



การศึกษารังสีสุทธิจากข้อมูลวัดที่สถานีอุตุนิยมวิทยานครปฐม



โดย

นางสาวชุตติมณฑน์ เพิ่มวงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาวิจัยจากข้อมูลวัดที่สถานีอุตุนิยมวิทยานครปฐม



โดย  
นางสาวชุตินันท์ เพิ่มวงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาามหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

A STUDY OF NET RADIATION FROM DATA COLLECTED AT NAKHON PATHOM  
METEOROLOGICAL STATION



By  
MISS Chutimon PHOEMWONG

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for Master of Science (PHYSICS)  
Department of PHYSICS  
Graduate School, Silpakorn University  
Academic Year 2021  
Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ	การศึกษาวิจัยสิทธิจากข้อมูลวัดที่สถานีอุตุนิยมวิทยานครปฐม
โดย	นางสาวชุตินฉัตร เพิ่มวงศ์
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุมาลย์ บรรเทียง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมเจตน์ ภัทรพานิชชัย

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อิศระ มะศิริ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก  
(ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุมาลย์ บรรเทียง)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมเจตน์ ภัทรพานิชชัย)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก  
(ดร. ประพนมกร ชูศรี)

630720020 : ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

คำสำคัญ : รังสีสุทธิ, รังสีอาทิตย์

นางสาว ชุตินณชนม์ เพิ่มวงศ์: การศึกษารังสีสุทธิจากข้อมูลวัดที่สถานีอุตุนิยมวิทยา นครปฐม  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค่ารังสีสุทธิจากเครื่องวัดภาคพื้นดินซึ่งตั้งอยู่ที่สถานีอุตุนิยมวิทยา นครปฐม อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม (14.00°N, 99.58°E) โดยเครื่องวัดที่ใช้เป็นเครื่องวัดเน็ตเรดิโอมิเตอร์ (Net Radiometer) จากบริษัทผู้ผลิต Kipp&Zonen รุ่น CNR4 และข้อมูลที่ใช้ในช่วงระหว่างปี ค.ศ. 2017-2021 (5ปี) ผู้วิจัยได้นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ทางสถิติซึ่งประกอบด้วย ค่ารังสีสุทธิรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนแต่ละปีและค่ารังสีสุทธิรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาว (ค.ศ. 2017-2021) จากผลที่ได้พบว่าค่ารังสีสุทธิจะมีค่าเป็นบวกในช่วงเวลากลางวันซึ่งสูงสุดที่เวลา 12.00 น. เนื่องจากปริมาณความเข้มของรังสีคลื่นสั้นขาลงนั้นมีค่าสูงกว่ารังสีคลื่นสั้นขาขึ้นมาก แต่จะมีค่าติดลบและคงที่ในเวลากลางคืนเนื่องจากในช่วงเวลากลางคืนมีเฉพาะองค์ประกอบของรังสีคลื่นยาวขาขึ้นจากพื้นดินมีค่ามากกว่าขาลงจากบรรยากาศเนื่องจากการกักเก็บความร้อนในพื้นดินนั้นมีค่าสูง จากนั้นศึกษาค่ารังสีสุทธิเฉลี่ยรายเดือนระยะยาว พบว่าจะมีค่าสูงสุดที่เดือนพฤษภาคมซึ่งเป็นช่วงรอยต่อระหว่างฤดูร้อนและฤดูฝน และมีค่าต่ำสุดในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงมกราคมซึ่งเป็นฤดูหนาว นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาค่าตัวแปรที่อาจมีผลต่อค่ารังสีสุทธิซึ่งประกอบด้วย ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง (aerosol optical depth) ดัชนีเมฆ (cloud index) ปริมาณไอน้ำในคอลัมน์บรรยากาศ (precipitable water) สัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิว (albedo) และคลื่นสั้นขาลง (downwelling shortwave) โดยใช้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมผลลัพธ์ที่ได้บ่งชี้ว่าอินพุตที่ดีที่สุดในการประมาณค่ารังสีสุทธิคือรังสีอาทิตย์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีสุทธิและค่ารังสีอาทิตย์ในรูปแบบของสมการเอมไพริคัล (empirical) โดยใช้ข้อมูลระหว่างปี ค.ศ. 2017-2020 โดยความสัมพันธ์ที่ได้อยู่ในรูปแบบสมการเส้นตรงที่มีค่าความชันเท่ากับ 0.735 และจุดตัดแกน y เท่ากับ -29.274 ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้ความสัมพันธ์นี้เป็นแบบจำลองในการประมาณค่ารังสีสุทธิจากรังสีอาทิตย์ จากนั้นทำการทดสอบแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ข้อมูลรังสีคลื่นสั้นรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนปี ค.ศ. 2021 และนำค่ารังสีสุทธิที่ได้จากแบบจำลองมาทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัด ผลที่ได้พบว่าค่า Root mean square difference (RMSD) มีค่าเท่ากับ 12.8% Mean bias difference (MBD) มีค่าเท่ากับ 0.3% และ Coefficient of determination ( $R^2$ ) มีค่าเท่ากับ 0.99 ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถประมาณค่ารังสีสุทธิจากรังสีคลื่นสั้นขาลงได้



630720020 : Major (PHYSICS)

Keyword : Net Radiation, Solar Radiation

MISS CHUTIMON PHOEMWONG : A STUDY OF NET RADIATION FROM DATA COLLECTED AT NAKHON PATHOM METEOROLOGICAL STATION THESIS ADVISOR : PROFESSOR SERM JANJAI, Ph.D.

In this work, the net radiation was measured by using a net radiometer (Kipp&Zonen: CNR4) located at Kamphaeng Saen district, Nakhon Pathom, Thailand. Five-year period (2017-2021) of the net radiation data from this measurement was statistically analyzed. A diurnal variation of the net radiation was investigated. It shows bell shape with the peak at solar noon and it has negative and constant values at night time. The monthly variation shows the peak in May and the lowest in winter (November-January). In addition, the variables affecting the net radiation consisting of aerosol optical depth, clouds index, precipitable water, surface albedo and downwelling shortwave were studied using a neural network model. The results indicate that the best input to estimate net radiation is solar radiation. Therefore, the correlation between net and solar radiation was analyzed in the form of empirical equation using the data during 2017-2020. The relationship is in the form of a linear equation with a slope of 0.735 and a y-intercept of -29.274. This linear equation was used as the net radiation estimation model. This model was validated using solar radiation in 2021 to obtain the net radiation. The comparison of the net radiation from the model and the measurement gives the values of root mean square difference (RMSD) of 12.8%, mean bias difference (MBD) of 0.3% and coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.99. This confirms that the developed model can be used to estimate net radiation from downwelling shortwave.

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ผู้วิจัยได้รับการสนับสนุนจากห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.เสริม จันทร์ฉาย อาจารย์ที่ปรึกษาหลักในการทำวิจัย  
ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำทางวิชาการ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุมาลย์ บรรเทง และ  
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเจตน์ ภัทรพานิชชัย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ให้คำปรึกษาแนวทางการ  
แก้ปัญหาทั้งทางด้านวิชาการและการปฏิบัติงานทางเครื่องมือ และขอขอบพระคุณ  
อาจารย์ ดร.ประนมกร ชูศรี ที่ได้กรุณาเสียสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้เป็นอย่าง  
สูง

ผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์ นักวิจัย พี่ ๆ เพื่อน ๆ และ น้อง ๆ ในห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงาน  
แสงอาทิตย์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือและแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้  
นี้จนเสร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ คุณประโยชน์ที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้แก่บิดามารดา รวมทั้ง  
คณาจารย์ทุกท่าน เพื่อตอบแทนพระคุณที่ช่วยให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการศึกษา

นางสาว ชุติมณฑน์ เพ็่มวงศ์



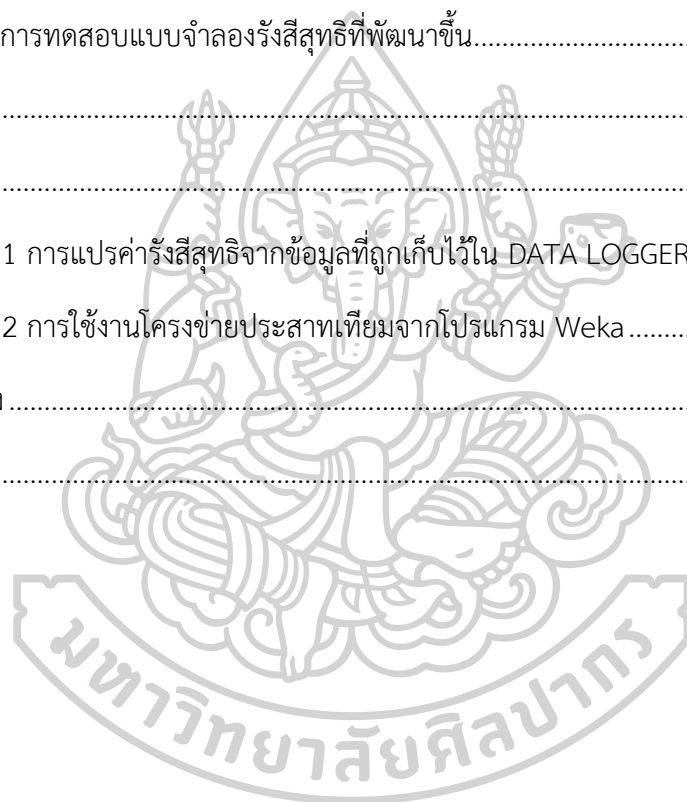


## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	3
2.1 ทฤษฎี.....	3
2.1.1 รังสีอาทิตย์ (Solar radiation).....	3
2.1.1.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	3
2.1.1.2 รังสีในบรรยากาศ.....	5
2.1.1.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อรังสีอาทิตย์.....	5
2.1.2 รังสีโลก (Terrestrial radiation).....	10
2.1.2.1 กฎของแพลงค์ (Plank's law).....	13
2.1.2.2 กฎการกระจัดของวีน (Wien's displacement law).....	13
2.1.2.3 กฎของสเตฟาน-โบลทซ์มันน์ (Stafan-Boltzmann's law).....	14
2.1.3 รังสีสุทธิ (Net Radiation).....	14

2.1.3.1 ความหมายของรังสีสุทธิ .....	14
2.1.3.2 การวัดรังสีสุทธิ.....	16
2.1.3.3 ความสำคัญของรังสีสุทธิ.....	17
2.1.4 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN).....	18
2.1.4.1 นิวรอนทางชีววิทยา.....	19
2.1.4.2 ประสาทเทียม (artificial neuron) .....	20
2.1.4.3 โครงข่ายประสาทเทียม .....	23
2.1.4.4 การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม .....	23
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	24
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัยและผลการวิจัย .....	27
3.1 ข้อมูล.....	27
3.1.1 ข้อมูลรังสีสุทธิ .....	28
3.1.2 การอ่านข้อมูล .....	28
3.1.3 การสอบเทียบเครื่องวัดรังสีสุทธิ.....	30
3.1.4 การควบคุมคุณภาพของข้อมูล .....	33
3.2 การศึกษาลักษณะทางสถิติของรังสีสุทธิจากการวัดภาคพื้นดิน .....	35
3.2.1 การแปรค่ารังสีสุทธิตามเวลาในรอบวัน (diurnal variation).....	35
3.2.2 การแปรค่ารังสีสุทธิรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (daily variation) .....	41
3.2.3 การแปรค่ารังสีสุทธิเฉลี่ยรายปี.....	42
3.3 การประมาณค่ารังสีสุทธิโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม .....	43
3.3.1 การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมในการประมาณค่ารังสีสุทธิ.....	44
3.3.2 การทดสอบแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม .....	51
3.3.2.1 การใช้อินพุต 1 ตัวแปร .....	52
3.3.2.2 การใช้อินพุต 2 ตัวแปร .....	54

3.3.2.3 การใช้อินพุต 3 ตัวแปร .....	56
3.3.2.4 การใช้อินพุต 4 ตัวแปร .....	57
3.3.2.5 การใช้อินพุต 5 ตัวแปร .....	58
3.3.3 สรุปการใช้ ANN ประมาณค่ารังสีสุทธิ.....	59
3.4 แบบจำลองสำหรับคำนวณหาค่ารังสีสุทธิจากรังสีคลื่นสั้นขาหลง.....	61
3.4.1 การสร้างแบบจำลอง.....	61
3.4.2 การทดสอบแบบจำลองรังสีสุทธิที่พัฒนาขึ้น.....	63
บทที่ 4 สรุป.....	64
ภาคผนวก.....	66
ภาคผนวก 1 การแปรค่ารังสีสุทธิจากข้อมูลที่ถูเก็บไว้ใน DATA LOGGER.....	67
ภาคผนวก 2 การใช้งานโครงข่ายประสาทเทียมจากโปรแกรม Weka.....	79
รายการอ้างอิง .....	89
ประวัติผู้เขียน.....	93



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวแต่ละชนิดบนโลก (STKE, 2018) .....	16
ตารางที่ 2 คุณสมบัติเฉพาะในการวัดของเน็ตเรดิโอมิเตอร์ รุ่น CNR4 (Kipp&Zonen, 2015).....	17
ตารางที่ 3 ตัวอย่างฟังก์ชันกระตุ้น .....	21
ตารางที่ 4 ค่าการตอบสนองของเครื่องมือในแต่ละปี.....	33
ตารางที่ 5 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลรังสีสุทธิที่ได้จากการวัด.....	49
ตารางที่ 6 อินพุตที่ใช้ในแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม.....	51
ตารางที่ 7 ความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์ที่ได้จากการประมาณค่าของ ANN .....	60



## สารบัญรูปร่างภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 ลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า .....	3
รูปที่ 2 ส่วนประกอบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปของสเปกตรัม .....	4
รูปที่ 3 ค่าความเข้มของรังสีที่แต่ละความยาวคลื่นที่แผ่ออกมาจากดวงอาทิตย์และโลก .....	5
รูปที่ 4 เส้นทางของรังสีอาทิตย์ที่มุมต่าง ๆ .....	6
รูปที่ 5 ลักษณะการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ในรอบปี .....	7
รูปที่ 6 กระบวนการทางรังสีอาทิตย์ในชั้นบรรยากาศ .....	8
รูปที่ 7 การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของบรรยากาศและแก๊สต่าง ๆ .....	8
รูปที่ 8 ลักษณะการกระเจิงของแสงที่อนุภาคขนาดต่าง ๆ .....	9
รูปที่ 9 การส่งผ่านรังสีอาทิตย์เนื่องจากการลดทอนโดยแก๊สต่าง ๆ ในบรรยากาศ .....	10
รูปที่ 10 การแผ่รังสีคลื่นยาวของพื้นผิวโลกและบรรยากาศ .....	11
รูปที่ 11 ช่วงความยาวคลื่นของหน้าต่างบรรยากาศ .....	11
รูปที่ 12 ภาวะเรือนกระจก .....	12
รูปที่ 13 แหล่งที่มาขององค์ประกอบทั้ง 4 ของรังสี .....	15
รูปที่ 14 ส่วนประกอบของเครื่องเน็ตเวิร์คโอมิเตอร์ รุ่น CNR4 .....	16
รูปที่ 15 การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศที่เป็นผลกระทบของสภาวะโลกร้อน .....	18
รูปที่ 16 การระเหยคายน้ำของพื้นที่ทางการเกษตร .....	18
รูปที่ 17 องค์ประกอบของนิวรอนที่ประกอบไปด้วย โซมา (soma) เดนไดรน์ (dendrite) .....	19
รูปที่ 18 กระบวนการทำงานของโครงข่ายระบบประสาทของมนุษย์ .....	20
รูปที่ 19 ขั้นตอนการทำงานของประสาทเทียม 1 หน่วย .....	20
รูปที่ 20 ตัวอย่างโครงข่ายประสาทเทียมที่ประกอบไปด้วยชั้นอินพุต ชั้นซ่อน 2 ชั้น และชั้นเอาต์พุต .....	23

รูปที่ 21 ขั้นตอนการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมแบบย้อนกลับ .....	24
รูปที่ 22 ตำแหน่งที่ตั้งของเครื่องมือวัดรังสีสุทธีที่สถานีนครปฐม .....	27
รูปที่ 23 รูปเครื่อง CNR4 สำหรับวัดรังสีสุทธีที่สถานีนครปฐม.....	28
รูปที่ 24 อุปกรณ์บันทึกข้อมูลรุ่น FX 1012 ของบริษัท Yokogawa .....	29
รูปที่ 25 การสอบเทียบเครื่องวัดรังสีสุทธีประจำสถานีนครปฐม .....	30
รูปที่ 26 ผลการสอบเทียบหัววัด pyranometer สำหรับวัดรังสีคลื่นสั้นขาหลง .....	31
รูปที่ 27 ผลการสอบเทียบหัววัด pyranometer สำหรับวัดรังสีคลื่นสั้นขาขึ้น.....	31
รูปที่ 28 ผลการสอบเทียบหัววัด pyrgeometer สำหรับวัดรังสีคลื่นยาวขาหลง .....	32
รูปที่ 29 ผลการสอบเทียบหัววัด pyrgeometer สำหรับวัดรังสีคลื่นยาวขาขึ้น .....	32
รูปที่ 30 เครื่องวัด Sunphotometer .....	34
รูปที่ 31 การแปรค่าตามเวลาในรอบวันของรังสีคลื่นสั้นขาหลง (DS) รังสีคลื่นสั้นขาขึ้น (US) รังสีคลื่นยาวขาหลง (DL) รังสีคลื่นยาวขาขึ้น (UL) และรังสีสุทธี (NET) รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาว (ค.ศ. 2017-2021).....	36
รูปที่ 32 การแปรค่ารังสีสุทธีรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อปีของปี ค.ศ. 2017 .....	38
รูปที่ 33 การแปรค่ารังสีสุทธีรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อปีของปี ค.ศ. 2018 .....	39
รูปที่ 34 การแปรค่ารังสีสุทธีรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อปีของปี ค.ศ. 2019 .....	39
รูปที่ 35 การแปรค่ารังสีสุทธีรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อปีของปี ค.ศ. 2020 .....	40
รูปที่ 36 การแปรค่ารังสีสุทธีรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อปีของปี ค.ศ. 2021 .....	40
รูปที่ 37 การแปรค่ารังสีสุทธีรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อปีระยะยาว (ค.ศ. 2017-2021) .....	41
รูปที่ 38 การแปรค่าของรังสีสุทธีรายวันเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาว.....	42
รูปที่ 39 ค่ารังสีสุทธีเฉลี่ยรายปี .....	43
รูปที่ 40 ลักษณะของโปรแกรม Weka .....	44
รูปที่ 41 ตัวแปรควบคุมซึ่งประกอบไปด้วย hiddenLayers, learningRate และ momentum.....	44
รูปที่ 42 รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในงานวิจัยนี้.....	45

รูปที่ 43 กราฟเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลรังสีสุทธิที่ทำการวัดและข้อมูลรังสีสุทธิที่จำลองแบบขึ้นมา จากโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อทำการแปรค่าช่วงเวลาในการฝึกสอนจาก 1,000-10,000 (RMSD คือ Root Mean Squared Difference, MBD คือ Mean Bias Difference, $R^2$ คือ Coefficient of determination).....	46
รูปที่ 44 ตัวแปรควบคุมซึ่งประกอบไปด้วย hiddenLayers, LearningRate, Momentum และ trainingTime .....	50
รูปที่ 45 กราฟการเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลรังสีสุทธิที่ได้จากการวัดและที่ได้จากโครงข่ายประสาท .....	52
รูปที่ 46 การเปรียบเทียบข้อมูลรังสีสุทธิจากการวัดและจากโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อแปรค่าอินพุต 1 ตัว เป็นค่าต่าง ๆ.....	53
รูปที่ 47 การเปรียบเทียบข้อมูลรังสีสุทธิจากการวัดและจากโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อแปรค่าอินพุต 2 ตัว เป็นค่าต่าง ๆ.....	54
รูปที่ 48 การเปรียบเทียบข้อมูลรังสีสุทธิจากการวัดและจากโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อแปรค่าอินพุต 3 ตัวแปร เป็นค่าต่าง ๆ.....	56
รูปที่ 49 การเปรียบเทียบข้อมูลรังสีสุทธิจากการวัดและจากโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อใช้ค่าอินพุต 4 ตัวแปร เป็นค่าต่าง ๆ.....	57
รูปที่ 50 การเปรียบเทียบข้อมูลรังสีสุทธิจากการวัดและจากโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อใช้ตัวแปร อินพุต 5 ตัว .....	58
รูปที่ 51 การเปรียบเทียบข้อมูลรังสีอาทิตย์ที่ได้จากเครื่อง pyranometer และเครื่องเน็ตเรดิโอ มิเตอร์ที่ใช้สำหรับวัดรังสีคลื่นสั้นข้างลง.....	61
รูปที่ 52 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างรังสีสุทธิและรังสีคลื่นสั้นข้างลง.....	62
รูปที่ 53 การเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลรังสีสุทธิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นและจากการวัด ....	63
รูปที่ 54 อุปกรณ์บันทึกข้อมูลรุ่น FX 1012 ของบริษัท Yokogawa .....	68
รูปที่ 55 การต่อสายสัญญาณเน็ตเรดิโอมิเตอร์เข้าอุปกรณ์บันทึกข้อมูล .....	69
รูปที่ 56 จอแสดงผลเครื่องบันทึกบันทึกข้อมูลเมื่อทำการบันทึกข้อมูลจากเครื่องเน็ตเรดิโอมิเตอร์ ..	69
รูปที่ 57 การต่อสายเซนเซอร์สำหรับวัดค่าสัญญาณรังสีโดยเอาท์พุตที่ออกมาจะมีค่าเป็น mV .....	70



รูปที่ 58 การต่อสายเซนเซอร์สำหรับวัดค่าสัญญาณอุณหภูมิโดยเอาท์พุทที่ออกมาจะมีค่าเป็น mV.	70
รูปที่ 59 การเปลี่ยนรูปแบบไฟล์ที่พร้อมใช้งาน.....	71
รูปที่ 60 โปรแกรม Universal Viewer.....	71
รูปที่ 61 ค่าสัญญาณจากหัววัด pyranometer CH003 คือ รังสีคลื่นสั้นขาหลง และ CH004 คือ รังสีคลื่นสั้นขาขึ้น .....	72
รูปที่ 62 รังสีคลื่นสั้นขาหลงในหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตร รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน (สีแดง) รวมรายวัน (สีน้ำเงิน).....	73
รูปที่ 63 รังสีคลื่นสั้นขาขึ้นในหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตร รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน (สีแดง) รวมรายวัน (สีน้ำเงิน).....	74
รูปที่ 64 ค่าสัญญาณจากหัววัด pyrgeometer CH005 และ CH006 คือ รังสีคลื่นยาวขาหลงและขาขึ้นตามลำดับ (สีแดง) CH008 อุณหภูมิที่ได้จากตัวเครื่อง (สีน้ำเงิน).....	75
รูปที่ 65 รังสีคลื่นยาวขาหลงในหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตร รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน (สีแดง) รวมรายวัน .....	76
รูปที่ 66 รังสีคลื่นยาวขาขึ้นในหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตรรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน (สีแดง) รวมรายวัน .....	77
รูปที่ 67 รังสีสุทธิในหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตร รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน (สีแดง) รวมรายวัน (สีน้ำเงิน) .....	78
รูปที่ 68 โปรแกรม Weka .....	80
รูปที่ 69 คำสั่ง Explorer ในแถบ Application .....	80
รูปที่ 70 เลือกเมนู open file เพื่อเปิดไฟล์ที่ใช้สำหรับการฝึกสอน .....	81
รูปที่ 71 หน้าต่างที่เพิ่มไฟล์อินพุตในการฝึกสอนลงไปแล้ว .....	81
รูปที่ 72 เลือกฟังก์ชันในการวิเคราะห์เป็น Multilayer Perceptron.....	82
รูปที่ 73 การปรับค่าคำสั่งในหน้าต่าง GenericObjectEditor.....	83
รูปที่ 74 การเลือกคำสั่ง Use training set เพื่อให้ข้อมูลที่อินพุตเข้าไบนั้นเป็นข้อมูลฝึกสอน .....	84
รูปที่ 75 รูปแบบการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม .....	85
รูปที่ 76 การเรียกไฟล์ที่ใช้สำหรับการทดสอบเข้าโปรแกรม .....	86



รูปที่ 77 หน้าต่างแสดงค่า Error..... 87

รูปที่ 78 หน้าต่างแสดงกราฟการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัด ..... 88



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โลกเป็นดาวเคราะห์ที่มีสิ่งมีชีวิตอาศัยอยู่ สิ่งสำคัญที่ทำให้สิ่งมีชีวิตดำรงอยู่ได้นั้นเนื่องจากโลกมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่เวลากลางวันและกลางคืนไม่มากนักซึ่งเหมาะแก่การดำรงชีวิตของมนุษย์ พืชพรรณ และสัตว์ต่าง ๆ โดยสิ่งที่ทำให้มีความสมดุลทางอุณหภูมินี้คือชั้นบรรยากาศที่ปกคลุมโลกซึ่งทำหน้าที่ในการป้องกันรังสีที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในเวลากลางวันและช่วยให้ความอบอุ่นในเวลากลางคืนโดยการปลดปล่อยความร้อนที่เก็บสะสมอยู่ในชั้นบรรยากาศออกมาทำให้ในเวลากลางคืนอุณหภูมิไม่ต่ำจนเกินไป ความร้อนที่สะสมอยู่ในชั้นบรรยากาศถูกเก็บสะสมโดยการดูดกลืนความร้อนขององค์ประกอบที่อยู่ในชั้นบรรยากาศ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ไออน้ำ ไอโซน และอื่น ๆ โดยองค์ประกอบเหล่านี้ถูกเรียกว่าแก๊สเรือนกระจก (greenhouse gases) ในทางกลับกันหากมีแก๊สเหล่านี้ในชั้นบรรยากาศปริมาณมากจะส่งผลให้เกิดการเก็บสะสมความร้อนที่สูงเกิดเป็นสภาวะโลกร้อน (global warming) ซึ่งถือว่าเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นมาเป็นระยะเวลาที่ยาวนานโดยแก๊สเหล่านี้เกิดได้ทั้งจากธรรมชาติและการกระทำของมนุษย์ ด้วยปัญหานี้เองทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยทั่วโลกมีแนวโน้มที่สูงขึ้นซึ่งตัวแปรหนึ่งที่สามารถบอกลถึงการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยทั่วทั้งโลกได้ดีคือ รังสีสุทธิ (Net Radiation)

รังสีสุทธิหรือที่เรียกกันอีกอย่างหนึ่งว่าฟลักซ์สุทธิคือสมดุลระหว่างพลังงานขาเข้าและขาออกของโลกซึ่งมีอิทธิพลต่อสภาพอากาศในระยะยาว โดยพลังงานขาเข้าจะเกิดจากการที่รังสีอาทิตย์ส่องผ่านชั้นบรรยากาศลงมาสู่พื้นโลก กรณีพลังงานขาออกเกิดขึ้นได้ 2 วิธี คือเกิดจากการสะท้อนรังสีอาทิตย์โดยเมฆ ฝุ่นละออง หรือพื้นผิวโลก ซึ่งจะเป็นพลังงานขาออกในรูปแบบของรังสีคลื่นสั้น และอีกวิธีหนึ่งคือพลังงานความร้อนที่แผ่ออกจากพื้นโลกและบรรยากาศซึ่งจะเป็นพลังงานขาออกในรูปแบบของรังสีคลื่นยาว โดยปกติแล้วรังสีสุทธิเฉลี่ยรายปีทั่วโลกจะต้องมีค่าเท่ากับ 0 นั่นหมายความว่าพลังงานขาเข้าและพลังงานขาออกมีค่าเท่ากัน ถ้าหากปีใดค่ารังสีสุทธิเฉลี่ยทั่วโลกมีค่ามากกว่า 0 แสดงว่าพลังงานขาเข้ามายังโลกมีค่าสูงกว่าพลังงานที่โลกปลดปล่อยออกไป ในทางตรงกันข้ามปีใดที่ค่ารังสีสุทธิมีค่าต่ำกว่า 0 นั่นหมายความว่าในปีนั้นพลังงานที่โลกปลดปล่อยออกมีค่ามากกว่าพลังงานที่เข้ามาสู่โลก โดยเครื่องมือที่ใช้วัดค่ารังสีสุทธินี้เรียกว่าเน็ตเรดิโอมิเตอร์ (Net Radiometer) ซึ่งจะประกอบไปด้วยหัววัดรังสีคลื่นสั้น (pyranometer) 2 หัว และหัววัดรังสีคลื่นยาว (pyrgeometer) 2 หัว โดยค่ารังสีสุทธิไม่ได้ถูกวัดเป็นข้อมูลพื้นฐานทางอุตุนิยมวิทยาเนื่องจากเครื่องมือมีราคาแพงและต้องอาศัยการดูแลรักษาอย่างใกล้ชิดอีกทั้งยังต้องมีการสอบเทียบเครื่องมือประจำปี ดังนั้นนักวิจัยทางบรรยากาศจึงได้มีการพัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่ารังสีสุทธิเพื่อใช้ในพื้นที่

ที่ไม่มีการติดตั้งเครื่องวัดหรือพื้นที่ห่างไกล โดยแบบจำลองที่ว่ามีทั้งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งมักอยู่ในรูปแบบของสมการเอมไพริคัลและแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม โดยทั้งสองแบบจำลองนี้จะอาศัยข้อมูลวัดภาคพื้น เช่น รังสีอาทิตย์ ใอน้ำในบรรยากาศ ฝุ่นละออง และสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิว เป็นข้อมูลอินพุตหรือข้อมูลฝึกสอน สำหรับประเทศไทยยังไม่พบการศึกษารังสีสุทธิดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาปริมาณรังสีสุทธิและพัฒนาแบบจำลองรังสีสุทธิโดยใช้ข้อมูลอินพุตที่มีความสัมพันธ์กับค่ารังสีสุทธิมากที่สุดในพื้นที่จังหวัดนครปฐม เพื่อเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ภาพรวมของการเพิ่มขึ้นและลดลงของอุณหภูมิในพื้นที่จังหวัดนครปฐม

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาลักษณะทางสถิติของรังสีสุทธิจากเครื่องมือวัดโดยเครื่องมือวัดตั้งอยู่ที่อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม
2. เพื่อศึกษาการประมาณค่ารังสีสุทธิโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม (ANN) จากตัวแปรอินพุตทางบรรยากาศต่าง ๆ
3. เพื่อพัฒนาและทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับประมาณค่ารังสีสุทธิ

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาโดยการวัดและวิเคราะห์ค่ารังสีสุทธิ ณ สถานีอุตุนิยมวิทยาจังหวัดนครปฐม (14.00°N, 99.58°E) ที่ตั้งอยู่ในอำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม โดยช่วงเวลาที่ทำการศึกษาอยู่ระหว่างปี ค.ศ. 2017-2021 รวมระยะเวลา 5 ปี

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

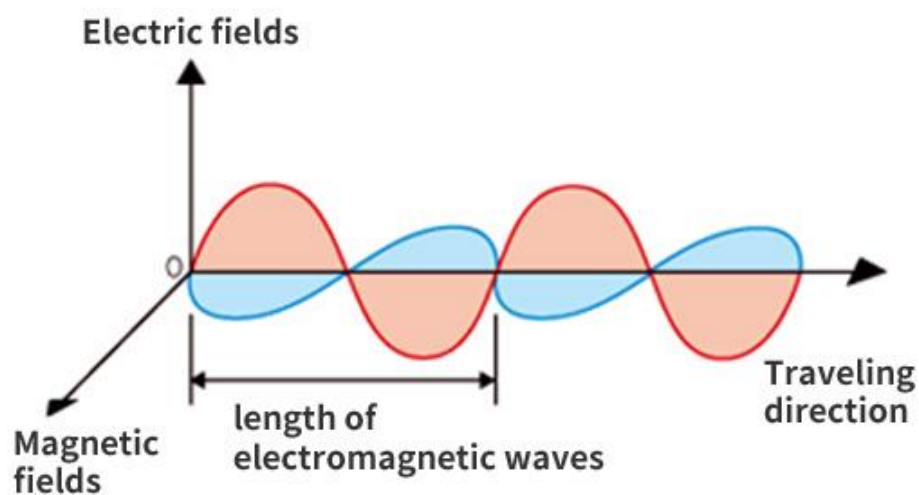
ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับรังสีสุทธิและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.1 ทฤษฎี

##### 2.1.1 รังสีอาทิตย์ (Solar radiation)

##### 2.1.1.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานขนาดใหญ่โดยพลังงานที่แผ่ออกมาจากดวงอาทิตย์นั้นจะถูกพิจารณาอยู่ใน 2 ลักษณะ คือ พลังงานที่แผ่ออกมาจากดวงอาทิตย์ในลักษณะของอนุภาคเรียกว่า โฟตอน (photon) ซึ่งเป็นการพิจารณาพลังงานที่แผ่ออกมาจากดวงอาทิตย์ในลักษณะของก้อนอนุภาค อีกรูปแบบหนึ่งคือพิจารณาในรูปแบบคลื่นหรือที่เรียกกันว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งจะประกอบไปด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กวางตัวในทิศตั้งฉากกันและตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นซึ่งสามารถแสดงลักษณะการวางตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดังรูปที่ 1

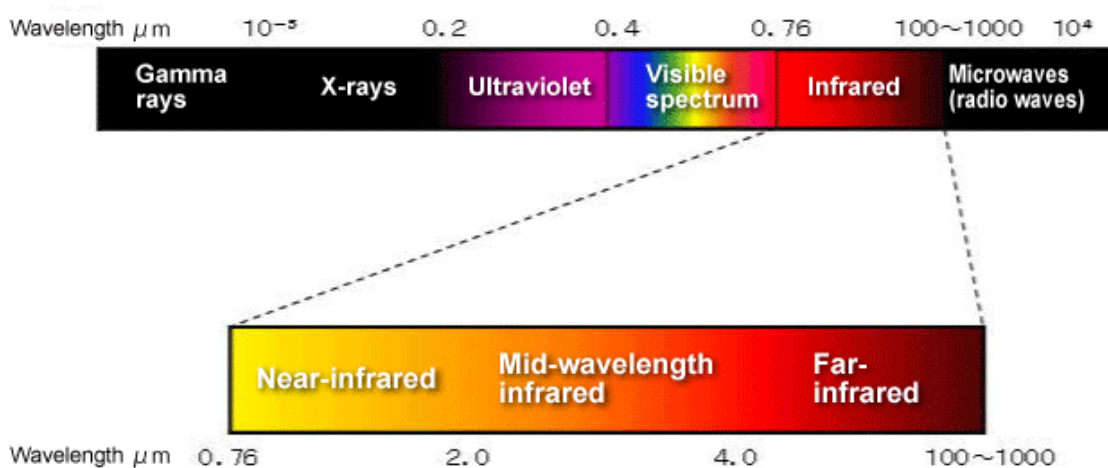


รูปที่ 1 ลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ที่มา: TOYOCEM (2016)

โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว  $2.998 \times 10^8$  m/s ซึ่งพลังงานจากดวงอาทิตย์ในรูปแบบคลื่นนี้สามารถแสดงอยู่ในรูปของสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (รูปที่ 2) ได้โดยสามารถแบ่งออกเป็นช่วงต่าง ๆ ซึ่งประกอบไปด้วย

- รังสีแกมมา (Gamma ray) มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 0.01 นาโนเมตร
- รังสีเอ็กซ์ (X-ray) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.01-1 นาโนเมตร
- รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet radiation) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 1-400 นาโนเมตร
- แสงสว่าง (Visible light) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 400-700 นาโนเมตร
- รังสีอินฟราเรด (Infrared radiation) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 700 นาโนเมตร-1 มิลลิเมตร
- ไมโครเวฟ (Microwave) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 1 มิลลิเมตร-10 เซนติเมตร
- คลื่นวิทยุ (Radio wave) มีความยาวคลื่นมากกว่า 10 เซนติเมตร



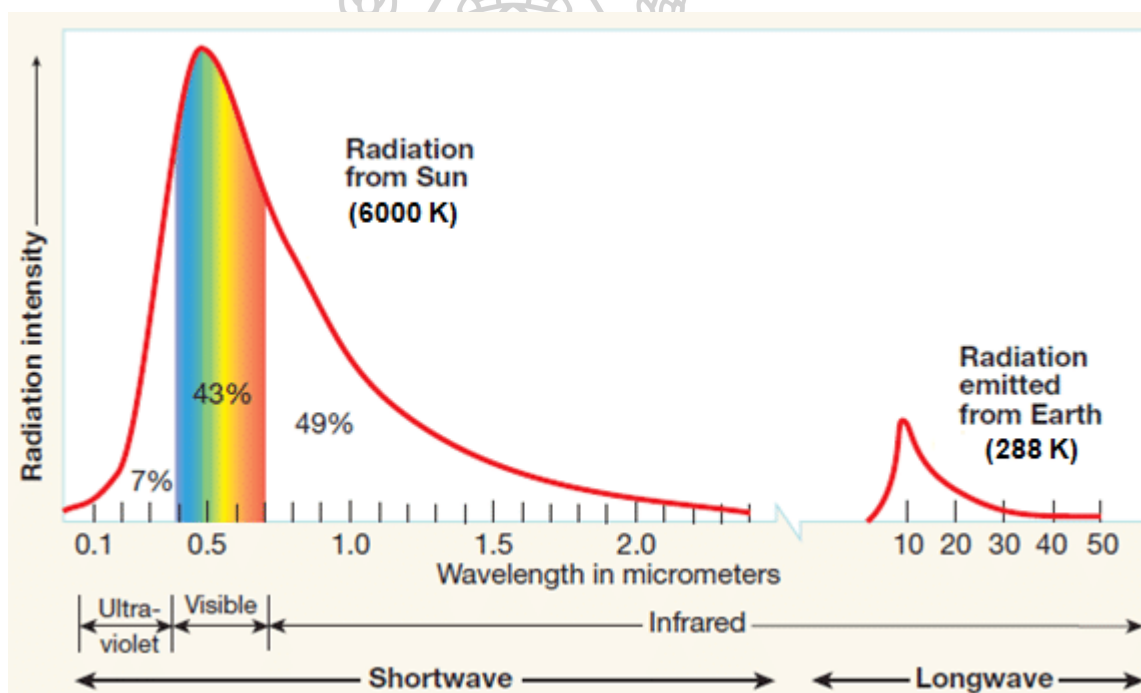
รูปที่ 2 ส่วนประกอบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปแบบของสเปกตรัม

ที่มา: THERMO RIKO CO. (2022)

จากรูปที่ 2 แสดงส่วนประกอบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปแบบของสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 0.76-100 ไมโครเมตร ซึ่งได้มาจากสองแหล่งคือมาจากดวงอาทิตย์และมาจากการแผ่รังสีของพื้นผิวโลกและบรรยากาศ

### 2.1.1.2 รังสีในบรรยากาศ

พลังงานจากดวงอาทิตย์จะแผ่ออกสู่อวกาศโดยรอบและส่วนหนึ่งจะผ่านชั้นบรรยากาศลงมาสู่โลกแต่ในชั้นบรรยากาศของโลกนี้ไม่ได้มีเพียงรังสีที่มาจากดวงอาทิตย์เท่านั้นแต่รังสีในชั้นบรรยากาศจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือรังสีคลื่นสั้น (shortwave) ที่มีแหล่งกำเนิดมาจากดวงอาทิตย์โดยมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.3-4.0 ไมโครเมตร และรังสีคลื่นยาว (longwave) ที่มีแหล่งกำเนิดมาจากการแผ่รังสีของพื้นโลกและบรรยากาศหรือเรียกอีกอย่างว่า รังสีโลก (Terrestrial radiation) โดยจะกล่าวรายละเอียดของรังสีชนิดนี้ในหัวข้อ 2.1.2 ต่อไป รังสีโลกจะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 4.0-100 ไมโครเมตร โดยจะมีค่าสูงสุดในช่วง 10 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่แผ่ออกมาจากวัตถุ (โลก) ที่มีอุณหภูมิประมาณ 288 K ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ค่าความเข้มของรังสีที่แต่ละความยาวคลื่นที่แผ่ออกมาจากดวงอาทิตย์และโลก

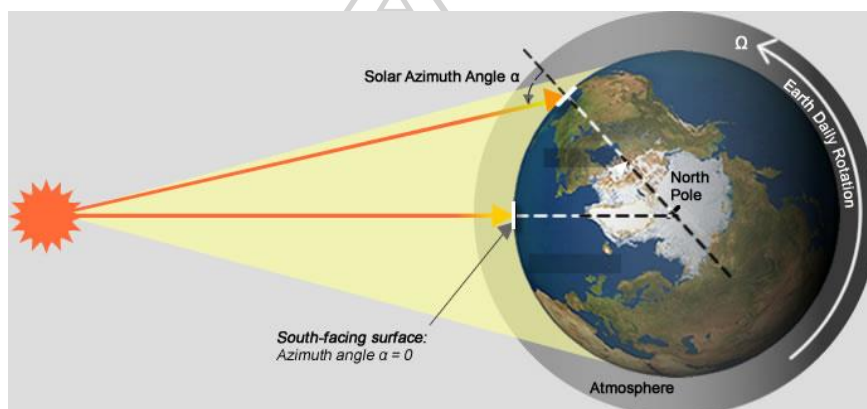
ที่มา: Hashim (2016)

