่ 31 การแปรค่ารังสีสุทธิตายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีนครพนมระหว่างปี ค.ศ. 2017-2024

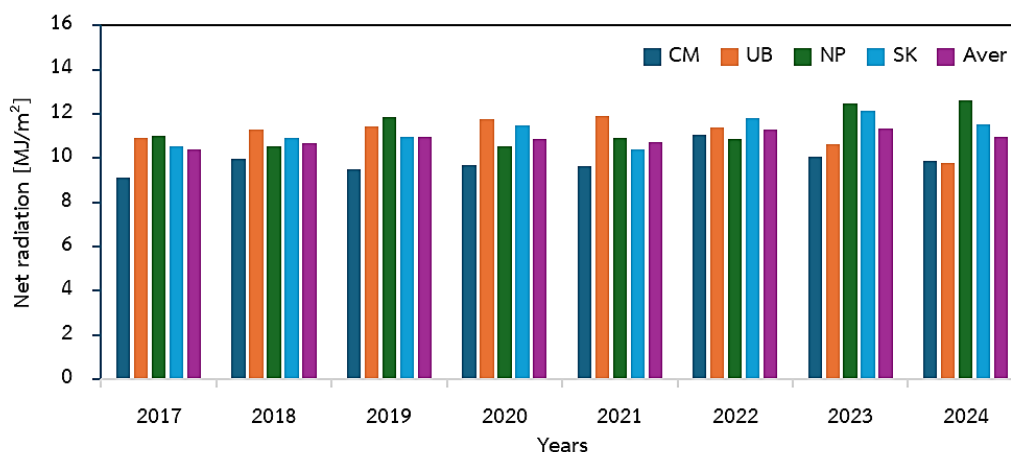


รูปที่ 32 การแปรค่ารังสีสุทธิรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของสถานีสงขลา ระหว่างปี ค.ศ. 2017-2024

จากรูปที่ 29 แสดงการแปรค่ารังสีสุทธิรายวันเฉลี่ยต่อเดือนระหว่างปี ค.ศ. 2017-2024 ของสถานีเชียงใหม่พบว่ามีค่าสูงสุดในเดือนพฤษภาคม โดยมีค่าประมาณ 11-13 MJ/m² ในหลายปี และมีค่าต่ำสุดอยู่ในช่วงเดือนธันวาคม-มกราคม ซึ่งมีค่าประมาณ 6-8 MJ/m² โดยสังเกตได้ว่ากราฟมีลักษณะรูปแบบเดียวกันทุกปี กล่าวคือรังสีสุทธิค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจากเดือนมกราคม จนสูงสุดในเดือนพฤษภาคม (ต้นฤดูฝน) และค่อย ๆ ลดลงในฤดูฝน (มิถุนายน-ตุลาคม) สำหรับสถานีอุบลราชธานี (รูปที่ 30) พบว่ามีลักษณะคล้ายกับสถานีเชียงใหม่ คือช่วงเดือนเมษายน-พฤษภาคมค่ารังสีสุทธิสูงสุด ประมาณ 12-13 MJ/m² และมีค่าต่ำสุดอยู่ในช่วงเดือนธันวาคม-มกราคม (ประมาณ 8-10 MJ/m²) แต่แต่ละปีจะมีกราฟลักษณะเดียวกัน แต่ค่าต่ำสุดในช่วงฤดูหนาวมีค่าสูงกว่าสถานีเชียงใหม่ ในด้านสถานีนครปฐม (รูปที่ 31) พบว่าค่ารังสีสุทธิมีค่าสูงสุดในช่วงเดือนเมษายน-พฤษภาคม ซึ่งเป็นช่วงที่ค่าสูงที่สุดในบรรดา 4 สถานี บางปีสูงถึง 14-15 MJ/m² และมีค่าต่ำสุดในช่วงเดือนธันวาคม-มกราคม (ประมาณ 8-10 MJ/m²) และพบว่ามีค่าสูงสุดที่สูงกว่าสถานีอื่น ๆ ในช่วงฤดูร้อน และสุดท้ายสำหรับสถานีสงขลา (รูปที่ 32) พบว่าค่ารังสีสุทธิมีค่าสูงสุดสองครั้งในรอบปี โดยมักจะอยู่ในช่วงเดือนมีนาคม-เมษายน และอีกครั้งในเดือนสิงหาคม-ตุลาคม โดยมีค่าประมาณ 12-14 MJ/m² และมีค่าต่ำสุดในช่วงเดือนพฤศจิกายน-ธันวาคม (บางปีลดลงเหลือ 7-8 MJ/m²) ซึ่งเป็นผลมาจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ หากสังเกตจากกราฟจะพบว่าการแปรค่าตามฤดูกาลแตกต่างจากสถานีอื่นอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากสถานีสงขลาอยู่ใกล้เส้นศูนย์สูตรและได้รับอิทธิพลจากมรสุม จากการวิเคราะห์กราฟการแปรค่ารังสีสุทธิรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของแต่ละสถานีช่วยให้เข้าใจถึงลักษณะเฉพาะทางภูมิอากาศของแต่ละภูมิภาคของประเทศไทย และเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ เช่น พลังงาน การเกษตร และการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

4.1.3 การแปรค่ารังสีสุทธิเฉลี่ยรายปี

ผู้วิจัยทำการศึกษาการแปรค่ารังสีสุทธิรายปี โดยผู้วิจัยได้นำค่ารังสีสุทธิรายวันมาทำการเฉลี่ยตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม ถึง 31 ธันวาคม ของแต่ละปี จากนั้นทำการเขียนกราฟดูการแปรค่ารังสีสุทธิในแต่ละปีเปรียบเทียบกับกัน 4 สถานี ผลที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 33



รูปที่ 33 การแปรค่ารังสีสุทธิเฉลี่ยรายปีโดยแสดงค่าระหว่างปี ค.ศ. 2017-2024 ของสถานีเชียงใหม่ อุบลราชธานี นครปฐม และสงขลา

จากรูปที่ 33 สังเกตได้ว่าสถานีนครปฐม (NP) มีค่ารังสีสุทธิค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับสถานีอื่น ๆ โดยเฉพาะในปี 2019 และ 2023 ซึ่งเป็นปีที่มีค่าสูงที่สุด (ประมาณ 12 MJ/m²) มีความผันแปรบ้าง แต่โดยรวมแล้วมีแนวโน้มรังสีสุทธิค่อนข้างสูง สำหรับสถานีอุบลราชธานี (UB) มีค่ารังสีสุทธิค่อนข้างคงที่ ประมาณ 11-12 MJ/m² ไม่มีความผันผวนมากนัก แสดงให้เห็นถึงความสม่ำเสมอของรังสีสุทธิ ในด้านสถานีสงขลา (SK) มีค่ารังสีสุทธิที่ค่อนข้างต่ำในปี 2017 และ 2018 (ประมาณ 10 MJ/m²) และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในช่วงปี 2021-2023 โดยเฉพาะในปี 2022 และ 2023 ที่มีค่าสูงถึงประมาณ 12 MJ/m² ซึ่งใกล้เคียงหรือสูงกว่าสถานีอื่น ๆ ในบางปี และสุดท้ายสถานีเชียงใหม่ (CM) มีค่ารังสีสุทธิที่ต่ำที่สุดในช่วงปีแรก ๆ (2017-2018) ประมาณ 9-10 MJ/m² และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงหลังมีค่าอยู่ในช่วง 10-11 MJ/m² ในปี 2022-2023 และเมื่อดูภาพรวมทั่วประเทศจากค่าเฉลี่ยพบว่าค่าเฉลี่ยรวมของรังสีสุทธิของทั้ง 4 สถานีมีค่าค่อนข้างคงที่ประมาณ 11 MJ/m² แสดงถึงแนวโน้มโดยรวมที่ค่อนข้างคงที่ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญในภาพรวม

4.2 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับประมาณค่ารังสีสุทธิ

หลังจากศึกษาลักษณะทางสถิติของรังสีสุทธิแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการประมาณค่ารังสีสุทธิจากข้อมูลอุตุนิยมวิทยาโดยใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งเป็นแบบจำลองที่จัดการกับความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ดีมาก ไม่ต้องกำหนดสมการล่วงหน้า เรียนรู้จากข้อมูลปริมาณมากได้ และ มีความยืดหยุ่นสูง ปรับขนาดและโครงสร้างของแบบจำลองได้ โดยในงานนี้ใช้ตัวแปรอุตุนิยมวิทยาเป็นตัวแปรอินพุตซึ่งอ้างอิงตัวแปรจากงานวิจัยที่ผ่านมา ผลที่ได้สามารถแสดงได้ดังนี้

4.2.1 ตัวแปรอินพุตในแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยใช้ตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยาเป็นตัวแปรอินพุต ประกอบด้วย รังสีคลื่นสั้นขา
ลง (S_g) ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) และอุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด (T_{max}, T_{min}) โดยตัวแปรเหล่านี้มีความสัมพันธ์กับรังสีสุทธิ โดยลักษณะของข้อมูลอินพุตสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ทางอุตุนิยมวิทยาที่ใช้ในแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

สถานี	พารามิเตอร์ทาง อุตุนิยมวิทยา	ปริมาณ			ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	
CM	อุณหภูมิอากาศสูงสุด (°C)	42.2	20	33.77	2.91
	อุณหภูมิอากาศต่ำสุด (°C)	29	10.5	23.02	3.07
	รังสีคลื่นสั้นขา ลง (MJ/m^2)	27.89	1.79	17.77	4.45
	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	94	36	69.97	10.65
UB	อุณหภูมิอากาศสูงสุด (°C)	40.9	17.8	33.62	2.84
	อุณหภูมิอากาศต่ำสุด (°C)	28.7	9.5	22.68	3.08
	รังสีคลื่นสั้นขา ลง (MJ/m^2)	27.81	2.27	18.91	4.36
	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	97	53	75.97	9.06

ตารางที่ 3 (ต่อ)

สถานี	พารามิเตอร์ทาง อุตุนิยมวิทยา	ปริมาณ			ส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน
		ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	
NP	อุณหภูมิอากาศสูงสุด (°C)	41.1	20.6	33.73	2.74
	อุณหภูมิอากาศต่ำสุด (°C)	29.2	11.7	23.7	2.65
	รังสีคลื่นสั้นขาหลง (MJ/m ²)	27.65	1.29	18.25	4.62
	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	99	53	78.9	7.02
SK	อุณหภูมิอากาศสูงสุด (°C)	41.1	24.5	32.64	2.29
	อุณหภูมิอากาศต่ำสุด (°C)	28.4	21.9	25.39	1.01
	รังสีคลื่นสั้นขาหลง (MJ/m ²)	28.32	0.45	19.09	5.54
	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	95	64	78.88	5.25

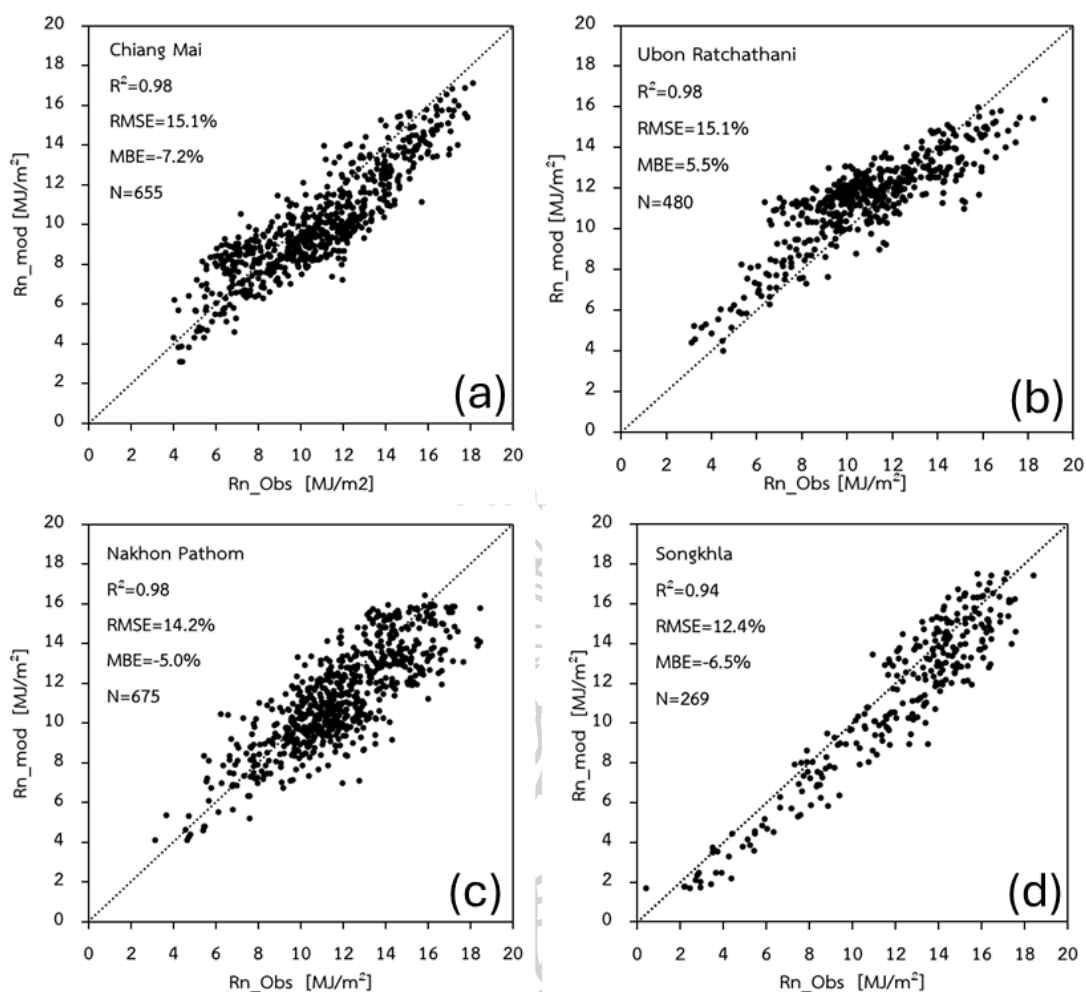
จากตารางที่ 3 ข้อมูลพารามิเตอร์ทางอุตุนิยมวิทยาจาก 4 สถานี (CM, UB, NP, SK) สะท้อนถึงความหลากหลายทางภูมิอากาศของประเทศไทยที่ครอบคลุมทั้งภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลาง และภาคใต้ โดยที่สถานีเชียงใหม่มีอุณหภูมิอากาศสูงสุด มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 33.77°C ค่าสูงสุดเท่ากับ 42.20°C ซึ่งแสดงถึงช่วงฤดูร้อนที่ร้อนจัดของภาคเหนือ โดยเฉพาะในเดือนเมษายน อุณหภูมิอากาศต่ำสุด มีค่าเฉลี่ย 23.02°C ค่าต่ำสุดถึง 10.50°C ซึ่งแสดงถึงอิทธิพลของฤดูหนาวที่หนาวเย็น โดยเฉพาะในเดือนธันวาคม-มกราคม รังสีคลื่นสั้นขาหลง เฉลี่ยอยู่ที่ 17.77 MJ/m² โดยมีความผันแปรสูง (S.D. = 4.45) MJ/m² แสดงถึงการแปรปรวนของปริมาณแสงแดดที่ได้รับ โดยเฉพาะระหว่างฤดูฝนกับฤดูร้อน และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 69.97% แสดงถึงลักษณะอากาศที่แห้งกว่าภาคอื่น โดยมีความชื้นต่ำในฤดูหนาวและฤดูร้อน ถัดมาสถานีอุบลราชธานีมีค่าอุณหภูมิสูงสุด เฉลี่ย 33.62°C ค่าสูงสุด 40.90°C ใกล้เคียงกับ CM อุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ย 22.68°C ค่าต่ำสุด 9.50°C ต่ำที่สุดในทุกสถานี รังสีคลื่นสั้นขาหลงเฉลี่ย 18.91 MJ/m² สูงกว่าสถานี CM เล็กน้อย และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 75.97% สูงกว่าสถานี CM ชัดเจน โดยเฉพาะในฤดูฝน ในด้านของสถานีนครปฐมมีค่าอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ย 33.73°C ค่าสูงสุด 41.10°C แสดงถึงฤดูร้อนที่ร้อนจัดมากในพื้นที่

ภาคกลาง อุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ย 23.70°C , ค่าต่ำสุด 11.70°C มีช่วงอุณหภูมิแคบกว่าสถานีเชียงใหม่ และสถานีอุบลราชธานี รังสีคลื่นสั้นขาหลง มีค่าค่อนข้างสูงตลอดปี และความชื้นสัมพัทธ์ เฉลี่ย $\sim 70-75\%$ อยู่ในระดับปานกลางค่อนข้างสูง และสุดท้ายในส่วนของการสถานีสงขลามีค่าอุณหภูมิสูงสุด/ต่ำสุด เฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณ $30-33^{\circ}\text{C}$ และ $23-25^{\circ}\text{C}$ สะท้อนลักษณะภูมิอากาศร้อนชื้นแบบชายฝั่งทะเล รังสีคลื่นสั้นขาหลงมีค่าเฉลี่ยสูงพอสมควร แม้จะมีเมฆมาก และความชื้นสัมพัทธ์สูงที่สุดในทุกสถานี (เฉลี่ย $\sim 80\%$) เป็นผลจากอิทธิพลของทะเลและฝนตลอดปี

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าพารามิเตอร์ทางอุตุนิยมวิทยาที่ใช้ในแบบจำลอง ANN ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด รังสีคลื่นสั้นขาหลง และความชื้นสัมพัทธ์ โดยแต่ละสถานีมีลักษณะเฉพาะ แตกต่างกันไป เช่น เชียงใหม่มีอุณหภูมิผันผวนสูงและความชื้นต่ำ อุบลราชธานีมีความชื้นสูงตลอดปี นครปฐมร้อนจัดในฤดูร้อน ส่วนสงขลามีอากาศร้อนชื้นคงที่และความชื้นสูงที่สุด ลักษณะเหล่านี้ส่งผลต่อรังสีสุทธิ

4.2.2 การสร้างและทดสอบแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

ผู้วิจัยนำข้อมูลรังสีสุทธิที่ได้จากการวัดและข้อมูลพารามิเตอร์ทางอุตุนิยมวิทยาระหว่างปี ค.ศ. 2017-2023 มาทำการแบ่งออกเป็นสองชุด ชุดที่ 1 (ระหว่างปี ค.ศ. 2017-2021) สำหรับฝึกสอน (Training) แบบจำลอง ชุดที่ 2 (ระหว่างปี ค.ศ. 2022-2023) สำหรับทดสอบแบบจำลอง (Testing) โดยโครงสร้างของแบบจำลองที่ผู้วิจัยใช้ในงานวิจัยนี้แสดงในรูปที่ 24 ในหัวข้อขั้นตอนการดำเนินงาน ซึ่งใช้จำนวนชั้นซ่อนทั้งหมด 2 ชั้น โดยชั้นแรกมี 8 โหนดและชั้นที่สองมี 3 โหนด และทำการฝึกสอนทั้งหมด 10,000 รอบ (Training time) จากนั้นนำแบบจำลองที่ผ่านการฝึกสอนแล้วนี้มาทำการทดสอบโดยประมาณค่ารังสีสุทธิจากข้อมูลอินพุตชุดใหม่ (ชุดที่ 2) และนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัดที่เวลาเดียวกัน ผลการเปรียบเทียบแสดงไว้ในรูปที่ 34



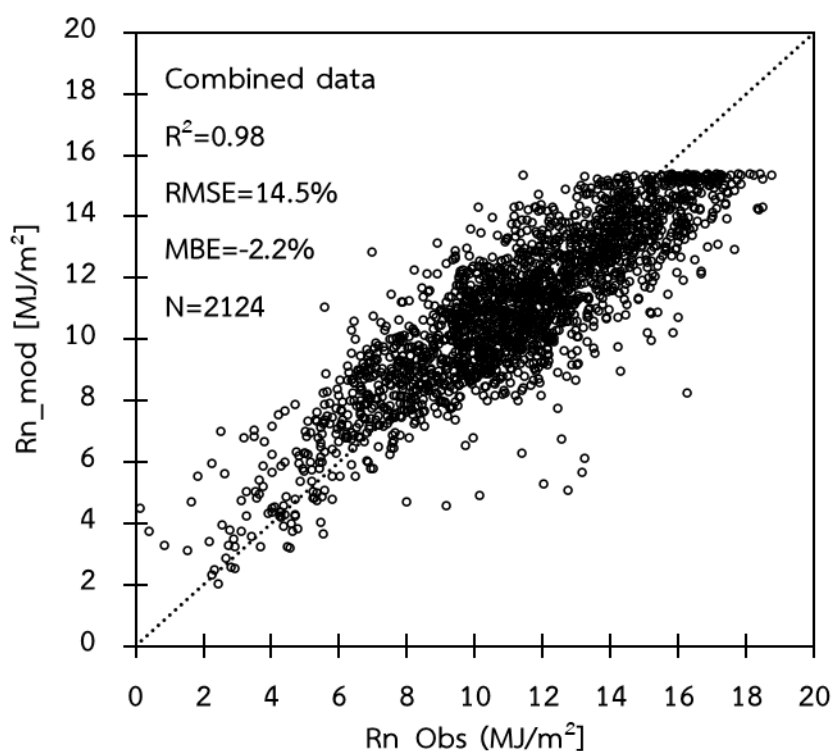
รูปที่ 34 ผลการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีสุทธิที่ได้จากจากวัด (R_{n_Obs}) ในแนวนอน X และรังสีสุทธิที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (R_{n_mod}) ในแนวนอน Y ของทั้ง 4 สถานีในประเทศไทย

จากรูปที่ 34 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมมีความสามารถในการทำนายค่ารังสีสุทธิได้ดี เนื่องจากจุดข้อมูลส่วนใหญ่กระจายตัวอยู่ใกล้เส้น 1:1 อย่างไรก็ตาม ยังมีรายละเอียดที่แตกต่างกันในแต่ละสถานี โดยสถานีเชียงใหม่ พบว่ามีค่า $R^2=0.98$ ซึ่งเป็นค่าที่สูงมาก แสดงว่าแบบจำลองสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลที่วัดได้ถึง 98% ซึ่งบ่งชี้ว่าแบบจำลองมีความแม่นยำสูงในการประมาณค่ารังสีสุทธิ มีค่า $RMSE = 15.1\%$ หมายความว่าค่าที่ทำนายโดยแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยประมาณ 15.1% ของค่าที่วัดได้และมีค่า $MBE = -7.2\%$ แสดงว่าแบบจำลองมีแนวโน้มที่จะทำนายค่ารังสีสุทธิต่ำกว่าค่าที่วัดจริง (Underestimation) สำหรับสถานีอุบลราชธานีมีค่า $R^2=0.98$ ซึ่งสูงมากแสดงถึงประสิทธิภาพการทำนายแนวโน้มที่ดีซึ่งมีค่า

