



การพัฒนาแบบจำลองทางสถิติสำหรับแปลงค่ารังสีกระจายจากท้องฟ้าบนพื้นราบให้เป็นค่าบนพื้น  
เอียง โดยใช้ข้อมูลรังสีอาทิตย์จาก 4 สถานี ในประเทศไทย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การพัฒนาแบบจำลองทางสถิติสำหรับแปลงค่ารังสีกระจายจากท้องฟ้าบนพื้นราบให้เป็น  
ค่าบนพื้นเอียง โดยใช้ข้อมูลรังสีอาทิตย์จาก 4 สถานี ในประเทศไทย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2561

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

DEVELOPMENT OF STATISTICAL MODELS FOR CONVERTING VALUES OF  
SOLAR DIFFUSE RADIATION FROM SKY ON HORIZONTAL PLANE TO THOSE  
OF DIFFUSE RADIATION ON INCLINED PLANES USING SOLAR RADIATION DATA  
FROM 4 STATIONS IN THAILAND



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for Master of Science (PHYSICS)  
Department of PHYSICS  
Graduate School, Silpakorn University  
Academic Year 2018  
Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ	การพัฒนาแบบจำลองทางสถิติสำหรับแปลงค่ารังสีกระจายจาก ท้องฟ้าบนพื้นราบให้เป็นค่าบนพื้นเอียง โดยใช้ข้อมูลรังสีอาทิตย์ จาก 4 สถานี ในประเทศไทย
โดย	กัญญ์วรา มีอินธา
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย

---

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

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

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อีสระ มะศิริ )

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

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รุ่งรัตน์ วัฒนกุล )

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิลาวรรณ คำหาญ )

59306201 : ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทบัณฑิต

นางสาว กัญญ์วรา มีอินธา: การพัฒนาแบบจำลองทางสถิติสำหรับแปลงค่ารังสีกระจายจากท้องฟ้าบนพื้นราบให้เป็นค่าบนพื้นเอียง โดยใช้ข้อมูลรังสีอาทิตย์จาก 4 สถานี ในประเทศไทย  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลองสำหรับแปลงความเข้มรังสีกระจายบนพื้นราบให้เป็นค่าบนพื้นเอียงที่มุมเอียงในสภาพท้องฟ้าต่างๆ โดยผู้วิจัยได้ทำการหาค่าความเข้มรังสีกระจายบนพื้นเอียงจากการวัดรังสีอาทิตย์ที่สถานีนครปฐม ( $13.82^{\circ}\text{N}$ ,  $100.04^{\circ}\text{E}$ ) และทำการหาค่าความเข้มรังสีกระจายบนพื้นราบจากการวัดด้วยไพราโนมิเตอร์ ซึ่งติดตั้งวงแหวนบังรังสีตรงที่สถานีเดียวกัน จากนั้นจะหาความสัมพันธ์ของรังสีกระจายบนพื้นเอียงและบนพื้นราบในรูปของสมการสหสัมพันธ์ ซึ่งสามารถใช้ในการคำนวณรังสีกระจายบนพื้นเอียงภายใต้สภาพท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด และท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับกรณีท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน ผู้วิจัยจะสร้างแบบจำลองโดยการรวมแบบจำลองของกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆและกรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด โดยใช้ปริมาณเมฆเป็นตัวถ่วงน้ำหนัก หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองที่ได้กับข้อมูลอิสระ ซึ่งวัดได้ที่สถานีนครปฐม ( $13.82^{\circ}\text{N}$ ,  $100.04^{\circ}\text{E}$ ) สถานีเชียงใหม่ ( $18.78^{\circ}\text{N}$ ,  $98.98^{\circ}\text{E}$ ) สถานีอุบลราชธานี ( $15.25^{\circ}\text{N}$ ,  $104.87^{\circ}\text{E}$ ) และสถานีสงขลา ( $7.20^{\circ}\text{N}$ ,  $100.60^{\circ}\text{E}$ ) ผลที่ได้พบว่าแบบจำลองให้ความละเอียดถูกต้องค่อนข้างดี สุดท้ายผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลองอื่นๆ และพบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นส่วนใหญ่มีสมรรถนะที่ดีกว่าแบบจำลองอื่นๆ ที่นำมาเปรียบเทียบ

59306201 : Major (PHYSICS)

MISS KANWARA MEEINTHA : DEVELOPMENT OF STATISTICAL MODELS FOR CONVERTING VALUES OF SOLAR DIFFUSE RADIATION FROM SKY ON HORIZONTAL PLANE TO THOSE OF DIFFUSE RADIATION ON INCLINED PLANES USING SOLAR RADIATION DATA FROM 4 STATIONS IN THAILAND THESIS ADVISOR : PROFESSOR SERM JANJAI, Ph.D.

In this work, models for converting values of diffuse solar radiation on horizontal plane into those on tilted planes with various tilted angles and sky conditions. Values of diffuse solar radiation on tilted plans were derived from solar radiation measurements at Nakhon Pathom station ( $13.82^{\circ}\text{N}$ ,  $100.04^{\circ}\text{E}$ ), while values of diffuse solar radiation on horizontal plane at the same station were obtained from the measurement using a pyranometer equipped with a shade ring. Then the values of the radiation on tilted planes were correlated with the values of solar radiation on the horizontal plane to obtain statistical models under overcast sky and clear sky. For partly cloudy sky, the models were obtained from linear combination of the models under overcast sky and the models for clear sky using cloud cover as a weighting factor. The performance of the models developed in this work was tested against independent solar radiation data obtained from the measurements at Nakhon Pathom station ( $13.82^{\circ}\text{N}$ ,  $100.04^{\circ}\text{E}$ ), Chiang Mai station ( $18.78^{\circ}\text{N}$ ,  $98.98^{\circ}\text{E}$ ), Ubon Ratchathani station ( $15.25^{\circ}\text{N}$ ,  $104.87^{\circ}\text{E}$ ), and Songkla station ( $7.20^{\circ}\text{N}$ ,  $100.60^{\circ}\text{E}$ ). It was found that the models give reasonable accuracy. Finally, the accuracy of the models compared favorably with most existing models

## กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษาระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต ผู้วิจัยได้รับทุนผู้ช่วยวิจัยและทุนการศึกษาจาก หอปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.เสริม จันทร์ฉาย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำแนะนำทางด้านวิชาการ พร้อมทั้งจัดหาทุนวิจัย เครื่องมือ และข้อมูลสำหรับการดำเนินงานในงานวิจัยนี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รุ่งรัตน์ วัตตาล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ เกี่ยวกับงานวิจัย

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ทุกคนและนักวิจัยของหอปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้คำปรึกษาในเรื่องต่างๆ และช่วยอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ คุณประโยชน์ที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยมอบให้กับบิดาและมารดา รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่าน เพื่อตอบแทนพระคุณที่ได้ช่วยให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการศึกษา



กัญญ์วรา มีอินธา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
ตาราง.....	ฌ
รูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 แหล่งกำเนิดรังสีอาทิตย์.....	3
2.2 สเปกตรัมของรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก .....	5
2.3 สมบัติทางเรขาคณิตของรังสีอาทิตย์.....	6
2.3.1 ทางเดินของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า.....	6
2.4 การบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์.....	6
2.4.1 ระบบที่ใช้ระนาบในแนวระดับอ้างอิง (horizontal system).....	7
2.4.2 ระบบที่ใช้ระนาบศูนย์สูตรอ้างอิง (equatorial system).....	8
2.5 มุมตกกระทบของรังสีอาทิตย์บนระนาบต่างๆ .....	10
2.6 มุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ขึ้นและมุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตกบนระนาบต่างๆ.....	12
2.7 รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกบนระนาบในแนวระดับ.....	15



2.7.1	รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกบนระนาบในแนวระดับรายชั่วโมง .....	15
2.7	รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกบนระนาบในแนวระดับรายวัน .....	16
2.8	รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกบนระนาบเอียงที่หันไปทางทิศใต้ .....	16
2.8.1	รังสีอาทิตย์รายชั่วโมง .....	16
2.8.2	รังสีอาทิตย์รายวัน .....	17
2.9	รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกบนระนาบเอียงที่หันไปทางทิศใดๆ .....	17
2.9.1	รังสีอาทิตย์รายชั่วโมง .....	17
2.9.2	รังสีอาทิตย์รายวัน .....	18
2.10	แพคเตอร์สำหรับแปลงค่ารังสีนอกบรรยากาศโลกบนระนาบในแนวระดับให้เป็นค่าบน ระนาบเอียง .....	19
2.11	การแปลงค่ารังสีบนระนาบในแนวระดับให้เป็นค่ารังสีบนระนาบเอียง .....	20
2.11.1	รังสีรายชั่วโมง .....	20
บทที่ 3	วิธีการวิจัยและผลที่ได้ .....	23
3.1	เครื่องมือวัดรังสีอาทิตย์ .....	23
3.2	การพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียง .....	32
3.2.1	การเตรียมข้อมูล .....	32
3.2.2	การวิเคราะห์ข้อมูล .....	35
3.2.3	สรุปแบบจำลอง .....	47
3.2.4	การทดสอบแบบจำลอง .....	49
3.2.5	การเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลองอื่นๆ .....	87
บทที่ 4	สรุป .....	96
	รายการอ้างอิง .....	98
	ประวัติผู้เขียน .....	101

## ตาราง

## หน้า

ตารางที่ 1 ช่วงความยาวคลื่นและสัดส่วนของพลังงานในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ที่สำคัญเมื่อเทียบกับพลังงานทั้งหมดของรังสีที่แผ่จากดวงอาทิตย์ (เสริม จันทรฉาย, 2560) .....	4
ตารางที่ 2 แสดงช่วงเวลาของข้อมูลที่ใช้สำหรับสร้างแบบจำลอง (ใช้ข้อมูลจากสถานีนครปฐม) ...	33
ตารางที่ 3 แสดงช่วงเวลาของข้อมูลที่ใช้ทดสอบแบบจำลอง (ใช้ข้อมูลทั้ง 4 สถานี).....	34
ตารางที่ 4 แบบจำลองสำหรับคำนวณค่ารังสีอาทิตย์บนพื้นเอียง.....	48
ตารางที่ 5 แสดงผลความคลาดเคลื่อนของค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงในรูปแบบ RMSD และค่า MBD กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด.....	66
ตารางที่ 6 แสดงผลความคลาดเคลื่อนของค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงในรูปแบบของ RMSD และค่า MBD กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์ .....	80
ตารางที่ 7 แสดงผลความคลาดเคลื่อนของค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงในรูปแบบของ RMSD และค่า MBD กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่เห็นดวงอาทิตย์ .....	84
ตารางที่ 8 แสดงผลความคลาดเคลื่อนของค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงในรูปแบบของ RMSD และค่า MBD กรณีท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน.....	86
ตารางที่ 9 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลองอื่นๆ ในสภาพท้องฟ้าทั่วไป สถานีนครปฐม .....	88
ตารางที่ 10 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลองอื่นๆ ในสภาพท้องฟ้าทั่วไป สถานีเชียงใหม่.....	89
ตารางที่ 11 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลองอื่นๆ ในสภาพท้องฟ้าทั่วไป สถานีอุบลราชธานี .....	90
ตารางที่ 12 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลองอื่นๆ ในสภาพท้องฟ้าทั่วไป สถานีสงขลา.....	91

## รูป

## หน้า

รูปที่ 1 โครงสร้างของดวงอาทิตย์ .....	4
รูปที่ 2 สเปกตรัมรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกตามมาตรฐาน ASTM E-490 เมื่อ $I_{\lambda}$ คือความเข้มรังสีอาทิตย์และ $\lambda$ คือความยาวคลื่น (กราฟเขียนจากข้อมูลของ (ASTM., 2000)).....	5
รูปที่ 3 วงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์.....	6
รูปที่ 4 การบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์โดยใช้ระนาบในแนวระดับอ้างอิง .....	7
รูปที่ 5 การบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์โดยใช้ศูนย์สูตรอ้างอิง.....	8
รูปที่ 6 มุมตกกระทบ ( $\theta_z$ ) ของรังสีอาทิตย์บนระนาบในแนวระดับ.....	11
รูปที่ 7 ระนาบที่ 1 อยู่ที่ละติจูด $\phi - \beta$ ซึ่งเป็นระนาบในแนวระดับและระนาบที่ 2 ซึ่งอยู่ที่ละติจูด $\phi$ และเอียงทำมุม $\beta$ กับระนาบในแนวระดับ โดย $n_1$ และ $n_2$ เป็นเส้นปกติของระนาบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ.....	11
รูปที่ 8 ระนาบเอียงซึ่งทำมุมกับระนาบในแนวระดับเป็นมุม $\beta$ และหันไปทางทิศใดๆ โดยที่ $\hat{n}$ เป็นเส้นปกติของระนาบเอียง $\hat{S}$ เป็นเวกเตอร์ 1 หน่วยที่ชี้ไปทางดวงอาทิตย์ $\theta$ เป็นมุมตกกระทบของรังสีอาทิตย์บนระนาบเอียง $\varphi$ เป็นมุมอาซิมุทของดวงอาทิตย์และ $\gamma$ เป็นอาซิมุทของระนาบเอียง .....	12
รูปที่ 9 ทางเดินของดวงอาทิตย์บนระนาบในแนวระดับ.....	13
รูปที่ 10 รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนระนาบในแนวระดับ ( $I_o$ ) และบนระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางของรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก ( $I_{on}$ ) .....	16
รูปที่ 11 รังสีอาทิตย์บนระนาบที่หันไปทางทิศใต้.....	17
รูปที่ 12 (ก) รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนระนาบในแนวระดับ ( $I_o$ )      (ข) รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนระนาบเอียงที่หันไปในทิศใดๆ ( $I_{o\beta}$ ) .....	19
รูปที่ 13 รังสีอาทิตย์ที่ระนาบเอียงได้รับ .....	20
รูปที่ 14 เครื่องวัดรังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ทำมุม (ก) $30^\circ$ (ข) $60^\circ$ และ (ค) $90^\circ$ กับพื้นราบ หันไปทางทิศเหนือ ใต้ ตะวันออก และตะวันตก ที่สถานีนครปฐม .....	24

รูปที่ 15 เครื่องวัดรังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ทำมุม (ก) 30° ทิศเหนือ (ข) 60° ทิศเหนือ และ (ค) 90° กับพื้นราบ หันไปทางทิศเหนือ ได้ ตะวันออก และตะวันตก ที่สถานีเชียงใหม่.....	25
รูปที่ 16 เครื่องวัดรังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ทำมุม (ก) 30° (ข) 60° และ (ค) 90° กับพื้นราบที่หันไปทางทิศเหนือ ได้ ตะวันออก และตะวันตก ที่สถานีอุบลราชธานี .....	25
รูปที่ 17 เครื่องวัดรังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ทำมุม (ก) 30° ทิศเหนือ (ข) 60° ทิศเหนือ และ 90° กับพื้นราบ ที่หันไปทางทิศเหนือ ได้ ตะวันออก และตะวันตก ที่สถานีสงขลา.....	26
รูปที่ 18 เครื่องวัดรังสีอาทิตย์ (ก) รังสีตรง (ยี่ห้อ Eppeley รุ่น NIP) (ข) รังสีกระจายบนพื้นราบของสถานีนครปฐม.....	26
รูปที่ 19 เครื่องวัดรังสีอาทิตย์ (ก) รังสีตรง (ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CHP1) (ข) รังสีกระจายบนพื้นราบของสถานีเชียงใหม่.....	26
รูปที่ 20 เครื่องวัดรังสีอาทิตย์ (ก) รังสีตรง (ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CHP1) (ข) รังสีกระจายของสถานีอุบลราชธานี.....	27
รูปที่ 21 เครื่องวัดรังสีอาทิตย์ (ก) รังสีตรง (ยี่ห้อ Eppeley รุ่น NIP) (ข) รังสีกระจายของสถานีสงขลา .....	27
รูปที่ 22 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DX2000 .....	27
รูปที่ 23 เครื่องถ่ายภาพท้องฟ้า (sky view) ยี่ห้อ PREDE (model PSV-100) (ก) สถานีนครปฐม (ข) สถานีเชียงใหม่ (ค) สถานีอุบลราชธานี และ (ง) สถานีสงขลา.....	29
รูปที่ 24 ตัวอย่างภาพถ่ายท้องฟ้า ที่สถานีนครปฐม (ก) กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด วันที่ 5 สิงหาคม 2559 เวลา 16.55 น. (ข) กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ วันที่ 2 มกราคม 2559 เวลา 09.35 น. (ค) กรณีท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน วันที่ 9 มิถุนายน 2559 เวลา 12.35 น.....	30
รูปที่ 25 ตัวอย่างภาพถ่ายท้องฟ้าที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่ (ก) กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด วันที่ 2 เมษายน 2560 เวลา 12.20 น. (ข) กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ วันที่ 5 กุมภาพันธ์ 2560 เวลา 12.20 น. (ค) กรณีท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน วันที่ 18 เมษายน 2560 เวลา 13.00 น.....	30
รูปที่ 26 ตัวอย่างภาพถ่ายท้องฟ้าที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี (ก) กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด วันที่ 10 กันยายน 2558 เวลา 10.50 น. (ข) กรณีท้องฟ้า	

ปราศจากเมฆ วันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2558 เวลา 08.30 น. (ค) กรณีท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน วันที่ 6 กุมภาพันธ์ 2558 เวลา 14.20 น. .... 31

รูปที่ 27 ตัวอย่างภาพถ่ายท้องฟ้า ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ จังหวัดสงขลา (ก) กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด วันที่ 18 มิถุนายน 2561 เวลา 11.00 น. (ข) กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ วันที่ 14 มกราคม 2562 เวลา 15.10 น. (ค) กรณีท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน วันที่ 11 เมษายน 2561 เวลา 11.50 น. .... 31

รูปที่ 28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นราบ ( $I_{dh}$ ) และค่าความเข้มรังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียง ( $I_{dt}$ ) ที่มุมเอียง 30 60 และ 90 องศา กับพื้นราบตามลำดับ..... 36

รูปที่ 29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชันกับมุมของพื้นเอียงสำหรับทุกทิศทาง (ทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออก และทิศตะวันตก) กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด ..... 37

รูปที่ 30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นราบ ( $I_{dh}$ ) กับค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียง ( $I_{dt}$ ) ที่ทำมุม 30 องศา รวมข้อมูลที่ได้จากการวัดทุกทิศทาง กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์..... 39

รูปที่ 31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นราบ ( $I_{dh}$ ) กับค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียง ( $I_{dt}$ ) ที่ทำมุม 60 องศา รวมข้อมูลที่ได้จากการวัดทุกทิศทาง กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์..... 39

รูปที่ 32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นราบ ( $I_{dh}$ ) กับค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียง ( $I_{dt}$ ) ที่ทำมุม 90 องศา รวมข้อมูลที่ได้จากการวัดทุกทิศทาง กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์..... 40

รูปที่ 33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชันกับมุมของพื้นเอียงในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆ กรณีที่พื้นเอียงไม่เห็นดวงอาทิตย์..... 40

รูปที่ 34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีอาทิตย์บนพื้นราบ ( $I_{dh}$ ) และค่ารังสีอาทิตย์บนพื้นเอียง ( $I_{dt}$ ) ที่หันไปทางทิศเหนือ ในกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่พื้นเอียงเห็นดวงอาทิตย์ ..... 42

รูปที่ 35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีอาทิตย์บนพื้นราบ ( $I_{dh}$ ) และค่ารังสีอาทิตย์บนพื้นเอียง ( $I_{dt}$ ) ที่หันไปทางทิศใต้ ในกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่พื้นเอียงเห็นดวงอาทิตย์ 43













## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ข้อมูลรังสีอาทิตย์เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบพลังงานแสงอาทิตย์ต่างๆ เช่น ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยโซลาร์เซลล์ และระบบทำน้ำร้อนพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์ส่วนใหญ่จะติดตั้งอยู่บนพื้นเอียงเพื่อให้ได้รับรังสีรวมทั้งปีได้สูงสุด เราจึงต้องการข้อมูลรังสีอาทิตย์บนพื้นเอียง โดยข้อมูลรังสีอาทิตย์บนพื้นเอียงต่างๆ ที่หันหน้าไปในแต่ละทิศทางเป็นข้อมูลที่สำคัญเพื่อใช้ในการออกแบบระบบพลังงานแสงอาทิตย์ดังกล่าว แม้ว่าสำหรับประเทศที่กำลังพัฒนาส่วนใหญ่จะมีสถานีตรวจวัดรังสีอาทิตย์เป็นจำนวนมาก แต่สถานีที่ทำการวัดรังสีอาทิตย์บนพื้นเอียงมีน้อย เนื่องจากอุปกรณ์วัดที่มีราคาแพง รวมถึงมีเทคนิคการวัดที่ยุ่งยากทำให้ข้อมูลรังสีอาทิตย์บนพื้นเอียงไม่เพียงพอ เมื่อไม่สามารถทำการวัดค่ารังสีอาทิตย์บนพื้นเอียงได้ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาแบบจำลองขึ้นใหม่หรือใช้แบบจำลองที่มีอยู่ในการคำนวณค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นเอียง โดยแบบจำลองเหล่านี้จะเปลี่ยนองค์ประกอบของรังสีตรงและรังสีกระจายบนพื้นราบให้เป็นรังสีอาทิตย์บนพื้นเอียง

รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกประกอบด้วยรังสีตรงและรังสีกระจายซึ่งรวมกันเรียกว่ารังสีรวม ในการแปลงข้อมูลรังสีรวมบนพื้นราบให้อยู่บนพื้นเอียงจะต้องทำการแปลงทั้งรังสีตรงและรังสีกระจายแยกกัน โดยรังสีกระจายบนพื้นเอียงจะประกอบไปด้วยรังสีกระจายจากท้องฟ้าและรังสีกระจายจากพื้นผิวโลก จากนั้นนำผลที่ได้มารวมกัน การแปลงรังสีตรงบนพื้นราบเป็นรังสีตรงบนพื้นเอียงเป็นกระบวนการที่ค่อนข้างตรงไปตรงมา จึงทำการแปลงได้ง่าย ในทางกลับกันกรณีของรังสีกระจายจะทำได้ยากและมีความซับซ้อนกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การแปลงรังสีกระจายจากท้องฟ้าในช่วง 50 ปีที่ผ่านมา มีแบบจำลองมากมายได้ถูกพัฒนาสำหรับการแปลงรังสีกระจายบนพื้นราบเป็นรังสีกระจายบนพื้นเอียง (Liu and Jordan, 1962; Bugler, 1977; Temps and Coulson, 1977; Hay, 1979; Klucher, 1979; Wilmott, 1982; Ma and Iqbal, 1983; Koronakis, 1986; Skartveit and Olseth, 1986; Perez et al., 1987; Gueymard, 1987; Reindl et al., 1990; Muneer, 1997; Badescu, 2002) แต่แบบจำลองดังกล่าวส่วนใหญ่ให้ผลการคำนวณที่มีความคลาดเคลื่อนสูง หรือไม่ก็มีความซับซ้อน เนื่องจากสภาพอากาศท้องถิ่น ปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ

ภูมิภาค และเงื่อนไขทางบรรยากาศต่างๆ ของแต่ละพื้นที่แตกต่างกัน จึงทำให้เกิดการพัฒนาแบบจำลองขึ้นใหม่ หรือมีการแก้ไขจากแบบจำลองอื่นๆ เพื่อให้แบบจำลองที่ใช้มีความแม่นยำและเหมาะสมกับประเทศนั้นๆ

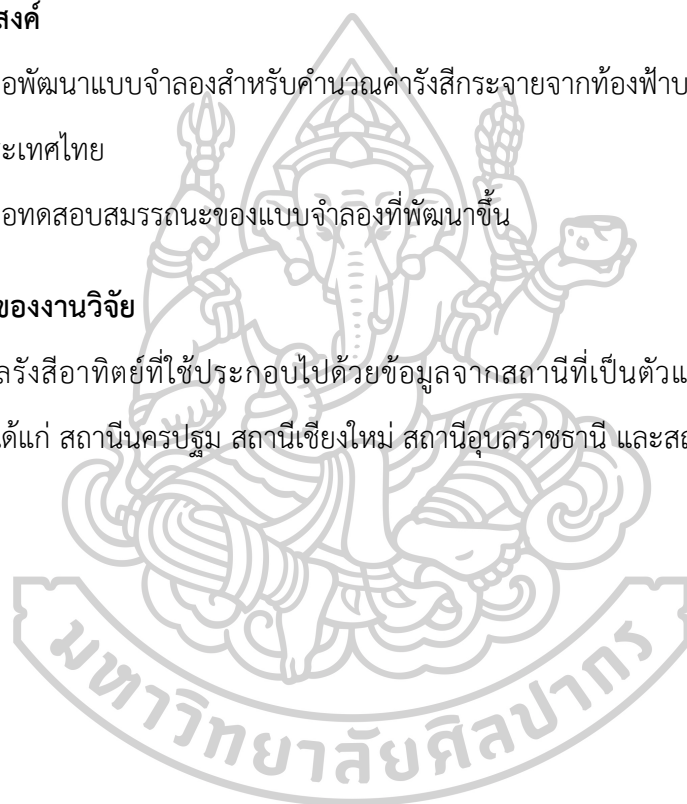
ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาแบบจำลองอย่างง่ายสำหรับการแปลงค่ารังสีกระจายบนพื้นราบที่มาจากท้องฟ้าให้อยู่บนพื้นเอียงโดยแบ่งตามสภาพท้องฟ้าออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ และกรณีท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณค่ารังสีกระจายจากท้องฟ้าบนพื้นเอียงสำหรับประเทศไทย
2. เพื่อทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ข้อมูลรังสีอาทิตย์ที่ใช้ประกอบไปด้วยข้อมูลจากสถานีที่เป็นตัวแทนจาก 4 ภูมิภาคของประเทศไทย ได้แก่ สถานีนครปฐม สถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี และสถานีสงขลา



## บทที่ 2

### ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทนี้จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐาน ที่มาของแหล่งกำเนิดรังสีอาทิตย์และทฤษฎีต่างๆ รวมถึงรายละเอียดต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

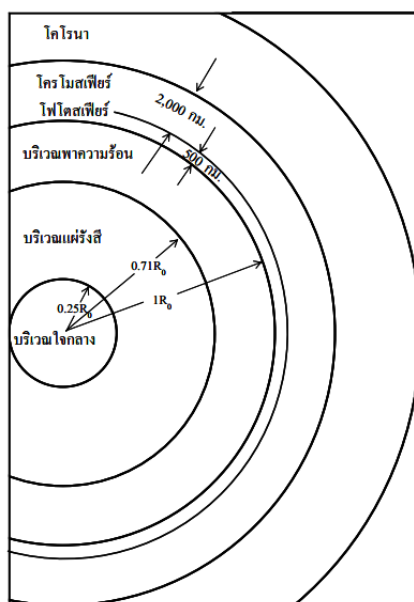
#### 2.1 แหล่งกำเนิดรังสีอาทิตย์

ดวงอาทิตย์เป็นดาวฤกษ์ซึ่งเป็นศูนย์กลางของระบบสุริยะ (Solar system) ที่มีโลกและดาวเคราะห์อื่นๆ เป็นบริวาร โดยดวงอาทิตย์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 ล้านกิโลเมตรหรือประมาณ 109 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของโลก และมีมวลเท่ากับ  $1.989 \times 10^{30}$  กิโลกรัม หรือประมาณ 3 แสนเท่าของมวลโลก โดยองค์ประกอบทางเคมีของดวงอาทิตย์ มวลสาร 70.67% ของดวงอาทิตย์เป็นไฮโดรเจน และ 27.43% เป็นฮีเลียม ส่วนที่เหลือจะเป็นคาร์บอน ไนโตรเจน ออกซิเจน และโลหะต่างๆ เนื่องจากดวงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงทำให้อิเล็กตรอนของอะตอมของธาตุต่างๆ หลุดออกมา ดังนั้นมวลสารของดวงอาทิตย์จึงมีสถานะเป็นพลาสมา กล่าวคือ ประกอบด้วยไอออนบวกและอิเล็กตรอนอิสระ

ดวงอาทิตย์มีระยะทางห่างจากโลกเฉลี่ยเท่ากับ  $1.495978 \times 10^{11}$  เมตร หรือประมาณ 150 ล้านกิโลเมตร นักดาราศาสตร์ได้กำหนดระยะทางนี้ว่า 1 หน่วยดาราศาสตร์ (Astronomical Unit, AU) และใช้ หน่วยนี้บอกระยะทางในระบบสุริยะ

รังสีอาทิตย์ (Solar radiation) หมายถึงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากดวงอาทิตย์ ซึ่งคนทั่วไปเรียกกันว่า แสงอาทิตย์ มีความยาวคลื่นต่างๆ ตั้งแต่ความยาวคลื่นน้อยกว่า  $10^{-3}$  ไมครอน หรือช่วงความยาวคลื่นของรังสีแกมมาจนถึงความยาวคลื่นหลายกิโลเมตรซึ่งเป็นช่วงของคลื่นวิทยุ อย่างไรก็ตามพลังงานส่วนใหญ่ของรังสีอาทิตย์จะอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 0.3 – 3.0 ไมครอน จะเรียกว่ารังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นกว้าง (broadband solar radiation) พลังงานรวมของรังสีทั้งหมดที่แผ่จากดวงอาทิตย์จะมีค่าเท่ากับ  $3.854 \times 10^{26}$  วัตต์ โดยพลังงานของรังสีแต่ละช่วงความยาวคลื่นมีสัดส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับพลังงานทั้งหมด ตามตารางที่ 1 จะพบว่ารังสีอาทิตย์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแสงสว่างและรังสีอินฟราเรด สำหรับรังสีอัลตราไวโอเล็ต ถึงแม้จะมีสัดส่วนค่อนข้างน้อยแต่มีพลังงานโฟตอน (photon energy) สูง ซึ่งมีผลกระทบต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิต

นอกจากรังสีต่างๆ ดังกล่าวแล้ว ดวงอาทิตย์ยังแผ่รังสีเอกซ์ และคลื่นวิทยุอีกเล็กน้อย ซึ่งมีผลในด้านพลังงานน้อยมาก (เสริม จันทร์ฉาย, 2560)



รูปที่ 1 โครงสร้างของดวงอาทิตย์

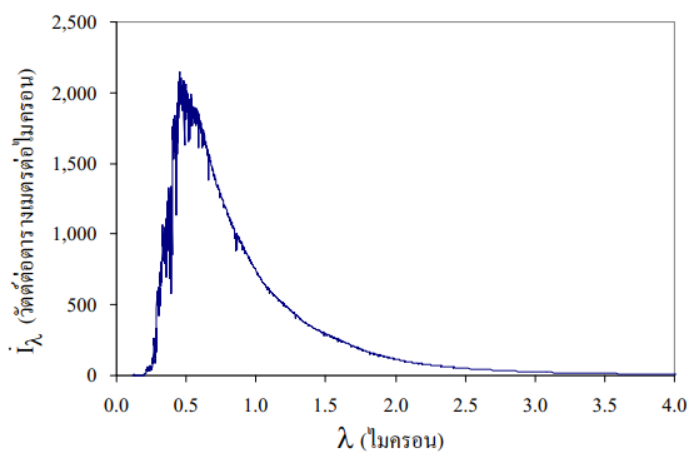
ตารางที่ 1 ช่วงความยาวคลื่นและสัดส่วนของพลังงานในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ที่สำคัญเมื่อเทียบกับพลังงานทั้งหมดของรังสีที่แผ่จากดวงอาทิตย์ (เสริม จันทร์ฉาย, 2560)