### 2.1.1.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อรังสีอาทิตย์

พลังงานที่กำเนิดจากดวงอาทิตย์จะแผ่ออกสู่บรรยากาศโดยรอบในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ ปริมาณรังสีอาทิตย์ที่เดินทางไปถึงจุด ๆ หนึ่งบนผิวโลกจะแตกต่างกันไปตามที่ตั้งทางภูมิศาสตร์ ฤดูกาล ฤดูกาล ภูมิทัศน์ และสภาพอากาศประจำท้องถิ่น ซึ่งเป็นผลมาจากปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้

### 1) ปัจจัยภายนอกโลก

ลักษณะพื้นผิวที่เป็นทรงกลมของโลกส่งผลให้รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นโลกทำมุมตั้งแต่  $0^\circ$  ถึง  $90^\circ$  เมื่อรังสีอาทิตย์ทำมุมตั้งฉากกับพื้นผิวโลก พื้นผิวโลกจะได้รับพลังงานสูง ในทางกลับกันหากรังสีอาทิตย์ทำมุมเอียงกับพื้นผิวโลกมากเท่าใดระยะที่รังสีเดินทางอยู่ในชั้นบรรยากาศจะมีค่ามากขึ้นเท่านั้น ทำให้รังสีอาทิตย์ถูกลดทอนโดยองค์ประกอบทางบรรยากาศมากขึ้น อีกปัจจัยหนึ่งคือการหมุนของโลกที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงโดยในช่วงเช้าและเย็นดวงอาทิตย์จะอยู่ที่ขอบฟ้าระยะทางเดินของรังสีอาทิตย์ในชั้นบรรยากาศจึงมีค่ามากกว่าตอนที่ดวงอาทิตย์อยู่ในตำแหน่งสูงสุดระยะทางเดินแสงในชั้นบรรยากาศจึงต่ำนั่นเอง

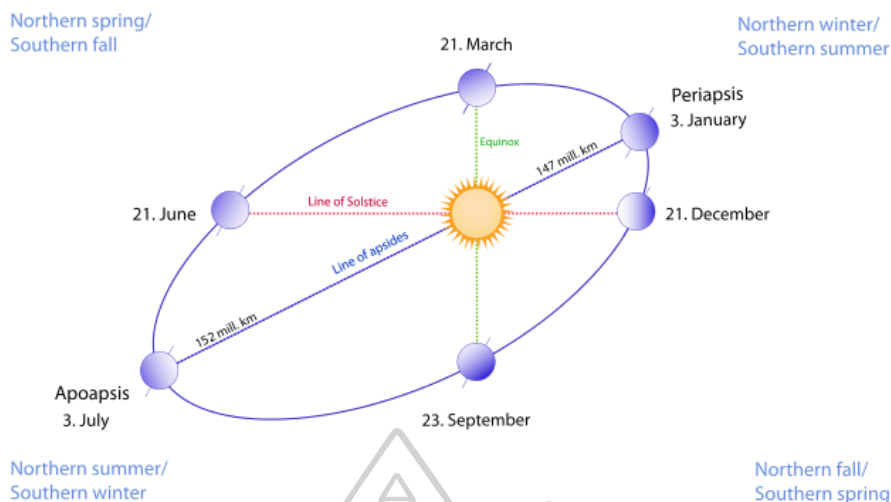


รูปที่ 4 เส้นทางของรังสีอาทิตย์ที่มุมต่าง ๆ

ที่มา: Rhino (2016)

นอกจากรูปทรงของโลกแล้วการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ก็ยังเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ โดยเมื่อดวงอาทิตย์อยู่ใกล้โลกพื้นผิวโลกจะได้รับพลังงานแสงอาทิตย์เพิ่มขึ้น ปัจจัยถัดมาคือ ความลาดเอียงของแกนโลกที่มีค่า  $23.5$  องศา การเอียงส่งผลให้มีวันที่ยาวนานขึ้นในซีกโลกเหนือตั้งแต่ฤดูใบไม้ผลิ (Vernal Equinox) ไปจนถึงฤดูใบไม้ร่วง (Autumnal Equinox) และวันที่ยาวนานขึ้นในซีกโลกใต้ในช่วง 6 เดือนที่เหลือ ช่วงกลางวันและกลางคืนที่มีความยาวนานเท่ากัน 12 ชั่วโมง ซึ่งเกิดขึ้นทุกปีในวันที่ 23 มีนาคม และ 22 กันยายน





รูปที่ 5 ลักษณะการโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ในรอบปี

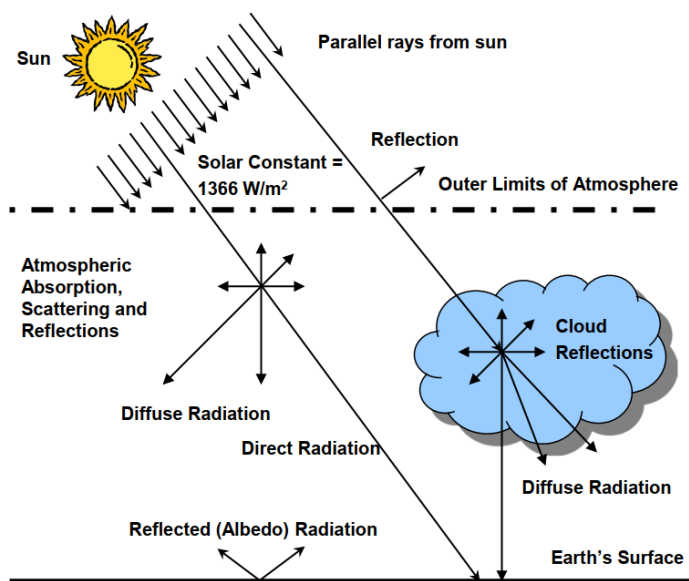
ที่มา: Benjamin (2009)

## 2) ปัจจัยภายในโลก

รังสีอาทิตย์หรือที่เรียกกันว่ารังสีคลื่นสั้น (shortwave) เคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศโดยส่วนหนึ่งถูกสะท้อนกลับสู่อวกาศโดยชั้นบรรยากาศ บางส่วนทะลุผ่านลงมาและถูกดูดทอนโดยองค์ประกอบทางบรรยากาศ เช่น เมฆ ไอน้ำ โอโซน คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และแก๊สอื่น ๆ

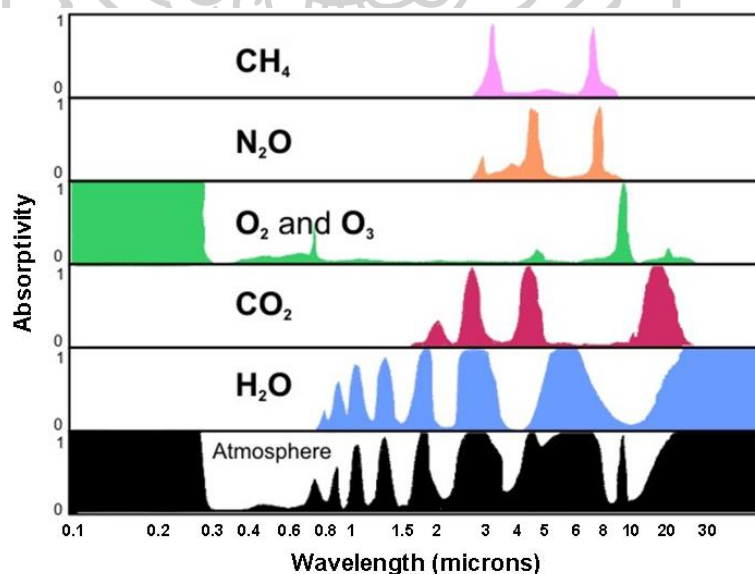
กระบวนการดูดทอนโดยองค์ประกอบทางบรรยากาศนี้ประกอบด้วยการดูดกลืน (absorption) และการกระเจิง (scattering) ซึ่งรังสีที่ถูกกระเจิงโดยองค์ประกอบทางบรรยากาศจะถูกเรียกว่ารังสีกระจาย (diffuse radiation) กรณีพุ่งตรงลงมาที่พื้นโลกเรียกรังสีนั้นว่ารังสีตรง (direct radiation) และผลรวมระหว่างรังสีตรงและรังสีกระจายเรียกว่ารังสีรวม (global radiation) ซึ่งทั้งรังสีตรงและรังสีกระจายที่ลงมายังพื้นโลกบางส่วนถูกดูดกลืนไว้โดยพื้นโลกและบางส่วนถูกสะท้อนกลับขึ้นมาในบรรยากาศซึ่งกระบวนการทางรังสีดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 6



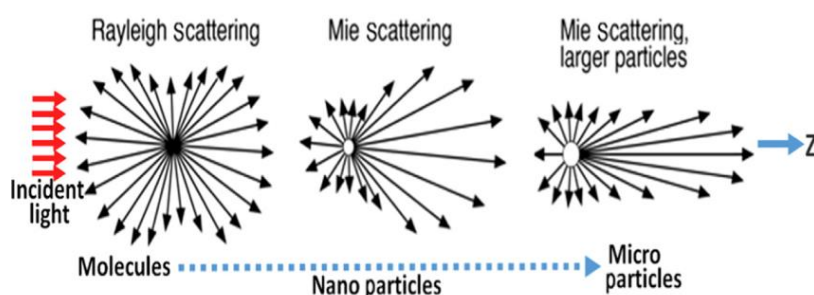


รูปที่ 6 กระบวนการทางรังสีอาทิตย์ในชั้นบรรยากาศ  
ที่มา: Strathmore University (2018)

อย่างที่กล่าวไว้ข้างต้นว่ากระบวนการลดทอนรังสีโดยชั้นบรรยากาศของโลกประกอบไปด้วย การดูดกลืนและการกระเจิงจากแก๊สต่าง ๆ ฝุ่นละออง และไอน้ำ โดยองค์ประกอบเหล่านี้จะดูดกลืนหรือกระเจิงรังสีขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (absorptivity) และขนาดของอนุภาคซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 7 และ 8



รูปที่ 7 การดูดกลืนรังสีอาทิตย์ของบรรยากาศและแก๊สต่าง ๆ  
ที่มา: Aix Marseille Université (2020)

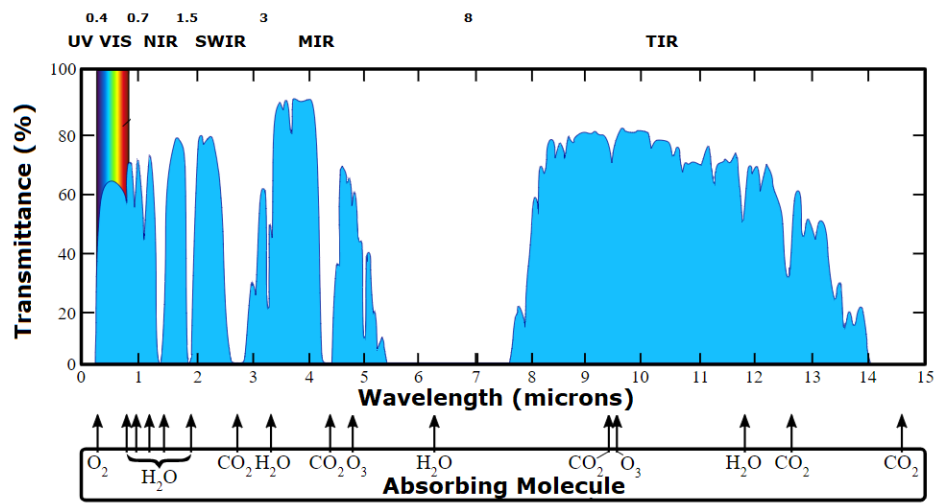


รูปที่ 8 ลักษณะการกระเจิงของแสงที่อนุภาคขนาดต่าง ๆ

ที่มา: Chegg (2003)

จากรูปที่ 7 แสดงการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ขององค์ประกอบทางบรรยากาศโดยมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) และไนตรัสออกไซด์ ( $\text{N}_2\text{O}$ ) ดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่น 2.5-10 ไมโครเมตร ออกซิเจน ( $\text{O}_2$ ) และโอโซน ( $\text{O}_3$ ) ดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่น 0.1-0.3 ไมโครเมตร ซึ่งอยู่ในช่วงรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ดูดกลืนรังสีในช่วงรังสีที่ตามองเห็นและรังสีความร้อนที่มีความยาวคลื่น 10-20 ไมโครเมตร และสุดท้ายคือไอน้ำในบรรยากาศ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ดูดกลืนรังสีในหลายช่วงความยาวคลื่นโดยเฉพาะในช่วงรังสีความร้อน หากพิจารณาถึงการลดทอนโดยการกระเจิง (รูปที่ 8) จะสามารถแบ่งรูปแบบการกระเจิงได้เป็นสามแบบคือ เมื่อขนาดของอนุภาคเล็กกว่าความยาวคลื่นจะเรียกการกระเจิงนี้ว่า Rayleigh scattering ถ้าขนาดของอนุภาคมีขนาดเท่ากับความยาวคลื่นเรียกการกระเจิงนี้ว่า Mie scattering และถ้าขนาดของอนุภาคมีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นเรียกการกระเจิงนี้ว่า Mie scattering larger particles

นอกจากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนขององค์ประกอบทางบรรยากาศแล้วยังสามารถบอกปริมาณรังสีอาทิตย์ที่เหลือจากการถูกลดทอนโดยองค์ประกอบทางบรรยากาศในรูปของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์ (transmission) ซึ่งจะมีค่าตรงข้ามกันกับสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโดยจะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9

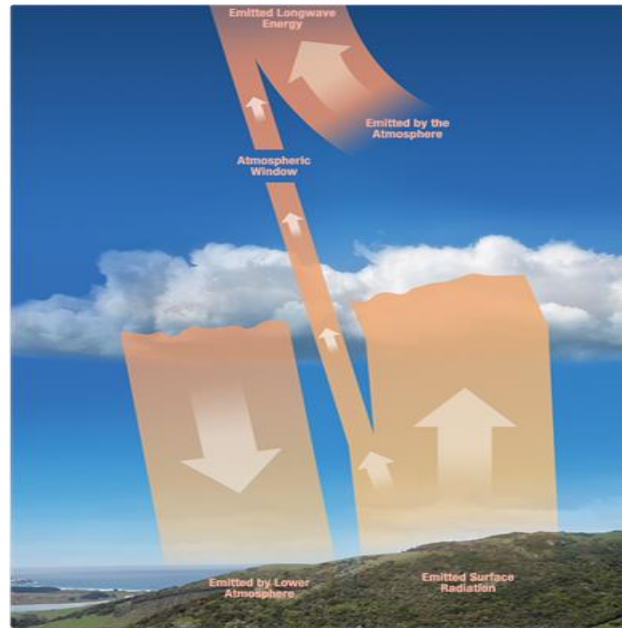


รูปที่ 9 การส่งผ่านรังสีอาทิตย์เนื่องจากการลดทอนโดยแก๊สต่าง ๆ ในบรรยากาศ

ที่มา: Usna.edu (2020)

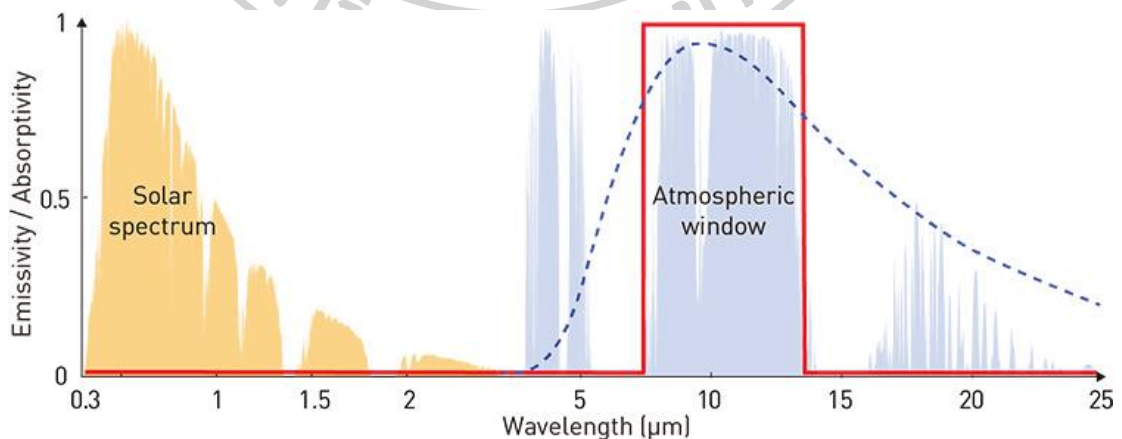
### 2.1.2 รังสีโลก (Terrestrial radiation)

รังสีอาทิตย์ที่เคลื่อนที่ผ่านบรรยากาศลงมายังพื้นโลกจะมีบางส่วนที่ถูกดูดกลืนโดยองค์ประกอบทางบรรยากาศและพื้นโลกโดยรังสีเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนแปลงเป็นพลังงานความร้อนเก็บสะสมไว้และปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปแบบของรังสีความร้อน (thermal and infrared radiation) หรือที่เรา รู้จักกันในชื่อของรังสีคลื่นยาว (longwave) ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 4.0-100 ไมโครเมตร โดยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 การแผ่รังสีคลื่นยาวของพื้นผิวโลกและบรรยากาศ  
ที่มา: SERC (2015)

โดยรังสีคลื่นยาวที่ออกมาจากพื้นผิวโลกและบรรยากาศนี้บางส่วนจะถูกดูดกลืนกลับโดยองค์ประกอบทางบรรยากาศ (รูปที่ 10) และบางส่วนจะออกสู่อวกาศ โดยรังสีคลื่นยาวที่ออกสู่อวกาศได้จะต้องมีความยาวคลื่นตรงกับความยาวคลื่นในช่วงหน้าต่างบรรยากาศ (Atmospheric window) ซึ่งมีความยาวคลื่นตรงกับความยาวคลื่นในช่วงนี้สำหรับการศึกษาระยะไกลด้วยดาวเทียมที่รู้จักกันในชื่อของรีโมทเซนซิง (remote sensing)



รูปที่ 11 ช่วงความยาวคลื่นของหน้าต่างบรรยากาศ  
ที่มา: Harvesting the Coldness of the Universe (2019)

ภาวะเรือนกระจก (greenhouse effect) คือการที่ชั้นบรรยากาศของโลกที่ประกอบไปด้วยแก๊สต่าง ๆ ที่มีคุณสมบัติในการกักเก็บความร้อน เช่น มีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ โอโซน และแก๊สอื่น ๆ ปรากฏตัวเหมือนกระจกโดยจะยอมให้รังสีคลื่นสั้นจากดวงอาทิตย์ผ่านลงมายังพื้นโลกและจะดูดกลืนรังสีคลื่นยาวในช่วงอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจากพื้นผิวโลกเอาไว้และยอมให้ออกจากชั้นบรรยากาศในช่วงความยาวคลื่นที่ตรงกับหน้าต่างบรรยากาศเท่านั้น จากนั้นแก๊สเหล่านี้จะทำการปลดปล่อยพลังงานความร้อนให้กระจายอยู่ในชั้นบรรยากาศและพื้นผิวโลกเพื่อให้เกิดความสมดุลทางอุณหภูมิจึงเหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 ภาวะเรือนกระจก

ที่มา: SECONDAIRE (2019)

แต่หากในชั้นบรรยากาศมีแก๊สเรือนกระจกปริมาณที่มากเกินไปจะส่งผลให้มีการกักเก็บพลังงานความร้อนในชั้นบรรยากาศที่มากเกิดเป็นสภาวะโลกร้อน (global warming) ซึ่งการปลดปล่อยพลังงานของพื้นโลกและบรรยากาศทำได้โดยการแผ่รังสีความร้อนในช่วงความยาวคลื่น 4.0-100 ไมโครเมตร โดยการแผ่รังสีนี้มีทฤษฎีต่าง ๆ ที่อธิบายไว้หลากหลายทฤษฎีดังต่อไปนี้

### 2.1.2.1 กฎของแพลงค์ (Planck's law)

กฎของแพลงค์ใช้อธิบายสเปกตรัมการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกความยาวคลื่นโดยเทียบกับวัตถุดำที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจากวัตถุดำซึ่งเป็นวัตถุที่มีการดูดกลืนและคายพลังงานได้อย่างสมบูรณ์จะแปรผกผันกับอุณหภูมิของวัตถุดำ อย่างไรก็ตามวัตถุดำเป็นเพียงวัตถุในอุดมคติที่ใช้อ้างอิงถึงหลักการในการแผ่รังสีซึ่งโดยทั่วไปแล้ววัตถุที่มีอุณหภูมิจะมีพลังงานเป็นไปตามกฎของแพลงค์ดังสมการที่ 2.1

$$E_\lambda = \frac{2c^2h}{\lambda^5} \frac{1}{[\exp(hc/k\lambda T) - 1]} \quad (2.1)$$

- เมื่อ  $E_\lambda$  คือ พลังงานของวัตถุต่อหนึ่งหน่วยเวลาที่ความยาวคลื่น  $\lambda$   
 $k$  คือ ค่าคงที่ของโบลทซ์มันน์ (Boltzmann constant) ( $k= 1.3806503 \times 10^{-23}$  J/K)  
 $h$  คือ ค่าคงที่ของแพลงค์ ( $h= 6.6256 \times 10^{-34}$  J.s)  
 $T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัตถุ (K)  
 $c$  คือ อัตราเร็วแสงในสุญญากาศ (m/s)  
 $\lambda$  คือ ความยาวคลื่น (m)

### 2.1.2.2 กฎการกระจัดของวีน (Wien's displacement law)

กฎการกระจัดของวีนอธิบายเกี่ยวกับความยาวคลื่นสูงสุดของรังสีที่แผ่ออกมาจากวัตถุซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยสามารถหาสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นสูงสุด ( $\lambda_{max}$ ) และอุณหภูมิ ( $T$ ) ได้จากการหาอนุพันธ์สมการที่ 2.1 เทียบกับความยาวคลื่นจะได้กฎของวีนแสดงดังสมการที่ 2.2

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \quad (2.2)$$

- เมื่อ  $\lambda_{max}$  คือ ความยาวคลื่นที่มีความเข้มสูงสุดที่แผ่ออกมาจากวัตถุ ( $\mu m$ )  
 $T$  คือ อุณหภูมิของวัตถุ (K)



### 2.1.2.3 กฎของสเตฟาน-โบลทซ์มันน์ (Stefan-Boltzmann's law)

กฎของสเตฟาน-โบลทซ์มันน์อธิบายพลังงานที่แผ่ออกมาจากวัตถุดำในทุกความยาวคลื่นได้ โดยการอินทิเกรตสมการที่ 2.1 จะได้ค่าคงที่เท่ากับ  $5.6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$  เรียกค่าคงที่นี้ว่า ค่าคงที่สเตฟาน-โบลทซ์มันน์ ( $\sigma$ ) โดยสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.3

$$E_b = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda = \frac{2\pi c^4 T^4}{c^2 h^3} \left( \frac{\pi^4}{15} \right) = \sigma T^4 \quad (2.3)$$

เมื่อ  $E_b$  คือ พลังงานทั้งหมดที่แผ่ออกมาจากวัตถุ (J)

$\sigma$  คือ ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลทซ์มันน์ (Stefan-Boltzmann constant)  
( $5.6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ )

$T$  คือ อุณหภูมิของวัตถุ (K)

จากทฤษฎีรังสีอาทิพย์และรังสีโลกพบว่ารังสีทั้งสองมีความสัมพันธ์กันในแง่ของพลังงานโดยเริ่มต้นรังสีอาทิพย์ที่ผ่านชั้นบรรยากาศลงมาถึงพื้นโลกหรือเรียกว่ารังสีคลื่นสั้นขาเข้า (incoming short wave) ถูกดูดกลืนและลดทอนโดยชั้นบรรยากาศและพื้นผิวโลก นอกจากนี้ยังมีรังสีบางส่วนที่ถูกสะท้อนกลับขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศโดยองค์ประกอบทางบรรยากาศและพื้นผิวโลก รังสีส่วนนั้นถูกเรียกว่ารังสีคลื่นสั้นขาขึ้น (outgoing shortwave) จากการที่พื้นโลกและบรรยากาศดูดกลืนรังสีคลื่นสั้นเอาไว้และเปลี่ยนเป็นพลังงานเก็บสะสมไว้ทำให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นและปลดปล่อยออกมาในรูปของรังสีความร้อนโดยพื้นโลกที่ปลดปล่อยออกมาในรูปของรังสีคลื่นยาวขาขึ้น (outgoing longwave) และตัวบรรยากาศที่ปลดปล่อยออกมาในรูปแบบของรังสีคลื่นยาวสองทิศทางคือรังสีคลื่นยาวที่มีทิศทางออกสู่บรรยากาศและรังสีคลื่นยาวที่มีทิศทางสู่พื้นผิวโลกหรือเรียกว่ารังสีคลื่นยาวขาเข้า (incoming longwave) เมื่อพิจารณาที่พื้นผิวโลกจะสังเกตได้ว่ามีทั้งรังสีคลื่นสั้นและรังสีคลื่นยาวเข้าออกจากพื้นผิวซึ่งผลต่างระหว่างรังสีขาเข้าและรังสีขาขึ้นเรียกว่า รังสีสุทธิ (Net radiation)

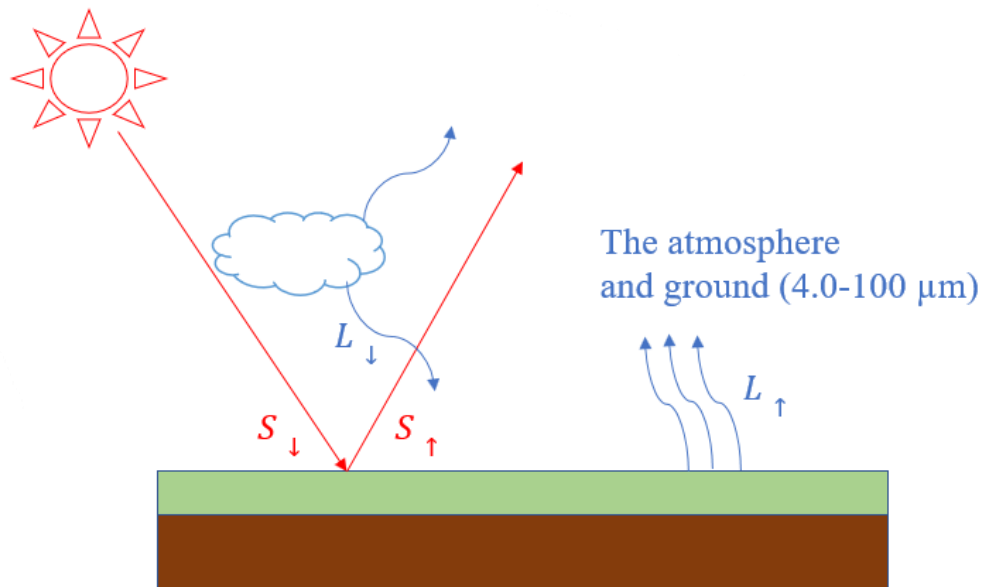
### 2.1.3 รังสีสุทธิ (Net Radiation)

#### 2.1.3.1 ความหมายของรังสีสุทธิ

รังสีสุทธิคือผลต่างระหว่างรังสีขาเข้าและรังสีขาขึ้นจากโลกทั้งนี้พิจารณาทั้งรังสีคลื่นสั้นและรังสีคลื่นยาวโดยองค์ประกอบของรังสีที่ว่านี้มีแหล่งที่มาแตกต่างกันโดยเริ่มต้นจากรังสีขาเข้าหรือรังสีที่มีทิศทางเคลื่อนที่ลงสู่พื้นโลกจะประกอบไปด้วยรังสีคลื่นสั้นที่มาจากดวงอาทิตย์และรังสีคลื่นยาวที่มาจากการแผ่รังสีขององค์ประกอบทางบรรยากาศ ในกรณีของรังสีขาขึ้นจะประกอบไปด้วยรังสี

คลื่นสั้นที่สะท้อนจากพื้นผิวโลกและรังสีคลื่นยาวที่แผ่ออกมาจากพื้นผิวโลกโดยสามารถอธิบายได้ดังรูปต่อไปนี้

The sun (0.1-4.0  $\mu\text{m}$ )



รูปที่ 13 แหล่งที่มาขององค์ประกอบทั้ง 4 ของรังสี

จากองค์ประกอบและความสัมพันธ์ที่กล่าวมาจะสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$R_n = S_{\downarrow} - S_{\uparrow} + L_{\downarrow} - L_{\uparrow} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $R_n$  คือ รังสีสุทธิ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$S_{\downarrow}$  และ  $S_{\uparrow}$  คือ รังสีคลื่นสั้นขาลงและขาขึ้นตามลำดับ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$L_{\downarrow}$  และ  $L_{\uparrow}$  คือ รังสีคลื่นยาวขาลงและขาขึ้นตามลำดับ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

หรือในบางกรณีอาจเขียนอยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิว (albedo) ได้ว่า

$$R_n = (1 - \alpha)S_{\downarrow} + L_{\downarrow} - L_{\uparrow} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิว

ซึ่งพื้นผิวแต่ละชนิดจะมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่แตกต่างกันออกไปสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1

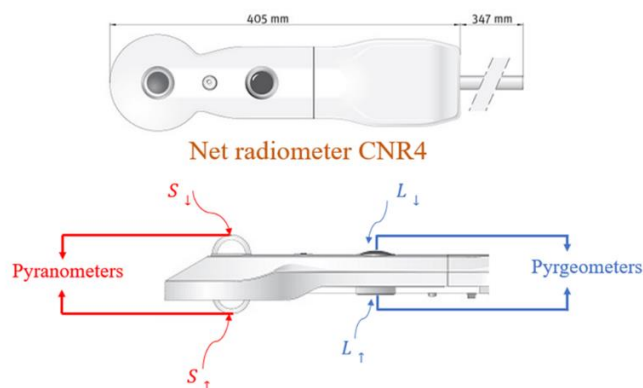


ตารางที่ 1 ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวแต่ละชนิดบนโลก (STKE, 2018)

พื้นผิว	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน
หลังคากระเบื้องลอน	0.1-0.15
พื้นผิวทาสี	0.15-0.35
พืชพรรณ	0.15-0.18
ยางมะตอย	0.05-0.2
คอนกรีต	0.25-0.7
หญ้า	0.25-0.3
น้ำแข็ง	0.3-0.5

### 2.1.3.2 การวัดรังสีสุทธิ

รังสีสุทธิประกอบไปด้วยรังสีที่มาจากดวงอาทิตย์หรือรังสีคลื่นสั้นและรังสีความร้อนที่แผ่ออกจากบรรยากาศและพื้นผิวโลกหรือรังสีคลื่นยาวซึ่งทั้งสองมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่แตกต่างกัน ดังนั้นเครื่องมือวัดจึงถูกแยกออกเป็นสองส่วนคือการวัดรังสีคลื่นสั้นใช้เครื่องไพราโนมิเตอร์ (pyranometer) ซึ่งจะวัดความยาวคลื่นในช่วง 0.3-2.8 ไมโครเมตร และการวัดรังสีคลื่นยาวใช้เครื่องไพริจีโอมิเตอร์ (pyrgeometer) ซึ่งจะวัดความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 4.5-42 ไมโครเมตร โดยทั้งสองเครื่องมือจะต้องวัดทั้งรังสีขาลงและรังสีขาขึ้น ดังนั้นเครื่องมือวัดรังสีสุทธิหรือเน็ตเรดิโอมิเตอร์ (Net Radiometer) จึงประกอบไปด้วย 4 หัววัด คือ ไพราโนมิเตอร์ 2 หัววัดและไพริจีโอมิเตอร์ 2 หัววัด ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 ส่วนประกอบของเครื่องเน็ตเรดิโอมิเตอร์ รุ่น CNR4

ที่มา: Kipp&Zonen (2015)

นอกจากเซนเซอร์สำหรับวัดค่าความต่างศักย์ของความเข้มรังสีแล้วเครื่องเน็ตเรดิโอมิเตอร์ยังมีเซนเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิของตัวเครื่องเทียบกับอุณหภูมิแวดล้อมเพื่อใช้ในการนำมาคำนวณค่ารังสีคลื่นยาวที่แผ่ออกมาจากพื้นผิวหรือบรรยากาศที่อุณหภูมิต่าง ๆ รายละเอียดคุณสมบัติของเครื่องวัดแสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติเฉพาะในการวัดของเน็ตเรดิโอมิเตอร์ รุ่น CNR4 (Kipp&Zonen, 2015)

คุณสมบัติของเครื่องมือ	ช่วงที่ทำงานได้
ช่วงความยาวคลื่นที่วัด (รังสีคลื่นสั้น) (Spectral range: shortwave)	300-2800 nm
ช่วงความยาวคลื่นที่วัด (รังสีคลื่นยาว) (Spectral range: longwave)	4500-42000 nm
ค่าการตอบสนอง (Sensitivity)	5-20 $\mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$
อุณหภูมิที่ขึ้นอยู่กับค่าการตอบสนอง (Temperature dependence of sensitivity)	< 4% (-10 to +40°C)
เวลาในการตอบสนอง (Response time)	< 18s
ความไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linearity)	< 1%
อุณหภูมิในการทำงาน (Operating temperature)	-40 to 80°C
มาตรฐานสากล (International standards (WMO))	Good Quality WMO
กำลังที่ใช้หมุนเวียนอากาศ (Ventilation power (optional CNF4))	10 Watts @ 12VDC

เครื่องเน็ตเรดิโอมิเตอร์ที่ใช้สำหรับวัดค่ารังสีสุทธีนี้ในท้องตลาดมีบริษัทผู้ผลิตหลากหลาย โดยเบื้องต้นการทำงานและการวัดจะมีลักษณะที่คล้ายกันแต่จะมีช่วงการทำงานที่แตกต่างกันออกไปตามแต่รุ่นของบริษัทผู้ผลิต

### 2.1.3.3 ความสำคัญของรังสีสุทธี

รังสีสุทธีถูกใช้เป็นตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาสภาวะโลกร้อนซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่าเฉลี่ยรังสีสุทธีทั่วโลกในหนึ่งปีจะต้องมีค่าเท่ากับ 0 โดยหากปีใดค่ารังสีสุทธีมีค่าเป็นบวกนั้นหมายถึงพลังงานที่เข้ามายังโลกมีค่ามากกว่าพลังงานที่โลกปลดปล่อยออกไปทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยทั่วโลกมีค่าสูงขึ้นในปีนั้น ในทางตรงกันข้ามหากปีนั้นค่ารังสีสุทธีมีค่าเป็นลบนั้นหมายถึงพลังงานที่โลกปลดปล่อยออกไปนั้นมี

ค่ามากกว่าพลังงานที่เข้ามายังโลกทำให้อุณหภูมิของโลกในปีนั้นลดลง นอกจากนี้จะใช้เป็นตัวแปรเพื่อบอกการเพิ่มขึ้นและลดลงของอุณหภูมิแล้วรังสีสุทธิยังถูกใช้เป็นตัวแปรอินพุตในแบบจำลองการระเหยคายน้ำเพื่อดูการสูญเสียน้ำให้กับบรรยากาศและเป็นแนวทางในการบริหารจัดการน้ำของกรมชลประทานต่อไป



รูปที่ 15 การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศที่เป็นผลกระทบของสภาวะโลกร้อน  
ที่มา: Voices (2021)



รูปที่ 16 การระเหยคายน้ำของพื้นที่ทางการเกษตร  
ที่มา: Herrarte (2022)

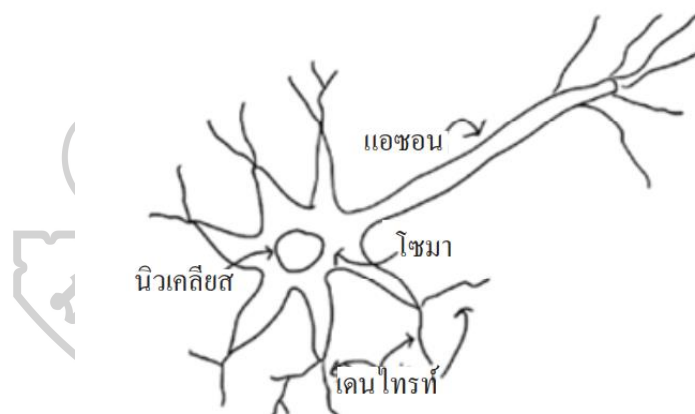
#### 2.1.4 แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN)

โครงข่ายประสาทเทียมหรือ ANN เป็นระบบทางคณิตศาสตร์ที่เขียนในรูปของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งสามารถจำลองการทำงานของระบบทางฟิสิกส์โดยเลียนแบบการทำงานของเซลล์

สมองของมนุษย์ โดยทั่วไปโครงข่ายประสาทเทียมจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรอินพุตและตัวแปรเอาต์พุตผ่านหน่วยย่อยที่เรียกว่า นิวรอน (neuron) โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวจะได้อมาจากการฝึกสอนด้วยข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่ทราบค่า จากนั้นจะนำโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้รับการฝึกสอนไปหาค่าเอาต์พุตของระบบจากอินพุตใหม่ได้ ข้อดีของการใช้งานโครงข่ายประสาทเทียมคือไม่จำเป็นต้องสร้างสมการความสัมพันธ์ในรูปแบบฟังก์ชันต่าง ๆ ดังนั้นการจำลองแบบโดยโครงข่ายประสาทเทียมจึงเหมาะสมกับระบบตัวแปรที่อินพุตและเอาต์พุตมีความสัมพันธ์กันอย่างซับซ้อนซึ่งไม่สามารถแสดงความสัมพันธ์ในรูปแบบของฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ได้โดยตรง

#### 2.1.4.1 นิวรอนทางชีววิทยา

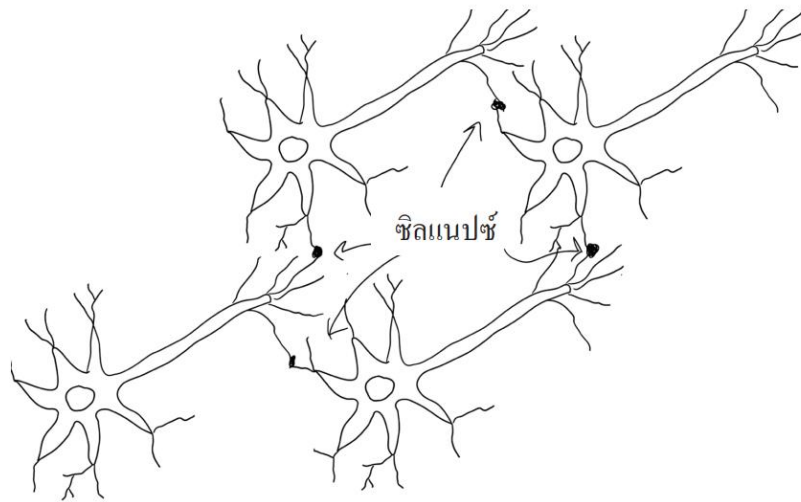
ระบบสมองของมนุษย์จะมีนิวรอนเป็นเซลล์พื้นฐานโดยแต่ละเซลล์จะตอบสนองต่อศักย์ไฟฟ้าที่ผ่านเข้ามาและทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าของเซลล์ข้างเคียง เมื่อนำนิวรอนทั้งหมดมาประกอบกันจะกลายเป็นโครงข่ายที่มีความซับซ้อนซึ่งสามารถประมวลผล วิเคราะห์ และจดจำข้อมูลต่าง ๆ ได้ โดยนิวรอนจะมีองค์ประกอบที่สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 องค์ประกอบของนิวรอนที่ประกอบไปด้วย โซมา (soma) เดนไดรน์ (dendrite) แอซอน (axon) และซินแนปส์ (synapse)

ที่มา: เสริม จันทรฉาย (2560)

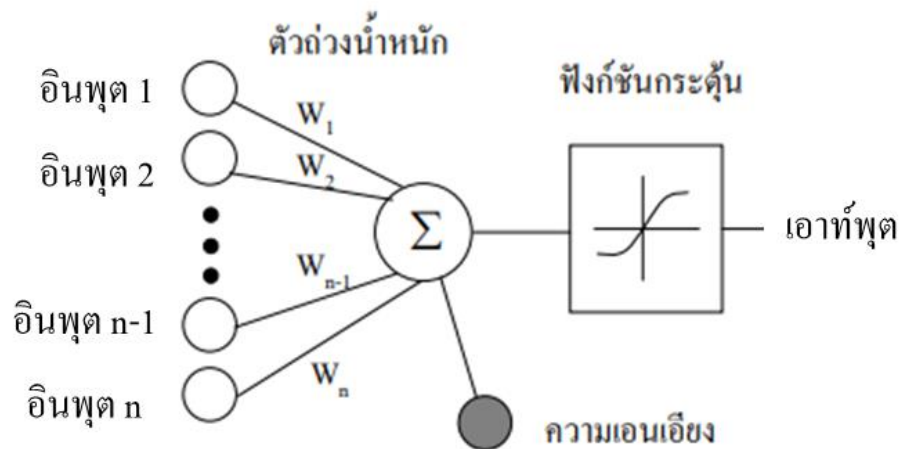
โดยโซมาจะทำหน้าที่รับสัญญาณไฟฟ้าจากนิวรอนข้างเคียงผ่านทางเดนไดรน์และทำการประมวลผลข้อมูล จากนั้นจะส่งออกสัญญาณเอาต์พุตผ่านทางแอซอนไปยังนิวรอนตัวอื่น ๆ ผ่านจุดเชื่อมที่เรียกว่า ซินแนปส์ซึ่งกระบวนการเหล่านี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 กระบวนการทำงานของโครงข่ายระบบประสาทของมนุษย์  
ที่มา: เสริม จันทร์ฉาย (2560)