$RMSE = 15.1\%$ เท่ากับสถานีเชียงใหม่ และมีค่า $MBE = 5.5\%$ แสดงว่าแบบจำลองมีแนวโน้มที่จะทำนายค่ารังสีสุทธิสูงกว่าค่าที่วัดจริง (Overestimation) ในด้านสถานีนครปฐม (NP) มีค่า $R^2 = 0.98$ ซึ่งสูงมาก บ่งชี้ถึงความสามารถในการทำนายแนวโน้มที่ดี มีค่า $RMSE = 14.2\%$ แสดงว่าแบบจำลองมีความแม่นยำในการทำนายค่ารังสีสุทธิที่นครปฐมได้ดี มีค่า $MBE = -5.0\%$ แสดงว่าแบบจำลองมีแนวโน้มที่จะทำนายค่าต่ำกว่าค่าที่วัดจริง และสุดท้ายสถานีสงขลามีค่า $R^2 = 0.94$ ซึ่งต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับสถานีอื่น ๆ แต่ก็ยังถือว่าสูงมากแสดงว่าแบบจำลองยังคงทำนายแนวโน้มได้ดี มีค่า $RMSE = 12.4\%$ บ่งชี้ว่าความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยน้อยและมีค่า $MBE = -6.5\%$ แสดงว่าแบบจำลองมีแนวโน้มที่จะทำนายค่าต่ำกว่าค่าที่วัดจริง

จากการวิเคราะห์ทุกสถานีสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแสดงประสิทธิภาพที่ดีในการทำนายค่ารังสีสุทธิสำหรับทั้ง 4 สถานีในประเทศไทย โดยมีค่า R^2 สูง (0.94-0.98) ซึ่งบ่งชี้ถึงความสามารถในการอธิบายความผันแปรของข้อมูล อย่างไรก็ตามยังคงมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง ซึ่งสะท้อนจากค่า $RMSE$ ที่อยู่ในช่วง 12.4% ถึง 15.1% และมีแนวโน้มการทำนายที่ต่ำกว่าค่าจริง (MBE ติดลบ) ในสถานีเชียงใหม่ นครปฐม และสงขลา ในขณะที่อุบลราชธานีมีแนวโน้มทำนายสูงกว่าเล็กน้อย สถานีสงขลาแสดงค่า $RMSE$ ที่ต่ำที่สุด ซึ่งบ่งบอกถึงความแม่นยำในการทำนายค่าที่ใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด แม้ว่าสงขลาจะมีค่า R^2 ต่ำที่สุดก็ตาม การที่จุดข้อมูลกระจายตัวรอบเส้น 1:1 บ่งชี้ว่าแบบจำลองมีสัมพันธระหว่างตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตได้ดี

นอกจากพิจารณาแต่ละสถานีแล้ว ผู้วิจัยยังได้ทำการพิจารณาแบบจำลองที่สามารถใช้งานได้ทั่วประเทศโดยการนำข้อมูลจากทั้ง 4 สถานีมารวมกัน (Combined data) และทำการฝึกสอนและทดสอบแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเหมือนกันกับขั้นตอนก่อนหน้านี้ ผลการเปรียบเทียบค่ารังสีสุทธิที่ได้จากแบบจำลอง และรังสีสุทธิที่ได้จากการวัดแสดงไว้ในรูปที่ 35



รูปที่ 35 การเปรียบเทียบค่ารังสีสุทธิจากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมกับค่ารังสีสุทธิที่ได้จากการวัด (รวมข้อมูลจากทั้ง 4 สถานี)

จากรูปที่ 35 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างรังสีสุทธิที่ได้จากการวัดและรังสีสุทธิที่ได้จากแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลรวมทั้ง 4 สถานีพบว่ารังสีสุทธิกระจายตัวอยู่รอบเส้นประ 1:1 ซึ่งบ่งชี้ว่าแบบจำลองสามารถทำนายค่ารังสีสุทธิได้ค่อนข้างดีและสอดคล้องกับค่าที่วัดได้จริง การกระจายตัวของจุดข้อมูลค่อนข้างหนาแน่นบริเวณค่ารังสีสุทธิตั้งแต่ปานกลางถึงสูง (ประมาณ 8-16 MJ/m²) และเริ่มบางลงเมื่อเข้าใกล้ค่าต่ำ (2-6 MJ/m²) โดยค่า $R^2 = 0.98$ ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ดีระหว่างค่าที่วัดได้และค่าที่ได้จากการประมาณโดยมีค่า $RMSE = 14.5\%$ และมีค่า $MBE = -2.2\%$ ซึ่งค่าติดลบนี้บ่งบอกว่าโดยเฉลี่ยแล้วแบบจำลองมีแนวโน้มที่จะทำนายค่าต่ำกว่าค่าที่วัดได้จริงเล็กน้อย ค่า bias นี้อยู่ในระดับที่ค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับรายสถานีบางแห่งที่เคยวิเคราะห์ก่อนหน้านี้ (เช่น เชียงใหม่ -7.2% และสงขลา -6.5%) แสดงให้เห็นว่าเมื่อรวมข้อมูลจากหลายสถานี อาจช่วยลดความเอนเอียงโดยรวมลงได้ ในส่วนของลักษณะกราฟที่เกิดการตัดขึ้น (แบบจำลองประมาณค่าได้ไม่เกิน 16 MJ/m²) สาเหตุอาจเกิดมาจากการฝึกสอนมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ (Skewed

Training data distribution) โดยข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนจะมีการกระจุกตัวอยู่ในแค่บางช่วง และมีจำนวนข้อมูลน้อยมากในบางค่า เช่น ค่ารังสีสุทธิตี่สูงมากหรือต่ำมาก ทำให้แบบจำลองไม่ได้รับการ "เรียนรู้" เพียงพอสำหรับค่าสูง ๆ เมื่อแบบจำลองพบข้อมูลอินพุตที่สูงกว่าช่วงที่ฝึกสอน จึงมีแนวโน้มที่จะทำนายค่าที่ใกล้เคียงกับค่าสูงสุดที่เคยเรียนรู้มา

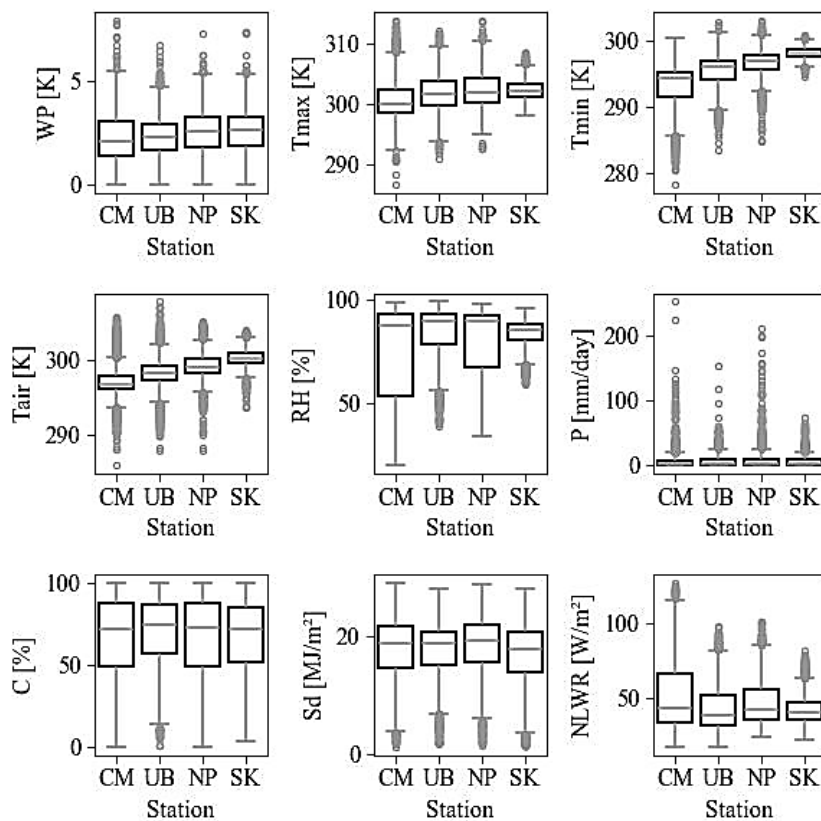
จากการวิเคราะห์ที่ผ่านมาสามารถสรุปได้ว่า การรวมข้อมูลจากทั้ง 4 สถานีเพื่อสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม ผลการเปรียบเทียบพบว่ามีค่า R^2 สูงถึง 0.98 ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความสามารถของแบบจำลองในการหาความสัมพันธ์ของข้อมูลได้อย่างแม่นยำ และพบว่าแบบจำลองสามารถประมาณค่ารังสีสุทธิตี่มีความสอดคล้องกับค่าที่วัดได้จริงโดยมีค่า $RMSE$ เท่ากับ 14.5% และ MBE เท่ากับ -2.2% โดยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมสามารถประมาณค่ารังสีสุทธิในวงกว้างได้มากขึ้น ซึ่งอาจเป็นประโยชน์สำหรับการประยุกต์ใช้ในพื้นที่อื่น ๆ ที่มีลักษณะภูมิอากาศใกล้เคียงกันแต่ไม่มีข้อมูลการวัดที่ครบถ้วน

4.3 แบบจำลองเอมไพริคัลสำหรับประมาณค่ารังสีสุทธิโดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม

นอกจากค่ารังสีสุทธิที่ได้จากแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแล้ว ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยยังได้สร้างแบบจำลองเอมไพริคัลอย่างง่ายสำหรับประมาณค่ารังสีสุทธิโดยใช้ตัวแปรอินพุตเป็นข้อมูลจาก MODIS และฐานข้อมูล NCEP/NCAR

4.3.1 ตัวแปรอินพุตจากข้อมูล MODIS และ NCEP/NCAR

ในการสร้างแบบจำลอง ผู้วิจัยได้สนใจตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยาได้แก่ รังสีคลื่นสั้นขาลง (S_g) ผลต่างอุณหภูมิการส่องสว่างระหว่างช่องสัญญาณที่ 31 และ 32 (WP) ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) อุณหภูมิอากาศ (T_{air}) อุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด (T_{max}, T_{min}) รังสีคลื่นยาวสุทธิ ($NLWR$) ปริมาณเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้า (C) และปริมาณน้ำฝน (P) โดยผู้วิจัยนำเสนอค่าทางสถิติของตัวแปรอินพุตเหล่านี้ในรูปแบบของแผนภาพกล่อง (Box plot) ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 36



รูปที่ 36 ลักษณะการกระจายตัวของตัวแปรอินพุตที่ได้จาก MODIS และ ฐานข้อมูล NCEP/NCAR

จากรูปที่ 36 แสดงลักษณะการกระจายตัวของตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จาก MODIS และ ฐานข้อมูล NCEP/NCAR ซึ่งสามารถสังเกตเห็นถึงความแตกต่างของลักษณะข้อมูลและแนวโน้มสภาพอากาศระหว่าง 4 สถานีหลัก ได้แก่ สถานีเชียงใหม่ (CM) อุบลราชธานี (UB) นครปฐม (NP) และ สงขลา (SK) ได้อย่างชัดเจน โดยพบว่าสถานีเชียงใหม่ (CM) มักแสดงช่วงการกระจายของข้อมูลที่ กว้างกว่าสถานีอื่นๆ ในหลายตัวแปรสำคัญ อาทิ ผลต่างอุณหภูมิการส่องสว่างระหว่างช่องสัญญาณที่ 31 และ 32 (WP), อุณหภูมิต่ำสุดรายวัน (T_{min}), อุณหภูมิอากาศรายวัน (T_{air}), ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) และรังสีคลื่นยาวสุทธิ ($NLWR$) ซึ่งบ่งชี้ถึงความผันผวนและความแปรปรวนของสภาพอากาศที่สูงกว่า ในภาคเหนือ ในทางตรงกันข้าม ค่ากลางของตัวแปรอุณหภูมิทั้งสามประเภท ได้แก่ อุณหภูมิสูงสุด รายวัน (T_{max}), อุณหภูมิต่ำสุดรายวัน (T_{min}) และอุณหภูมิอากาศรายวัน (T_{air}) ในสถานีสงขลา (SK) ซึ่งตั้งอยู่ทางภาคใต้ มีแนวโน้มที่จะมีค่าสูงกว่าสถานีอื่นๆ อย่างเห็นได้ชัด สะท้อนถึงสภาพภูมิอากาศที่ อบอุ่นกว่าโดยเฉลี่ย สำหรับสถานีอุบลราชธานี (UB) และนครปฐม (NP) มักแสดงลักษณะการ

กระจายตัวของข้อมูลและค่ากลางที่อยู่ระหว่างสถานีเชียงใหม่และสงขลาในหลายๆ ตัวแปร บ่งชี้ถึงสภาพอากาศที่มีลักษณะผสมผสาน สำหรับปริมาณน้ำฝน (P) ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญต่อความชื้น ทุกสถานีแสดงให้เห็นว่ามีค่ามัธยฐานที่ต่ำมาก แต่กลับปรากฏค่าผิดปกติที่สูงมากจำนวนมาก ซึ่งเป็นสัญญาณบ่งชี้ถึงการเกิดเหตุการณ์ฝนตกหนักเป็นบางครั้งซึ่งส่งผลต่อปริมาณน้ำฝนอย่างมีนัยสำคัญ ขณะที่ปริมาณเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้า (C) และรังสีคลื่นสั้นขาลง (S_d) มีการกระจายตัวของข้อมูลและค่ากลางที่ไม่แตกต่างกันมากนักในภาพรวมของทุกสถานี โดยเฉพาะในส่วนของรังสีคลื่นสั้นขาลงที่ค่ากลางค่อนข้างใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม สถานีอุบลราชธานี นครปฐม และสงขลา มักมีความชื้นสัมพัทธ์ (RH) และปริมาณเมฆ (C) โดยเฉลี่ยสูงกว่าสถานีเชียงใหม่ ซึ่งสะท้อนถึงอิทธิพลของภูมิประเทศและฤดูกาลที่มีผลต่อปริมาณความชื้นและเมฆปกคลุมในแต่ละภูมิภาคของประเทศไทย โดยหากพิจารณาค่าสูงสุด ต่ำสุด ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของตัวแปรอินพุตทั้งหมดสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าสถิติของตัวแปรอินพุตประกอบด้วยค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

สถานี	ตัวแปร	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	S_d	28.89	1.28	17.68	5.44
	WP	7.99	0.01	2.23	1.17
	RH	98.74	20.00	74.12	23.03
	$NLWR$	126.92	17.94	52.20	23.41
CM	C	100.00	0.11	66.25	25.42
	P	251.27	0.00	7.30	15.42
	T_{air}	305.85	285.79	297.25	2.48
	T_{min}	300.49	278.37	293.14	3.31
	T_{max}	313.79	286.81	300.78	3.55

ตารางที่ 4 (ต่อ)

สถานี	ตัวแปร	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
UB	S_d	27.87	1.77	17.32	4.81
	WP	6.79	0.03	2.34	0.98
	RH	99.40	39.15	84.28	12.78
	$NLWR$	98.39	17.66	43.05	15.55
	C	99.90	0.87	69.30	21.44
	P	152.28	0.00	7.23	10.53
	T_{air}	307.98	287.79	298.20	2.29
	T_{min}	302.86	283.48	295.39	2.52
	T_{max}	312.28	291.11	301.83	3.11
NP	S_d	28.68	1.56	18.24	5.01
	WP	7.34	0.02	2.57	1.06
	RH	98.50	34.10	80.94	15.48
	$NLWR$	100.96	24.24	46.96	14.78
	C	100.00	0.53	66.80	24.85
	P	209.69	0.00	8.93	17.22
	T_{air}	305.23	287.79	299.30	1.95
	T_{min}	303.20	284.85	296.59	2.04
	T_{max}	313.95	292.70	302.53	3.00
SK	S_d	27.88	1.50	16.73	5.38
	WP	7.40	0.01	2.58	1.12
	RH	96.16	59.33	83.60	7.06
	$NLWR$	81.64	22.05	42.98	9.70
	C	100.00	3.59	66.97	21.98
	P	72.58	0.00	6.60	8.63
	T_{air}	304.09	293.70	300.37	1.20
	T_{min}	300.86	294.65	298.22	0.82
	T_{max}	308.59	298.20	302.39	1.69

4.3.2 การวิเคราะห์ตัวแปรสำหรับสร้างแบบจำลอง

เนื่องจากตัวแปรอินพุตที่รวบรวมมามีทั้งหมด 9 ตัว ผู้วิจัยจึงทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุตและค่ารังสีสุทธิโดยใช้ข้อมูลทั้งหมดระหว่างปี ค.ศ. 2017-2024 และพิจารณาพารามิเตอร์สองตัวเป็นเกณฑ์นั่นคือ ค่า p-value ต้องไม่เกิน 0.05 และค่า VIF ต้องไม่เกิน 10 โดยผลลัพธ์ของพารามิเตอร์ทั้ง 9 ตัวนี้แสดงได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงค่า p-value และค่า VIF ของตัวแปรอินพุตที่ได้จาก MODIS และฐานข้อมูล NCEP/NCAR

ตัวแปร	p-value	VIF
<i>Const</i>	0.000	-
<i>S_d</i>	0.000	1.768
<i>RH</i>	0.000	7.023
<i>WP</i>	0.000	1.384
<i>T_{air}</i>	0.001	5.936
<i>C</i>	0.010	2.492
<i>T_{max}</i>	0.127	3.530
<i>T_{min}</i>	0.053	6.967
<i>NLWR</i>	0.274	6.336
<i>P</i>	0.302	1.222

จากตารางที่ 5 เมื่อพิจารณาค่า p-value และ VIF ของตัวแปรอินพุตในสร้างแบบจำลองสำหรับประมาณค่ารังสีสุทธิ สามารถสรุปได้ว่าตัวแปรส่วนใหญ่มีนัยสำคัญทางสถิติและมีความเหมาะสมในการนำมาใช้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง รังสีคลื่นสั้นขาลง (*S_d*) ผลต่างอุณหภูมิการส่องสว่าง (*WP*) และปริมาณเมฆ (*C*) ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีค่า p-value เท่ากับ 0.000 หรือต่ำกว่า 0.010 แสดงถึงความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญต่อแบบจำลอง และมีค่า VIF ต่ำกว่า 5 (1.768, 1.384, 2.492 ตามลำดับ) ซึ่งบ่งชี้ว่าไม่มีปัญหาภาวะการทับซ้อนกันของตัวแปร ในขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์ (*RH*) และอุณหภูมิอากาศ (*T_{air}*) แม้จะมีนัยสำคัญทางสถิติสูง (p-value 0.000 และ 0.001 ตามลำดับ) แต่มีค่า VIF อยู่ในช่วง 5-10 (7.023 และ 5.936 ตามลำดับ) ซึ่งอาจบ่งชี้ถึงภาวะการทับซ้อนทางตัวแปรระดับปานกลางกับตัวแปรอื่นที่อยู่ในแบบจำลอง ซึ่งควรพิจารณาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านี้ ส่วนตัวแปรที่เหลือ อุณหภูมิสูงสุดรายวัน (*T_{max}*) อุณหภูมิต่ำสุดรายวัน (*T_{min}*)

รังสีคลื่นยาวสุทธิ ($NLWR$) และปริมาณน้ำฝน (P) กลับไม่มีนัยสำคัญทางสถิติในแบบจำลองนี้ โดยมีค่า p -value สูงกว่า 0.05 อย่างชัดเจน (0.127, 0.053, 0.274, 0.302 ตามลำดับ) แม้ว่า T_{min} และ $NLWR$ จะมี VIF อยู่ในระดับปานกลาง (6.967 และ 6.336) แต่การไม่มีนัยสำคัญทางสถิติชี้ให้เห็นว่าตัวแปรเหล่านี้อาจไม่ได้มีบทบาทสำคัญในการอธิบายรังสีสุทธิเมื่อพิจารณาร่วมกับตัวแปรอื่น ๆ ในแบบจำลอง หรืออาจเป็นเพราะผลกระทบของตัวแปรอื่นพุดเหล่านี้อธิบายโดยตัวแปรอื่นไปแล้ว สรุปได้ว่าแบบจำลองนี้จะพิจารณา S_d , WP , C , RH และ T_{air} ในการประมาณค่ารังสีสุทธิ เนื่องจากมีความสัมพันธ์กับค่ารังสีสุทธิอย่างมีนัยสำคัญและมีค่า p -value และ VIF อยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการสร้างแบบจำลองเอมไพริคัลออกมา 2 แบบจำลอง โดยแบบจำลองที่ 1 ใช้ค่า S_d , WP และ RH ซึ่งมีค่า p -value ที่ต่ำเป็นตัวแปรอินพุต และแบบจำลองที่ 2 ทำการเพิ่มตัวแปร C และ T_{air} เพื่อดูประสิทธิภาพของแบบจำลอง เมื่อมีการเพิ่มตัวแปรอินพุต โดยแบบจำลอง 2 แบบจำลองสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$R_{n_model1} = a_0 + a_1(S_d) + a_2(WP) + a_3(RH) \quad (18)$$

$$R_{n_model2} = a_0 + a_1(S_d) + a_2(WP) + a_3(RH) + a_4(T_{air}) + a_5(C) \quad (19)$$

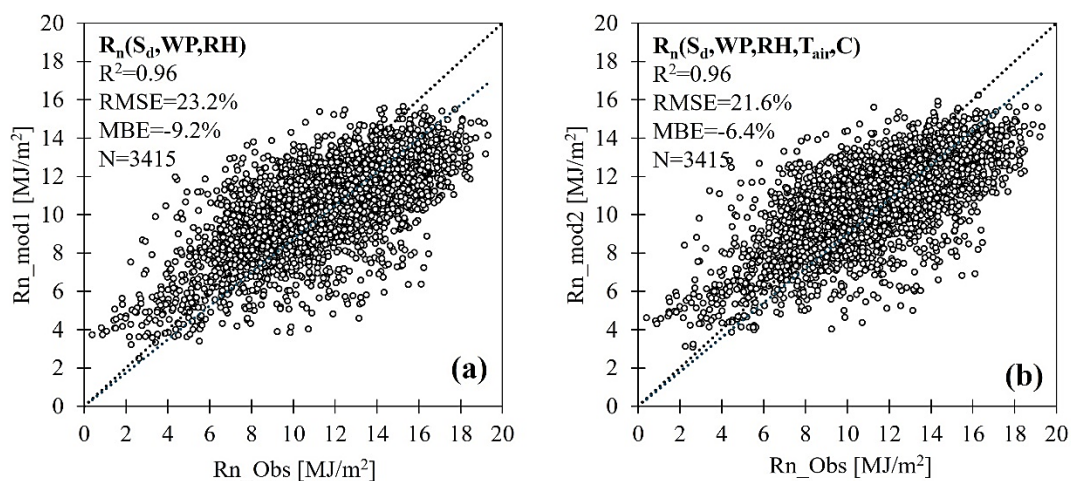
โดยที่ R_{n_model1} และ R_{n_model2} คือค่ารังสีสุทธิที่ได้จากการประมาณค่าจากแบบจำลองที่ 1 (ตัวแปรอินพุต 3 ตัว) และแบบจำลองที่ 2 (ตัวแปรอินพุต 5 ตัว) ตามลำดับ a_0 คือค่าคงที่ในแบบจำลอง a_1 , a_2 , a_3 , a_4 และ a_5 คือค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร S_d , WP , RH , T_{air} และ C ตามลำดับ โดยค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองที่ 1 และ 2 แสดงไว้ในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในแบบจำลองที่ 1 และ 2