รังสีอาทิตย์	ช่วงความยาวคลื่น (ไมครอน)	สัดส่วนของพลังงาน เมื่อเทียบกับพลังงานทั้งหมดที่แผ่ออกมา (%)
1. รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่นสั้นมาก (extreme ultraviolet, XUV)	0.01 – 0.1	$3 \times 10^{-6}$
2. รังสีอัลตราไวโอเล็ตไกล (far ultraviolet, FUV)	0.1 – 0.2	0.01
3. รังสีอัลตราไวโอเล็ตซี (ultraviolet C, UVC)	0.2 – 0.28	0.5
4. รังสีอัลตราไวโอเล็ตบี (ultraviolet B, UVB)	0.28 – 0.32	1.3
5. รังสีอัลตราไวโอเล็ตเอ (ultraviolet A, UVA)	0.32 – 0.40	6.2
6. แสงสว่าง (visible)	0.40 – 0.78	39
7. รังสีอินฟราเรด (infrared)	0.78 – 1,000	52.9

## 2.2 สเปกตรัมของรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก

รังสีที่แผ่ออกมาจากดวงอาทิตย์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความยาวคลื่นต่างๆ ตั้งแต่รังสีแกมมาจนถึงคลื่นวิทยุ โดยแต่ละความยาวคลื่นมีความเข้มแตกต่างกัน และเรียกความเข้มของรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ว่า “สเปกตรัมรังสีอาทิตย์” ซึ่งแสดงในกราฟรูปที่ 2

รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบที่ชั้นบนสุดของบรรยากาศโลก จะเรียกว่ารังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (Extraterrestrial solar radiation, ETR) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลง 6.9% ในระหว่างปี (จาก  $1321.0 \text{ W/m}^2$  ถึง  $1412.0 \text{ W/m}^2$ ) เนื่องจากระยะทางที่แตกต่างกันของโลกกับดวงอาทิตย์



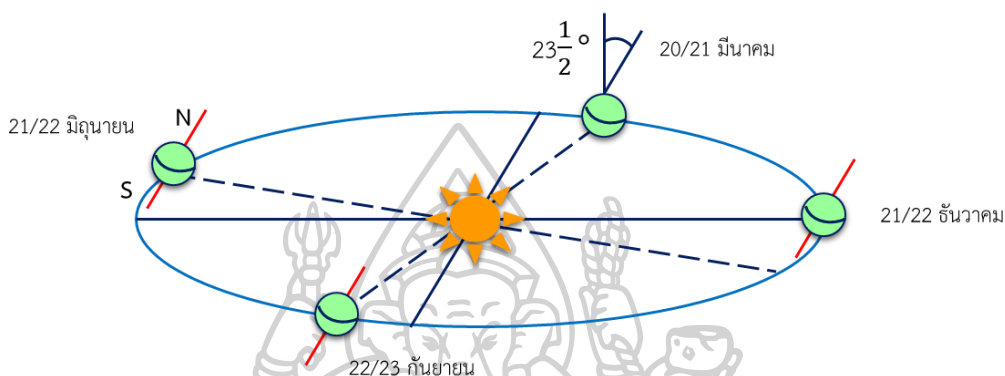
รูปที่ 2 สเปกตรัมรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกตามมาตรฐาน ASTM E-490 เมื่อ  $I_\lambda$  คือความเข้มรังสีอาทิตย์และ  $\lambda$  คือความยาวคลื่น (กราฟเขียนจากข้อมูลของ (ASTM., 2000))

การรวมสเปกตรัมรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกทุกความยาวคลื่นจะนิยามเป็น ค่าคงตัวรังสีอาทิตย์ (solar constant,  $I_{sc}$ ) ซึ่งแสดงถึงความหนาแน่นฟลักซ์ของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบตั้งฉากบนพื้นที่ 1 หน่วยต่อ 1 หน่วยเวลาที่ระยะทางเฉลี่ยระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ โดยค่าคงตัวรังสีอาทิตย์มาตรฐานที่สมาคมทดสอบและวัสดุของสหรัฐอเมริกา (Energy Earth Public Company Limited) ได้ยอมรับ และมีการนำไปใช้งานทั่วไปในปัจจุบัน มีค่าเท่ากับ  $1366.1 \text{ W/m}^2$

## 2.3 สมบัติทางเรขาคณิตของรังสีอาทิตย์

### 2.3.1 ทางเดินของดวงอาทิตย์บนท้องฟ้า

โดยปกติโลกโคจรรอบดวงอาทิตย์เป็นวงรีโดยมีดวงอาทิตย์อยู่ตรงกลางของวงรี และแกนหมุนของโลกทำมุมเอียงกับเส้นตั้งฉากของระนาบวงโคจรของโลกเป็นมุม  $23\frac{1}{2}^{\circ}$  องศา ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 วงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์

จากรูปที่ 3 จะเห็นว่าในช่วงวันที่ 21 – 22 มิถุนายน โลกจะหันขั้วโลกเหนือเข้าหาดวงอาทิตย์ ทำให้ขั้วโลกเหนือมีกลางวันยาวนานที่สุด ส่วนในช่วงวันที่ 21 – 22 ธันวาคม โลกจะหันทิศใต้เข้าหาดวงอาทิตย์ ทำให้ขั้วโลกใต้มีกลางวันยาวนานที่สุด และสำหรับวันที่ 20 -21 มีนาคม และ 22 – 23 กันยายน ดวงอาทิตย์จะอยู่ในแนวศูนย์สูตรของโลก ทำให้ช่วงเวลาดังกล่าวมีกลางวันเท่ากับกลางคืน (Iqbal, 1983)

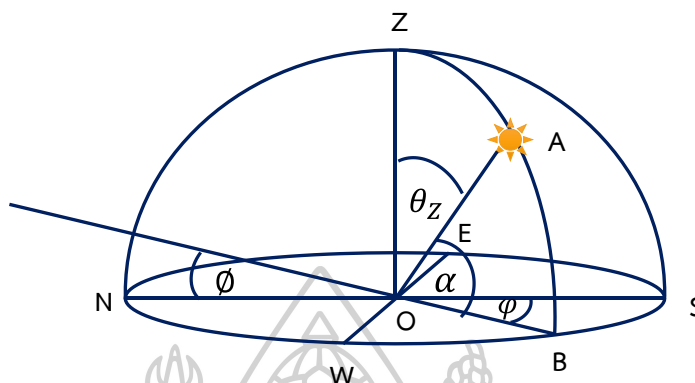
### 2.4 การบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์

ในการคำนวณค่ารังสีอาทิตย์ทั้งที่อยู่นอกบรรยากาศโลกและที่ตกกระทบบนพื้นผิวโลก จำเป็นที่จะต้องทราบตำแหน่งของดวงอาทิตย์ สำหรับการระบุตำแหน่งของดวงอาทิตย์จะพิจารณาว่าท้องฟ้าเป็นครึ่งหนึ่งของทรงกลม เรียกว่า ทรงกลมท้องฟ้า โดยมีผู้สังเกตอยู่ตรงกลาง และจะใช้มุม 2 มุม หรือใช้ส่วนโค้ง (arc) ของทรงกลมท้องฟ้า 2 ส่วนโค้ง และจะแบ่งออกเป็น 2 ระบบในการระบุตำแหน่งของดวงอาทิตย์ (Iqbal, 1983) ดังนี้



### 2.4.1 ระบบที่ใช้ระนาบในแนวระดับอ้างอิง (horizontal system)

ระบบนี้จะอาศัยมุม 2 มุม ในการระบุตำแหน่งของดวงอาทิตย์ (รูปที่ 4) ดังนี้



รูปที่ 4 การบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์โดยใช้ระนาบในแนวระดับอ้างอิง

ก. มุมอาซิมุท (azimuth angle,  $\varphi$ ) เป็นมุมที่วัดจากแนวทิศใต้ (OS ในรูปที่ 4) ไปยังภาพฉาย (projection) ของเส้นตรงที่เชื่อมต่อระหว่างผู้สังเกตกับดวงอาทิตย์บนระนาบในแนวระดับ (OB) โดยมีค่าเป็นบวกถ้าเงาดังกล่าวอยู่ซีกตะวันออก และเป็นลบถ้าอยู่ซีกตะวันตกของท้องฟ้า หรือ  $-180^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$  เขียนสมการได้ดังนี้

$$\varphi = \cos^{-1} \left( \frac{\sin \alpha \sin \phi - \sin \delta}{\cos \alpha \cos \phi} \right) \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\varphi$  คือ มุมอาซิมุท (องศา)

$\alpha$  คือ มุมอัลติจูด (องศา)

$\phi$  คือ ตำแหน่งละติจูดของผู้สังเกต (องศา)

$\delta$  คือ มุมเดคลิเนชันหรือระยะห่างเชิงมุมระหว่างดวงอาทิตย์กับศูนย์สูตรท้องฟ้า (องศา)

ข. มุมอัลติจูด (altitude angle,  $\alpha$ ) หรือมุมเงยเป็นมุมระหว่างเส้นตรงที่เชื่อมต่อระหว่างผู้สังเกตกับดวงอาทิตย์ (OA) กับภาพฉายของเส้นตรงดังกล่าวบนระนาบในแนวระดับ (OB) ซึ่งจะมีค่าจาก 0 ถึง 90 องศา สำหรับมุมระหว่างเส้นตรงที่เชื่อมต่อระหว่างผู้สังเกตกับดวงอาทิตย์ (OA) กับเส้น

ตรงที่เชื่อมต่อกันระหว่างผู้สังเกตกับจุดเซนธิ (OZ) จะเรียกว่า มุมเซนธิ (zenith angle,  $\theta_z$ ) ซึ่งนิยมใช้บอกตำแหน่งดวงอาทิตย์เช่นกัน

$$\text{โดยที่ } \theta_z = 90 - \alpha$$

$$\alpha = \sin^{-1}[\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega] \quad (2.2)$$

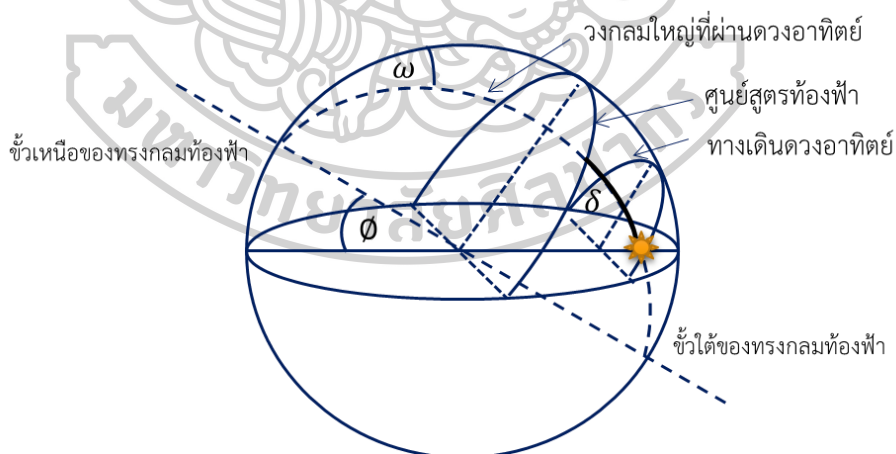
เมื่อ  $\theta_z$  คือ มุมเซนธิหรือมุมระหว่างดวงอาทิตย์กับจุดเซนธิ (องศา)

$\omega$  คือ มุมชั่วโมง (องศา)

การบอกตำแหน่งโดยใช้ระบบระนาบในแนวระดับอ้างอิง มีข้อดีคือเข้าใจได้ง่าย แต่มีข้อด้อยคือค่ามุมอาซิมุสและมุมอัลติจูด จะเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาตั้งแต่ดวงอาทิตย์ขึ้นจนถึงดวงอาทิตย์ตก และเปลี่ยนแปลงไปตามวันในรอบปีด้วย

#### 2.4.2 ระบบที่ใช้ระนาบศูนย์สูตรอ้างอิง (equatorial system)

เนื่องจากระนาบของทางเดินของดวงอาทิตย์บนทรงกลมท้องฟ้าจะขนานกับระนาบของศูนย์สูตรท้องฟ้าโดยในช่วงเวลา 1 วัน ระนาบของทางเดินของดวงอาทิตย์จะเปลี่ยนแปลงน้อยมากจนสามารถถือว่าคงที่ ดังนั้นจะใช้ 2 ตัวแปรในการระบุตำแหน่งของดวงอาทิตย์ได้ดังนี้



รูปที่ 5 การบอกตำแหน่งของดวงอาทิตย์โดยใช้ศูนย์สูตรอ้างอิง

ก. เดคลิเนชัน (declination,  $\delta$ ) คือระยะห่างเชิงมุมระหว่างดวงอาทิตย์กับศูนย์สูตรท้องฟ้าบนวงกลมใหญ่ (great circle) ที่ลากเส้นจากขั้วหนึ่งของทรงกลมท้องฟ้าผ่านดวงอาทิตย์ไปยัง

อีกข้างหนึ่ง โดยเดคลิเนชันจะแปรค่าอยู่ระหว่าง  $-23\frac{1}{2}$  องศา และ  $23\frac{1}{2}$  องศา หาได้จากสูตรอย่างง่ายของคูเปอร์ (Cooper, 1969)

$$\delta = 23.45 \sin \left[ \frac{360}{365} (d_n + 284) \right] \quad (2.3)$$

โดยที่  $\delta$  คือ เดคลิเนชัน (องศา)

$d_n$  คือ ลำดับวันในรอบปี

หากต้องการความละเอียดถูกต้องของค่าเดคลิเนชัน โดยมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 3 ลิปดา สามารถหาค่าเดคลิเนชันโดยใช้สมการดังนี้

$$\delta = (0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.070257 \sin \Gamma - 0.00675 \cos 2\Gamma + 0.000907 \sin 2\Gamma - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma)(180 / \pi) \quad (2.4)$$

โดยที่  $\Gamma$  คือ มุมวัน (day angle) (เรเดียน) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\Gamma = 2\pi(d_n - 1) / 365 \quad (2.5)$$

**ข. มุมชั่วโมง (hour angle,  $\omega$ )** คือมุมบนผิวทรงกลมท้องฟ้าระหว่างวงกลมใหญ่ที่ลากผ่านดวงอาทิตย์ และเส้นเมริเดียน โดยจะแปรตามเวลาที่ใช้ตำแหน่งดวงอาทิตย์อ้างอิงหรือเวลาดวงอาทิตย์ (solar time) ทั้งนี้เพราะช่วงเวลาที่ดวงอาทิตย์เคลื่อนจากเส้นเมริเดียนที่อยู่ตรงศีรษะของผู้สังเกตไปทางทิศตะวันตกจนกลับมายังตำแหน่งเดิมอีกครั้ง จะใช้เวลา 24 ชั่วโมง ในขณะที่เดียวกันมุมชั่วโมงของดวงอาทิตย์ก็จะวนมาครบรอบ หรือ 360 องศา จะเห็นว่าดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ด้วยอัตรา 15 องศาต่อชั่วโมง ดังนั้นเราจึงสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมชั่วโมงกับเวลาดวงอาทิตย์ได้ดังสมการ

$$\omega = 15(12 - ST) \quad (2.6)$$

โดยที่  $\omega$  คือ มุมชั่วโมงของดวงอาทิตย์ (องศา)

ST คือ เวลาดวงอาทิตย์ (ชั่วโมง:นาที)

เวลาดวงอาทิตย์จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับตำแหน่งของดวงอาทิตย์ กล่าวคือเมื่อเวลา 12.00 นาฬิกา ตามเวลาดวงอาทิตย์ ค่า  $\omega = 0$  องศา ถ้าเวลาดวงอาทิตย์เป็น 11.00 นาฬิกา  $\omega = 15$  องศา เวลาดวงอาทิตย์นี้สามารถคำนวณได้จากเวลามาตรฐานท้องถิ่น สมการเวลา และผลต่างระหว่างตำแหน่งเส้นลองจิจูดมาตรฐาน และเส้นลองจิจูดของตำแหน่งที่ต้องการคำนวณซึ่งเขียนเป็นรูปสมการได้ดังนี้ (Iqbal, 1983)

$$ST = LST + 4(L_s - L_{log}) + E_t \quad (2.7)$$

โดยที่	ST	คือ เวลาดวงอาทิตย์ (ชั่วโมง:นาที)
	LST	คือ เวลามาตรฐานท้องถิ่น (ชั่วโมง:นาที)
	$L_s$	คือ ลองจิจูดมาตรฐาน (องศา)
	$L_{log}$	คือ ลองจิจูดของตำแหน่งที่ต้องการคำนวณ (องศา)
	$E_t$	คือ ความแตกต่างระหว่างเวลาดวงอาทิตย์กับเวลาดวงอาทิตย์เฉลี่ย (นาที)

ค่าของ  $4(L_s - L_{log})$  มีหน่วยเป็นนาทีและค่าของ  $L_s$  และ  $L_{log}$  เป็นลบเมื่ออยู่ทางตะวันออกของกรีนิช และเป็นบวก เมื่ออยู่ทางตะวันตกของกรีนิช และสำหรับค่าความแตกต่างระหว่างเวลาดวงอาทิตย์กับเวลาดวงอาทิตย์เฉลี่ย คำนวณได้จากสมการ (Iqbal, 1983)

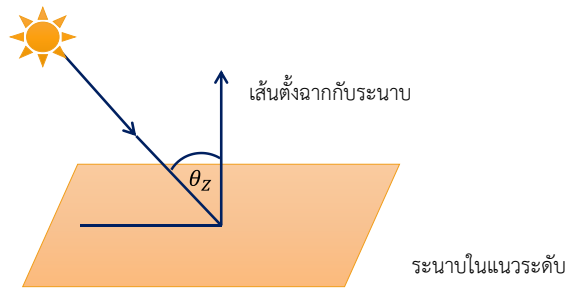
$$E_t = 229.18(0.000075 + 0.001868 \cos \Gamma - 0.032077 \sin \Gamma - 0.014615 \cos 2\Gamma - 0.04089 \sin 2\Gamma) \quad (2.8)$$

## 2.5 มุมตกกระทบของรังสีอาทิตย์บนระนาบต่างๆ

ในการคำนวณปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ตกลงบนระนาบต่างๆ จำเป็นต้องทราบมุมตกกระทบ (incident angle,  $\theta$ ) ของรังสีอาทิตย์บนระนาบนั้นๆ (Iqbal, 1983)

ก) กรณีระนาบในแนวระดับ ในกรณีนี้มุมตกกระทบจะเท่ากับมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ ( $\theta_z$ ) (รูปที่ 6) ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ

$$\cos \theta_z = \sin \alpha = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (2.9)$$

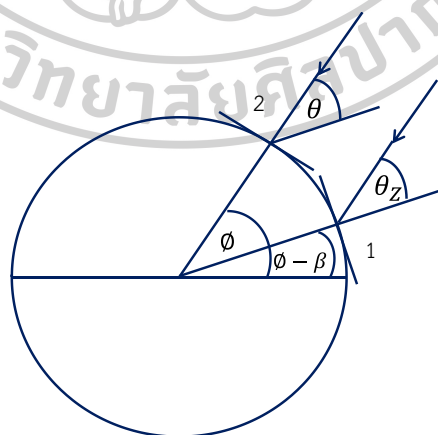


รูปที่ 6 มุมตกกระทบ ( $\theta_z$ ) ของรังสีอาทิตย์บนระนาบในแนวระดับ

ข) กรณีระนาบเอียงที่หันไปทางทิศใต้ ในการหามุมตกกระทบดังกล่าว เราจะพิจารณา ระนาบ 2 ระนาบ (รูปที่ 7) โดยระนาบที่ 1 เป็นระนาบในแนวระดับซึ่งอยู่ที่ตำแหน่งละติจูด  $\phi - \beta$  ส่วนระนาบที่ 2 อยู่ที่ละติจูด  $\phi$  เอียงทำมุม  $\beta$  กับระนาบในแนวระดับ และหันไปทางทิศใต้ จาก หลักการทางเรขาคณิต เราสามารถพิสูจน์ได้ว่ามุมตกกระทบของรังสีอาทิตย์บนระนาบที่ 1 ( $\theta_z$ ) จะ เท่ากับมุมตกกระทบของรังสีอาทิตย์บนระนาบที่ 2 ( $\theta$ ) ดังนั้นถ้าเราแทน  $\theta_z$  ด้วย  $\theta$  และแทน  $\phi$  ด้วย  $\phi - \beta$  ในสมการ (2.9) เราจะได้สมการสำหรับคำนวณมุมตกกระทบของรังสีอาทิตย์บนระนาบ เอียงที่หันไปทางทิศใต้ ดังนี้ (เสริม จันทร์ฉาย, 2560)

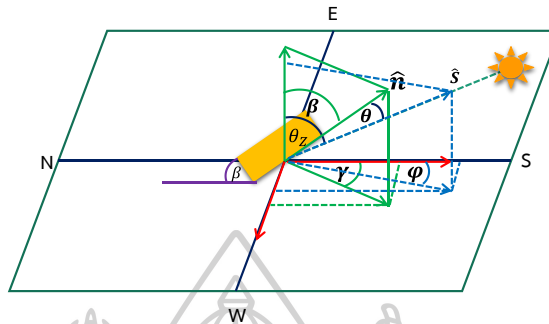
$$\cos \theta = \sin \delta \sin(\phi - \beta) + \cos \delta \cos(\phi - \beta) \cos \omega \quad (2.10)$$

เมื่อ  $\beta$  คือ มุมของระนาบเอียง (องศา)



รูปที่ 7 ระนาบที่ 1 อยู่ที่ละติจูด  $\phi - \beta$  ซึ่งเป็นระนาบในแนวระดับและระนาบที่ 2 ซึ่งอยู่ที่ละติจูด  $\phi$  และเอียงทำมุม  $\beta$  กับระนาบในแนวระดับ โดย  $n_1$  และ  $n_2$  เป็นเส้นปกติของระนาบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

ค) กรณีระนาบเอียงที่หันไปทางทิศใดๆ สำหรับมุมตกกระทบของรังสีอาทิตย์บนระนาบเอียงที่หันไปทางทิศใดๆ สามารถหาได้โดยพิจารณาจากรูปที่ 8 สามารถคำนวณได้ดังสมการ (เสริมจันทร์ฉาย, 2560)



รูปที่ 8 ระนาบเอียงซึ่งทำมุมกับระนาบในแนวระดับเป็นมุม  $\beta$  และหันไปทางทิศใดๆ โดยที่  $\delta$  เป็นเส้นปกติของระนาบเอียง  $\hat{S}$  เป็นเวกเตอร์ 1 หน่วยที่ชี้ไปทางดวงอาทิตย์  $\theta$  เป็นมุมตกกระทบของรังสีอาทิตย์บนระนาบเอียง  $\phi$  เป็นมุมอาซิมูทของดวงอาทิตย์และ  $\gamma$  เป็นอาซิมูทของระนาบเอียง

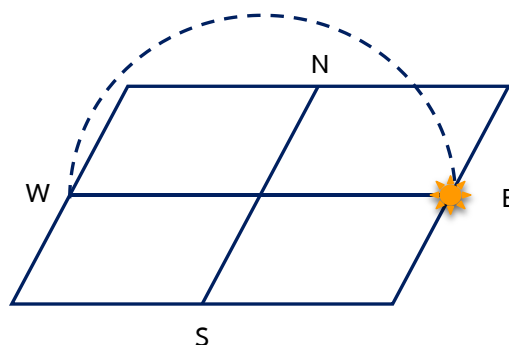
$$\cos \theta = \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega + (\cos \phi \cos \beta \cos \delta + \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \delta) \cos \omega + \sin \phi \cos \beta \sin \delta - \cos \phi \sin \beta \cos \gamma \sin \delta \quad (2.11)$$

เมื่อ  $\beta$  คือ มุมของระนาบเอียง (องศา)

$\gamma$  คือ อาซิมูทของระนาบเอียง (องศา)

## 2.6 มุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ขึ้นและมุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตกบนระนาบต่างๆ

ในการประมาณค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนระนาบต่างๆ ตลอดวัน จำเป็นต้องรู้ช่วงเวลาที่ดวงอาทิตย์อยู่เหนือระนาบนั้นตั้งแต่ดวงอาทิตย์ขึ้นจนถึงดวงอาทิตย์ตกบนระนาบนั้น (Iqbal, 1983)



## รูปที่ 9 ทางเดินของดวงอาทิตย์บนระนาบในแนวระดับ

ก. กรณีพื้นระนาบในแนวระดับ ในการหาช่วงเวลาดังกล่าว เราจะต้องหามุมชั่วโมงขณะที่ดวงอาทิตย์ขึ้น (sunrise hour angle,  $\omega_{sr}$ ) โดยใช้สมการ (2.9) โดยแทนค่ามุมอัสติจูดของดวงอาทิตย์เป็น 0 องศา ทั้งนี้เพราะขณะที่ดวงอาทิตย์ขึ้น  $\alpha = 0$  และแทน  $\omega$  ด้วย  $\omega_{sr}$  แสดงดังนี้

$$\text{จาก} \quad \sin \alpha = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega_{sr} \quad (2.12)$$

$$\cos \omega_{sr} = -\frac{\sin \delta \sin \phi}{\cos \delta \cos \phi} \quad (2.13)$$

$$\text{จะได้} \quad \omega_{sr} = \cos^{-1}(-\tan \delta \tan \phi) = \omega_{ss} \quad (2.14)$$

เมื่อ  $\omega_{sr}$  คือ มุมชั่วโมงที่พระอาทิตย์ขึ้น และ  $\omega_{ss}$  คือ มุมชั่วโมงที่พระอาทิตย์ตก

เนื่องจากในกรณีระนาบในแนวระดับ ทางเดินของดวงอาทิตย์ในช่วงเช้าจะสมมาตรกับช่วงบ่ายทำให้มุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ตก (sunset hour angle,  $\omega_{ss}$ ) มีค่าเท่ากับมุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ขึ้น แต่มีเครื่องหมายตรงข้าม

ข. กรณีพื้นระนาบเอียงที่หันไปทางทิศใต้ ในการหาช่วงเวลาที่ดวงอาทิตย์อยู่เหนือระนาบเอียงที่หันไปทางทิศใต้ เราจะแทนมุมตกกระทบ ( $\theta$ ) เท่ากับ 90 องศา ขณะที่พระอาทิตย์ขึ้น ในสมการ (2.10) และมุมชั่วโมงขณะที่ดวงอาทิตย์ขึ้นจะเป็น  $\omega'_{sr}$

$$\text{จาก} \quad \cos(90) = \sin \delta \sin(\phi - \beta) + \cos \delta \cos(\phi - \beta) \cos \omega'_{sr} \quad (2.15)$$

$$\text{จะได้} \quad \cos \omega'_{sr} = -\frac{\sin \delta \sin(\phi - \beta)}{\cos \delta \cos(\phi - \beta)} \quad (2.16)$$

$$\omega'_{sr} = \cos^{-1}[-\tan \delta \tan(\phi - \beta)] \quad (2.17)$$

จากสมการ (2.17) ในกรณีที่  $\delta < 0$  สมการนี้จะให้ค่า  $\omega'_{sr}$  มากกว่ามุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ขึ้นบนระนาบในแนวระดับ ( $\omega_{sr}$ ) ซึ่งไม่เป็นความจริง ในกรณีนี้เราจะต้องใช้ค่า  $\omega_{sr}$  แทน  $\omega'_{sr}$  ดังนั้นสามารถเขียนสมการทั่วไปสำหรับหาค่ามุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ขึ้นบนระนาบเอียง ได้ดังนี้

$$\omega'_{sr} = \min\{\cos^{-1}(-\tan \delta \tan \phi), \cos^{-1}(-\tan \delta \tan(\phi - \beta))\} \quad (2.18)$$

เมื่อ  $\min$  เป็นสัญลักษณ์ที่บอกว่า  $\omega'_{sr}$  จะเป็นค่าต่ำสุด เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าที่คำนวณได้จากพจน์ที่ 1 และพจน์ที่ 2 ในวงเล็บ

ค. กรณีพื้นระนาบเอียงที่หันไปทางทิศใดๆ ในการหาช่วงเวลาที่ดวงอาทิตย์อยู่เหนือระนาบเอียงที่หันไปทางทิศใดๆ ทำได้ดังนี้ (Iqbal, 1983)

$$\cos \theta = A \sin \omega + B \cos \omega + C \quad (2.19)$$

เมื่อ  $A = \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \quad (2.20)$

$$B = \cos \phi \cos \delta + \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \delta \quad (2.21)$$

$$C = \sin \phi \cos \beta \sin \delta - \cos \phi \sin \beta \cos \gamma \sin \delta \quad (2.22)$$

ให้  $x = \frac{B}{A}$  และ  $y = \frac{C}{A}$

จะได้  $x = \frac{\cos \phi}{\sin \gamma \tan \beta} + \frac{\sin \phi}{\tan \gamma} \quad (2.23)$

$$y = \tan \delta \left( \frac{\sin \phi}{\sin \gamma \tan \beta} - \frac{\cos \phi}{\tan \gamma} \right) \quad (2.24)$$

เนื่องจากมุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ขึ้น  $\omega'_{sr}$  และตก ( $\omega'_{ss}$ ) บนระนาบเอียงจะต้องน้อยกว่ากรณีของระนาบในแนวระดับ ดังนั้นเราจึงสามารถเขียนสมการของมุมชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์ขึ้นและตกในกรณีต่างๆ ได้ดังนี้

- กรณีระนาบเอียงหันไปสู่ด้านตะวันออก หรือ  $\gamma > 0$

$$\omega'_{sr} = \min \omega_{sr}, \cos^{-1} \left( \frac{-xy - \sqrt{x^2 - y^2 + 1}}{x^2 + 1} \right) \quad (2.25)$$



$$\text{และ } \omega'_{ss} = -\min[\omega_{sr}, \cos^{-1}\left(\frac{-xy + \sqrt{x^2 - y^2 + 1}}{x^2 + 1}\right)] \quad (2.26)$$

- กรณีระนาบเอียงหันไปสู่ด้านตะวันตก หรือ  $\gamma < 0$

$$\omega'_{sr} = \min[\omega_{sr}, \cos^{-1}\left(\frac{-xy + \sqrt{x^2 - y^2 + 1}}{x^2 + 1}\right)] \quad (2.27)$$

$$\text{และ } \omega'_{ss} = -\min[\omega_{sr}, \cos^{-1}\left(\frac{-xy - \sqrt{x^2 - y^2 + 1}}{x^2 + 1}\right)] \quad (2.28)$$

## 2.7 รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกบนระนาบในแนวระดับ

### 2.7.1 รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกบนระนาบในแนวระดับรายชั่วโมง

ปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ระยะเวลาหนึ่ง (solar irradiance) นอกบรรยากาศโลกที่ตกกระทบบนระนาบซึ่งตั้งฉากกับทิศทางของรังสีอาทิตย์ จะขึ้นกับระยะห่างระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ (Iqbal, 1983) ตามสมการ

$$\dot{I}_{on} = \dot{I}_{sc} (r_o / r)^2 \quad (2.29)$$

$$\text{หรือ } \dot{I}_{on} = \dot{I}_{sc} E_o \quad (2.30)$$

เมื่อ  $\dot{I}_{on}$  คือ รังสีอาทิตย์ที่ระยะเวลาหนึ่งซึ่งตกกระทบระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางของรังสี (วัดต่อตารางเมตร)

$\dot{I}_{sc}$  คือ ค่าคงตัวรังสีอาทิตย์ (1,366.1 วัดต่อตารางเมตร)

$r_o$  คือ ระยะทางเฉลี่ยระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ ( $1.496 \times 10^8$  กิโลเมตร)

$r$  คือ ระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ที่เวลาใดๆ (กิโลเมตร)

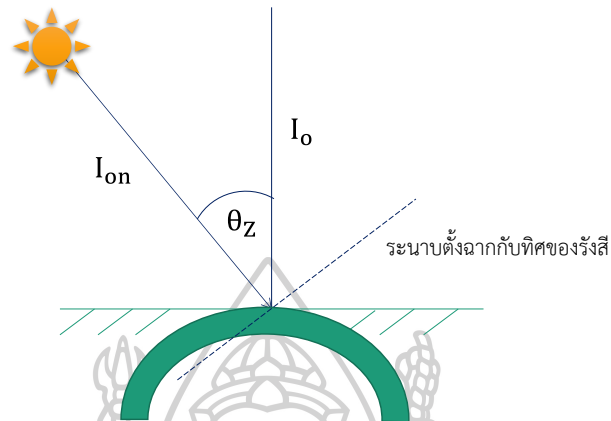
$E_o$  คือ แฟกเตอร์สำหรับแก้ผลการแปรค่าของระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ (-)