#### 2.1.4.2 ประสาทเทียม (artificial neuron)

ระบบประสาทเทียมเป็นกระบวนการทางคอมพิวเตอร์ที่จำลองการทำงานของเซลล์ประสาทมนุษย์โดยประสาทเทียม 1 หน่วยจะรับข้อมูลอินพุตเข้ามาแล้วคูณด้วยตัวถ่วงน้ำหนัก ( $w_i$ ) เมื่อได้ผลคูณของตัวแปรอินพุตแต่ละตัวออกมาแล้วจะทำการหาผลรวมของผลคูณนั้นและบวกด้วยตัวแปรบอกความเอนเอียง (bias parameter) จากนั้นส่งต่อไปยังฟังก์ชันกระตุ้น (activate function) และจะได้เอาต์พุตออกมาซึ่งกระบวนการทำงานของประสาทเทียม 1 หน่วยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 19 และเอาต์พุตของระบบสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการได้ดังสมการที่ 2.6



รูปที่ 19 ขั้นตอนการทำงานของประสาทเทียม 1 หน่วย  
ที่มา: เสริม จันทร์ฉาย (2560)



$$y = f(b + \sum_i w_i x_i) \quad (2.6)$$

เมื่อ  $y$  คือ เอาท์พุทของประสาทเทียม

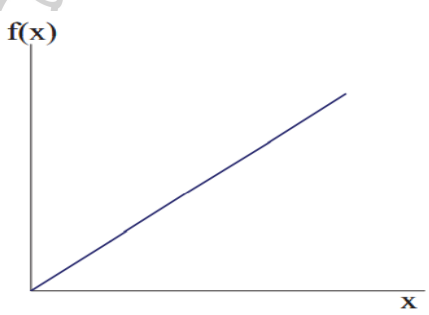
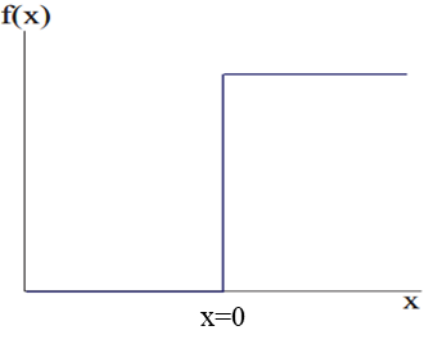
$b$  คือ ตัวแปรบอกความเอนเอียง

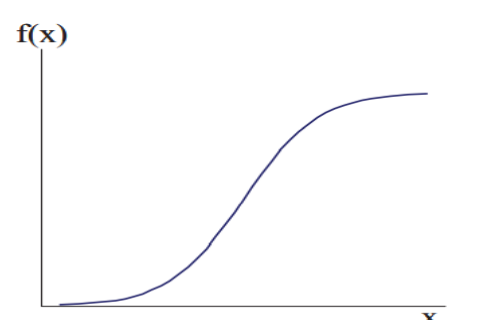
$x_i$  คือ ตัวแปรอินพุตที่  $i$  เมื่อ  $(i=1,2,3,\dots,n)$

$w_i$  คือ ค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับตัวแปรอินพุตที่  $i$

สำหรับฟังก์ชันกระตุ้นมีได้หลายรูปแบบทั้งแบบเชิงเส้น (linear) และแบบไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear) ซึ่งแสดงตัวอย่างไว้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตัวอย่างฟังก์ชันกระตุ้น

ฟังก์ชัน	สมการ	กราฟ
1. ฟังก์ชันเชิงเส้น	$f(x)=x$ ; สำหรับทุกค่าของ $x$	
2. ฟังก์ชันขีดจำกัด (threshold function)	$f(x) = \begin{cases} 0, & x < \theta \\ 1, & x \geq \theta \end{cases}$ เมื่อ $\theta$ เป็นขีดจำกัด	

3. ฟังก์ชันซิกมอยด์ (sigmoid function)	$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$	
--	-------------------------------	--

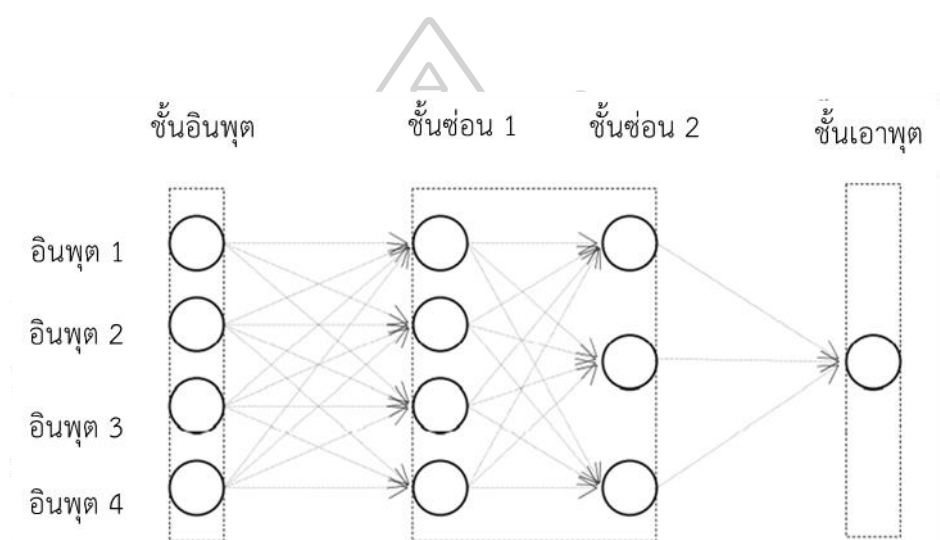
ฟังก์ชันกระตุ้น (โกรศักดี เกษร, 2564) เป็นฟังก์ชันในการคำนวณเพื่อทำนายค่าของข้อมูลออก (Output) รูปแบบที่นิยมมากที่สุดและมีประโยชน์คือแบบที่ไม่เป็นฟังก์ชันสมการเส้นตรง (Non-linear function) เนื่องจากปัญหาในโลกความเป็นจริงมีลักษณะเป็นแบบสมการเส้นตรงน้อยมาก ฟังก์ชันกระตุ้นทำหน้าที่ในการตัดสินใจว่านิวรอนควรจะถูกกระตุ้นหรือไม่ โดยดูค่าผลรวมของข้อมูลเข้า (Input) และค่าถ่วงน้ำหนัก ฟังก์ชันกระตุ้นจะถูกนำไปใช้ทั้งโหนดซ่อน (Hidden node) และโหนดข้อมูลออก (Output node) ซึ่งทั้งสองโหนดอาจจะใช้ฟังก์ชันกระตุ้นที่เหมือนหรือต่างกันได้ แต่ส่วนมากจะใช้ฟังก์ชันแบบไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากโหนดซ่อนจะมีการคำนวณแบบการรวมเชิงเส้น (Linear combination) ถ้าฟังก์ชันกระตุ้นของโหนดซ่อนมีการคำนวณแบบเชิงเส้นอีกจะเป็นการทำงานซ้ำซ้อนกับการคำนวณแบบการรวมเชิงเส้นในชั้นข้อมูลออก และจะทำให้ผลลัพธ์เทียบเท่ากับสมการถดถอยลอสติก ฟังก์ชันกระตุ้นจะมีหลากหลายรูปแบบ ดังต่อไปนี้

1. ฟังก์ชันกระตุ้นแบ่งค่า (Threshold activation function) ฟังก์ชันนี้เรียกอีกชื่อว่าฟังก์ชันไบนารีสเตป (Binary step function) ซึ่งจะพิจารณาค่าข้อมูลเข้าว่ามากกว่าหรือน้อยกว่าค่าแบ่งที่กำหนดไว้หรือไม่ เพื่อส่งค่าต่อไปยังชั้นถัดไป
2. ฟังก์ชันกระตุ้นซิกมอยด์ (Sigmoid activation function) เป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่มีลักษณะเป็นตัวเอส “S-curve” หรือเรียกว่า “Sigmoid curve” จะมีค่าระหว่าง 0 และ 1 ฟังก์ชันนี้จะใช้เมื่อต้องการทำนายความน่าจะเป็น (Probability) ของข้อมูลออก

โดยการเลือกใช้ฟังก์ชันกระตุ้นนั้นขึ้นอยู่กับงานหรือเงื่อนไขของเอาต์พุตที่ผู้วิจัยต้องการ โดยงานในด้านรังสีอาทิติยนั้นจะนิยมใช้ฟังก์ชันซิกมอยด์เป็นฟังก์ชันกระตุ้นเนื่องจากเป็นงานทางการทำนายหรือการประมาณค่า

### 2.1.4.3 โครงข่ายประสาทเทียม

การนำประสาทเทียมมาเชื่อมต่อเป็นโครงข่ายมีได้หลายแบบโดยที่นิยมใช้ในงานด้านรังสีอาทิติย์ คือ แบบเพอร์เซปตรอนหลายชั้น (multi-layer perceptron) โครงข่ายประสาทเทียมดังกล่าวประกอบด้วยประสาทเทียมที่เชื่อมต่อกันเป็นระบบแบ่งออกเป็นชั้น ๆ ได้แก่ ชั้นอินพุต (input layer) ชั้นซ่อน (hidden layer) และชั้นเอาต์พุต (output layer) โดยชั้นซ่อนสามารถมีได้หลายชั้นดังตัวอย่างในรูปที่ 20

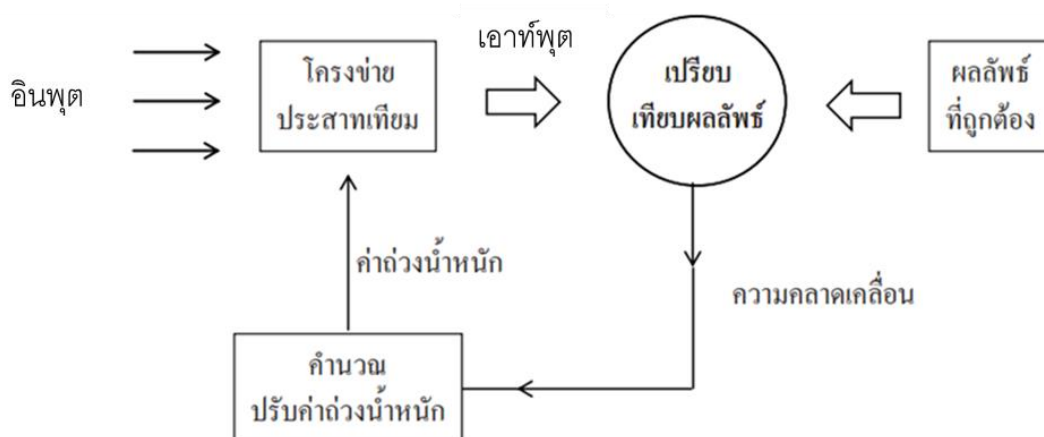


รูปที่ 20 ตัวอย่างโครงข่ายประสาทเทียมที่ประกอบไปด้วยชั้นอินพุต ชั้นซ่อน 2 ชั้น และชั้นเอาต์พุต  
ที่มา: เสริม จันทร์ฉาย (2560)

### 2.1.4.4 การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมจะมีการเรียนรู้และปรับตัวต่อสิ่งเร้าต่าง ๆ เช่นเดียวกับสมองมนุษย์ กล่าวคือต้องมีการเรียนรู้ก่อนนำไปใช้งาน การเรียนรู้ดังกล่าวเกิดจากการฝึกสอนด้วยข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตที่ทราบค่าโดยวิธีการฝึกสอนที่นิยมใช้กันคือ การฝึกสอนแบบย้อนกลับ (back propagation algorithm) ซึ่งมีขั้นตอนแสดงดังรูป





รูปที่ 21 ขั้นตอนการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมแบบย้อนกลับ

ที่มา: เสริม จันทร์ฉาย (2560)

การฝึกสอนแบบย้อนกลับสามารถทำได้โดยการป้อนข้อมูลอินพุตเข้าไปในโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อให้ระบบคำนวณเอาต์พุตที่เป็นผลลัพธ์ออกมา จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่คำนวณได้กับผลลัพธ์เป้าหมายซึ่งเป็นค่าที่ถูกต้อง หลังจากนั้นคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อน (error) ส่งย้อนกลับเข้าไปในระบบเพื่อปรับค่าถ่วงน้ำหนักแล้วทำการคำนวณผลลัพธ์ใหม่และจะทำซ้ำเช่นนี้จนกระทั่งค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้จึงหยุดทำการฝึกสอน โครงข่ายประสาทเทียมจะจดจำค่าถ่วงน้ำหนักสุดท้ายไปใช้งานเพื่อจำลองแบบโดยใช้ข้อมูลอินพุตชุดใหม่

การสร้างโครงข่ายประสาทเทียมสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

1) ออกแบบโครงข่ายประสาทเทียมและเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ตามทีออกแบบไว้ โดยวิธีนี้ผู้ใช้งานจะต้องเข้าใจกลไกการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียมเป็นอย่างดีรวมถึง การมีความรู้ทางด้านเขียนโปรแกรมด้วย

2) โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับโครงข่ายประสาทเทียม เช่น โปรแกรม Weka โดยวิธีนี้ผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องเข้าใจถึงรายละเอียดของตัวโปรแกรมแต่รู้วิธีการป้อนข้อมูลเข้าไปในโปรแกรมก็จะสามารถใช้งานโครงข่ายประสาทเทียมในการแก้ปัญหาได้ (เสริม จันทร์ฉาย, 2560)

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Shaw (1956) นำเสนอแบบจำลองคำนวณค่ารังสีสุทธิโดยพิจารณาจากข้อมูลรังสีอาทิตย์ที่ได้จากเครื่องมือวัดภาคพื้นดินในมหาวิทยาลัย Iowa State ที่ประเทศฟิลิปปินส์ในสภาวะท้องฟ้าปราศจากเมฆและท้องฟ้ามีเมฆมาก โดยแบบจำลองอยู่ในรูปของสมการการถดถอยเชิงเส้นซึ่งจากแบบจำลองนี้สามารถนำมาใช้ในการคำนวณค่ารังสีสุทธิได้ดีโดยมีค่าสหสัมพันธ์ (correlation) เท่ากับ 0.98 และ 0.97 ในสภาวะท้องฟ้าปราศจากเมฆและมีเมฆมาก ตามลำดับ ต่อมา Davies

(1967) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างรังสีสุทธิและรังสีอาทิตย์ที่ 3 สถานีในแอฟริกาตะวันตก และ 14 สถานีทั่วโลก ซึ่งความสัมพันธ์อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงที่มีค่าความชันและจุดตัดแกน  $y$  ต่างกัน โดยค่าความชันนี้สามารถนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิว (albedo) และสัมประสิทธิ์ทางความร้อน (heating coefficient) Gay (1971) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างรังสีอาทิตย์ที่เข้ามายังพื้นโลกและรังสีสุทธิที่พื้นผิวต่าง ๆ ในสภาวะท้องฟ้าปราศจากเมฆ พบว่าแบบจำลองที่อยู่ในรูปแบบสมการถดถอยเชิงเส้นที่มีมาก่อนหน้านั้นมีข้อบกพร่องหลายประการซึ่ง Gay ได้เสนอแนวทางในการแก้ไขโดยการปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีคลื่นยาว โดยใช้สัมประสิทธิ์การทำความร้อนของพื้นผิว (Surface heating coefficient) เนื่องจากผู้วิจัยคาดว่าสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีคลื่นยาวที่พื้นผิวสามแบบคือ ทะเลทราย ป่าไม้ และพืชพรรณทางน้ำนั้นได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมด้วย เมื่อทำการทดสอบแบบจำลองพบว่าแบบจำลองที่ถูกปรับแก้แล้วให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r^2$ ) เท่ากับ 0.997 0.98 และ 0.98 ในพื้นผิว ทะเลทราย พืชพรรณ และพืชพรรณทางน้ำ ตามลำดับ

Kaminsky and Dubayah (1997) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์รังสีคลื่นสั้นขาเข้าและรังสีสุทธิราย 15 นาที ที่ 9 สถานีบริเวณตอนกลางของประเทศจีนเพื่อจัดทำแบบจำลองในการประมาณค่ารังสีสุทธิพบว่าแบบจำลองดังกล่าวอยู่ในรูปของสมการเส้นตรงที่สามารถใช้งานได้ในพื้นที่ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r^2$ ) อยู่ในช่วง 0.96-0.99 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Root Mean Square Error: RMSE) ในช่วง 26-41  $W/m^2$

Alados et al. (2003) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างรังสีอาทิตย์และรังสีสุทธิราย 5 นาทีเป็นเวลา 38 เดือน ในพื้นที่กึ่งแห้งแล้งที่ปกคลุมไปด้วยไม้พุ่ม พบว่ารังสีทั้งสองมีความสัมพันธ์เชิงเส้นโดยเมื่อรังสีอาทิตย์ที่เข้ามายังพื้นผิวโลกเพิ่มรังสีสุทธิก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้องค์ประกอบทางบรรยากาศ เช่น ปริมาณเมฆบนท้องฟ้าก็ส่งผลต่อรังสีสุทธิเนื่องจากเป็นตัวบดบังรังสีอาทิตย์ขาเข้า ต่อมา Hu et al. (2012) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างรังสีสุทธิและรังสีอาทิตย์บริเวณที่ราบสูงทิเบตในเมือง Lhasa และ Haibei พบว่ารังสีสุทธิรายวันเฉลี่ยต่อเดือนมีค่าต่ำสุดที่ฤดูหนาวและค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงเดือนพฤษภาคม จากนั้นก็ค่อย ๆ ลดลงจนถึงเดือนมกราคมซึ่งรูปแบบการแปรค่านี้สอดคล้องกับค่ารังสีอาทิตย์โดยรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างรังสีอาทิตย์และรังสีสุทธิอยู่ในรูปของสมการเส้นตรงโดยค่าที่ประมาณได้จากแบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัดมีเปอร์เซ็นต์การเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ (relative deviations) เท่ากับ 2.8% และ 3.8% ที่เมือง Lhasa และ Haibei ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ ถัดมา Ojo et al. (2021) ได้ทำการศึกษาการประมาณค่ารังสีสุทธิในไนจีเรียที่มีสภาพพื้นที่ที่แตกต่างกันโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network: ANN) ซึ่งใช้อัลกอริทึม 3 รูปแบบในการวิเคราะห์ คือ Gradient Descent Conjugate Gradient และ Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) และใช้อัลกอริทึมอนุกรมอนุกรมเป็นตัวแปรอินพุต ผล

การศึกษาพบว่าอุณหภูมิต่ำสุดส่งผลดีต่อการประมาณค่ารังสีสุทิมากกว่าอุณหภูมิสูงสุดและจากการประเมินประสิทธิภาพของ ANN พบว่าอัลกอริทึมที่ดีที่สุดในการใช้วิเคราะห์คือ Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno (BFGS) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r^2$ ) สูงสุดที่ 0.91 ในพื้นที่กึ่งแห้งแล้ง 0.65 ในพื้นที่กึ่งแห้งและชื้น 0.80 ในพื้นที่กึ่งชื้น และ 0.88 ในพื้นที่ชื้น ตามลำดับ

สำหรับประเทศไทย Limhooon and Bualert (2013) ได้ทำการศึกษาการแปรค่ารังสีสุทิม และสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ในประเทศไทยพบว่ารังสีทั้งสองมีความสัมพันธ์กัน โดยในฤดูร้อนเมื่อปริมาณสเปกตรัมรังสีอาทิตย์มีค่ามากค่ารังสีสุทิมก็มีค่ามาก ลองลงมาเป็นฤดูหนาวที่ประเทศไทยได้รับผลกระทบจากฝุ่นละอองในบรรยากาศกระเจิงรังสีอาทิตย์ทำให้ปริมาณรังสีสุทิมลดลง และมีค่าต่ำที่สุดในฤดูฝนที่ท้องฟ้าเต็มไปด้วยเมฆส่งผลให้บดบังรังสีอาทิตย์เข้าทำให้รังสีสุทิมมีค่าต่ำที่สุดในฤดูนี้

จากงานวิจัยก่อนหน้านี้พบว่ารังสีสุทิมสามารถประมาณค่าได้จากรังสีอาทิตย์เข้าโดยทั้งสองมีความสัมพันธ์กันดีในรูปแบบเชิงเส้นโดยเมื่อรังสีอาทิตย์มีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้รังสีสุทิมมีค่ามากตามไปด้วย แต่เนื่องจากปัจจัยที่มีผลต่อรังสีอาทิตย์บนโลกนี้มีค่ามากจึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงปัจจัยเหล่านั้นด้วย เช่น ปริมาณเมฆ ฝุ่นละออง ไอ้ น้ำ รวมไปถึงสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิว ดังนั้นงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีสุทิมและองค์ประกอบทางบรรยากาศเพื่อจัดทำแบบจำลองในการประมาณค่ารังสีสุทิม รวมไปถึงศึกษาลักษณะทางสถิติของรังสีสุทิมที่สถานีนครปฐมด้วย



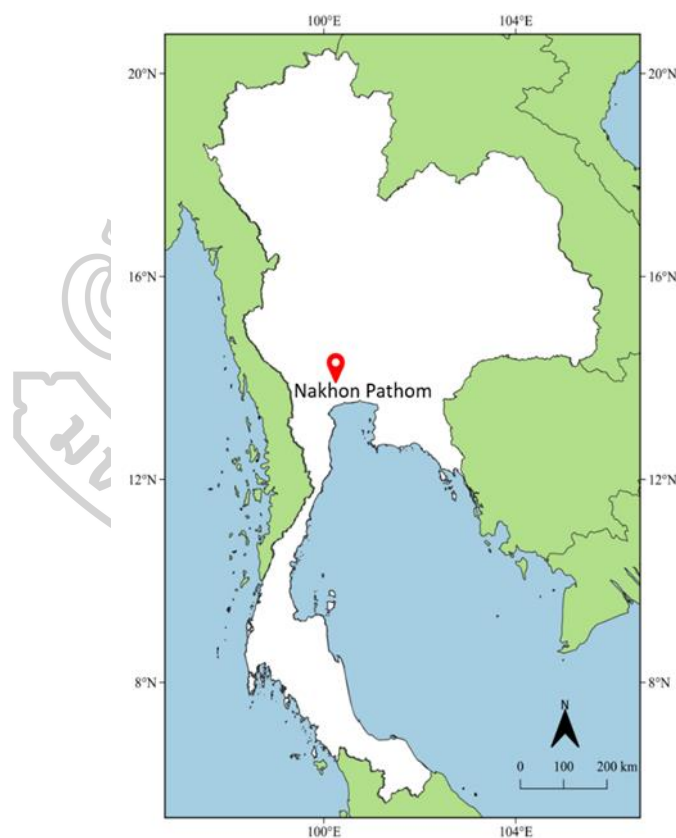
### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัยและผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษารังสีสุทธิจากข้อมูลที่ได้จากการวัดที่สถานีอุตุนิยมวิทยา นครปฐมและพัฒนาแบบจำลองเพื่อใช้ในการประมาณค่ารังสีสุทธิโดยใช้ข้อมูลจากสถานีดังกล่าว

#### 3.1 ข้อมูล

งานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลรังสีสุทธิที่ได้จากเครื่องมือวัดซึ่งตั้งอยู่ที่สถานีอุตุนิยมวิทยานครปฐม อำเภอกำแพงแสน (14°N, 99.58°E) จังหวัดนครปฐม (รูปที่ 22) โดยข้อมูลที่ใช้อยู่ในช่วงปี ค.ศ. 2017-2021 รายละเอียดของข้อมูลที่ใช้แสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 22 ตำแหน่งที่ตั้งของเครื่องมือวัดรังสีสุทธิที่สถานีนครปฐม

### 3.1.1 ข้อมูลรังสีสุทธิ

รังสีสุทธิถูกวัดด้วยเครื่องมือที่มีชื่อว่า เน็ตเรดิโอมิเตอร์ (Net Radiometer) รุ่น CNR4 ของบริษัท Kipp&Zonen ซึ่งประกอบไปด้วย pyranometer สำหรับวัดรังสีคลื่นสั้น 2 หัววัด และ pyrgeometer สำหรับวัดรังสีคลื่นยาว 2 หัววัด และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิของเครื่องมือ โดยจะติดตั้งเครื่องมือดังกล่าวไว้ที่สถานีอุตุนิยมวิทยานครปฐม ดังแสดงในรูปที่ 23



รูปที่ 23 รูปเครื่อง CNR4 สำหรับวัดรังสีสุทธิที่สถานีนครปฐม

### 3.1.2 การอ่านข้อมูล

ในการอ่านและบันทึกข้อมูล ผู้วิจัยจะทำการอ่านข้อมูลจากเครื่องบันทึกข้อมูลรุ่น FX 1012 ของบริษัท Yokogawa แสดงดังรูปที่ 24 ซึ่งทำการบันทึกข้อมูลจากเครื่องวัดรังสีสุทธิในรูปของความสัมพันธ์ไฟฟ้าทุก ๆ 1 วินาที จำนวน 5 ช่องสัญญาณ ได้แก่ สัญญาณที่มาจาก pyranometer 2 ช่องสัญญาณ สัญญาณที่มาจาก pyrgeometer 2 ช่องสัญญาณ และสัญญาณที่มาจากเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ 1 ช่องสัญญาณ โดยค่าเหล่านี้จะถูกนำมาคำนวณหารังสีคลื่นสั้นขาลงและขาขึ้น และรังสีคลื่นยาวขาลงและขาขึ้นตามสมการที่ 3.1-3.4 ตามลำดับ



$$S_{\downarrow} = \frac{V_1}{C_1} \quad (3.1)$$

$$S_{\uparrow} = \frac{V_2}{C_2} \quad (3.2)$$

$$L_{\downarrow} = \frac{V_3}{C_3} + 5.67 \times 10^{-8} \times T^4 \quad (3.3)$$

$$L_{\uparrow} = \frac{V_4}{C_4} + 5.67 \times 10^{-8} \times T^4 \quad (3.4)$$

เมื่อ  $S_{\downarrow}$  และ  $S_{\uparrow}$  คือ รังสีคลื่นสั้นขาหลงและขาขึ้น ตามลำดับ ( $W/m^2$ )  
 $L_{\downarrow}$  และ  $L_{\uparrow}$  คือ รังสีคลื่นยาวขาหลงและขาขึ้น ตามลำดับ ( $W/m^2$ )  
 $V_1$   $V_2$   $V_3$  และ  $V_4$  คือ ค่าสัญญาณความต่างศักย์ของแต่ละหัววัด (V)  
 $C_1$   $C_2$   $C_3$  และ  $C_4$  คือ ค่าการตอบสนองของหัววัดแต่ละหัว ( $V/W/m^2$ )  
 $T$  คือ ค่าอุณหภูมิของเครื่องวัด (K)



รูปที่ 24 อุปกรณ์บันทึกข้อมูลรุ่น FX 1012 ของบริษัท Yokogawa

หลังจากได้รังสีคลื่นสั้นขาหลงและขาขึ้น และรังสีคลื่นยาวขาหลงและขาขึ้นรายวินาทีแล้ว ผู้วิจัยจะคำนวณค่ารังสีสุทธิในหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตร ( $W/m^2$ ) ตามสมการที่ 2.4 จากนั้นนำค่าที่ได้มาทำการเฉลี่ยเป็นค่ารายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน ซึ่งค่าที่ได้ผู้วิจัยจะนำมาศึกษาลักษณะทางสถิติและพัฒนาแบบจำลองต่อไป

โดยทั่วไปเครื่องวัดประเภทเซนเซอร์จะต้องอาศัยการดูแลรักษาอย่างใกล้ชิดเพื่อให้ค่าสัญญาณที่ออกมาที่มีความถูกต้องและแม่นยำมากที่สุด นอกจากนี้ยังต้องมีการสอบเทียบเครื่องวัดเพื่อหาค่าการตอบสนองของหัววัด (sensitivity) อย่างน้อยปีละหนึ่งครั้งเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงในการตอบสนองของหัววัดและเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่ารังสีต่อไป

### 3.1.3 การสอบเทียบเครื่องวัดรังสีสุทธิ

เนื่องจากเครื่องวัดรังสีสุทธิประกอบไปด้วย 4 เซนเซอร์สำหรับวัดรังสี และ 1 เซนเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิซึ่งแต่ละเซนเซอร์จะมีค่าการตอบสนองที่ไม่เท่ากันดังนั้นจึงต้องพิจารณาแยกออกเป็นส่วน ๆ

ผู้วิจัยได้ทำการสอบเทียบเครื่องวัดรังสีสุทธิโดยการติดตั้งหัววัดมาตรฐานคู่กับเครื่องวัดที่สถานีอุตุนิยมวิทยานครปฐมแสดงได้ดังรูปที่ 25



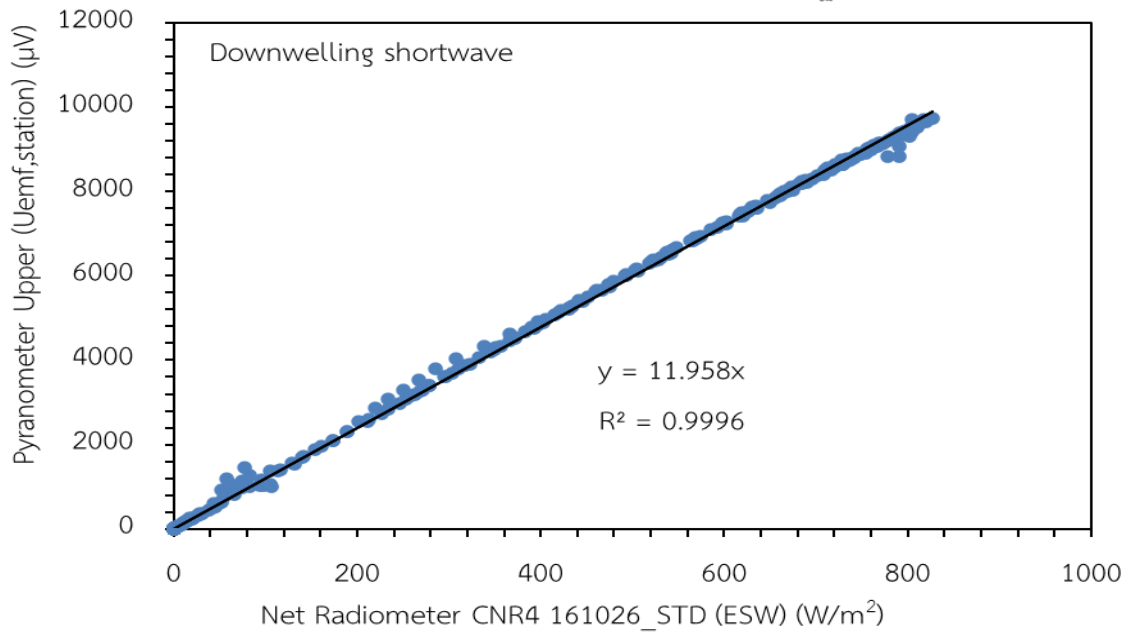
รูปที่ 25 การสอบเทียบเครื่องวัดรังสีสุทธิประจำสถานีนครปฐม

จากนั้นนำค่าความต่างศักย์ของแต่ละช่องสัญญาณของหัววัดมาตรฐานมาคำนวณหาค่ารังสีและนำมาเขียนกราฟเทียบกับค่าความต่างศักย์ของหัววัดประจำสถานีเพื่อหาค่าการตอบสนองใหม่ของหัววัดประจำสถานี ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 26-29



## ผลการสอบเทียบหัววัด Net Radiometer CNR4

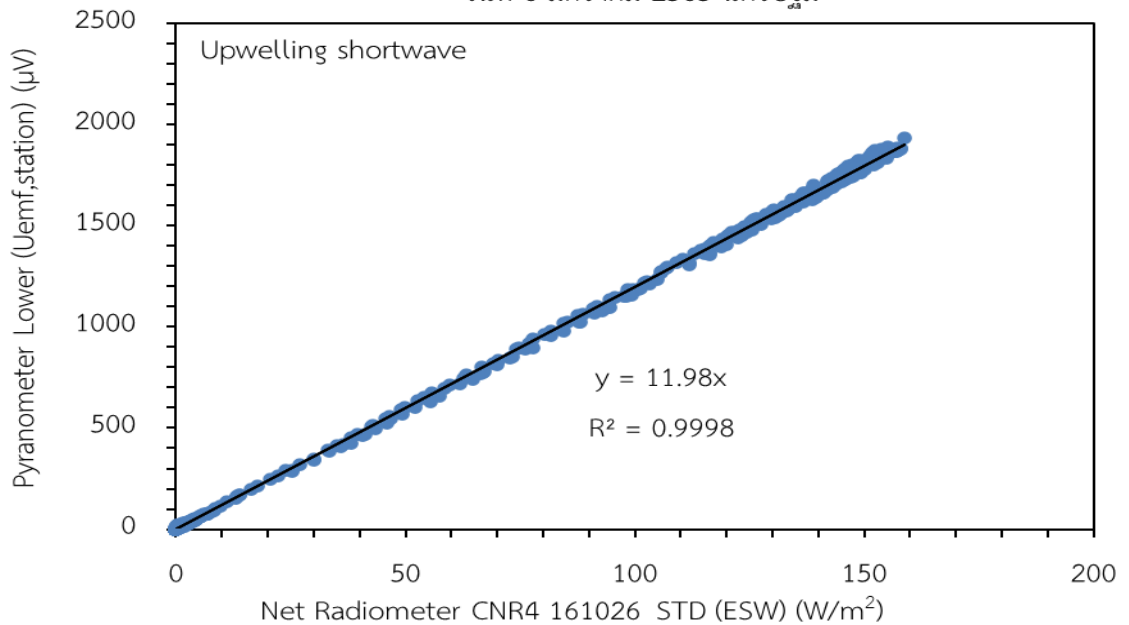
วันที่ 6 ธันวาคม 2564 นครปฐม



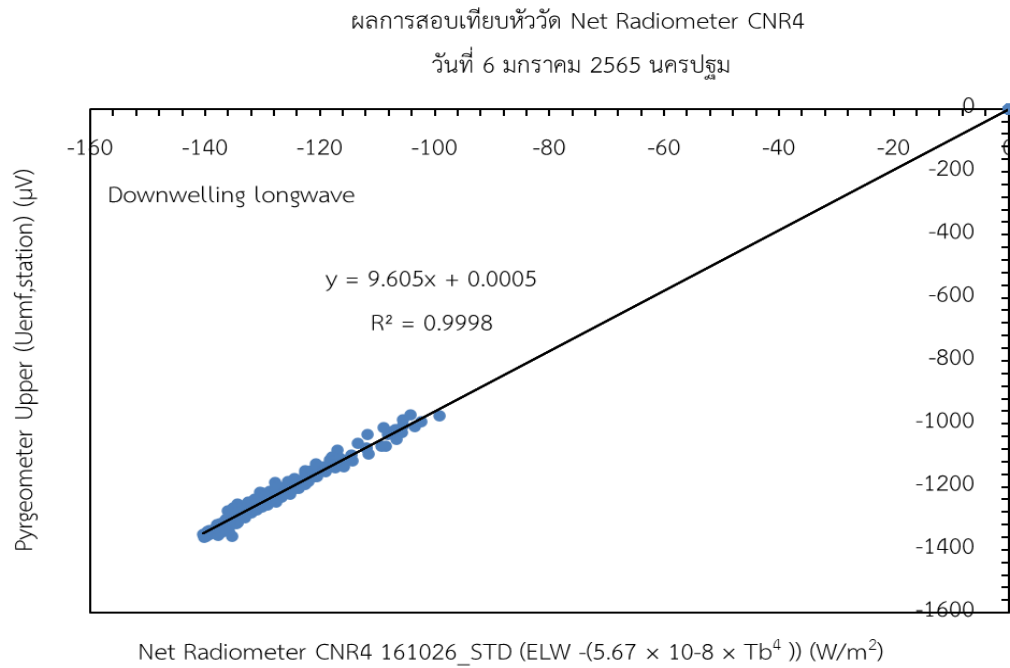
รูปที่ 26 ผลการสอบเทียบหัววัด pyranometer สำหรับวัดรังสีคลื่นสั้นขาลง

## ผลการสอบเทียบหัววัด Net Radiometer CNR4

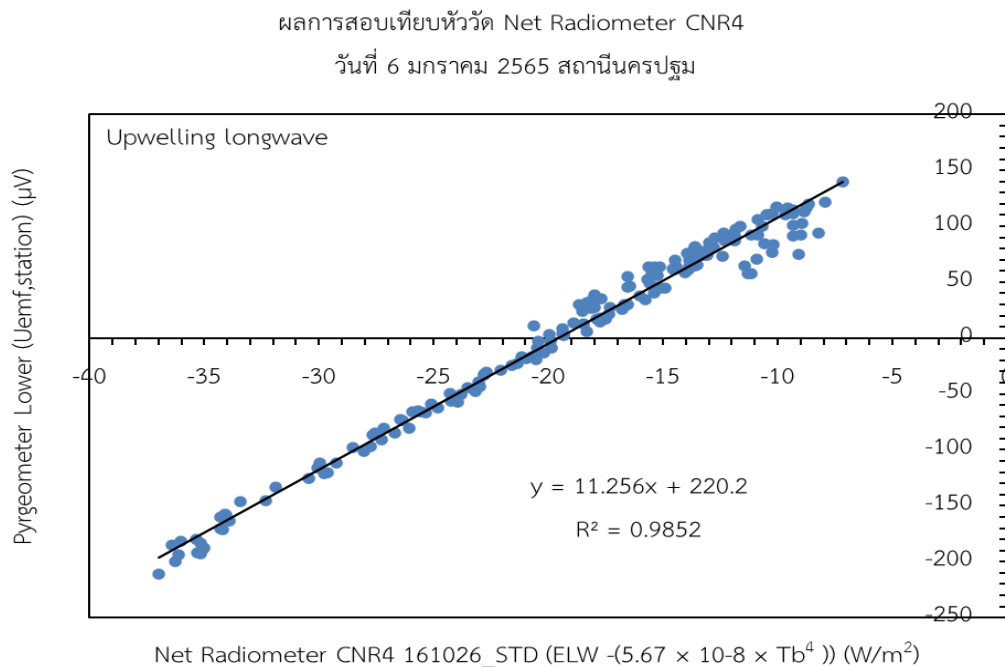
วันที่ 6 มกราคม 2565 นครปฐม



รูปที่ 27 ผลการสอบเทียบหัววัด pyranometer สำหรับวัดรังสีคลื่นสั้นขาขึ้น



รูปที่ 28 ผลการสอบเทียบหัววัด pyrometer สำหรับวัดรังสีคลื่นยาวขาลง



รูปที่ 29 ผลการสอบเทียบหัววัด pyrometer สำหรับวัดรังสีคลื่นยาวขาขึ้น

โดยหากสรุปเป็นตารางการสอบเทียบตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันสามารถแสดงได้เป็นตารางดังนี้

ตารางที่ 4 ค่าการตอบสนองของเครื่องมือในแต่ละปี

สถานี	Serial No.	2016 [V/W/m <sup>2</sup> ]	2018 [V/W/m <sup>2</sup> ]	2020 [V/W/m <sup>2</sup> ]	2022 [V/W/m <sup>2</sup> ]
นครปฐม	160969	DS: 11.99	DS: 11.98	DS: -	DS: 11.93
		US: 11.77	US: 11.87	US: -	US: 10.07
		DL: 11.53	DL: 11.47	DL: -	DL: 10.40
		UL: 10.38	UL: 10.65	UL: -	UL: 8.04

หมายเหตุ DS คือ หัววัดรังสีคลื่นสั้นขาลง  
US คือ หัววัดรังสีคลื่นสั้นขาขึ้น  
DL คือ หัววัดรังสีคลื่นยาวขาลง  
UL คือ หัววัดรังสีคลื่นยาวขาขึ้น

จากตารางพบว่าค่าการตอบสนองของเครื่องมือมีแนวโน้มการลดลงแบบเชิงเส้นดังนั้นการสอบเทียบหัววัดจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อที่จะได้ข้อมูลวัดที่น่าเชื่อถือ

### 3.1.4 การควบคุมคุณภาพของข้อมูล

ถึงแม้ว่าเครื่องมือวัดรังสีสุทธิตีจะได้รับการสอบเทียบประจำปีเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงค่าการตอบสนองของเครื่องมือแล้วแต่อาจจะมีส่วนที่ผิดพลาดของข้อมูล ดังนั้นจำเป็นต้องมีการตรวจสอบควบคุมคุณภาพของข้อมูล ซึ่งสามารถพิจารณาได้ดังนี้

- 1) ปริมาณรังสีคลื่นสั้นจะมีค่าเป็นบวกเสมอในเวลากลางวันและจะมีค่าเป็นศูนย์ในเวลากลางคืน
- 2) ปริมาณรังสีคลื่นยาวต้องมีค่าน้อยกว่ารังสีที่แผ่ออกจากวัตถุดำเสมอ
- 3) การนำข้อมูลรังสีทั้งสองสัญญาณและอุณหภูมิมาเขียนกราฟการแปรค่าตามเวลาเพื่อหาข้อมูลที่ผิดปกติ

