



การพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้าในสภาพ
ท้องฟ้าปราศจากเมฆโดยคำนึงถึงผลของฝุ่นละออง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาามมหาบัณฑิต

วิทยาศาสตร มหาวิทาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้าใน
สภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆโดยคำนึงถึงผลของฝุ่นละออง



โดย
นางสาววิไลพร กล่อมเกลี้ยง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต
วิทยาศาสตร มหาวิทาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

DEVELOPMENT OF A MODEL FOR CALCULATING SKY RADIANCE UNDER
CLOUDLESS SKIES WITH THE AEROSOL EFFECT



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	การพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วน ต่างๆ ของท้องฟ้าในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆโดยคำนึงถึงผลของฝุ่น ละออง
โดย	วลัยพร กล่อมเกลี้ยง
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ แผน 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. กรทิพย์ ไตะสิงห์)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริชัย เทพา)

57306213 : พิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต

คำสำคัญ : ความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า, แบบจำลองเชิงสถิติ

นางสาว วลัยพร กล่อมเกลี้ยง: การพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้าในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆโดยคำนึงถึงผลของฝุ่นละออง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า (sky radiance) ในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆโดยอาศัยข้อมูลความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง (aerosol optical depth, AOD) ช่วยในการจำแนกสภาพท้องฟ้า แบบจำลองที่เสนอเป็นผลคูณของสองฟังก์ชัน ได้แก่ gradation function และ indicatrix function โดย gradation function เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับมุมเซนนิธของตำแหน่งบนท้องฟ้าที่พิจารณา และ indicatrix function เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับระยะห่างเชิงมุมระหว่างตำแหน่งที่พิจารณากับตำแหน่งดวงอาทิตย์ ในการหาฟังก์ชันทั้งสอง ผู้วิจัยทำการวัดข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าด้วยเครื่องสแกนท้องฟ้า (sky scanner) ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ลานทดลองพลังงานแสงอาทิตย์ ดาดฟ้าชั้น 11 อาคารวิทยาศาสตร์ 1 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม (13.81°N, 100.04°E) โดยใช้ข้อมูลเดือนมกราคม ค.ศ. 2008 ถึง เดือนธันวาคม ค.ศ. 2015 และได้ทำการแบ่งกลุ่มข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าตามค่าของ AOD และมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ เพื่อใช้ในการแยกฟังก์ชันทั้งสองออกจากกัน พร้อมทั้งเขียนสมการความสัมพันธ์ด้วยฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลทำให้ได้แบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าตามต้องการ จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยทำการเปรียบเทียบความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าที่ได้จากแบบจำลองและที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง sky scanner ที่จังหวัดเชียงใหม่ (18.78°N, 98.98°E) ซึ่งใช้ข้อมูลเดือนสิงหาคม ค.ศ. 2015 ถึง สิงหาคม ค.ศ. 2016 จากผลการทดสอบพบว่าข้อมูลที่ได้จากการวัดและการคำนวณความสอดคล้องกันดี โดยมีความแตกต่างในรูปของ mean bias difference (MBD) เท่ากับ -3.7% และค่า root mean square difference (RMSD) เท่ากับ 19.7%

57306213 : Major (PHYSICS)

Keyword : SKY RADIANCE, STATISTICAL MODEL

MISS Walaiporn KLOMKLIANG : Development of a model for calculating sky radiance under cloudless skies with the aerosol effect Thesis advisor : Professor Serm Janjai, Ph.D.

In this research work, a statistical model for calculating sky radiance under cloudless sky condition was developed. The proposed model is a multiplication of two functions namely gradation function and indicatrix function. Gradation function is a function of the sky zenith angle and indicatrix function is a function of angular distance between the sky position and the sun position. To obtain the analytical form of these functions, sky radiance was measured by a sky scanner at Faculty of Science, Silpakorn University Nakhon Pathom (13.81°N, 100.04°E) during January, 2008 to December, 2015 with condition of cloudless sky were analyzed. By grouping the sky radiance data according to aerosol optical depth (AOD) and the solar zenith angle, the two functions were separated. After that, these functions were fitted with the exponential equations and the model for estimating the sky radiance was obtained. To validate the model, the calculated hourly sky radiance at Chiang Mai (18.78°N, 98.98°E) during August, 2015 to August, 2016 was compared with the measurement by sky scanner. It was found that the measured and calculated sky radiance were in good agreement. The discrepancy between both data set was presented in terms of mean bias difference (MBD) and root mean square difference (RMSD), which are -3.7% and 19.7%, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต โดยผู้วิจัยได้รับทุนสนับสนุนจากผู้ช่วยวิจัยจากห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ซึ่งผู้วิจัยขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้เป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.เสริม จันทร์ฉาย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาผู้ให้คำแนะนำด้านวิชาการ และช่วยจัดหาทุนวิจัย เครื่องมือ อุปกรณ์ และข้อมูล สำหรับใช้ในการดำเนินงานวิจัย

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

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. กรทิพย์ ไต๊ะสิงห์ อาจารย์ ดร. อิศระ มะศิริ อาจารย์ ดร. สมเจตน์ ภัทรพานิชชัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุมาลย์ บรรเทิง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รุ่งรัตน์ วัฒนาล อาจารย์ ดร. ประสาน ปานแก้ว และนักวิจัยของห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำต่าง ๆ เกี่ยวกับงานวิจัย และขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่านที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ท้ายสุดนี้ คุณประโยชน์ที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดาและมารดา รวมทั้งคณะจารย์ทุกท่าน เพื่อตอบแทนพระคุณที่ได้ช่วยให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการศึกษา

วัลย์พร กลุ่มเกลี้ยง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 หลักทงวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 หลักการทงวิชาการ.....	3
2.1.1 แหล่งที่มาของรังสีอาทิตย์.....	3
2.2 ชนิดของรังสีอาทิตย์.....	5
2.3 ปริมาณรังสีอาทิตย์.....	6
2.3.1 รังสีที่ขณะเวลาหนึ่ง (irradiance).....	6
2.3.2 รังสีในชวงเวลา (irradiation).....	6
2.3.3 รังสีในมุมตัน (radiance).....	7
2.3.4 รังสีตรง (Direct Irradiance) และรังสีกระจาย (Diffuse Irradiance).....	9
2.3.5 ความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า (Sky radiance).....	10
2.4 ทฤษฎีเกี่ยวกับฝุ่นละอองในบรรยากาศ.....	11

2.4.1	คำจำกัดความและธรรมชาติของฝุ่นละออง	11
2.4.2	การลดทอนรังสีอาทิตย์ของฝุ่นละอองในบรรยากาศ	12
2.4.3	ความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง	12
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	14
บทที่ 3	วิธีการดำเนินการวิจัยและผล	22
3.1	การเตรียมข้อมูล	22
3.1.1	ข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า	22
3.1.2	ข้อมูลภาพถ่ายท้องฟ้า	28
3.1.3	ข้อมูลความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง	31
3.2	การสร้างแบบจำลองสำหรับคำนวณปริมาณรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า	32
3.2.1	การจัดกลุ่มข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า	33
3.2.2	การหาค่าเฉลี่ยปริมาณรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า.....	36
3.2.3	การแบ่งข้อมูลเพื่อใช้แยกฟังก์ชัน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ ออกจาก $f(\chi)/f(Z_s)$	37
3.2.3.1	การแบ่งโซนของเซลล์ข้อมูลเพื่อใช้แยกฟังก์ชัน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ ออกจาก $f(\chi)/f(Z_s)$	37
3.2.3.2	การเตรียมข้อมูลสำหรับฟังก์ชัน $\varphi(Z)/\varphi(0)$	39
3.2.3.3	การเตรียมข้อมูลสำหรับหาฟังก์ชัน $f(\chi)/f(Z_s)$	42
3.2.3.4	การวิเคราะห์หาฟังก์ชัน $\varphi(Z)/\varphi(0)$	43
3.2.3.5	การวิเคราะห์หาฟังก์ชัน $f(\chi)/f(Z_s)$	93
3.2.4	แบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า	100
3.3	การทดสอบแบบจำลอง.....	100
บทที่ 4	สรุป.....	114
	รายการอ้างอิง	116
	ภาคผนวก ก รูปแบบของไฟล์ข้อมูลดิบ	117

ภาคผนวก ข เรขาคณิตของข้อมูลวัดที่ได้จากเครื่อง sky scanner 120

ประวัติผู้เขียน 123



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ช่วงความยาวคลื่นและสัดส่วนของพลังงานในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ที่สำคัญเมื่อเทียบกับพลังงานทั้งหมดของรังสีที่แผ่จากดวงอาทิตย์ (เสริม จันทร์ฉาย, 2560).....	5
ตารางที่ 2.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ a, b, c, d และค่า e ตามแบบจำลองมาตรฐาน (Uetani et al., 2003)	20
ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า ในหน่วย $W/m^2 \cdot sr$ ซึ่งวัดได้จาก sky scanner	25
ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างการจัดข้อมูลปริมาณรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า (R) ที่ค่า χ คงที่เท่ากับ χ_1 ถึง χ_{30} โดยแต่ละ χ จะมีค่า Z แปรค่าจาก Z_1 ถึง Z_8 โดย R_{ref} เป็นความเข้มรังสีอาทิตย์บนท้องฟ้าที่ตำแหน่งอ้างอิง Z_{ref} ชุดข้อมูลดังกล่าวเป็นกลุ่มข้อมูลกรณี $AOD = AOD_1$ และ $Z_s = Z_{s_1}$	41
ตารางที่ 3.3 ข้อมูลปริมาณรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า (R) ที่ค่า Z คงที่ เท่ากับ Z_1 ถึง Z_8 โดยแต่ละ Z จะมีค่า χ ที่แปรค่าจาก χ_1 ถึง χ_{30} ทั้งนี้เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์หา $f(\chi)/f(Z_s)$ โดยข้อมูลในตารางเป็นชุดข้อมูลกรณี $AOD = AOD_1$ และ $Z_s = Z_{s_1}$.	43
ตารางที่ 3.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ a_0, a_1, a_2, a_3 และ a_4 ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Non-linear estimation.....	93
ตารางที่ 3.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการของ $f(\chi)/f(\chi_{ref})$ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี non-linear estimation	99

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของดวงอาทิตย์ (เสริม จันทร์ฉาย, 2560)	4
รูปที่ 2.2 องค์ประกอบของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลก	5
รูปที่ 2.3 ปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ช่วงเวลาหนึ่ง (irradiance).....	6
รูปที่ 2.4 ปริมาณรังสีอาทิตย์ในมุมตัน (radiance).....	7
รูปที่ 2.5 สเปกตรัมรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก ตามมาตรฐาน ASTM E-490 เมื่อ I_{λ} คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์ และ λ คือ ความยาวคลื่น (เสริม จันทร์ฉาย, 2560)	8
รูปที่ 2.6 สเปกตรัมรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ (Iqbal,1983).....	8
รูปที่ 2.7 แสงตรงจากดวงอาทิตย์ (sunlight) และแสงกระจายจากท้องฟ้า (skylight).....	9
รูปที่ 2.8 ความเข้มของรังสีอาทิตย์ในรูปของ รังสีตรง (Direct Irradiance) และรังสีกระจาย (Diffuse Irradiance)	9
รูปที่ 2.9 ความเข้มของรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า (sky radiance).....	10
รูปที่ 2.10 เครื่องวัดความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า (sky scanner) ของบริษัท EKO รุ่น MS – 321LR	11
รูปที่ 2.11 เครื่องชั้นโฟโตมิเตอร์ (Sunphotometer) ของบริษัท CIMEL รุ่น CE-318.....	13
รูปที่ 2.12 ความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าที่ตำแหน่งกลางท้องฟ้ารายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน (a) ท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด (b) ท้องฟ้ามีเมฆเกือบเต็มท้องฟ้า (c) ท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน (d) ท้องฟ้าเกือบปราศจากเมฆ (e) ท้องฟ้าปราศจากเมฆ.....	15
รูปที่ 2.13 การกระจายของความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้ารายชั่วโมงเฉลี่ย ต่อเดือน (a) ที่เวลา 9.30 นาฬิกา (b) ที่เวลา 12.30 นาฬิกา (c) ที่เวลา 15.30 นาฬิกา	17
รูปที่ 2.14 การเปรียบเทียบปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ได้จากแบบจำลอง (Calculated sky radiance) กับ ค่าที่วัดได้จากการวัด (Measurement sky radiance) ในระยะเวลา 3 ปี ค.ศ. 2013 - 2015	21

รูปที่ 3.1 เครื่อง sky scanner ของบริษัท EKO รุ่น MS – 321LR ซึ่งติดตั้งที่คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม	23
รูปที่ 3.2 เครื่อง sky scanner ของบริษัท EKO รุ่น MS – 321LR ซึ่งติดตั้งที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยา ภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่	23
รูปที่ 3.3 ตำแหน่งของท้องฟ้าจำนวน 145 เซลล์ ซึ่งเครื่อง sky scanner ทำการวัดความเข้มรังสี อาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า	24
รูปที่ 3.4 ค่าอัลติจูดหรือมุมเงยของตำแหน่งท้องฟ้าที่เครื่อง sky scanner ทำการวัด (เสริม จันทร์ฉาย, 2547).....	24
รูปที่ 3.5 เครื่องถ่ายภาพท้องฟ้า (sky view) ซึ่งติดตั้งที่คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม	28
รูปที่ 3.6 เครื่องถ่ายภาพท้องฟ้า (sky view) ซึ่งติดตั้งที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือจังหวัดเชียงใหม่	29
รูปที่ 3.7 ตัวอย่างภาพถ่ายท้องฟ้าในกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ ซึ่งทำการถ่ายท้องฟ้าที่สถานีนครปฐม ในวันที่ 16 มีนาคม ค.ศ. 2015 เวลา 15.30 นาฬิกา.....	30
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างภาพถ่ายท้องฟ้าในกรณีท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน ซึ่งทำการถ่ายท้องฟ้าที่สถานีนครปฐม ในวันที่ 23 มิถุนายน ค.ศ. 2015 เวลา 13.30 นาฬิกา	30
รูปที่ 3.9 ตัวอย่างเว็บไซต์ http://aeronet.gsfc.nasa.gov/ ของ AERONET สำหรับดาวน์โหลดค่า AOD	31
รูปที่ 3.10 ตำแหน่งของดวงอาทิตย์และตำแหน่งของท้องฟ้าที่พิจารณา (sky element) ที่จะหา ปริมาณรังสีอาทิตย์ตามแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดย Z เป็นมุมเซนนิธของมุมที่พิจารณา Z_s เป็นมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ γ เป็นมุมระหว่างตำแหน่งบนท้องฟ้าที่พิจารณากับตำแหน่ง ดวงอาทิตย์ γ_s เป็นมุมอซิมุธของดวงอาทิตย์ γ เป็นมุมอซิมุธของตำแหน่งที่พิจารณา (Uetani et al., 2003).....	33
รูปที่ 3.11 การจัดกลุ่มข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า ในสภาพท้องฟ้า ปราศจากเมฆ ซึ่งบอกด้วยค่า AOD และแบ่งตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่บอกด้วยค่ามุม เซนนิธของดวงอาทิตย์ (Z_s) ค่า Z_s เป็นค่ากึ่งกลางช่วง เช่น $Z_s = 25^\circ$ หมายถึงข้อมูลที่ Z_s อยู่ในช่วง $Z_s = 20^\circ$ ถึง $Z_s = 30^\circ$ (เสริม จันทร์ฉาย, 2547).....	35

รูปที่ 3.12 การหมุนเซลล์ข้อมูลปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าใน sky dome ให้ดวงอาทิตย์ไปอยู่ทางทิศใต้ (เสริม จันทร์ฉาย, 2547) 36

รูปที่ 3.13 ตัวอย่างการเฉลี่ยข้อมูลปริมาณรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า แบบเซลล์ต่อเซลล์ กรณีค่า AOD อยู่ในช่วง 0.00 - 0.19 (เสริม จันทร์ฉาย, 2547) 37

