



การศึกษาแบบจำลองสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาแบบจำลองสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ



โดย
นางสาวพิมพ์พัฒน์ กฤติธนาเดช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

วิทยาศาสตร มหาวิทาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

A STUDY OF SPECTRAL SOLAR RADIATION MODELS UNDER CLOUDLESS SKIES




A Thesis Submitted in partial Fulfillment of Requirements
for Master of Science (PHYSICS)
Science Silpakorn University
Academic Year 2016
Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ การศึกษาแบบจำลองสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ
โดย พิมพ์พัฒน์ กฤติธนาเดช
สาขาวิชา ฟิสิกส์ แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย

วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปานใจ ธารทัศน์วงศ์)
พิจารณาเห็นชอบโดย
..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร. ภราดร ภัคดีวานิช)
..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย)
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร. อีสระ มะศิริ)
..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริชัย เทพา)



57306208 : พิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

คำสำคัญ : สเปกตรัมรังสีตรง, สเปกตรัมรังสีกระจาย, ท้องฟ้าปราศจากเมฆ, สเปกตรัมรังสีรวม, แบบจำลองกึ่งเอมไพริคัล

นางสาว พิมพ์พัฒน์ กฤติธนาเดช: การศึกษาแบบจำลองสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองสเปกตรัมรังสีตรงและสเปกตรัมรังสีกระจายในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆโดยเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีตรงและสเปกตรัมรังสีกระจาย EKO spectroradiometer (MS-710) ที่จังหวัดนครปฐม ครอบคลุมช่วงระยะเวลาระหว่างปี พ.ศ. 2557 ถึง พ.ศ. 2559 ผู้วิจัยได้คัดเลือกแบบจำลองสำหรับคำนวณสเปกตรัมรังสีตรงและสเปกตรัมรังสีกระจายของ Leckner (1978) Brine และ Iqbal (1983) Bird (1984) Bird และ Riodan (1986) และ Gueymard (2001) มาใช้ในการเปรียบเทียบ โดยแบบจำลองดังกล่าวมีการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของบรรยากาศ ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมข้อมูลทางบรรยากาศดังกล่าวมาเป็นข้อมูลเพื่อป้อนเข้าในการเปรียบเทียบแบบจำลองต่างๆ จากผลการเปรียบเทียบแบบจำลองสเปกตรัมรังสีตรงในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆพบว่าแบบจำลองของ Brine และ Iqbal (1983) ให้ผลการเปรียบเทียบกับค่าจากการวัดได้ดีที่สุด โดยมีค่า root mean square difference (RMSD) และ mean bias difference (MBD) เท่ากับ 7.40% และ 2.30% ตามลำดับ สำหรับผลจากการเปรียบเทียบแบบจำลองสเปกตรัมรังสีกระจายในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆพบว่าแบบจำลองของ Bird (1984) ให้ผลการเปรียบเทียบกับค่าจากการวัดได้ดีที่สุด โดยมีค่า RMSD เท่ากับ 12.85% และ MBD เท่ากับ -1.40% รองลงมาเป็นแบบจำลองของ Bird และ Riodan (1986) ซึ่งมีค่า RMSD เท่ากับ 13.13% และ MBD เท่ากับ -0.17% และแบบจำลองของ Gueymard (2001) ซึ่งมีค่า RMSD เท่ากับ 13.65% และ MBD เท่ากับ 0.34%

ผู้วิจัยได้พัฒนาแบบจำลองกึ่งเอมไพริคัลสำหรับคำนวณหาสเปกตรัมรังสีรวมภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ โดยแบบจำลองดังกล่าวมีการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของบรรยากาศ จากนั้นได้ทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีรวม EKO spectroradiometer ซึ่งติดตั้งอยู่ที่จังหวัดเชียงใหม่ นครปฐม และอุบลราชธานี ครอบคลุมช่วงระยะเวลาระหว่างเดือนธันวาคม พ.ศ. 2555 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2559 ผลการเปรียบเทียบพบว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นให้ผลการคำนวณสอดคล้องดีกับค่าจากการวัด โดยมีค่า RMSD เท่ากับ 15.86% และค่า MBD มีค่าเป็น 0.18%

57306208 : Major (PHYSICS)

Keyword : direct-beam, diffuse horizontal solar spectral irradiance, spectral global irradiance, semi-empirical model, cloudless sky conditions

MISS Pimpaphat KITTITANADET : A Study of Spectral Solar Radiation Models under cloudless skies Thesis advisor : Professor Serm Janjai, Ph.D.

Comparisons of the models for estimating direct-beam and diffuse horizontal solar spectral irradiances under cloudless sky conditions were examined with the direct-beam and diffuse horizontal solar spectral irradiances measured using EKO spectroradiometer (MS-710) at Nakhon Pathom (13.82°N, 100.04°E). The spectral irradiances recorded on selective cloudless sky conditions were collected from 2014 to 2016. Cloudless sky radiation models developed by Leckner (1978), Brine and Iqbal (1983), Bird (1984), Bird and Riordan (1986) and Gueymard (2001) were compared with the measurement data. The atmospheric parameters were used as the main inputs of the models. According to our comparisons for the case of direct-beam solar spectral irradiances, the Brine and Iqbal model provided the best performance with root mean square difference (RMSD) and mean bias difference (MBD) of 7.40% and 2.30%, respectively. In addition, for comparisons of diffuse horizontal solar spectral irradiances model, the Bird model gave the best performance with RMSD and MBD of 12.85% and -1.40%, respectively. Followed by the Bird and Riordan model, it performed quite well with RMSD and MBD of 13.13% and -0.17%, respectively. Thirdly, the Gueymard model was analyzed and revealed with RMSD and MBD of 13.65% and 0.34%, respectively.

We also developed the semi-empirical model for calculating spectral global irradiance under cloudless sky conditions. The performance of the model was evaluated by comparing the calculated irradiance with the measured irradiance using EKO spectroradiometers at Chiang Mai (17.80°N, 98.43°E), Nakhon Pathom (13.82°N, 100.04°E) and Ubon Ratchathani (15.25°N, 104.87°E) covering the period from December 2012 to December 2016. The comparisons revealed that semi-empirical model gave good agreement with RMSD and MBD of 15.86% and 0.18%, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต โดยผู้วิจัยได้รับทุนสนับสนุนผู้ช่วยวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์จากห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์บรรยากาศภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ซึ่งผู้วิจัยขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้เป็นอย่างสูง รวมถึงขอขอบคุณกรมอุตุนิยมวิทยา สถานีเรดาร์ของกรมฝนหลวงและการบินเกษตร อำเภอมวกอย จังหวัดเชียงใหม่ ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี และมหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ติดตั้งเครื่องวัดสเปกตรัม และเครื่องมืออื่นๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.เสริม จันทรฉาย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาหลักผู้ให้คำแนะนำด้านวิชาการ และช่วยหาทุนวิจัย เครื่องมือ อุปกรณ์ และข้อมูล สำหรับใช้ในการดำเนินการวิจัย อีกทั้งขอบพระคุณอาจารย์ ดร.อิสระ มะศิริ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมผู้ให้คำปรึกษาและแนวคิดในการวิเคราะห์ข้อมูลของงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย เทพา และ อาจารย์ ดร.ภราดร ภัคดีวานิช ที่ได้กรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้เป็นอย่างสูง

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.รุ่งรัตน์ วัตตาล อาจารย์ ดร.ประสาน ปานแก้ว อาจารย์ ดร.กรทิพย์ ไต้ะสิงห์ อาจารย์ ดร.สุมามาลย์ บรรเทิง อาจารย์ ดร.สมเจตน์ ภัทรพานิชชัย และนักวิจัยของห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์จากห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์บรรยากาศภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่างๆ เกี่ยวกับงานวิจัย และขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ในภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ท้ายสุดนี้ คุณประโยชน์ที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดาและมารดา รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่าน เพื่อตอบแทนพระคุณที่ได้ช่วยให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการศึกษา

พิมพ์พัฒน์ กฤติธนาเดช

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
รายการสัญลักษณ์.....	ถ
บทที่ 1.....	1
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
บทที่ 2.....	3
หลักการทางวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 สเปกตรัมรังสีอาทิตย์ (spectral solar irradiance).....	3
2.1.1 สเปกตรัมรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (extraterrestrial solar radiation).....	3
2.1.2 สเปกตรัมรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลก.....	4
2.1.2.1 การกระเจิงรังสีอาทิตย์ของโมเลกุลอากาศ.....	4
2.1.2.2 การลดทอนรังสีอาทิตย์เนื่องจากฝุ่นละอองในบรรยากาศ.....	5
2.1.2.3 การดูดกลืนรังสีอาทิตย์เนื่องจากไอน้ำ.....	6
2.1.2.4 การดูดกลืนรังสีอาทิตย์เนื่องจากโอโซน.....	7
2.1.2.5 การดูดกลืนรังสีอาทิตย์เนื่องจากโมเลกุลของก๊าซต่างๆ.....	8

2.2 การวัดสเปกตรัมรังสีอาทิตย์.....	9
2.2.1 การวัดสเปกตรัมรังสีตรง.....	9
2.2.2 การวัดสเปกตรัมรังสีกระจาย.....	10
2.2.3 การวัดสเปกตรัมรังสีรวม.....	11
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
บทที่ 3	19
การศึกษาแบบจำลองสเปกตรัมรังสีดวงอาทิตย์ในจังหวัดนครปฐม	19
3.1 การเตรียมข้อมูลเพื่อนำไปใช้ในการเปรียบเทียบแบบจำลอง	19
3.1.1 ข้อมูลวัดจากเครื่องสเปกตรัมรังสีอาทิตย์.....	19
3.1.2 ข้อมูลโอโซน	31
3.1.3 ข้อมูลฝุ่นละออง.....	32
3.1.4 ข้อมูลไอน้ำ	33
3.1.5 ข้อมูลสภาพท้องฟ้า.....	34
3.2 การเปรียบเทียบแบบจำลอง.....	35
3.2.1 การเปรียบเทียบแบบจำลองสเปกตรัมรังสีตรง.....	35
3.2.2 การเปรียบเทียบแบบจำลองสเปกตรัมรังสีกระจาย.....	49
3.3 การพัฒนาแบบจำลองกึ่งเอมไพริคัลเพื่อคำนวณหาค่าสเปกตรัมรังสีรวมภายใต้ท้องฟ้า ปราศจากเมฆ	64
3.3.1 การเตรียมข้อมูลเพื่อใช้ในการพัฒนาแบบจำลองกึ่งเอมไพริคัล	64
3.3.1.1 ข้อมูลสเปกตรัมรังสีอาทิตย์	65
3.3.1.2 ข้อมูลโอโซน.....	66
3.3.1.3 ข้อมูลฝุ่นละออง	67
3.3.1.4 ข้อมูลไอน้ำ.....	70
3.3.1.5 ข้อมูลสภาพท้องฟ้า	72

3.3.2 การพัฒนาแบบจำลอง	73
3.3.3 การทดสอบแบบจำลอง	94
บทที่ 4	97
สรุป.....	97
รายการอ้างอิง	98
ประวัติผู้เขียน.....	99



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์ k_o , k_w และ k_g	13
ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบค่า MBD และ RMSD ของสเปกตรัมรังสีตรงจากแบบจำลองแต่ละเวลาในรอบวัน.....	45
ตารางที่ 3.2 แสดงค่า MBD และ RMSD ของการเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองกับค่าสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการวัดภาคพื้นดิน	48
ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบค่า MBD และ RMSD ของสเปกตรัมรังสีกระจายจากแบบจำลองแต่ละเวลาในรอบวัน.....	59
ตารางที่ 3.4 แสดงค่า MBD และ RMSD ของการเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองกับค่าสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการวัดภาคพื้นดิน.....	62
ตารางที่ 3.5 แสดงที่ตั้งของสถานีวัดสเปกตรัมรังสีรวม และช่วงข้อมูลที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองนี้	64
ตารางที่ 3.6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองในสมการที่ (3.3) ความยาวคลื่น 350-950 nm... 74	
ตารางที่ 3.7 เปรียบเทียบค่า RMSD และ MBD ของสเปกตรัมรังสีรวมจากแบบจำลองกึ่งเอมไพริคัลในแต่ละเวลาในรอบวัน	96

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	สเปกตรัมรังสีนอกบรรยากาศโลกของสมาคมทดสอบและวัสดุของสหรัฐอเมริกาตามมาตรฐาน ASTM E-490 (ASTM, 2000).....	3
รูปที่ 2.2	การแปรค่าของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์ซึ่งเกิดจากการกระเจิงรังสีอาทิตย์โดยโมเลกุลอากาศ (τ_{m}) ที่ความยาวคลื่น (λ) และมวลอากาศ (m_a) ค่าต่างๆ	4
รูปที่ 2.3	การแปรค่าของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์เนื่องจากฝุ่นละออง (τ_{d}) ตามความยาวคลื่นในกรณีที่บรรยากาศมีสัมประสิทธิ์ความขุ่นมัวของอังสตรอม (β) เท่ากับ 0.2 และตัวเลขยกกำลังของอังสตรอม (α) เท่ากับ 1.3 ที่มวลอากาศ (m_a) ค่าต่างๆ	5
รูปที่ 2.4	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์เนื่องจากไอน้ำ (τ_{w}) กรณีมวลอากาศเท่ากับ 1 และบรรยากาศมีไอน้ำ 2 เซนติเมตร (ดัดแปลงจาก (Iqbal, 1983)).....	6
รูปที่ 2.5	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์ของโอโซน (τ_{o_3}) ที่มวลอากาศ (m_a) ค่าต่างๆ.....	7
รูปที่ 2.6	การแปรค่าตามความยาวคลื่นของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์ของโมเลกุลของก๊าซต่างๆ (τ_{g}) ที่มวลอากาศ (m_a) เท่ากับ 1 (ดัดแปลงจาก (Iqbal, 1983)).....	8
รูปที่ 2.7	เครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ตรงซึ่งติดอยู่กับเครื่องติดตามดวงอาทิตย์ (sun tracker).....	9
รูปที่ 2.8	สเปกตรัมรังสีตรงจากเครื่องมือวัด ในวันที่ 6 เมษายน ค.ศ. 2016 เวลา 12:00 น.....	9
รูปที่ 2.9	เครื่องวัดสเปกตรัมรังสีกระจายที่มีลูกบอลบังรังสีตรงของดวงอาทิตย์ซึ่งติดอยู่กับเครื่องติดตามดวงอาทิตย์ (sun tracker).....	10
รูปที่ 2.10	สเปกตรัมรังสีกระจายจากเครื่องมือวัด ในวันที่ 6 เมษายน ค.ศ. 2016 เวลา 12:00 น... ..	10
รูปที่ 2.11	เครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอาทิตย์รวม EKO spectroradiometer (MS-711)	11
รูปที่ 2.12	สเปกตรัมรังสีรวมจากเครื่องมือวัด ในวันที่ 12 พฤศจิกายน ค.ศ. 2012 เวลา 12:00 น. ..	11
รูปที่ 3.1	เครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ตรง EKO spectroradiometer (MS-710) ซึ่งติดอยู่กับเครื่องติดตามดวงอาทิตย์ Kipp & Zonen (Model 2AP).....	20

รูปที่ 3.2 เครื่องวัดสเปกตรัมรังสีกระจาย EKO spectroradiometer (MS-710) ที่มีลูกบอลบังรังสีตรงของดวงอาทิตย์ซึ่งติดอยู่กับเครื่องติดตามดวงอาทิตย์ Kipp & Zonen (Model 2AP)	20
รูปที่ 3.3 สเปกตรัมรังสีตรงเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือนมกราคม ภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ	21
รูปที่ 3.4 สเปกตรัมรังสีตรงเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือนกุมภาพันธ์ภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ	21
รูปที่ 3.5 สเปกตรัมรังสีตรงเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือนมีนาคม ภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ	22
รูปที่ 3.6 สเปกตรัมรังสีตรงเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือนเมษายน ภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ	22
รูปที่ 3.7 สเปกตรัมรังสีตรงเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือนพฤษภาคมภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ	23
รูปที่ 3.8 สเปกตรัมรังสีตรงเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือนสิงหาคม ภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ	23
รูปที่ 3.9 สเปกตรัมรังสีตรงเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือนกันยายน ภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ	24
รูปที่ 3.10 สเปกตรัมรังสีตรงเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือนตุลาคม ภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ	24
รูปที่ 3.11 สเปกตรัมรังสีตรงเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือนพฤศจิกายนภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ	25
รูปที่ 3.12 สเปกตรัมรังสีตรงเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือนธันวาคมภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ	25
รูปที่ 3.13 สเปกตรัมรังสีกระจายเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือนมกราคมภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ	26
รูปที่ 3.14 สเปกตรัมรังสีกระจายเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือนกุมภาพันธ์ภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ	26

รูปที่ 3.15 สเปกตรัมรังสีกระจายเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือน มีนาคมภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ.....	27
รูปที่ 3.16 สเปกตรัมรังสีกระจายเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือน เมษายนภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ	27
รูปที่ 3.17 สเปกตรัมรังสีกระจายเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือน พฤษภาคมภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ	28
รูปที่ 3.18 สเปกตรัมรังสีกระจายเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือน สิงหาคมภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ.....	28
รูปที่ 3.19 สเปกตรัมรังสีกระจายเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือน กันยายนภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ.....	29
รูปที่ 3.20 สเปกตรัมรังสีกระจายเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือน ตุลาคมภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ.....	29
รูปที่ 3.21 สเปกตรัมรังสีกระจายเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือน พฤศจิกายนภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ.....	30
รูปที่ 3.22 สเปกตรัมรังสีกระจายเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือน ธันวาคมภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ.....	30
รูปที่ 3.23 แสดงข้อมูลโอโซนจากดาวเทียม OMI/AURA (Ozone Monitoring Instrument) ในวันที่ 6 เมษายน ค.ศ. 2016	31
รูปที่ 3.24 เครื่อง cimel sunphotometer ซึ่งติดตั้งที่มหาวิทยาลัยศิลปากรจังหวัดนครปฐม.....	32
รูปที่ 3.25 แสดงตัวอย่างข้อมูล AOD ในรอบวันที่ได้จากเครื่อง cimel sunphotometer ที่ มหาวิทยาลัยศิลปากรจังหวัดนครปฐม ในวันที่ 20 เมษายน ค.ศ. 2015	33
รูปที่ 3.26 แสดงตัวอย่างข้อมูลไอน้ำในรอบวันที่ได้จากเครื่อง cimel sunphotometer ที่ มหาวิทยาลัยศิลปากรจังหวัดนครปฐม ในวันที่ 20 เมษายน ค.ศ. 2015	33
รูปที่ 3.27 กล้องถ่ายภาพท้องฟ้าอัตโนมัติซึ่งติดตั้งที่มหาวิทยาลัยศิลปากรจังหวัดนครปฐม.....	34
รูปที่ 3.28 แสดงตัวอย่างของสภาพท้องฟ้ากล้องถ่ายภาพท้องฟ้าอัตโนมัติ a) overcast sky b) partly cloudy sky และ c) clear sky	34

รูปที่ 3.40 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมรังสีตรงจากแบบจำลองกับค่าสเปกตรัมรังสีตรงจากการวัด ภาคพื้นดินที่เวลา 14:00 น.....	44
รูปที่ 3.41 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมรังสีตรงจากแบบจำลองกับค่าสเปกตรัมรังสีตรงจากการวัด ภาคพื้นดินที่เวลา 15:00 น.....	44
รูปที่ 3.42 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมรังสีตรงจากแบบจำลองกับค่าสเปกตรัมรังสีตรงจากการวัด ภาคพื้นดินที่เวลา 16:00 น.....	45
รูปที่ 3.43 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Leckner (1978) ($I_{d\lambda,model}$) และสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการวัด ภาคพื้นดิน ($I_{d\lambda,meas}$).....	46
รูปที่ 3.44 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Brine และ Iqbal (1983) ($I_{d\lambda,model}$) และสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการวัด ภาคพื้นดิน ($I_{d\lambda,meas}$).....	46
รูปที่ 3.45 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Bird (1984) ($I_{d\lambda,model}$) และสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการวัดภาคพื้นดิน ($I_{d\lambda,meas}$).....	47
รูปที่ 3.46 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Bird และ Riordan (1986) ($I_{d\lambda,model}$) และสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการ วัดภาคพื้นดิน ($I_{d\lambda,meas}$).....	47
รูปที่ 3.47 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Gueymard (2001) ($I_{d\lambda,model}$) และสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการวัด ภาคพื้นดิน ($I_{d\lambda,meas}$).....	48
รูปที่ 3.48 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Leckner (1978) ($I_{d\lambda,model}$) และสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการ วัดภาคพื้นดิน ($I_{d\lambda,meas}$) ที่เวลา 08:00-16:00 น.....	50
รูปที่ 3.49 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Brine และ Iqbal (1983) ($I_{d\lambda,model}$) และสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน จากการวัดภาคพื้นดิน ($I_{d\lambda,meas}$) ที่เวลา 08:00-16:00 น.....	51

รูปที่ 3.62 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Leckner (1978) ($I_{sl,model}$) และสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการ วัดภาคพื้นดิน ($I_{sl,meas}$).....	60
รูปที่ 3.63 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Brine และ Iqbal (1983) ($I_{sl,model}$) และสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน จากการวัดภาคพื้นดิน ($I_{sl,meas}$).....	60
รูปที่ 3.64 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Bird (1984) ($I_{sl,model}$) และสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการวัด ภาคพื้นดิน ($I_{sl,meas}$).....	61
รูปที่ 3.65 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Bird และ Riodan (1986) ($I_{sl,model}$) และสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน จากการวัดภาคพื้นดิน ($I_{sl,meas}$).....	61
รูปที่ 3.66 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Gueymard (2001) ($I_{sl,model}$) และสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจาก การวัดภาคพื้นดิน ($I_{sl,meas}$).....	62
รูปที่ 3.67 แสดงตำแหน่งของสถานีที่ตั้งเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอาทิตย์รวม EKO spectroradiometer.....	65
รูปที่ 3.68 ดาวเทียม OMI/AURA (Ozone Monitoring Instrument).....	66
รูปที่ 3.69 เครื่อง cimel sunphotometer ที่ติดตั้งแต่ละสถานี.....	67
รูปที่ 3.70 แสดงตัวอย่างข้อมูล AOD ในรอบวันที่ได้จากเครื่อง cimel sunphotometer ที่จังหวัด เชียงใหม่ (อมก๋อย) ในวันที่ 20 พฤศจิกายน ค.ศ. 2016.....	68
รูปที่ 3.71 แสดงตัวอย่างข้อมูล AOD ในรอบวันที่ได้จากเครื่อง cimel sunphotometer ที่จังหวัด นครปฐม ในวันที่ 7 ธันวาคม ค.ศ. 2012.....	68
รูปที่ 3.72 แสดงตัวอย่างข้อมูล AOD ในรอบวันที่ได้จากเครื่อง cimel sunphotometer ที่จังหวัด อุบลราชธานี ในวันที่ 20 ธันวาคม ค.ศ. 2016.....	69
รูปที่ 3.73 แสดงตัวอย่างข้อมูลไอน้ำในรอบวันที่ได้จากเครื่อง cimel sunphotometer ที่จังหวัด เชียงใหม่ (อมก๋อย) ในวันที่ 20 พฤศจิกายน ค.ศ. 2016.....	70

รูปที่ 3.74 แสดงตัวอย่างข้อมูลไอน้ำในรอบวันที่ได้จากเครื่อง cimel sunphotometer ที่จังหวัด นครปฐม ในวันที่ 7 ธันวาคม ค.ศ. 2012 71

รูปที่ 3.75 แสดงตัวอย่างข้อมูลไอน้ำในรอบวันที่ได้จากเครื่อง cimel sunphotometer ที่จังหวัด อุบลราชธานี ในวันที่ 20 ธันวาคม ค.ศ. 2016..... 71

รูปที่ 3.76 เครื่องถ่ายภาพท้องฟ้าซึ่งติดตั้งที่แต่ละสถานี..... 72

รูปที่ 3.77 การเปรียบเทียบสเปกตรัมรังสีรวมจากแบบจำลองกึ่งเอมไพริคัลกับข้อมูลสเปกตรัมรังสี รวมที่ได้จากเครื่องวัด EKO spectroradiometer..... 94

รูปที่ 3.78 สเปกตรัมรังสีรวมเฉลี่ยรายชั่วโมงจากแบบจำลองกึ่งเอมไพริคัลที่ความยาวคลื่นต่างๆ.... 96



รายการสัญลักษณ์

- $I_{d\lambda}$ คือ สเปกตรัมรังสีตรง ($W/m^2 - \mu m$)
- $I_{s\lambda}$ คือ สเปกตรัมรังสีกระจาย ($W/m^2 - \mu m$)
- $I_{0\lambda}$ คือ สเปกตรัมรังสีจากดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก ($W/m^2 - \mu m$)
- $I_{r\lambda}$ คือ สเปกตรัมรังสีกระจายที่เกิดจากการกระเจิงโดยโมเลกุลอากาศ ($W/m^2 - \mu m$)
- $I_{a\lambda}$ คือ สเปกตรัมรังสีกระจายที่เกิดจากการกระเจิงโดยฝุ่นละออง ($W/m^2 - \mu m$)
- $I_{m\lambda}$ คือ สเปกตรัมรังสีกระจายที่เกิดจากการกระเจิงระหว่างพื้นโลกและชั้นบรรยากาศ ($W/m^2 - \mu m$)
- $\tau_{r\lambda}$ คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของรังสีอาทิตย์เนื่องจากการกระเจิงโดยโมเลกุลอากาศ (-)
- $\tau_{0\lambda}$ คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์เนื่องจากโอโซน (-)
- $\tau_{w\lambda}$ คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์เนื่องจากไอน้ำ (-)
- $\tau_{g\lambda}$ คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์เนื่องจากโมเลกุลก๊าซต่าง ๆ (-)
- $\tau_{a\lambda}$ คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์เนื่องจาก ฝุ่นละออง (-)
- $\tau_{aa\lambda}$ คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์เนื่องจากฝุ่นละอองคิดเฉพาะการดูดกลืนเท่านั้น (-)
- $\tau_{as\lambda}$ คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์เนื่องจากฝุ่นละอองคิดเฉพาะการกระเจิงเท่านั้น (-)
- $\tau'_{0\lambda}, \tau'_{w\lambda}, \tau'_{g\lambda}, \tau'_{r\lambda}$ และ $\tau'_{a\lambda}$ คือ พารามิเตอร์ที่มีมวลอากาศสัมพันธ์เป็น $m_r = 1.9$
- λ คือ ความยาวคลื่น (μm)
- E_0 คือ แฟคเตอร์สำหรับแก้ผลการแปรค่าของระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์ (-)
- θ_z คือ มุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ (องศา)
- ψ คือ มุมวัน (เรเดียน)
- d คือ ลำดับวันในรอบปี (-)
- m_a คือ มวลอากาศ (-)
- m_r คือ มวลอากาศสัมพันธ์ (-)
- k_o คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีอาทิตย์ของโอโซน (-)
- k_w คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีอาทิตย์ของไอน้ำ (-)
- k_g คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีอาทิตย์ของก๊าซต่างๆ (-)
- l คือ ปริมาณโอโซน (cm)

- w คือ ปริมาณไอน้ำ (cm)
- β คือ สัมประสิทธิ์ความชุ่มชื้นของบรรยากาศของอาร์มสตรอง (-)
- α คือ ตัวเลขยกกำลังของอาร์มสตรอง (-)
- P คือ ความดันที่พื้นผิวโลก ณ ตำแหน่งที่ต้องการวัด (mb)
- P_0 คือ ความดันเหนือระดับน้ำทะเล (mb)
- ω_0 คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิงครั้งแรกของฝุ่นละออง (-)
- ρ_{gl} คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิงรังสีดวงอาทิตย์ของพื้นผิวโลกในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ (-)
- ρ_{at} คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิงรังสีดวงอาทิตย์ของบรรยากาศที่ความยาวคลื่นต่างๆ (-)
- m_0 คือ มวลอากาศของโอโซน (-)
- h_0 คือ ความสูงจากพื้นโลก (km)
- C_s คือ แฟคเตอร์สำหรับแก้ผลการแปรค่าที่ความยาวคลื่นต่างๆ (-)
- m_R คือ มวลอากาศสำหรับโมเลกุลอากาศ (-)
- m_0 คือ มวลอากาศสำหรับโอโซน (-)
- f_w คือ แฟคเตอร์แก้ค่าในชั้นบรรยากาศสำหรับไอน้ำ (-)
- m_w คือ มวลอากาศสำหรับไอน้ำ (-)
- m_g คือ มวลอากาศสำหรับโมเลกุลอากาศ (-)
- m_{acr} คือ มวลอากาศสำหรับฝุ่นละออง (-)
- m_n คือ มวลอากาศสำหรับไนโตรเจนไดออกไซด์ (-)
- X_R คือ ความลึกเชิงแสงของโมเลกุลอากาศ (-)
- X_O คือ ความลึกเชิงแสงของโอโซน (-)
- X_g คือ ความลึกเชิงแสงของก๊าซต่างๆ (-)
- X_w คือ ความลึกเชิงแสงของไอน้ำในชั้นบรรยากาศ (-)
- X_a คือ ความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง (-)
- X_n คือ ความลึกเชิงแสงของไนโตรเจนไดออกไซด์ (-)
- B_w คือ แฟคเตอร์แก้ค่าสำหรับไอน้ำ (-)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

รังสีที่แผ่ออกมาจากดวงอาทิตย์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีความยาวคลื่นต่างๆ ตั้งแต่รังสีแกมมาจนถึงคลื่นวิทยุ โดยแต่ละความยาวคลื่นมีความเข้มแตกต่างกัน ซึ่งเรียกว่าสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ เนื่องจากข้อมูลสเปกตรัมรังสีอาทิตย์มีความสำคัญต่อการพัฒนาเซลล์สุริยะและการศึกษาด้านผิวเลือกรังสี (selective surface) นอกจากนี้สเปกตรัมรังสีที่แผ่ออกมาจากดวงอาทิตย์ยังใช้เป็นข้อมูลสำหรับคำนวณสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกอีกด้วย (เสริม จันทร์ฉาย, 2557) ในปัจจุบันข้อมูลของสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ยังไม่เพียงพอต่อการใช้งาน เนื่องจากการวัดสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ต้องใช้ spectroradiometer ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาแพง ดังนั้นในช่วง 30 ปีที่ผ่านมา นักวิทยาศาสตร์จึงได้เสนอแบบจำลองพารามิเตอร์ไรเซชันที่แสดงความสัมพันธ์ทางฟิสิกส์ของบรรยากาศกับค่ารังสีอาทิตย์ในรูปสมการพีชคณิต เพื่อหาค่าของสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ เช่น (Iqbal, 1983) ได้เสนอแบบจำลองสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ที่สามารถคำนวณได้ทั้งรังสีตรง รังสีกระจาย และรังสีรวมในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆ โดยใช้พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับบรรยากาศเป็นตัวแปรหลักในการคำนวณ ซึ่งประกอบด้วย การกระเจิงเนื่องจาก Rayleigh และฝุ่นละออง การดูดกลืนเนื่องจากโอโซน ไอน้ำ และโมเลกุลก๊าซต่างๆ ในบรรยากาศ ในปี ค.ศ. 1984 Bird ได้เสนอแบบจำลองในการคำนวณสเปกตรัมรังสีตรงและรังสีกระจายของรังสีอาทิตย์บนระนาบในแนวระดับ โดยใช้ข้อมูลทางบรรยากาศประกอบด้วย ปริมาณโอโซน ไอน้ำ ฝุ่นละออง และโมเลกุลอากาศ เป็นอินพุตหลักในการคำนวณ และในปี ค.ศ. 2001 Gueymard ได้เสนอแบบจำลองพารามิเตอร์การส่งผ่านสำหรับรังสีตรงและรังสีรวมของดวงอาทิตย์ โดยการคำนวณดังกล่าวได้พิจารณาค่าพารามิเตอร์ของบรรยากาศ ได้แก่ การกระเจิงเนื่องจาก Rayleigh และฝุ่นละออง การดูดกลืนเนื่องจากโอโซน ไอน้ำ โมเลกุลก๊าซ และไนโตรเจนไดออกไซด์ อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่ผ่านมามีความคลาดเคลื่อนอยู่มาก ประกอบกับค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในแบบจำลอง มีความซับซ้อน นอกจากนี้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในอดีตมักจะใช้ข้อมูลเฉพาะแหล่ง จึงไม่สามารถนำไปใช้คำนวณสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ที่อื่นได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการศึกษาแบบจำลองที่มีอยู่แล้ว และพัฒนาแบบจำลองสเปกตรัมรังสีอาทิตย์โดยจะเปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดโดยใช้เครื่องมือวัดภาคพื้นดิน ซึ่งจะพิจารณาทั้งในส่วนองรังสีตรง รังสีกระจาย และรังสีรวม ที่ความยาวคลื่นต่างๆ

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อเปรียบเทียบแบบจำลองสำหรับหาสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆที่มีอยู่ก่อนแล้ว กับค่าที่ได้จากเครื่องมือวัด spectroradiometer
2. เพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับหาค่าสเปกตรัมรังสีอาทิตย์รวมในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบและพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณหาสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆ โดยใช้ข้อมูลสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ซึ่งมีช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 350-950 nm ติดตั้งอยู่ที่สถานีเรดาร์ของกรมฝนหลวงและการบินเกษตร อำเภอมวกก่อย จังหวัดเชียงใหม่ ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี และที่มหาวิทยาลัยศิลปากร อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม



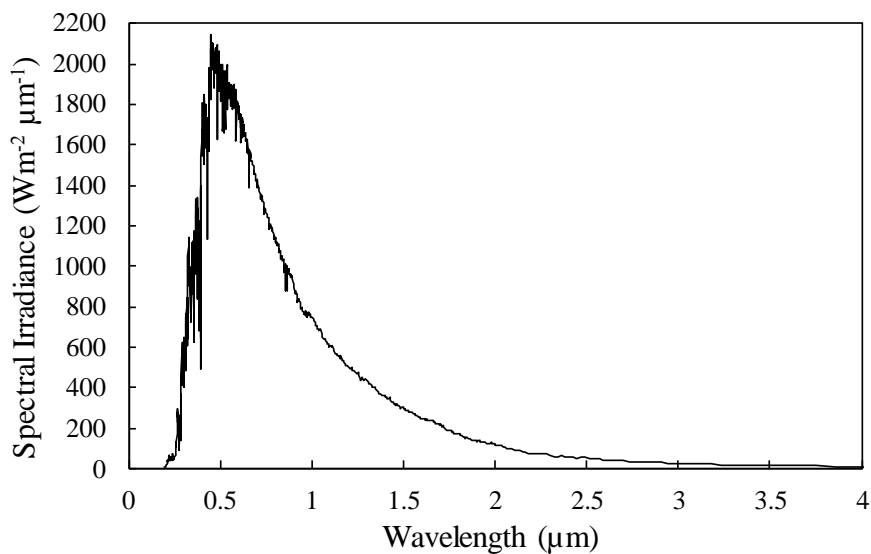
บทที่ 2

หลักการทางวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สเปกตรัมรังสีอาทิตย์ (spectral solar irradiance)

2.1.1 สเปกตรัมรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (extraterrestrial solar radiation)

สเปกตรัมรังสีอาทิตย์ (spectral solar irradiance) หมายถึงความเข้มของรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่างๆ โดยแต่ละความยาวคลื่นก็จะมีค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่แตกต่างกัน ซึ่งสเปกตรัมที่แผ่ออกมาจากดวงอาทิตย์ยังใช้เป็นข้อมูลสำหรับคำนวณสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกซึ่งสามารถนำมาใช้งานทางด้านการผลิตกระแสไฟฟ้าจากโซลาร์เซลล์ได้อีกด้วย นอกจากนี้สเปกตรัมรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกยังสามารถใช้เป็นข้อมูลสำหรับคำนวณสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลก จึงทำให้หลายปีที่ผ่านมานักวิทยาศาสตร์พยายามหาค่าของสเปกตรัมรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (American Society for Testing And Materials (ASTM)) ในปัจจุบันสมาคมทดสอบและวัสดุของสหรัฐอเมริกาได้ประกาศให้ค่าสเปกตรัมรังสีอาทิตย์มีค่าคงตัวอยู่ที่ $1,366.1 \text{ W/m}^2$ ซึ่งเป็นค่าสเปกตรัมมาตรฐานในปี ค.ศ. 2000 เรียกกันทั่วไปว่าสเปกตรัม ASTM E-490 (ASTM, 2000) สเปกตรัมรังสีนอกบรรยากาศโลกดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 สำหรับสเปกตรัมทุกความยาวคลื่นสามารถหาได้ที่เว็บไซต์ <http://redc.nrel.gov/solar/spectra/am0/>



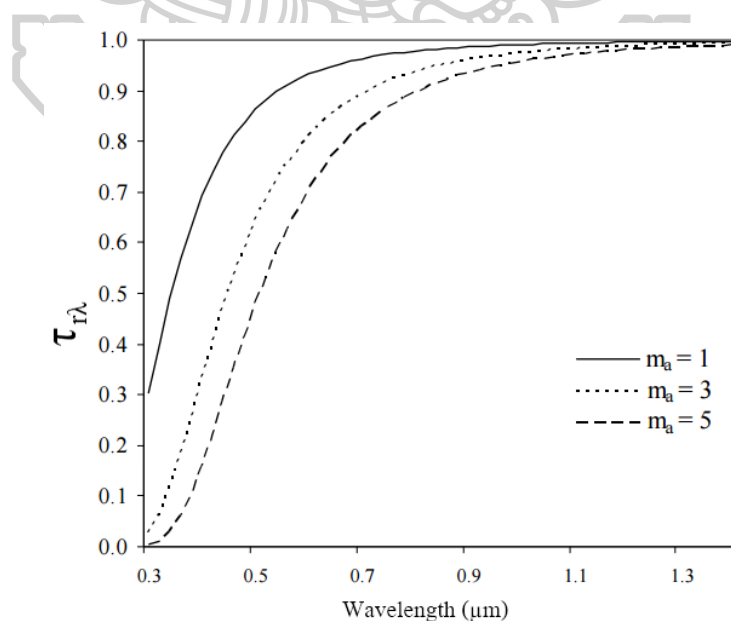
รูปที่ 2.1 สเปกตรัมรังสีนอกบรรยากาศโลกของสมาคมทดสอบและวัสดุของสหรัฐอเมริกาตามมาตรฐาน ASTM E-490 (ASTM, 2000)

2.1.2 สเปกตรัมรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลก

เนื่องจากสเปกตรัมรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกสามารถใช้เป็นข้อมูลสำหรับคำนวณสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลก ซึ่งสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกในงานวิจัยนี้เรียกว่าสเปกตรัมรังสีรวม โดยสเปกตรัมรังสีรวมประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ สเปกตรัมรังสีตรง และสเปกตรัมรังสีกระจาย ซึ่งสเปกตรัมรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกจากดวงอาทิตย์ที่เดินทางมาถึงพื้นผิวโลกจะถูกลดทอนโดยองค์ประกอบต่างๆ ทางบรรยากาศ ทำให้ค่าของสเปกตรัมรังสีรวมมีค่าลดน้อยลง จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาปัจจัยองค์ประกอบทางบรรยากาศต่างๆ ที่มีผลต่อสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ โดยมีรายละเอียดตามหัวข้อต่อไปนี้

