

การหาค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ด้วยแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศ



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

กรกฎาคม 2559

การหาค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ด้วยแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศ



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

กรกฎาคม 2559

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การหาค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ด้วยแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศ



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

กรกฎาคม 2559

ภัทรา ภัคดีเกียรติ. (2559). การหาค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ด้วยแบบจำลองทางฟิสิกส์
บรรยากาศ. ปรินซิปีนิพนธ์ กศ.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย
ศรีนครินทรวิโรฒ. อาจารย์ที่ปรึกษาปรินซิปีนิพนธ์: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริลักษณ์
เรืองรุ่งโรจน์.

งานวิจัยนี้ได้แสดงผลการหาค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์โดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์
บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองเบิร์ด แบบจำลองซีเอสอาร์ แบบจำลอง คูมาร์
แบบจำลองดาเนซเซอร์พอลทริดพอคเตอร์ และแบบจำลองมีเนล และนำค่าที่ได้จากการคำนวณ
รายชั่วโมงมาเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการวัด ผู้วิจัยเลือกพิจารณาและวิเคราะห์ข้อมูลในกรณีวันที่มี
สภาพท้องฟ้าโปร่ง (Clear day) ของฤดูหนาว (เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ปีพ.ศ.
2555-2557 ผลที่ได้พบว่าในช่วงฤดูร้อนของทั้ง 3 ปี มีค่าการแผ่รังสีตรงเฉลี่ยรายวันมากกว่าในช่วง
ฤดูหนาวโดยมีค่าอยู่ระหว่าง $440-570 \text{ W/m}^2$ และ $550-700 \text{ W/m}^2$ ตามลำดับ จากนั้นได้นำผลการ
วิเคราะห์ค่าการแผ่รังสีตรงที่ได้มาทำการทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองโดยใช้การทดสอบทาง
สถิติ 3 วิธี ได้แก่ รากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง (RMSD) ความแตกต่างในรูป
ความเอนเอียงเฉลี่ย (MBD) และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ผลการทดสอบความน่าเชื่อถือของ
แบบจำลองในภาพรวม 3 ปี พบว่าแบบจำลองมีเนลเป็นแบบจำลองที่มีค่าความน่าเชื่อถือมากที่สุด
โดยในฤดูหนาวพบว่ามีค่า RMSD MBD และ R^2 เท่ากับ 12.08% 8.75% และ 96.22% ตามลำดับ
และในฤดูร้อนเท่ากับ 8.38% 6.49% และ 97.80% ตามลำดับ

DETERMINATION OF DIRECT SOLAR RADIATION USING ATMOSPHERIC
PHYSICS MODELS

AN ABSTRACT
BY
PATTRA PUKDEEKIAT



Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Education Degree in physics
At Srinakharinwirot University
July 2016

Pattra Pukdeekiat. (2016). *Determination of direct solar radiation using atmospheric physics models*. Master's thesis, M.Ed. (Physics). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor: Assist. Prof. Dr. Siriluk Ruangrungrrote.

This study was designed to measure direct solar radiation using five atmospheric physics models: the Bird model, the CSR model, the Kumar model, the Daneshyer–Paltridge–Proctor (DPP) model and the Meinel model. After that, direct solar radiation was calculated on an hourly basis by each model and compared with the measurable data, together with the assumption of clear sky conditions in winter (January) and summer (March) 2012-2014. The results showed that direct solar radiation was in a range of 440-570 W/m² in winter and 550-700 W/m² in summer. Furthermore, statistical tests such as Mean Bias Difference (MBD), Root Mean Square Difference (RMSD) and Coefficient of determination (R^2) were carried out in order to show the efficiency of each model. The obtainable analysis pinpointed that the best performance was the Meinel model with the RMSD, MBD and R^2 at 12.08%, 8.75% and 96.22% respectively for winter and with summer at 8.38%, 6.49% and 97.80% respectively.

เรื่อง

การหาค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ด้วยแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศ

ของ

ภัทรา ภัคดีเกียรติ

ได้รับการอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....รักษาการแทนคณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. ปรินทร์ ชัยวิสุทธิทางกูร)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. 2559

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

.....ที่ปรึกษา

.....ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์) (รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์แก้ว อุดมสมุทรทรัพย์)

.....กรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์)

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนของบัณฑิตวิทยาลัย ประเภททุนการศึกษาเพื่อทำปริญญานิพนธ์
จาก
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ



ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดีเป็นเพราะผู้วิจัยได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ที่ท่านได้มอบทั้งคำปรึกษา และคำแนะนำในการจัดทำงานวิจัยนี้ทุกขั้นตอน ทำให้ผู้วิจัยได้รับประสบการณ์ในการทำวิจัย การคิดวิเคราะห์ รวมทั้งการวางแผนการทำงาน นอกจากนี้ยังให้คำแนะนำเพื่อเป็นแนวทางในการดำรงชีวิต และการทำงานเพื่อเป็นครูที่ดี โดยที่ท่านได้เป็นแบบอย่างของอาจารย์ที่ทุ่มเทให้กับศิษย์และงานวิชาการอย่างเต็มที่ และขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์แก้ว อุดมสมุทรศิริ และศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ สำหรับคำแนะนำต่างๆ และที่สละเวลามาเป็นคณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณนางสาวสัมฤทธิ์ สุทธิประภา ผู้อำนวยการศูนย์ตรวจวิเคราะห์ไอโซนและรังสี กรมอุตุนิยมวิทยา กรุงเทพฯ ที่ให้ความช่วยเหลือด้านข้อมูลในการทำงานวิจัย และให้คำแนะนำต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์มากมาย

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ ให้ความช่วยเหลือต่าง ๆ และให้คำแนะนำกับผู้วิจัยในการศึกษาตามหลักสูตรการศึกษามหาบัณฑิต ทำให้ผู้วิจัยรู้ว่าการศึกษานั้นจะเกิดผลดีและมีประสิทธิภาพอย่างสูงที่สุดนั้นจะต้องมีการศึกษาค้นคว้าอยู่เสมอให้กลายเป็นการเรียนรู้อย่างไม่มีสิ้นสุด แล้วความรู้นั้นจะเจริญงอกงามตามปรัชญาของมหาวิทยาลัย และนำความรู้นั้นไปสร้างประโยชน์ให้กับผู้อื่นและสังคมต่อไปจึงจะสมตามเจตนารมณ์ของหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิตอย่างสมบูรณ์

ท้ายที่สุดผู้วิจัยขอขอบพระคุณพ่อ แม่ พี่ น้องและเพื่อน ๆ นิสิตปริญญาโท หลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่คอยให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ เรื่อง และให้ทั้งกำลังใจและกำลังใจที่ดีเยี่ยมตลอดระยะเวลาที่ศึกษาและทำงานวิจัย รวมทั้งเจ้าหน้าที่ในภาควิชาฟิสิกส์ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือแก่ผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา

ภัทรา ภัคดีเกียรติ

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง.....	1
ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	3
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
2 ทฤษฎี และเอกสารที่เกี่ยวข้อง.....	5
บรรยากาศ (Atmosphere)	6
องค์ประกอบของบรรยากาศ.....	6
โครงสร้างของบรรยากาศ.....	8
การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ (Solar radiation)	10
พลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์	11
ชนิดของรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกลงสู่พื้นโลก	11
สมบัติทางเรขาคณิตของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์.....	12
พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศที่ใช้คำนวณ	
ค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์.....	14
พารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameter).....	14
พารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศ (Atmospheric parameter).....	18
แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศที่ใช้คำนวณค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์	19
แบบจำลองเบิร์ด (Bird model)	21
แบบจำลองซีเอสอาร์ (CSR model)	23
แบบจำลองคูมาร์ (Kumar model)	24
แบบจำลองดาเนชเยอร์พอลทริดพรอคเตอร์ (Daneshyer – Paltridge –	
Proctor (DPP) model)	25
แบบจำลองมีเนล (Meinel model)	25

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2 (ต่อ)	
วิธีการสถิติสำหรับทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองทางฟิสิกส์.....	25
รากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง	
(Root mean square difference)	26
ความแตกต่างในรูปความเอนเอียงเฉลี่ย (Mean bias difference).....	27
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of determination).....	27
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
3 วิธีการดำเนินงาน	31
ลักษณะทางภูมิศาสตร์ของพื้นที่และการวิเคราะห์ข้อมูล.....	32
ลักษณะทางภูมิศาสตร์ของพื้นที่ที่ทำการวิเคราะห์.....	32
การศึกษาข้อมูล และเก็บรวบรวมข้อมูล.....	32
การพิจารณาวันที่สภาพท้องฟ้าโปร่ง (Clear day).....	33
คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ ค่าพารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศ และ	
ค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ โดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศ.....	35
คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameters).....	35
คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศ (Atmospheric parameters).....	37
คำนวณค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์โดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศ.	38
เขียนกราฟแสดงค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์โดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์	
บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลอง	43
ทดสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้การทดสอบ	
ทางสถิติ (Statistical test)	43
คำนวณค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง (RMSD).....	43

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3 (ต่อ)	
คำนวณค่าความแตกต่างในรูปความเอนเอียงเฉลี่ย (MBD).....	44
คำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2).....	45
4 ผลการวิจัย	46
ผลการพิจารณาวันที่สภาพท้องฟ้าโปร่ง (Clear day).....	46
การคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameters) และการ	
คำนวณค่าพารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศ (Atmospheric parameters).....	49
การเขียนกราฟแสดงค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์โดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์	
บรรยากาศและค่าที่ได้จากการวัดจริงเทียบกับเวลารายชั่วโมง.....	50
การทดสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้การทดสอบทาง	
สถิติ (Statistical test)	69
5 สรุปผลและวิจารณ์	77
สรุปผลและวิจารณ์	77
ข้อเสนอแนะในการทำวิจัย	78
บรรณานุกรม	80
ภาคผนวก	83
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์โดยใช้	
แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลอง.....	84
ภาคผนวก ข ค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameters)	
และพารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศ (Atmospheric parameters).....	91
ภาคผนวก ค เครื่องมือสำหรับวัดการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์.....	102
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	105

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 แบบจำลองการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์	19
2 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameters) และพารามิเตอร์ ในชั้นบรรยากาศ (Atmospheric parameters) เวลา 07:00 น. ของวันที่ท้องฟ้าโปร่ง (Clear day) ในฤดูหนาว (เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ปี พ.ศ. 2555-2557	49
3 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameters) และพารามิเตอร์ ในชั้นบรรยากาศ (Atmospheric parameters) เวลา 08:00 น. ของวันที่ท้องฟ้าโปร่ง (Clear day) ในฤดูหนาว (เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ปี พ.ศ. 2555-2557	92
4 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameters) และพารามิเตอร์ ในชั้นบรรยากาศ (Atmospheric parameters) เวลา 09:00 น. ของวันที่ท้องฟ้าโปร่ง (Clear day) ในฤดูหนาว (เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ปี พ.ศ. 2555-2557	93
5 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameters) และพารามิเตอร์ ในชั้นบรรยากาศ (Atmospheric parameters) เวลา 10:00 น. ของวันที่ท้องฟ้าโปร่ง (Clear day) ในฤดูหนาว (เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ปี พ.ศ. 2555-2557	94
6 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameters) และพารามิเตอร์ ในชั้นบรรยากาศ (Atmospheric parameters) เวลา 11:00 น. ของวันที่ท้องฟ้าโปร่ง (Clear day) ในฤดูหนาว (เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ปี พ.ศ. 2555-2557	95
7 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameters) และพารามิเตอร์ ในชั้นบรรยากาศ (Atmospheric parameters) เวลา 12:00 น. ของวันที่ท้องฟ้าโปร่ง (Clear day) ในฤดูหนาว (เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ปี พ.ศ. 2555-2557.....	96

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
8 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameters) และพารามิเตอร์ ในชั้นบรรยากาศ (Atmospheric parameters) เวลา 13:00 น. ของวันที่ท้องฟ้าโปร่ง (Clear day) ในฤดูหนาว (เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ปี พ.ศ. 2555-2557.....	97
9 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameters) และพารามิเตอร์ ในชั้นบรรยากาศ (Atmospheric parameters) เวลา 14:00 น. ของวันที่ท้องฟ้าโปร่ง (Clear day) ในฤดูหนาว (เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ปี พ.ศ. 2555-2557.....	98
10 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameters) และพารามิเตอร์ใน ชั้นบรรยากาศ (Atmospheric parameters) เวลา 15:00 น. ของวันที่ท้องฟ้าโปร่ง (Clear day) ในฤดูหนาว (เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ปี พ.ศ. 2555-2557.....	99
11 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameters) และพารามิเตอร์ ในชั้นบรรยากาศ (Atmospheric parameters) เวลา 16:00 น. ของวันที่ท้องฟ้าโปร่ง (Clear day) ในฤดูหนาว (เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ปี พ.ศ. 2555-2557.....	100
12 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameters) และพารามิเตอร์ ในชั้นบรรยากาศ (Atmospheric parameters) เวลา 17:00 น. ของวันที่ท้องฟ้าโปร่ง (Clear day) ในฤดูหนาว (เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ปี พ.ศ. 2555-2557.....	101

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 โครงสร้างของบรรยากาศโลก.....	8
2 การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์.....	10
3 วงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์.....	13
4 ลักษณะของทรงกลมฟ้า.....	14
5 มุมเดคลิเนชัน (δ) และมุมชั่วโมง (ω).....	15
6 มุมเซนนิธดวงอาทิตย์ (θ_z).....	16
7 กราฟสมการเวลา (Equation time) เทียบกับวันในรอบปี.....	17
8 กรมอุตุนิยมวิทยาบางนา กรุงเทพมหานคร.....	33
9 เครื่องไพรานอมิเตอร์(Pyranometer) รุ่น MS-802 ที่ผลิตโดยบริษัทเอกโก (EKO) ซึ่ง ติดตั้ง ณ กรมอุตุนิยมวิทยาบางนา กรุงเทพฯ.....	34
10 กราฟค่าการแผ่รังสีสุทธิที่ได้จากเครื่องไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer) เทียบกับเวลา ของวันที่ 7-10 มกราคม และวันที่ 6, 21 มีนาคม พ.ศ. 2555.....	46
11 กราฟค่าการแผ่รังสีสุทธิที่ได้จากเครื่องไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer) เทียบกับเวลา ของวันที่ 3, 5, 17, 19 มกราคม และวันที่ 23, 31 มีนาคม พ.ศ. 2556.....	47
12 กราฟค่าการแผ่รังสีสุทธิที่ได้จากเครื่องไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer) เทียบกับเวลา ของวันที่ 2, 10-12 มกราคม และวันที่ 14, 31 มีนาคม พ.ศ. 2557.....	48
13 กราฟค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทาง ฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัด เทียบกับเวลารายชั่วโมง ของวันที่ 7 มกราคม พ.ศ. 2555.....	51
14 กราฟค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทาง ฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัด เทียบกับเวลารายชั่วโมง ของวันที่ 8 มกราคม พ.ศ. 2555.....	52
15 กราฟค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทาง ฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัด เทียบกับเวลารายชั่วโมง ของวันที่ 9 มกราคม พ.ศ. 2555.....	53
16 กราฟค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทาง ฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัด เทียบกับเวลารายชั่วโมง ของวันที่ 10 มกราคม พ.ศ. 2555.....	54

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

[illegible]

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
26 กราฟค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัด เทียบกับเวลารายชั่วโมงของวันที่ 10 มกราคม พ.ศ. 2557.....	64
27 กราฟค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัด เทียบกับเวลารายชั่วโมงของวันที่ 11 มกราคม พ.ศ. 2557.....	65
28 กราฟค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัด เทียบกับเวลารายชั่วโมงของวันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2557.....	66
29 กราฟค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัด เทียบกับเวลารายชั่วโมงของวันที่ 14 มีนาคม พ.ศ. 2557.....	67
30 กราฟค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัด เทียบกับเวลารายชั่วโมงของวันที่ 31 มีนาคม พ.ศ. 2557.....	68
31 กราฟค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง (RMSD) ของแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองของฤดูหนาวและฤดูร้อน ปี พ.ศ. 2555.....	70
32 กราฟค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง (RMSD) ของแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองของฤดูหนาวและฤดูร้อน ปี พ.ศ. 2556.....	70
33 กราฟค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง (RMSD) ของแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองของฤดูหนาวและฤดูร้อน ปี พ.ศ. 2557.....	71
34 กราฟค่าความแตกต่างในรูปความเอนเอียงเฉลี่ย (MBD) ของแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองของฤดูหนาวและฤดูร้อน ปี พ.ศ. 2555.....	71
35 กราฟค่าความแตกต่างในรูปความเอนเอียงเฉลี่ย (MBD) ของแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองของฤดูหนาวและฤดูร้อน ปี พ.ศ. 2556.....	72
36 กราฟค่าความแตกต่างในรูปความเอนเอียงเฉลี่ย (MBD) ของแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองของฤดูหนาวและฤดูร้อน ปี พ.ศ. 2557.....	72

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
37 กราฟค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลอง ของฤดูหนาวและฤดูร้อน ปี พ.ศ. 2555.....	73
38 กราฟค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลอง ของฤดูหนาวและฤดูร้อน ปี พ.ศ. 2556.....	73
39 กราฟค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลอง ของฤดูหนาวและฤดูร้อน ปี พ.ศ. 2557.....	74
40 กราฟค่าที่ได้จากการทดสอบทางสถิติ (Statistical test) ของแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลอง ในฤดูหนาว เฉลี่ย 3 ปี	75
41 กราฟค่าที่ได้จากการทดสอบทางสถิติ (Statistical test) ของแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลอง ในฤดูร้อน เฉลี่ย 3 ปี.....	75
42 เครื่องไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer) รุ่น MS-802 ที่ผลิตโดยบริษัทเอกโก (EKO).....	103

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

รังสีดวงอาทิตย์ที่แผ่มาถึงพื้นโลกเป็นแหล่งพลังงานตามธรรมชาติที่สะอาด และมีปริมาณมาก อีกทั้งยังมีประโยชน์ทั้งทางตรง และทางอ้อมต่อสิ่งมีชีวิตทุกชนิดบนโลก โดยพลังงานที่ส่งจากดวงอาทิตย์มาถึงโลกจะอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีความยาวคลื่นต่อเนื่อง เมื่อรังสีดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศมายังพื้นโลกจะถูกดูดกลืน (Absorb) และกระเจิง (Scatter) โดยองค์ประกอบต่างๆ ของชั้นบรรยากาศ เช่นแก๊สต่าง ๆ โมเลกุลของอากาศ และละอองลอย เป็นต้น โดยรังสีที่มาถึงพื้นโลกส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นของแสงสว่าง และรังสีอินฟราเรด โดยรังสีที่มีทิศทางตรงมาจากดวงอาทิตย์ เรียกว่า การแผ่รังสีตรง (Direct radiation) ซึ่งเป็นรังสีที่สามารถหักเหหรือสะท้อนไปรวมกันอย่างเป็นระเบียบ ดังนั้นการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์จึงสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานของอุปกรณ์รวมแสงต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้าได้ โดยทั่วไปการใช้ประโยชน์จากพลังงานแสงอาทิตย์จะมี 2 ลักษณะ คือในรูปของการผลิตกระแสไฟฟ้า และความร้อน ปัจจุบันเราสามารถวัดการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นผิวโลกได้ ซึ่งปริมาณที่วัดได้จะไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย

สำหรับการศึกษาเกี่ยวกับการวัดการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ (Direct solar radiation) ในประเทศไทยมีการศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลมานานกว่า 40 ปีแล้ว⁽¹⁾ โดยเริ่มต้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2523 ซึ่งเป็นผลมาจากการตื่นตัวในด้านการวิจัยและการพัฒนาพลังงานแสงอาทิตย์ เพื่อที่จะนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทน และได้เริ่มดำเนินการครั้งแรกโดยคณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (ปัจจุบันเปลี่ยนชื่อเป็นมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี) โดยได้ดำเนินการประมาณ 2-3 ปี อุปกรณ์เกิดขัดข้องจึงได้หยุดดำเนินการวัดไป ต่อมาในปี พ.ศ. 2525 กรมอุตุนิยมวิทยาและการพลังงานแห่งชาติ (ปัจจุบันเปลี่ยนชื่อเป็นกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน) ได้จัดตั้งสถานีวัดรังสีตรงของดวงอาทิตย์ขึ้นที่สถานีบางนา กรุงเทพมหานคร แต่ต่อมาเกิดปัญหาขึ้นโดยพบว่าข้อมูลขาดหายไปจำนวนมาก สถานีจึงได้หยุดดำเนินการไปในปี พ.ศ. 2537 ต่อมาสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย (Asian Institute of Technology) หรือ AIT ซึ่งตั้งอยู่ห่างจากกรุงเทพฯ ประมาณ 40 กิโลเมตร ได้ทำการวัดการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ด้วยเครื่อง

¹ กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ร่วมกับห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. (2551). *เครือข่ายการตรวจวัดความเข้มการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์และศักยภาพการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ในประเทศไทย*. หน้า 50-58.

ไพโรเฮลิโอมิเตอร์ (Pyrheliometer) แต่ไม่ทราบประวัติการสอบเทียบเครื่องมือและมีข้อมูลในบางช่วงหายไปเนื่องจากสถานีถูกฟ้าผ่าจึงได้หยุดดำเนินการไป ต่อมาประมาณปี พ.ศ. 2529-2538 การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ) ได้ทำการวัดการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ขึ้นอีกครั้งด้วยเครื่องไพโรเฮลิโอมิเตอร์ (Pyrheliometer) แต่เนื่องจากเครื่องติดตามดวงอาทิตย์ (Sun tracker) ที่ติดตั้งอยู่กับเครื่องไพโรเฮลิโอมิเตอร์ (Pyrheliometer) เกิดการขัดข้องจึงหยุดการวัด และต่อมามหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม ได้ดำเนินการซื้อเครื่องมือและทำการวัดการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ด้วยเครื่องไพโรเฮลิโอมิเตอร์ (Pyrheliometer) ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2525 จนถึงปี พ.ศ. 2531 จึงได้หยุดทำการวัดไปเนื่องจากเครื่องติดตามดวงอาทิตย์ (Sun tracker) เกิดการชำรุด และต่อมาปี พ.ศ. 2534 จึงได้เริ่มการวัดอีกครั้ง

เนื่องจากการวัดการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์จำเป็นต้องใช้เครื่องไพโรเฮลิโอมิเตอร์ (Pyrheliometer) ซึ่งจะต้องติดตั้งบนเครื่องติดตามดวงอาทิตย์ (Sun tracker) เพราะการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์เป็นรังสีที่พุ่งออกมาจากดวงอาทิตย์ และตำแหน่งของดวงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังนั้นเครื่องนี้จึงทำหน้าที่ขับเคลื่อนหัววัดให้ชี้ไปยังตำแหน่งของดวงอาทิตย์ โดยปัญหาที่พบส่วนใหญ่มักเกิดจากเครื่องติดตามดวงอาทิตย์ (Sun tracker) เพราะเครื่องดังกล่าวจะต้องทำการปรับแก้ด้วยมือทุก ๆ 1-2 วัน ซึ่งหากผู้ดูแลละเลยก็จะทำให้เครื่องวัดรังสีตรงของดวงอาทิตย์ชี้ไปไม่ตรงกับตำแหน่งของดวงอาทิตย์ อีกปัญหาที่พบคือ สายสัญญาณมักจะพันกับเครื่องติดตามดวงอาทิตย์และผู้ดูแลจะต้องมาคลี่สายสัญญาณทุก 1-2 วัน และอีกปัญหาคือ เมื่อเกิดกระแสไฟฟ้าขัดข้องเครื่องจะหยุดทำงาน ซึ่งกรณีของประเทศไทยมักเกิดปัญหากระแสไฟฟ้าขัดข้องบ่อย อีกทั้งจำนวนสถานีวัดรังสีตรงของดวงอาทิตย์ยังมีอยู่อย่างจำกัด ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาและหาเทคนิคการคำนวณหาค่าการแผ่การแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ โดยอาศัยข้อมูลพารามิเตอร์ทาง ดาราศาสตร์ และพารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือ สำหรับเป็นข้อมูลในการใช้แก้ปัญหาจากกรณีเกิดขึ้นดังกล่าว โดยในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาเทคนิคการคำนวณหาค่าการแผ่การแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ของดวงอาทิตย์ โดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศต่าง ๆ จำนวน 5 แบบจำลอง และมีการทดสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่คำนวณได้โดยใช้การทดสอบทางสถิติ (Statistical test) ทั้งหมด 3 วิธี เพื่อแสดงประสิทธิภาพของแบบจำลองที่มีความน่าเชื่อถือที่สุดในการคำนวณหาค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ในประเทศไทย อีกทั้งยังนำไปใช้ประโยชน์ในงานวิจัยด้านฟิสิกส์บรรยากาศ และงานด้านพลังงานแสงอาทิตย์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป

ความมุ่งหมายของการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งความมุ่งหมายไว้ดังนี้

1. เพื่อหาค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์รายชั่วโมง โดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศจำนวน 5 แบบจำลอง ของวันที่มีสภาพท้องฟ้าโปร่ง (Clear day) ในฤดูหนาว (เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ปี พ.ศ. 2555-2557
2. เพื่อหาค่าความน่าเชื่อถือของแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้การทดสอบทางสถิติ (Statistical test)
3. เพื่อแสดงประสิทธิภาพของแบบจำลองที่มีความน่าเชื่อถือที่สุดในการคำนวณหาค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์

ขอบเขตของการวิจัย

1. ทำการวิเคราะห์ข้อมูล ณ พื้นที่สถานีกรมอุตุนิยมวิทยา กรุงเทพฯ ที่ตั้งอยู่ละติจูด 13.40 องศาเหนือ ลองจิจูด 100.37 องศาตะวันออก และวิเคราะห์ข้อมูลในฤดูหนาว (เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ของปี พ.ศ. 2555-2557
2. คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ และในชั้นบรรยากาศ ของวันที่มีสภาพท้องฟ้าโปร่ง (Clear day) ในเดือนมกราคม และเดือนมีนาคม ของปี พ.ศ. 2555-2557
3. คำนวณหาค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ของประเทศไทยรายชั่วโมง โดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศจำนวน 5 แบบจำลอง
4. สร้างกราฟแสดงค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์รายชั่วโมง โดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศและค่าที่ได้จากการวัดจริงเทียบกับเวลา
5. ใช้วิธีการทางสถิติ (Statistical test) 3 วิธี ในการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. ได้ความรู้ และความเข้าใจเกี่ยวกับเรื่องการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่ผ่านชั้นบรรยากาศ
2. ได้เทคนิคการคำนวณหาค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์โดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศ
3. ได้ข้อมูลที่จะสามารถใช้เป็นตัวแทนของข้อมูลในวันที่เครื่องมือไม่สามารถวัดได้ และในสถานที่ที่ไม่มีเครื่องมือวัด

4. ได้ข้อมูลสำหรับนำไปใช้ประโยชน์ในงานวิจัยด้านฟิสิกส์บรรยากาศ และงานด้านพลังงาน แสงอาทิตย์อื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป

5. ได้นำความรู้ และหลักการทางฟิสิกส์ไปใช้ในการอธิบายผลการวิจัย ก่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับเรื่องการแผ่รังสีดวงอาทิตย์



บทที่ 2

ทฤษฎี และเอกสารที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาทฤษฎี และเอกสารที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

2.1 บรรยากาศ (Atmosphere)

2.1.1 องค์ประกอบของบรรยากาศ

2.1.2 โครงสร้างของบรรยากาศ

2.2 การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ (Solar radiation)

2.2.1 พลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์

2.2.2 ชนิดของรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกลงสู่พื้นโลก

2.2.3 สมบัติทางเรขาคณิตของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์

2.3 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศที่ใช้คำนวณค่า การแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์

2.3.1 พารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameter)

2.3.1.1 มุมเดคลิเนชัน (Declination angle)

2.3.1.2 มุมชั่วโมง (The hour angle)

2.3.1.3 มุมเซนิตดวงอาทิตย์ (The solar zenith angle)

2.3.1.4 ค่าแฟกเตอร์ปรับแก้ความรีของวงโคจรของโลก (Eccentricity correction –factor of the Earth's orbit)

2.3.1.5 เวลาดวงอาทิตย์ (Solar time)

2.3.1.6 การแผ่รังสีดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (Extraterrestrial radiation)

2.3.2 พารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศ (Atmospheric parameter)

2.3.2.1 มวลอากาศ (Air mass)

2.3.2.2 อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew point temperature)

2.4 แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศที่ใช้คำนวณค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์

2.4.1 แบบจำลองเบิร์ด (Bird model)

2.4.2 แบบจำลองซีเอสอาร์ (CSR model)

2.4.3 แบบจำลองคูมาร์ (Kumar model)

2.4.4 แบบจำลองดาเนชเยอร์พอลทริดจ์พรอคเตอร์ (Daneshyher – Paltridge – Proctor (DPP) model)

2.4.5 แบบจำลองมีเนล (Meinel model)

2.5 วิธีการทางสถิติสำหรับทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองทางฟิสิกส์

บรรยากาศ

2.5.1 รากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง (Root mean square difference)

2.5.2 ความแตกต่างในรูปความเอนเอียงเฉลี่ย (Mean bias difference)

2.5.3 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of determination)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บรรยากาศ (Atmosphere)^(1,2)

บรรยากาศ หมายถึง อากาศที่อยู่รอบ ๆ ตัวเรา หรือที่ห่อหุ้มโลกเราอยู่โดยรอบ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส และไม่สามารถมองเห็นหรือสังเกตเห็นได้ อากาศในบรรยากาศบริเวณใกล้ผิวโลก จะหนาแน่นมากที่สุด และเมื่ออยู่สูงขึ้นอากาศจะบางลงหรือน้อยลง นอกจากนี้บรรยากาศยังมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตบนโลกอีกด้วย การศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของบรรยากาศจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากสิ่งมีชีวิตบนโลกจะสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ต้องอาศัยสมดุลของบรรยากาศเป็นสำคัญ ดังนั้นถ้าอากาศที่ห่อหุ้มโลกเปลี่ยนแปลงมากจนเกิดความแปรปรวนของบรรยากาศก็จะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตอย่างร้ายแรง

2.1.1 องค์ประกอบของบรรยากาศ

บรรยากาศ ประกอบด้วยองค์ประกอบที่สำคัญ 4 ส่วน ดังนี้

2.1.1.1 แก๊สต่าง ๆ (Gas) อากาศจัดอยู่ในสถานะแก๊ส ถือเป็นองค์ประกอบหลักของบรรยากาศ เป็นสารเนื้อเดียวประเภทสารละลาย ประกอบด้วย

1. ไนโตรเจน (Nitrogen, N_2) เป็นแก๊สที่มีอยู่ในชั้นบรรยากาศมากที่สุด โดยมีอยู่ประมาณร้อยละ 78 โดยปริมาตร

2. ออกซิเจน (Oxygen, O_2) เป็นแก๊สที่ได้มาจากการสังเคราะห์แสงของพืชสำหรับหายใจ และสิ่งมีชีวิต โดยมีอยู่ในชั้นบรรยากาศประมาณร้อยละ 21 โดยปริมาตร

3. แก๊สเฉื่อย (Inert gas) เป็นแก๊สที่ไม่มีความว่องไวต่อปฏิกิริยาทางเคมีใด ๆ ได้แก่ อาร์กอน (Ar), ฮีเลียม (He), นีออน (Ne) และคริปทอน (Kr)

4. แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO_2) เป็นแก๊สที่เกิดจาก

¹ นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์, คณิตา ตั้งคณานุรักษ์. (2552). *เคมีบรรยากาศ*. หน้า 88-89.

² ทองกต ทศานนท์. (2547). *หลักอุณหภูมิมหาวิทยา*. หน้า 9-11.

กระบวนการหายใจของสิ่งมีชีวิต การเผาเปื้อนของอินทรีย์สารในพื้นดิน การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงมีอยู่ประมาณร้อยละ 0.03 โดยปริมาตร นอกจากนี้แก๊สชนิดนี้ยังสามารถก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจกได้

2.1.1.2 ไอน้ำ (Water vapor) มีปริมาณร้อยละ 0-4 ในบรรยากาศ ขึ้นอยู่กับช่วงเวลา และสถานที่ โมเลกุลของไอน้ำจะแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของอากาศ และจะเข้าสู่ชั้นบรรยากาศโดยกระบวนการระเหยจากแหล่งน้ำต่าง ๆ เช่น แม่น้ำ คลอง หนอง บึง ทะเล มหาสมุทร รวมทั้งการคายน้ำของพืช การระเหยน้ำจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอุณหภูมิพื้นผิวที่ผิวน้ำ และปริมาณไอน้ำในอากาศ นอกจากนั้นเมื่อไอน้ำกลั่นตัวเป็นละอองน้ำ หรือ “เมฆ” มีความสามารถในการสะท้อนแสงอาทิตย์ และแผ่รังสีอินฟราเรด ทำให้พื้นผิวโลกไม่ร้อน หรือหนาวจนเกินไป

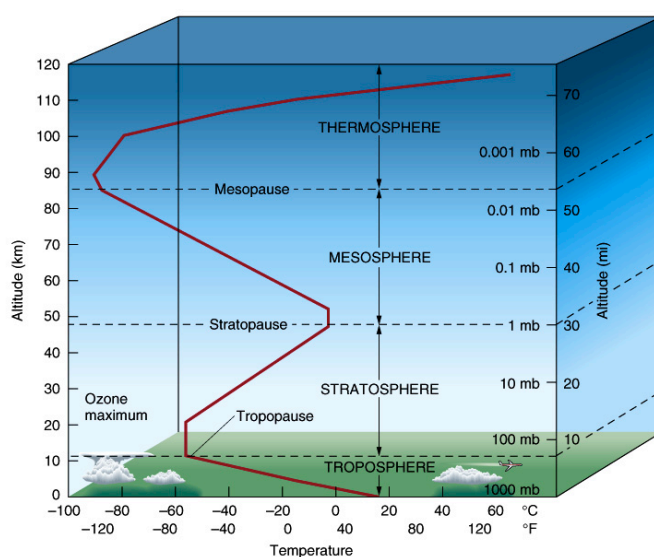
2.1.1.3 ละอองลอย (Aerosol) หรือ แอโรซอล หมายถึง อนุภาคของแข็งหรือของเหลว หรือของผสมระหว่างของแข็งและของเหลวที่แขวนลอยอยู่ในอากาศ แต่ไม่รวมเมฆ และหมอก ซึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาคเช่นเดียวกัน และละอองลอยยังมีผลโดยตรงต่อพลังงานรังสีจากดวงอาทิตย์ (Direct radiative forcing) เพราะละอองลอยสามารถดูดกลืน และกระเจิงแสงอาทิตย์ และรังสีอินฟราเรดในบรรยากาศได้ ซึ่งเป็นตัวอธิบายความขุ่นมัวของบรรยากาศ และเชื่อมโยงกับละอองลอยในบรรยากาศที่บอกถึงมลภาวะทางอากาศ (Pollution)

นอกจากนี้ละอองลอยยังมีอิทธิพลทำให้รังสีดวงอาทิตย์ที่ผ่านบรรยากาศมายังพื้นโลกลดลง เมื่อรังสีดวงอาทิตย์เคลื่อนมายังบรรยากาศโลก รังสีส่วนหนึ่งจะถูกละอองลอยดูดกลืน และกระเจิง ทำให้เกิดปรากฏการณ์ต่าง ๆ ซึ่งรังสีดวงอาทิตย์ที่มาถึงพื้นโลกจะมีปริมาณลดลง ส่วนรังสีดวงอาทิตย์อีกส่วนหนึ่งจะถูกสะท้อนกลับไปสู่อากาศ ส่งผลกระทบต่อสมดุลพลังงานของโลก

2.1.1.4 โอโซน (Ozone, O_3) เป็นแก๊สสีฟ้าอ่อน มีกลิ่นฉุน ไม่เสถียร แตกตัวได้ง่าย เกิดจากแก๊สออกซิเจนดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ต ทำให้แยกออกเป็นอะตอมเดี่ยว ๆ แล้วรวมกันกลายเป็นโอโซน (O_3) ดังนั้นโอโซนจึงมีปริมาณน้อยมากที่บริเวณใกล้ผิวโลก โอโซนในบรรยากาศมีปริมาณน้อยมากเฉลี่ยประมาณ 3 ใน 10 ล้านโมเลกุลอากาศ แม้ว่าจะมีปริมาณเล็กน้อยแต่มีบทบาทสำคัญในบรรยากาศมาก โดยปกติพบมากใน 2 บริเวณ ซึ่งร้อยละ 90 พบในชั้นบรรยากาศสตราโตสเฟียร์ (Stratosphere) ที่ความสูงประมาณ 10 ถึง 50 กิโลเมตร พบโอโซนหนาแน่นที่ประมาณ 11 - 35 กิโลเมตร เรียกว่า **ชั้นโอโซน (Ozone layer)** ส่วนที่เหลือร้อยละ 10 พบที่บริเวณชั้นล่างลงมา คือ ชั้นโทรโพสเฟียร์ (Troposphere) โดยโอโซนจะทำหน้าที่ดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตไว้จำนวนหนึ่งเพื่อไม่ให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตบนโลก

2.1.2 โครงสร้างบรรยากาศ^(1,2)

การแบ่งชั้นบรรยากาศออกเป็นชั้น ๆ ตามแนวดิ่ง อาจใช้สมบัติด้านใดด้านหนึ่งในการแบ่งก็ได้ ซึ่งได้แก่ ส่วนประกอบของอากาศ ความกดอากาศ หรืออุณหภูมิของอากาศ แต่โดยส่วนใหญ่จะใช้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเป็นเกณฑ์ในการแบ่งชั้นบรรยากาศ ดังภาพประกอบ 1 โดยที่แนวสีแดงแสดงอุณหภูมิของบรรยากาศโลกที่ระดับความสูงต่าง ๆ แกนตั้งแสดงระดับความสูงจากพื้นผิวโลกในหน่วยกิโลเมตร (km) และหน่วยไมล์ (mi) และความกดอากาศในหน่วยมิลลิบาร์ (mb) ส่วนแกนนอนแสดงอุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส (C°) และหน่วยองศาฟาเรนไฮต์ (F°)



ภาพประกอบ 1 โครงสร้างของบรรยากาศโลก

ที่มา: <https://daejeonastronomy.wordpress.com/2013/10/20/> สืบค้น

วันที่ 8 กรกฎาคม 2558 โครงสร้างของบรรยากาศในแนวดิ่ง มีการแบ่งชั้นบรรยากาศออกเป็น 4 ชั้น ดังนี้

2.1.2.1 ชั้นโทรโพสเฟียร์ (Troposphere)

เป็นชั้นบรรยากาศชั้นล่างสุดอยู่ติดกับพื้นโลกและเป็นชั้นบรรยากาศที่มนุษย์อาศัยอยู่ มีความสูงจากระดับน้ำทะเลเฉลี่ยประมาณ 10-12 กิโลเมตร ชั้นนี้ประกอบด้วยโมเลกุลหรือน้ำหนักแก๊สของบรรยากาศ รวมทั้งไอน้ำ เมฆ และละอองน้ำในอากาศอยู่ถึงร้อยละ 75 พลังงานส่วน

¹ วิไลลักษณ์ ตั้งเจริญ. (2540). *อุตุนิยมวิทยา*. หน้า 10.