รูปที่ 3.14 ตัวอย่างการแบ่งค่า χ ออกเป็นโซน ในกรณีของ $Z_s = 30^\circ$, AOD อยู่ในช่วง 0.00 - 0.19 (Janjai S, 2013)..... 38

รูปที่ 3.15 ตัวอย่างการแบ่งโซนของข้อมูลตามแนว Z คงที่ค่าต่าง ๆ ในกรณีของ $Z_s = 35$, AOD อยู่ในช่วง 0.00 - 0.19 (Janjai S, 2013)..... 39

รูปที่ 3.16 การแบ่งข้อมูลปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า (R) ออกเป็นโซนตามช่วงของมุม χ และการกำหนดตำแหน่งของเซลล์อ้างอิงตามแนว Z (Z_{ref}) เพื่อเอาค่า R ตามโซนของ χ ไปหารด้วย $R(Z_{ref})$ สำหรับกำจัดฟังก์ชัน $f(\chi)/f(Z_s)$ (เสริม จันทร์ฉาย, 2547)..... 40

รูปที่ 3.17 การแบ่งข้อมูลปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า (R) ออกเป็นโซนตามช่วงของมุม Z และกำหนดตำแหน่งของเซลล์อ้างอิงตามแนว χ เพื่อเอาค่าของ R ตามโซนของ Z ไปหาร $R(Z_i, \chi_{ref})$ สำหรับกำจัด $\varphi(Z)/\varphi(0)$ (เสริม จันทร์ฉาย, 2547)..... 42

รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนติ Z ที่มีมุมเซนติของดวงอาทิตย์ $Z_s = 15^\circ$ และค่า AOD = 0.00 - 0.19 45

รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนติ Z ที่มีมุมเซนติของดวงอาทิตย์ $Z_s = 25^\circ$ และค่า AOD = 0.00 - 0.19 46

รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนติ Z ที่มีมุมเซนติของดวงอาทิตย์ $Z_s = 35^\circ$ และค่า AOD = 0.00 - 0.19 46

รูปที่ 3.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนติ Z ที่มีมุมเซนติของดวงอาทิตย์ $Z_s = 45^\circ$ และค่า AOD = 0.00 - 0.19 47

รูปที่ 3.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนติ Z ที่มีมุมเซนติของดวงอาทิตย์ $Z_s = 55^\circ$ และค่า AOD = 0.00 - 0.19 47

รูปที่ 3.101 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิธ Z ที่มีมุมเซนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 75^\circ$ และค่า AOD = 1.00 – 1.19..... 88

รูปที่ 3.102 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิธ Z ที่มีมุมเซนิธของดวงอาทิตย์ Z_s ค่าต่าง ๆ และ AOD = 0.00 – 0.19..... 89

รูปที่ 3.103 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิธ Z ที่มีมุมเซนิธของดวงอาทิตย์ Z_s ค่าต่าง ๆ และ AOD = 0.20 – 0.39..... 90

รูปที่ 3.104 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิธ Z ที่มีมุมเซนิธของดวงอาทิตย์ Z_s ค่าต่าง ๆ และ AOD = 0.40 – 0.59..... 90

รูปที่ 3.105 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิธ Z ที่มีมุมเซนิธของดวงอาทิตย์ Z_s ค่าต่าง ๆ และ AOD = 0.60 – 0.79..... 91

รูปที่ 3.106 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิธ Z ที่มีมุมเซนิธของดวงอาทิตย์ Z_s ค่าต่าง ๆ และ AOD = 0.80 – 0.99..... 91

รูปที่ 3.107 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิธ Z ที่มีมุมเซนิธของดวงอาทิตย์ Z_s ค่าต่าง ๆ และ AOD = 1.00 – 1.19..... 92

รูปที่ 3.108 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $f(\chi)/f(Z_s)$ กับ χ ที่ AOD = 0.00 - 0.19 ที่ Z_s ค่าต่าง ๆ 95

รูปที่ 3.109 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $f(\chi)/f(Z_s)$ กับ χ ที่ AOD = 0.20 - 0.39 ที่ Z_s ค่าต่าง ๆ 96

รูปที่ 3.110 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $f(\chi)/f(Z_s)$ กับ χ ที่ AOD = 0.40 - 0.59 ที่ Z_s ค่าต่าง ๆ 96

รูปที่ 3.111 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $f(\chi)/f(Z_s)$ กับ χ ที่ AOD = 0.60 - 0.79 ที่ Z_s ค่าต่าง ๆ 97

รูปที่ 3.112 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $f(\chi)/f(Z_s)$ กับ χ ที่ AOD = 0.80 - 0.99 ที่ Z_s ค่าต่าง ๆ 97

รูปที่ 3.113 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $f(\chi)/f(Z_s)$ กับ χ ที่ AOD = 1.00 - 1.19 ที่ Z_s ค่าต่าง ๆ 98

รูปที่ 3.114 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $f(\chi)/f(Z_s)$ กับ χ ที่ AOD ทุก ๆ ช่วง 98

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของปัญหา

ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญซึ่งให้พลังงานจำนวนมากมหาศาลแก่โลกของเรา โดยพลังงานจากดวงอาทิตย์ที่แผ่ออกมาสู่พื้นผิวโลกจะอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ ได้แก่ รังสีแกมมา รังสีเอ็กซ์ รังสีอัลตราไวโอเล็ต แสงสว่าง และรังสีอินฟราเรด ซึ่งเราใช้ประโยชน์ของรังสีอาทิตย์ (solar radiation) ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกในด้านพลังงานแสงอาทิตย์ อุตุนิยมวิทยาและสิ่งแวดล้อม เช่น การออกแบบอาคารให้เกิดประโยชน์สูงสุดสำหรับการติดตั้งเครื่องปรับอากาศ การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ และการติดตั้งเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น เนื่องจากรังสีอาทิตย์เปลี่ยนแปลงตามวัน เวลาในรอบปี รวมถึงองค์ประกอบต่าง ๆ ในบรรยากาศ เช่น ปริมาณเมฆ ฝุ่นละออง โอโซน ไอน้ำ ในการประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ จึงจำเป็นต้องรู้ข้อมูลปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์บริเวณนั้น ๆ

โดยทั่วไปการหาปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบวัตถุต่าง ๆ จำเป็นต้องรู้ข้อมูลรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบวัตถุนั้น โดยรังสีดังกล่าวมีสองส่วน คือ รังสีตรงจากอาทิตย์และรังสีกระจายจากท้องฟ้า รังสีตรงจากอาทิตย์สามารถหาได้ง่าย เพราะมีทิศทางแน่นอน แต่การหารังสีกระจายจากท้องฟ้ามีความยุ่งยากเพราะมีทิศทางไม่แน่นอนและขึ้นกับสภาพท้องฟ้า การหาปริมาณของรังสีกระจายจากท้องฟ้าเราจำเป็นต้องรู้ข้อมูลปริมาณของรังสีที่มาจากทิศทางต่าง ๆ ในมุมตัน (solid angle) หรือเรียกว่า ความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า (sky radiance) จากนั้นจะทำการอินทิเกรตทุกทิศทาง ก็จะได้รังสีกระจายที่ตกกระทบวัตถุที่เราสนใจโดยทั่วไปข้อมูลรังสีอาทิตย์จากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า ซึ่งข้อมูลดังกล่าวได้จากการวัดด้วยเครื่องสแกนท้องฟ้า (sky scanner) แต่เครื่องมือวัดดังกล่าวมีราคาแพงทำให้ข้อมูลที่ได้จากการวัดมีน้อยมาก ดังนั้นจึงมีการพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าในบริเวณที่ไม่มีการวัด ถึงแม้ว่าจะมีนักวิจัยทำการสร้างแบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มแสงสว่างจากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า (sky luminance) และนำแบบจำลองดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า แต่แบบจำลองส่วนใหญ่เป็นการพัฒนาขึ้นจากสภาพท้องฟ้าในแถบยุโรปและอเมริกา ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสภาพท้องฟ้าที่มีเมฆปกคลุมทั้งหมด (overcast sky) และทางเดินดวงอาทิตย์ (sun path) ไม่ผ่านตำแหน่งกลางท้องฟ้า (zenith) ซึ่งแตกต่างกับกรณีของประเทศไทยที่ทางเดินดวงอาทิตย์ส่วนใหญ่อยู่ใกล้ตำแหน่งกลางท้องฟ้า ทำให้แบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าที่มีอยู่แล้วไม่เหมาะสมกับสภาพอากาศของประเทศไทย

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยจึงเสนอที่จะพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มข้นความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าโดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง sky scanner และใช้ข้อมูลความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง (aerosol optical depth, AOD) ในการจำแนกสภาพท้องฟ้า สำหรับใช้คำนวณหาความเข้มข้นรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าในบริเวณที่ต้องการ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านพลังงานแสงอาทิตย์และงานอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

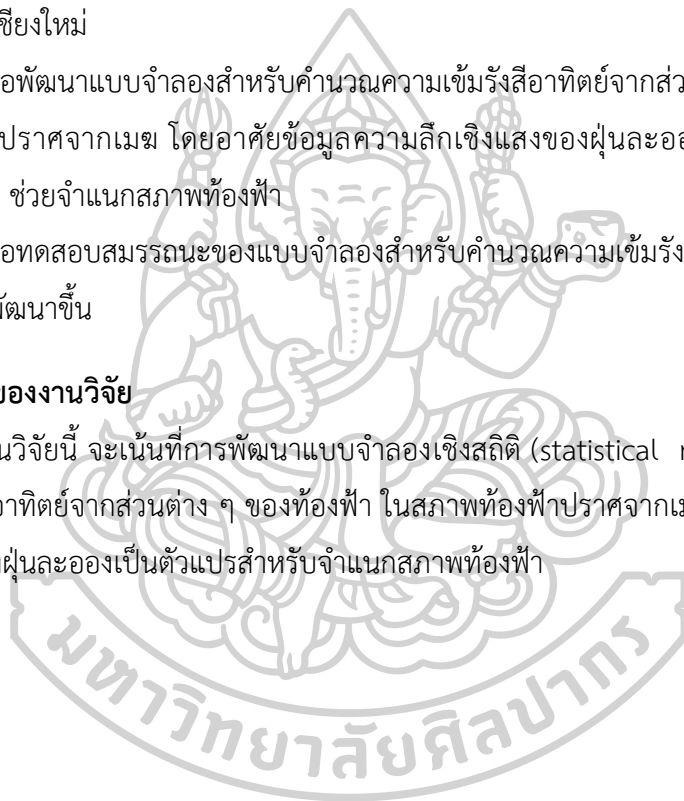
1) เพื่อทำการวัดและรวบรวมข้อมูลความเข้มข้นรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าที่สถานีนครปฐมและเชียงใหม่

2) เพื่อพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มข้นรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า ในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆ โดยอาศัยข้อมูลความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง (aerosol optical depth, AOD) ช่วยจำแนกสภาพท้องฟ้า

3) เพื่อทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มข้นรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าที่พัฒนาขึ้น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ จะเน้นที่การพัฒนาแบบจำลองเชิงสถิติ (statistical model) สำหรับคำนวณความเข้มข้นรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า ในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆโดยอาศัยข้อมูลความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองเป็นตัวแปรสำหรับจำแนกสภาพท้องฟ้า



บทที่ 2

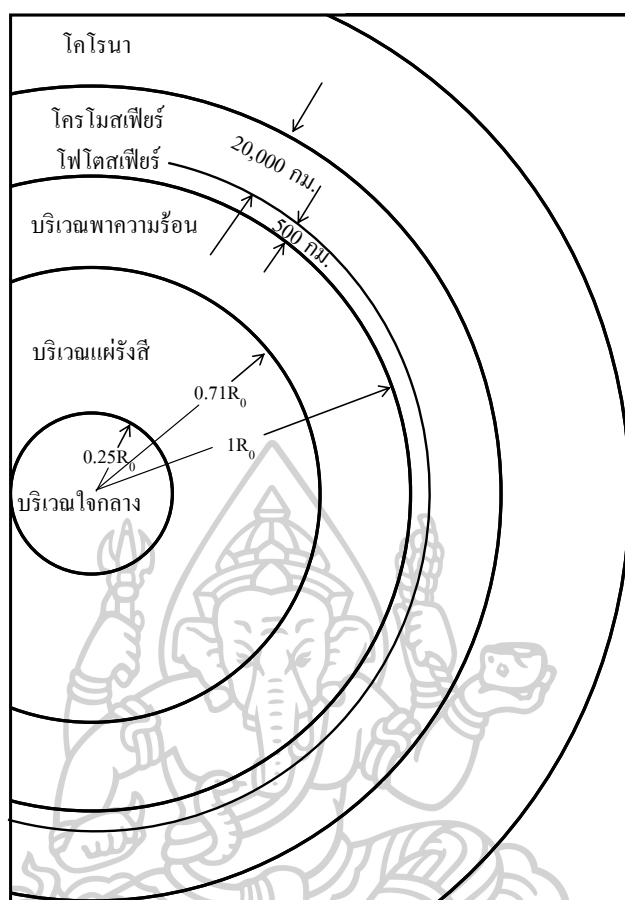
หลักทางวิชาการและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รังสีอาทิตย์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกจากดวงอาทิตย์โดยมีความยาวคลื่นค่าต่าง ๆ เมื่อรังสีอาทิตย์ผ่านบรรยากาศและตกกระทบที่พื้นผิวโลกในบริเวณต่าง ๆ จะมีปริมาณที่แตกต่างกัน ดังนั้น ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการวิชาการของความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าและความลึกเชิงแสงของฟูละออง รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 หลักการทางวิชาการ

2.1.1 แหล่งที่มาของรังสีอาทิตย์

ดวงอาทิตย์เป็นดาวฤกษ์ซึ่งเป็นศูนย์กลางของระบบสุริยะ (solar system) ที่มีโลกและดาวเคราะห์อื่นๆ เป็นบริวาร โดยดวงอาทิตย์มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4 ล้านกิโลเมตร มีมวลเท่ากับ 1.989×10^{30} กิโลกรัม ดวงอาทิตย์ประกอบด้วยไฮโดรเจน 70.67% และ ฮีเลียม 27.43% ของมวลสาร ส่วนที่เหลือจะเป็นคาร์บอน ไนโตรเจน ออกซิเจน และโลหะต่าง ๆ โดยมวลสารในบริเวณใจกลาง (core) จะกดทับกันจนมีความหนาแน่นสูงถึง 151,300 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรทำให้เกิดปฏิกิริยาเทอร์โมนิวเคลียร์ที่บริเวณใจกลาง จากนั้นมีการถ่ายเทพลังงานออกมาสู่อวกาศภายนอก จากใจกลางไปยังบริเวณแผ่รังสี (radiative zone) บริเวณพาความร้อน (convective zone) และออกไปสู่บรรยากาศของดวงอาทิตย์ โดยบรรยากาศชั้นล่างสุดคือ โฟโตสเฟียร์ (photosphere) ถัดขึ้นมาคือ โครโมสเฟียร์ (chromosphere) และบรรยากาศชั้นนอกสุดคือโคโรนา (corona) โครงสร้างของดวงอาทิตย์ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของดวงอาทิตย์ (เสริม จันทร์ฉาย, 2560)