No. model	Coefficients	Value	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%
Model 1	a_0	-3.24	-9.18	<0.0005	-3.93	-2.55
	a_1	0.42	32.78	<0.0005	0.39	0.44
	a_2	0.32	6.42	<0.0005	0.22	0.42
	a_3	0.07	22.45	<0.0005	0.06	0.07
Model 2	a_0	-43.29	-5.51	<0.0005	-58.71	-27.87
	a_1	0.39	28.81	<0.0005	0.36	0.41
	a_2	0.28	5.64	<0.0005	0.18	0.38
	a_3	0.08	22.12	<0.0005	0.07	0.09
	a_4	0.14	5.15	<0.0005	0.08	0.19
	a_5	-0.01	-4.73	<0.0005	-0.02	-0.01

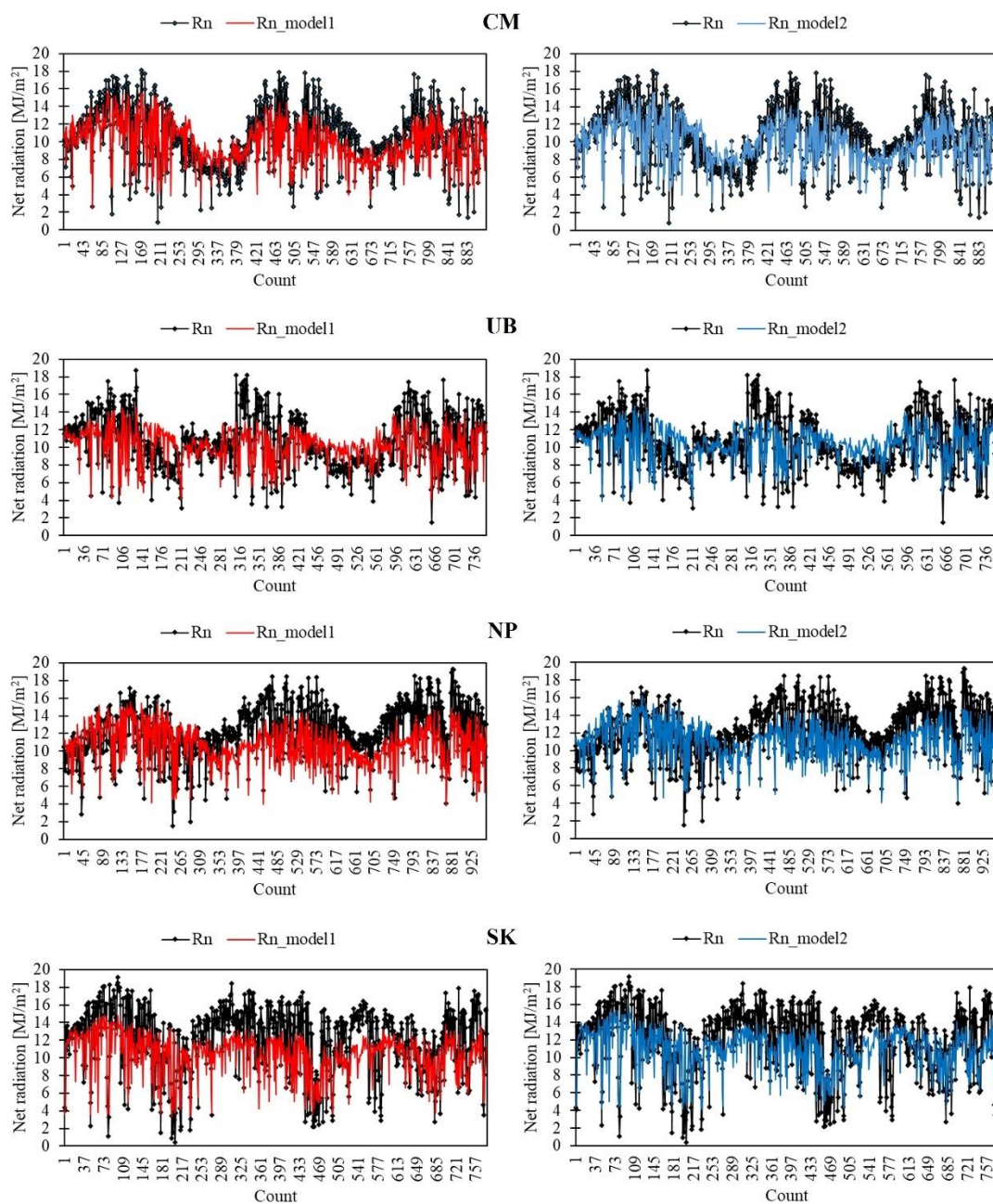
4.3.3 การทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองเอมไพริคัลสำหรับประมาณค่ารังสีสุทธิ

จากการวิเคราะห์ตัวแปรอินพุตและนำตัวแปรดังกล่าวมาทำการสร้างแบบจำลองเอมไพริคัลทั้งหมด 2 แบบจำลอง โดยแบบจำลองแรกเป็นแบบจำลองอย่างง่ายใช้ตัวแปรอินพุตเริ่มต้นสามตัว (สมการ (18)) และแบบจำลองที่ 2 เพิ่มตัวแปรอินพุตเป็น 5 ตัว (สมการ (19)) เพื่อดูประสิทธิภาพของแบบจำลอง จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นผู้วิจัยนำแบบจำลองดังกล่าวมาทำการประมาณค่ารังสีสุทธิโดยใช้ข้อมูลอินพุตชุดใหม่ (ข้อมูลปี ค.ศ. 2022-2024) ซึ่งเป็นชุดข้อมูลที่ไม่ถูกใช้ในการสร้างแบบจำลอง จากนั้นนำค่ารังสีสุทธิที่ได้จากแบบจำลองมาทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลรังสีสุทธิที่ได้จากการวัด โดยแสดงผลลัพธ์ในลักษณะของกราฟการกระจายตัวและค่า R^2 , $RMSE$, และ MBE ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 37



รูปที่ 37 กราฟการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีสุทธิที่ได้จากการวัด ($R_{n_Obs} [\text{MJ} / \text{m}^2]$) และค่ารังสีสุทธิที่ได้จากแบบจำลอง ($R_{n_mod} [\text{MJ} / \text{m}^2]$) โดยกราฟ (a) คือแบบจำลองที่ 1 และ กราฟ (b) คือแบบจำลองที่ 2

จากรูปที่ 37 แสดงการเปรียบเทียบของค่ารังสีสุทธิที่ได้จากการวัด (R_{n_Obs}) กับค่าที่ได้จากแบบจำลอง (R_{n_mod}) ทั้งสองแบบจำลอง พบว่าแบบจำลองที่ 2 ที่ใช้อินพุต 5 ตัวแปร (S_d , WP , RH , T_{air} , C) มีประสิทธิภาพในการประมาณค่ารังสีสุทธิที่ดีกว่า แบบจำลองที่ 1 ที่ใช้อินพุต 3 ตัวแปร (S_d , WP , RH) โดยพิจารณาจากค่าทางสถิติพบว่า แบบจำลองที่ 2 มีค่า R^2 เท่ากับ 0.96 ซึ่งบ่งชี้ว่าแบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ดี และจุดข้อมูลมีการกระจายตัวใกล้กับเส้น 1:1 มากกว่า นอกจากนี้มีค่า $RMSE$ เท่ากับ 21.6% ซึ่งต่ำกว่าแบบจำลองที่ 1 แสดงว่ามีความแม่นยำในการประมาณสูงกว่า และมีค่า MBE เท่ากับ -6.4% ซึ่งน้อยกว่าแบบจำลองที่ 1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ -9.2% ซึ่งบ่งชี้ว่าแบบจำลองที่ 2 มีความเอนเอียงในการประมาณค่าต่ำกว่าแบบจำลองที่ 1 ดังนั้นในการเพิ่มตัวแปรอินพุต T_{air} และ C เข้าไปในแบบจำลองที่ 2 ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้น ทำให้จุดข้อมูลกระจายตัวใกล้เส้น 1:1 มากขึ้นและมีความคลาดเคลื่อนโดยรวมลดลง แสดงให้เห็นว่า T_{air} และ C เป็นตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการประมาณค่ารังสีสุทธิในแบบจำลองนี้ เพื่อให้เห็นการเปรียบเทียบที่ชัดเจนขึ้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการเขียนกราฟเส้นเพื่อดูการแปรค่ารังสีสุทธิระหว่างค่าที่ได้จากแบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัดซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 38



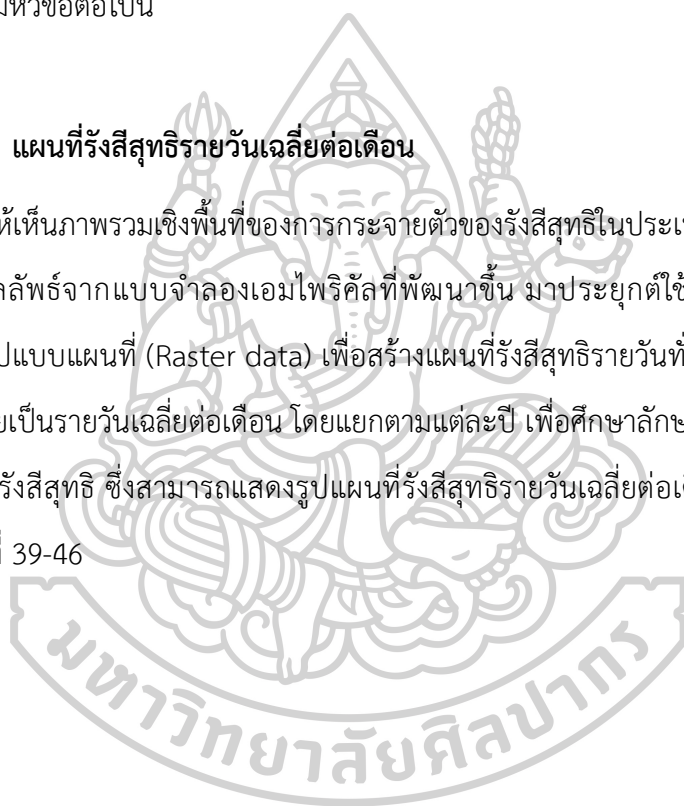
รูปที่ 38 กราฟการเปรียบเทียบระหว่างรังสีสุทธิที่ได้จากการวัด (เส้นสีดำ) และรังสีสุทธิที่ได้จากแบบจำลองที่ 1 (เส้นสีแดง) แบบจำลองที่ 2 (เส้นสีน้ำเงิน)

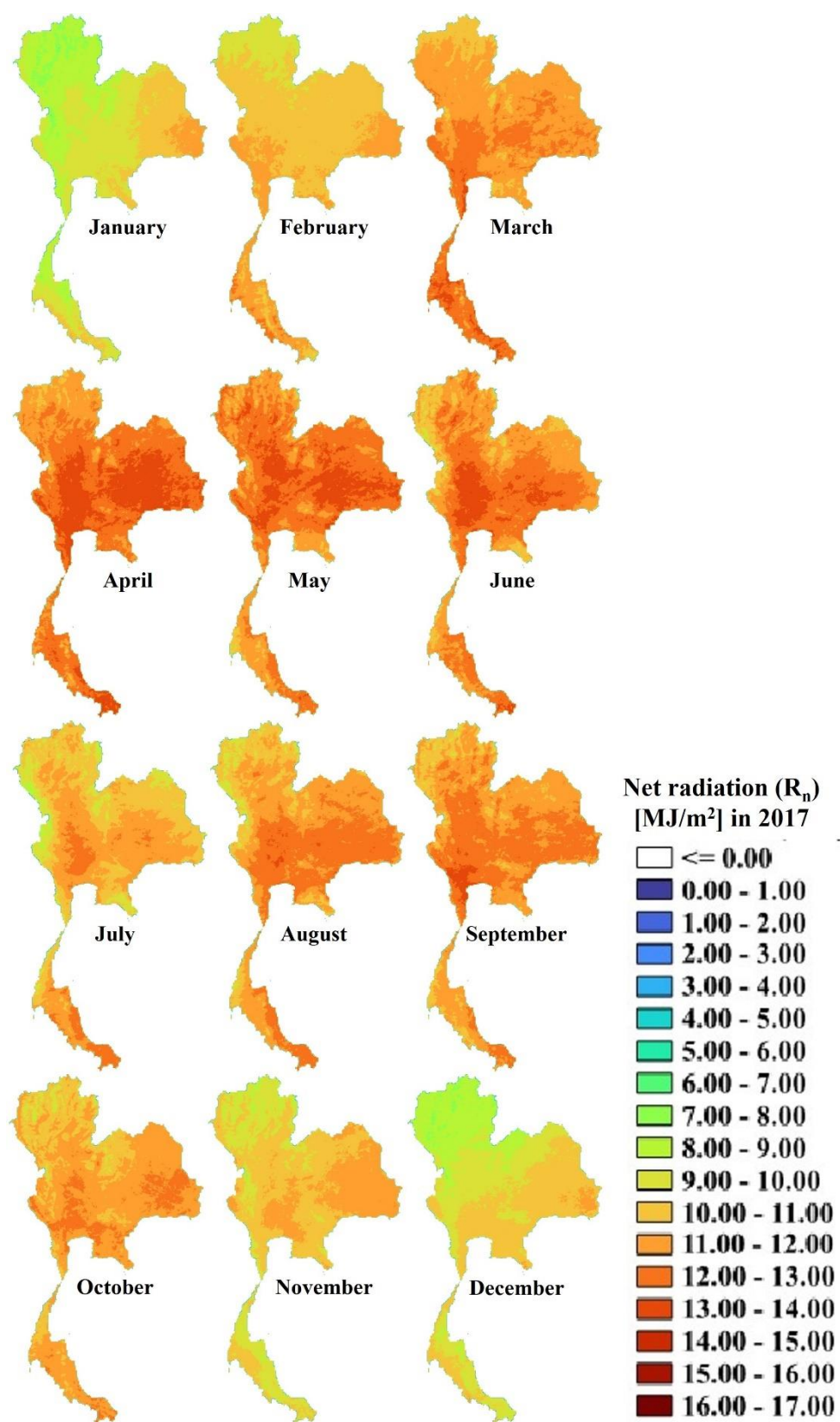
4.4 แผนที่รังสีสุทธิ

จากแบบจำลองที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นพบว่า แบบจำลองที่ 2 ที่ใช้ตัวแปรทั้งหมด 5 ตัวซึ่งประกอบด้วย S_d , WP , RH , T_{air} และ C มีประสิทธิภาพในการประมาณค่ารังสีสุทธิที่สูง ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำแบบจำลองดังกล่าวมาสร้างเป็นแผนที่รังสีสุทธิในพื้นที่ประเทศไทย โดยนำค่าสัมประสิทธิ์จากแบบจำลองที่ 2 ไปคูณเข้ากับข้อมูลอินพุตในรูปแบบของข้อมูล Raster (ข้อมูลอินพุตในรูปแบบแผนที่ทั้งประเทศไทย) จากนั้นทำการคำนวณตามแบบจำลองจะได้แผนที่รังสีสุทธิออกมาซึ่งสามารถนำเสนอได้ตามหัวข้อต่อไปนี้

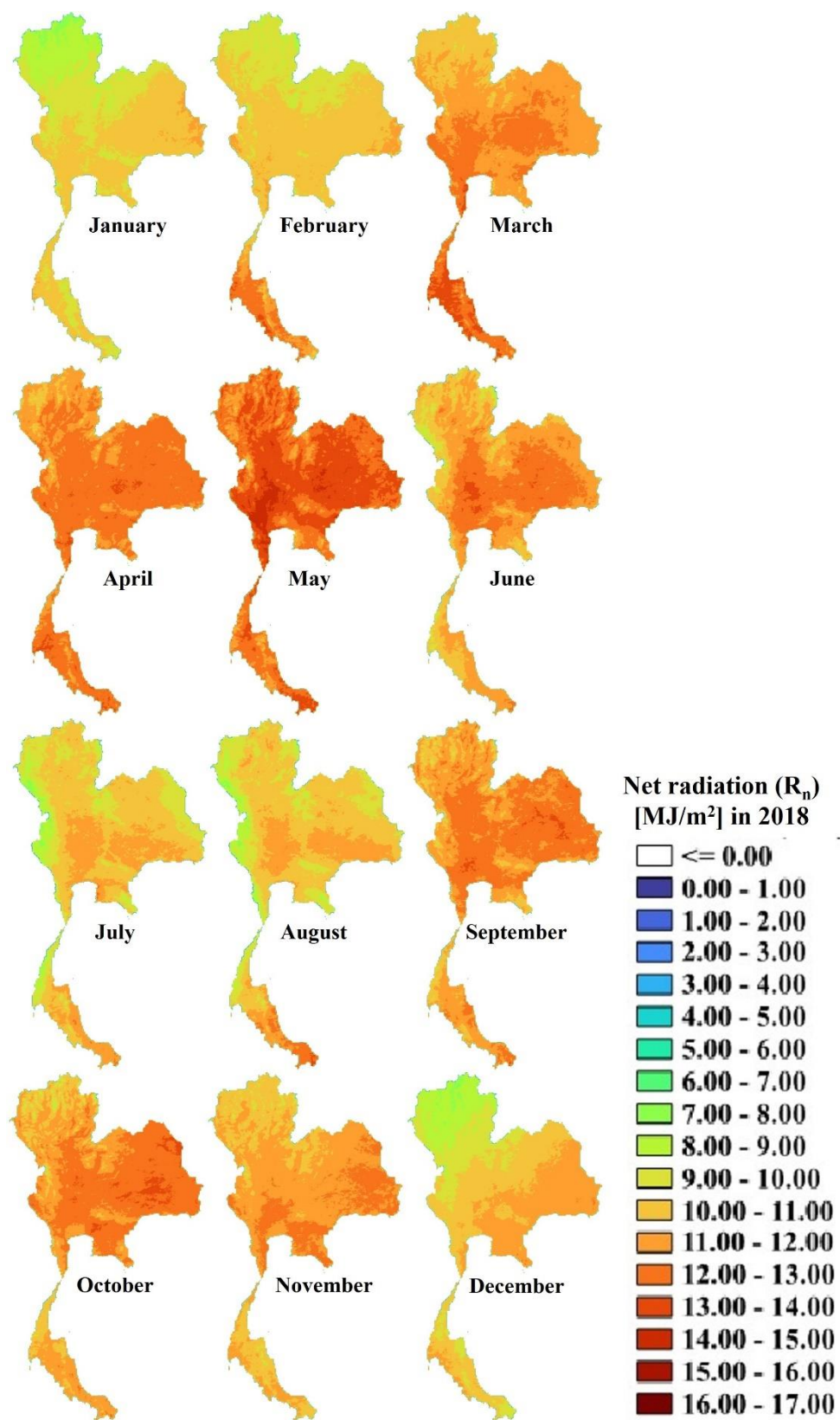
4.4.1 แผนที่รังสีสุทธิรายวันเฉลี่ยต่อเดือน

เพื่อให้เห็นภาพรวมเชิงพื้นที่ของการกระจายตัวของรังสีสุทธิในประเทศไทยในแต่ละช่วงเวลา ผู้วิจัยได้นำผลลัพธ์จากแบบจำลองเอมไพริคัลที่พัฒนาขึ้น มาประยุกต์ใช้ร่วมกับข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมในรูปแบบแผนที่ (Raster data) เพื่อสร้างแผนที่รังสีสุทธิรายวันทั่วประเทศ จากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาเฉลี่ยเป็นรายวันเฉลี่ยต่อเดือน โดยแยกตามแต่ละปี เพื่อศึกษาลักษณะการแปรค่าทางเวลา และพื้นที่ของรังสีสุทธิ ซึ่งสามารถแสดงรูปแผนที่รังสีสุทธิรายวันเฉลี่ยต่อเดือนในปีต่าง ๆ (2017-2024) ดังรูปที่ 39-46