² เสริม จันทร์ฉาย ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. (2557). *รังสีอาทิตย์ (Solar radiation)*. หน้า 61-62.

ใหญ่ที่ชั้นนี้ได้รับการดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ขององค์ประกอบของบรรยากาศของชั้นนี้ที่สำคัญ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และละอองลอย องค์ประกอบเหล่านี้จะมีมากที่บริเวณใกล้พื้นผิวโลก และมีค่าลดลงเมื่อความสูงเพิ่มขึ้น นอกจากนี้บรรยากาศชั้นนี้ยังได้รับพลังงานจากรังสีที่แผ่จากพื้นผิวโลก ดังนั้นบรรยากาศบริเวณใกล้พื้นผิวโลกจึงมีอุณหภูมิสูงสุดแล้วค่อย ๆ ลดลงตามความสูง และชั้นนี้ยังเป็นชั้นที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างโลกกับบรรยากาศมากที่สุด ความเร็วลมเพิ่มขึ้นตามความสูง เพราะไม่มีสิ่งกีดขวาง ความร้อนที่ได้รับเป็นการพาความร้อนจากอากาศที่อยู่เบื้องล่างขึ้นไปชั้นบนสุดเรียกว่า โทรโพพอส (Tropopause) เป็นแนวแบ่งเขตระหว่างชั้นโทรโพสเฟียร์กับชั้นบรรยากาศชั้นถัดไป

2.1.2.2 ชั้นสตราโตสเฟียร์ (Stratosphere)

เป็นชั้นบรรยากาศที่อยู่ถัดจากชั้นโทรโพสเฟียร์ขึ้นไป จนถึงระดับความสูงประมาณ 50 กิโลเมตร เรียกว่า สตราโตพอส (Stratopause) ซึ่งเป็นแนวแบ่งเขตระหว่างชั้นสตราโตสเฟียร์กับบรรยากาศชั้นถัดไป ชั้นนี้มีความหนาแน่นของโอโซนอยู่ที่ระดับความสูงประมาณ 19-34 กิโลเมตร จากระดับน้ำทะเล โอโซนจะดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตไว้บางส่วน โดยกระบวนการเกิดโอโซนนั้นจะมีการปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมาทำให้บรรยากาศชั้นนี้มีอุณหภูมิสูงขึ้น ความร้อนจะถ่ายเทสู่บรรยากาศชั้นล่างและชั้นบน สภาพลักษณะของอากาศในชั้นสตราโตสเฟียร์ มีทัศนวิสัยดี ไม่มีเมฆ ไม่มีพายุเกิดขึ้น การไหลถ่ายเทของอากาศในแนวตั้งมีน้อย เพราะอากาศชั้นบนมีอุณหภูมิสูงกว่า ชั้นล่างทำให้ไม่เกิดการยกตัวของอากาศ รวมทั้งในบรรยากาศชั้นนี้ไม่มีไอน้ำอยู่เลย การเกิดเมฆหรือฝนจึงมีน้อย ชั้นนี้จึงเป็นชั้นที่มีความสำคัญต่อนักอุตุนิยมวิทยา เพราะเป็นชั้นที่มีการพยากรณ์อากาศสำหรับการบิน

2.1.2.3 ชั้นมิโซสเฟียร์ (Mesosphere)

เป็นชั้นที่อยู่สูงเหนือชั้นสตราโตสเฟียร์ขึ้นไประหว่างความสูงประมาณ 50-80 กิโลเมตร ขอบบนสุดของชั้นนี้เรียกว่า มิโซพอส (Mesopause) ชั้นนี้อุณหภูมิจากอากาศจะลดต่ำลงตามความสูงที่เพิ่มขึ้น อุณหภูมิโดยเฉลี่ย -90 องศาเซลเซียส เนื่องจากอยู่ห่างจากพื้นผิวโลกมากทำให้บรรยากาศชั้นนี้ได้รับพลังงานจากพื้นผิวโลกน้อย นอกจากนั้นมวลของบรรยากาศชั้นมิโซสเฟียร์เบาบางมากจึงดูดกลืนรังสีของดวงอาทิตย์ได้น้อยมาก

2.1.2.4 ชั้นเทอร์โมสเฟียร์ (Thermosphere)

เป็นชั้นที่อยู่ถัดจากชั้นมิโซสเฟียร์ขึ้นไป ตั้งแต่ระดับความสูง 80-500 กิโลเมตร ชั้นนี้อุณหภูมิจากอากาศจะเพิ่มขึ้นตามความสูง ความหนาแน่นของอากาศจะเบาบางมาก ส่วนบรรยากาศชั้นที่สูงกว่าชั้นเทอร์โมสเฟียร์ขึ้นไปจะเป็นชั้นบรรยากาศที่มีแก๊สฮีเลียม และแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งจะค่อยผสมกลมกลืนเข้ากับแก๊สระหว่างดาว (Interstellar gas) ทำให้กำหนดขอบเขตได้ยาก

2.2 การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ (Solar radiation)⁽¹⁾

ดวงอาทิตย์เป็นดาวฤกษ์ที่มีแสงสว่างในตัวเอง อยู่ในศูนย์กลางของระบบสุริยะ ประกอบด้วยมวลที่มีความหนาแน่นมาก และแก๊สร้อนมาก อีกทั้งยังเป็นแหล่งพลังงานทางธรรมชาติที่ใหญ่ที่สุดที่โลกได้รับ ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ และระบบวงจรอุทกวิทยาของน้ำในส่วนต่าง ๆ ของโลก โดยที่อุณหภูมิในใจกลางดวงอาทิตย์สูงประมาณ 15 ล้านเคลวิน ในขณะที่อุณหภูมิที่ผิวของดวงอาทิตย์มีประมาณ 6000 เคลวิน ซึ่งจะแผ่รังสีออกไปทุกทิศทางในรูปสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของพลังงานของรังสีการแผ่รังสีพลังงาน (Electromagnetic spectrum of radiant energy) ที่เดินทางเป็นเส้นตรงจากดวงอาทิตย์มาถึงโลกเป็นระยะทาง 150 ล้านกิโลเมตร ด้วยความเร็วประมาณ 300,000 km/s ใช้เวลาเดินทางประมาณ 8 วินาที แหล่งพลังงานมหาศาลที่เกิดขึ้นบนดวงอาทิตย์นี้เป็นผลมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน (Nuclear fusion) ซึ่งเกิดขึ้นที่ใจกลางของดวงอาทิตย์ ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันนี้เกิดขึ้นมาแล้ว 4,600 ล้านปี และยังคงเกิดต่อเนื่อง ทำให้ปริมาณไฮโดรเจนที่ใจกลางลดน้อยลง ขณะที่ปริมาณฮีเลียมจะเพิ่มขึ้น พลังงานมหาศาลจากไส้แกนกลาง (Solar core) จะกระจายออกโดยรอบผ่านชั้นแผ่รังสี (Radiation zone) ผ่านมายังชั้นพาพลังงานความร้อน (Convection zone) พลังงานส่งผ่านต่อจากภายในดวงอาทิตย์สู่บรรยากาศของดวงอาทิตย์ต่อไป โดยผ่านชั้นของโฟโตสเฟียร์ (Photosphere) และชั้นโครโมสเฟียร์ (Chromosphere) ตามลำดับ ซึ่งพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่แผ่รังสีมายังโลกนั้นจะไม่สูญหายระหว่างทาง แต่ขนาดความเข้มข้นของลำแสงจะน้อยลงตามระยะทางที่ห่างจากดวงอาทิตย์ ดังนั้นจะทำให้โลกได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์ประมาณ 1 ต่อ 2,000,000 เท่าของพลังงานความร้อนทั้งหมด



ภาพประกอบ 2 การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์

ที่มา: http://www.sunandstar.net/all_astronomy_terms/06_image_glossary_of_astronomy
สืบค้นวันที่ 10 กรกฎาคม 2558

¹ วิไลลักษณ์ ตั้งเจริญ. (2540). *อุตุนิยมวิทยา*. หน้า 24.

การแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์นอกชั้นบรรยากาศโลกจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $1,367 \text{ W/m}^2$ หรือ $4,921 \text{ kJ/m}^2\text{-hr}$ ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นที่ยอมรับขององค์การอุตุนิยมวิทยาโลก (World Meteorology Organization, WMO) โดยจะมีค่าการแผ่รังสีเฉลี่ยอยู่ระหว่าง $1,350\text{-}1,440 \text{ W/m}^2$ ค่าการแผ่รังสีดังกล่าวเราเรียกว่า **ค่าคงที่สุริยะ** (Solar constant) ซึ่งก็คือ ค่าอัตราการตกกระทบของพลังงานแสงอาทิตย์ต่อหน่วยพื้นที่ในทิศทางตั้งฉากกับดวงอาทิตย์นอกชั้นบรรยากาศโลกและจะมีค่าแตกต่างกันออกไปในแต่ละเดือน โดยมีค่าแปรผันไปตามช่วงความยาวคลื่นของรังสีซึ่งอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบไปด้วย รังสีช่วงคลื่นยาว ได้แก่ รังสีอินฟราเรด (Infrared) จนถึงรังสีช่วงคลื่นสั้น ได้แก่ รังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet)

2.2.1 พลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ ประกอบด้วย

2.2.1.1 การแผ่รังสีคลื่นสั้น (Shortwave radiation) ได้แก่ รังสีเอกซ์ (X-rays) รังสีแกมมา (Gamma rays) และรังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet rays) มีอยู่ประมาณร้อยละ 9 ของพลังงานทั้งหมด ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 290-400 นาโนเมตร

2.2.1.2 การแผ่รังสีที่มองเห็น (Visible light radiation) เป็นช่วงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า โดยประกอบด้วย 7 สี ได้แก่ สีม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง ส้ม และสีแดง มีอยู่ประมาณร้อยละ 41 ของพลังงานทั้งหมด ซึ่งมีช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร

2.2.1.3 การแผ่รังสีคลื่นยาว (Longwave radiation) ได้แก่ รังสีอินฟราเรด (Infrared rays) ไมโครเวฟ (Microwave radar) คลื่นทีวี และคลื่นวิทยุ มีอยู่ประมาณร้อยละ 50 ของพลังงานทั้งหมด ซึ่งมีช่วงความยาวคลื่น 700-3,500 นาโนเมตร

2.2.2 ชนิดของรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกลงสู่พื้นโลก

การแผ่รังสีลงมาถึงผิวโลกมีหลายลักษณะ เนื่องจากผ่านบรรยากาศโลกสามารถแบ่งได้ดังนี้

2.2.2.1 การแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ (Direct solar radiation)

หมายถึง รังสีที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรง และตกลงบนผิวรับแสง มีทิศทางแน่นอนที่เวลาหนึ่งเวลาใด ทิศทางของรังสีตรงอยู่ในแนวลำแสงอาทิตย์

2.2.2.2 การแผ่รังสีแผ่ของดวงอาทิตย์ (Diffuse solar radiation)

หมายถึง รังสีอาทิตย์ส่วนที่ถูกสะท้อน (Reflection) และกระเจิง (Scattering) จากบรรยากาศของโลก และวัตถุต่าง ๆ ที่อยู่ในทางเดินของแสงก่อนตกกระทบพื้นผิว รับแสง รังสีกระจายนี้มาจากทุกทิศทุกทางของท้องฟ้า

2.2.2.3 การแผ่รังสีสุทธิของดวงอาทิตย์ (Total or Global solar radiation)

หมายถึง ผลรวมของการแผ่รังสีตรง และการแผ่รังสีแพร่ของดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวรับแสง ในกรณีที่ผิวรับแสงเป็นพื้นเอียงรังสีสุทธิจะประกอบด้วย รังสีตรงจากท้องฟ้า รังสีแพร่จากท้องฟ้าและผิวโลก เรียกรังสีสุทธิ (Total radiation) สำหรับกรณีที่ผิวรับแสงเป็นพื้นราบ รังสีสุทธิจะมาจากครึ่งทรงกลมท้องฟ้าไม่มีส่วนมาจากผิวโลก เรียกรังสีสุทธิในกรณีนี้ว่า Global radiation

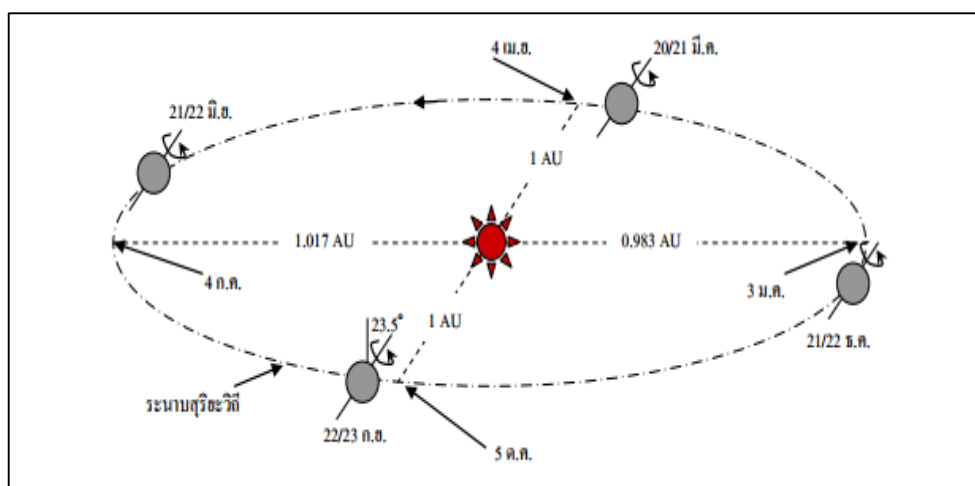
2.2.3 สมบัติทางเรขาคณิตของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์⁽¹⁾

2.2.3.1 วงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์

วงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ มีลักษณะเป็นวงรี โดยมีความรี (Eccentricity) เท่ากับ 0.016722 มีระยะกึ่งแกนหลัก (Semimajor axis) เท่ากับ 1.496×10^8 กิโลเมตร หรือ 1 หน่วยดาราศาสตร์ (Astronomical unit, AU) ระนาบของวงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ เรียกว่า ระนาบสุริยวิถี (Ecliptic plane) แกนหมุนของโลกเอียงทำมุมกับเส้นตั้งฉากของระนาบสุริยวิถี 23.5° ดังนั้นระนาบศูนย์สูตร (Equatorial plane) ของโลกจึงทำมุมกับระนาบสุริยวิถี 23.5° ด้วยการที่แกนหมุนของโลกเอียงทำให้โลกหันซีกเหนือ และซีกใต้เข้าหาดวงอาทิตย์มากน้อยต่างกัน ในขณะที่โคจรรอบดวงอาทิตย์ โดยโลกจะหันซีกเหนือเข้าหาดวงอาทิตย์มากที่สุดในวันที่ 21 หรือ 22 มิถุนายน และโลกจะหันซีกใต้เข้าหาดวงอาทิตย์มากที่สุดในวันที่ 21 หรือ 22 ธันวาคม

เนื่องจากวงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์เป็นวงรี ระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์จึงเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โดยมีระยะเฉลี่ยเท่ากับ 1 AU โลกจะอยู่ที่ตำแหน่งใกล้ดวงอาทิตย์ที่สุด (Perihelion) ที่ระยะห่าง 0.983 AU หรือวันที่ 3 มกราคม และอยู่ที่ตำแหน่งไกลสุด (Aphelion) ที่ระยะ 1.017 AU ในวันที่ 4 กรกฎาคม

¹ กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ร่วมกับห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. (2551). *เครือข่ายการตรวจวัดความเข้มรังสีตรงและศักยภาพรังสีตรงในประเทศไทย*. หน้า 4-6.



ภาพประกอบ 3 วงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์

ที่มา: http://www.scimath.org/images/uploads/upload2/24_3_2558_13_58_18.jpg

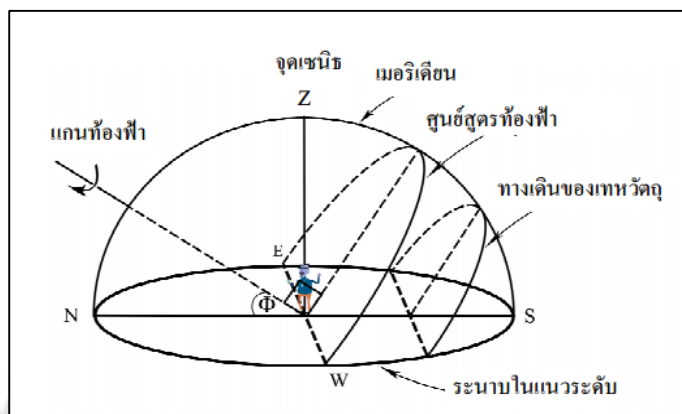
สืบค้นวันที่ 15 กรกฎาคม 2558

2.2.3.2 ทรงกลมท้องฟ้า และทางเดินปรากฏของเทหวัตถุ

ขณะที่โลกโคจรรอบดวงอาทิตย์จากทิศตะวันออกไปทิศตะวันตก โลกจะหมุนรอบตัวเองไปในทิศเดียวกันด้วย สมมติว่าเราอยู่ที่ผิวโลก ณ ตำแหน่งละติจูด (ϕ) และลองจิจูด ใด ๆ ตัวเราก็จะเคลื่อนที่ไปพร้อมผิวโลก และถ้าเรามองไปรอบ ๆ กรณีที่ไม่สิ่งกีดขวางเราจะเห็นขอบฟ้ากลม ทั้งนี้เพราะสายตาเรามองได้ไกลสุดเท่ากันทุกทิศทุกทาง และถ้าแหงนมองขึ้นข้างบน เราจะเห็นท้องฟ้าโค้งเป็นครึ่งทรงกลมครอบเราอยู่ เพราะเรารับรู้แสงที่มาจากท้องฟ้าซึ่งเกิดจากการกระเจิงของบรรยากาศมาเข้าตาเราเท่ากันทุกทิศทาง

ดวงดาวต่าง ๆ ซึ่งอยู่ไกลมากถือว่าอยู่นิ่งกับที่เทียบกับการเคลื่อนที่ของโลก เราจะเคลื่อนที่ไปพร้อมกับ การหมุนรอบตัวเองของโลกจากทิศตะวันตกไปทิศตะวันออกผ่านดวงดาวต่าง ๆ แต่เรารู้สึกว่าพื้นผิวโลกอยู่นิ่งกับที่ และดวงดาวต่าง ๆ เป็นฝ่ายเคลื่อนที่จากทิศตะวันออกไปทิศตะวันตกรอบแกนหมุนซึ่งขนานกับแกนหมุนของโลก เรียกแกนหมุนนี้ว่า แกนหมุนท้องฟ้า ระนาบของพื้นโลกที่เราอยู่เรียกว่า ระนาบในแนวระดับ (Plane of horizon) ดังแสดงในภาพประกอบ 4 จากหลักเรขาคณิตสามารถพิสูจน์ได้ว่า แกนหมุนท้องฟ้าจะทำมุมกับระนาบขอบฟ้าเท่ากับละติจูดที่เราอยู่ โดยทั่วไปสายตาของมนุษย์ไม่สามารถแยกแยะระยะห่างจากผู้สังเกตของวัตถุหรือแหล่งกำเนิดแสงตั้งแต่ 2 แหล่งขึ้นไปซึ่งอยู่ไกลมาก ๆ สายตาของเราจะสังเกตเห็นวัตถุนั้นอยู่ห่างจากเรา

เท่ากันหมด ด้วยเหตุนี้เราจึงเห็นท้องฟ้ามีลักษณะเป็นครึ่งทรงกลมครอบเราอยู่ โดยมีเทหวัตถุ (Celestial object) เช่น ดาวฤกษ์ต่าง ๆ ยึดติดกับทรงกลมท้องฟ้า และเคลื่อนที่รอบแกนหมุนซึ่งขนานกับแกนหมุนของโลกด้วยอัตราเดียวกับอัตราการหมุนของโลกรอบตัวเองคือ 1 รอบต่อวัน



ภาพประกอบ 4 ลักษณะของทรงกลมฟ้า

ที่มา: เสริม จันทรฉาย ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. (2557). *รังสีอาทิตย์ (Solar radiation)*. หน้า 25. สืบค้นวันที่ 18 กรกฎาคม 2558

2.3 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศที่ใช้คำนวณค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์^(1,2)

2.3.1 พารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameter)

2.3.1.1 มุมเดคลิเนชัน (Declination angle, δ)

เป็นส่วนโค้งของวงกลมขนาดใหญ่ (Great circle) ที่ผ่านขั้วทั้งสองของทรงกลมฟ้าระหว่างเส้นศูนย์สูตรท้องฟ้ากับทางเดินของดวงอาทิตย์ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง $-23.45^\circ < \delta < +23.45^\circ$ ถือว่าเป็นค่าคงที่ในแต่ละวัน และค่ามุมเดคลิเนชันนี้ก็มีค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตามวันในรอบปี ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + n_j) \right] \quad (1)$$

¹ กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ร่วมกับห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. (2551). *เครือข่ายการตรวจวัดความเข้มรังสีตรงและศักยภาพรังสีตรงในประเทศไทย*. หน้า 9-13.

² Omar Behar a , Abdallah Khellaf , Kamal Mohammedi. (2015). *Comparison of solar radiation models and their validation under Algerian climate – The case of direct irradiance*. 98: 238–240.

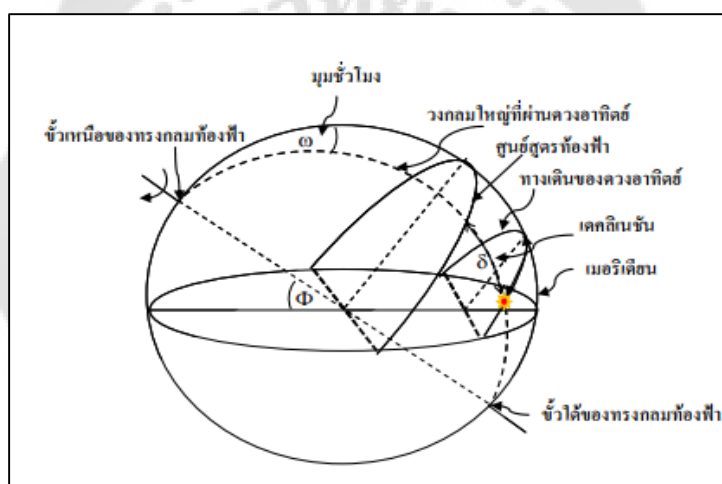
เมื่อ n_j คือ วันในรอบปี (โดยที่ $n_1 = 1$ สำหรับวันที่ 1 มกราคม)

2.3.1.2 มุมชั่วโมง (The hour angle, ω)

เป็นมุมที่ชี้ของทรงกลมฟ้า (Celestial pole) หรือส่วนโค้งของทรงกลมฟ้า ระหว่างเส้นเมริเดียน (Meridian) ของผู้สังเกตกับวงกลมใหญ่ที่ลากผ่านดวงอาทิตย์ และชี้ทั้งสองของทรงกลมฟ้า มีค่าเป็นบวกเมื่อดวงอาทิตย์อยู่ทางทิศตะวันออกของเมริเดียน และเป็นลบเมื่ออยู่ทางทิศตะวันตกของเมริเดียน โดยมุมชั่วโมงสามารถคำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

$$\omega = 15^\circ (12 - ST) \quad (2)$$

เมื่อ ST คือ เวลาดวงอาทิตย์ (Solar time) (ชั่วโมง)



ภาพประกอบ 5 มุมเดคลิเนชัน (δ) และมุมชั่วโมง (ω)

ที่มา: เสริม จันทรฉาย ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. (2557). *รังสีอาทิตย์ (Solar radiation)*. หน้า 31. สืบค้นวันที่ 18 กรกฎาคม 2558

2.3.1.3 มุมเซนิธดวงอาทิตย์ (The solar zenith angle, θ_z)

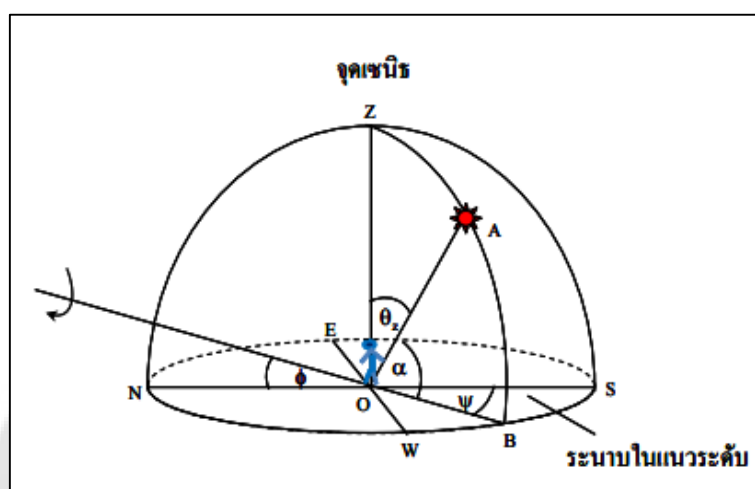
มุมเซนิธดวงอาทิตย์ เป็นมุมที่อยู่ระหว่างผู้สังเกตกับดวงอาทิตย์ โดยมุมเซนิธดวงอาทิตย์สามารถคำนวณได้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$\cos(\theta_z) = \cos(\delta)\cos(\phi)\cos(\omega) + \sin(\delta)\sin(\phi) \quad (3)$$

เมื่อ δ คือ มุมเดคลิเนชัน (องศา)

ϕ คือ ละติจูด (องศา)

ω คือ มุมชั่วโมง (องศา)



ภาพประกอบ 6 มุมเซนิตดวงอาทิตย์ (θ_z)

ที่มา: เสริม จันทรฉาย ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. (2557). *รังสีอาทิตย์ (Solar radiation)*. หน้า 30. สืบค้นวันที่ 18 กรกฎาคม 2558

2.3.1.4 ค่าแฟกเตอร์ปรับแก้ความรีของวงโคจรของโลก (Eccentricity correction-factor of the Earth's orbit , E_0)

เนื่องจากวงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์เป็นวงรีจึงทำให้ระยะห่างระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โดยมีระยะเฉลี่ยเท่ากับ 1.496×10^8 กิโลเมตร หรือ 1 หน่วยดาราศาสตร์ (Astronomical unit, AU) โลกจะอยู่ที่ตำแหน่งใกล้ดวงอาทิตย์ที่สุด (Perihelion) ที่ระยะห่าง 0.983 AU และอยู่ที่ตำแหน่งไกลที่สุด (Aphelion) ที่ระยะห่าง 1.017 AU ระยะทางระหว่างโลกกับ ดวงอาทิตย์มีผลต่อปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลก ระยะทางดังกล่าวจะแปรไปตามวันต่าง ๆ ในรอบปี ตามสมการดังต่อไปนี้

$$E_0 = 1.000110 + 0.034221 \cos(\Gamma) + 0.001280 \sin(\Gamma) + 0.000719 \cos(2\Gamma) + 0.000077 \sin(2\Gamma) \quad (4)$$

โดยที่

$$\Gamma = 2\pi \left(\frac{n_j - 1}{365} \right) \quad (5)$$

เมื่อ Γ คือ มุมวัน (Day angle) (เรเดียน)

2.3.1.5 เวลาดวงอาทิตย์ (Solar time, ST)

เวลาดวงอาทิตย์จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับตำแหน่งของดวงอาทิตย์ เวลาดวงอาทิตย์สามารถคำนวณได้จากเวลามาตรฐานท้องถิ่น สมการเวลา และผลต่างระหว่างเส้นลองจิจูดมาตรฐาน และเส้นลองจิจูดของผู้สังเกต ซึ่งคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$ST = SDT + 4(L_{st} - L_{loc}) + E \quad (6)$$

เมื่อ SDT คือ เวลามาตรฐานท้องถิ่น (ชั่วโมง)

L_{st} คือ เส้นลองจิจูดมาตรฐาน (องศา)

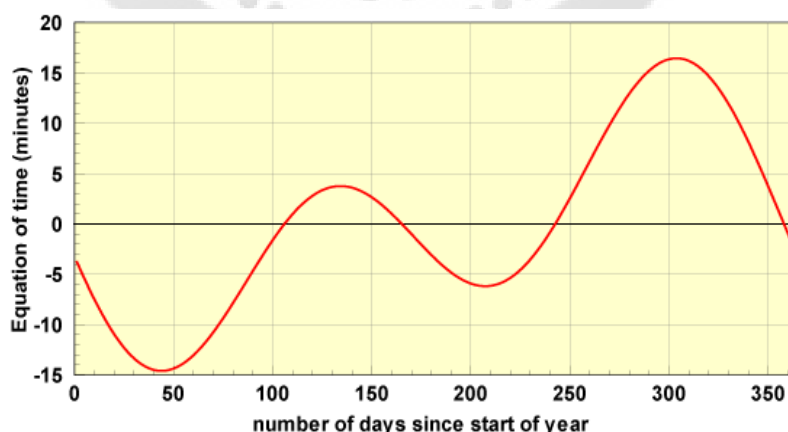
L_{loc} คือ เส้นลองจิจูดของผู้สังเกต (องศา)

E คือ สมการเวลา (Equation time)

โดยสมการเวลาจะบอกความแตกต่างระหว่างเวลาของดวงอาทิตย์กับเวลาดวงอาทิตย์เฉลี่ย ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868 \cos(\Gamma) - 0.032077 \sin(\Gamma) - 0.014615 \cos(2\Gamma) - 0.04089 \sin(2\Gamma)) \quad (7)$$

เมื่อ Γ คือ มุมวัน (Day angle) (เรเดียน)



ภาพประกอบ 7 กราฟสมการเวลา (Equation time) เทียบกับวันในรอบปี

ที่มา: <http://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/solar-time>

สืบค้นวันที่ 18 กรกฎาคม 2558

2.3.1.6 การแผ่รังสีดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (Extraterrestrial radiation, I_{so})

รังสีดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก เป็นปริมาณของพลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ไม่มีชั้นบรรยากาศ การเปลี่ยนแปลงของรังสีดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกเกิดจาก 2 แหล่งกำเนิด คือ การเปลี่ยนแปลงของการปล่อยรังสีดวงอาทิตย์ และการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ การเปลี่ยนแปลงนี้จะพิจารณาโดยคำนึงถึงปัจจัยทางดาราศาสตร์ ตามสมการต่อไปนี้

$$I_{so} = I_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \left(\frac{360}{365} n_j \right) \right) \quad (8)$$

เมื่อ I_{sc} คือ ค่าคงที่สุริยะ มีค่าเท่ากับ 1367 W/m^2

2.3.2 พารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศ (Atmospheric parameter)

2.3.2.1 มวลอากาศ (Air mass, m_r)

การคำนวณมวลอากาศนั้นต้องพิจารณาความโค้งของชั้นบรรยากาศ เพราะเมื่อดวงอาทิตย์ขึ้น และลับขอบฟ้า มุมของดวงอาทิตย์จากตำแหน่งทั้งสองเท่ากับ 90 องศา จะทำให้มวลอากาศมีค่าไม่สิ้นสุด (Infinite) ในขณะที่ความยาวของทางเดินจะไม่เป็นเช่นนั้น ดังนั้นสมการจึงพิจารณาความโค้งของโลกด้วยจะได้ว่า

$$m_r = \left[\cos(\theta_z) + 0.15(93.885 - \theta_z)^{-1.253} \right]^{-1} \quad (9)$$

เมื่อ θ_z คือ มุมเซนนิธดวงอาทิตย์ (องศา)

และมวลอากาศที่ความดันบรรยากาศที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งใด ๆ (m_{air}) สามารถคำนวณได้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$m_{air} = m_r \left(\frac{p}{p_0} \right) \quad (10)$$

เมื่อ p คือ ความดันบรรยากาศที่ตำแหน่งต่าง ๆ (mbar)

p_0 คือ ความดันบรรยากาศมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 1013.25 mbar

2.3.2.2 อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew point temperature, T_{dew})

อุณหภูมิจุดน้ำค้าง หมายถึง อุณหภูมิที่เมื่ออากาศชื้นถูกทำให้เย็นลงขณะที่ปริมาณไอน้ำยังคงที่ การลดอุณหภูมิถึงจุดหนึ่งจะทำให้ไอน้ำเกิดการอิ่มตัว และกลั่นตัวควบแน่น (Condensate) เป็นหยดน้ำ ที่ความดันบรรยากาศ (Atmospheric pressure) คงที่ โดยอุณหภูมิจุดน้ำค้างสามารถคำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

$$T_{dew} = T_{ambc} - \left(\frac{100 - RH}{5} \right) \quad (11)$$

เมื่อ T_{ambc} คือ อุณหภูมิโดยรอบ (อากาศเซลล์เซียส)

RH คือ ความชื้นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)

2.4 แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศที่ใช้คำนวณค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์

แบบจำลองการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ (Direct solar radiation model) ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อนำมาใช้ทำนายค่ารังสีตรงของดวงอาทิตย์ ซึ่งมีทั้งแบบจำลองที่มีรูปแบบที่ง่าย และรูปแบบที่ซับซ้อน โดยขึ้นอยู่กับจำนวนพารามิเตอร์ที่ใช้ในแต่ละแบบจำลอง โดยแบบจำลองที่มีรูปแบบที่ง่ายจะขึ้นอยู่กับมุมเซนิธดวงอาทิตย์ (Solar zenith angle) และมวลอากาศ (Air mass) เป็นต้น แต่แบบจำลองที่มีรูปแบบที่ซับซ้อน นอกจากต้องคำนึงถึงพารามิเตอร์ข้างต้นแล้วยังขึ้นอยู่กับองค์ประกอบต่าง ๆ ของบรรยากาศด้วย เช่น ความหนาของชั้นโอโซน และความหนาของไอน้ำ เป็นต้น สำหรับแบบจำลองการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ใช้ในปัจจุบันมีเป็นจำนวนมาก สามารถสรุปได้ดังนี้

ตาราง 1 แบบจำลองการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์⁽¹⁾

ที่	ชื่อแบบจำลอง	สมการ	จำนวนพารามิเตอร์
1	Bird model	$DI_{Bird} = 0.9662E_0I_{sc}\tau_{total} \cos(\theta_z)$	8

¹ Omar Behar a , Abdallah Khellaf , Kamal Mohammedi. (2015). *Comparison of solar radiation models and their validation under Algerian climate – The case of direct irradiance*. 98: 240–244.