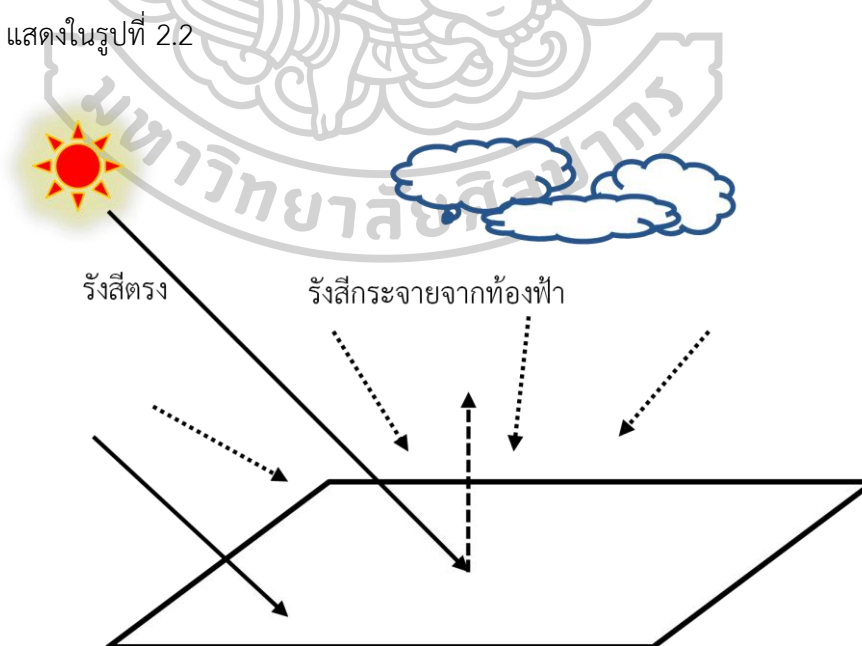
พลังงานที่เกิดจากดวงอาทิตย์จะแผ่ออกสู่อวกาศโดยรอบในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นต่างๆ เรียกว่า รังสีอาทิตย์ โดยพลังงานรวมของรังสีทั้งหมดที่แผ่จากดวงอาทิตย์จะมีค่าเท่ากับ 3.854×10^{26} วัตต์ (เสริม จันทร์ฉาย, 2560) รังสีอาทิตย์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแสงสว่างและรังสีอินฟราเรด สำหรับรังสีอัลตราไวโอเล็ต ถึงแม้จะมีสัดส่วนค่อนข้างน้อยแต่มีพลังงานโฟตอน (photon energy) สูง ซึ่งมีความสำคัญในด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม นอกจากรังสีต่างๆ ดังกล่าวแล้ว ดวงอาทิตย์ยังแผ่รังสีเอกซ์และคลื่นวิทยุอีกเล็กน้อย ซึ่งมีผลในด้านพลังงานน้อยมาก

ตารางที่ 2.1 ช่วงความยาวคลื่นและสัดส่วนของพลังงานในช่วงความยาวคลื่นต่างๆ ที่สำคัญเมื่อเทียบกับพลังงานทั้งหมดของรังสีที่แผ่จากดวงอาทิตย์ (เสริม จันทร์ฉาย, 2560)

รังสีอาทิตย์	ช่วงความยาวคลื่น (μm)	สัดส่วนของพลังงาน เมื่อเทียบกับพลังงานทั้งหมดที่แผ่ออกมา (%)
รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ความคลื่นสั้นมาก	0.01-0.1	3×10^{-6}
รังสีอัลตราไวโอเล็ตไกล	0.1-0.2	0.01
รังสีอัลตราไวโอเล็ตซี	0.2-0.28	0.5
รังสีอัลตราไวโอเล็ตบี	0.28-0.32	1.3
รังสีอัลตราไวโอเล็ตเอ	0.32-0.40	6.2
แสงสว่าง	0.40-0.78	39
รังสีอินฟราเรด	0.78-1,000	52.9

2.2 ชนิดของรังสีอาทิตย์

เมื่อรังสีอาทิตย์เคลื่อนผ่านบรรยากาศมายังพื้นผิวโลก รังสีดังกล่าวจะถูกโมเลกุลอากาศ ฝุ่น ละออง และเมฆกระเจิงและดูดกลืน โดยรังสีที่เหลือจะพุ่งตรงมาถึงพื้นผิวโลก ซึ่งเรียกว่า รังสีตรง (direct radiation) ส่วนรังสีที่เกิดจากการกระเจิงโดยองค์ประกอบต่าง ๆ ของบรรยากาศจะเรียกว่า รังสีกระจาย (diffuse radiation) และผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระจายเรียกว่า รังสีรวม (global radiation) แสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 องค์ประกอบของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลก

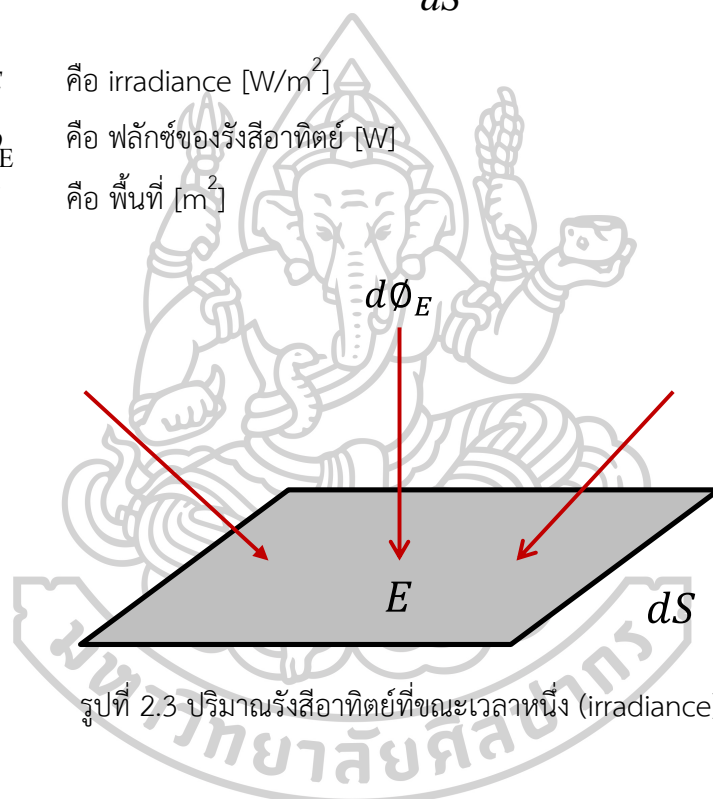
2.3 ปริมาณรังสีอาทิตย์

2.3.1 รังสีที่ระยะเวลาหนึ่ง (irradiance)

รังสีที่ระยะเวลาหนึ่ง หรือความเข้มรังสีอาทิตย์ หมายถึง พลังงานของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่ 1 หน่วยที่ระยะเวลาหนึ่ง มีหน่วยเป็นจูลต่อวินาทีต่อตารางเมตร [$\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$] หรือ วัตต์ต่อตารางเมตร [W/m^2] ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และเขียนความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.1

$$E = \frac{d\phi_E}{dS} \quad (2.1)$$

เมื่อ E คือ irradiance [W/m^2]
 ϕ_E คือ ฟลักซ์ของรังสีอาทิตย์ [W]
 S คือ พื้นที่ [m^2]



รูปที่ 2.3 ปริมาณรังสีอาทิตย์ที่ระยะเวลาหนึ่ง (irradiance)

2.3.2 รังสีในช่วงเวลา (irradiation)

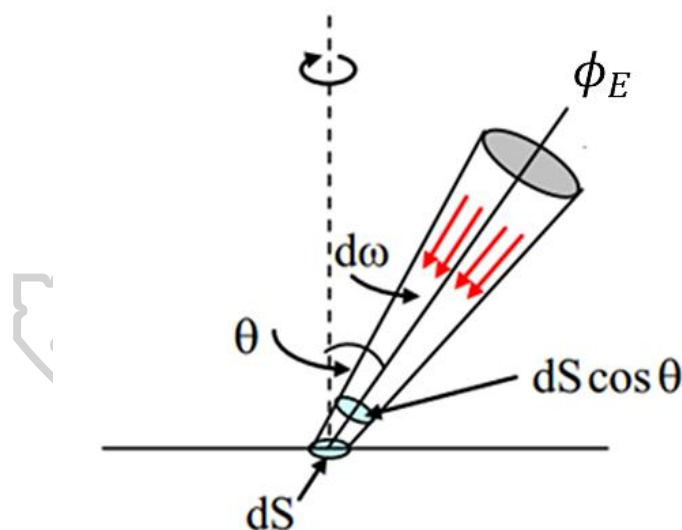
รังสีในช่วงเวลา หมายถึงปริมาณของพลังงานของรังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นที่ในช่วงเวลาที่กำหนด ตัวอย่างเช่น ถ้าเป็นช่วงเวลา 1 ชั่วโมงก็จะเรียกว่า รังสีรายชั่วโมง (hourly irradiation) ซึ่งมีหน่วยเป็นจูลต่อชั่วโมง หรือกรณีที่เป็นช่วงเวลา 1 วันก็จะเรียกว่า รังสีอาทิตย์รายวัน (daily irradiation) ซึ่งมีหน่วยเป็นจูลต่อตารางเมตร

2.3.3 รังสีในมุมตัน (radiance)

รังสีในมุมตัน หรือเรเดียนซ์หรือความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า หมายถึง พลังงานที่ได้รับจากรังสีอาทิตย์ที่เดินทางเข้ามาใน 1 หน่วยมุมตันต่อ 1 หน่วยพื้นที่ที่ตั้งฉากกับมุมตัน มีหน่วยเป็นจูลต่อตารางเมตรต่อสเตอเรเดียน เขียนได้ดังสมการที่ 2.2 และแสดงดังรูปที่ 2.4

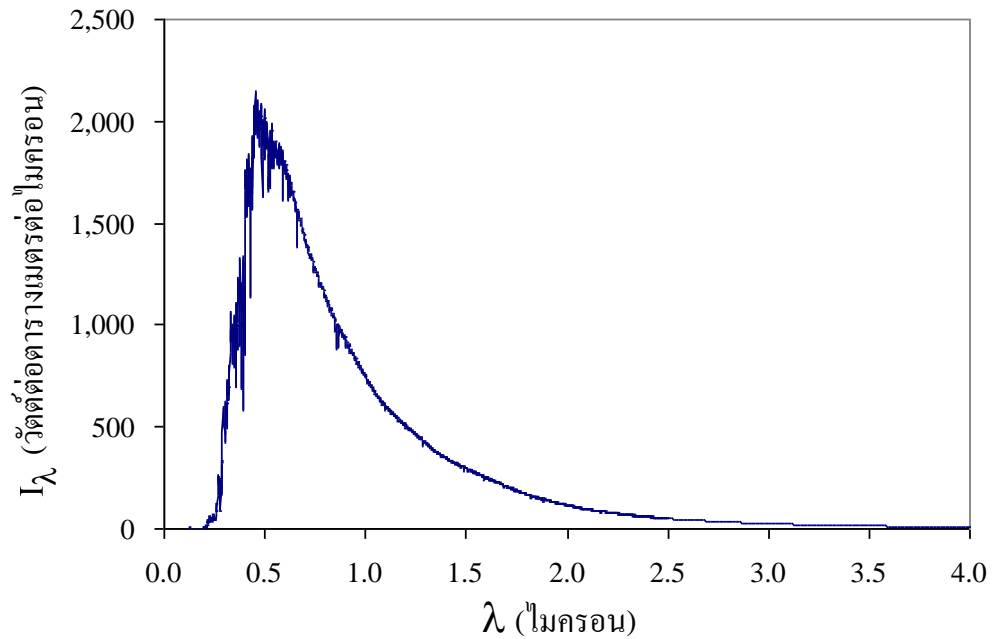
$$R = \frac{d^2 \phi_E}{dS \cos \theta d\omega} \quad (2.2)$$

เมื่อ R คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า [$\text{W}/\text{m}^2\text{-sr}$]
 ϕ_E คือ ฟลักซ์ของรังสีอาทิตย์ [W]
 ω คือ มุมตัน [sr]
 S คือ พื้นที่ [m^2]
 θ คือ มุมระหว่างเส้นตั้งฉากของพื้นราบกับทิศที่แสงเดินทาง [degree]

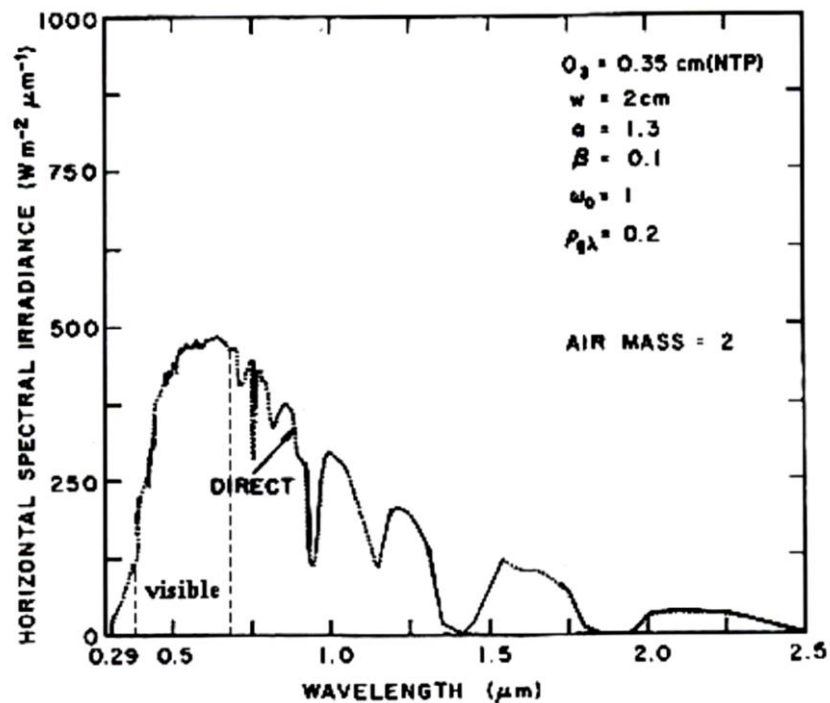


รูปที่ 2.4 ปริมาณรังสีอาทิตย์ในมุมตัน (radiance)

ดวงอาทิตย์ส่งพลังงานออกมาสู่อวกาศในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมีความยาวคลื่นตั้งแต่ แกมมาถึง คลื่นวิทยุ ซึ่งสเปกตรัมรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก แสดงดังรูปที่ 2.5 เมื่อผ่านบรรยากาศของโลก จะถูกโมเลกุลของอากาศ ฝุ่นละออง และเมฆดูดกลืนและกระเจิง โดยรังสีส่วนที่ตกกระทบพื้นผิวโลก จะเหลือเฉพาะ รังสีอัลตราไวโอเล็ต แสงสว่าง และรังสีอินฟราเรด หรืออยู่ในช่วงความยาวคลื่น 0.3 – 4.0 ไมครอน แสดงดังรูปที่ 2.6



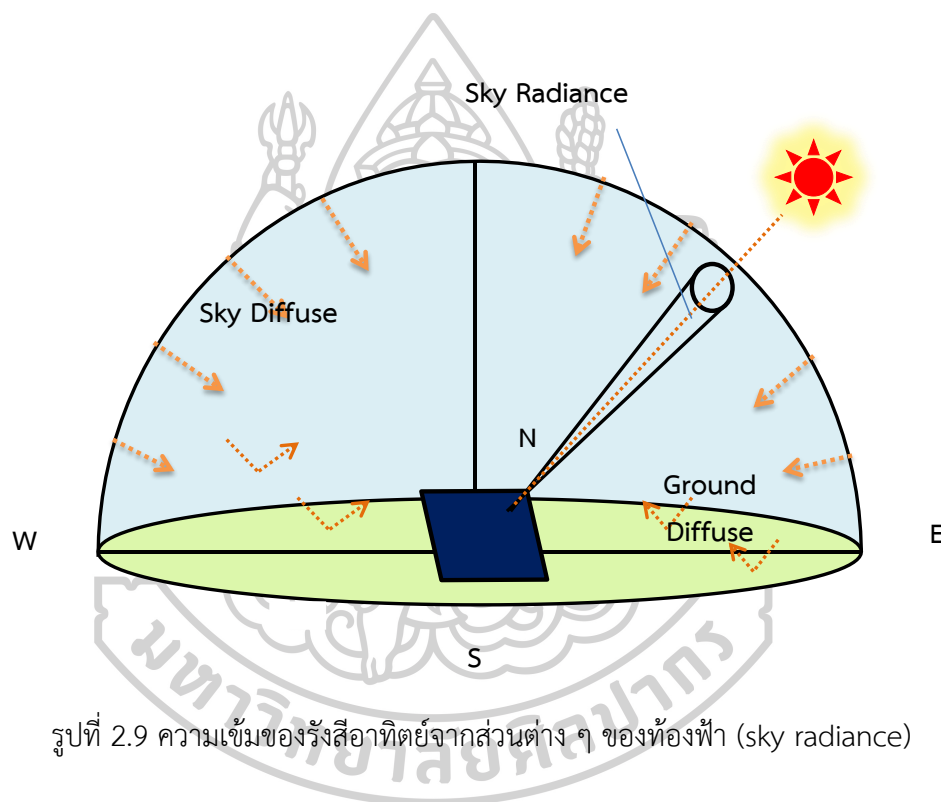
รูปที่ 2.5 สเปกตรัมรังสีอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก ตามมาตรฐาน ASTM E-490 เมื่อ I_λ คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์ และ λ คือ ความยาวคลื่น (เสริม จันทร์ฉาย, 2560)