กรณีระนาบในแนวระดับ รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบระยะเวลาหนึ่งบนระนาบดังกล่าวจะเขียนได้ดังสมการ

$$\dot{I}_o = \dot{I}_{sc} E_o \cos \theta_z \quad (2.31)$$

แทน  $\cos \theta_z$  จากสมการ (2.9) ลงในสมการ (2.31) จะได้

$$I_o = I_{sc} E_o (\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega) \quad (2.32)$$



รูปที่ 10 รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนระนาบในแนวระดับ ( $I_o$ ) และบนระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางขอ รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก ( $I_{on}$ )

## 2.7. รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกบนระนาบในแนวระดับรายวัน

ค่ารังสีอาทิตย์รายวันจะได้รับการอินทิเกรตรังสีอาทิตย์รายชั่วโมง ตั้งแต่ดวงอาทิตย์ขึ้น จนถึงดวงอาทิตย์ตก (Iqbal, 1983) เขียนได้ดังสมการ

$$H_o = \int_{t_{sr}}^{t_{ss}} I_o E_o \cos \theta_z dt \quad (2.33)$$

เมื่อ  $H_o$  คือ รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายวันบนระนาบในแนวระดับ (จุดต่อตารางเมตรต่อวัน)

$I_o$  คือ รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกรายชั่วโมงบนระนาบในแนวระดับ (จุดต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)

$t_{sr}$  คือ เวลาที่ดวงอาทิตย์ขึ้น (นาฬิกา)

$t_{ss}$  คือ เวลาที่ดวงอาทิตย์ตก (นาฬิกา)

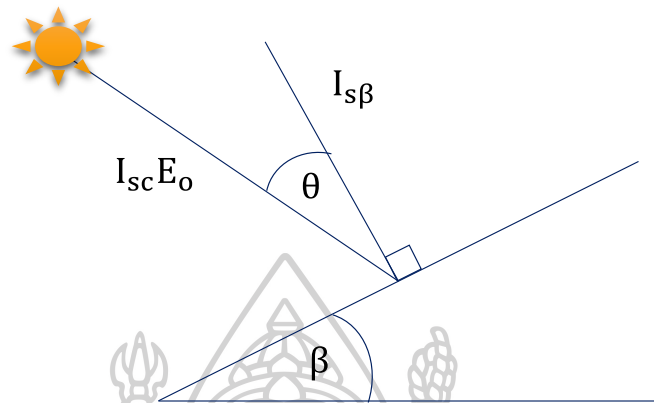
## 2.8 รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกบนระนาบเอียงที่หันไปทางทิศใต้

### 2.8.1 รังสีอาทิตย์รายชั่วโมง

เราจะเริ่มจากการคำนวณรังสีอาทิตย์ที่ขณะเวลาหนึ่งที่ตกกระทบระนาบเอียงที่หันไปทางทิศใต้ ซึ่งทำมุม  $\beta$  กับระนาบในแนวระดับ (รูปที่ 11) (Iqbal, 1983) โดยใช้สมการ

$$I_{o\beta} = I_{sc} E_o \cos \theta \quad (2.34)$$

เมื่อ  $\theta$  คือ มุมตกกระทบของรังสีอาทิตย์บนระนาบเอียง (องศา)



รูปที่ 11 รังสีอาทิตย์บนระนาบที่หันไปทางทิศใต้

จากสมการ (2.34) เราสามารถเขียนสมการดังกล่าวในรูปของปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ระนาบเอียงได้รับ  $dI_{o\beta}$  ในช่วงเวลา  $dt$  ได้ดังนี้

$$I_{o\beta} = I_{sc} E_o [\sin \delta \sin(\phi - \beta) + \cos \delta \cos(\phi - \beta) \cos \omega_i] \quad (2.35)$$

### 2.8.2 รังสีอาทิตย์รายวัน

ค่ารังสีอาทิตย์รายวันบนระนาบเอียงที่หันไปทางทิศใต้จะได้จากการอินทิเกรตรังสีอาทิตย์รายชั่วโมง ตั้งแต่ดวงอาทิตย์ขึ้นจนถึงดวงอาทิตย์ตก เขียนได้ดังสมการ

$$H_{o\beta} = \left(\frac{24}{\pi}\right) I_{sc} E_o \left[ \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega_{sr}' \sin \delta \sin(\phi - \beta) + \cos \delta \cos(\phi - \beta) \sin \omega_{sr}' \right] \quad (2.36)$$

$$\text{เมื่อ} \quad \omega_{sr}' = \min\left\{ \omega_{sr}, \cos^{-1}[-\tan \delta \tan(\phi - \beta)] \right\} \quad (2.37)$$

## 2.9 รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกบนระนาบเอียงที่หันไปทางทิศใดๆ

### 2.9.1 รังสีอาทิตย์รายชั่วโมง

เราจะเริ่มจากการคำนวณรังสีอาทิตย์ที่ช่วงเวลาหนึ่งที่ตกกระทบระนาบเอียงที่หันไปทางทิศใดๆ ( $I_{o\beta}$ ) (Iqbal, 1983) โดยเขียนสมการดังนี้

$$dI_{o\beta} = I_{sc} E_o \cos \theta dt = \frac{12}{\pi} I_{sc} E_o \cos \theta d\omega \quad (2.38)$$

แทน  $\cos \theta$  และทำการอินทิเกรตสมการ (2.38) จะได้

$$I_{o\beta} = I_{sc} E_o [(\sin \phi \cos \beta - \cos \phi \sin \beta \cos \gamma) \sin \delta + (\cos \phi \cos \beta + \sin \phi \sin \beta \cos \gamma) \cos \delta \cos \omega_i + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega_i] \quad (2.39)$$

เมื่อ  $\omega_i$  คือ มุมชั่วโมงของดวงอาทิตย์ที่กึ่งกลางชั่วโมงระหว่าง  $\omega_1$  และ  $\omega_2$  (องศา)

$\beta$  คือ มุมเอียงของระนาบ (องศา)

$\gamma$  คือ มุมอาซิมุทของระนาบเอียง (องศา)

### 2.9.2 รังสีอาทิตย์รายวัน

ค่ารังสีอาทิตย์รายวันบนระนาบเอียงที่หันไปทางทิศใดๆ จะได้จากการอินทิเกรตรังสีอาทิตย์รายชั่วโมง ตั้งแต่ดวงอาทิตย์ขึ้นจนถึงดวงอาทิตย์ตก เขียนได้ดังสมการ

$$H_{o\beta} = \frac{12}{\pi} I_{sc} E_o \int_{sr}^{ss} \cos \theta d\omega \quad (2.40)$$

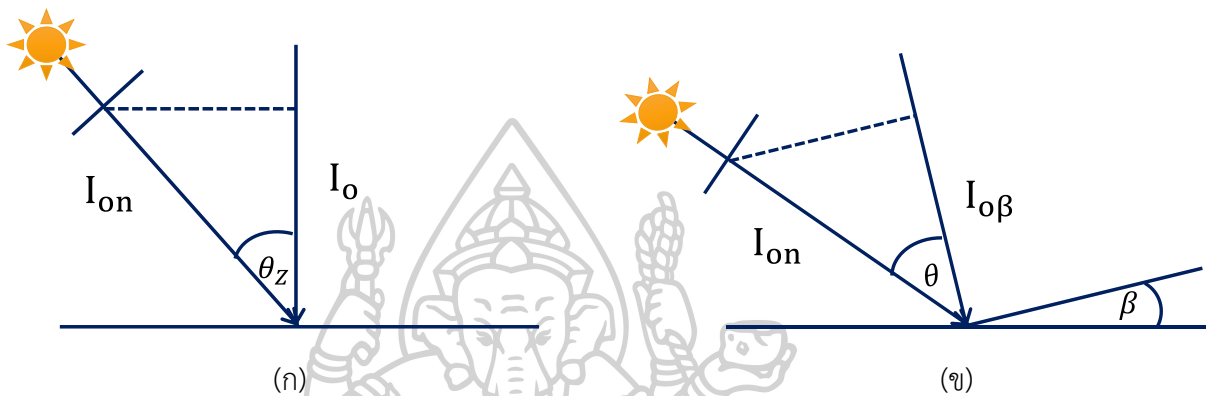
แทน  $\cos \theta$  และทำการอินทิเกรตสมการ (2.40) จะได้

$$H_{o\beta} = \frac{12}{\pi} I_{sc} E_o [\cos \beta \sin \delta \sin \phi \left| \omega_{ss} - \omega_{sr} \right| \times \frac{\pi}{180} - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma \left| \omega_{ss} - \omega_{sr} \right| \times \frac{\pi}{180} + \cos \phi \cos \delta \cos \beta \left| \sin \omega_{ss} - \sin \omega_{sr} \right| + \cos \delta \cos \gamma \sin \phi \sin \beta \left| \sin \omega_{ss} - \sin \omega_{sr} \right| + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \left| \cos \omega_{ss} - \cos \omega_{sr} \right|] \quad (2.41)$$

## 2.10 แฟกเตอร์สำหรับแปลงค่ารังสีนอกบรรยากาศโลกบนระนาบในแนวระดับให้เป็นค่าบน

### ระนาบเอียง

รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกที่ตกกระทบบนระนาบในแนวระดับ ( $I_o$ ) และรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนระนาบเอียงที่หันไปในทิศใดๆ ( $I_{o\beta}$ ) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 12 (เสริม จันทร์ฉาย, 2560)



รูปที่ 12 (ก) รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนระนาบในแนวระดับ ( $I_o$ )

(ข) รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนระนาบเอียงที่หันไปในทิศใดๆ ( $I_{o\beta}$ )

จากรูปที่ 12 เราจะสามารถเขียนสมการสำหรับคำนวณค่ารังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนระนาบในแนวระดับ ( $I_o$ ) และรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบบนระนาบเอียงที่หันไปในทิศใดๆ ( $I_{o\beta}$ ) ได้ดังสมการต่อไปนี้

- กรณีระนาบในแนวระดับ

$$I_o = I_{on} \cos \theta_z \quad (2.42)$$

- กรณีระนาบเอียง

$$I_{o\beta} = I_{on} \cos \theta \quad (2.43)$$

เมื่อ  $\theta_z$  คือ มุมเซนนิซของดวงอาทิตย์ (องศา)

$\theta$  คือ มุมตกกระทบของรังสีอาทิตย์บนระนาบเอียง (องศา)

หารสมการ (2.43) ด้วยสมการ (2.42) จะได้

$$\frac{I_{o\beta}}{I_o} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (2.44)$$

ถ้าให้  $r_b = I_{o\beta} / I_o$  จะเขียนสมการ (2.44) ใหม่ ได้ดังนี้

$$r_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (2.45)$$

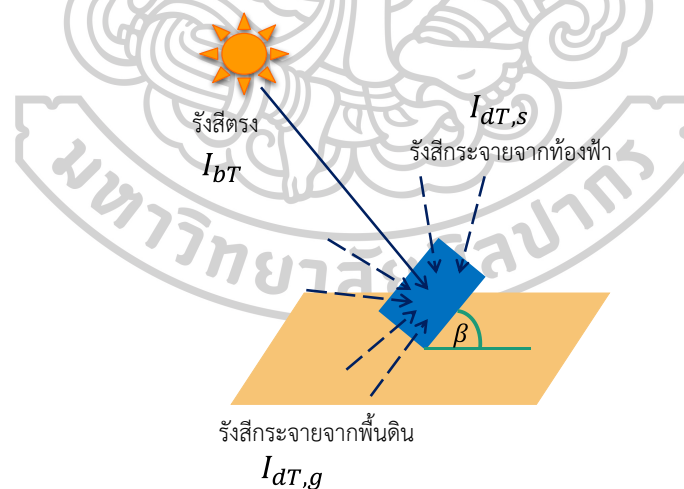
เมื่อ  $r_b$  คือ แฟคเตอร์สำหรับแปลงรังสีตรงบนระนาบในแนวระดับให้เป็นค่าบนระนาบเอียง

## 2.11 การแปลงค่ารังสีบนระนาบในแนวระดับให้เป็นค่ารังสีบนระนาบเอียง

ข้อมูลรังสีอาทิตย์ทั้งที่ได้จากแบบจำลองและจากการวัด ส่วนใหญ่จะเป็นค่าบนระนาบในแนวระดับแต่ในการใช้งานต่างๆ ผู้ใช้มักต้องการค่ารังสีอาทิตย์บนระนาบเอียง สำหรับพื้นที่ที่ไม่มีเครื่องวัดบนพื้นเอียง ผู้ใช้จะต้องทำการแปลงค่ารังสีอาทิตย์บนพื้นราบให้เป็นค่าบนพื้นเอียง โดยการแปลงแบ่งได้เป็น 2 กรณี ได้แก่ รังสีรายชั่วโมง และรังสีรายวันเฉลี่ยต่อเดือน (Iqbal, 1983) แต่ละกรณีมีรายละเอียด ดังนี้

### 2.11.1 รังสีรายชั่วโมง

ถ้ามีระนาบเอียงซึ่งทำมุม  $\beta$  กับระนาบในแนวระดับ (รูปที่ 13) รังสีอาทิตย์ที่ระนาบเอียงได้รับจะประกอบด้วยรังสีตรง รังสีกระจายจากท้องฟ้า และรังสีกระจายจากพื้นผิวโลก หรือเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการ (2.46)



รูปที่ 13 รังสีอาทิตย์ที่ระนาบเอียงได้รับ

$$I_T = I_{bT} + I_{dT,s} + I_{dT,g} \quad (2.46)$$

เมื่อ  $I_T$  คือ รังสีรวมรายชั่วโมงบนระนาบเอียง (จุดต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)

$I_{bT}$  คือ รังสีตรงรายชั่วโมงบนระนาบเอียง (จุดต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)

$I_{dT,s}$  คือ รังสีกระจายจากท้องฟ้ารายชั่วโมงบนระนาบเอียง (จุดต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)

$I_{dT,g}$  คือ รังสีกระจายที่สะท้อนจากพื้นผิวโลกรายชั่วโมงบนระนาบเอียง  
(จุดต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)

สำหรับในการแปลงรังสีบนระนาบในแนวระดับให้เป็นรังสีบนระนาบเอียงจะทำแยกกัน  
จากนั้นนำรังสีที่แปลงได้มารวมกัน จะได้รังสีรวมบนระนาบเอียง โดยวิธีการแปลงแต่ละส่วนมีดังนี้

### ก. รังสีตรง

เริ่มแรกจะพิจารณารังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก ( $I_o$ ) ที่เดินทางผ่านบรรยากาศโลก จะมี  
สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของบรรยากาศ ( $\tau_b$ ) และตกกระทบบนพื้นผิวโลกเป็น  $I_b$  ดังสมการ

$$I_b = \tau_b I_o \quad (2.47)$$

เมื่อ  $I_b$  คือ รังสีตรงรายชั่วโมงที่ตกกระทบบนระนาบในแนวระดับที่พื้นผิวโลก  
(จุดต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)

$\tau_b$  คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีตรงของบรรยากาศโลก (-)

$I_o$  คือ รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกบนระนาบในแนวระดับ (จุดต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)

ในทำนองเดียวกัน เราจะพิจารณารังสีนอกบรรยากาศที่ผ่านบรรยากาศโลกมาตกกระทบบน  
ระนาบเอียง ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$I_{bT} = \tau_b I_{oT} \quad (2.48)$$

เมื่อ  $I_{bT}$  คือ รังสีตรงรายชั่วโมงที่ตกกระทบบนระนาบเอียงที่พื้นผิวโลก  
(จุดต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)

$I_{oT}$  คือ รังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกบนระนาบเอียง (จุดต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)

หารสมการ (2.48) ด้วยสมการ (2.47) จะได้

$$\frac{I_{bT}}{I_b} = \frac{I_{oT}}{I_o} \quad (2.49)$$

ถ้าให้  $r_b = I_{oT} / I_o$  ดังนั้นสมการ (2.44) จะเขียนได้ใหม่เป็น

$$I_{bT} = r_b I_b \quad (2.50)$$

โดยที่  $r_b$  หาได้จากสมการ (2.45)

### ข. รังสีกระจายจากท้องฟ้า

รังสีกระจายจากท้องฟ้าเป็นรังสีที่เกิดจากการกระเจิงโดยองค์ประกอบต่างๆ ทางบรรยากาศ ได้แก่ โมเลกุลอากาศ ฝุ่นละออง และเมฆ และเนื่องจากขนาดและ รูปทรงของเมฆ รวมถึงตำแหน่งของเมฆที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลาทำให้การคำนวณค่ารังสีกระจายที่มาจากท้องฟ้ามีความซับซ้อน โดยมีนักวิจัยที่ได้เสนอแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีกระจายจากท้องฟ้า (Liu and Jordan, 1962; Bugler, 1977; Temps and Coulson, 1977; Klucher, 1979; Hay, 1979; Ma and Iqbal, 1983; Skartveit and Olseth, 1986; Koronakis, 1986; Gueymard, 1987; Perez et al., 1987; Muneer, 1997; Badescu, 2002) แบบจำลองเหล่านี้แบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ แบบจำลองที่พิจารณาว่ารังสีกระจายจากท้องฟ้ามีความสม่ำเสมอทุกทิศทาง (isotropic model) และแบบจำลองที่พิจารณาว่ารังสีกระจายจากท้องฟ้าขึ้นกับทิศทาง (anisotropic model) แบบจำลองดังกล่าว เป็นแบบจำลองเอมไพริคัลซึ่งพัฒนาจากข้อมูลรังสีอาทิตย์จากบริเวณต่างๆ ของโลก จึงมีสมรรถนะแตกต่างกัน

เนื่องจากแบบจำลองสำหรับแปลงรังสีกระจายจากท้องฟ้าบนพื้นราบให้เป็นค่าบนพื้นเอียงที่มีอยู่ส่วนใหญ่ให้ผลการคำนวณที่มีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง หรือไม่ก็มีความซับซ้อนมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงเสนอที่จะพัฒนาแบบจำลองทางสถิติอย่างง่ายเพื่อใช้แปลงรังสีกระจายดังกล่าวสำหรับกรณีประเทศไทย



### บทที่ 3

#### วิธีการวิจัยและผลที่ได้

ในบทนี้จะกล่าวถึงเครื่องมือวัดรังสีอาทิตย์ การสร้างแบบจำลองสำหรับคำนวณค่าความเข้มรังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียง และการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองที่สร้างขึ้นและแบบจำลองอื่นๆ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 เครื่องมือวัดรังสีอาทิตย์

ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมข้อมูลความเข้มรังสีรวมบนพื้นเอียง ความเข้มรังสีกระจายบนพื้นราบ รวมถึงความเข้มรังสีตรง โดยข้อมูลความเข้มรังสีรวมบนพื้นเอียงได้จากเครื่องวัดไพราโนมิเตอร์ (Pyranometer) ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CMP6 ซึ่งประกอบด้วยแผ่นโลหะสีดำที่วางทำมุมเอียง  $30^{\circ}$   $60^{\circ}$  และ  $90^{\circ}$  กับพื้นราบ และหันพื้นเอียงไปทางทิศเหนือ ใต้ ตะวันออก และตะวันตก ดังแสดงในรูปที่ 14 - 17 สำหรับข้อมูลความเข้มรังสีกระจายบนพื้นราบได้จากเครื่องวัดไพราโนมิเตอร์ ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CM11 ส่วนข้อมูลความเข้มรังสีตรงได้จากเครื่องวัดไพริลิโอมิเตอร์ (Pyrheliometer) ที่ติดตั้งอยู่บนเครื่องติดตามดวงอาทิตย์ (Sun tracker) (รูปที่ 18 - 21) โดยอุปกรณ์ดังกล่าวได้ติดตั้งไว้ทั้ง 4 สถานี ได้แก่ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม ( $13.82^{\circ}\text{N}$ ,  $100.04^{\circ}\text{E}$ ) ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือจังหวัดเชียงใหม่ ( $18.78^{\circ}\text{N}$ ,  $98.98^{\circ}\text{E}$ ) ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือจังหวัดอุบลราชธานี ( $15.25^{\circ}\text{N}$ ,  $104.87^{\circ}\text{E}$ ) และศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออกจังหวัดสงขลา ( $7.20^{\circ}\text{N}$ ,  $100.60^{\circ}\text{E}$ ) กรณีรังสีรวมบนพื้นเอียงที่วัดทุกทิศทาง ที่มุมเอียง  $30^{\circ}$   $60^{\circ}$  และ  $90^{\circ}$  จะมีเฉพาะที่สถานีนครปฐมและอุบลราชธานี ส่วนสถานีเชียงใหม่มีเฉพาะที่มุมเอียง  $30^{\circ}$   $60^{\circ}$  ที่หันไปทางทิศเหนือ และ  $90^{\circ}$  ทุกทิศทาง และสำหรับสถานีสงขลามีเฉพาะที่มุมเอียง  $30^{\circ}$   $60^{\circ}$  ที่หันไปทางทิศใต้ และ  $90^{\circ}$  ทุกทิศทาง

ข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ได้จากเครื่องวัดไพราโนมิเตอร์และเครื่องวัดไพริลิโอมิเตอร์จะอยู่ในรูปของศักย์ไฟฟ้า ซึ่งจะถูกบันทึกโดยเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DX2000 (รูปที่ 22) โดยจะทำการบันทึกค่าทุกๆ 1 วินาที จากนั้นจะทำการแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าให้เป็นค่ารังสีอาทิตย์รายชั่วโมงโดยใช้สมการ

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

เมื่อ  $I$  คือ ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ (วัตต์ต่อตารางเมตร)

$V$  คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการวัด (โวลต์)

$S$  คือ ค่าการตอบสนองของหัววัด (โวลต์ต่อวัตต์ต่อตารางเมตร)

ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ได้จะอยู่ในรูปของวัตต์ต่อตารางเมตร ( $W/m^2 \cdot hr$ ) จากนั้นจะทำแปลงหน่วยให้อยู่ในรูป  $MJ/m^2 \cdot hr$  โดยผู้วิจัยจะใช้ข้อมูลตั้งแต่ 08.00 น. ถึง 16.00 น.



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 14 เครื่องวัดรังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ทำมุม (ก)  $30^\circ$  (ข)  $60^\circ$  และ (ค)  $90^\circ$  กับพื้นราบ หันไปทางทิศเหนือ ได้ ตะวันออก และตะวันตก ที่สถานีนครปฐม



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 15 เครื่องวัดรังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ทำมุม (ก)  $30^\circ$  ทิศเหนือ (ข)  $60^\circ$  ทิศเหนือ และ (ค)  $90^\circ$  กับพื้นราบ หันไปทางทิศเหนือ ได้ ตะวันออก และตะวันตก ที่สถานีเชียงใหม่



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 16 เครื่องวัดรังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ทำมุม (ก)  $30^\circ$  (ข)  $60^\circ$  และ (ค)  $90^\circ$  กับพื้นราบที่หันไปทางทิศเหนือ ได้ ตะวันออก และตะวันตก ที่สถานีอุบลราชธานี



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 17 เครื่องวัดรังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ทำมุม (ก)  $30^{\circ}$  ทิศเหนือ (ข)  $60^{\circ}$  ทิศเหนือ และ  $90^{\circ}$  กับพื้นราบ ที่หันไปทางทิศเหนือ ได้ ตะวันออก และตะวันตก ที่สถานีสงขลา



(ก)



(ข)

รูปที่ 18 เครื่องวัดรังสีอาทิตย์ (ก) รังสีตรง (ยี่ห้อ Eppley รุ่น NIP) (ข) รังสีกระจายบนพื้นราบของสถานีนครปฐม



(ก)



(ข)

รูปที่ 19 เครื่องวัดรังสีอาทิตย์ (ก) รังสีตรง (ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CHP1) (ข) รังสีกระจายบนพื้นราบของสถานีเชียงใหม่



(ก)



(ข)

รูปที่ 20 เครื่องวัดรังสีอาทิตย์ (ก) รังสีตรง (ยี่ห้อ Kipp&Zonen รุ่น CHP1) (ข) รังสีกระจายของ  
สถานีอุบลราชธานี



(ก)



(ข)

รูปที่ 21 เครื่องวัดรังสีอาทิตย์ (ก) รังสีตรง (ยี่ห้อ Eppley รุ่น NIP) (ข) รังสีกระจายของสถานีสงขลา



รูปที่ 22 เครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) ยี่ห้อ Yokogawa รุ่น DX2000

### 3.1.1 การควบคุมคุณภาพข้อมูล

โดยทั่วไปในการวัดค่าความเข้มรังสีอาทิติย์มักจะพบข้อมูลที่มีความผิดปกติ และมีบางข้อมูลที่อาจจะขาดหายไปอันเนื่องมาจากความผิดปกติของเครื่องวัดรังสีอาทิติย์หรือแม้แต่ผลของความผิดพลาดที่เกิดจากสภาพแวดล้อมรอบๆ เครื่องวัด ดังนั้นผู้วิจัยจึงต้องทำการควบคุมคุณภาพของข้อมูลก่อนที่จะนำข้อมูลรังสีอาทิติย์มาใช้ตามวิธีการดังนี้

1. การเปรียบเทียบกับข้อมูลความเข้มรังสีอาทิติย์นอกบรรยากาศโลก โดยค่าความเข้มรังสีอาทิติย์จะมีค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลได้ อย่างเช่น รังสีตรงบนระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางของรังสีต้องมีค่าน้อยกว่ารังสีอาทิติย์นอกบรรยากาศโลก

$$I_{bn} < I_{on} \quad (3.3)$$

เมื่อ  $I_{bn}$  คือ ความเข้มรังสีตรงบนระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางของรังสี (วัดต่อตารางเมตร)

$I_{on}$  คือ ความเข้มรังสีอาทิติย์นอกบรรยากาศโลกบนระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางของรังสี (วัดต่อตารางเมตร)

2. เปรียบเทียบข้อมูลรังสีรวมและรังสีกระจาย กรณีที่มีการวัดพร้อมกัน เราสามารถเปรียบเทียบค่าทั้งสองเพื่อตรวจสอบถูกต้อง โดยข้อมูลที่ดีคือข้อมูลที่ค่าความเข้มรังสีกระจาย น้อยกว่าความเข้มรังสีรวม ในกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆหรือข้อมูลที่ค่าความเข้มรังสีกระจายเท่ากับค่าความเข้มรังสีรวมในกรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด

$$I_d \leq I_g \quad (3.4)$$

เมื่อ  $I_d$  คือ ความเข้มรังสีกระจาย (วัดต่อตารางเมตร)

$I_g$  คือ ความเข้มรังสีรวม (วัดต่อตารางเมตร)

3. ตัดข้อมูลรายชั่วโมงที่มีมุมอัลติจูดของดวงอาทิติย์น้อยกว่า 5 องศา เพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดที่อาจเกิดจากสภาพแวดล้อม และความคลาดเคลื่อนที่เกิดจาก cosine response ของเครื่องวัด

### 3.1.2 การจำแนกสภาพท้องฟ้า

ในการจำแนกสภาพท้องฟ้า ผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลภาพถ่ายท้องฟ้าที่บันทึกทุกๆ 5 นาที ด้วยเครื่องถ่ายภาพท้องฟ้า (sky view) ยี่ห้อ Prede (model PSV-100) ที่ติดตั้งอยู่ทั้ง 4 สถานี ดังแสดงในรูปที่ 23 ซึ่งจะได้ภาพถ่ายท้องฟ้าทั้งหมดจากขอบฟ้าจนถึงจุดเซนธิธ (zenith) แล้วนำมาจำแนกสภาพท้องฟ้าโดยสังเกตจากสายตา โดยผู้วิจัยจะทำการแบ่งท้องฟ้าออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ (1) กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด (2) ท้องฟ้าปราศจากเมฆ และ (3) ท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน จากนั้นผู้วิจัยได้ใช้ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงที่แบ่งตามสภาพท้องฟ้าแล้ว มาใช้สร้างและทดสอบสมรรถนะของแบบจำลอง



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 23 เครื่องถ่ายภาพท้องฟ้า (sky view) ยี่ห้อ PREDE (model PSV-100) (ก) สถานีนครปฐม  
(ข) สถานีเชียงใหม่ (ค) สถานีอุบลราชธานี และ (ง) สถานีสงขลา

สำหรับตัวอย่างภาพถ่ายท้องฟ้าที่ได้จากเครื่องถ่ายภาพท้องฟ้า ในแต่ละกรณีของทั้ง 4 สถานี คือสถานีนครปฐม สถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี และสถานีสงขลา แสดงในรูปที่ 24 – 27 ตามลำดับ



(ก)

(ข)

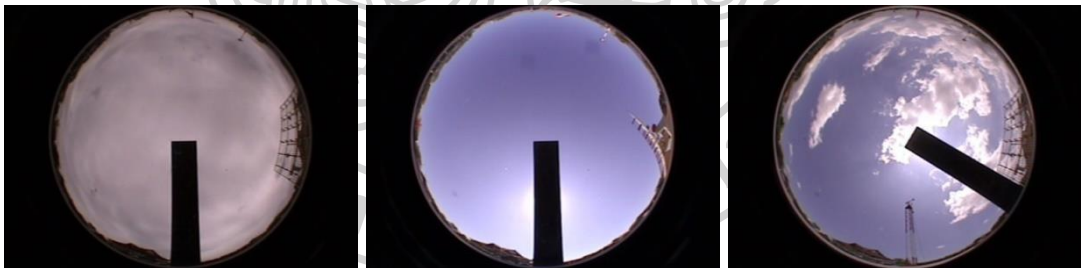
(ค)

รูปที่ 24 ตัวอย่างภาพถ่ายท้องฟ้า ที่สถานีนครปฐม

(ก) กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด วันที่ 5 สิงหาคม 2559 เวลา 16.55 น.

(ข) กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ วันที่ 2 มกราคม 2559 เวลา 09.35 น.

(ค) กรณีท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน วันที่ 9 มิถุนายน 2559 เวลา 12.35 น.



(ก)

(ข)

(ค)

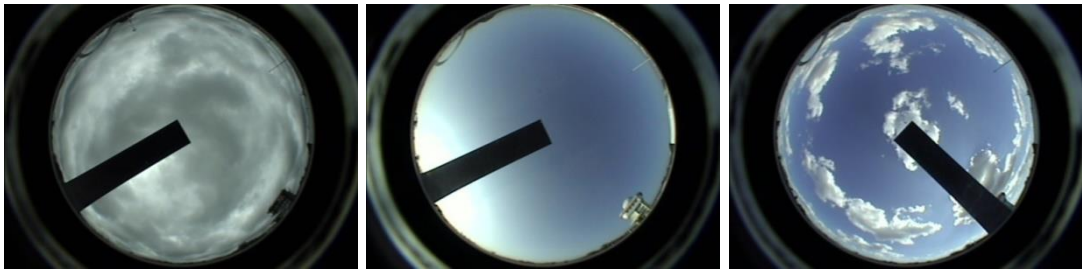
รูปที่ 25 ตัวอย่างภาพถ่ายท้องฟ้าที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่

(ก) กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด วันที่ 2 เมษายน 2560 เวลา 12.20 น.

(ข) กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ วันที่ 5 กุมภาพันธ์ 2560 เวลา 12.20 น.

(ค) กรณีท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน วันที่ 18 เมษายน 2560 เวลา 13.00 น.





(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 26 ตัวอย่างภาพถ่ายท้องฟ้าที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี

(ก) กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด วันที่ 10 กันยายน 2558 เวลา 10.50 น.

(ข) กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ วันที่ 10 กุมภาพันธ์ 2558 เวลา 08.30 น.

(ค) กรณีท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน วันที่ 6 กุมภาพันธ์ 2558 เวลา 14.20 น.



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 27 ตัวอย่างภาพถ่ายท้องฟ้า ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ จังหวัดสงขลา

(ก) กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด วันที่ 18 มิถุนายน 2561 เวลา 11.00 น.

(ข) กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ วันที่ 14 มกราคม 2562 เวลา 15.10 น.

(ค) กรณีท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน วันที่ 11 เมษายน 2561 เวลา 11.50 น.