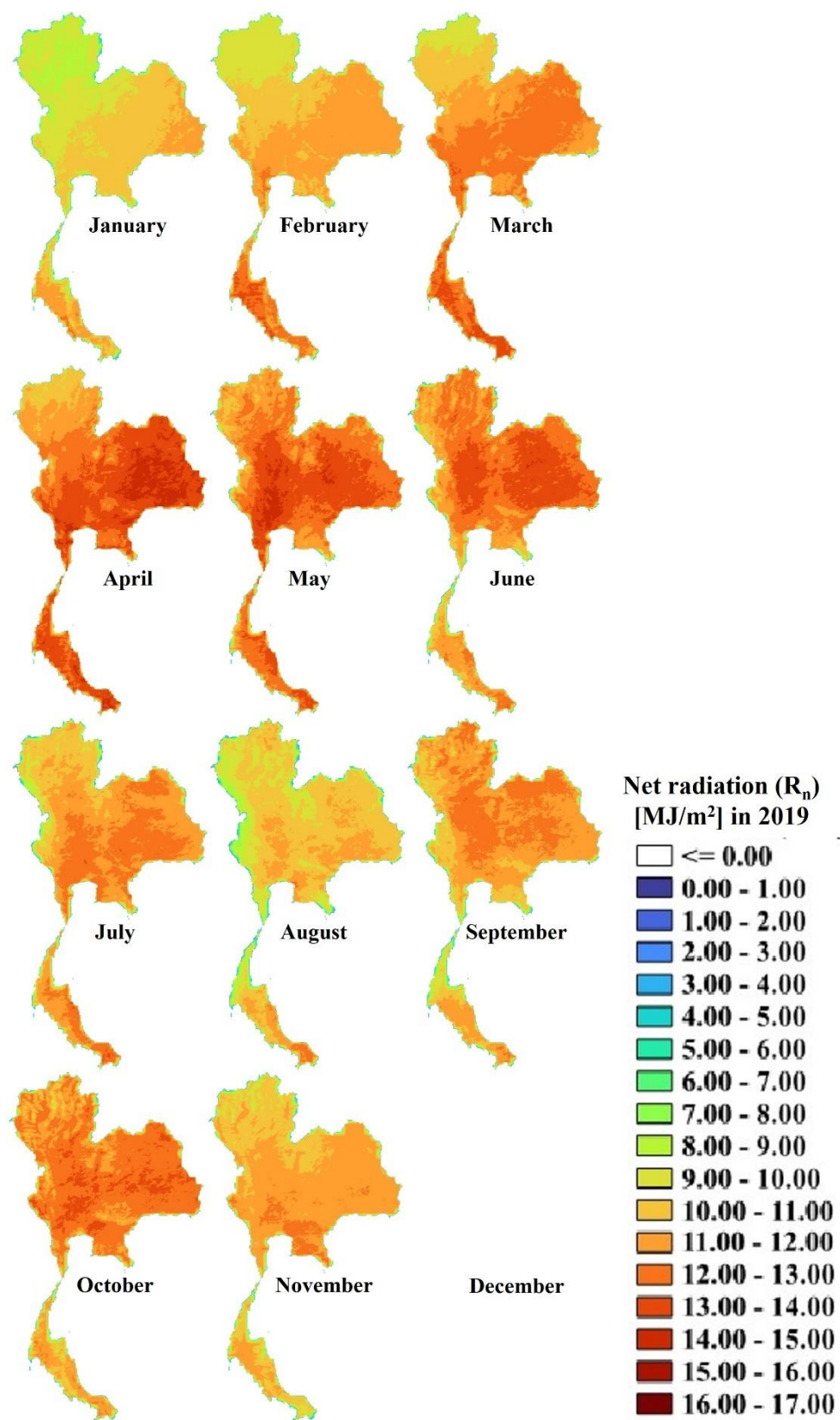




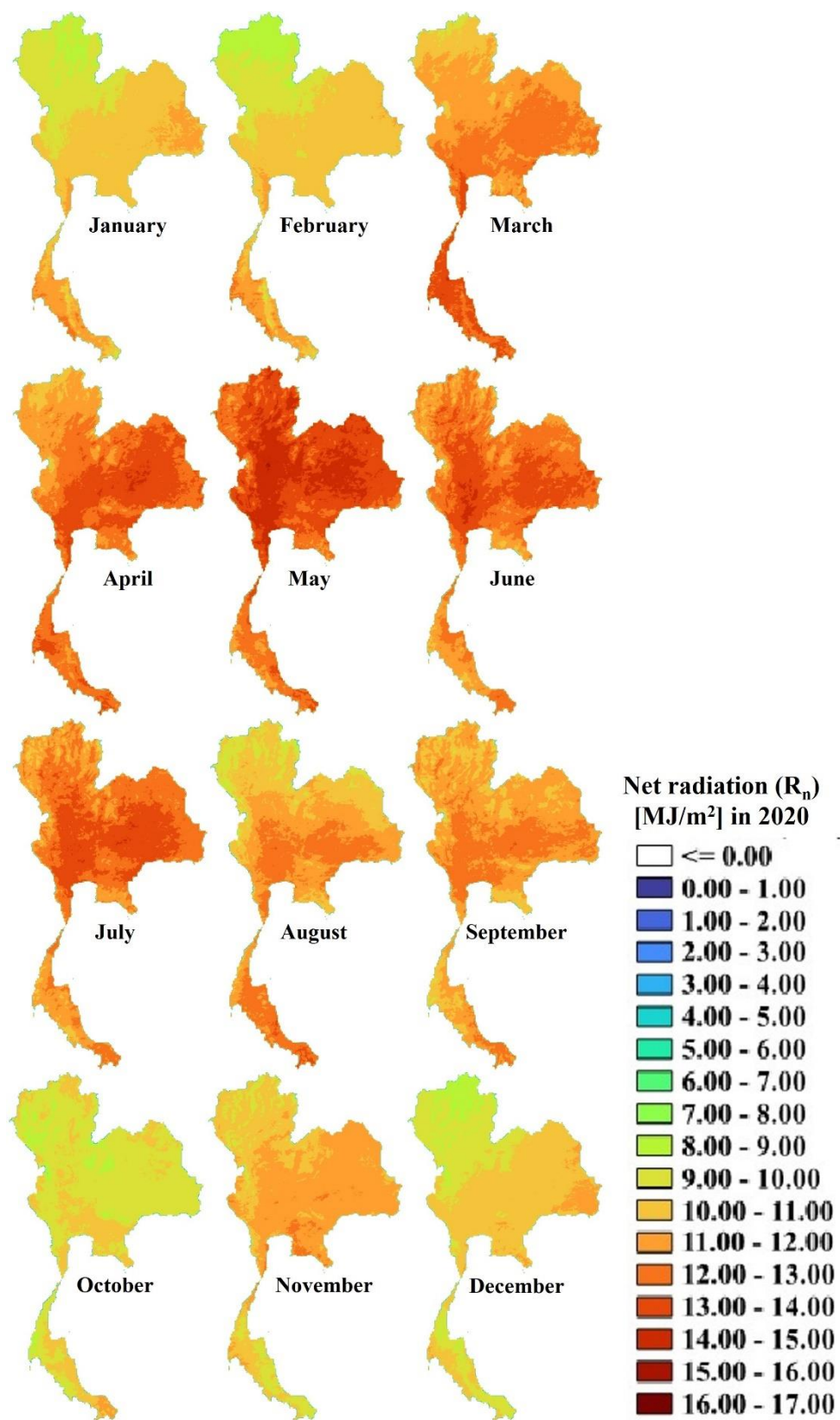
รูปที่ 39 แผนที่รังสีสุทธิรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของปี ค.ศ. 2017



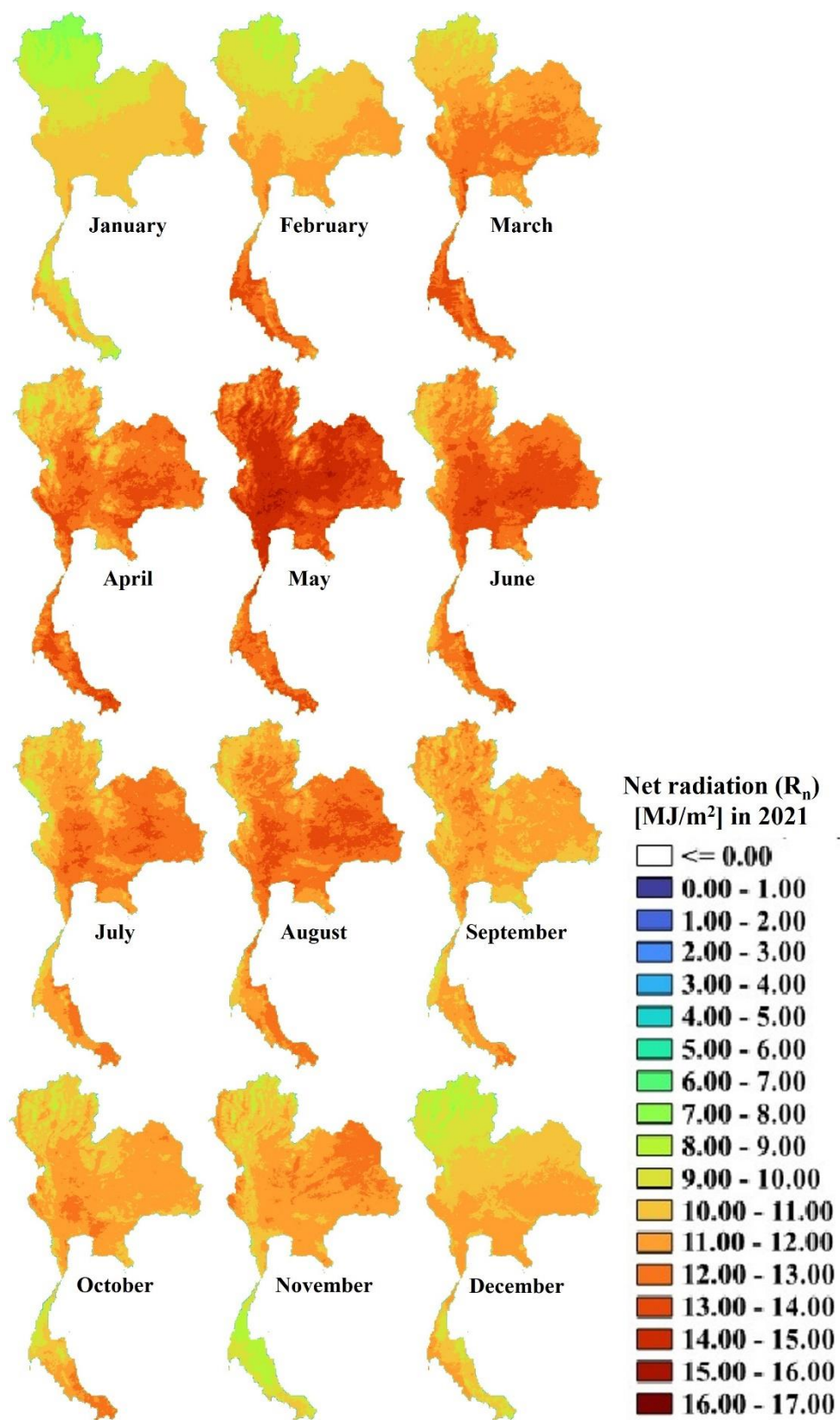
รูปที่ 40 แผนที่รังสีสุทธิรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของปี ค.ศ. 2018



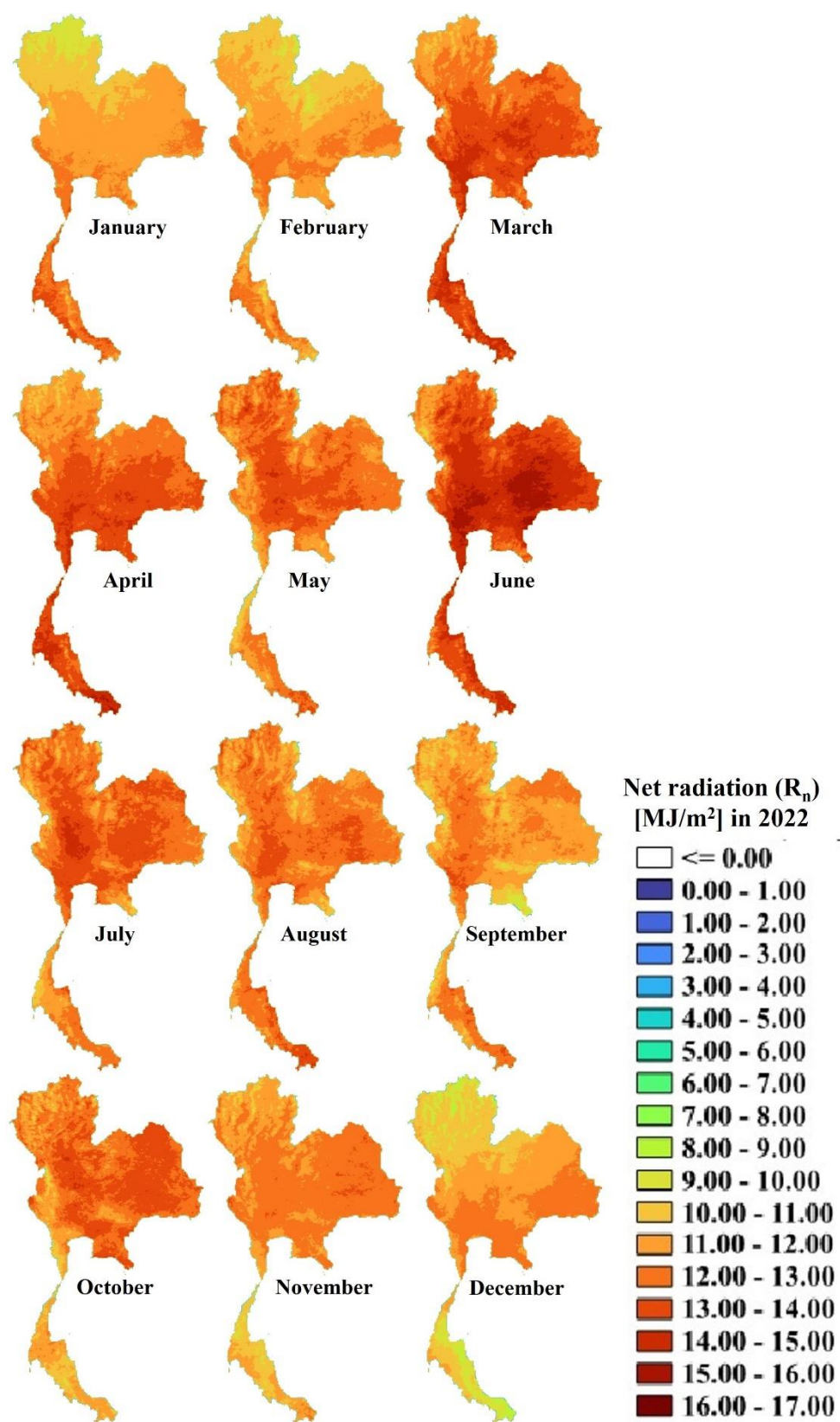
รูปที่ 41 แผนที่รังสีสุทธิตามรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของปี ค.ศ. 2019



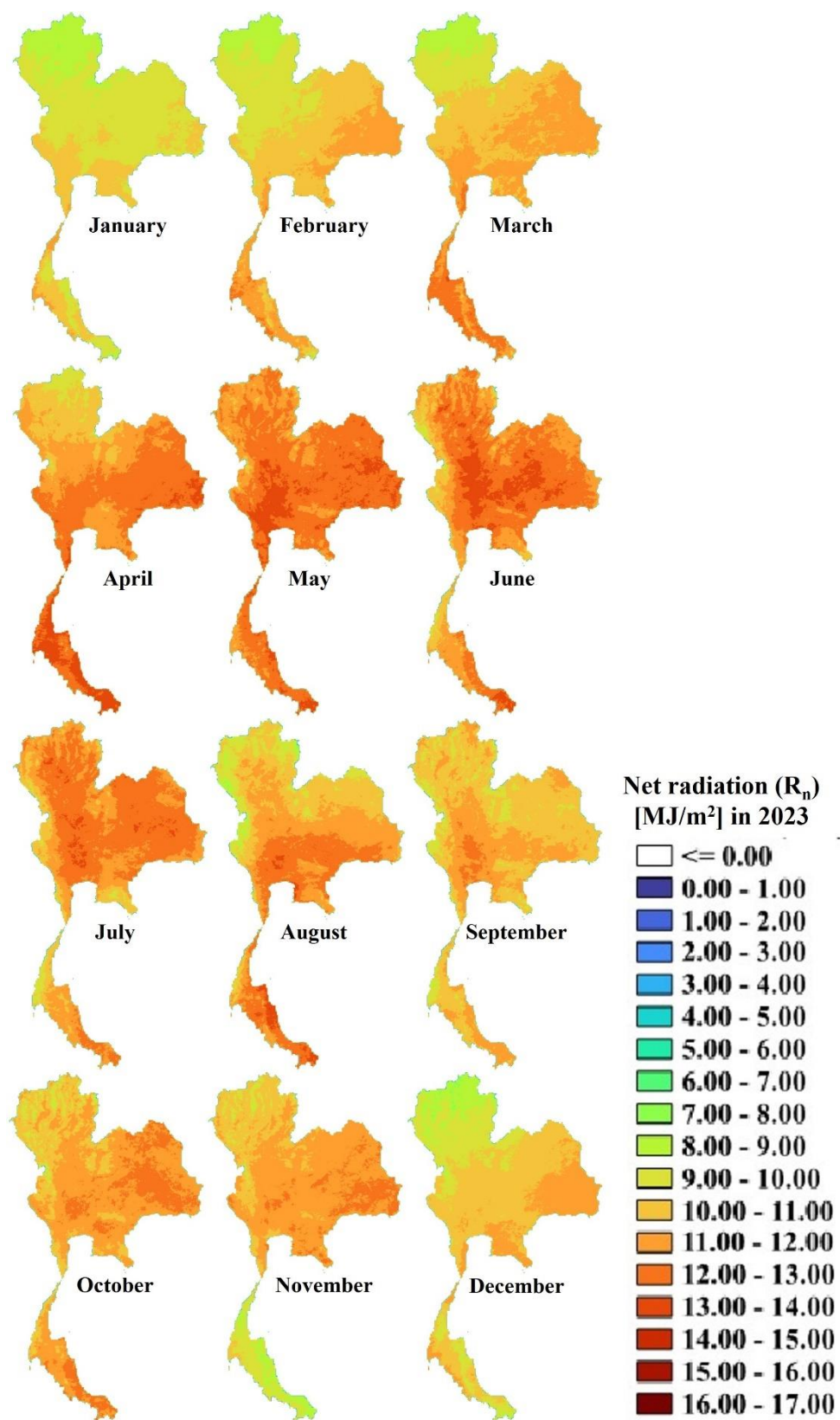
รูปที่ 42 แผนที่รังสีสุทธิรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของปี ค.ศ. 2020



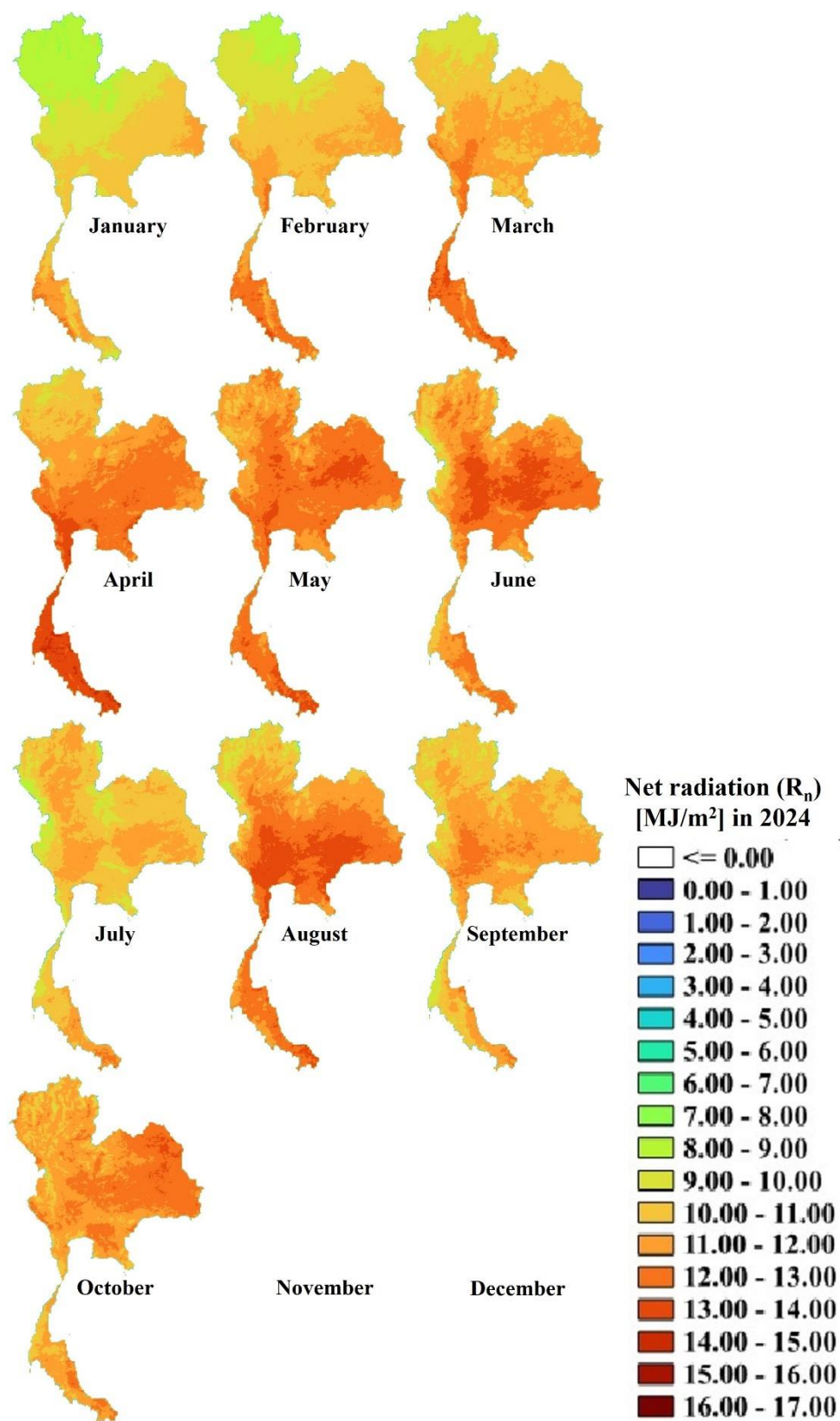
รูปที่ 43 แผนที่รังสีสุทธิรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของปี ค.ศ. 2021