นอกจากข้อมูลจากเครื่องเน็ตเรดิโอมิเตอร์ผู้วิจัยยังใช้ข้อมูลอื่น ๆ ในการพัฒนาแบบจำลอง ได้แก่ ความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง (aerosol optical depth, AOD) ดัชนีเมฆ (cloud index,  $n$ ) ปริมาณไอน้ำในคอลัมน์บรรยากาศ (precipitable water,  $w$ ) และสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิว (albedo,  $\alpha$ ) โดยค่า AOD และ  $w$  ผู้วิจัยได้มาจากเครื่อง Sunphotometer (รูปที่ 30) ซึ่งเป็น

เครื่องวัดรังสีแบบสแกนดวงอาทิตย์และท้องฟ้าอัตโนมัติแบบหลายช่องสัญญาณ โดยจะทำงานจากการวัดรังสีตรงที่มาจากดวงอาทิตย์เพื่อหาความโปร่งของท้องฟ้าที่พื้นผิวโลก หลังจากได้ข้อมูลที่เราสนใจแล้วผู้วิจัยทำการกรองข้อมูลที่มีความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร เพื่อนำมาใช้และทำการเฉลี่ยให้เป็นรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนเพื่อนำไปใช้งานต่อไป กรณีของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวผู้วิจัยได้จากเครื่องเน็ตเรดิโอมิเตอร์โดยใช้ช่องสัญญาณจากห้ววัดรังสีคลื่นสั้นขาขึ้นหารด้วยสัญญาณจากช่องห้ววัดคลื่นสั้นขาลงจะได้มาซึ่งสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนซึ่งจะมีข้อมูลที่ตรงกับค่ารังสีสุทธิ และสุดท้ายคือ ดัชนีเมฆ ( $\tau$ ) หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า cloud index ผู้วิจัยได้จากข้อมูลดาวเทียม Himawari-8 โดยจะเลือกใช้ช่องสัญญาณที่ 2 ในความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร ซึ่งดาวเทียมจะทำการวัดปริมาณเมฆโดยการตรวจจับสัญญาณสะท้อนกลับในรูปแบบของสัมประสิทธิ์การสะท้อนซึ่งโดยทั่วไปแล้ว เมฆจะมีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนมากกว่าพื้นดินเมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่เวลาใด ๆ แล้ว จะนำมาคำนวณตามสมการที่ 3.5 เพื่อหาค่าดัชนีเมฆต่อไป



รูปที่ 30 เครื่องวัด Sunphotometer

$$n = \frac{\rho_{EA} - \rho_{min}}{\rho_{max} - \rho_{min}} \quad (3.5)$$

เมื่อ	$n$	คือ ค่าดัชนีเมฆ
	$\rho_{EA}$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ณ เวลาใด ๆ
	$\rho_{max}$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของเมฆ
	$\rho_{min}$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นโลก

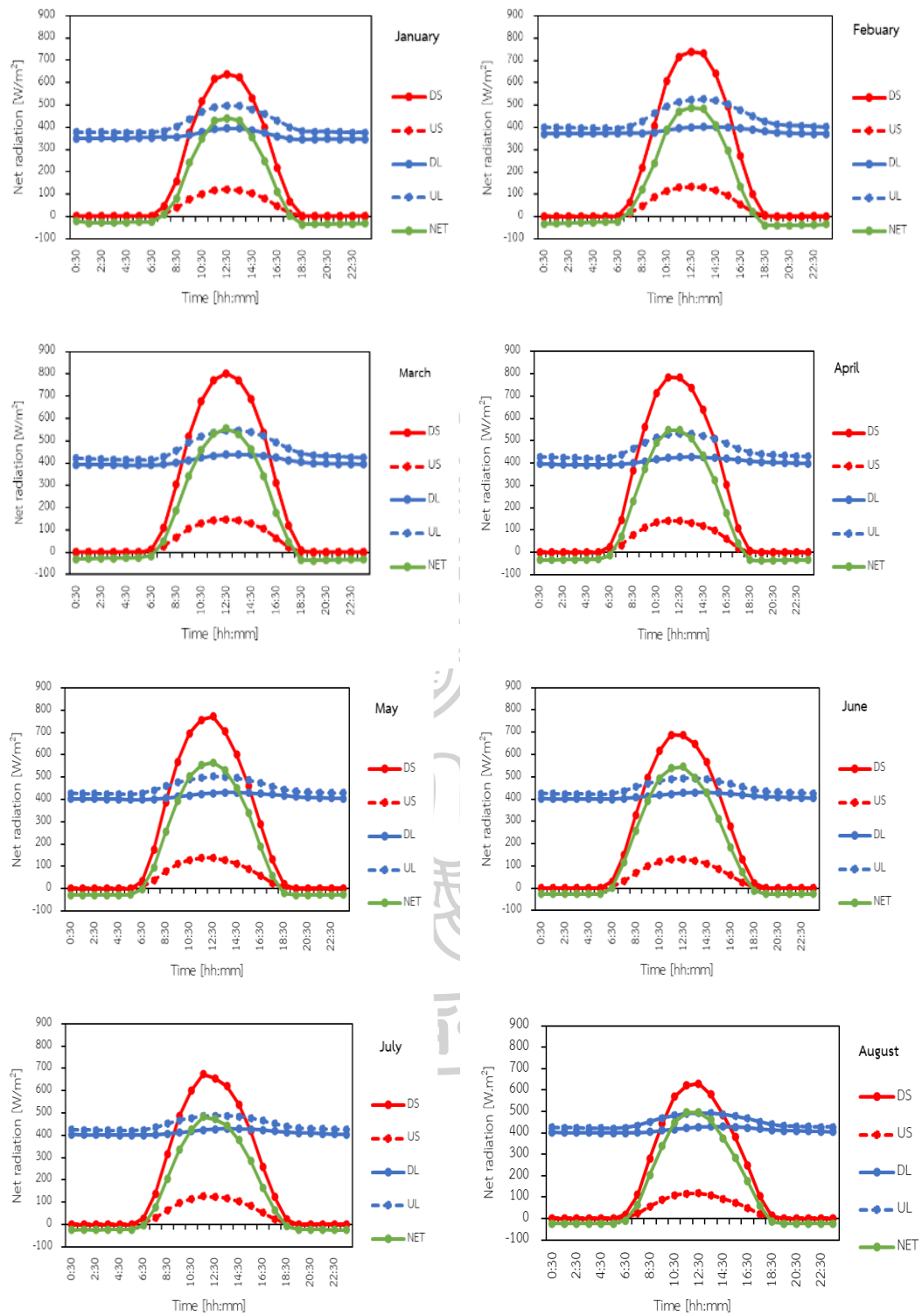
### 3.2 การศึกษาลักษณะทางสถิติของรังสีสุทธิจากการวัดภาคพื้นดิน

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาลักษณะทางสถิติของข้อมูลรังสีคลื่นสั้นขาขึ้นและขาลง รังสีคลื่นยาวขาขึ้นและขาลง และรังสีสุทธิรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน การแปรค่าเฉลี่ยรายเดือนของรังสีสุทธิ และการแปรค่าเฉลี่ยรายปีของรังสีสุทธิ โดยใช้ข้อมูลในช่วงปี ค.ศ. 2017-2021 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

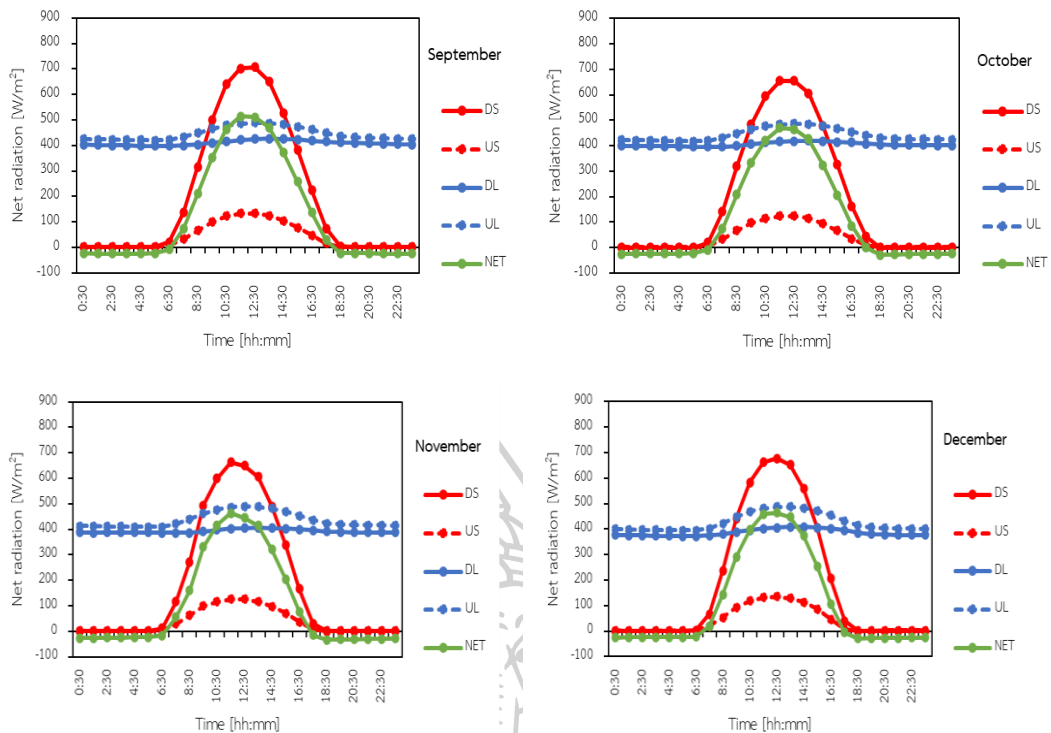
#### 3.2.1 การแปรค่ารังสีสุทธิตามเวลาในรอบวัน (diurnal variation)

ผู้วิจัยได้นำค่ารังสีสุทธิรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนในแต่ละปีมาทำการคำนวณเป็นค่ารายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาว (ค.ศ. 2017-2021) แล้วนำมาเขียนกราฟการแปรค่าตามเวลาในรอบวันผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 31





รูปที่ 31 การแปรค่าตามเวลาในรอบวันของรังสีคลื่นสั้นขาลง (DS) รังสีคลื่นสั้นขาขึ้น (US) รังสีคลื่นยาวขาลง (DL) รังสีคลื่นยาวขาขึ้น (UL) และรังสีสุทธิ (NET) รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาว (ค.ศ. 2017-2021)



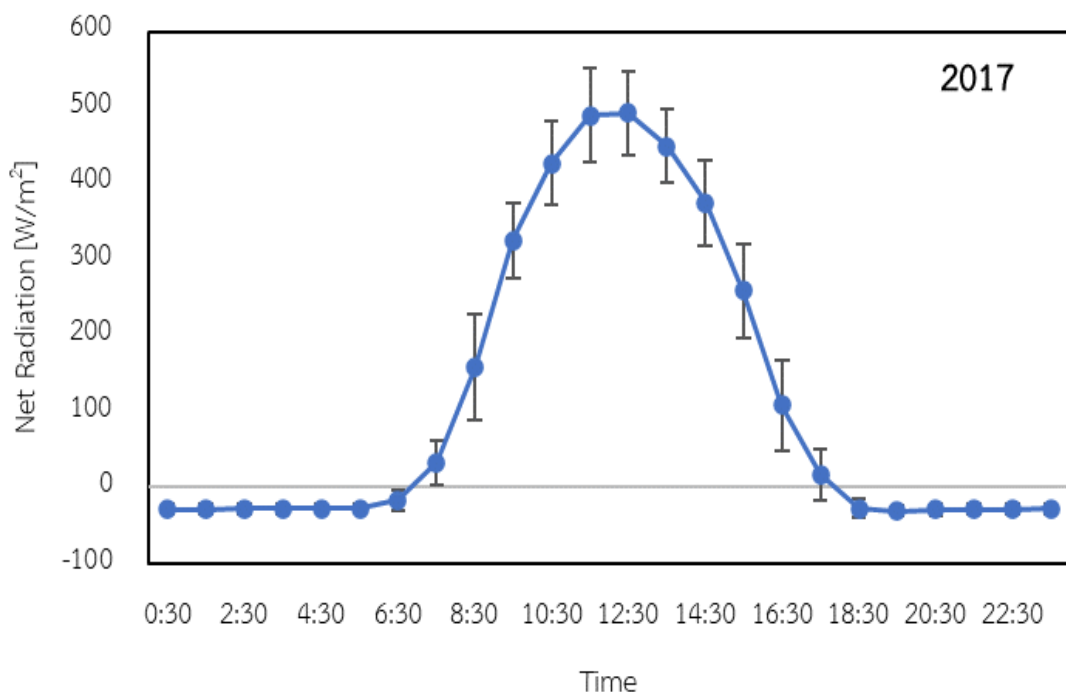
รูปที่ 31 (ต่อ)

โดยทั่วไปรังสีคลื่นสั้นขาลงและขาขึ้นนั้นจะมีค่าอยู่ในช่วงเวลากลางวันแต่ในเวลากลางคืนจะมีค่าเป็นศูนย์ ในขณะที่รังสีคลื่นยาวจะมีค่าตลอดทั้งวัน และเมื่อนำรังสีทั้งสองมารวมกันจะเป็นค่ารังสีสุทธิที่มีค่าติดลบและคงที่ในช่วงเวลากลางคืนแต่ในช่วงเวลากลางวันจะมีค่าเป็นบวก สำหรับการแปรค่ารังสีสุทธิตามเวลาในรอบวันเฉลี่ยทั้ง 5 ปีที่สถานีนครปฐม (รูปที่ 31) พบว่ารูปแบบการแปรค่าขององค์ประกอบทั้งสี่มีการแปรค่าในลักษณะที่คล้ายคลึงกันโดยเริ่มต้นจากรังสีคลื่นสั้นขาลง (Downwelling shortwave : DS) ในช่วงเวลากลางคืนจะมีค่าเป็นศูนย์และมีค่าเพิ่มขึ้นที่เวลาประมาณ 6.30 น. และเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงค่าสูงสุดที่เวลาประมาณ 12.00 น. จากนั้นจะลดต่ำลงจนกระทั่งเวลา 18.30 น. โดยค่าสูงสุดและต่ำสุดของรังสีคลื่นสั้นขาลงนั้นมีค่าอยู่ที่ 800 วัตต์ต่อตารางเมตร และ 620 วัตต์ต่อตารางเมตร ในเดือนมีนาคมและเดือนสิงหาคม ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันกับรังสีคลื่นสั้นขาขึ้น (Upwelling shortwave : US) ที่มีลักษณะการแปรค่าเหมือนกันกับขาลงแต่จะมีค่าที่ต่ำกว่ามากโดยมีค่าสูงสุดต่ำสุดอยู่ที่ 145 วัตต์ต่อตารางเมตร และ 119 วัตต์ต่อตารางเมตรในเดือนมีนาคมและเดือนสิงหาคม ตามลำดับ ถัดมาเป็นรังสีคลื่นยาวขาลง (Downwelling longwave : DL) โดยรังสีคลื่นยาวนั้นจะมีค่าทั้งในช่วงเวลากลางวันและกลางคืนโดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลากลางวันและไปสูงสุดที่เวลาประมาณ 15.00 น. และลดต่ำลงจนกระทั่งเช้าของอีกวันเป็นแบบนี้ทุกเดือน ซึ่งรังสีคลื่นยาวขาลงนั้นจะมีค่าอยู่ในช่วงแคบ ๆ คือ 350-450 วัตต์ต่อตาราง

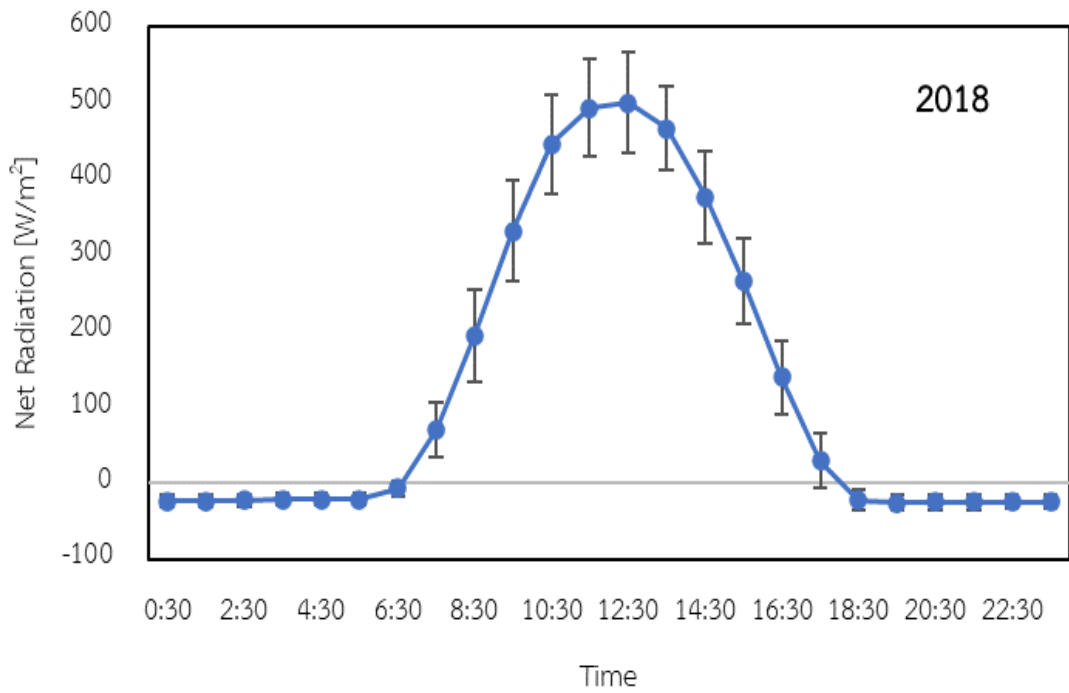


เมตร ทำนองเดียวกันกับรังสีคลื่นยาวขาขึ้นที่มีลักษณะการแปรค่าที่คล้ายคลึงกันแต่จะมีค่าที่สูงกว่า เนื่องจากการแผ่รังสีของพื้นดินที่มีค่ามากกว่าชั้นบรรยากาศ โดยที่สถานีนครปฐมมีค่าอยู่ในช่วง 390-550 วัตต์ต่อตารางเมตร จากลักษณะการแปรค่านี้สังเกตได้ว่ารังสีคลื่นยาวขาและขาขึ้นนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน แตกต่างจากรังสีคลื่นสั้นขาและขาขึ้นที่มีผลต่างที่มากกว่า ดังนั้นรังสีสุทธิที่หาได้จากการรวมกันของรังสีคลื่นสั้นสุทธิและรังสีคลื่นยาวสุทธิจะมีลักษณะการแปรค่าคล้ายคลึงกับรังสีคลื่นสั้นมากกว่าหรือสามารถบอกเป็นอีกนัยหนึ่งได้ว่ารังสีสุทธิขึ้นอยู่กับรังสีคลื่นสั้นมากกว่ารังสีคลื่นยาว โดยค่ารังสีสุทธิในเวลากลางคืนจะมีค่าติดลบเนื่องจากไม่มีองค์ประกอบของรังสีคลื่นสั้น ดังนั้นจึงต้องพิจารณาที่รังสีคลื่นยาวที่มีการแผ่ออกจากพื้นมากกว่าที่แผ่ออกมาจากบรรยากาศดังนั้นรังสีคลื่นยาวสุทธิจึงมีค่าติดลบ สำหรับในช่วงเวลากลางวันรังสีสุทธิมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากเวลาประมาณ 6.30 น. จนกระทั่งไปสูงสุดที่เวลา 12.00 น. และลดต่ำลงจนกระทั่งเวลาประมาณ 18.30 น. จากนั้นค่ารังสีสุทธิจะกลับมามีค่าติดลบจนเช้าของอีกวัน โดยที่สถานีนครปฐมมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 580 วัตต์ต่อตารางเมตร ในเดือนพฤษภาคม

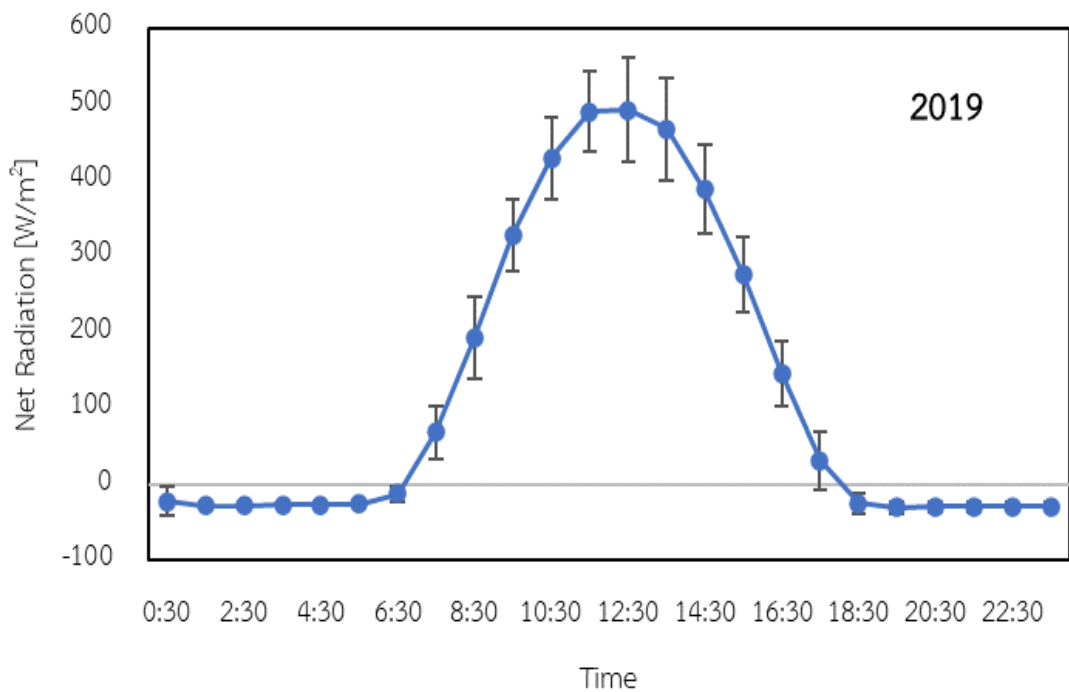
สำหรับการแปรค่าตามเวลาในรอบวันของรังสีสุทธิรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อปีแสดงได้ดังรูปที่ 32-36 และการแปรค่าตามเวลาในรอบวันของรังสีสุทธิรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อปีระยะยาวแสดงได้ดังรูปที่ 37



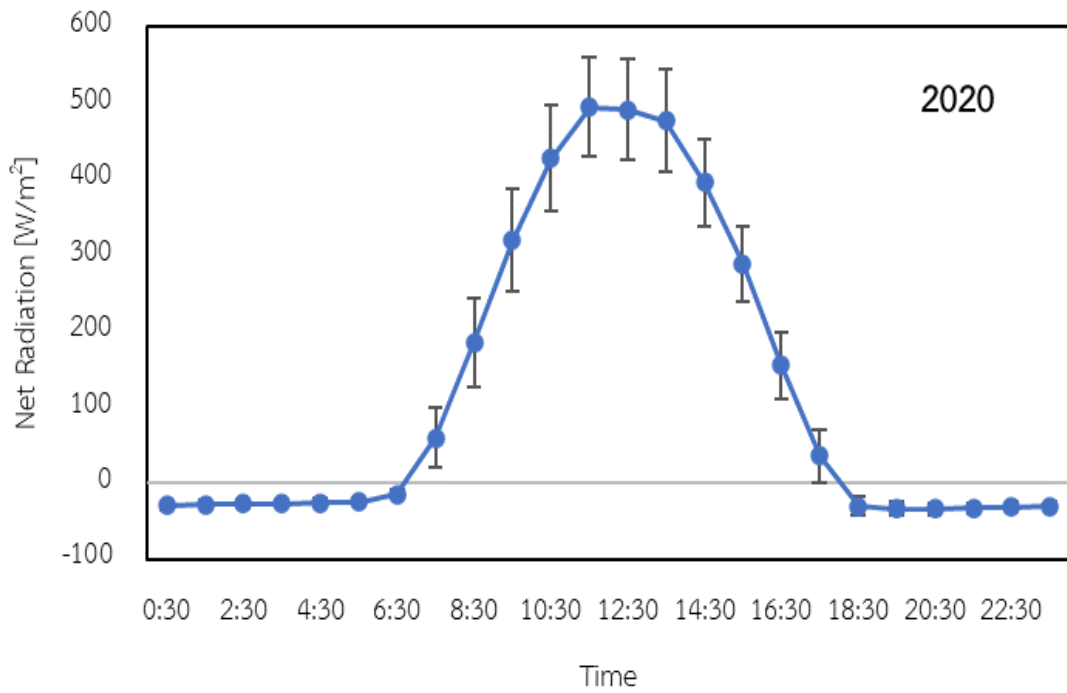
รูปที่ 32 การแปรค่ารังสีสุทธิรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อปีของปี ค.ศ. 2017



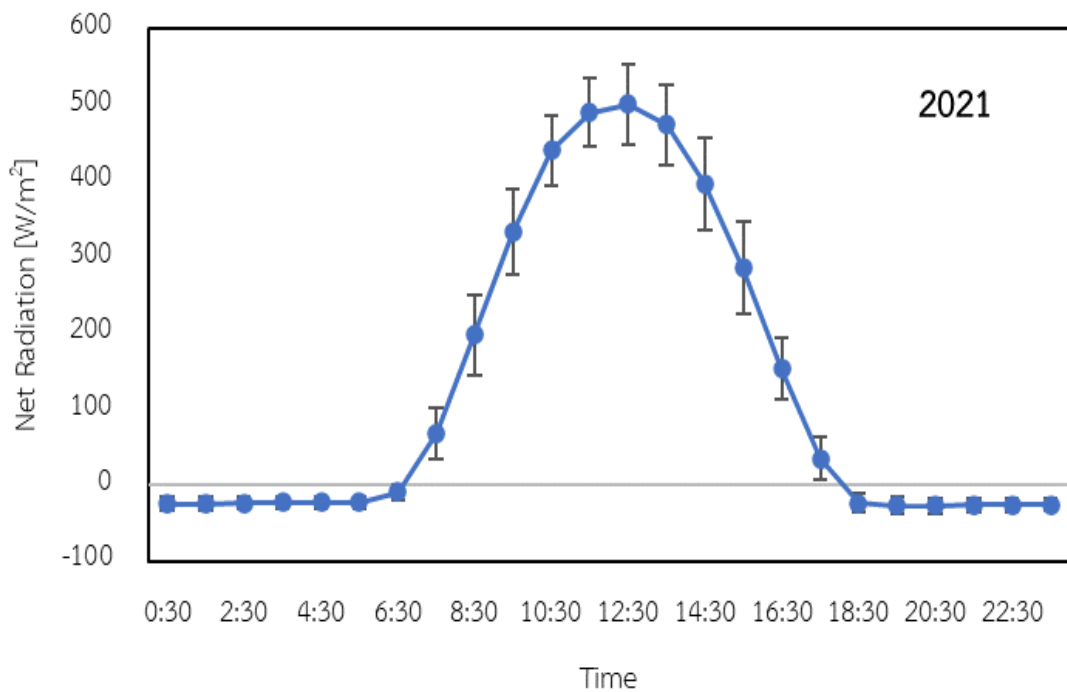
รูปที่ 33 การแปรค่ารังสีสุทธิรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อปีของปี ค.ศ. 2018



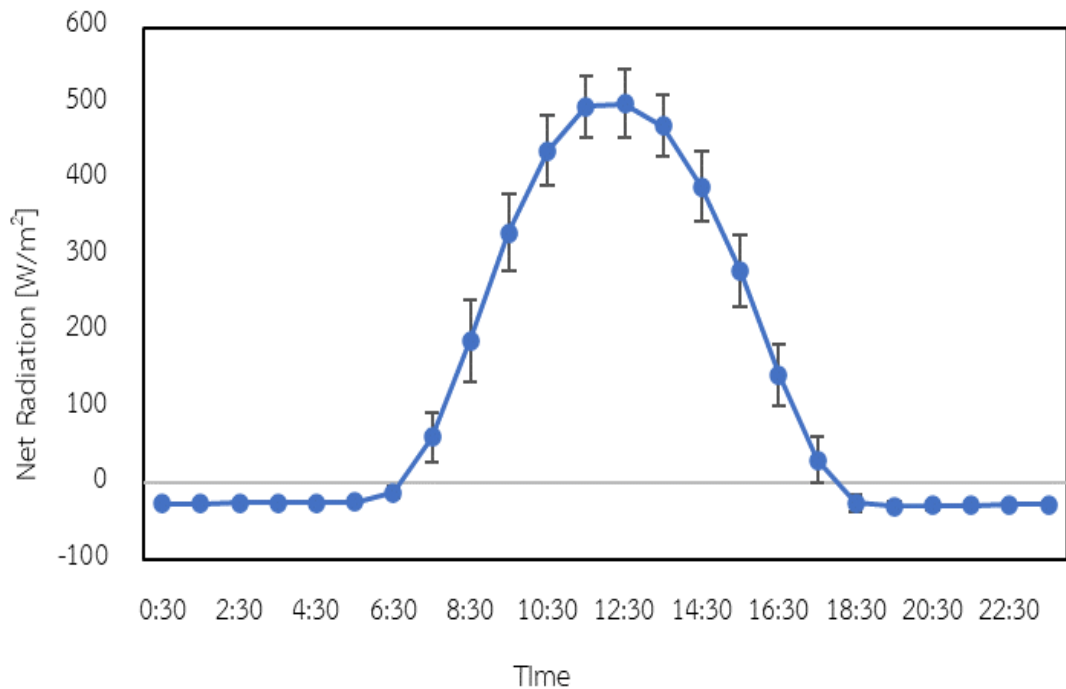
รูปที่ 34 การแปรค่ารังสีสุทธิรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อปีของปี ค.ศ. 2019



รูปที่ 35 การแปรค่ารังสีสุทธิรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อปีของปี ค.ศ. 2020



รูปที่ 36 การแปรค่ารังสีสุทธิรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อปีของปี ค.ศ. 2021

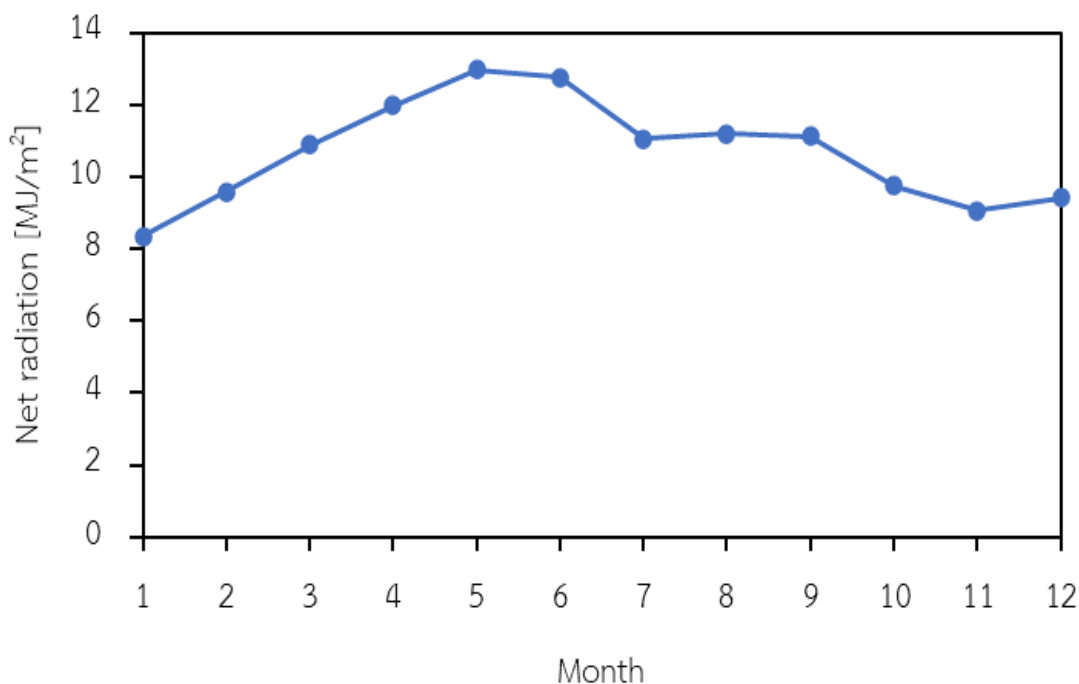


รูปที่ 37 การแปรค่ารังสีสุทธิรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อปีระยะยาว (ค.ศ. 2017-2021)

จากรูปจะเห็นว่าค่ารังสีสุทธิรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อปีมีลักษณะการแปรค่าที่เหมือนกันโดยจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 500 วัตต์ต่อตารางเมตร

### 3.2.2 การแปรค่ารังสีสุทธิรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (daily variation)

ผู้วิจัยนำข้อมูลรังสีสุทธิรายชั่วโมงในหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตรมาทำการหาผลรวมเป็นค่ารังสีสุทธิรายวัน จากนั้นทำการแปลงหน่วยจากวัตต์ต่อตารางเมตรเป็นหน่วยเมกะจูลต่อตารางเมตร แล้วนำค่ารายวันในหน่วยเมกะจูลต่อตารางเมตรมาทำการเฉลี่ยเป็นค่ารังสีสุทธิรายวันเฉลี่ยต่อเดือน จากนั้นนำผลที่ได้ของแต่ละปีมาทำการเฉลี่ยเป็นรายวันเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาว (ปี ค.ศ. 2017-2021) และทำการเขียนกราฟซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 38

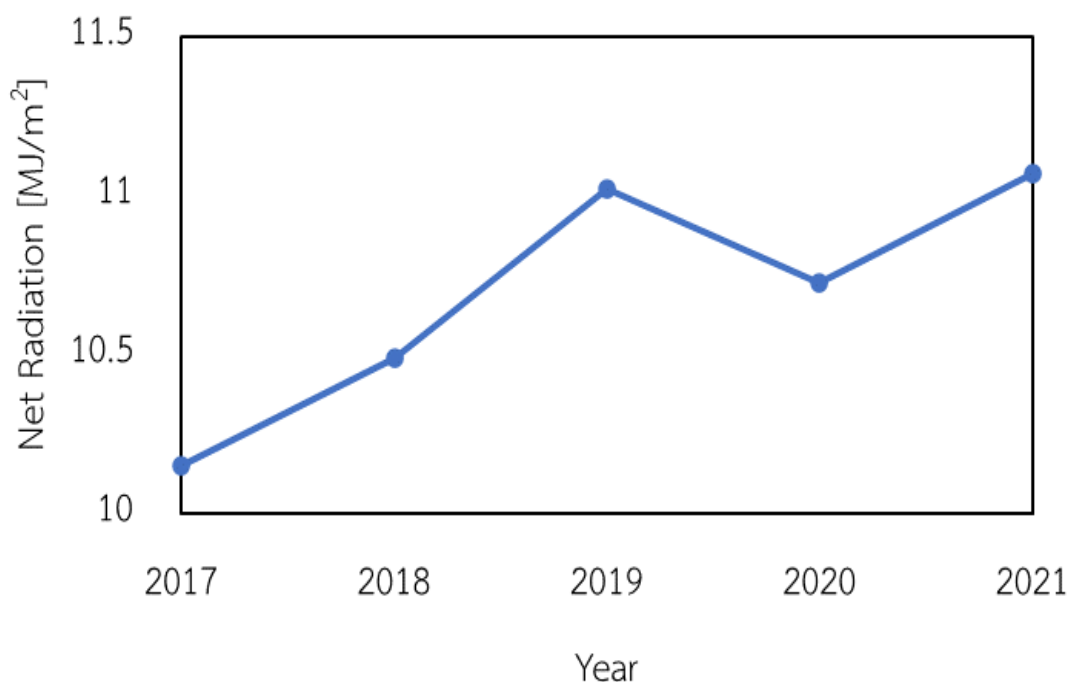


รูปที่ 38 การแปรค่าของรังสีสุทธิรายวันเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาว

จากรูปพบว่าค่ารังสีสุทธิมีค่าต่ำในช่วงเดือนมกราคมและกุมภาพันธ์ซึ่งอยู่ในช่วงฤดูหนาวเป็นผลมาจากได้รับปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์ที่น้อยพื้นผิวโลกค่อนข้างแห้งจึงทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวโลกมีค่าสูง ดังนั้นปริมาณของรังสีคลื่นสั้นขาขึ้นนั้นมีความมากทำให้ค่ารังสีสุทธิในช่วงเดือนดังกล่าวมีค่าน้อย จากนั้นค่ารังสีสุทธิจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงฤดูร้อนเนื่องจากโลกได้รับปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์ที่มากขึ้นทำให้ค่ารังสีสุทธิมีค่าสูงตามไปด้วย ถัดมาในช่วงเดือนพฤษภาคมและมิถุนายน โลกยังคงได้รับรังสีอาทิตย์ในปริมาณมากพร้อมกับได้รับอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ทำให้ประเทศไทยมีฝนตกหนักพื้นผิวอิมไปด้วยน้ำส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวที่มีค่าต่ำลง ดังนั้นอัตราการสะท้อนของรังสีอาทิตย์ที่สะท้อนออกนั้นมีค่าต่ำลง เมื่อรังสีขาลงมากและรังสีขาขึ้นน้อยลงทำให้ปริมาณรังสีสุทธิมีค่ามากที่สุดในช่วงนี้และจะค่อย ๆ ลดต่ำลงเนื่องจากปริมาณรังสีอาทิตย์ที่เข้ามาสู่โลกต่ำลงและกลับมาต่ำที่สุดในช่วงเดือนพฤศจิกายนและธันวาคมที่เป็นช่วงฤดูหนาว

### 3.2.3 การแปรค่ารังสีสุทธิเฉลี่ยรายปี

ผู้วิจัยนำค่ารังสีสุทธิรายวันเฉลี่ยต่อเดือนของทั้ง 12 เดือนมาทำการเฉลี่ยเป็นค่ารังสีสุทธิเฉลี่ยรายปี จากนั้นนำมาเขียนกราฟเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของค่ารังสีสุทธิ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 39



รูปที่ 39 ค่ารังสีสุทธิเฉลี่ยรายปี

จากกราฟค่ารังสีสุทธิเฉลี่ยรายปีพบว่าปริมาณความเข้มของรังสีสุทธิมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยมีค่ารังสีสุทธิเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 10.15 10.49 11.03 10.73 และ 11.07 MJ/m<sup>2</sup> ในปี ค.ศ. 2017-2021 ตามลำดับ จากค่าเฉลี่ยรายปีพบว่าในปี ค.ศ. 2021 ค่ารังสีสุทธิมีค่าเพิ่มขึ้นจากปี ค.ศ. 2017 คิดเป็น 9.08% เมื่อเวลาผ่านไปเพียง 4 ปี นี้อาจจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงพลังงานที่โลกเก็บสะสมไว้นั้นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปีทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยโดยรวมสูงขึ้นตาม

### 3.3 การประมาณค่ารังสีสุทธิโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

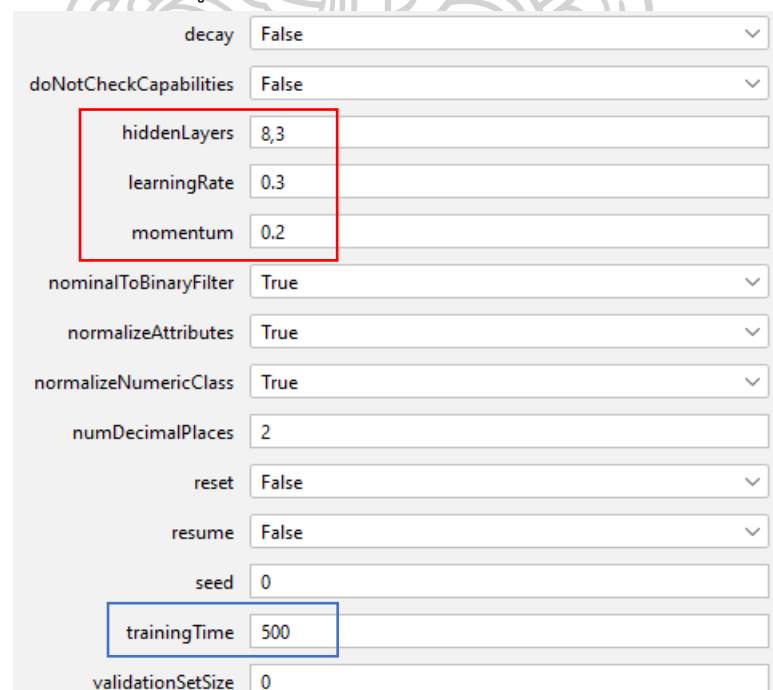
จากที่กล่าวไปในหัวข้อก่อนหน้านี้ว่ารังสีสุทธิมีลักษณะการแปรค่าที่คล้ายคลึงกับรังสีคลื่นสั้นขาหลังโดยตัวรังสีอาทิตย์นี้ก็ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางบรรยากาศ ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้โครงข่ายประสาทเทียม (artificial neural network, ANN) ในการประมาณค่ารังสีสุทธิโดยใช้อินพุต (input) เป็น รังสีคลื่นสั้นขาหลัง ปริมาณไอน้ำในคอลัมน์บรรยากาศ ความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง ดัชนีเมฆ และสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิว และใช้ในการศึกษาว่าตัวแปรอินพุตตัวใดส่งผลต่อค่ารังสีสุทธิมากที่สุดก่อนที่จะนำมาทำการสร้างแบบจำลองในรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อ 3.4 ต่อไป