รูปที่ 2.6 สเปกตรัมรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ (Iqbal,1983)

2.3.5 ความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า (Sky radiance)

เมื่อรังสีอาทิตย์เดินทางผ่านบรรยากาศของโลกจะถูกกระเจิงโดยโมเลกุลของอากาศ ฝุ่น ละออง และเมฆ เกิดเป็นรังสีกระจายหรือเรียกว่าความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า (sky radiance) โดยความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าเป็นฟลักซ์ของรังสีอาทิตย์ที่พุ่งเข้าหรือพุ่งออกมาจากท้องฟ้าเข้ามาในกรวยแคบ ๆ ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ที่ตั้งฉากกับทิศที่รังสีอาทิตย์เข้ามา มีหน่วยเป็น $W/m^2 \cdot sr$ แสดงดังรูปที่ 2.9 เครื่องมือที่ใช้วัดความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าเรียกว่า เครื่องสแกนท้องฟ้า (sky scanner) ซึ่งมีลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.9 ความเข้มของรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า (sky radiance)



รูปที่ 2.10 เครื่องวัดความเข้มข้นสีอาทิตยจากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า (sky scanner) ของบริษัท EKO รุ่น MS - 321LR

เครื่องวัดนี้มีหัววัดเรเดียน ซึ่งทำการกวาดไปทั่วทุกส่วนของท้องฟ้าและวัดค่าความเข้มข้นสีอาทิตยจากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า ข้อมูลนี้ถือเป็นข้อมูลที่ดียิ่งที่สุดสำหรับการนำมาใช้ในด้านพลังงานแสงอาทิตยและสิ่งแวดล้อม เพื่อนำมาใช้คำนวณปริมาณความเข้มข้นสีอาทิตยบริเวณนั้น ๆ อย่างไรก็ตามเครื่อง sky scanner มีราคาแพงจึงมีการวัดน้อยมาก ดังนั้นนักวิจัยจึงมีการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้คำนวณความเข้มข้นสีอาทิตยจากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าสำหรับบริเวณที่ไม่มีการวัด

2.4 ทฤษฎีเกี่ยวกับฝุ่นละอองในบรรยากาศ

2.4.1 คำจำกัดความและธรรมชาติของฝุ่นละออง

ฝุ่นละออง (aerosol) หมายถึงอนุภาคของแข็งหรือของเหลวที่แขวนลอยอยู่ในบรรยากาศ ทั้งนี้ รวมถึงควันจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงต่าง ๆ ฝุ่นที่ฟุ้งกระจายจากพื้นดินหรือจากทะเลทราย ละอองเกลือจากน้ำทะเล ละอองเกสรดอกไม้ และละอองของเหลวของสารเคมีต่าง ๆ แต่จะไม่รวมถึงเมฆและหมอก โดยทั่วไปฝุ่นละอองในบรรยากาศมีขนาดตั้งแต่ 0.1 – 1,000 ไมครอน

ฝุ่นละอองส่วนใหญ่จะอยู่ในบรรยากาศชั้นโทรโปสเฟียร์ที่ช่วงความสูงตั้งแต่พื้นผิวโลกถึงที่ระดับความสูง 2 กิโลเมตร และจะลอยไปตามกระแสลม โดยทั่วไปฝุ่นละอองในบรรยากาศชั้นนี้จะอยู่ได้ประมาณ 1-2 สัปดาห์ จากนั้นจะร่วงหล่นลงสู่พื้นผิวโลกด้วยแรงโน้มถ่วงหรือการชะล้างของฝน เราสามารถพบฝุ่นละอองได้เล็กน้อยในชั้นสตราโตสเฟียร์ โดยส่วนใหญ่เกิดจากเถ้าถ่านที่พ่นจากภูเขาไฟ และสามารถฟุ้งกระจายไปได้ทั่วโลก

ฝุ่นละอองในบรรยากาศสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ฝุ่นละอองที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ และฝุ่นละอองตามธรรมชาติ ตัวอย่างฝุ่นละอองที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ ได้แก่ ฝุ่นละอองจากการสันดาปของเชื้อเพลิงฟอสซิลต่าง ๆ และการเผาไหม้ชีวมวล เป็นต้น สำหรับฝุ่นละอองธรรมชาติจะเกิดขึ้นตามกระบวนการต่าง ๆ ในธรรมชาติ เช่น ฝุ่นละอองจากทะเลทราย ฝุ่นละอองจากพื้นดิน ละอองเกลือจากน้ำทะเล และละอองเกสรดอกไม้ เป็นต้น

2.4.2 การลดทอนรังสีอาทิตย์ของฝุ่นละอองในบรรยากาศ

โดยทั่วไปบรรยากาศจะมีฝุ่นละอองอยู่เสมอ เมื่อรังสีอาทิตย์เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศจะถูกฝุ่นละอองกระเจิงทำให้เกิดรังสีกระจาย และบางส่วนจะถูกฝุ่นละอองดูดกลืน สัดส่วนของการกระเจิงและการดูดกลืนจะขึ้นกับชนิดของฝุ่นละออง เช่น ฝุ่นละอองที่เกิดจากการสันดาปของเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งมีคาร์บอนดำ (black carbon) เป็นองค์ประกอบจะดูดกลืนรังสีอาทิตย์ได้ถึง 20% ส่วนฝุ่นละอองจากทะเลทรายจะดูดกลืนรังสีอาทิตย์น้อยกว่า 5% (Kandratyev, 1999)

2.4.3 ความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง

ความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง (aerosol optical depth, AOD) เป็นการวัดค่าการส่งผ่านของรังสีอาทิตย์ที่ผ่านองค์ประกอบในบรรยากาศและฝุ่นละอองลงมายังพื้นโลก โดยค่า AOD ใช้เป็นตัวแปรหนึ่งในการจำแนกสภาพท้องฟ้า การหาสมบัติเชิงแสงของฝุ่นละอองดังกล่าวได้จากการวัดสเปกตรัมรังสีตรงของดวงอาทิตย์ในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆได้จากเครื่องชั้นโฟโตมิเตอร์ (sunphotometer) ของบริษัท CIMEL แสดงดังรูปที่ 2.11 โดยต้องเลือกวัดที่ความยาวคลื่นซึ่งไม่มีการดูดกลืนรังสีอาทิตย์จากไอน้ำและก๊าซต่าง ๆ ซึ่งโดยทั่วไปจะทำการวัดที่ความยาวคลื่น 340, 380, 415, 500, 673, 870 และ 1020 นาโนเมตร



รูปที่ 2.11 เครื่องชั้นโฟโตมิเตอร์ (Sunphotometer) ของบริษัท CIMEL รุ่น CE-318

ข้อมูลความลึกเชิงแสงและสมบัติแสงอื่นๆ ของฝุ่นละออง สามารถดาวน์โหลดได้จากเว็บไซต์ <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/> กรณีของประเทศไทย หน่วยงานวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้ทำการติดตั้งเครื่องชั้นโฟโตมิเตอร์ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่ ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดอุบลราชธานี ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคใต้จังหวัดสงขลา และลานทดลองพลังงานแสงอาทิตย์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม เพื่อทำการวัดคุณสมบัติฝุ่นละออง พร้อมทั้งนำข้อมูลเข้าสู่เว็บไซต์ดังกล่าวด้วย

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า เป็นข้อมูลที่สำคัญสำหรับใช้ในการคำนวณความเข้มรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวระนาบและพื้นเอียงระนาบต่าง ๆ สำหรับประยุกต์ใช้งานในด้านพลังงาน อุตุนิยมวิทยาและสิ่งแวดล้อม จึงทำให้มีนักวิทยาศาสตร์ในประเทศต่าง ๆ สนใจศึกษาปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าบริเวณพื้นที่ต่าง ๆ โดยวิธีการวัดด้วยเครื่องวัดภาคพื้นดินและการสร้างแบบจำลองทางฟิสิกส์หรือทางสถิติ

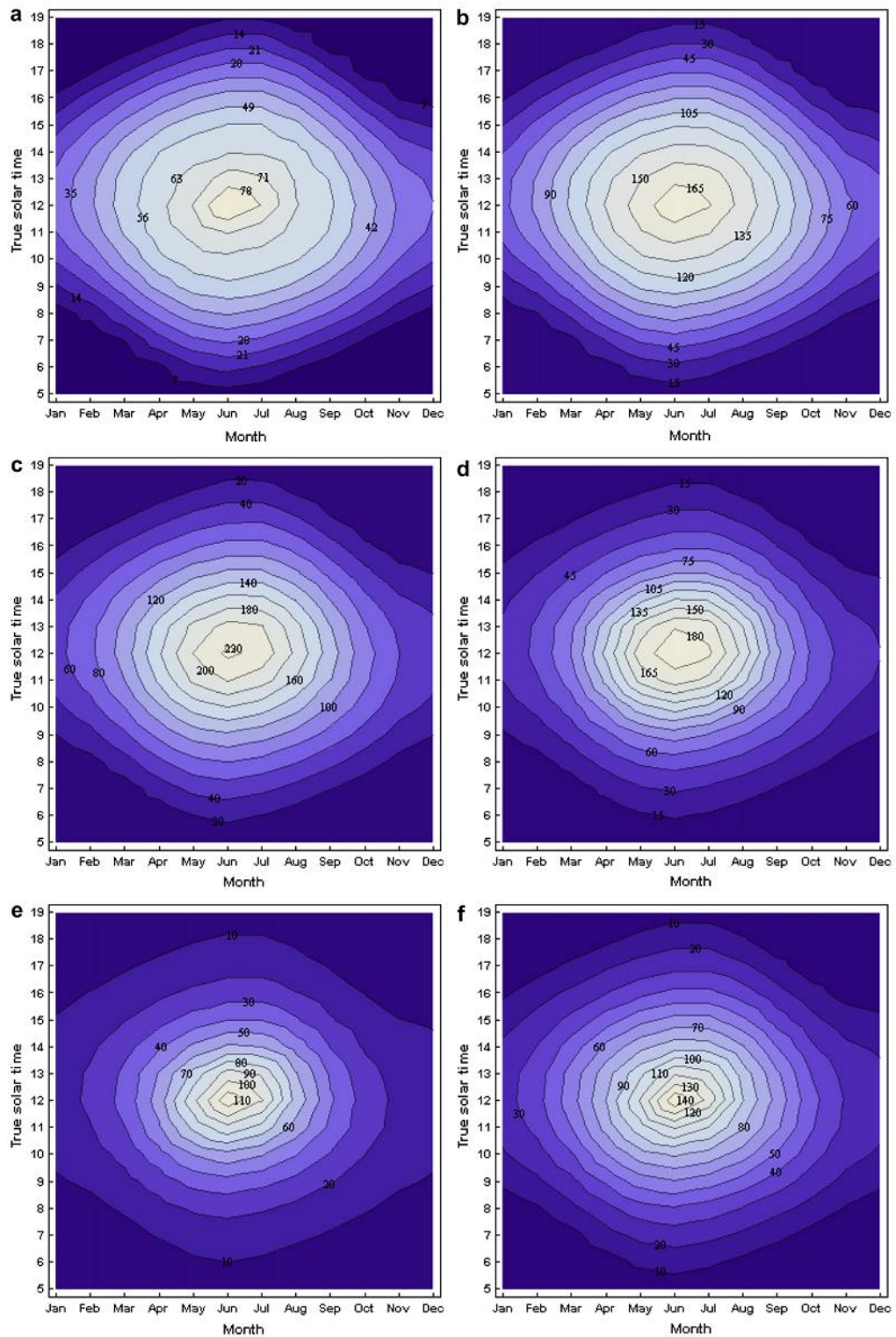
Torres, García, de Blas, Gracia, and Illanes (2010) ได้ทำการวัดความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าที่ตำแหน่งกลางท้องฟ้า (zenith radiance) ที่เมืองปัมโปนา ประเทศสเปน ระหว่างเมษายน ค.ศ. 2007 ถึง กรกฎาคม ค.ศ. 2008 ภายใต้สภาพท้องฟ้าต่าง ๆ ซึ่งแตกต่างกัน 5 แบบ และได้สัมประสิทธิ์ที่ขึ้นกับสภาพท้องฟ้าแต่ละแบบ จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสีอาทิตย์ สัมประสิทธิ์สภาพท้องฟ้าต่าง ๆ และมุมเซนิตดวงอาทิตย์ ได้ดังสมการ

$$R_z = \sum_{i=0}^n a_i \alpha_i \quad (2.4)$$

R_z คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าที่ตำแหน่งกลางท้องฟ้า [$W/m^2 \cdot sr$]

a_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์ในสภาพท้องฟ้าต่าง ๆ

เมื่อนำแบบจำลองไปคำนวณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าที่ตำแหน่งกลางท้องฟ้ารายชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน และแสดงค่าในรูปของคอนทัวร์สำหรับท้องฟ้าแต่ละแบบ แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าที่ตำแหน่งกลางท้องฟ้าราย ชั่วโมงเฉลี่ยต่อเดือน (a) ท้องฟ้าปกคลุมด้วยเมฆทั้งหมด (b) ท้องฟ้ามีเมฆเกือบเต็มท้องฟ้า (c) ท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน (d) ท้องฟ้าเกือบปราศจากเมฆ (e) ท้องฟ้าปราศจากเมฆ

Kómar, Rusnák, and Dubnička (2013) ทำการวิเคราะห์รังสีกระจาย (diffuse radiation) โดยแบ่งท้องฟ้าออกเป็น 2 ส่วนด้วยเส้นเมริเดียน (solar meridian) และใช้เครื่อง sky scanner แบบพกพาในการวัดสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ จากนั้นทำการวิเคราะห์ปริมาณความเข้มแสงสว่าง (daylight) ร่วมกับการวัดสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นกว้าง ซึ่งสามารถนำมาใช้แก้ไขการคำนวณรังสีกระจายที่ตกกระทบพื้นผิวโลก โดยความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า (sky radiance) เป็นผลคูณของ 2 ฟังก์ชัน ได้แก่ gradation function และ indicatrix function ตามแบบจำลองมาตรฐานของ CIE และสามารถนำมาใช้คำนวณรังสีกระจายบนพื้นเอียงในสภาพท้องฟ้าต่าง ๆ ได้ดังสมการ

$$R_z(\alpha, Z) = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(\frac{f(\chi, \lambda)}{Z_s, \lambda} \cdot \frac{\varphi(Z, \lambda)}{\varphi(0^\circ, \lambda)} \right) R_z(\lambda) \Delta\lambda \quad (2.5)$$

$R_z(\alpha, Z)$ คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า [$\text{W/m}^2\text{-sr}$]

λ_1, λ_2 คือ ความยาวคลื่นที่ทำการวัด [μm]