ตาราง 1 (ต่อ) Model C		$DI_q = 0.9751E_0 I_{sc} \tau_{total} \cos(\theta_z)$	9
ที่	ชื่อแบบจำลอง	สมการ	จำนวนพารามิเตอร์
3	CSR model	$DI_{CSR} = C_{CSR} E_0 I_{sc} \tau_{total} \cos(\theta_z)$	8
4	Heliostat-1 model	$DI_{H1} = I_0 \cos(\theta_z) \exp(-m_{air} \sigma T_L)$	4
5	Atwater and Ball model	$DI_{ATWB} = I_{sc} \cos(\theta_z) (\tau_{md} - a_w) \tau_a$	6
6	Davies and Hay model	$DI_{DH} = I_{sc} \cos(\theta_z) (T_o T_R - a_w) \tau_a$	10
7	HLJ model	$DI_{HLJ} = \tau_{DNI} \cdot I_{so} \cdot \cos(\theta_z)$	2
8	Kumar model	$DI_{nKu} = 0.56 I_{so} [\exp(-0.65 m_{Ku}) + \exp(-0.095 m_{Ku})]$	3
9	Fu and Rich model	$DI_{FR} = I_{so} \tau_{bulk}^{m_f} \cos(\theta_z)$	4
10	Daneshyar–Paltridge–Proctor (DPP) model	$DI_{DPP} = 950 \left\{ 1 - \exp \left[-0.075 \left(90^\circ - \theta_z \right) \right] \right\} \cos(\theta_z)$	1
11	Meinel model	$DI_{Mei} = I_{so} 0.7 m_{air}^{0.678} \cos(\theta_z)$	2
12	Laue model	$DI_{Laue} = I_{so} \left[(1 - 0.14 A_m) 0.7 m_{air}^{0.678} + 0.14 A_m \right]$	3
13	ASHRAE model	$DI_{ash} = A_{ash} \exp \left(- \frac{B_{ash}}{\cos(\theta_z)} \frac{P}{P_0} \right) \cdot \cos(\theta_z)$	2
14	Hoyt model	$DI_{Hoyt} = I_{sc} \cos(\theta_z) \left(1 - \sum_{i=1}^5 a_i \right) \tau_{as} \tau_r$	7
15	ESRA model	$DI_{ESRA} = I_{so} \exp(-m_{air} \sigma T_L)$	7

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศที่ใช้สำหรับคำนวณค่ารังสีตรงของดวงอาทิตย์ จำนวน 5 แบบจำลอง ดังต่อไปนี้

2.4.1 แบบจำลองเบิร์ด (Bird model)

แบบจำลองนี้เริ่มมีการพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1983 และได้รับการปรับปรุงอีกครั้งในปี ค.ศ. 1986 โดยแบบจำลองนี้จะคำนึงถึงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านในชั้นบรรยากาศของโมเลกุลของอากาศ โอโซน แก๊สต่าง ๆ ไอน้ำ และละอองลอย และแบบจำลองดังกล่าวนี้ยังถูกนำมาใช้ในการประเมินทรัพยากรพลังงานแสงอาทิตย์ในหลาย ๆ ประเทศทั่วโลกอีกด้วย โดยแบบจำลองนี้สามารถคำนวณตามสมการต่อไปนี้

$$DI_{Bird} = 0.9662 E_0 I_{sc} \tau_{total} \cos(\theta_z) \quad (12)$$

เมื่อ	E_0	คือ	ค่าแฟกเตอร์ปรับแก้ความริของวงโคจรของโลก
	I_{sc}	คือ	ค่าคงที่สุริยะมีค่าเท่ากับ 1367 W/m^2
	τ_{total}	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์ขององค์ประกอบต่าง ๆ ของบรรยากาศ
	θ_z	คือ	มุมเซนนิทดวงอาทิตย์ (องศา)

โดยที่ τ_{total} คำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

$$\tau_{total} = \tau_r \tau_o \tau_g \tau_w \tau_a \quad (13)$$

เมื่อ	τ_r	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์ของบรรยากาศอันเนื่องมาจากการกระเจิงของโมเลกุลอากาศ
	τ_o	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์ของบรรยากาศอันเนื่องมาจากการดูดกลืนของโอโซน
	τ_g	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์ของบรรยากาศอันเนื่องมาจากการดูดกลืนของแก๊สต่าง ๆ
	τ_w	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์ของบรรยากาศอันเนื่องมาจากการดูดกลืนของไอน้ำ
	τ_a	คือ	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์ของบรรยากาศอันเนื่องมาจากการดูดกลืนของละอองลอย

2.4.1.1 ค่า τ_r คำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

$$\tau_r = \exp\left[-0.0903m_{air}^{0.84}\left(1 + m_{air} - m_{air}^{1.01}\right)\right] \quad (14)$$

เมื่อ m_{air} คือ มวลอากาศที่ความดัน ณ ตำแหน่งใด ๆ

2.4.1.2 ค่า τ_o คำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

$$\tau_o = 1 - \left[0.1611U_3\left((1 + 139.48U_3)^{-0.3035} - 0.002715U_3(1 + 0.044U_3 + 0.0003U_3^2)^{-1}\right)\right] \quad (15)$$

เมื่อ U_3 คือ The ozone's relative optical – path length (cm) โดยที่ U_3 สามารถคำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

$$U_3 = L_{oz}m_r \quad (16)$$

เมื่อ L_{oz} คือ ความหนาของชั้นโอโซน (ซม.)

m_r คือ มวลอากาศ

2.4.1.3 ค่า τ_g คำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

$$\tau_g = \exp\left(-0.0127m_{air}^{0.26}\right) \quad (17)$$

2.4.1.4 ค่า τ_w คำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

$$\tau_w = 1 - 2.4959U_1\left[(1 + 79.034U_1)^{0.6828} + 6.385U_1\right]^{-1} \quad (18)$$

เมื่อ U_1 คือ The pressure-corrected relative optical-path length of precipitable water (cm) โดยที่ U_1 สามารถคำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

$$U_1 = wm_r \quad (19)$$

เมื่อ w คือ ความหนาของไอน้ำ (ซม.)

m_r คือ มวลอากาศ

และค่า w สามารถคำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

$$w = w'\left(\frac{P}{P_0}\right)^{3/4}\left(\frac{T_{0K}}{T_{ambk}}\right)^{1/2} \quad (20)$$

และ $w' = 0.1 \exp(2.2572 + 0.05454 T_{dew})$ (21)

เมื่อ	T_{ambk}	คือ อุณหภูมิโดยรอบ (เคลวิน)
	T_{0K}	คือ 273 เคลวิน
	P	คือ ความดันบรรยากาศที่ตำแหน่งต่างๆ (กรมอุตุนิยมฯ กรุงเทพฯเท่ากับ 1006.3 mbar)
	P_0	คือ ความดันบรรยากาศมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 1013.25 mbar

2.4.1.5 ค่า τ_a คำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

$$\tau_a = \exp \left[-L_{ao}^{0.873} (1 + L_{ao} - L_{ao}^{0.7808}) m_{air}^{0.9108} \right] \quad (22)$$

เมื่อ	L_{ao}	คือ The broadband aerosol optical depth โดยที่ L_{ao} สามารถคำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้
-------	----------	--

$$L_{ao} = 0.2758 L_{ao;\lambda=0.38\mu m} + 0.35 L_{ao;\lambda=0.5\mu m} \quad (23)$$

และ $L_{ao;\lambda=0.38\mu m} = \beta_2 0.38^{\beta_1}$ (24)

$$L_{ao;\lambda=0.5\mu m} = \beta_2 0.5^{\beta_1} \quad (25)$$

เมื่อ	β_2	คือ Angstrom exponent
	β_1	คือ Angstrom turbidity coefficient

2.4.2 แบบจำลองซีเอสอาร์ (CSR model)

แบบจำลองนี้ถูกปรับปรุงจาก METSTAT model ซึ่งได้รับการพัฒนาโดยห้องปฏิบัติการพลังงานทดแทนแห่งชาติ (National Renewable Energy Laboratory , NREL) เพื่อพัฒนาข้อมูลรังสีดวงอาทิตย์ภาคพื้นดินของ US NSRDB ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวนี้ยังถูกนำมาใช้ในหลายๆประเทศ โดยเฉพาะสหรัฐอเมริกา เพื่อใช้ทำแผนที่พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งแบบจำลองนี้สามารถคำนวณตามสมการต่อไปนี้

$$DI_{CSR} = C_{CSR} E_0 I_{sc} \tau_{total} \cos(\theta_z) \quad (26)$$

เมื่อ	C_{CSR}	คือ สัมประสิทธิ์ค่าคงที่ของแบบจำลองซีเอสอาร์
	E_0	คือ Eccentricity correction – factor of the Earth's orbit

I_{sc} คือ ค่าคงที่สุริยะ มีค่าเท่ากับ 1367 W/m^2

τ_{total} คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์ขององค์ประกอบต่าง ๆ ของบรรยากาศ

θ_z คือ มุมเซนนิธดวงอาทิตย์ (องศา)

โดยที่ τ_{total} คำนวณได้ตามสมการ (13)

$$\tau_{total} = \tau_r \tau_o \tau_g \tau_w \tau_a$$

2.4.2.1 ค่า C_{CSR} คำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

$$C_{CSR} = \left[50 + \left| \cos \left(\frac{n_j}{365} \right) \right| \right] / 49.25 \quad (27)$$

เมื่อ n_j คือ วันในรอบปี (โดยที่ $n_1 = 1$ สำหรับวันที่ 1 มกราคม)

2.4.2.2 ค่า τ_a คำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

$$\tau_a = \exp[-m_{air} L_{ao}] \quad (28)$$

เมื่อ L_{ao} คือ The broadband aerosol optical depth

2.4.3 แบบจำลองคูมาร์ (Kumar model)

แบบจำลองนี้ได้รับการพัฒนาขึ้นสำหรับการทำงานเกี่ยวกับระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ในด้านการเกษตร และนิเวศวิทยา โดยแบบจำลองนี้สามารถคำนวณตามสมการต่อไปนี้

$$DI_{Ku} = DI_{nKu} \cos(\theta_z) \quad (29)$$

โดย $DI_{nKu} = 0.56 I_{so} [\exp(-0.65 m_{Ku}) + \exp(-0.095 m_{Ku})] \quad (30)$

เมื่อ I_{so} คือ รังสีนอกบรรยากาศโลก (W/m^2)

m_{Ku} คือ มวลอากาศ (สำหรับแบบจำลองคูมาร์)

θ_z คือ มุมเซนนิธดวงอาทิตย์ (องศา)

2.4.3.1 ค่า m_{Ku} คำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

$$m_{Ku} = \left\{ \left[1229 + (614 \cos(\theta_z))^2 \right]^{0.5} - 614 \cos(\theta_z) \right\} \frac{p}{p_0} \quad (31)$$

เมื่อ θ_z คือ มุมเซนนิธดวงอาทิตย์ (องศา)

p คือ ความดันบรรยากาศที่ตำแหน่งต่างๆ (กรมอุตุนิยมฯ กรุงเทพฯ เท่ากับ 1006.3 mbar)

P_0 คือ ความดันบรรยากาศมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 1013.25 mbar

2.4.4 แบบจำลองดาเนชเยอร์พอลทริดพรอคเตอร์ (Daneshyer – Paltridge – Proctor (DPP) model)

แบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองที่มีรูปแบบที่ง่ายที่สุด เพราะขึ้นอยู่กับมุมเซนิธดวงอาทิตย์ (Solar zenith angle) เท่านั้น โดยแบบจำลองนี้สามารถคำนวณตามสมการต่อไปนี้

$$DI_{DPP} = 950 \left\{ 1 - \exp \left[-0.075 \left(90^\circ - \theta_z \right) \right] \right\} \cos(\theta_z) \quad (32)$$

เมื่อ θ_z คือ มุมเซนิธดวงอาทิตย์ (องศา)

2.4.5 แบบจำลองมีเนล (Meinel model)

แบบจำลองนี้มีรูปแบบที่ค่อนข้างง่าย ไม่ซับซ้อน ซึ่งขึ้นอยู่กับ มุมเซนิธดวงอาทิตย์ (Solar zenith angle) และมวลอากาศที่ความดันบรรยากาศที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งใด ๆ (Air mass) โดยแบบจำลองนี้สามารถคำนวณตามสมการต่อไปนี้

$$DI_{Mei} = I_{so} 0.7^{m_{air(Mei)}^{0.678}} \cos(\theta_z) \quad (33)$$

เมื่อ $m_{air(Mei)}$ คือ มวลอากาศ (สำหรับแบบจำลองมีเนล)

2.4.5.1 ค่า $m_{air(Mei)}$ (สำหรับแบบจำลองมีเนล) คำนวณได้ตามสมการต่อไปนี้

$$m_{air(Mei)} = \frac{1}{\cos(\theta_z)} \quad (34)$$

เมื่อ θ_z คือ มุมเซนิธดวงอาทิตย์ (องศา)

2.5 วิธีการสถิติสำหรับทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศ

ในการทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองสำหรับคำนวณค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์โดยทั่วไปจะเปรียบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัด แต่เนื่องจากการเปรียบเทียบข้อมูลเพียงค่าใดค่าหนึ่งไม่เพียงพอต่อการบอกความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง ดังนั้น นักวิจัยต่างๆ จึงเปรียบเทียบข้อมูลทั้งหมดโดยใช้วิธีการทดสอบทางสถิติ ดังต่อไปนี้

2.5.1 รากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง (Root mean square difference, RMSD)^(1,2)

รากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง เป็นตัวชี้วัดทางสถิติที่บอกความเบี่ยงเบนเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการคำนวณจากข้อมูลซึ่งได้จากการวัด โดยค่าดังกล่าวสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$RMSD = \left(\frac{1}{\bar{m}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2} \right) \times 100 \quad (35)$$

โดยที่
$$\bar{m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i \quad (36)$$

และ
$$e_i = c_i - m_i \quad (37)$$

เมื่อ $\bar{m}$ คือ ค่าเฉลี่ยของการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการวัด
 n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด
 c_i คือ ค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง
 m_i คือ ค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการวัด

เนื่องจากการยกกำลังสองของความแตกต่างระหว่างค่าจากการคำนวณกับค่าจากการวัด ดังนั้นค่า RMSD จึงมีค่าเป็นบวกเสมอ ในกรณีอุดมคติกล่าวคือ ค่าจากการคำนวณเท่ากับค่าจากการวัดทั้งหมด RMSD จะมีค่าเป็นศูนย์ แบบจำลองที่ดีจะต้องได้ค่า RMSD ใกล้ศูนย์

¹ Omar Behar, Abdallah Khellaf, Kamal Mohammedi. (2015). *Comparison of solar radiation models and their validation under Algerian climate – The case of direct irradiance*. 98: 244.

² Muhammad Iqbal. (1983). *Introduction to Solar Radiation*. Academic Press, New York. P. 383-384.

2.5.2 ความแตกต่างในรูปความเอนเอียงเฉลี่ย (Mean bias difference, MBD)^(1,2)

ความแตกต่างในรูปความเอนเอียงเฉลี่ยเป็นตัวชี้วัดทางสถิติที่บอกความแตกต่าง เฉลี่ยระหว่างกลุ่มข้อมูลที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากการวัด โดยค่าดังกล่าวสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$MBD = \left(\frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n e_i \right) \times 100 \quad (38)$$

MBD อาจมีค่าเป็นบวกหรือลบก็ได้ ถ้าค่าเป็นบวกแสดงว่าข้อมูลมีความเอนเอียงไปในด้านที่ค่าจากการคำนวณมากกว่าค่าจากการวัด ในทางกลับกันถ้ามีค่าเป็นลบ แสดงว่าข้อมูลมีความเอนเอียงไปในด้านที่ค่าจากการวัดมากกว่าค่าจากการคำนวณ แบบจำลองที่ดีค่า MBD ต้องมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งหมายความว่าผลจากการคำนวณไม่มีความเอนเอียงไปทางด้านใดด้านหนึ่งมากนัก

2.5.3 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of determination, R^2)⁽³⁾

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เป็นตัวชี้วัดทางสถิติที่ชี้ให้เห็นว่าข้อมูลที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัด โดยค่าดังกล่าวสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - c_i)^2}{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2} \right) \times 100 \quad (39)$$

เนื่องจากการยกกำลังสองของอัตราส่วนระหว่างค่าจากการคำนวณกับค่าจากการวัด ดังนั้นค่า R^2 จึงมีค่าเป็นบวกเสมอ ซึ่งแบบจำลองที่ดีค่า R^2 ต้องมีค่าเข้าใกล้หนึ่งหรือ 100 % ซึ่งหมายความว่าผลจากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวัด

¹ Omar Behar, Abdallah Khellaf, Kamal Mohammedi. (2015). *Comparison of solar radiation models and their validation under Algerian climate – The case of direct irradiance*. 98: 244.

² Muhammad Iqbal. (1983). *Introduction to Solar Radiation*. Academic Press, New York. P. 383-384.

³ Fariba Besharat, Aii A. Dehghan, Ahmard R, Faghih. (2013). *Empirical models for estimating global solar radiation. A review and case study*. 21: 817.

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พ.ศ. 2544 Wong และ Chow (L.T.Wong; & W.K.Chow. 2001: 191-224) ได้ศึกษาแบบจำลองการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ เพื่อทำนายค่าเฉลี่ยรายวัน และรายชั่วโมงของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ทั้งการแผ่รังสีสุทธิ (Global radiation) การแผ่รังสีแผ่ (Diffuse radiation) และการแผ่รังสีตรง (Direct radiation) หรือแบบลำแสง (Beam radiation) ในฮ่องกง ประเทศจีน (ละติจูด 22.3°N , ลองจิจูด 114.3°E) โดยทั้ง 7 แบบจำลองจะคำนวณโดยใช้สมการของ Angstrom Prescott เพื่อทำนายค่ารังสีดวงอาทิตย์รายวัน ซึ่งสมการดังกล่าวจะพิจารณาจำนวนชั่วโมงของแสงแดดด้วย และอีก 2 แบบจำลองจะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำนายค่ารังสีดวงอาทิตย์รายชั่วโมง จากนั้นก็มีการเปรียบเทียบค่ารังสีดวงอาทิตย์ที่ได้จากแบบจำลองกับที่ได้จากการวัดจริง

พ.ศ. 2546 Gueymard และ Christian (Gueymard; & Christian A. 2003: 355-379) ได้ศึกษาแบบจำลองการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ จำนวน 19 แบบจำลอง เพื่อทำนายค่ารังสีตรงของดวงอาทิตย์ (Direct normal radiation) ภายใต้สภาพท้องฟ้าที่โปร่งใส (Clear sky) โดยเลือกศึกษาแบบจำลองจากการสำรวจจากงานวิจัยต่าง ๆ นอกจากนี้ยังมีอีก 2 แบบจำลองใหม่ที่ถูกพัฒนาขึ้น โดยเฉพาะ สำหรับศึกษาการส่งผ่านแสงอาทิตย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสูญเสียที่สำคัญในชั้นบรรยากาศ ผลจากการประเมินตามทฤษฎีสรุปได้ว่าแบบจำลองที่พิจารณาการส่งผ่านแสงอาทิตย์มีความถูกต้องมากกว่าแบบจำลองอื่น โดยแบบจำลองการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด มี 4 แบบจำลอง ได้แก่ CPCR2, MLWT2, REST และ Yang และแบบจำลองใหม่ที่พิจารณาการส่งผ่านแสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ MLWT2 model

พ.ศ. 2549 Pierre (Pierre Ineichen. 2006: 468-478) ได้เปรียบเทียบแบบจำลองการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ทั้งแบบการแผ่รังสีตรงหรือแบบลำแสง และการแผ่รังสีสุทธิ ภายใต้สภาพท้องฟ้าที่โปร่งใส (Clear sky) จำนวน 8 แบบจำลอง โดยใช้ข้อมูลจำนวน 16 ชุดข้อมูลในช่วงเวลา 20 ปีของแต่ละสถานีโดยมีความสูงจากระดับน้ำทะเล 1,600 เมตร และมีสภาพภูมิอากาศที่แตกต่างกันจากการเปรียบเทียบพบว่าความถูกต้องของแบบจำลองขึ้นอยู่กับความถูกต้องของพารามิเตอร์ที่ป้อนเข้าไปในแบบจำลอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้อมูลความขุ่นมัว (Turbidity) และพบว่าการใช้ข้อมูลจากคลังข้อมูลภูมิอากาศแทนที่พารามิเตอร์ที่วัดได้จริงของแต่ละพื้นที่ เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้แบบจำลองมีความผิดพลาด และถูกต้องน้อยลง ดังนั้นเกณฑ์การเลือกแบบจำลองควรจะอยู่บนพื้นฐานของความง่ายในการคำนวณ และสิ่งสำคัญจะต้องพิจารณาถึงความถูกต้องของพารามิเตอร์ที่ป้อนเข้าไปในแต่ละแบบจำลองด้วย

พ.ศ. 2553 Rahoma และคณะ (U.Ail Rahoma: & et al. 2010: 647-655) ได้ศึกษาองค์ประกอบของการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์เฉลี่ยรายวันทั้งแบบการแผ่รังสีสุทธิ (Global radiation) การแผ่รังสีแพร่ (Diffuse radiation) และการแผ่รังสีตรง (Direct radiation) ในเมือง Helwan ประเทศอียิปต์ (ละติจูด 29.25°N , ลองจิจูด 31.20°E) ซึ่งเมืองดังกล่าวถือเป็นเมืองที่มีมลพิษเป็นจำนวนมากที่สุดในโลกเมืองหนึ่งเพราะเป็นเมืองอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาข้อมูลที่ได้จากการวัดในช่วงระยะเวลา 9 ปี ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1991-2000 ได้แก่ ข้อมูลรังสีดวงอาทิตย์ในแนวนระดับรายชั่วโมง ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม เป็นต้น โดยจะเลือกวิเคราะห์ข้อมูลในวันที่ท้องฟ้าโปร่งใส (Clear sky) ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบสำคัญที่มีผลกับการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์คือ ละอองลอย (Aerosol) และไอน้ำ (Water vapor) ที่ลอยอยู่ในชั้นบรรยากาศ

พ.ศ. 2555 Gueymard และ Christian (Gueymard; & Christian A. 2012: 2145-2169) ได้ศึกษาแบบจำลองการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ จำนวน 18 แบบจำลอง เพื่อทำนายค่าการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ทั้ง 3 แบบ คือ การแผ่รังสีสุทธิ การแผ่รังสีแพร่ และการแผ่รังสีตรง ภายใต้สภาพท้องฟ้าโปร่งใส โดยอาศัยชุดข้อมูลที่มีคุณภาพสูงจาก 5 สถานีที่มีลักษณะสภาพภูมิอากาศที่แตกต่างกัน เพื่อที่จะนำข้อมูลที่ได้มาประยุกต์ใช้กับโครงการขนาดใหญ่ เช่น การทำแผนที่ทรัพยากรพลังงานแสงอาทิตย์ การประเมินรังสีดวงอาทิตย์ในระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ โดยข้อมูลที่ป้อนเข้าไปในแบบจำลอง ได้แก่ ข้อมูลละอองลอย และไอน้ำที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องชั้นโฟโตมิเตอร์ (Sunphotometer) เป็นต้น แบบจำลองดังกล่าวจะได้รับการประเมินโดยการเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายกับค่าที่วัดได้จริง ซึ่งพบว่ามีค่าความไม่แน่นอนประมาณ 3 % สำหรับค่าการแผ่รังสีตรง และเท่ากับ 5 % สำหรับค่าการแผ่รังสีสุทธิและการแผ่รังสีแพร่ อีกทั้งยังมีการนำสถิติมาใช้ในการทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองด้วย ได้แก่ ความแตกต่างในรูปความเอนเอียงเฉลี่ย (Mean bias difference), รากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง (Root mean square difference), สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of determination), ความไม่แน่นอนรวมด้วยความเชื่อมั่นจำกัด 95% (Total uncertainty with 95% confidence limits) และ ดัชนีประสิทธิภาพการทำงานรวมกัน (Combined performance Index) ผลจากการทดสอบสถิติ พบว่าค่าการแผ่รังสีตรงจากแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือ และถูกต้องอื่น โดยแบบจำลองการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด 5 แบบจำลอง ได้แก่ REST2, Ineichen, Hoyt, Bird และ Iqbal-C

พ.ศ. 2557 Fang และ Dai (Xiande Fang; & Qiumin Dai. 2014: 1239-1245) ได้ศึกษาแบบจำลองการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ ทั้งการแผ่รังสีตรง และการแผ่รังสีแพร่ ซึ่งวิเคราะห์จากแบบจำลอง และข้อมูลที่มีอยู่ โดยนำมาพัฒนาและปรับปรุงให้เป็นแบบจำลองใหม่เพื่อให้สามารถทำนายข้อมูลการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ทั้งแบบการแผ่รังสีตรง และการแผ่รังสีแพร่ ภายใต้สภาพ

ท้องฟ้าโปร่งใสได้อย่างถูกต้อง ซึ่งมีการนำสถิติมาใช้ทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองใหม่ด้วย ได้แก่ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of determination, R^2) รากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง (Root mean square difference, RMSE) และ ข้อผิดพลาดแท้จริงเฉลี่ย (Mean absolute error, MAE) จากผลการทดสอบพบว่า R^2 , RMSE และ MAE สำหรับแบบจำลองการแผ่รังสีตรงมีค่าเท่ากับ 0.992, 16.9 และ 2.2% ตามลำดับ และแบบจำลองการแผ่รังสีกระจายเท่ากับ 0.86, 16.9 และ 9.9% ตามลำดับ จากนั้นทำการเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองใหม่ และแบบจำลองเก่า พบว่าแบบจำลองใหม่มีความถูกต้องแม่นยำมากกว่าแบบจำลองเก่า

พ.ศ. 2558 Behar และคณะ (Omar Behar: & et al. 2015: 236-251) ได้ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ภายใต้สภาพบรรยากาศแอลจีเรีย (ประเทศแอลจีเรีย) จำนวน 17 แบบจำลอง เพื่อจะเลือกแบบจำลองที่มีความถูกต้องมากที่สุดสำหรับการประเมินผลการดำเนินงานของโครงการพลังงานแสงอาทิตย์ โดยทั้ง 17 แบบจำลองได้ทำนายค่าการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ที่เมือง Ghardaia (ภาคใต้ของประเทศแอลจีเรีย) อีกทั้งยังมีการนำสถิติมาใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของแต่ละแบบจำลองเพื่อจะได้แบบจำลองที่ดีที่สุด ซึ่งสถิติที่นำมาทดสอบได้แก่ ความแตกต่างในรูปความเอนเอียงเฉลี่ย (Mean bias difference, MBD) รากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง (Root mean square difference, RMSD) สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Coefficient of determination, R^2) ความไม่แน่นอนรวมด้วยความเชื่อมั่นจำกัด 95% (Total uncertainty with 95% confidence limits, U_{95}) การทดสอบสถิติที (T-statistic test, TT) และตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพรวม (Global performance indicator, GPI) ซึ่งพบว่าแบบจำลองที่มีรูปแบบที่ง่ายซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีรูปแบบการคำนวณที่ไม่ซับซ้อนและมีจำนวนพารามิเตอร์ที่ไม่มากเป็นแบบจำลองที่มีความถูกต้องแม่นยำมากกว่าแบบจำลองที่มีรูปแบบที่ซับซ้อนและที่อาศัยพารามิเตอร์จำนวนมาก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าแบบจำลองที่มีความถูกต้องแม่นยำไม่ได้ขึ้นกับรูปแบบที่ซับซ้อน และจำนวนพารามิเตอร์

สำหรับในประเทศไทย พ.ศ. 2553 กมล ศรีเจริญ (Sricharoen. 2010: 187-195) ได้ทำการวัดค่าความเข้มรังสีตรงดวงอาทิตย์ในรูปของ direct normal irradiance ที่สถานีอุตุนิยมวิทยา 3 แห่ง ได้แก่ ที่จังหวัดเชียงใหม่ (18.78 ° N, 98.98 ° E) จังหวัดนครปฐม (13.82 ° N, 100.04 ° E) และ จังหวัดสงขลา (7.20 ° N, 100.60 ° E) ด้วยเครื่องวัดความเข้มรังสีตรง (Pyreheliometer) ชนิดมีแกนหมุนตามดวงอาทิตย์ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการวัดดังกล่าวมาคัดเลือกเฉพาะข้อมูลช่วงที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆเพื่อทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองรังสีตรงของนักวิจัยต่างๆ จากการเปรียบเทียบพบว่าแบบจำลอง Solis มีผลการคำนวณใกล้เคียงกับการวัดมากที่สุดโดยมีค่า RMSD เท่ากับ 9.03 %

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

3.1 ลักษณะทางภูมิศาสตร์ของพื้นที่และการวิเคราะห์ข้อมูล

3.1.1 ลักษณะทางภูมิศาสตร์ของพื้นที่ที่ทำการวิเคราะห์

3.1.2 การศึกษาข้อมูล และเก็บรวบรวมข้อมูล

3.1.3 การพิจารณาวันที่สภาพท้องฟ้าโปร่ง (Clear day)

3.2 คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ ค่าพารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศ และค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ โดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศ

3.2.1 คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameters)

3.2.1.1 มุมเดคลิเนชัน (Declination angle)

3.2.1.2 ค่าแฟกเตอร์ปรับแก้ความรีของวงโคจรของโลก (Eccentricity correction – factor of the Earth's orbit)

3.2.1.3 เวลาดวงอาทิตย์ (Solar time)

3.2.1.4 มุมชั่วโมง (The hour angle)

3.2.1.5 มุมเซนิธดวงอาทิตย์ (The solar zenith angle)

3.2.1.6 การแผ่รังสีดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (Extraterrestrial radiation)

3.2.2 คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศ (Atmospheric parameters)

3.2.2.1 มวลอากาศ (Air mass)

3.2.2.2 อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew point temperature)

3.2.3 คำนวณค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์โดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศ

3.2.3.1 แบบจำลองเบิร์ด (Bird model)

3.2.3.2 แบบจำลองซีเอสอาร์ (CSR model)

3.2.3.3 แบบจำลองคุมาร์ (Kumar model)

3.2.3.4 แบบจำลองดาเนชเยอร์พอลทริดพรอคเตอร์ (Daneshyer – Paltridge – Proctor (DPP) model)

3.2.3.5 แบบจำลองมีเนล (Meinel model)

3.3 เขียนกราฟแสดงค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์โดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลอง และค่าที่ได้จากการวัดจริงเทียบกับเวลารายชั่วโมงของวันที่ท้องฟ้าโปร่ง (Clear day) ในฤดูหนาว (เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ปีพ.ศ. 2555-2557

3.4 ทดสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้การทดสอบทางสถิติ (Statistical test)

3.4.1 คำนวณค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง (RMSE)

3.4.2 คำนวณค่าความแตกต่างในรูปความเอนเอียงเฉลี่ย (MBD)

3.4.3 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2)

3.1 ลักษณะทางภูมิศาสตร์ของพื้นที่และการวิเคราะห์ข้อมูล

3.1.1 ลักษณะทางภูมิศาสตร์ของพื้นที่ที่ทำการวิเคราะห์

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกกรมอุตุนิยมวิทยาบางนา เป็นพื้นที่ในการวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งตั้งอยู่เลขที่ 4353 ถนนสุขุมวิท แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพมหานคร (ละติจูด 13.40 องศาเหนือ, ลองจิจูด 100.37 องศาตะวันออก) ลักษณะภูมิประเทศเป็นที่ราบลุ่ม มีระดับความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางประมาณ 1.5-2 เมตร มีแม่น้ำเจ้าพระยาไหลผ่านและอยู่ใกล้กับอ่าวไทยจึงได้รับอิทธิพลจากทะเลอยู่บ้าง ลักษณะภูมิอากาศเป็นแบบร้อนชื้น โดยอยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุม 2 ชนิด ได้แก่ ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ และลมมรสุมตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งก่อให้เกิดฤดูกาลที่แตกต่างกัน 3 ฤดู ได้แก่ ฤดูร้อนระหว่างเดือนกุมภาพันธ์ - เดือนเมษายน จะมีอากาศร้อนอบอ้าวซึ่งทำให้เกิดพายุฝนฟ้าคะนองและลมกรรโชกแรง หรือเรียกทั่วไปว่า “พายุฤดูร้อน” และมีอุณหภูมิเฉลี่ย 34.1 องศาเซลเซียส ฤดูฝนระหว่างเดือนพฤษภาคม - เดือนตุลาคม จะมีฝนตกทั้งช่วงบ้าง และฝนจะตกชุกต่อเนื่องในช่วงเดือนกรกฎาคมถึงเดือนตุลาคม ซึ่งจะมีฝนตกมากที่สุดช่วงเดือนสิงหาคมถึงกันยายน โดยมีฝนสูงสุดเฉลี่ย 197.6 มิลลิเมตร และฤดูหนาวระหว่างเดือนพฤศจิกายน - เดือนมกราคม มักจะได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ทำให้อากาศแปรปรวน และมีอากาศเย็นหรือฝนฟ้าคะนองเกิดขึ้นได้บ้าง อุณหภูมิเฉลี่ย 20.6 องศาเซลเซียส สำหรับความชื้นสัมพัทธ์จะมีค่าสูงเกือบตลอดปี เนื่องจากตั้งอยู่ใกล้อ่าวไทย ซึ่งมีไอน้ำพัดเข้าถึงสม่ำเสมอ และมีค่าเฉลี่ยจำนวนวันที่ฝนตกปีละ 118 วัน



ภาพประกอบ 8 กรมอุตุนิยมวิทยาบางนา กรุงเทพมหานคร

ที่มา: <https://www.google.co.th/maps/search/กรม>

อุตุนิยมวิทยา/@13.3376722,98.0475745,5.6z?hl=th สืบค้นวันที่ 4 มิถุนายน 2559

3.1.2 การศึกษา และเก็บรวบรวมข้อมูล

ศึกษาข้อมูลค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ (Direct solar radiation) ที่ได้จากข้อมูลค่าการแผ่รังสีสุทธิของดวงอาทิตย์ (Global solar radiation) และข้อมูลค่าการแผ่รังสีแพร่ของดวงอาทิตย์ (Diffuse solar radiation) เนื่องจากค่าการแผ่รังสีสุทธิของดวงอาทิตย์เกิดจากผลรวมของค่าการแผ่รังสีตรงและค่าการแผ่รังสีแพร่ของดวงอาทิตย์ ดังนั้นค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์จึงหาได้จากผลต่างของค่าการแผ่รังสีสุทธิและค่าการแผ่รังสีแพร่ของดวงอาทิตย์ ซึ่งข้อมูลดังกล่าวนี้ได้มาจากเครื่องไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer) รุ่น MS-802 ที่ผลิตโดยบริษัทเอกโก(EKO) ดังภาพประกอบ 9 ที่ติดตั้ง ณ กรมอุตุนิยมวิทยา บางนา กรุงเทพฯ โดยได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์ตรวจวิเคราะห์ไอโซน และรังสี ซึ่งเครื่องนี้สามารถเก็บข้อมูลได้ทุก ๆ ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 04:00-20:00 น. คือตั้งแต่เริ่มมีแสงของดวงอาทิตย์จนดวงอาทิตย์ลับขอบฟ้า โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกศึกษาข้อมูลในช่วงฤดูหนาว (เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) พ.ศ. 2555-2557 และเลือกวิเคราะห์ข้อมูลในช่วงเวลา 07:00-17:00 น.จำนวน 11 ชั่วโมง



Pyranometer

ภาพประกอบ 9 เครื่องไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer) รุ่น MS-802 ที่ผลิตโดยบริษัทเอคโก (EKO) ซึ่งติดตั้ง ณ กรมอุตุนิยมวิทยาบางนา กรุงเทพฯ

3.1.3 การพิจารณาวันที่สภาพท้องฟ้าโปร่ง (Clear day)

งานวิจัยนี้ได้เลือกวันในการคำนวณค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ โดยจะพิจารณาวันที่ท้องฟ้าโปร่ง (Clear day) หรือ วันที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆ ซึ่งได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแผ่รังสีสุทธิของดวงอาทิตย์กับเวลาที่ได้จากเครื่องไพรานอมิเตอร์ เทียบกับเวลา ซึ่งกราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นรูประฆังคว่ำ⁽¹⁾ ที่เส้นกราฟต่อเนื่องและไม่พบการตกของเส้นกราฟแสดงว่าช่วงเวลาดังกล่าวจะเป็นวันที่ท้องฟ้าโปร่ง โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกคำนวณในวันที่ท้องฟ้าโปร่งของช่วงฤดูหนาว (มกราคม) และฤดูร้อน (มีนาคม) พ.ศ. 2555-2557 และเลือกคำนวณในช่วงเวลา 07:00-17:00 น. เป็นระยะเวลาจำนวน 11 ชั่วโมง

¹ M.D. Alexandrov, A.A. Lacis, B.E. Carlson, and B. Cairns. (2002). *Remote Sensing of Atmospheric Aerosols and Trace Gases by Means of Multifilter Rotating Shadowband Radiometer, Part I: Retrieval Algorithm*. 59: 524–543.