รูปที่ 44 แผนที่รังสีสุทธิตายวันเฉลี่ยต่อเดือนของปี ค.ศ. 2022



รูปที่ 45 แผนที่รังสีสุทธิตายวันเฉลี่ยต่อเดือนของปี ค.ศ. 2023



รูปที่ 46 แผนที่รังสีสุทธิต่อเดือนของปี ค.ศ. 2024

จากรูปที่ 39 แสดงค่ารังสีสุทธิตายวันเฉลี่ยต่อเดือนในปี 2017 พบว่าค่ารังสีสุทธิมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากเดือนมกราคมจนถึงเดือนเมษายน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือจะเห็นสีเข้มขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งเดือนเมษายนมีค่าประมาณ 15-16 MJ/m² และในเดือนพฤษภาคมมีค่าค่อย ๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งเดือนกรกฎาคม จากนั้นเดือนสิงหาคมถึงเดือนตุลาคมค่ารังสีสุทธิค่อย ๆ เพิ่มขึ้นทั่วประเทศไทยเล็กน้อยและกลับมาลดต่ำลงอีกครั้งในเดือนพฤศจิกายน-ธันวาคมโดยเฉพาะภาคเหนือและภาคกลางมีค่าอยู่ในช่วง 7-10 MJ/m² (สีเขียวอ่อนถึงเหลือง) สำหรับค่ารังสีสุทธิตายวันเฉลี่ยต่อเดือนในปี 2018 (รูปที่ 40) พบว่าค่ารังสีสุทธิมีค่าเพิ่มขึ้นทั่วประเทศจากเดือนมกราคมจนมีค่ารังสีสุทธิสูงสุดในเดือนมีนาคมสำหรับภาคใต้ ในส่วนพื้นที่ที่เหนือมีค่าสูงสุดในเดือนพฤษภาคม จากนั้นในช่วงเดือนมิถุนายน-สิงหาคมค่ารังสีสุทธิทั่วประเทศลดลงอย่างต่อเนื่องและกลับมาเพิ่มขึ้นอีกครั้งในเดือนกันยายนและตุลาคม ก่อนจะปรับตัวลดต่ำลงในช่วงฤดูหนาว สำหรับในปี 2019 (รูปที่ 41) ลักษณะการแปรค่าใกล้เคียงกันกับปี 2018 แต่ในเดือนเมษายนพื้นที่ที่มีค่ารังสีสุทธิสูงนั้นคือพื้นที่ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จากนั้นค่อย ๆ มีค่าต่ำลงจนกระทั่งเดือนสิงหาคม ซึ่งในปี 2019 นี้ไม่มีแผนที่รังสีสุทธิเดือนธันวาคมสาเหตุเนื่องจากขาดข้อมูลอินพุต 1 ตัวคือค่ารังสีคลื่นสั้นขาหลัง ต่อมาในปี 2020-2021 (รูปที่ 42-43) พบว่ามีลักษณะการแปรค่าเหมือนปี 2018 เช่นเดียวกันคือมีค่าสูงสุดในเดือนพฤษภาคมซึ่งเป็นช่วงปลายฤดูร้อนต้นฤดูฝน และจะมีค่าต่ำที่สุดในช่วงเดือนธันวาคม-มกราคม แต่ในปี 2020 จะมีค่ารังสีสุทธิที่สูงกว่าปี 2021 ในส่วนของปี 2022 (รูปที่ 44) พบว่าค่ารังสีสุทธิมีค่าสูงตลอดทั้งปีและมีค่าลดต่ำลงในช่วงครึ่งปีหลังซึ่งอาจจะเกิดจากสาเหตุอิทธิพลของลานีญาที่ทำให้มีฝนตกชุกตลอดทั้งปีทำให้ค่ารังสีขาขึ้นมีค่าลดต่ำลงเนื่องจากความชื้นในพื้นผิวดิน สดท้ายในปี 2023-2024 (รูปที่ 45-46) พบว่ามีลักษณะการแปรค่าที่คล้ายกันกับปี 2018 โดยค่ารังสีสุทธิมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดือนมกราคมและไปสูงสุดที่เดือนพฤษภาคม จากนั้นค่อย ๆ ลดลงและกลับมาเพิ่มอีกครั้งในเดือนสิงหาคมก่อนจะลดลงเรื่อย ๆ จนต่ำที่สุดในช่วงฤดูหนาว

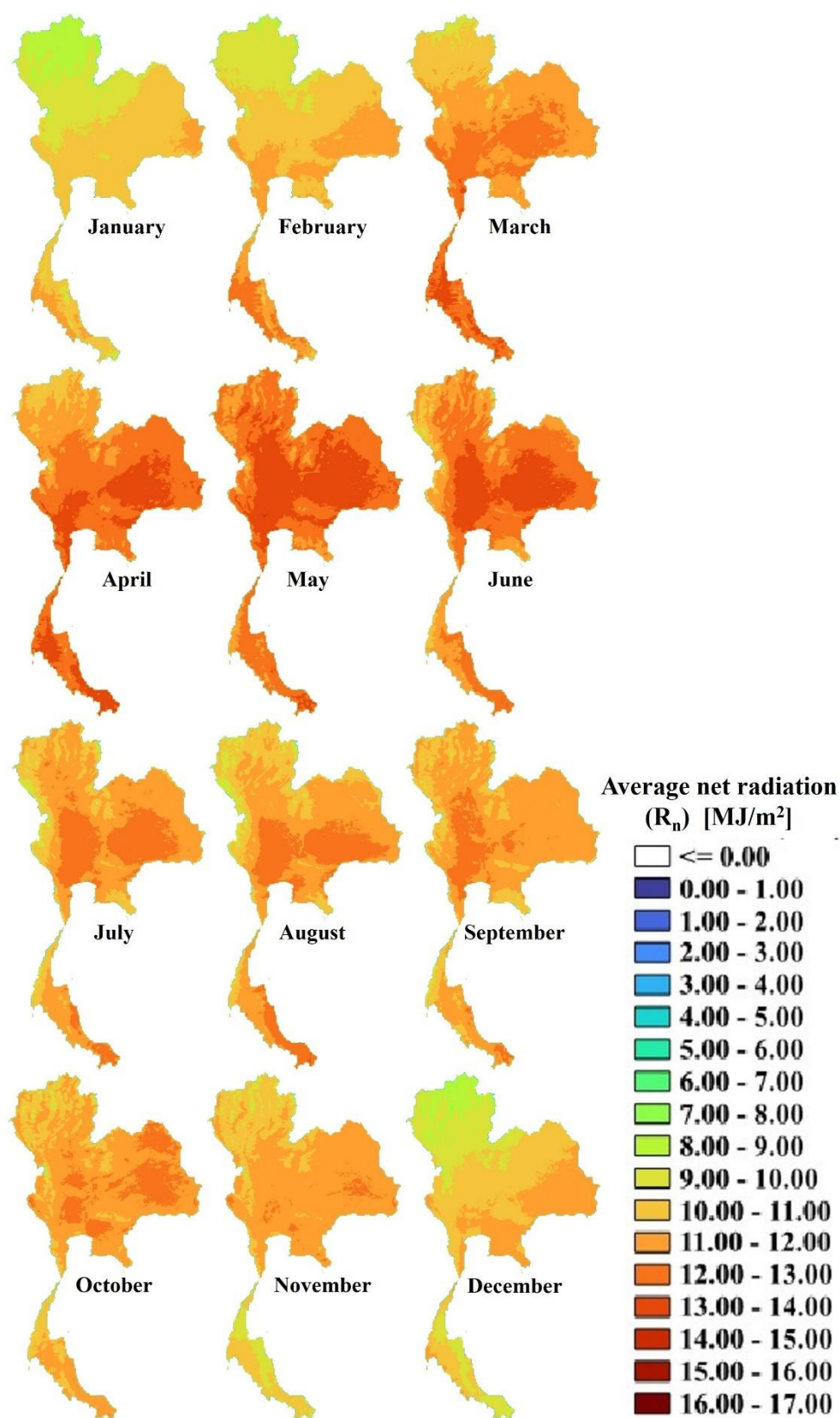
โดยภาพรวมแล้วทุกปีที่นำเสนอ (ค.ศ. 2017-2024) แนวโน้มของค่ารังสีสุทธิในประเทศไทยเป็นไปในทิศทางเดียวกันคือช่วงค่ารังสีสุทธิสูงสุดมักจะเกิดขึ้นในช่วงเดือนเมษายน - พฤษภาคม ซึ่งสอดคล้องกับฤดูร้อนของประเทศไทยที่มีแดดจัดและมีปริมาณเมฆน้อย ช่วงค่ารังสีสุทธิต่ำสุดมักจะเกิดขึ้นในช่วงเดือนธันวาคม - มกราคม (โดยเฉพาะธันวาคม) ซึ่งเป็นช่วงฤดูหนาวและมีเมฆน้อยใน

บางพื้นที่ หรือมีการเปลี่ยนแปลงของมุมตกกระทบของแสงอาทิตย์ช่วงเปลี่ยนผ่านค่ารังสีสุทธิจะเริ่มลดลงตั้งแต่เดือนมิถุนายนถึงกันยายน ซึ่งเป็นช่วงฤดูฝนที่มีเมฆมากและฝนตก ทำให้ปริมาณแสงแดดลดลง จากการสังเกตด้วยตาเปล่าในภาพรวมดูเหมือนว่า ส่วนใหญ่จะมีค่ารังสีสุทธิสูงสุดในช่วงเดือนพฤษภาคม โดยมีบริเวณสีแดงเข้มครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของประเทศ ซึ่งแสดงถึงค่ารังสีสุทธิที่สูงกว่า 13 MJ/m^2 หรือบางปีอาจจะสูงถึง $16\text{--}17 \text{ MJ/m}^2$ ในบางพื้นที่

4.4.2 แผนที่รายวันเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาว

ผู้วิจัยต้องการดูภาพรวมทั้งหมดของการแปรค่ารังสีสุทธิรายวันเฉลี่ยต่อเดือนในพื้นที่ประเทศไทยผู้วิจัยจึงได้ทำการเฉลี่ยค่ารังสีสุทธิของแต่ละเดือนตลอด 8 ปี (2017-2024) เพื่อดูแนวโน้มการแปรค่าระยะยาว โดยผลที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 47





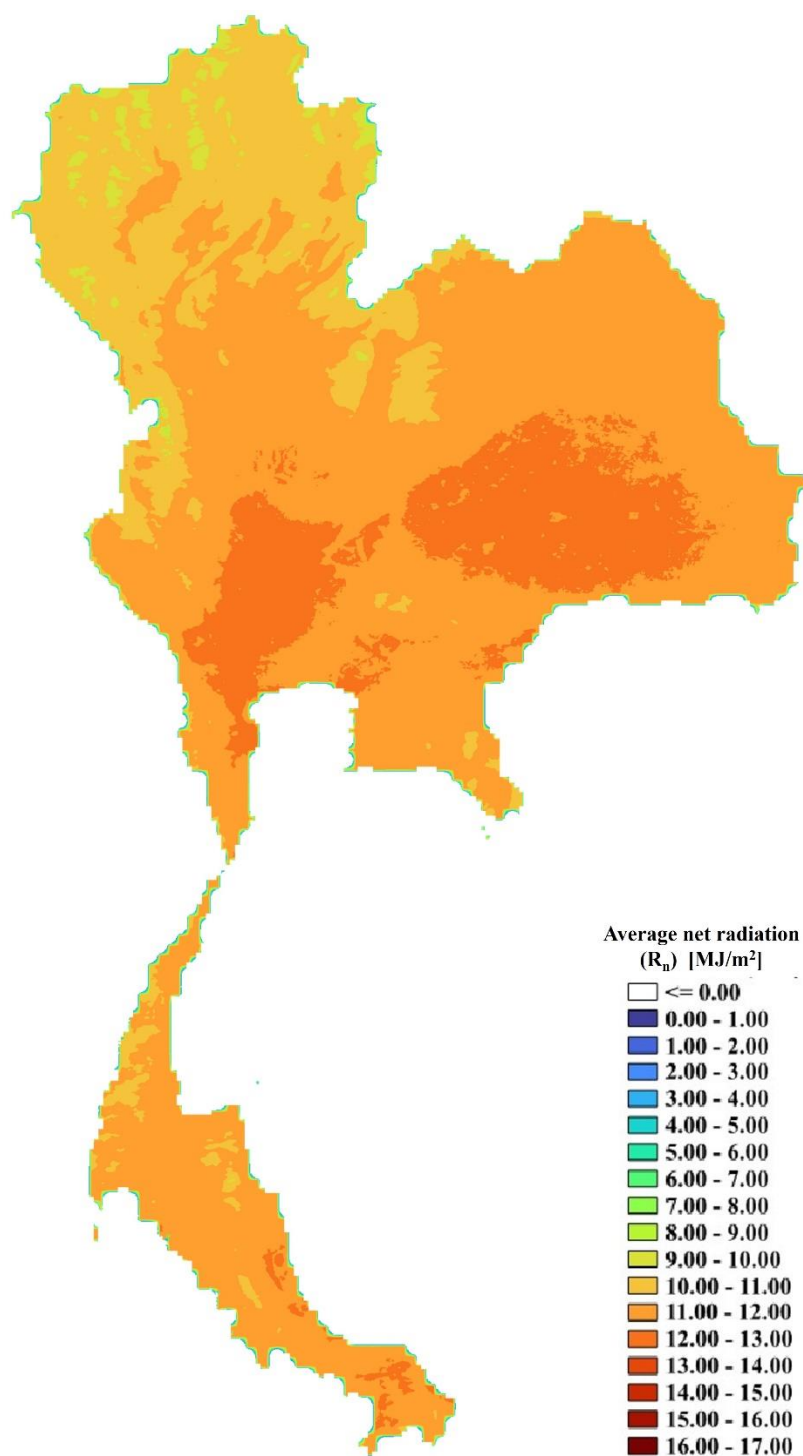
รูปที่ 47 ค่ารังสีสุทธิรายวันเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาว

จากรูปที่ 47 แสดงค่ารังสีสุทธิตายวันเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาวพบว่าผลที่ได้นั้นมีความสอดคล้องกับข้อมูลแต่ละปีที่ผ่านมา แต่ข้อมูลเฉลี่ยระยะยาวนี้จะเห็นลักษณะการแปรค่าช่วงหน้าฝน (ครึ่งปีหลัง) ได้ชัดเจนมากกว่า โดยค่ารังสีสุทธินั้นจะมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดือนมกราคมอย่างต่อเนื่องและมีค่าสูงสุดในเดือนพฤษภาคมซึ่งเป็นช่วงปลายฤดูร้อนต้นฤดูฝนจากนั้นเมื่อเข้าสู่ฤดูฝนอย่างเต็มตัว ค่ารังสีสุทธิจะมีค่าลดลงอย่างช้า ๆ ต่อเนื่องจนถึงเดือนตุลาคมเนื่องจากเมฆฝนมีการบดบังรังสีคลื่นสั้นขาลง เมื่อเข้าสู่ฤดูหนาวพื้นที่ประเทศไทยจะมีช่วงเวลากลางวันสั้นและมุมดวงอาทิตย์ที่ต่ำทำให้ค่ารังสีคลื่นสั้นขาลงยังคงลดลงอย่างต่อเนื่องส่งผลให้ค่ารังสีสุทธิลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจนจนกระทั่งเดือนธันวาคม

4.4.3 รังสีสุทธิตายปี

เพื่อดูศักยภาพของรังสีสุทธิในพื้นที่ประเทศไทย ผู้วิจัยจึงได้ทำการเฉลี่ยค่ารังสีสุทธิตายเดือนเป็นค่ารังสีสุทธิตายปี (รูปที่ 48) โดยรังสีสุทธิเฉลี่ยรายปีมีความแตกต่างกันตามภูมิประเทศอย่างชัดเจน โดยภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นพื้นที่ที่มีศักยภาพรังสีสุทธิที่สูงสุด โดยเฉพาะบริเวณที่ราบที่ได้รับแสงแดดเต็มที่ ทำให้ค่ารังสีสุทธิเฉลี่ยอยู่ในช่วง $13-17 \text{ MJ/m}^2$ ซึ่งแสดงถึงการได้รับพลังงานจากดวงอาทิตย์ในปริมาณมหาศาลตลอดทั้งปี สะท้อนถึงโอกาสในการนำพลังงานแสงอาทิตย์ไปใช้ประโยชน์ ส่วนภาคเหนือตอนบนและภาคตะวันตก ซึ่งมีสภาพภูมิประเทศเป็นภูเขาสูงหรือป่าไม้หนาแน่น จะมีศักยภาพรังสีสุทธิต่ำกว่า (อยู่ในช่วง $7-10 \text{ MJ/m}^2$) เนื่องจากมีเมฆปกคลุมบ่อยครั้งและแสงแดดอาจถูกบดบังจากภูเขา ทำให้ได้รับพลังงานแสงอาทิตย์โดยเฉลี่ยตลอดปีน้อยกว่า ขณะที่ภูมิภาคอื่นๆ จะมีค่ารังสีสุทธิอยู่ในระดับปานกลาง สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างรังสีสุทธิกับการคายระเหยนั้น รังสีสุทธิเป็นพลังงานหลักที่ขับเคลื่อนกระบวนการคายระเหย เมื่อพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ตกกระทบพื้นผิวโลกและพืชในปริมาณมาก นั้นหมายความว่ามีความเป็นไปได้ที่จะเปลี่ยนสถานะของน้ำจากของเหลวไปเป็นไอน้ำได้มากขึ้น ยิ่งค่ารังสีสุทธิสูงเท่าใด ก็จะมีพลังงานพร้อมสำหรับการระเหยและคายน้ำจากพืชมากขึ้น ส่งผลให้อัตราการคายระเหยมีค่าสูงตามไปด้วย อย่างไรก็ตาม แม้รังสีสุทธิจะเป็นตัวปัจจัยสำคัญแต่ปัจจัยด้านสภาพอากาศอื่นๆ เช่น อุณหภูมิอากาศที่สูงขึ้น ความชื้นสัมพัทธ์ที่ต่ำลง และความเร็วลมที่เพิ่มขึ้น ก็ล้วนส่งเสริมกระบวนการคายระเหยให้มีอัตราเร่งขึ้นได้อีกด้วย การทำความเข้าใจกระบวนการเหล่านี้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

ต่อการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ การเกษตร และการรับมือกับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในแต่ละพื้นที่ของประเทศไทย



รูปที่ 48 ค่ารังสีสุทธิเฉลี่ยรายปี

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

รังสีสุทธิเป็นปริมาณพลังงานสุทธิที่พื้นผิวโลกโดยพิจารณาผลต่างระหว่างรังสีขาหลงและรังสีขาขึ้น ทั้งในรูปแบบของรังสีคลื่นสั้นและรังสีคลื่นยาว ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อสมดุลพลังงานของโลก กระบวนการระเหย ความชื้นในดิน และการเจริญเติบโตของพืช โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการคำนวณค่าการคายระเหยอ้างอิงที่จำเป็นต่อการบริหารจัดการน้ำในภาคเกษตรกรรม อย่างไรก็ตามประเทศไทยยังขาดเครือข่ายสถานีวัดรังสีสุทธิอย่างครอบคลุม ทำให้ต้องพึ่งพาการประเมินค่ารังสีสุทธิด้วยแบบจำลอง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งพัฒนาแบบจำลองสำหรับการประมาณค่ารังสีสุทธิในประเทศไทย โดยแบ่งเป็นสองแนวทางหลัก ได้แก่ 1) แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาภาคพื้นดิน เช่น ค่ารังสีคลื่นสั้นขาหลง อุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด และความชื้นสัมพัทธ์ เป็นตัวแปรอินพุต โดยแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมมีโครงสร้าง 2 ชั้นซ่อน (ชั้นแรก 3 โหนด ชั้นที่สอง 3 โหนด) โดยพบว่าแบบจำลองที่ใช้ข้อมูลรวมทั้ง 4 สถานีให้ค่าความแม่นยำสูง ($R^2 = 0.98$, $RMSE = 14.5\%$, $MBE = -2.2\%$) เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลวัดจากสถานีเชียงใหม่ อุบลราชธานี นครปฐม และสงขลา แนวทางที่ 2) คือการสร้างแบบจำลองเอมไพริคัลโดยใช้ข้อมูลจากดาวเทียม Terra/Aqua และข้อมูลบรรยากาศจากฐานข้อมูล NCEP/NCAR เช่น ค่ารังสีคลื่นสั้นขาหลง ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิอากาศ ปริมาณเมฆ และผลต่างอุณหภูมิการส่องสว่าง ซึ่งถึงแม้จะมีความแม่นยำน้อยกว่า ($R^2 = 0.96$, $RMSE = 21.6\%$, $MBE = -6.4\%$) แต่มีข้อดีเนื่องจากครอบคลุมพื้นที่และข้อมูลมีความต่อเนื่อง ผลจากแบบจำลองเอมไพริคัลที่ดีที่สุดถูกนำมาสร้างแผนที่การกระจายตัวของรังสีสุทธิทั่วประเทศไทย พบว่าค่ารังสีสุทธิมีความแตกต่างตามฤดูกาล โดยมีอิทธิพลหลักจากรังสีคลื่นสั้นขาหลง แผนที่ที่ได้มีความสอดคล้องกับข้อมูลวัดอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของแบบจำลองในการใช้แทนการวัดภาคสนามในพื้นที่ที่ไม่มีข้อมูล ซึ่งจะสามารถนำไปต่อยอดในด้านการบริหารจัดการน้ำ การเกษตร และการศึกษาการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศในประเทศไทยต่อไป

รายการอ้างอิง

- Al-Ghobari, H.M., El-Marazky, M.S., Dewidar, A.Z. and Mattar, M.A., 2018. Prediction of wind drift and evaporation losses from sprinkler irrigation using neural network and multiple regression techniques. *Agricultural Water Management*, 195: 211-221.
- Albugami, S., Palmer, S., Meersmans, J. and Waine, T., 2018. Evaluating MODIS dust-detection indices over the Arabian Peninsula. *Remote Sensing*, 10(12): 1993.
- Alexandris, S. and Kerkides, P., 2003. New empirical formula for hourly estimations of reference evapotranspiration. *Agricultural Water Management*, 60(3): 157-180.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, 300(9): D05109.
- Bisht, G. and Bras, R.L., 2010. Estimation of net radiation from the MODIS data under all sky conditions: Southern Great Plains case study. *Remote Sensing of Environment*, 114(7): 1522-1534.
- Bisht, G. and Bras, R.L., 2011. Estimation of net radiation from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer over the continental United States. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(6): 2448-2462.
- Bisht, G., Venturini, V., Islam, S. and Jiang, L., 2005. Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days. *Remote sensing of environment*, 97(1): 52-67.
- Chen, J.M. and Liu, J., 2020. Evolution of evapotranspiration models using thermal and shortwave remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 237: 111594.
- Davies, J., 1967. A note on the relationship between net radiation and solar radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 93(395): 109-115.
- Emmendorfer, L.R. and Dimuro, G.P., 2021. A point interpolation algorithm resulting from weighted linear regression. *Journal of Computational Science*, 50: 101304.
- Ferreira, A.G., Soria-Olivas, E., López, A.J.S. and Lopez-Baeza, E., 2011. Estimating net radiation at surface using artificial neural networks: a new approach. *Theoretical*

- and applied climatology, 106: 263-279.
- Geraldo-Ferreira, A. et al., 2011. Modelling net radiation at surface using “in situ” netpyrradiometer measurements with artificial neural networks. *Expert Systems with Applications*, 38(11): 14190-14195.
- Hou, J., Jia, G., Zhao, T., Wang, H. and Tang, B., 2014. Satellite-based estimation of daily average net radiation under clear-sky conditions. *Advances in Atmospheric Sciences*, 31: 705-720.
- Hu, B., Wang, Y. and Liu, G., 2012. Relationship between net radiation and broadband solar radiation in the Tibetan Plateau. *Advances in Atmospheric Sciences*, 29: 135-143.
- Jiang, B. et al., 2015. Empirical estimation of daytime net radiation from shortwave radiation and ancillary information. *Agricultural and Forest Meteorology*, 211: 23-36.
- Kumar, M., Raghuwanshi, N. and Singh, R., 2011. Artificial neural networks approach in evapotranspiration modeling: a review. *Irrigation Science*, 29: 11-25.
- Linacre, E., 1968. Estimating the net-radiation flux. *Agricultural meteorology*, 5(1): 49-63.
- Linacre, E.T., 1969. Net radiation to various surfaces. *Journal of Applied Ecology*: 61-75.
- Ojo, O.S., Adeyemi, B. and Oluleye, D.O., 2021. Artificial neural network models for prediction of net radiation over a tropical region. *Neural Computing and Applications*, 33: 6865-6877.
- Ornelas L., 2016. The Mexican Water Forest: benefits of using remote sensing techniques to assess changes in land use and land cover, University of San Francisco, 1-84 pp.
- Peng, J. et al., 2021. A new empirical estimation scheme for daily net radiation at the ocean surface. *Remote Sensing*, 13(20): 4170.
- Wang, D., Liang, S., He, T. and Shi, Q., 2015. Estimation of daily surface shortwave net radiation from the combined MODIS data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(10): 5519-5529.
- Yue, H., He, C., Zhao, Y., Ma, Q. and Zhang, Q., 2017. The brightness temperature adjusted dust index: An improved approach to detect dust storms using MODIS imagery. *International journal of applied earth observation and geoinformation*,

57: 166-176.