2.1.2.1 การกระเจิงรังสีอาทิตย์ของโมเลกุลอากาศ

การกระเจิงรังสีอาทิตย์ของโมเลกุลอากาศถูกนำเสนอโดย ลอร์ดเรย์ลีห์ (Lord Rayleigh) เพื่อเป็นเกียรติกับลอร์ดเรย์ลีห์จึงเรียกรังสีที่กระเจิงแสงโดยโมเลกุลอากาศว่าการกระเจิงแบบเรย์ลีห์ (Rayleigh scattering) ซึ่งจะนำทฤษฎีนี้มาใช้ในการคำนวณหารังสีอาทิตย์ที่ถูกระเจิงโดยโมเลกุลของก๊าซต่างในบรรยากาศได้ ซึ่งสามารถแสดงถึงสมบัติของโมเลกุลอากาศที่ลดทอนรังสีอาทิตย์จากการกระเจิงโดยโมเลกุลอากาศได้ดังรูปที่ 2.2



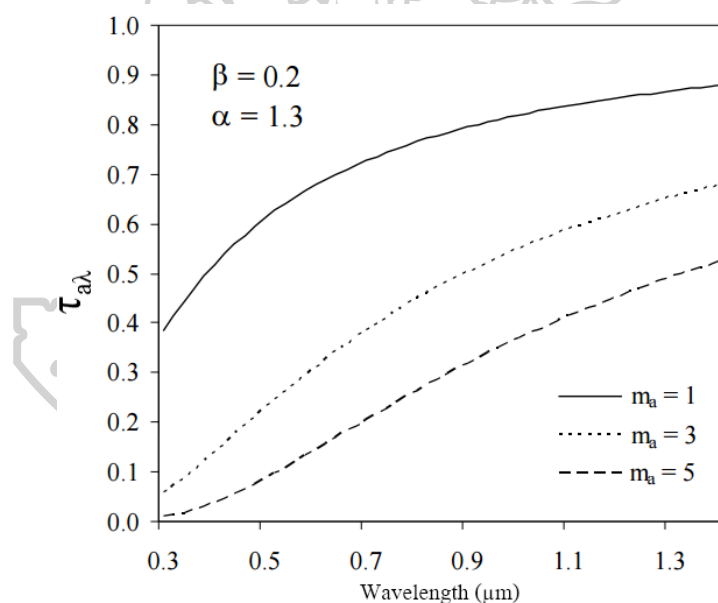
รูปที่ 2.2 การแปรค่าของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์ซึ่งเกิดจากการกระเจิงรังสีอาทิตย์โดย

โมเลกุลอากาศ ($\tau_{r\lambda}$) ที่ความยาวคลื่น (λ) และมวลอากาศ (m_a) ค่าต่างๆ

จากกราฟจะเห็นว่าที่ความยาวคลื่นมากกว่า $1 \mu\text{m}$ การกระเจิงรังสีอาทิตย์โดยโมเลกุลอากาศจะมีผลน้อยมากและการกระเจิงจะมีผลมากที่ความยาวคลื่นสั้นๆ จากกราฟนี้ยังแสดงให้เห็นว่าที่ความยาวคลื่นสั้นซึ่งเป็นแสงสีน้ำเงิน สัมประสิทธิ์การส่งผ่านมีค่าต่ำแสดงว่าแสงส่วนใหญ่ที่ความยาวคลื่นนี้ถูกกระเจิงทำให้เราเห็นท้องฟ้าเป็นสีน้ำเงิน

2.1.2.2 การลดทอนรังสีอาทิตย์เนื่องจากฝุ่นละอองในบรรยากาศ

ความสามารถในการลดทอนรังสีอาทิตย์เนื่องจากฝุ่นละอองนั้นมีทั้งกระบวนการดูดกลืนและการกระเจิง ดังนั้นการแยกสัดส่วนของรังสีอาทิตย์ที่ลดลงจากแต่ละกระบวนการมีวิธีการที่ซับซ้อน ดังนั้นอังสตรอม (Ångström, 1929) จึงเสนอวิธีการหาค่าการลดทอนรังสีอาทิตย์เนื่องจากฝุ่นละอองในบรรยากาศ ซึ่งสามารถแสดงการลดทอนของฝุ่นละอองที่ความยาวคลื่นต่างๆ ดังรูปที่ 2.3

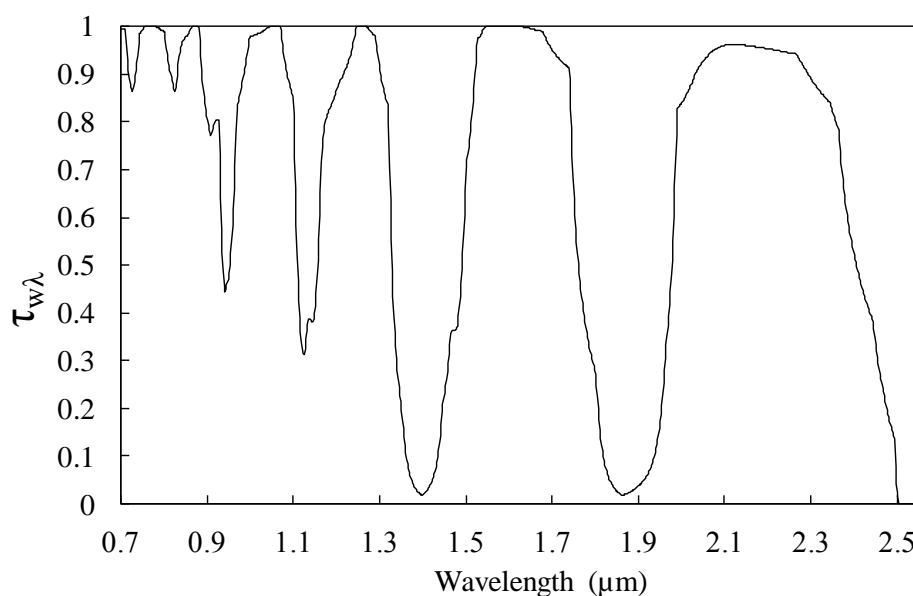


รูปที่ 2.3 การแปรค่าของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์เนื่องจากฝุ่นละออง (τ_{λ}) ตามความยาวคลื่นในกรณีที่บรรยากาศมีสัมประสิทธิ์ความขุ่นมัวของอังสตรอม (β) เท่ากับ 0.2 และตัวเลขยกกำลังของอังสตรอม (α) เท่ากับ 1.3 ที่มวลอากาศ (m_a) ค่าต่างๆ

โดยค่าสัมประสิทธิ์ความขุ่นมัวของอังสตรอม (β) จะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นของปริมาณฝุ่นละออง หรือจำนวนอนุภาคของฝุ่นละอองต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของอากาศ กล่าวคือถ้า β มีค่ามากความหนาแน่นของฝุ่นละอองในบรรยากาศจะมีค่ามากด้วย สำหรับตัวเลขยกกำลังของอังสตรอม (α) จะมีความสัมพันธ์กับขนาดของฝุ่นละอองแบบผกผัน กล่าวคือถ้า α มีค่าน้อยฝุ่นละอองจะมีขนาดใหญ่และ α มีค่ามากฝุ่นละอองจะมีขนาดเล็ก โดยฝุ่นละอองทั่วไปจะมีค่า $\alpha = 1.3 \pm 0.5$

2.1.2.3 การดูดกลืนรังสีอาทิตย์เนื่องจากไอน้ำ

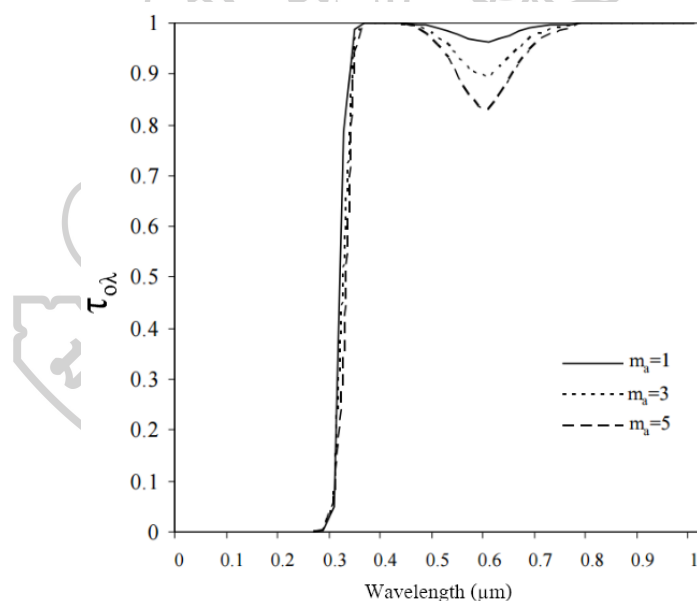
การลดทอนรังสีอาทิตย์เนื่องจากไอน้ำจะมีทั้งการกระเจิงและการดูดกลืน ซึ่งการลดลงของรังสีอาทิตย์ที่ถูกกระเจิงโดยโมเลกุลของไอน้ำถือว่าน้อยมากเมื่อเทียบกับการดูดกลืน ดังนั้นการคำนวณรังสีอาทิตย์ที่เคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศโดยทั่วไปจะพิจารณาเฉพาะผลจากการดูดกลืนเท่านั้น โดยส่วนใหญ่ไอน้ำจะดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นรังสีอินฟราเรด โดยปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืนจะขึ้นอยู่กับปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศและมวลอากาศที่รังสีอาทิตย์เคลื่อนที่ผ่าน กระบวนการดังกล่าวสามารถแสดงตัวอย่างผลการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นในช่วงรังสีอินฟราเรดได้ในรูปของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์เนื่องจากไอน้ำ ($\tau_{w\lambda}$) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์เนื่องจากไอน้ำ ($\tau_{w\lambda}$) กรณีมวลอากาศเท่ากับ 1 และบรรยากาศมีไอน้ำ 2 เซนติเมตร (ดัดแปลงจาก (Iqbal, 1983))

2.1.2.4 การดูดกลืนรังสีอาทิตย์เนื่องจากโอโซน

จากโครงสร้างระดับพลังงานของโมเลกุลของโอโซน ทำให้โอโซนสามารถดูดกลืนรังสีเป็นแถบความยาวคลื่น ที่สำคัญคือ แถบฮาร์ทลีย์ (Hartley band) แถบฮักกินส์ (Huggins band) และแถบแชปปูสซ์ (Chappuis band) ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่น $0.22-0.29 \mu\text{m}$ $0.32-0.36 \mu\text{m}$ และ $0.45-0.65 \mu\text{m}$ ตามลำดับ โดยในช่วงแถบฮาร์ทลีย์ โอโซนจะดูดกลืนรังสีอาทิตย์ได้สูงมาก รองลงมาคือแถบฮักกินส์และแถบแชปปูสซ์ จากแถบการดูดกลืนเหล่านี้ทำให้อัตราการดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ตบี ($0.28-0.32 \mu\text{m}$) ส่วนใหญ่จะถูกดูดกลืนโดยโอโซน และในช่วงความยาวคลื่น visible ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่น ($0.50-0.75 \mu\text{m}$) ถูกดูดกลืนโดยโอโซนเล็กน้อย สามารถแสดงผลการดูดกลืนรังสีอาทิตย์เนื่องจากโอโซนได้ในรูปของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์ของโอโซนที่ความยาวคลื่นต่างๆ ดังรูปที่ 2.5

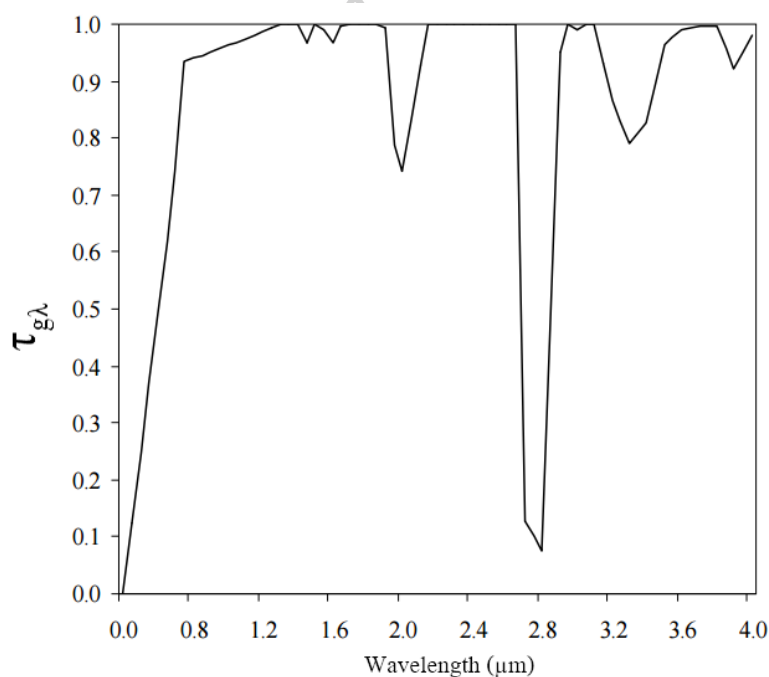


รูปที่ 2.5 สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์ของโอโซน ($\tau_{0\lambda}$) ที่มวลอากาศ (m_a) ค่าต่างๆ

จากกราฟจะเห็นว่าที่ความยาวคลื่นน้อยกว่า $0.29 \mu\text{m}$ ซึ่งเป็นช่วงความยาวคลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ตบีจะมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านเป็นศูนย์ ทั้งนี้เพราะโอโซนดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นนี้นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นการดูดกลืนของโอโซนในช่วงความยาวคลื่น visible ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่น ($0.50-0.75 \mu\text{m}$) อีกเล็กน้อย

2.1.2.5 การดูดกลืนรังสีอาทิตย์เนื่องจากโมเลกุลของก๊าซต่างๆ

โมเลกุลอากาศในที่นี่จะหมายถึงโมเลกุลของก๊าซในบรรยากาศอื่นๆ นอกเหนือจากโอโซนและไอน้ำโดยส่วนใหญ่ได้แก่คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และออกซิเจน (O_2) นอกจากนี้ยังมีก๊าซอื่นๆ เช่น ไนตรัสออกไซด์ (N_2O) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นต้น ผลการดูดกลืนรังสีอาทิตย์เนื่องจากโมเลกุลของก๊าซต่างๆ ได้ในรูปของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์ของโมเลกุลของก๊าซต่างๆ ที่ความยาวคลื่นแตกต่างกันสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การแปรค่าตามความยาวคลื่นของสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์ของโมเลกุลของก๊าซต่างๆ (τ_{sun}) ที่มวลอากาศ (m_a) เท่ากับ 1 (ดัดแปลงจาก (Iqbal, 1983))

จากกราฟจะเห็นการดูดกลืนของโมเลกุลของก๊าซส่วนใหญ่อยู่ในช่วงความยาวคลื่นรังสีอินฟราเรดโดยมีการดูดกลืนมากที่ความยาวคลื่น $2.8 \mu\text{m}$ และที่ความยาวคลื่นใกล้เคียง

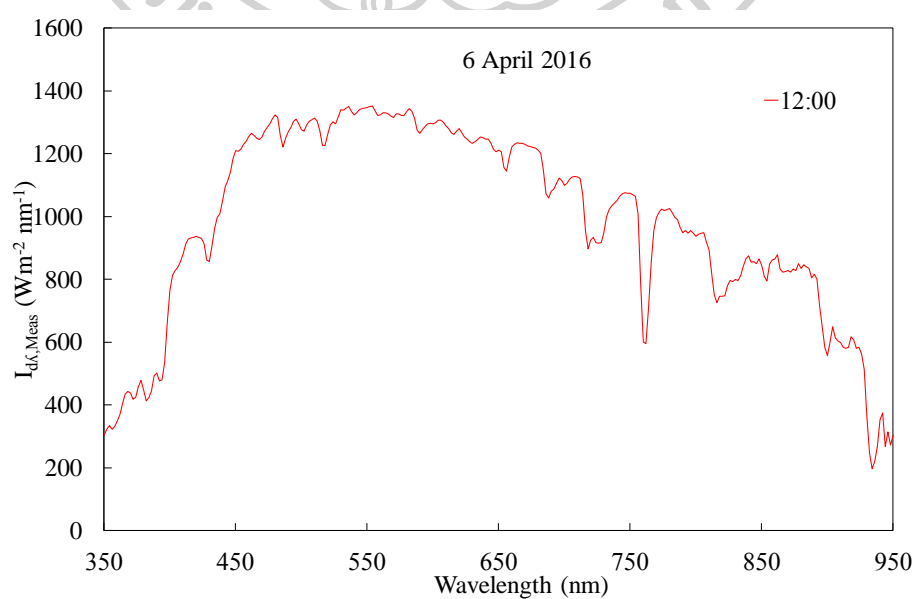
2.2 การวัดสเปกตรัมรังสีอาทิตย์

2.2.1 การวัดสเปกตรัมรังสีตรง

สเปกตรัมรังสีตรงสามารถวัดได้โดยใช้เครื่องวัดสเปกตรัม ซึ่งติดตั้งบนเครื่องติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ (sun tracker) ดังรูปตัวอย่างที่ 2.7 สำหรับการบันทึกข้อมูลทำโดยต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ และตั้งโปรแกรมให้เครื่องทำการบันทึกข้อมูล โดยตัวอย่างของข้อมูลเป็นข้อมูลสเปกตรัมรังสีตรงที่ได้ในช่วงความยาวคลื่น 350-950 nm แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 เครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ตรงซึ่งติดตั้งอยู่กับเครื่องติดตามดวงอาทิตย์ (sun tracker)



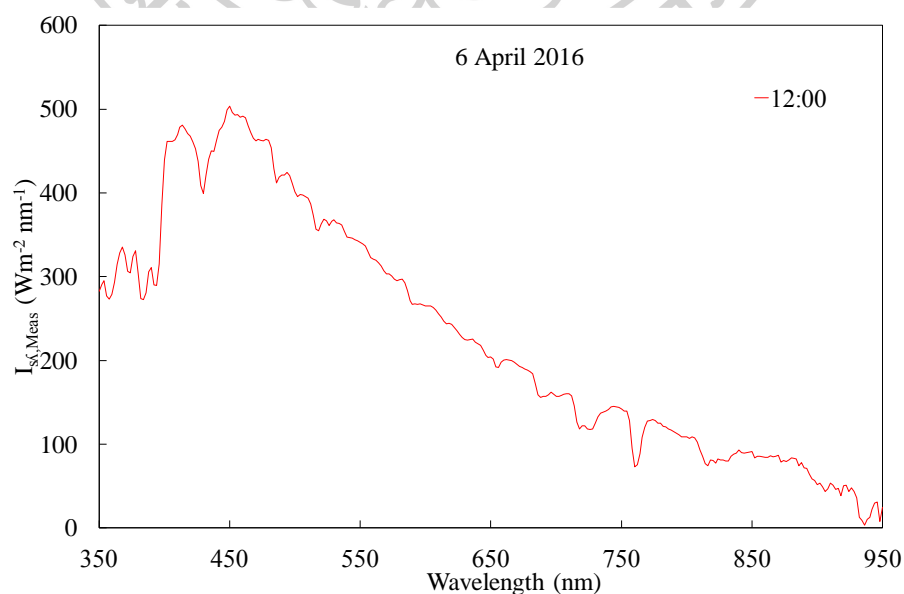
รูปที่ 2.8 สเปกตรัมรังสีตรงจากเครื่องมือวัด ในวันที่ 6 เมษายน ค.ศ. 2016 เวลา 12:00 น.

2.2.2 การวัดสเปกตรัมรังสีกระจาย

การวัดสเปกตรัมรังสีกระจายสามารถวัดได้โดยใช้เครื่องวัดสเปกตรัมที่มีลูกบอลบังรังสีตรง ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งต้องติดตั้งลูกบอลกับอุปกรณ์ติดตามการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ (sun tracker) เพื่อให้ลูกบอลบังรังสีตรงตลอดทั้งวัน สำหรับการบันทึกข้อมูลทำโดยต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ และตั้งโปรแกรมให้เครื่องทำการบันทึกข้อมูล ตัวอย่างของข้อมูลเป็นข้อมูลสเปกตรัมรังสีกระจายที่ได้ในช่วงความยาวคลื่น 350-950 nm แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 เครื่องวัดสเปกตรัมรังสีกระจายที่มีลูกบอลบังรังสีตรงของดวงอาทิตย์ซึ่งติดตั้งอยู่กับเครื่องติดตามดวงอาทิตย์ (sun tracker)



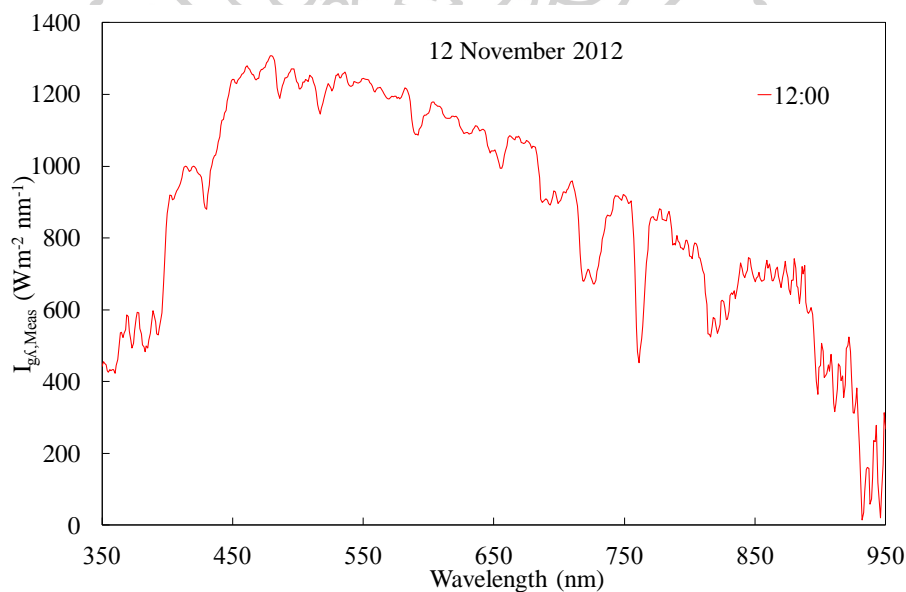
รูปที่ 2.10 สเปกตรัมรังสีกระจายจากเครื่องมือวัด ในวันที่ 6 เมษายน ค.ศ. 2016 เวลา 12:00 น.

2.2.3 การวัดสเปกตรัมรังสีรวม

สเปกตรัมรังสีรวมสามารถวัดได้โดยใช้เครื่องวัดสเปกตรัมดังตัวอย่างรูปที่ 2.11 ซึ่งติดตั้งบนฐานที่มีความมั่นคงบนพื้นราบ และไม่มีเงาของอาคารหรือต้นไม้บังตลอดช่วงเช้าและบ่าย โดยทั่วไปการบันทึกข้อมูลทำโดยต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ และตั้งโปรแกรมให้เครื่องทำการบันทึกข้อมูลตัวอย่างของข้อมูลเป็นข้อมูลสเปกตรัมรังสีรวมที่ได้ในช่วงความยาวคลื่น 350-950 nm แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.11 เครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอาทิตย์รวม EKO spectroradiometer (MS-711)



รูปที่ 2.12 สเปกตรัมรังสีรวมจากเครื่องมือวัด ในวันที่ 12 พฤศจิกายน ค.ศ. 2012 เวลา 12:00 น.

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากข้อมูลสเปกตรัมรังสีอาทิตย์มีความสำคัญต่อการออกแบบเซลล์สุริยะซึ่งเป็นแหล่งพลังงานธรรมชาติ นอกจากนี้สเปกตรัมรังสีที่แผ่ออกมาจากดวงอาทิตย์ยังใช้เป็นข้อมูลสำหรับการศึกษาด้านผิวเลือกรังสีอีกด้วย ในปัจจุบันข้อมูลของสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ยังไม่เพียงพอต่อการใช้งาน เนื่องจากการวัดสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ต้องใช้ spectroradiometer ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีราคาแพง ดังนั้นในช่วง 30 ปีที่ผ่านมานักวิทยาศาสตร์จึงได้เสนอแบบจำลองทั้งในรูปแบบของสมการเชิงพีสิกส์และเชิงสถิติเพื่อหาค่าของสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ โดยแบบจำลองส่วนใหญ่มักจะพิจารณาการกระเจิงและดูดกลืนรังสีอาทิตย์เนื่องจากองค์ประกอบทางบรรยากาศต่างๆ ซึ่งแบบจำลองสำหรับคำนวณหาสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ที่ผ่านมายังพื้นผิวโลก สามารถสรุปได้ดังนี้

Leckner (1978) ได้เสนอแบบจำลองเพื่อหาค่าสเปกตรัมรังสีตรง รังสีกระจาย และรังสีรวมที่พื้นผิวโลกภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆโดยขึ้นอยู่กับการลดทอนสเปกตรัมรังสีอาทิตย์จากองค์ประกอบทางบรรยากาศ ซึ่งใช้สเปกตรัมรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลกนำมาจาก (Thekaekara, 1973) และค่าองค์ประกอบทางบรรยากาศต่างๆ เช่น ปริมาณโอโซน ไอน้ำ ฝุ่นละออง และโมเลกุลอากาศ เป็นอินพุตหลักที่ป้อนเข้าไปในแบบจำลอง ที่ความยาวคลื่น 0.3-0.4 μm โดยจะใช้ข้อมูลสเปกตรัมของ (Kok, 1972) เป็นข้อมูลสเปกตรัมที่ใช้ในการเปรียบเทียบแบบจำลอง โดยแบบจำลองของ Leckner มีรายละเอียดดังนี้

$$I_{d\lambda} = I_{0\lambda} \tau_{r\lambda} \tau_{o\lambda} \tau_{g\lambda} \tau_{w\lambda} \tau_{a\lambda} E_0 \quad (2.1)$$

$$I_{s\lambda} = 0.5(I_{0\lambda} \tau_{o\lambda} \tau_{g\lambda} \tau_{w\lambda} - I_{d\lambda}) \cos \theta_z \quad (2.2)$$

เมื่อ $I_{d\lambda}$ คือ สเปกตรัมรังสีตรง ($\text{W}/\text{m}^2 - \mu\text{m}$)

$I_{s\lambda}$ คือ สเปกตรัมรังสีกระจาย ($\text{W}/\text{m}^2 - \mu\text{m}$)

$I_{0\lambda}$ คือ สเปกตรัมรังสีจากดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก ($\text{W}/\text{m}^2 - \mu\text{m}$)

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ k_o , k_w และ k_g คือค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีอาทิตย์เนื่องจากโอโซน ไอน้ำ และก๊าซต่างๆ ในบรรยากาศ ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 2.1

จากผลการเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีตรงกับข้อมูลสเปกตรัมของ (Kok, 1972) ให้ค่าความสอดคล้องที่ดี แต่เนื่องจากสเปกตรัมรังสีกระจายมีการคำนวณที่ค่อนข้างซับซ้อนจึงทำให้ผลการเปรียบเทียบไม่สอดคล้องกับข้อมูลวัดเท่าที่ควร

ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์ k_o , k_w และ k_g

ความยาวคลื่น (μm)	สเปกตรัมรังสีอาทิตย์นอก บรรยากาศโลก ($\text{W}/\text{m}^2 - \text{nm}$)	k_w	k_o	k_g
0.20	0	114.52	0	0.20
0.30	0	10.52	0	0.30
0.40	0	0	0	0.40
0.50	0	0.02955	0	0.50
0.60	0.0463235	0.119382	0	0.60
0.70	7.20E-05	0.00439997	0.307998	0.70
0.80	3.49599	0	0	0.80
0.90	6.22499	0	0	0.90
1.00	520.002	0	6.00E-05	1.00
1.10	0.000299998	0	0.0849995	1.10
1.20	61.2534	0	0	1.20
1.30	69.2795	0	2.98798	1.30
1.40	0.282	0	0.00076	1.40
1.50	10.7559	0	0.000473332	1.50
1.60	4.44452E-05	0	0.0911118	1.60
1.70	0.413552	0	6.45159E-05	1.70
1.80	145.441	0	2.08343E-06	1.80
1.90	666.667	0	0.0007	1.90
2.00	3.175	0	15.8	2.00
3.00	273.333	0	0.0188332	3.00
0.20	0	114.52	0	0.20
0.30	0	10.52	0	0.30
0.40	0	0	0	0.40
0.50	0	0.02955	0	0.50
0.60	0.0463235	0.119382	0	0.60
0.70	7.20E-05	0.00439997	0.307998	0.70
0.80	3.49599	0	0	0.80
0.90	6.22499	0	0	0.90
1.00	520.002	0	6.00E-05	1.00

Brine และ Iqbal (1983) ได้เสนอแบบจำลองเพื่อคำนวณหาค่าสเปกตรัมรังสีตรง รังสีกระจาย และรังสีรวมที่ความยาวคลื่น 0.3-4.0 μm ภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆอย่างง่าย โดยในงานวิจัยนี้จะพิจารณาการดูดกลืนของ โอโซน ไอน้ำ ก๊าซต่างๆ และการกระเจิงโดยโมเลกุลอากาศ และฝุ่นละออง เป็นพารามิเตอร์หลักที่ป้อนเข้าไปในแบบจำลอง โดยมีรูปสมการเขียนได้ดังนี้

$$I_{d\lambda} = I_{0\lambda} \tau_{r\lambda} \tau_{o\lambda} \tau_{g\lambda} \tau_{w\lambda} \tau_{a\lambda} \quad (2.3)$$

$$I_{s\lambda} = I_{r\lambda} + I_{a\lambda} + I_{m\lambda} \quad (2.4)$$

$$I_{r\lambda} = I_{0\lambda} \cos \theta_z \tau_{o\lambda} \tau_{g\lambda} \tau_{w\lambda} \tau_{a\lambda} (1 - \tau_{r\lambda}) F_r \quad (2.5)$$

$$I_{a\lambda} = I_{0\lambda} \cos \theta_z \tau_{o\lambda} \tau_{g\lambda} \tau_{w\lambda} (1 - \tau_{a\lambda}) \omega_0 F_a \quad (2.6)$$

$$I_{m\lambda} = (I_{d\lambda} \cos \theta_z + I_{r\lambda} + I_{a\lambda}) \rho_{g\lambda} \rho_{a\lambda} / (1 - \rho_{g\lambda} \rho_{a\lambda}) \quad (2.7)$$

- เมื่อ $I_{d\lambda}$ คือ สเปกตรัมรังสีตรง ($\text{W}/\text{m}^2 - \mu\text{m}$)
- $I_{s\lambda}$ คือ สเปกตรัมรังสีกระจาย ($\text{W}/\text{m}^2 - \mu\text{m}$)
- $I_{0\lambda}$ คือ สเปกตรัมรังสีจากดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก ($\text{W}/\text{m}^2 - \mu\text{m}$)
- $I_{r\lambda}$ คือ สเปกตรัมรังสีกระจายที่เกิดจากการกระเจิงโดยโมเลกุลอากาศ ($\text{W}/\text{m}^2 - \mu\text{m}$)
- $I_{a\lambda}$ คือ สเปกตรัมรังสีกระจายที่เกิดจากการกระเจิงโดยฝุ่นละออง ($\text{W}/\text{m}^2 - \mu\text{m}$)
- $I_{m\lambda}$ คือ สเปกตรัมรังสีกระจายที่เกิดจากการกระเจิงระหว่างพื้นโลกและชั้นบรรยากาศ ($\text{W}/\text{m}^2 - \mu\text{m}$)
- ω_0 คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิงครั้งแรกของฝุ่นละออง (-)
- $\rho_{g\lambda}$ คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิงรังสีดวงอาทิตย์ของพื้นผิวโลกในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ (-)
- $\rho_{a\lambda}$ คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิงรังสีดวงอาทิตย์ของบรรยากาศที่ความยาวคลื่นต่างๆ (-)

ผลการเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีตรง และสเปกตรัมรังสีกระจายจากการคำนวณให้ผลสอดคล้องที่ดีกับค่าจากการวัด อย่างไรก็ตามเนื่องจากแบบจำลองมีพารามิเตอร์หลายตัวที่ไม่รู้ค่า จึงทำให้การคำนวณค่อนข้างซับซ้อนและมีความคลาดเคลื่อนได้ง่าย

Bird (1984) ได้เสนอแบบจำลองเพื่อคำนวณหาค่าของสเปกตรัมรังสีตรงและรังสีกระจายภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆอย่างง่าย โดยเรียกแบบจำลองนี้ว่า “SPCTRAL” ซึ่งจะใช้อิงค์ประกอบทางบรรยากาศต่างๆ เช่น ปริมาณโอโซน ไอน้ำ ฝุ่นละออง และโมเลกุลอากาศ เป็นอินพุทหลักที่ป้อนเข้าไปในแบบจำลอง แบบจำลองนี้สามารถคำนวณหาค่าสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นระหว่าง 0.3-4.0 μm โดยมีรายละเอียดดังนี้

$$I_{d\lambda} = I_{0\lambda} \tau_{r\lambda} \tau_{o\lambda} \tau_{g\lambda} \tau_{w\lambda} \tau_{a\lambda} \quad (2.8)$$

$$I_{s\lambda} = I_{r\lambda} + I_{a\lambda} + I_{m\lambda} \quad (2.9)$$

$$I_{r\lambda} = I_{0\lambda} \cos \theta_z \tau_{o\lambda} \tau_{g\lambda} \tau_{w\lambda} \tau_{a\lambda} (1 - \tau_{r\lambda}) F_r \quad (2.10)$$

$$I_{a\lambda} = I_{0\lambda} \cos \theta_z \tau_{o\lambda} \tau_{g\lambda} \tau_{w\lambda} (1 - \tau_{a\lambda}) \omega_0 F_a \quad (2.11)$$

$$I_{m\lambda} = (I_{d\lambda} \cos \theta_z + I_{r\lambda} + I_{a\lambda}) \rho_{g\lambda} \rho_{a\lambda} / (1 - \rho_{g\lambda} \rho_{a\lambda}) \quad (2.12)$$

- เมื่อ $I_{d\lambda}$ คือ สเปกตรัมรังสีตรง ($\text{W}/\text{m}^2 - \mu\text{m}$)
 $I_{s\lambda}$ คือ สเปกตรัมรังสีกระจาย ($\text{W}/\text{m}^2 - \mu\text{m}$)
 $I_{0\lambda}$ คือ สเปกตรัมรังสีจากดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก ($\text{W}/\text{m}^2 - \mu\text{m}$)
 $I_{r\lambda}$ คือ สเปกตรัมรังสีกระจายที่เกิดจากการกระเจิงโดยโมเลกุลอากาศ ($\text{W}/\text{m}^2 - \mu\text{m}$)
 $I_{a\lambda}$ คือ สเปกตรัมรังสีกระจายที่เกิดจากการกระเจิงโดยฝุ่นละออง ($\text{W}/\text{m}^2 - \mu\text{m}$)
 $I_{m\lambda}$ คือ สเปกตรัมรังสีกระจายที่เกิดจากการกระเจิงระหว่างพื้นโลกและชั้นบรรยากาศ ($\text{W}/\text{m}^2 - \mu\text{m}$)
 ω_0 คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิงครั้งแรกของฝุ่นละออง (-)
 $\rho_{g\lambda}$ คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิงรังสีดวงอาทิตย์ของพื้นผิวโลกในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ (-)
 $\rho_{a\lambda}$ คือ สัมประสิทธิ์การกระเจิงรังสีดวงอาทิตย์ของบรรยากาศที่ความยาวคลื่นต่างๆ (-)

ผลการเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีตรงให้ผลสอดคล้องที่ดีกับค่าจากการวัด สำหรับสเปกตรัมรังสีกระจายให้ผลสอดคล้องที่ไม่สอดคล้องกับค่าจากการวัดเท่าใดนัก เนื่องจากพารามิเตอร์ที่ไม่รู้ค่าหลายตัว จึงทำให้การคำนวณมีความซับซ้อนและมีความคลาดเคลื่อน

Bird และ Riordan (1986) ได้เสนอแบบจำลองเพื่อหาค่าสเปกตรัมรังสีตรง และรังสีกระจายที่พื้นผิวโลกภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆที่ความยาวคลื่นระหว่าง 0.3-4.0 μm โดยเรียกแบบจำลองนี้ว่า "SPCTRAL2" ซึ่งใช้ค่ามุมเงยดวงอาทิตย์ องค์ประกอบทางบรรยากาศต่างๆ ได้แก่ ไอน้ำ โอโซน ฝุ่น ละออง ความดันที่พื้นผิวโลก และค่า ground albedo เป็นอินพุทหลักที่ป้อนเข้าไปในแบบจำลอง ซึ่งงานวิจัยนี้จะนำไปใช้การศึกษาทางด้านเซลล์แสงอาทิตย์โดยมีรายละเอียดดังนี้

$$I_{d\lambda} = I_{0\lambda} \tau_{r\lambda} \tau_{o\lambda} \tau_{g\lambda} \tau_{w\lambda} \tau_{a\lambda} E_0 \quad (2.13)$$

$$I_{s\lambda} = I_{r\lambda} + I_{a\lambda} + I_{m\lambda} \quad (2.14)$$

$$I_{r\lambda} = I_{0\lambda} E_0 \cos \theta_z \tau_{o\lambda} \tau_{g\lambda} \tau_{w\lambda} \tau_{a\lambda} (1 - \tau_{r\lambda}^{0.95}) F_r C_s \quad (2.15)$$

$$I_{a\lambda} = I_{0\lambda} \cos \theta_z \tau_{o\lambda} \tau_{g\lambda} \tau_{w\lambda} \tau_{a\lambda} \tau_{r\lambda}^{1.5} (1 - \tau_{a\lambda}) F_s C_s \quad (2.16)$$

$$I_{m\lambda} = (I_{d\lambda} \cos \theta_z + I_{r\lambda} + I_{a\lambda}) \rho_{g\lambda} \rho_{a\lambda} / (1 - \rho_{g\lambda} \rho_{a\lambda}) \quad (2.17)$$

เมื่อ $I_{d\lambda}$ คือ สเปกตรัมรังสีตรง ($\text{W}/\text{m}^2 - \mu\text{m}$)

$I_{s\lambda}$ คือ สเปกตรัมรังสีกระจาย ($\text{W}/\text{m}^2 - \mu\text{m}$)

$I_{0\lambda}$ คือ สเปกตรัมรังสีจากดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก ($\text{W}/\text{m}^2 - \mu\text{m}$)

$I_{r\lambda}$ คือ สเปกตรัมรังสีกระจายที่เกิดจากการกระเจิงโดยโมเลกุลอากาศ ($\text{W}/\text{m}^2 - \mu\text{m}$)

$I_{a\lambda}$ คือ สเปกตรัมรังสีกระจายที่เกิดจากการกระเจิงโดยฝุ่นละออง ($\text{W}/\text{m}^2 - \mu\text{m}$)

$I_{m\lambda}$ คือ สเปกตรัมรังสีกระจายที่เกิดจากการกระเจิงระหว่างพื้นโลกและชั้นบรรยากาศ
($\text{W}/\text{m}^2 - \mu\text{m}$)

$\tau_{a\lambda}$ คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์โดยฝุ่นละอองคิดเฉพาะการดูดกลืนเท่านั้น (-)

$\tau_{as\lambda}$ คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีอาทิตย์โดยฝุ่นละอองคิดเฉพาะการกระเจิงเท่านั้น (-)

ผลการเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีตรง และสเปกตรัมรังสีกระจายจากการคำนวณให้ผลสอดคล้องที่ดีกับค่าจากการวัด อย่างไรก็ตามต้องทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่ไม่รู้ค่าหลายตัว จึงทำให้การคำนวณลำช้าและใช้ระยะเวลานาน ที่สำคัญการตั้งค่าพารามิเตอร์เหล่านั้นใช้ได้กับเฉพาะแหล่งจึงทำให้การคำนวณมีความซับซ้อนและมีความคลาดเคลื่อนเมื่อนำไปใช้คำนวณในพื้นที่อื่น