### 3.2 การพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียง

#### 3.2.1 การเตรียมข้อมูล

ในขั้นตอนแรก ผู้วิจัยจะคำนวณค่ารังสีตรงรายชั่วโมงบนพื้นเอียง เนื่องจากรังสีตรงที่ได้จากเครื่องวัด pyrheliometer จะอยู่ในรูปของรังสีตรงบนระนาบตั้งฉากกับทิศทางของรังสี ( $I_{bn}$ ) จึงต้องแปลงให้เป็นค่ารังสีตรงบนพื้นเอียง ( $I_{bt}$ ) สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$I_{bt} = I_{bn} \cos \theta \quad (3.5)$$

โดยที่  $I_{bt}$  คือ รังสีตรงรายชั่วโมงบนพื้นเอียง (จุดต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)  
 $I_{bn}$  คือ รังสีตรงรายชั่วโมงบนระนาบตั้งฉากกับทิศทางของรังสี (จุดต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)  
 $\theta$  คือ มุมตกกระทบของรังสีอาทิตย์ (องศา)

จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการคำนวณค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียง ( $I_{dt}$ ) โดยนำรังสีตรงบนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณในสมการ (3.5) มาลบออกจากค่ารังสีรวมรายชั่วโมงบนพื้นเอียง ( $I_{gt}$ ) ที่ได้จากเครื่องวัดรังสีกระจายบนพื้นเอียง ได้เป็น

$$I_{dt} = I_{gt} - I_{bt} \quad (3.6)$$

โดยที่  $I_{dt}$  คือ รังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียง (จุดต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)  
 $I_{gt}$  คือ รังสีรวมรายชั่วโมงบนพื้นเอียง (จุดต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)  
 $I_{bt}$  คือ รังสีตรงรายชั่วโมงบนพื้นเอียง (จุดต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง)

เนื่องจากเครื่องวัดรังสีกระจายบนพื้นเอียงได้ทำการติดตั้งแผ่นโลหะสีดำดังแสดงในรูปที่ 14 - 17 เพื่อกันรังสีกระจายที่สะท้อนจากพื้นผิวโลกที่จะสะท้อนเข้าหัววัดรังสี ดังนั้นในการคำนวณค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียงสามารถตัดรังสีกระจายที่สะท้อนจากพื้นผิวโลก ทำให้เหลือเพียงรังสีกระจายที่มาจากท้องฟ้าเท่านั้น

สำหรับในการสร้างแบบจำลองคำนวณรังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียง ผู้วิจัยได้ทำการแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด โดยชุดแรกผู้วิจัยได้เลือกใช้ข้อมูลจากสถานีนครปฐมในการสร้างแบบจำลองเป็นระยะเวลา 4 ปี ตั้งแต่ปี 2014 ถึง 2017 ส่วนข้อมูลชุดที่สองจะเป็นข้อมูลที่ใช้สำหรับทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองของแต่ละสถานี ซึ่งช่วงเวลาของข้อมูลที่ใช้ในการสร้างและทดสอบสมรรถนะของแบบจำลอง แสดงในตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 แสดงช่วงเวลาของข้อมูลที่ใช้สำหรับสร้างแบบจำลอง (ใช้ข้อมูลจากสถานีนครปฐม)

สถานี	ทิศ	มุมเอียง (องศา)	ช่วงเวลาของข้อมูลที่ใช้ทดสอบแบบจำลอง
นครปฐม	เหนือ	30	มกราคม 2014 – 31 ธันวาคม 2017
		60	
		90	
	ใต้	30	
		60	
		90	
	ตะวันออก	30	
		60	
		90	
	ตะวันตก	30	
		60	
		90	



ตารางที่ 3 แสดงช่วงเวลาของข้อมูลที่ใช้ทดสอบแบบจำลอง (ใช้ข้อมูลทั้ง 4 สถานี)

สถานี	ทิศ	มุมเอียง (องศา)	ช่วงเวลาของข้อมูลที่ใช้ทดสอบแบบจำลอง
นครปฐม	เหนือ, ใต้,	30	มกราคม 2018 – ธันวาคม 2018
	ตะวันออก	60	
	และตะวันตก	90	
อุบลราชธานี	เหนือ, ใต้,	30	มกราคม 2015 - ธันวาคม 2015
	ตะวันออก	60	
	และตะวันตก	90	
เชียงใหม่	เหนือ	30, 60, 90	มกราคม 2017 - ธันวาคม 2017
	ใต้,ตะวันออก	60	
	และตะวันตก	90	
สงขลา	ใต้	30, 60, 90	มีนาคม 2018 – กุมภาพันธ์ 2019
	เหนือ,	90	
	ตะวันออก และตะวันตก		



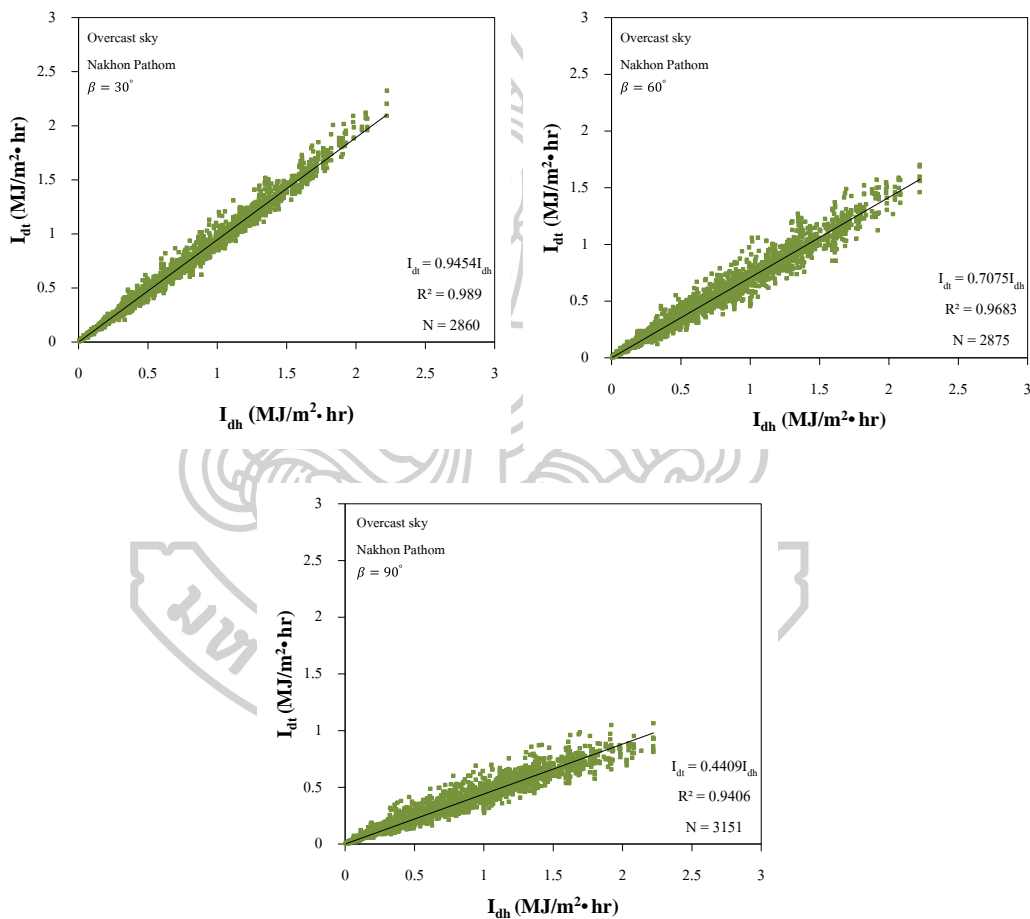
### 3.2.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

เนื่องจากเมฆส่งผลต่อความเข้มรังสีอาทิตย์บนพื้นผิวโลก โดยขึ้นกับเวลาและปริมาณเมฆ กล่าวคือถ้าปริมาณเมฆบดบังดวงอาทิตย์มาก รังสีที่ได้รับบนพื้นผิวโลกจะมีค่าน้อย ดังนั้นในการสร้างและทดสอบแบบจำลอง ผู้วิจัยจึงต้องคำนึงถึงผลของเมฆด้วย โดยทั่วไปรังสีรวมจะประกอบด้วยรังสีตรงและรังสีกระจาย กรณีที่ท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด (Overcast sky) รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกจะมีเฉพาะรังสีกระจาย สำหรับกรณีที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆ (Clear sky) รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกจะมีทั้งรังสีตรงและรังสีกระจาย เนื่องจากความแตกต่างดังกล่าว ทำให้การสร้างแบบจำลองของแต่ละกรณีจึงไม่เหมือนกัน ในการเตรียมข้อมูลก่อนการสร้างแบบจำลอง ผู้วิจัยมีข้อมูลความเข้มรังสีรวมบนพื้นเอียง ข้อมูลความเข้มรังสีตรง และข้อมูลความเข้มรังสีกระจายบนพื้นราบ ชั้นแรกผู้วิจัยจะทำการแปลงค่าความเข้มรังสีตรงบนระนาบที่ตั้งฉากกับทิศของรังสี ( $I_{bn}$ ) ที่ได้จากเครื่องวัดไพเอลิโอมิเตอร์ให้เป็นค่าบนพื้นเอียง (สมการ 3.5) จากนั้นนำค่าความเข้มรังสีตรงบนพื้นเอียง ( $I_{bt}$ ) ที่คำนวณได้ไปลบออกจากค่ารังสีรวมบนพื้นเอียง ( $I_{gt}$ ) ที่ได้จากเครื่องวัด จะได้ค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียง ( $I_{dt}$ ) สำหรับในกรณีที่ท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด และกรณีที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆ ด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์ รังสีรวมบนพื้นเอียงจะเท่ากับรังสีกระจายบนพื้นเอียง เนื่องจากกรณีนี้เมฆจะบังรังสีตรงที่มาจากดวงอาทิตย์ ทำให้พื้นเอียงได้รับเพียงรังสีกระจายจากท้องฟ้าเท่านั้น แต่สำหรับกรณีที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆ ด้านที่เห็นดวงอาทิตย์ พื้นเอียงจะได้รับทั้งรังสีตรงและรังสีกระจายจากท้องฟ้า ดังนั้นกรณีนี้จะต้องใช้ค่าความเข้มรังสีกระจายบนพื้นเอียงที่คำนวณได้จากสมการ (3.6) มาหาความสัมพันธ์กับค่ารังสีกระจายบนพื้นราบ

ในการสร้างแบบจำลองหาค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียง ผู้วิจัยได้หาความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียง ( $I_{dt}$ ) กับค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นราบ ( $I_{dh}$ ) ที่มุมเอียง  $30^\circ$   $60^\circ$  และ  $90^\circ$  กับพื้นราบที่หันระนาบไปทางทิศเหนือ ได้ ตะวันออก และตะวันตก ของสถานี นครปฐม โดยแบ่งตามประเภทท้องฟ้าออกเป็น 3 กรณี ได้แก่ กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด ท้องฟ้าปราศจากเมฆ และท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน

1.) กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด (Overcast sky)

ผู้วิจัยได้เลือกข้อมูลเฉพาะชั่วโมงที่ท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด จะนิยามโดยการแบ่งท้องฟ้าออกเป็น 10 ส่วน ถ้ามีเมฆปกคลุมทั้ง 10 ส่วน หรือ  $10/10 = 1$  จะถือเป็นสภาพที่ปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด โดยเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นราบและค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียงรวมข้อมูลทุกทิศทางจากสถานีนครปฐม ในแต่ละมุมเอียงต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 28



รูปที่ 28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นราบ ( $I_{dh}$ ) และค่าความเข้มรังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียง ( $I_{dti}$ ) ที่มุมเอียง 30 60 และ 90 องศา กับพื้นราบ ตามลำดับ

จากกราฟรูปที่ 28 จะเห็นว่ารังสีกระจายบนพื้นราบมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับรังสีกระจายบนพื้นเอียง โดยไม่ขึ้นกับทิศทางที่พื้นเอียงหัน ซึ่งสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

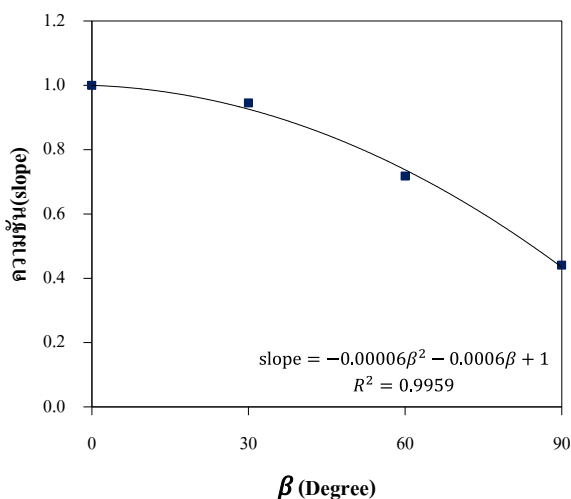
$$I_{dt} = \text{slope} \times I_{dh} \quad (3.7)$$

เมื่อ  $I_{dt}$  คือ ค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียง ( $\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ )

$I_{dh}$  คือ ค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นราบ ( $\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ )

slope คือ ความชัน (-)

จากนั้น ผู้วิจัยได้นำค่าความชันมาเขียนกราฟกับมุมเอียงได้ผลดังรูปที่ 29



รูปที่ 29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชันกับมุมของพื้นเอียงสำหรับทุกทิศทาง (ทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออก และทิศตะวันตก) กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด

จากกราฟในรูปที่ 29 จะเห็นว่าค่าความชันมีความสัมพันธ์กับมุมเอียง ( $\beta$ ) (องศา) เป็นแบบเส้นโค้งคว่ำซึ่งสามารถพิตกราฟของความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปของสมการโพลิโนเมียลกำลังสอง เขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$\text{slope} = -0.00006\beta^2 - 0.0006\beta + 1 \quad (3.8)$$

เมื่อรวมสมการ (3.7) และ (3.8) จะได้แบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีกระจายบนพื้นเอียง ดังนี้

$$I_{dt} = (-0.00006\beta^2 - 0.0006\beta + 1)I_{dh} \quad (3.9)$$

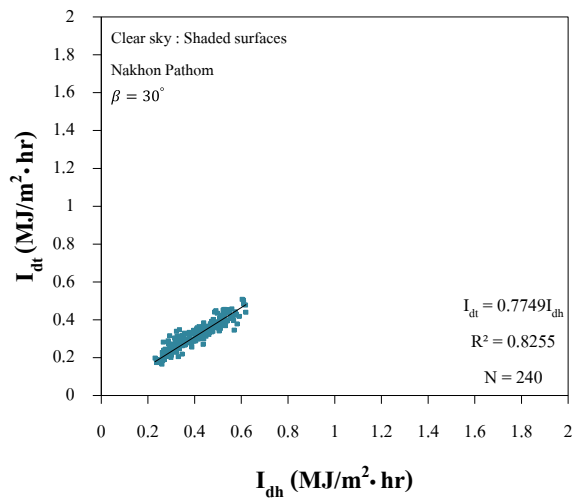
## 2) กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ (Clear sky)

ในการหาแบบจำลองสำหรับคำนวณค่าความเข้มรังสีกระจายบนพื้นเอียงในกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ ผู้วิจัยได้ทำการแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน คือ ด้านที่พื้นเอียงเห็นดวงอาทิตย์ (Sunlit surface) และด้านที่พื้นเอียงไม่เห็นดวงอาทิตย์ (Shaded surface) โดยพิจารณาจากทางเดินของดวงอาทิตย์ที่ผ่านระนาบของพื้นเอียงตามมุมตกกระทบ ( $\theta$ ) จากนั้นจึงหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มรังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียงและค่าความเข้มรังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นราบ ดังแสดงต่อไปนี้

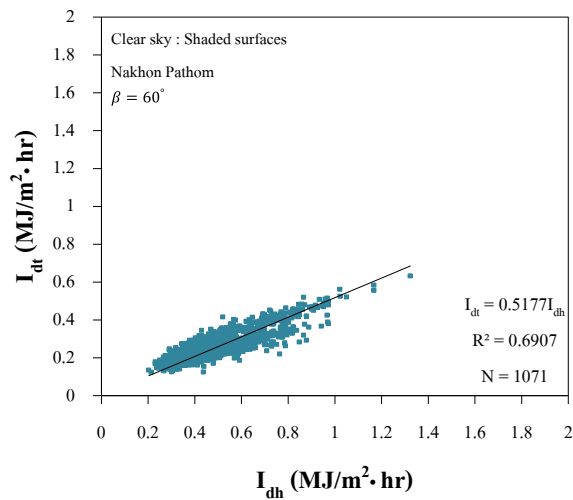
### ก. ด้านที่พื้นเอียงไม่เห็นดวงอาทิตย์ (Shaded surface)

ผู้วิจัยได้นำข้อมูลรังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นราบและรังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียงที่วัดได้จากสถานีนครปฐม มาเขียนกราฟความสัมพันธ์สำหรับด้านที่ระนาบเอียงไม่เห็นดวงอาทิตย์ ผลที่ได้พบว่ากราฟความสัมพันธ์ในกรณีดังกล่าวมีลักษณะใกล้เคียงกับกราฟความสัมพันธ์ในกรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด เนื่องจากพื้นเอียงจะไม่ได้รับผลของรังสีตรงที่มาจากดวงอาทิตย์ และเนื่องจากตำแหน่งละติจูดของพื้นที่ในประเทศไทย ทำให้ทางเดินปรากฏของดวงอาทิตย์ส่วนใหญ่อยู่ทางซีกโลกใต้ ส่งผลให้พื้นเอียงมุม  $30^\circ$  ที่หันไปทางทิศเหนือและทิศใต้ กับพื้นเอียง  $60^\circ$  ที่หันไปทางทิศใต้เห็นดวงอาทิตย์ตลอดเวลา ดังนั้นในการหาความสัมพันธ์สำหรับพื้นเอียง  $30^\circ$  จะมีเพียงข้อมูลจากทิศตะวันออกและทิศตะวันตกเท่านั้น ในกรณีของ  $60^\circ$  ก็จะมีข้อมูลของทิศเหนือ ทิศตะวันออก และทิศตะวันตก ส่วนในกรณี  $90^\circ$  จะมีข้อมูลของทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออก และทิศตะวันตก ซึ่งสามารถรวมข้อมูลของทั้ง 4 ทิศทาง ในแต่ละมุมเอียงได้ดังนี้

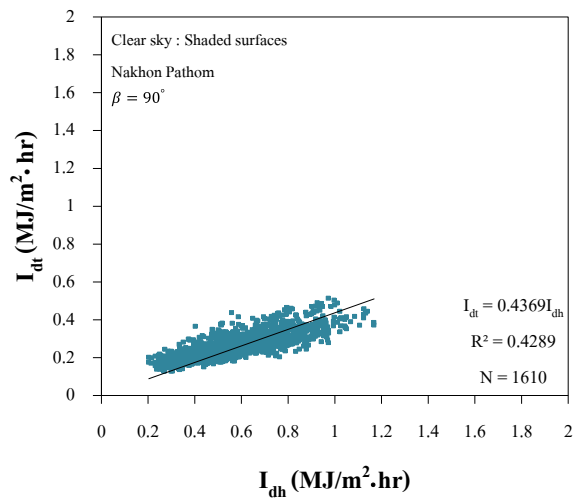




รูปที่ 30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นราบ ( $I_{dh}$ ) กับค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียง ( $I_{dt}$ ) ที่ทำมุม 30 องศา รวมข้อมูลที่ได้จากการวัดทุกทิศทาง กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์

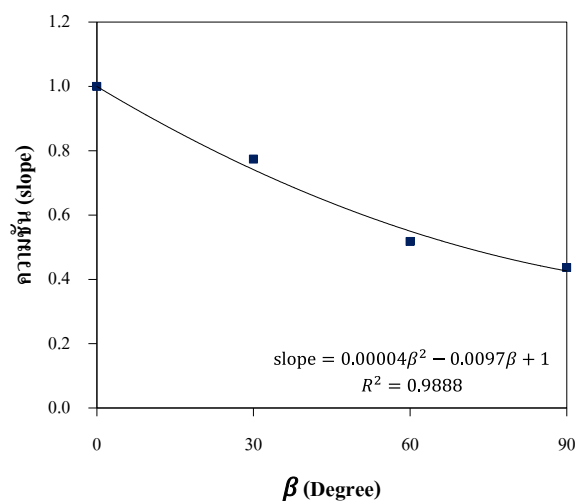


รูปที่ 31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นราบ ( $I_{dh}$ ) กับค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียง ( $I_{dt}$ ) ที่ทำมุม 60 องศา รวมข้อมูลที่ได้จากการวัดทุกทิศทาง กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์



รูปที่ 32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นราบ ( $I_{dh}$ ) กับค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียง ( $I_{dt}$ ) ที่ทำมุม 90 องศา รวมข้อมูลที่ได้จากการวัดทุกทิศทาง กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์

จากกราฟรูปที่ 30 - 32 จะเห็นว่ารังสีกระจายบนพื้นราบมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับรังสีกระจายบนพื้นเอียงเช่นเดียวกับกรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมดตามสมการ (3.7) ซึ่งจะเห็นว่าข้อมูลที่ได้ไม่ขึ้นกับทิศทางของพื้นเอียง จากนั้นผู้วิจัยได้นำค่าความชันมาเขียนกราฟกับมุมเอียงได้ผลดังรูปที่ 33



รูปที่ 33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชันกับมุมของพื้นเอียงในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆ กรณีที่พื้นเอียงไม่เห็นดวงอาทิตย์

จากกราฟในรูปที่ 33 จะเห็นว่าค่าความชันมีความสัมพันธ์กับมุมเอียง ( $\beta$ ) เป็นแบบเส้นโค้ง หมายถึงสามารถพิกกราฟของความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปของสมการโพลีโนเมียลกำลังสอง เขียนสมการสำหรับคำนวณค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงได้ดังนี้

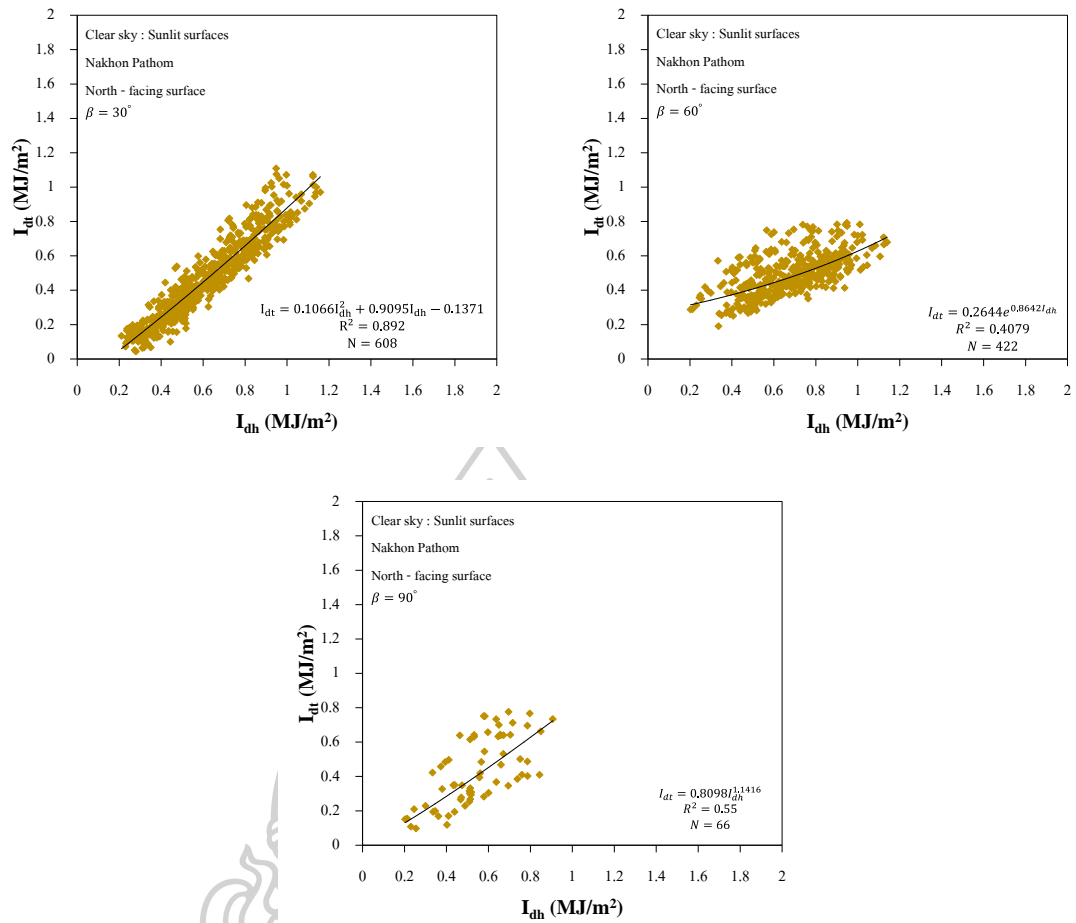
$$I_{dt} = (0.00004\beta^2 - 0.0097\beta + 1)I_{dh} \quad (3.10)$$

ข. ด้านที่พื้นเอียงเห็นดวงอาทิตย์ (Sunlit surface)

ผู้วิจัยได้นำข้อมูลรังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียงที่วัดได้จากสถานีนครปฐม ในด้านที่ระนาบเอียงเห็นดวงอาทิตย์มาหาความสัมพันธ์กับรังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นราบ โดยทำการแยกในแต่ละมุมเอียง และแต่ละทิศทาง เนื่องจากความสัมพันธ์ที่ได้มีลักษณะแตกต่างกันจึงทำให้ไม่สามารถนำข้อมูลมารวมกันได้ โดยจะขึ้นอยู่กับมุมของพื้นเอียงและแต่ละทิศทางที่ระนาบเอียง

- ทิศเหนือ

ข้อมูลรังสีกระจายบนพื้นเอียงในด้านที่พื้นเอียงหันไปทางทิศเหนือ กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ มีความสัมพันธ์กับข้อมูลรังสีกระจายบนพื้นราบที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดในแต่ละมุมเอียง โดยจำนวนชั่วโมงที่ดวงอาทิตย์เดินผ่านระนาบเอียงที่หันไปทางทิศเหนือมีช่วงเวลาจำกัด ทำให้จำนวนข้อมูลค่อนข้างน้อยสำหรับพื้นเอียง  $30^\circ$  จะทำการพิกกราฟของความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปของสมการโพลีโนเมียลกำลังสอง ส่วนพื้นเอียง  $60^\circ$  จะพิกกราฟความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปของสมการเอ็กซ์โพเนนเชียล และ  $90^\circ$  จะพิกกราฟความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปของสมการเลขยกกำลัง ดังกราฟรูปที่ 34



รูปที่ 34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีอาทิตย์บนพื้นราบ ( $I_{dh}$ ) และค่ารังสีอาทิตย์บนพื้นเอียง ( $I_{dt}$ ) ที่หันไปทางทิศเหนือ ในกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่พื้นเอียงเห็นดวงอาทิตย์

ดังนั้นผู้วิจัยจะเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรังสีกระจายบนพื้นราบและรังสีกระจายบนพื้นเอียงกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่พื้นเอียงเห็นดวงอาทิตย์ และหันไปทางทิศเหนือ ได้ดังนี้

- มุมเอียง  $30^\circ$  กับพื้นราบ

$$I_{dt} = 0.1066I_{dh}^2 + 0.9095I_{dh} - 0.1371 \quad (3.11)$$

- มุมเอียง  $60^\circ$  กับพื้นราบ

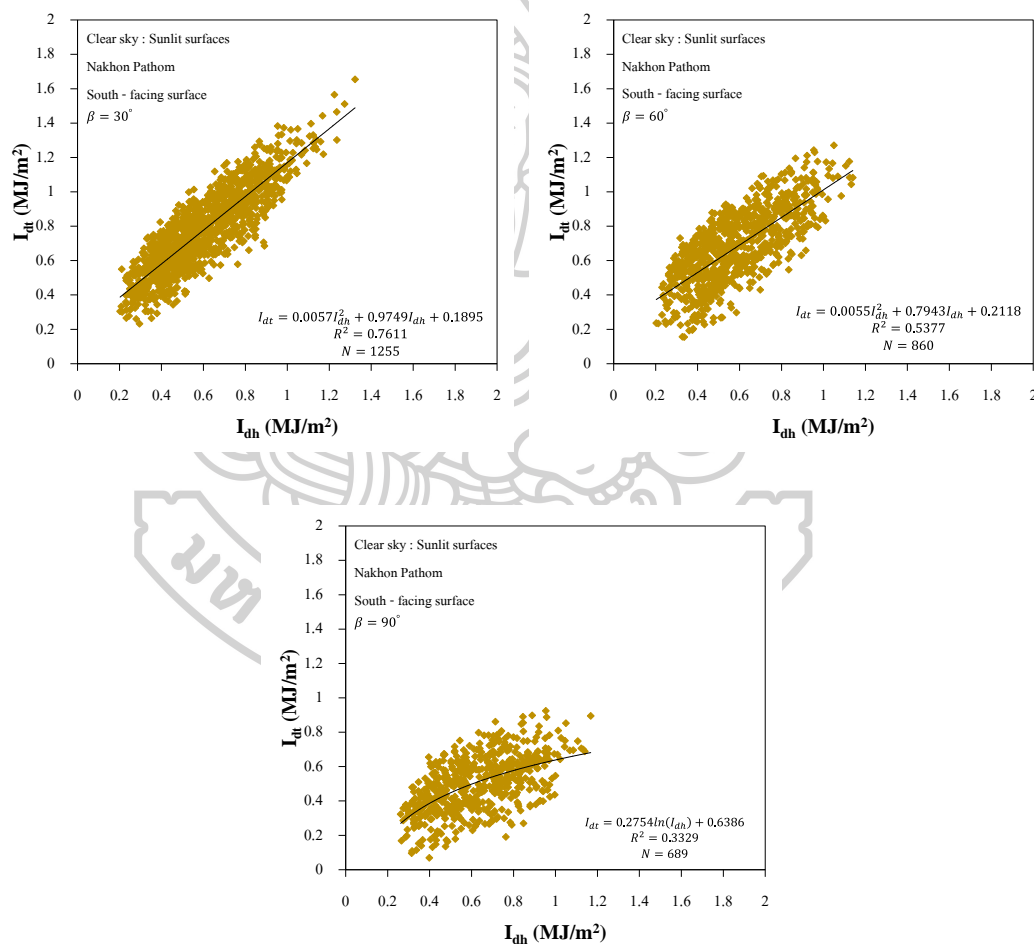
$$I_{dt} = 0.2644e^{0.8642I_{dh}} \quad (3.12)$$

- มุมเอียง  $90^\circ$  กับพื้นราบ

$$I_{dt} = 0.8098I_{dh}^{1.1416} \quad (3.13)$$

- ทิศใต้

ข้อมูลรังสีกระจายบนพื้นเอียงในด้านที่ระนาบเอียงหันไปทางทิศใต้ กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ มีจำนวนชั่วโมงที่ค่อนข้างมากเนื่องจากระนาบเอียงจะได้รับรังสีอาทิตย์มากกว่าทิศอื่นๆ เนื่องจากตำแหน่งละติจูดของประเทศไทยที่ทางเดินปรากฏของดวงอาทิตย์เดินอยู่ทางซีกโลกใต้เป็นส่วนใหญ่ ทำให้ระนาบเอียงที่หันไปทางทิศใต้สามารถมองเห็นดวงอาทิตย์ตลอดทั้งปี สำหรับพื้นเอียง  $30^\circ$  และ  $60^\circ$  กับพื้นราบจะทำการพิตกกราฟของความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปของสมการโพลีโนเมียลกำลังสอง ส่วนพื้นเอียง  $90^\circ$  จะพิตกกราฟความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปของสมการลอการิทึม ดังกราฟรูปที่ 35



รูปที่ 35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีอาทิตย์บนพื้นราบ ( $I_{dh}$ ) และค่ารังสีอาทิตย์บนพื้นเอียง ( $I_{dt}$ ) ที่หันไปทางทิศใต้ ในกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่พื้นเอียงเห็นดวงอาทิตย์