3.2 คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ ค่าพารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศ และค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์โดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศ

การคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ และค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ของแบบจำลอง ได้ดำเนินการโดยใช้ โปรแกรม Microsoft Excel ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

3.2.1 คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameters)

3.2.1.1 มุมเดคลิเนชัน (Declination angle, δ)

คำนวณหามุม δ ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และมีนาคม ของ ปี พ.ศ. 2555-2557 ตามสมการ (1)

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

โดยแทนค่า n_j คือ วันในรอบปี (โดย $n_1 = 1$ สำหรับวันที่ 1 มกราคม) ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือน มกราคม และมีนาคม ของปีพ.ศ. 2555-2557 ลงในสมการ (1) จะได้ค่ามุมเดคลิเนชันของวันที่เลือก คำนวณ

3.2.1.2 ค่าแฟกเตอร์ปรับแก้ความรีของวงโคจรของโลก (Eccentricity

correction – factor of the Earth's orbit, E_0)

3.2.1.2.1 คำนวณหา E_0 ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และมีนาคม ของ ปีพ.ศ. 2555-2557 ตามสมการ (4)

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

3.2.1.2.2 คำนวณหา Γ ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และมีนาคม ของปีพ.ศ. 2555-2557 ตามสมการ (5)

$$\Gamma = 2\pi \left(\frac{n_j - 1}{365} \right)$$

โดยแทนค่า n_j คือ วันในรอบปี (โดย $n_1 = 1$ สำหรับวันที่ 1 มกราคม) ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งใน เดือนมกราคม และมีนาคม ของปีพ.ศ. 2555-2557 ลงในสมการ (5) จากนั้นนำค่า Γ ที่ได้จากหัวข้อ

3.2.1.2.2 แทนค่าลงในสมการ (4) ก็จะได้ค่า E_0 ของวันที่เลือกคำนวณ

3.2.1.3 เวลาดวงอาทิตย์ (Solar time, ST)

3.2.1.3.1 คำนวณหา ST ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และมกราคม ของปีพ.ศ. 2555-2557 ตั้งแต่เวลา 07:00 – 17:00 น. ตามสมการ (6)

$$ST = SDT + 4(L_{st} - L_{loc}) + E$$

โดยที่ SDT เป็นเวลาที่อ่านได้จากนาฬิกา (Clock time) ซึ่งในงานวิจัยนี้จะพิจารณาเวลาดังแต่ 07:00 – 17:00 น. ดังนั้นค่า SDT ของแต่ละวันจึงมีค่าตั้งแต่ 7-17 ส่วนค่า $L_{st} = 105$ (สำหรับ ประเทศไทย) และค่า $L_{loc} = 100.37$ องศา (แปลงพิกัดให้เป็นทศนิยมจะได้ว่า $L_{loc} = 100.61$)

3.2.1.3.2 คำนวณหา E ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และมกราคม ของปีพ.ศ. 2555-2557 ตามสมการ (7)

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868 \cos(\Gamma) - 0.032077 \sin(\Gamma) - 0.014615 \cos(2\Gamma) - 0.04089 \sin(2\Gamma))$$

จากนั้นนำค่ามุม Γ ที่ได้จากหัวข้อ 3.2.1.2.2 แทนค่าลงในสมการ (7) และจากนั้น แทนค่า E ลงในสมการ (6) ก็จะได้ค่า ST รายชั่วโมงของวันที่เลือกคำนวณ

3.2.1.4 มุมชั่วโมง (The hour angle, ω)

คำนวณหามุม ω ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และมกราคม ของ ปี พ.ศ. 2555-2557 ตั้งแต่เวลา 07:00 – 17:00 น. ตามสมการ (2)

$$\omega = 15^\circ (12 - ST)$$

โดยแทนค่า ST ที่ได้จากหัวข้อ 3.2.1.3 ลงในสมการ (2) ก็จะได้ค่ามุมชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 07:00 – 17:00 น. ของวันที่เลือกคำนวณ

3.2.1.5 มุมเซนิธดวงอาทิตย์ (The solar zenith angle, θ_z)

คำนวณหามุม θ_z ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และมกราคม ของ ปีพ.ศ. 2555-2557 ตามสมการ (3)

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

โดยนำค่า δ ที่ได้จากหัวข้อ 3.2.1.1 , ค่า $\phi = 13.40$ องศา (แปลงพิกัดให้เป็นทศนิยมจะได้ว่า $\phi = 13.67$) และค่า α ที่ได้จากหัวข้อ 3.2.1.4 แทนลงในสมการ (3) จะได้มุมเซนิธดวงอาทิตย์ รายชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 07:00–17:00 น.ของวันที่เลือกคำนวณ

3.2.1.6 รังสีนอกบรรยากาศโลก (The Extraterrestrial radiation, I_{so})

คำนวณหา I_{so} ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และ มีนาคม ของ ปีพ.ศ. 2555-2557 ตามสมการ (8)

$$I_{so} = I_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \left(\frac{360}{365} n_j \right) \right)$$

โดยนำค่า n_j ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และ มีนาคม ของ ปีพ.ศ. 2555-2557 ที่เลือกคำนวณ และนำค่า $I_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$ แทนลงในสมการ (8) ก็จะได้ค่ารังสีนอกบรรยากาศโลกของวันที่เลือกคำนวณ

3.2.2 คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศ (Atmospheric parameters)

3.2.2.1 มวลอากาศ (Air mass, m_r)

คำนวณหา m_r ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และ มีนาคม ของ ปี พ.ศ.2555-2557 ตามสมการ (9)

$$m_r = \left[\cos(\theta_z) + 0.15(93.885 - \theta_z)^{-1.253} \right]^{-1}$$

และคำนวณหามวลอากาศที่ความดันบรรยากาศที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งใด ๆ (m_{air}) ตามสมการ (10)

$$m_{air} = m_r \left(\frac{p}{p_0} \right)$$

โดยนำค่า θ_z ที่ได้จากหัวข้อ 3.2.1.5 แทนลงในสมการ (9) ก็จะได้ค่ามวลอากาศ (m_r) และนำค่า m_r , ค่า $p = 1006.3 \text{ mbar}$ (สำหรับกรมอุตุนิยมวิทยา กรุงเทพฯ) และค่า $p_0 = 1013.25 \text{ mbar}$ แทนลงในสมการ (10) ก็จะได้มวลอากาศที่ความดันบรรยากาศที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งใด ๆ (m_{air}) รายชั่วโมงของวันที่เลือกคำนวณ

3.2.2.2 อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew point temperature , T_{dew})

คำนวณหา T_{dew} ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และมกราคม ของปี พ.ศ. 2555-2557 ตามสมการ (11)

$$T_{dew} = T_{ambc} - \left(\frac{100 - RH}{5} \right)$$

โดยนำข้อมูลดิบของค่า T_{ambc} และค่า RH ที่ได้จากข้อมูลอุณหภูมิราย 3 ชั่วโมง ของกรมอุตุนิยมวิทยา กรุงเทพฯ ของเดือนมกราคม และมกราคม ปีพ.ศ. 2555-2557 แทนลงในสมการ (11) ก็จะได้ค่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างรายชั่วโมงของวันที่เลือกคำนวณ

3.2.3 คำนวณค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์โดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศ

สำหรับในงานวิจัยนี้ การคำนวณค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ในประเทศไทย จะใช้แบบจำลองในการคำนวณทั้งหมด 5 แบบจำลอง ดังต่อไปนี้

3.2.3.1 แบบจำลองเบิร์ด (Bird model)

ใช้แบบจำลองเบิร์ด คำนวณค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์รายชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 07:00–17:00 น. ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และมกราคม ของปีพ.ศ.2555-2557 ตามสมการ (12)

$$DI_{Bird} = 0.9662 E_0 I_{sc} \tau_{total} \cos(\theta_z)$$

โดยที่ τ_{total} คำนวณได้ตามสมการ (13)

$$\tau_{total} = \tau_r \tau_o \tau_g \tau_w \tau_a$$

3.2.3.1.1 หาค่า τ_r ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และมกราคม ของปี พ.ศ.2555-2557 ตามสมการ (14)

$$\tau_r = \exp \left[-0.0903 m_{air}^{0.84} (1 + m_{air} - m_{air}^{1.01}) \right]$$

โดย m_{air} คือ มวลอากาศที่ความดันที่เกิดขึ้นจริง ซึ่งค่า m_{air} ได้จากหัวข้อ 3.2.2.1

3.2.3.1.2 หาค่า τ_o ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และมกราคม ของปี

พ.ศ.2555-2557 ตามสมการ (15)

$$\tau_o = 1 - \left[0.1611U_3 \left((1 + 139.48U_3)^{-0.3035} - 0.002715U_3 (1 + 0.044U_3 + 0.0003U_3^2)^{-1} \right) \right]$$

โดยที่ U_3 สามารถคำนวณได้ตามสมการ (16)

$$U_3 = L_{oz} m_r$$

โดยค่า L_{oz} ได้จากข้อมูลค่าความหนาของชั้นโอโซนที่วัดได้ในแต่ละวันของเดือนมกราคม และมกราคม ของปีพ.ศ. 2555-2557 ของกรมอุตุนิยมวิทยา กรุงเทพฯ และ m_r ได้จากหัวข้อ 3.2.2.1

3.2.3.1.3 หาค่า τ_g ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และมกราคม ของปี

พ.ศ.2555-2557 ตามสมการ (17)

$$\tau_g = \exp \left(-0.0127 m_{air}^{0.26} \right)$$

โดย m_{air} คือ มวลอากาศที่ความดันที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งใด ๆ ซึ่งค่า m_{air} ได้จากหัวข้อ 3.2.2.1

3.2.3.1.4 หาค่า τ_w ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และมกราคม ของปี

พ.ศ.2555-2557 ตามสมการ (18)

$$\tau_w = 1 - 2.4959U_1 \left[(1 + 79.034U_1)^{0.6828} + 6.385U_1 \right]^{-1}$$

เมื่อ U_1 คือ The pressure – corrected relative optical – path length of precipitable water

โดยที่ U_1 สามารถคำนวณได้ตามสมการ (19)

$$U_1 = w m_r$$

และค่า w สามารถคำนวณได้ตามสมการ (20)

$$w = w' \left(\frac{P}{P_0} \right)^{3/4} \left(\frac{T_{0K}}{T_{ambk}} \right)^{1/2}$$

เมื่อ $w' = 0.1 \exp(2.2572 + 0.05454T_{dew})$

โดยค่า T_{dew} ได้จากหัวข้อ 3.2.2.2 ,ค่า $T_{0K} = 273$ K, ค่า T_{ambk} ได้จากข้อมูลอุณหภูมิราย 3 ชั่วโมงของกรมอุตุนิยมวิทยา กรุงเทพฯ, ค่า $P = 1006.3$ mbar (สำหรับกรมอุตุนิยมวิทยา กรุงเทพฯ) และค่า $P_0 = 1013.25$ mbar

3.2.3.1.5 หาค่า τ_a ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และมกราคม ของปี พ.ศ.2555-2557 ตามสมการ (22)

$$\tau_a = \exp \left[-L_{ao}^{0.873} \left(1 + L_{ao} - L_{ao}^{0.7808} \right) m_{air}^{0.9108} \right]$$

โดยที่ L_{ao} สามารถคำนวณได้ตามสมการ (23)

$$L_{ao} = 0.2758L_{ao;\lambda|\lambda=0.38\mu m} + 0.35L_{ao;\lambda|\lambda=0.5\mu m}$$

เมื่อ

$$L_{ao;\lambda|\lambda=0.38\mu m} = \beta_2 0.38^{\beta_1}$$

$$L_{ao;\lambda|\lambda=0.5\mu m} = \beta_2 0.5^{\beta_1}$$

โดยค่า $\beta_1 = 1.3$ (ตามทฤษฎี), ค่า β_2 ได้จากข้อมูลปริมาณนิพนธ์ เรื่องความลึกเชิงแสงของละอองลอยที่ขึ้นกับความยาวคลื่นในปี 2546 ของนายภูวกฤต ใจหอม ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.1308 (สำหรับเดือนมกราคม) และ 0.2868 (สำหรับเดือนมกราคม)

3.2.3.1.6 นำค่า $\tau_r, \tau_o, \tau_g, \tau_w$ และ τ_a ที่ได้จากหัวข้อ 3.2.3.1.1-3.2.3.1.5 แทนค่าลงในสมการ (13) แล้วจากนั้นนำค่า τ_{total} , ค่า E_0 ที่ได้จากหัวข้อ 3.2.1.2 , ค่า $I_{sc} = 1,367$ w/m^2 , และค่า θ_z ที่ได้จากหัวข้อ 3.2.1.5 แทนค่าลงในสมการ (12) ก็จะได้ค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์รายชั่วโมงของวันที่เลือกคำนวณโดยใช้แบบจำลองเบิร์ด

3.2.3.2 แบบจำลองซีเอสอาร์ (CSR model)

ใช้แบบจำลองซีเอสอาร์ คำนวณค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์รายชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 07:00–17:00 น. ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และมกราคม ของปีพ.ศ.2555-2557 ตามสมการ (26)

$$DI_{CSR} = C_{CSR} E_0 I_{sc} \tau_{total} \cos(\theta_z)$$

โดยที่ τ_{total} คำนวณได้ตามสมการ (13)

$$\tau_{total} = \tau_r \tau_o \tau_g \tau_w \tau_a$$

3.2.3.2.1 หาค่า C_{CSR} ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และมีนาคม ของปี พ.ศ. 2555-2557 ตามสมการ (27)

$$C_{CSR} = \left[50 + \left| \cos \left(\frac{n_j}{365} \right) \right| \right] / 49.25$$

3.2.3.2.2 หาค่า τ_a ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และมีนาคม ของปีพ.ศ. 2555-2557 ตามสมการ (28)

$$\tau_a = \exp[-m_{air} L_{ao}]$$

โดยค่า L_{ao} หาได้จากหัวข้อ 3.2.3.1.5 และค่า m_{air} หาได้จากหัวข้อ 3.2.2.1

3.2.3.2.3 นำค่า τ_r, τ_o, τ_g และ τ_w ที่ได้จากหัวข้อ 3.2.3.1.1-3.2.3.1.4 และ τ_a จากหัวข้อ 3.2.3.2.2 แทนค่าลงในสมการ (13) แล้วจากนั้นนำค่า τ_{total} , ค่า C_{CSR} ที่ได้จากหัวข้อ 3.2.3.2.1, ค่า E_0 ที่ได้จากหัวข้อ 3.2.1.2, ค่า $I_{sc} = 1,367 \text{ w/m}^2$, และค่า θ_z ที่ได้จากหัวข้อ 3.2.1.5 แทนค่าลงในสมการ (26) ก็จะได้ค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์รายชั่วโมงของวันที่เลือกคำนวณ โดยใช้แบบจำลองซีเอสอาร์

3.2.3.3 แบบจำลองคูมาร์ (Kumar model)

ใช้แบบจำลองคูมาร์ คำนวณค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์รายชั่วโมง ตั้ง เวลา 07:00 – 17:00 น. ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และมีนาคม ของปีพ.ศ. 2555-2557 ตามสมการ (29)

$$DI_{Ku} = DI_{nKu} \cos(\theta_z)$$

โดย

$$DI_{nKu} = 0.56 I_{so} [\exp(-0.65 m_{Ku}) + \exp(-0.095 m_{Ku})]$$

3.2.3.3.1 หาค่า m_{Ku} ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และมกราคม ของปี

พ.ศ. 2555-2557 ตามสมการ (31)

$$m_{Ku} = \left\{ \left[1229 + (614 \cos(\theta_z))^2 \right]^{0.5} - 614 \cos(\theta_z) \right\} \frac{p}{p_0}$$

โดยค่า θ_z ได้จากหัวข้อ 3.2.1.5 , ค่า $P_0 = 1013.25$ mbar และค่า $P = 1006.3$ mbar (สำหรับ กรมอุตุนิยมวิทยา กรุงเทพฯ)

3.2.3.3.2 นำค่า I_{so} ได้จากหัวข้อ 3.2.1.6 และค่า m_{Ku} ที่ได้จากหัวข้อ

3.2.3.3.1 แทนค่าลงใน สมการ จากนั้นนำค่า DI_{nKu} และค่า θ_z ที่ได้จากหัวข้อ 3.2.1.5 แทนค่าลงในสมการ (29) ก็จะได้ค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์รายชั่วโมงของวันที่เลือกคำนวณโดยใช้แบบจำลองคูมาร์

3.2.3.4 แบบจำลองดาเนชเยอร์พอลทริดพรอคเตอร์ (Daneshyer – Paltridge – Proctor (DPP) model)

ใช้แบบจำลองดาเนชเยอร์พอลทริดพรอคเตอร์คำนวณค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์รายชั่วโมง ตั้งเวลา 07:00 – 17:00 น.ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และมกราคม ของปี พ.ศ. 2555-2557 ตามสมการ (32)

$$DI_{DPP} = 950 \left\{ 1 - \exp \left[-0.075 \left(90^\circ - \theta_z \right) \right] \right\} \cos(\theta_z)$$

นำค่า θ_z ได้จากหัวข้อ 3.2.1.5 แทนค่าลงในสมการ (32) ก็จะได้ค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์รายชั่วโมงของวันที่เลือกคำนวณโดยใช้แบบจำลองดาเนชเยอร์พอลทริดพรอคเตอร์

3.2.3.5 แบบจำลองมีเนล (Meinel model)

ใช้แบบจำลองมีเนล คำนวณค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์รายชั่วโมง ตั้งเวลา 07:00 – 17:00 น.ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และมกราคม ของปีพ.ศ. 2555-2557 ตามสมการ (33)

$$DI_{Mei} = I_{so} 0.7^{m_{air(Mei)}^{0.678}} \cos(\theta_z)$$

โดยค่า $m_{air(Mei)}$ (สำหรับแบบจำลองมีเนล) สามารถคำนวณได้ตามสมการ (34)

$$m_{air(Mei)} = \frac{1}{\cos(\theta_z)}$$

โดยค่า θ_z ได้จากหัวข้อ 3.2.1.5 จากนั้นนำค่า I_{so} ที่ได้จากหัวข้อ 3.2.1.6 และค่า $m_{air(Mei)}$ (สำหรับแบบจำลองมีเนล) แทนค่าลงในสมการ (33) ก็จะได้ค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์รายชั่วโมงของวันที่เลือกคำนวณโดยใช้แบบจำลองมีเนล

3.3 เขียนกราฟแสดงค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์โดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลอง และค่าที่ได้จากการวัดจริงเทียบกับเวลารายชั่วโมงของวันที่ท้องฟ้าโปร่ง (Clear day) ในฤดูหนาว (เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ปีพ.ศ. 2555-2557

3.4 ทดสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้การทดสอบทางสถิติ (Statistical test)

การทดสอบความน่าเชื่อถือของค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลอง โดยใช้วิธีการทดสอบทางสถิติ (Statistical test) จำนวน 3 วิธี มีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

3.4.1 คำนวณค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง (RMSD)

คำนวณค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสองของแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลอง ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และมีนาคม ของปีพ.ศ. 2555-2557 ตามสมการ (35)

$$RMSD = \left(\frac{1}{\bar{m}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2} \right) \times 100$$

3.4.1.1 หาค่าเฉลี่ยของค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการวัด ($\bar{m}$)

ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และมีนาคม ของปีพ.ศ. 2555-2557 ตามสมการ (36)

$$\bar{m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i$$

3.4.1.2 หาค่า e_i ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และมีนาคม ของปี พ.ศ. 2555-2557 ตามสมการ (37)

$$e_i = c_i - m_i$$

โดยค่า c_i ได้จากค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลอง และค่า m_i ได้จากค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการวัด ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และมีนาคม ของปีพ.ศ. 2555-2557

3.4.1.3 นำค่า $\bar{m}$ ที่ได้จากหัวข้อ 3.4.1.1, ค่า e_i ที่ได้จากหัวข้อ 3.4.1.2 และค่า n ที่ได้จากจำนวนข้อมูลในการคำนวณ ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และมีนาคม ของปี พ.ศ. 2555-2557 แทนค่าลงในสมการ (35) ก็จะได้ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสองของวันที่เลือกคำนวณ

3.4.2 คำนวณค่าความแตกต่างในรูปความเอนเอียงเฉลี่ย (MBD)

คำนวณค่าความแตกต่างในรูปความเอนเอียงเฉลี่ยของแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลอง วันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และมีนาคม ของปีพ.ศ. 2555-2557 ตามสมการ (38)

$$MBD = \left(\frac{1}{n\bar{m}} \sum_{i=1}^n e_i \right) \times 100$$

นำค่า $\bar{m}$ ที่ได้จากหัวข้อ 3.4.1.1, ค่า e_i ที่ได้จากหัวข้อ 3.4.1.2 และค่า n ที่ได้จากจำนวนข้อมูลในการคำนวณ ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และมีนาคม ของปี พ.ศ. 2555-2557 แทนค่าลงในสมการ (38) ก็จะได้ค่าความแตกต่างในรูปความเอนเอียงเฉลี่ยของวันที่เลือกคำนวณ

3.4.3 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2)

คำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ของแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลอง ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคมและ มีนาคมของปีพ.ศ.2555-2557 ตามสมการ(39)

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - c_i)^2}{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2} \right) \times 100$$

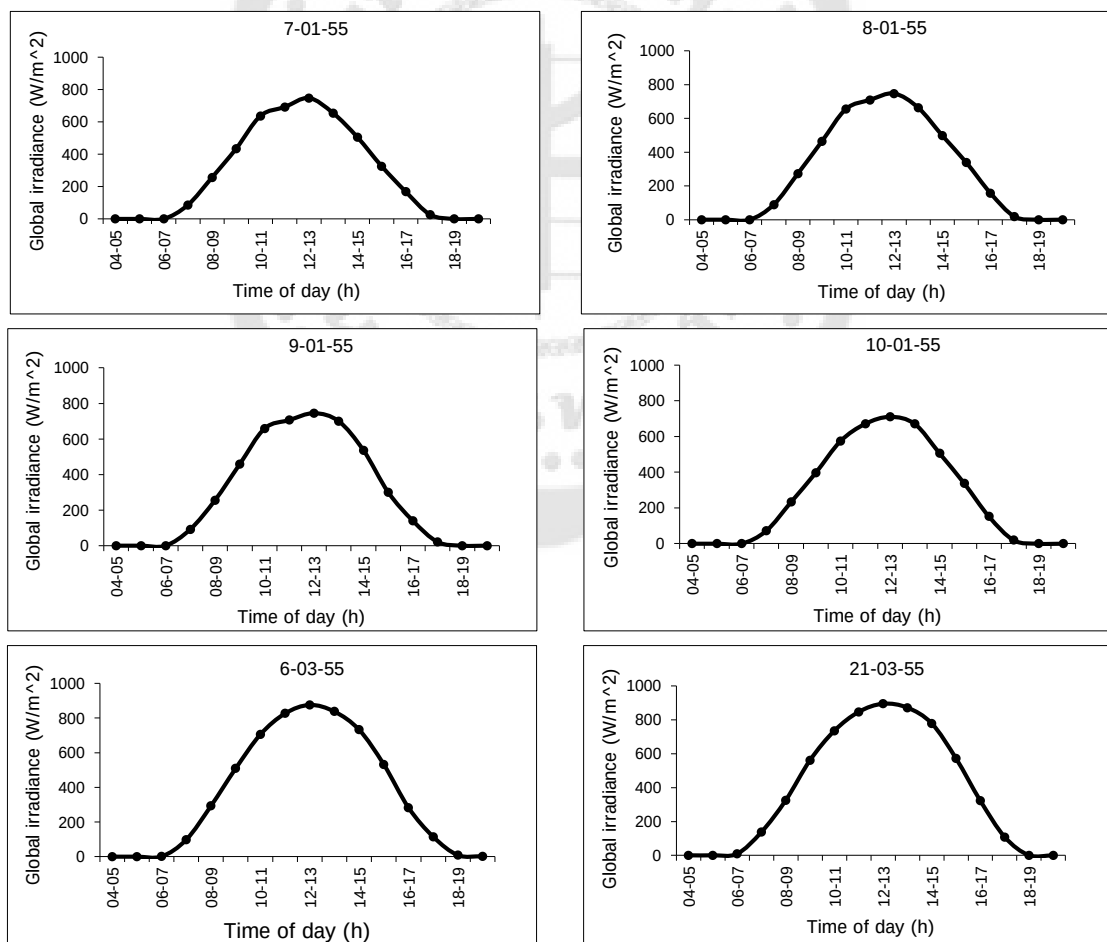
นำค่า c_i ที่ได้จากการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้แบบจำลอง ค่า m_i ที่ได้จากการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการวัด และค่า $\bar{m}$ ที่ได้ จากหัวข้อ 3.4.1.1 ของวันที่ท้องฟ้าโปร่งในเดือนมกราคม และ มีนาคม ของปีพ.ศ. 2555-2557 แทน ค่าลงในสมการ (39) ก็จะได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของวันที่เลือกคำนวณ

บทที่ 4

ผลการวิจัย

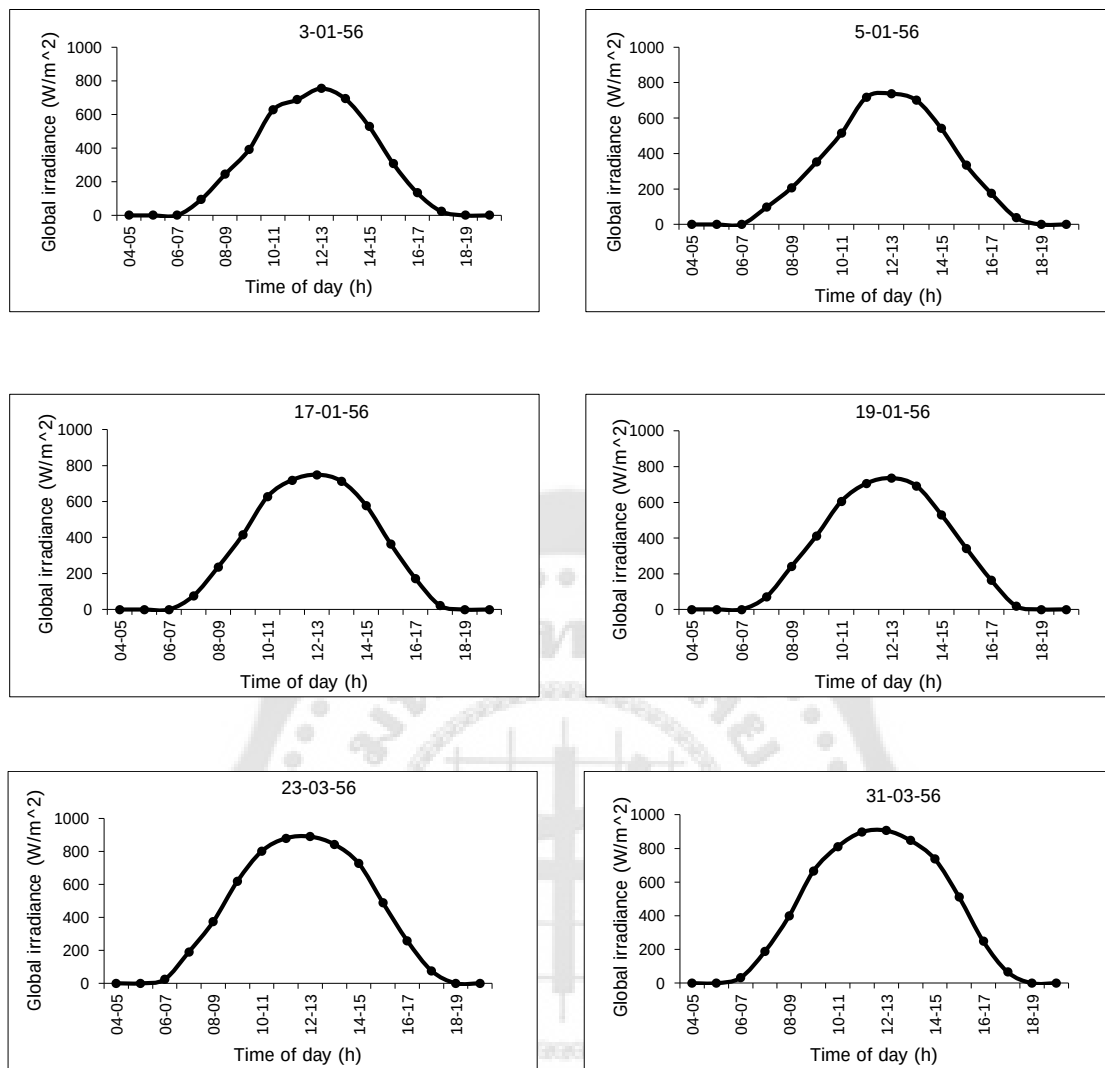
4.1 ผลการพิจารณาวันที่สภาพท้องฟ้าโปร่ง (Clear day)

ผลการพิจารณาสภาพท้องฟ้าโปร่งวันที่ฟ้าโปร่ง (Clear day) หรือวันที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆจะสามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่าและจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแผ่รังสีสุทธิที่ได้จากเครื่องไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer) เทียบกับเวลา โดยเลือกวันจากกราฟที่มีลักษณะเป็นรูปประซังคว่ำที่เส้นกราฟต่อเนื่องและไม่พบการตกของเส้นกราฟของวันทั้งในฤดูหนาว (เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ของปี พ.ศ.2555-2557 ซึ่งวันที่เลือกของปี พ.ศ. 2555 มีจำนวน 6 วัน ได้แก่ วันที่ 7-10 มกราคม และวันที่ 6, 21 มีนาคม ดังภาพประกอบ 10 สำหรับ พ.ศ. 2556 มีจำนวน 6 วัน ได้แก่ วันที่ 3, 5, 17, 19 มกราคม และวันที่ 23, 31 มีนาคม ดังภาพประกอบ 11 และสำหรับปี พ.ศ. 2557 มีจำนวน 6 วัน ได้แก่ วันที่ 2, 10-12 มกราคม และวันที่ 14, 31 มีนาคม ดังภาพประกอบ 12

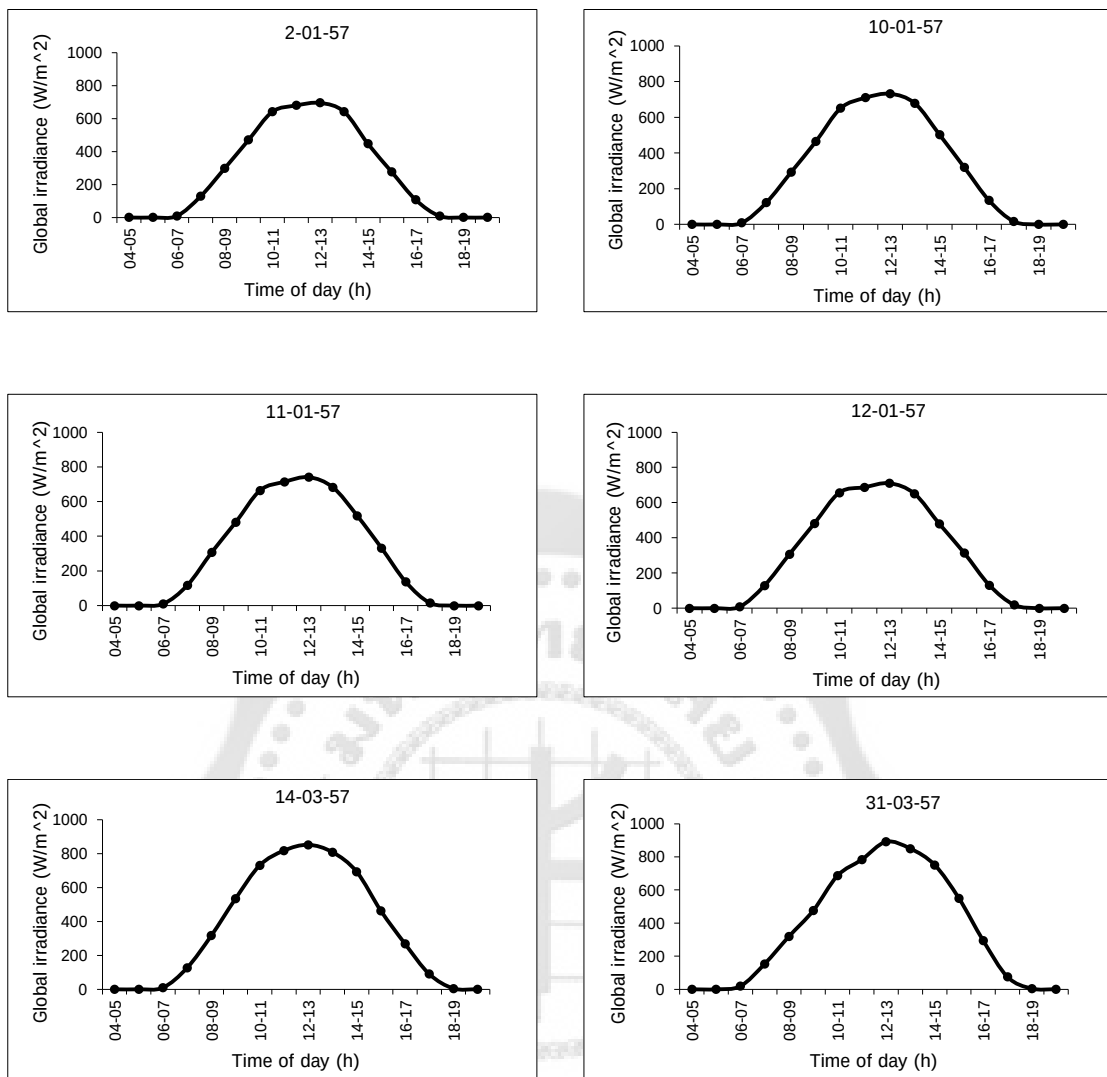


ภาพประกอบ 10 กราฟค่าการแผ่รังสีสุทธิที่ได้จากเครื่องไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer)

เทียบกับเวลา ของวันที่ 7-10 มกราคม และวันที่ 6, 21 มีนาคม พ.ศ. 2555



ภาพประกอบ 11 กราฟค่าการแผ่รังสีสุทธิที่ได้จากเครื่องไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer)
เทียบกับเวลา ของวันที่ 3, 5, 17, 19 มกราคม และวันที่ 23, 31 มีนาคม พ.ศ. 2556



ภาพประกอบ 12 กราฟค่าการแผ่รังสีสุทิตีที่ได้จากเครื่องไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer)

เทียบกับเวลา ของวันที่ 2, 10-12 มกราคม และวันที่ 14, 31 มีนาคม พ.ศ. 2557

4.2 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameters) และการคำนวณค่าพารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศ (Atmospheric parameters)

ผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ มีจำนวน 7 พารามิเตอร์ ตามสมการ 1-4 และ 6-7 ประกอบด้วย ค่ามุมเดคลิเนชัน (δ), ค่าแฟกเตอร์ปรับแก้ความรีของวงโคจรของโลก (E_0), เวลาดวงอาทิตย์ (ST), มุมซัวโมง (ω), มุมเซนิตดวงอาทิตย์ (θ_z), และค่ารังสีนอกบรรยากาศโลก (I_{so}) ตามลำดับ และผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศ มีจำนวน 2 พารามิเตอร์ ตามสมการ 9 และ 11 ประกอบด้วย ค่ามวลอากาศ (m_r) และค่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (T_{dew}) ตามลำดับ โดยเลือกคำนวณข้อมูลดังกล่าวในช่วงเวลาตั้งแต่เวลา 07:00-17:00 น. ของวันในฤดูหนาว (เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ปี พ.ศ.2555-2557 จำนวน 18 วัน โดยมีรายละเอียดของช่วงเวลาเวลา 07:00 น.แสดงดังในตาราง 2 และในช่วงเวลาตั้งแต่เวลา 08:00-17:00 น. มีรายละเอียดดังแสดงในภาคผนวก

ตาราง 2 แสดงค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameters) และพารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศ (Atmospheric parameters) เวลา 07:00 น. ของวันที่ท้องฟ้าโปร่ง (Clear day) ในฤดูหนาว (เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ปี พ.ศ. 2555-2557