Gueymard (2001) ได้พัฒนาแบบจำลองเพื่อคำนวณหาค่าสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นระหว่าง 0.28-4.0 μm ซึ่งเรียกแบบจำลองนี้ว่า “SMARTS2” โดยจะคำนวณหาค่าสเปกตรัมรังสีตรงภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆซึ่งขึ้นอยู่กับการกระเจิงแบบเรเลย์ การลดทอนโดยฝุ่นละออง การดูดกลืนโดยไอน้ำ โอโซน ก๊าซต่างๆ และก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ อีกทั้งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ หรือความดันที่พื้นผิวโลกอีกด้วย

$$I_{d\lambda} = I_{0\lambda} \tau_{r\lambda} \tau_{o\lambda} \tau_{g\lambda} \tau_{w\lambda} \tau_{a\lambda} \tau_{n\lambda} \quad (2.18)$$

$$I_{s\lambda} = I_{r\lambda} + I_{a\lambda} + I_{m\lambda} \quad (2.19)$$

เมื่อ

$$\tau_{r\lambda} = \exp \{-m_R X_R\} \quad (2.20)$$

$$\tau_{o\lambda} = \exp \{-m_o X_o\} \quad (2.21)$$

$$\tau_{w\lambda} = \exp \{-[(m_w w)^{1.05} f_w^a B_w X_w]^b\} \quad (2.22)$$

$$\tau_{g\lambda} = \exp \{-(m_g U_g X_g)^c\} \quad (2.23)$$

$$\tau_{a\lambda} = \exp \{-m_{aer} X_a\} \quad (2.24)$$

$$\tau_{n\lambda} = \exp \{-m_n X_n\} \quad (2.25)$$

และ a, b, c คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในแบบจำลอง

ผลการเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีตรง และสเปกตรัมรังสีกระจายจากการคำนวณให้ผลสอดคล้องที่ดีกับค่าจากการวัด ทั้งนี้การคำนวณค่อนข้างทำได้ยากและซับซ้อนเพราะมีพารามิเตอร์ที่ไม่รู้หลายค่า อีกทั้งแบบจำลองเหมาะสมกับการใช้คำนวณหาค่าสเปกตรัมเฉพาะแหล่ง เมื่อนำแบบจำลองนี้ไปคำนวณหาค่าสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ที่พื้นที่อื่นๆ อาจทำให้มีความคลาดเคลื่อนได้มาก

จากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับแบบจำลองที่ใช้เพื่อคำนวณหาสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าแบบจำลองเหล่านั้นค่อนข้างมีความยุ่งยากและซับซ้อนเพราะมีพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าจำนวนมาก และเป็นแบบจำลองที่ใช้ได้เฉพาะแหล่ง เมื่อนำแบบจำลองไปคำนวณหาค่าสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ที่พื้นที่อื่นๆ จะทำให้มีความคลาดเคลื่อนสูง อีกทั้งในประเทศไทยมีการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ค่อนข้างน้อย ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการที่จะทำการศึกษาสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ในประเทศไทย โดยการใช้แบบจำลองต่างๆ ที่กล่าวมา แล้วจะพิจารณาว่าแบบจำลองใดจะมีความเหมาะสมกับการนำมาใช้งานในประเทศไทย โดยรายละเอียดที่จะกล่าวในบทต่อไป



บทที่ 3

การศึกษาแบบจำลองสเปกตรัมรังสีดวงอาทิตย์ในจังหวัดนครปฐม

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะดำเนินการศึกษาสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ ซึ่งประกอบด้วยรังสีตรง รังสีกระจาย และรังสีรวม ภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ โดยมีค่าความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 350-950 nm ผู้วิจัยทำการติดตั้งเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีดวงอาทิตย์โดยได้ทำการวัดและบันทึกข้อมูลต่อเนื่องกัน 1-3 ปี แล้วนำข้อมูลสเปกตรัมที่ได้จากการวัดมาทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ในอดีต พร้อมทั้งหาแบบจำลองสำหรับคำนวณหาค่าสเปกตรัมรังสีรวม โดยรายละเอียดของการดำเนินการจะกล่าวในหัวข้อต่างๆ ดังนี้

3.1 การเตรียมข้อมูลเพื่อนำไปใช้ในการเปรียบเทียบแบบจำลอง

3.1.1 ข้อมูลวัดจากเครื่องสเปกตรัมรังสีอาทิตย์

ผู้วิจัยได้ทำการวัดและรวบรวมข้อมูลสเปกตรัมรังสีตรงและรังสีกระจาย จากเครื่อง EKO spectroradiometer (MS-710) ที่มหาวิทยาลัยศิลปากรจังหวัดนครปฐม (13.82°N, 100.04°E) ซึ่งติดตั้งบนเครื่องติดตามตำแหน่งดวงอาทิตย์ Suntracker Kipp & Zonen (Model 2AP) ดังรูปที่ 3.1 โดยเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีกระจายจะมีลูกบอลบังรังสีตรงด้วย แสดงดังรูปที่ 3.2 สำหรับการบันทึกข้อมูลทำโดยต่อสัญญาณที่วัดได้เข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ และตั้งโปรแกรมให้เครื่องทำการบันทึกข้อมูลวัดทุกๆ 1 นาที ข้อมูลที่ได้เป็นข้อมูลรังสีอาทิตย์ ในช่วงความยาวคลื่น 350-950 nm โดยผู้วิจัยจะใช้ข้อมูลซึ่งวัดระหว่างปี 2014-2016 มาใช้ในการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง

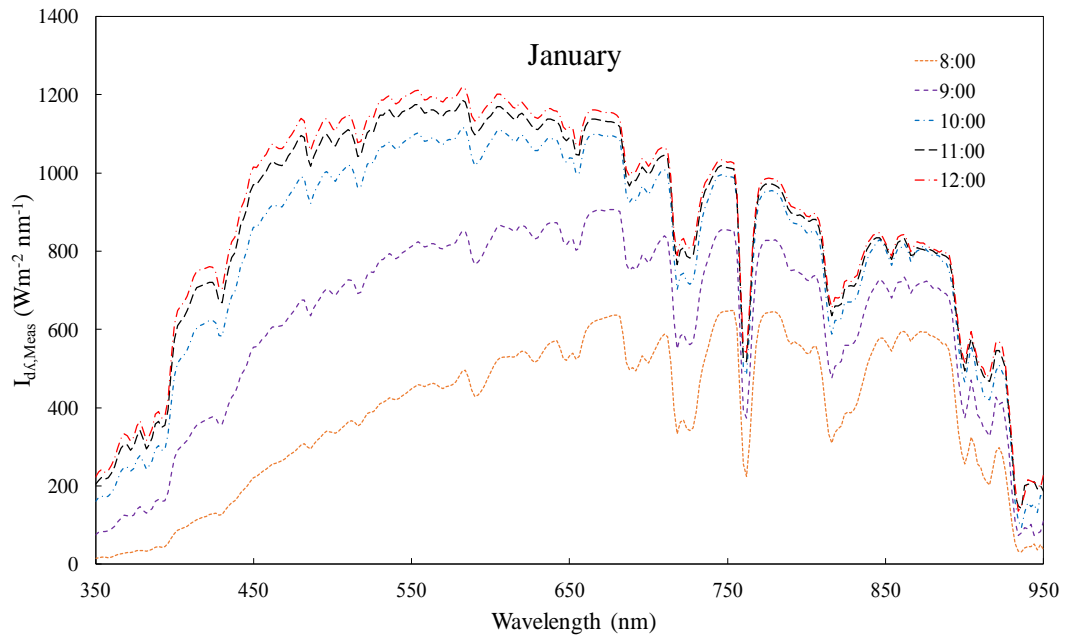


รูปที่ 3.1 เครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ตรง EKO spectroradiometer (MS-710) ซึ่งติดอยู่กับเครื่องติดตามดวงอาทิตย์ Kipp & Zonen (Model 2AP)

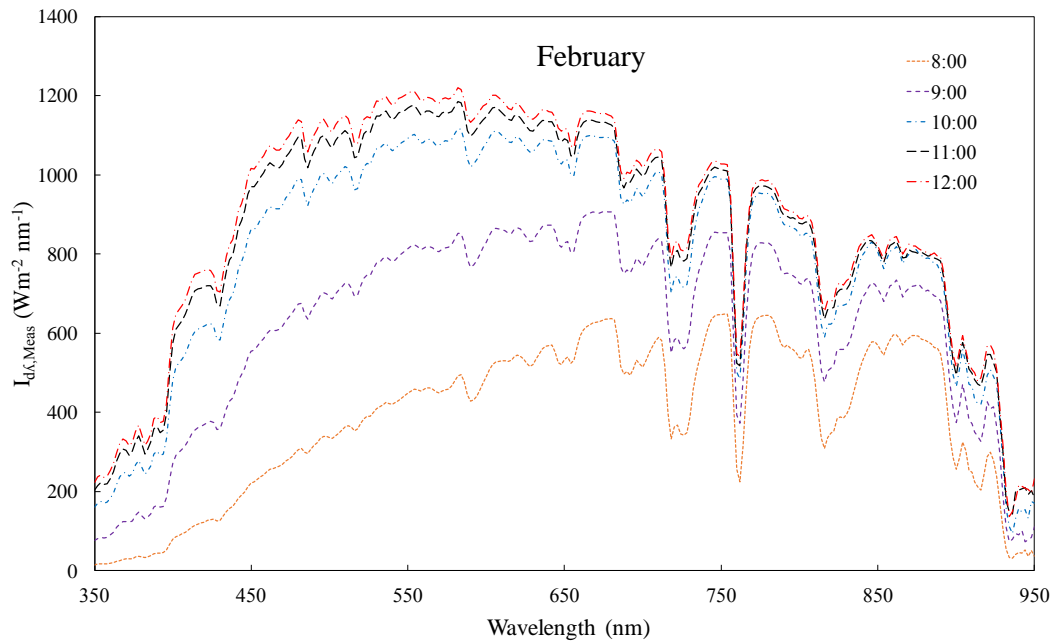


รูปที่ 3.2 เครื่องวัดสเปกตรัมรังสีกระจาย EKO spectroradiometer (MS-710) ที่มีลูกบอลบังรังสีตรงของดวงอาทิตย์ซึ่งติดอยู่กับเครื่องติดตามดวงอาทิตย์ Kipp & Zonen (Model 2AP)

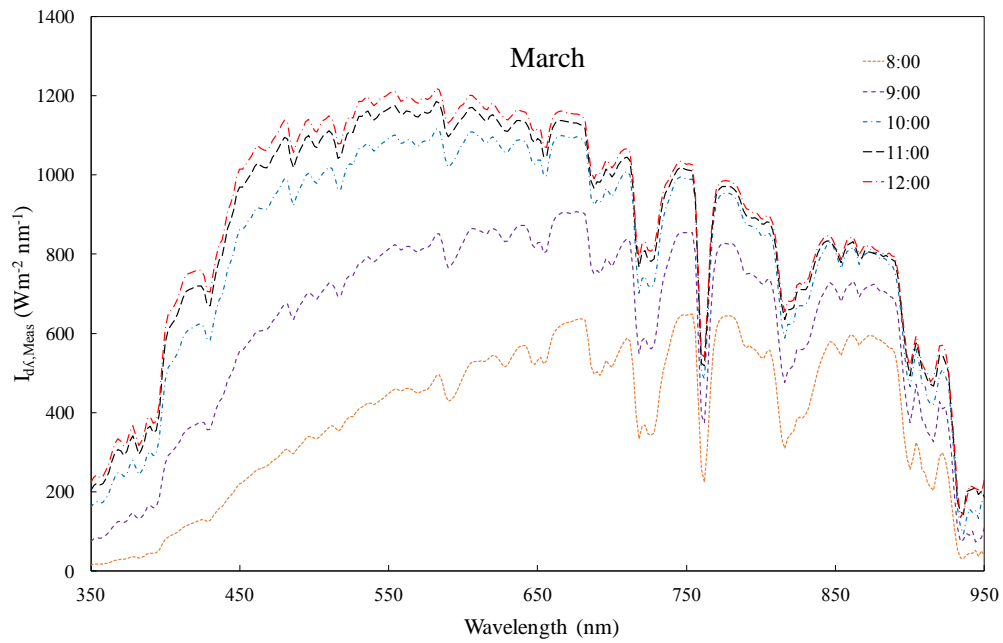
ข้อมูลสเปกตรัมรังสีตรงและสเปกตรัมรังสีกระจายที่ได้จากเครื่อง EKO spectroradiometer ระหว่างปี 2014-2016 ภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ แสดงได้ดังรูปที่ 3.3 ถึง 3.22 ซึ่งในเดือน มิถุนายนและเดือนกรกฎาคม ระหว่างปี 2014-2016 ไม่ได้นำมาใช้ในการเปรียบเทียบแบบจำลอง เนื่องจากว่าไม่มีช่วงเวลาท้องฟ้าปราศจากเมฆ



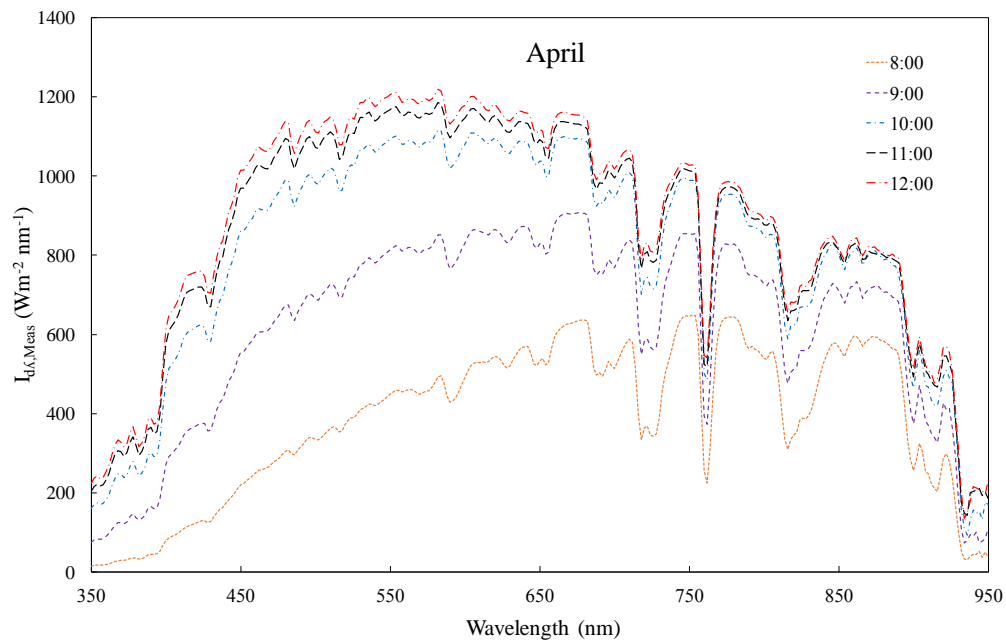
รูปที่ 3.3 สเปกตรัมรังสีตรงเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือนมกราคม ภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ



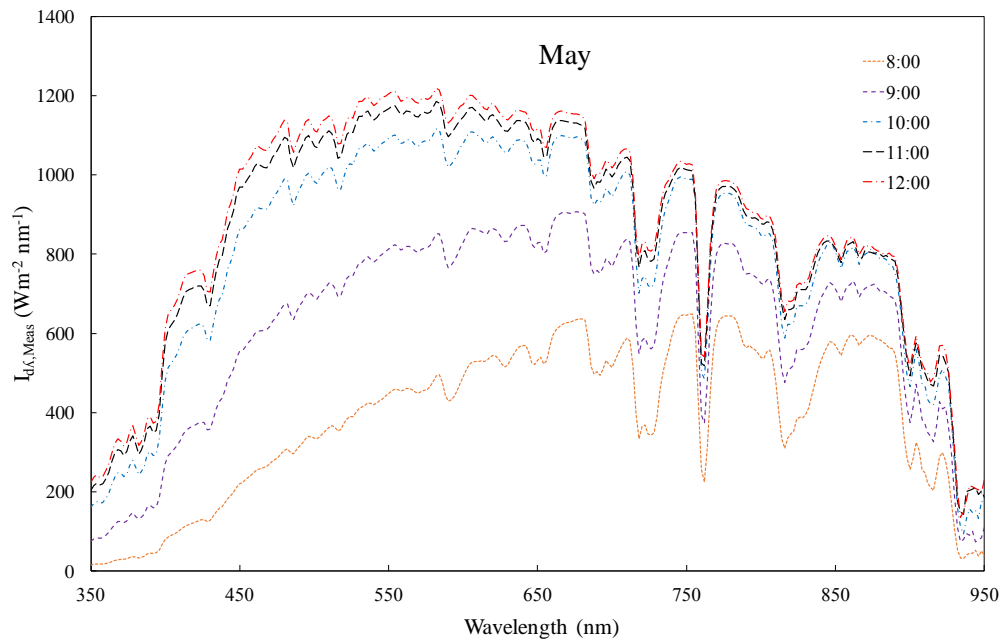
รูปที่ 3.4 สเปกตรัมรังสีตรงเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือนกุมภาพันธ์ภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ



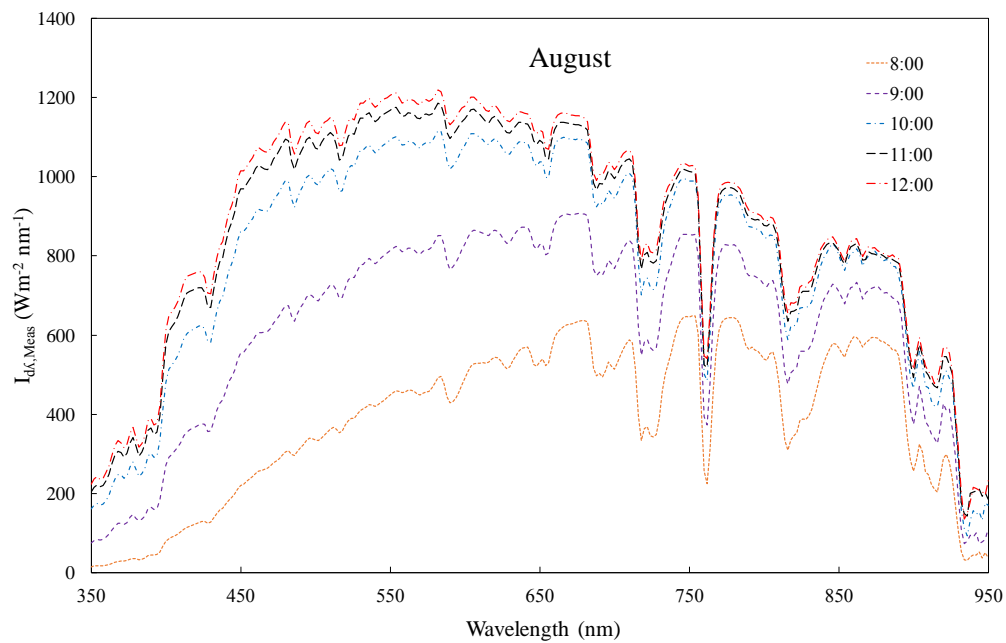
รูปที่ 3.5 สเปกตรัมรังสีตรงเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือนมีนาคม ภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ



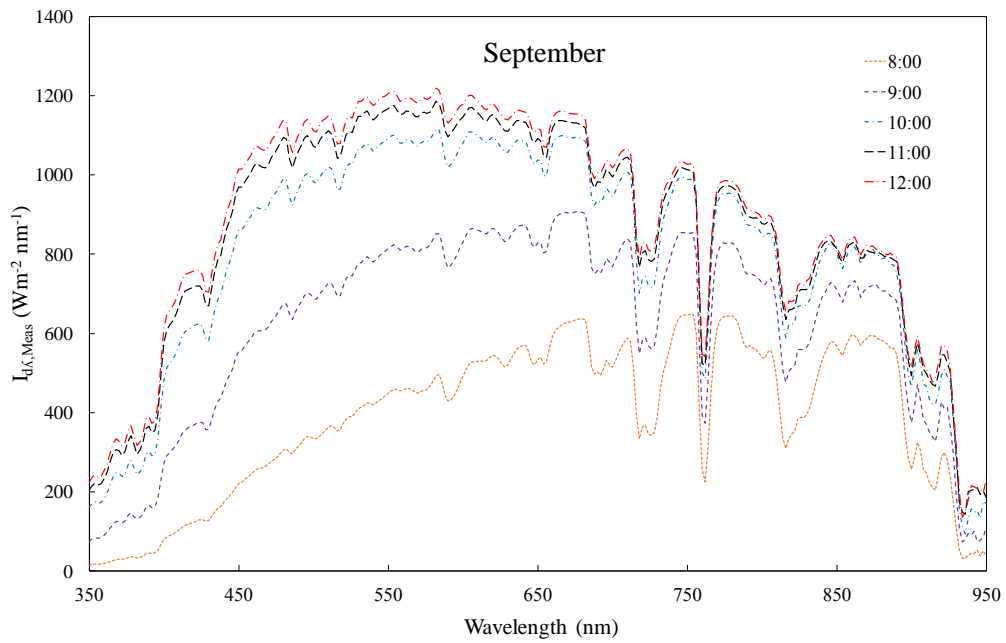
รูปที่ 3.6 สเปกตรัมรังสีตรงเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือนเมษายน ภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ



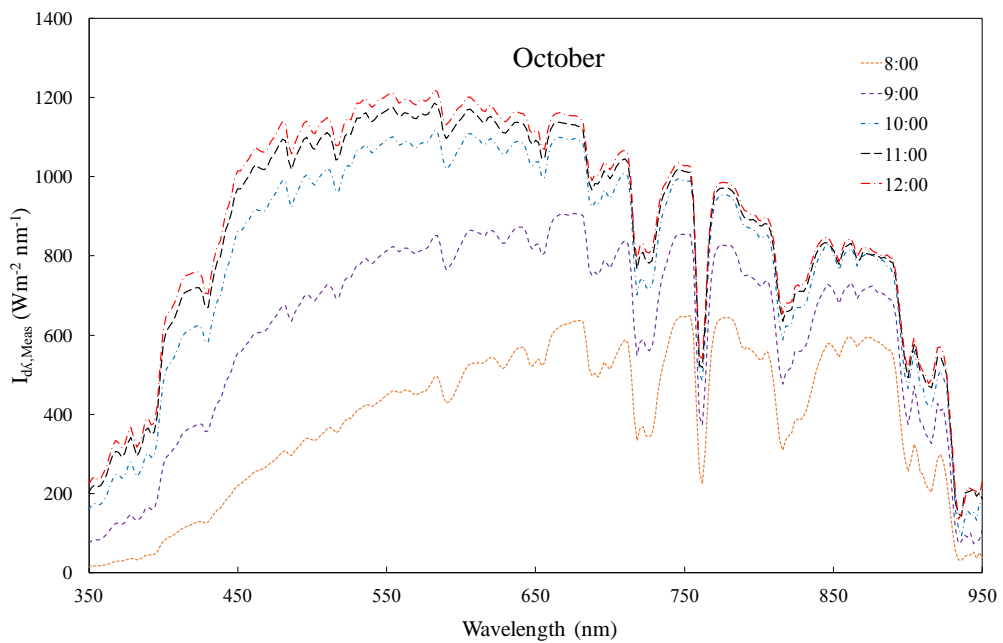
รูปที่ 3.7 สเปกตรัมรังสีตรงเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือน พฤษภาคมภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ



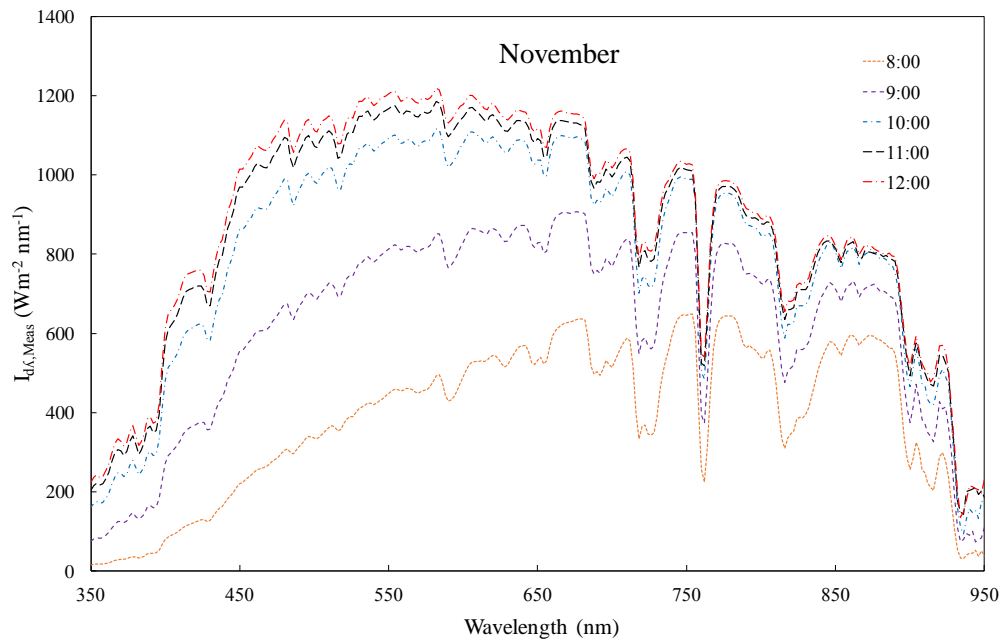
รูปที่ 3.8 สเปกตรัมรังสีตรงเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือนสิงหาคม ภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ



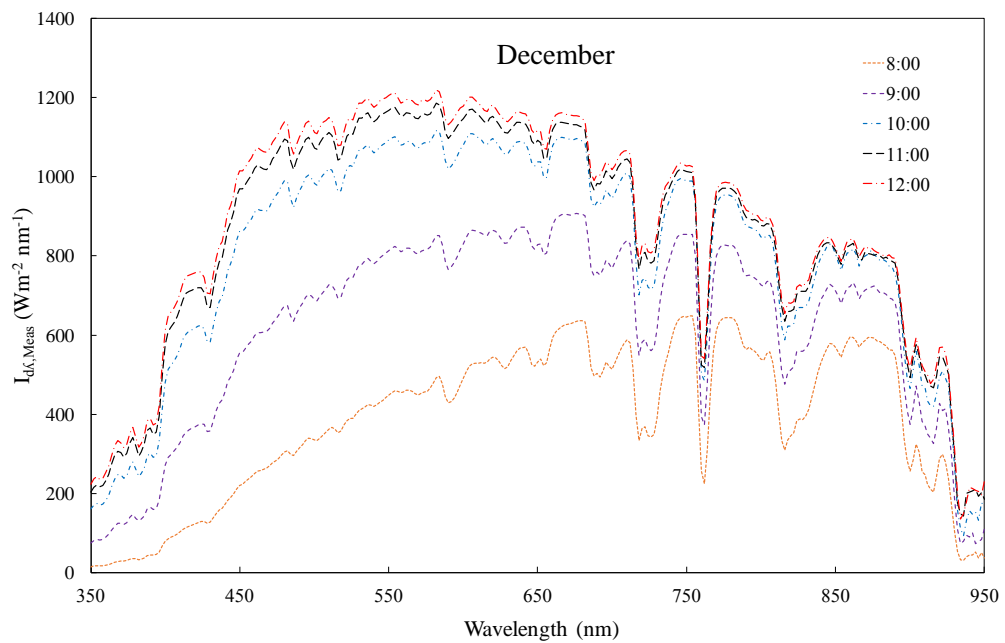
รูปที่ 3.9 สเปกตรัมรังสีตรงเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือนกันยายน ภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ



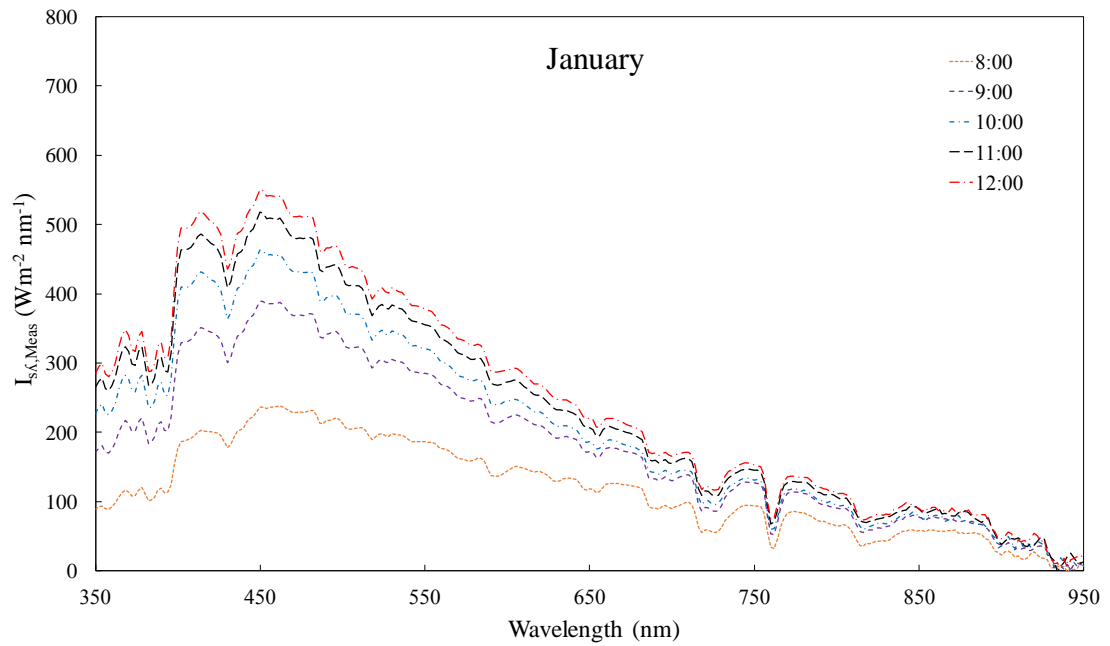
รูปที่ 3.10 สเปกตรัมรังสีตรงเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือนตุลาคม ภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ



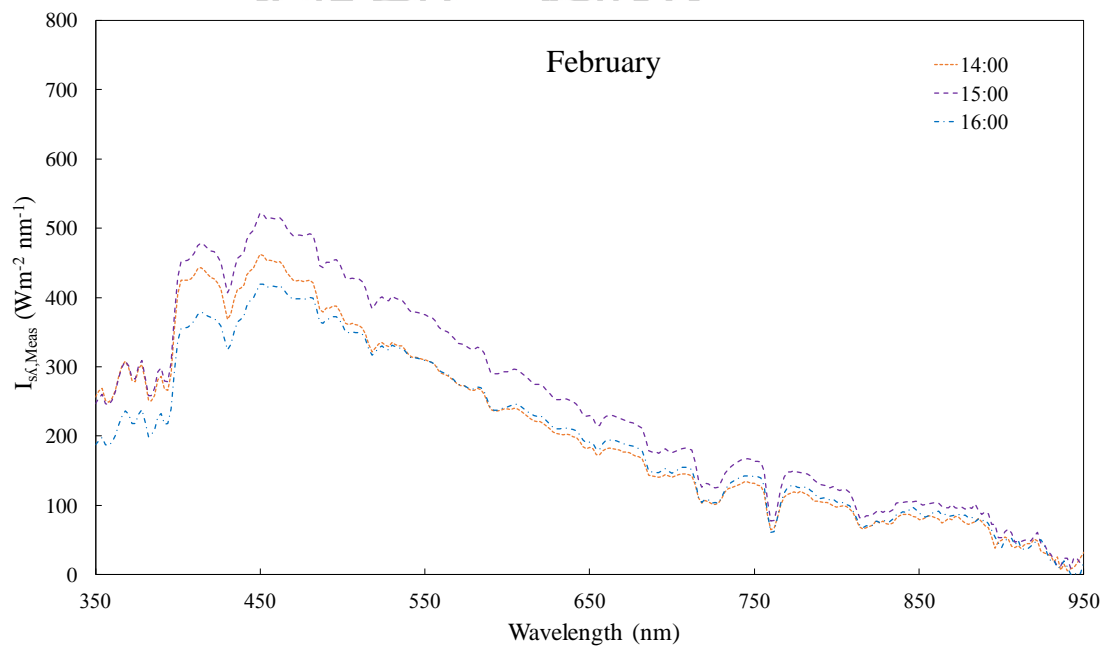
รูปที่ 3.11 สเปกตรัมรังสีตรงเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือนพฤศจิกายนภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ



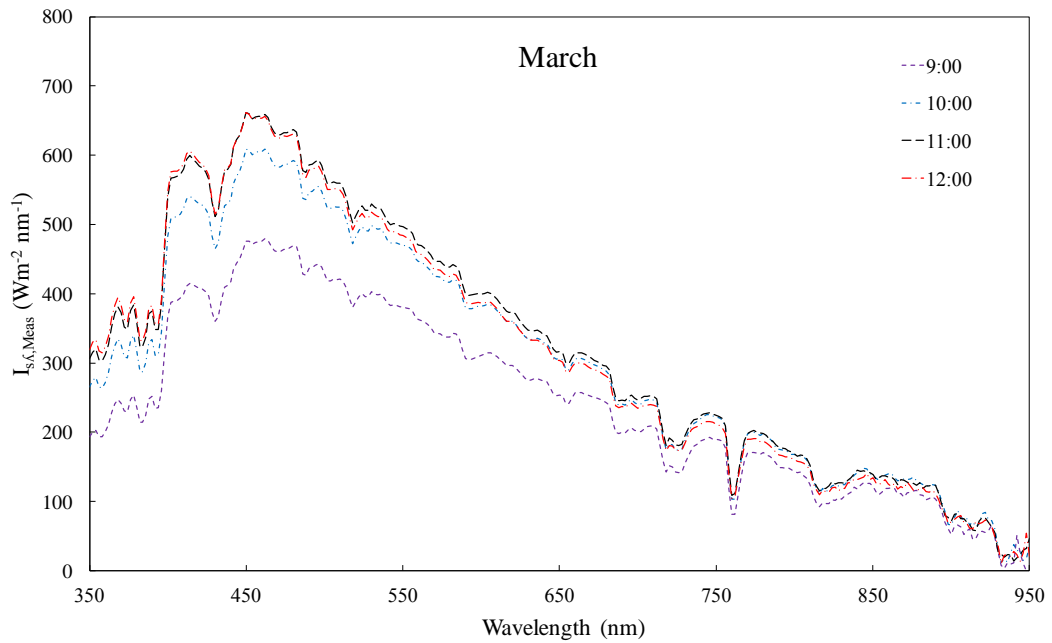
รูปที่ 3.12 สเปกตรัมรังสีตรงเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือนธันวาคมภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ



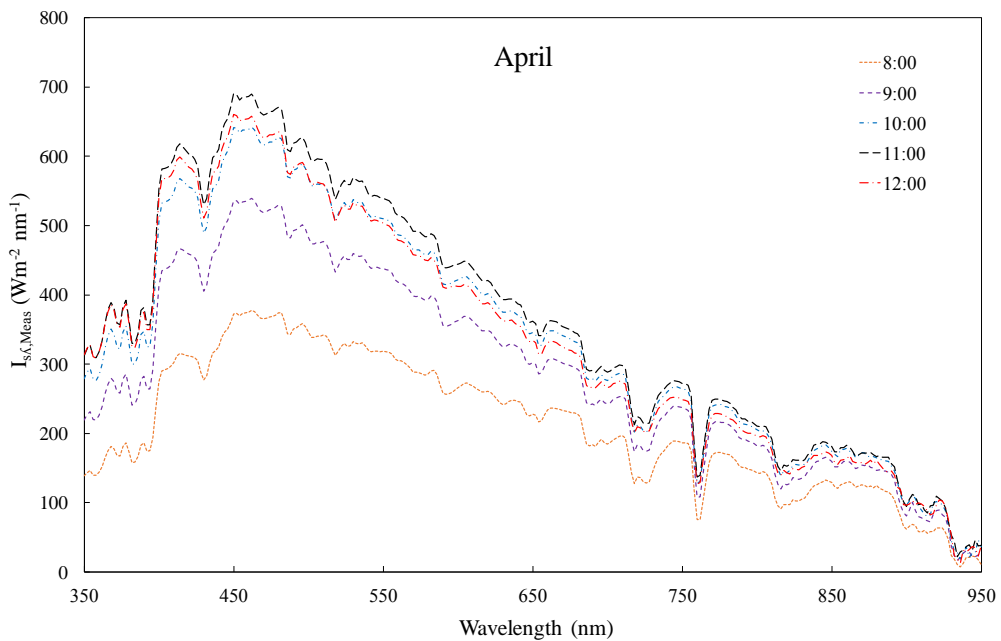
รูปที่ 3.13 สเปกตรัมรังสีกระจายเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือน มกราคมภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ



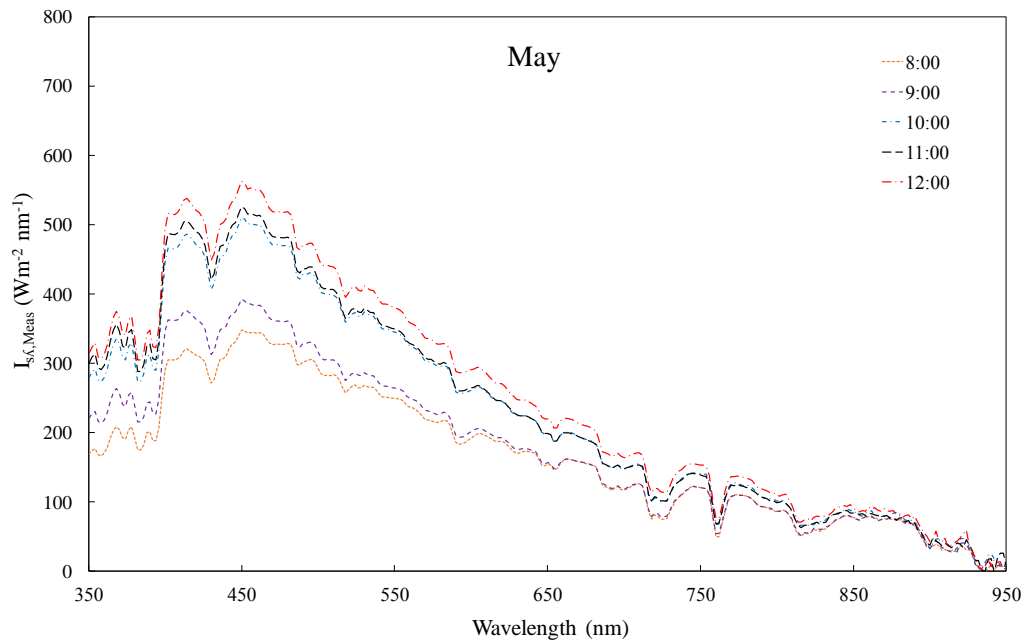
รูปที่ 3.14 สเปกตรัมรังสีกระจายเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือน กุมภาพันธ์ภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ



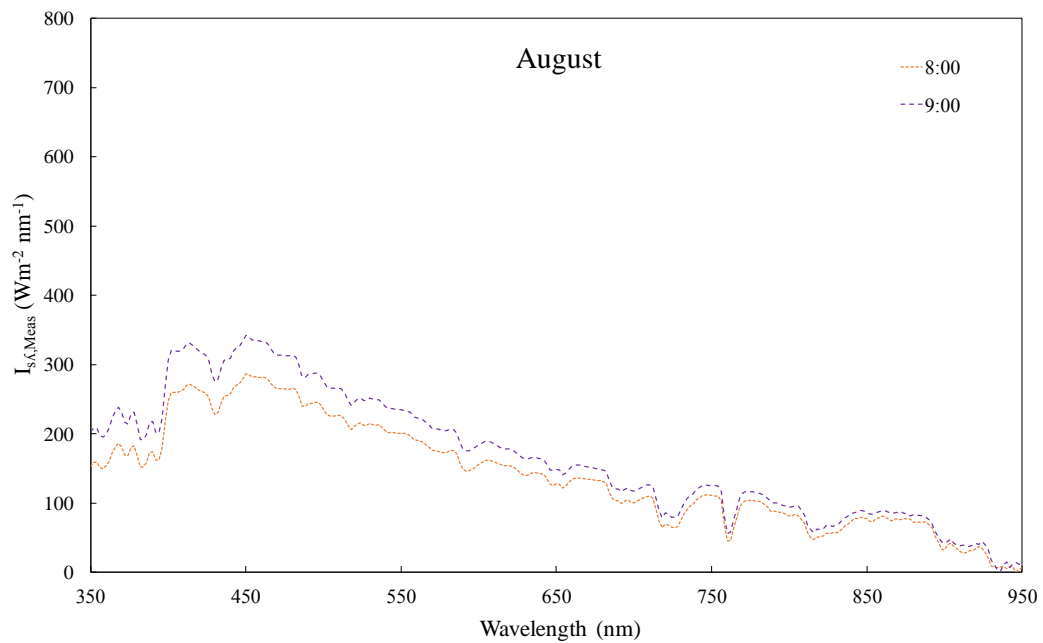
รูปที่ 3.15 สเปกตรัมรังสีกระจายเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือน มีนาคมภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ



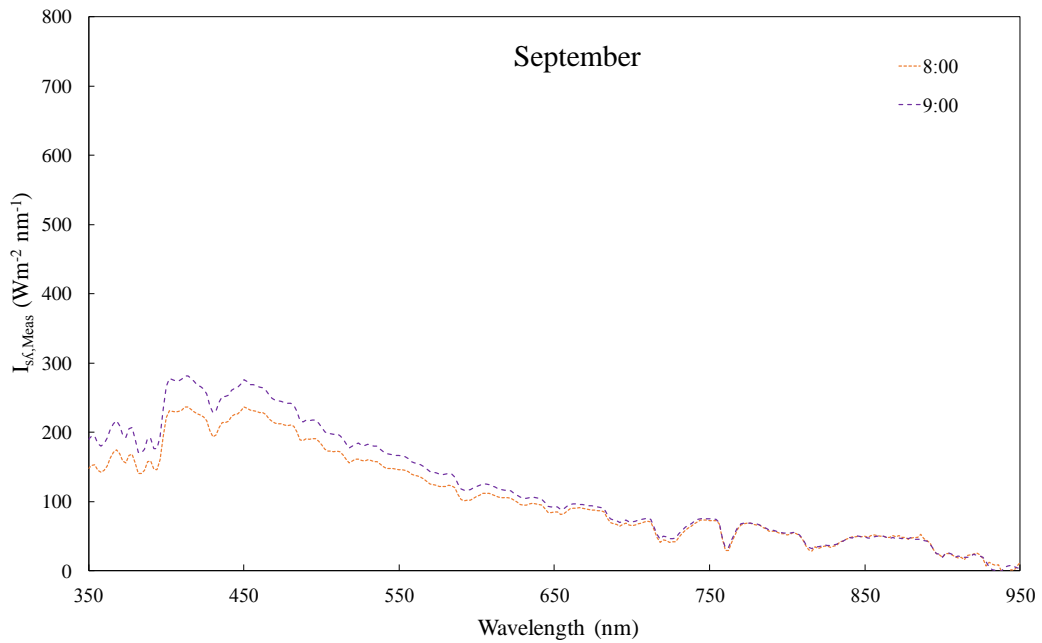
รูปที่ 3.16 สเปกตรัมรังสีกระจายเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือน เมษายนภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ



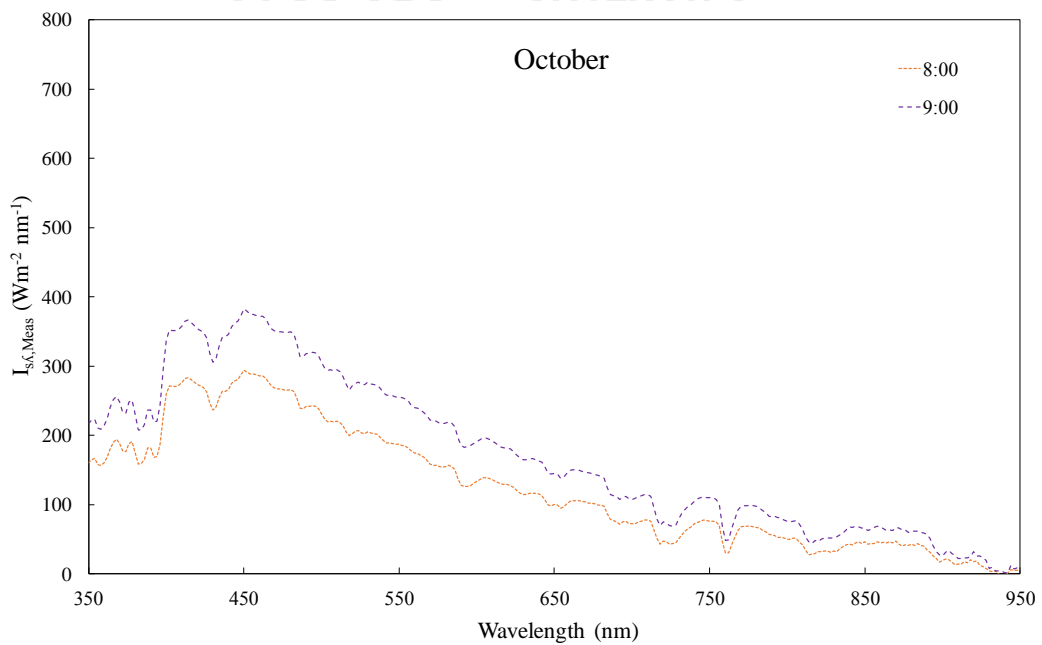
รูปที่ 3.17 สเปกตรัมรังสีกระจายเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือน พฤษภาคมภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ



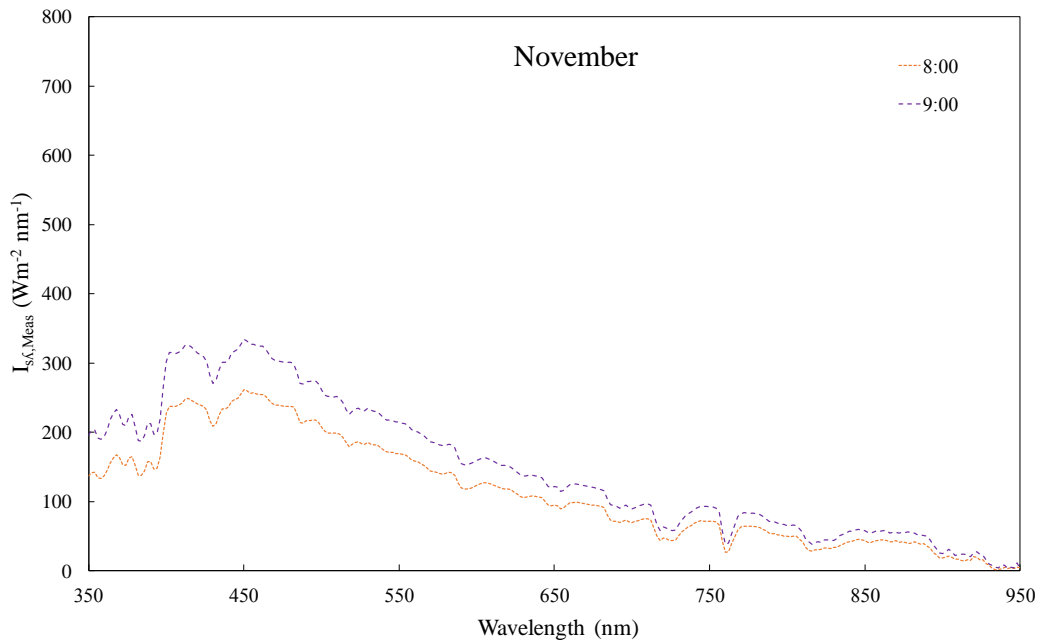
รูปที่ 3.18 สเปกตรัมรังสีกระจายเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือน สิงหาคมภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ



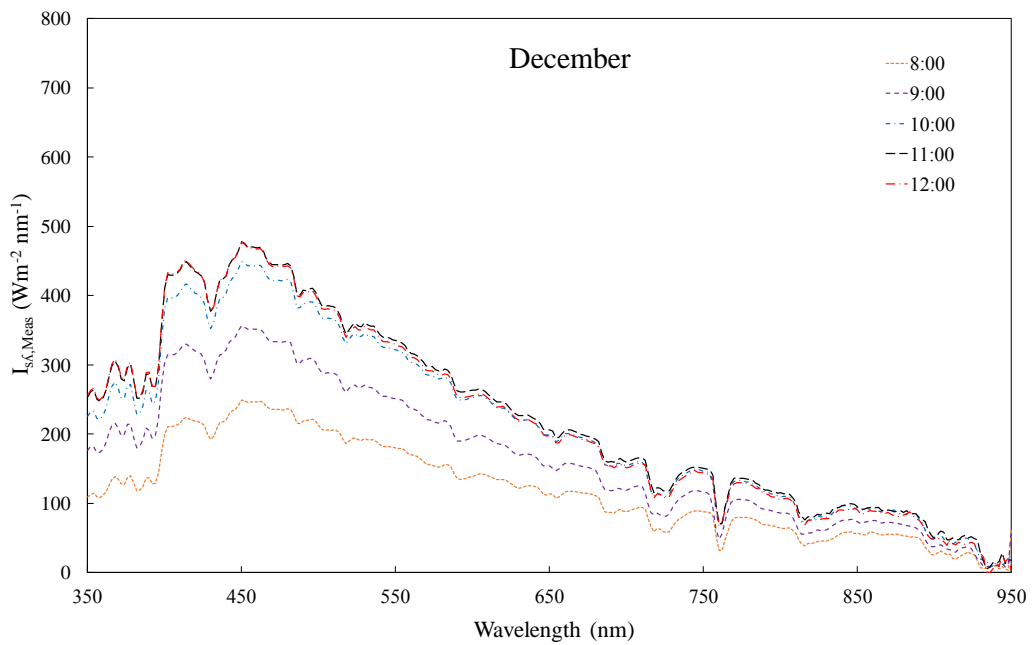
รูปที่ 3.19 สเปกตรัมรังสีกระจายเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือน กันยายนภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ



รูปที่ 3.20 สเปกตรัมรังสีกระจายเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือน ตุลาคมภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ



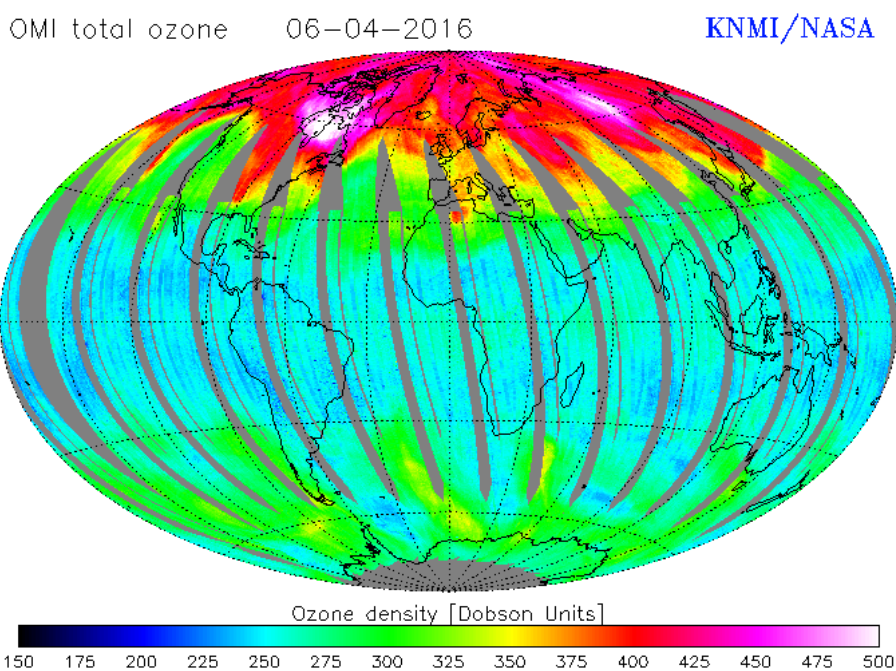
รูปที่ 3.21 สเปกตรัมรังสีกระจายเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือน พฤศจิกายนภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ



รูปที่ 3.22 สเปกตรัมรังสีกระจายเฉลี่ยรายชั่วโมงจากเครื่อง EKO spectroradiometer ของเดือน ธันวาคมภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ

3.1.2 ข้อมูลโอโซน

ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมข้อมูลโอโซนจากดาวเทียม OMI/AURA (Ozone Monitoring Instrument) ซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะใช้ข้อมูลซึ่งวัดระหว่างปี ค.ศ. 2014-2016 มาใช้เป็นข้อมูลสำหรับการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของโอโซนที่ตำแหน่งของสถานีวัดจังหวัดนครปฐมเพื่อใช้ในแบบจำลอง โดยทั่วไปสามารถบอกปริมาณโอโซนในหน่วยดอบสัน (Dobson Unit) หรือ DU ซึ่งเท่ากับปริมาณโอโซนในรูปของปริมาณโอโซนทั้งหมดในคอลัมน์บรรยากาศเป็นเซนติเมตรคูณด้วย 1000 ข้อมูลโอโซนที่ได้จากดาวเทียมดังกล่าวจะมีวันละ 1 เวลา (ประมาณเที่ยงวัน ตามเวลาท้องถิ่น) ครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของโลก ตัวอย่างข้อมูลโอโซนในวันที่ 6 เมษายน ค.ศ. 2016 จากดาวเทียม OMI/AURA (Ozone Monitoring Instrument) ซึ่งบอกค่าโอโซนในหน่วยดอบสัน ดังรูปที่ 3.23 รายละเอียดของข้อมูลโอโซนในวันต่างๆ หาได้จากเว็บไซต์ <https://aura.gsfc.nasa.gov/omi.html>



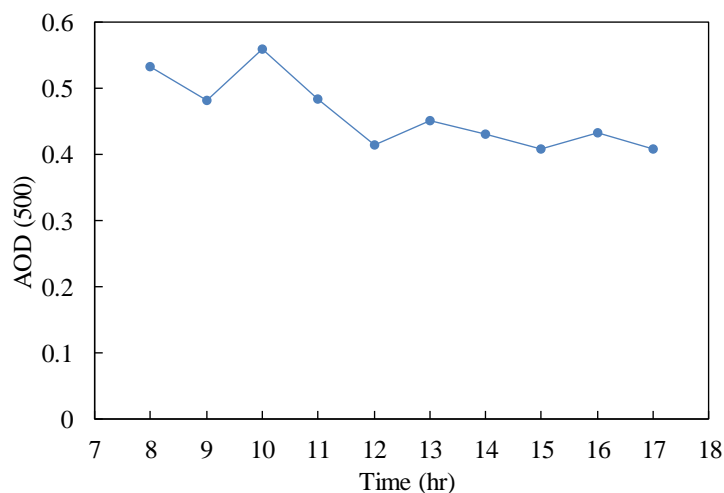
รูปที่ 3.23 แสดงข้อมูลโอโซนจากดาวเทียม OMI/AURA (Ozone Monitoring Instrument) ในวันที่ 6 เมษายน ค.ศ. 2016

3.1.3 ข้อมูลฝุ่นละออง

ผู้วิจัยทำการรวบรวมข้อมูลฝุ่นละอองจากเครื่อง cimel sunphotometer ซึ่งติดตั้งที่มหาวิทยาลัยศิลปากรจังหวัดนครปฐม โดยเครื่อง cimel sunphotometer เป็นอุปกรณ์วัดรังสีตรงและรังสีกระจายซึ่งมีการประมวลผลผ่านระบบอินเทอร์เน็ตโดยองค์การนาซ่า (NASA) ลักษณะของเครื่องวัดดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 3.24 ซึ่งทำการวัดรังสีอาทิตย์ที่ความยาวคลื่น 340, 380, 440, 500, 675, 870, 940 และ 1020 nm โดยข้อมูลที่ใช้ในการหา optical depth ของฝุ่นละออง (AOD) เป็นข้อมูลที่ความยาวคลื่น 340, 380, 440, 500, 675, 870 nm ซึ่งผู้วิจัยทำการรวบรวมข้อมูลฝุ่นละอองระหว่างปี ค.ศ. 2014-2016 มาใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากการดูดกลืนโดยฝุ่นละออง ตัวอย่างข้อมูล AOD ในรอบวันที่ได้จากเครื่อง cimel sunphotometer แสดงดังรูปที่ 3.25



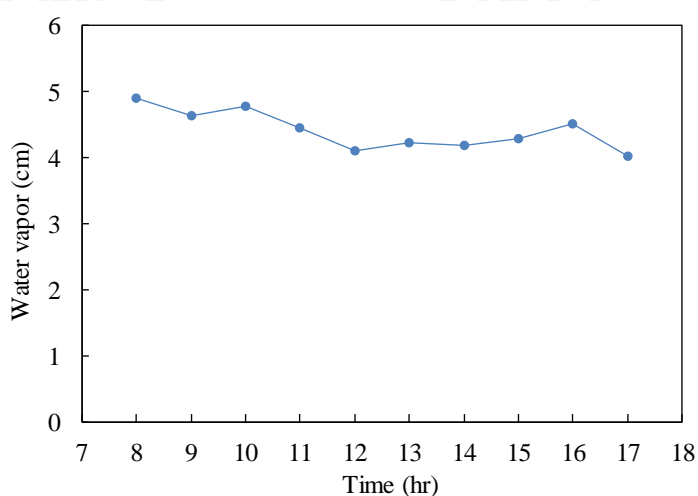
รูปที่ 3.24 เครื่อง cimel sunphotometer ซึ่งติดตั้งที่มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม



รูปที่ 3.25 แสดงตัวอย่างข้อมูล AOD ในรอบวันที่ความยาวคลื่น 500 nm จากเครื่อง cimel sunphotometer ที่มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม ในวันที่ 20 เมษายน 2015

3.1.4 ข้อมูลไอน้ำ

ผู้วิจัยทำการรวบรวมข้อมูลไอน้ำจากเครื่อง cimel sunphotometer ซึ่งติดตั้งที่มหาวิทยาลัยศิลปากรจังหวัดนครปฐม โดยข้อมูลในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากการดูดกลืนไอน้ำอยู่ที่ความยาวคลื่น 940 nm ซึ่งผู้วิจัยทำการรวบรวมข้อมูลไอน้ำในรูปของปริมาณรวมทั้งคอลัมน์ของบรรยากาศในหน่วย cm ระหว่างปี ค.ศ. 2014-2016 มาใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากการดูดกลืนโดยไอน้ำ ตัวอย่างข้อมูลไอน้ำในรอบวันที่ได้จากเครื่อง cimel sunphotometer แสดงดังรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 แสดงตัวอย่างข้อมูลไอน้ำในรอบวันที่ได้จากเครื่อง cimel sunphotometer ที่มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม ในวันที่ 20 เมษายน ค.ศ. 2015

3.1.5 ข้อมูลสภาพท้องฟ้า

ในการพิจารณาสภาพท้องฟ้าผู้วิจัยได้นำภาพถ่ายท้องฟ้าที่บันทึกโดยใช้กล้องถ่ายภาพท้องฟ้าอัตโนมัติ ซึ่งติดตั้งที่มหาวิทยาลัยศิลปากรจังหวัดนครปฐม แสดงดังรูปที่ 3.27 โดยสภาพท้องฟ้าสามารถจำแนกหลักๆ ได้ 3 รูปแบบด้วยกันคือ เมฆปกคลุมเต็มท้องฟ้า (overcast sky) มีเมฆบางส่วน (partly cloudy sky) และไม่มีเมฆปกคลุม (clear sky) แสดงตัวอย่างของสภาพท้องฟ้าทั้ง 3 รูปแบบ แสดงไว้ดังรูปที่ 3.28 โดยผู้วิจัยจะคัดเลือกช่วงวันและเวลาที่ท้องฟ้าไม่มีเมฆปกคลุม ซึ่งใช้ข้อมูลวัดระหว่างปี ค.ศ. 2014-2016



รูปที่ 3.27 กล้องถ่ายภาพท้องฟ้าอัตโนมัติซึ่งติดตั้งที่มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม



a)

b)

c)

รูปที่ 3.28 แสดงตัวอย่างของสภาพท้องฟ้ากล้องถ่ายภาพท้องฟ้าอัตโนมัติ a) overcast sky b) partly cloudy sky และ c) cloudless sky

3.2 การเปรียบเทียบแบบจำลอง

3.2.1 การเปรียบเทียบแบบจำลองสเปกตรัมรังสีตรง

ผู้วิจัยทำการเปรียบเทียบแบบจำลองสเปกตรัมรังสีตรงในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆโดยคัดเลือกแบบจำลองของ Leckner (1978) Brine และ Iqbal (1983) Bird (1984) Bird และ Riodan (1986) และ Gueymard (2001) มาเปรียบเทียบกับข้อมูลวัดภาคพื้นดินจากเครื่อง EKO spectroradiometer ที่จังหวัดนครปฐม ในระหว่างปี ค.ศ. 2014-2016 ทั้งนี้ผู้วิจัยจะทำการทดสอบแบบจำลองเพื่อหาแบบจำลองที่มีความเหมาะสมกับประเทศไทยที่สุด โดยเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีอาทิตย์รายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน ตั้งแต่เวลา 08:00-16:00 น. ซึ่งแสดงผลในรูปของ mean bias difference (MBD) และ ค่า root mean square difference (RMSD) ซึ่งหาได้จากสมการ (3.1) และ (3.2) ผลการเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน แสดงดังรูปที่ 3.29-3.33

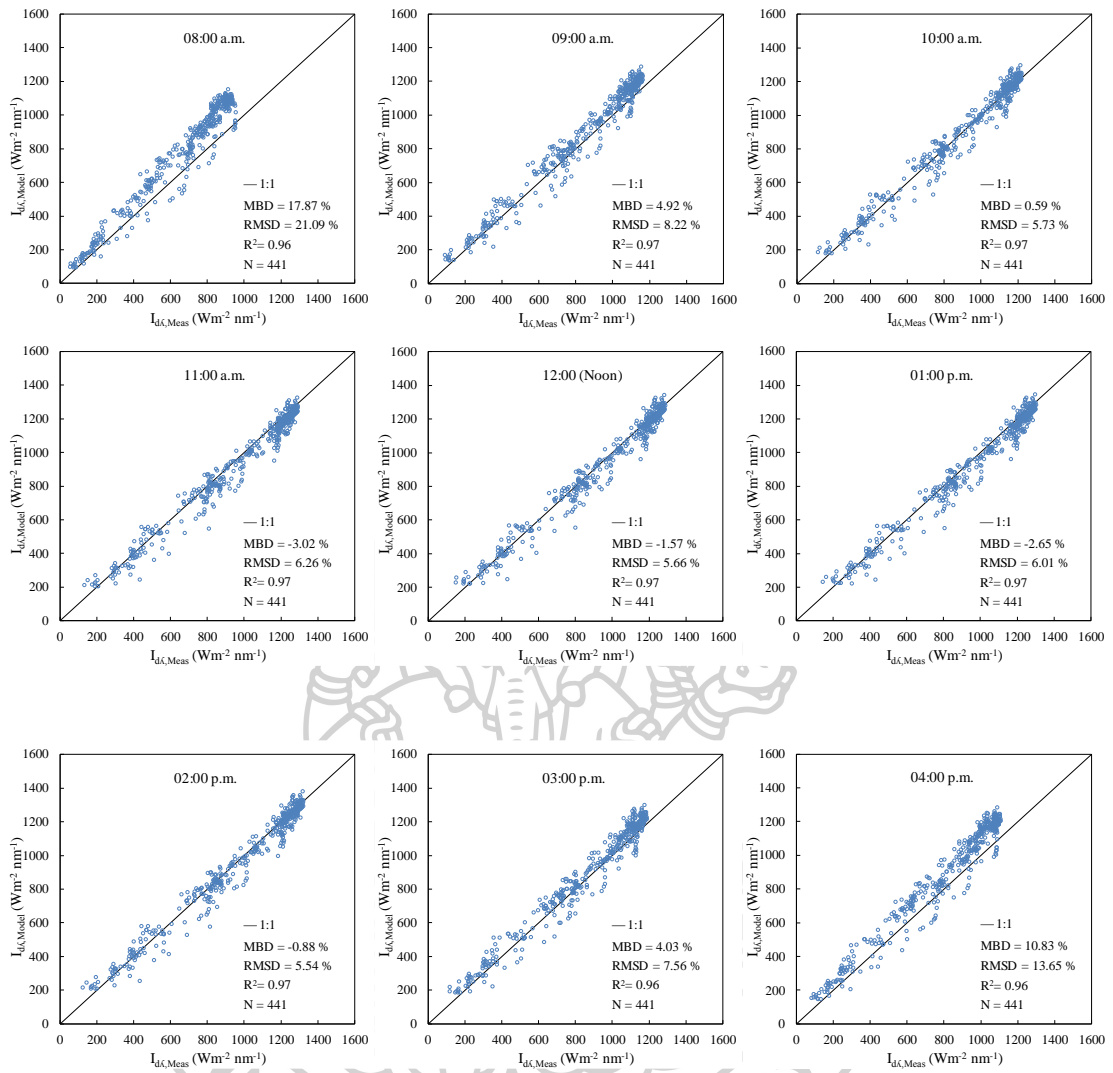
$$MBD = \frac{\sum_{i=1}^N (I_{\text{model}} - I_{\text{meas}})}{\sum_{i=1}^N I_{\text{meas}}} \quad (3.1)$$

$$RMSD = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{(I_{\text{model}} - I_{\text{meas}})^2}}{\sum_{i=1}^N I_{\text{meas}}} \quad (3.2)$$

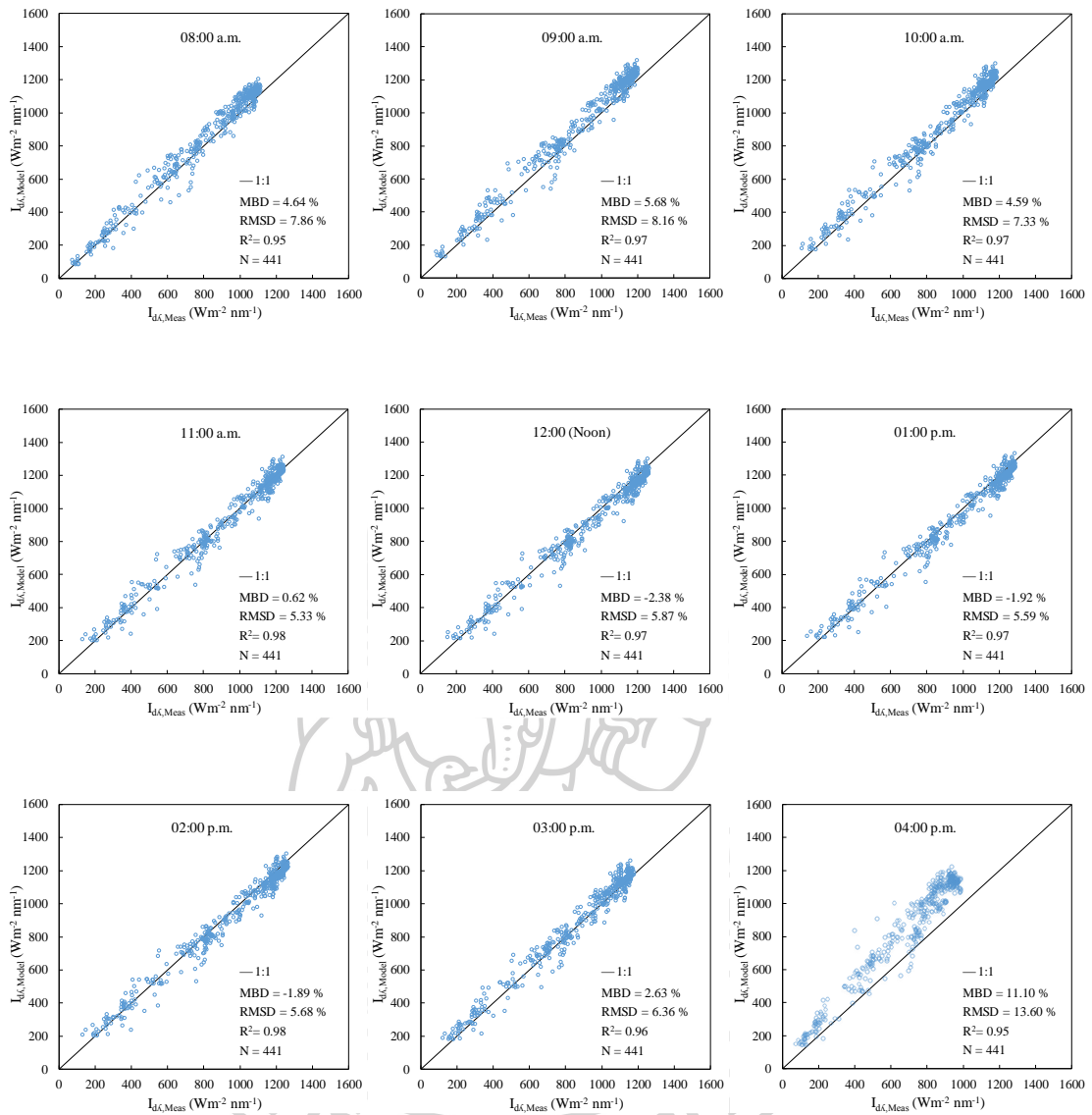
เมื่อ I_{model} คือ ค่าสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง ($\text{W}/\text{m}^2 - \text{nm}$)

I_{meas} คือ ค่าสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ที่ได้จากการวัด ($\text{W}/\text{m}^2 - \text{nm}$)

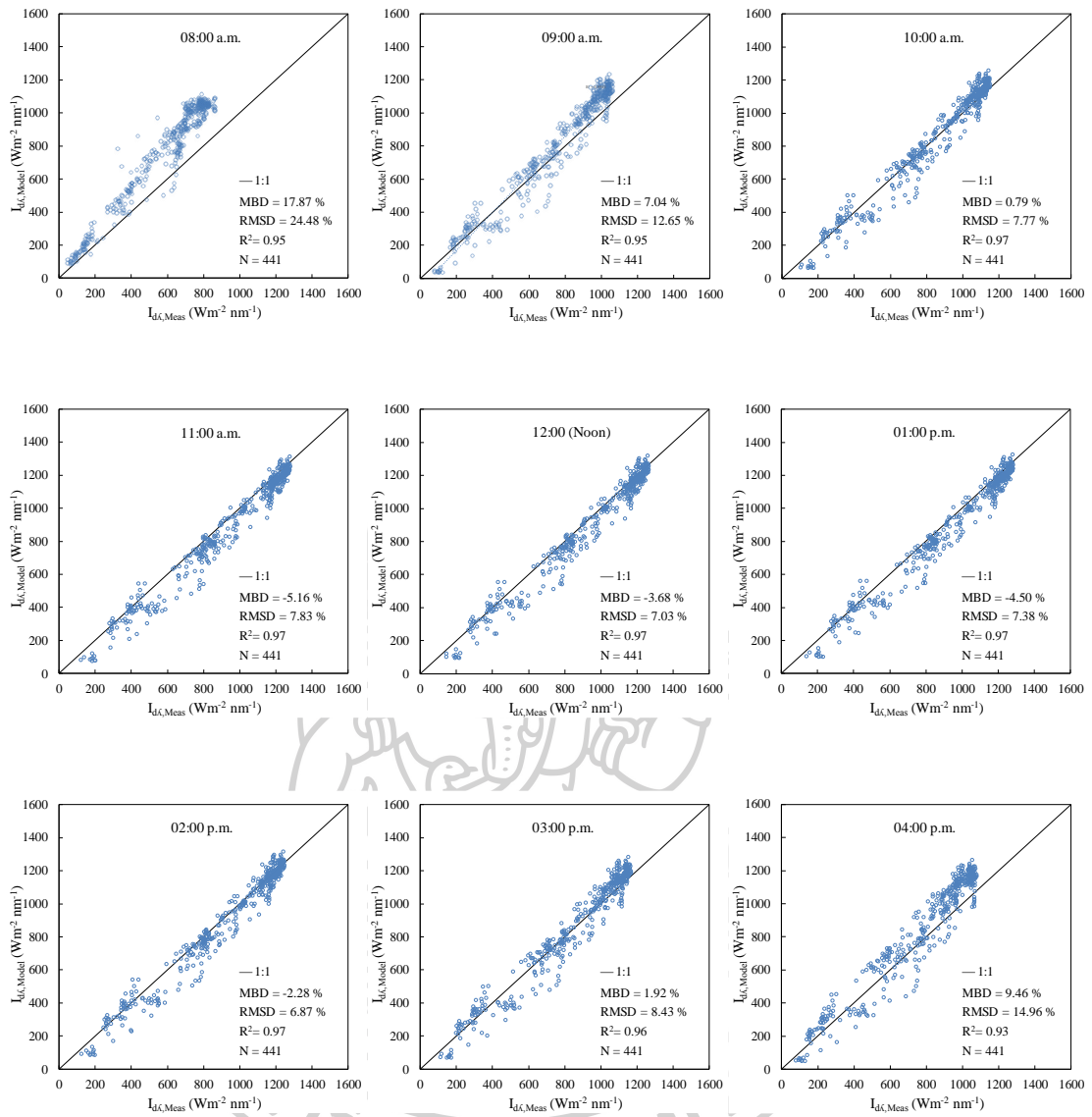
N คือ จำนวนข้อมูล



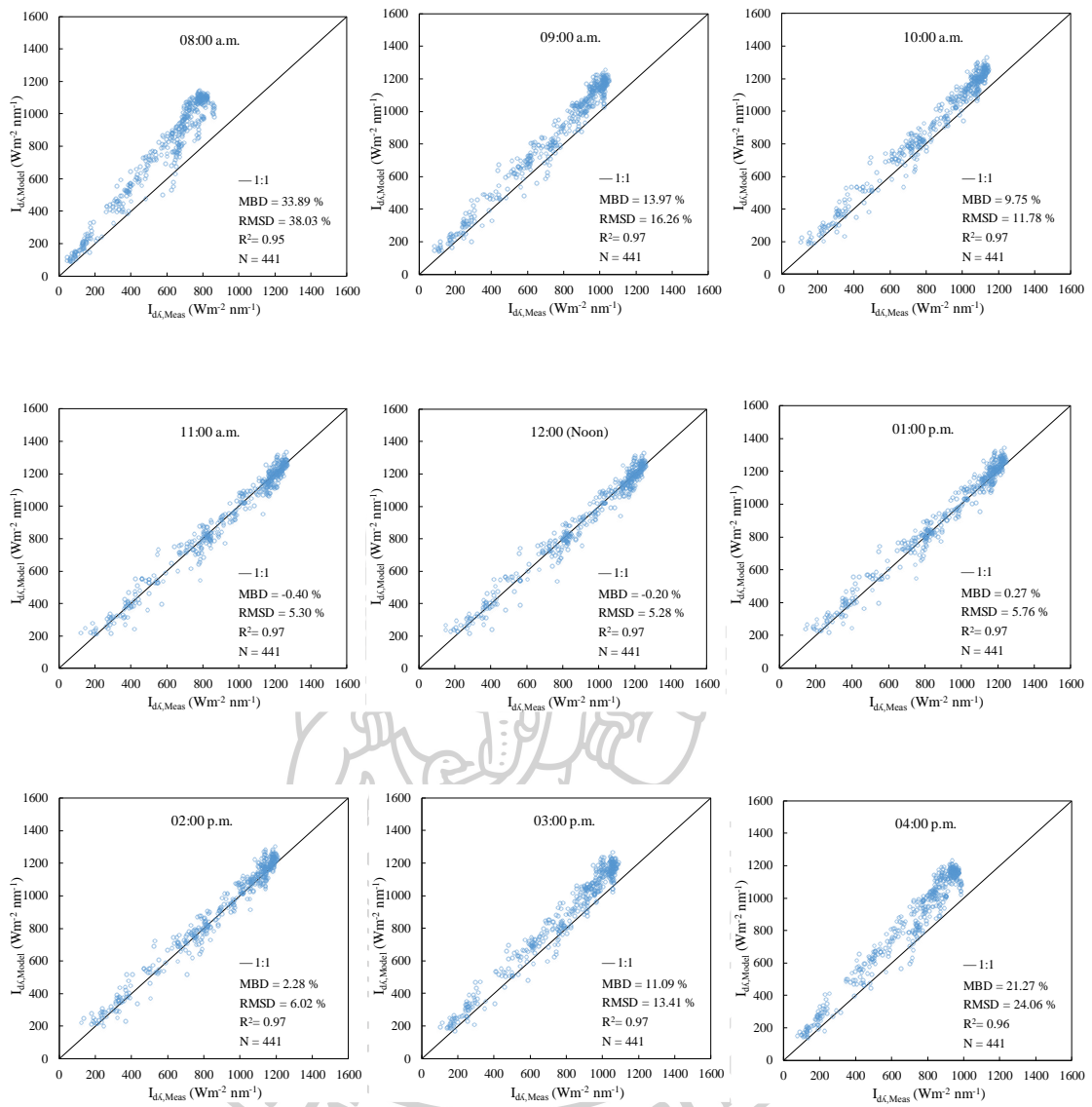
รูปที่ 3.29 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Leckner (1978) ($I_{d\lambda,model}$) และสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการวัดภาคพื้นดิน ($I_{d\lambda,meas}$) ที่เวลา 08:00-16:00 น.