เสริม จันทร์ฉาย, 2014. รังสีอาทิตย์ (Solar radiation). หน่วยวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์, ภาควิชาฟิสิกส์,
คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยศิลปากร, นครปฐม.

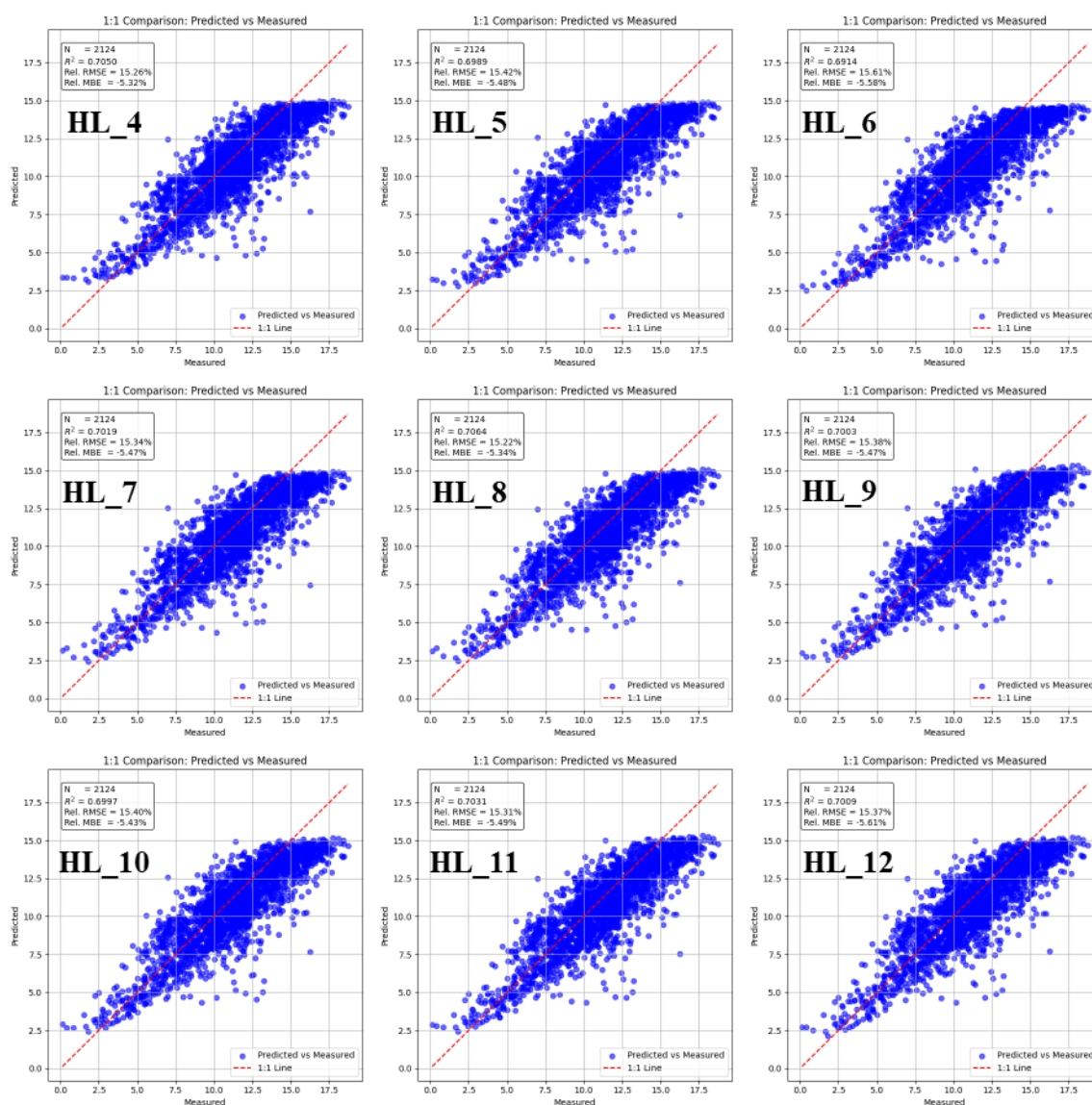


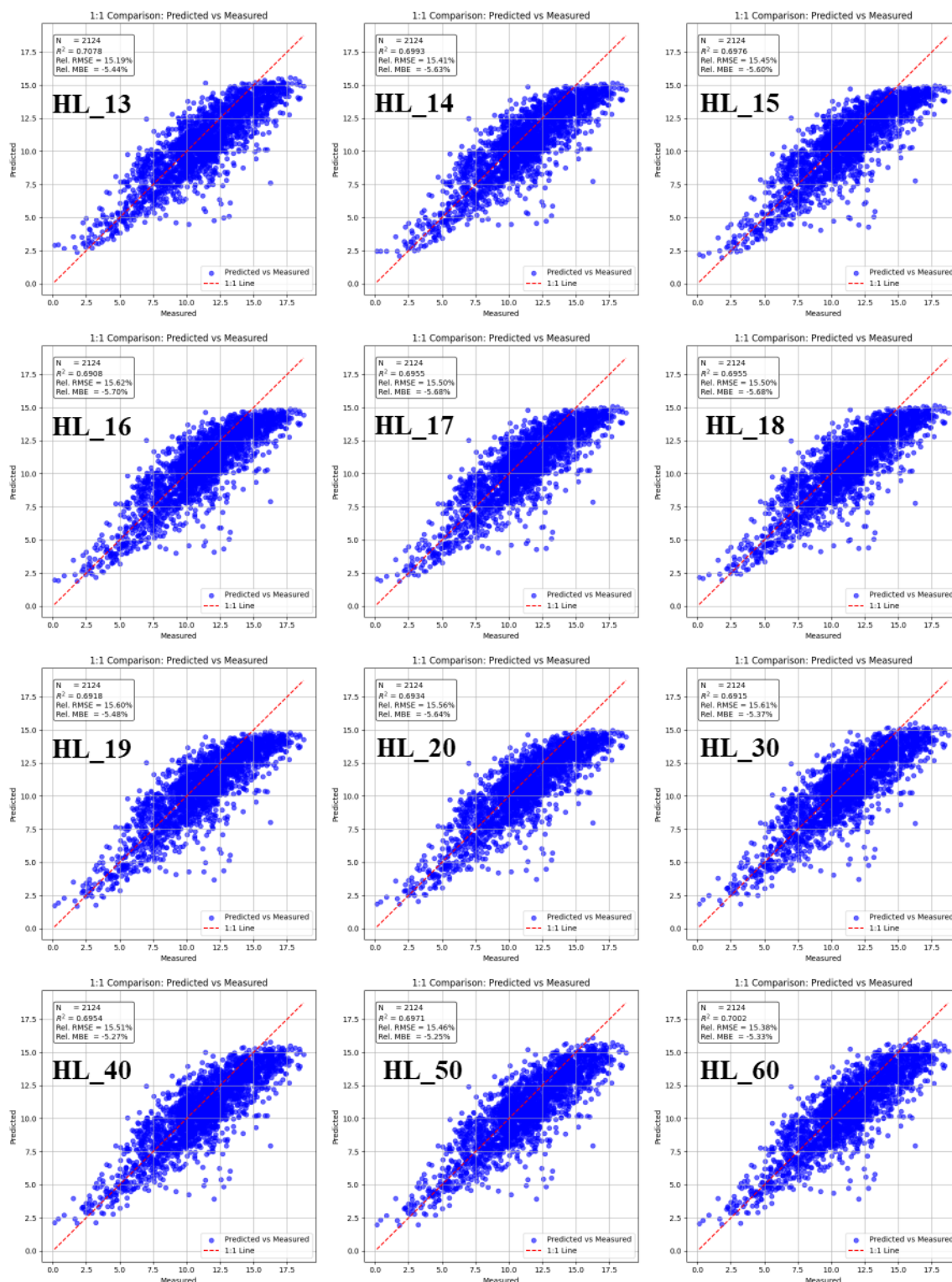


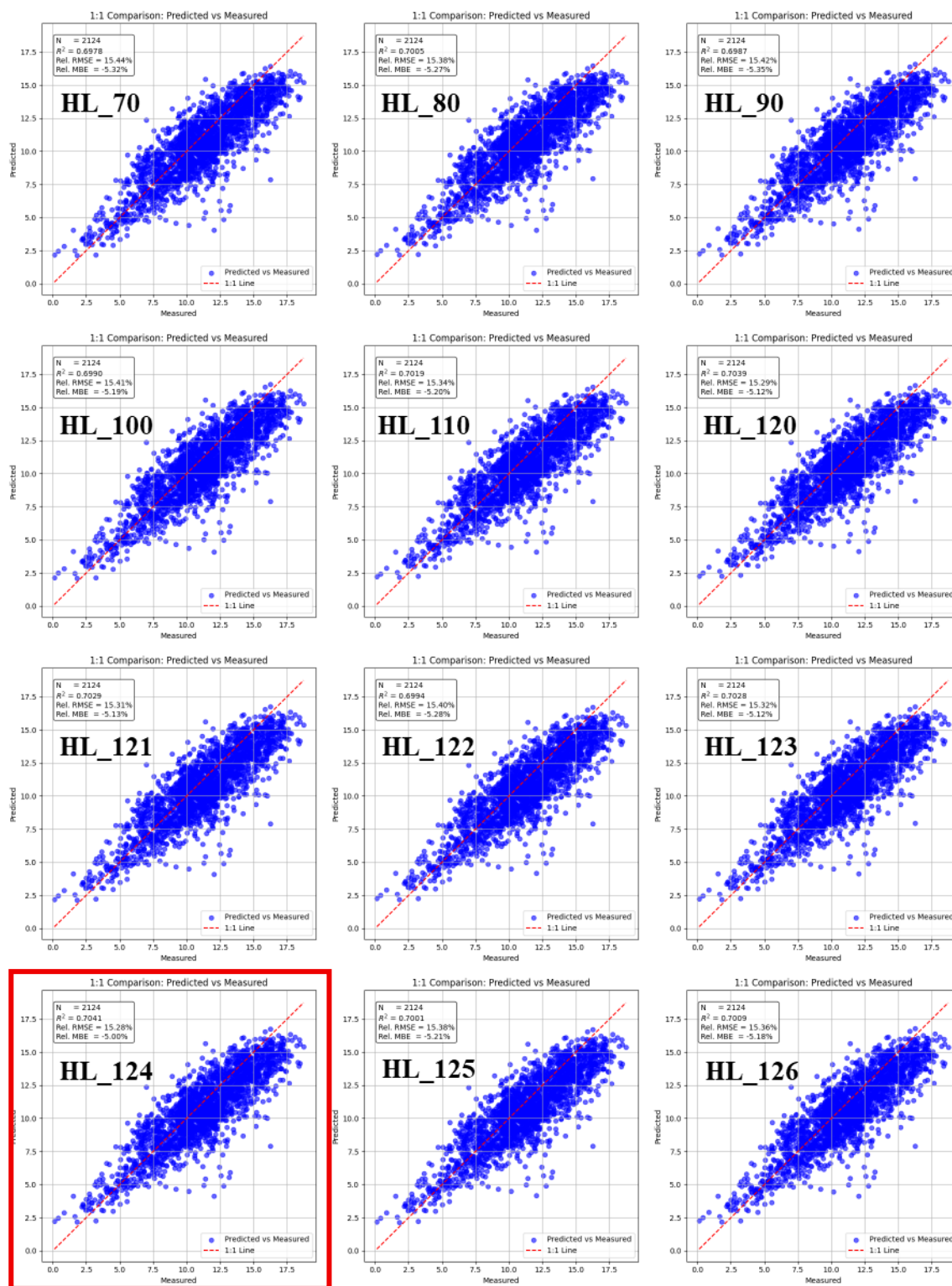


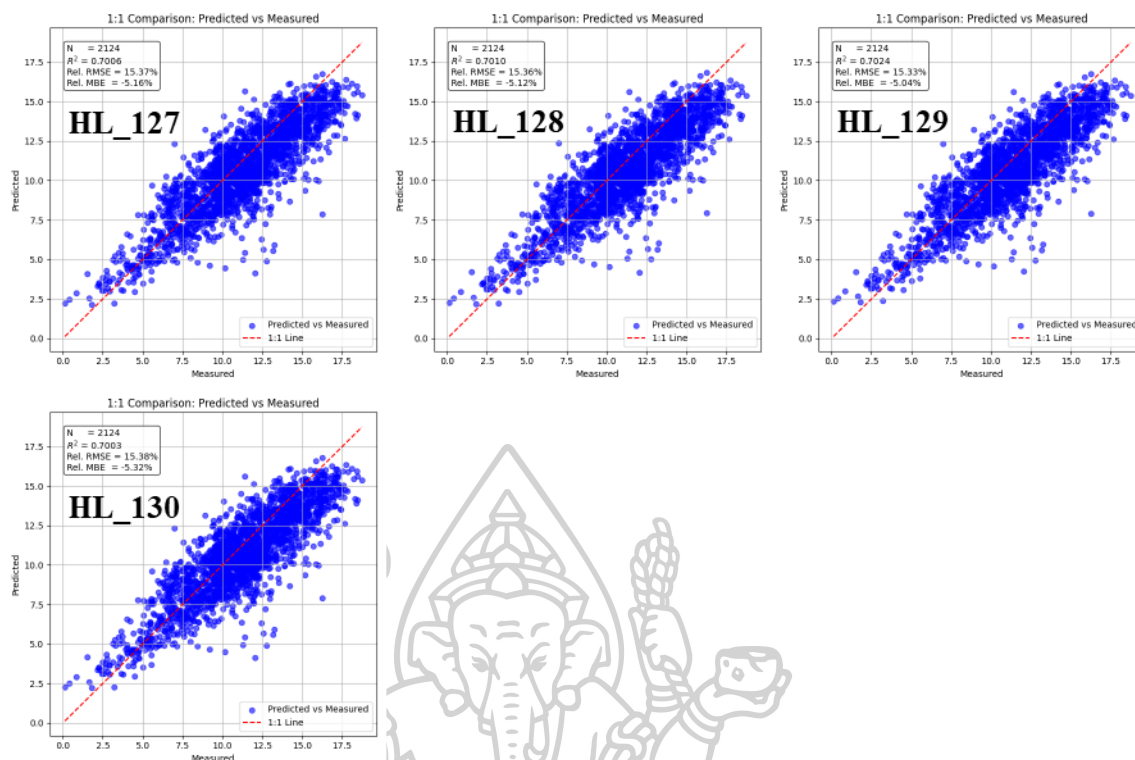
ส่วนของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมนั้นมีความจำเป็นที่จะต้องทำการแปรค่าจำนวนชั้นซ่อน และจำนวนโหนดที่ดีที่สุดออกมาโดยผู้วิจัยได้ทำการแปรค่าจำนวนโหนดและจำนวนชั้นซ่อนที่ 1 ชั้น และ 2 ชั้น โดยได้ผลลัพธ์แสดงได้ดังกราฟต่อไปนี้

1. จำนวนชั้นซ่อน 1 ชั้น









โดยสามารถสรุปเป็นตารางค่าความคลาดเคลื่อนเป็นตารางได้ดังต่อไปนี้

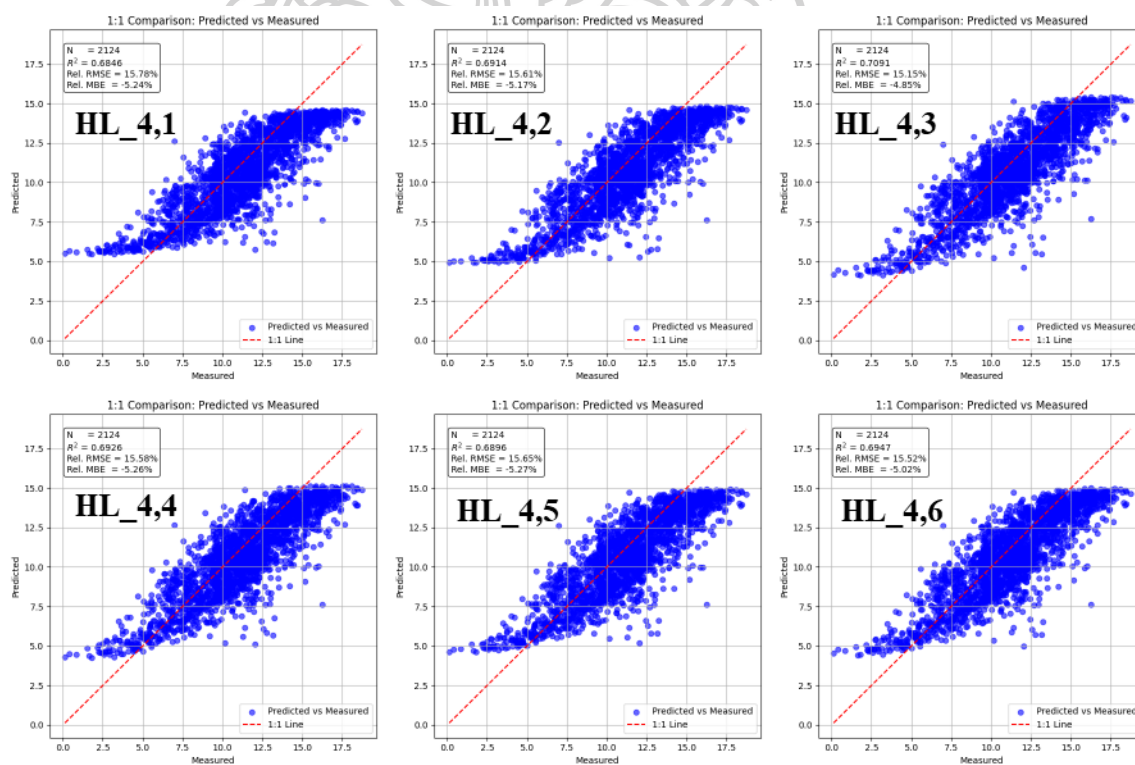
ตารางแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่ารังสีสุทธิของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อมีจำนวนชั้นซ่อน 1 ชั้น และมีจำนวนโหนดต่าง ๆ

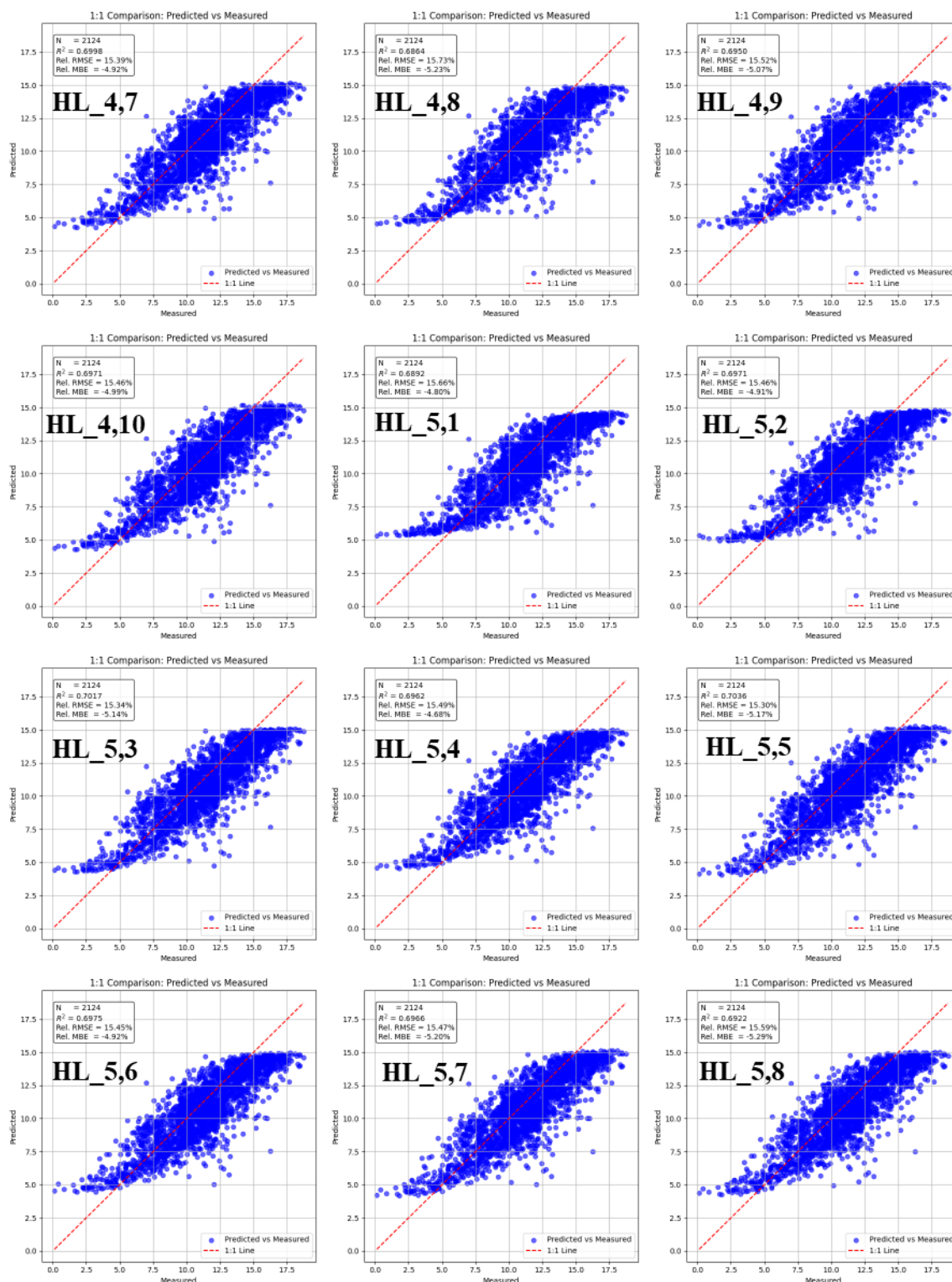
Hidden Layer	R ²	RMSE	MBE	Hidden Layer	R ²	RMSE	MBE
4	0.705	15.26	-5.32	14	0.6993	15.41	-5.63
5	0.6989	15.42	-5.48	15	0.6976	15.45	-5.6
6	0.6914	15.61	-5.58	16	0.6908	15.62	-5.7
7	0.7019	15.34	-5.47	17	0.6955	15.5	-5.68
8	0.7064	15.22	-5.34	18	0.6955	15.5	-5.68
9	0.7003	15.38	-5.47	19	0.6918	15.6	-5.48
10	0.6997	15.4	-5.43	20	0.6934	15.56	-5.64
11	0.7031	15.31	-5.49	30	0.6915	15.61	-5.37
12	0.7009	15.37	-5.61	40	0.6954	15.51	-5.27
13	0.7078	15.19	-5.44	50	0.6971	15.46	-5.25