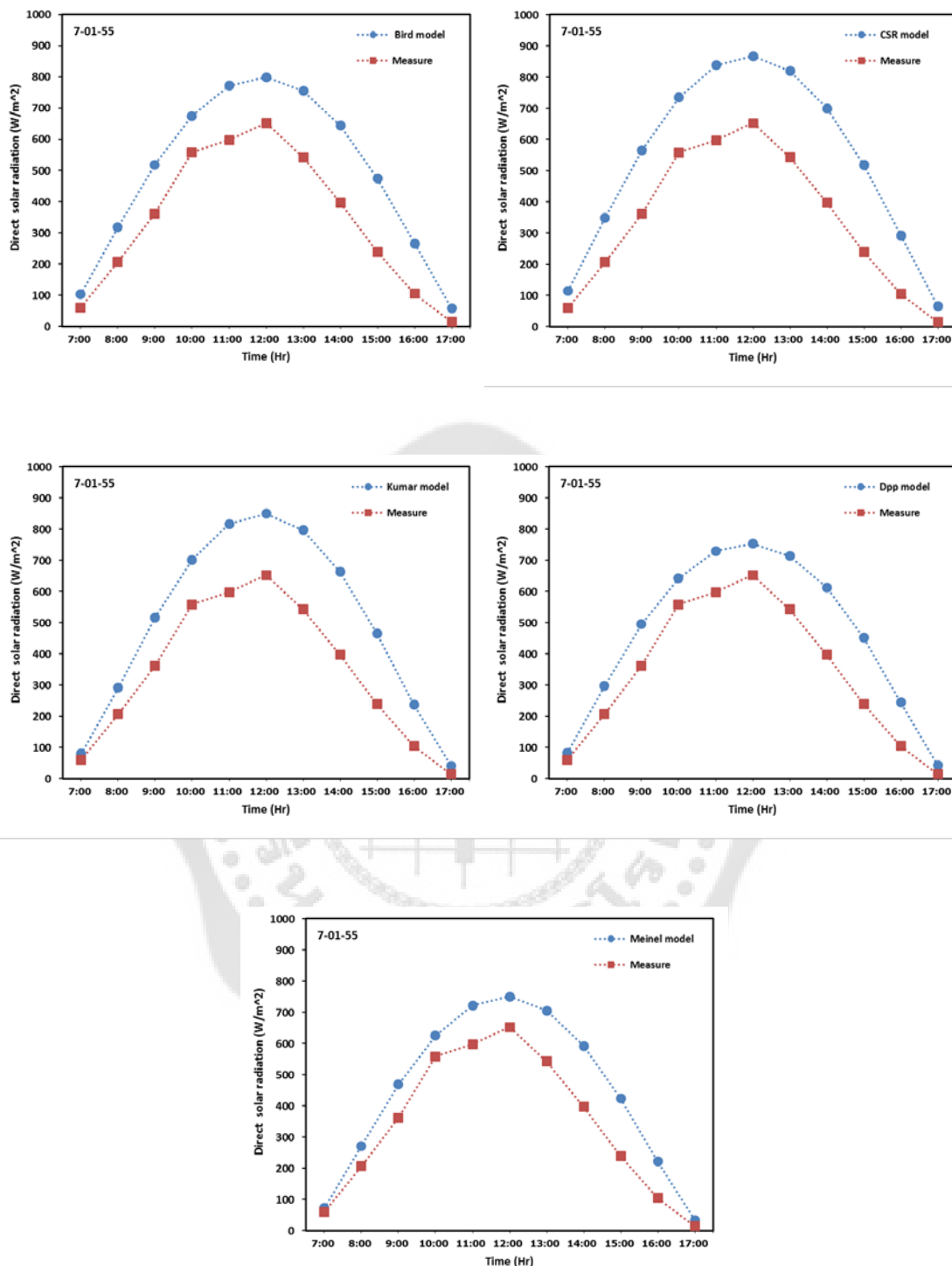
วันที่	ค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์							ค่าพารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศ	
	δ (องศา)	E_0	ST (ชม.)	ω (องศา)	$\cos \theta_z$ (องศา)	θ_z (องศา)	I_{so} (W/m ²)	m_r	T_{dew} (เซลเซียส)
7 มกราคม 2555	-22.46	1.035	7.12	73.19	0.169	80.3	1404	5.715	20.86
8 มกราคม 2555	-22.35	1.035	7.12	73.26	0.169	80.3	1369	5.722	18.38
9 มกราคม 2555	-22.23	1.035	7.11	73.32	0.169	80.3	1406	5.727	17.63
10 มกราคม 2555	-22.06	1.035	7.11	73.38	0.169	80.3	1408	5.731	18.12
6 มีนาคม 2555	-5.56	1.016	7.06	74.12	0.242	76.0	1396	4.070	24.80
21 มีนาคม 2555	0.34	1.007	7.10	73.50	0.277	73.9	1377	3.560	19.97
22 มีนาคม 2555	0.74	1.007	7.10	73.45	0.280	73.8	1398	3.531	24.19
3 มกราคม 2556	-22.92	1.035	7.14	72.94	0.171	80.2	1411	5.669	20.09
5 มกราคม 2556	-22.69	1.035	7.13	73.07	0.170	80.2	1377	5.695	19.79

ตาราง 2 (ต่อ)

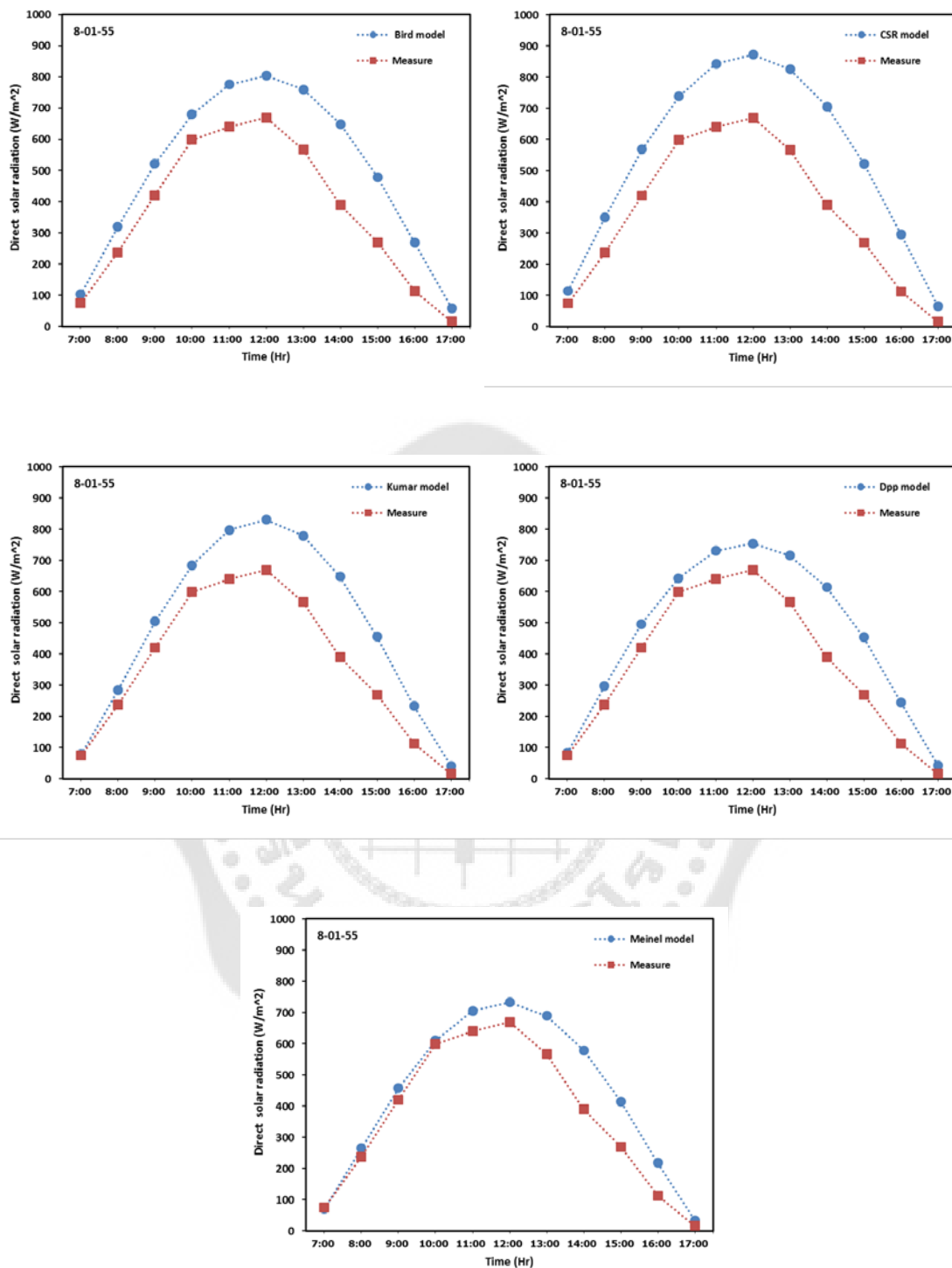
วันที่	ค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์							ค่าพารามิเตอร์ ในชั้นบรรยากาศ	
	δ (องศา)	E_0	ST (ชม.)	ω (องศา)	$\cos\theta_z$ (องศา)	θ_z (องศา)	I_{so} (W/m ²)	m_r	T_{dew} (เซลเซียส)
17 มกราคม 2556	-20.91	1.034	7.08	73.76	0.169	80.2	1389	5.710	19.87
19 มกราคม 2556	-20.51	1.034	7.08	73.86	0.170	80.2	1412	5.688	17.26
23 มีนาคม 2556	0.74	1.007	7.10	73.45	0.280	73.8	1398	3.531	25.07
31 มีนาคม 2556	3.84	1.002	7.13	73.07	0.298	72.7	1398	3.317	25.16
2 มกราคม 2557	-22.98	1.035	7.14	72.87	0.171	80.1	1385	5.654	16.15
10 มกราคม 2557	-22.06	1.035	7.11	73.38	0.169	80.3	1408	5.731	17.90
11 มกราคม 2557	-21.94	1.035	7.10	73.44	0.169	80.3	1374	5.733	19.37
12 มกราคม 2557	-21.77	1.035	7.10	73.49	0.169	80.3	1401	5.734	19.01
14 มีนาคม 2557	-2.81	1.012	7.08	73.85	0.258	75.0	1411	3.817	24.58
31 มีนาคม 2557	3.84	1.002	7.13	73.07	0.298	72.7	1398	3.317	25.49

4.3 การเขียนกราฟแสดงค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์โดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศและค่าที่ได้จากการวัดจริงเทียบกับเวลารายชั่วโมง

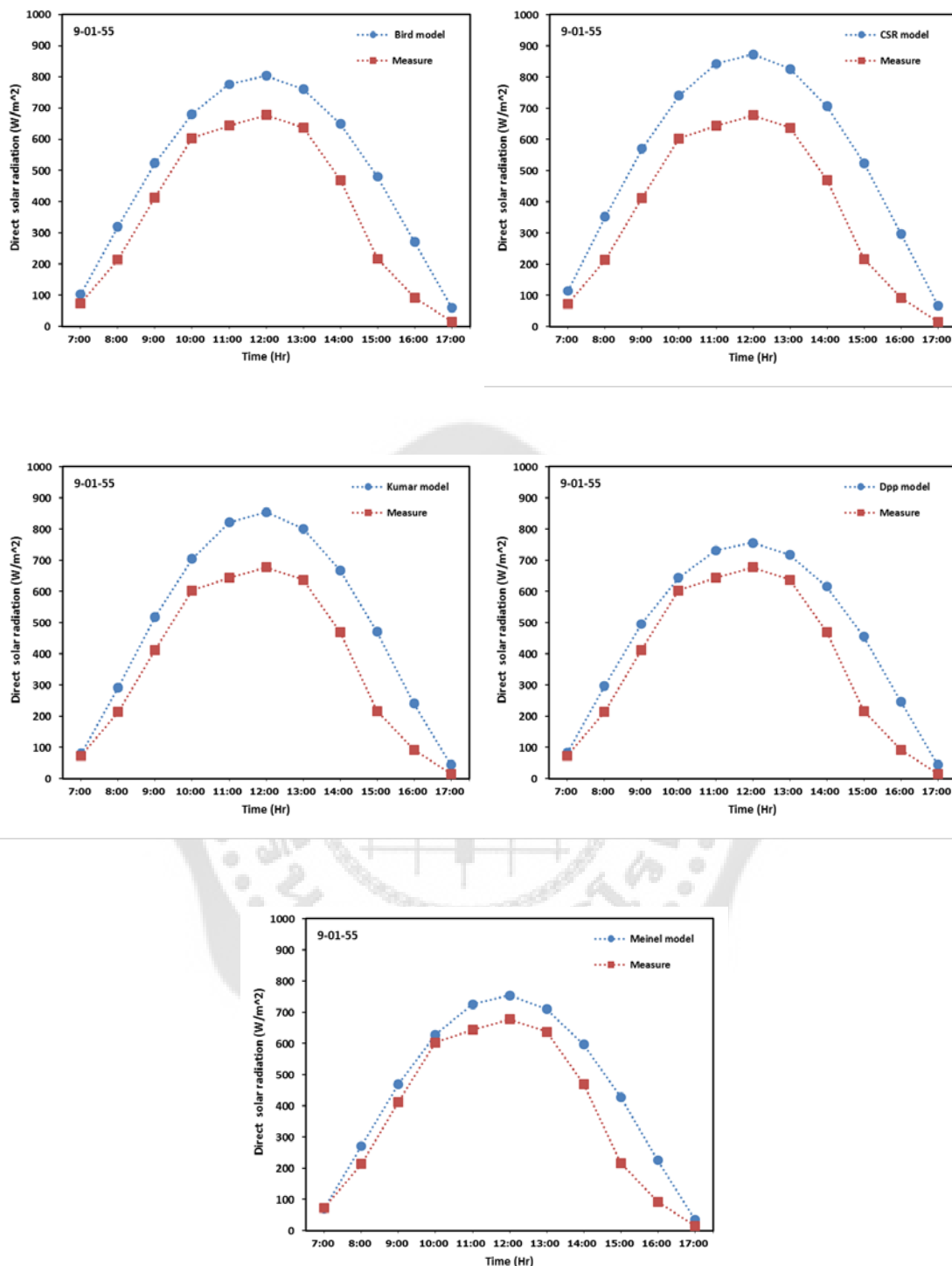
ผลการเขียนกราฟแสดงค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองเบิร์ด แบบจำลองซีเอสอาร์ แบบจำลองคูมาร์ แบบจำลองดาเนซเยอร์พอลทริดพรอกเตอร์ และแบบจำลองมีเนล และค่าที่ได้จากการวัดจริงจากเครื่องมือ เทียบกับเวลารายชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 07:00-17:00 น. ของวันที่ท้องฟ้าโปร่ง (Clear day) ในฤดูหนาว(เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ของปีพ.ศ. 2555-2557 แสดงดังในภาพประกอบ 13-30



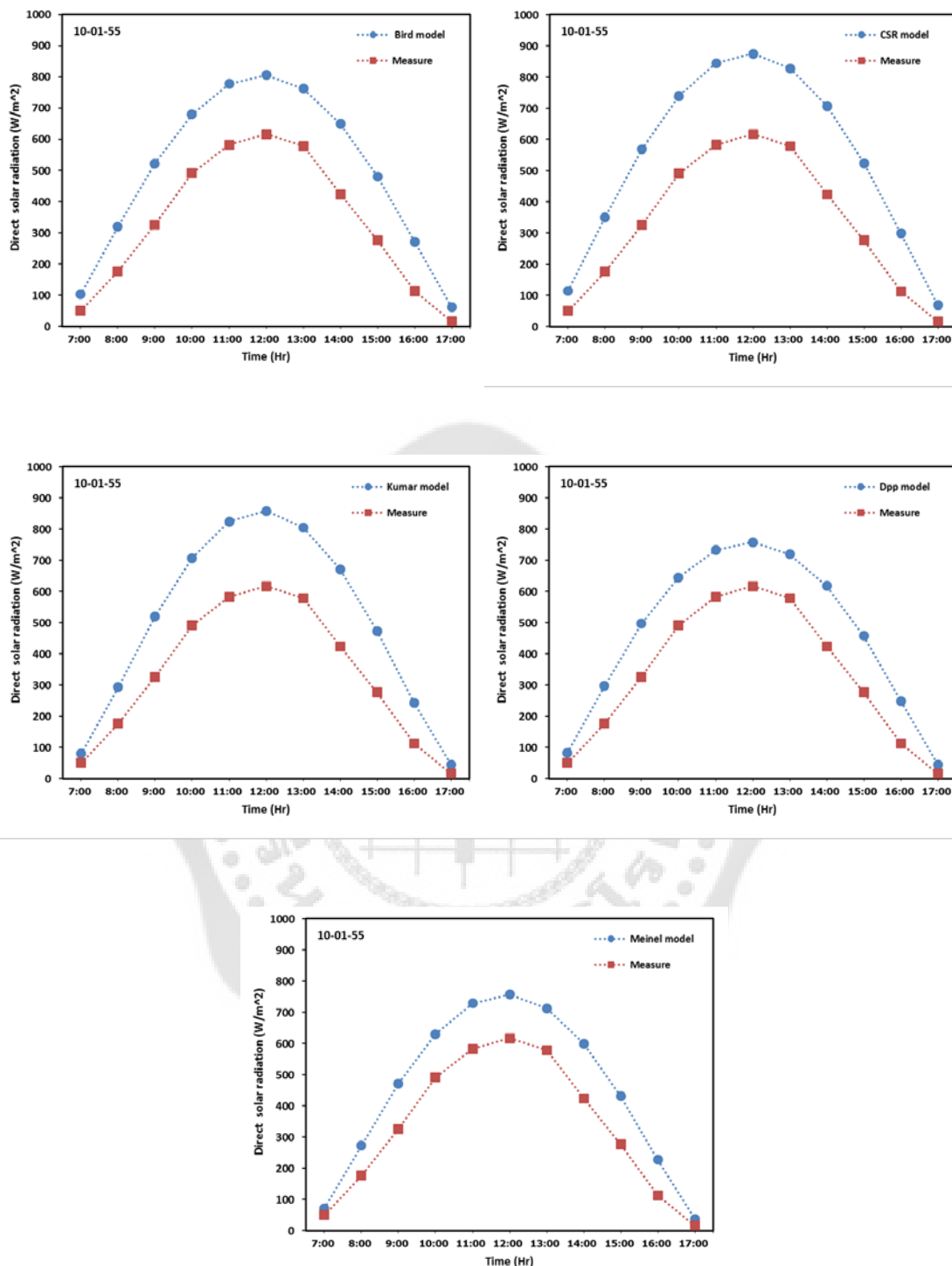
ภาพประกอบ 13 กราฟค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัด เทียบกับเวลารายชั่วโมงของวันที่ 7 มกราคม พ.ศ. 2555



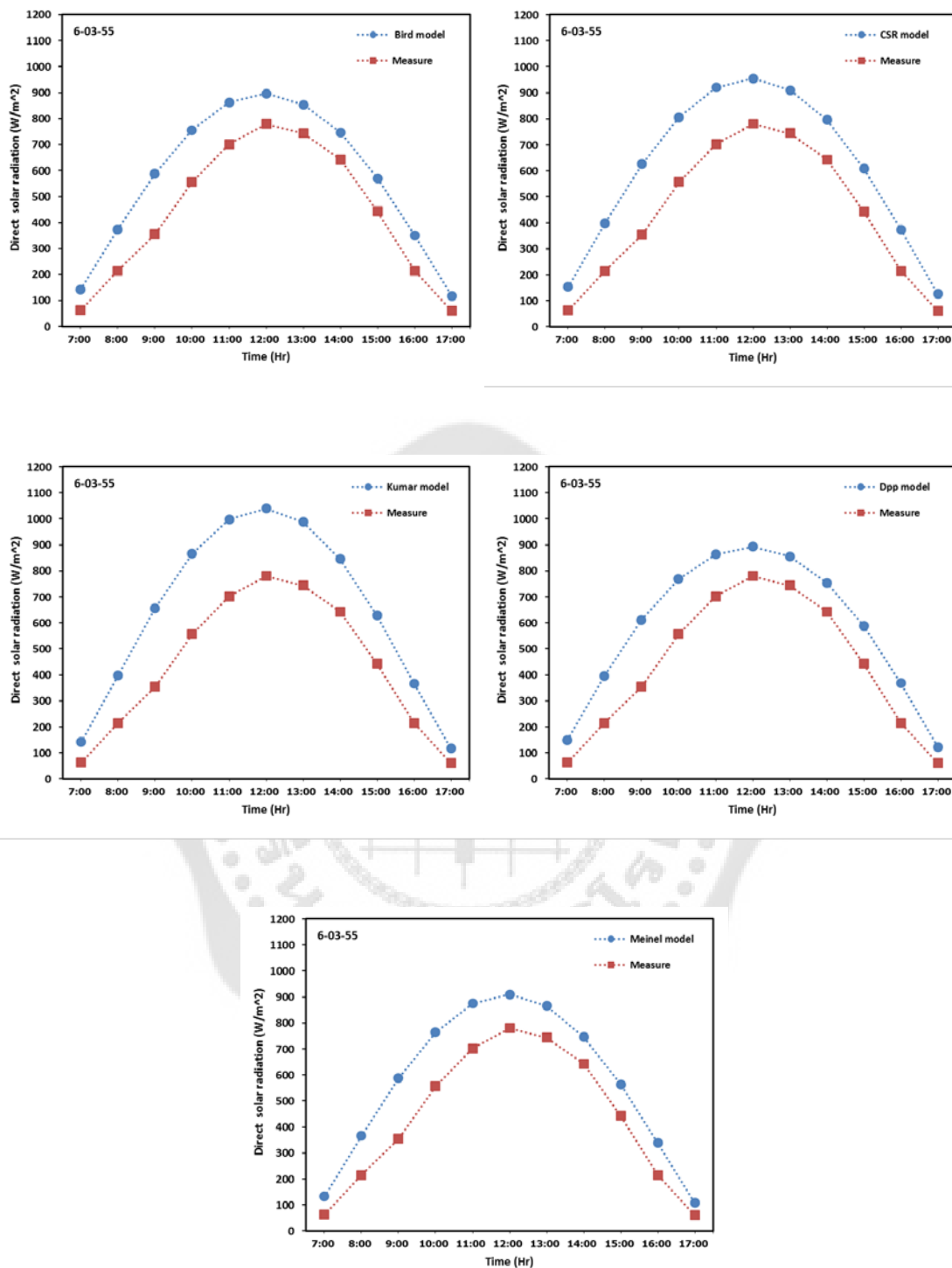
ภาพประกอบ 14 กราฟค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัด เทียบกับเวลารายชั่วโมงของวันที่ 8 มกราคม พ.ศ. 2555



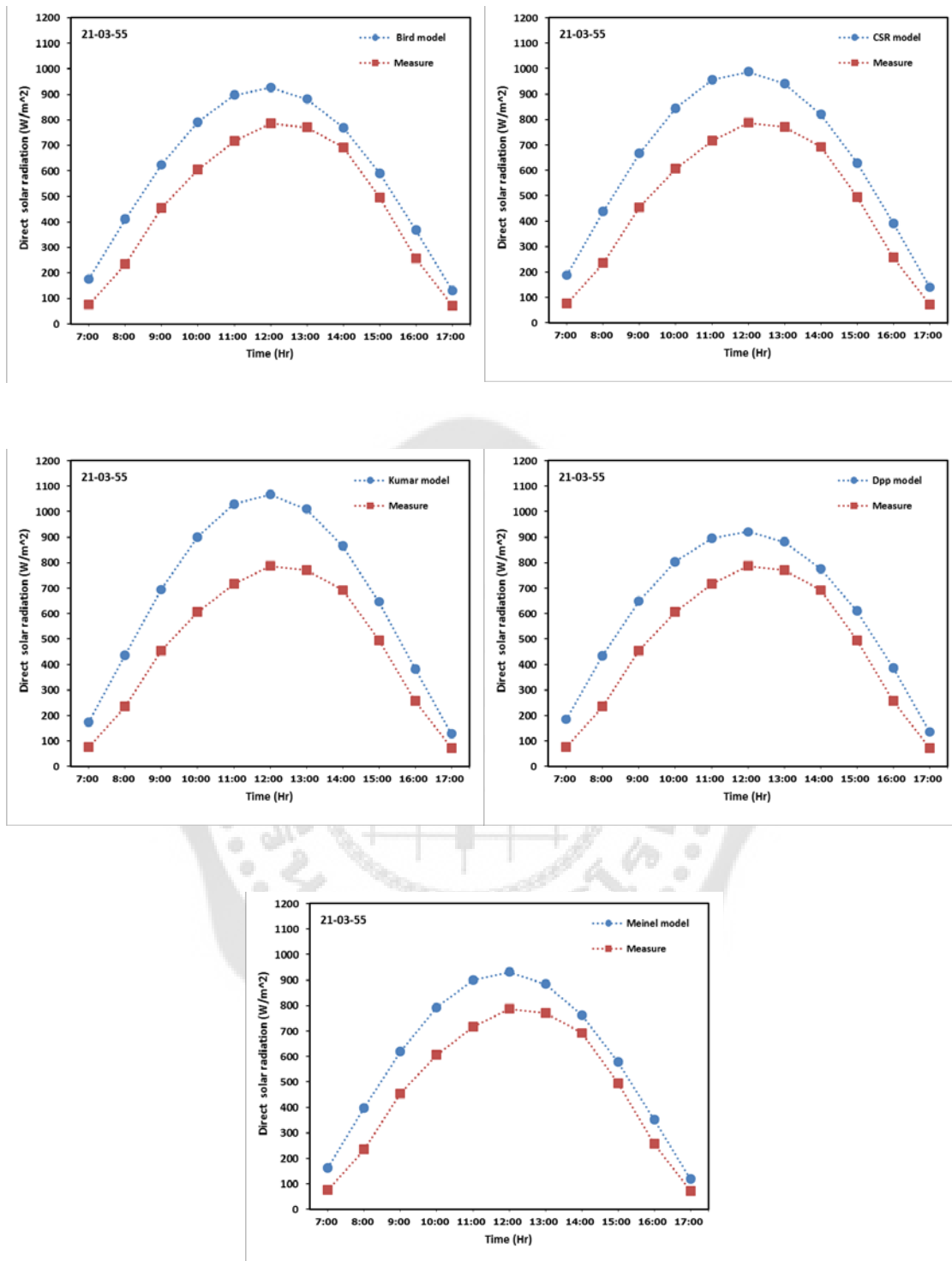
ภาพประกอบ 15 กราฟค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัด เทียบกับเวลารายชั่วโมงของวันที่ 9 มกราคม พ.ศ. 2555



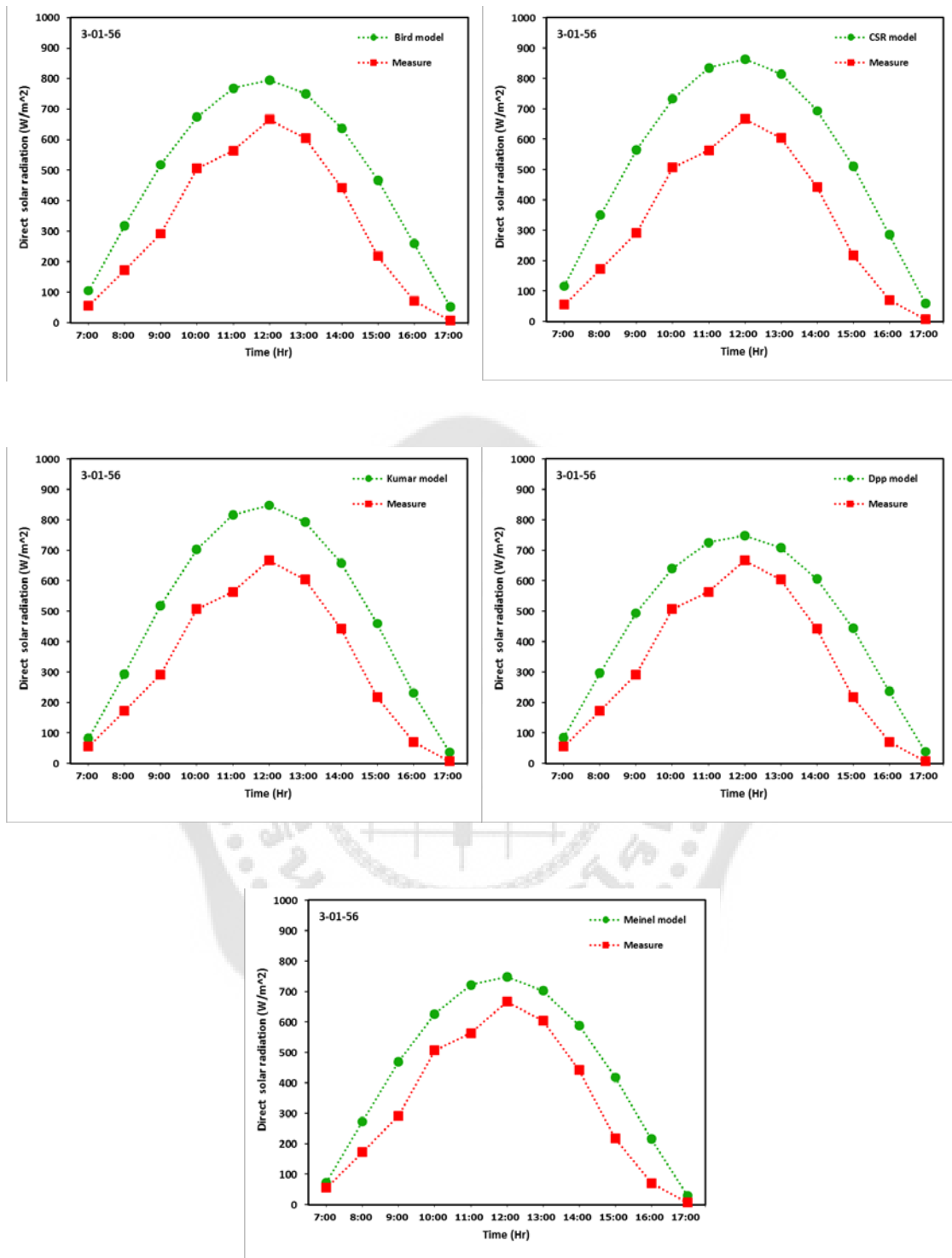
ภาพประกอบ 16 กราฟค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัด เทียบกับเวลารายชั่วโมงของวันที่ 10 มกราคม พ.ศ. 2555



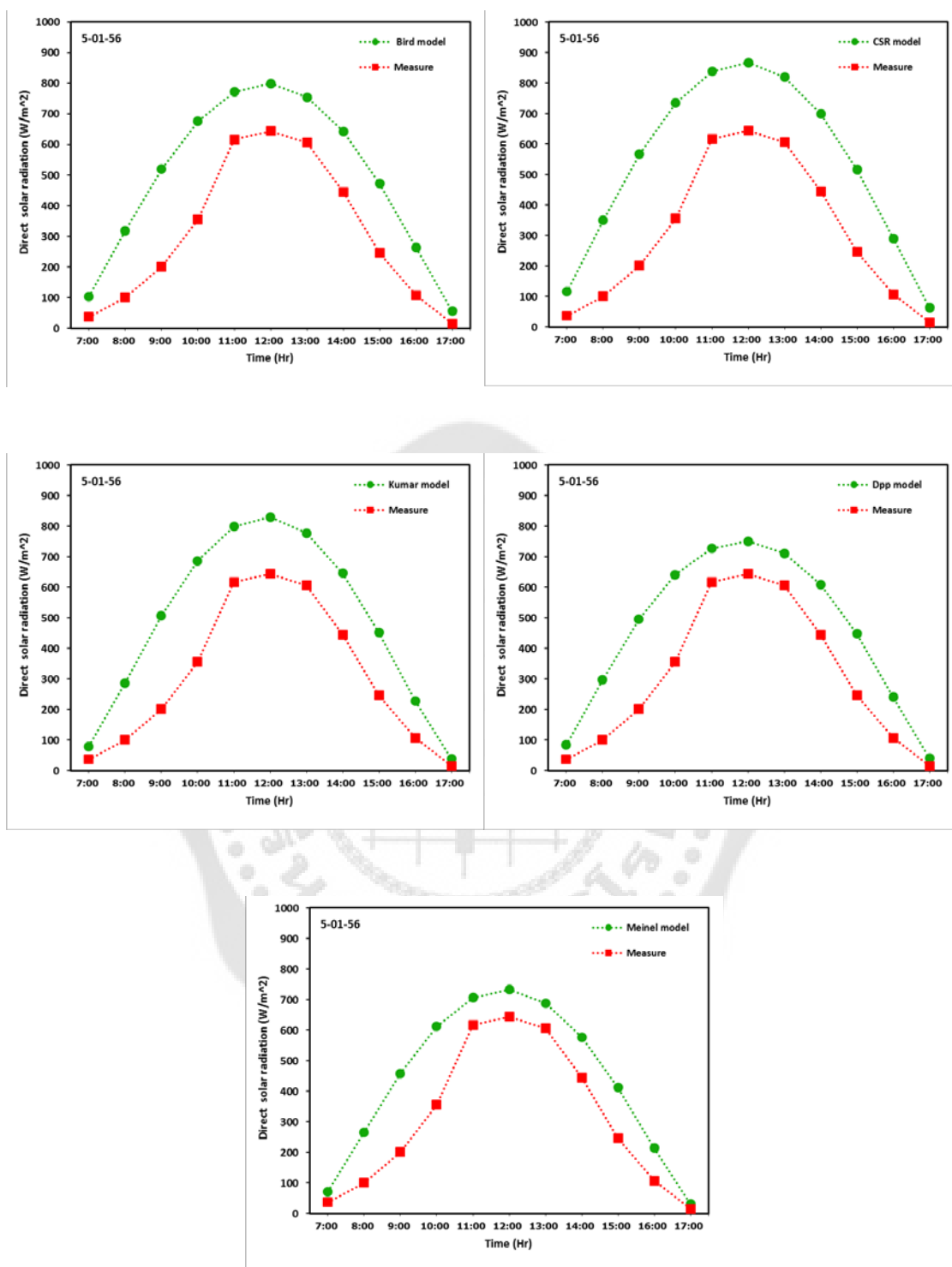
ภาพประกอบ 17 กราฟค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัด เทียบกับเวลารายชั่วโมงของวันที่ 6 มีนาคม พ.ศ. 2555



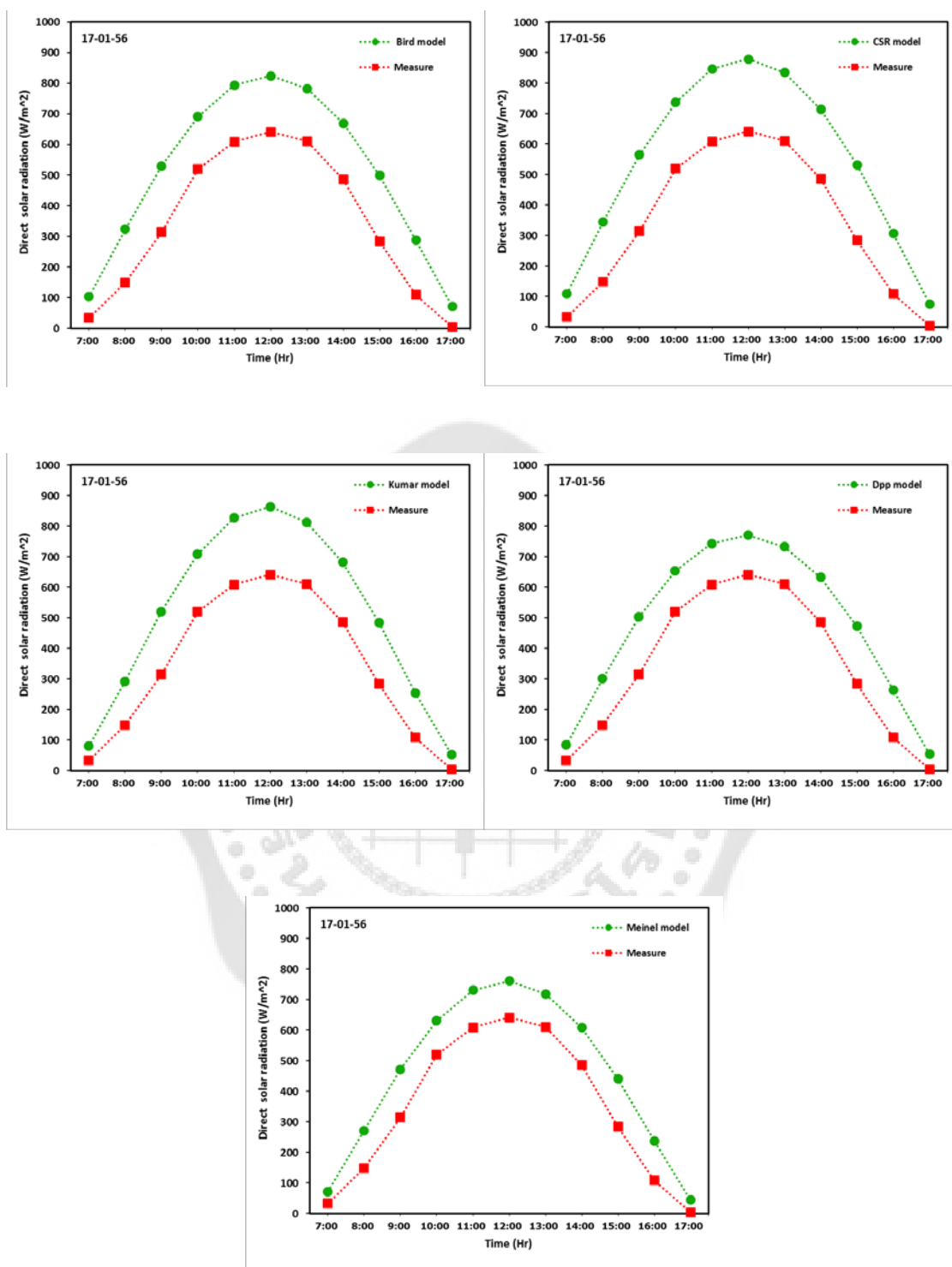
ภาพประกอบ 18 กราฟค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัด เทียบกับเวลารายชั่วโมงของวันที่ 21 มีนาคม พ.ศ. 2555