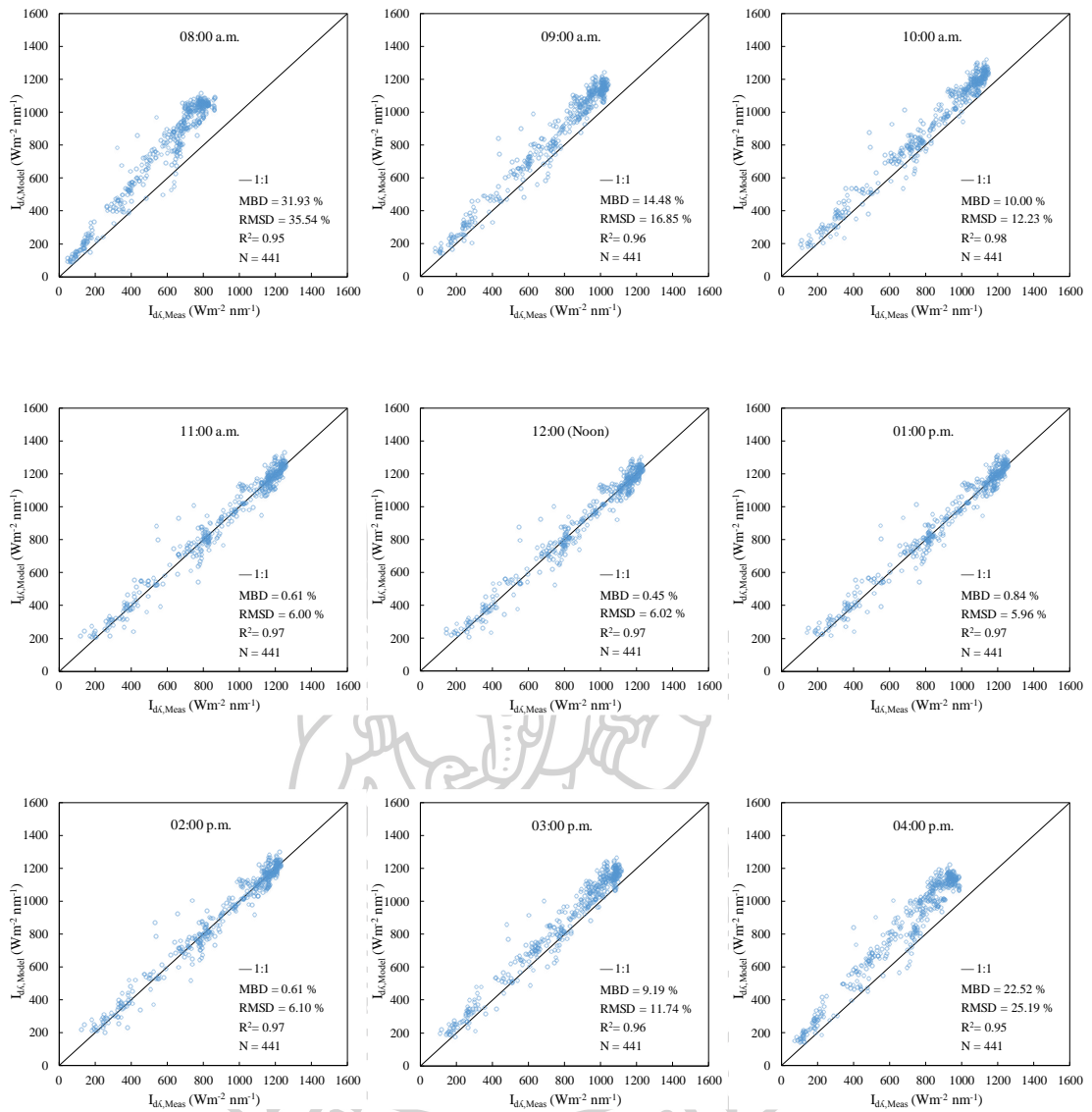
รูปที่ 3.30 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Brine และ Iqbal (1983) ($I_{d\lambda, \text{model}}$) และสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการวัดภาคพื้นดิน ($I_{d\lambda, \text{meas}}$) ที่เวลา 08:00-16:00 น.



รูปที่ 3.31 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Bird (1984) ($I_{d,model}$) และสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการวัดภาคพื้นดิน ($I_{d,meas}$) ที่เวลา 08:00-16:00 น.

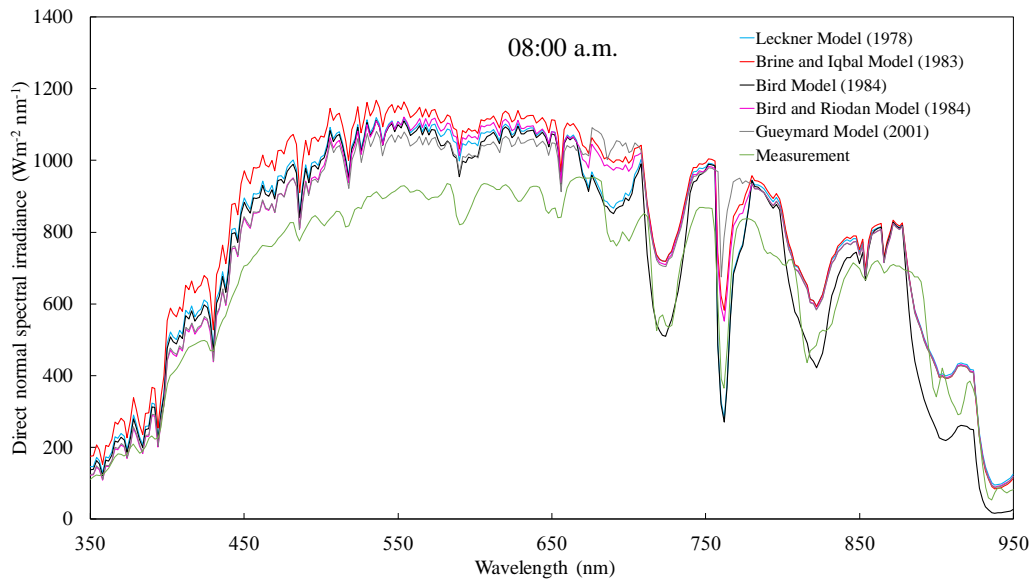


รูปที่ 3.32 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Bird และ Riodan (1986) ($I_{d,model}$) และสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการวัดภาคพื้นดิน ($I_{d,meas}$) ที่เวลา 08:00-16:00 น.

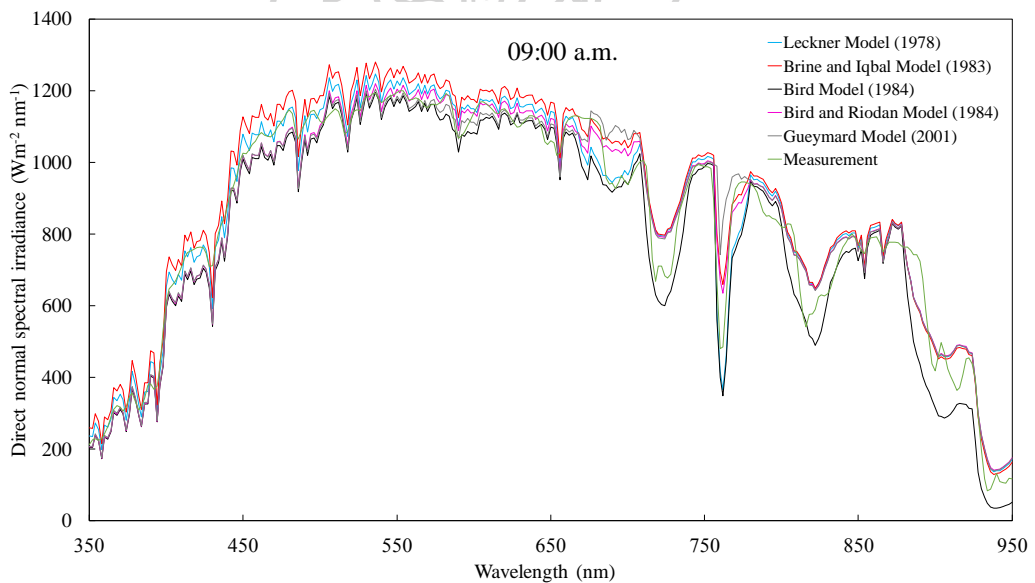


รูปที่ 3.33 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Gueymard (2001) ($I_{d\lambda,model}$) และสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการวัดภาคพื้นดิน ($I_{d\lambda,meas}$) ที่เวลา 08:00-16:00 น.

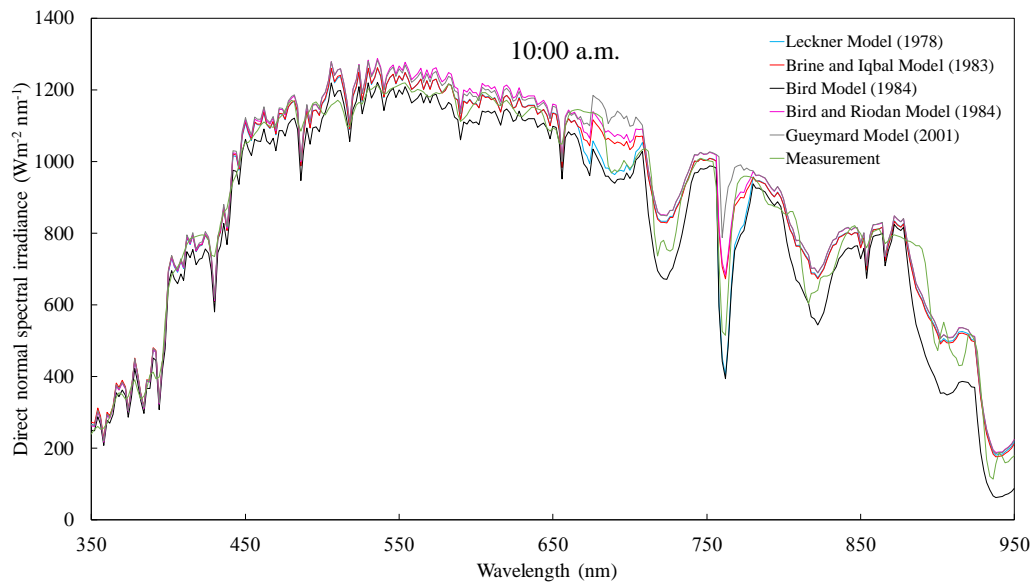
เมื่อนำข้อมูลสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงที่คำนวณจากแบบจำลองต่างๆ มาแสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบกับข้อมูลวัดภาคพื้นดิน ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.34-3.42 และตารางที่ 3.1



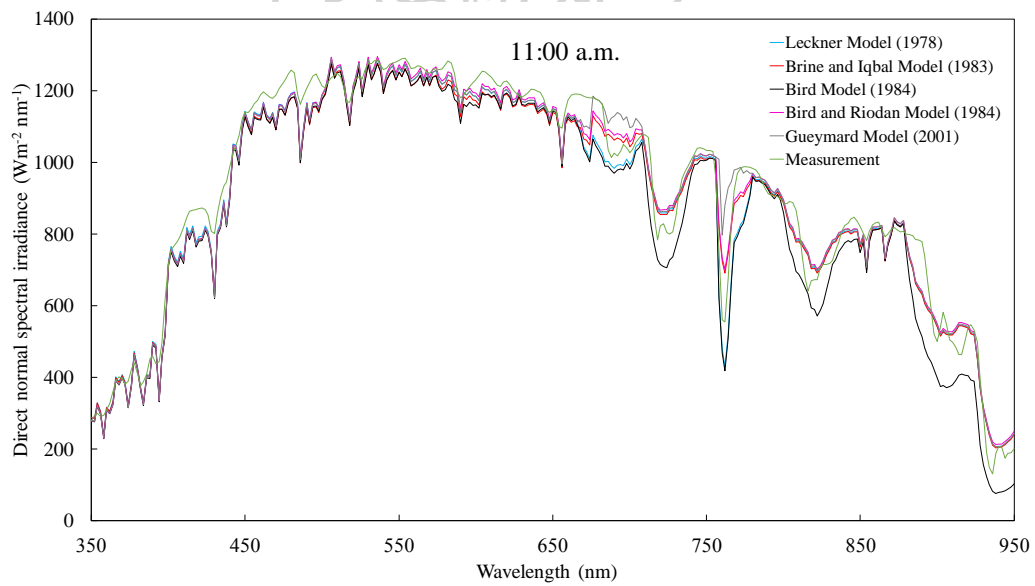
รูปที่ 3.34 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมรังสีตรงจากแบบจำลองกับค่าสเปกตรัมรังสีตรงจากการวัดภาคพื้นดินที่เวลา 08:00 น.



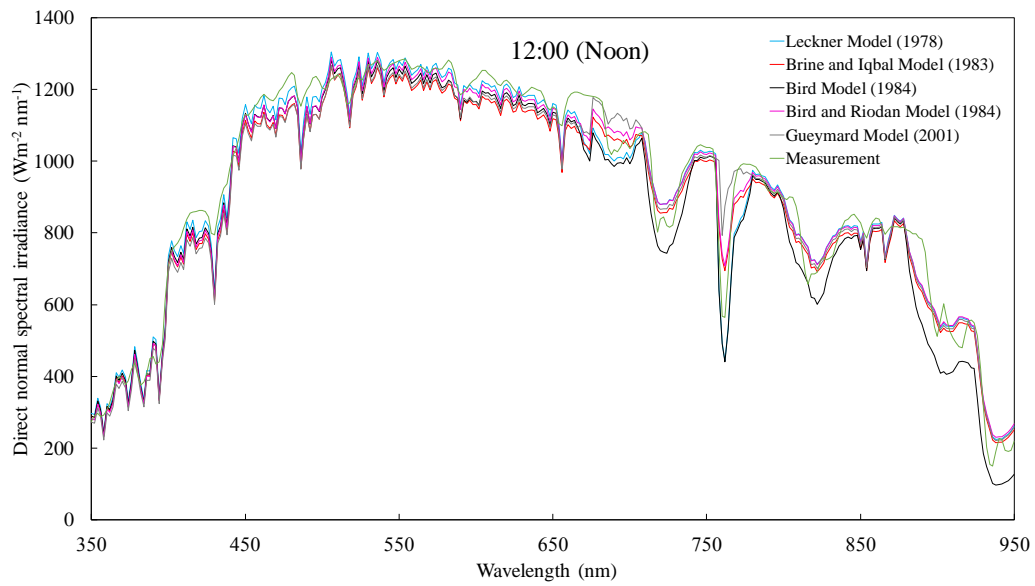
รูปที่ 3.35 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมรังสีตรงจากแบบจำลองกับค่าสเปกตรัมรังสีตรงจากการวัดภาคพื้นดินที่เวลา 09:00 น.



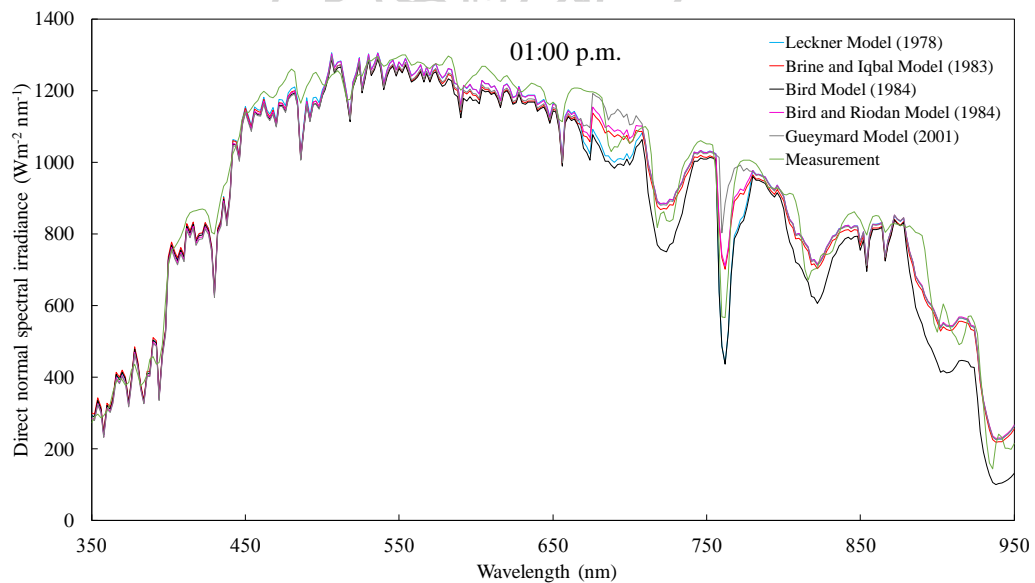
รูปที่ 3.36 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมรังสีตรงจากแบบจำลองกับค่าสเปกตรัมรังสีตรงจากการวัดภาคพื้นดินที่เวลา 10:00 น.



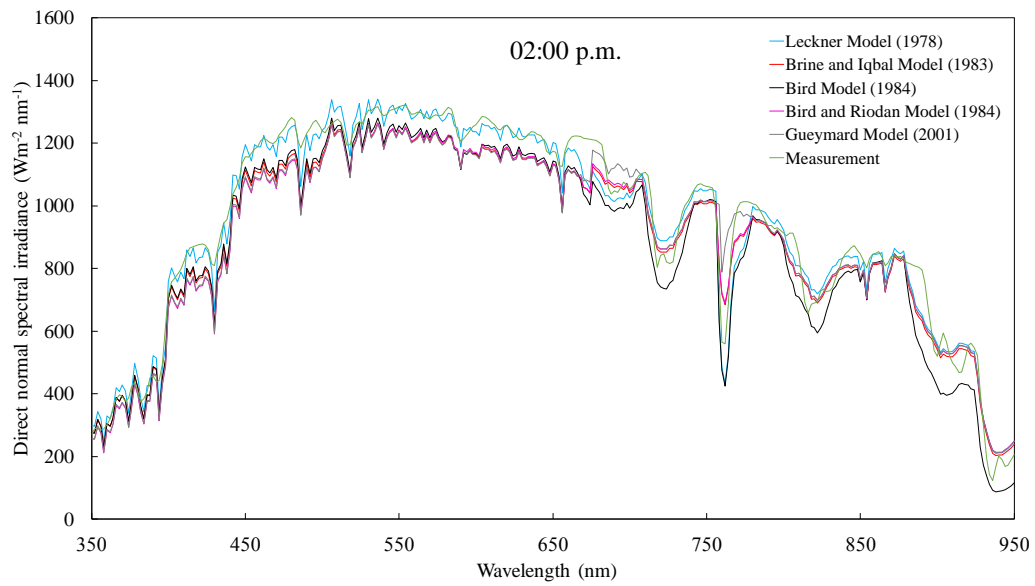
รูปที่ 3.37 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมรังสีตรงจากแบบจำลองกับค่าสเปกตรัมรังสีตรงจากการวัดภาคพื้นดินที่เวลา 11:00 น.



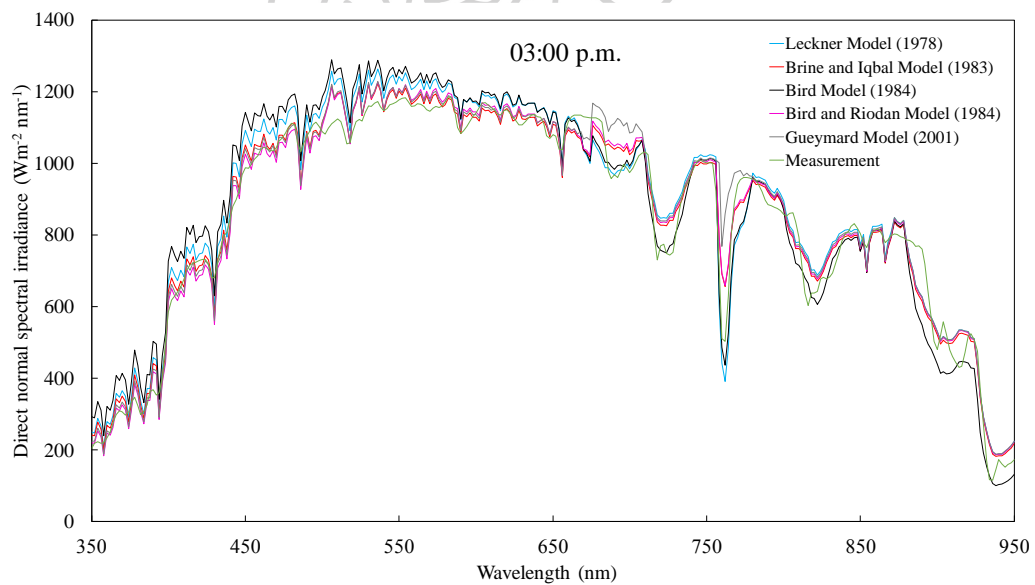
รูปที่ 3.38 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมรังสีตรงจากแบบจำลองกับค่าสเปกตรัมรังสีตรงจากการวัดภาคพื้นดินที่เวลา 12:00 น.



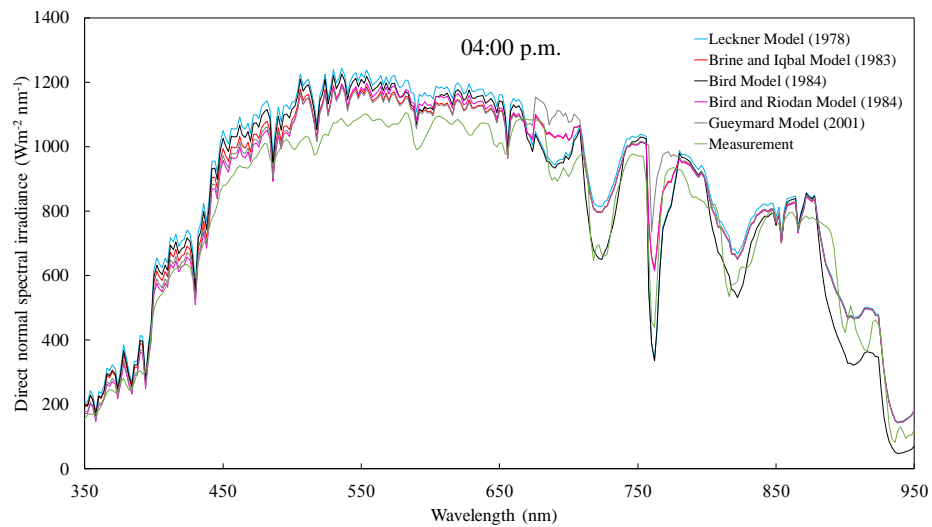
รูปที่ 3.39 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมรังสีตรงจากแบบจำลองกับค่าสเปกตรัมรังสีตรงจากการวัดภาคพื้นดินที่เวลา 13:00 น.



รูปที่ 3.40 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมรังสีตรงจากแบบจำลองกับค่าสเปกตรัมรังสีตรงจากการวัดภาคพื้นดินที่เวลา 14:00 น.



รูปที่ 3.41 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมรังสีตรงจากแบบจำลองกับค่าสเปกตรัมรังสีตรงจากการวัดภาคพื้นดินที่เวลา 15:00 น.

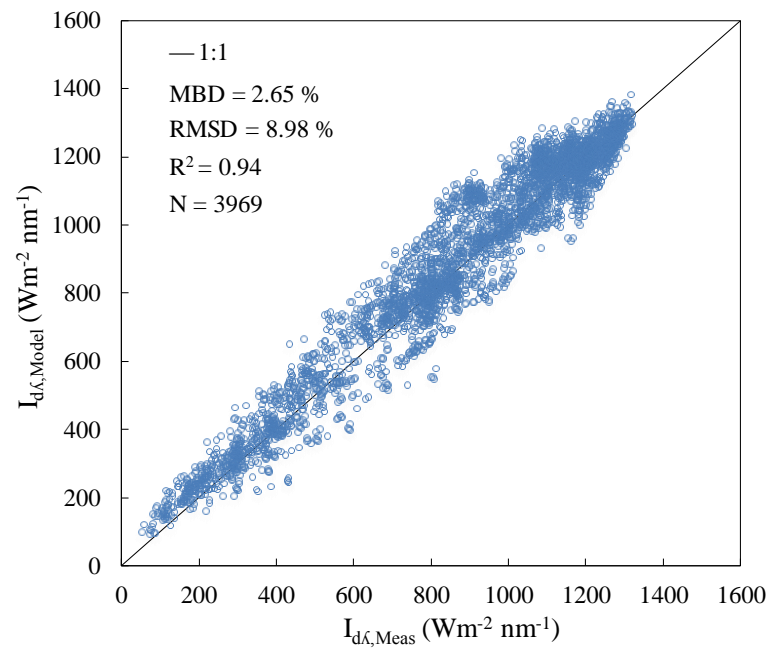


รูปที่ 3.42 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมรังสีตรงจากแบบจำลองกับค่าสเปกตรัมรังสีตรงจากการวัดภาคพื้นดินที่เวลา 16:00 น.

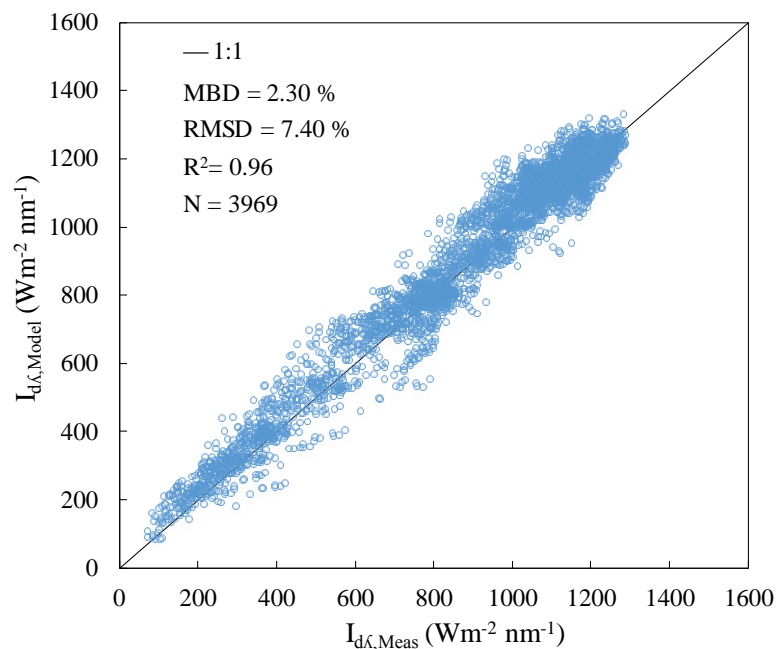
ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบค่า MBD และ RMSD ของสเปกตรัมรังสีตรงจากแบบจำลองแต่ละเวลาในรอบวัน

Models	Leckner (1978)		Brine and Iqbal (1983)		Bird (1984)		Bird and Riordan (1986)		Gueymard (2001)	
	MBD (%)	RMSD (%)	MBD (%)	RMSD (%)	MBD (%)	RMSD (%)	MBD (%)	RMSD (%)	MBD (%)	RMSD (%)
08:00	17.87	21.09	4.64	7.86	17.87	24.48	33.89	38.03	31.93	35.54
09:00	4.92	8.22	5.68	8.16	7.04	12.65	13.97	16.26	14.48	16.85
10:00	0.59	5.73	4.59	7.33	0.79	7.77	9.75	11.78	10.00	12.23
11:00	-3.02	6.26	0.62	5.33	-5.16	7.83	-0.40	5.30	0.61	6.00
12:00	-1.57	5.66	-2.38	5.87	-3.68	7.03	-0.20	5.28	2.07	5.76
13:00	-2.65	6.01	-1.92	5.59	-4.50	7.38	2.07	5.76	0.84	5.96
14:00	-0.88	5.54	-1.89	5.68	-2.28	6.87	2.28	6.02	0.61	6.10
15:00	4.03	7.56	2.63	6.36	1.92	8.43	11.09	13.41	9.19	11.74
16:00	10.83	13.65	11.10	13.60	9.46	14.96	21.27	24.06	22.52	25.19

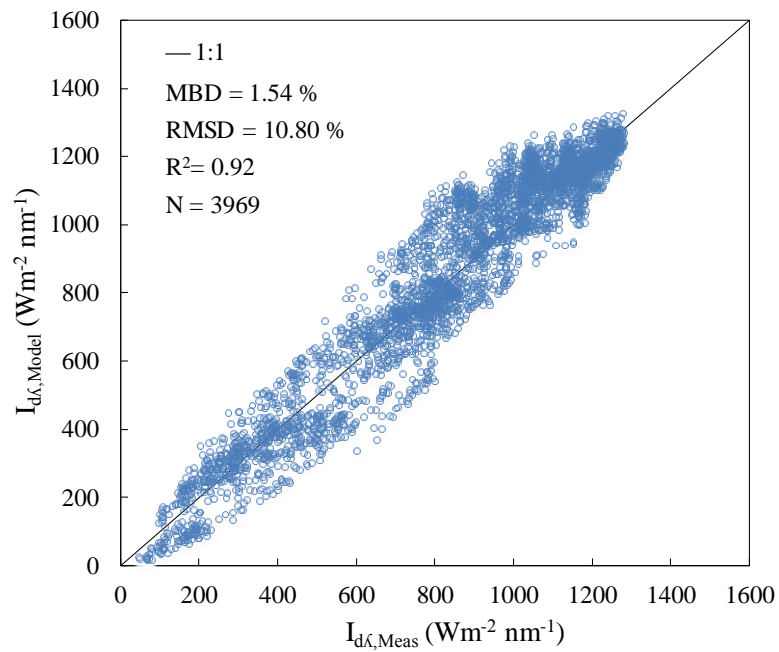
ผลการเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองกับค่าจากการวัดภาคพื้นดิน สามารถสรุปได้แสดงดังรูปที่ 3.43-3.47 และตารางที่ 3.2



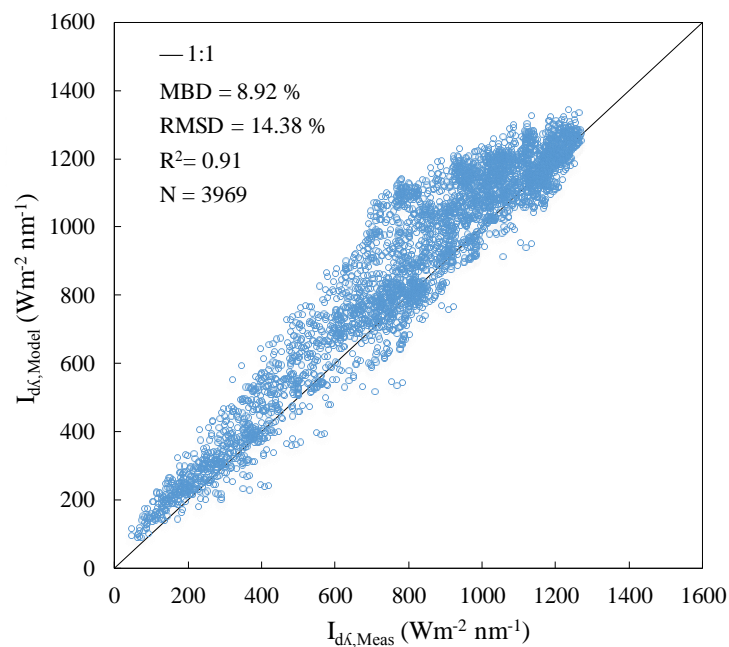
รูปที่ 3.43 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Leckner (1978) ($I_{d\lambda,model}$) และสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการวัดภาคพื้นดิน ($I_{d\lambda,meas}$)



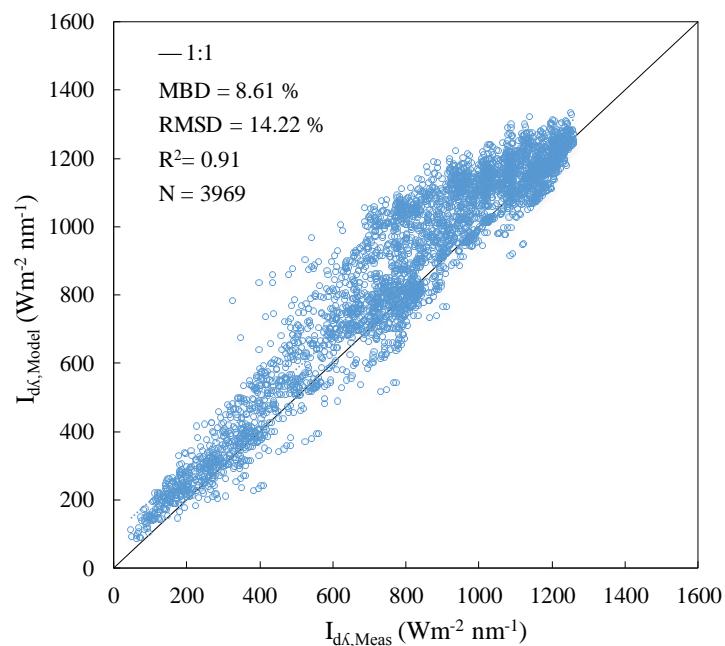
รูปที่ 3.44 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Brine และ Iqbal (1983) ($I_{d\lambda,model}$) และสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการวัดภาคพื้นดิน ($I_{d\lambda,meas}$)



รูปที่ 3.45 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Bird (1984) ($I_{d\lambda, model}$) และสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการวัดภาคพื้นดิน ($I_{d\lambda, meas}$)



รูปที่ 3.46 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Bird และ Riodan (1986) ($I_{d\lambda, model}$) และสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการวัดภาคพื้นดิน ($I_{d\lambda, meas}$)



รูปที่ 3.47 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Gueymard (2001) ($I_{d\lambda, \text{model}}$) และสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการวัดภาคพื้นดิน ($I_{d\lambda, \text{meas}}$)

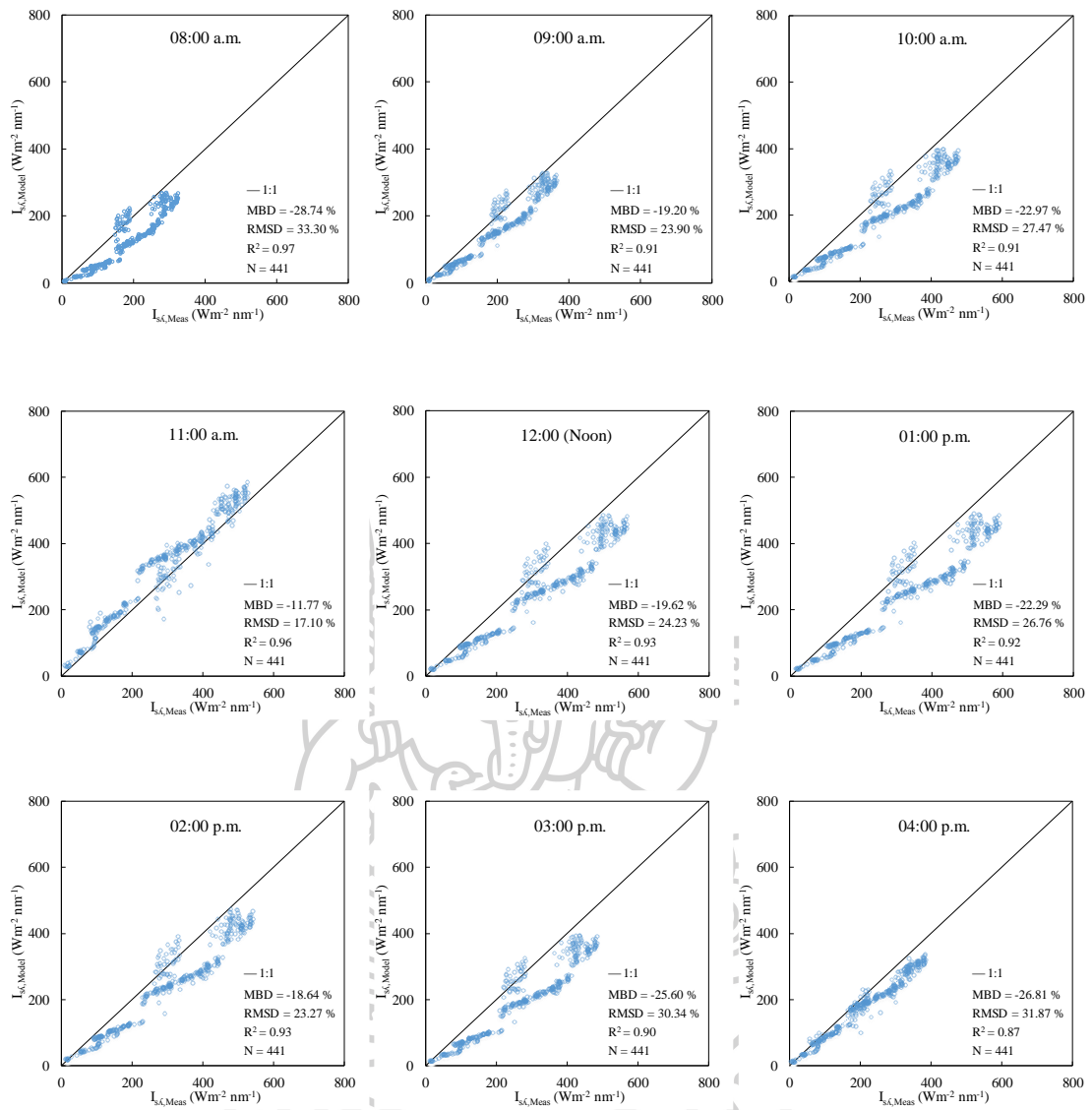
ตารางที่ 3.2 แสดงค่า MBD และ RMSD ของการเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองกับค่าสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการวัดภาคพื้นดิน

แบบจำลอง	MBD (%)	RMSD (%)
Leckner (1978)	2.65	8.98
Brine และ Iqbal (1983)	2.30	7.40
Bird (1984)	1.54	10.80
Bird และ Riodan (1986)	8.92	14.38
Gueymard (2001)	8.61	14.22

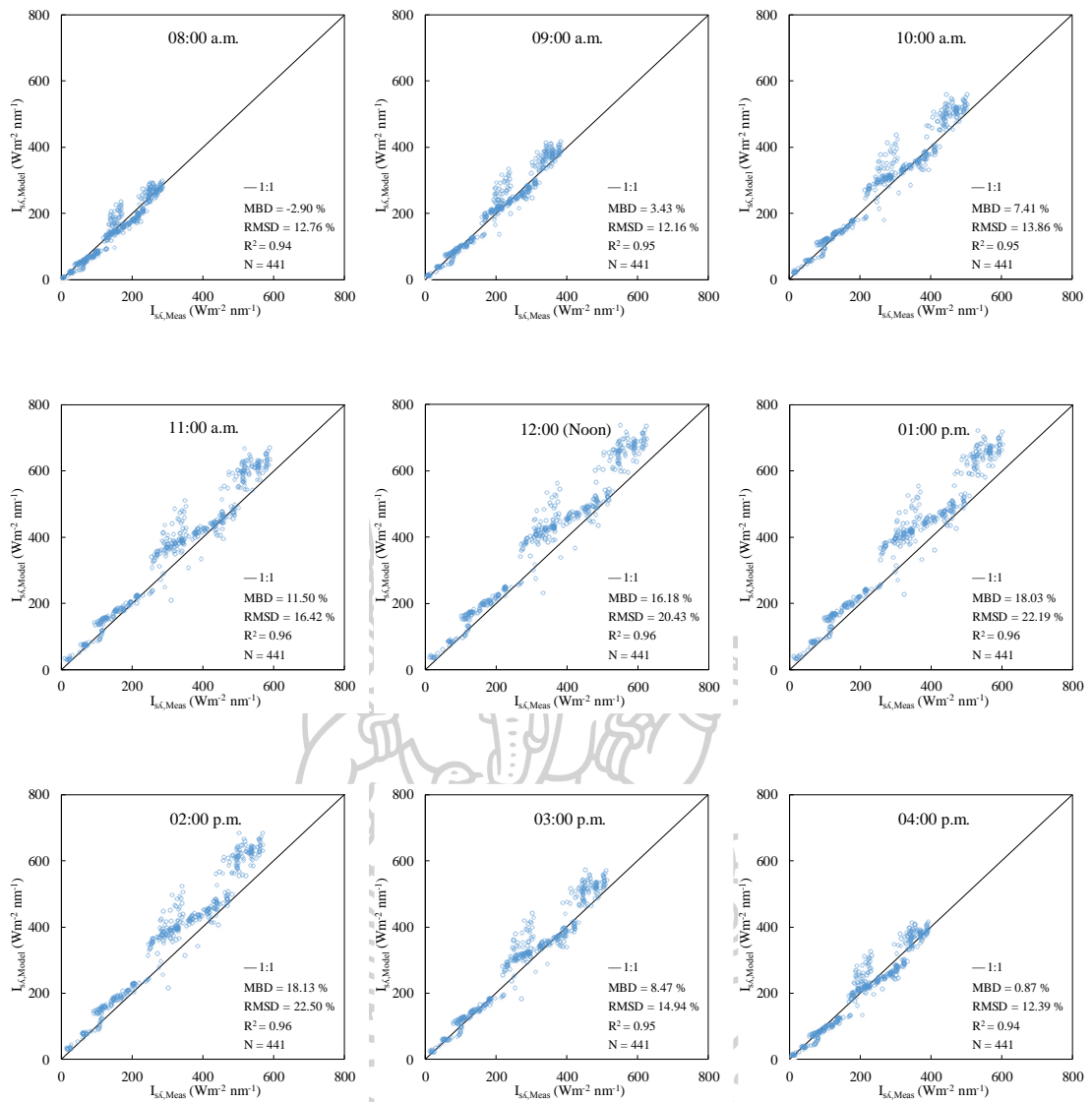
จากการเปรียบเทียบสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Leckner (1978) Brine และ Iqbal (1983) Bird (1984) Bird และ Riordan (1984) และ Gueymard (2001) กับค่าสเปกตรัมรังสีตรงรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการวัดภาคพื้นดินที่เวลา 08:00-16:00 น. จะเห็นได้ว่ากราฟของสเปกตรัมรังสีตรงแต่ละแบบจำลองในเวลาช่วงเช้าและเย็นจะมีค่าสูงกว่าข้อมูลจากการวัดจริง ที่เป็นดั่งนั้นเพราะว่าในช่วงเวลาเช้าและเย็นรังสีอาทิตย์จะเคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศด้วยระยะทางที่ยาวกว่าเวลาเที่ยงวัน ส่งผลให้การคำนวณ optical depth ในแต่ละองค์ประกอบของบรรยากาศมีความคลาดเคลื่อนสะสม เมื่อเปรียบเทียบค่า MBD และค่า RMSD ของสเปกตรัมรังสีตรงจากแบบจำลองแต่ละเวลาในรอบวันแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทั้งหมดในช่วงเวลาเที่ยงวันมีค่า MBD และ RMSD ต่ำกว่าช่วงเวลาเช้าและเย็น โดยแบบจำลองของ Brine และ Iqbal (1983) ให้ผลการเปรียบเทียบกับค่าจากการวัดได้ดีที่สุดโดยมีค่า MBD เท่ากับ 2.30% และ RMSD เท่ากับ 7.40%