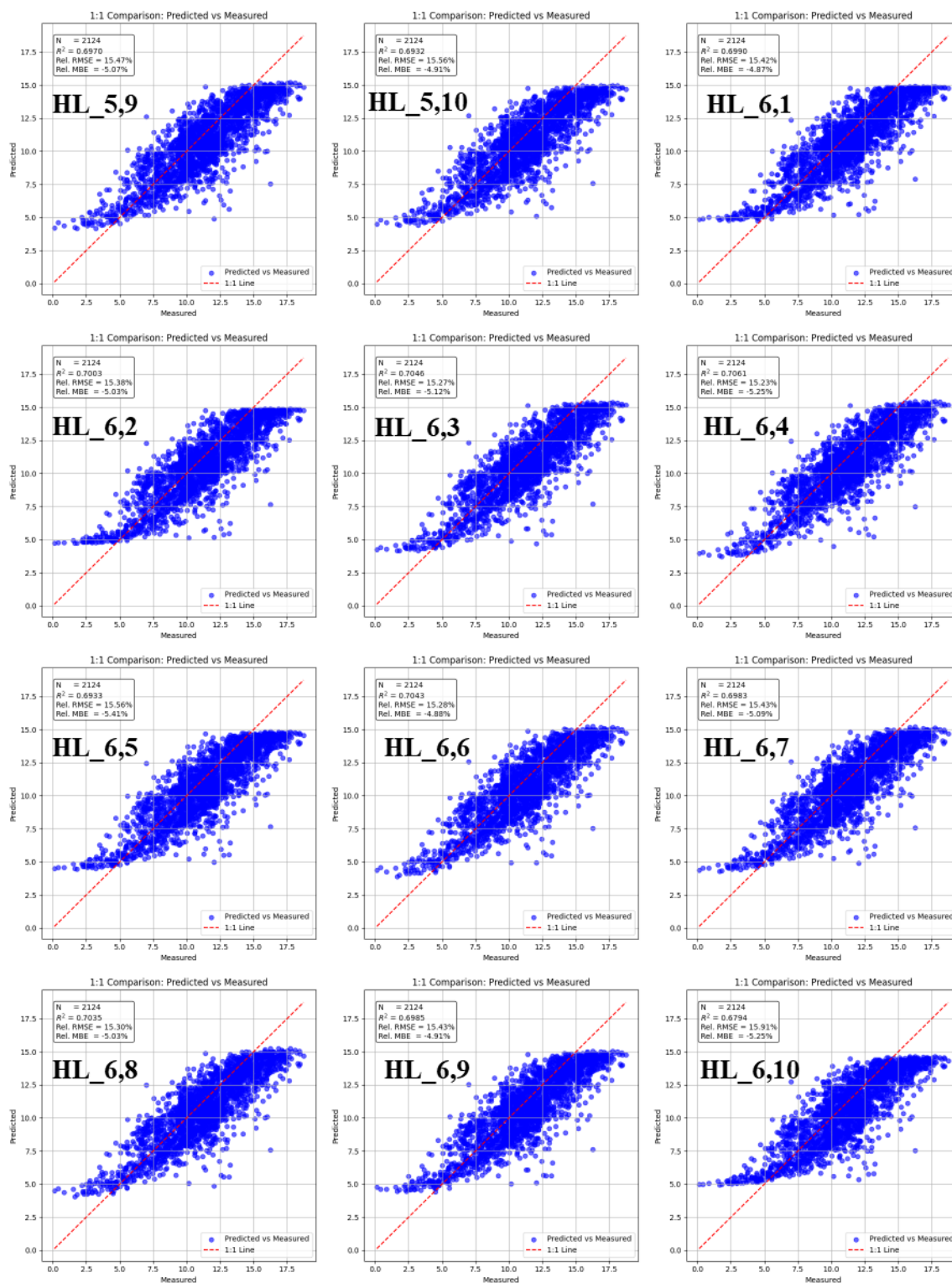
ตาราง (ต่อ)

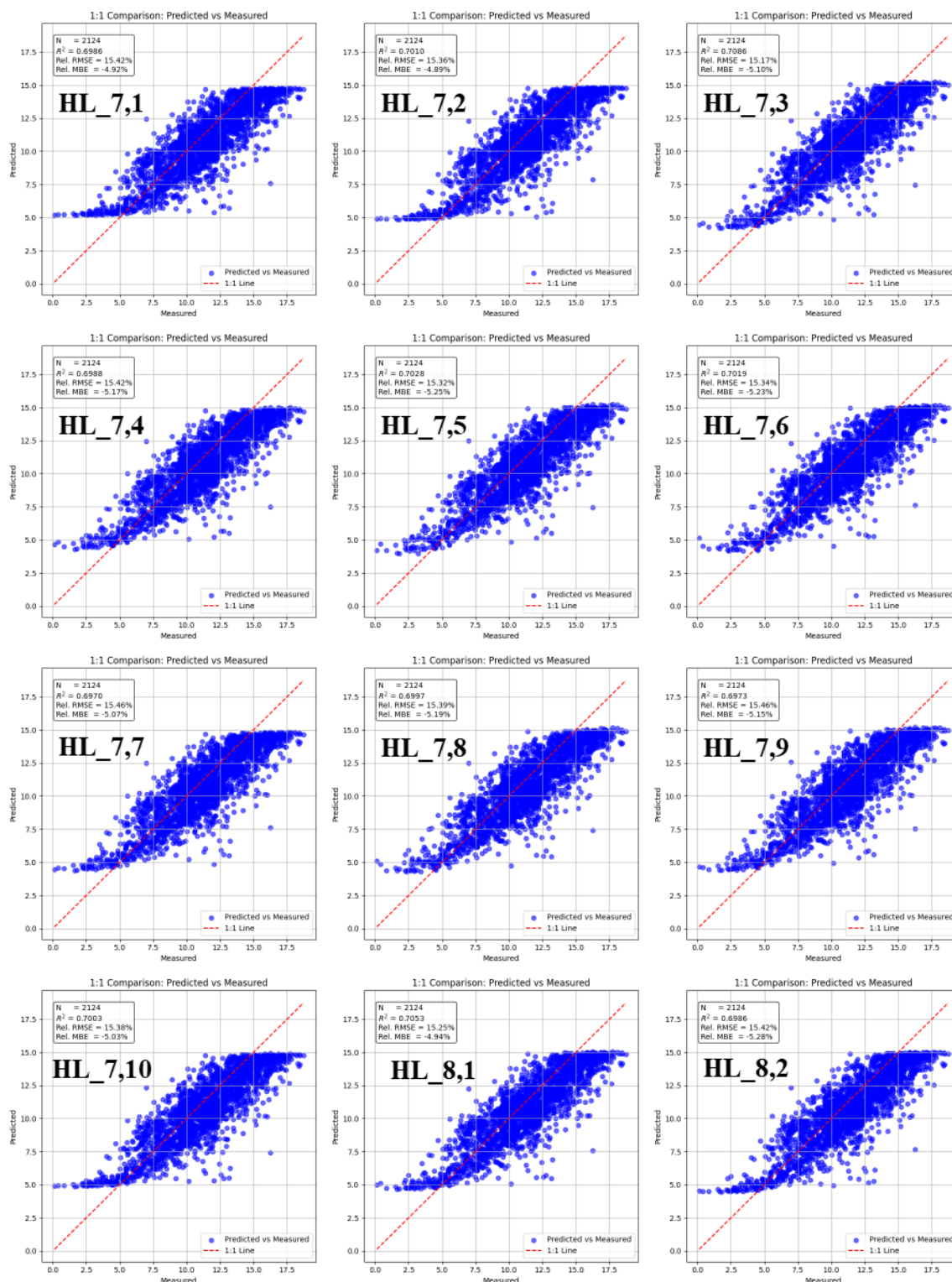
Hidden Layer	R ²	RMSE	MBE	Hidden Layer	R ²	RMSE	MBE
60	0.7002	15.38	-5.33	123	0.7028	15.32	-5.12
70	0.6978	15.44	-5.32	124	0.7041	15.28	-5
80	0.7005	15.38	-5.27	125	0.7001	15.38	-5.21
90	0.6987	15.42	-5.35	126	0.7009	15.36	-5.18
100	0.699	15.41	-5.19	127	0.7006	15.37	-5.16
110	0.7019	15.34	-5.2	128	0.701	15.36	-5.12
120	0.7039	15.29	-5.12	129	0.7024	15.33	-5.04
121	0.7029	15.31	-5.13	130	0.7003	15.38	-5.32
122	0.6994	15.4	-5.28				

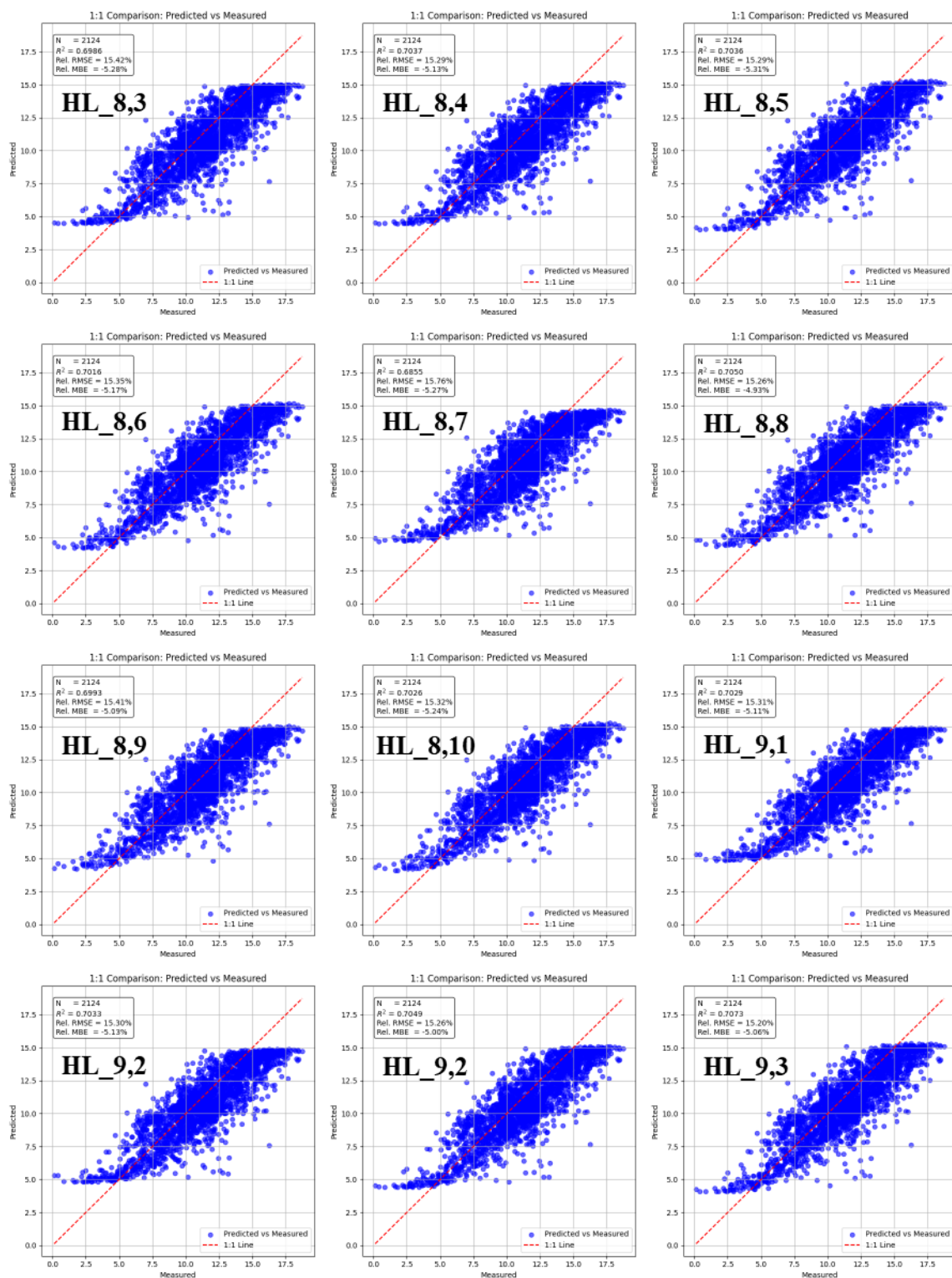
2. จำนวนชั้นซ่อน 2 ชั้น

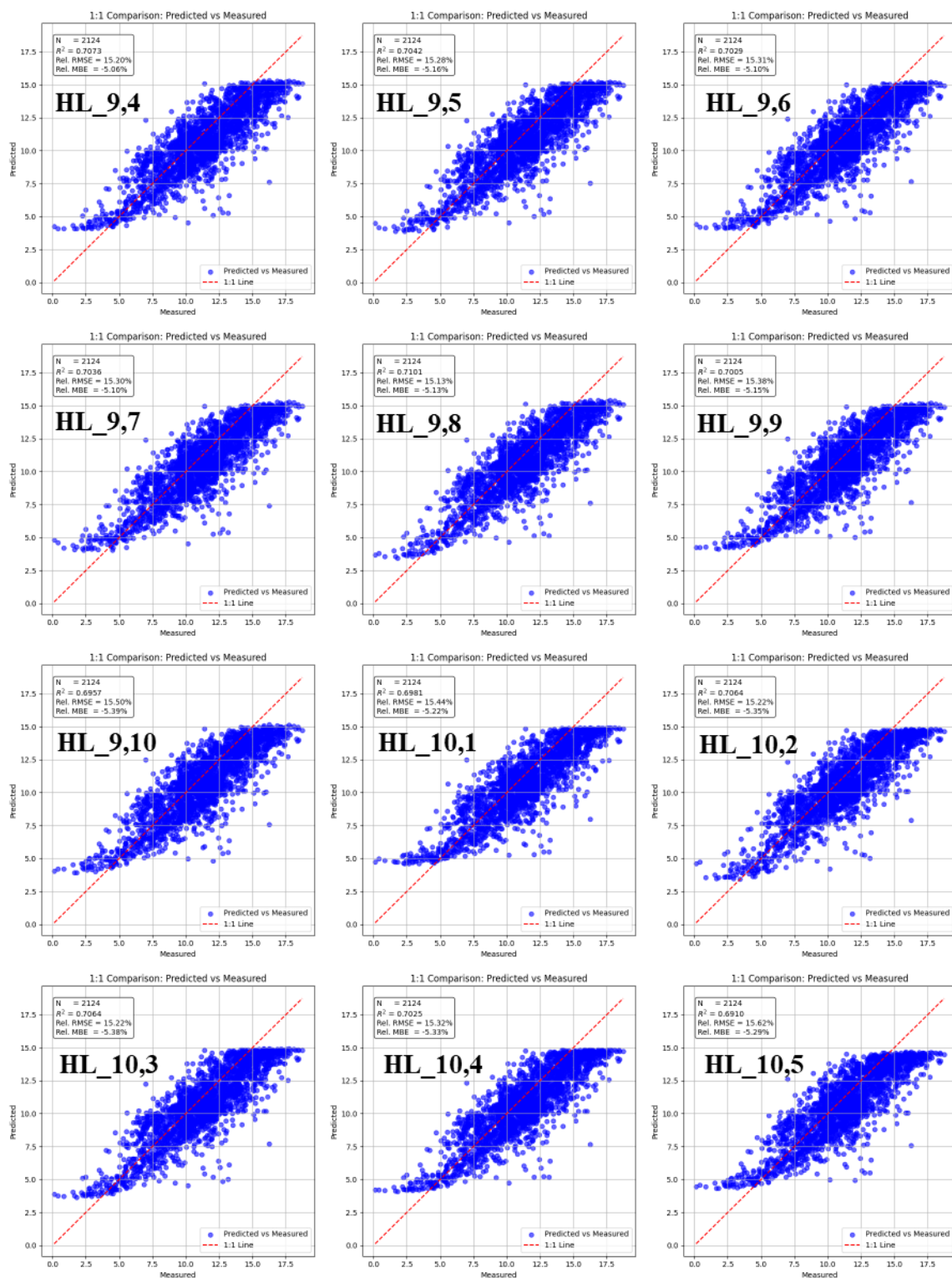


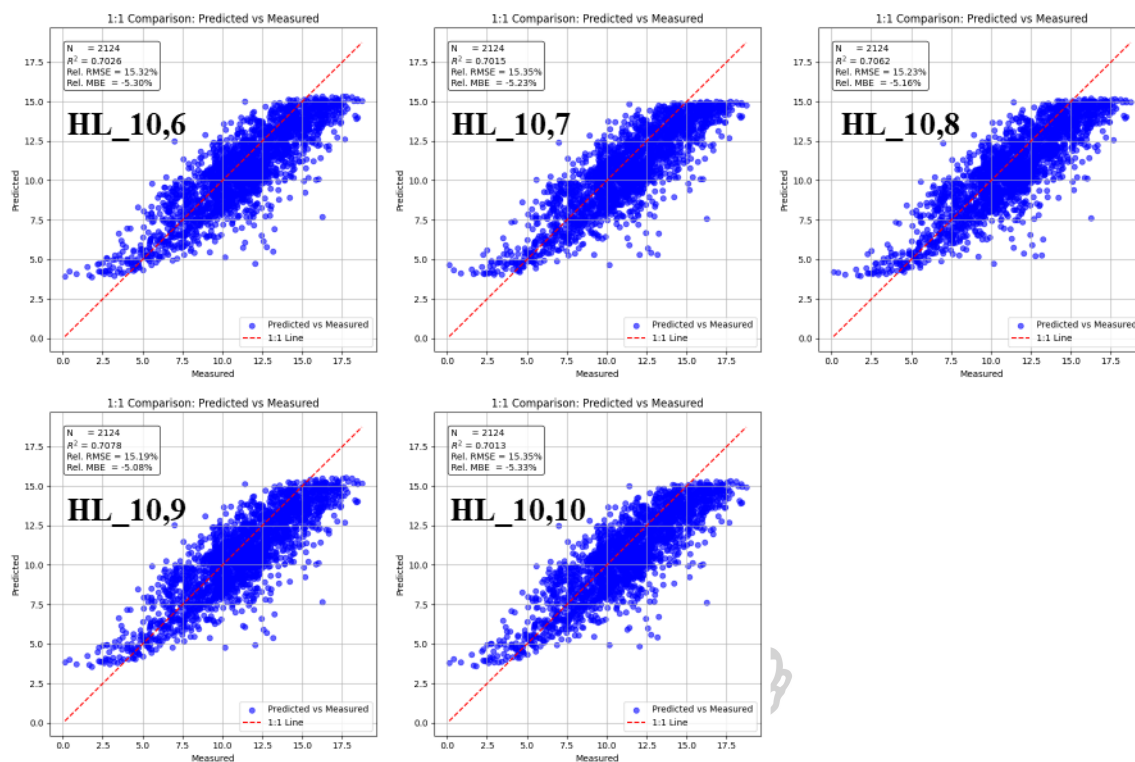




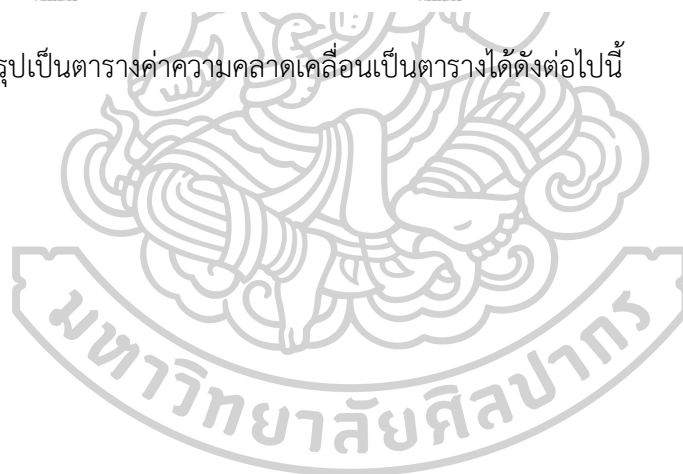








โดยสามารถสรุปเป็นตารางค่าความคลาดเคลื่อนเป็นตารางได้ดังต่อไปนี้



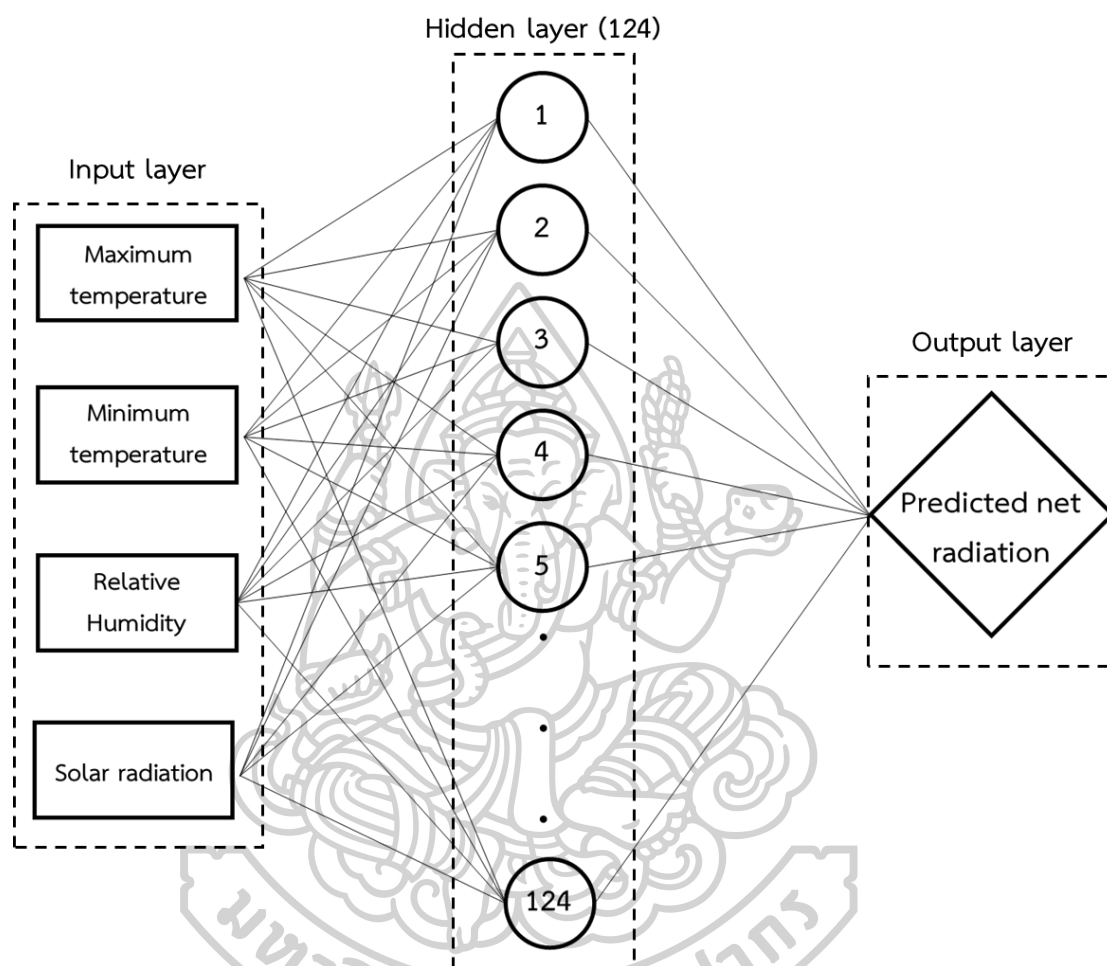
ตารางแสดงค่าความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าฟังก์ชันของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อมีจำนวนชั้นซ่อน 2 ชั้น และมีจำนวนโหนดต่าง ๆ