### 3.3.1 การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมในการประมาณค่ารังสีสุทธิ

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้แบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด คือข้อมูลระหว่างปี ค.ศ. 2017-2020 สำหรับการใช้ในการฝึกสอน และข้อมูลในปี ค.ศ. 2021 ในการทดสอบแบบจำลอง โดยเลือกใช้โครงข่ายประสาทเทียมจากโปรแกรม Weka (McSeveney, 2021) ที่กำหนดตัวแปรควบคุมดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 40 ลักษณะของโปรแกรม Weka

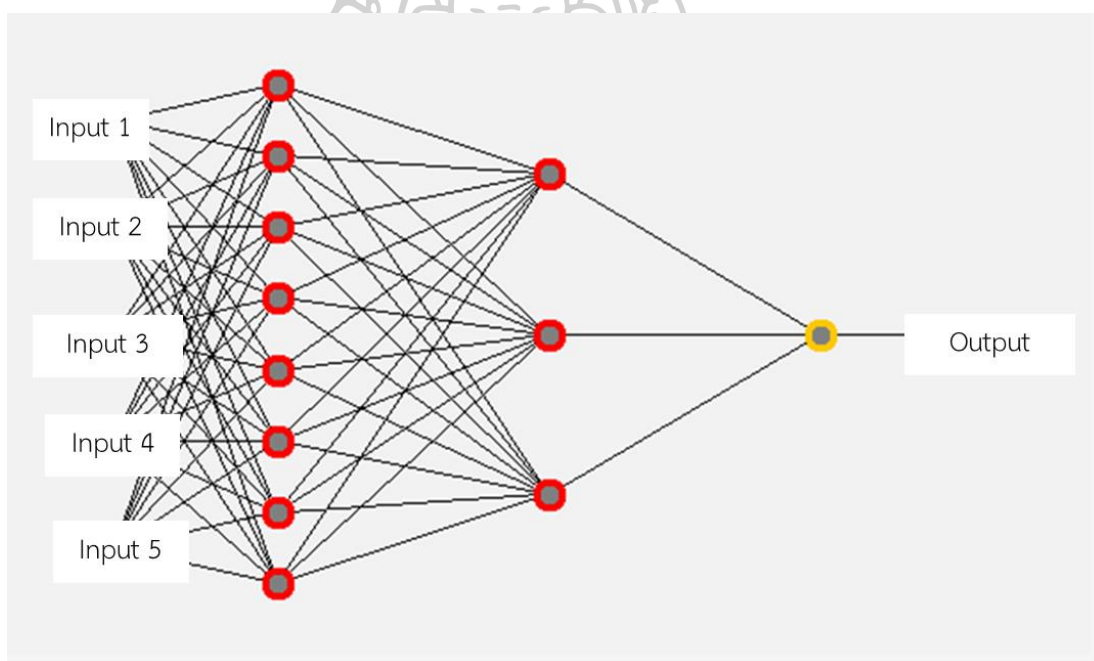


รูปที่ 41 ตัวแปรควบคุมซึ่งประกอบไปด้วย hiddenLayers, learningRate และ momentum



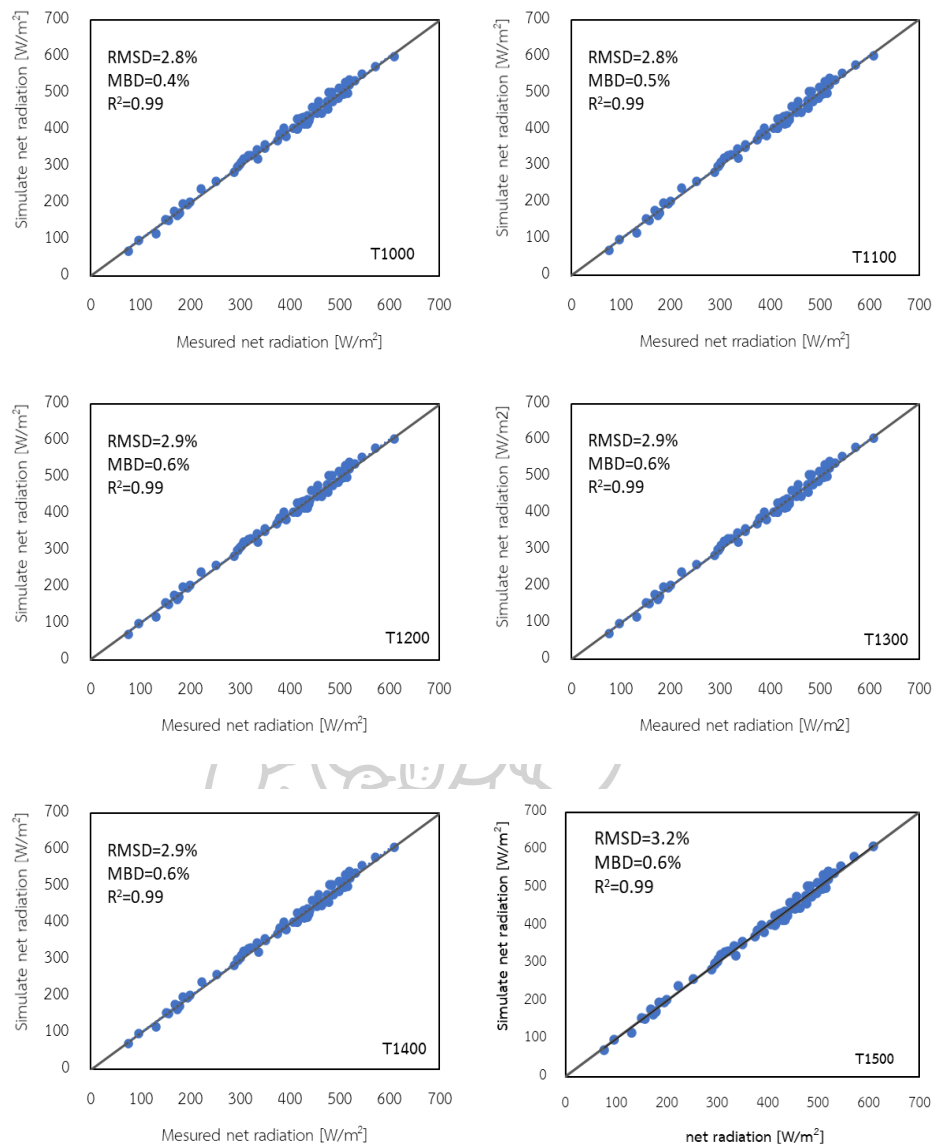
เมื่อ hiddenLayer คือชั้นซ่อนที่มีจำนวนโหนดแตกต่างกันในแต่ละชั้นซึ่งสามารถกำหนดได้ตามความเหมาะสมของการใช้งาน learningRate คืออัตราการเรียนรู้โดยจะเป็นตัวควบคุมการเรียนรู้ให้เร็วหรือช้า และ momentum คือค่าคงที่ที่ใช้ในการแปรค่าค่าถ่วงน้ำหนัก

ในงานวิจัยนี้ตัวแปรควบคุมที่จะกำหนดให้คงที่ คือจำนวนชั้นซ่อน (hidden layer) ที่จะกำหนดให้มี 2 ชั้น โดยชั้นแรกจะมีทั้งหมด 8 โหนด ชั้นที่สองจะกำหนดให้มี 3 โหนด (รูปที่ 41) อัตราการเรียนรู้ (learning rate) จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.3 โมเมนตัม (momentum) กำหนดให้มีค่า 0.2 และช่วงเวลาในการทำการฝึกสอน (training time) ผู้วิจัยจะทำการแปรค่าเพื่อหาช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ตัวแปรอินพุตทั้งหมด 5 ตัว ได้แก่ รังสีอาทิตย์ ปริมาณไอน้ำในคอลัมน์บรรยากาศ ความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง ดัชนีเมฆ และสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิว สำหรับเอาต์พุตจะมี 1 ตัว คือ รังสีสุทธิ

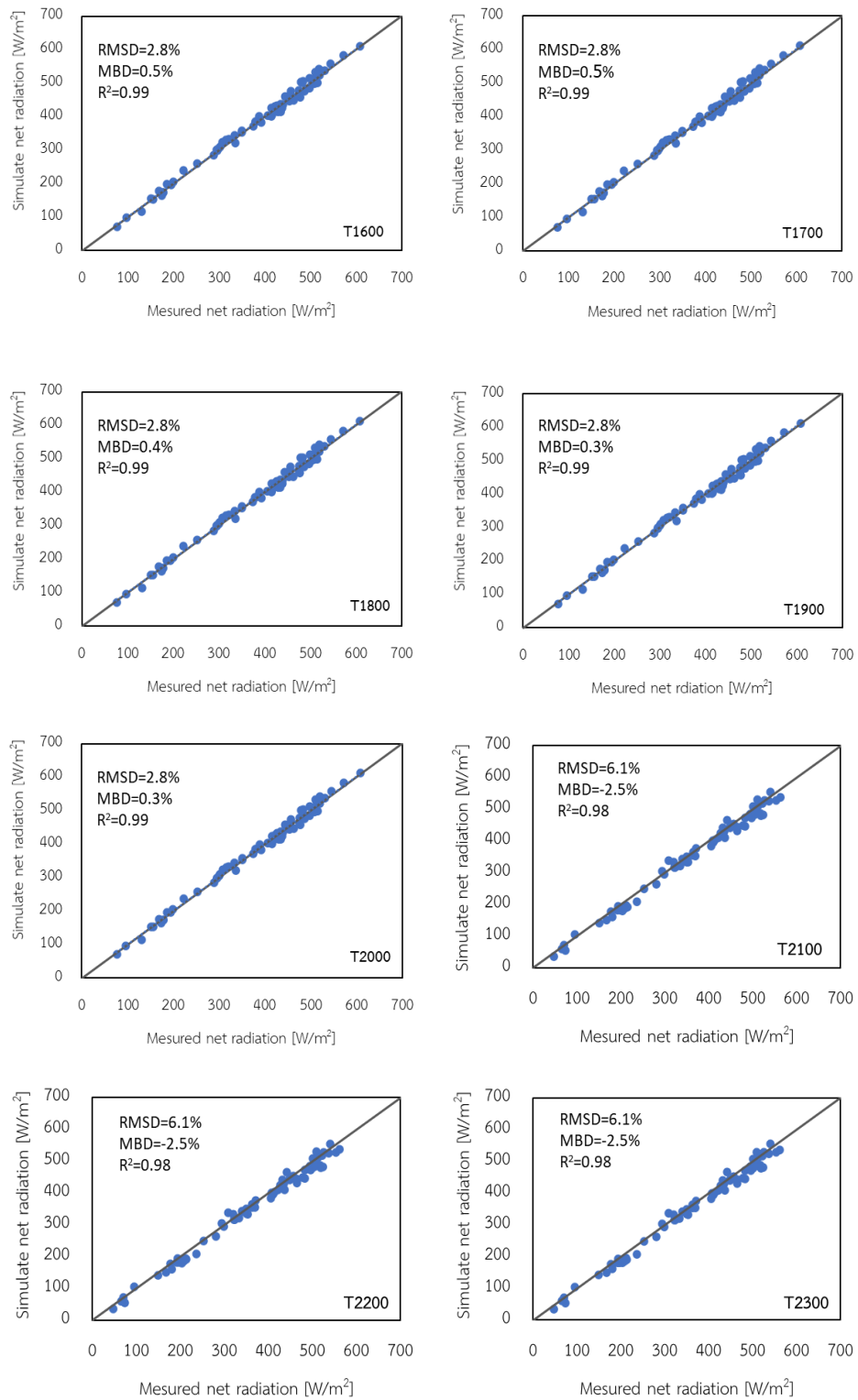


รูปที่ 42 รูปแบบโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในงานวิจัยนี้

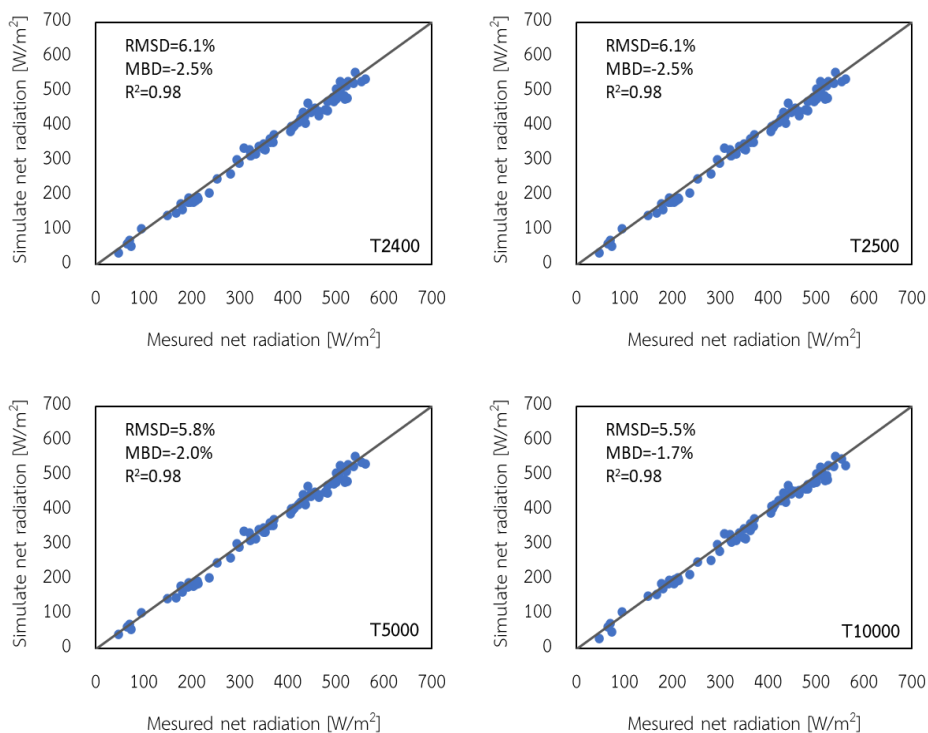
ในการแปรค่าช่วงเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนผู้วิจัยได้ทำการแปรค่า training Time ระหว่าง 1,000-10,000 โดยใช้ข้อมูลในช่วงปี ค.ศ. 2017-2020 ในการฝึกสอน และข้อมูลในปี ค.ศ. 2021 ในการทดสอบแบบจำลอง ผลการแปรค่าช่วงเวลาที่ใช้ในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 43



รูปที่ 43 กราฟเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลรังสีสุทธิที่ทำการวัดและข้อมูลรังสีสุทธิที่จำลองแบบขึ้นมา จากโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อทำการแปรค่าช่วงเวลาในการฝึกสอนจาก 1,000-10,000 (RMSD คือ Root Mean Squared Difference, MBD คือ Mean Bias Difference,  $R^2$  คือ Coefficient of determination)



รูปที่ 43 (ต่อ)



รูปที่ 43 (ต่อ)

จากกราฟที่แสดงด้านบนแกน x คือ รังสีสุทธิที่ได้จากการวัด แกน y คือ รังสีสุทธิที่ได้จากการประมาณค่าโดยโครงข่ายประสาทเทียม โดยแต่ละกราฟจะแสดงการเปรียบเทียบค่ารังสีสุทธิที่ได้จากการวัดและจากโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้รับการฝึกสอนโดยใช้ training Time ค่าต่าง ๆ ซึ่งสามารถสรุปค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการแปรค่า training Time ในการฝึกสอนดังตารางที่ 5

จากกราฟและตารางจะเห็นได้ว่าเมื่อเราเปลี่ยนระยะเวลาในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม ผลที่ได้ออกมาจากแบบจำลองก็จะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จึงมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ต่างกันออกไป โดยจากการแปรค่าช่วงเวลาในการฝึกสอนนี้พบว่าช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สุดคือ 2,000 ซึ่งได้ค่า RMSD เท่ากับ 2.8% MBD เท่ากับ 0.3% และ  $R^2$  เท่ากับ 0.99 ซึ่งเป็นเช่นเดียวกันกับจำนวนอินพุตอื่น ๆ ดังนั้นตัวแปรควบคุมที่จะใช้ในโปรแกรม Weka ทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 44

ตารางที่ 5 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลรังสีสุทธิที่ได้จากการวัด  
และที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม

Time Training	RMSD	MBD	R <sup>2</sup>
1000	2.8	0.4	0.99
1100	2.8	0.5	0.99
1200	2.9	0.6	0.99
1300	2.9	0.6	0.99
1400	2.9	0.6	0.99
1500	3.2	0.6	0.99
1600	2.8	0.5	0.99
1700	2.8	0.5	0.99
1800	2.8	0.4	0.99
1900	2.8	0.3	0.99
<b>2000</b>	<b>2.8</b>	<b>0.3</b>	<b>0.99</b>
2100	6.1	-2.5	0.98
2200	6.1	-2.5	0.98
2300	6.1	-2.5	0.98
2400	6.1	-2.5	0.98
2500	6.1	-2.5	0.98
5000	5.8	-2.0	0.98
10000	5.5	-1.7	0.98

หมายเหตุ ความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุดแสดงในตัวหนา  
Time Training ที่ดีที่สุดแสดงในตัวหนา

GUI	True
autoBuild	True
batchSize	100
debug	False
decay	False
doNotCheckCapabilities	False
hiddenLayers	8,3
learningRate	0.3
momentum	0.2
nominalToBinaryFilter	True
normalizeAttributes	True
normalizeNumericClass	True
numDecimalPlaces	2
reset	False
resume	False
seed	0
trainingTime	2000

รูปที่ 44 ตัวแปรควบคุมซึ่งประกอบไปด้วย hiddenLayers, LearningRate, Momentum และ trainingTime

ดังนั้นในการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมผู้วิจัยจะกำหนดจำนวนชั้นซ่อน 2 ชั้น ชั้นแรกประกอบด้วย 8 โหนด ชั้นที่สองประกอบด้วย 3 โหนด อัตราการเรียนรู้ให้มีค่าเท่ากับ 0.3 โมเมนตัมมีค่าเท่ากับ 0.2 และระยะเวลาในการฝึกสอนให้มีค่าเท่ากับ 2,000

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการแปรค่าข้อมูลอินพุตเพื่อดูความสามารถของ ANN ในการประมาณค่ารังสีสุทธิจากตัวแปรทางบรรยากาศต่าง ๆ โดยข้อมูลอินพุตประกอบไปด้วย รังสีคลื่นสั้นขาลง (downwelling shortwave, DS) สัมประสิทธิ์การสะท้อน (albedo,  $\alpha$ ) ดัชนีเมฆ (cloud Index,  $n$ ) ปริมาณไอน้ำในคอลัมน์บรรยากาศ (precipitable water,  $w$ ) และค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง (aerosol optical depth, AOD) ในการฝึกสอนจะใช้อินพุตที่แตกต่างกัน ได้แก่ การใช้อินพุต 1 ตัว 2 ตัว 3 ตัว 4 ตัว และ 5 ตัว ดังแสดงในตารางที่ 6 สำหรับข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนจะเป็นข้อมูลในช่วงปี ค.ศ. 2017-2020

ตารางที่ 6 อินพุตที่ใช้ในแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

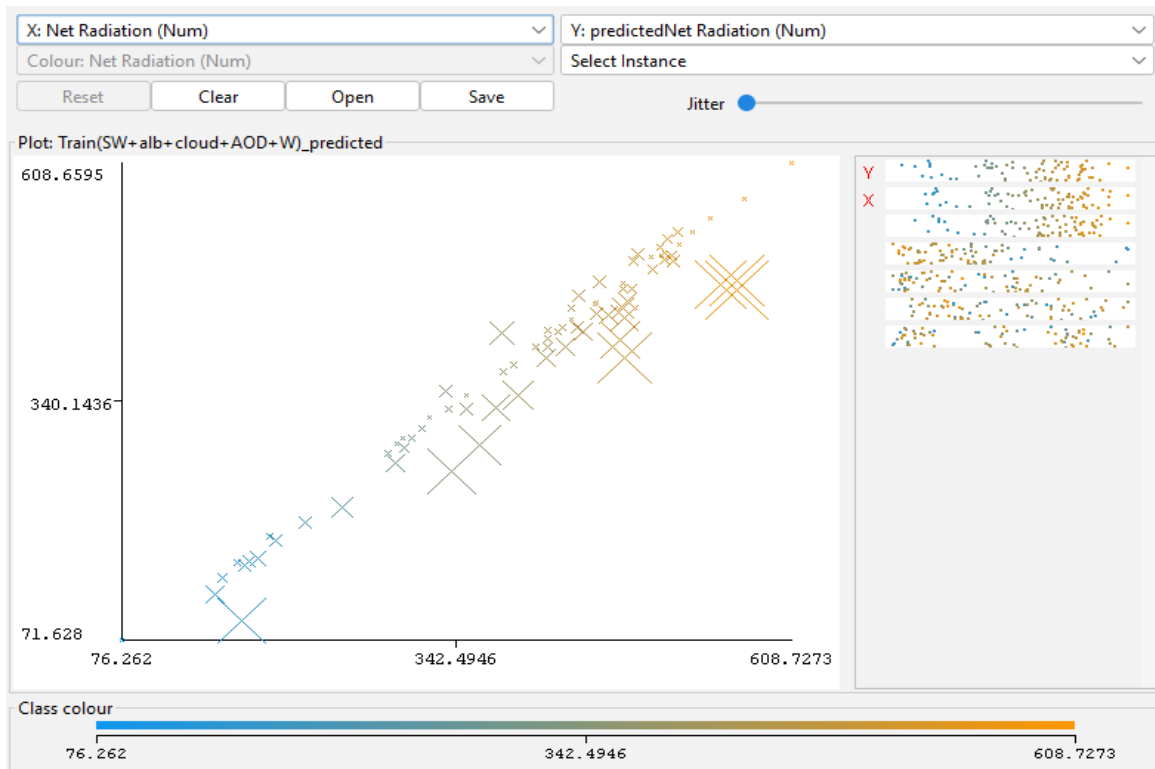
จำนวนอินพุต				
1	2	3	4	5
DS	$DS+\alpha$	$DS+\alpha+n$	$DS+\alpha+n+AOD$	$DS+\alpha+n+AOD+w$
$\alpha$	$DS+n$	$DS+\alpha+AOD$	$DS+\alpha+n+w$	
$n$	$DS+w$	$DS+\alpha+w$	$\alpha+n+AOD+w$	
AOD	$DS+AOD$	$\alpha+n+AOD$		
w	$\alpha+n$	$\alpha+n+w$		
	$\alpha+AOD$	$n+AOD+w$		
	$\alpha+w$			
	$n+AOD$			
	$n+w$			
	$AOD+w$			

หมายเหตุ	DS	คือ รังสีคลื่นสั้นกลาง
	$\alpha$	คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิว
	$n$	คือ ค่าดัชนีเมฆ
	AOD	คือ ความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง
	w	คือ ปริมาณไอน้ำในคอลัมน์บรรยากาศ

### 3.3.2 การทดสอบแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

อย่างที่กล่าวไปแล้วข้างต้นว่าข้อมูลถูกแบ่งออกเป็นสองชุดสำหรับฝึกสอนและทดสอบแบบจำลองโดยข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบนี้คือข้อมูลในปี ค.ศ. 2021 โดยผู้วิจัยจะทำการตัดข้อมูลที่ผิดปกติและช่วงเวลาที่มีข้อมูลขาดหายออกก่อนที่จะนำไปทดสอบด้วยแบบจำลองที่ทำการฝึกสอนไว้ เมื่ออินพุตข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบลงไปแล้วตัวโปรแกรมจะให้ข้อมูลรังสีสุทธิที่ได้จากแบบจำลองและนำมาทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลรังสีสุทธิที่ได้จากการวัดซึ่งแสดงการเปรียบเทียบในรูปของกราฟ 1:1 ดังรูปที่ 45



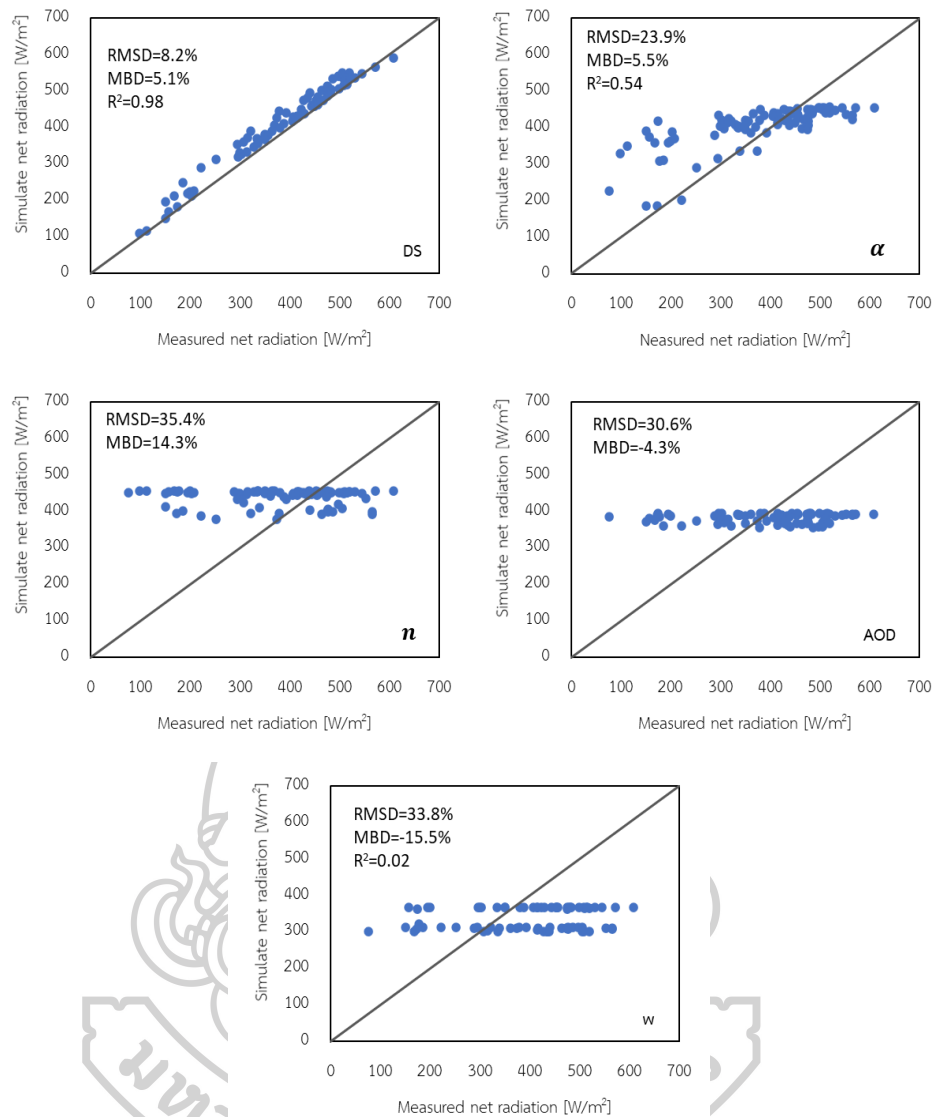


รูปที่ 45 กราฟการเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลรังสีสุทธิที่ได้จากการวัดและที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมจากโปรแกรม Weka

ผลการทดสอบแบบจำลองโดยใช้อินพุตค่าต่าง ๆ แสดงได้ดังนี้

### 3.3.2.1 การใช้อินพุต 1 ตัวแปร

โดยเริ่มต้นผู้วิจัยได้ใช้อินพุตทีละค่า โดยเริ่มต้นจาก ค่ารังสีคลื่นสั้นขาหลง สัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิว ดัชนีเมฆ ค่าความลึกเชิงแสงของผุ่นละออง และปริมาณไอน้ำในคอลัมน์บรรยากาศ ซึ่งผลการเปรียบเทียบสามารถแสดงได้ดังกราฟต่อไปนี้

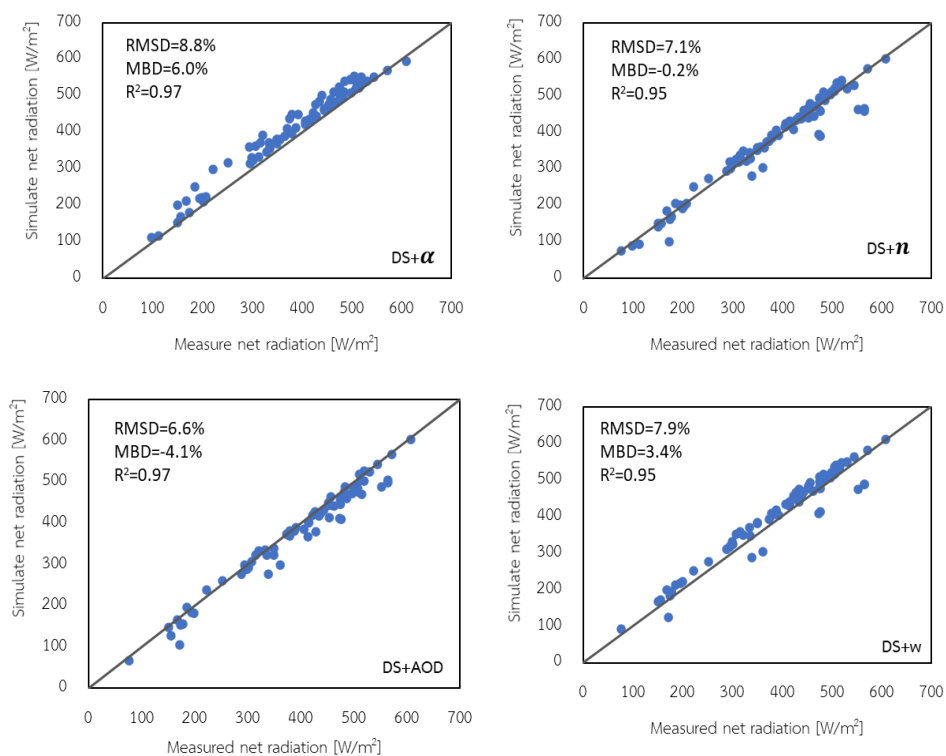


รูปที่ 46 การเปรียบเทียบข้อมูลรังสีสุทธิจากการวัดและจากโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อแปรค่าอินพุต 1 ตัว เป็นค่าต่าง ๆ

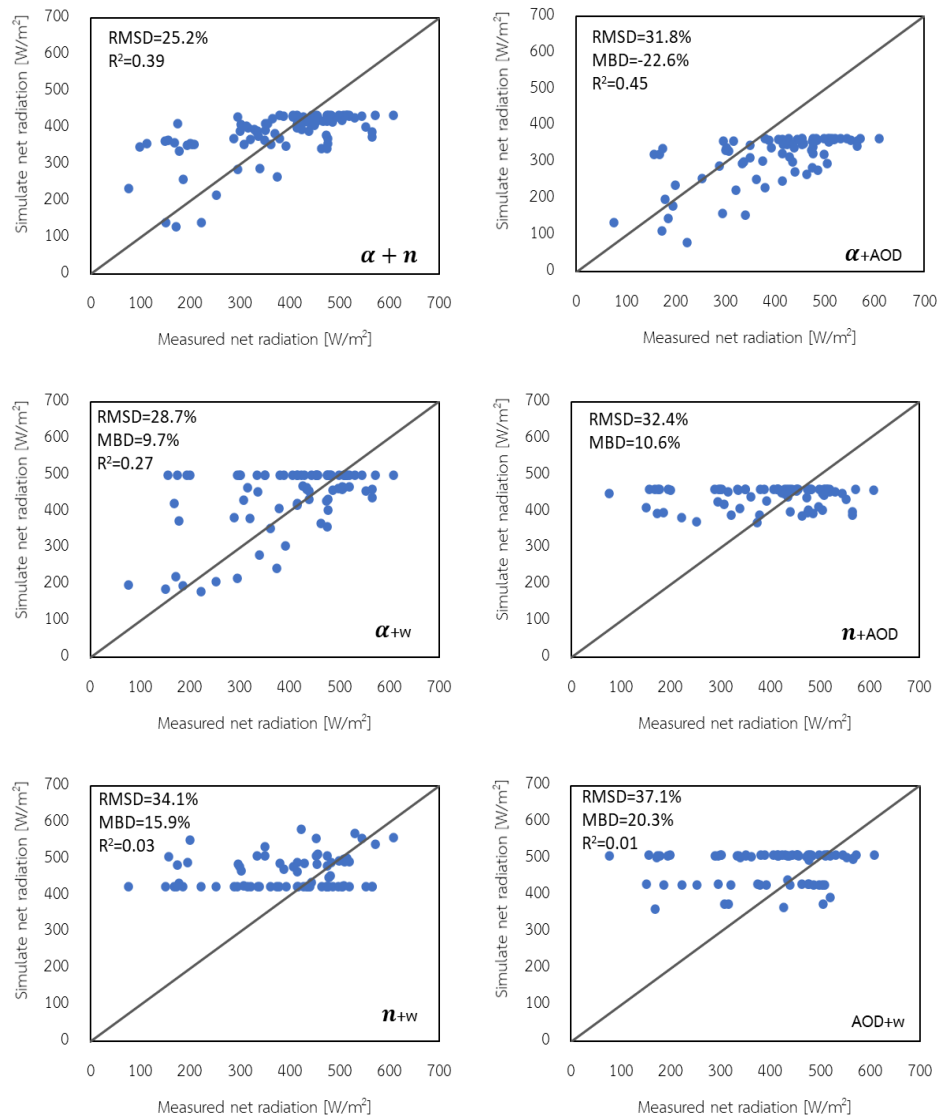
จากกราฟแสดงการเปรียบเทียบข้อมูลระหว่างรังสีสุทธิที่ได้จากการวัดและที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อเปลี่ยนอินพุตเป็นค่าต่าง ๆ พบว่าเมื่อใช้อินพุตเป็นค่ารังสีอาทิตย์ ค่ารังสีสุทธิเอาท์พุตที่ได้ ออกมามีความสัมพันธ์กับค่าที่ได้จากการวัดมากที่สุดโดยมีค่า RMSD เท่ากับ 8.2% MBD เท่ากับ 5.1% และ  $R^2$  เท่ากับ 0.98 อินพุตที่ตรงลงมาคือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน และไม่พบความสัมพันธ์คือค่ารังสีสุทธิที่มาจากอินพุต ดัชนีเมฆ ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่น และปริมาณไอน้ำในคอลัมน์บรรยากาศ

### 3.3.2.2 การใช้อินพุต 2 ตัวแปร

หลังจากนั้นผู้วิจัยจะทำการเพิ่มตัวแปรที่ใช้ในการอินพุตจาก 1 ค่าเป็น 2 ค่า โดยจะจัดเป็นชุดได้ดังนี้ รังสีคลื่นสั้นขาลงและสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิว รังสีคลื่นสั้นขาลงและดัชนีเมฆ รังสีคลื่นสั้นขาลงและค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง รังสีคลื่นสั้นขาลงและปริมาณไอน้ำในคอลัมน์บรรยากาศ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวและดัชนีเมฆ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวและค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและปริมาณไอน้ำในคอลัมน์บรรยากาศ ดัชนีเมฆและค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง ดัชนีเมฆและปริมาณไอน้ำในคอลัมน์บรรยากาศ และสุดท้ายคือ ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองและปริมาณไอน้ำในคอลัมน์บรรยากาศ โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังกราฟต่อไปนี้



รูปที่ 47 การเปรียบเทียบข้อมูลรังสีสุทธิจากการวัดและจากโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อแปรค่าอินพุต 2 ตัว เป็นค่าต่าง ๆ

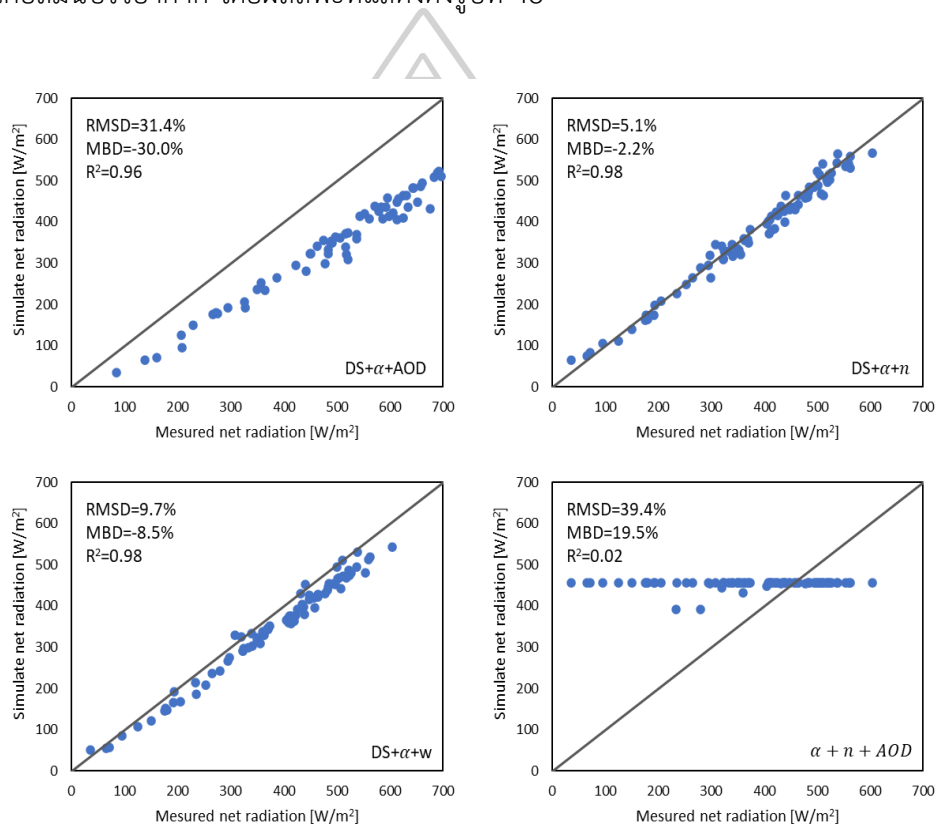


รูปที่ 47 (ต่อ)

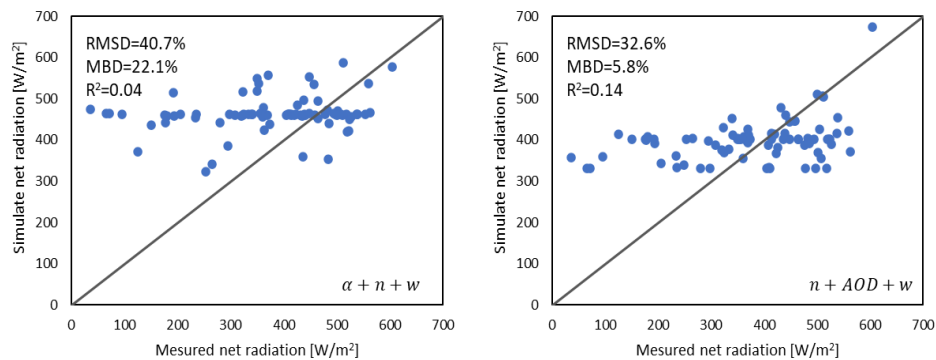
จากกราฟที่แสดงในข้างต้นผู้วิจัยได้เพิ่มตัวแปรอินพุตจาก 1 เป็น 2 ตัวโดยจัดเป็นกลุ่มพบว่า กลุ่มอินพุตที่มีค่ารังสีคลื่นสั้นขาลงเป็นองค์ประกอบจะสามารถประมาณค่ารังสีสุทธิออกมาได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัด โดยเฉพาะอินพุตที่เป็นค่ารังสีคลื่นสั้นขาลงและค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองสามารถประมาณค่ารังสีสุทธิได้ใกล้เคียงความถูกต้องที่สุดซึ่งมีค่า RMSD เท่ากับ 6.6%, MBD เท่ากับ -4.1% และ R<sup>2</sup> เท่ากับ 0.97 ซึ่งเป็นชุดข้อมูลอินพุต 2 ค่าที่ดีที่สุด

### 3.3.2.3 การใช้อินพุต 3 ตัวแปร

ผู้วิจัยได้ทำการเพิ่มตัวแปรอินพุตจาก 2 ค่าเป็น 3 ค่า โดยจัดเป็นกลุ่ม ๆ ดังนี้ รังสีคลื่นสั้นขา  
ลง ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิว และดัชนีเมฆ รังสีคลื่นสั้นขา  
ลง ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิว และค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง รังสีคลื่นสั้นขา  
ลง ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิว และปริมาณไอน้ำในคอลัมน์บรรยากาศ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิว ดัชนีเมฆ และค่า  
ความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิว ดัชนีเมฆ และปริมาณไอน้ำใน  
คอลัมน์บรรยากาศ และอินพุตชุดสุดท้ายคือ ดัชนีเมฆ ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง และปริมาณ  
ไอน้ำในคอลัมน์บรรยากาศ โดยผลลัพธ์ที่แสดงดังรูปที่ 48



รูปที่ 48 การเปรียบเทียบข้อมูลรังสีสุทธิจากการวัดและจากโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อแปรค่าอินพุต 3 ตัวแปร เป็นค่าต่าง ๆ