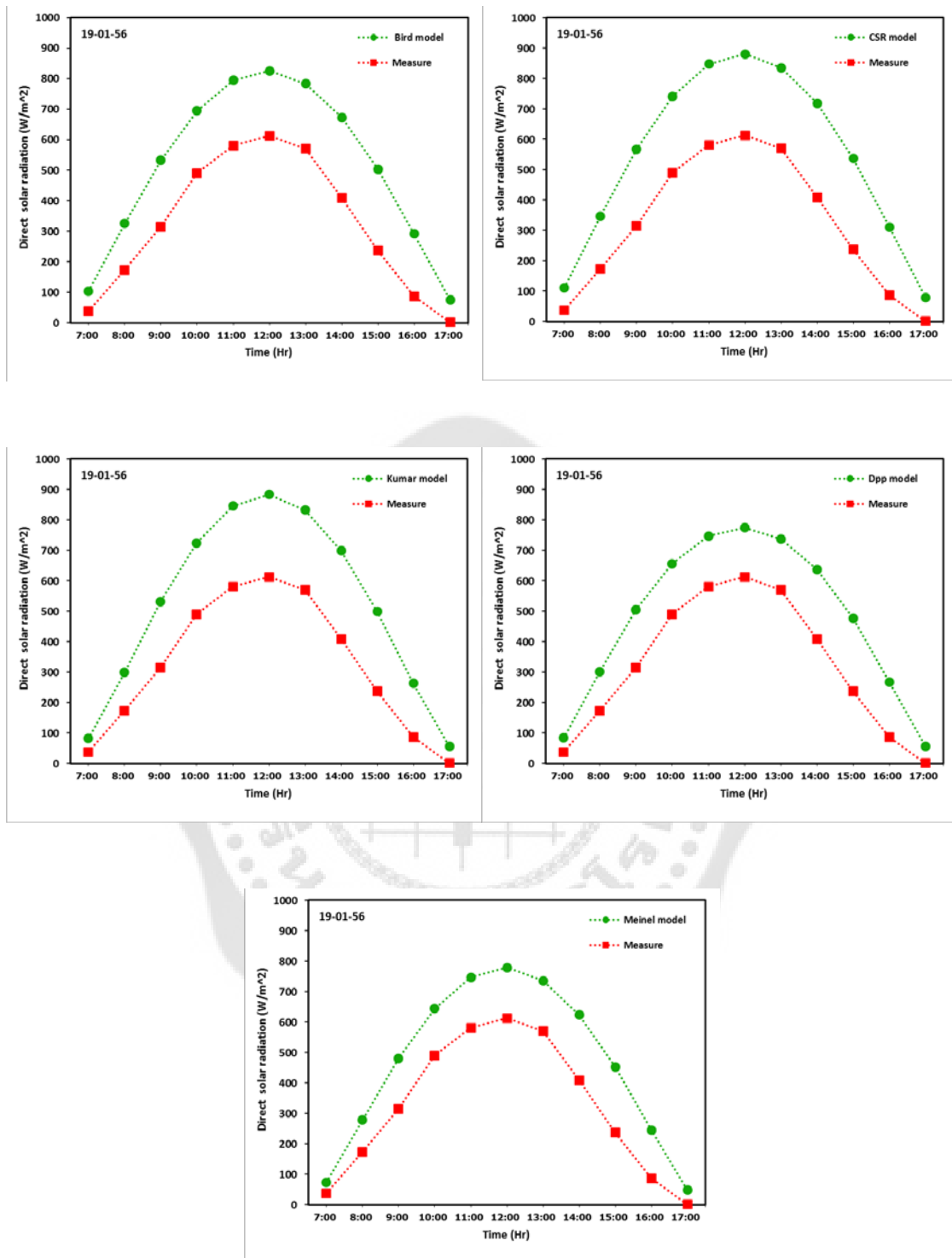
ภาพประกอบ 19 กราฟค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัด เทียบกับเวลารายชั่วโมงของวันที่ 3 มกราคม พ.ศ. 2556



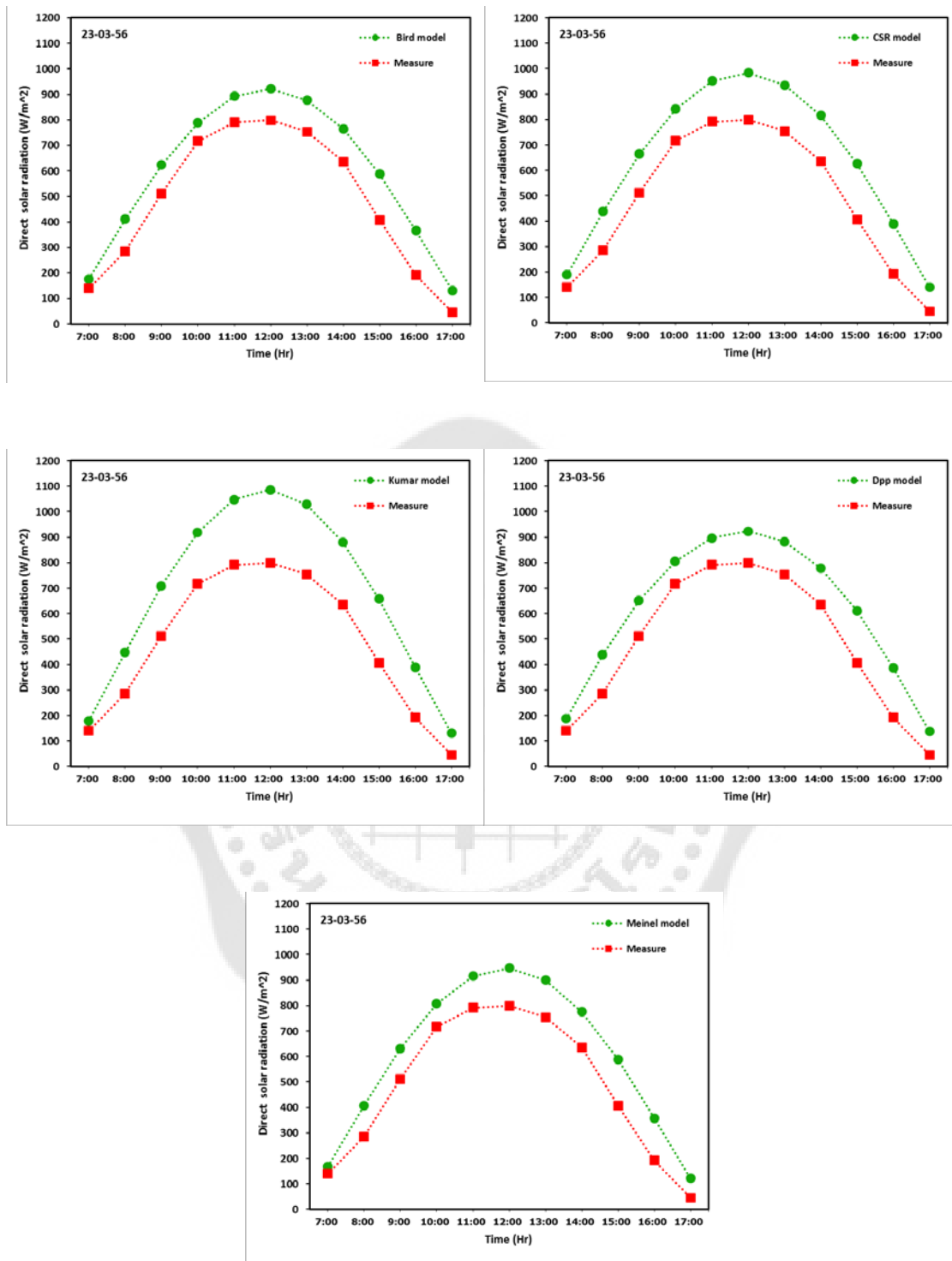
ภาพประกอบ 20 กราฟค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัด เทียบกับเวลารายชั่วโมงของวันที่ 5 มกราคม พ.ศ. 2556



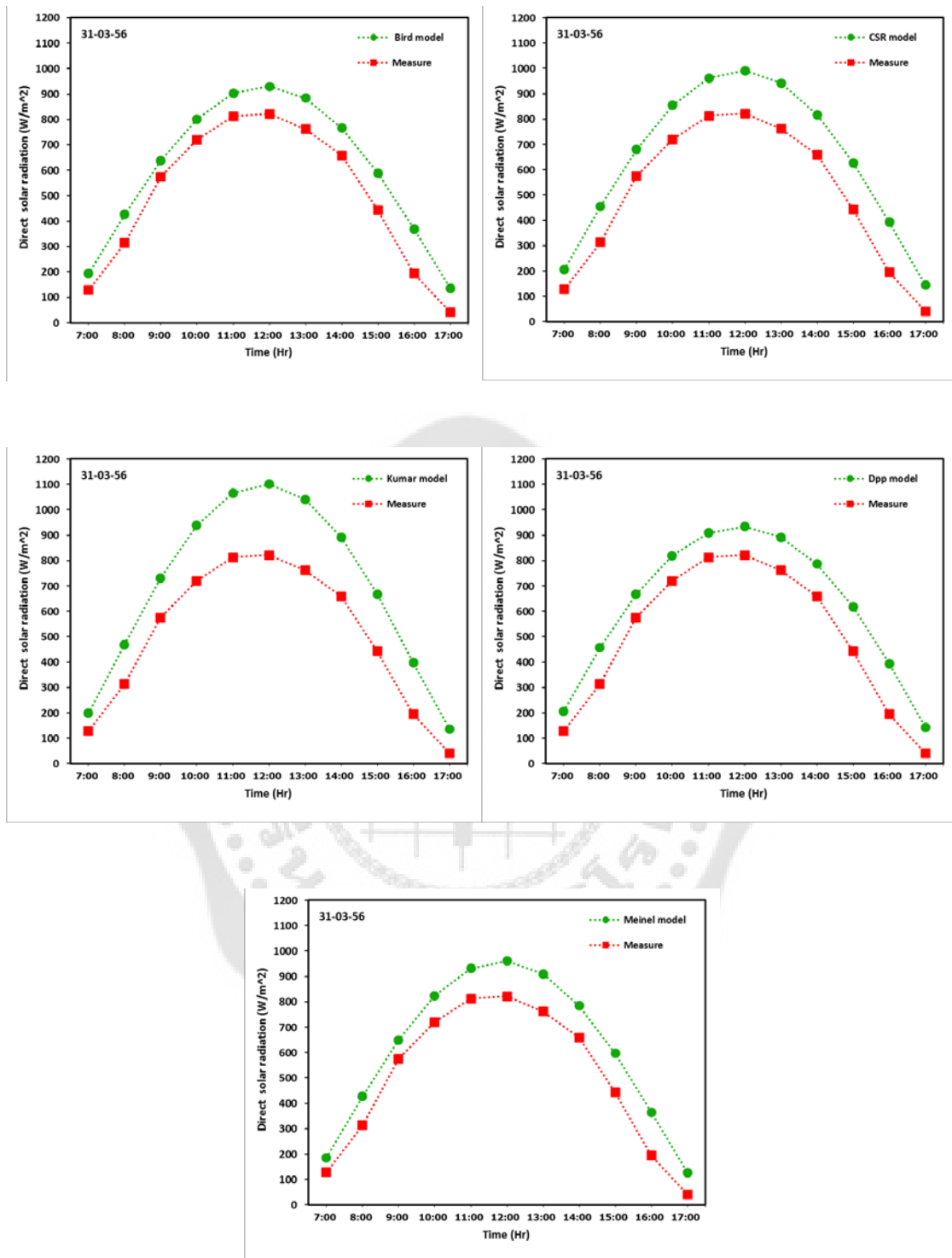
ภาพประกอบ 21 กราฟค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัด เทียบกับเวลารายชั่วโมงของวันที่ 17 มกราคม พ.ศ. 2556



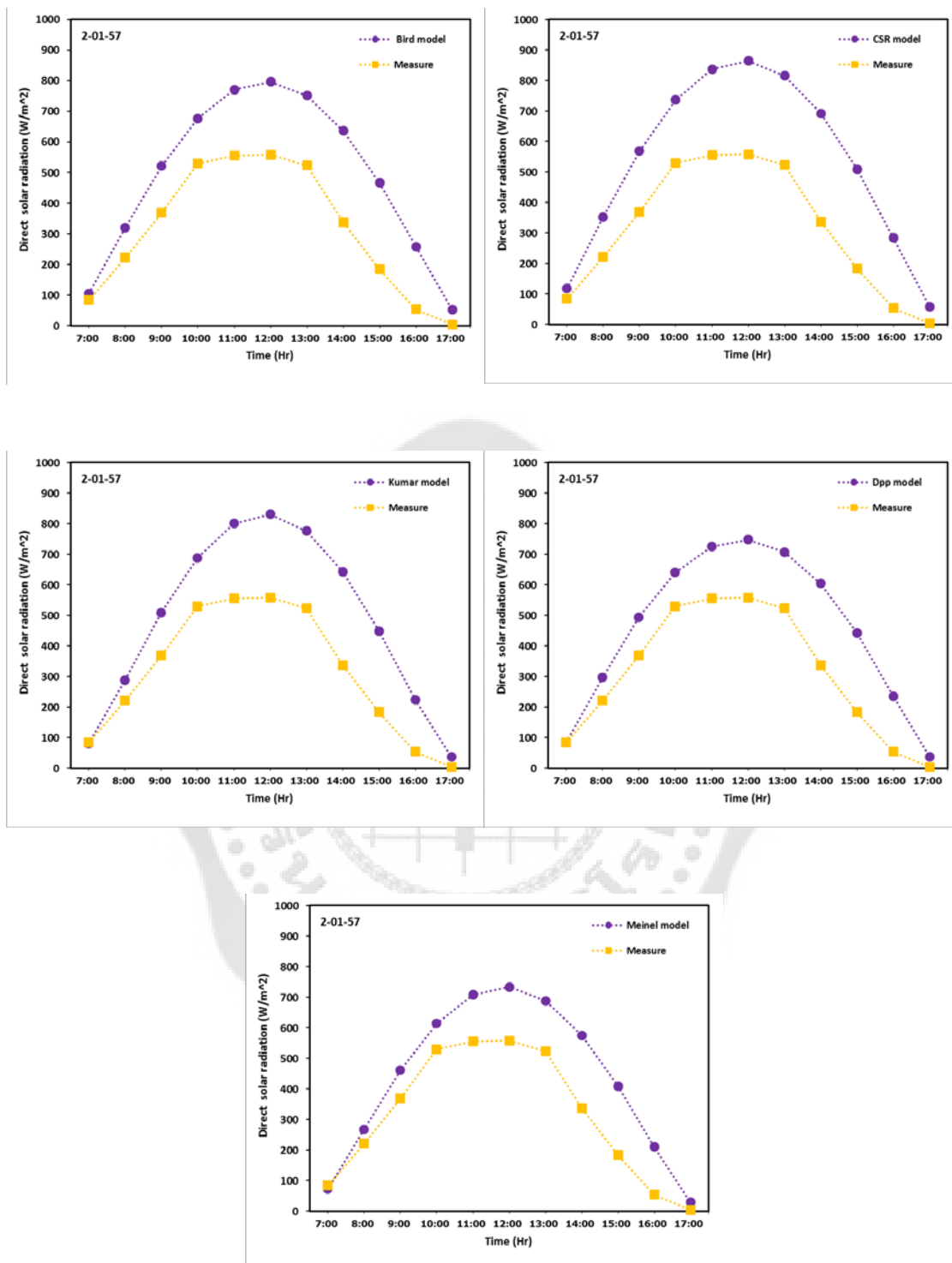
ภาพประกอบ 22 กราฟค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัด เทียบกับเวลารายชั่วโมงของวันที่ 19 มกราคม พ.ศ. 2556



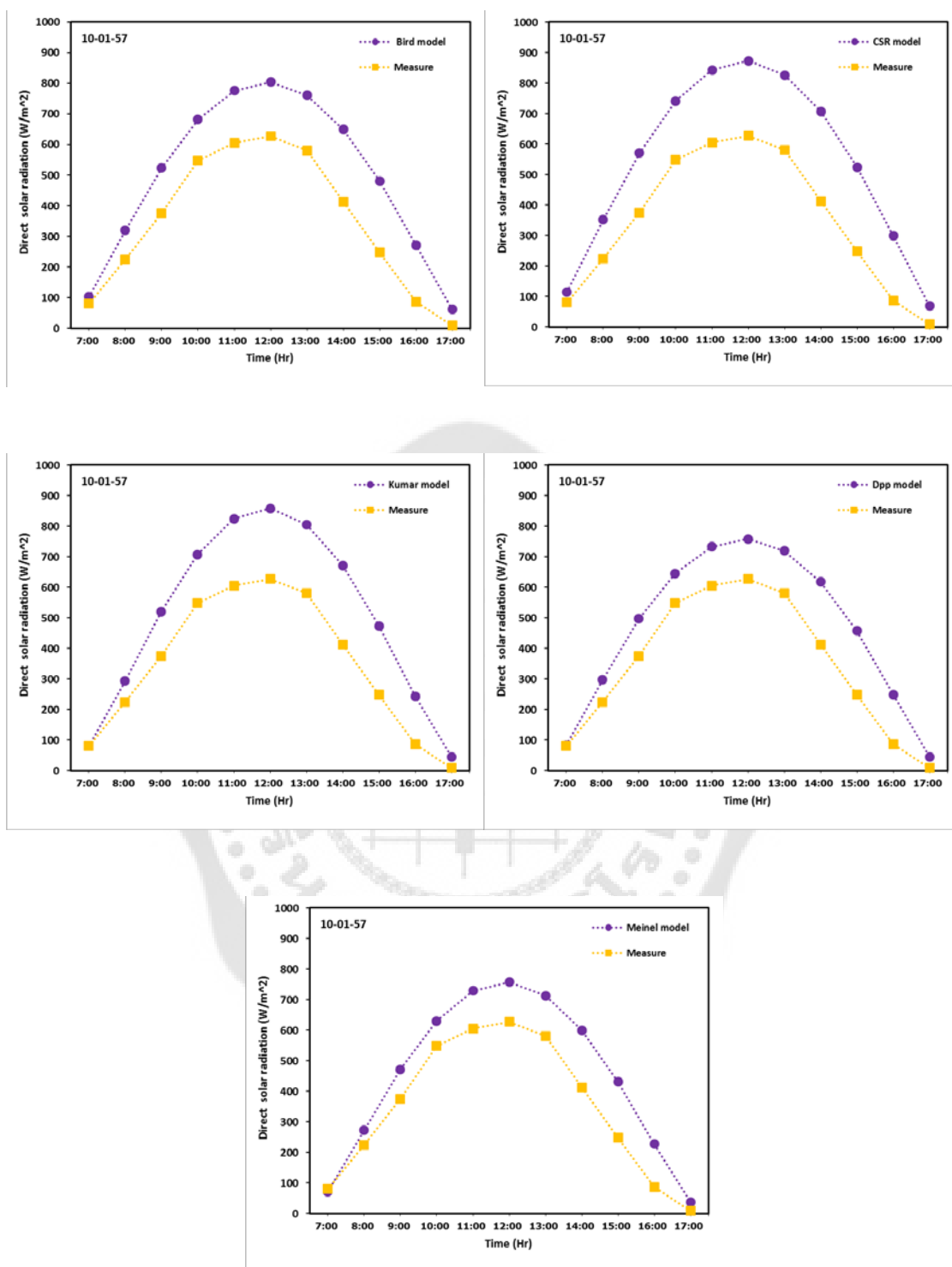
ภาพประกอบ 23 กราฟค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัด เทียบกับเวลารายชั่วโมงของวันที่ 23 มีนาคม พ.ศ. 2556



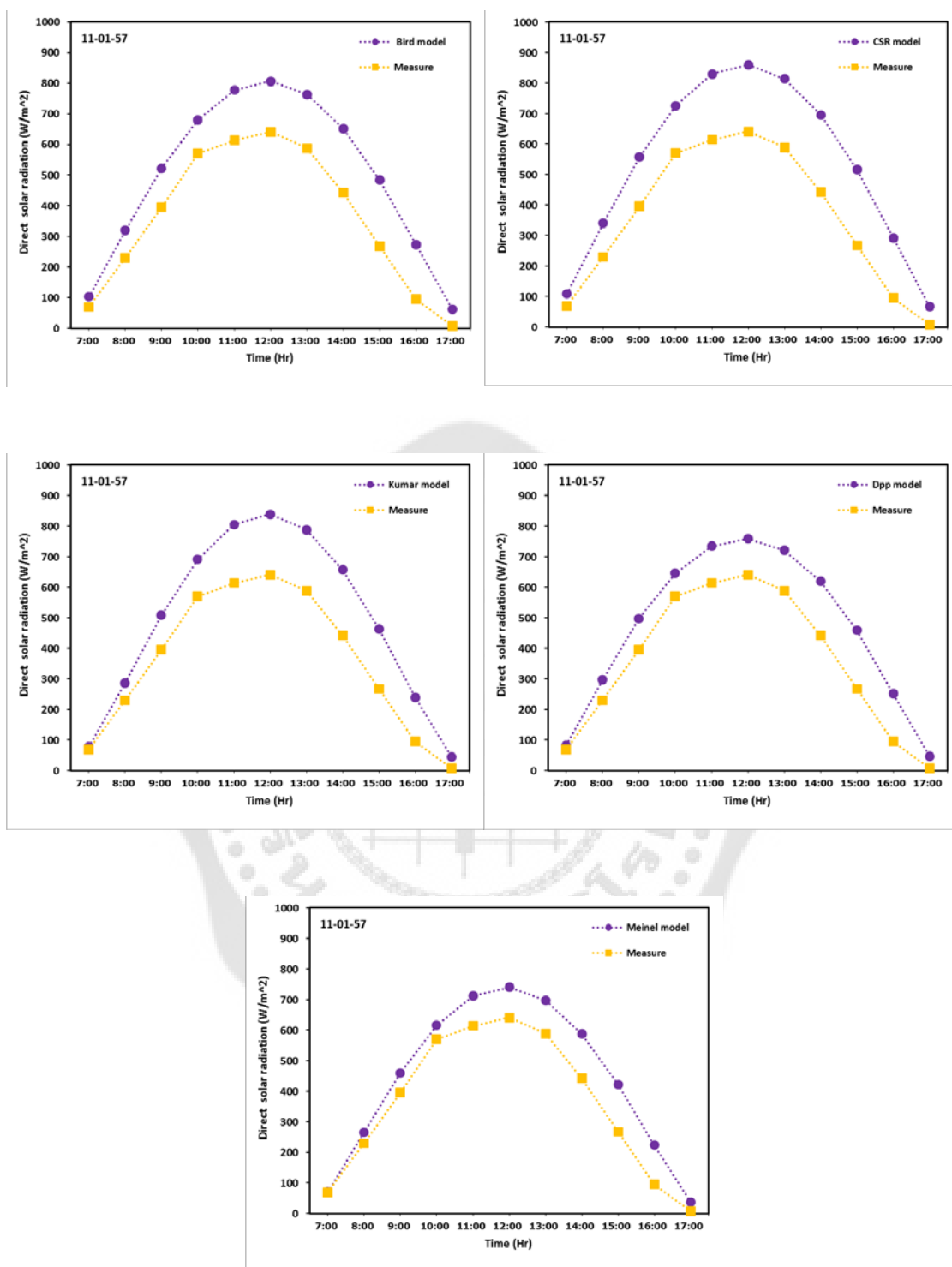
ภาพประกอบ 24 กราฟค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัด เทียบกับเวลารายชั่วโมงของวันที่ 31 มีนาคม พ.ศ. 2556



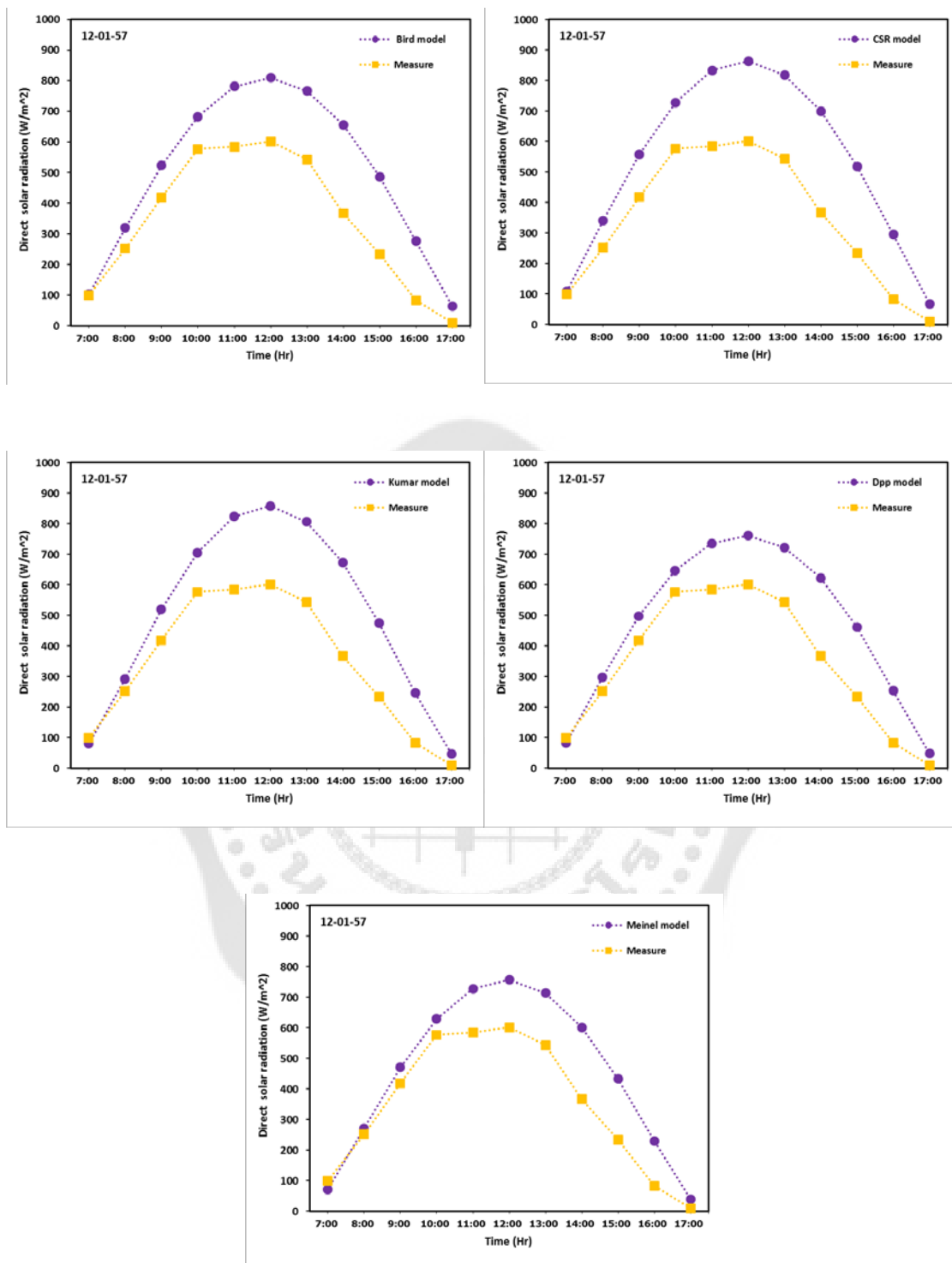
ภาพประกอบ 25 กราฟค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัด เทียบกับเวลารายชั่วโมงของวันที่ 2 มกราคม พ.ศ. 2557



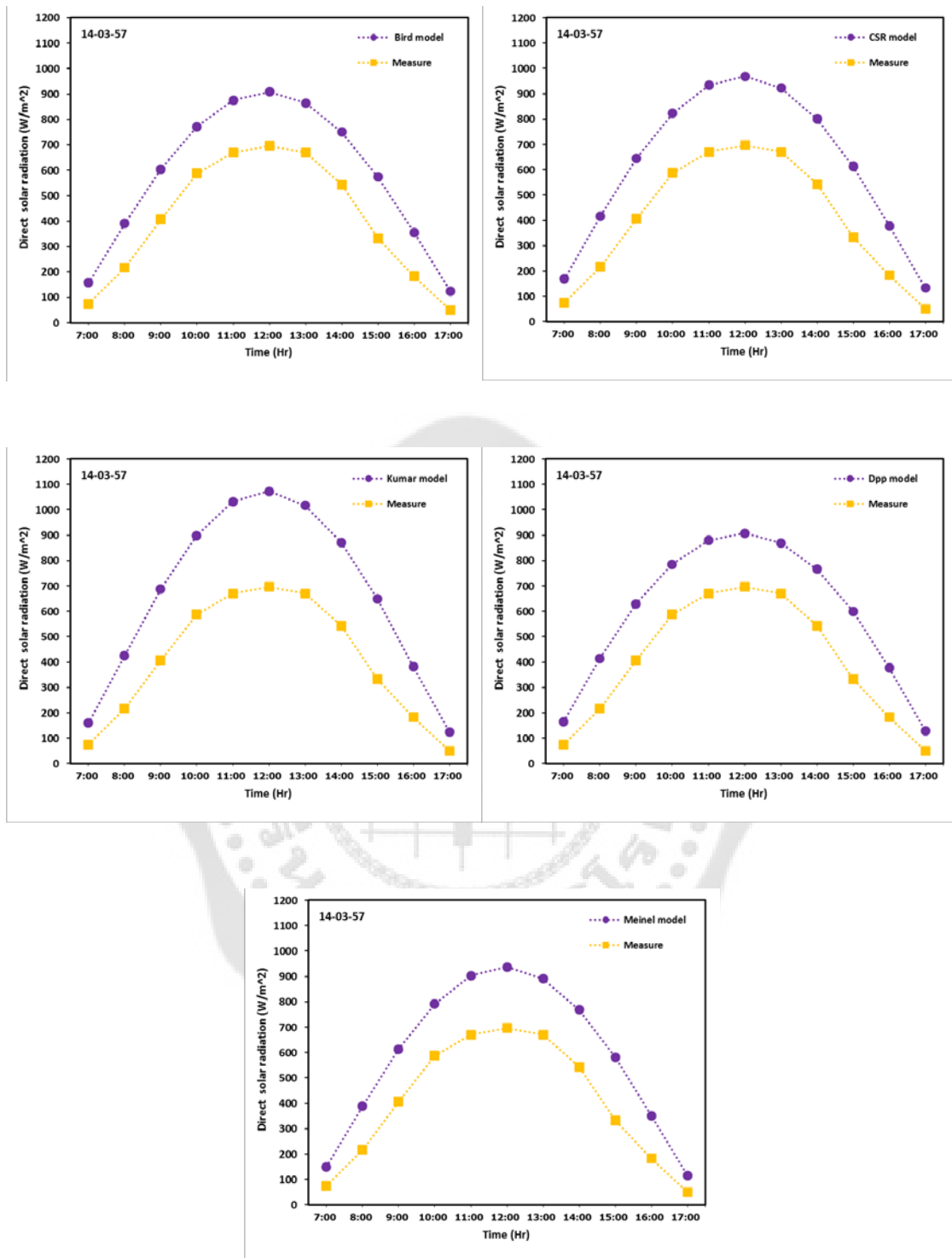
ภาพประกอบ 26 กราฟค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัด เทียบกับเวลารายชั่วโมงของวันที่ 10 มกราคม พ.ศ. 2557



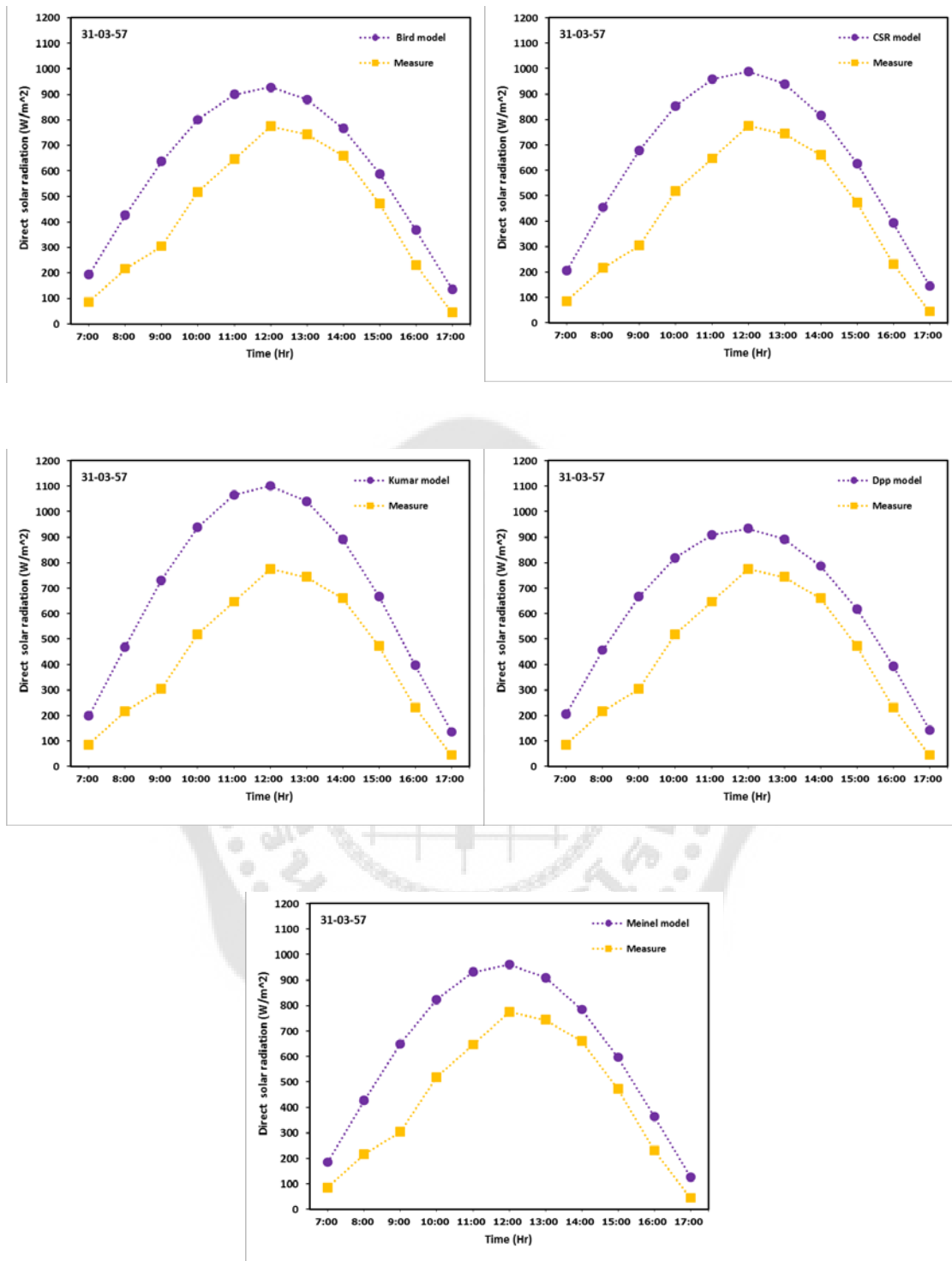
ภาพประกอบ 27 กราฟค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัด เทียบกับเวลารายชั่วโมงของวันที่ 11 มกราคม พ.ศ. 2557



ภาพประกอบ 28 กราฟค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัด เทียบกับเวลารายชั่วโมงของวันที่ 12 มกราคม พ.ศ. 2557



ภาพประกอบ 29 กราฟค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัด เทียบกับเวลารายชั่วโมงของวันที่ 14 มีนาคม พ.ศ. 2557