Hidden Layer	R^2	RMSE	MBE	Hidden Layer	R^2	RMSE	MBE
4,1	0.68	15.78	-5.24	5,2	0.70	15.46	-4.91
4,2	0.69	15.61	-5.17	5,3	0.70	15.34	-5.14
4,3	0.71	15.15	-4.85	5,4	0.70	15.49	-4.68
4,4	0.69	15.58	-5.26	5,5	0.70	15.30	-5.17
4,5	0.69	15.65	-5.27	5,6	0.70	15.45	-4.92
4,6	0.69	15.52	-5.02	5,7	0.70	15.47	-5.20
4,7	0.70	15.39	-4.92	5,8	0.69	15.59	-5.29
4,8	0.69	15.73	-5.23	5,9	0.70	15.47	-5.07
4,9	0.70	15.52	-5.07	5,10	0.69	15.56	-4.91
4,10	0.70	15.46	-4.99	6,1	0.70	15.42	-4.87
5,1	0.69	15.66	-4.80	6,2	0.70	15.38	-5.03

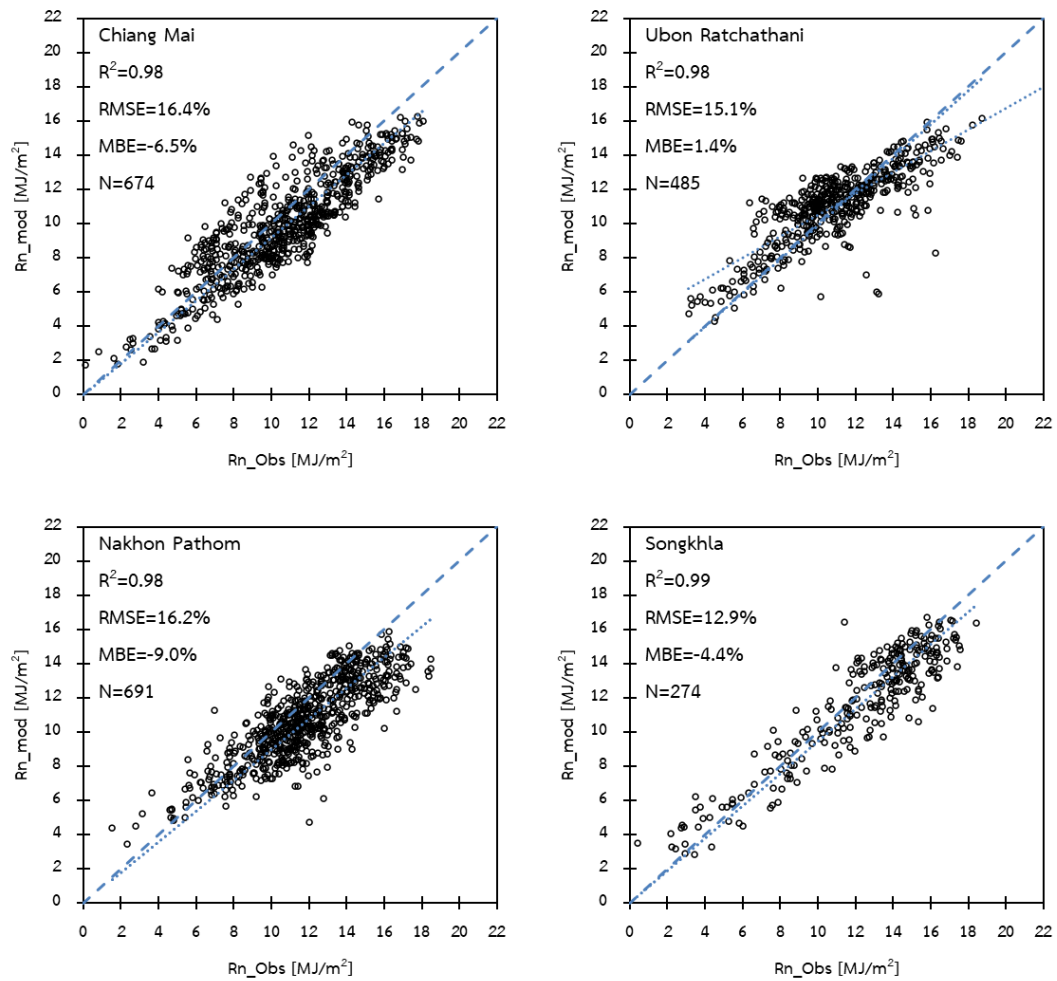
ตาราง (ต่อ)

Hidden Layer	R ²	RMSE	MBE	Hidden Layer	R ²	RMSE	MBE
6,3	0.70	15.27	-5.12	8,7	0.69	15.76	-5.27
6,4	0.71	15.23	-5.25	8,8	0.70	15.26	-4.93
6,5	0.69	15.56	-5.41	8,9	0.70	15.41	-5.09
6,6	0.70	15.28	-4.88	8,10	0.70	15.32	-5.24
6,7	0.70	15.43	-5.09	9,1	0.70	15.31	-5.11
6,8	0.70	15.30	-5.03	9,2	0.70	15.30	-5.13
6,9	0.70	15.43	-4.91	9,3	0.70	15.26	-5.00
6,10	0.68	15.91	-5.25	9,4	0.71	15.20	-5.06
7,1	0.70	15.42	-4.92	9,5	0.70	15.28	-5.16
7,2	0.70	15.36	-4.89	9,6	0.70	15.31	-5.10
7,3	0.71	15.17	-5.10	9,7	0.70	15.30	-5.10
7,4	0.70	15.42	-5.17	9,8	0.71	15.13	-5.13
7,5	0.70	15.32	-5.25	9,9	0.70	15.38	-5.15
7,6	0.70	15.34	-5.23	9,10	0.70	15.50	-5.39
7,7	0.70	15.46	-5.07	10,1	0.70	15.44	-5.22
7,8	0.70	15.39	-5.19	10,2	0.71	15.22	-5.35
7,9	0.70	15.46	-5.15	10,3	0.71	15.22	-5.38
7,10	0.70	15.31	-5.43	10,4	0.70	15.32	-5.33
8,1	0.70	15.38	-5.03	10,5	0.69	15.62	-5.29
8,2	0.71	15.25	-4.94	10,6	0.70	15.32	-5.30
8,3	0.70	15.42	-5.28	10,7	0.70	15.35	-5.23
8,4	0.70	15.29	-5.13	10,8	0.71	15.23	-5.16
8,5	0.70	15.29	-5.31	10,9	0.71	15.19	-5.08
8,6	0.70	15.35	-5.17	10,10	0.70	15.35	-5.33

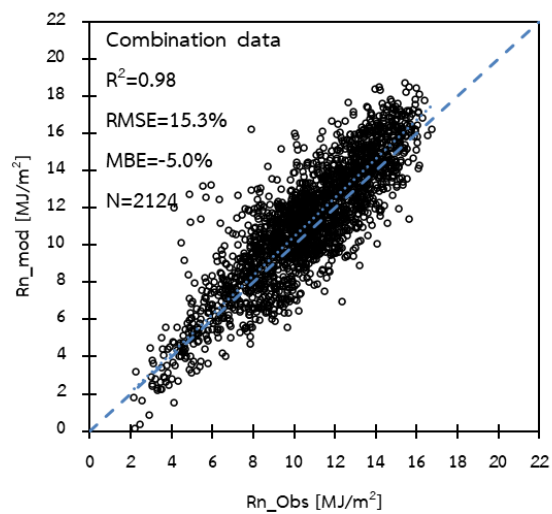
โครงสร้างที่เหมาะสมที่สุดคือ จำนวนชั้นซ่อน 1 ชั้น มีทั้งหมด 124 โหนด และสามารถแสดงโครงสร้างได้ดังต่อไปนี้



ผลลัพธ์การเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการวัดและข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองของแต่ละสถานีสามารถแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้

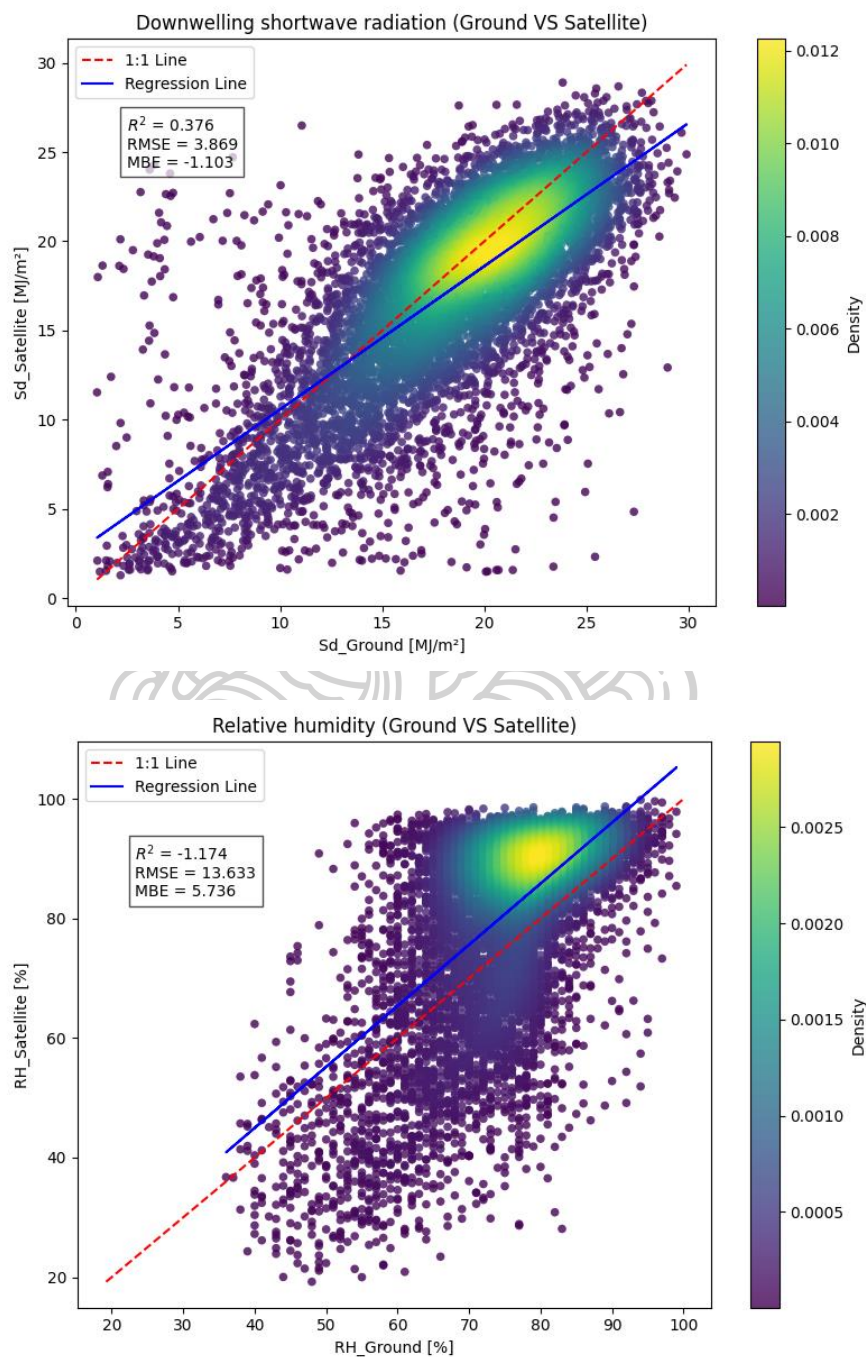


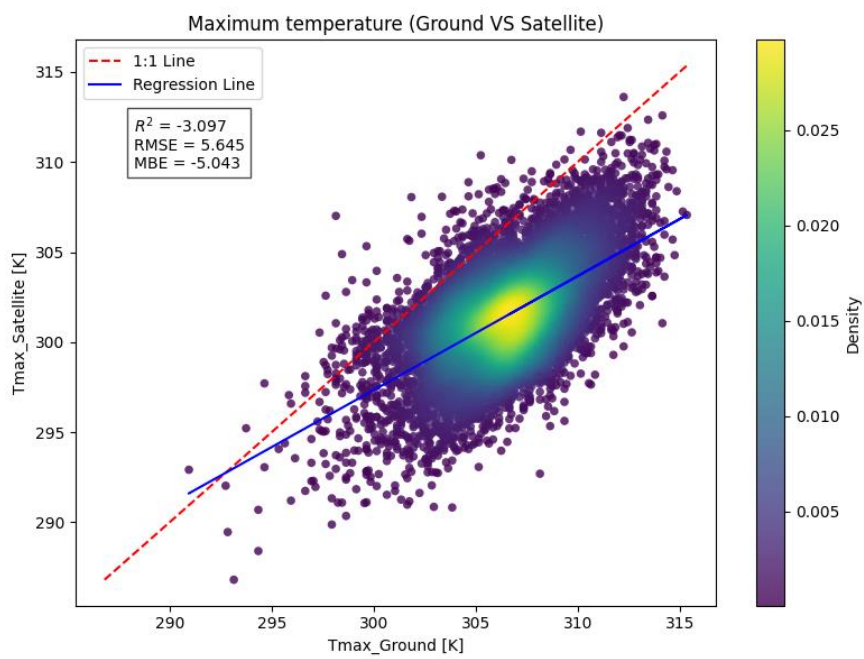
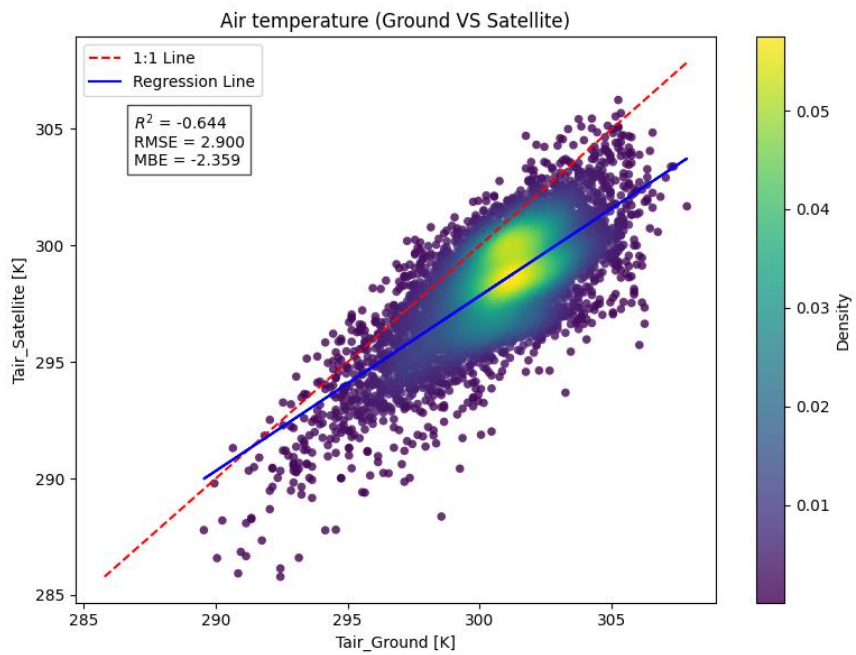
ผลลัพธ์การเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการวัดและข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองของข้อมูลทั่วประเทศ
(Combination data)

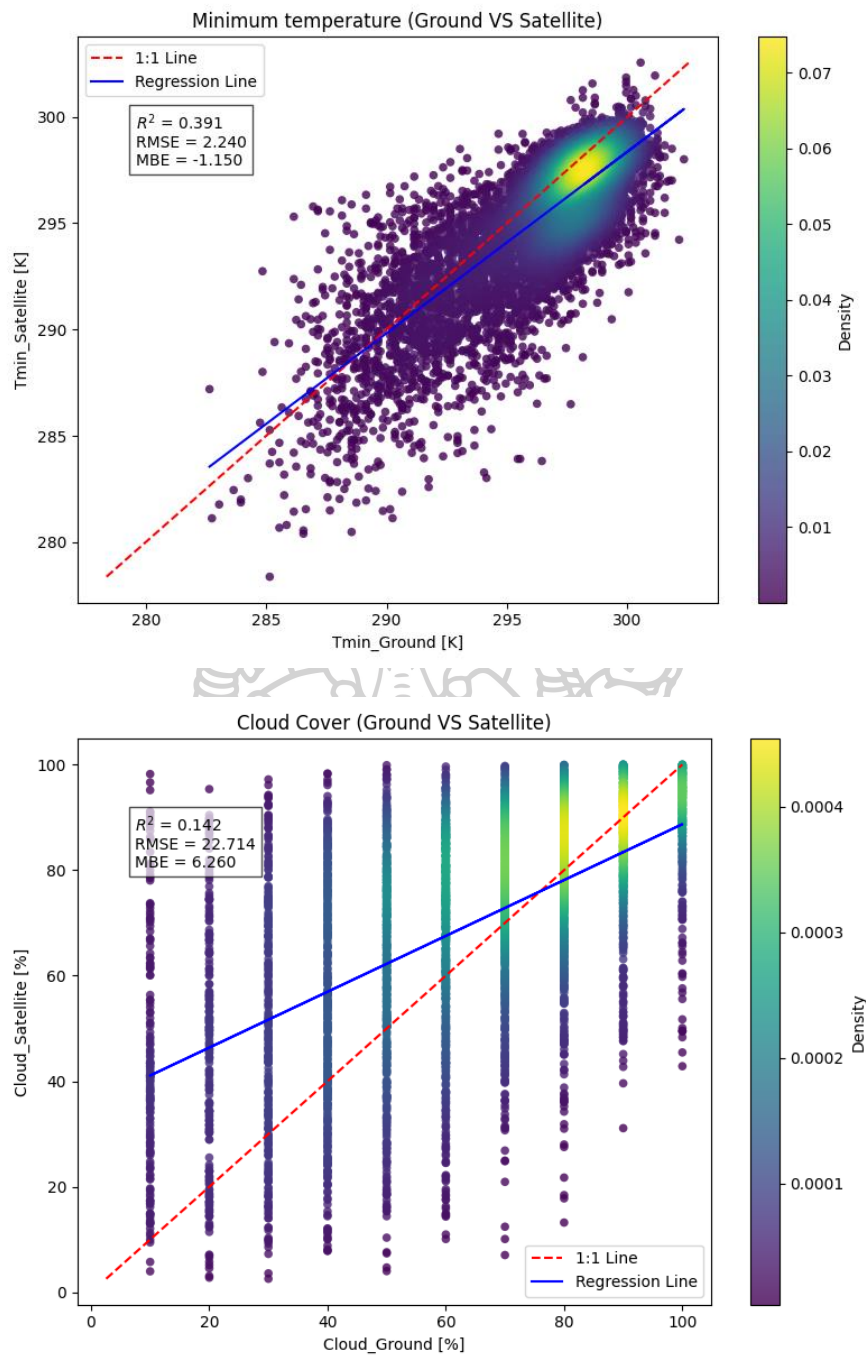




งานวิจัยนี้มีการนำข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมมาเป็นอินพุตในแบบจำลอง เพื่อเป็นการยืนยันว่าข้อมูลดังกล่าวสอดคล้องหรือมีความสัมพันธ์ข้อมูลภาคพื้น ผู้วิจัยได้ทำการเขียนกราฟเพื่อดูว่าข้อมูลทั้งสองชุดมีความสอดคล้องกัน







ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล

ชุติมณฑน์ เพิ่มวงศ์

วุฒิการศึกษา

1. ศึกษาในระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนสุโขทัยวิทยาคม จังหวัดสุโขทัย ระหว่างปี พ.ศ. 2552-2558

2. ศึกษาในระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ ระหว่างปี พ.ศ. 2559-2562

3. ศึกษาในระดับปริญญาโทวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ ระหว่างปี พ.ศ. 2563-2564

ผลงานตีพิมพ์

1. กมลทิพย์ หนูหรั่ง และ ชุติมณฑน์ เพิ่มวงศ์ (2562): การพัฒนาอุปกรณ์สำรวจระยะไกล สำหรับวัดฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศ : โครงการวิจัยระดับปริญญาตรี สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร (วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์)

2. Chutimon Phoemwong, Sumaman Buntoung, Somjet Pattarapanitchai, and Serm Janjai (2021): A Model for estimating net radiation at Nakhon Pathom, In conjunction with the 2nd International Conference on Engineering and Industrial Technology 2021 (ICEIT 2021)

3. ชุติมณฑน์ เพิ่มวงศ์ (2564): การศึกษารังสีสุทธิจากข้อมูลวัดที่สถานีอุตุนิยมวิทยานครปฐม : วิทยานิพนธ์ระดับมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร (วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์)

4. Chutimon Phoemwong, Rungrat Wattan, and Serm Janjai. (2025). Artificial Neural Network Estimation of Daily Net Radiation Using Meteorological Data in Thailand. Journal of Renewable Energy and Smart Grid Technology, 20(1), 1-7.