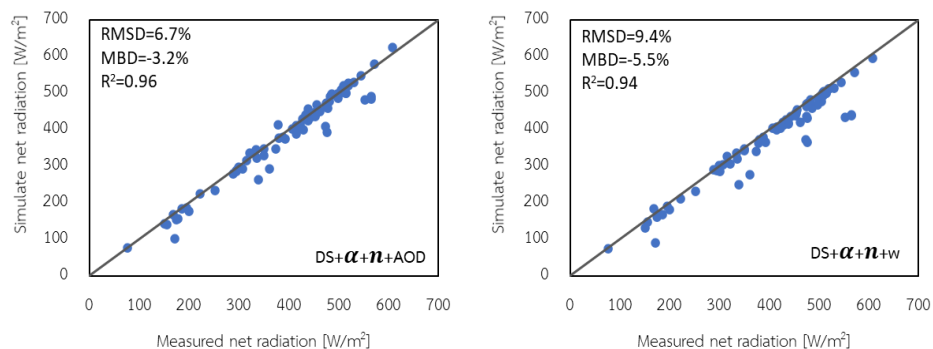


รูปที่ 48 (ต่อ)

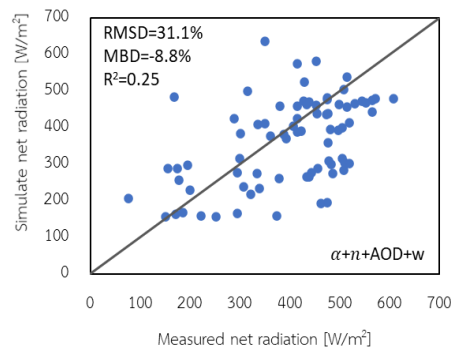
เมื่อทำการเพิ่มตัวแปรอินพุตจาก 2 ตัวแปรเป็น 3 ค่า พบว่าผลลัพธ์ที่ได้ออกมาจากโครงข่ายประสาทเทียมนั้นให้ผลลัพธ์คล้ายกันกับอินพุต 2 ตัวแปร โดยอินพุตกลุ่มที่มีรังสีคลื่นสั้นขาลงเป็นองค์ประกอบจะสามารถประมาณค่ารังสีสุทธิได้ใกล้เคียงกับรังสีสุทธิที่ได้จากการวัด ในกรณีของอินพุตกลุ่มอื่น ๆ ที่ไม่มีรังสีคลื่นสั้นขาลงเป็นองค์ประกอบนั้นจะให้ค่ารังสีสุทธิที่ไม่มีความสัมพันธ์กับค่าที่ได้จากการวัดอาจเป็นผลเนื่องมาจากโครงข่ายประสาทเทียมไม่สามารถจับรูปแบบความสัมพันธ์ของกลุ่มตัวแปรเหล่านี้ได้จึงทำให้ข้อมูลที่ได้ออกมาจากตัวโปรแกรมนั้นมีข้อผิดพลาด

### 3.3.2.4 การใช้อินพุต 4 ตัวแปร

ผู้วิจัยได้ทำการเพิ่มตัวแปรอินพุตจาก 3 ตัวเป็น 4 ตัวแปร โดยจัดเป็นกลุ่ม ๆ ดังนี้ รังสีคลื่นสั้นขาลง ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิว ดัชนีเมฆ และความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง สัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิว ดัชนีเมฆ และปริมาณไอน้ำในคอลัมน์บรรยากาศ และตัวแปรอินพุตกลุ่มสุดท้าย คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิว ดัชนีเมฆ ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง และปริมาณไอน้ำในคอลัมน์บรรยากาศ ซึ่งผลลัพธ์แสดงได้ดังกราฟต่อไปนี้



รูปที่ 49 การเปรียบเทียบข้อมูลรังสีสุทธิจากการวัดและจากโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อใช้ค่าอินพุต 4 ตัวแปร เป็นค่าต่าง ๆ

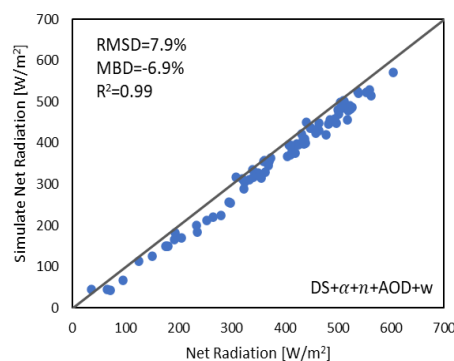


รูปที่ 49 (ต่อ)

เมื่อใช้ข้อมูลอินพุตทั้งหมด 4 ตัวแปร พบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมีความสัมพันธ์ที่ดีกับค่ารังสีสุทธิที่ได้จากการวัด โดยเฉพาะกลุ่มตัวแปรอินพุตที่มีค่ารังสีคลื่นสั้นขาลง เป็นองค์ประกอบแต่เมื่อนำข้อมูลอินพุตที่เป็นค่ารังสีคลื่นสั้นขาลงออกพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลรังสีสุทธิที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมและการวัดมีความสัมพันธ์กันน้อยลงโดยข้อมูลมีการกระจายตัวออกห่างจากเส้น 1:1

### 3.3.2.5 การใช้อินพุต 5 ตัวแปร

สุดท้ายผู้วิจัยได้ใช้ตัวแปรอินพุตทั้งหมด 5 ตัวพร้อมกัน ซึ่งประกอบไปด้วย รังสีคลื่นสั้นขาลงสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิว ดัชนีเมฆ ความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง และปริมาณไอน้ำในคอลัมน์บรรยากาศ ซึ่งผลลัพธ์แสดงได้ดังกราฟต่อไปนี้



รูปที่ 50 การเปรียบเทียบข้อมูลรังสีสุทธิจากการวัดและจากโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อใช้ตัวแปรอินพุต 5 ตัว



เมื่อใช้ข้อมูลอินพุตทั้งหมดพบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมมีความสัมพันธ์ที่ดีกับค่ารังสีสุทธิที่ได้จากการวัดโดยมีค่า RMSD เท่ากับ 7.9% MBD เท่ากับ -6.9% และ  $R^2$  เท่ากับ 0.99 ซึ่งเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้

จากผลลัพธ์ที่ได้จากการแปรค่าตัวแปรอินพุตสังเกตได้ว่าอินพุตกลุ่มใดที่มีรังสีคลื่นสั้นخالลงเป็นองค์ประกอบ การประมาณค่ารังสีสุทธิที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมจะให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดโดยการกระจายตัวของข้อมูลจะอยู่บริเวณเส้น 1:1 นั่นหมายถึงรังสีคลื่นสั้นخالลงเป็นตัวแปรอินพุตที่มีผลต่อค่ารังสีสุทธิมากที่สุด

### 3.3.3 สรุปการใช้ ANN ประมาณค่ารังสีสุทธิ

จากผลการประมาณค่ารังสีสุทธิโดยใช้ ANN เมื่อเปลี่ยนอินพุตเป็นกลุ่มตัวแปรต่าง ๆ พบว่าอินพุตแต่ละกลุ่มมีความสามารถในการประมาณค่าที่ไม่เท่ากันสามารถดูได้จากค่าทางสถิติที่สรุปเป็นตารางที่ 7 เมื่อ DS คือ รังสีคลื่นสั้นخالลง  $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิว  $n$  คือ ค่าดัชนีเมฆ AOD คือ ความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง  $w$  คือ ปริมาณไอน้ำในคอลัมน์บรรยากาศ

ตัวแปรที่ใช้เป็นอินพุตแล้วสามารถประมาณค่ารังสีสุทธิได้ใกล้เคียงกับที่ค่าที่ได้จากการวัดมากที่สุดคือ ค่ารังสีคลื่นสั้นخالลง ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิว และดัชนีเมฆ ซึ่งมี RMSD เท่ากับ 5.1% และ MBD เท่ากับ -2.2% ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าตัวแปรที่ดีที่สุดในการประมาณค่ารังสีสุทธิคือค่ารังสีคลื่นสั้นخالลงและเมื่อนำมาจับคู่กับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิวแล้วส่งผลให้เพิ่มความแม่นยำในการประมาณค่ารังสีสุทธิ ดังนั้นรังสีคลื่นสั้นخالลงหรือรังสีอาทิตย์จึงเป็นตัวแปรเบื้องต้นที่ควรทำการศึกษาหาความสัมพันธ์กับค่ารังสีสุทธิต่อไป

ตารางที่ 7 ความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์ที่ได้จากการประมาณค่าของ ANN

จำนวน อินพุต	อินพุต	RMSD (%)	MBD (%)
1	DS	8.2	5.1
	$\alpha$	23.9	5.5
	$n$	35.4	14.3
	AOD	30.6	-4.3
	w	33.8	-15.5
2	DS+ $\alpha$	8.8	6.1
	DS+ $n$	7.1	-0.2
	DS+w	7.9	3.4
	DS+AOD	6.6	-4.1
	$\alpha+n$	25.5	-
	$\alpha$ +AOD	31.8	-22.6
	$\alpha$ +w	28.7	9.7
	$n$ +AOD	32.4	10.6
	$n$ +w	34.1	15.9
	AOD+w	37.1	20.3
3	<b>DS+<math>\alpha+n</math></b>	<b>5.1</b>	<b>-2.2</b>
	DS+ $\alpha$ +AOD	31.4	-30.0
	DS+ $\alpha$ +w	9.7	-8.5
	$\alpha+n$ +AOD	25.9	10.6
	$\alpha+n$ +w	28.1	6.7
	$n$ +AOD+w	31.8	-0.8
4	DS+ $\alpha+n$ +AOD	6.7	-3.2
	DS+ $\alpha+n$ +w	9.4	-5.5
	$\alpha+n$ +AOD+w	31.1	-8.8
5	DS+ $\alpha+n$ +AOD+w	7.9	-6.9

หมายเหตุ

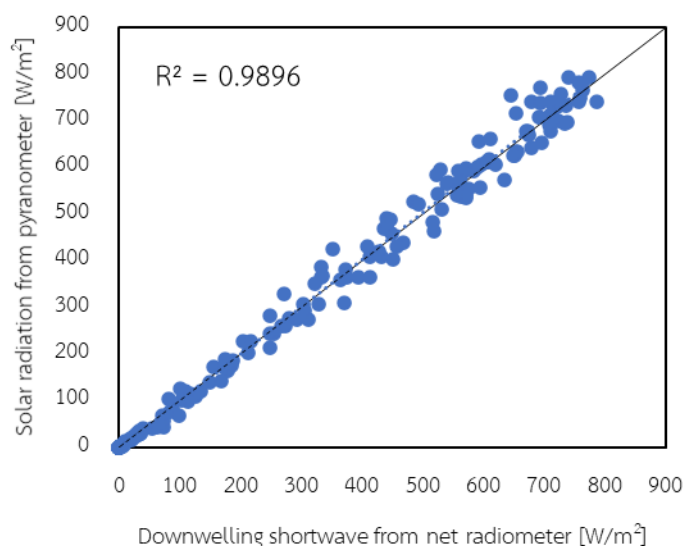
อินพุตที่ดีที่สุดที่ใช้ประมาณค่ารังสีสททิจจากแบบจำลอง ANN แสดงในตัวหนา

### 3.4 แบบจำลองสำหรับคำนวณหาค่ารังสีสุทธิจากรังสีคลื่นสั้นขาลง

จากการศึกษาในหัวข้อที่ผ่านมาพบว่าสามารถใช้ ANN ในการประมาณค่ารังสีสุทธิได้อย่างไรก็ตามการใช้ ANN จำเป็นต้องหาค่าตัวแปรควบคุมที่เหมาะสมกับงาน ดังนั้นผู้วิจัยจึงเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการประมาณค่ารังสีสุทธิโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.4.1 การสร้างแบบจำลอง

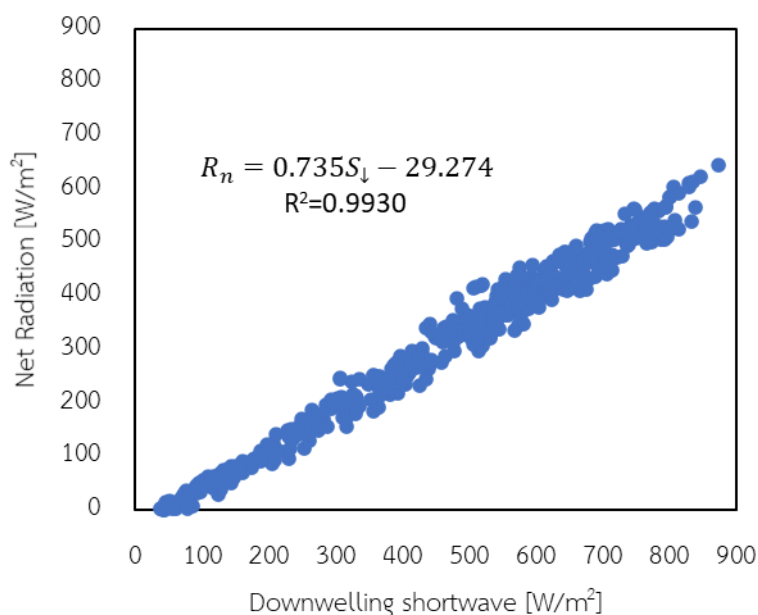
จากลักษณะการแปรค่าของรังสีคลื่นสั้นขาลง รังสีคลื่นสั้นขาขึ้น รังสีคลื่นยาวขาลง และรังสีคลื่นยาวขาขึ้น และผลการประมาณค่ารังสีสุทธิจากโครงข่ายประสาทเทียมทำให้ทราบว่าค่ารังสีคลื่นสั้นขาลงหรือรังสีอาทิตย์ที่เข้ามายังโลกเรานั้นมีผลต่อรังสีสุทธิเป็นอย่างมาก ดังนั้นผู้วิจัยจะสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการประมาณหาค่ารังสีสุทธิจากรังสีคลื่นสั้นขาลงที่ส่องผ่านมายังพื้นผิวโลก โดยผู้วิจัยจะใช้ข้อมูลรังสีคลื่นสั้นขาลงที่เข้ามายังโลกจากห้ววัดรังสีคลื่นสั้นขาลงของเครื่องวัด เน็ตเรดิโอมิเตอร์ที่ติดตั้งไว้ที่สถานีอุตุนิยมวิทยา นครปฐม เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ pyranometer เช่นเดียวกัน ทำการวัดที่ความยาวคลื่นในช่วงเดียวกัน และอยู่ในตำแหน่งเดียวกันกับห้ววัดรังสีสุทธิ โดยเมื่อนำข้อมูลรังสีอาทิตย์ที่ได้จาก pyranometer ทั่วไปเทียบกับห้วที่ใช้วัดรังสีคลื่นสั้นขาลงของเน็ตเรดิโอมิเตอร์พบว่ามีความสัมพันธ์กันดีซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 51 การเปรียบเทียบข้อมูลรังสีอาทิตย์ที่ได้จากเครื่อง pyranometer และเครื่องเน็ตเรดิโอมิเตอร์ที่ใช้สำหรับวัดรังสีคลื่นสั้นขาลง

จากกราฟการเปรียบเทียบข้อมูลรังสีอาทิตย์ที่ได้จาก pyranometer และเน็ตเรดิโอมิเตอร์ พบว่าทั้งสองเครื่องมือให้ค่ารังสีคลื่นสั้นขาลงที่ใกล้เคียงกันโดยมีค่า  $R^2=0.99$  ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่ดี ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าข้อมูลจากทั้งสองเครื่องมือนี้สามารถเทียบเคียงกันหรือใช้แทนกันได้

หลังจากการเปรียบเทียบและทราบถึงการนำข้อมูลมาใช้แทนกันได้แล้ว ผู้วิจัยได้ทำการนำค่ารังสีสุทธิและค่ารังสีอาทิตย์รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนในช่วงปี ค.ศ. 2017-2020 มาทำการพล็อตกราฟดูความสัมพันธ์ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 52 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่างรังสีสุทธิและรังสีคลื่นสั้นขาลง

จากกราฟพบว่ารังสีสุทธิและรังสีคลื่นสั้นขาลงมีความสัมพันธ์ที่ดีในรูปแบบเชิงเส้นโดย  $R^2$  เท่ากับ 0.99 และมีค่าความชันเป็นบวกเท่ากับ 0.74 ซึ่งสามารถนำความสัมพันธ์นี้มาเขียนอยู่ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการประมาณค่ารังสีสุทธิได้ดังสมการที่ 3.5

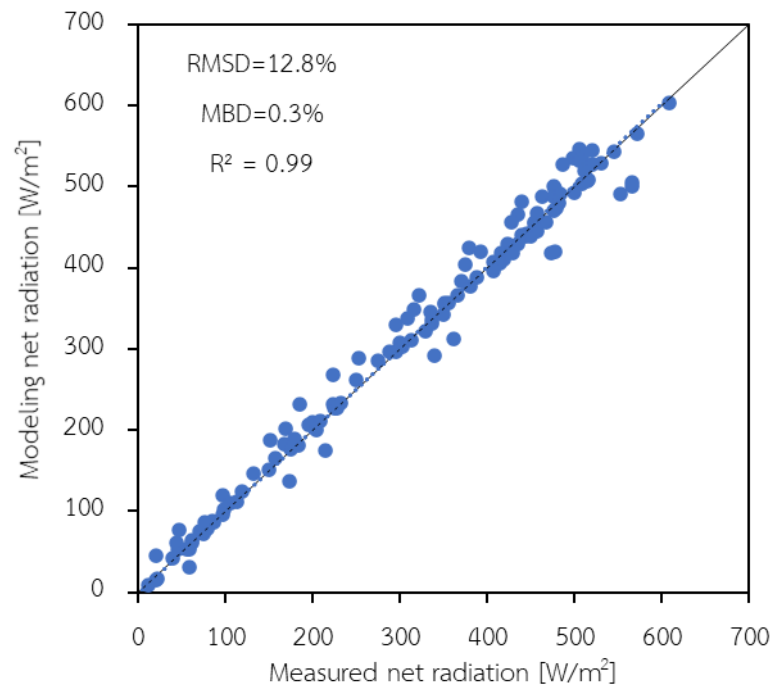
$$R_n = 0.735S_d - 29.274 \quad (3.5)$$

เมื่อ  $R_n$  คือ รังสีสุทธิ ( $W/m^2$ )  
 $S_d$  คือ รังสีคลื่นสั้นขาลงหรือรังสีอาทิตย์ ( $W/m^2$ )

โดยจากความสัมพันธ์ เมื่อรังสีคลื่นสั้นขาลงมีค่าเพิ่มขึ้นรังสีสุทธิก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ในช่วงเวลา กลางคืนที่ไม่มีรังสีคลื่นสั้นขาลง ( $S_d = 0$ ) ค่ารังสีสุทธิในพื้นที่สถานีอุตุนิยมวิทยานครปฐมจะมีค่าติดลบโดยประมาณ  $-29.274$  วัตต์ต่อตารางเมตร ตลอดทั้งคืน

### 3.4.2 การทดสอบแบบจำลองรังสีสุทธิที่พัฒนาขึ้น

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ข้อมูลรังสีคลื่นสั้นขาลงที่สถานีนครปฐม ในช่วงปี ค.ศ. 2021 คำนวณหาค่ารังสีสุทธิตามสมการที่ 3.5 จากนั้นนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดผลสามารถแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 53 การเปรียบเทียบระหว่างข้อมูลรังสีสุทธิที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นและจากการวัด

จากรูปที่ 53 ข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองและจากการวัดมีความสัมพันธ์ที่ดี โดยค่า RMSD เท่ากับ 12.8% MBD เท่ากับ 0.3% ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าแบบจำลองรังสีสุทธิที่พัฒนาขึ้น (สมการที่ 3.5) สามารถนำมาใช้ในการประมาณค่ารังสีสุทธิจากค่ารังสีคลื่นสั้นขาลงได้

## บทที่ 4

### สรุป

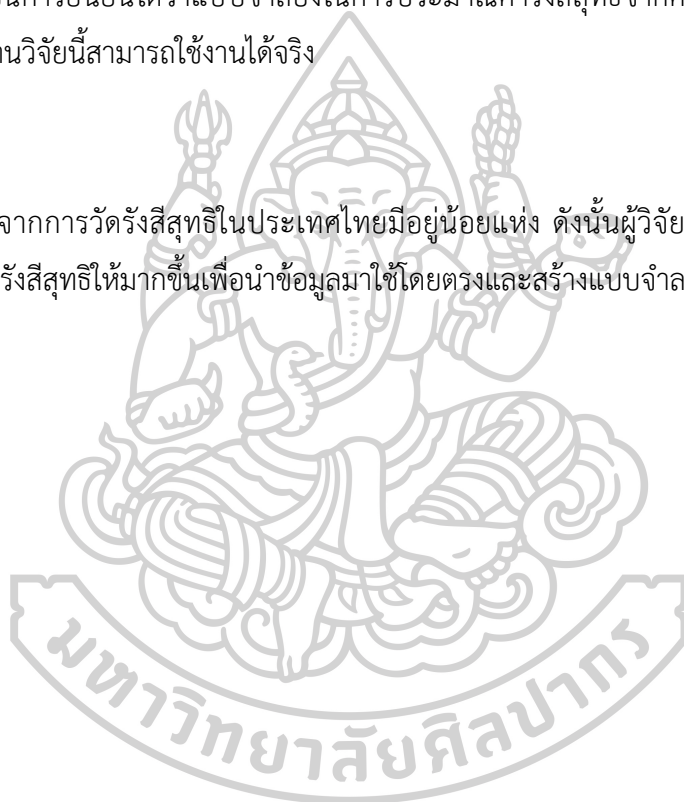
จากการศึกษาลักษณะทางสถิติของรังสีคลื่นสั้นขาหลง รังสีคลื่นสั้นขาขึ้น รังสีคลื่นยาวขาหลง และรังสีคลื่นยาวขาขึ้น รวมไปถึงรังสีสุทธิในช่วงปี ค.ศ. 2017-2021 พบว่าค่ารังสีสุทธิรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนในรอบวันมีการแปรค่าตามรังสีคลื่นสั้นขาหลงหรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่ารังสีอาทิตย์ โดยในช่วงเวลากลางวันรังสีสุทธิมีค่าเพิ่มขึ้นจากเวลาประมาณ 6.00 น. จนกระทั่งไปสูงสุดที่เวลาประมาณ 12.00 น. จากนั้นจึงลดต่ำลงจนกระทั่งเวลาประมาณ 18.00 น. ค่ารังสีสุทธิมีค่าลดต่ำลงจนกระทั่งมีติดลบ เนื่องจากในช่วงระยะเวลากลางวันมีเฉพาะองค์ประกอบของรังสีคลื่นยาวซึ่งรังสีคลื่นยาวขาหลงที่มาจากการแผ่รังสีของบรรยากาศนั้นมีค่าน้อยกว่ารังสีคลื่นยาวขาขึ้นที่แผ่ออกมาจากพื้นผิวโลก โดยค่าติดลบนี้จะมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดทั้งคืนและจะกลับมาเพิ่มขึ้นเมื่อถึงเช้าของอีกวัน ในกรณีของรังสีสุทธิรายวันเฉลี่ยต่อเดือนระยะยาวพบว่าค่ารังสีสุทธิมีค่าต่ำในช่วงฤดูหนาวเนื่องจากได้รับปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์ที่น้อยพื้นผิวโลกค่อนข้างแห้งจึงทำให้รังสีคลื่นสั้นขาขึ้นมีค่ามากส่งผลให้รังสีสุทธิในช่วงเดือนดังกล่าวมีค่าน้อย จากนั้นรังสีสุทธิจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงฤดูร้อนเนื่องจากโลกได้รับปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์ที่สูงทำให้ค่ารังสีสุทธิมีค่าสูงตามไปด้วย ถัดมาในช่วงเดือนพฤษภาคมและมีถุนายน โลกยังคงได้รับรังสีอาทิตย์ในปริมาณที่สูงอีกทั้งยังมีอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ทำให้ประเทศไทยมีฝนตกหนักพื้นผิวอิมไปด้วยน้ำส่งผลให้รังสีคลื่นสั้นขาขึ้นมีค่าลดต่ำลง เมื่อรังสีขาหลงมากและรังสีขาขึ้นน้อยทำให้ปริมาณรังสีสุทธิมีค่ามากที่สุดในช่วงนี้และจะค่อย ๆ ลดต่ำลงเนื่องจากปริมาณรังสีอาทิตย์ที่เข้ามาสู่โลกต่ำลงในช่วงฤดูหนาว นอกจากนี้รังสีสุทธิเฉลี่ยรายปียังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยในปี ค.ศ. 2021 ค่ารังสีสุทธิมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11.07 เมกะจูลต่อตารางเมตรโดยเพิ่มสูงขึ้นจากปี ค.ศ. 2017 ถึง 9.08%

เนื่องจากการศึกษาลักษณะทางสถิติบ่งชี้ว่ารังสีคลื่นสั้นขาหลงมีความสัมพันธ์และเป็นตัวแปรหลักที่ส่งผลต่อรังสีสุทธิแต่เนื่องจากองค์ประกอบทางบรรยากาศ เช่น ปริมาณเมฆ อนุภาคน้ำในบรรยากาศ ฝุ่นละออง และลักษณะการสะท้อนของพื้นผิวโลกล้วนแล้วแต่ส่งผลต่อค่ารังสีคลื่นสั้นขาหลง ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการประมาณค่ารังสีสุทธิโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมซึ่งใช้ตัวแปรอินพุตเป็นองค์ประกอบทางบรรยากาศและลักษณะการสะท้อนของพื้นผิวโลกโดยใช้ข้อมูลช่วงปี ค.ศ. 2017-2020 สำหรับฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม และข้อมูลในปี ค.ศ. 2021 เป็นข้อมูลในการทดสอบ ผลปรากฏว่าการใช้ตัวแปรอินพุตที่มีรังสีคลื่นสั้นขาหลงรวมอยู่ด้วยสามารถประมาณค่ารังสีสุทธิได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัด โดยเฉพาะกลุ่มตัวแปรอินพุตที่มีรังสีคลื่นสั้นขาหลงร่วมกับค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของพื้นผิว และดัชนีเมฆ จะสามารถประมาณค่ารังสีสุทธิได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัดจริงมากที่สุดโดยมีค่า RMSD เท่ากับ 5.1% MBD เท่ากับ -2.2%

นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาแบบจำลองรังสีสุทธีอย่างง่ายโดยการพล็อตดูความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีคลื่นสั้นขาหลงและค่ารังสีสุทธีรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนในช่วงปี ค.ศ. 2017-2020 พบว่าความสัมพันธ์ของทั้งสองปริมาณอยู่ในรูปของสมการเส้นตรงที่แปรผันตรงกัน โดยเมื่อปริมาณรังสีคลื่นสั้นขาหลงเพิ่มขึ้นค่ารังสีสุทธีก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และเมื่อค่ารังสีคลื่นสั้นมีค่าเป็นศูนย์ค่ารังสีสุทธีจะมีค่าติดลบและคงที่ จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการทดสอบแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยใช้ข้อมูลรังสีอาทิตย์ในปี ค.ศ. 2021 ผลปรากฏว่ารังสีสุทธีที่ได้จากแบบจำลองมีความสัมพันธ์กันดีกับค่ารังสีสุทธีที่ได้จากการวัดโดยมีค่า RMSD และ MBD เท่ากับ 12.8% และ 0.3% ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้ ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันได้ว่าแบบจำลองในการประมาณค่ารังสีสุทธีจากค่ารังสีอาทิตย์ที่ได้ทำการพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถใช้งานได้จริง

#### ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการวัดรังสีสุทธีในประเทศไทยมีอยู่น้อยแห่ง ดังนั้นผู้วิจัยจึงเสนอแนะว่าให้มีการติดตั้งสถานีวัดรังสีสุทธีให้มากขึ้นเพื่อนำข้อมูลมาใช้โดยตรงและสร้างแบบจำลองต่าง ๆ ต่อไป

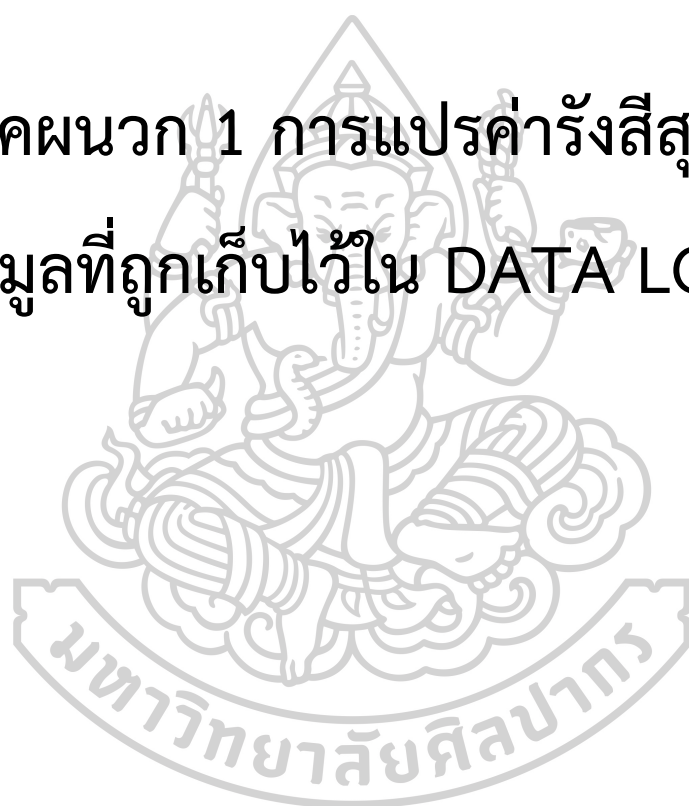




# ภาคผนวก

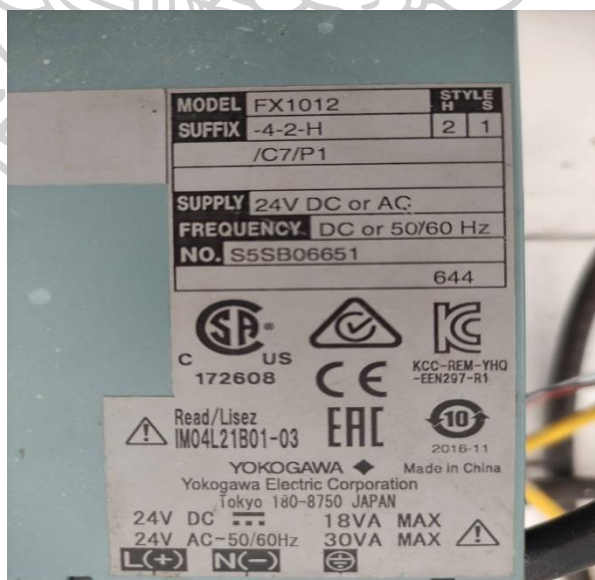


ภาคผนวก 1 การแปรค่ารังสีสุทิจาก  
ข้อมูลที่ถูกเก็บไว้ใน DATA LOGGER

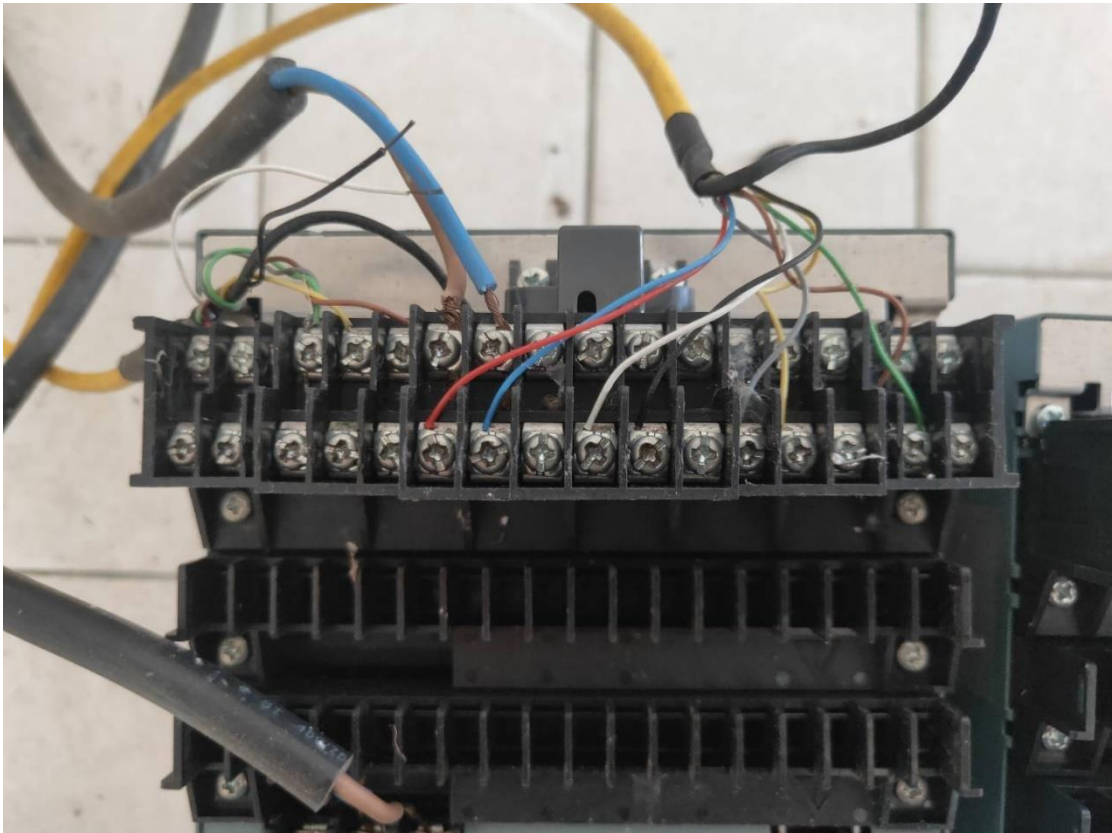


### A1.1 การเก็บข้อมูลโดยใช้ DATA LOGGER

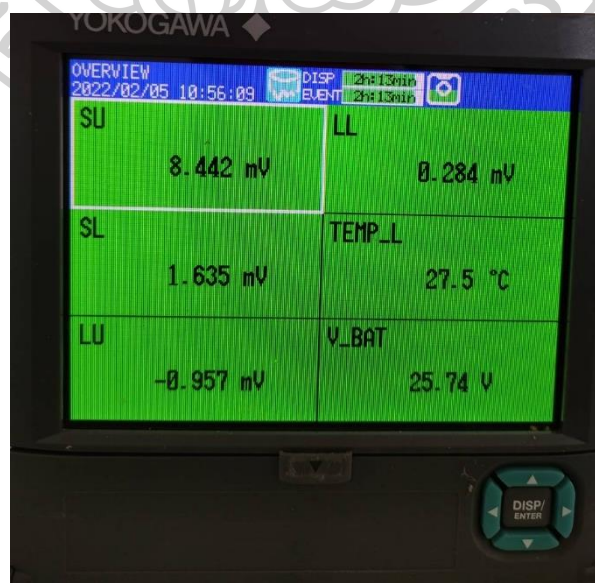
อุปกรณ์บันทึกข้อมูลรุ่น FX 1012 ของบริษัท Yokogawa โดยจะต่อสายสัญญาณจากเครื่องเน็ตเวิร์คโอมิเตอร์เข้าอุปกรณ์บันทึกข้อมูลจำนวน 5 ช่องสัญญาณ โดยรูปอุปกรณ์บันทึกข้อมูล การต่อสายสัญญาณ และจอแสดงผล สามารถแสดงได้ดังรูปด้านล่าง



รูปที่ 54 อุปกรณ์บันทึกข้อมูลรุ่น FX 1012 ของบริษัท Yokogawa  
ที่มา: Alibaba (1999-2022)



รูปที่ 55 การต่อสายสัญญาณเน็ตเรดิโอมิเตอร์เข้าอุปกรณ์บันทึกข้อมูล



รูปที่ 56 จอแสดงผลเครื่องบันทึกบันทึกข้อมูลเมื่อทำการบันทึกข้อมูลจากเครื่องเน็ตเรดิโอมิเตอร์

โดยลักษณะการต่อสายสัญญาณนั้นจะแบ่งเป็นสายสัญญาณสำหรับเซนเซอร์วัดรังสี 4 หัววัด  
4 คู่สายสัญญาณและสายสัญญาณสำหรับเซนเซอร์วัดอุณหภูมิซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูป



CNR 4 NET RADIOMETER • SENSOR			
8 WIRE CABLE • 8-ADRIGES KABEL • CÂBLE 8 FILS • CABLE DE 8 CONDUCTORES			
Wire Kabel Fil Cable	Function Funktion Fonction Función	Connect with Anschluss an Relier à Conectar con	
<b>1</b> Red Rot • Rouge • Rojo	+	Pyranometer Upper Oben • Supérieur • Superior	+ Hi
<b>2</b> Blue Blau • Bleu • Azul	-		- Lo
<b>7</b> White Weiss • Blanc • Blanco	+	Pyranometer Lower Unten • Inférieur • Más bajo	+ Hi
<b>8</b> Black Schwarz • Noir • Negro	-		- Lo
<b>5</b> Grey Grau • Gris • Gris	+	Pyrgometer Upper Oben • Supérieur • Superior	+ Hi
<b>4</b> Yellow Gelb • Jaune • Amarillo	-		- Lo
<b>6</b> Brown Braun • Brun • Marrón	+	Pyrgometer Lower Unten • Inférieur • Más bajo	+ Hi
<b>3</b> Green Grün • Vert • Verde	-		- Lo
<b>Shield</b> Abschirmung Protection Malla	<b>Housing</b> Gehäuse Boîte Cubierta	⏚ <b>Ground *</b> Erde Terre Tierra	

\* Connect to ground if radiometer not grounded  
Mit Erde verbinden, wenn das Radiometer nicht geerdet ist  
Reliez à la terre si le radiomètre n'est pas connecté  
Conectar a tierra si el radiómetro no lo está

รูปที่ 57 การต่อสายเซนเซอร์สำหรับวัดค่าสัญญาณรังสีโดยเอาที่พูดที่ออกมาจะมีค่าเป็น mV  
ที่มา: Kipp&Zonen (2015)

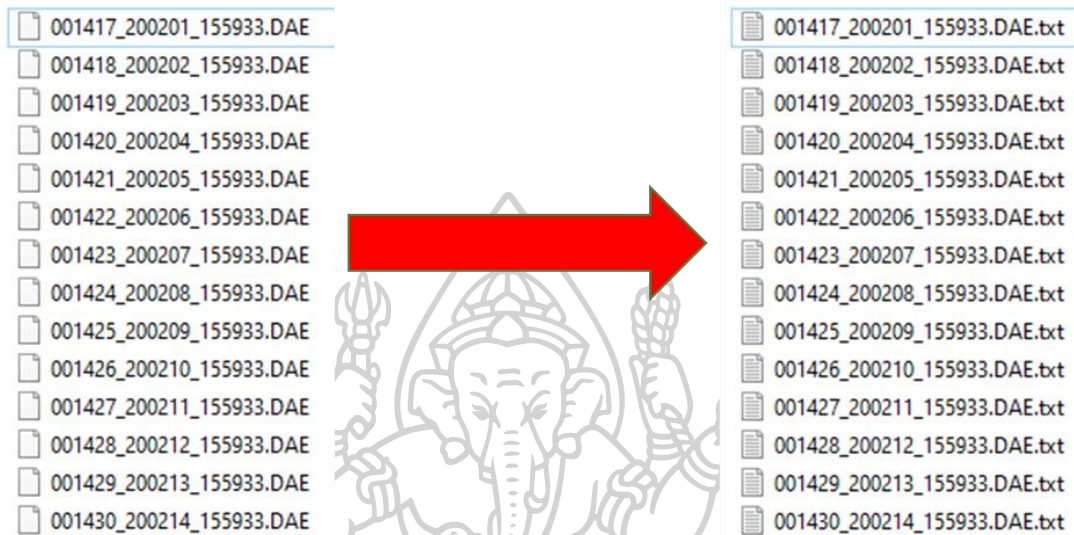


CNR 4 NET RADIOMETER • TEMPERATURE				
6 WIRE CABLE • 6-ADRIGES KABEL • CÂBLE 6 FILS • CABLE DE 6 CONDUCTORES				
<b>7</b>		White Weiss • Blanc • Blanco	Thermistor	Standard Standard Etalon Estándar
<b>8</b>		Black Schwarz • Noir • Negro		
<b>5</b>		Grey Grau • Gris • Gris	Combined Kombiniert Combiné Combinado	Pt-100 Standard Standard Etalon Estándar
<b>3</b>		Green Grün • Vert • Verde		
<b>4</b>		Yellow Gelb • Jaune • Amarillo	Combined Kombiniert Combiné Combinado	
<b>6</b>		Brown Braun • Brun • Marrón		
<b>Shield</b> Abschirmung Protection Malla	<b>Housing</b> Gehäuse Boîte Cubierta	⏚ <b>Ground *</b> Erde Terre Tierra		