$\varphi(Z, \lambda) / \varphi(0^\circ, \lambda)$ คือ gradation function

$f(\chi, \lambda) / \varphi(Z_s, \lambda)$ คือ indicatrix function

Z_s คือ มุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ [rad]

Z คือ มุมเซนนิธของตำแหน่งที่พิจารณา [rad]

สำหรับกรณีประเทศไทย ข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้ามีจำกัด โดย

Chirattananon and Chaiwiwatworakul (2006) ได้ทำการวัดความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าที่กรุงเทพฯ จากนั้นทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ gradation function และ indicatrix function เพื่อหาสัมประสิทธิ์ของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามสมมติฐานของ Kittler (1967) ซึ่งเขียนได้ดังสมการ

$$R = R_z \frac{\psi(\phi)f(\zeta)}{\psi(0)f(\phi_s)} \quad (2.6)$$

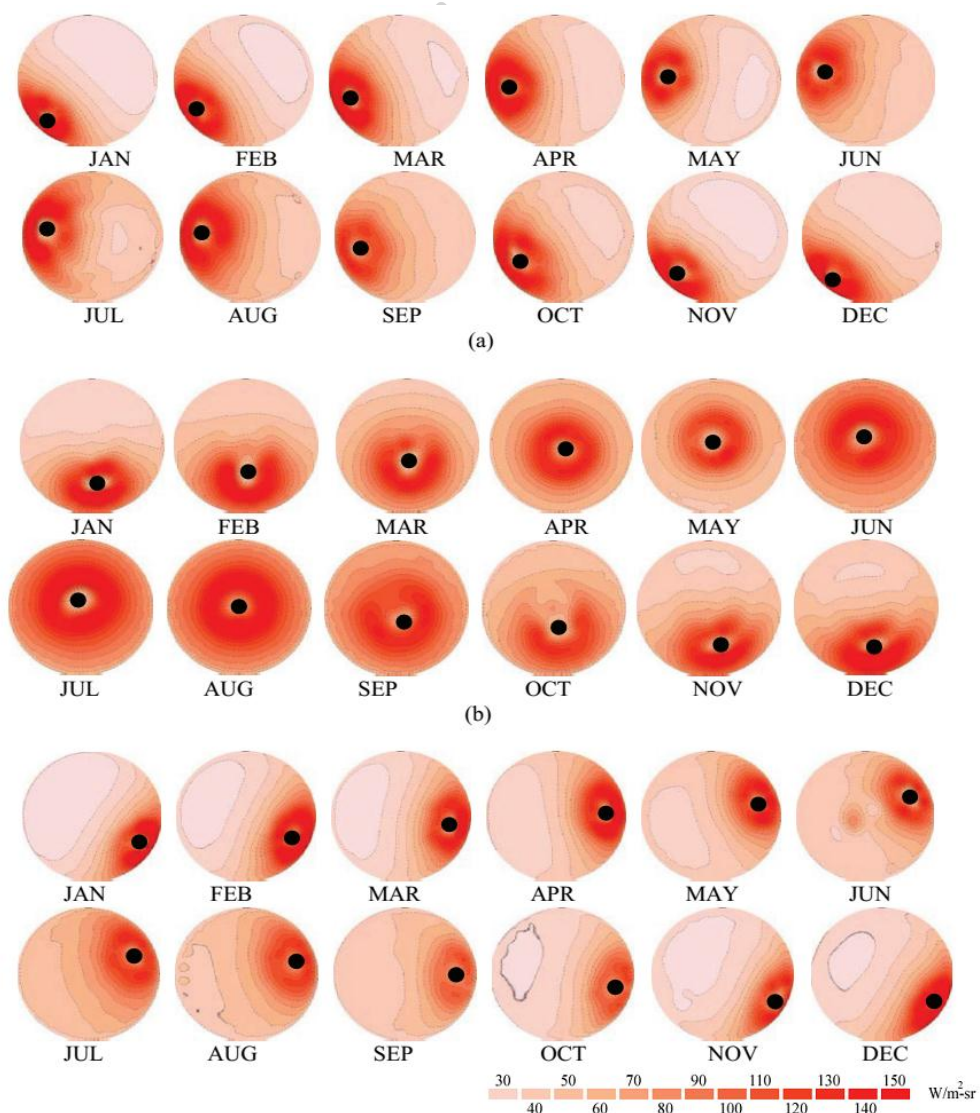
R คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าที่ตำแหน่งพิจารณา [$\text{W/m}^2\text{-sr}$]

R_z คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าที่ตำแหน่งกลางท้องฟ้า [$\text{W/m}^2\text{-sr}$]

$\psi(\phi) / \psi(0)$ คือ gradation function

$f(\zeta) / f(\phi_s)$ คือ indicatrix function

Tohsing, Klomklang, Masiri, and Janjai (2017) ได้ทำการวัดและเก็บรวบรวมข้อมูล ความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า ที่ลานทดลองพลังงานแสงอาทิตย์ อาคาร วิทยาศาสตร์ 1 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม ซึ่งทำการวัดข้อมูลตั้งแต่ปี ค.ศ. 2002 จนถึงปัจจุบัน โดยใช้เครื่อง sky scanner ของบริษัท EKO รุ่น MS-321LR จากนั้นผู้วิจัย ได้ทำการวิเคราะห์การกระจายของความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้ารายชั่วโมงเฉลี่ย ต่อเดือน โดยใช้ข้อมูลระหว่างปี ค.ศ.2013-2015 และแสดงผลในรูปแบบของคอนทัวร์ที่เวลา 9.30 12.30 และ 15.30 นาฬิกา แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การกระจายของความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้ารายชั่วโมงเฉลี่ย ต่อเดือน (a) ที่เวลา 9.30 นาฬิกา (b) ที่เวลา 12.30 นาฬิกา (c) ที่เวลา 15.30 นาฬิกา

จากการวิเคราะห์ดังกล่าวพบว่า ความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้นจากช่วงเช้าของวันไปจนถึงช่วงกลางวันจากนั้นจะลดลงและมีค่าต่ำสุดในช่วงเย็นซึ่งเป็นไปตามการแปรค่าของรังสีอาทิตย์ในรอบวัน นอกจากนี้ ผู้วิจัยยังได้ศึกษาการแปรค่าตามฤดูกาลของความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าด้วย ซึ่งพบว่าความเข้มรังสีอาทิตย์จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจากเดือนมกราคมไปจนถึงเดือนพฤษภาคมตามการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของดวงอาทิตย์ จากนั้นในเดือนมิถุนายนถึงตุลาคมจะค่อย ๆ ลดลง เนื่องจากอิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งพัดพาความชื้นและเมฆมาสู่ประเทศไทย แต่ในช่วงปี ค.ศ.2013-2015 ประเทศไทยได้รับผลกระทบของความแห้งแล้ง ทำให้ไม่มีฝนตกจนถึงเดือนสิงหาคม ดังนั้นค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าจึงมีค่าสูงสุดในช่วงเดือนกรกฎาคมถึงสิงหาคม

Tohsing, Klomkliang, Masiri, and Janjai (2017) ยังได้ทำการคำนวณความเข้มรังสีอาทิตย์ (Uetani et al., 2003) จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า ซึ่งใช้สมมติฐานแบบจำลองมาตรฐานของ Uetani et al., 2003 และใช้ค่าสัมประสิทธิ์จากท้องฟ้ามาตรฐาน โดยเขียนความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าในรูปผลคูณของ 2 ฟังก์ชัน ได้แก่ gradation function และ indicatrix function ดังสมการ

$$\frac{R(Z_i, \chi_j)}{R(0)} = \frac{f(\chi_j)\phi(Z_i)}{f(Z_s)\phi(0)} \quad (2.7)$$

$R(Z_i, \chi_j)$ คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าที่ตำแหน่งที่พิจารณา
[W/m²-sr]

$R(0)$ คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าที่ตำแหน่งกลางท้องฟ้า
[W/m²-sr]

Z_s คือ มุมเซนิตของดวงอาทิตย์ [rad]

Z_i คือ มุมเซนิตของตำแหน่งบนท้องฟ้าที่พิจารณา [rad]

χ_j คือ ระยะเชิงมุมระหว่างตำแหน่งของท้องฟ้ากับตำแหน่งดวงอาทิตย์ [rad]

โดยคำนวณได้จากสมการ

$$\chi = \cos(\cos Z_s \cos Z + \sin Z_s \sin Z \cos|\gamma - \gamma_s|)$$

สำหรับ gradation function และ indicatrix function สามารถคำนวณได้จากสมการ
gradation function สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\varphi(Z_i) = 1 + a \cdot \exp\left(\frac{b}{\cos Z}\right) \quad \text{เมื่อ } 0 \leq Z \leq \frac{\pi}{2} \quad (2.8)$$

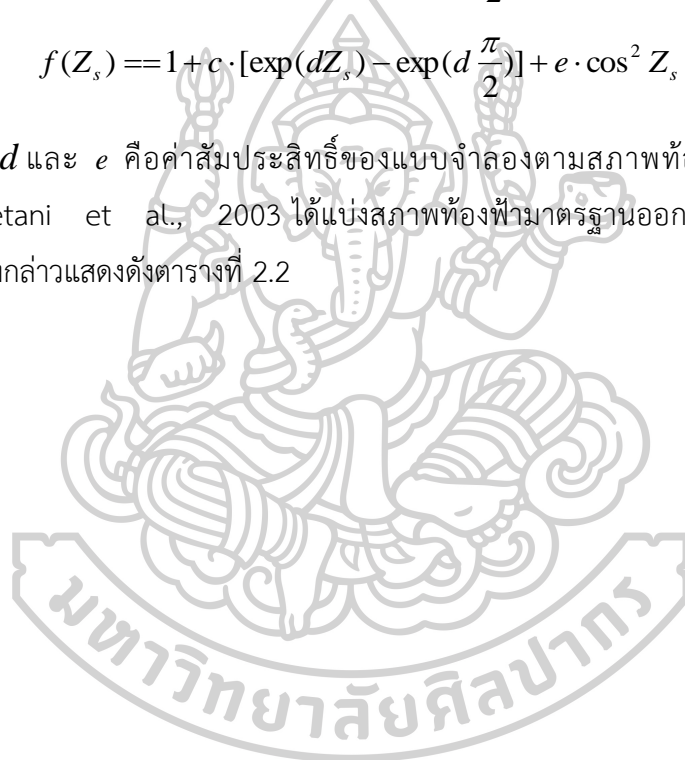
$$\varphi\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1 \quad (2.9)$$

และ indicatrix function สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$f(\chi_j) = 1 + c \cdot [\exp(d\chi_j) - \exp(d\frac{\pi}{2})] + e \cdot \cos^2 \chi_j \quad (2.9)$$

$$f(Z_s) = 1 + c \cdot [\exp(dZ_s) - \exp(d\frac{\pi}{2})] + e \cdot \cos^2 Z_s \quad (2.10)$$

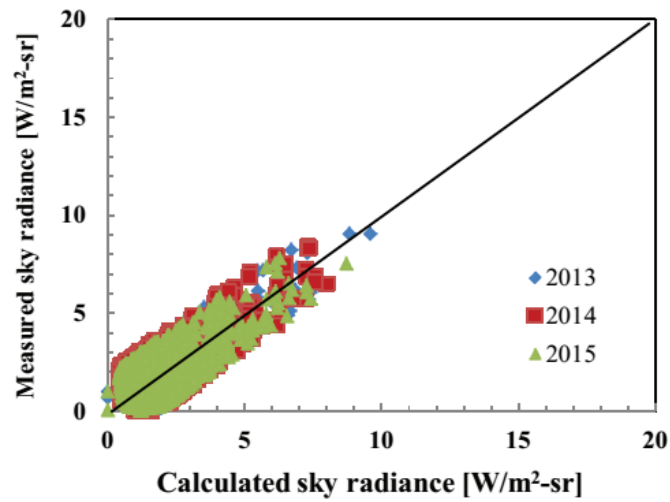
ค่า a, b, c, d และ e คือค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลองตามสภาพท้องฟ้า โดยแบบจำลองมาตรฐาน Uetani et al., 2003 ได้แบ่งสภาพท้องฟ้ามาตรฐานออกเป็น 15 แบบ และมีค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวแสดงดังตารางที่ 2.2



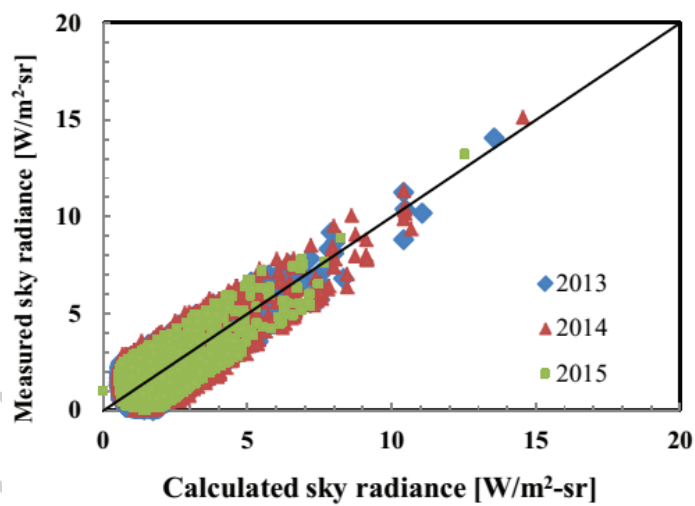
ตารางที่ 2.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ a, b, c, d และค่า e ตามแบบจำลองมาตรฐาน (Uetani et al., 2003)

Type	Grada- tion group	Indica- trix group	a	b	c	d	e	Description of luminance distribution
1	I	1	4,0	-0,70	0	-1,0	0	CIE Standard Overcast Sky, Steep luminance gradation towards zenith, azimuthal uniformity
2	I	2	4,0	-0,70	2	-1,5	0,15	Overcast, with steep luminance gradation and slight brightening towards the sun
3	II	1	1,1	-0,8	0	-1,0	0	Overcast, moderately graded with azimuthal uniformity
4	II	2	1,1	-0,8	2	-1,5	0,15	Overcast, moderately graded and slight brightening towards the sun
5	III	1	0	-1,0	0	-1,0	0	Sky of uniform luminance
6	III	2	0	-1,0	2	-1,5	0,15	Partly cloudy sky, no gradation towards zenith, slight brightening towards the sun
7	III	3	0	-1,0	5	-2,5	0,30	Partly cloudy sky, no gradation towards zenith, brighter circumsolar region
8	III	4	0	-1,0	10	-3,0	0,45	Partly cloudy sky, no gradation towards zenith, distinct solar corona
9	IV	2	-1,0	-0,55	2	-1,5	0,15	Partly cloudy, with the obscured sun
10	IV	3	-1,0	-0,55	5	-2,5	0,30	Partly cloudy, with brighter circumsolar region
11	IV	4	-1,0	-0,55	10	-3,0	0,45	White-blue sky with distinct solar corona
12	V	4	-1,0	-0,32	10	-3,0	0,45	CIE Standard Clear Sky, low luminance turbidity
13	V	5	-1,0	-0,32	16	-3,0	0,30	CIE Standard Clear Sky, polluted atmosphere
14	VI	5	-1,0	-0,15	16	-3,0	0,30	Cloudless turbid sky with broad solar corona
15	VI	6	-1,0	-0,15	24	-2,8	0,15	White-blue turbid sky with broad solar corona

ผู้วิจัยเลือกแบบจำลองและค่าสัมประสิทธิ์สำหรับกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ กรณีแบบที่ 12 และ 13 เพื่อคำนวณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าพร้อมทั้งทำการทดสอบแบบจำลอง โดยใช้ข้อมูลจากการวัดด้วยเครื่อง sky scanner ผลการทดสอบแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 2.14



(a)



(b)