ดังนั้นผู้วิจัยจะเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรังสีกระจายบนพื้นราบและรังสีกระจายบนพื้นเอียงกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่พื้นเอียงเห็นดวงอาทิตย์ และหันไปทางทิศใต้ ได้ดังนี้

- มุมเอียง  $30^\circ$  กับพื้นราบ

$$I_{dt} = 0.0057I_{dh}^2 + 0.9749I_{dh} + 0.1895 \quad (3.14)$$

- มุมเอียง  $60^\circ$  กับพื้นราบ

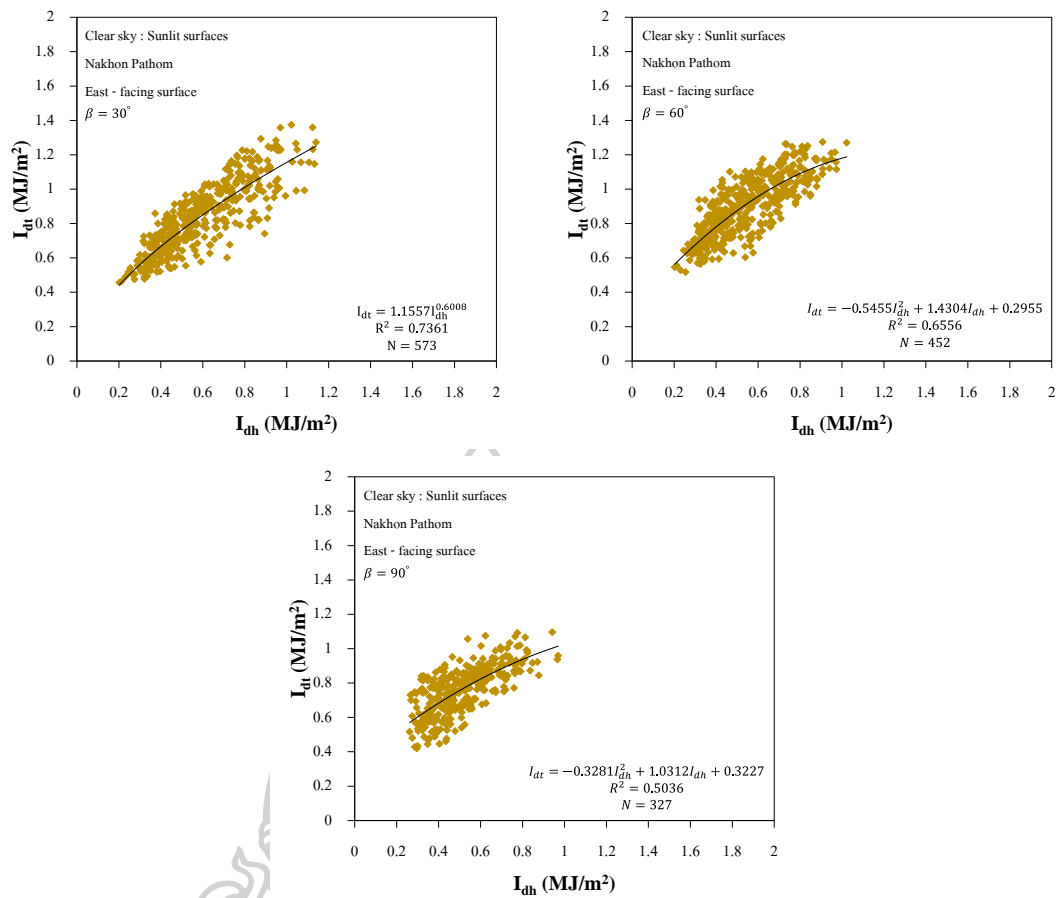
$$I_{dt} = 0.0055I_{dh}^2 + 0.7943I_{dh} + 0.2118 \quad (3.15)$$

- มุมเอียง  $90^\circ$  กับพื้นราบ

$$I_{dt} = 0.2754 \ln(I_{dh}) + 0.6386 \quad (3.16)$$

- ทิศตะวันออก

ข้อมูลรังสีกระจายบนพื้นเอียงในด้านที่พื้นเอียงหันไปทางทิศตะวันออก กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ เนื่องจากดวงอาทิตย์จะเดินทางจากทิศตะวันออกไปทางทิศตะวันตกจะทำให้พื้นเอียงที่หันไปทางทิศตะวันออกมีช่วงเวลาจำกัดโดยเฉพาะที่มุมเอียง  $90^\circ$  จะมีจำนวนข้อมูลช่วงเช้าจนถึงเที่ยงเท่านั้น ในขณะที่มุมเอียง  $30^\circ$  และ  $60^\circ$  ก็จะมีจำนวนข้อมูลน้อยลงตามมุมเอียงที่เพิ่มขึ้น สำหรับพื้นเอียง  $30^\circ$  จะทำการพิศกรภาพของความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปของสมการเลขยกกำลัง ส่วนพื้นเอียง  $60^\circ$  และ  $90^\circ$  จะพิศกรภาพความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปของสมการโพลิโนเมียล ดังกราฟรูปที่ 36



รูปที่ 36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีอาทิตย์บนพื้นราบ ( $I_{dh}$ ) และค่ารังสีอาทิตย์บนพื้นเอียง ( $I_{dt}$ ) ที่หันไปทางทิศตะวันออก ในกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่พื้นเอียงเห็นดวงอาทิตย์

ดังนั้นผู้วิจัยจะเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรังสีกระจายบนพื้นราบและรังสีกระจายบนพื้นเอียงกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่พื้นเอียงเห็นดวงอาทิตย์ และหันไปทางทิศตะวันออก ได้ดังนี้

- มุมเอียง  $30^\circ$  กับพื้นราบ

$$I_{dt} = 1.1557I_{dh}^{0.6008} \quad (3.17)$$

- มุมเอียง  $60^\circ$  กับพื้นราบ

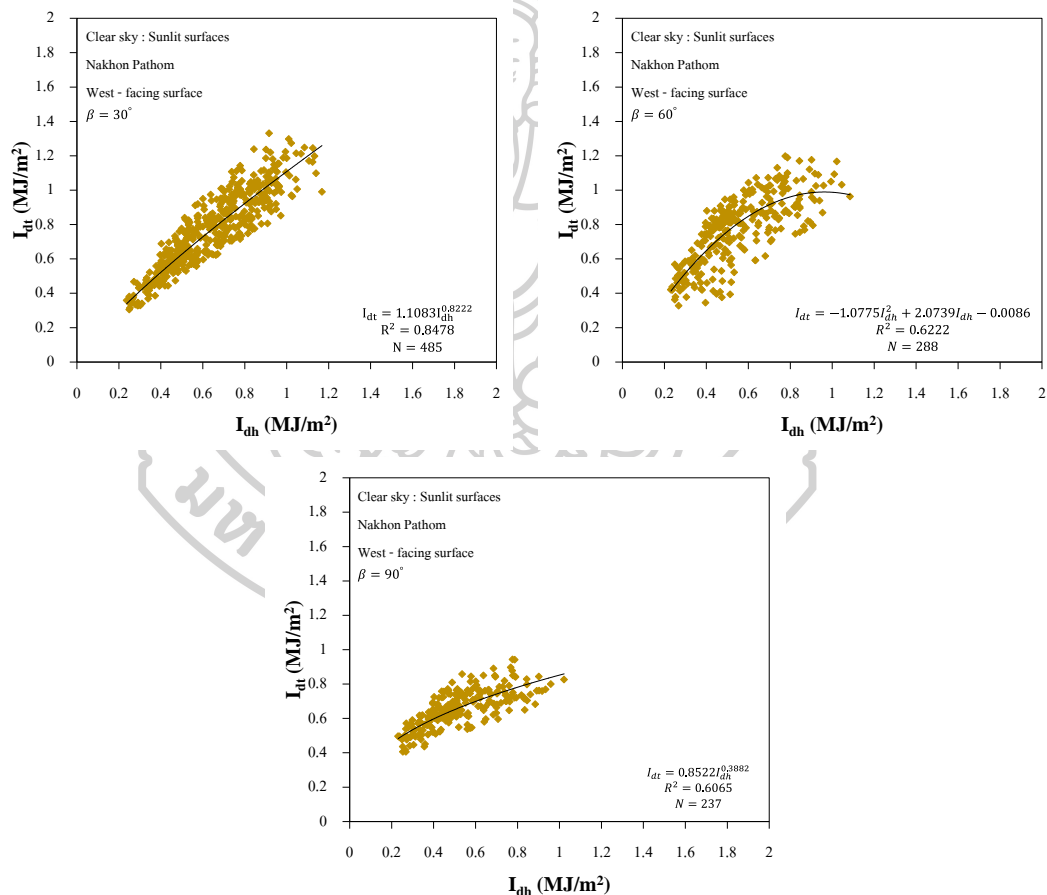
$$I_{dt} = -0.5455I_{dh}^2 + 1.4304I_{dh} + 0.2955 \quad (3.18)$$

- มุมเอียง  $90^\circ$  กับพื้นราบ

$$I_{dt} = -0.3281I_{dh}^2 + 1.0312I_{dh} + 0.3227 \quad (3.19)$$

- ทิศตะวันตก

ข้อมูลรังสีกระจายบนพื้นเอียงในด้านที่พื้นเอียงหันไปทางทิศตะวันตก กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ มีจำนวนชั่วโมงที่ขึ้นกับมุมเอียงของระนาบเอียง เนื่องจากดวงอาทิตย์จะเดินทางจากทิศตะวันออกไปทางทิศตะวันตกจะทำให้พื้นเอียงที่หันไปทางทิศตะวันตกมีช่วงเวลาจำกัดโดยเฉพาะที่มุมเอียง  $90^\circ$  จะมีจำนวนข้อมูลตั้งแต่ช่วงเที่ยงจนถึงเย็นเท่านั้น ในขณะที่มุมเอียง  $30^\circ$  และ  $60^\circ$  ก็จะมีจำนวนข้อมูลน้อยลงตามมุมเอียงที่เพิ่มขึ้น สำหรับพื้นเอียง  $30^\circ$  และ  $90^\circ$  จะทำการพิตกราฟของความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปของสมการเลขยกกำลัง ส่วนพื้นเอียง  $60^\circ$  จะพิตกราฟความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปของสมการโพลีโนเมียล ดังกราฟรูปที่ 37



รูปที่ 37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีอาทิตย์บนพื้นราบ ( $I_{dh}$ ) และค่ารังสีอาทิตย์บนพื้นเอียง ( $I_{dt}$ ) ที่หันไปทางทิศตะวันตก ในกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่พื้นเอียงเห็นดวงอาทิตย์



ดังนั้นผู้วิจัยจะเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรังสีกระจายบนพื้นราบและรังสีกระจายบนพื้นเอียงกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่พื้นเอียงเห็นดวงอาทิตย์ และหันไปทางทิศตะวันตก ได้ดังนี้

- มุมเอียง  $30^\circ$  กับพื้นราบ

$$I_{dt} = 1.1083I_{dh}^{0.3882} \quad (3.20)$$

- มุมเอียง  $60^\circ$  กับพื้นราบ

$$I_{dt} = -1.0775I_{dh}^2 + 2.0739I_{dh} - 0.0086 \quad (3.21)$$

- มุมเอียง  $90^\circ$  กับพื้นราบ

$$I_{dt} = 0.8522I_{dh}^{0.3882} \quad (3.22)$$

### 3) กรณีท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน (Partly cloudy sky)

สำหรับกรณีท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีกระจายบนพื้นเอียงกับบนพื้นราบค่อนข้างยากและซับซ้อน ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการรวมสมการในกรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมดกับสมการในกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆของแต่ละพื้นเอียงโดยใช้ปริมาณเมฆ (cloud cover) เป็นแฟคเตอร์ถ่วงน้ำหนัก ซึ่งได้มาจากการสังเกตด้วยตาเปล่าจากภาพถ่ายท้องฟ้า มีค่าตั้งแต่ 0 – 1 โดย 0 เป็นกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ ส่วน 1 เป็นกรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด และส่วนที่เหลือเป็นกรณีท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน

#### 3.2.3 สรุปแบบจำลอง

แบบจำลองสำหรับหาค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียงที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นราบกับบนพื้นเอียงรายชั่วโมงสำหรับทุกกรณี สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 แบบจำลองสำหรับคำนวณค่ารังสีอาทิตย์บนพื้นเอียง

ประเภทท้องฟ้า	ดวงอาทิตย์	ทิศที่พื้นเอียงหัน	มุมเอียง	แบบจำลอง
1. ท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด (Overcast sky)	ไม่เห็นดวงอาทิตย์	ทุกทิศทาง	รวม	$I_{dt} = (-0.00006 \beta^2 - 0.0006 \beta + 1) I_{dh}$
2. ท้องฟ้าปราศจากเมฆ (Clear sky)	ไม่เห็นดวงอาทิตย์	เหนือ	รวม	$I_{dt} = (0.00004 \beta^2 - 0.0097 \beta + 1) I_{dh}$
			30	$I_{dt} = 0.1066 I_{dh}^2 + 0.9095 I_{dh} - 0.1371$
			60	$I_{dt} = 0.2644 e^{0.8642 I_{dh}}$
	เห็นดวงอาทิตย์	ใต้	30	$I_{dt} = 0.8098 I_{dh}^{1.1416}$
			60	$I_{dt} = 0.0057 I_{dh}^2 + 0.9749 I_{dh} + 0.1895$
			90	$I_{dt} = 0.0055 I_{dh}^2 + 0.7943 I_{dh} + 0.2118$
	ดวงอาทิตย์ออก	ใต้	30	$I_{dt} = 0.0057 I_{dh}^2 + 0.9749 I_{dh} + 0.1895$
			60	$I_{dt} = 0.0055 I_{dh}^2 + 0.7943 I_{dh} + 0.2118$
			90	$I_{dt} = 0.2754 \ln(I_{dh}) + 0.6386$
		ตะวันออก	30	$I_{dt} = 1.1557 I_{dh}^{0.6008}$
			60	$I_{dt} = -0.5455 I_{dh}^2 + 1.4304 I_{dh} + 0.2955$
			90	$I_{dt} = -0.3281 I_{dh}^2 + 1.0312 I_{dh} + 0.3227$
	ตะวันตก	ใต้	30	$I_{dt} = 1.1083 I_{dh}^{0.3882}$
			60	$I_{dt} = -1.0775 I_{dh}^2 + 2.0739 I_{dh} - 0.0086$
			90	$I_{dt} = 0.8522 I_{dh}^{0.3882}$
3. ท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน (Partly cloudy sky)	ไม่เห็นดวงอาทิตย์	ทุกทิศทาง	รวม	$I_{dt} = C(-0.00006 \beta^2 - 0.0006 \beta + 1) I_{dh} + (1-C)(0.00004 \beta^2 - 0.0097 \beta + 1) I_{dh}$
			30	$I_{dt} = C(-0.00006 \beta^2 - 0.0006 \beta + 1) I_{dh} + (1-C)(0.1066 I_{dh}^2 + 0.9095 I_{dh} - 0.1371)$
	เห็นดวงอาทิตย์	เหนือ	60	$I_{dt} = C(-0.00006 \beta^2 - 0.0006 \beta + 1) I_{dh} + (1-C)(0.2644 e^{0.8642 I_{dh}})$
			90	$I_{dt} = C(-0.00006 \beta^2 - 0.0006 \beta + 1) I_{dh} + (1-C)(0.8098 I_{dh}^{1.1416})$
			30	$I_{dt} = C(-0.00006 \beta^2 - 0.0006 \beta + 1) I_{dh} + (1-C)(0.0057 I_{dh}^2 + 0.9749 I_{dh} + 0.1895)$
		ใต้	30	$I_{dt} = C(-0.00006 \beta^2 - 0.0006 \beta + 1) I_{dh} + (1-C)(0.0057 I_{dh}^2 + 0.9749 I_{dh} + 0.1895)$
			60	$I_{dt} = C(-0.00006 \beta^2 - 0.0006 \beta + 1) I_{dh} + (1-C)(0.0055 I_{dh}^2 + 0.7943 I_{dh} + 0.2118)$

			60	$I_{dt} = C(-0.00006\beta^2 - 0.0006\beta + 1)I_{dh}$ $+ (1-C)(0.0055I_{dh}^2 + 0.7943I_{dh} + 0.2118)$
			90	$I_{dt} = C(-0.00006\beta^2 - 0.0006\beta + 1)I_{dh}$ $+ (1-C)(0.2754\ln(I_{dh}) + 0.6386)$
		ตะวันออก	30	$I_{dt} = C(-0.00006\beta^2 - 0.0006\beta + 1)I_{dh}$ $+ (1-C)(1.1557I_{dh}^{0.6008})$
			60	$I_{dt} = C(-0.00006\beta^2 - 0.0006\beta + 1)I_{dh}$ $+ (1-C)(-0.5455I_{dh}^2 + 1.4304I_{dh} + 0.2955)$
			90	$I_{dt} = C(-0.00006\beta^2 - 0.0006\beta + 1)I_{dh}$ $+ (1-C)(-0.3281I_{dh}^2 + 1.0312I_{dh} + 0.3227)$
		ตะวันตก	30	$I_{dt} = C(-0.00006\beta^2 - 0.0006\beta + 1)I_{dh}$ $+ (1-C)(1.1083I_{dh}^{0.3882})$
			60	$I_{dt} = C(-0.00006\beta^2 - 0.0006\beta + 1)I_{dh}$ $+ (1-C)(-1.0775I_{dh}^2 + 2.0739I_{dh} - 0.0086)$
			90	$I_{dt} = C(-0.00006\beta^2 - 0.0006\beta + 1)I_{dh}$ $+ (1-C)(0.8522I_{dh}^{0.3882})$

### 3.2.4 การทดสอบแบบจำลอง

หลังจากสร้างแบบจำลองแล้ว ในขั้นตอนสุดท้าย ผู้วิจัยจะทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือกรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด และท้องฟ้าปราศจากเมฆ โดยกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆจะแบ่งออกเป็นด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์และด้านที่เห็นดวงอาทิตย์ ซึ่งผู้วิจัยจะทำการทดสอบทั้งหมด 4 สถานี ได้แก่ สถานีนครปฐม สถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี และสถานีสงขลา ระยะเวลา 1 ปี โดยข้อมูลที่ใช้ทดสอบจะไม่ซ้ำกับข้อมูลที่ใช้สำหรับสร้างแบบจำลอง พร้อมทั้งได้เปรียบเทียบกับสมรรถนะของแบบจำลองจากงานวิจัยอื่นๆ โดยแสดงค่าความแตกต่างในรูปของ root mean square difference (RMSD) และ mean bias difference (MBD) (Iqbal, 1983) ซึ่งหาได้จากสมการที่ (3.23) – (3.24) และสำหรับช่วงเวลาของข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 3

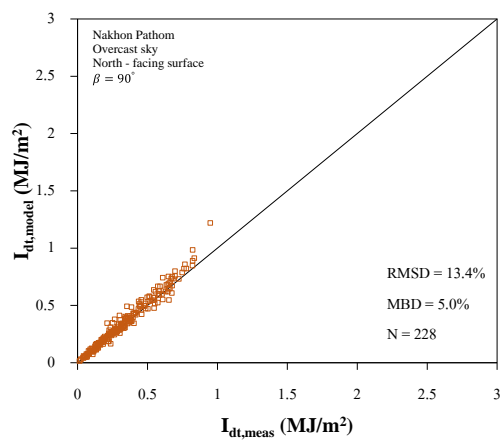
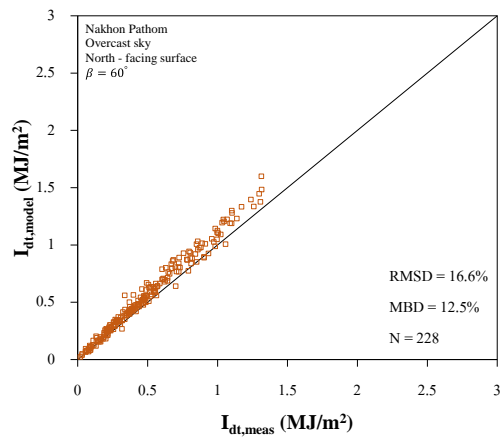
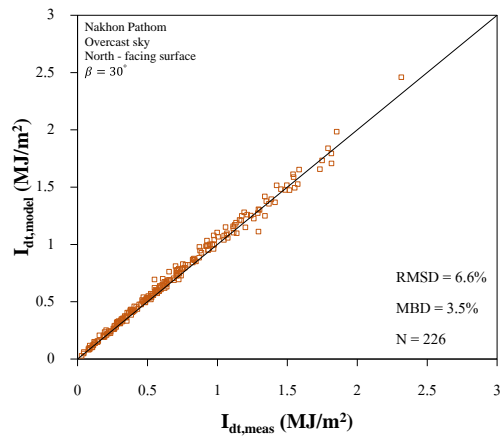
$$\text{RMSD} (\%) = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I_{dt,model} - I_{dt,meas})^2}{N}}}{\frac{\sum_{i=1}^N I_{dt,meas}}{N}} \times 100 \quad (3.23)$$

$$\text{MBD} (\%) = \frac{\frac{\sum_{i=1}^N (I_{dt,model} - I_{dt,meas})}{N}}{\frac{\sum_{i=1}^N I_{dt,meas}}{N}} \times 100 \quad (3.24)$$

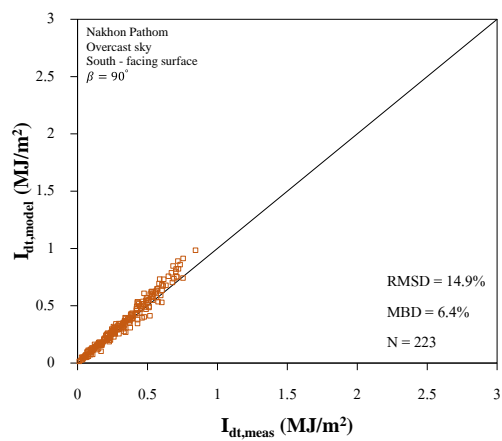
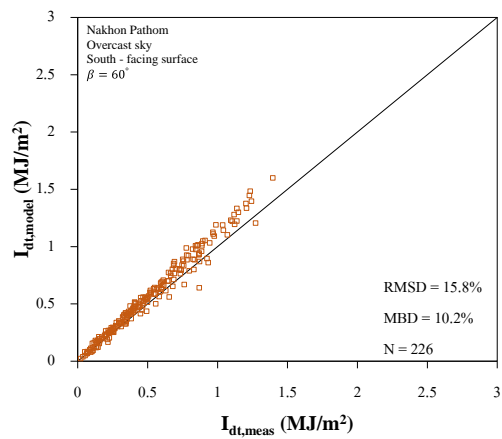
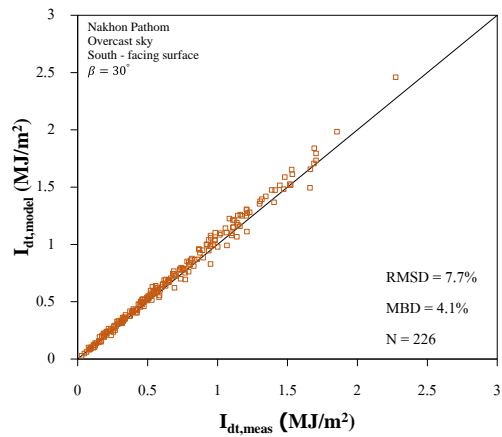
เมื่อ  $I_{dt,model}$  คือค่าความเข้มรังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียงที่ได้จากแบบจำลอง ( $\text{MJ/m}^2 \cdot \text{hr}$ )  
 $I_{dt,meas}$  คือค่าความเข้มรังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด ( $\text{MJ/m}^2 \cdot \text{hr}$ )  
 $N$  คือจำนวนข้อมูลรายชั่วโมง

### 1. กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด

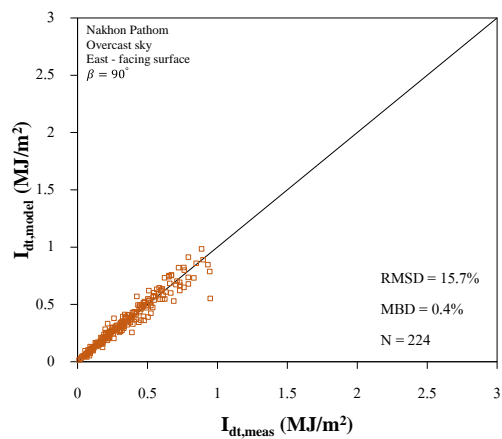
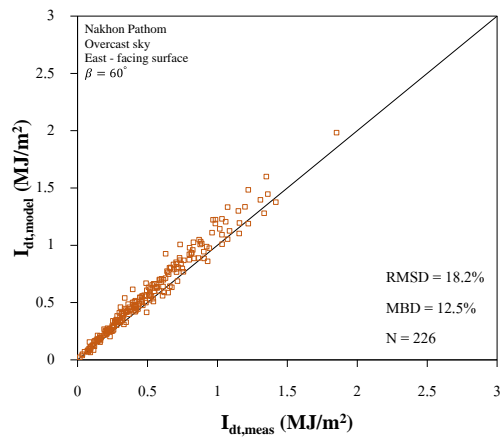
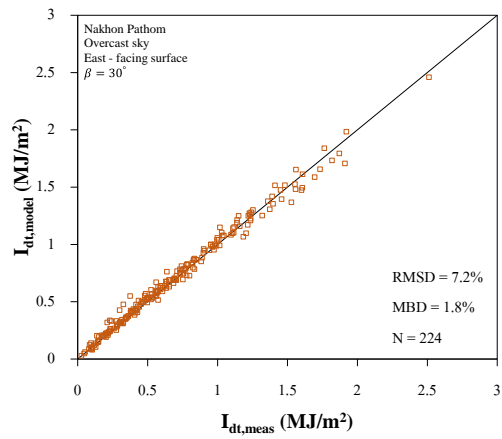
ผลการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองสำหรับการคำนวณค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียง กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด โดยแบ่งตามมุมเอียงและแต่ละทิศทาง ของสถานี นครปฐม สถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี และสถานีสงขลา แสดงดังรูปที่ 38 – 53



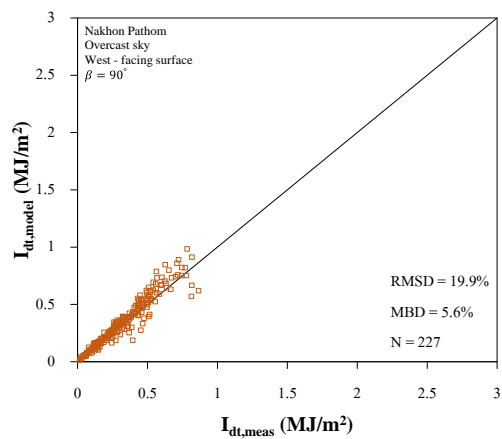
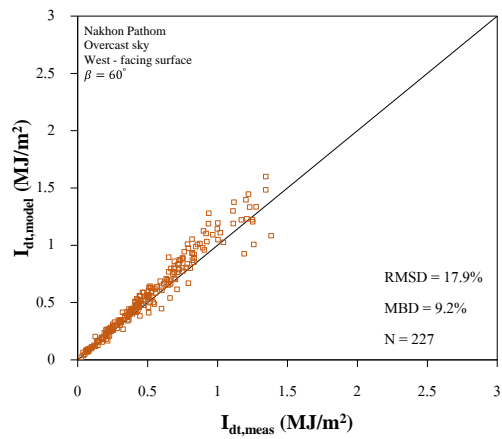
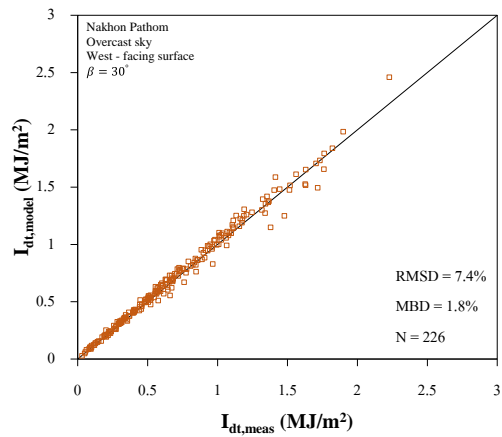
รูปที่ 38 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) สำหรับด้านที่หันไปทางทิศเหนือกรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด ที่สถานีนครปฐม



รูปที่ 39 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) สำหรับด้านที่หันไปทางทิศใต้ กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด ที่สถานีนครปฐม

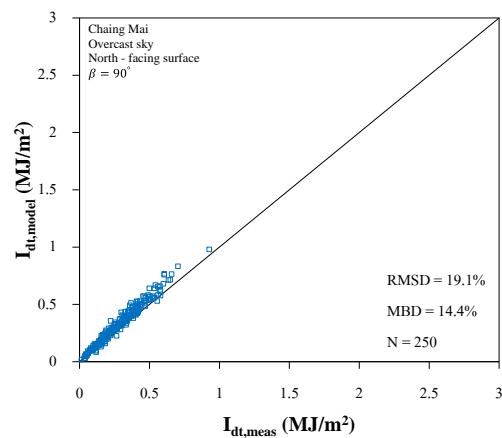
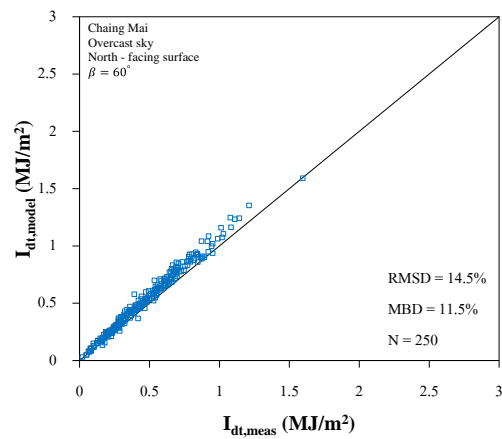
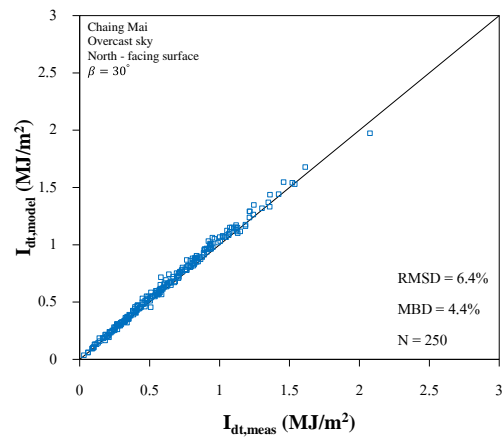


รูปที่ 40 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) สำหรับด้านที่หันไปทางทิศตะวันออก กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด ที่สถานีนครปฐม

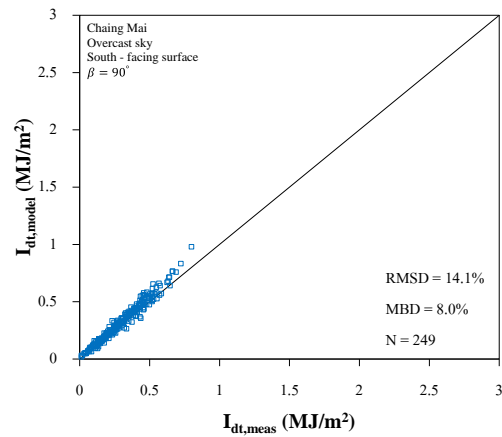


รูปที่ 41 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่า รังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) สำหรับด้านที่หันไปทางทิศตะวันตก กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด ที่สถานีนครปฐม