3.2.2 การเปรียบเทียบแบบจำลองสเปกตรัมรังสีกระจาย

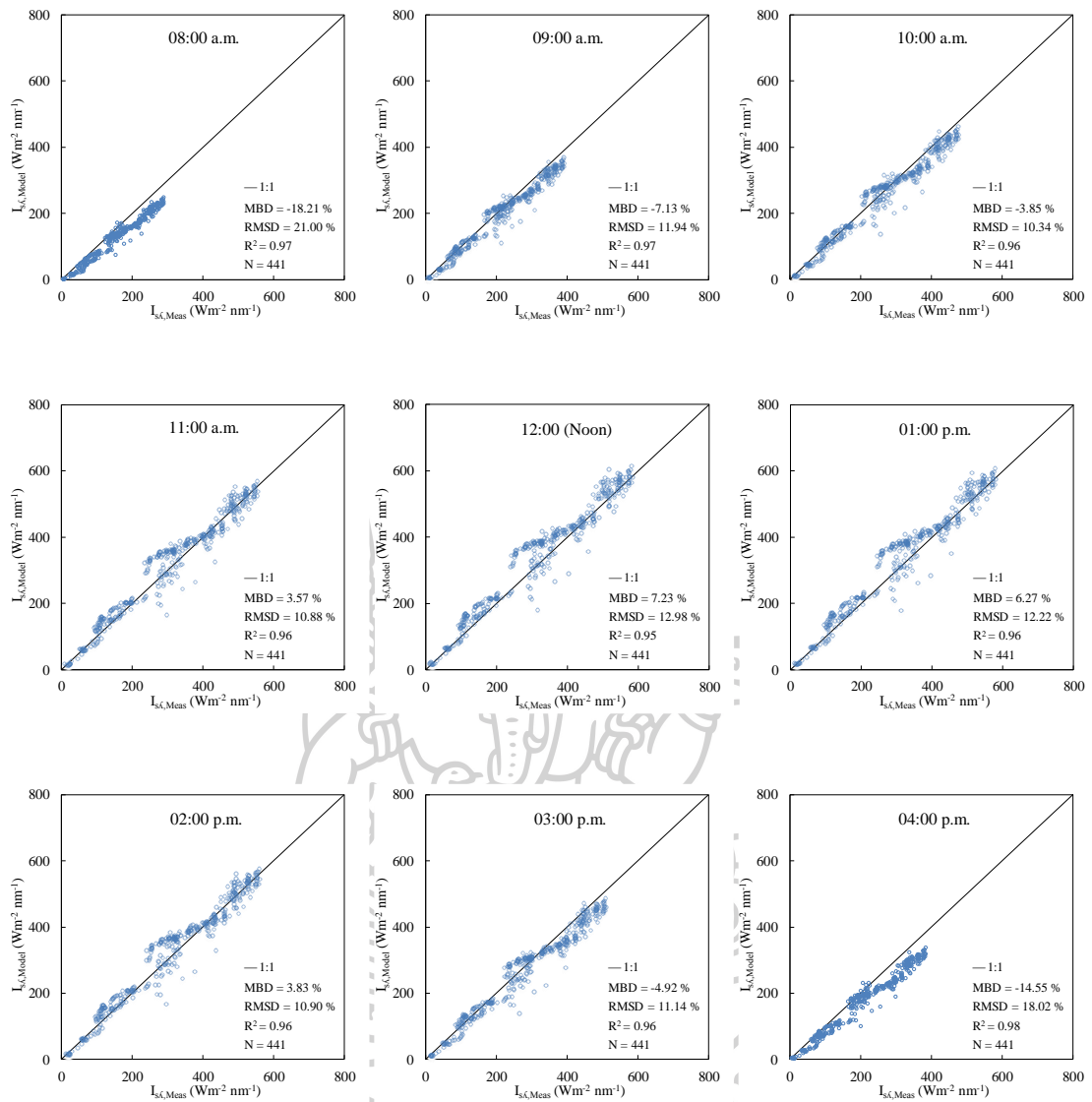
ผู้วิจัยทำการเปรียบเทียบแบบจำลองสเปกตรัมรังสีกระจายในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆจากแบบจำลองของ Leckner (1978) Brine และ Iqbal (1983) Bird (1984) Bird และ Riordan (1986) และ Gueymard (2001) กับข้อมูลวัดภาคพื้นดินจากเครื่อง EKO spectroradiometer ที่จังหวัดนครปฐม ใช้ข้อมูลตั้งแต่ปี ค.ศ. 2014-2016 เพื่อเปรียบเทียบว่าแบบจำลองใดมีความเหมาะสมที่สุด โดยเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน ซึ่งจะแสดงผลในรูปของ MBD และค่า RMSD ซึ่งหาได้จากสมการ (3.1) และ (3.2) กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน แสดงดังรูปที่ 3.48-3.52



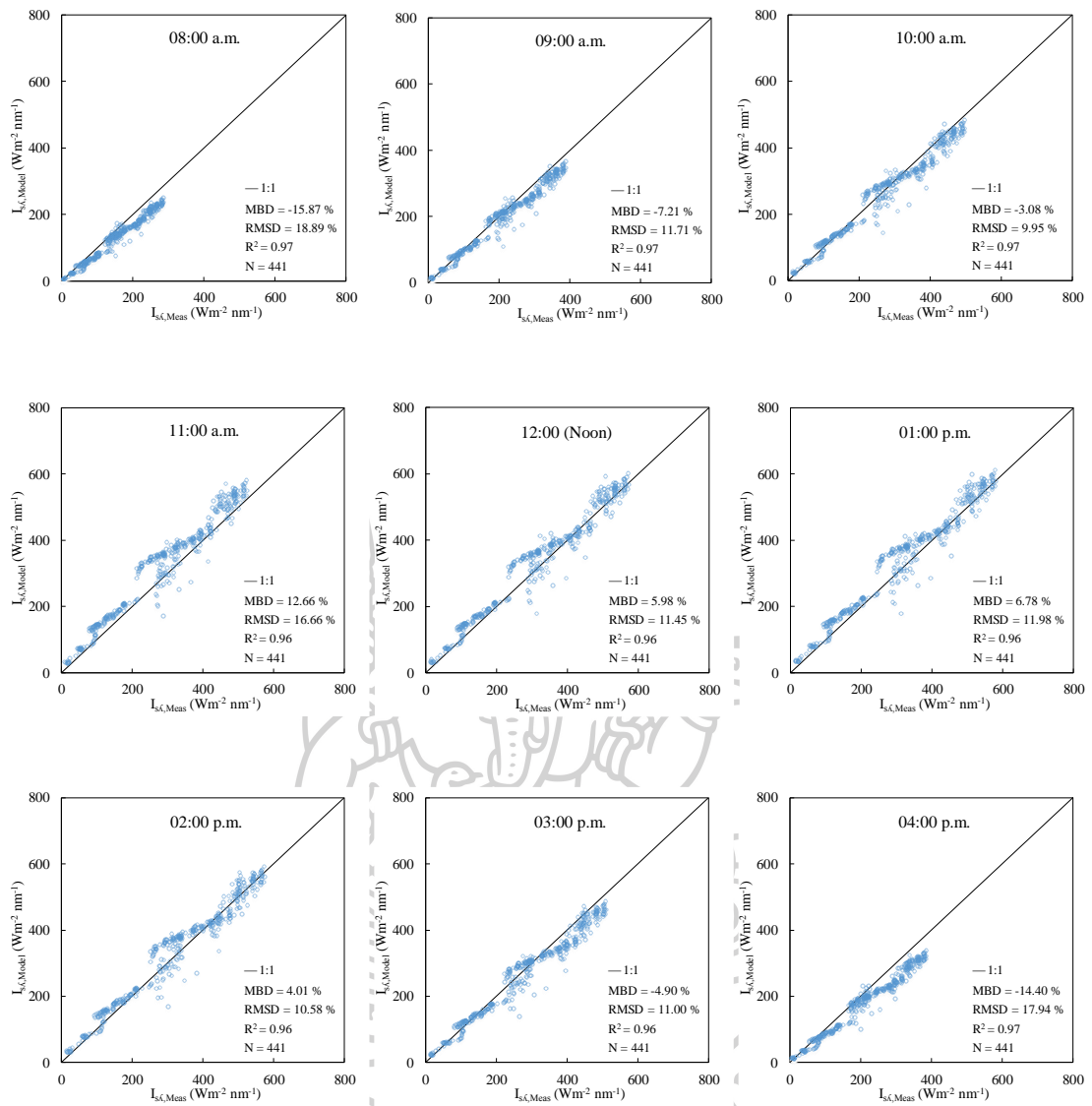
รูปที่ 3.48 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Leckner (1978) ($I_{d\lambda,model}$) และสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการวัดภาคพื้นดิน ($I_{d\lambda,meas}$) ที่เวลา 08:00-16:00 น.



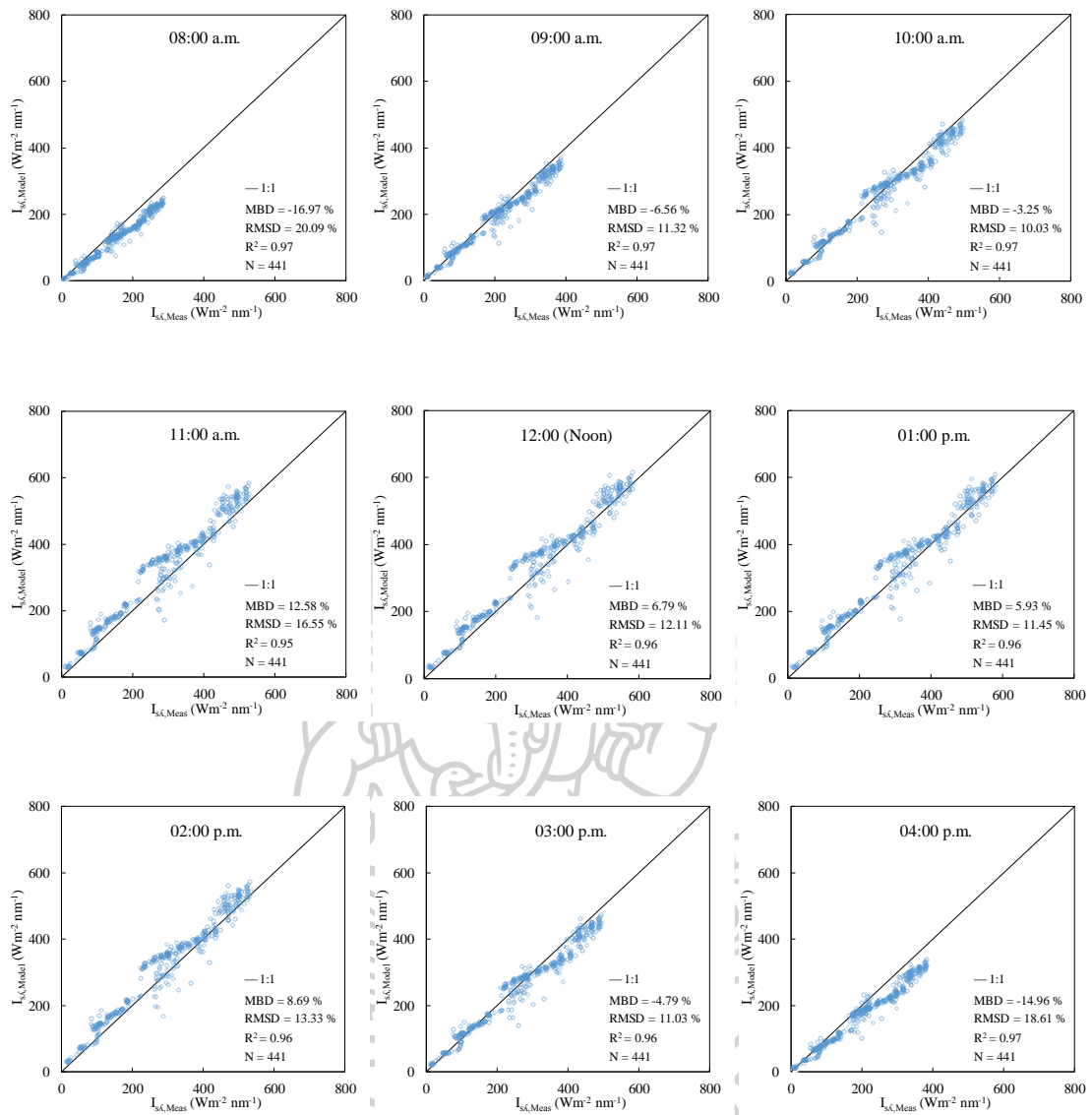
รูปที่ 3.49 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Brine และ Iqbal (1983) ($I_{d,model}$) และสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการวัดภาคพื้นดิน ($I_{d,meas}$) ที่เวลา 08:00-16:00 น.



รูปที่ 3.50 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Bird (1984) ($I_{d,model}$) และสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการวัดภาคพื้นดิน ($I_{d,meas}$) ที่เวลา 08:00-16:00 น.

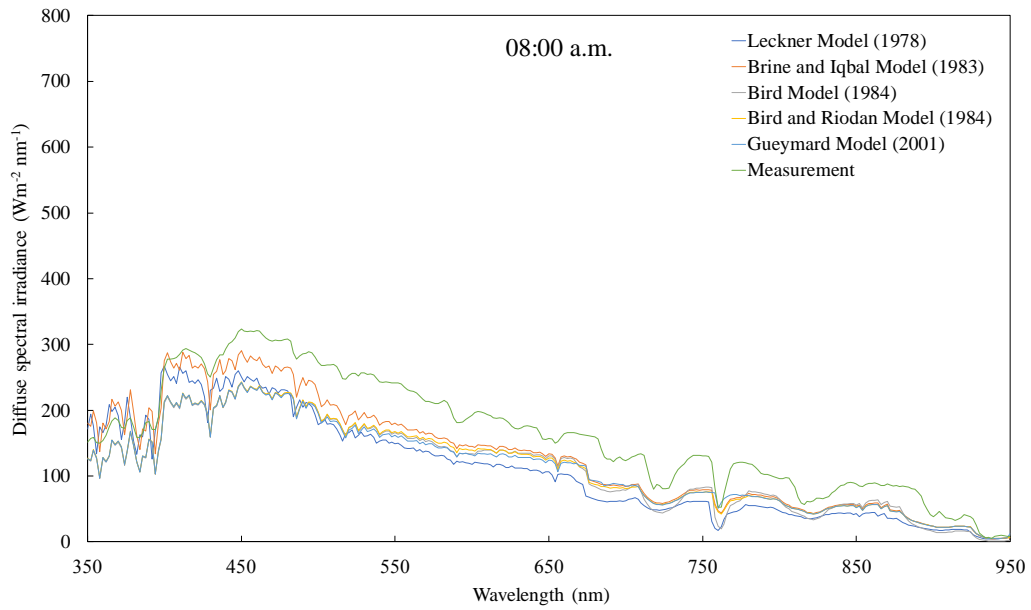


รูปที่ 3.51 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Bird และ Riordan (1986) ($I_{d,model}$) และสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการวัดภาคพื้นดิน ($I_{d,meas}$) ที่เวลา 08:00-16:00 น.

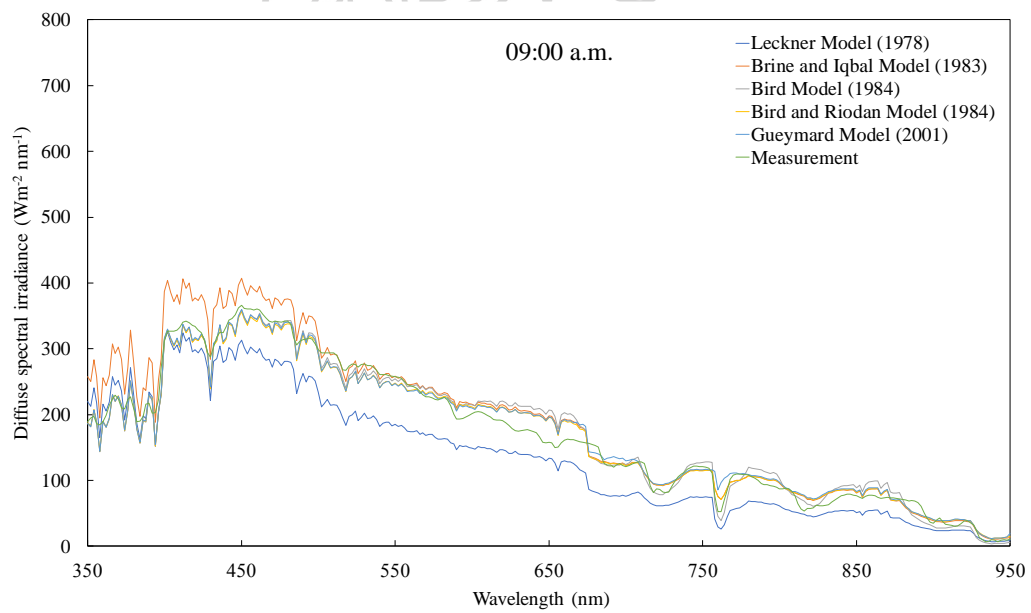


รูปที่ 3.52 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Gueymard (2001) ($I_{d\lambda,model}$) และสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการวัดภาคพื้นดิน ($I_{d\lambda,meas}$) ที่เวลา 08:00-16:00 น.

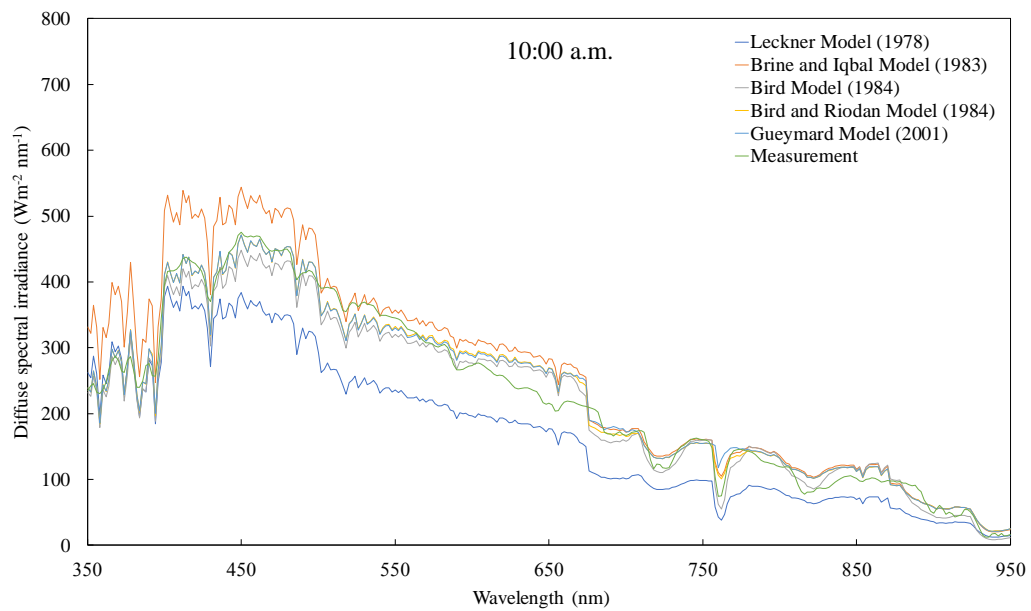
เมื่อนำข้อมูลสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงที่คำนวณจากแบบจำลองต่างๆ มาแสดงความสัมพันธ์เปรียบเทียบกับข้อมูลวัดภาคพื้นดิน ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.53-3.61 และตารางที่ 3.3



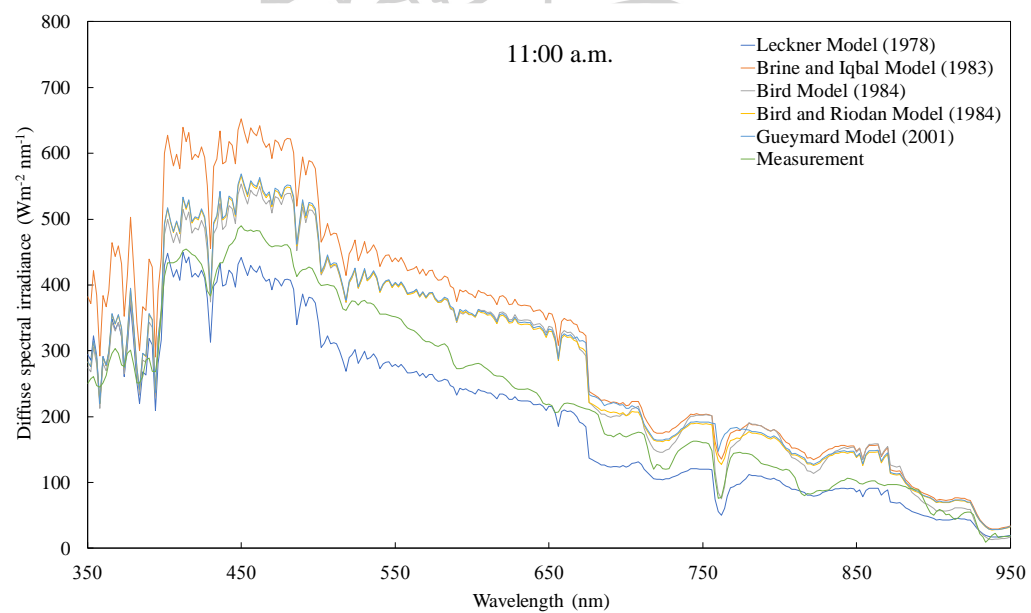
รูปที่ 3.53 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมรังสีกระจายจากแบบจำลองกับค่าสเปกตรัมรังสีกระจายจากการวัดภาคพื้นดินที่เวลา 08:00 น.



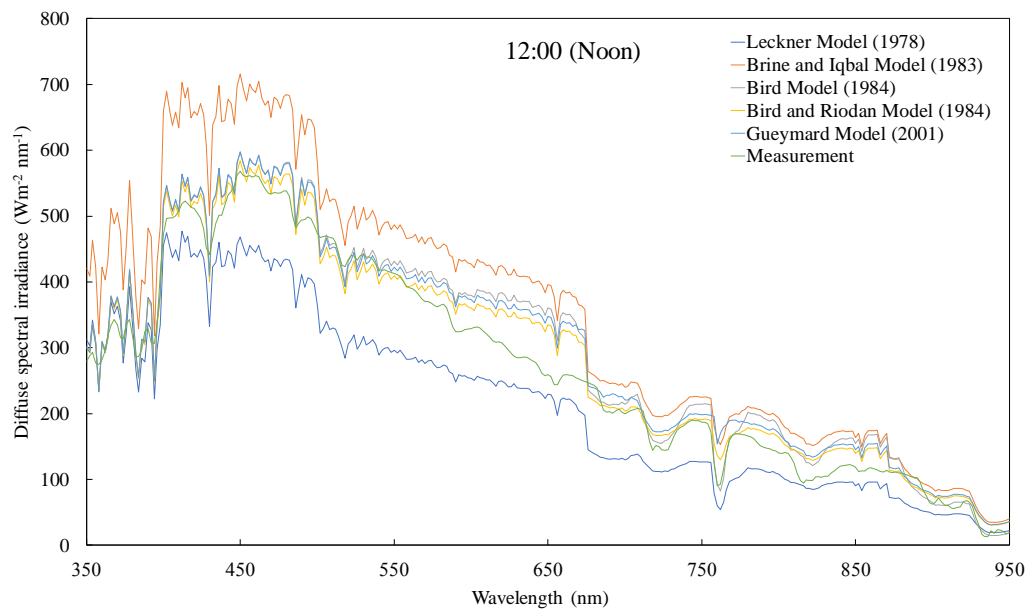
รูปที่ 3.54 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมรังสีกระจายจากแบบจำลองกับค่าสเปกตรัมรังสีกระจายจากการวัดภาคพื้นดินที่เวลา 09:00 น.



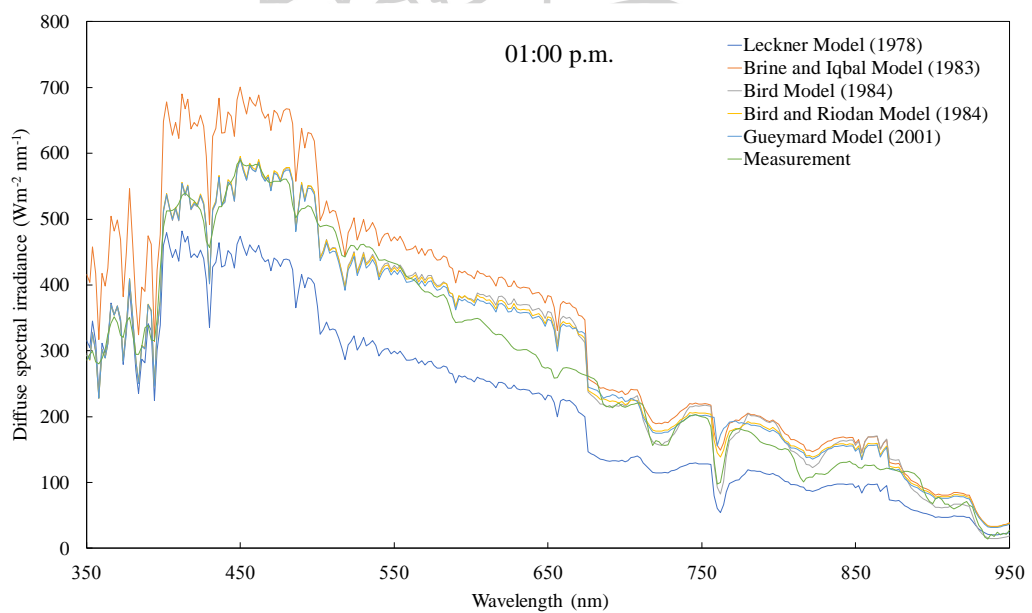
รูปที่ 3.55 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมรังสีกระจายจากแบบจำลองกับค่าสเปกตรัมรังสีกระจายจากการวัดภาคพื้นดินที่เวลา 10:00 น.



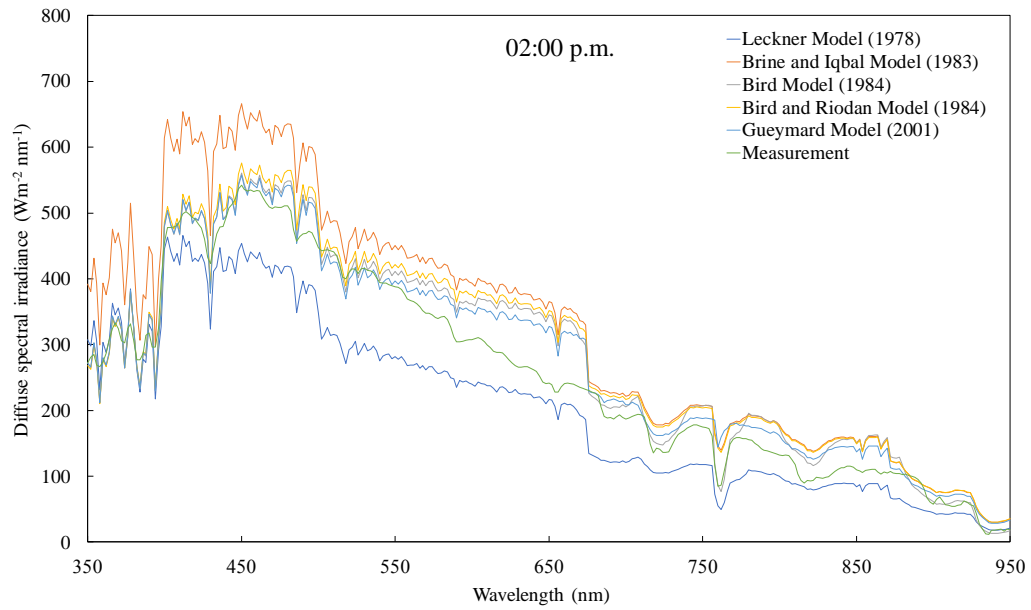
รูปที่ 3.56 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมรังสีกระจายจากแบบจำลองกับค่าสเปกตรัมรังสีกระจายจากการวัดภาคพื้นดินที่เวลา 11:00 น.



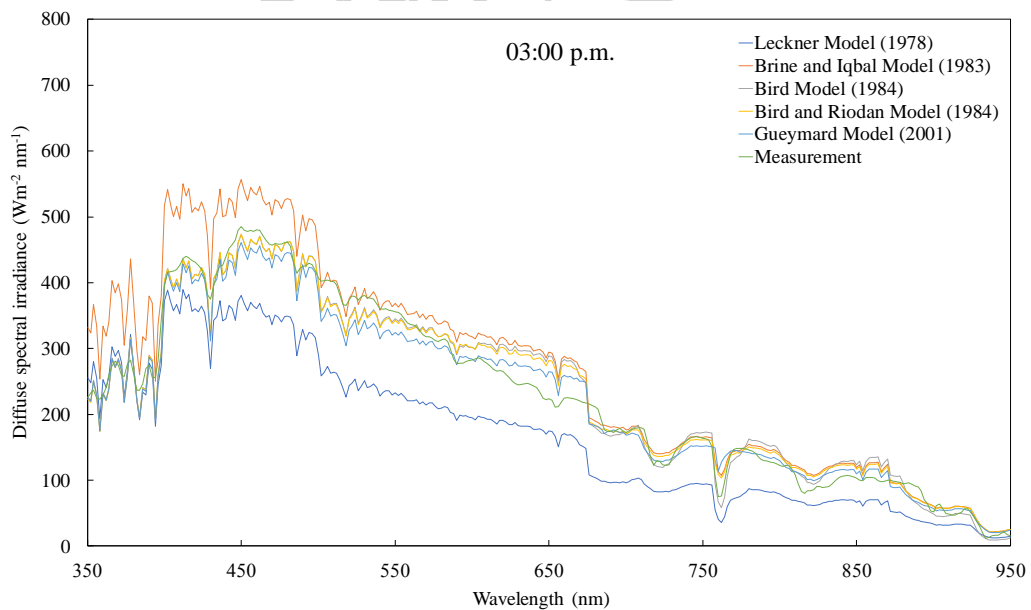
รูปที่ 3.57 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมรังสีกระจายจากแบบจำลองกับค่าสเปกตรัมรังสีกระจายจากการวัดภาคพื้นดินที่เวลา 12:00 น.



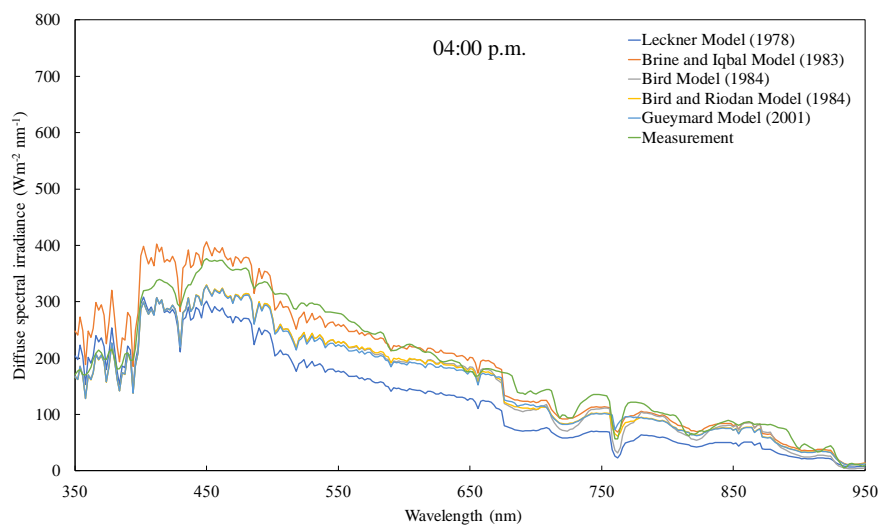
รูปที่ 3.58 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมรังสีกระจายจากแบบจำลองกับค่าสเปกตรัมรังสีกระจายจากการวัดภาคพื้นดินที่เวลา 13:00 น.



รูปที่ 3.59 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมรังสีกระจายจากแบบจำลองกับค่าสเปกตรัมรังสีกระจายจากการวัดภาคพื้นดินที่เวลา 14:00 น.



รูปที่ 3.60 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมรังสีกระจายจากแบบจำลองกับค่าสเปกตรัมรังสีกระจายจากการวัดภาคพื้นดินที่เวลา 15:00 น.

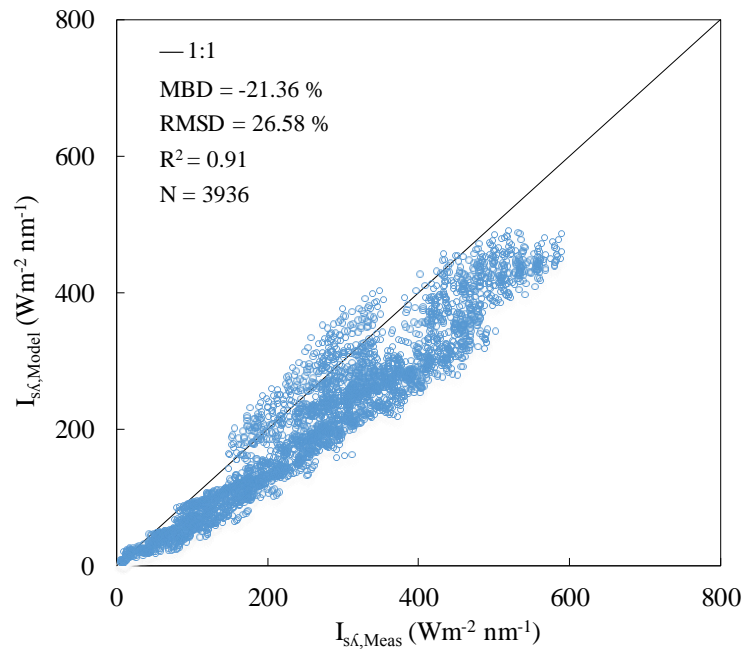


รูปที่ 3.61 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมรังสีกระจายจากแบบจำลองกับค่าสเปกตรัมรังสีกระจายจากการวัดภาคพื้นดินที่เวลา 16:00 น.