รูปที่ 2.14 การเปรียบเทียบปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ได้จากแบบจำลอง (Calculated sky radiance) กับค่าที่วัดได้จากการวัด (Measurement sky radiance) ในระยะเวลา 3 ปี ค.ศ. 2013 – 2015 รูป (a) เป็นค่าสัมประสิทธิ์ในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆแบบที่ 12 รูป (b) เป็นค่าสัมประสิทธิ์ในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆแบบที่ 13

ผลการเปรียบเทียบค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าจากแบบจำลองมาตรฐาน (Uetani et al., 2003) และข้อมูลที่ได้จากการวัดมีค่าความแตกต่างสูงมาก ทั้งนี้อาจเนื่องมากจากการใช้สัมประสิทธิ์จากแบบจำลองซึ่งไม่เหมาะสมกับสภาวะอากาศในบริเวณเขตร้อนของประเทศไทย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงจะทำการพัฒนาแบบจำลองที่เหมาะสมกับสภาพอากาศของประเทศไทย



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัยและผล

การดำเนินงานเพื่อพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า ผู้วิจัยได้ทำการเตรียมข้อมูลความเข้มรังสีจากส่วนต่าง ๆ ข้อมูลภาพถ่ายท้องฟ้าสำหรับจำแนกสภาพอากาศ ข้อมูลความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง การสร้างแบบจำลอง รวมถึงการทดสอบแบบจำลอง โดยรายละเอียดของการดำเนินงานมีดังนี้

3.1 การเตรียมข้อมูล

3.1.1 ข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า

เนื่องจากการสร้างแบบจำลองสำหรับคำนวณปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าจำเป็นต้องใช้ข้อมูลปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า (sky radiance) ผู้วิจัยได้จึงทำการวัดและเก็บรวบรวมข้อมูลด้วยเครื่อง sky scanner ของบริษัท EKO รุ่น MS - 321LR (ดังรูปที่ 3.1) ซึ่งติดตั้งอยู่ที่ลานทดลองพลังงานแสงอาทิตย์ ดาดฟ้าชั้น 11 อาคารวิทยาศาสตร์ 1 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม (13.81°N, 100.04°E) โดยเริ่มทำการวัดตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน ค.ศ. 2002 จนถึงปัจจุบัน สำหรับข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นข้อมูลในเดือนมกราคม ค.ศ. 2008 ถึง ธันวาคม ค.ศ. 2015 โดยทำการเลือกข้อมูลที่ เวลา 8.30, 9.30, 10.30, 11.30, 12.30, 13.30, 14.30, 15.30 และ 16.30 นาฬิกา ตามเวลามาตรฐานประเทศไทย เพื่อนำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า



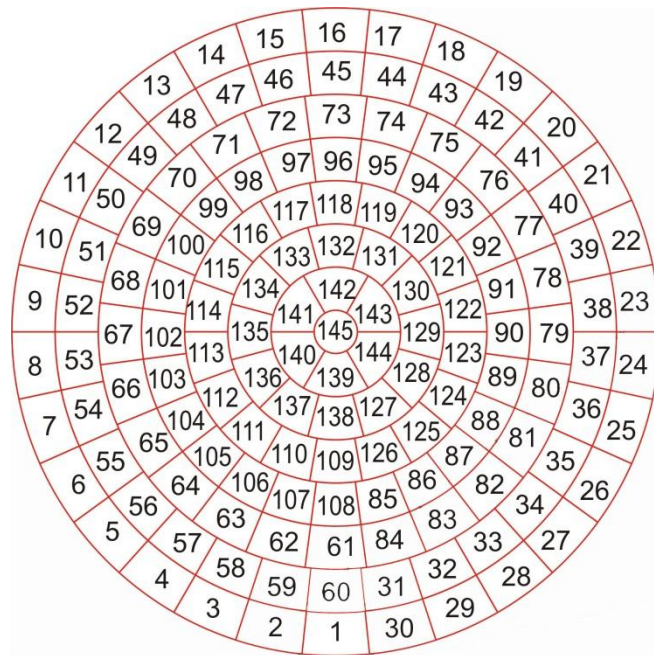
รูปที่ 3.1 เครื่อง sky scanner ของบริษัท EKO รุ่น MS - 321LR ซึ่งติดตั้งที่คณะ
วิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม

นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ทำการทำการติดตั้งเครื่อง sky scanner เพื่อวัดความเข้มรังสีอาทิตย์จาก
ส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า ที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่ (18.78°N, 98.98°E) ตั้งแต่
เดือนสิงหาคม ค.ศ. 2015 จนถึงปัจจุบัน ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยนำข้อมูลในช่วงเดือนสิงหา ค.ศ.
2015 ถึง สิงหาคม ค.ศ. 2016 มาใช้ทดสอบแบบจำลอง

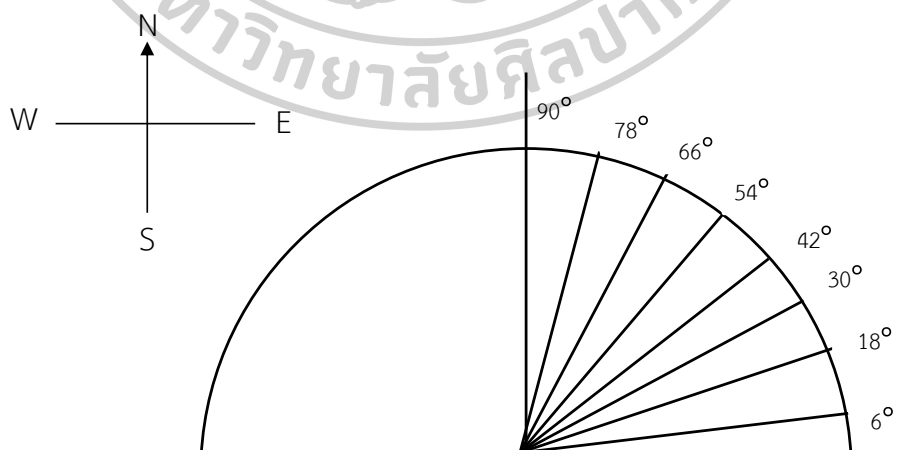


รูปที่ 3.2 เครื่อง sky scanner ของบริษัท EKO รุ่น MS - 321LR ซึ่งติดตั้งที่ศูนย์
อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่

เครื่อง sky scanner จะกวาดท้องฟ้าในแนวอาซิมุท (azimuth) และอัลติจูด (altitude) ทำให้หัววัดของเครื่องชี้ไปยังตำแหน่งต่าง ๆ ของท้องฟ้าเป็นเซลล์ (cell) จำนวน 145 เซลล์ ตามแผนภูมิแสดงดังรูปที่ 3.3 โดยแต่ละตำแหน่งของท้องฟ้าที่วัดจะรองรับมุม 11 องศา และมีค่าอัลติจูดตามแผนภูมิแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งของท้องฟ้าจำนวน 145 เซลล์ ซึ่งเครื่อง sky scanner ทำการวัดความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า



รูปที่ 3.4 ค่าอัลติจูดหรือมุมเงยของตำแหน่งท้องฟ้าที่เครื่อง sky scanner ทำการวัด (เสริม จันทร์ฉาย, 2547)

ในการวัดแต่ละครั้ง หัววัดของ sky scanner จะทำการกวาดท้องฟ้าจนครบ 145 เซลล์ใช้เวลา 4 นาที สำหรับความถี่ของการวัดแต่ละครั้งสามารถเลือกได้โดยการอาศัยการตั้งโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ควบคุมการทำงานของเครื่อง โดยในที่นี้จะตั้งให้เครื่องทำการวัดทุก ๆ 10 นาที ข้อมูลที่ได้จะถูกบันทึกด้วยคอมพิวเตอร์ในหน่วยของศักย์ไฟฟ้า แล้วนำมาแปลงให้เป็นค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า ในหน่วย $W/m^2\text{-sr}$ ด้วยการหารด้วยค่าการตอบสนอง (sensitivity) ของหัววัด ตัวอย่างข้อมูลที่ได้จากเครื่อง sky scanner แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า ในหน่วย $W/m^2\text{-sr}$ ซึ่งวัดได้จาก sky scanner

1-Jan-15	Cell number							
Time	1	2	3	4	5	6	...	145
6:00:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...	0.00
6:10:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...	0.00
6:20:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...	0.00
6:30:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	...	0.00
6:40:00	1.27	1.06	0.88	0.78	0.72	0.63	...	0.50
6:50:00	5.16	4.32	3.57	3.12	2.78	2.84	...	1.77
7:00:00	12.05	9.99	8.07	7.05	6.40	6.23	...	3.45
7:10:00	19.65	15.99	12.81	10.92	9.91	9.60	...	4.74
7:20:00	27.11	22.07	17.49	14.80	13.45	13.04	...	6.06
7:30:00	34.28	27.67	21.99	18.49	16.86	16.29	...	7.46
7:40:00	40.47	32.80	25.99	21.80	19.77	19.06	...	8.77
7:50:00	46.27	37.34	29.44	24.76	22.34	21.36	...	9.73
8:00:00	51.50	41.59	32.73	27.29	24.56	23.44	...	11.20
8:10:00	56.65	45.46	35.56	29.53	26.55	25.24	...	11.76
8:20:00	60.99	49.08	38.17	31.72	28.40	27.00	...	13.75
8:30:00	65.57	52.42	40.70	33.60	29.90	28.59	...	15.04
8:40:00	69.72	56.12	43.63	35.69	31.51	29.53	...	16.18
8:50:00	73.10	59.11	46.12	37.79	32.98	31.03	...	17.31
9:00:00	76.83	62.44	48.70	39.95	34.90	32.29	...	17.89

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า ในหน่วย W/m^2-sr ซึ่งวัดได้
จาก sky scanner (ต่อ)

1-Jan-15	Cell number							
Time	1	2	3	4	5	6	...	145
9:10:00	80.99	66.38	51.83	42.18	36.41	33.88	...	19.56
9:20:00	84.10	69.36	54.32	43.87	37.78	34.59	...	22.41
9:30:00	86.36	71.54	55.94	45.47	39.10	35.42	...	23.59
9:40:00	90.60	75.42	58.98	47.66	40.75	36.83	...	25.41
9:50:00	93.91	78.61	61.75	49.84	42.69	38.36	...	25.82
10:00:00	96.84	81.71	64.73	52.16	44.20	39.58	...	28.76
10:10:00	99.90	85.39	67.84	54.76	46.33	41.05	...	30.93
10:20:00	103.30	89.37	71.14	57.68	48.40	42.65	...	33.53
10:30:00	106.22	92.43	74.58	60.70	50.68	44.23	...	34.04
10:40:00	108.90	96.61	78.29	63.95	53.38	46.24	...	37.60
10:50:00	112.05	100.12	81.91	66.99	56.08	48.14	...	38.58
11:00:00	113.51	103.58	85.38	70.46	58.93	50.47	...	0.07
11:10:00	115.46	107.59	90.17	74.29	62.60	53.18	...	1.65
11:20:00	117.63	111.73	94.50	78.43	65.71	55.88	...	48.15
11:30:00	119.26	114.82	98.93	82.89	69.74	59.07	...	49.81
11:40:00	118.97	117.20	102.51	87.32	73.44	62.35	...	54.45
11:50:00	119.29	120.07	106.85	91.17	77.01	65.45	...	54.99
12:00:00	119.54	122.20	109.67	94.55	80.62	68.42	...	54.79
12:10:00	119.94	124.59	113.07	98.95	84.61	72.25	...	53.98
12:20:00	118.58	126.56	117.40	103.31	89.55	76.24	...	54.20
12:30:00	118.15	129.04	121.43	107.91	93.40	79.94	...	56.24
12:40:00	117.96	131.26	124.89	112.56	97.72	83.92	...	56.87
12:50:00	117.50	132.65	130.26	119.08	103.97	89.76	...	57.38
13:00:00	114.22	132.19	133.33	124.41	109.83	94.65	...	56.62
13:10:00	112.07	132.19	135.85	131.19	117.05	101.30	...	60.07
13:20:00	111.37	133.18	139.44	136.77	122.62	105.80	...	56.09
13:30:00	108.44	131.97	142.19	142.94	131.62	114.61	...	51.29

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า ในหน่วย $W/m^2 \cdot sr$ ซึ่งวัดได้
จาก sky scanner (ต่อ)

1-Jan-15	Cell number							
Time	1	2	3	4	5	6	...	145
13:40:00	104.15	129.22	139.80	142.06	136.92	120.61	...	49.74
13:50:00	94.41	120.82	136.65	143.34	135.97	121.64	...	44.23
14:00:00	91.84	118.82	137.49	146.19	142.16	128.18	...	40.82
14:10:00	88.26	115.77	139.19	152.30	151.70	137.55	...	39.82
14:20:00	85.80	113.89	138.39	154.87	157.84	143.93	...	38.76
14:30:00	85.21	110.94	135.93	156.78	163.82	152.57	...	38.05
14:40:00	84.43	113.05	138.97	161.60	172.29	162.76	...	33.16
14:50:00	81.05	110.59	137.63	163.79	178.65	172.59	...	33.75
15:00:00	76.63	106.08	134.97	164.83	184.10	181.98	...	27.69
15:10:00	71.27	97.11	128.68	162.63	186.72	188.71	...	24.88
15:20:00	70.80	98.50	128.56	164.85	188.15	194.11	...	26.21
15:30:00	67.64	93.79	125.16	163.73	196.24	205.14	...	22.92
15:40:00	64.20	89.89	120.25	159.77	197.80	213.95	...	21.39
15:50:00	60.82	86.02	115.20	156.15	196.18	218.18	...	20.08
16:00:00	57.80	81.25	109.55	149.41	193.63	220.30	...	18.52
16:10:00	53.73	75.75	103.12	141.66	188.39	222.79	...	15.93
16:20:00	50.33	71.19	96.99	134.40	182.57	232.50	...	14.70
16:30:00	46.52	65.84	90.59	125.28	175.38	239.10	...	12.40
16:40:00	42.40	59.73	82.52	115.17	166.11	249.82	...	11.47
16:50:00	37.27	52.65	72.95	103.12	152.91	261.04	...	10.56
17:00:00	32.46	45.54	63.59	91.15	135.35	261.27	...	9.70
17:10:00	27.76	38.60	53.85	77.05	114.45	241.23	...	8.12
17:20:00	22.41	31.12	42.94	61.91	91.80	197.74	...	5.94
17:30:00	16.63	22.95	31.18	44.19	67.09	141.80	...	4.48
17:40:00	9.57	12.90	17.93	26.37	41.88	82.37	...	2.73
17:50:00	5.68	7.36	9.91	14.07	21.50	37.55	...	1.25
18:00:00	1.94	2.21	2.78	3.62	5.61	8.20	...	0.32

3.1.2 ข้อมูลภาพถ่ายท้องฟ้า

ในการจำแนกสภาพท้องฟ้าสำหรับเลือกข้อมูลเพื่อพัฒนาและทดสอบแบบจำลองความเข้มข้นสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าซึ่งจะพิจารณาเฉพาะกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆนั้น ผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลจากเครื่องถ่ายภาพท้องฟ้า หรือ sky view ที่ทำการถ่ายภาพสภาพท้องฟ้าของสถานีวิจัยทั้ง 2 แห่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.5 และ 3.6 สำหรับสถานีนครปฐมและศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือ จังหวัดเชียงใหม่ ตามลำดับ