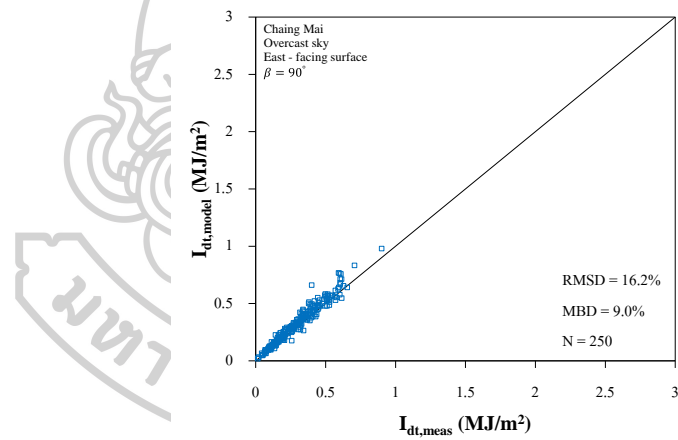




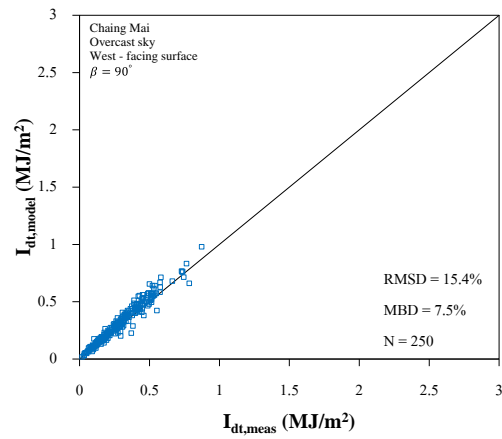
รูปที่ 42 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) สำหรับด้านที่หันไปทางทิศเหนือกรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด ที่สถานีนครปฐม



รูปที่ 43 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) สำหรับด้านที่หันไปทางทิศใต้ กรณีห้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด ที่สถานีเชียงใหม่

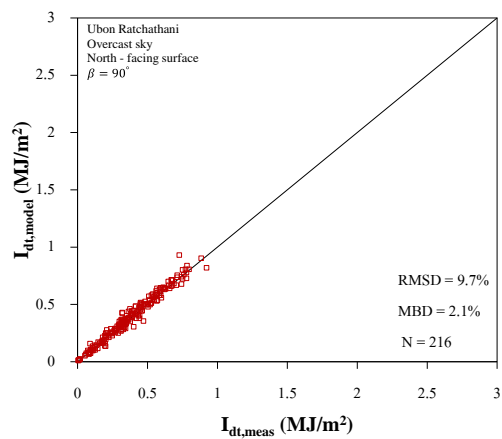
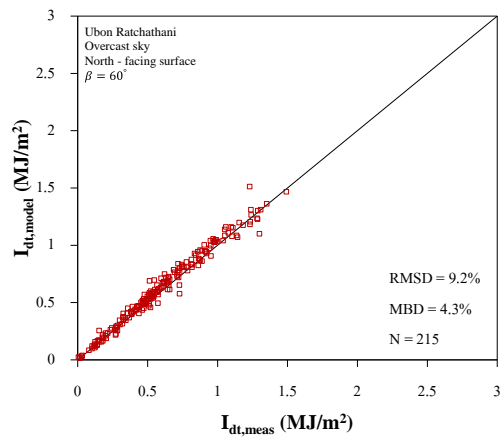
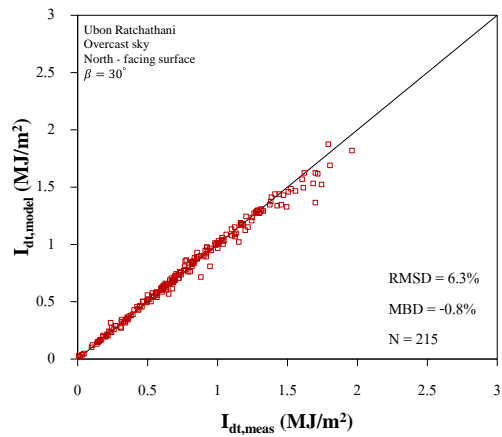


รูปที่ 44 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) สำหรับด้านที่หันไปทางทิศตะวันออก กรณีห้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด ที่สถานีเชียงใหม่

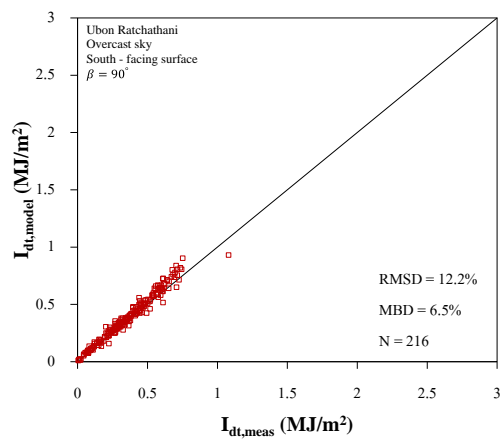
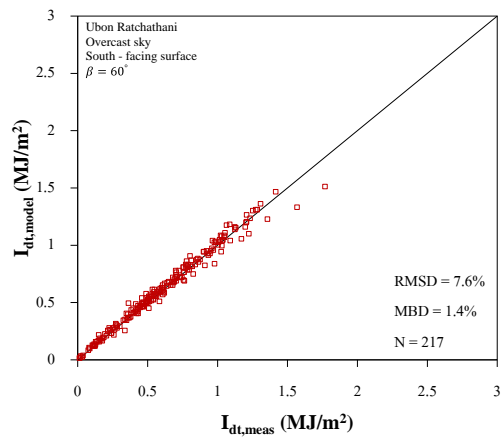
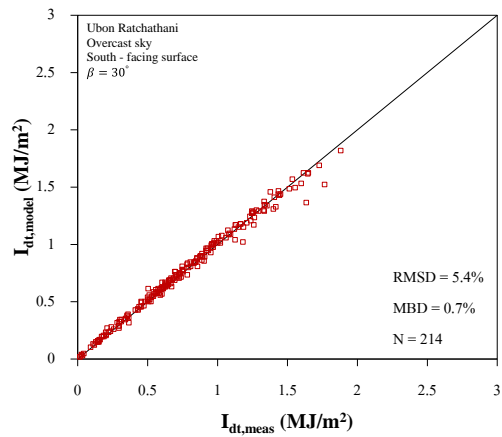


รูปที่ 45 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) สำหรับด้านที่หันไปทางทิศตะวันตก กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด ที่สถานีเชียงใหม่

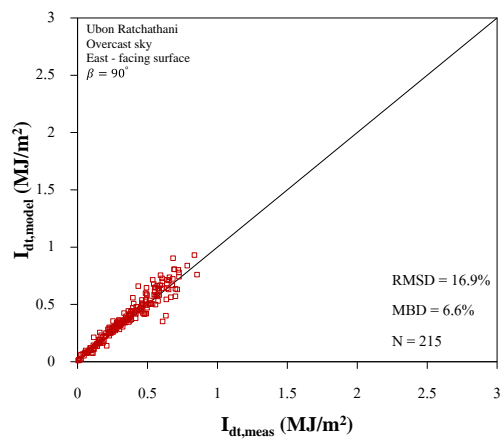
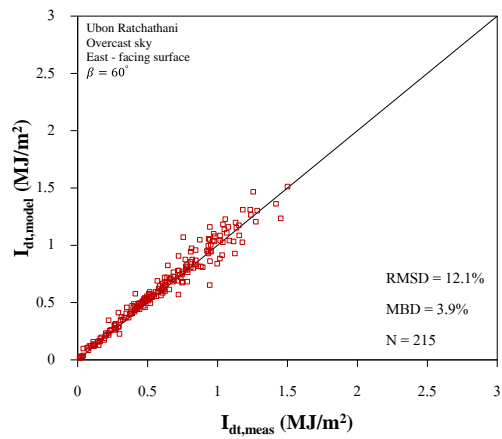
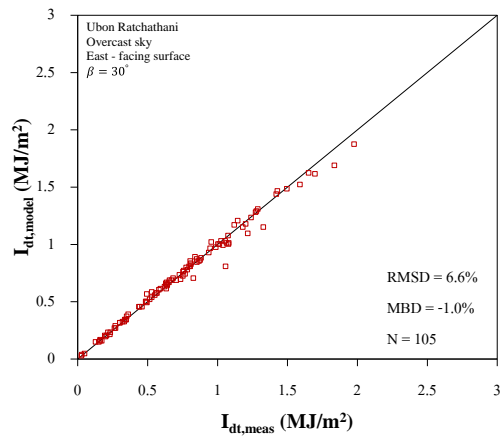




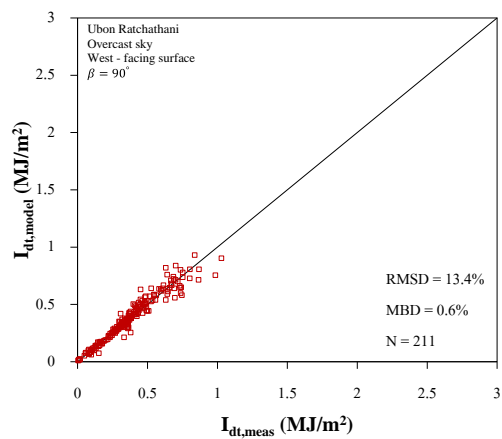
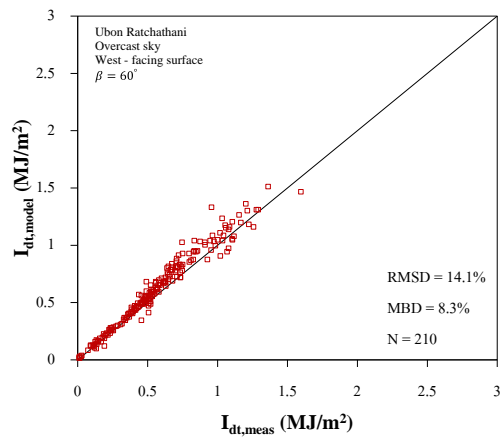
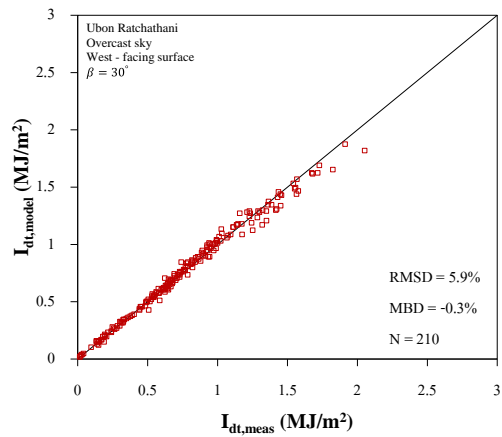
รูปที่ 46 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) สำหรับด้านที่หันไปทางทิศเหนือกรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด ที่สถานีอุบลราชธานี



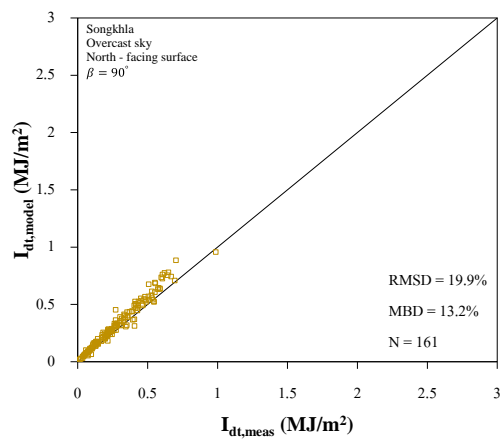
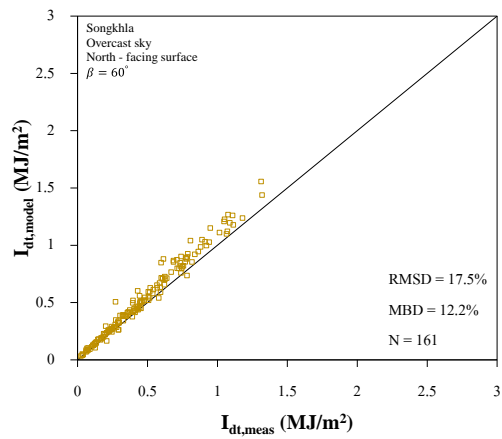
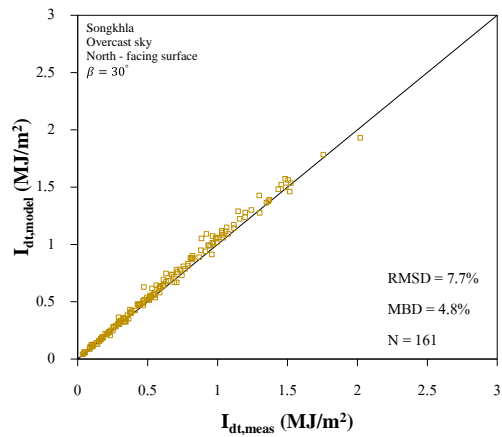
รูปที่ 47 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) สำหรับด้านที่หันไปทางทิศใต้ กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด ที่สถานีอุบลราชธานี



รูปที่ 48 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) สำหรับด้านที่หันไปทางทิศตะวันออก กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด ที่สถานีอุบลราชธานี

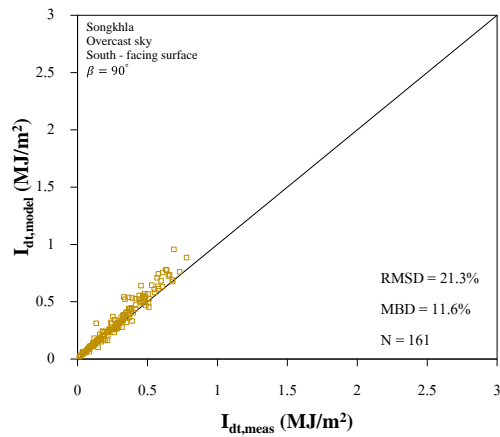


รูปที่ 49 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) สำหรับด้านที่หันไปทางทิศตะวันตก กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด ที่สถานีอุบลราชธานี

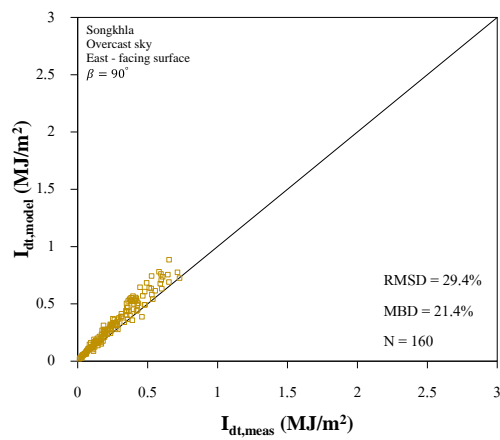


รูปที่ 50 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) สำหรับด้านที่หันไปทางทิศเหนือกรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด ที่สถานีสงขลา

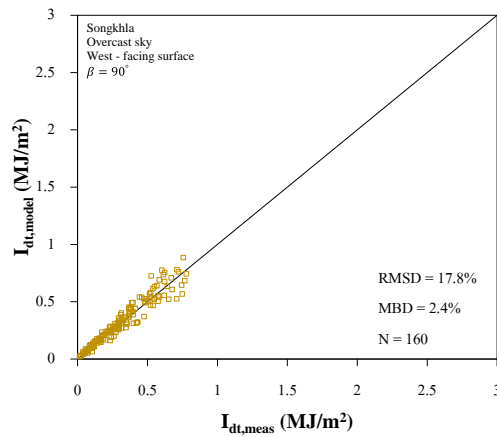




รูปที่ 51 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) สำหรับด้านที่หันไปทางทิศใต้ กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด ที่สถานีสงขลา

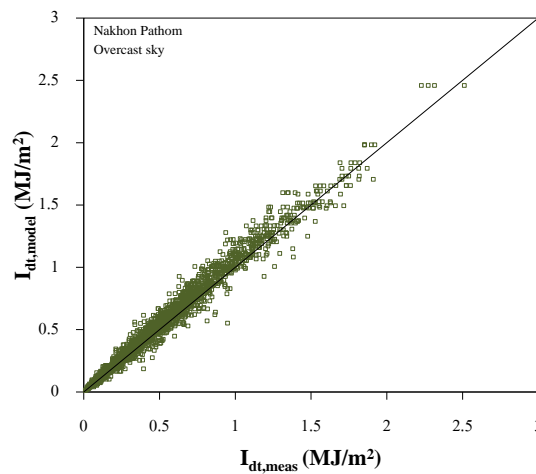


รูปที่ 52 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) สำหรับด้านที่หันไปทางทิศตะวันออก กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด ที่สถานีสงขลา

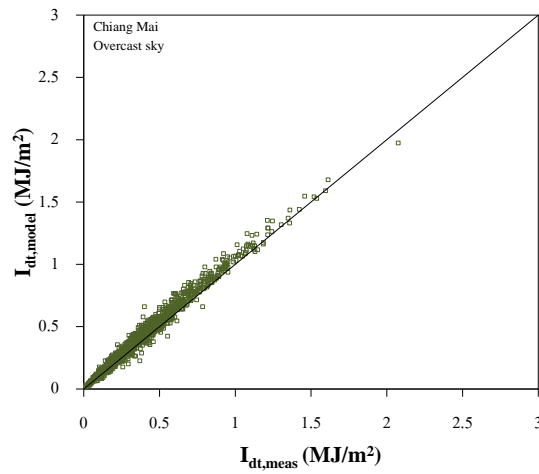


รูปที่ 53 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) สำหรับด้านที่หันไปทางทิศตะวันตก กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด ที่สถานีสงขลา

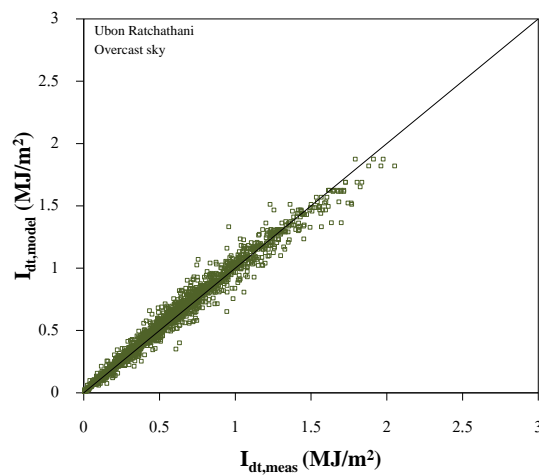
ผลการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองที่ได้สำหรับการคำนวณค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียง ในกรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด โดยรวมทุกมุมเอียงและทุกทิศทางของแต่ละสถานี แสดงดังรูปที่ 54 - 57



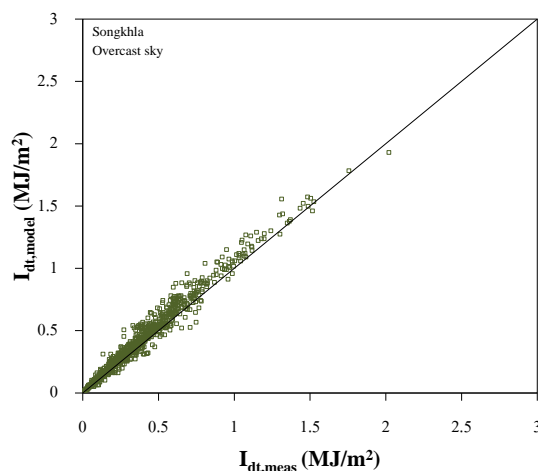
รูปที่ 54 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มรังสีกระจายที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) รวมทุกมุมเอียงและทุกทิศทาง กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด ที่สถานีนครปฐม



รูปที่ 55 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มรังสีกระจายที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) รวมทุกมุมเอียงและทุกทิศทาง กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด ที่สถานีเชียงใหม่



รูปที่ 56 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มรังสีกระจายที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) รวมทุกมุมเอียงและทุกทิศทาง กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด ที่สถานีอุบลราชธานี



รูปที่ 57 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มรังสีกระจายที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) รวมทุกมุมเอียงและทุกทิศทาง กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด ที่สถานีสงขลา

ตารางที่ 5 แสดงผลความคลาดเคลื่อนของค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงในรูปแบบ RMSD และค่า MBD กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด

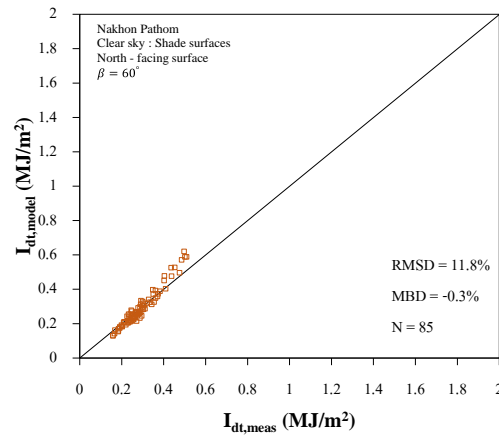
พื้นเอียง	สถานี								
	มุมเอียง	นครปฐม		เชียงใหม่		อุบลราชธานี		สงขลา	
		RMSD	MBD	RMSD	MBD	RMSD	MBD	RMSD	MBD
เหนือ	30	6.6	3.5	6.4	4.4	6.3	-0.8	7.7	4.8
	60	16.6	12.5	14.5	11.5	9.2	4.3	17.5	12.2
	90	13.4	5.0	19.1	14.4	9.7	2.1	19.9	13.2
ใต้	30	7.7	4.1	-	-	5.4	0.7	-	-
	60	15.8	10.2	-	-	7.6	1.4	-	-
	90	14.9	6.4	14.1	8.0	12.2	6.5	21.3	11.6
ตะวันออก	30	7.2	1.8	-	-	6.6	-1.0	-	-
	60	18.2	12.5	-	-	12.1	3.9	-	-
	90	15.7	0.4	16.2	9.0	16.9	6.6	29.4	21.4
ตะวันตก	30	7.4	1.8	-	-	5.9	-0.3	-	-
	60	17.9	9.2	-	-	14.1	8.3	-	-
	90	19.9	5.6	15.4	7.5	13.4	0.6	17.8	2.4
รวม		12.9	6.9	13.4	8.6	9.6	2.4	17.3	9.9

จากตารางที่ 5 จะเห็นว่าแบบจำลองที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นจากความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียงและรังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นราบ ในกรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด และเมื่อนำมาคำนวณค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียงที่สถานีอื่นๆ พบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัดมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี โดยที่สถานีนครปฐมมีค่า RMSD อยู่ในช่วง 6.6 – 19.9 % และมีค่า MBD อยู่ในช่วง 1.8 – 12.5 % สำหรับสถานีเชียงใหม่ พบค่า RMSD อยู่ในช่วง 6.4 – 19.1 % และค่า MBD อยู่ในช่วง 4.4 – 14.4 % สำหรับสถานีอุบลราชธานี มีค่า RMSD อยู่ในช่วง 5.4 – 16.9 % ส่วนสถานีสงขลา มีค่า RMSD อยู่ในช่วง 7.7 – 29.4 % และมีค่า MBD อยู่ในช่วง 2.4 – 21.4 % เมื่อสังเกตจะพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมุมเอียงเพิ่มขึ้น ยกเว้นที่สถานีนครปฐม ส่วนใหญ่ที่มุมเอียง 60° กลับพบค่าความคลาดเคลื่อนสูงกว่า 90° เล็กน้อย และเมื่อทำการทดสอบสมรรถนะโดยรวมทุกมุมเอียง และทุกทิศทาง พบว่าที่สถานีนครปฐมมีค่า RMSD เท่ากับ 12.9% และค่า MBD เท่ากับ 6.9% สถานีเชียงใหม่มีค่า RMSD เท่ากับ 13.4% และค่า MBD เท่ากับ 8.6% สถานีอุบลราชธานีมีค่า RMSD เท่ากับ 9.6% และค่า MBD เท่ากับ 2.4% และสถานีสงขลามีค่า RMSD เท่ากับ 17.3% และค่า MBD เท่ากับ 9.9% โดยจะสังเกตเห็นว่าทุกสถานีมีค่า MBD เป็นบวกแสดงให้เห็นว่าค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียงที่ได้จากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการวัด ส่วนค่า RMSD ของแต่ละสถานีมีค่าใกล้เคียงกัน และอยู่ในเกณฑ์ที่ดี โดยจะเห็นว่าสถานีสงขลามีความคลาดเคลื่อนมากกว่าสถานีอื่นๆ เนื่องจากแบบจำลองสร้างจากข้อมูลที่สถานีนครปฐม ซึ่งมีลักษณะภูมิอากาศ และภูมิประเทศที่ค่อนข้างแตกต่างจากสถานีสงขลาที่มีภูมิอากาศอยู่ติดกับทะเลจึงทำให้มีความคลาดเคลื่อนมากกว่าที่สถานีอื่นๆ

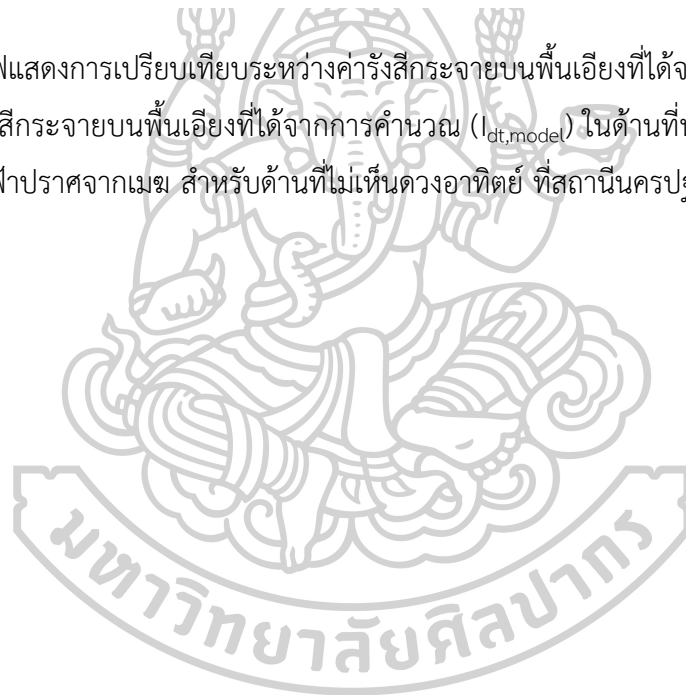
## 2. กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ (Clear sky)

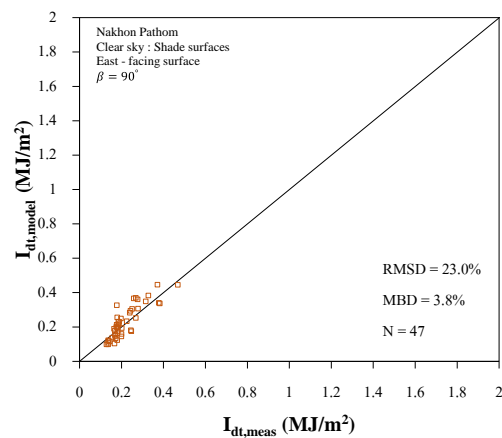
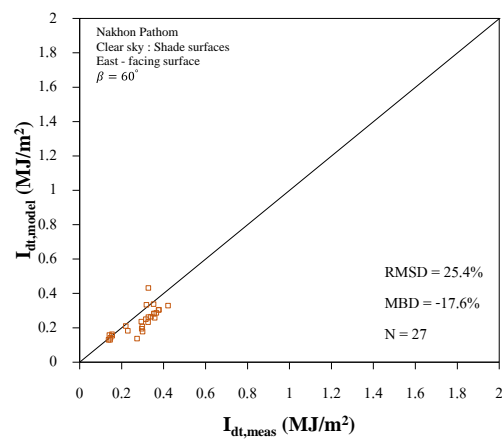
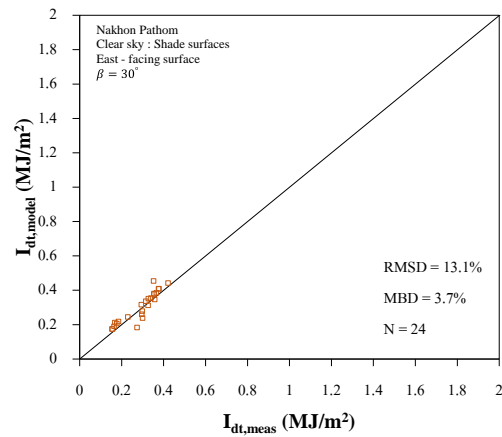
ในการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองสำหรับคำนวณค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียงกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ ผู้วิจัยได้แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน คือด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์และด้านที่เห็นดวงอาทิตย์ ซึ่งจะแบ่งตามมุมเอียงและแต่ละทิศทาง ของสถานีนครปฐม สถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี และสถานีสงขลา แสดงดังรูปที่ 58 – 70

ก. ด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์

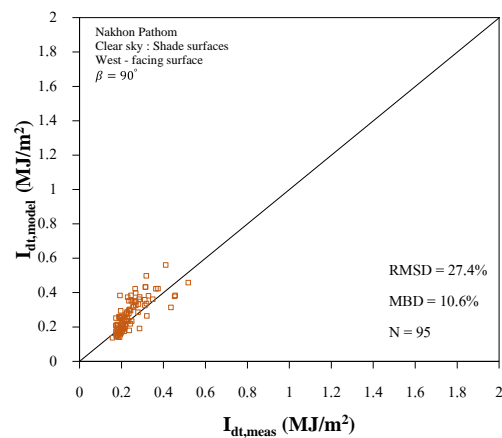
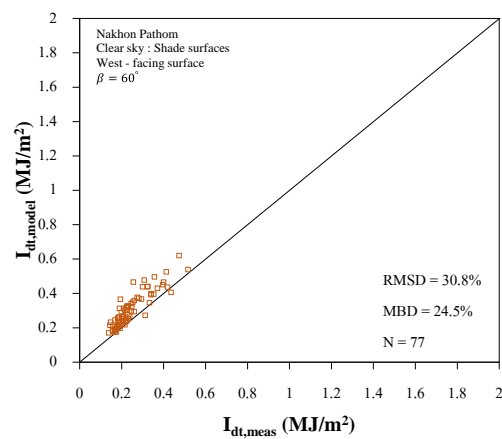
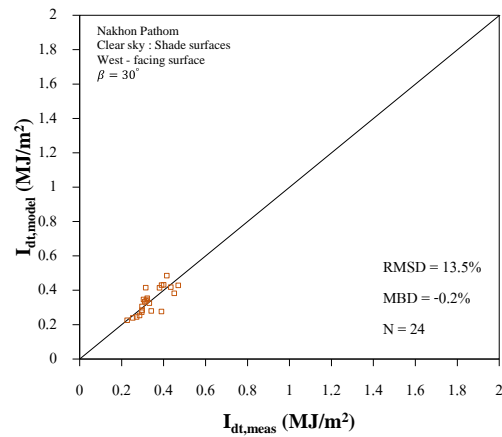


รูปที่ 58 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) ในด้านที่หันไปทางทิศเหนือ กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์ ที่สถานีนครปฐม



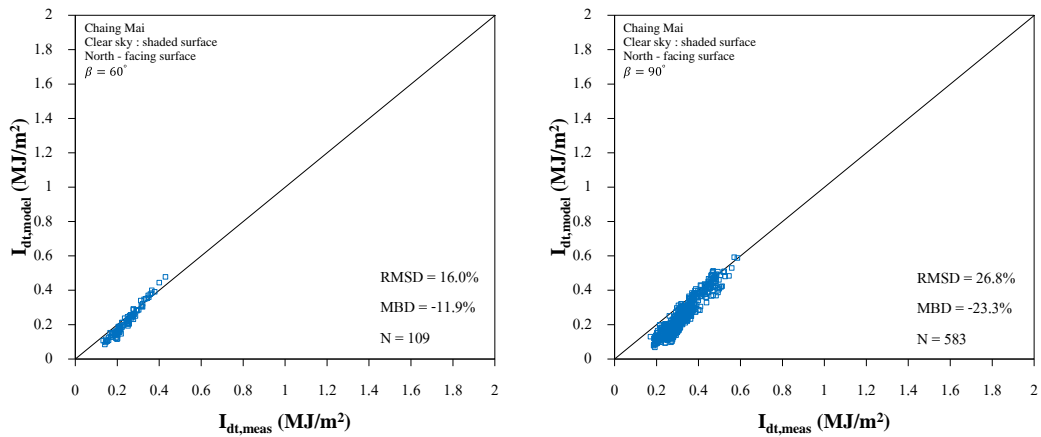


รูปที่ 59 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) ในด้านที่หันไปทางทิศตะวันออกกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์ ที่สถานีนครปฐม