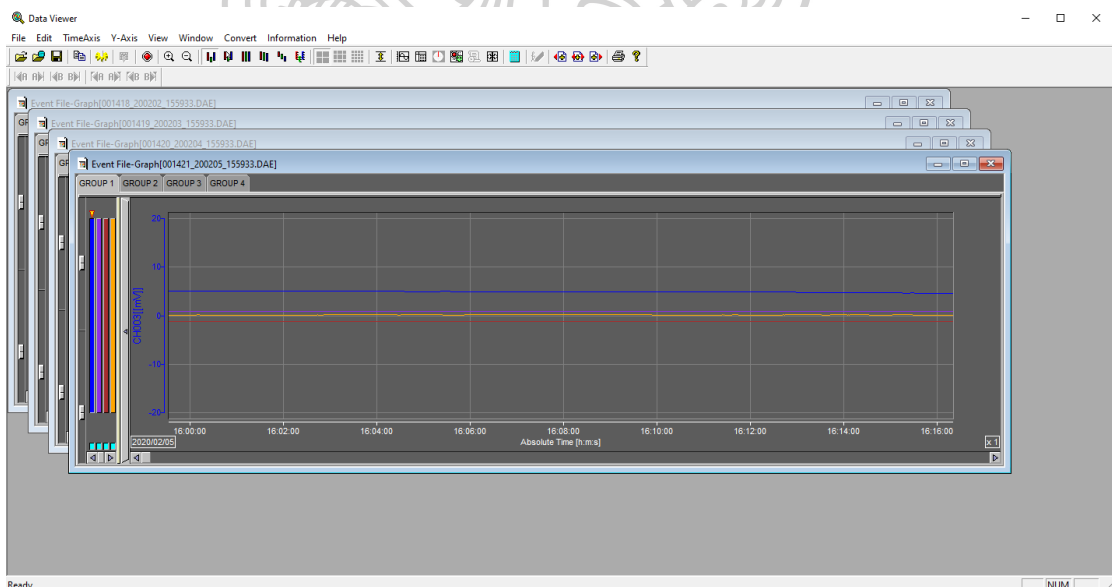
รูปที่ 58 การต่อสายเซนเซอร์สำหรับวัดค่าสัญญาณอุณหภูมิโดยเอาที่พูดที่ออกมาจะมีค่าเป็น mV  
ที่มา: Kipp&Zonen (2015)



เมื่ออุปกรณ์บันทึกข้อมูลทำการบันทึกสัญญาณแล้วข้อมูลที่ได้จะอยู่ในลักษณะไฟล์ .DAE ที่บันทึกรายวินาที จากนั้นทำการแปลงไฟล์ .DAE นี้ ให้เป็นไฟล์ในรูปแบบที่พร้อมใช้งานหรือไฟล์ .text โดยใช้โปรแกรม Universal Viewer



รูปที่ 59 การเปลี่ยนรูปแบบไฟล์ที่พร้อมใช้งาน



รูปที่ 60 โปรแกรม Universal Viewer

เครื่องเน็ตเรดิโอมิเตอร์ประกอบไปด้วย pyranometer 2 หัววัด และ pyrgeometer 2 หัววัด ดังนั้นการแปลงข้อมูลจึงแบ่งออกเป็นสองแบบ

#### 1. การแปลงสัญญาณจาก pyranometer

นำข้อมูล text ที่ได้จากการแปลงข้อมูลด้วยโปรแกรม Universal Viewer มาทำการเปิดใน excel จะได้ค่าสัญญาณแต่ละช่องออกมาในหน่วย mV

Ch.			CH003	CH004
Tag			SU	SL
Date	Time	sec	mV	mV
2/2/2020	15:59:33	0	4.722	0.925
2/2/2020	15:59:34	0	4.721	0.924
2/2/2020	15:59:35	0	4.719	0.924
2/2/2020	15:59:36	0	4.718	0.924
2/2/2020	15:59:37	0	4.718	0.923
2/2/2020	15:59:38	0	4.717	0.923
2/2/2020	15:59:39	0	4.717	0.924
2/2/2020	15:59:40	0	4.717	0.923
2/2/2020	15:59:41	0	4.717	0.924
2/2/2020	15:59:42	0	4.717	0.924
2/2/2020	15:59:43	0	4.717	0.924
2/2/2020	15:59:44	0	4.718	0.924
2/2/2020	15:59:45	0	4.718	0.925
2/2/2020	15:59:46	0	4.719	0.925
2/2/2020	15:59:47	0	4.719	0.925
2/2/2020	15:59:48	0	4.719	0.925
2/2/2020	15:59:49	0	4.718	0.925
2/2/2020	15:59:50	0	4.718	0.925

รูปที่ 61 ค่าสัญญาณจากหัววัด pyranometer CH003 คือ รังสีคลื่นสั้นขาลง และ CH004 คือ รังสีคลื่นสั้นขาขึ้น

จากนั้นนำค่าสัญญาณในหน่วย mV ของแต่ละช่องสัญญาณคูณด้วย 1000 และหารด้วยค่า Sensitivity ของแต่ละหัววัดจะได้ค่ารังสีคลื่นสั้นขาลงและรังสีคลื่นสั้นขาขึ้นในหน่วย  $W/m^2$  โดยค่ารังสีที่ได้จะเป็นค่ารายวินาที นำค่าที่ได้นั้นมาทำการเฉลี่ยเป็นรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้



		Downward short wave radiation (W/m <sup>2</sup> )																								
MONTH :		JANUARY										STATION :										NAKHON PATHOM				
YEAR :		2020																								
Date	0-1	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	ME/m <sup>2</sup>
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	570	535	549	361	166	50	0	0	0	0	0	0	0	8.034
2	1.4	0	0	0.8	0	0	0.5	64	279	502	605	634	691	659	501	394	301	72	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0.3	57	252	439	544	553	663	683	575	407	247	65	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0.7	57	241	425	572	680	646	523	595	445	253	63	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0.4	0	0	0	0	0	1	58	233	456	614	706	713	703	612	467	278	71	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	1.1	57	232	419	568	668	683	682	605	441	254	64	0	0	0	0	0	0	0.5	0
7	0	0	0	0	0	0	1.2	58	224	425	581	679	699	694	587	435	236	67	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0.3	49	202	407	545	660	651	591	521	376	213	54	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0.2	0.7	0.8	0	0	0	0.2	55	219	427	567	672	692	691	606	467	278	60	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0.1	0.1	49	195	378	520	622	623	621	434	331	237	67	0	0	0	0.7	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0.2	41	147	292	390	592	609	595	577	361	181	59	0.1	0.2	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	1	54	212	418	576	696	699	701	599	280	189	82	1.2	0	0	0	0	0	0	0
13	0.3	0	0	0	0	0	0	11	63	126	96	382	763	648	486	425	230	87	0.9	0	0.4	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0.6	57	200	402	543	704	730	717	623	453	259	82	0.5	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	1.1	53	202	412	584	705	696	677	554	460	251	75	0.2	0	0.5	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0.1	53	192	405	570	682	701	711	605	457	262	79	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0.3	0	1.1	0.3	1.2	51	195	419	565	681	718	680	600	449	245	73	0.6	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0.1	0.1	0	0	0	0.3	36	143	381	521	563	450	455	394	341	195	73	0.7	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0.4	46	171	367	525	633	600	534	550	427	239	71	0.5	0	0	0.2	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	39	171	369	538	651	650	581	526	370	145	50	2.1	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0.9	48	186	406	409	569	527	696	552	361	218	63	2.1	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0.4	0.6	47	180	411	588	626	587	667	608	444	261	83	1.6	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	51	187	404	582	696	703	709	625	475	285	97	1.2	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	53	186	424	606	717	715	715	638	496	305	98	1.4	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	56	195	443	615	666	532	593	488	484	306	109	4.6	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0.8	71	225	450	660	797	815	829	701	541	330	111	4.3	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	77	214	538	718	819	846	844	736	554	339	117	1.9	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	81	230	545	715	778	772	786	734	555	337	113	2.8	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0.4	0	0	0.5	65	214	467	635	704	694	709	654	527	323	111	1.1	0.7	0.7	0.4	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0.6	58	202	427	680	658	630	705	461	444	156	70	2.1	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	47	224	419	545	669	732	741	662	501	311	111	2.7	0	0	0	0	0	0	0
Avg.	0.076	0.027	0.041	0.032	0.032	0.027	0.446	21.232	184.104	400.142	541.132	640.667	667.734	666.842	579.300	456.340	232.670	72.900	1.056	0.021	0.032	0.042	0.000	0.012	0	0

รูปที่ 62 รังสีคลื่นสั้นลงในหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตร รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน (สีแดง) รวมรายวัน (สีน้ำเงิน)

Upward short wave radiation (W/m <sup>2</sup> )																										
MONTH : JANUARY													STATION : NAKHON PATHOM													
YEAR : 2020																										
Date	0:1	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	MJ/m <sup>2</sup>
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	120	102	106	70	33	11	0.6	1.6	1.4	1.9	1.5	1.8	450.932	1.623
2	3.6	2	2.7	1.7	1	1.5	2.5	19	63	102	118	121	133	126	97	78	64	14	0.5	0.8	1.2	1.4	1.4	1	955.183	3.439
3	1.7	2.5	2.7	2.7	1.9	2.1	2.5	17	57	92	109	107	129	128	110	80	53	13	0.7	1.9	1.7	2.2	1.7	1.2	920.332	3.313
4	1.5	1.4	1.7	1.4	1.5	1.2	1.3	15	57	90	115	130	124	99	116	90	55	13	0.6	1.3	1.9	2.1	1.7	1.2	922.532	3.321
5	1.9	1.8	1.7	1.5	1.1	1.2	1.6	15	56	92	119	134	136	131	116	93	59	14	0.7	2.1	2	1.8	1.6	1.4	985.867	3.549
6	1.9	1.7	1.5	1.5	1.2	1.3	1.8	14	55	89	113	127	130	127	115	88	56	13	0.4	2.6	1.5	1.6	1.8	2.7	948.971	3.416
7	1.7	1.9	3.3	1.5	1.3	1.4	2	14	55	90	116	130	133	129	113	88	52	14	0.7	1.8	2.1	2.5	2.6	2.3	958.639	3.451
8	1.9	2.2	1.3	1.5	2.1	1.6	1	12	49	85	108	126	125	112	103	78	47	11	0.2	1.9	1.5	1.2	1.2	0.9	875.494	3.152
9	1.7	2	1.8	0.5	1	0.8	1.1	15	54	89	113	128	130	126	111	90	58	11	1.3	1.6	1.5	1.2	2.1	1.4	941.628	3.390
10	2.1	1.8	1.5	1.2	1	0.9	1.5	15	48	81	105	121	98	117	83	66	50	14	0.9	1.2	1.3	3.9	2	1.8	819.743	2.951
11	1.3	1.5	1.1	1.2	1.4	1.7	1.5	9.5	30	62	76	113	112	107	107	67	37	12	0.8	3.3	1.5	1.8	2	1.7	753.309	2.712
12	1.7	1.5	2.1	2	2.4	1.6	2.7	13	48	89	111	128	129	124	109	51	39	17	1.7	2	2.8	1.6	0.9	1.2	881.117	3.172
13	1.6	1.1	1.2	1.3	0.9	1.5	1.1	2.8	14	22	17	70	142	116	90	81	46	19	0.9	1.2	2	1.1	1.3	1.8	636.682	2.292
14	0.9	1.4	1.8	1.3	1.1	0.8	1.2	13	45	83	101	127	130	126	113	88	55	18	1.6	2.5	3.1	1.9	1.2	1.9	919.951	3.312
15	1.5	1.7	1.4	1.7	1.4	1.4	1.7	12	43	84	110	126	124	121	99	90	53	16	1.5	1.7	3.5	2.1	2.6	1.7	901.474	3.245
16	1.9	2.1	1.1	2.3	1.9	1.9	1.2	13	46	84	109	124	127	125	110	89	56	17	1.9	2.8	2.8	2	2.6	1.8	926.344	3.335
17	1.5	0.9	2.4	1.2	2.7	2.6	2.1	12	47	81	107	122	129	119	109	87	52	16	1.6	2.1	1.6	0.9	1.3	1.2	902.089	3.248
18	1.8	2.1	2.3	1.7	0.7	1.6	1.2	8.1	29	80	101	107	78	79	68	65	41	16	1.3	1.6	2.4	2.1	2.8	2.2	696.802	2.508
19	2	1.2	1	1.7	1.4	1.5	1.9	11	40	77	101	115	109	95	102	83	50	15	1	1.4	2.1	2.9	2.7	1.5	819.105	2.949
20	0.9	1.4	1.2	0.9	1.9	1.8	1.6	8.5	42	77	102	118	117	104	100	72	26	10	1.3	1.3	1.1	1.1	0.8	1.9	793.323	2.856
21	1.6	1.8	0.5	1.3	1.1	1.1	1.7	11	46	82	74	105	92	126	101	66	47	14	1.4	2.2	2.5	2.3	1.1	1.5	782.826	2.818
22	1.8	0.8	1.6	0.8	1.4	2.3	2.1	11	43	82	108	110	108	116	108	86	55	18	1.2	2.4	2.1	2.8	2.8	2.1	869.202	3.129
23	2	2.1	2.2	2.3	1.4	2.3	1.6	12	48	81	108	123	125	122	111	90	60	21	2.4	2.3	3.1	2.9	2.9	2.4	932.330	3.356
24	2.4	1.7	1.8	1.7	1.5	1.8	1.8	12	45	83	110	123	122	120	112	92	62	21	2	2	2	2.2	2.1	2.5	928.138	3.341
25	2.3	2.2	1.6	1.4	2	2.8	2.8	14	43	84	110	116	92	99	87	90	61	24	2.7	1.9	2.1	2	1.9	1.8	847.306	3.050
26	1.7	2.6	1.8	1.8	2.4	2.9	3.1	18	56	89	120	139	140	141	125	102	70	26	3.1	1.9	2.7	2.9	2.8	3.1	*****	3.815
27	2.1	2.3	2	2.3	3	6.5	3.4	19	65	103	130	142	147	143	130	105	71	27	2.7	1.9	2.6	2.8	2.9	3.2	*****	4.034
28	2.4	3.2	3	2.4	3.2	3.9	3	21	69	106	135	145	144	139	134	106	73	27	2.8	3	3	2	1.4	1.7	*****	4.087
29	1.2	1.7	2.1	3.2	2.2	2.7	2.9	15	57	94	122	133	131	129	121	102	71	27	0.3	3.3	3	2.6	1.3	1.6	*****	3.709
30	1.4	2	3.3	1.2	1.2	2.5	1.9	14	53	86	125	116	108	124	82	84	29	14	1.8	0.9	1.8	1.3	1.9	1.5	857.721	3.088
31	2.8	3.5	2.6	2.5	2.5	2.2	2	11	54	84	102	121	133	134	122	97	64	24	1.6	1.9	1.8	1.5	2	2.5	973.982	3.506
Ave.	1.737	1.812	1.816	1.609	1.602	1.921	1.562	12.774	47.902	81.329	103.126	117.602	122.241	119.536	106.532	84.216	53.061	16.945	1.540	1.943	2.115	2.016	1.894	1.826	888.614	3.199

รูปที่ 63 รังสีคลื่นสั้นขาขึ้นในหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตร รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน (สีแดง) รวมรายวัน (สีน้ำเงิน)

## 2. การแปลงสัญญาณจาก pyreometer

นำข้อมูล text ที่ได้จากการแปลงข้อมูลด้วยโปรแกรม Universal Viewer มาทำการเปิดใน excel จะได้ค่าสัญญาณแต่ละช่องออกมาในหน่วย mV

Ch.			CH003	CH004	CH005	CH006	CH008
Tag			SU	SL	LU	LL	TEMP_L
Date	Time	sec	mV	mV	mV	mV	°C
2/2/2020	15:59:33	0	4.722	0.925	-1.011	0.191	32
2/2/2020	15:59:34	0	4.721	0.924	-1.01	0.192	32
2/2/2020	15:59:35	0	4.719	0.924	-1.01	0.192	32
2/2/2020	15:59:36	0	4.718	0.924	-1.009	0.193	32
2/2/2020	15:59:37	0	4.718	0.923	-1.008	0.194	32
2/2/2020	15:59:38	0	4.717	0.923	-1.007	0.194	32
2/2/2020	15:59:39	0	4.717	0.924	-1.008	0.196	32
2/2/2020	15:59:40	0	4.717	0.923	-1.007	0.193	32
2/2/2020	15:59:41	0	4.717	0.924	-1.006	0.19	32
2/2/2020	15:59:42	0	4.717	0.924	-1.007	0.19	32
2/2/2020	15:59:43	0	4.717	0.924	-1.006	0.189	32
2/2/2020	15:59:44	0	4.718	0.924	-1.005	0.187	32
2/2/2020	15:59:45	0	4.718	0.925	-1.004	0.185	32
2/2/2020	15:59:46	0	4.719	0.925	-1.004	0.183	32
2/2/2020	15:59:47	0	4.719	0.925	-1.005	0.18	32
2/2/2020	15:59:48	0	4.719	0.925	-1.005	0.18	32
2/2/2020	15:59:49	0	4.718	0.925	-1.005	0.182	32
2/2/2020	15:59:50	0	4.718	0.925	-1.004	0.182	32

รูปที่ 64 ค่าสัญญาณจากหัววัด pyreometer CH005 และ CH006 คือ รังสีคลื่นยาวขาหลงและขาขึ้นตามลำดับ (สีแดง) CH008 อุณหภูมิที่ได้จากตัวเครื่อง (สีน้ำเงิน)

จากนั้นนำค่าสัญญาณในหน่วย mV ของแต่ละช่องสัญญาณคูณด้วย 1000 และหารด้วยค่า Sensitivity ของแต่ละหัววัดและบวกด้วยค่าคงที่ของสเตพาน-โบลซ์มันน์คูณอยู่กับอุณหภูมิในหน่วย เคลวินยกกำลังสี่ (ช่องสัญญาณที่ CH008 บวกกับ 273.15) โดยจะได้ค่ารังสีคลื่นยาวขาหลงและขาขึ้นในหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตรซึ่งค่ารังสีที่ได้จะเป็นค่ารายวินาที นำค่าที่ได้นั้นมาทำการเฉลี่ยเป็นราย ชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปต่อไปนี้

Downward long wave radiation (W/m <sup>2</sup> )																											
MONTH : JANUARY														STATION : NAKHON PATHOM													
YEAR : 2020																											
Date	0-1	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	23-24	Total	MM/m <sup>2</sup>	
1													446.23	394.09	321.13	306.1	243.32	233.42	235.91	242.51	271.43	271.32	271.51	272.5	*****	*****	
2	274.99	251.54	243.16	244.22	249.09	231.43	229.25	243.95	291.49	372.94	429.54	430.11	473.4	441.15	372.95	311.01	241.16	197.04	219.25	224.29	242.05	244.95	244.94	247.71	*****	*****	
3	249.79	272.4	244.16	233.4	231.49	246.73	242.29	242.25	242.33	349.44	405.23	415.9	442.22	445.22	374.42	309.21	254.29	206.09	219.73	231.43	241.15	242.25	243.5	242.3	*****	*****	
4	249.77	272.2	232.95	231.45	232.25	234.27	246.29	207.41	317.24	340.03	405.43	444.24	434.23	322.94	402.07	309.21	232.24	154.74	201.43	237.73	240.45	249.97	274.47	273.43	*****	*****	
5	301.14	232.05	239.24	232.4	272.25	239.12	237.42	204.29	209.29	234.44	410.27	421.29	484.21	421.3	413.93	234.99	240.11	122.44	197.23	232.21	234.44	244.23	270.95	249.04	*****	*****	
6	270.44	272.75	273.07	254.14	239.19	232.41	232.47	202.25	229.44	333.21	371.9	412.44	432.11	402.29	333.21	232.2	232.19	122.44	192.74	224.99	240.45	234.44	244.73	271.14	*****	*****	
7	242.92	242.74	247.21	234.1	249.23	232.22	231.21	204.22	317.27	314.2	239.11	232.23	422.03	423.03	242.25	234.27	224.04	179.23	192.2	231.22	232.23	242.45	244.23	234.23	*****	*****	
8	237.42	232.25	270.27	239.94	274.14	244.73	232.44	204.02	222.23	312.24	341	400.07	422.21	239.44	244.24	202.27	241.44	194.2	214.29	220.42	244.12	272.14	274.95	277.42	*****	*****	
9	232.17	211.74	211.05	232.49	232.22	249.22	272.24	202.22	222.4	341.99	391.3	444.42	442.27	420.02	232.09	232.22	232.15	172.41	212.23	244.74	240.72	244.95	270.24	242.42	*****	*****	
10	272.24	270.07	274.43	272.11	232.75	234.24	200.29	201.1	222.04	299.2	232.09	232.42	222.22	272.24	210.2	271.22	211.29	122.22	200.15	239.44	234.92	232.47	231.25	237.12	*****	*****	
11	232.24	272.22	232.22	237.49	232	234.44	232.99	210.17	222.21	242.04	230.74	272.23	244.29	244.09	234.24	244.42	242.24	202.22	214.23	242.15	212.97	232.95	242.01	242.71	*****	*****	
12	247.22	242.21	272.91	244.21	230.49	231.2	234.71	204.49	217.29	234.27	239.75	232.24	271.71	272.24	222.22	239.23	270.14	240.29	219.04	237.23	242.23	242.43	239.1	274.44	*****	*****	
13	202.27	201	234.79	232.07	232.23	232.15	237.24	212.49	231.72	214.29	212.24	234.24	422.21	404.99	242.72	244.92	232.24	242.2	242.43	249.7	220.07	270.42	241.94	247.73	*****	*****	
14	221.94	271.29	234.93	232.24	234	232.95	200.14	202.03	208.44	244.24	274.73	424.23	422.99	421.3	237.27	224	234.12	232.23	197.03	222.2	232.29	232.24	234.29	272.2	*****	*****	
15	220.42	229.97	232.21	234.73	234.11	234.74	232.25	200.2	207.22	244.24	232.24	232.24	234.29	274.44	232.24	234.29	214.24	199.03	221.27	231.74	224.73	244.97	220.27	272.2	*****	*****	
16	241.42	221.95	220.41	227.4	229.97	231.23	234.19	207.24	221.22	220.24	234.29	274.44	232.09	232.09	234.24	232.24	234.29	232.24	232.24	232.24	232.24	232.24	232.24	232.24	*****	*****	
17	222.24	230.25	231.71	231.25	232.25	234.4	237.12	212.22	221.44	232.25	270.04	232.23	232.09	232.09	234.29	234.29	232.24	232.24	232.24	232.24	232.24	232.24	232.24	232.24	*****	*****	
18	227.29	227.97	274.95	227.23	232.45	234.27	232.25	204.95	208.23	231.45	244.27	232.23	232.23	232.23	232.23	232.23	232.23	232.23	232.23	232.23	232.23	232.23	232.23	232.23	*****	*****	
19	247.42	279.13	232.94	232.22	232.73	227.95	231.42	239.73	222.44	227.45	227.45	227.45	227.45	227.45	227.45	227.45	227.45	227.45	227.45	227.45	227.45	227.45	227.45	227.45	*****	*****	
20	224.72	244.05	229.42	279.74	231.29	234.2	234.21	209.25	222.72	227.42	227.42	227.42	227.42	227.42	227.42	227.42	227.42	227.42	227.42	227.42	227.42	227.42	227.42	227.42	*****	*****	
21	224.72	244.05	229.42	279.74	231.29	234.2	234.21	209.25	222.72	227.42	227.42	227.42	227.42	227.42	227.42	227.42	227.42	227.42	227.42	227.42	227.42	227.42	227.42	227.42	*****	*****	
22	272.44	220.21	222.71	232.24	234.23	232.07	232.27	232.92	202.93	234.49	200.23	241.24	247.23	272.23	241.9	204.24	234.24	192.91	204.42	220.22	212.05	234.22	232.02	242.42	*****	*****	
23	244.29	242.23	274.2	222.97	229.29	234.21	234.4	202.11	212.24	217.43	271.23	407.94	232.01	221.71	222.44	229.91	224.47	192.43	172.47	194.94	220.21	240.23	240.49	221.24	*****	*****	
24	230.02	222.22	244.92	234.92	232.25	234.73	232.24	202.71	214.24	212.23	272.1	412.27	420.03	417.15	224.22	222.02	270.73	224.21	212.73	224.02	232.43	232.2	234.23	242.23	*****	*****	
25	244.2	242.29	242.22	242.23	272.4	247.41	227.42	222.94	270.24	211.24	247.2	232.42	232.74	222.7	241.24	229.42	227.23	242.74	221.42	222.22	222.22	222.22	244.79	224.22	*****	*****	
26	222.72	224.92	229	222.22	272.29	220.77	222.24	239.77	202.42	200.41	227.42	401.2	224.11	231.92	222.99	242.22	194.72	124.4	172.47	194.22	214.22	222.22	222.22	220.04	*****	*****	
27	222.21	242.77	272.22	274.2	272.2	224.94	220.04	221.74	222.29	270.41	409.24	442.44	412.49	234.29	222.97	202.75	172.22	122.99	194.71	222.29	222.2	222.2	222.2	222.2	*****	*****	
28	192.72	192.17	192.44	207.12	224.22	227.4	222.92	229.29	222.42	204.44	412.22	444.21	447.49	232.47	247.24	271.42	212.23	127.17	142.22	172.42	191.1	207.05	229.42	247.21	*****	*****	
29	272.24	224.12	227.44	224.24	224.02	227.73	200.23	202.27	224.02	272.23	232.71	234.24	222.23	224.22	229.42	222.74	121.21	149.74	229.42	222.47	222.29	224.23	222.23	222.23	*****	*****	
30	240.1	242.72	222.2	224.22	272.24	224.29	229.2	207.17	222.23	224.42	404.22	402.02	229.4	421.27	222.42	214.44	242.72	240.22	219.02	224.92	227.01	222.71	247.42	244.23	*****	*****	
31	272.29	244.47	220.42	224.22	242.95	240.23	272.14	217.4	270.47	229.91	404.74	412.22	200.42	200.27	429.23	222.12	221.22	200.92	124.22	222.4	242.92	224.02	222.94	242.44	*****	*****	
AVG	242.422	247.127	272.292	272.242	221.442	222.222	222.212	237.474	222.922	229.912	271.222	409.414	414.122	401.212	240.227	222.222	249.222	224.442	224.412	222.122	242.172	242.422	222.729	227.229	*****	*****	

รูปที่ 65 รังสีคลื่นยาวขาลงในหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตร รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน (สีแดง) รวมรายวัน (สีน้ำเงิน)

		Upward long wave radiation (W/m <sup>2</sup> )																								
MONTH :		JANUARY																		STATION :						
YEAR :		2020																		NAKHON PATHOM						
Date	0-1	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	Totl	MJ/m <sup>2</sup>
1													371.62	304.42	486.22	388.22	332.16	200.66	267.06	280.06	282.12	285.62	282.07	300.62	4343.221	*****
2	287.542	276.80	270.32	274.32	266.1	261.24	263.22	237.71	260.42	470.82	540.26	373.22	602.22	371.12	423.22	411.21	348.22	200.82	202.22	226.22	281.42	285.62	282.79	285.49	8330.758	*****
3	282.9	301.62	286.01	284.51	254.44	200.04	276.1	302.22	327.22	439.47	511.09	323.62	382.27	321.22	482.24	408.22	322.62	256.49	201.62	278.71	222.22	228.26	280.64	282.72	8487.561	*****
4	282.252	282.12	288.62	306.27	307.42	302.22	316.22	326.64	373.64	426.72	321.47	374.62	262.84	482.22	322.71	414.72	312.22	237.21	222.21	270.49	280.42	287.74	300.22	287.22	8294.372	*****
5	312.202	302.2	316.62	302.82	286.24	312.1	311.19	333.04	372.29	418.67	324.12	606.26	422.87	612.22	327.1	442.2	342.19	242.41	221.81	269.71	222.44	281.22	286.82	282.26	8904.291	*****
6	286.202	282.9	284.26	288.62	302.22	306.12	302.22	322.27	377.6	422.22	426.46	541.24	266.24	326.21	422.26	402.17	321.27	222.41	221.21	262.22	272.21	222.22	282.72	286.76	8452.328	*****
7	282.017	288.22	282.62	221.26	282.12	302.12	302.22	322.12	372.27	402.17	478.47	322.24	262.72	322.22	422.24	388.21	307	224.2	222.22	262.22	222.22	280.22	284.22	278.22	8329.028	*****
8	272.222	222.26	286.62	312.24	288.24	280.67	289.27	321.71	372.22	402.22	472.9	324.82	202.22	302.12	471.22	382.29	312.86	242.69	242.4	221.11	282.12	282.22	300.24	201.64	8227.424	*****
9	302.644	222.22	312.9	302.22	208.27	282.22	288.7	324.22	342.72	427.22	488.6	370.19	372.62	302.22	472.22	402.72	307.29	224.72	242.21	272.22	226.82	281.22	282.2	282.22	8260.211	*****
10	300.417	284.29	301.67	300.29	300.26	208.89	312.74	224.12	241.22	221.21	428.74	482.41	426.72	426.42	402.14	228.72	288.84	242.7	226.22	270.26	227.67	281.67	262.82	271.47	7997.626	*****
11	222.082	282.11	300.24	302.12	202.81	302.21	307.22	322.22	242.17	412.27	424.22	482.27	482.22	467.12	428.22	264.22	218.26	264.64	221.22	220.89	222.22	272.22	278.24	222.12	8022.621	*****
12	220.742	226.72	284.21	287.87	300.72	300.27	302.87	212.22	220.82	426.47	462.82	327.89	220.82	212.7	422.69	242.24	322.22	282.64	227.22	271.27	277.67	272.26	226.71	282.29	8207.622	*****
13	310.724	311.27	208.64	304.24	300.22	302.19	302.29	221.1	221.81	242.22	242.42	421.22	261.89	218.22	424.29	422.21	268.26	286.22	270.72	282.21	288.29	281.62	280.21	221.42	8229.286	*****
14	222.649	281.22	288.26	302.67	304.62	307.27	310.81	221.12	248.22	442.27	422.2	242.22	272.64	267.17	214.22	424.22	342.2	268.29	241.27	262.82	274.2	272.21	226.24	288.22	8284.222	*****
15	287.071	302.17	302.22	302.22	304.67	302.4	302.22	216.12	228.4	442.27	422.2	242.22	272.64	267.17	214.22	424.22	342.2	268.29	241.27	262.82	274.2	272.21	226.24	288.22	8422.222	*****
16	226.267	300.12	287.14	301.17	301.24	301.21	302.22	218.29	222.87	412.21	464.82	217.71	221.69	227.66	471.24	402.27	228.44	270.81	242.17	242.2	229	260.22	277	280.42	8221.212	*****
17	302.266	301.22	304.76	300.22	306.7	304.42	302.42	212.2	222.24	422.27	422.27	222.27	260.22	227.12	426.74	412.21	226.24	266.26	242.19	262.12	270.42	222.26	280.16	282.12	8466.622	*****
18	288.221	302.22	302.86	300.24	307.2	302.26	302.22	221.66	226.26	424.26	476.87	201.77	444.26	442.4	222.26	222.22	222.22	270.29	222.21	261.11	272.72	277.42	228.6	280.21	8106.222	*****
19	227.222	222.22	282.86	300.22	302.26	302.22	302.86	220.22	247.62	412.17	470.24	206.21	202.26	421.69	471.22	412.27	222.42	222.27	227.09	268.21	277.69	222.69	222.22	276.62	8277.723	*****
20	282.222	300.21	218.27	310.29	288.26	300.72	302.79	211.79	222.22	407.6	428.27	212.46	222.24	487.24	472.21	401.12	228.12	288.21	268.72	222.77	287.24	288.21	221.12	282.4	8466.242	*****
21	222.272	272.22	227.21	287.11	202.29	204.6	302.22	221	264.62	420.12	421.26	484.24	462.29	222.16	468.66	402.22	222.82	282.16	222.22	274.62	272.7	277.24	220.84	282.82	8267.226	*****
22	286.282	286.76	300.66	302.79	202.82	202.22	206.22	214.62	242.24	412.29	462.14	478.24	421.62	204.82	464.22	408.72	222.21	224.2	244.7	222.67	224.22	272.26	272.62	220.47	8166.720	*****
23	280.226	281.8	284.12	286.22	200.21	202.21	206.24	216.7	224.14	282.22	420.67	224.89	222.26	212.62	464.72	402.24	222.42	264.22	224.12	246.2	266.84	227.81	282.12	278.9	8229.279	*****
24	276.222	272.22	280.27	201.22	204.22	204.46	202.26	217.41	222.42	286.72	424.21	241.82	248.29	244.22	207.29	422.17	260.42	281.77	271.72	272.69	222.12	222.16	272.12	224.79	8209.697	*****
25	224.626	278.82	221.17	280.22	200.22	288.24	282.87	222.2	221.77	404.29	424.47	210.22	426.26	462.22	422.87	420.84	270.62	208.89	222.29	277.22	276.86	272.22	221.82	272.22	8277.706	*****
26	264.782	272.44	272.22	222.12	228.22	282.64	282.11	212.81	267.22	412.22	202.26	268.22	264.42	270.72	200.62	227.11	211.26	212.72	222.29	244.47	266.1	272.26	228.4	267.11	8222.227	*****
27	242.222	276.22	282.17	282.82	202.29	288.26	277.76	202.82	212.22	412.22	221.22	222.17	620.72	601.72	222.27	407.49	226.21	262.42	220.8	220.62	266.16	278.26	272	262.42	8492.700	*****
28	242.224	246.26	242.29	222.27	274.44	272.72	268.29	204.27	218.21	422.84	262.24	620.22	622.12	272.22	241.76	422.7	222.29	241.77	212.22	220.82	244.62	221.22	276.22	282.22	8211.662	*****
29	287.227	282.82	282.44	286.61	287.24	286.82	200.67	217.21	222.82	442.87	212.9	246.8	212.2	210.49	422.62	417.62	228.87	222.42	217.22	262.61	264.6	262.22	272.12	222.22	8246.222	*****
30	282.424	282.22	286.29	227.21	286.21	201.82	201.22	221.29	266.29	426.22	221.21	222.69	217.22	226.11	442.29	424.22	222.72	284.26	222.21	267.61	227.24	222.69	282.79	282.19	8206.190	*****
31	302.622	221.22	224.16	228.82	200.22	282.22	202.22	241.72	240.74	442.66	221.12	627.72	622.22	621.7	614.72	202.22	226.2	222.82	270.11	222.22	291.4	280.24	287.17		8072.222	*****
Avg	229.221	281.612	284.822	286.249	282.227	288.274	200.422	218.127	221.229	418.624	422.222	227.622	246.221	222.622	422.221	410.212	224.422	264.222	246.827	262.462	277.242	222.221	226.166	222.222	8406.222	*****

รูปที่ 66 รังสีคลื่นยาวขาขึ้นในหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตรรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน (สีแดง) รวมรายวัน (สีน้ำเงิน)

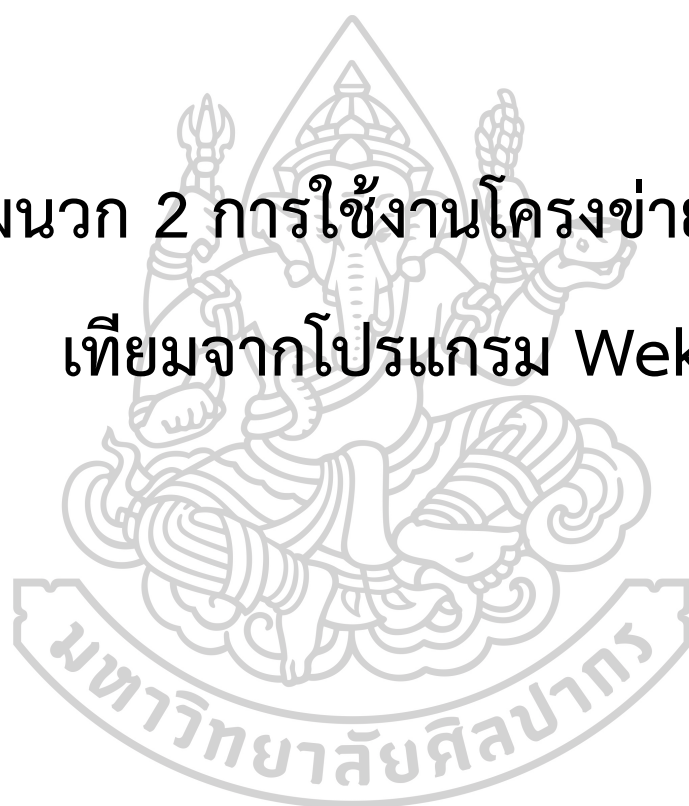


เมื่อได้องค์ประกอบของรังสีทั้ง 4 ส่วนครบแล้ว (รังสีคลื่นสั้นกลางและขาขึ้น และ รังสีคลื่นยาวกลางและขาขึ้น) นำค่ารังสีกลางลบด้วยรังสีขาขึ้นทั้งรังสีคลื่นสั้นและรังสีคลื่นยาวจากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้มารวมกันจะได้เป็นค่ารังสีสุทธิ

		Net radiation (W/m <sup>2</sup> )																									
MONTH :		JANUARY										STATION :		NAKHON PATHOM													
YEAR :		2020																									
Date	0-1	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	367hm	
1													322.17	322.11	327.57	197.09	64.002	-12.992	-19.273	-12.132	-17.523	-19.3	-12.095	-14.954	*****	3.315	
2	-14.97	-17.094	-19.217	-11.44	-17.925	-11.791	-13.996	11227	14436	302.43	370.62	329.42	-421.47	-403.42	293.2	213.44	149.17	-44623	-13.542	-10.212	-10.227	-10.122	-19.217	-12.729	*****	3.442	
3	-14.772	-15.734	-14.24	-13.239	-14.631	-13.334	-12.923	-11.722	136.41	237.2	322.53	322.53	-402.21	-419.24	342.9	226.53	113.92	21.623	-12.627	-19.943	-19.029	-19.293	-12.492	-12.706	*****	7.321	
4	-16.942	-14.331	-12.342	-11.642	-11.231	-14.266	-10.542	22.61	127.94	242.24	340.22	-419.23	392.97	317.42	339.61	249.92	112.2	-12.474	-14.692	-14.011	-11.642	-19.914	-17.347	-12.612	*****	8.218	
5	-12.242	-14.029	-12.017	-11.26	-14.172	-12.214	-14.142	13.437	112.22	262.44	322.9	446.47	442.52	-425.42	372.23	246.61	134.2	33.574	-12.073	-12.39	-12.81	-12.623	-17.521	-17.272	*****	9.235	
6	-17.911	-17.249	-12.273	-17.002	-14.049	-14.024	-12.722	22.322	122.72	240.43	340.44	412	-412.34	-421.47	241.24	244.61	114.29	-14.442	-12.426	-12.91	-12.579	-19.92	-12.212	-17.222	*****	8.578	
7	-17.721	-12.421	-11.474	-12.927	-12.021	-14.214	-12.92	24.627	112.62	241.46	344.22	-412.22	-402.27	-422.22	322.19	241.44	102.11	-12.422	-12.422	-12.222	-10.022	-10.012	-11.102	-17.24	*****	8.412	
8	-17.422	-19.192	-17.104	-12.174	-17.16	-12.202	-17.422	19.124	97.424	232.2	322.97	409.23	-402.22	342.22	314.21	202.14	92.004	-12.274	-12.127	-12.279	-12.579	-14.904	-14.207	-14.227	*****	7.622	
9	-11.926	-12.071	-12.272	-12.142	-12.222	-14.224	-12.22	22.692	109.22	222.02	342.27	-419.2	-422.22	-422.99	271.24	242.22	122.94	-12.022	-14.02	-19.407	-17.422	-17.202	-17.294	-12.022	*****	8.910	
10	-10.172	-14.322	-14.216	-12.421	-19.091	-12.92	-14.799	11.724	90.692	216.11	210.07	322.42	216.22	222.92	222.46	174.24	99.212	-17.702	-17.112	-12.912	-12.227	-11.229	-19.227	-14.142	*****	6.627	
11	-11.117	-14.046	-19.076	-12.642	-12.244	-11.042	-19.766	21.419	99.221	122.12	222.24	241.22	271.22	342.27	246.74	192.44	62.002	-12.242	-12.69	-12.222	-19.221	-10.922	-12.047	-14.104	*****	6.621	
12	-14.294	-12.474	-17.944	-12.74	-12.422	-10.422	-10.229	22.202	12.147	222.72	222.12	-422.11	-421.1	-421.94	222.22	222.22	142.22	24.921	-12.222	-12.244	-12.47	-12.221	-12.221	-12.221	*****	8.247	
13	-19.222	-11.427	-14.016	-12.202	-11.222	-11.222	-19.629	22.222	22.221	71.721	22.247	246.74	-496.74	-422.22	322.27	222.27	107.4	14.472	-17.222	-14.979	-12.642	-12.227	-12.12	-17.492	*****	8.329	
14	-12.122	-12.922	-12.922	-12.922	-12.922	-12.922	-12.922	-12.922	-12.922	-12.922	-12.922	-12.922	-12.922	-12.922	-12.922	-12.922	-12.922	-12.922	-12.922	-12.922	-12.922	-12.922	-12.922	-12.922	-12.922	*****	8.979
15	-12.172	-12.222	-11.729	-12.024	-12.001	-12.072	-12.221	22.272	124.22	222.29	222.22	442.26	-422.22	-421.22	322.11	242.77	111.64	-12.422	-12.074	-12.224	-14.724	-12.222	-12.222	-12.622	*****	8.770	
16	-12.422	-12.204	-17.422	-14.027	-12.422	-11.222	-19.916	22.727	102.41	22.721	222.24	412.91	-422.22	442.22	242.24	222.14	112.94	-12.922	-12.202	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	*****	2.492	
17	-12.296	-12.771	-12.216	-12.229	-14.222	-14.222	-12.229	22.642	112.44	222.17	342.9	-422.22	-422.22	-422.22	222.22	222.22	104.9	-12.669	-12.224	-12.921	-12.422	-12.422	-12.422	-12.214	*****	8.260	
18	-14.241	-12.272	-12.729	-11.192	-12.229	-12.724	-12.221	12.242	92.229	226.92	212.27	222.22	272.92	277.41	222.22	124.2	21.949	6.2242	-12.422	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	*****	6.322
19	-11.926	-17.192	-12.004	-14.072	-11.244	-11.621	-12.111	20.07	92.142	209.27	219.27	392.49	272.22	322.22	242.29	242.29	109.22	2.9242	-19.094	-12.224	-14.224	-12.272	-14.722	-12.444	*****	7.292	
20	-17.171	-12.492	-14.441	-12.01	-12.224	-14.229	-12.927	12.424	96.922	212.42	222.22	-422.22	-422.22	-422.22	222.22	222.22	222.22	222.22	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	*****	7.290
21	-12.279	-12.729	-12.229	-12.642	-12.924	-10.911	-19.492	22.24	104.41	242.02	227.04	346.47	324.22	422.22	242.67	212.21	124.14	27.242	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	*****	7.624
22	-12.422	-17.022	-12.274	-10.22	-11.142	-12.196	-12.224	20.401	92.722	244.91	242.22	322.06	244.91	-424.4	277.24	222.24	117.47	2.0001	-12.224	-12.222	-14.912	-12.222	-12.496	-12.222	*****	8.404	
23	-12.222	-12.702	-12.212	-14.104	-12.141	-12.991	-12.022	24.747	97.229	240.79	242.22	442.22	442.91	-422.22	222.22	222.22	122.42	22.746	-12.9	-14.229	-14.722	-12.002	-12.222	-12.472	*****	8.693	
24	-14.229	-12.722	-12.219	-14.022	-12.221	-11.242	-10.792	29.142	102.02	222.22	222.24	447.12	-442.42	-446.9	-422.42	224.4	122.22	9.1242	-12.21	-12.629	-12.49	-12.222	-12.606	-12.72	*****	9.229	
25	-12.727	-12.242	-14.222	-12.644	-12.112	-14.406	-12.126	10.014	92.241	242.22	227.96	-424.42	227.04	222.24	207.11	222.71	142.27	12.222	-12.999	-12.222	-12.247	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	*****	7.214
26	-12.79	-11.216	-12.714	-12.714	-12.442	-14.714	-12.126	27.929	112.22	244.42	222.24	422.22	422.22	222.22	222.22	222.22	222.22	222.22	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	*****	9.474
27	-12.224	-12.242	-12.222	-14.442	-12.729	-12.222	-12.222	-12.222	22.222	22.222	22.222	-422.22	-422.22	-422.22	222.22	222.22	222.22	222.22	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	*****	9.473
28	-11.416	-14.407	-12.214	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	*****	8.702
29	-12.224	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	*****	8.902
30	-14.442	-14.472	-12.672	-11.921	-14.272	-12.446	-12.247	20.242	102.22	249.24	427.22	-411.2	222.22	446.92	249.22	222.22	222.22	222.22	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	-12.222	*****	8.128
31	-12.102	-12.042	-12.122	-12.622	-12.222	-14.229	-12.122	11.402	99.272	224.71	219.12	401.72	442.97	422.42	222.24	272	141.92	12.224	-12.222	-12.222	-14.412	-12.222	-12.222	-12.222	*****	8.212	
Avg	-12.121	-14.229	-12.177	-12.122	-12.022	-12.249	-12.092	12.274	102.92	229.44	222.4	-412.21	-412.74	-414.066	249.274	244.292	114.442	2.226	-12.272	-12.242	-12.222	-14.022	-14.222	-12.421	*****	8.202	