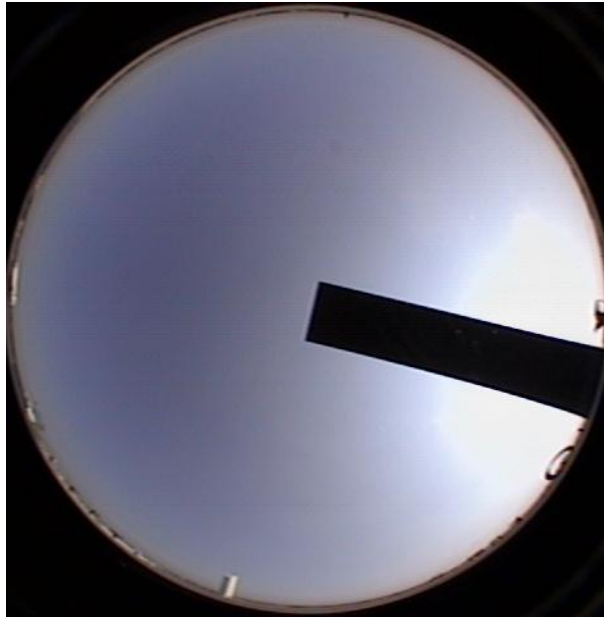


รูปที่ 3.5 เครื่องถ่ายภาพท้องฟ้า (sky view) ซึ่งติดตั้งที่คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม

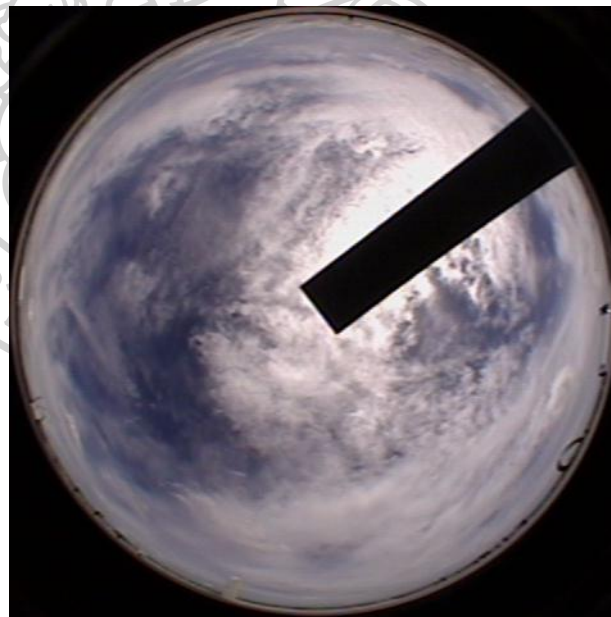


รูปที่ 3.6 เครื่องถ่ายภาพท้องฟ้า (sky view) ซึ่งติดตั้งที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือจังหวัดเชียงใหม่

เครื่องถ่ายภาพท้องฟ้าที่ใช้ผลิตโดยบริษัท Prede (รุ่น PSV-100) ประเทศญี่ปุ่น เครื่องถ่ายภาพท้องฟ้าเป็นกล้องดิจิทัลซึ่งติดตั้งเลนส์ตาปลา (fisheye lens) ซึ่งปิดด้านบนด้วยโดมแก้ว และมีแผ่นโลหะสำหรับบังดวงอาทิตย์เพื่อป้องกันรังสีตรงจากดวงอาทิตย์ไม่ให้ตกกระทบกล้องเพื่อให้ตัวรับภาพกล้องเสียหาย โดยทำการบันทึกภาพท้องฟ้าทุก ๆ 5 นาที ตั้งแต่เวลา 05.00 – 19.00 นาฬิกา ผู้วิจัยทำการเลือกข้อมูลภาพถ่ายให้ตรงกับช่วงเวลาเดียวกันกับข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ได้จากเครื่อง sky scanner ที่เวลา 8.30, 9.30, 10.30, 11.30, 12.30, 13.30, 14.30, 15.30 และ 16.30 นาฬิกา ตามเวลามาตรฐานประเทศไทย ข้อมูลภาพถ่ายท้องฟ้าที่นำมาใช้สำหรับคัดเลือกข้อมูลเพื่อสร้างแบบจำลองจากสถานีนครปฐมอยู่ในช่วงเดือนมกราคม ค.ศ. 2008 ถึง ธันวาคม ค.ศ. 2015 และนำมาใช้เลือกข้อมูลสำหรับทดสอบแบบจำลองจากสถานีเชียงใหม่เป็นข้อมูลในช่วงของเดือนสิงหาคม ค.ศ. 2015 ถึงเดือนสิงหาคม ค.ศ. 2016 ตัวอย่างของภาพถ่ายท้องฟ้าสำหรับกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆและท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน แสดงดังรูปที่ 3.7 และ 3.8 ตามลำดับ



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างภาพถ่ายท้องฟ้าในกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆ ซึ่งทำการถ่ายท้องฟ้าที่สถานี นครปฐม ในวันที่ 16 มีนาคม ค.ศ. 2015 เวลา 15.30 นาฬิกา



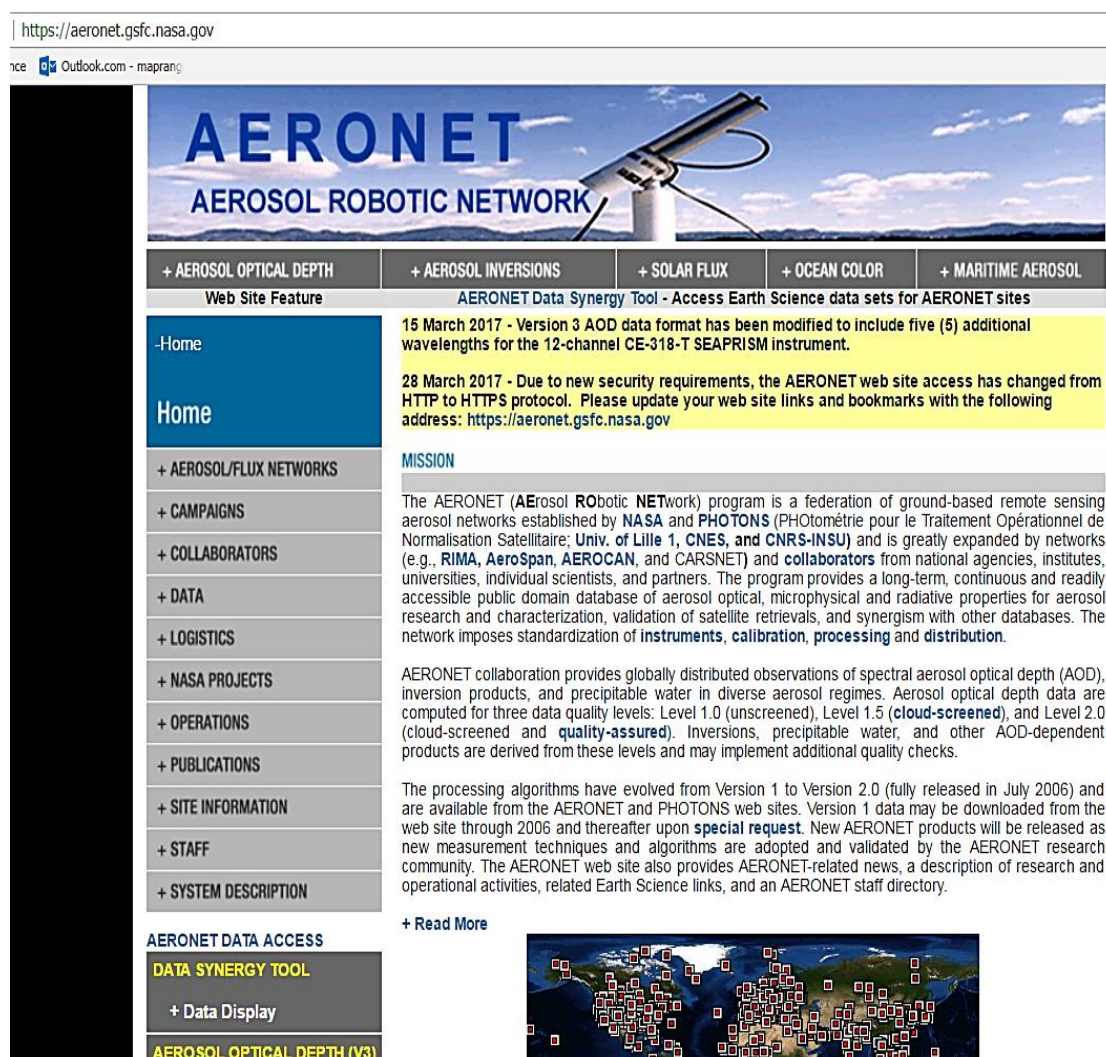
รูปที่ 3.8 ตัวอย่างภาพถ่ายท้องฟ้าในกรณีท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน ซึ่งทำการถ่ายท้องฟ้าที่สถานี นครปฐม ในวันที่ 23 มิถุนายน ค.ศ. 2015 เวลา 13.30 นาฬิกา

3.1.3 ข้อมูลความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง

ความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง (aerosol optical depth, AOD) เป็นตัวแปรที่สำคัญที่นำมาใช้ในการจำแนกสภาพท้องฟ้า โดยใช้ข้อมูลจากเครื่อง sunphotometer ซึ่งเลือกที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร ข้อมูล AOD สามารถดาวน์โหลดได้จากเว็บไซต์ <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/> แสดงดังรูปที่ 3.9 โดยเลือกข้อมูล AOD สถานีวัดนครปฐมในช่วงเดือนมกราคม ค.ศ. 2008 ถึง ธันวาคม ค.ศ. 2015 เพื่อนำมาใช้สร้างแบบจำลอง และค่า AOD ของสถานีเชียงใหม่ในช่วงเดือนสิงหาคม ค.ศ. 2015 ถึง สิงหาคม ค.ศ. 2016 เพื่อทดสอบแบบจำลอง

<https://aeronet.gsfc.nasa.gov>

nce Outlook.com - maprang



AERONET
AEROSOL ROBOTIC NETWORK

+ AEROSOL OPTICAL DEPTH + AEROSOL INVERSIONS + SOLAR FLUX + OCEAN COLOR + MARITIME AEROSOL

Web Site Feature AERONET Data Synergy Tool - Access Earth Science data sets for AERONET sites

-Home

Home

+ AEROSOL/FLUX NETWORKS

+ CAMPAIGNS

+ COLLABORATORS

+ DATA

+ LOGISTICS

+ NASA PROJECTS

+ OPERATIONS

+ PUBLICATIONS

+ SITE INFORMATION

+ STAFF

+ SYSTEM DESCRIPTION

AERONET DATA ACCESS

DATA SYNERGY TOOL

+ Data Display

AEROSOL OPTICAL DEPTH (V3)

15 March 2017 - Version 3 AOD data format has been modified to include five (5) additional wavelengths for the 12-channel CE-318-T SEAPRISM instrument.

28 March 2017 - Due to new security requirements, the AERONET web site access has changed from HTTP to HTTPS protocol. Please update your web site links and bookmarks with the following address: <https://aeronet.gsfc.nasa.gov>

MISSION

The AERONET (AERosol RObotic NETwork) program is a federation of ground-based remote sensing aerosol networks established by NASA and PHOTONS (PHOtométrie pour le Traitement Opérationnel de Normalisation Satellitaire; Univ. of Lille 1, CNES, and CNRS-INSU) and is greatly expanded by networks (e.g., RIMA, AeroSpan, AEROCAN, and CARSNET) and collaborators from national agencies, institutes, universities, individual scientists, and partners. The program provides a long-term, continuous and readily accessible public domain database of aerosol optical, microphysical and radiative properties for aerosol research and characterization, validation of satellite retrievals, and synergism with other databases. The network imposes standardization of instruments, calibration, processing and distribution.

AERONET collaboration provides globally distributed observations of spectral aerosol optical depth (AOD), inversion products, and precipitable water in diverse aerosol regimes. Aerosol optical depth data are computed for three data quality levels: Level 1.0 (unscreened), Level 1.5 (cloud-screened), and Level 2.0 (cloud-screened and quality-assured). Inversions, precipitable water, and other AOD-dependent products are derived from these levels and may implement additional quality checks.

The processing algorithms have evolved from Version 1 to Version 2.0 (fully released in July 2006) and are available from the AERONET and PHOTONS web sites. Version 1 data may be downloaded from the web site through 2006 and thereafter upon special request. New AERONET products will be released as new measurement techniques and algorithms are adopted and validated by the AERONET research community. The AERONET web site also provides AERONET-related news, a description of research and operational activities, related Earth Science links, and an AERONET staff directory.

+ Read More

รูปที่ 3.9 ตัวอย่างเว็บไซต์ <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/> ของ AERONET สำหรับดาวน์โหลดค่า AOD

3.2 การสร้างแบบจำลองสำหรับคำนวณปริมาณรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า

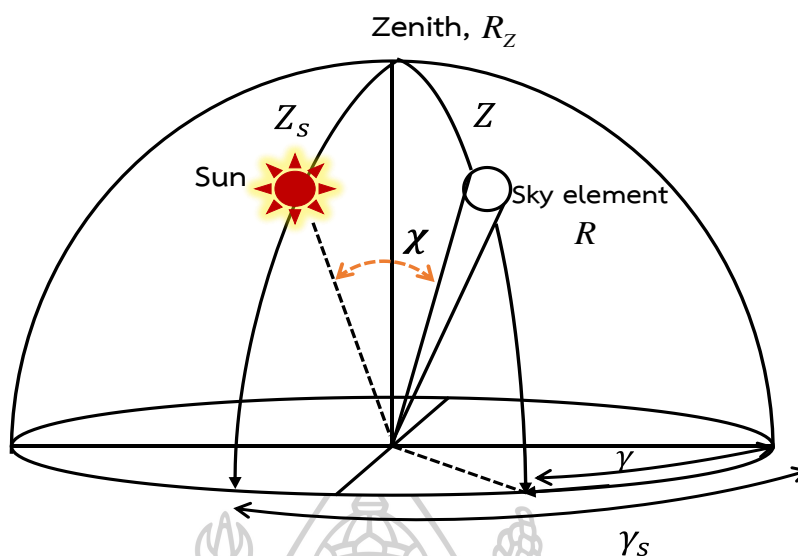
แบบจำลองที่นำมาใช้คำนวณปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า เป็นแบบจำลองซึ่งตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า ในสภาพท้องฟ้าแบบหนึ่ง ปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตำแหน่งหนึ่งบนท้องฟ้าจะขึ้นอยู่กับมุมเซนิตของตำแหน่งที่พิจารณา (Z) มุมเซนิตของดวงอาทิตย์ (Z_s) และระยะห่างเชิงมุมระหว่างดวงอาทิตย์กับตำแหน่งที่พิจารณา (χ) โดยแบบจำลองดังกล่าวเป็นการดัดแปลงแบบจำลองมาตรฐานของ (Uetani et al., 2003) และ (Janjai, 2013) ซึ่งการกระจายของปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าเทียบกับปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตำแหน่งกลางท้องฟ้า สามารถเขียนเป็นผลคูณของ 2 ฟังก์ชัน โดยฟังก์ชันแรก เรียกว่า gradation function ซึ่งขึ้นอยู่กับมุมเซนิตของตำแหน่งที่พิจารณา (Z) และฟังก์ชันที่สอง เรียกว่า indicatrix function ซึ่งขึ้นกับระยะห่างเชิงมุมระหว่างดวงอาทิตย์กับตำแหน่งที่พิจารณา (χ) ซึ่งแสดงไว้ดังแผนภูมิรูปที่ 3.10 และเขียนสมการความสัมพันธ์ได้เป็น

$$\frac{R}{R_z} = \frac{\varphi(Z)}{\varphi(0)} \cdot \frac{f(\chi)}{f(Z_s)} \quad (3.1)$$

โดย ระยะห่างเชิงมุมดวงอาทิตย์กับตำแหน่งที่พิจารณา คำนวณได้ดังสมการ

$$\chi = \cos(\cos Z_s \cos Z + \sin Z_s \sin Z \cos|\gamma - \gamma_s|) \quad (3.2)$$