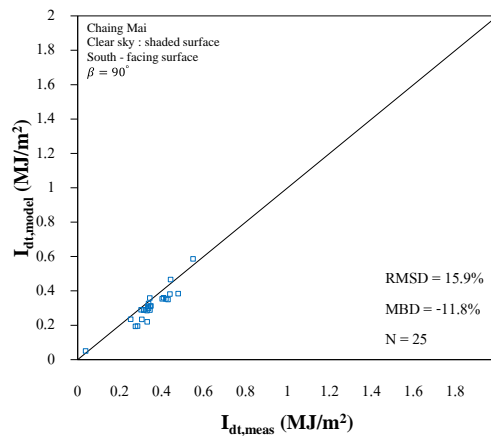


รูปที่ 60 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) ในด้านที่หันไปทางทิศตะวันตกกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์ ที่สถานีนครปฐม

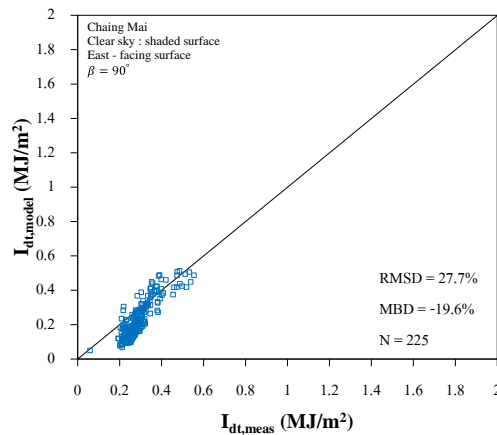




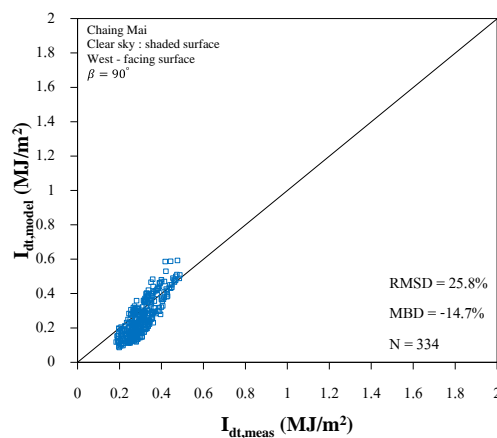
รูปที่ 61 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) ในด้านที่หันไปทางทิศเหนือ กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์ ที่สถานีเชียงใหม่



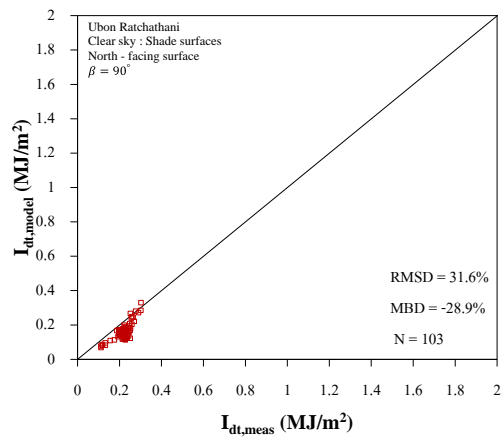
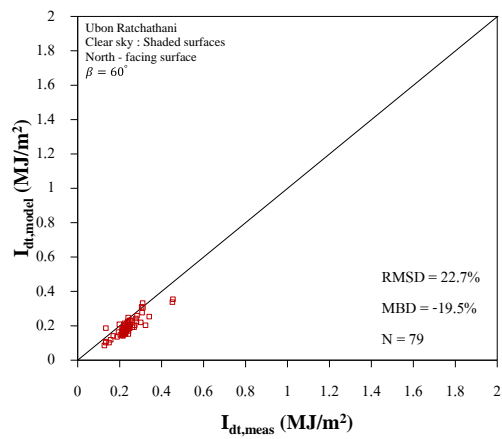
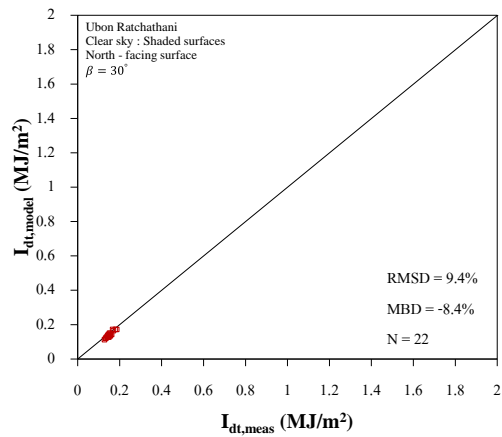
รูปที่ 62 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) ในด้านที่หันไปทางทิศใต้ กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์ ที่สถานีเชียงใหม่



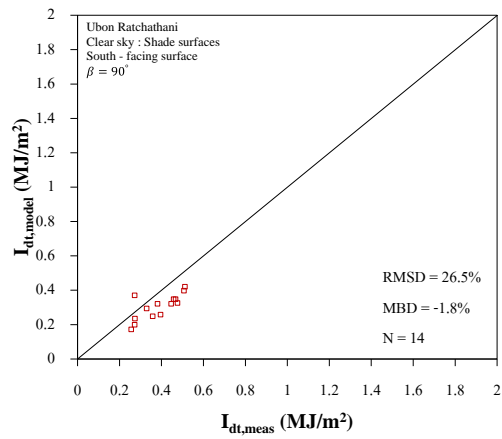
รูปที่ 63 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) ในด้านที่หันไปทางทิศตะวันออก กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์ ที่สถานีเชียงใหม่



รูปที่ 64 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) ในด้านที่หันไปทางทิศตะวันตก กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์ ที่สถานีเชียงใหม่

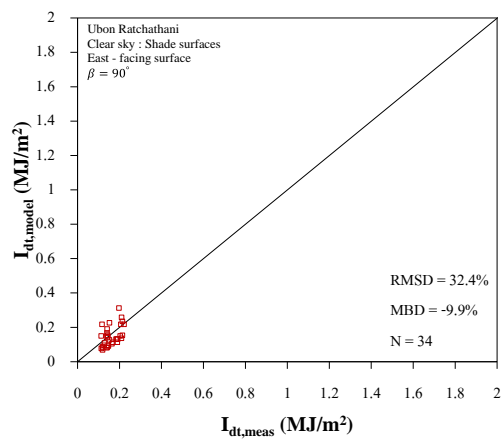
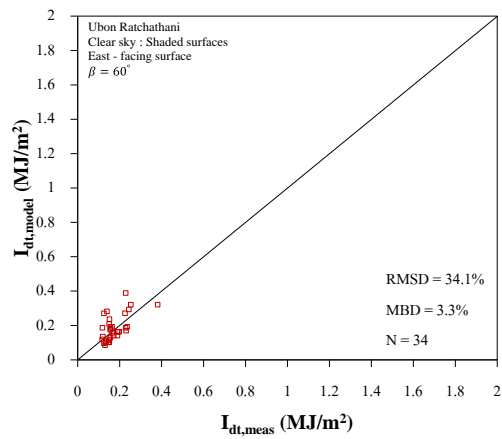
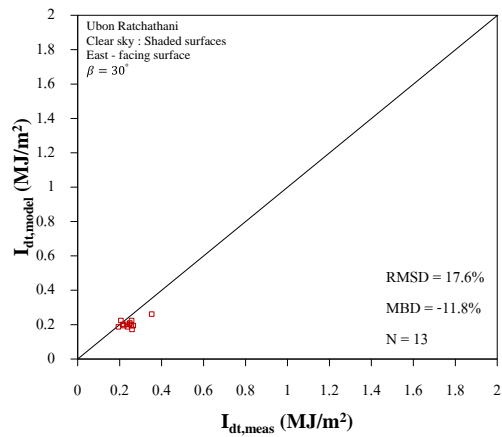


รูปที่ 65 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) ในด้านที่หันไปทางทิศเหนือ กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์ ที่สถานีอุบลราชธานี

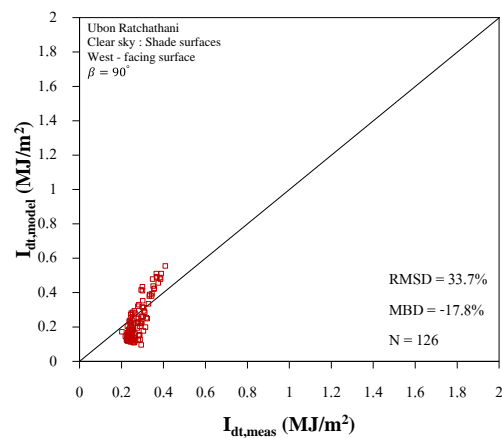
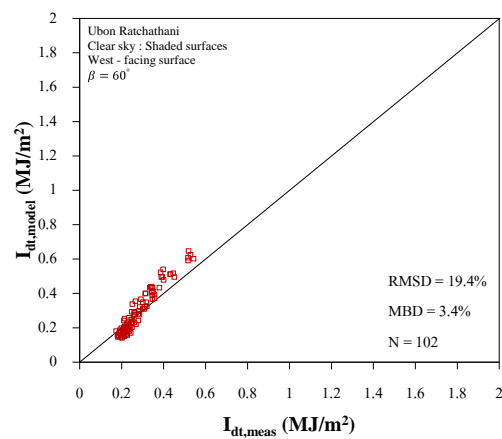
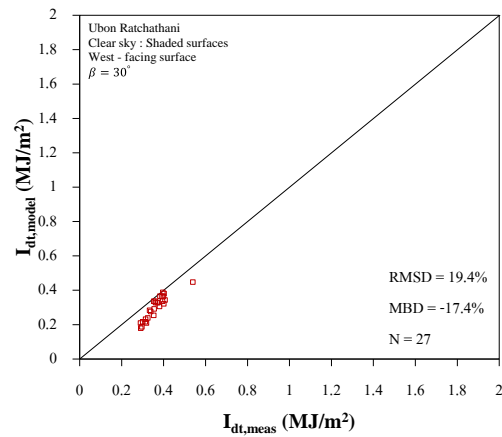


รูปที่ 66 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) ในด้านที่หันไปทางทิศใต้ กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์ ที่สถานีอุบลราชธานี

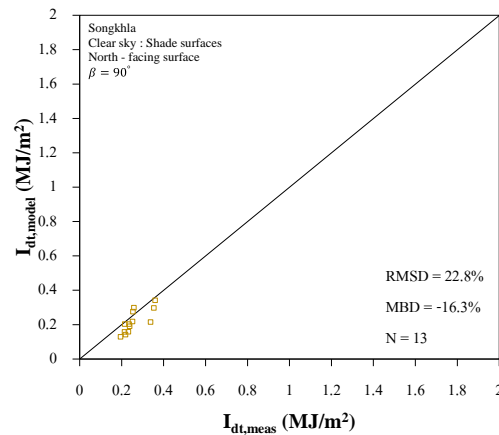




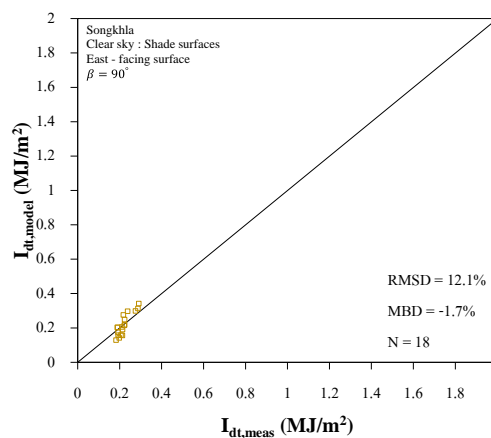
รูปที่ 67 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) ในด้านที่หันไปทางทิศตะวันออกกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์ ที่สถานีอุบลราชธานี



รูปที่ 68 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) ในด้านที่หันไปทางทิศตะวันตกกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์ ที่สถานีอุบลราชธานี

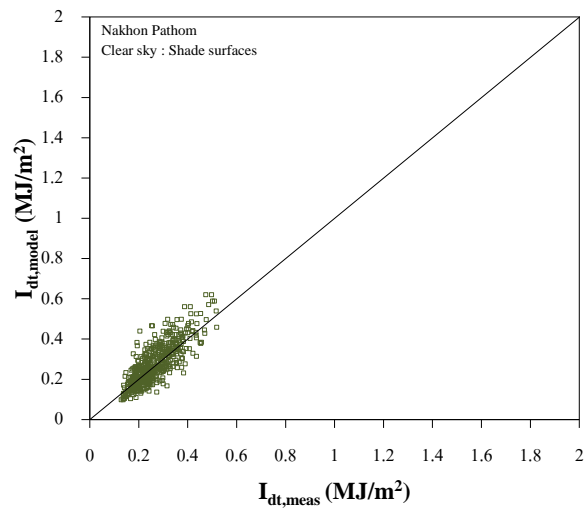


รูปที่ 69 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) ในด้านที่หันไปทางทิศเหนือ กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์ ที่สถานีสงขลา

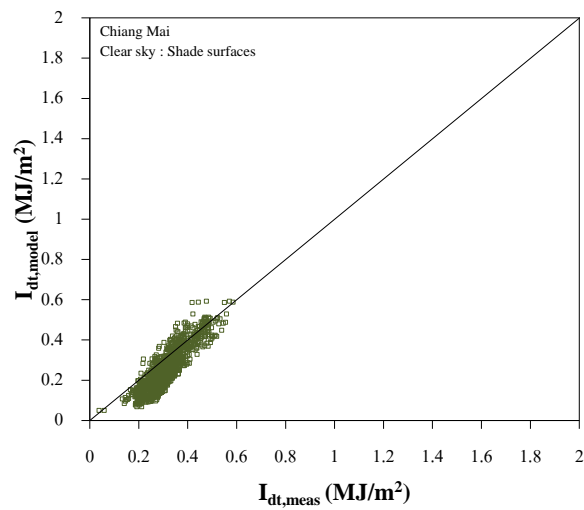


รูปที่ 70 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) ในด้านที่หันไปทางทิศตะวันออก กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์ ที่สถานีสงขลา

ผลการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองที่ได้สำหรับคำนวณค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียง ในกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์ โดยรวมทุกมุมเอียงและทุกทิศทางของแต่ละสถานี แสดงดังรูปที่ 71 - 74

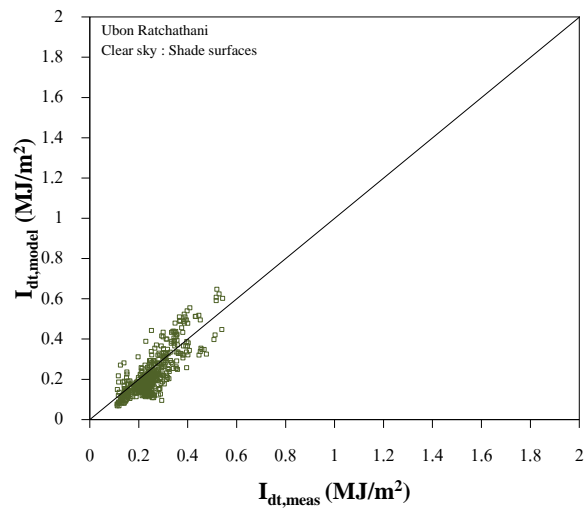


รูปที่ 71 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มรังสีกระจายที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) รวมทุกมุมเอียงและทุกทิศทาง กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์ ที่สถานีนครปฐม

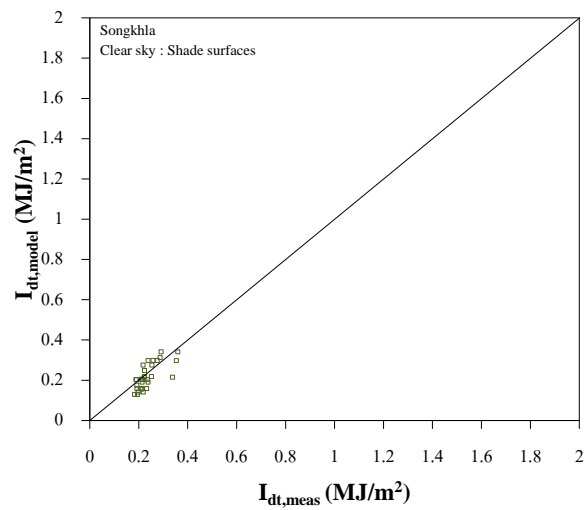


รูปที่ 72 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มรังสีกระจายที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) รวมทุกมุมเอียงและทุกทิศทาง กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์ ที่สถานีเชียงใหม่





รูปที่ 73 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มรังสีกระจายที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) รวมทุกมุมเอียงและทุกทิศทาง กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์ ที่สถานีอุบลราชธานี



รูปที่ 74 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มรังสีกระจายที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) รวมทุกมุมเอียงและทุกทิศทาง กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์ ที่สถานีสงขลา

ตารางที่ 6 แสดงผลความคลาดเคลื่อนของค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงในรูปของ RMSD และค่า MBD  
กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์

พื้นเอียง	สถานี								
	มุมเอียง	นครปฐม		เชียงใหม่		อุบลราชธานี		สงขลา	
		RMSD	MBD	RMSD	MBD	RMSD	MBD	RMSD	MBD
เหนือ	30	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี	9.4	-8.4	ไม่มี	ไม่มี
	60	11.8	-0.3	16.0	-11.9	22.7	-19.5	ไม่มี	ไม่มี
	90	27.4	10.6	26.8	-23.3	31.6	-28.9	-	-
ใต้	30	ไม่มี	ไม่มี	-	-	ไม่มี	ไม่มี	-	-
	60	ไม่มี	ไม่มี	-	-	ไม่มี	ไม่มี	-	-
	90	ไม่มี	ไม่มี	15.9	-11.8	26.5	-1.8	22.8	-16.3
ตะวันออก	30	13.1	3.7	-	-	17.6	-11.8	-	-
	60	25.4	-17.6	-	-	34.1	3.3	-	-
	90	23.0	3.8	27.7	-19.6	32.4	-9.9	12.1	-1.7
ตะวันตก	30	13.5	-0.2	-	-	19.4	-17.4	-	-
	60	30.8	24.5	-	-	19.4	3.4	-	-
	90	27.4	10.6	25.8	-14.7	33.7	-17.8	ไม่มี	ไม่มี
รวม		22.9	3.7	26.3	-19.6	27.9	-14.0	20.1	-8.3

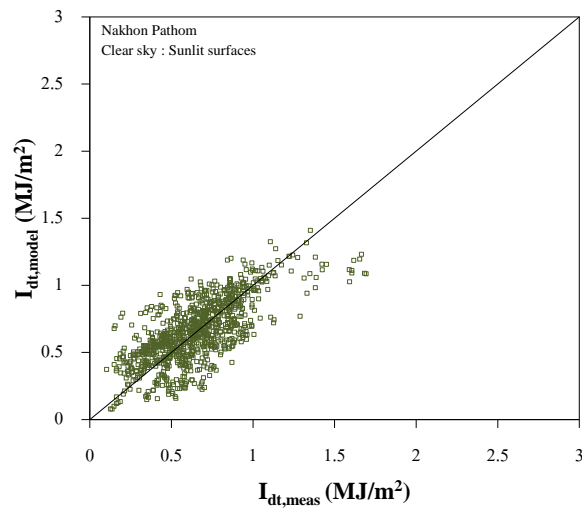
\*หมายเหตุ : (-) หมายถึงไม่ได้ทำการวัดข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์ , (ไม่มี) หมายถึง ไม่มีข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองสำหรับทิศทางนั้นๆ และมุมเอียงนั้นๆ

จากตารางที่ 6 จะเห็นว่าแบบจำลองที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นจากความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียงและรังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นราบ ในกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ ด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์ เมื่อนำมาคำนวณค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียงที่สถานีอื่นๆ พบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัดมีความสอดคล้องกัน โดยที่สถานีนครปฐมมีค่า RMSD อยู่ในช่วง 11.8 – 30.8 % และมีค่า MBD อยู่ในช่วง -17.6 – 24.5 % สำหรับสถานีเชียงใหม่ พบค่า RMSD อยู่ในช่วง 15.9 – 27.7 % และค่า MBD อยู่ในช่วง -23.3 – -11.8 % สำหรับสถานีอุบลราชธานี มีค่า RMSD อยู่ในช่วง 9.4 – 34.1 % ส่วนสถานีสงขลา มีค่า RMSD อยู่ในช่วง 12.1 –

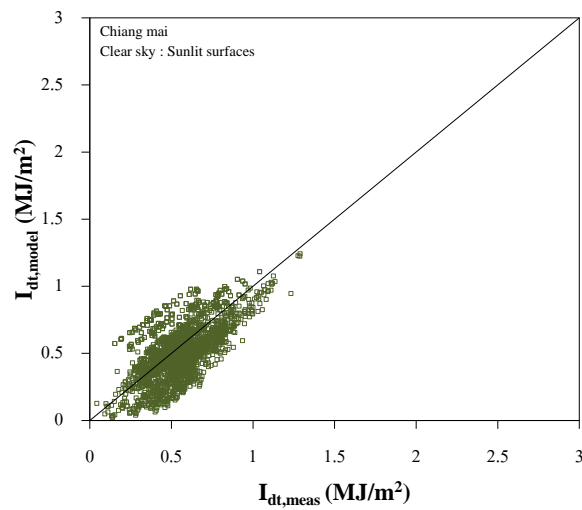
22.8 % และมีค่า MBD อยู่ในช่วง -16.3 – -1.7 % เมื่อสังเกตจะเห็นจะพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมุมมองเพิ่มขึ้น เนื่องจากตำแหน่งละติจูดของแต่ละสถานีทำให้บางมุมมองมองไม่เห็นดวงอาทิตย์ ภายใต้สภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆจึงไม่มีข้อมูลสำหรับทดสอบสมรรถนะของแบบจำลอง และเมื่อทำการทดสอบสมรรถนะโดยรวมทุกมุมมอง และทุกทิศทาง พบว่าที่สถานีนครปฐมมีค่า RMSD เท่ากับ 22.9% และค่า MBD เท่ากับ 3.7% สถานีเชียงใหม่มีค่า RMSD เท่ากับ 26.3% และค่า MBD เท่ากับ -19.6% สถานีอุบลราชธานีมีค่า RMSD เท่ากับ 27.9% และค่า MBD เท่ากับ -14.0% และสถานีสงขลามีค่า RMSD เท่ากับ 20.1% และค่า MBD เท่ากับ -8.3% สำหรับค่า RMSD รวมของทุกสถานีมีค่าใกล้เคียงกัน โดยที่ค่า RMSD ที่ได้จากสถานีอุบลราชธานีมีค่าสูงกว่าสถานีอื่นๆ และค่า MBD ของสถานีส่วนใหญ่มีค่าเป็นลบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าความเข้มรังสีกระจายที่ได้จากการวัดสูงกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลอง ยกเว้นสถานีนครปฐมที่มีค่า MBD เป็นบวก แสดงว่าค่าความเข้มรังสีกระจายที่ได้จากการวัดน้อยกว่าค่าที่ได้จากแบบจำลอง

#### ข. ด้านที่เห็นดวงอาทิตย์

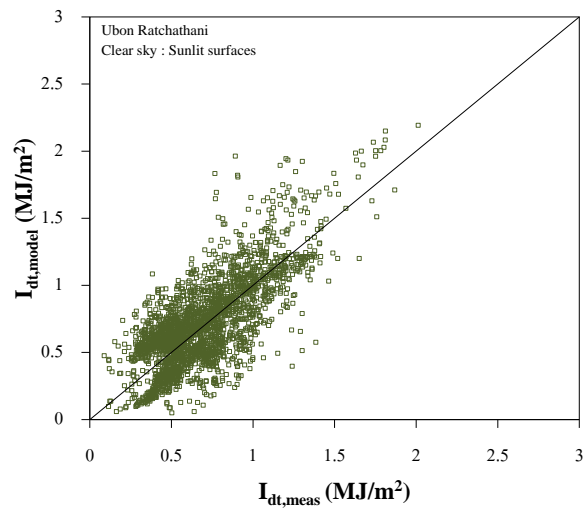
ผลการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองสำหรับคำนวณค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียง กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ ด้านที่เห็นดวงอาทิตย์ โดยรวมทุกมุมมองและทุกทิศทางของแต่ละสถานี ได้แก่ สถานีนครปฐม สถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี และสถานีสงขลา แสดงดังรูปที่ 75 – 78 ตามลำดับ



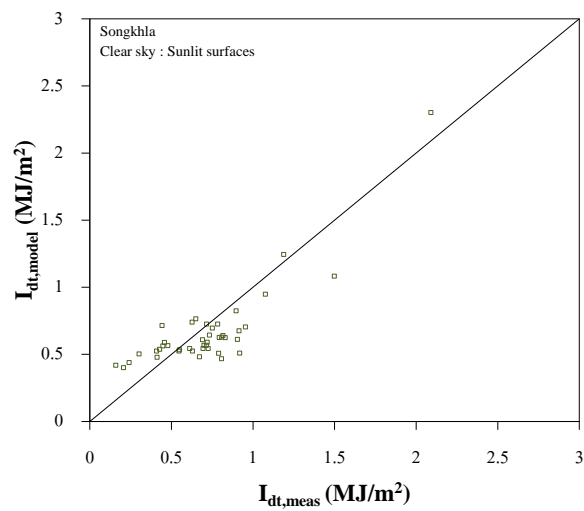
รูปที่ 75 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มรังสีกระจายที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) รวมทุกมุมเอียงและทุกทิศทาง กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่เห็นดวงอาทิตย์ ที่สถานีนครปฐม



รูปที่ 76 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มรังสีกระจายที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) รวมทุกมุมเอียงและทุกทิศทาง กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่เห็นดวงอาทิตย์ ที่สถานีเชียงใหม่



รูปที่ 77 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มรังสีกระจายที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) รวมทุกมุมเอียงและทุกทิศทาง กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่เห็นดวงอาทิตย์ ที่สถานีอุบลราชธานี



รูปที่ 78 กราฟแสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความเข้มรังสีกระจายที่ได้จากการวัด ( $I_{dt,meas}$ ) และค่ารังสีกระจายที่ได้จากการคำนวณ ( $I_{dt,model}$ ) รวมทุกมุมเอียงและทุกทิศทาง กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่เห็นดวงอาทิตย์ ที่สถานีสงขลา

ตารางที่ 7 แสดงผลความคลาดเคลื่อนของค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงในรูปของ RMSD และค่า MBD กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่เห็นดวงอาทิตย์

พื้นเอียง	สถานี								
	มุมเอียง	นครปฐม		เชียงใหม่		อุบลราชธานี		สงขลา	
		RMSD	MBD	RMSD	MBD	RMSD	MBD	RMSD	MBD
เหนือ	30	36.1	-21.3	33.5	-30.3	44.4	-18.4	-	-
	60	47.0	41.7	18.2	-15.2	20.7	-8.7	-	-
	90	ไม่มี	ไม่มี	25.2	22.2	37.3	17.2	ไม่มี	ไม่มี
ใต้	30	24.1	4.3	-	-	34.3	10.7	10.6	7.3
	60	21.0	-1.8	-	-	32.1	-6.3	23.1	18.3
	90	39.1	-5.6	29.9	-8.8	26.6	-12.2	19.4	9.3
ตะวันออก	30	21.1	9.0	-	-	23.9	5.4	-	-
	60	35.3	2.0	-	-	25.8	1.7	-	-
	90	17.4	-3.1	30.9	25.9	35.4	24.1	ไม่มี	ไม่มี
ตะวันตก	30	24.6	5.8	-	-	36.4	21.7	-	-
	60	15.5	-0.8	-	-	46.6	18.7	-	-
	90	33.7	23.6	14.6	2.7	45.3	23.7	19.6	-13.5
รวม		28.7	0.9	31.2	-15.6	32.6	2.3	25.9	-7.8

จากตารางที่ 7 จะเห็นว่าแบบจำลองที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นจากความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียงและรังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นราบ ในกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ ด้านที่เห็นดวงอาทิตย์ และเมื่อนำมาคำนวณค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียงที่สถานีอื่นๆ พบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัดมีความคลาดเคลื่อนมากกว่ากรณีอื่นๆ โดยที่สถานี นครปฐมมีค่า root mean square difference (RMSD) อยู่ในช่วง 15.5 – 47.0 % และมีค่า mean bias difference (MBD) อยู่ในช่วง -21.3 – 41.7 % สำหรับสถานีเชียงใหม่ พบค่า RMSD อยู่ในช่วง 14.6 – 33.5 % และค่า MBD อยู่ในช่วง -30.0 – 25.9% สำหรับสถานีอุบลราชธานี มีค่า RMSD อยู่ในช่วง 20.7 – 46.6 % ส่วนสถานีสงขลา มีค่า RMSD อยู่ในช่วง 10.6 – 23.1 % และมีค่า MBD อยู่ในช่วง -13.3 – 18.3 % เนื่องจากตำแหน่งละติจูดของแต่ละสถานีทำให้มุมเอียงส่วนใหญ่มองเห็นดวงอาทิตย์เกือบทั้งหมด ภายใต้อากาศท้องฟ้าปราศจากเมฆ ยกเว้นที่มุม 90° ทิศเหนือ สถานีนครปฐม

และสถานีสงขลา และทิศตะวันออก สถานีสงขลา มองไม่เห็นดวงอาทิตย์ จึงไม่มีข้อมูลสำหรับทดสอบสมรรถนะของแบบจำลอง และเมื่อทำการทดสอบสมรรถนะโดยรวมทุกมุมเอียง และทุกทิศทางพบว่าที่สถานีนครปฐมมีค่า RMSD เท่ากับ 28.7% และค่า MBD เท่ากับ 0.9% สถานีเชียงใหม่มีค่า RMSD เท่ากับ 31.2% และค่า MBD เท่ากับ -15.6% สถานีอุบลราชธานีมีค่า RMSD เท่ากับ 32.6% และค่า MBD เท่ากับ 2.3% และสถานีสงขลามีค่า RMSD เท่ากับ 25.9% และค่า MBD เท่ากับ -7.8% จากผลที่ได้จะเห็นว่าในกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ สำหรับด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์จะมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูงกว่ากรณีอื่นๆ นอกจากเมฆที่มีผลต่อค่าความเข้มรังสีอาทิตย์แล้ว ยังมีองค์ประกอบต่างๆ ในบรรยากาศ เช่น ฝุ่นละออง โมเลกุลอากาศ โอโซน ไอน้ำ และแก๊ส ที่ส่งผลต่อค่าความเข้มรังสีอาทิตย์อีกด้วย ทำให้กรณีนี้อาจจะต้องคิดผลขององค์ประกอบดังกล่าวเข้าไปด้วย เพื่อให้แบบจำลองมีความถูกต้องมากขึ้น



### 3. ทัศนียภาพที่มีเมฆบางส่วน (Partly cloudy sky)

ผลการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองสำหรับคำนวณรังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียง ทัศนียภาพที่มีเมฆบางส่วน สำหรับแต่ละสถานี แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 แสดงผลความคลาดเคลื่อนของค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงในรูปของ RMSD และค่า MBD ทัศนียภาพที่มีเมฆบางส่วน

พื้นเอียง	สถานี								
	มุมเอียง	นครปฐม		เชียงใหม่		อุบลราชธานี		สงขลา	
		RMSD	MBD	RMSD	MBD	RMSD	MBD	RMSD	MBD
เหนือ	30	17.9	-4.2	17.1	-8.6	22.2	-5.5	-	-
	60	22.1	8.3	20.0	-4.6	27.4	-3.9	-	-
	90	31.6	11.9	24.7	7.7	37.4	11.4	28.1	18.3
ใต้	30	21.5	-0.1	-	-	22.7	-5.3	26.0	7.6
	60	26.7	2.9	-	-	27.0	-2.0	37.5	11.1
	90	35.0	10.8	27.6	-5.4	28.9	-7.8	39.6	-4.3
ตะวันออก	30	21.9	5.1	-	-	26.6	8.2	-	-
	60	37.0	-17.5	-	-	34.2	7.5	-	-
	90	25.9	-3.5	30.0	7.2	47.2	16.4	54.8	37.4
ตะวันตก	30	18.3	-0.1	-	-	34.3	-3.2	-	-
	60	43.0	-16.2	-	-	37.8	-3.7	-	-
	90	30.1	9.1	26.0	-3.9	35.9	0.4	28.8	-2.9
รวม		29.0	-2.1	24.0	-2.6	31.4	-0.3	32.2	9.3