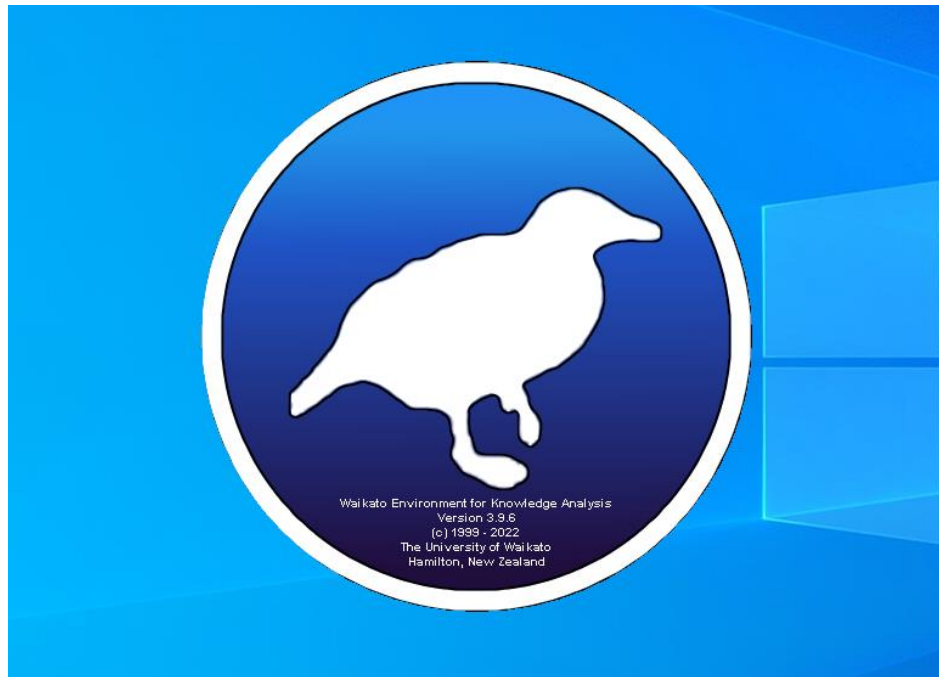
รูปที่ 67 รังสีสุทธิในหน่วยวัตต์ต่อตารางเมตร รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน (สีแดง) รวมรายวัน (สีน้ำเงิน)

ภาคผนวก 2 การใช้งานโครงข่ายประสาท  
เทียมจากโปรแกรม Weka





1. เปิดโปรแกรม Weka และ กดเลือกตัวเลือก Explorer ในแถบเมนู Application

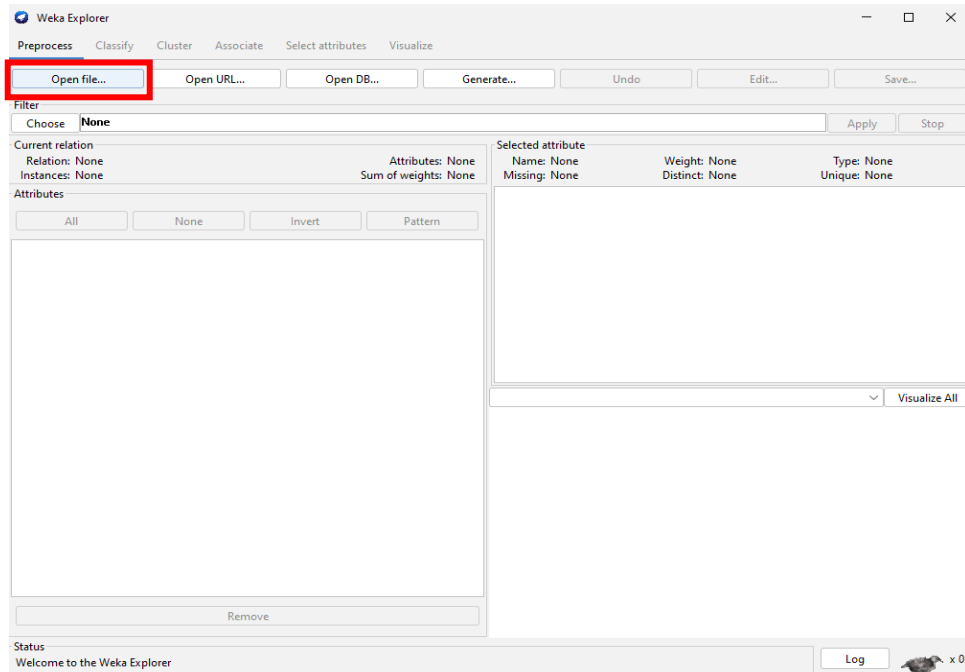


รูปที่ 68 โปรแกรม Weka

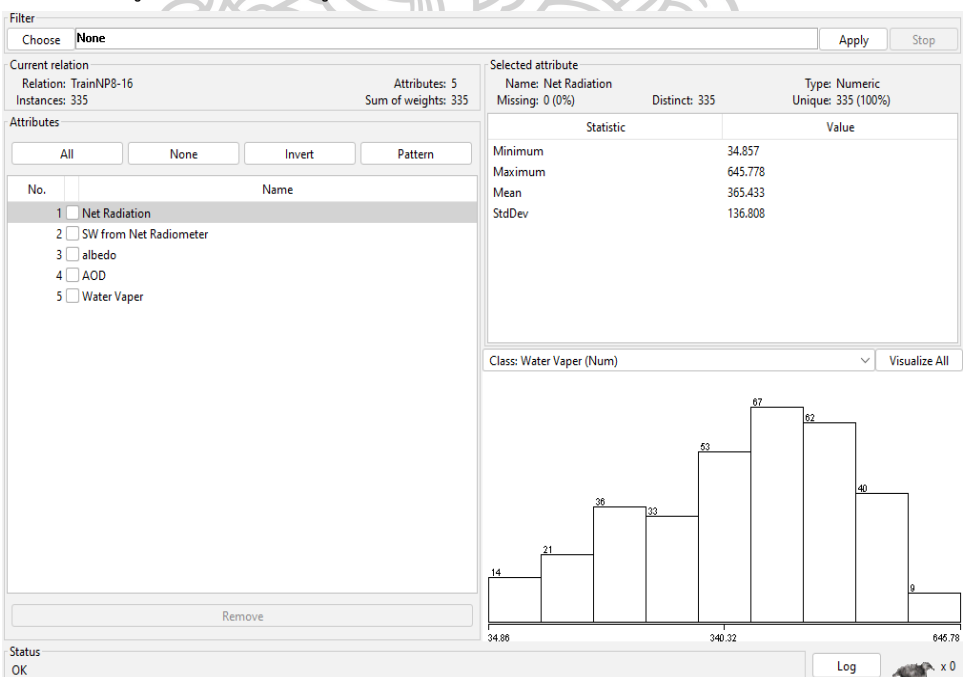


รูปที่ 69 คำสั่ง Explorer ในแถบ Application

2. ปรากฏหน้าต่าง Explorer จากนั้นเลือกเมนู open file เพื่อเลือกไฟล์อินพุตสำหรับการฝึกสอน

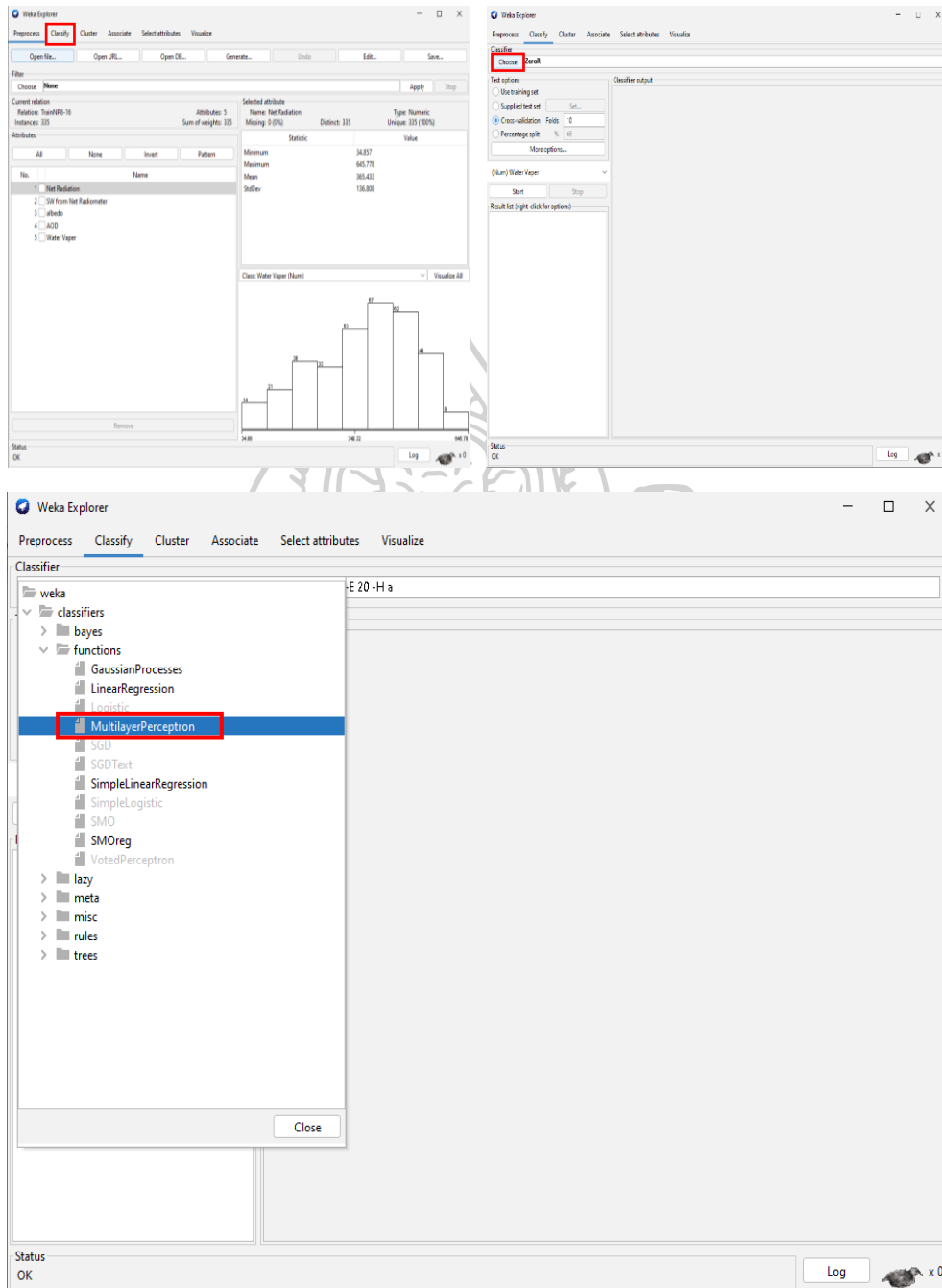


รูปที่ 70 เลือกเมนู open file เพื่อเปิดไฟล์ที่ใช้สำหรับการฝึกสอน



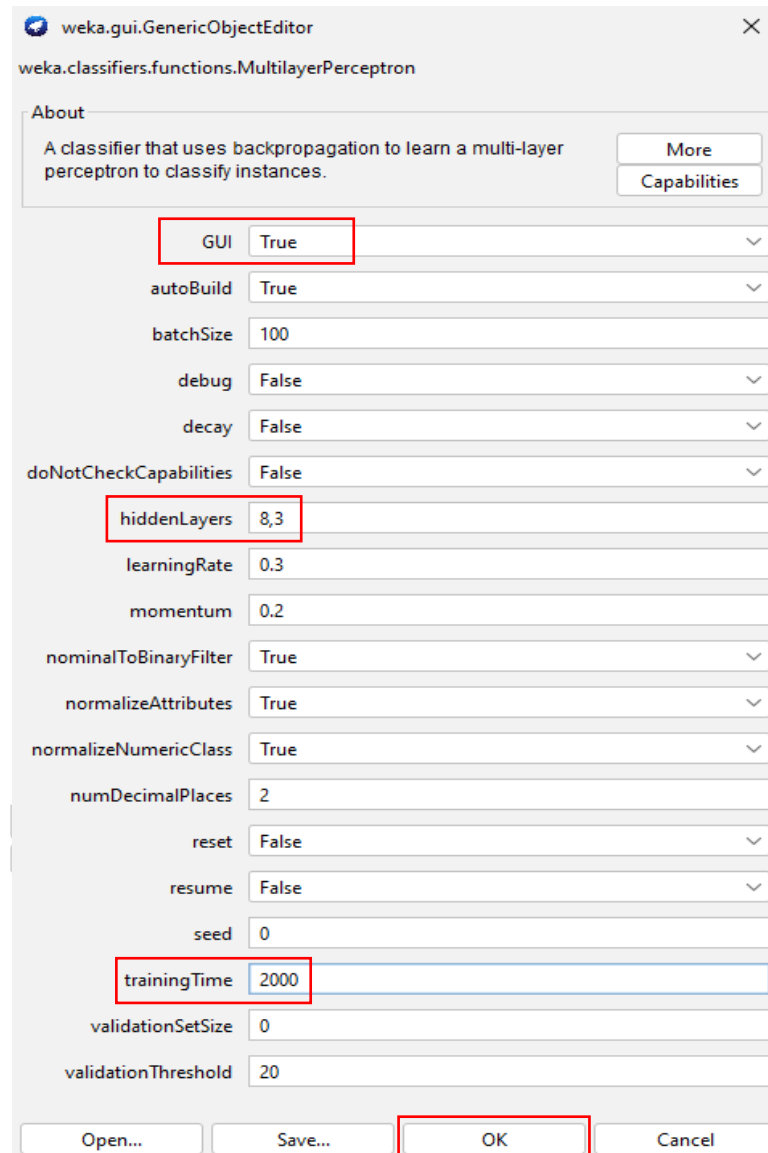
รูปที่ 71 หน้าต่างที่เพิ่มไฟล์อินพุตในการฝึกสอนลงไปแล้ว

3. เลือกคำสั่ง classify ในแถบเมนูบาร์จะปรากฏหน้าต่างการทำงานของคำสั่ง classify เลือกเมนู choose และเลือกฟังก์ชัน (function) ในการทำงานเป็นฟังก์ชัน Multilayer Perceptron



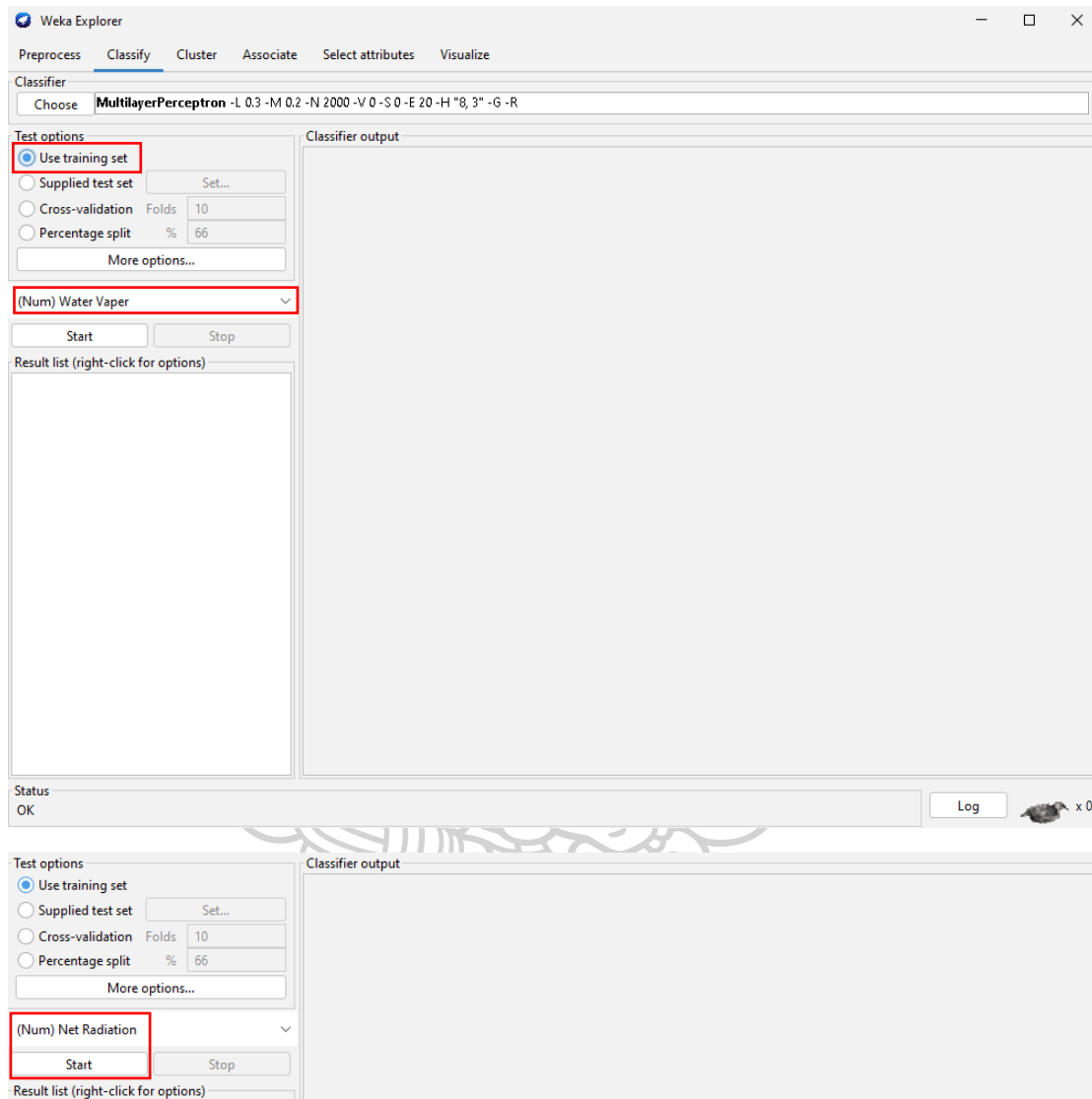
รูปที่ 72 เลือกฟังก์ชันในการวิเคราะห์เป็น Multilayer Perceptron

4. คลิกที่ช่องของฟังก์ชัน Multilayer Perceptron จะปรากฏหน้าต่าง GenericObjectEditor เพื่อใช้ในการปรับแก้การฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียม ตั้งค่าคำสั่ง GUI เป็น True hiddenlayer เป็น 8,3 และ Training Time ตามจำนวนรอบที่ต้องการฝึกสอน จากนั้นคลิกที่ OK



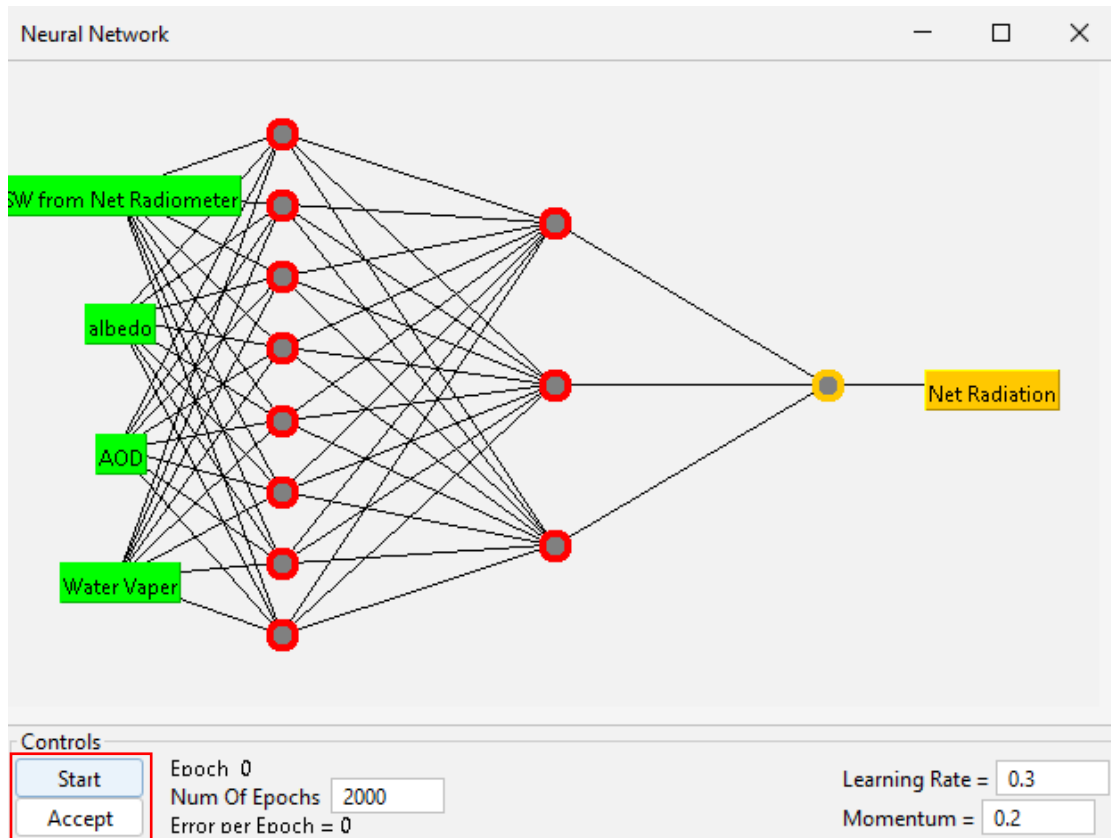
รูปที่ 73 การปรับค่าคำสั่งในหน้าต่าง GenericObjectEditor

5. เลือกคำสั่ง Use training set เพื่อให้ข้อมูลที่ยื่นป้อนเข้าไปเป็นข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนคลิกที่แถบ (Num) Water Vapor เปลี่ยนจาก Water Vapor เป็นตัวแปรเอาท์พุทที่เราต้องการ จากนั้นกด Start



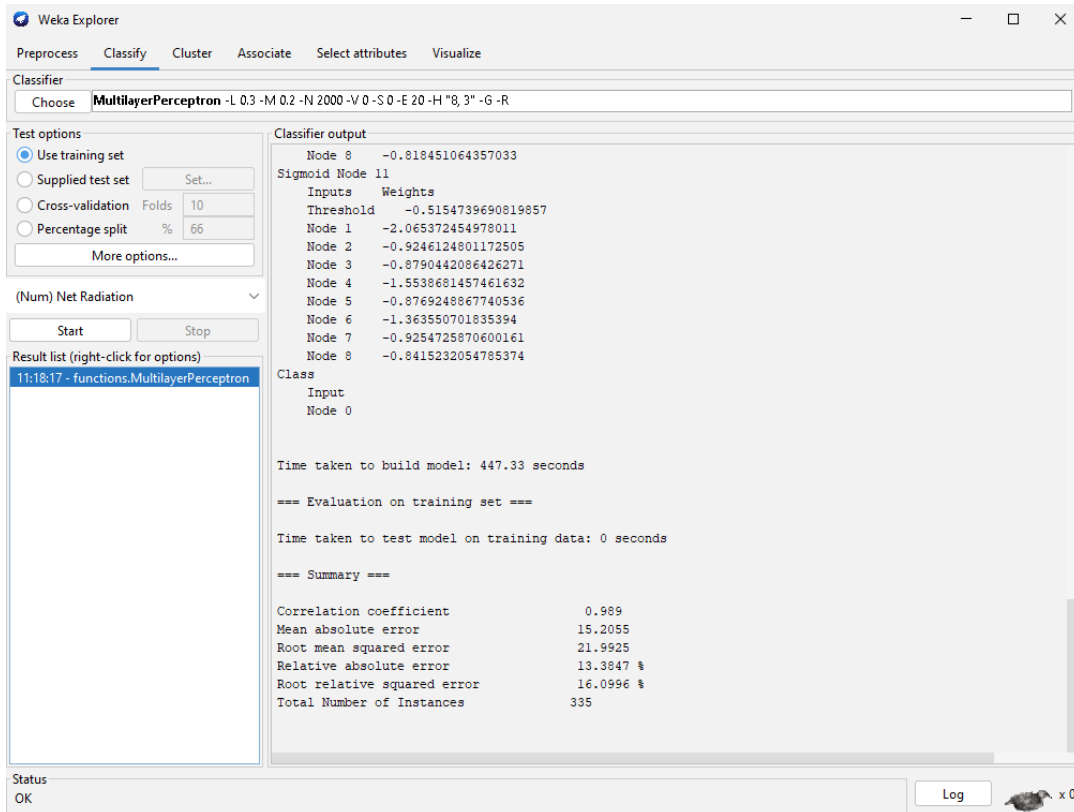
รูปที่ 74 การเลือกคำสั่ง Use training set เพื่อให้ข้อมูลที่ยื่นป้อนเข้าไปนั้นเป็นข้อมูลฝึกสอน

6. จากนั้นจะปรากฏหน้าต่าง Neural Network แสดงอินพุตที่เราใส่เข้าไป จำนวนชั้น hidden layer และจำนวนโหนดในแต่ละชั้นรวมไปถึงตัวแปรเอาต์พุตของแบบจำลอง จากนั้นกด Start เพื่อเริ่มการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเมื่อโปรแกรม Run เสร็จ กดที่คำสั่ง Accept



รูปที่ 75 รูปแบบการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม

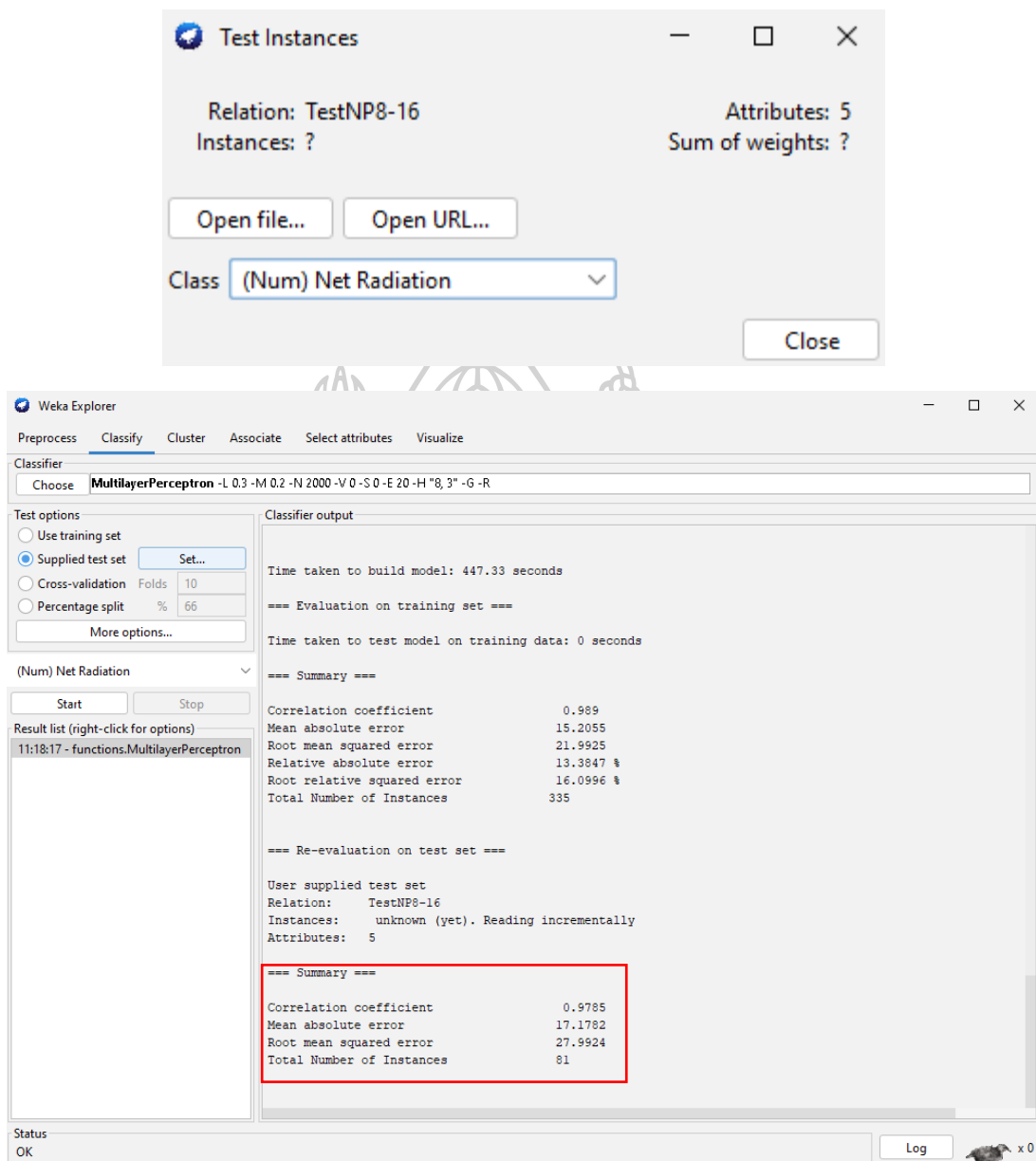
7. จากนั้นหน้าต่างต่าง Classify จะปรากฏ Classifier output ที่บอกถึงค่าความคลาดเคลื่อนจากแบบจำลอง เลือกคำสั่ง Supplied test set เพื่อเรียกไฟล์ในการทดสอบเข้ามาในโปรแกรม



รูปที่ 76 การเรียกไฟล์ที่ใช้สำหรับการทดสอบเข้าโปรแกรม

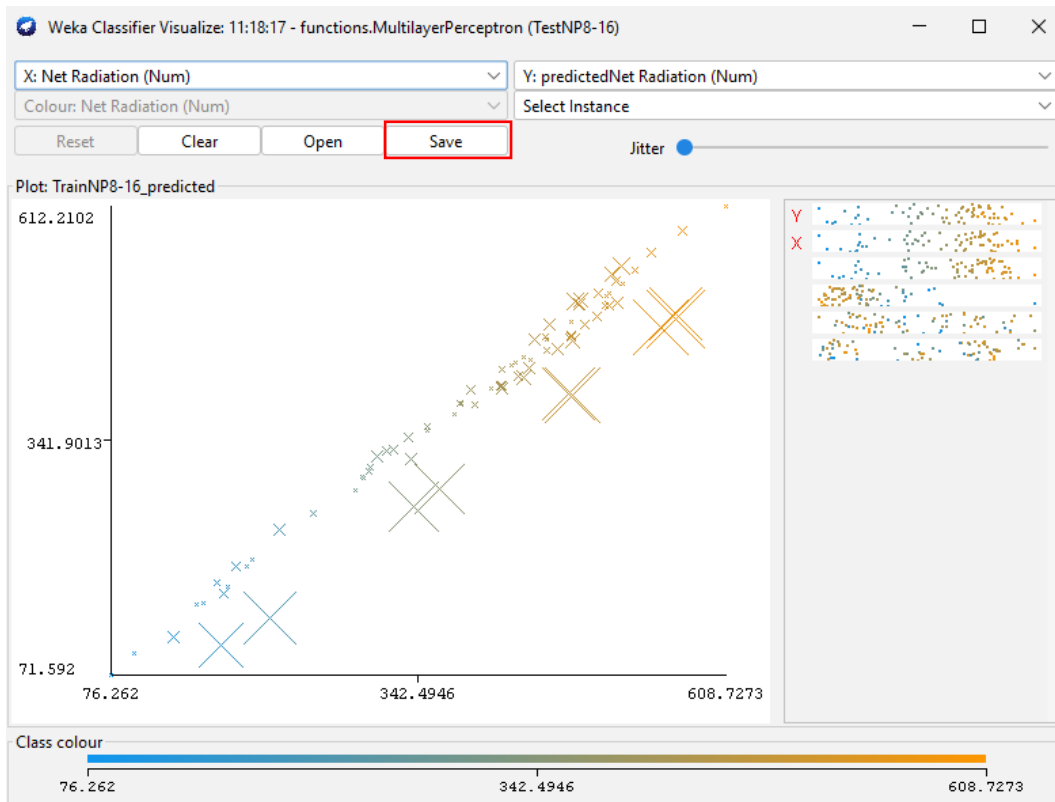


8. เลือกแถบ Class ให้เป็นเอาท์พุทที่เราต้องการจากนั้นกด Close คลิกขวาที่คำสั่ง functions.MultilayerPerceptron เลือก Re-evaluate model จะปรากฏค่าความคลาดเคลื่อน



รูปที่ 77 หน้าต่างแสดงค่า Error

9. คลิกขวาที่ฟังก์ชัน `functions.MultilayerPerceptron` เลือก `Visualize classifies error` จะปรากฏกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าจากแบบจำลอง จากนั้นทำการกด `Save` เพื่อบันทึกไฟล์ที่ได้จากการประมาณค่า



รูปที่ 78 หน้าต่างแสดงกราฟการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัด

## รายการอ้างอิง

- Aix Marseille Université. (2020). Estimation paramétrique de la réponse impulsionnelle et déconvolution.
- Alados, I., Foyo-Moreno, I., Olmo, F., & Alados-Arboledas, L. (2003). Relationship between net radiation and solar radiation for semi-arid shrub-land. *Agricultural and Forest Meteorology*, 116(3-4), 221-227.
- Alibaba. (1999-2022). Yokogawa DX2030. Retrieved from <https://thai.alibaba.com/p-detail/Yokogawa-60729764106.html?spm=a2700.7724857.0.0.1d4359e9m6Dd9s>
- Benjamin. (2009). Path of the earth. Retrieved from [https://uk.m.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D1%80%D0%B1%D1%96%D1%82%D0%B0\\_%D0%97%D0%B5%D0%BC%D0%BB%D1%96](https://uk.m.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D1%80%D0%B1%D1%96%D1%82%D0%B0_%D0%97%D0%B5%D0%BC%D0%BB%D1%96)
- Chegg. (2003). Scattering of molecular. Retrieved from <https://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/1-difference-2-arrows-point-different-direction-3-arrows-long-short-length-q73997304>
- 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.
- Gay, L. W. (1971). The regression of net radiation upon solar radiation. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B*, 19(1), 1-14.
- Harvesting the Coldness of the Universe. (2019). Radiative Cooling. Retrieved from [https://www.optica-opn.org/home/articles/volume\\_30/november\\_2019/features/radiative\\_cooling\\_harvesting\\_the\\_coldness\\_of\\_the\\_u/](https://www.optica-opn.org/home/articles/volume_30/november_2019/features/radiative_cooling_harvesting_the_coldness_of_the_u/)
- Hashim. (2016). Evaluation the effects of Industrial CO2 Emission on Climate Changes in Irag. doi:10.13140/RG.2.2.12938.41927
- Herrarte, B. G. (2022). Evapotranspiration, what is it exactly? Retrieved from <https://www.hortidaily.com/article/9222748/evapotranspiration-what-is-it-exactly/>
- Hu, B., Wang, Y., & Liu, G. (2012). Relationship between net radiation and broadband solar radiation in the Tibetan plateau. *Advances in Atmospheric Sciences*, 29(1),

135-143.

Kaminsky, K. Z., & Dubayah, R. (1997). Estimation of surface net radiation in the boreal forest and northern prairie from shortwave flux measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D24), 29707-29716.

Kipp&Zonen. (2015). Net radiometer CNR4 In *Instruction Manual*.

Limhoon, P., & Bualert, S. (2013). Variation of net radiation and solar spectrum in Thailand. *International Journal of Environmental Science and Development*, 4(2), 107.

McSeveney, A. (2021). WEKA. Retrieved from <https://www.weka.io/>

Ojo, O. S., Adeyemi, B., & Oluleye, D. O. (2021). Artificial neural network models for prediction of net radiation over a tropical region. *Neural Computing and Applications*, 33(12), 6865-6877.

Rhino, G. (2016). The sun's observed position. Retrieved from <http://www.greenrhinoenergy.com/solar/radiation/geometry.php>

SECONDAIRE, Q. S. A. (2019). UN OURAGAN DE STATISTIQUES. *Communication scientifique*, 58.

SERC. (2015). Outgoing solar radiation. Retrieved from [https://serc.carleton.edu/download/images/55495/outgoing\\_solar\\_radiation.png](https://serc.carleton.edu/download/images/55495/outgoing_solar_radiation.png)

Shaw, R. (1956). A comparison of solar radiation and net radiation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 37(5), 205-206.

STKE. (2018). อัสปีโต. Retrieved from <https://www.stkc.go.th/stiarticle/%E0%B8%AD%E0%B8%B1%E0%B8%A5%E0%B8%9A%E0%B8%B5%E0%B9%82%E0%B8%94>

Strathmore University. (2018). SOLAR TRAINING MANUAL. *Energy Research Centre*.

THERMO RIKO CO., L. (2022). Introduction to infrared radiation. Retrieved from <https://www.thermo-r.com/introduction-to-infrared-radiation/>

TOYOCEM. (2016). What is Electromagnetic Wave Shield? Retrieved from <https://www.toyo-chem.com/en/products/electronics/column/emishield.html>

Usna.edu. (2020). Final Test Summer. Retrieved from [https://www.usna.edu/Users/oceano/pguth/website/so431/quiz/final\\_exam\\_summer\\_2020/so431\\_exam\\_finale\\_summr\\_2020\\_answers.htm](https://www.usna.edu/Users/oceano/pguth/website/so431/quiz/final_exam_summer_2020/so431_exam_finale_summr_2020_answers.htm)

Voices, E. (2021). July 2021 Earth's hottest month on record. Retrieved from

<https://earthsky.org/earth/july-2021-earths-hottest-month-on-record/>

เสริม จันทร์ฉาย. (2560). รั้งสื้ออาทิตย์ (พิมพ์ครั้งที่ 2 ed.). นครปฐม: หน่วยวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.

ไกรศักดิ์ เกษร. (2564). โครงข่ายประสาทเทียมอัจฉริยะ (Artificial Neuron Network). In *The art of DATA science for the beginners using Python and Azure ML*.





## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ชุตินันทร์ เพิ่มวงศ์
วัน เดือน ปี เกิด	29 พฤษภาคม 2541
สถานที่เกิด	สุโขทัย
วุฒิการศึกษา	มัธยมศึกษาตอนปลาย : โรงเรียนสุโขทัยวิทยาคม อุดมศึกษา : มหาวิทยาลัยศิลปากร (วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์)
ที่อยู่ปัจจุบัน	391 หมู่ 11 ต. บ้านสวน อ. เมืองสุโขทัย จ. สุโขทัย 64000