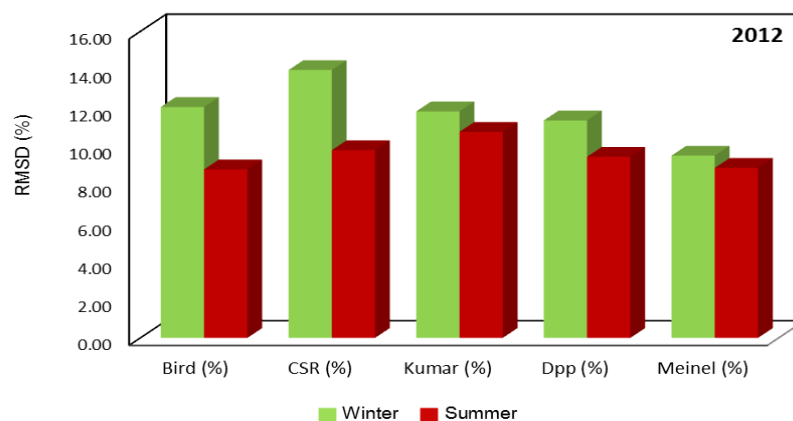


ภาพประกอบ 30 กราฟค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองและค่าที่ได้จากการวัด เทียบกับเวลารายชั่วโมงของวันที่ 31 มีนาคม พ.ศ. 2557

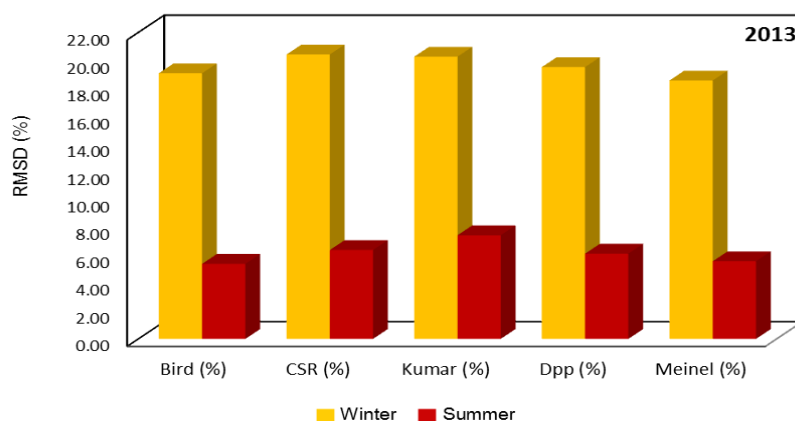
จากผลการเขียนกราฟแสดงค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลอง และค่าที่ได้จากการวัดจริง เทียบกับเวลาแต่ละชั่วโมง ดังในภาพประกอบ 13-30 พบว่ากราฟที่ได้จากการคำนวณและกราฟที่ได้จากการวัดมีลักษณะเป็นรูปประฆังคว่ำที่เส้นกราฟต่อเนื่องและไม่พบการตกของเส้นกราฟ และพบว่ากราฟที่ได้จากการวัดจะให้ค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณในทุกช่วงเวลาซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณของเมฆ และเมื่อนำค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณรายชั่วโมงมาเฉลี่ยรายวัน พบว่าในฤดูหนาว (เดือนมกราคม) ของทั้ง 3 ปี มีค่าการแผ่รังสีตรงเฉลี่ยรายวันอยู่ระหว่าง $440-570 \text{ W/m}^2$ และในช่วงฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ของทั้ง 3 ปี มีค่าการแผ่รังสีตรงเฉลี่ยรายวันอยู่ระหว่าง $550-700 \text{ W/m}^2$ และพบว่ามีหลายแบบจำลองที่ให้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการทดสอบค่าความน่าเชื่อถือของแบบจำลองจากการคำนวณเพื่อให้ได้แบบจำลองที่ดีที่สุด โดยใช้การทดสอบทางสถิติ ซึ่งมีรายละเอียดของค่าที่ได้จากการทดสอบทางสถิติแสดงดังหัวข้อต่อไป

4.4 การทดสอบความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้การทดสอบทางสถิติ (Statistical test)

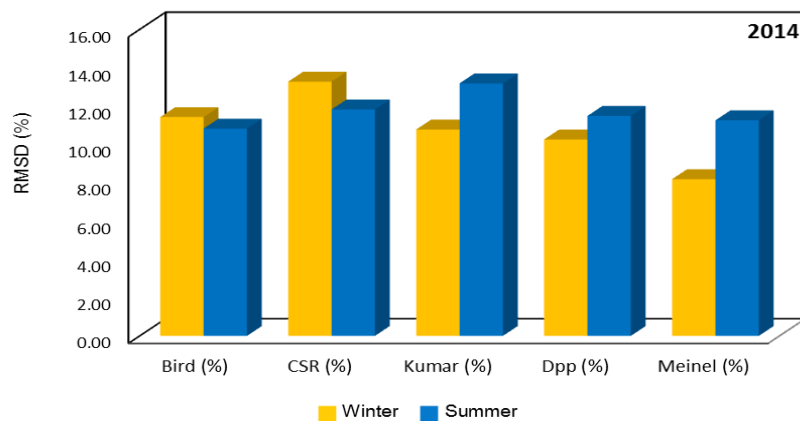
ผลการทดสอบความน่าเชื่อถือของค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลอง โดยใช้วิธีการทดสอบทางสถิติ 3 วิธี ตามสมการ 35, 38 และ 39 ได้แก่ รากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง (RMSD) ความแตกต่างในรูปความเอนเอียงเฉลี่ย (MBD) และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของฤดูหนาวและฤดูร้อน ปี พ.ศ. 2555-2557 และค่าที่ได้จากการทดสอบทางสถิติ (Statistical test) ของแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลอง ในฤดูหนาวและฤดูร้อน เฉลี่ย 3 ปี มีรายละเอียดดังแสดงในภาพประกอบ 31-41 ตามลำดับ



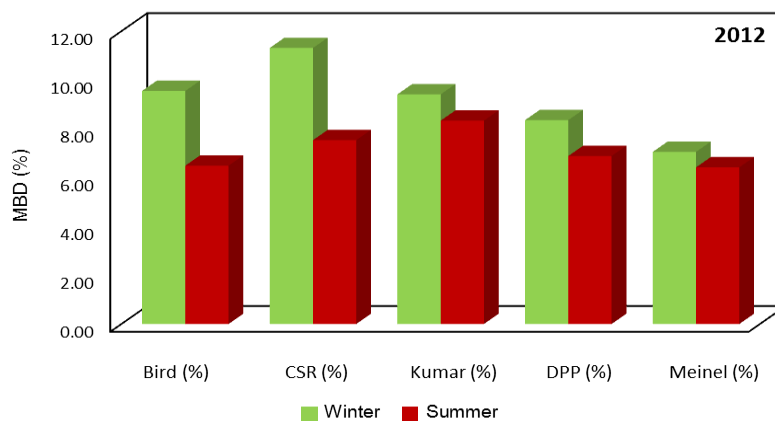
ภาพประกอบ 31 กราฟค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง (RMSD) ของแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองของฤดูหนาวและฤดูร้อน ปี พ.ศ.2555



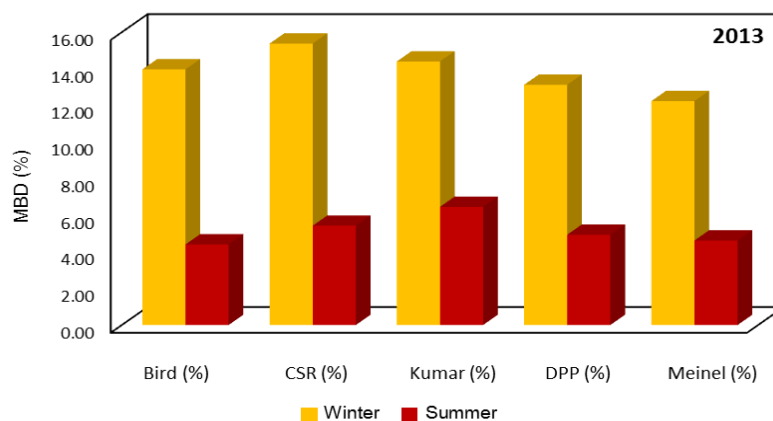
ภาพประกอบ 32 กราฟค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง (RMSD) ของแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองของฤดูหนาวและฤดูร้อน ปี พ.ศ.2556



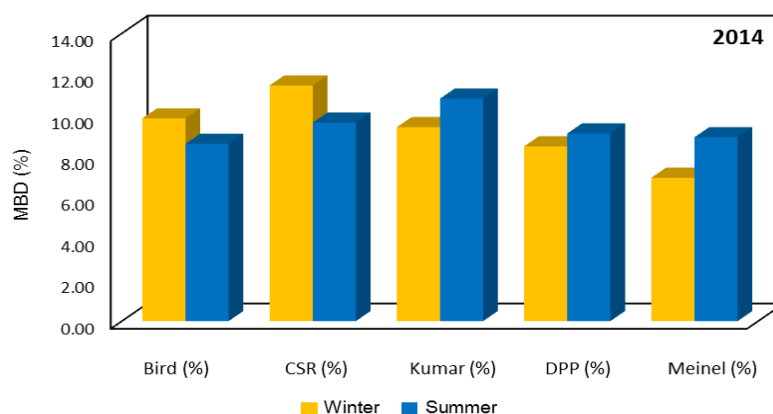
ภาพประกอบ 33 กราฟค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง (RMSD) ของแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองของฤดูหนาวและฤดูร้อน ปี พ.ศ.2557



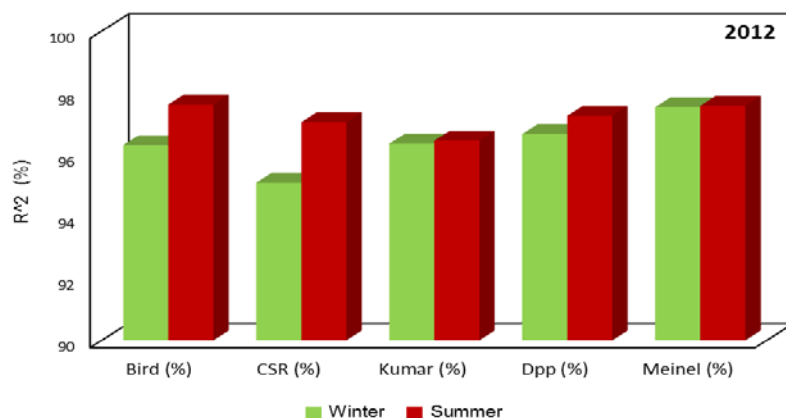
ภาพประกอบ 34 กราฟค่าความแตกต่างในรูปความเอนเชิงเฉลี่ย (MBD) ของแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองของฤดูหนาวและฤดูร้อน ปี พ.ศ.2555



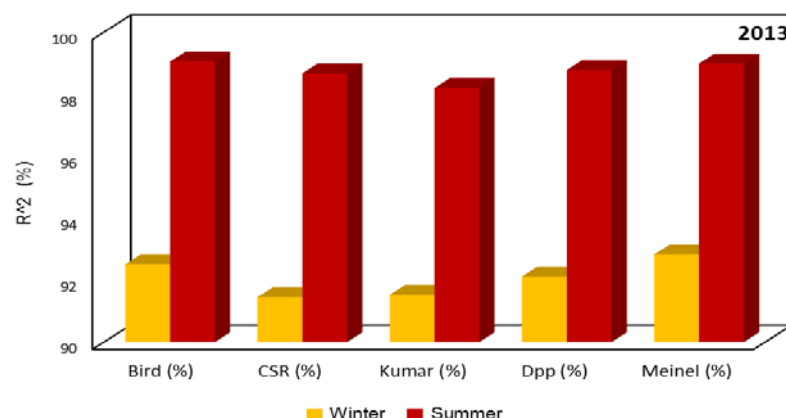
ภาพประกอบ 35 กราฟค่าความแตกต่างในรูปความเอนเอียงเฉลี่ย (MBD) ของแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองของฤดูหนาวและฤดูร้อน ปี พ.ศ.2556



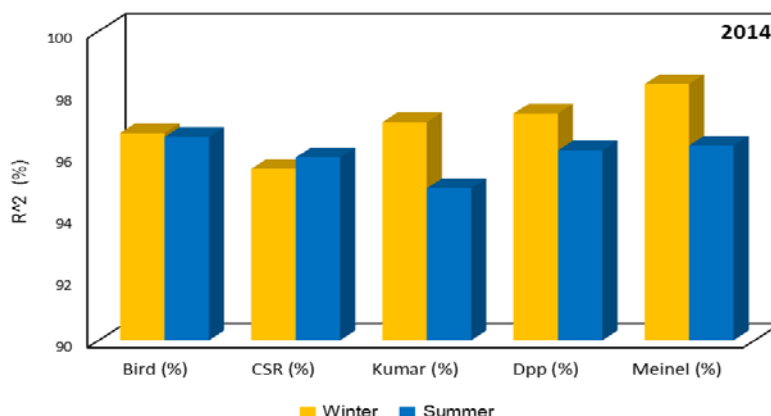
ภาพประกอบ 36 กราฟค่าความแตกต่างในรูปความเอนเอียงเฉลี่ย (MBD) ของแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองของฤดูหนาวและฤดูร้อน ปี พ.ศ.2557



ภาพประกอบ 37 กราฟค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองของฤดูหนาวและฤดูร้อน ปี พ.ศ.2555

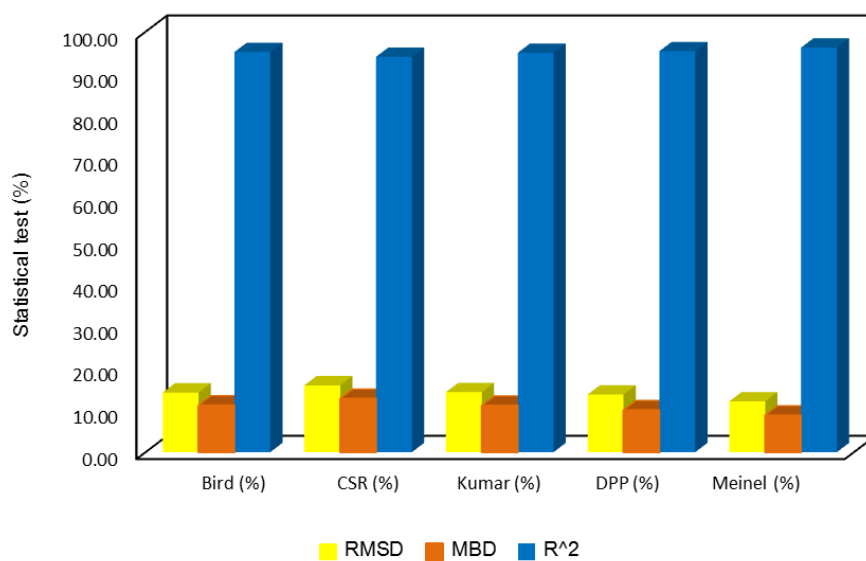


ภาพประกอบ 38 กราฟค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองของฤดูหนาวและฤดูร้อน ปี พ.ศ.2556

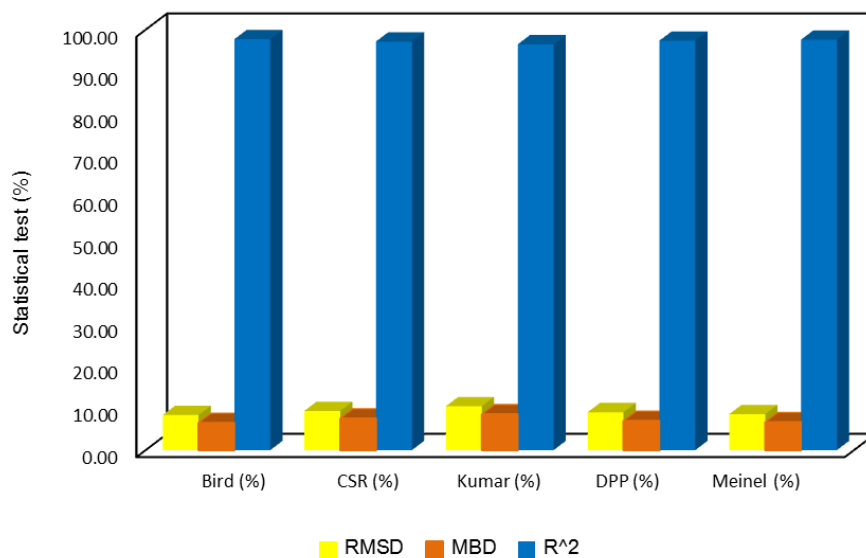


ภาพประกอบ 39 กราฟค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ของแบบจำลอง
ทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองของฤดูหนาวและฤดูร้อน ปี พ.ศ.2557

จากภาพประกอบ 31-39 พบว่าในฤดูหนาวแบบจำลองที่มีความน่าเชื่อถือมากที่สุด ได้แก่ แบบจำลองมีเนล แบบจำลองดาเนชเยอร์พอลทริดพรอดเตอร์ แบบจำลองคูมาร์ แบบจำลองเบิร์ด และแบบจำลองซีเอสอาร์ เรียงตามลำดับ โดยมีค่า RMSD MBD และค่า R^2 อยู่ในช่วง 8.18% ถึง 20.42% , 6.98% ถึง 15.38% และ 91.45% ถึง 98.29% ตามลำดับ และในฤดูร้อนพบว่าแบบจำลองที่มีความน่าเชื่อถือมากที่สุด ได้แก่ แบบจำลองมีเนล แบบจำลองเบิร์ด แบบจำลองดาเนชเยอร์พอลทริดพรอดเตอร์ แบบจำลองซีเอสอาร์ และแบบจำลองคูมาร์ เรียงตามลำดับ โดยมีค่า RMSD MBD และค่า R^2 อยู่ในช่วง 5.02% ถึง 13.19% , 4.11% ถึง 10.82% และ 94.92% ถึง 99.10% ตามลำดับ



ภาพประกอบ 40 กราฟแสดงค่าที่ได้จากการทดสอบทางสถิติ (Statistical test) ของแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลอง ในฤดูหนาว เฉลี่ย 3 ปี



ภาพประกอบ 41 กราฟแสดงค่าที่ได้จากการทดสอบทางสถิติ (Statistical test) ของแบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลอง ในฤดูร้อน เฉลี่ย 3 ปี

จากภาพประกอบ 40-41 พบว่าแบบจำลองที่มีความน่าเชื่อถือมากที่สุดทั้งในฤดูหนาวและฤดูร้อน เฉลี่ย 3 ปี คือ แบบจำลองมีเนล โดยพบว่ามีค่า RMSD MBD และ R^2 ในฤดูหนาวเท่ากับ 12.08% 8.75% และ 96.22% ตามลำดับ และในฤดูร้อนเท่ากับ 8.38% 6.49% และ 97.80% ตามลำดับ



บทที่ 5

สรุปผลและวิจารณ์

5.1 สรุปผลและวิจารณ์

จากผลการวิจัยในบทที่ 4 สามารถสรุปและวิจารณ์ได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 การพิจารณาวันที่สภาพท้องฟ้าโปร่ง (Clear day)

จากผลการพิจารณาวันที่สภาพท้องฟ้าโปร่ง (Clear day) หรือวันที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆที่ได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแผ่รังสีสุทธิที่ได้จากเครื่องไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer) เทียบกับเวลา สามารถแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าท้องฟ้าในแต่ละวันมีลักษณะที่ไม่เหมือนกัน บางวันท้องฟ้ามีลักษณะโปร่งและบางวันท้องฟ้ามีเมฆมากหรือมีเมฆเป็นบางส่วน จึงทำให้ไม่สามารถเลือกวันเลือกวันที่จะมาวิเคราะห์ได้ทั้งหมด โดยการเลือกวันจะพิจารณาจากกราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นรูปประฆังคว่ำที่เส้นกราฟต่อเนื่องและไม่พบการตกของเส้นกราฟซึ่งจะแสดงว่าสภาพท้องฟ้าค่อนข้างโปร่งตลอดทั้งวัน ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกวันที่เป็นตัวแทนในการวิเคราะห์ข้อมูลของปี พ.ศ. 2555-2557 ทั้ง 2 ฤดูกาล คือฤดูหนาว (เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ดังภาพประกอบ 10-12 โดยจะเห็นว่าจากรายงานสภาวะอากาศประเทศไทยเดือนมีนาคมของปี พ.ศ. 2555-2557 จะมีลมมรสุมตะวันออกเฉียงใต้พัดปกคลุมตลอดทั้งเดือน และมีฝนกับฝนตกหนักบางพื้นที่ในบางช่วงเวลาดังนั้นในเดือนมีนาคมท้องฟ้าส่วนใหญ่จึงเป็นท้องฟ้าที่ค่อนข้างมีเมฆ ทำให้ในช่วงเดือนมีนาคมมีวันที่ท้องฟ้าโปร่งน้อยกว่าช่วงเดือนมกราคมที่เป็นฤดูหนาว

5.1.2 การเขียนกราฟแสดงค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์โดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศและค่าที่ได้จากการวัดจริงเทียบกับเวลารายชั่วโมงและเฉลี่ยรายวัน

จากภาพประกอบ 13-30 แสดงผลการเขียนกราฟแสดงค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลองได้แก่ แบบจำลองเบิร์ด แบบจำลองซีเอสอาร์ แบบจำลองคูมาร์ แบบจำลองดาเนซเยอร์พอลทริดพรอคเตอร์ และแบบจำลองมีเนล และค่าที่วัดได้จริง เทียบกับเวลา ตั้งแต่เวลา 07:00-17:00 น. โดยภาพรวมสรุปได้ว่ากราฟที่จากการคำนวณและกราฟที่ได้จากการวัดให้ค่าที่มีแนวโน้มคล้ายกันในทุกช่วงเวลา โดยกราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นรูปประฆังคว่ำที่มีเส้นกราฟต่อเนื่อง และไม่พบการตกของเส้นกราฟและพบว่ากราฟที่ได้จากการวัดให้ค่าที่ต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณในทุกช่วงเวลา ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของปริมาณเมฆที่ทำให้รังสีที่วัดได้มีค่าลดลง และเมื่อนำค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ได้จากการคำนวณรายชั่วโมงมาเฉลี่ยรายวัน พบว่าในช่วงฤดูร้อน(เดือนมีนาคม) ของทั้ง 3 ปี มีค่าการ

แผ่รังสีตรงเฉลี่ยรายวันมากกว่าในช่วงฤดูหนาว (เดือนมกราคม) ซึ่งสอดคล้องกับแผนที่ศักยภาพพลังงานแสงดวงอาทิตย์ของประเทศไทย ที่สรุปว่าการกระจายความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ในช่วงเดือนมีนาคม ดวงอาทิตย์จะอยู่ที่บริเวณเส้นศูนย์สูตรท้องฟ้า มุมตกกระทบของรังสีดวงอาทิตย์ตอนเที่ยงวันจะตั้งฉากหรือเกือบตั้งฉากกับพื้นผิวโลก ดังนั้นในช่วงเดือนนี้จึงมีความเข้มรังสีดวงอาทิตย์โดยเฉลี่ยสูงกว่าเดือนอื่น

5.1.3 การทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่ได้จากการคำนวณ

ผลจากการทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้การทดสอบทางสถิติ(Statistical test) ทั้ง 3 วิธี ได้แก่ รากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง (RMSD) ความแตกต่างในรูปความเอนเอียงเฉลี่ย (MBD) และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) พบว่าแบบจำลองที่มีความน่าเชื่อถือมากที่สุดทั้งในฤดูหนาวและฤดูร้อน คือ แบบจำลองมีเนล โดยที่แบบจำลองดังกล่าวนี้เป็นแบบจำลองที่รูปแบบการคำนวณที่ค่อนข้างง่าย ไม่ซับซ้อน และอาศัยพารามิเตอร์ไม่มากในการคำนวณ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Behar และคณะ (Omar Behar: & et al. 2015: 236-251) ที่ได้ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ภายใต้สภาพบรรยากาศแอลจีเลียน (ประเทศแอลจีเรีย) จำนวน 17 แบบจำลอง เพื่อจะเลือกแบบจำลองที่มีความถูกต้องมากที่สุดสำหรับการประเมินผลการดำเนินงานของโครงการพลังงานแสงอาทิตย์ และพบว่าแบบจำลองที่มีรูปแบบที่ง่ายซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีรูปแบบการคำนวณที่ไม่ซับซ้อนและมีจำนวนพารามิเตอร์ที่ไม่มากเป็นแบบจำลองที่มีความถูกต้องแม่นยำมากกว่าแบบจำลองที่มีรูปแบบที่ซับซ้อนและที่อาศัยพารามิเตอร์จำนวนมาก และผลจากการทดสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองมีเนลพบว่าในฤดูหนาวมีค่า RMSD, MBD และ R^2 เท่ากับ 12.08% 8.75% และ 96.22% ตามลำดับ และในฤดูร้อนเท่ากับ 8.38% 6.49% และ 97.80% ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าแบบจำลองมีเนลเป็นแบบจำลองที่แสดงประสิทธิภาพที่มีความน่าเชื่อถือที่สุดในการคำนวณหาค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์

5.2 ข้อเสนอแนะในการทำวิจัย

5.2.1 ผลที่ได้จากการคำนวณในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการคำนวณหาค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์โดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศสามารถให้ค่าได้ทันที และสามารถคำนวณได้ตลอดทั้งวันหรือ 24 ชั่วโมง ซึ่งจะสามารถคำนวณย้อนหลังหรือประมาณค่าในอนาคตได้หลายปีโดยไม่ต้องอาศัยเครื่องมือวัด โดยใช้เพียงพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameter) และพารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศ (Atmospheric parameter) ในการคำนวณ และข้อมูลที่ได้นี้ยังสามารถเก็บเป็นข้อมูลอ้างอิงของประเทศไทยได้ต่อไป

5.2.2 เทคนิคการคำนวณในงานวิจัยนี้ จะให้ค่าที่ถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือจึงจำเป็นต้องเลือกคำนวณในวันที่ท้องฟ้าโปร่ง (Clear day) หรือวันที่ปราศจากเมฆ ซึ่งใน 1 ปี จะมีวันที่ท้องฟ้าโปร่งเพียงไม่กี่วันเท่านั้น โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงฤดูหนาว และฤดูร้อน หรือในช่วงเดือนมกราคม – เมษายน ซึ่งถัดจากช่วงเดือนนี้ไปจะเป็นช่วงฤดูฝนและต้นฤดูหนาวท้องฟ้าจะมีปริมาณเมฆที่ค่อนข้างมากทำให้ค่าที่ได้จากการคำนวณให้ค่าที่คลาดเคลื่อนไปจากค่าที่วัดได้จริง

5.2.3 ค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameter) และพารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศ (Atmospheric parameter) เช่น มุมเซนนิทดวงอาทิตย์ มุมซัวโมง มวลอากาศ และอุณหภูมิจุดน้ำค้าง เป็นต้น ควรเป็นค่าที่ได้จากสถานที่ที่ต้องการคำนวณและเป็นค่าในเวลาที่ต้องการคำนวณจริง ค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่คำนวณได้จึงจะให้ค่าที่ถูกต้อง มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริง และมีความน่าเชื่อถือมากที่สุด





บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ร่วมกับ ห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร. (2551). *เครือข่ายการตรวจวัด
ความเข้มรังสีตรงและศักยภาพรังสีตรงในประเทศไทย*. รายงานวิจัย. กรุงเทพฯ: ภาควิชา
ฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- กมลลา ศรีเจริญ. (2552). *การพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ภายใต้
สภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆ*. วิทยานิพนธ์ กศ.ม. (ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยศิลปากร. ถ่ายเอกสาร.
- ทรงกต ทศานนท์. (2547). *หลักอุณหภูมิมิวิทยา*. นครราชสีมา: สาขาวิชาการรับรู้ระยะไกล สำนัก
วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์, คณิตา ตั้งคณานุรักษ์. (2552). *เคมีบรรยากาศ*. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เนตรนภา ชิวปรีชา. (2548). *การศึกษาปริมาณโอโซนในบรรยากาศของประเทศไทย*. วิทยานิพนธ์
กศ.ม.(ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร. ถ่ายเอกสาร.
- ภูวกฤต ใจหอม. (2553). *ความลึกเชิงแสงของละอองลอยที่ขึ้นกับความยาวคลื่นในปี 2546 ณ
อ่าวศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย*. วิทยานิพนธ์ กศ.ม.(ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิต
วิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร.
- วิไลลักษณ์ ตั้งเจริญ. (2540). *อุณหภูมิมิวิทยา*. กรุงเทพฯ: ม.ป.พ.
- ศิริลักษณ์ เรืองรุ่งโรจน์, อรุณีย์ อินทศร. (2553). *การหาค่าความลึกเชิงแสงของละอองลอยที่ขึ้นกับ
สเปกตรัมของแสง ในการศึกษาบรรยากาศ ณ อ่าวศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัยด้วยเครื่องเรดิ
โอมิเตอร์ MFR-7*. รายงานวิจัย. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. ถ่ายเอกสาร.
- สายนต์ โพธิ์เกตุ. (2542). *การศึกษาการลดลงของรังสีดวงอาทิตย์เนื่องจากฝุ่นละอองในบรรยากาศ
ของประเทศไทย*. วิทยานิพนธ์ กศ.ม.(ฟิสิกส์). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย
ศิลปากร. ถ่ายเอกสาร.
- Alexandrov, M.D.: & Lacis, A.A.: & Carlson, B.E.; & Cairns, B. (2002). *Remote Sensing of
Atmospheric Aerosols and Trace Gases by Means of Multifilter Rotating
Shadowband Radiometer, Part I: Retrieval Algorithm*. Journal of Atmospheric
Science. 59: 524–543.

- Besharat, F.; & Dehghan A. A.; & Faghin R. A. (2013). *Empirical models for estimating global solar radiation. A review and case study*. 21: 798-821.
- Behar, O.; & Khellaf, A.; & Mohammedi K. (2015). *Comparison of solarradiation models and their validation under Algerian climate – The case of direct irradiance*. Energy Conversion and Management. 98: 236–251.
- Chow, W.K.; & Wong, L.T. (2001). *Solar radiation model*. Applied Energy. 69: 191–224.
- Fang, X.; & Dai, Q. (2014). *A simple model to predict solar radiation under clear sky conditions*. Advances in Space Research Volume 53, Issue 8, 15 April 2014, Pages 1239–1245.
- Geuymard, C.A. (2003). *Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I: detailed theoretical performance assessment*. Solar Energy. 74: 381–395.
- Gueymard, C.A. (2012). *Clear-sky irradiance predictions for solar resource mapping and large-scale applications: Improved validation methodology and detailed performance analysis of 18 broadband radiative models*. Solar Energy. 86: 2145–69.
- Ineichen, P. (2006). *Comparison of eight clear sky broadband models against 16 independent data banks*. Solar Energy. 80: 468–78.
- Iqbal M. (1983). *An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press, New York.
- Lawrence, M.G. (2005). *The relationship between relative humidity and the dew point temperature in moist air – a simple conversion and applications*. American Meteorological Society. BAMS. 225–233.
- Rahoma, A.U.; & Hassan, A.H. (2010). *Estimate of aerosol optical depth using broadband direct normal observations at highest polluted area in the world*. American Journal of Applied Sciences 7 (5): 647-655.
- Reno, MJ.; & Hansen, WC.; & Stein, JS. (2012). *Global horizontal irradiance clear sky models: implementation and analysis*. SANDIA report. SAND 2012-2389.

ภาคผนวก





ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์โดยใช้
แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลอง

ตัวอย่างการคำนวณ

คำนวณหาค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์โดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศทั้ง 5 แบบจำลอง ของวันที่ 9 มกราคม พ.ศ. 2555 เวลา 11:00 น. ณ สถานีกรมอุตุนิยมวิทยา บางนา กรุงเทพฯ (ละติจูด 13.67 , ลองจิจูด 100.61)

วิธีทำ

- คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ และพารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศ

- (1) คำนวณค่ามุมเดคลิเนชัน (δ)

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

โดยที่ $n_j = 9$ (สำหรับวันที่ 9 มกราคม)

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + 9) \right] = -22.2 \text{ องศา}$$

- (2) คำนวณค่าแฟกเตอร์ปรับแก้ความรีของวงโคจรของโลก (E_0)

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

เมื่อ

$$\Gamma = 2\pi \left(\frac{n_j - 1}{365} \right) = 2\pi \left(\frac{9 - 1}{365} \right) = 0.137 \text{ องศา}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$E_0 = 1.000110 + 0.034221 \cos(0.137) + 0.001280 \sin(0.137) + 0.000719 \cos(2(0.137)) + 0.000077 \sin(2(0.137))$$

$$E_0 = 1.035$$

- (3) คำนวณค่าเวลาดวงอาทิตย์ (ST)

$$ST = SDT + 4(L_{st} + L_{loc}) + E$$

เมื่อ

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868 \cos(\Gamma) - 0.032077 \sin(\Gamma) - 0.014615 \cos(2\Gamma) - 0.04089 \sin(2\Gamma))$$

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868 \cos(0.137) - 0.032077 \sin(0.137) - 0.014615 \cos(2(0.137)) - 0.04089 \sin(2(0.137))) = -6.337$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$ST = 11:00 + [4(105 + 100.61) + (-6.337)] = 11:00 + (11.22) \text{ นาที}$$

$$ST = 11:11 \text{ ชม.}$$

(4) คำนวณค่ามุมชั่วโมง (ω)

$$\omega = 15^\circ(12 - ST)$$

$$\omega = 15^\circ(12 - 11.11) = 13.32 \text{ องศา}$$

(5) คำนวณค่ามุมเซนิธดวงอาทิตย์ (θ_z)

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

$$\cos(\theta_z) = \cos(-22.2)\cos(13.67)\cos(13.3) + \sin(-22.2)\sin(13.67) = 0.786$$

$$\theta_z = \cos^{-1}(0.786) = 38.2 \text{ องศา}$$

(6) คำนวณค่ารังสีนอกบรรยากาศโลก (I_{so})

$$I_{so} = I_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \left(\frac{360}{365} n_j \right) \right)$$

$$I_{so} = 1367 \left(1 + 0.033 \cos \left(\frac{360 \times 9}{365} \right) \right) = 1412 \text{ W/m}^2$$

(7) คำนวณค่ามวลอากาศ (m_r) และมวลอากาศที่ความดันบรรยากาศที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งใด ๆ (m_{air})

$$m_r = \left[\cos(\theta_z) + 0.15(93.885 - \theta_z)^{-1.253} \right]^{-1}$$

$$m_r = \left[\cos(38.2) + 0.15(93.885 - 38.2)^{-1.253} \right]^{-1} = 1.271$$

และคำนวณ m_{air}

$$m_{air} = m_r \left(\frac{p}{p_0} \right)$$

$$m_{air} = 1.271 \left(\frac{1006.3}{1013.25} \right) = 1.262$$

โดยค่า $p = 1006.3 \text{ mbar}$ (สำหรับกรมอุตุนิยมวิทยา กรุงเทพฯ) และค่า $p_0 = 1013.25 \text{ mbar}$

(8) อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (T_{dew})

$$T_{dew} = T_{ambc} - \left(\frac{100 - RH}{5} \right)$$

$$T_{dew} = 27.87 - \left(\frac{100 - 50}{5} \right) = 17.87 \text{ องศาเซลเซียส}$$

โดยค่า $T_{ambc} = 27.87$ องศาเซลเซียส และค่า $RH = 50$ เปอรเซ็นต์ สำหรับวันที่ 9 มกราคม

พ.ศ. 2555 เวลา 11:00 น.