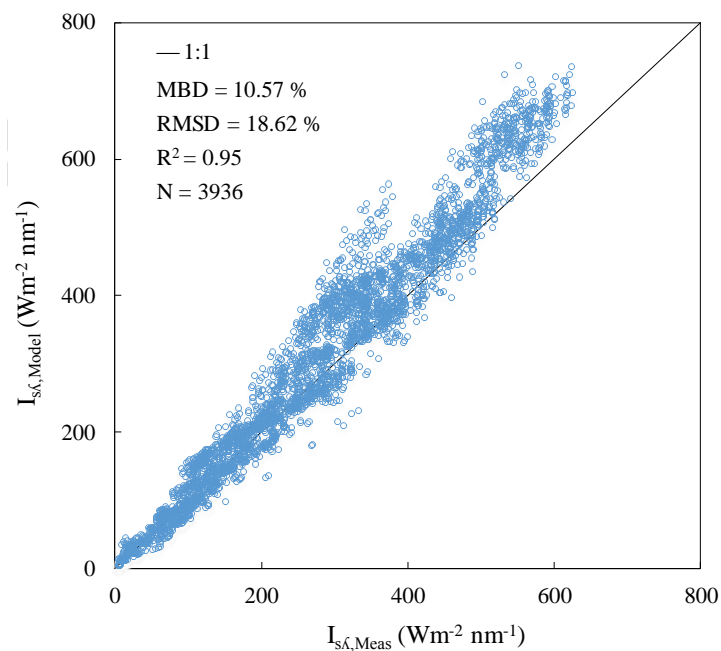
ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบค่า MBD และ RMSD ของสเปกตรัมรังสีกระจายจากแบบจำลองแต่ละเวลาในรอบวัน

Models	Leckner (1978)		Brine and Iqbal (1983)		Bird (1984)		Bird and Riordan (1986)		Gueymard (2001)	
	MBD (%)	RMSD (%)	MBD (%)	RMSD (%)	MBD (%)	RMSD (%)	MBD (%)	RMSD (%)	MBD (%)	RMSD (%)
08:00	-28.74	33.30	-2.90	12.76	-18.21	21.00	-15.87	18.89	-16.97	20.09
09:00	-19.20	23.90	3.43	12.16	-7.13	11.94	-7.21	11.71	-6.56	11.32
10:00	-22.97	27.47	7.41	13.86	-3.85	10.34	-3.08	9.95	-3.25	10.03
11:00	-11.77	17.10	11.50	16.42	3.57	10.88	12.66	16.66	12.58	16.55
12:00	-19.62	24.23	16.18	20.43	7.23	12.98	5.98	11.45	6.79	12.11
13:00	-22.29	26.76	18.03	22.19	6.27	12.22	6.78	11.98	5.93	11.45
14:00	-18.64	23.27	18.13	22.50	3.83	10.90	4.01	10.58	8.69	13.33
15:00	-25.60	30.34	8.74	14.94	-4.92	11.14	-4.90	11.00	-4.79	11.03
16:00	-26.81	31.87	0.87	12.39	-14.55	18.02	-14.40	17.94	-14.96	18.61

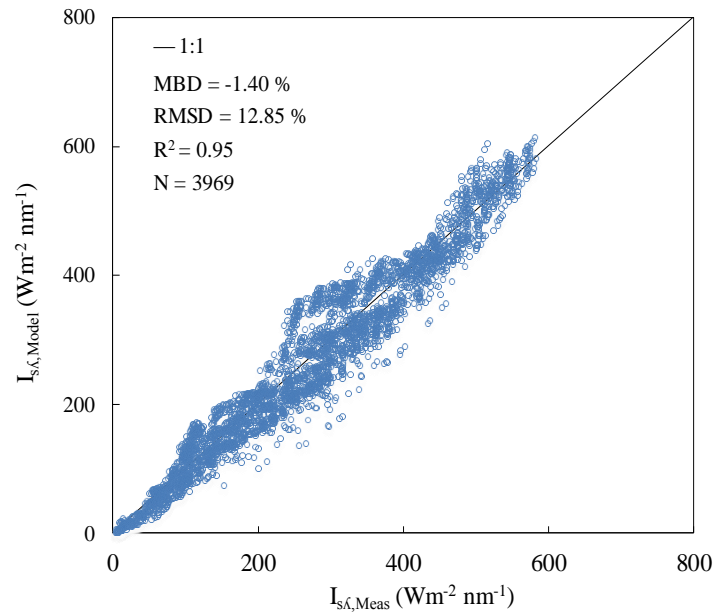
ผลการเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองกับค่าจากการวัดภาคพื้นดิน สามารถสรุปได้แสดงดังรูปที่ 3.62-3.66 และตารางที่ 3.4



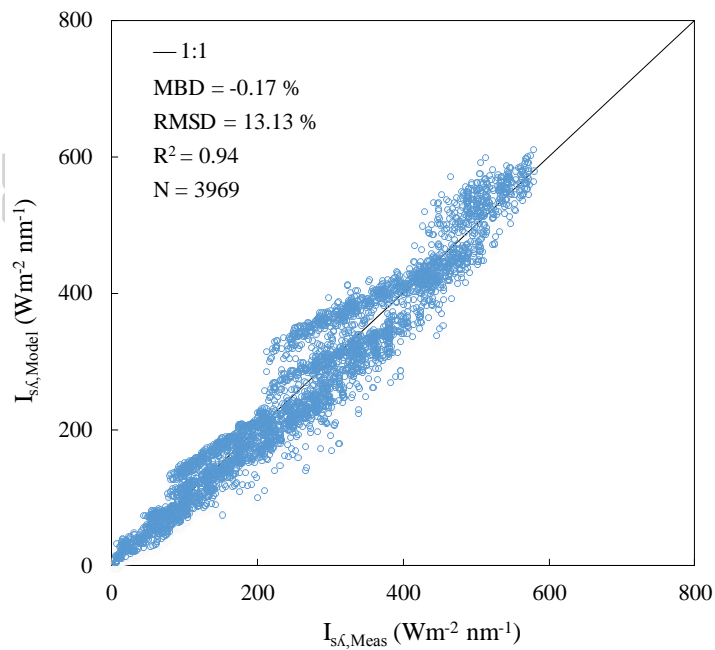
รูปที่ 3.62 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Leckner (1978) ($I_{s\lambda, \text{model}}$) และสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการวัดภาคพื้นดิน ($I_{s\lambda, \text{meas}}$)



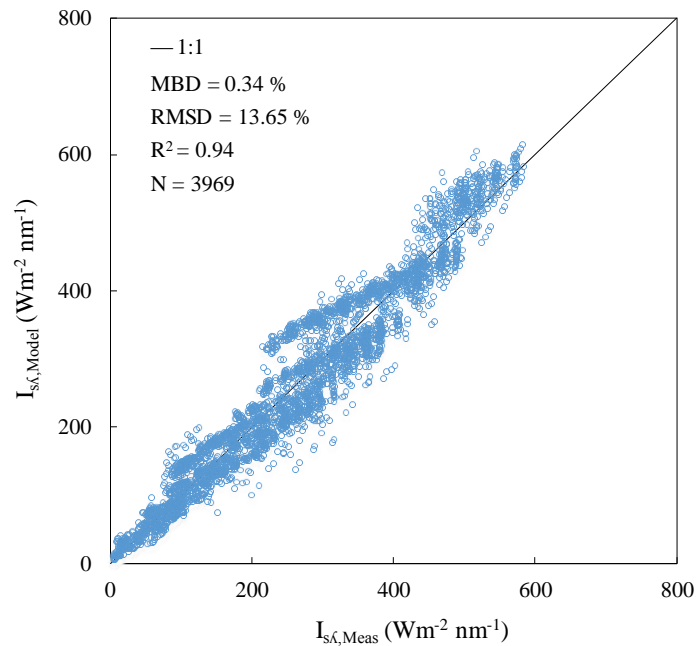
รูปที่ 3.63 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Brine และ Iqbal (1983) ($I_{s\lambda, \text{model}}$) และสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการวัดภาคพื้นดิน ($I_{s\lambda, \text{meas}}$)



รูปที่ 3.64 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Bird (1984) ($I_{s\lambda, model}$) และสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการวัดภาคพื้นดิน ($I_{s\lambda, meas}$)



รูปที่ 3.65 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Bird และ Riordan (1986) ($I_{s\lambda, model}$) และสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการวัดภาคพื้นดิน ($I_{s\lambda, meas}$)



รูปที่ 3.66 การเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองของ Gueymard (2001) ($I_{s\lambda, \text{model}}$) และสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการวัดภาคพื้นดิน ($I_{s\lambda, \text{meas}}$)

ตารางที่ 3.4 แสดงค่า MBD และ RMSD ของการเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองกับค่าสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการวัดภาคพื้นดิน

แบบจำลอง	MBD (%)	RMSD (%)
Leckner (1978)	-21.36	26.58
Brine และ Iqbal (1983)	10.57	18.62
Bird (1984)	-1.40	12.85
Bird และ Riodan (1986)	-0.17	13.13
Gueymard (2001)	0.34	13.65

จากการเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากแบบจำลองกับค่าสเปกตรัมรังสีกระจายรายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือนจากการวัดภาคพื้นดิน ได้ผลสรุปว่าแบบจำลองของ Bird (1984) ให้ผลการเปรียบเทียบกับค่าจากการวัดได้ดีที่สุด โดยมีค่า MBD เท่ากับ -1.40% และ RMSD เท่ากับ 12.85% รองลงมาเป็นแบบจำลองของ Bird และ Riordan (1986) ซึ่งมีค่า MBD เท่ากับ -0.17% และ RMSD เท่ากับ 13.13% ลำดับถัดมาเป็นแบบจำลองของ Gueymard (2001) ซึ่งมีค่า MBD เท่ากับ 0.34% และ RMSD เท่ากับ 13.65%



3.3 การพัฒนาแบบจำลองกึ่งเอมไพริคัลเพื่อคำนวณหาค่าสเปกตรัมรังสีรวมภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ

ในการพัฒนาแบบจำลองผู้วิจัยทำการพัฒนาแบบจำลองกึ่งเอมไพริคัลเพื่อคำนวณหาค่าสเปกตรัมรังสีรวมภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆ และเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้กับข้อมูลจากเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีรวม EKO spectroradiometer ที่จังหวัดเชียงใหม่ นครปฐม และอุบลราชธานี โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.3.1 การเตรียมข้อมูลเพื่อใช้ในการพัฒนาแบบจำลองกึ่งเอมไพริคัล

ในการพัฒนาแบบจำลองกึ่งเอมไพริคัล (semi-empirical model) สำหรับคำนวณหาค่าสเปกตรัมรังสีรวมภายใต้ท้องฟ้าปราศจากเมฆจำเป็นต้องใช้ข้อมูลต่างๆ ได้แก่ ข้อมูลสเปกตรัมรังสีรวมดวงอาทิตย์ (spectral global irradiance) ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ (precipitable water) ปริมาณโอโซน (ozone) ปริมาณฝุ่นละออง (aerosol) มุมของดวงอาทิตย์ (solar zenith angle) ข้อมูลสภาพท้องฟ้า โดยจะใช้เป็นข้อมูลในการสร้างแบบจำลองและการทดสอบแบบจำลองดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 แสดงที่ตั้งของสถานีวัดสเปกตรัมรังสีรวม และช่วงข้อมูลที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองนี้

สถานี	ที่ตั้ง	ตำแหน่ง	ข้อมูลที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง	ข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบแบบจำลอง
สถานีเชียงใหม่	สถานีเรดาร์กรมฝนหลวงและการบินเกษตร (อมก๋อย)	(17.80°N, 98.43°E)	กุมภาพันธ์ 2014 – มิถุนายน 2015	กรกฎาคม 2015 – ธันวาคม 2016
สถานีอุบลราชธานี	ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี	(15.25°N, 104.87°E)	มีนาคม 2016 – สิงหาคม 2016	กันยายน 2016 – ธันวาคม 2016
สถานีนครปฐม	มหาวิทยาลัยศิลปากรจังหวัดนครปฐม	(13.82°N, 100.04°E)	ธันวาคม 2012 – กรกฎาคม 2013	สิงหาคม 2013 – กุมภาพันธ์ 2014

รายละเอียดของข้อมูลแต่ละตัวแปรที่จะนำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองและทดสอบแบบจำลองมีดังนี้

3.3.1.1 ข้อมูลสเปกตรัมรังสีอาทิตย์

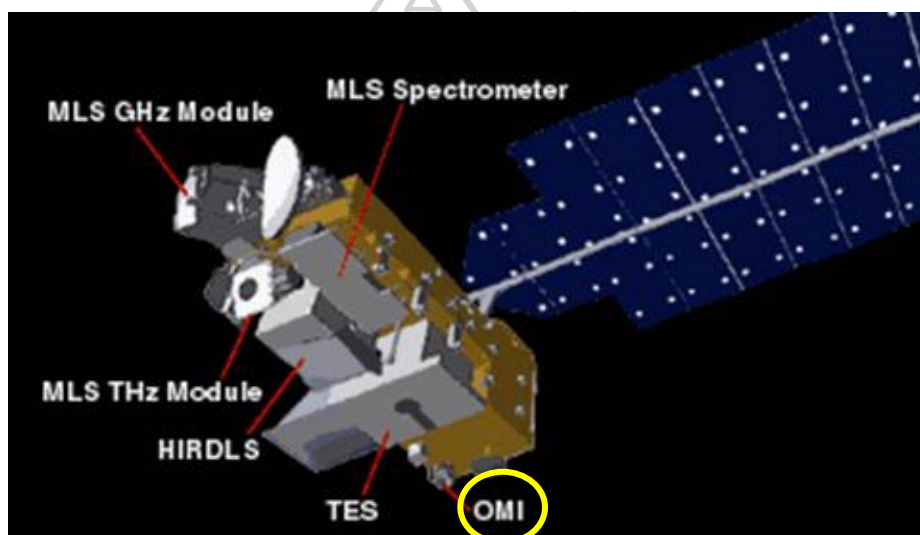
ผู้วิจัยได้ทำการติดตั้งเครื่อง EKO spectroradiometer ได้แก่ สถานีเรดาร์ของกรมฝนหลวงและการบินเกษตร อำเภอมวก้อย จังหวัดเชียงใหม่ (17.80 °N, 98.43 °E) ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี (15.25°N, 104.87 °E) และที่มหาวิทยาลัยศิลปากร อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม (13.82 °N, 100.04 °E) เพื่อทำการวัด และรวบรวมข้อมูลสเปกตรัมรังสีรวม โดยข้อมูลที่นำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองเป็นข้อมูลที่อยู่ในช่วงความยาวคลื่น 350-950 nm ตำแหน่งที่ทำการติดตั้งเครื่อง EKO spectroradiometer ของแต่ละสถานีแสดงดังรูปที่ 3.67



รูปที่ 3.67 แสดงตำแหน่งของสถานีที่ติดตั้งเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีอาทิตย์รวม EKO spectroradiometer

3.3.1.2 ข้อมูลโอโซน

สำหรับการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากการดูดกลืนของโอโซนที่ตำแหน่งของสถานีจังหวัดเชียงใหม่ นครปฐม และอุบลราชธานี ผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมข้อมูลโอโซนจากดาวเทียม OMI/AURA (Ozone Monitoring Instrument) ซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจะใช้ข้อมูลซึ่งวัดในช่วงเดือน ค.ศ. 2012 ถึงเดือนธันวาคม ค.ศ. 2016 มาใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาแบบจำลอง ตัวอย่างดาวเทียม OMI/AURA (Ozone Monitoring Instrument) แสดงดังรูปที่ 3.68 รายละเอียดของข้อมูลโอโซนในวันต่างๆ สามารถหาได้ที่เว็บไซต์ <https://aura.gsfc.nasa.gov/omi.html>



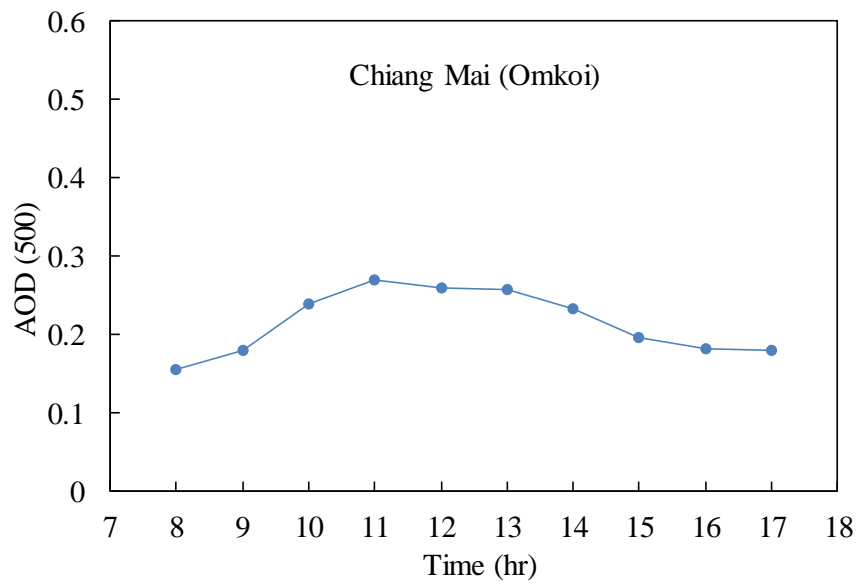
รูปที่ 3.68 ดาวเทียม OMI/AURA (Ozone Monitoring Instrument)

3.3.1.3 ข้อมูลฝุ่นละออง

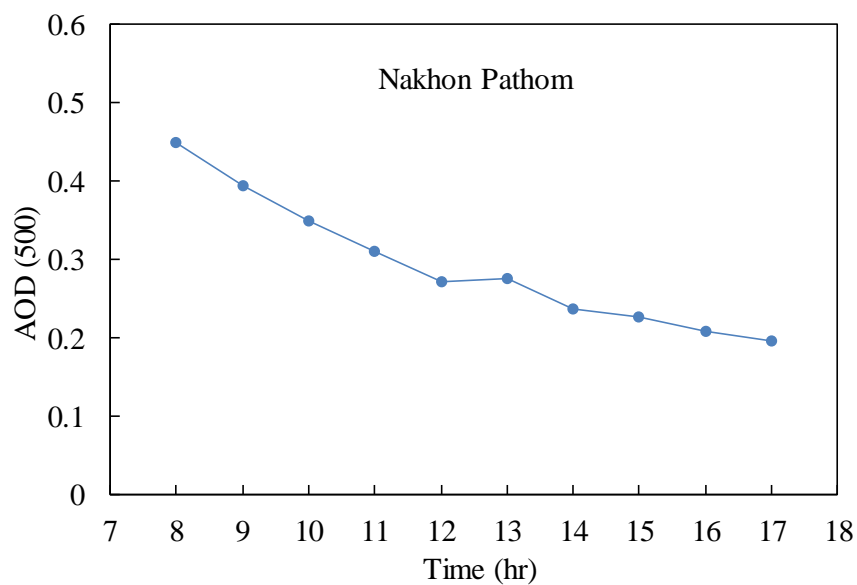
ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากการดูดกลืนฝุ่นละอองผู้วิจัยได้นำข้อมูล aerosol optical depth ที่ความยาวคลื่น 340 380 440 500 675 870 และ 1020 nm จากเครื่อง cimel sunphotometer มาใช้เป็นตัวแปรในการคำนวณ โดยเครื่องวัดดังกล่าวถูกติดตั้งอยู่ที่จังหวัด เชียงใหม่ นครปฐม และอุบลราชธานี ดังรูปที่ 3.69 ผู้วิจัยจะใช้ข้อมูลในช่วงเดือนธันวาคม ค.ศ. 2012 ถึงเดือนธันวาคม ค.ศ. 2016 มาใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาแบบจำลอง ตัวอย่างข้อมูล AOD ในรอบ วันที่ได้จากเครื่อง cimel sunphotometer แต่ละสถานีแสดงได้ดังรูปที่ 3.70-3.72



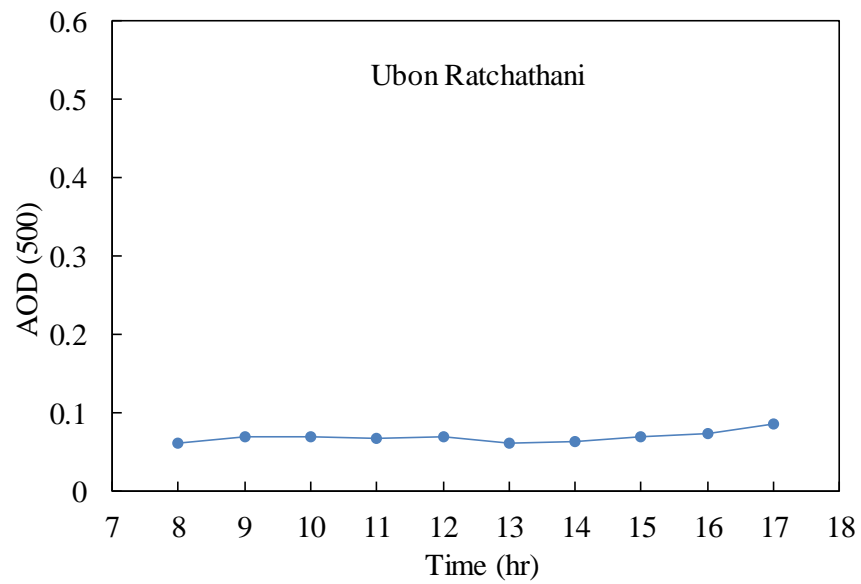
รูปที่ 3.69 เครื่อง cimel sunphotometer ที่ติดตั้งแต่ละสถานี



รูปที่ 3.70 แสดงตัวอย่างข้อมูล AOD ในรอบวันที่ได้จากเครื่อง cimel sunphotometer ที่จังหวัด เชียงใหม่ (อมก๋อย) ในวันที่ 20 พฤศจิกายน ค.ศ. 2016



รูปที่ 3.71 แสดงตัวอย่างข้อมูล AOD ในรอบวันที่ได้จากเครื่อง cimel sunphotometer ที่จังหวัด นครปฐม ในวันที่ 7 ธันวาคม ค.ศ. 2012

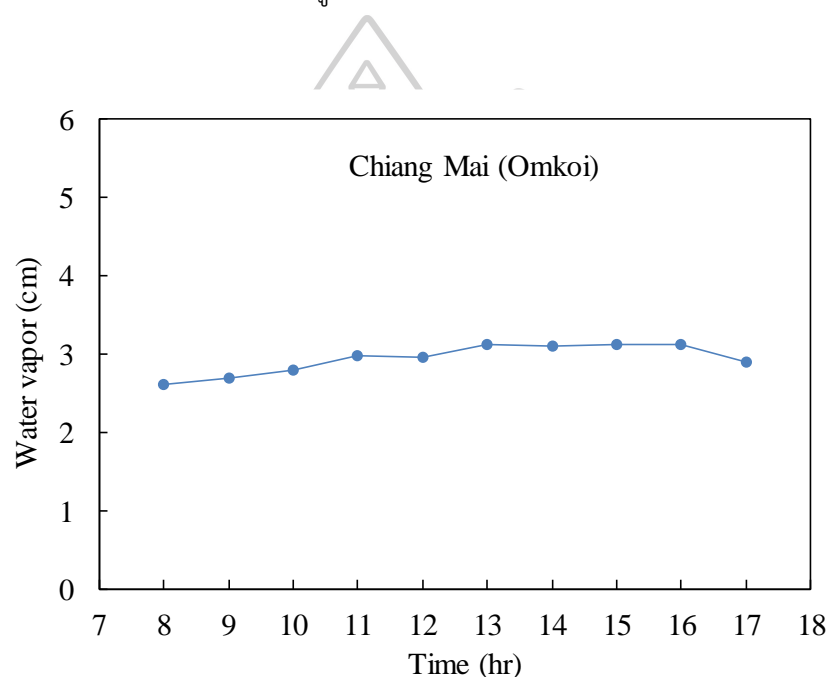


รูปที่ 3.72 แสดงตัวอย่างข้อมูล AOD ในรอบวันที่ได้จากเครื่อง cimel sunphotometer ที่จังหวัดอุบลราชธานี ในวันที่ 20 ธันวาคม ค.ศ. 2016

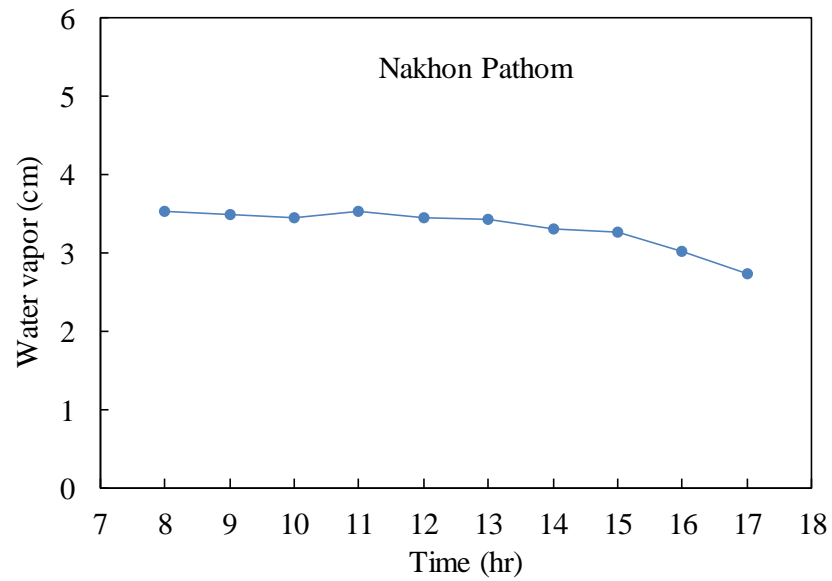


3.3.1.4 ข้อมูลไอน้ำ

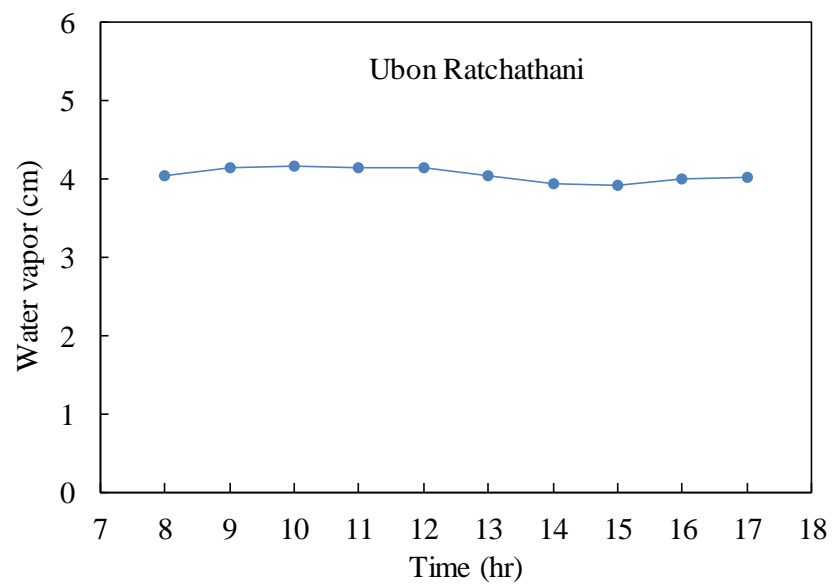
ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์เนื่องจากการดูดกลืนไอน้ำผู้วิจัยได้นำข้อมูล aerosol optical depth ที่ความยาวคลื่น 940 nm มาใช้เป็นตัวแปรในการคำนวณ ผู้วิจัยทำการรวบรวมข้อมูลไอน้ำจากเครื่อง cimel sunphotometer ซึ่งติดตั้งที่จังหวัดเชียงใหม่ นครปฐม และ อุบลราชธานี โดยใช้ข้อมูลในช่วงเดือนธันวาคม ค.ศ. 2012 ถึง เดือนธันวาคม ค.ศ. 2016 มาใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนาแบบจำลอง ตัวอย่างข้อมูลไอน้ำในรอบวันที่ได้จากเครื่อง cimel sunphotometer แต่ละสถานีแสดงได้ดังรูปที่ 3.73-3.75



รูปที่ 3.73 แสดงตัวอย่างข้อมูลไอน้ำในรอบวันที่ได้จากเครื่อง cimel sunphotometer ที่จังหวัด เชียงใหม่ (อมก๋อย) ในวันที่ 20 พฤศจิกายน ค.ศ. 2016



รูปที่ 3.74 แสดงตัวอย่างข้อมูลไอน้ำในรอบวันที่ได้จากเครื่อง cimel sunphotometer ที่จังหวัด นครปฐม ในวันที่ 7 ธันวาคม ค.ศ. 2012



รูปที่ 3.75 แสดงตัวอย่างข้อมูลไอน้ำในรอบวันที่ได้จากเครื่อง cimel sunphotometer ที่จังหวัด อุบลราชธานี ในวันที่ 20 ธันวาคม ค.ศ. 2016

3.3.1.5 ข้อมูลสภาพท้องฟ้า

ผู้วิจัยทำการคัดเลือกข้อมูลวัดเฉพาะในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆ โดยใช้ภาพถ่ายท้องฟ้าที่บันทึกจากกล้องถ่ายภาพท้องฟ้าอัตโนมัติ ซึ่งติดตั้งที่จังหวัดเชียงใหม่ นครปฐม และ อุบลราชธานี แสดงดังรูปที่ 3.76 ข้อมูลดังกล่าวเป็นภาพถ่ายซึ่งบันทึกสภาพท้องฟ้าในช่วงระหว่างเดือนธันวาคม ค.ศ. 2012 ถึง เดือนธันวาคม ค.ศ. 2016



รูปที่ 3.76 เครื่องถ่ายภาพท้องฟ้าซึ่งติดตั้งที่แต่ละสถานี

3.3.2 การพัฒนาแบบจำลอง

ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาแบบจำลองสเปกตรัมรังสีรวมในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆ โดยพิจารณาเทอมของ optical depth เป็นผลรวมของค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ไอน้ำ โอโซน โมเลกุลก๊าซ และฝุ่นละออง ซึ่งแสดงดังสมการที่ (3.3)

$$I_{g\lambda} = I_{0\lambda} \exp \{ -[a_0 k_w w + a_1 k_o O_3 + a_2 k_g + a_3 (\tau'_{a\lambda}) + a_4] m_a + a_5 \} \quad (3.3)$$

เมื่อ

$I_{g\lambda}$ คือ สเปกตรัมรังสีรวมที่พื้นผิวโลก ($W/m^2 - nm$)

$I_{0\lambda}$ คือ สเปกตรัมรังสีตรงจากดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก ($W/m^2 - nm$)

k_w คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีอาทิตย์ของไอน้ำ (-)

k_o คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีอาทิตย์ของโอโซน (-)

k_g คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีอาทิตย์ของก๊าซต่าง ๆ (-)

$\tau'_{a\lambda}$ คือ ความลึกเชิงแสงเนื่องจากฝุ่นละออง (-)

m_a คือ มวลอากาศ (-)

λ คือ ความยาวคลื่น (nm)

k_w , k_o และ k_g เป็นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีอาทิตย์ซึ่งสามารถหาได้จากแบบจำลองของ Iqbal (1983)

a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 และ a_5 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่ความยาวคลื่นต่างๆ ซึ่งได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีการ multiple regression โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัดที่จังหวัดนครปฐม เชียงใหม่ และ อุบลราชธานี ค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าว แสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองในสมการที่ (3.3) ความยาวคลื่น 350-950 nm

λ (nm)	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
350	0	-591	0	0.40	0.46	-0.11
351	0	79612	0	0.27	0.36	-0.24
352	0	97719	0	0.27	0.35	-0.17
353	0	115616	0	0.27	0.35	-0.07
354	0	143929	0	0.27	0.34	-0.22
355	0	170245	0	0.27	0.34	-0.30
356	0	211276	0	0.27	0.34	-0.27
357	0	261123	0	0.27	0.34	-0.15
358	0	347102	0	0.27	0.35	-0.01
359	0	538317	0	0.27	0.36	0.14
360	0	0	0	-0.37	0.44	-0.20
361	0	0	0	0.36	0.45	-0.16
362	0	0	0	0.36	0.44	-0.04
363	0	0	0	0.36	0.44	-0.13
364	0	0	0	0.34	0.44	-0.05
365	0	0	0	0.35	0.44	-0.04
366	0	0	0	0.35	0.44	-0.17
367	0	0	0	0.35	0.44	-0.22
368	0	0	0	0.35	0.44	-0.16
369	0	0	0	0.35	0.44	-0.06
370	0	0	0	0.35	0.44	-0.19
371	0	0	0	0.36	0.44	-0.16
372	0	0	0	0.36	0.44	-0.22
373	0	0	0	0.35	0.44	-0.14
374	0	0	0	0.34	0.44	0.00
375	0	0	0	0.33	0.44	0.06
376	0	0	0	0.32	0.44	-0.06
377	0	0	0	0.32	0.44	-0.04
378	0	0	0	0.32	0.44	-0.21
379	0	0	0	0.34	0.44	-0.28
380	0.00	0.00	0.00	0.34	0.44	-0.10

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

λ (nm)	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
381	0.00	0.00	0.00	0.35	0.43	-0.29
382	0.00	0.00	0.00	0.34	0.43	-0.22
383	0.00	0.00	0.00	0.33	0.43	0.06
384	0.00	0.00	0.00	0.31	0.44	0.23
385	0.00	0.00	0.00	0.32	0.44	-0.10
386	0.00	0.00	0.00	0.30	0.44	-0.11
387	0.00	0.00	0.00	0.30	0.44	-0.08
388	0.00	0.00	0.00	0.30	0.44	-0.04
389	0.00	0.00	0.00	0.30	0.44	0.04
390	0.00	0.00	0.00	0.31	0.44	-0.14
391	0.00	0.00	0.00	0.32	0.43	-0.23
392	0.00	0.00	0.00	0.33	0.43	-0.34
393	0.00	0.00	0.00	0.33	0.43	-0.09
394	0.00	0.00	0.00	0.31	0.43	0.48
395	0.00	0.00	0.00	0.30	0.43	-0.06
396	0.00	0.00	0.00	0.30	0.43	-0.26
397	0.00	0.00	0.00	0.27	0.44	0.28
398	0.00	0.00	0.00	0.27	0.44	0.29
399	0.00	0.00	0.00	0.26	0.44	-0.08
400	0.00	0.00	0.00	0.28	0.44	-0.12
401	0.00	0.00	0.00	0.29	0.44	-0.09
402	0.00	0.00	0.00	0.30	0.43	-0.10
403	0.00	0.00	0.00	0.31	0.43	-0.11
404	0.00	0.00	0.00	0.31	0.43	-0.07
405	0.00	0.00	0.00	0.31	0.43	-0.06
406	0.00	0.00	0.00	0.31	0.43	-0.05
407	0.00	0.00	0.00	0.30	0.43	0.00
408	0.00	0.00	0.00	0.30	0.43	-0.01
409	0.00	0.00	0.00	0.30	0.43	-0.07
410	0.00	0.00	0.00	0.30	0.43	-0.05
411	0.00	0.00	0.00	0.30	0.43	0.08

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

λ (nm)	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
412	0.00	0.00	0.00	0.30	0.43	-0.07
413	0.00	0.00	0.00	0.30	0.43	-0.05
414	0.00	0.00	0.00	0.30	0.43	-0.03
415	0.00	0.00	0.00	0.30	0.43	-0.02
416	0.00	0.00	0.00	0.30	0.43	-0.02
417	0.00	0.00	0.00	0.31	0.43	-0.08
418	0.00	0.00	0.00	0.30	0.43	0.02
419	0.00	0.00	0.00	0.30	0.43	0.01
420	0.00	0.00	0.00	0.30	0.42	0.00
421	0.00	0.00	0.00	0.30	0.42	-0.03
422	0.00	0.00	0.00	0.30	0.42	-0.06
423	0.00	0.00	0.00	0.30	0.42	0.06
424	0.00	0.00	0.00	0.30	0.42	-0.02
425	0.00	0.00	0.00	0.30	0.42	-0.06
426	0.00	0.00	0.00	0.30	0.42	-0.03
427	0.00	0.00	0.00	0.30	0.42	-0.05
428	0.00	0.00	0.00	0.31	0.42	-0.02
429	0.00	0.00	0.00	0.31	0.42	-0.05
430	0.00	0.00	0.00	0.30	0.42	0.02
431	0.00	0.00	0.00	0.29	0.42	0.31
432	0.00	0.00	0.00	0.29	0.42	-0.05
433	0.00	0.00	0.00	0.28	0.42	0.00
434	0.00	0.00	0.00	0.28	0.42	-0.03
435	0.00	0.00	0.00	0.29	0.42	0.03
436	0.00	0.00	0.00	0.29	0.42	0.01
437	0.00	0.00	0.00	0.29	0.42	-0.09
438	0.00	0.00	0.00	0.29	0.42	-0.02
439	0.00	0.00	0.00	0.28	0.42	0.13
440	0.00	0.00	0.00	0.29	0.42	0.00
441	0.00	0.00	0.00	0.28	0.42	0.09
442	0.00	0.00	0.00	0.28	0.42	-0.02

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

λ (nm)	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
443	0.00	0.00	0.00	0.28	0.42	-0.03
444	0.00	301631	0.00	0.22	0.37	0.01
445	0.00	243977	0.00	0.22	0.37	-0.02
446	0.00	186559	0.00	0.22	0.37	0.08
447	0.00	155065	0.00	0.22	0.37	0.06
448	0.00	136097	0.00	0.22	0.37	-0.02
449	0.00	113987	0.00	0.22	0.38	0.05
450	0.00	108133	0.00	0.22	0.37	0.02
451	0.00	100614	0.00	0.22	0.37	-0.03
452	0.00	98235	0.00	0.22	0.36	-0.03
453	0.00	91513	0.00	0.22	0.36	0.05
454	0.00	79033	0.00	0.22	0.37	0.04
455	0.00	71965	0.00	0.22	0.37	0.05
456	0.00	67424	0.00	0.22	0.37	0.02
457	0.00	63649	0.00	0.22	0.37	0.00
458	0.00	61756	0.00	0.22	0.36	-0.01
459	0.00	59024	0.00	0.22	0.36	0.06
460	0.00	53333	0.00	0.22	0.37	0.05
461	0.00	51160	0.00	0.22	0.37	0.04
462	0.00	50605	0.00	0.22	0.36	0.03
463	0.00	49703	0.00	0.22	0.36	0.00
464	0.00	48574	0.00	0.22	0.36	0.02
465	0.00	47512	0.00	0.22	0.36	0.05
466	0.00	44516	0.00	0.22	0.36	0.01
467	0.00	43288	0.00	0.22	0.36	0.07
468	0.00	41058	0.00	0.22	0.36	0.02
469	0.00	38878	0.00	0.22	0.36	0.03
470	0.00	38497	0.00	0.22	0.36	0.03
471	0.00	34916	0.00	0.22	0.36	0.10
472	0.00	33515	0.00	0.22	0.36	0.03
473	0.00	32357	0.00	0.22	0.36	0.03

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

λ (nm)	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
474	0.00	31231	0.00	0.22	0.36	0.05
475	0.00	30057	0.00	0.22	0.36	0.03
476	0.00	27541	0.00	0.22	0.36	0.05
477	0.00	26734	0.00	0.22	0.36	0.08
478	0.00	25004	0.00	0.22	0.37	0.03
479	0.00	23430	0.00	0.22	0.37	0.07
480	0.00	-827	0.00	0.30	0.44	0.13
481	0.00	21864	0.00	0.22	0.36	0.05
482	0.00	20775	0.00	0.22	0.36	0.02
483	0.00	20574	0.00	0.22	0.36	0.03
484	0.00	22781	0.00	0.22	0.35	0.00
485	0.00	20959	0.00	0.21	0.35	0.00
486	0.00	19825	0.00	0.21	0.35	0.06
487	0.00	16409	0.00	0.21	0.36	0.19
488	0.00	14389	0.00	0.21	0.37	0.09
489	0.00	14097	0.00	0.21	0.37	0.05
490	0.00	13733	0.00	0.21	0.37	0.03
491	0.00	14223	0.00	0.21	0.36	0.01
492	0.00	14139	0.00	0.21	0.36	0.07
493	0.00	13115	0.00	0.21	0.36	0.08
494	0.00	12644	0.00	0.21	0.36	0.09
495	0.00	12062	0.00	0.21	0.36	0.01
496	0.00	11855	0.00	0.21	0.36	0.07
497	0.00	11300	0.00	0.21	0.36	0.02
498	0.00	11795	0.00	0.21	0.36	0.01
499	0.00	11186	0.00	0.21	0.36	0.08
500	0.00	10321	0.00	0.21	0.36	0.02
501	0.00	10179	0.00	0.22	0.36	0.07
502	0.00	9434	0.00	0.22	0.36	0.10
503	0.00	8856	0.00	0.22	0.37	0.06
504	0.00	8041	0.00	0.22	0.37	0.05

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

λ (nm)	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
505	0.00	7811	0.00	0.22	0.37	0.08
506	0.00	7364	0.00	0.22	0.37	0.02
507	0.00	7382	0.00	0.22	0.37	0.04
508	0.00	7469	0.00	0.22	0.37	0.06
509	0.00	6884	0.00	0.21	0.37	0.06
510	0.00	6983	0.00	0.21	0.37	0.06
511	0.00	7105	0.00	0.21	0.36	0.04
512	0.00	7291	0.00	0.21	0.36	0.01
513	0.00	7390	0.00	0.21	0.36	0.07
514	0.00	7360	0.00	0.21	0.36	0.06
515	0.00	7983	0.00	0.21	0.35	0.02
516	0.00	7691	0.00	0.21	0.35	-0.01
517	0.00	7601	0.00	0.21	0.35	0.11
518	0.00	6719	0.00	0.21	0.36	0.08
519	0.00	6209	0.00	0.21	0.36	0.14
520	0.00	6042	0.00	0.21	0.36	0.05
521	0.00	5820	0.00	0.21	0.36	0.07
522	0.00	5909	0.00	0.21	0.36	0.04
523	0.00	5886	0.00	0.21	0.36	0.09
524	0.00	5869	0.00	0.21	0.36	0.05
525	0.00	5814	0.00	0.21	0.36	0.01
526	0.00	5851	0.00	0.21	0.36	0.02
527	0.00	5497	0.00	0.21	0.36	0.17
528	0.00	5129	0.00	0.21	0.36	0.10
529	0.00	4787	0.00	0.21	0.36	0.07
530	0.00	4790	0.00	0.21	0.36	0.07
531	0.00	4826	0.00	0.21	0.36	0.05
532	0.00	5001	0.00	0.21	0.36	0.04
533	0.00	4909	0.00	0.21	0.36	0.14
534	0.00	4587	0.00	0.21	0.36	0.07
535	0.00	4428	0.00	0.21	0.36	0.10

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

λ (nm)	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
536	0.00	4272	0.00	0.21	0.36	0.03
537	0.00	4281	0.00	0.21	0.36	0.09
538	0.00	4455	0.00	0.21	0.36	0.07
539	0.00	4139	0.00	0.21	0.36	0.09
540	0.00	4139	0.00	0.21	0.36	0.09
541	0.00	3982	0.00	0.21	0.36	0.13
542	0.00	3883	0.00	0.21	0.36	0.07
543	0.00	3640	0.00	0.21	0.37	0.10
544	0.00	3718	0.00	0.21	0.37	0.07
545	0.00	3721	0.00	0.21	0.36	0.07
546	0.00	3684	0.00	0.21	0.36	0.06
547	0.00	3678	0.00	0.21	0.36	0.08
548	0.00	3656	0.00	0.21	0.36	0.10
549	0.00	3515	0.00	0.21	0.36	0.08
550	0.00	3485	0.00	0.21	0.36	0.07
551	0.00	3460	0.00	0.21	0.36	0.08
552	0.00	3376	0.00	0.21	0.36	0.08
553	0.00	3337	0.00	0.21	0.36	0.09
554	0.00	3251	0.00	0.21	0.36	0.07
555	0.00	3306	0.00	0.21	0.36	0.06
556	0.00	3242	0.00	0.21	0.36	0.05
557	0.00	3129	0.00	0.21	0.36	0.09
558	0.00	3124	0.00	0.20	0.36	0.07
559	0.00	3031	0.00	0.20	0.36	0.10
560	0.00	2846	0.00	0.20	0.36	0.09
561	0.00	2766	0.00	0.20	0.37	0.07
562	0.00	2719	0.00	0.20	0.37	0.08
563	0.00	2704	0.00	0.20	0.37	0.07
564	0.00	2688	0.00	0.20	0.37	0.06
565	0.00	2675	0.00	0.20	0.37	0.06
566	0.00	2589	0.00	0.21	0.37	0.08