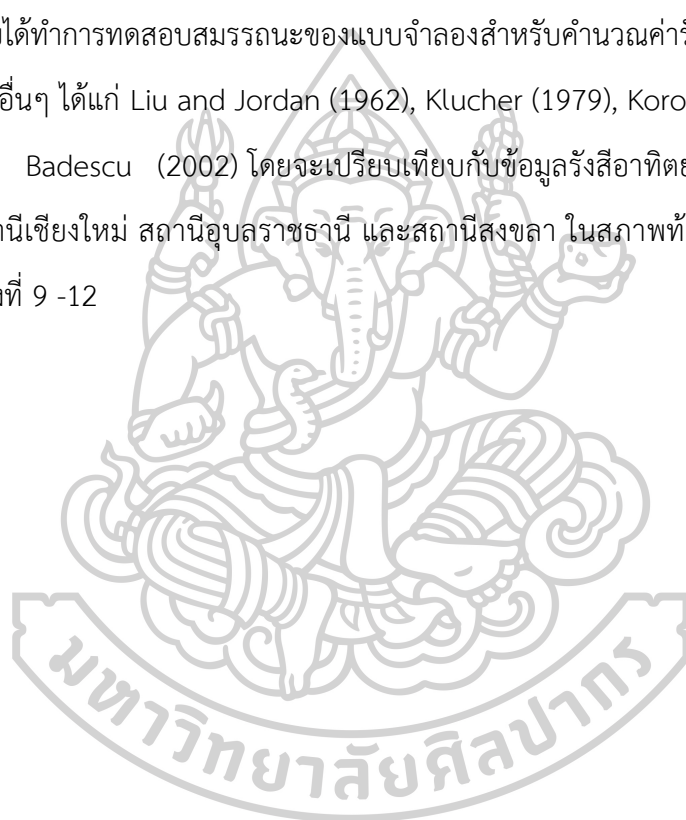
จากตารางที่ 8 แสดงผลความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองคำนวณค่าความเข้มรังสีกระจายพื้นเอียง ในสภาพท้องฟ้าทั่วไปที่ได้จากการรวมแบบจำลองทัศนียภาพปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด และทัศนียภาพปราศจากเมฆ พบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัดค่อนข้างมีความสอดคล้องกัน โดยที่กรณีมุมเอียง 30° จะให้ผลที่มีความคลาดเคลื่อนน้อย และความคลาดเคลื่อนจะมากขึ้น ตามมุมเอียงที่เพิ่มขึ้น เป็นส่วนใหญ่ ยกเว้นที่มุมเอียง 60° ที่พื้นเอียงหันไปทางทิศตะวันตก จะมีความคลาดเคลื่อนที่สูงกว่ามุมเอียง 90° โดยที่สถานีนครปฐมมีค่า RMSD อยู่ในช่วง 17.9 –



43.0% และมีค่า MBD อยู่ในช่วง -17.5 – 11.9% สำหรับสถานีเชียงมีค่า RMSD อยู่ในช่วง 17.1 – 30.0% และมีค่า MBD อยู่ในช่วง -8.6 – 7.7% ส่วนที่สถานีอุบลราชธานีมีค่า RMSD อยู่ในช่วง 22.2 – 47.2% และมีค่า MBD อยู่ในช่วง -5.5 – 16.4% และสุดท้ายสถานีสงขลามีค่า RMSD อยู่ในช่วง 26.0 – 54.8% และมีค่า MBD อยู่ในช่วง -4.3 – 37.4% เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่ได้จากการรวมแบบจำลองของทั้งสองกรณีจึงทำให้ได้ผลการทดสอบสมรรถนะที่ค่อนข้างดี

### 3.2.5 การเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลองอื่นๆ

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองสำหรับคำนวณค่ารังสีอาทิตย์บนพื้นเอียงที่ได้จากนักวิจัยอื่นๆ ได้แก่ Liu and Jordan (1962), Klucher (1979), Koronakis (1986), Muneer (1997) และ Badescu (2002) โดยจะเปรียบเทียบกับข้อมูลรังสีอาทิตย์ที่ได้จากการวัดที่สถานีนครปฐม สถานีเชียงใหม่ สถานีอุบลราชธานี และสถานีสงขลา ในสภาพท้องฟ้าทั่วไป โดยผลที่ได้แสดงในตารางที่ 9 -12



ตารางที่ 9 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลองอื่นๆ ในสภาพ  
ท้องฟ้าทั่วไป สถานีนครปฐม

แบบจำลอง	ทิศ								
	มุม เอียง	เหนือ		ใต้		ตะวันออก		ตะวันตก	
		RMSD	MBD	RMSD	MBD	RMSD	MBD	RMSD	MBD
Proposed	30	24.1	2.9	19.5	2.5	22.4	6.7	19.5	3.0
	60	20.7	9.0	26.5	3.0	39.0	-16.3	44.3	-13.3
	90	30.9	9.2	35.9	-9.8	25.0	-2.7	29.9	10.1
Liu&Jordan	30	24.5	3.9	23.7	-9.8	22.1	-4.7	21.4	-8.5
	60	25.6	17.0	36.7	16.2	46.9	-28.0	35.9	-2.2
	90	33.3	8.9	48.0	-15.0	50.1	-18.1	41.3	-3.1
Klucher	30	24.8	4.2	37.4	-19.7	28.4	-0.7	32.0	-6.2
	60	36.5	23.0	34.1	-4.5	45.9	-21.4	44.6	7.5
	90	50.2	29.8	59.7	-0.9	58.4	-4.8	60.5	15.4
Koronakis	30	24.7	4.1	23.2	-7.6	21.8	-2.5	20.9	-6.3
	60	36.3	29.0	32.6	-3.6	42.8	-19.9	38.9	8.6
	90	61.6	45.2	56.1	13.3	53.9	9.1	58.2	29.1
Muneer	30	24.2	3.5	24.6	-12.9	23.0	-8.0	22.4	-11.7
	60	18.3	4.3	36.3	-22.8	52.5	-36.3	36.9	-13.6
	90	33.2	-15.8	53.5	-34.3	57.3	-36.7	44.9	-25.1
Badescu	30	24.1	3.2	25.8	-15.4	24.1	-10.7	23.6	-14.2
	60	17.9	-1.0	38.7	-26.9	55.2	-40.0	38.7	-18.5
	90	33.3	8.9	48.0	-15.0	50.1	-18.1	41.3	-3.1

ตารางที่ 10 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลองอื่นๆ ในสภาพ  
ท้องฟ้าทั่วไป สถานีเชียงใหม่

แบบจำลอง	ทิศของหัววัด								
	มุม เอียง	เหนือ		ใต้		ตะวันออก		ตะวันตก	
		RMSD	MBD	RMSD	MBD	RMSD	MBD	RMSD	MBD
Proposed	30	19.4	-11.0	-	-	-	-	-	-
	60	20.1	-5.2	-	-	-	-	-	-
	90	25.1	3.4	27.6	-5.3	40.7	14.3	25.8	-4.4
Liu&Jordan	30	14.0	-5.0	-	-	-	-	-	-
	60	19.4	1.1	-	-	-	-	-	-
	90	25.3	4.8	40.4	-14.7	40.1	-7.6	45.1	-18.1
Klucher	30	12.5	-1.0	-	-	-	-	-	-
	60	37.3	28.1	-	-	-	-	-	-
	90	38.0	25.6	36.5	4.2	38.7	14.1	55.3	3.8
Koronakis	30	13.5	-2.7	-	-	-	-	-	-
	60	24.6	12.3	-	-	-	-	-	-
	90	55.9	39.8	49.1	13.7	53.0	23.2	49.9	9.2
Muneer	30	15.4	-8.3	-	-	-	-	-	-
	60	21.8	-10.8	-	-	-	-	-	-
	90	26.3	-19.0	47.4	-34.0	46.3	-28.5	52.8	-36.7
Badescu	30	16.9	-10.9	-	-	-	-	-	-
	60	24.9	-15.8	-	-	-	-	-	-
	90	25.3	4.8	40.4	-14.7	40.1	-7.6	45.1	-18.1

ตารางที่ 11 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลองอื่นๆ ในสภาพ  
ท้องฟ้าทั่วไป สถานีอุบลราชธานี

แบบจำลอง	ทิศของหัววัด								
	มุม เอียง	เหนือ		ใต้		ตะวันออก		ตะวันตก	
		RMSD	MBD	RMSD	MBD	RMSD	MBD	RMSD	MBD
Proposed	30	33.5	-2.2	24.8	-2.3	29.9	9.9	37.3	6.8
	60	25.3	-3.3	28.5	-0.7	30.1	6.4	38.1	3.2
	90	46.8	13.4	27.3	-6.6	46.4	18.3	42.1	3.9
Liu&Jordan	30	26.5	1.3	28.3	-8.5	34.2	-0.7	36.4	-3.9
	60	30.3	5.8	33.8	-18.8	44.1	-8.5	43.4	-3.4
	90	53.8	16.6	43.7	-11.2	55.8	-5.7	52.1	-9.0
Klucher	30	27.0	5.1	27.5	-1.2	32.7	6.0	35.6	2.5
	60	33.4	14.3	27.8	-8.9	38.3	2.7	40.9	9.7
	90	68.0	38.5	42.3	7.0	54.9	15.3	51.3	10.3
Koronakis	30	27.3	3.8	28.3	-6.3	35.1	1.6	36.8	-1.6
	60	37.1	17.6	32.8	-9.8	46.2	1.6	46.7	7.3
	90	94.0	56.7	59.8	18.4	72.5	25.7	68.9	21.3
Muneer	30	25.9	-2.2	28.8	-11.8	33.2	-4.2	36.2	-7.3
	60	28.6	-6.6	38.2	-28.3	45.2	-19.3	43.4	-17.7
	90	40.7	-9.8	46.5	-31.3	56.3	-27.1	52.9	-29.6
Badescu	30	25.8	-5.0	29.5	-14.2	32.9	-6.9	36.4	-9.9
	60	29.9	-11.8	40.8	-32.3	46.7	-23.8	44.5	-19.5
	90	53.8	16.7	43.7	-11.2	55.8	-5.7	52.1	-9.0

ตารางที่ 12 ผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลองอื่นๆ ในสภาพ  
ท้องฟ้าทั่วไป สถานีสงขลา

แบบจำลอง	ทิศของหัววัด								
	มุม เอียง	เหนือ		ใต้		ตะวันออก		ตะวันตก	
		RMSD	MBD	RMSD	MBD	RMSD	MBD	RMSD	MBD
Proposed	30	-	-	25.7	7.3	-	-	-	-
	60	-	-	37.5	11.1	-	-	-	-
	90	27.5	17.6	31.1	3.0	52.2	34.8	27.8	-2.2
Liu&Jordan	30	-	-	27.0	-5.2	-	-	-	-
	60	-	-	31.9	-2.0	-	-	-	-
	90	23.7	9.9	39.4	2.6	46.4	15.0	49.1	-14.3
Klucher	30	-	-	27.6	-0.3	-	-	-	-
	60	-	-	33.9	7.3	-	-	-	-
	90	38.7	29.6	46.3	23.8	60.3	43.1	44.1	7.6
Koronakis	30	-	-	27.0	-2.9	-	-	-	-
	60	-	-	35.2	9.1	-	-	-	-
	90	50.7	40.6	59.4	35.8	75.6	53.3	54.9	15.0
Muneer	30	-	-	27.5	-8.5	-	-	-	-
	60	-	-	32.9	-13.3	-	-	-	-
	90	21.4	-11.1	41.1	-20.0	41.2	-11.1	56.0	-34.2
Badescu	30	-	-	28.1	-11.1	-	-	-	-
	60	-	-	34.8	-18.1	-	-	-	-
	90	23.7	9.8	39.4	2.6	46.4	15.0	49.1	-14.3

จากตารางที่ 9 – 12 จากผลการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับแบบจำลองอื่นๆ ในสภาพท้องฟ้าทั่วไป ดังนี้

### 1. สถานีนครปฐม

ในกรณีพื้นเอียงที่หันไปทางทิศเหนือทำมุมเอียง 30 องศา ของทุกแบบจำลองมีค่าใกล้เคียงกัน และมีความคลาดเคลื่อนน้อย โดยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นและแบบจำลองของ Badescu ให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่เท่ากันและมีค่าน้อยที่สุด โดยมีค่า RMSD เท่ากับ 24.1% แต่แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นให้ค่า MBD น้อยกว่าแบบจำลองของ Badescu สำหรับที่มุมเอียง 60 องศา แบบจำลองส่วนใหญ่จะมีความคลาดเคลื่อนที่สูงกว่ากรณีมุมเอียง 30 องศา โดยแบบจำลองที่ให้ค่า RMSD น้อยที่สุดคือ แบบจำลองของ Badescu มีค่าเท่ากับ 17.9% และมีค่า MBD เท่ากับ -1.0% และสำหรับมุมเอียง 90 องศา แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยกว่าแบบจำลองอื่นๆ สำหรับพื้นเอียงที่หันไปทางทิศใต้ทำมุมเอียง 30 60 และ 90 องศา พบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยที่สุด ส่วนแบบจำลองอื่นๆ จะมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ใกล้เคียงกัน โดยค่า RMSD จะสูงที่มุมเอียง 90 องศา สำหรับทุกแบบจำลอง ในส่วนพื้นเอียงที่หันไปทางทิศตะวันออกทำมุมเอียง 30 องศา พบว่าทุกๆแบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยและมีค่าใกล้เคียง โดยแบบจำลองของ Koronakis ให้ค่า RMSD น้อยที่สุด เท่ากับ 21.8% และมีค่า MBD เท่ากับ -2.5% ส่วนที่มุมเอียง 60 และ 90 องศา แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบจำลองอื่นๆ สุดท้ายพื้นเอียงที่หันไปทางทิศตะวันตกทำมุมเอียง 30 องศา จะเห็นว่าทุกแบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยและใกล้เคียงกัน ยกเว้นแบบจำลองของ Klucher ให้ค่าความคลาดเคลื่อนที่สูงกว่าแบบจำลองอื่นๆ โดยมีค่า RMSD เท่ากับ 44.6% และค่า MBD เท่ากับ 7.5% ส่วนมุมเอียง 60 องศา ทุกแบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกัน และที่มุมเอียง 90 องศา แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบจำลองอื่นๆ

### 2. สถานีเชียงใหม่

ในกรณีพื้นเอียงที่หันไปทางทิศเหนือทำมุมเอียง 30 องศา พบว่าทุกแบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ใกล้เคียงกัน โดยแบบจำลองของ Klucher มีค่า RMSD ที่น้อยกว่าแบบจำลองอื่นๆ เท่ากับ 12.5% และมีค่า MBD เท่ากับ -1.0% สำหรับมุมเอียง 60 องศา และ 90 องศา ทุกแบบจำลองมีค่า RMSD ที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ สำหรับพื้นเอียงที่หันไปทางทิศใต้ทำมุมเอียง 90 องศา

จะเห็นได้ชัดว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำกว่าแบบจำลองอื่นๆ โดยมีค่า RMSD เท่ากับ 27.6% และค่า MBD เท่ากับ -5.3% และแบบจำลองของ Koronakis ให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูงกว่าแบบจำลองอื่นๆ โดยมีค่า RMSD เท่ากับ 49.1% และมีค่า MBD เท่ากับ 13.7% ในส่วนพื้นเอียงที่หันไปทางทิศตะวันออกเฉียง 90 องศา แต่ละแบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ค่อนข้างสูง โดยแบบจำลองของ Klucher มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด คือมีค่า RMSD เท่ากับ 38.7% และมีค่า MBD เท่ากับ 14.1% ส่วนแบบจำลองที่มีความคลาดเคลื่อนสูงกว่าแบบจำลองอื่นๆ คือแบบจำลองของ Koronakis มีค่า RMSD เท่ากับ 53.0% และมีค่า MBD เท่ากับ 23.2% สุดท้ายพื้นเอียงที่หันไปทางทิศตะวันตกทำมุมเอียง 90 องศา แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบจำลองอื่นๆ โดยมีค่า RMSD เท่ากับ 25.8% และมีค่า MBD เท่ากับ -4.4% ส่วนแบบจำลองอื่นๆ มีความคลาดเคลื่อนที่ใกล้เคียงกัน

### 3. สถานีอุบลราชธานี

ในกรณีพื้นเอียงที่หันไปทางทิศเหนือทำมุมเอียง 30 องศา ทุกแบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ใกล้เคียงกัน โดยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีค่า RMSD สูงกว่าแบบจำลองอื่นๆ เล็กน้อย โดยมีค่าเท่ากับ 33.5% และค่า MBD เท่ากับ -2.2% สำหรับที่มุมเอียง 60 องศา ทุกแบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกัน แต่แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบจำลองอื่นๆ ส่วนมุมเอียง 90 องศา แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบจำลองอื่นเล็กน้อย ยกเว้นแบบจำลองของ Muneer ที่มีค่า RMSD ต่ำกว่า ซึ่งมีค่าเท่ากับ 40.7% และค่า MBD เท่ากับ -9.8% สำหรับพื้นเอียงที่หันไปทางทิศใต้ทำมุมเอียง 30 องศา ทุกแบบจำลองมีค่าความคลาดเคลื่อนที่ใกล้เคียงกัน โดยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีค่า RMSD น้อยกว่าแบบจำลองอื่นเล็กน้อย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 24.8% และมีค่า MBD เท่ากับ -2.3% ส่วนมุมเอียง 60 องศา แบบจำลองของ Klucher มีค่า RMSD น้อยที่สุด เท่ากับ 27.8% และค่า MBD เท่ากับ -8.9% และที่มุมเอียง 90 องศา แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบจำลองอื่นๆ โดยมีค่า RMSD เท่ากับ 27.3% และ MBD มีค่า -6.6% ในส่วนพื้นเอียงที่หันไปทางทิศตะวันออกเฉียง 30 องศา 60 และ 90 องศา แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบจำลองอื่น โดยมีค่า RMSD เท่ากับ 29.9% และค่า MBD เท่ากับ 9.9% ส่วนแบบจำลองอื่นๆ มีค่าความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกัน โดยจะมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย สุดท้ายพื้นเอียงที่หันไปทางทิศตะวันตกทำมุมเอียง 30 องศา ทุกแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนที่ใกล้เคียงกัน โดย

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความคลาดเคลื่อนสูงกว่าแบบจำลองอื่นเล็กน้อย โดยมีค่า RMSD เท่ากับ 37.3% และมีค่า MBD เท่ากับ 6.8% ส่วนมุมเอียง 60 และ 90 องศา แบบจำลองอื่นๆ มีค่าความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกัน และแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

#### 4. สถานีสงขลา

ในกรณีพื้นเอียงที่หันไปทางทิศเหนือท่ามูมเอียง 90 องศา ค่าความคลาดเคลื่อนของอัตราแบบจำลองค่อนข้างแตกต่างกัน โดยแบบจำลองของ Muneer มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ซึ่งมีค่า RMSD เท่ากับ 21.4% และค่า MBD เท่ากับ -11.1% สำหรับพื้นเอียงที่หันไปทางทิศใต้ท่ามูมเอียง 30 องศา ทุกแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนที่ใกล้เคียงกัน โดยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบจำลองอื่นเล็กน้อย โดยมีค่า RMSD เท่ากับ 25.7% และมีค่า MBD เท่ากับ 7.3% ส่วนมุมเอียง 60 องศา แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความคลาดเคลื่อนสูงกว่าแบบจำลองอื่นๆ เล็กน้อย โดยแบบจำลองของ Liu และ Jordan มีค่า RMSD เท่ากับ 31.9% และมีค่า MBD เท่ากับ -2.0% ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบจำลองอื่นๆ และที่มุมเอียง 90 องศา แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าแบบจำลองอื่นๆ โดยมีค่า RMSD เท่ากับ 31.1% และมีค่า MBD เท่ากับ 3.0% ในส่วนพื้นเอียงที่หันไปทางทิศตะวันออกท่ามูมเอียง 90 องศา แบบจำลองของ Muneer ให้ความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด โดยมีค่า RMSD เท่ากับ 41.2% และมีค่า MBD เท่ากับ -11.1% ส่วนแบบจำลองของ Koronakis มีความคลาดเคลื่อนที่สูงกว่าแบบจำลองอื่นๆ โดยมีค่า RMSD เท่ากับ 75.6% และมีค่า MBD เท่ากับ 53.3% สุดท้ายพื้นเอียงที่หันไปทางทิศตะวันตกท่ามูมเอียง 90 องศา แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด โดยมีค่า RMSD เท่ากับ 27.8% และค่า MBD เท่ากับ -2.2% ส่วนแบบจำลองอื่นๆ มีความคลาดเคลื่อนใกล้เคียงกัน

จากผลการเปรียบเทียบทั้งหมด พบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ในการคำนวณค่ารังสีกระจายจากท้องฟ้ารายชั่วโมงบนพื้นเอียงที่หันไปทางทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออก และทิศตะวันตก ที่มุมเอียง 30 60 และ 90 องศา ได้ค่อนข้างดี เมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่นๆ โดยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจะให้ค่าการคำนวณที่ใกล้เคียงกับแบบจำลองของ Muneer เนื่องจากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นได้พัฒนาแนวคิดมาจากแบบจำลองของ Muneer ซึ่งเป็นแบบจำลอง anisotropic ที่มีความซับซ้อน ส่วนแบบจำลองของ Liu และ Jordan แบบจำลองของ Koronakis และแบบจำลองของ Badescu เป็นแบบจำลอง isotropic เป็นแบบจำลองที่ไม่ค่อยมีความซับซ้อน



และให้ค่าการคำนวณที่ดีในบางกรณี ส่วนแบบจำลองของ Klucher จะให้ค่าการคำนวณที่ค่อนข้างสูงกว่าแบบจำลองอื่นๆ เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ค่อนข้างมีความซับซ้อน สรุปได้ว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเป็นแบบจำลองอย่างง่ายที่มีความซับซ้อนน้อยกว่าแบบจำลองอื่นๆ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับมุมมองของพื้นเอียงและรังสีรวมบนพื้นเอียง เพียงทราบมุมของพื้นเอียงและรังสีรวมบนพื้นราบก็สามารถใช้คำนวณหาค่ารังสีกระจายจากท้องฟ้าบนพื้นเอียงได้



## บทที่ 4

### สรุป

ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณค่าความเข้มรังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียง ในการพัฒนาแบบจำลอง ผู้วิจัยทำการวัดรังสีกระจายบนพื้นราบและรังสีรวมบนพื้นเอียงที่ทำมุมเอียงกับพื้นราบ  $30^{\circ}$   $60^{\circ}$  และ  $90^{\circ}$  ที่หันหน้าไปทางทิศเหนือใต้ ตะวันออก และตะวันตก โดยเครื่องมือได้ติดตั้งพร้อมกับเครื่องวัดรังสีตรง และรังสีกระจายบนพื้นราบไว้ทั้ง 4 สถานี ได้แก่ สถานีนครปฐม ( $13.82^{\circ}$  N,  $100.04^{\circ}$  E) ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่ ( $18.78^{\circ}$  N,  $98.98^{\circ}$  E) ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี ( $15.25^{\circ}$  N,  $104.87^{\circ}$  E) และศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้ฝั่งตะวันออก จังหวัดสงขลา ( $7.20^{\circ}$  N,  $100.60^{\circ}$  E)

สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล ผู้วิจัยได้นำข้อมูลรังสีอาทิตย์ดังกล่าวมาแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ ข้อมูลชุดแรกคือข้อมูลรังสีอาทิตย์สำหรับใช้สร้างแบบจำลอง ปี 2014 – 2017 และข้อมูลชุดที่สองคือข้อมูลที่ใช้สำหรับทดสอบสมรรถนะของแบบจำลอง โดยผู้วิจัยจะแบ่งข้อมูลออกเป็น 3 กรณีตามปริมาณเมฆ ได้แก่ ท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด ท้องฟ้าปราศจากเมฆ และท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน ซึ่งสำหรับกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆก็จะแบ่งออกเป็นด้านที่เห็นดวงอาทิตย์ และด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์ จากนั้นจะทำการพลอตกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นเอียงและค่ารังสีกระจายรายชั่วโมงบนพื้นราบสำหรับแต่ละมุมเอียงและแต่ละทิศทาง ในแต่ละสถานีโดยใช้ข้อมูลชุดแรก และแบบจำลองที่ได้จะเป็นแบบจำลองหาค่ารังสีอาทิตย์บนพื้นเอียงสำหรับแต่ละกรณีดังกล่าว จากนั้นผู้วิจัยจะนำแบบจำลองที่ได้มาทดสอบสมรรถนะของแบบจำลอง โดยใช้ข้อมูลชุดที่สองที่ไม่ซ้ำกับข้อมูลชุดแรก ในแต่ละกรณีและแต่ละสถานี โดยผลการทดสอบของแบบจำลองแสดงได้ดังต่อไปนี้

1. กรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด (Overcast sky) พบความแตกต่างระหว่างค่ารังสีกระจายบนพื้นเอียงที่ได้จากการวัดและค่ารังสีกระจายที่ได้จากแบบจำลองมีค่า RMSD รวมทั้งหมดอยู่ในช่วง 9.6 – 17.3% และมีค่า MBD รวมทั้งหมดอยู่ในช่วง 2.4 – 9.9% ซึ่งจะเห็นว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีสมรรถนะอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

2. กรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ (Clear sky) สำหรับด้านที่ไม่เห็นดวงอาทิตย์ มีค่า RMSD อยู่ระหว่าง 20.1 – 27.9% และมีค่า MBD อยู่ในช่วง -19.6 – 3.7% และสำหรับด้านที่เห็นดวงอาทิตย์ มีค่า RMSD รวมอยู่ระหว่าง 25.9 – 32.6% และมีค่า MBD รวมอยู่ในช่วง -15.6 – 2.3%

3. กรณีท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน (Partly cloudy sky) ผู้วิจัยจะใช้ผลรวมของแบบจำลองกรณีท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมดและกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ โดยใช้ปริมาณเมฆ (cloud cover) เป็นตัวถ่วงน้ำหนัก ผลการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองที่ได้พบว่าค่า RMSD รวมทั้งหมดอยู่ในช่วง 24.0 – 32.2% และมีค่า MBD รวมอยู่ในช่วง -2.6 – 9.3%

สุดท้ายผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองอื่นๆ โดยใช้ข้อมูลชุดเดียวกันในสภาพท้องฟ้าทั่วไป และพบว่าแบบจำลองที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นมีความแม่นยำกว่าแบบจำลองอื่นๆ เป็นส่วนใหญ่

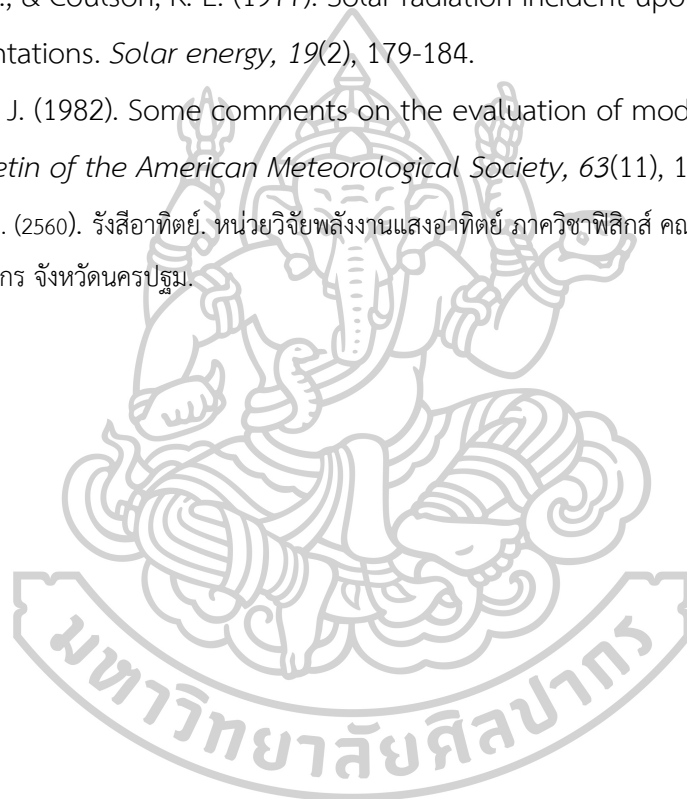
**ข้อเสนอแนะ** เนื่องจากการวัดรังสีบนพื้นเอียงที่สถานีเชียงใหม่ และสงขลา มีเฉพาะที่หันหน้าไปทางทิศเท่านั้น ดังนั้นในอนาคต ควรทำการวัดให้ครบทุกทิศทางหลัก เพื่อนำข้อมูลมาใช้ในการปรับปรุงแบบจำลองให้มีสมรรถนะที่ดีขึ้น



## รายการอ้างอิง

- ASTM. ( 2000). *Standard solar constant and zero air mass solar spectral tables. Standard E-490*. American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA, USA.
- Badescu, V. (2002). 3D isotropic approximation for solar diffuse irradiance on tilted surfaces. *Renewable Energy*, 26(2), 221-233.
- Bugler, J. W. (1977). The determination of hourly insolation on an inclined plane using a diffuse irradiance model based on hourly measured global horizontal insolation. *Solar energy*, 19(5), 477-491.
- Cooper, P. I. (1969). The absorption of solar radiation in solar stills. *Solar energy*, 12(3), 333-346.
- Gueymard, C. (1987). An anisotropic solar irradiance model for tilted surfaces and its comparison with selected engineering algorithms. *Solar energy*, 38(5), 367-386.
- Hay, J. E. (1979). Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces. *Solar energy*, 23(4), 301-307.
- Iqbal, M. (1983). *An introduction to solar radiation*. New York: Academic Press.
- Klucher, T. M. (1979). Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. *Solar energy*, 23(2), 111-114.
- Koronakis, P. S. (1986). On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens basin area. *Solar energy*, 36(3), 217-225.
- Liu, B. Y. H., & Jordan, R. C. (1962). Daily insolation on surfaces tilted towards equator. *ASHRAE J.; (United States)*, 10, 526-541.
- Ma, C. C. Y., & Iqbal, M. (1983). Statistical comparison of models for estimating solar radiation on inclined surfaces. *Solar energy*, 31(3), 313-317.
- Muneer, T. (1997). *Solar Radiation and Daylight Models: For the Energy Efficient Design of Buildings*. In: Oxford: Architectural Press.
- Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., Stewart, R., & Menicucci, D. (1987). A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. *Solar energy*, 39(3), 221-231.

- Psiloglou, B. E., & Kambezidis, H. D. (2009). Estimation of the ground albedo for the Athens area, Greece. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 71(8-9), 943-954.
- Reindl, D. T., Beckman, W. A., & Duffie, J. A. (1990). Diffuse fraction correlations. *Solar energy*, 45(1), 1-7.
- Skartveit, A., & Olseth, J. A. (1986). Modelling slope irradiance at high latitudes. *Solar energy*, 36(4), 333-344.
- Temps, R. C., & Coulson, K. L. (1977). Solar radiation incident upon slopes of different orientations. *Solar energy*, 19(2), 179-184.
- Willmott, C. J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11), 1309-1313.
- เสริม จันทร์ฉาย. (2560). รังสีอาทิตย์. หน่วยวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม.





## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	กัญญ์วรา มีอินธา
วัน เดือน ปี เกิด	18 เมษายน 2537
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลราชวิถี
วุฒิการศึกษา	วท.บ.(ฟิสิกส์) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
ที่อยู่ปัจจุบัน	หัวหมาก 11 แขวงหัวหมาก เขตบางกะปิ กรุงเทพมหานคร 10240