- คำนวณค่าการแผ่รังสีตรงของดวงอาทิตย์โดยใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์บรรยากาศ

(1) แบบจำลองเบิร์ด (Bird model)

$$DI_{Bird} = 0.9662 E_0 I_{sc} \tau_{total} \cos(\theta_z)$$

โดยที่ $\tau_{total} = \tau_r \tau_o \tau_g \tau_w \tau_a$

(1.1) คำนวณค่า τ_r

$$\tau_r = \exp \left[-0.0903 m_{air}^{0.84} (1 + m_{air} - m_{air}^{1.01}) \right]$$

$$\tau_r = \exp \left[-0.0903 (1.262)^{0.84} (1 + 1.262 - (1.262)^{1.01}) \right] = 0.896$$

(1.2) คำนวณค่า τ_o

$$\tau_o = 1 - \left[0.1611 U_3 \left((1 + 139.48 U_3)^{-0.3035} - 0.002715 U_3 (1 + 0.044 U_3 + 0.0003 U_3^2)^{-1} \right) \right]$$

เมื่อ $U_3 = L_{oz} m_r = 0.25 (1.271) = 0.32 \text{ cm}$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\tau_o = 1 - \left[0.1611 (0.32) \left((1 + 139.48 (0.32))^{-0.3035} - 0.002715 (0.32) (1 + 0.044 (0.32) + 0.0003 (0.32)^2)^{-1} \right) \right] = 0.985$$

โดยค่า $L_{oz} = 0.25 \text{ cm}$ สำหรับวันที่ 9 มกราคม พ.ศ. 2555

(1.3) คำนวณค่า τ_g

$$\tau_g = \exp \left(-0.0127 m_{air}^{0.26} \right)$$

$$\tau_g = \exp \left(-0.0127 (1.262)^{0.26} \right) = 0.987$$

(1.4) คำนวณค่า τ_w

$$\tau_w = 1 - 2.4959 U_1 \left[(1 + 79.034 U_1)^{0.6828} + 6.385 U_1 \right]^{-1}$$

เมื่อ $U_1 = w m_r$

โดยที่ $w = w' \left(\frac{P}{P_0} \right)^{3/4} \left(\frac{T_{0K}}{T_{ambk}} \right)^{1/2}$ และ $w' = 0.1 \exp(2.2572 + 0.05454 T_{dew})$

$$U_1 = w m_r = [0.1 \exp(2.2572 + 0.05454 (17.78))] \left[\frac{1006.3}{1013.25} \right]^{3/4} \left(\frac{273}{280.77} \right)^{1/2} (1.271) = 3.114$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\tau_w = 1 - 2.4959 (3.114) \left[(1 + 79.034 (3.114))^{0.6828} + 6.385 (3.114) \right]^{-1} = 0.876$$

(1.5) คำนวณค่า τ_a

$$\tau_a = \exp \left[-L_{ao}^{0.873} \left(1 + L_{ao} - L_{ao}^{0.7808} \right) m_{air}^{0.9108} \right]$$

เมื่อ $L_{ao} = 0.2758 L_{ao;\lambda|\lambda=0.38\mu m} + 0.35 L_{ao;\lambda|\lambda=0.5\mu m}$

โดยที่ $L_{ao;\lambda|\lambda=0.38\mu m} = \beta_2 0.38^{\beta_1}$ และ $L_{ao;\lambda|\lambda=0.5\mu m} = \beta_2 0.5^{\beta_1}$

$$L_{ao} = 0.2758 (0.1308 \times (0.38)^{1.3}) + 0.35 (0.1308 \times (0.5)^{1.3}) = 0.029$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\tau_a = \exp \left[- (0.029)^{0.873} \left(1 + 0.029 - (0.029)^{0.7808} \right) (1.262)^{0.9108} \right] = 0.947$$

โดยค่า $\beta_1 = 1.3$ (ตามทฤษฎี), ค่า β_2 ได้จากข้อมูลปริมาณนิพนธ์ ของนายภูวกฤต ใจหอม ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.1308 (สำหรับเดือนมกราคม)

และจะได้ว่า $\tau_{total} = \tau_r \tau_o \tau_g \tau_w \tau_a = (0.896)(0.985)(0.987)(0.876)(0.947) = 0.722$

จากสมการของแบบจำลองเบิร์ด จะได้ว่า

$$DI_{Bird} = 0.9662 E_0 I_{sc} \tau_{total} \cos(\theta_z)$$

$$DI_{Bird} = 0.9662 (1.035) (1367) (0.722) (0.786) = 775.77 \text{ W/m}^2$$

(2) แบบจำลองซีเอสอาร์ (CSR model)

$$DI_{CSR} = C_{CSR} E_0 I_{sc} \tau_{total} \cos(\theta_z)$$

$$\text{เมื่อ } C_{CSR} = \left[50 + \left| \cos\left(\frac{n_j}{365}\right) \right| \right] / 49.25 = \left[50 + \left| \cos\left(\frac{9}{365}\right) \right| \right] / 49.25 = 1.036$$

และ $\tau_{total} = \tau_r \tau_o \tau_g \tau_w \tau_a$ (สำหรับค่า $\tau_r \tau_o \tau_g$ และ τ_w ได้จากการคำนวณในหัวข้อ 1.1-1.4)

$$\text{และสำหรับ } \tau_a = \exp[-m_{air} L_{ao}] = \exp[-1.262(0.029)] = 0.964$$

$$\text{ดังนั้นจะได้ว่า } \tau_{total} = \tau_r \tau_o \tau_g \tau_w \tau_a = (0.896)(0.985)(0.987)(0.876)(0.964) = 0.736$$

จากสมการของแบบจำลองซีเอสอาร์ จะได้ว่า

$$DI_{CSR} = C_{CSR} E_0 I_{sc} \tau_{total} \cos(\theta_z)$$

$$DI_{CSR} = (1.036)(1.035)(1367)(0.736)(0.786) = 847.95 \text{ W/m}^2$$

(3) แบบจำลองคูมาร์ (Kumar model)

$$DI_{Ku} = DI_{nKu} \cos(\theta_z)$$

$$\text{โดยที่ } DI_{nKu} = 0.56 I_{so} [\exp(-0.65 m_{Ku}) + \exp(-0.095 m_{Ku})]$$

$$\text{เมื่อ } m_{Ku} = \left\{ \left[1229 + (614 \cos(\theta_z))^2 \right]^{0.5} - 614 \cos(\theta_z) \right\} \frac{p}{p_0} = \left\{ \left[1229 + (614(0.786))^2 - 614(0.786) \right] \right\} \frac{1006.3}{1013.25} = 1.263$$

จากสมการของแบบจำลองคูมาร์ จะได้ว่า

$$DI_{Ku} = 0.56 I_{so} [\exp(-0.65 m_{Ku}) + \exp(-0.095 m_{Ku})] \cos(\theta_z)$$

$$DI_{Ku} = 0.56(1412) [\exp(-0.65(1.263)) + \exp(-0.095(1.263))] (0.786) = 820.97 \text{ W/m}^2$$

(4) แบบจำลองดาเนซเยอร์พอลทริดพรอกเตอร์ (DPP model)

$$DI_{DPP} = 950 \left\{ 1 - \exp \left[-0.075 \left(90^\circ - \theta_z \right) \right] \right\} \cos(\theta_z)$$

$$DI_{DPP} = 950 \left\{ 1 - \exp \left[-0.075 \left(90^\circ - 38.2 \right) \right] \right\} (0.786) = 731.36 \text{ W/m}^2$$

(5) แบบจำลองมีเนล (Meinel model)

$$DI_{Mei} = I_{so} 0.7^{m_{air}^{0.678}(Mei)} \cos(\theta_z)$$

โดยที่ $m_{air}(Mei) = \frac{1}{\cos(\theta_z)} = \frac{1}{(0.786)} = 1.272$

จากสมการของแบบจำลองมีเนล จะได้ว่า

$$DI_{Mei} = I_{so} 0.7^{m_{air}^{0.678}(Mei)} \cos(\theta_z)$$

$$DI_{Mei} = (1412) 0.7^{(1.272)^{0.678}} (0.786) = 729.31 \text{ W/m}^2$$

ภาคผนวก ข

ค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameters)
และพารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศ (Atmospheric parameters)

ตาราง 3 ค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameters) และพารามิเตอร์ในชั้น
บรรยากาศ (Atmospheric parameters) เวลา 08:00 น.ของวันที่ท้องฟ้าโปร่ง (Clear day)
ในฤดูหนาว (เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ปี พ.ศ. 2555-2557

วันที่	ค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์							ค่าพารามิเตอร์ ในชั้นบรรยากาศ	
	δ (องศา)	E_0	ST (ชม.)	ω (องศา)	$\cos \theta_z$ (องศา)	θ_z (องศา)	I_{so} (W/m ²)	m_r	T_{dew} (เซลเซียส)
7 มกราคม 2555	-22.46	1.035	8.12	58.19	0.383	67.5	1404	2.595	19.97
8 มกราคม 2555	-22.35	1.035	8.12	58.26	0.383	67.5	1369	2.594	17.29
9 มกราคม 2555	-22.23	1.035	8.11	58.32	0.383	67.5	1406	2.593	16.50
10 มกราคม 2555	-22.06	1.035	8.11	58.38	0.383	67.5	1408	2.592	18.72
6 มีนาคม 2555	-5.56	1.016	8.06	59.12	0.473	61.7	1396	2.104	24.99
21 มีนาคม 2555	0.34	1.007	8.10	58.50	0.509	59.4	1377	1.958	21.37
3 มกราคม 2556	-22.92	1.035	8.14	57.94	0.383	67.5	1411	2.592	20.38
5 มกราคม 2556	-22.69	1.035	8.13	58.07	0.383	67.5	1377	2.594	19.65
17 มกราคม 2556	-20.91	1.034	8.08	58.76	0.386	67.3	1389	2.572	17.04
19 มกราคม 2556	-20.51	1.034	8.08	58.86	0.388	67.2	1412	2.562	16.49
23 มีนาคม 2556	0.74	1.007	8.10	58.45	0.511	59.2	1398	1.949	24.82
31 มีนาคม 2556	3.84	1.002	8.13	58.07	0.529	58.1	1398	1.886	24.47
2 มกราคม 2557	-22.98	1.035	8.14	57.87	0.384	67.4	1385	2.591	16.40
10 มกราคม 2557	-22.06	1.035	8.11	58.38	0.383	67.5	1408	2.592	17.62
11 มกราคม 2557	-21.94	1.035	8.10	58.44	0.384	67.4	1374	2.590	18.93
12 มกราคม 2557	-21.77	1.035	8.10	58.49	0.384	67.4	1401	2.588	18.84
14 มีนาคม 2557	-2.81	1.012	8.08	58.85	0.490	60.6	1411	2.032	24.32
31 มีนาคม 2557	3.84	1.002	8.13	58.07	0.529	58.1	1398	1.886	24.84

ตาราง 4 ค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameters) และพารามิเตอร์ในชั้น
บรรยากาศ (Atmospheric parameters) เวลา 09:00 น. ของวันที่ท้องฟ้าโปร่ง (Clear day)
ในฤดูหนาว (เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ปี พ.ศ. 2555-2557

วันที่	ค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์							ค่าพารามิเตอร์ ในชั้นบรรยากาศ	
	δ (องศา)	E_0	ST (ชม.)	ω (องศา)	$\cos \theta_z$ (องศา)	θ_z (องศา)	I_{so} (W/m ²)	m_r	T_{dew} (เซลเซียส)
7 มกราคม 2555	-22.46	1.035	9.12	43.19	0.564	55.6	1404	1.767	19.97
8 มกราคม 2555	-22.35	1.035	9.12	43.26	0.565	55.6	1369	1.766	17.29
9 มกราคม 2555	-22.23	1.035	9.11	43.32	0.565	55.6	1406	1.765	16.50
10 มกราคม 2555	-22.06	1.035	9.11	43.38	0.566	55.6	1408	1.763	18.72
6 มีนาคม 2555	-5.56	1.016	9.06	44.12	0.671	47.8	1396	1.487	24.99
21 มีนาคม 2555	0.34	1.007	9.10	43.50	0.706	45.1	1377	1.414	21.37
3 มกราคม 2556	-22.92	1.035	9.14	42.94	0.563	55.7	1411	1.770	20.38
5 มกราคม 2556	-22.69	1.035	9.13	43.07	0.564	55.7	1377	1.769	19.65
17 มกราคม 2556	-20.91	1.034	9.08	43.76	0.571	55.2	1389	1.746	17.04
19 มกราคม 2556	-20.51	1.034	9.08	43.86	0.573	55.0	1412	1.739	16.49
23 มีนาคม 2556	0.74	1.007	9.10	43.45	0.708	44.9	1398	1.410	24.82
31 มีนาคม 2556	3.84	1.002	9.13	43.07	0.724	43.6	1398	1.379	24.47
2 มกราคม 2557	-22.98	1.035	9.14	42.87	0.563	55.7	1385	1.770	16.40
10 มกราคม 2557	-22.06	1.035	9.11	43.38	0.566	55.6	1408	1.763	17.62
11 มกราคม 2557	-21.94	1.035	9.10	43.44	0.566	55.5	1374	1.761	18.93
12 มกราคม 2557	-21.77	1.035	9.10	43.49	0.567	55.5	1401	1.759	18.84
14 มีนาคม 2557	-2.81	1.012	9.08	43.85	0.688	46.5	1411	1.451	24.32
31 มีนาคม 2557	3.84	1.002	9.13	43.07	0.724	43.6	1398	1.379	24.84

ตาราง 5 ค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameters) และพารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศ (Atmospheric parameters) เวลา 10:00 น. ของวันที่ท้องฟ้าโปร่ง (Clear day) ในฤดูหนาว (เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ปี พ.ศ. 2555-2557

วันที่	ค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์							ค่าพารามิเตอร์ในชั้นบรรยากาศ	
	δ (องศา)	E_0	ST (ชม.)	ω (องศา)	$\cos \theta_z$ (องศา)	θ_z (องศา)	I_{so} (W/m ²)	m_r	T_{dew} (เซลเซียส)
7 มกราคม 2555	-22.46	1.035	10.12	28.19	0.701	45.5	1404	1.424	19.97
8 มกราคม 2555	-22.35	1.035	10.12	28.26	0.702	45.4	1369	1.423	17.29
9 มกราคม 2555	-22.23	1.035	10.11	28.32	0.703	45.4	1406	1.421	16.50
10 มกราคม 2555	-22.06	1.035	10.11	28.38	0.703	45.3	1408	1.419	18.72
6 มีนาคม 2555	-5.56	1.016	10.06	29.12	0.822	34.7	1396	1.215	24.99
21 มีนาคม 2555	0.34	1.007	10.10	28.50	0.855	31.2	1377	1.168	21.37
3 มกราคม 2556	-22.92	1.035	10.14	27.94	0.699	45.7	1411	1.428	20.38
5 มกราคม 2556	-22.69	1.035	10.13	28.07	0.700	45.6	1377	1.427	19.65
17 มกราคม 2556	-20.91	1.034	10.08	28.76	0.711	44.7	1389	1.403	17.04
19 มกราคม 2556	-20.51	1.034	10.08	28.86	0.714	44.4	1412	1.398	16.49
23 มีนาคม 2556	0.74	1.007	10.10	28.45	0.857	31.0	1398	1.165	24.82
31 มีนาคม 2556	3.84	1.002	10.13	28.07	0.871	29.4	1398	1.147	24.47
2 มกราคม 2557	-22.98	1.035	10.14	27.87	0.699	45.7	1385	1.429	16.40
10 มกราคม 2557	-22.06	1.035	10.11	28.38	0.703	45.3	1408	1.419	17.62
11 มกราคม 2557	-21.94	1.035	10.10	28.44	0.704	45.2	1374	1.417	18.93
12 มกราคม 2557	-21.77	1.035	10.10	28.49	0.705	45.1	1401	1.415	18.84
14 มีนาคม 2557	-2.81	1.012	10.08	28.85	0.838	33.0	1411	1.192	24.32
31 มีนาคม 2557	3.84	1.002	10.13	28.07	0.871	29.4	1398	1.147	24.84

ตาราง 6 ค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameters) และพารามิเตอร์ในชั้น
บรรยากาศ (Atmospheric parameters) เวลา 11:00 น. ของวันที่ท้องฟ้าโปร่ง (Clear day)
ในฤดูหนาว (เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ปี พ.ศ. 2555-2557

วันที่	ค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์							ค่าพารามิเตอร์ ในชั้นบรรยากาศ	
	δ (องศา)	E_0	ST (ชม.)	ω (องศา)	$\cos \theta_z$ (องศา)	θ_z (องศา)	I_{so} (W/m ²)	m_r	T_{dew} (เซลเซียส)
7 มกราคม 2555	-22.46	1.035	11.12	13.19	0.784	38.4	1404	1.274	19.49
8 มกราคม 2555	-22.35	1.035	11.12	13.26	0.785	38.3	1369	1.272	17.23
9 มกราคม 2555	-22.23	1.035	11.11	13.32	0.786	38.2	1406	1.271	17.87
10 มกราคม 2555	-22.06	1.035	11.11	13.38	0.787	38.1	1408	1.269	18.30
6 มีนาคม 2555	-5.56	1.016	11.06	14.12	0.915	23.8	1396	1.092	23.88
21 มีนาคม 2555	0.34	1.007	11.10	13.50	0.946	18.9	1377	1.056	19.80
3 มกราคม 2556	-22.92	1.035	11.14	12.94	0.780	38.7	1411	1.280	19.47
5 มกราคม 2556	-22.69	1.035	11.13	13.07	0.782	38.6	1377	1.277	18.73
17 มกราคม 2556	-20.91	1.034	11.08	13.76	0.797	37.1	1389	1.253	14.73
19 มกราคม 2556	-20.51	1.034	11.08	13.86	0.801	36.8	1412	1.247	17.18
23 มีนาคม 2556	0.74	1.007	11.10	13.45	0.948	18.6	1398	1.054	23.89
31 มีนาคม 2556	3.84	1.002	11.13	13.07	0.960	16.2	1398	1.041	23.49
2 มกราคม 2557	-22.98	1.035	11.14	12.87	0.780	38.8	1385	1.281	16.95
10 มกราคม 2557	-22.06	1.035	11.11	13.38	0.787	38.1	1408	1.269	20.01
11 มกราคม 2557	-21.94	1.035	11.10	13.44	0.788	38.0	1374	1.267	19.35
12 มกราคม 2557	-21.77	1.035	11.10	13.49	0.790	37.8	1401	1.265	18.23
14 มีนาคม 2557	-2.81	1.012	11.08	13.85	0.931	21.5	1411	1.074	24.47
31 มีนาคม 2557	3.84	1.002	11.13	13.07	0.960	16.2	1398	1.041	25.21

ตาราง 7 ค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameters) และพารามิเตอร์ในชั้น
 บรรยากาศ (Atmospheric parameters) เวลา 12:00 น. ของวันที่ท้องฟ้าโปร่ง (Clear day)
 ในฤดูหนาว (เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ปี พ.ศ. 2555-2557

วันที่	ค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์							ค่าพารามิเตอร์ ในชั้นบรรยากาศ	
	δ (องศา)	E_0	ST (ชม.)	ω (องศา)	$\cos \theta_z$ (องศา)	θ_z (องศา)	I_{so} (W/m ²)	m_r	T_{dew} (เซลเซียส)
7 มกราคม 2555	-22.46	1.035	12.12	-1.81	0.807	36.2	1404	1.238	19.49
8 มกราคม 2555	-22.35	1.035	12.12	-1.74	0.808	36.1	1369	1.236	17.23
9 มกราคม 2555	-22.23	1.035	12.11	-1.68	0.810	35.9	1406	1.233	17.87
10 มกราคม 2555	-22.06	1.035	12.11	-1.62	0.811	35.8	1408	1.231	18.30
6 มีนาคม 2555	-5.56	1.016	12.06	-0.88	0.944	19.3	1396	1.059	23.88
21 มีนาคม 2555	0.34	1.007	12.10	-1.50	0.973	13.4	1377	1.027	19.80
3 มกราคม 2556	-22.92	1.035	12.14	-2.06	0.803	36.6	1411	1.244	19.47
5 มกราคม 2556	-22.69	1.035	12.13	-1.93	0.805	36.4	1377	1.241	18.73
17 มกราคม 2556	-20.91	1.034	12.08	-1.24	0.823	34.6	1389	1.213	14.73
19 มกราคม 2556	-20.51	1.034	12.08	-1.14	0.827	34.2	1412	1.208	17.18
23 มีนาคม 2556	0.74	1.007	12.10	-1.55	0.974	13.0	1398	1.026	23.89
31 มีนาคม 2556	3.84	1.002	12.13	-1.93	0.985	10.0	1398	1.015	23.49
2 มกราคม 2557	-22.98	1.035	12.14	-2.13	0.802	36.7	1385	1.246	16.95
10 มกราคม 2557	-22.06	1.035	12.11	-1.62	0.811	35.8	1408	1.231	20.01
11 มกราคม 2557	-21.94	1.035	12.10	-1.56	0.813	35.6	1374	1.229	19.35
12 มกราคม 2557	-21.77	1.035	12.10	-1.51	0.814	35.5	1401	1.227	18.23
14 มีนาคม 2557	-2.81	1.012	12.08	-1.15	0.959	16.5	1411	1.042	24.47
31 มีนาคม 2557	3.84	1.002	12.13	-1.93	0.985	10.0	1398	1.015	25.21

ตาราง 8 ค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameters) และพารามิเตอร์ในชั้น
บรรยากาศ (Atmospheric parameters) เวลา 13:00 น. ของวันที่ท้องฟ้าโปร่ง (Clear day)
ในฤดูหนาว (เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ปี พ.ศ. 2555-2557

วันที่	ค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์							ค่าพารามิเตอร์ ในชั้นบรรยากาศ	
	δ (องศา)	E_0	ST (ชม.)	ω (องศา)	$\cos \theta_z$ (องศา)	θ_z (องศา)	I_{so} (W/m ²)	m_r	T_{dew} (เซลเซียส)
7 มกราคม 2555	-22.46	1.035	13.12	-16.81	0.769	39.7	1404	1.298	19.49
8 มกราคม 2555	-22.35	1.035	13.12	-16.74	0.771	39.6	1369	1.296	17.23
9 มกราคม 2555	-22.23	1.035	13.11	-16.68	0.772	39.4	1406	1.293	17.87
10 มกราคม 2555	-22.06	1.035	13.11	-16.62	0.774	39.3	1408	1.290	18.30
6 มีนาคม 2555	-5.56	1.016	13.06	-15.88	0.907	24.9	1396	1.101	23.88
21 มีนาคม 2555	0.34	1.007	13.10	-16.50	0.933	21.1	1377	1.071	19.80
3 มกราคม 2556	-22.92	1.035	13.14	-17.06	0.764	40.2	1411	1.308	19.47
5 มกราคม 2556	-22.69	1.035	13.13	-16.93	0.766	40.0	1377	1.303	18.73
17 มกราคม 2556	-20.91	1.034	13.08	-16.24	0.787	38.1	1389	1.269	14.73
19 มกราคม 2556	-20.51	1.034	13.08	-16.14	0.791	37.7	1412	1.262	17.18
23 มีนาคม 2556	0.74	1.007	13.10	-16.55	0.934	20.9	1398	1.069	23.89
31 มีนาคม 2556	3.84	1.002	13.13	-16.93	0.943	19.4	1398	1.059	23.49
2 มกราคม 2557	-22.98	1.035	13.14	-17.13	0.763	40.3	1385	1.310	16.95
10 มกราคม 2557	-22.06	1.035	13.11	-16.62	0.774	39.3	1408	1.290	20.01
11 มกราคม 2557	-21.94	1.035	13.10	-16.56	0.776	39.1	1374	1.287	19.35
12 มกราคม 2557	-21.77	1.035	13.10	-16.51	0.777	39.0	1401	1.285	18.23
14 มีนาคม 2557	-2.81	1.012	13.08	-16.15	0.921	23.0	1411	1.085	24.47
31 มีนาคม 2557	3.84	1.002	13.13	-16.93	0.943	19.4	1398	1.059	25.21

ตาราง 9 ค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameters) และพารามิเตอร์ในชั้น
 บรรยากาศ (Atmospheric parameters) เวลา 14:00 น. ของวันที่ท้องฟ้าโปร่ง (Clear day)
 ในฤดูหนาว (เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ปี พ.ศ. 2555-2557

วันที่	ค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์							ค่าพารามิเตอร์ ในชั้นบรรยากาศ	
	δ (องศา)	E_0	ST (ชม.)	ω (องศา)	$\cos \theta_z$ (องศา)	θ_z (องศา)	I_{so} (W/m ²)	m_r	T_{dew} (เซลเซียส)
7 มกราคม 2555	-22.46	1.035	14.12	-31.81	0.673	47.7	1404	1.484	19.22
8 มกราคม 2555	-22.35	1.035	14.12	-31.74	0.674	47.6	1369	1.480	16.52
9 มกราคม 2555	-22.23	1.035	14.11	-31.68	0.676	47.5	1406	1.476	17.23
10 มกราคม 2555	-22.06	1.035	14.11	-31.62	0.678	47.3	1408	1.472	19.26
6 มีนาคม 2555	-5.56	1.016	14.06	-30.88	0.807	36.2	1396	1.238	19.04
21 มีนาคม 2555	0.34	1.007	14.10	-31.50	0.830	33.9	1377	1.204	16.49
3 มกราคม 2556	-22.92	1.035	14.14	-32.06	0.667	48.2	1411	1.497	19.31
5 มกราคม 2556	-22.69	1.035	14.13	-31.93	0.670	48.0	1377	1.491	18.05
17 มกราคม 2556	-20.91	1.034	14.08	-31.24	0.692	46.2	1389	1.443	16.11
19 มกราคม 2556	-20.51	1.034	14.08	-31.14	0.696	45.9	1412	1.434	16.50
23 มีนาคม 2556	0.74	1.007	14.10	-31.55	0.831	33.8	1398	1.202	20.40
31 มีนาคม 2556	3.84	1.002	14.13	-31.93	0.839	33.0	1398	1.191	23.49
2 มกราคม 2557	-22.98	1.035	14.14	-32.13	0.665	48.3	1385	1.500	18.67
10 มกราคม 2557	-22.06	1.035	14.11	-31.62	0.678	47.3	1408	1.472	19.63
11 มกราคม 2557	-21.94	1.035	14.10	-31.56	0.680	47.2	1374	1.468	18.59
12 มกราคม 2557	-21.77	1.035	14.10	-31.51	0.682	47.0	1401	1.464	17.84
14 มีนาคม 2557	-2.81	1.012	14.08	-31.15	0.819	35.0	1411	1.220	24.58
31 มีนาคม 2557	3.84	1.002	14.13	-31.93	0.839	33.0	1398	1.191	23.70

ตาราง 10 ค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameters) และพารามิเตอร์ในชั้น
บรรยากาศ (Atmospheric parameters) เวลา 15:00 น. ของวันที่ท้องฟ้าโปร่ง (Clear day)
ในฤดูหนาว (เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ปี พ.ศ. 2555-2557

วันที่	ค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์							ค่าพารามิเตอร์ใน ชั้นบรรยากาศ	
	δ (องศา)	E_0	ST (ชม.)	ω (องศา)	$\cos \theta_z$ (องศา)	θ_z (องศา)	I_{so} (W/m ²)	m_r	T_{dew} (เซลเซียส)
7 มกราคม 2555	-22.46	1.035	15.12	-46.81	0.524	58.4	1404	1.901	19.22
8 มกราคม 2555	-22.35	1.035	15.12	-46.74	0.526	58.3	1369	1.895	16.52
9 มกราคม 2555	-22.23	1.035	15.11	-46.68	0.528	58.1	1406	1.889	17.23
10 มกราคม 2555	-22.06	1.035	15.11	-46.62	0.530	58.0	1408	1.882	19.26
6 มีนาคม 2555	-5.56	1.016	15.06	-45.88	0.650	49.4	1396	1.535	19.04
21 มีนาคม 2555	0.34	1.007	15.10	-46.50	0.670	47.9	1377	1.489	16.49
3 มกราคม 2556	-22.92	1.035	15.14	-47.06	0.518	58.8	1411	1.925	19.31
5 มกราคม 2556	-22.69	1.035	15.13	-46.93	0.521	58.6	1377	1.913	18.05
17 มกราคม 2556	-20.91	1.034	15.08	-46.24	0.544	57.1	1389	1.834	16.11
19 มกราคม 2556	-20.51	1.034	15.08	-46.14	0.548	56.8	1412	1.820	16.50
23 มีนาคม 2556	0.74	1.007	15.10	-46.55	0.671	47.8	1398	1.487	20.40
31 มีนาคม 2556	3.84	1.002	15.13	-46.93	0.678	47.3	1398	1.472	23.49
2 มกราคม 2557	-22.98	1.035	15.14	-47.13	0.516	58.9	1385	1.930	18.67
10 มกราคม 2557	-22.06	1.035	15.11	-46.62	0.530	58.0	1408	1.882	19.63
11 มกราคม 2557	-21.94	1.035	15.10	-46.56	0.531	57.9	1374	1.876	18.59
12 มกราคม 2557	-21.77	1.035	15.10	-46.51	0.533	57.8	1401	1.869	17.84
14 มีนาคม 2557	-2.81	1.012	15.08	-46.15	0.661	48.6	1411	1.511	24.58
31 มีนาคม 2557	3.84	1.002	15.13	-46.93	0.678	47.3	1398	1.472	23.70

ตาราง 11 ค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameters) และพารามิเตอร์ในชั้น
 บรรยากาศ (Atmospheric parameters) เวลา 16:00 น. ของวันที่ท้องฟ้าโปร่ง (Clear day)
 ในฤดูหนาว (เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ปี พ.ศ. 2555-2557

วันที่	ค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์							ค่าพารามิเตอร์ ในชั้นบรรยากาศ	
	δ (องศา)	E_0	ST (ชม.)	ω (องศา)	$\cos \theta_z$ (องศา)	θ_z (องศา)	I_{so} (W/m ²)	m_r	T_{dew} (เซลเซียส)
7 มกราคม 2555	-22.46	1.035	16.12	-61.81	0.334	70.5	1404	2.969	19.22
8 มกราคม 2555	-22.35	1.035	16.12	-61.74	0.336	70.4	1369	2.954	16.52
9 มกราคม 2555	-22.23	1.035	16.11	-61.68	0.337	70.3	1406	2.939	17.23
10 มกราคม 2555	-22.06	1.035	16.11	-61.62	0.339	70.2	1408	2.924	19.26
6 มีนาคม 2555	-5.56	1.016	16.06	-60.88	0.448	63.4	1396	2.224	19.04
21 มีนาคม 2555	0.34	1.007	16.10	-61.50	0.465	62.3	1377	2.142	16.49
3 มกราคม 2556	-22.92	1.035	16.14	-62.06	0.327	70.9	1411	3.027	19.31
5 มกราคม 2556	-22.69	1.035	16.13	-61.93	0.331	70.7	1377	2.999	18.05
17 มกราคม 2556	-20.91	1.034	16.08	-61.24	0.352	69.4	1389	2.815	16.11
19 มกราคม 2556	-20.51	1.034	16.08	-61.14	0.357	69.1	1412	2.784	16.50
23 มีนาคม 2556	0.74	1.007	16.10	-61.55	0.466	62.2	1398	2.137	20.40
31 มีนาคม 2556	3.84	1.002	16.13	-61.93	0.472	61.8	1398	2.110	23.49
2 มกราคม 2557	-22.98	1.035	16.14	-62.13	0.326	71.0	1385	3.041	18.67
10 มกราคม 2557	-22.06	1.035	16.11	-61.62	0.339	70.2	1408	2.924	19.63
11 มกราคม 2557	-21.94	1.035	16.10	-61.56	0.341	70.1	1374	2.909	18.59
12 มกราคม 2557	-21.77	1.035	16.10	-61.51	0.343	70.0	1401	2.893	17.84
14 มีนาคม 2557	-2.81	1.012	16.08	-61.15	0.457	62.8	1411	2.180	24.58
31 มีนาคม 2557	3.84	1.002	16.13	-61.93	0.472	61.8	1398	2.110	23.70

ตาราง 12 ค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์ (Astronomical parameters) และพารามิเตอร์ในชั้น
บรรยากาศ (Atmospheric parameters) เวลา 17:00 น. ของวันที่ท้องฟ้าโปร่ง (Clear day)
ในฤดูหนาว (เดือนมกราคม) และฤดูร้อน (เดือนมีนาคม) ปี พ.ศ. 2555-2557

วันที่	ค่าพารามิเตอร์ทางดาราศาสตร์							ค่าพารามิเตอร์ ในชั้นบรรยากาศ	
	δ (องศา)	E_0	ST (ชม.)	ω (องศา)	$\cos \theta_z$ (องศา)	θ_z (องศา)	I_{so} (W/m ²)	m_r	T_{dew} (เซลเซียส)
7 มกราคม 2555	-22.46	1.035	17.12	-76.81	0.115	83.4	1404	8.162	20.34
8 มกราคม 2555	-22.35	1.035	17.12	-76.74	0.116	83.3	1369	8.062	19.59
9 มกราคม 2555	-22.23	1.035	17.11	-76.68	0.118	83.2	1406	7.962	17.79
10 มกราคม 2555	-22.06	1.035	17.11	-76.62	0.120	83.1	1408	7.864	19.96
6 มีนาคม 2555	-5.56	1.016	17.06	-75.88	0.213	77.7	1396	4.597	22.58
21 มีนาคม 2555	0.34	1.007	17.10	-76.50	0.228	76.8	1377	4.302	19.03
3 มกราคม 2556	-22.92	1.035	17.14	-77.06	0.108	83.8	1411	8.569	21.18
5 มกราคม 2556	-22.69	1.035	17.13	-76.93	0.111	83.6	1377	8.364	18.93
17 มกราคม 2556	-20.91	1.034	17.08	-76.24	0.132	82.4	1389	7.208	18.84
19 มกราคม 2556	-20.51	1.034	17.08	-76.14	0.135	82.2	1412	7.033	16.59
23 มีนาคม 2556	0.74	1.007	17.10	-76.55	0.229	76.8	1398	4.287	24.07
31 มีนาคม 2556	3.84	1.002	17.13	-76.93	0.235	76.4	1398	4.179	25.29
2 มกราคม 2557	-22.98	1.035	17.14	-77.13	0.107	83.9	1385	8.671	19.82
10 มกราคม 2557	-22.06	1.035	17.11	-76.62	0.120	83.1	1408	7.864	20.15
11 มกราคม 2557	-21.94	1.035	17.10	-76.56	0.121	83.0	1374	7.767	19.78
12 มกราคม 2557	-21.77	1.035	17.10	-76.51	0.123	82.9	1401	7.671	20.40
14 มีนาคม 2557	-2.81	1.012	17.08	-76.15	0.221	77.3	1411	4.442	24.73
31 มีนาคม 2557	3.84	1.002	17.13	-76.93	0.235	76.4	1398	4.179	24.09



ภาคผนวก ค
เครื่องมือสำหรับวัดการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์

เครื่องมือสำหรับวัดการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์

เครื่องไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer)

เครื่องไพรานอมิเตอร์ เป็นอุปกรณ์วัดค่าการแผ่รังสีรวมของดวงอาทิตย์ ปกติจะใช้วัดบนพื้นราบแต่อาจประยุกต์ใช้วัดการแผ่รังสีกระจายได้โดยติดตั้งบนหรือจางบนเงา ไพรานอมิเตอร์จะมีตัวรับรังสีที่ทำด้วยเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) จำนวนมากที่ต่ออนุกรม ซึ่งเรียกว่า เทอร์โมไพล์ (Thermopile) โดยมีแผ่นรับรังสีสีดำปิดด้านบน เพื่อไม่ให้รังสีจากดวงอาทิตย์ตกกระทบเทอร์โมไพล์โดยตรง และมีโดมแก้วครอบด้านบนซึ่งมีหน้าที่ป้องกันตัวรับแสงจากฝุ่นและลม ซึ่งทำให้ตัวรับแสงสูญเสียความร้อนไป เนื่องจากการพาและการแผ่รังสี ปกติโดมแก้วจะมี 2 ชั้นทำด้วยแก้วพิเศษซึ่งจะต้องมีความหนาที่สม่ำเสมอ เพื่อที่จะไม่ก่อให้เกิดการกระจายของรังสีที่จะตกกระทบตัวรับแสง เทอร์โมไพล์ประกอบด้วยโลหะต่างชนิดเชื่อมกันอยู่ โลหะแต่ละชนิดข้างหนึ่งชุบด้วยสีดำและอีกด้านหนึ่งชุบด้วยสีขาวสลับกัน โลหะด้านที่ชุบเคลือบด้วยสีขาวจะมีสมบัติสะท้อนรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบ โลหะสีดำมีสมบัติการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ เครื่องวัดการแผ่รังสีรวมแบบนี้โดยทั่วไปจะมีลักษณะดังภาพประกอบ 38



ภาพประกอบ 42 เครื่องไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer) รุ่น MS-802 ที่ผลิตโดยบริษัทเอคโก (EKO)

ที่มา: <https://exportpages.com/en/product/pyranometers/38819/> สืบค้นวันที่ 10 มิถุนายน 2559

เมื่อรังสีดวงอาทิตย์ตกกระทบแผ่นรับรังสี แผ่นดังกล่าวจะถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นไปยังเทอร์โมไฟล์ ทำให้เทอร์โมไฟล์มีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วของเทอร์โมไฟล์ ค่าของศักย์ไฟฟ้างกล่าวสามารถนำมาคำนวณเป็นค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ได้โดยการสอบเทียบกับเครื่องวัดรังสีอาทิตย์มาตรฐาน ข้อดีของเครื่องวัดการแผ่รังสีรวมแบบเทอร์โมไฟล์นี้ คือ สามารถตอบสนองต่อสเปกตรัมรังสีดวงอาทิตย์ส่วนใหญ่ในช่วงความยาวคลื่น 0.3-3.0 ไมครอน ได้เท่ากัน นอกจากนี้ยังสามารถทำงานโดยไม่ขึ้นกับสภาพแวดล้อมมากนัก และมีความละเอียดถูกต้องในการวัดค่อนข้างสูง



ประวัติย่อผู้วิจัย



ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นางสาวภัทรา ภัคดีเกียรติ
วันเดือนปีเกิด	28 เมษายน พ.ศ. 2534
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	208 หมู่ 1 ตำบลโคกกล่าม อำเภอลำปลายมาศ จังหวัดบุรีรัมย์
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2552	มัธยมศึกษาตอนปลาย จาก โรงเรียนลำปลายมาศ
พ.ศ. 2556	ปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จาก มหาวิทยาลัยบูรพา
พ.ศ. 2559	ปริญญาโท การศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