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

λ (nm)	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
567	0.00	2589	0.00	0.21	0.37	0.08
568	0.00	2529	0.00	0.21	0.37	0.04
569	0.00	2472	0.00	0.21	0.37	0.08
570	0.00	2422	0.00	0.21	0.38	0.05
571	-5.40	1385	0.00	0.25	0.42	0.12
572	-1.74	1379	0.00	0.25	0.43	0.10
573	-1.03	1401	0.00	0.25	0.43	0.06
574	-0.77	1417	0.00	0.25	0.43	0.07
575	-0.63	1390	0.00	0.25	0.43	0.07
576	-0.56	1381	0.00	0.26	0.43	0.09
577	-0.48	1336	0.00	0.25	0.43	0.08
578	-0.42	1237	0.00	0.25	0.43	0.07
579	-0.38	1193	0.00	0.25	0.43	0.11
580	-0.34	1176	0.00	0.25	0.43	0.09
581	-0.31	1079	0.00	0.25	0.43	0.09
582	-0.28	1087	0.00	0.25	0.43	0.08
583	-0.26	1076	0.00	0.25	0.43	0.06
584	-0.23	1081	0.00	0.25	0.43	0.07
585	-0.19	1133	0.00	0.25	0.42	0.07
586	-0.15	1210	0.00	0.25	0.42	0.10
587	-0.13	1708	0.00	0.26	0.41	0.05
588	-0.10	1733	0.00	0.26	0.41	0.02
589	-0.07	1733	0.00	0.26	0.41	0.07
590	-0.04	1604	0.00	0.26	0.41	0.15
591	-0.02	1471	0.00	0.26	0.41	0.03
592	-0.01	1458	0.00	0.25	0.41	0.05
593	-0.02	1358	0.00	0.25	0.41	0.04
594	-0.04	1385	0.00	0.25	0.42	0.05
595	-0.06	1287	0.00	0.26	0.42	0.07
596	-0.08	984	0.00	0.25	0.43	0.07
597	-0.10	924	0.00	0.25	0.43	0.06

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

λ (nm)	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
598	-0.13	874	0.00	0.26	0.43	0.07
599	-0.18	735	0.00	0.25	0.44	0.08
600	-0.23	711	0.00	0.26	0.44	0.07
601	-0.28	689	0.00	0.26	0.44	0.09
602	-0.34	483	0.00	0.26	0.44	0.09
603	-0.40	508	0.00	0.26	0.44	0.11
604	-0.48	477	0.00	0.26	0.44	0.07
605	-0.58	539	0.00	0.26	0.44	0.07
606	-0.74	512	0.00	0.26	0.44	0.08
607	-0.95	579	0.00	0.26	0.44	0.08
608	-1.35	553	0.00	0.26	0.44	0.07
609	-2.29	495	0.00	0.26	0.44	0.08
610	-6.98	486	0.00	0.26	0.44	0.07
611	0.00	2022	0.00	0.19	0.37	0.07
612	0.00	2063	0.00	0.19	0.37	0.04
613	0.00	2120	0.00	0.19	0.37	0.06
614	0.00	2150	0.00	0.19	0.36	0.06
615	0.00	2183	0.00	0.19	0.36	0.04
616	0.00	2179	0.00	0.19	0.36	0.04
617	0.00	2210	0.00	0.18	0.36	0.10
618	0.00	2118	0.00	0.19	0.37	0.05
619	0.00	2165	0.00	0.18	0.37	0.04
620	0.00	2251	0.00	0.18	0.36	0.05
621	0.00	2322	0.00	0.18	0.36	0.03
622	0.00	2370	0.00	0.18	0.36	0.05
623	0.00	2317	0.00	0.19	0.37	0.03
624	0.00	2453	0.00	0.19	0.37	0.05
625	0.00	2447	0.00	0.19	0.37	0.06
626	0.00	2477	0.00	0.19	0.37	0.07
627	0.00	2636	0.00	0.19	0.37	0.03
628	0.00	2630	0.00	0.19	0.37	0.03

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

λ (nm)	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
629	0.00	2498	0.00	0.19	0.38	0.03
630	0.00	2363	0.00	0.19	0.38	0.04
631	0.00	2464	0.00	0.19	0.38	0.05
632	0.00	2536	0.00	0.19	0.37	0.05
633	0.00	2531	0.00	0.19	0.37	0.04
634	0.00	2551	0.00	0.18	0.37	0.05
635	0.00	2579	0.00	0.18	0.37	0.05
636	0.00	2514	0.00	0.19	0.37	0.07
637	0.00	2611	0.00	0.18	0.37	0.07
638	0.00	2673	0.00	0.18	0.37	0.06
639	0.00	2832	0.00	0.18	0.36	0.07
640	0.00	2948	0.00	0.18	0.36	0.09
641	0.00	2929	0.00	0.18	0.36	0.06
642	0.00	2918	0.00	0.18	0.36	0.06
643	0.00	2829	0.00	0.19	0.37	0.11
644	0.00	2811	0.00	0.19	0.37	0.20
645	0.00	3453	0.00	0.20	0.37	0.08
646	0.00	3406	0.00	0.21	0.37	0.06
647	0.00	3429	0.00	0.21	0.37	0.07
648	0.00	3312	0.00	0.21	0.38	0.06
649	0.00	3126	0.00	0.21	0.38	0.08
650	-11.13	454	0.00	0.26	0.44	0.09
651	-4.77	290	0.00	0.27	0.44	0.11
652	-3.12	660	0.00	0.26	0.43	0.10
653	-2.48	864	0.00	0.27	0.43	0.09
654	-2.08	817	0.00	0.27	0.44	0.08
655	-1.98	715	0.00	0.28	0.44	0.06
656	-1.76	232	0.00	0.28	0.44	0.06
657	-1.56	-197	0.00	0.28	0.45	0.08
658	-1.30	-1437	0.00	0.27	0.45	0.11
659	-1.20	-1079	0.00	0.27	0.45	0.12

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

λ (nm)	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
660	-1.17	-853	0.00	0.27	0.45	0.13
661	-1.19	-995	0.00	0.27	0.45	0.15
662	-1.23	-957	0.00	0.27	0.45	0.15
663	-1.28	-704	0.00	0.27	0.44	0.16
664	-1.30	-796	0.00	0.27	0.44	0.17
665	-1.31	-885	0.00	0.27	0.44	0.17
666	-1.32	-817	0.00	0.26	0.44	0.19
667	-1.33	-1067	0.00	0.26	0.44	0.19
668	-1.37	-1142	0.00	0.26	0.44	0.17
669	-1.38	-1206	0.00	0.26	0.44	0.17
670	-1.43	-1459	0.00	0.26	0.44	0.18
671	-0.08	-1459	0.00	0.26	0.44	0.18
672	-0.03	-1529	0.00	0.26	0.44	0.18
673	-0.02	-1462	0.00	0.26	0.44	0.19
674	-0.01	-1578	0.00	0.26	0.44	0.19
675	-0.01	-2035	0.00	0.26	0.44	0.22
676	-0.01	-2113	0.00	0.26	0.44	0.21
677	-0.01	-2505	0.00	0.26	0.44	0.20
678	-0.01	-2607	0.00	0.27	0.44	0.19
679	-0.01	-2457	0.00	0.27	0.44	0.19
680	-0.01	-2539	0.00	0.27	0.44	0.21
681	-0.01	-2867	0.00	0.27	0.44	0.20
682	-0.02	-3515	0.00	0.27	0.44	0.20
683	-0.03	-848	0.00	0.27	0.44	0.20
684	-0.04	507	0.00	0.27	0.44	0.18
685	-0.10	1586	0.00	0.28	0.45	0.18
686	-0.43	8498	0.00	0.29	0.45	0.16
687	-0.52	6308	0.00	0.29	0.46	0.12
688	-0.62	2313	0.00	0.28	0.47	0.12
689	-0.73	-1335	0.00	0.28	0.47	0.12
690	-0.95	-2531	0.00	0.27	0.47	0.14

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

λ (nm)	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
691	-1.87	-462	0.00	0.27	0.46	0.15
692	-19.69	1370	0.00	0.28	0.45	0.15
693	-31.04	1257	0.00	0.29	0.45	0.16
694	-81.42	-222	0.00	0.29	0.45	0.16
695	-193.05	-2036	0.37	0.28	0.00	0.18
696	-437.00	-7936	0.16	0.28	0.00	0.18
697	0.00	20099	0.10	0.22	0.00	0.16
698	0.00	25935	0.17	0.22	0.00	0.17
699	0.00	33568	0.00	0.22	0.37	0.20
700	-195.34	-3115	0.00	0.29	0.45	0.20
701	-82.29	-7522	0.00	0.29	0.45	0.20
702	-53.32	-13653	0.00	0.29	0.45	0.20
703	-40.81	-33602	0.00	0.29	0.45	0.22
704	-34.07	-57104	0.00	0.29	0.45	0.22
705	-26.74	0.00	0.00	0.28	0.44	0.22
706	-6.42	0.00	0.00	0.27	0.44	0.23
707	-2.68	0.00	0.00	0.27	0.44	0.24
708	-1.65	0.00	0.00	0.26	0.44	0.24
709	-1.18	0.00	0.00	0.26	0.44	0.24
710	-0.91	0.00	0.00	0.25	0.43	0.23
711	-0.66	0.00	0.00	0.23	0.43	0.24
712	-0.50	0.00	0.00	0.22	0.43	0.25
713	-0.38	0.00	0.00	0.22	0.43	0.24
714	-0.27	0.00	0.00	0.23	0.43	0.21
715	-0.16	0.00	0.00	0.23	0.43	0.19
716	-0.07	0.00	0.00	0.31	0.45	0.13
717	-0.02	0.00	0.00	0.33	0.45	0.10
718	0.00	0.00	0.00	0.33	0.45	0.09
719	0.00	0.00	0.00	0.31	0.44	0.08
720	0.01	0.00	0.00	0.29	0.43	0.11
721	0.01	0.00	0.00	0.27	0.42	0.10

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

λ (nm)	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
722	0.01	0.00	0.00	0.28	0.43	0.11
723	0.00	0.00	0.00	0.30	0.43	0.11
724	0.00	0.00	0.00	0.32	0.44	0.11
725	0.00	0.00	0.00	0.31	0.43	0.14
726	0.00	0.00	0.00	0.30	0.43	0.12
727	0.00	0.00	0.00	0.30	0.43	0.13
728	0.00	0.00	0.00	0.30	0.43	0.13
729	0.00	0.00	0.00	0.29	0.43	0.14
730	0.00	0.00	0.00	0.28	0.43	0.15
731	0.00	0.00	0.00	0.28	0.43	0.18
732	-0.01	0.00	0.00	0.28	0.44	0.21
733	-0.01	0.00	0.00	0.26	0.43	0.24
734	-0.02	0.00	0.00	0.26	0.43	0.25
735	-0.04	0.00	0.00	0.27	0.43	0.26
736	-0.06	0.00	0.00	0.27	0.43	0.27
737	-0.09	0.00	0.00	0.26	0.43	0.28
738	-0.10	0.00	0.00	0.26	0.43	0.29
739	-0.13	0.00	0.00	0.25	0.43	0.29
740	-0.17	0.00	0.00	0.25	0.43	0.29
741	-0.22	0.00	0.00	0.25	0.43	0.35
742	-0.28	0.00	0.00	0.24	0.43	0.33
743	-0.41	0.00	0.00	0.25	0.43	0.46
744	-0.65	0.00	0.00	0.25	0.43	0.35
745	-1.34	0.00	0.00	0.25	0.43	0.32
746	-5.38	0.00	0.00	0.25	0.43	0.33
747	-81.76	0.00	0.00	0.25	0.43	0.33
748	-41.18	0.00	0.00	0.25	0.43	0.32
749	-27.50	0.00	0.00	0.25	0.43	0.44
750	-21.01	0.00	0.00	0.24	0.43	0.38
751	-16.78	0.00	0.00	0.25	0.43	0.34
752	-13.92	0.00	0.00	0.24	0.43	0.33

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

λ (nm)	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
753	-11.66	0.00	0.00	0.24	0.43	0.34
754	-10.13	0.00	0.00	0.24	0.43	0.35
755	-8.44	0.00	0.00	0.24	0.42	0.33
756	-0.15	0.00	0.00	0.27	0.43	0.32
757	-0.04	0.00	0.00	0.28	0.43	0.25
758	-0.02	0.00	0.00	0.28	0.44	0.14
759	-0.02	0.00	0.00	0.41	0.51	0.01
760	-0.02	0.00	0.00	0.42	0.54	-0.10
761	-0.01	0.00	0.00	0.38	0.55	-0.17
762	-0.01	0.00	0.00	0.32	0.56	-0.11
763	0.00	0.00	0.00	0.27	0.54	-0.06
764	0.00	0.00	0.00	0.26	0.53	0.00
765	0.00	0.00	0.00	0.27	0.52	0.07
766	0.00	0.00	0.00	0.21	0.47	0.19
767	0.00	0.00	0.00	0.23	0.46	0.26
768	0.00	0.00	0.00	0.25	0.46	0.27
769	0.00	0.00	0.00	0.23	0.44	0.32
770	0.00	0.00	0.00	0.24	0.44	0.35
771	0.00	0.00	0.00	0.25	0.44	0.37
772	0.00	0.00	0.00	0.25	0.44	0.37
773	0.00	0.00	0.00	0.24	0.43	0.36
774	0.00	0.00	0.00	0.24	0.43	0.37
775	0.00	0.00	0.00	0.24	0.43	0.37
776	0.00	0.00	0.00	0.25	0.43	0.38
777	0.00	0.00	0.00	0.24	0.43	0.41
778	0.00	0.00	0.00	0.24	0.43	0.41
779	0.00	0.00	0.00	0.24	0.43	0.40
780	0.00	0.00	0.00	0.24	0.43	0.38
781	0.00	0.00	0.00	0.24	0.43	0.40
782	0.00	0.00	0.00	0.24	0.42	0.40
783	0.00	0.00	0.00	0.24	0.42	0.40

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

λ (nm)	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
784	0.00	0.00	0.00	0.24	0.42	0.41
785	0.00	0.00	0.00	0.24	0.42	0.40
786	0.00	0.00	0.00	0.26	0.43	0.41
787	0.00	0.00	0.00	0.26	0.43	0.42
788	0.00	0.00	0.00	0.27	0.43	0.40
789	0.00	0.00	0.00	0.27	0.43	0.39
790	0.00	0.00	0.00	0.26	0.43	0.38
791	0.00	0.00	0.00	0.26	0.43	0.38
792	0.00	0.00	0.00	0.25	0.43	0.38
793	0.00	0.00	0.00	0.25	0.43	0.41
794	0.00	0.00	0.00	0.25	0.43	0.40
795	0.00	0.00	0.00	0.25	0.43	0.39
796	0.00	0.00	0.00	0.25	0.43	0.40
797	0.00	0.00	0.00	0.25	0.43	0.41
798	0.00	0.00	0.00	0.25	0.43	0.41
799	0.00	0.00	0.00	0.25	0.43	0.42
800	0.00	0.00	0.00	0.25	0.43	0.41
801	0.00	0.00	0.00	0.25	0.43	0.41
802	0.00	0.00	0.00	0.25	0.43	0.41
803	0.00	0.00	0.00	0.25	0.43	0.43
804	-0.01	0.00	0.00	0.24	0.43	0.42
805	-0.01	0.00	0.00	0.24	0.43	0.43
806	-0.01	0.00	0.00	0.24	0.43	0.43
807	-0.01	0.00	0.00	0.25	0.43	0.42
808	-0.01	0.00	0.00	0.26	0.43	0.43
809	-0.01	0.00	0.00	0.26	0.43	0.42
810	-0.02	0.00	0.00	0.29	0.43	0.41
811	-0.02	0.00	0.00	0.29	0.43	0.39
812	-0.02	0.00	0.00	0.29	0.43	0.36
813	0.00	0.00	0.00	0.28	0.42	0.33
814	0.00	0.00	0.00	0.32	0.44	0.28

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

λ (nm)	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
815	0.05	0.00	0.00	0.31	0.43	0.26
816	0.07	0.00	0.00	0.31	0.43	0.26
817	0.11	0.00	0.00	0.28	0.43	0.26
818	0.12	0.00	0.00	0.26	0.42	0.29
819	0.09	0.00	0.00	0.27	0.42	0.31
820	0.08	0.00	0.00	0.27	0.42	0.28
821	0.06	0.00	0.00	0.28	0.43	0.29
822	0.01	0.00	0.00	0.28	0.44	0.30
823	-0.03	0.00	0.00	0.29	0.44	0.31
824	0.03	0.00	0.00	0.26	0.43	0.34
825	0.04	0.00	0.00	0.25	0.43	0.35
826	0.01	0.00	0.00	0.27	0.42	0.35
827	-0.05	0.00	0.00	0.28	0.43	0.37
828	-0.08	0.00	0.00	0.27	0.43	0.36
829	-0.04	0.00	0.00	0.27	0.43	0.38
830	-0.10	0.00	0.00	0.27	0.43	0.38
831	-0.15	0.00	0.00	0.26	0.43	0.39
832	-0.29	0.00	0.00	0.26	0.43	0.39
833	-0.47	0.00	0.00	0.26	0.43	0.40
834	-0.86	0.00	0.00	0.26	0.43	0.41
835	-1.49	0.00	0.00	0.24	0.42	0.44
836	-3.63	0.00	0.00	0.25	0.43	0.46
837	-20.67	0.00	0.00	0.25	0.43	0.47
838	-96.78	0.00	0.00	0.24	0.43	0.48
839	-69.98	0.00	0.00	0.24	0.43	0.50
840	-55.83	0.00	0.00	0.24	0.43	0.49
841	-48.92	0.00	0.00	0.24	0.43	0.50
842	-40.71	0.00	0.00	0.23	0.43	0.51
843	-35.80	0.00	0.00	0.24	0.42	0.52
844	-35.97	0.00	0.00	0.24	0.43	0.51
845	-33.05	0.00	0.00	0.23	0.43	0.53

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

λ (nm)	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
846	-31.92	0.00	0.00	0.24	0.43	0.52
847	-28.06	0.00	0.00	0.24	0.43	0.51
848	-26.75	0.00	0.00	0.24	0.43	0.50
849	-25.46	0.00	0.00	0.24	0.43	0.51
850	-0.77	0.00	0.00	0.24	0.43	0.51
851	-0.16	0.00	0.00	0.24	0.43	0.51
852	-0.09	0.00	0.00	0.24	0.43	0.48
853	-0.05	0.00	0.00	0.24	0.43	0.47
854	-0.03	0.00	0.00	0.23	0.43	0.47
855	-0.03	0.00	0.00	0.23	0.43	0.48
856	-0.02	0.00	0.00	0.22	0.42	0.51
857	-0.02	0.00	0.00	0.23	0.43	0.54
858	-0.01	0.00	0.00	0.24	0.43	0.54
859	-0.01	0.00	0.00	0.23	0.43	0.53
860	-0.01	0.00	0.00	0.22	0.43	0.54
861	-0.01	0.00	0.00	0.22	0.43	0.52
862	-0.01	0.00	0.00	0.22	0.43	0.53
863	-0.01	0.00	0.00	0.23	0.43	0.57
864	-0.01	0.00	0.00	0.23	0.43	0.53
865	-0.01	0.00	0.00	0.23	0.43	0.52
866	0.00	0.00	0.00	0.23	0.43	0.50
867	0.00	0.00	0.00	0.22	0.43	0.52
868	0.00	0.00	0.00	0.22	0.42	0.52
869	0.00	0.00	0.00	0.22	0.42	0.53
870	0.00	0.00	0.00	0.23	0.43	0.55
871	0.00	0.00	0.00	0.23	0.43	0.55
872	0.00	0.00	0.00	0.23	0.43	0.56
873	0.00	0.00	0.00	0.22	0.43	0.55
874	0.00	0.00	0.00	0.23	0.42	0.55
875	0.00	0.00	0.00	0.22	0.43	0.55
876	0.00	0.00	0.00	0.22	0.43	0.57

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

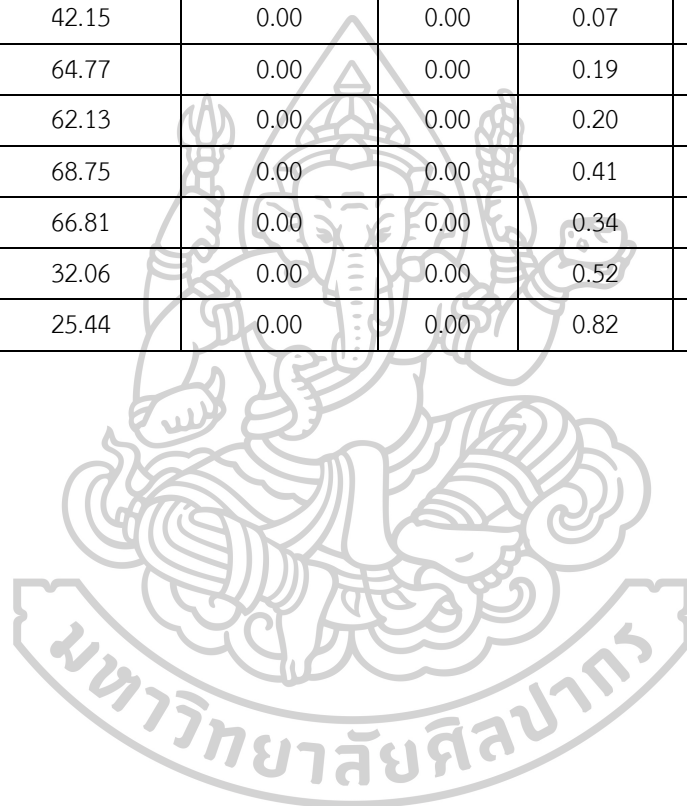
λ (nm)	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
877	0.00	0.00	0.00	0.22	0.43	0.55
878	0.00	0.00	0.00	0.23	0.43	0.56
879	0.00	0.00	0.00	0.23	0.44	0.58
880	0.00	0.00	0.00	0.22	0.43	0.57
881	0.00	0.00	0.00	0.22	0.43	0.57
882	0.00	0.00	0.00	0.22	0.43	0.56
883	0.00	0.00	0.00	0.22	0.42	0.56
884	0.00	0.00	0.00	0.23	0.43	0.58
885	0.00	0.00	0.00	0.23	0.43	0.58
886	0.00	0.00	0.00	0.23	0.43	0.58
887	0.00	0.00	0.00	0.22	0.43	0.58
888	0.00	0.00	0.00	0.22	0.43	0.58
889	0.00	0.00	0.00	0.23	0.43	0.57
890	0.00	0.00	0.00	0.23	0.42	0.57
891	0.00	0.00	0.00	0.24	0.43	0.57
892	0.00	0.00	0.00	0.29	0.44	0.55
893	0.00	0.00	0.00	0.30	0.44	0.53
894	0.00	0.00	0.00	0.29	0.44	0.48
895	0.00	0.00	0.00	0.29	0.44	0.44
896	0.00	0.00	0.00	0.32	0.43	0.41
897	0.00	0.00	0.00	0.29	0.42	0.36
898	0.00	0.00	0.00	0.30	0.43	0.36
899	0.00	0.00	0.00	0.29	0.45	0.36
900	0.00	0.00	0.00	0.28	0.44	0.35
901	0.00	0.00	0.00	0.26	0.44	0.37
902	0.00	0.00	0.00	0.24	0.41	0.37
903	0.00	0.00	0.00	0.23	0.41	0.42
904	0.00	0.00	0.00	0.24	0.42	0.45
905	0.00	0.00	0.00	0.29	0.42	0.43
906	0.00	0.00	0.00	0.31	0.45	0.43
907	0.00	0.00	0.00	0.33	0.44	0.37

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

λ (nm)	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
908	0.00	0.00	0.00	0.30	0.44	0.38
909	0.00	0.00	0.00	0.30	0.44	0.35
910	0.01	0.00	0.00	0.28	0.40	0.33
911	0.01	0.00	0.00	0.28	0.41	0.33
912	0.01	0.00	0.00	0.31	0.43	0.35
913	0.01	0.00	0.00	0.32	0.46	0.37
914	0.01	0.00	0.00	0.34	0.45	0.34
915	0.01	0.00	0.00	0.29	0.43	0.36
916	0.01	0.00	0.00	0.27	0.42	0.35
917	0.01	0.00	0.00	0.27	0.41	0.38
918	0.01	0.00	0.00	0.23	0.43	0.46
919	0.01	0.00	0.00	0.24	0.41	0.43
920	0.01	0.00	0.00	0.26	0.45	0.50
921	0.00	0.00	0.00	0.29	0.45	0.50
922	0.01	0.00	0.00	0.28	0.42	0.44
923	0.01	0.00	0.00	0.26	0.42	0.45
924	0.02	0.00	0.00	0.25	0.40	0.43
925	0.02	0.00	0.00	0.33	0.42	0.42
926	0.02	0.00	0.00	0.33	0.42	0.37
927	0.02	0.00	0.00	0.38	0.48	0.36
928	0.04	0.00	0.00	0.39	0.43	0.26
929	0.04	0.00	0.00	0.51	0.46	0.08
930	0.09	0.00	0.00	0.47	0.39	-0.05
931	0.16	0.00	0.00	0.46	0.30	-0.28
932	0.21	0.00	0.00	0.49	0.31	-0.49
933	0.42	0.00	0.00	0.65	0.00	-1.10
934	0.73	0.00	0.00	0.29	0.06	-0.98
935	1.32	0.00	0.00	0.60	0.02	-1.01
936	1.82	0.00	0.00	0.42	0.27	-0.65
937	7.87	0.00	0.00	-0.08	0.27	-0.66
938	68.71	0.00	0.00	0.39	0.18	-0.37

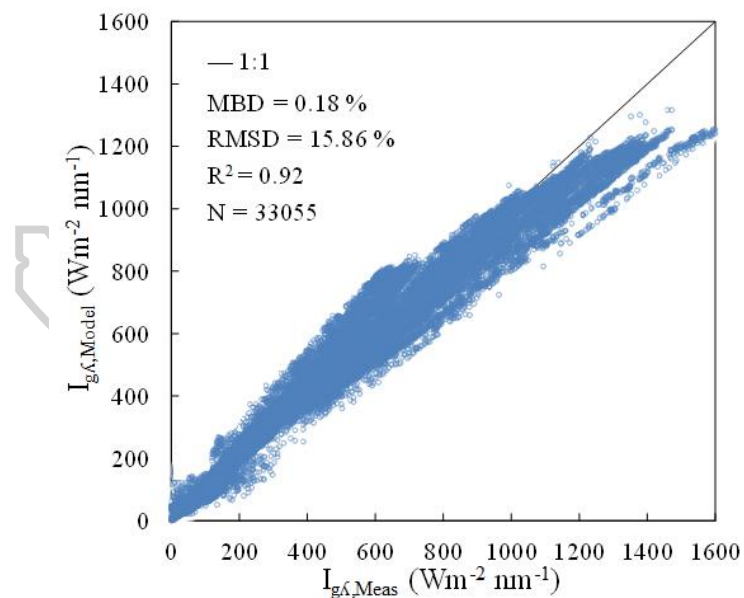
ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

λ (nm)	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
939	63.92	0.00	0.00	0.31	0.29	-0.19
940	72.90	0.00	0.00	0.26	0.07	-0.62
941	74.32	0.00	0.00	0.29	0.07	-0.57
942	37.77	0.00	0.00	0.65	0.55	0.02
943	61.20	0.00	0.00	0.24	0.18	-0.54
944	42.15	0.00	0.00	0.07	0.58	-0.03
945	64.77	0.00	0.00	0.19	0.39	-0.01
946	62.13	0.00	0.00	0.20	0.33	-0.24
947	68.75	0.00	0.00	0.41	0.10	-0.57
948	66.81	0.00	0.00	0.34	0.11	-0.55
949	32.06	0.00	0.00	0.52	0.59	0.04
950	25.44	0.00	0.00	0.82	0.46	0.00



3.3.3 การทดสอบแบบจำลอง

ในการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองสำหรับคำนวณหาค่าสเปกตรัมรังสีรวมดวงอาทิตย์ในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆ ผู้วิจัยจะใช้ข้อมูลสเปกตรัมรังสีรวมจากสถานีเรดาร์ของกรมฝนหลวงและการบินเกษตร อำเภอมวกก่อ จังหวัดเชียงใหม่ ระหว่างเดือน กรกฎาคม ค.ศ. 2015 ถึง ธันวาคม ค.ศ. 2016 ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือจังหวัดอุบลราชธานี ระหว่างเดือน กันยายน ค.ศ. 2016 ถึง ธันวาคม ค.ศ. 2016 และมหาวิทยาลัยศิลปากรจังหวัดนครปฐม ระหว่างเดือน สิงหาคม ค.ศ. 2013 ถึง กุมภาพันธ์ ค.ศ. 2014 มาเป็นข้อมูลที่ใช้ในการเปรียบเทียบกับแบบจำลอง ทั้งนี้ข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลที่มีได้นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลอง โดยผู้วิจัยจะนำค่าโอโซน ผุนละออง และไอน้ำ ที่เวลาเดียวกันไปแทนในสมการที่ (3.3) ทำให้ได้ค่าสเปกตรัมรังสีรวมในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆ หลังจากนั้นนำค่าดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัด ในรูปของ MBD และ ค่า RMSD ผลการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 3.77

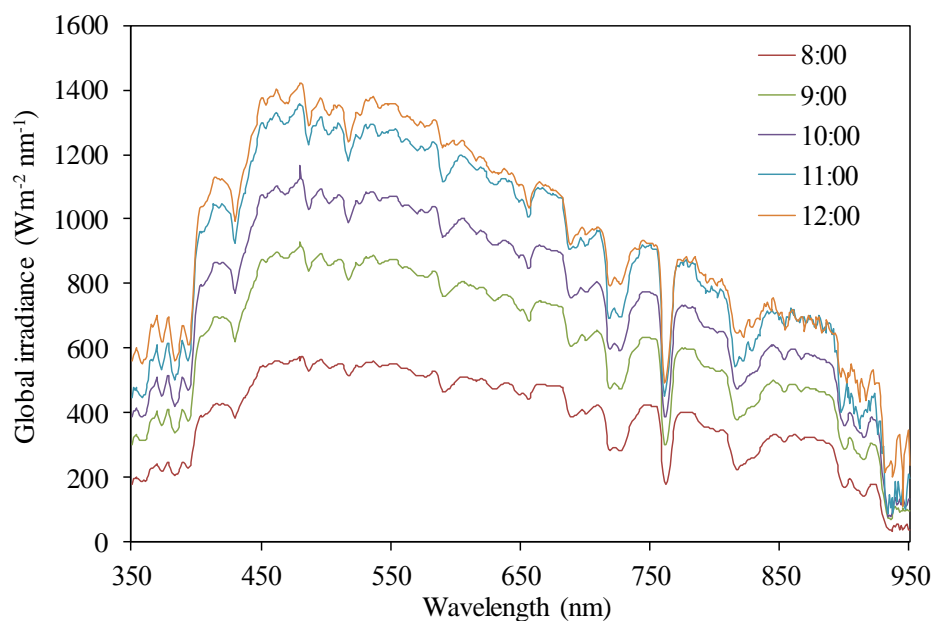


รูปที่ 3.77 การเปรียบเทียบสเปกตรัมรังสีรวมจากแบบจำลองกึ่งเอมไพริคัลกับข้อมูลสเปกตรัมรังสีรวมที่ได้จากเครื่องวัด EKO spectroradiometer

จากการเปรียบเทียบค่าสเปกตรัมรังสีอาทิตย์รวมที่คำนวณได้จากแบบจำลองกับข้อมูลที่ได้จากเครื่องวัดสเปกตรัมรังสีรวม EKO spectroradiometer พบว่าผลที่ได้มีค่า RMSD เท่ากับ 15.86% และ MBD มีค่าเป็น 0.18% ซึ่งให้ความสอดคล้องที่ดี สำหรับการเปรียบเทียบค่า RMSD และ MBD ของสเปกตรัมรังสีรวมจากแบบจำลองกึ่งเอมไพริคัลในแต่ละเวลา ระหว่าง 8:00-16:00 น. ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 3.7 ทั้งนี้พบว่าค่า RMSD และ MBD จะมีค่าสูงในช่วงเช้าและเย็นและจะมีค่าน้อยในช่วงเวลากลางวัน ซึ่งที่เวลา 12:00 น. ให้ค่า MBD และค่า RMSD ที่ดีที่สุด เป็น 0.07% และ 4.18% ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนั้นเพราะในช่วงเวลาเช้าและเย็นรังสีอาทิตย์จะเคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศด้วยระยะทางที่ยาวกว่าตอนเที่ยงวัน ส่งผลให้การคำนวณ optical depth ในแต่ละองค์ประกอบของบรรยากาศมีความคลาดเคลื่อนสะสม

ผู้วิจัยได้นำแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมาคำนวณหาค่าสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ที่เวลาต่างๆ สำหรับข้อมูลสเปกตรัมรังสีรวมเฉลี่ยรายชั่วโมงจากแบบจำลองกึ่งเอมไพริคัลที่พัฒนาขึ้น แสดงดังตัวอย่างในรูปที่ 3.78 จากรูปพบว่าค่าของสเปกตรัมรังสีรวมในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 450-550 nm ซึ่งอยู่ในช่วงของความยาวคลื่นที่ตอบสนองต่อสายตามนุษย์จะมีค่าสูงกว่าสเปกตรัมในช่วง UV และ NIR สำหรับสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่น NIR ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 700-950 nm พบว่ามีการดูดกลืนส่วนมากโดยไอน้ำที่เฉพาะบางความยาวคลื่น





รูปที่ 3.78 สเปกตรัมรังสีรวมเฉลี่ยรายชั่วโมงจากแบบจำลองกึ่งเอมไพริคัลที่ความยาวคลื่นต่างๆ

ตารางที่ 3.7 เปรียบเทียบค่า RMSD และ MBD ของสเปกตรัมรังสีรวมจากแบบจำลองกึ่งเอมไพริคัลในแต่ละเวลาในรอบวัน

เวลา	MBD (%)	RMSD (%)
8:00	13.33	14.07
9:00	5.49	5.87
10:00	-8.38	8.88
11:00	-4.04	4.35
12:00	0.07	4.18
13:00	0.62	3.00
14:00	-7.10	7.39
15:00	-6.46	8.54
16:00	-14.10	15.91

บทที่ 4

สรุป

ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบแบบจำลองเพื่อหาค่าของสเปกตรัมรังสีตรงและสเปกตรัมรังสีกระจายในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆที่มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม โดยในการเปรียบเทียบแบบจำลองผู้วิจัยได้คัดเลือกแบบจำลองมาทำการเปรียบเทียบจำนวน 5 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองของ Leckner (1978) Brine และ Iqbal (1984) Bird (1984) Bird และ Riordan (1986) และ Gueymard (2001) ในการคำนวณผู้วิจัยได้ทำการรวบรวมค่าของสเปกตรัมรังสีตรงและสเปกตรัมรังสีกระจายรวมถึงพารามิเตอร์ที่ต้องนำมาใช้ในการเปรียบเทียบแบบจำลอง ได้แก่ ใอน้ำ โอโซน และฝุ่นละออง โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่ปี ค.ศ. 2014-2016 ซึ่งผลจากการเปรียบเทียบแบบจำลองสเปกตรัมรังสีตรงในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆพบว่าแบบจำลองของ Brine และ Iqbal (1983) ให้ผลการเปรียบเทียบกับค่าจากการวัดได้ดีที่สุด โดยมีค่า RMSD และ MBD เท่ากับ 7.40% และ 2.30% ตามลำดับ และผลจากการเปรียบเทียบแบบจำลองสเปกตรัมรังสีกระจายในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆพบว่าแบบจำลองของ Bird (1984) ให้ผลการเปรียบเทียบกับค่าจากการวัดได้ดีที่สุด โดยมีค่า MBD และ RMSD อยู่ที่ -1.40% และ 12.85% รองลงมาเป็นแบบจำลองของ Bird และ Riordan (1986) ซึ่งมีค่า MBD เท่ากับ -0.17% และ RMSD เท่ากับ 13.13% และแบบจำลองของ Gueymard (2001) ซึ่งมีค่า MBD เท่ากับ 0.34% และ RMSD เท่ากับ 13.65%

สำหรับการพัฒนาแบบจำลองกึ่งเอมไพริคัล สำหรับหาค่าสเปกตรัมรังสีอาทิตย์รวมภายใต้สภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆ ผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลของสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ที่สถานีเรดาร์ของกรมฝนหลวง และการบินเกษตร อำเภอมวกก่อ จังหวัดเชียงใหม่ ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ อำเภอมือง จังหวัดอุบลราชธานี และที่มหาวิทยาลัยศิลปากร อำเภอมือง จังหวัดนครปฐม มาเป็นข้อมูลในการพัฒนาแบบจำลอง ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ใช้ค่าใอน้ำ โอโซน และฝุ่นละออง เป็นพารามิเตอร์หลักที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง และทำการหาค่าของสัมประสิทธิ์แต่ละความยาวคลื่น และนำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ไปคำนวณหาค่าสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ ซึ่งในการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองกึ่งเอมไพริคัล ผู้วิจัยได้นำข้อมูลผลการวัดสเปกตรัมรังสีรวมที่สถานีเชียงใหม่ นครปฐม และอุบลราชธานี มาทำการเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณพบว่าแบบจำลองกึ่งเอมไพริคัลที่พัฒนาขึ้นให้ผลการคำนวณสอดคล้องดีกับค่าจากการวัด โดยมีค่า RMSD เท่ากับ 15.86% และค่า MBD เท่ากับ 0.18%

รายการอ้างอิง



รายการอ้างอิง

- เสริม จันทร์ฉาย. (2557). รังสีอาทิตย์. นครปฐม : หน่วยวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
- Ångström, A. (1929). On the atmospheric transmission of sun radiation and on dust in the air. *Geografiska Annaler*, 11, 156-166.
- ASTM, E. (2000). 490. 2000 American Society for Testing & Materials (ASTM) standard extraterrestrial solar spectrum reference E-4 9 0 -0 0 (2 0 0 0). <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am0/>.
- Bird, R. E. (1984). A simple, solar spectral model for direct-normal and diffuse horizontal irradiance. *Solar Energy*, 32(4), 461-471.
- Bird, R. E., & Riordan, C. (1986). Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the earth's surface for cloudless atmospheres. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 25(1), 87-97.
- Brine, D. T., & Iqbal, M. (1983). Diffuse and global solar spectral irradiance under cloudless skies. *Solar Energy*, 30(5), 447-453.
- Gueymard, C. A. (2001). Parameterized transmittance model for direct beam and circumsolar spectral irradiance. *Solar Energy*, 71(5), 325-346.
- Iqbal, M. (1983). *An Introduction to Solar Radiation*. New York: Academic Press.
- Kok, C. (1972). Spectral irradiance of daylight for air mass 2. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 5(9), L85.
- Leckner, B. (1978). The spectral distribution of solar radiation at the earth's surface—elements of a model. *Solar Energy*, 20(2), 143-150.
- Thekaekara, M. (1973). Solar energy outside the earth's atmosphere. *Solar Energy*, 14(2), 109-127.