- เมื่อ
- R คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า [$\text{W/m}^2\text{-sr}$]
 - R_z คือ ความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าที่ตำแหน่งกลางท้องฟ้า [$\text{W/m}^2\text{-sr}$]
 - Z_s คือ มุมเซนิตของดวงอาทิตย์ [rad]
 - Z คือ มุมเซนิตของตำแหน่งบนท้องฟ้าที่พิจารณา [rad]
 - χ คือ ระยะเชิงมุมระหว่างตำแหน่งของท้องฟ้ากับตำแหน่งดวงอาทิตย์ [rad]
 - γ คือ มุมอาซิมุทของตำแหน่งบนท้องฟ้าที่พิจารณา [rad]
 - γ_s คือ มุมอาซิมุทของตำแหน่งดวงอาทิตย์ [rad]
 - $\varphi(Z)/\varphi(0)$ คือ gradation function ซึ่งขึ้นกับมุมเซนิตของตำแหน่งบนท้องฟ้าที่ทำการหาความเข้มรังสีอาทิตย์
 - $f(\chi)/f(Z_s)$ คือ indicatrix function ซึ่งขึ้นกับระยะห่างเชิงมุมระหว่างตำแหน่งบนท้องฟ้าที่พิจารณากับกับตำแหน่งดวงอาทิตย์



รูปที่ 3.10 ตำแหน่งของดวงอาทิตย์และตำแหน่งของท้องฟ้าที่พิจารณา (sky element) ที่จะหาปริมาณรังสีอาทิตย์ตามแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดย Z เป็นมุมเซนิตของมุมที่พิจารณา Z_s เป็นมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ χ เป็นมุมระหว่างตำแหน่งบนท้องฟ้าที่พิจารณากับตำแหน่งดวงอาทิตย์ γ_s เป็นมุมอซิมูทของดวงอาทิตย์ γ เป็นมุมอซิมูทของตำแหน่งที่พิจารณา (Uetani et al., 2003)

ในการหาอัตราส่วนระหว่างความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าที่ตำแหน่งพิจารณาเทียบกับตำแหน่งกลางท้องฟ้า R/R_z ผู้วิจัยจะทำการจัดกลุ่มข้อมูลซึ่งจำแนกสภาพท้องฟ้าตาม AOD และนำมาวิเคราะห์เพื่อหาฟังก์ชัน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ และ $f(\chi)/f(Z_s)$ โดยมีขั้นตอนการหาฟังก์ชันดังกล่าวตามรายละเอียดดังนี้

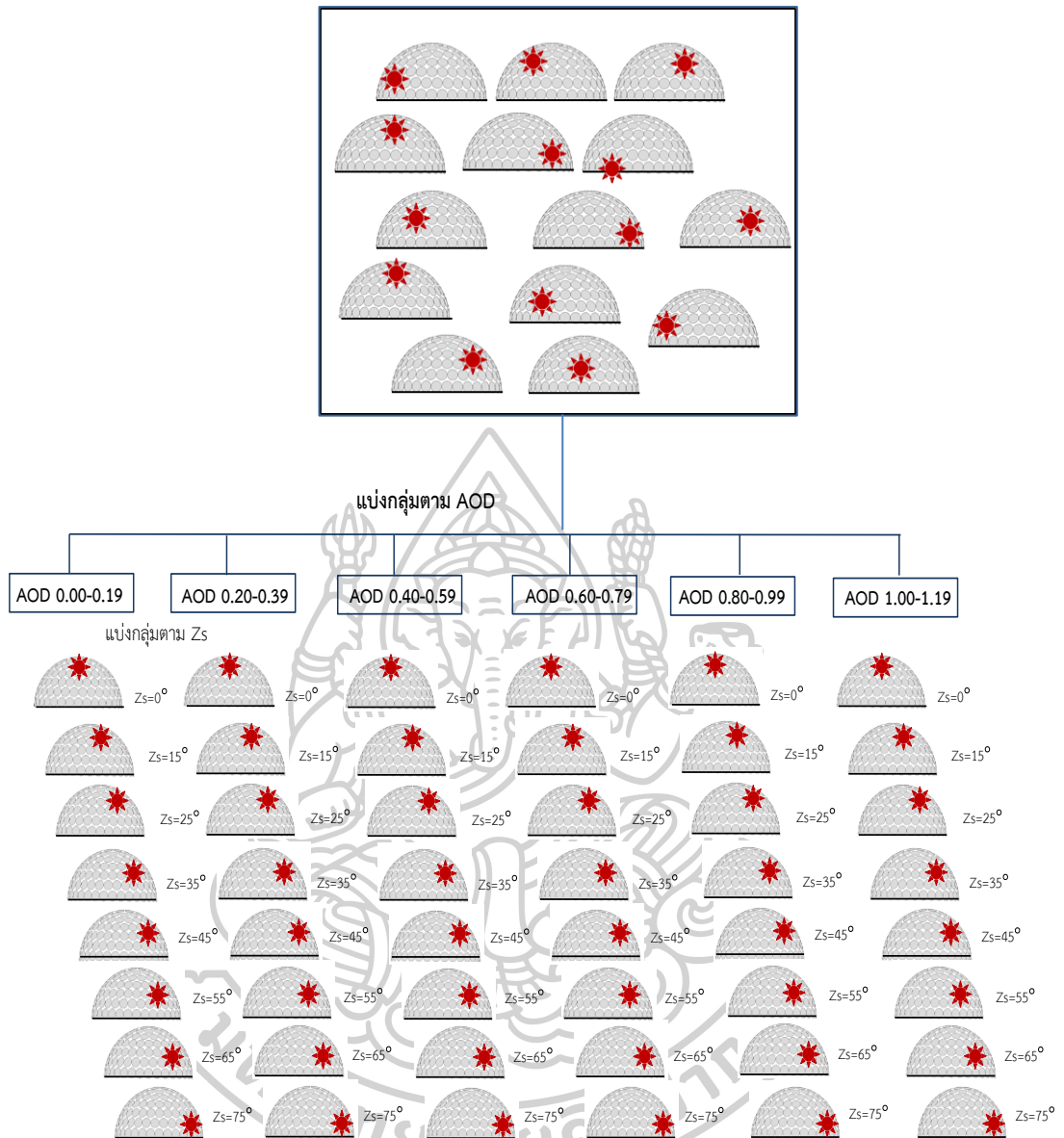
3.2.1 การจัดกลุ่มข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า

ในการจัดกลุ่มข้อมูล ผู้วิจัยนำข้อมูลรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า ในช่วงเวลาที่ทำในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆ ในช่วงเดือน มกราคม ค.ศ. 2008– ธันวาคม ค.ศ. 2015 และข้อมูล AOD ในช่วงเวลาเดียวกันความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า มาแบ่งกลุ่มโดยแบ่งตาม AOD ออกเป็น 6 กลุ่ม ได้แก่ค่า AOD อยู่ในช่วง 0.00-0.19, 0.20-0.39, 0.40-0.59, 0.60-0.79, 0.80-0.99 และ 1.00-1.19 โดยค่า AOD ที่แตกต่างกันสามารถใช้ในการจำแนกสภาพท้องฟ้า กล่าวคือ ค่า AOD ในช่วง 0.00-0.19 แสดงถึงสภาพท้องฟ้าที่ปราศจากเมฆและท้องฟ้าไม่มีความขุ่นมัว ค่า AOD ในช่วง 0.40-0.59 เป็นสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆแต่มีความขุ่นมัว (turbidity) ในบรรยากาศ และที่ AOD อยู่ในช่วง 1.00-1.19 เป็นสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆที่มีความขุ่นมัวใน

บรรยากาศมากที่สุด จากการแบ่งกลุ่มดังกล่าวจะทำให้ได้กลุ่มของข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าตามสภาพความขุ่นมัวในบรรยากาศในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆ 6 กลุ่ม

จากนั้นนำข้อมูลแต่ละกลุ่มมาแบ่งกลุ่มย่อยตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์ซึ่งบอกด้วยมุมเซนติวดวงอาทิตย์โดยแบ่งออกเป็น 8 กลุ่มย่อย ดวงอาทิตย์มีตำแหน่งอยู่ในช่วง $0^\circ < Z_s \leq 10^\circ$, $10^\circ < Z_s \leq 20^\circ$, $20^\circ < Z_s \leq 30^\circ$, $30^\circ < Z_s \leq 40^\circ$, $40^\circ < Z_s \leq 50^\circ$, $50^\circ < Z_s \leq 60^\circ$, $60^\circ < Z_s \leq 70^\circ$, $Z_s > 75^\circ$ การจัดกลุ่มข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าดังกล่าวสรุปได้ดังแผนภูมิรูปที่ 3.11

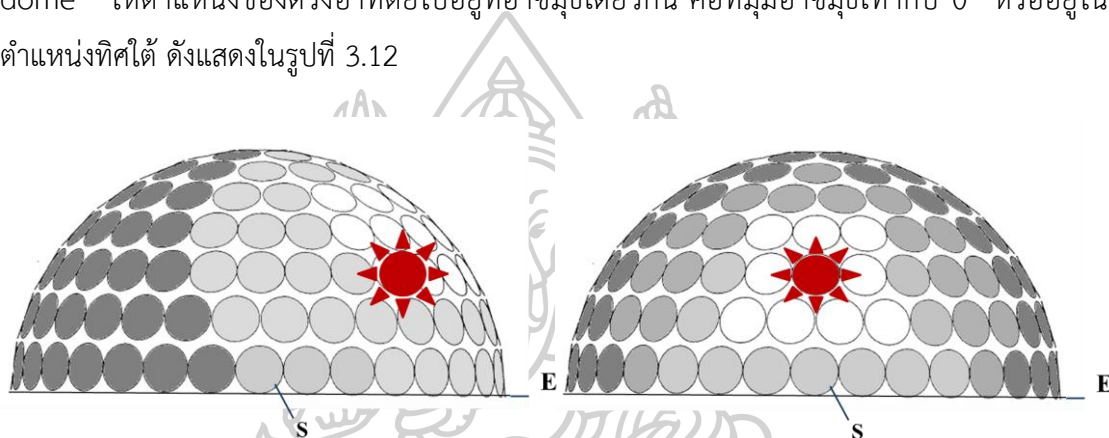




รูปที่ 3.11 การจัดกลุ่มข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า ในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆ ซึ่งบอกด้วยค่า AOD และแบ่งตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์ที่บอกด้วยค่ามุมเซนธิสของดวงอาทิตย์ (Z_s) ค่า Z_s เป็นค่ากึ่งกลางช่วง เช่น $Z_s = 25^\circ$ หมายถึงข้อมูลที่ Z_s อยู่ในช่วง $Z_s = 20^\circ$ ถึง $Z_s = 30^\circ$ (เสริม จันทร์ฉาย, 2547)

3.2.2 การหาค่าเฉลี่ยปริมาณรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า

ในการสร้างแบบจำลองนี้ไม่ได้ใช้สำหรับคำนวณปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าในเวลาใดเวลาหนึ่ง แต่เป็นค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ระยะยาว ดังนั้นจึงต้องทำการเฉลี่ยข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า ซึ่งกระบวนการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ทำให้การแบ่งกลุ่มดังที่กล่าวไปในหัวข้อ 3.2.1 ไม่สามารถหาค่าเฉลี่ยได้โดยตรง ทั้งนี้เพราะที่กลุ่มข้อมูลที่ค่า AOD ค่าหนึ่ง และ Z_s ค่าหนึ่ง ดวงอาทิตย์อาจอยู่ที่ตำแหน่งอาซิมุทต่าง ๆ กัน ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการแก้ปัญหาโดยทำการหมุนชุดข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง sky scanner ทุกเซลล์บน sky dome ให้ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ไปอยู่ที่อาซิมุทเดียวกัน คือที่มุมอาซิมุทเท่ากับ 0° หรืออยู่ในตำแหน่งทิศใต้ ดังแสดงในรูปที่ 3.12



ก) ชุดข้อมูลที่ได้จากเครื่อง sky scanner

ข) ชุดข้อมูลที่หมุนให้ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ไปยังทิศใต้

รูปที่ 3.12 การหมุนเซลล์ข้อมูลปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าใน sky dome ให้ดวงอาทิตย์ไปอยู่ทางทิศใต้ (เสริม จันทร์ฉาย, 2547)

หลังจากทำการหมุนชุดข้อมูลปริมาณรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าไปทางทิศใต้เรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยจึงทำการเฉลี่ยข้อมูลปริมาณรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าแบบเซลล์ต่อเซลล์ในแต่ละกลุ่มของค่า AOD เดียวกัน และมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ที่กลุ่มเดียวกัน ทำให้ได้เป็นค่าเฉลี่ยของความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า จำนวน 145 เซลล์ต่อ 1 sky dome ที่ค่า AOD และ Z_s หนึ่งชุด ของข้อมูลในแต่ละเดือน โดยตัวอย่างของข้อมูลเดือนมกราคม ค.ศ. 2008 แสดงดังรูปที่ 3.13

data	$Z_s = 0^\circ$	$Z_s = 15^\circ$	$Z_s = 25^\circ$	$Z_s = 35^\circ$...	$Z_s = 75^\circ$
1 Jan 2008					...	
2 Jan 2008					...	
3 Jan 2008					...	
4 Jan 2008					...	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
31 Jan 2008					...	
AVERAGE					...	

รูปที่ 3.13 ตัวอย่างการเฉลี่ยข้อมูลปริมาณรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า แบบเซลล์ต่อเซลล์ กรณีค่า AOD อยู่ในช่วง 0.00 - 0.19 (เสริม จันทร์ฉาย, 2547)

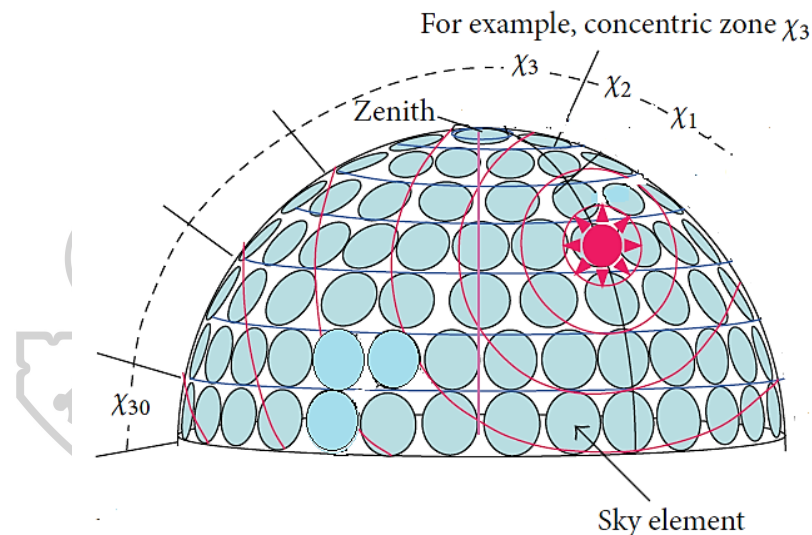
3.2.3 การแบ่งข้อมูลเพื่อใช้แยกฟังก์ชัน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ ออกจาก $f(\chi)/f(Z_s)$

ถึงแม้ว่าค่า R/R_z ในสมการ 3.1 จะขึ้นกับ $\varphi(Z)/\varphi(0)$ และ $f(\chi)/f(Z_s)$ แต่จากการแบ่งกลุ่มของข้อมูล สามารถหาค่า R/R_z ซึ่งขึ้นกับฟังก์ชัน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ หรือ $f(\chi)/f(Z_s)$ ได้เพียงอย่างเดียว ซึ่งในงานนี้จะใช้วิธีการนำข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ได้ทำการเฉลี่ยแล้วมาจัดแบ่งเป็นโซน (zone) เพื่อนำข้อมูลไปใช้หาฟังก์ชัน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ จะแบ่งข้อมูลเป็นโซนตามค่าระยะเชิงมุมระหว่างตำแหน่งบนท้องฟ้ากับดวงอาทิตย์ (χ) และในกรณีการนำข้อมูลไปหาฟังก์ชัน $f(\chi)/f(Z_s)$ จะแบ่งข้อมูลเป็นโซนตามค่ามุมเซนติ (Z)

3.2.3.1 การแบ่งโซนของเซลล์ข้อมูลเพื่อใช้แยกฟังก์ชัน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ ออกจาก $f(\chi)/f(Z_s)$

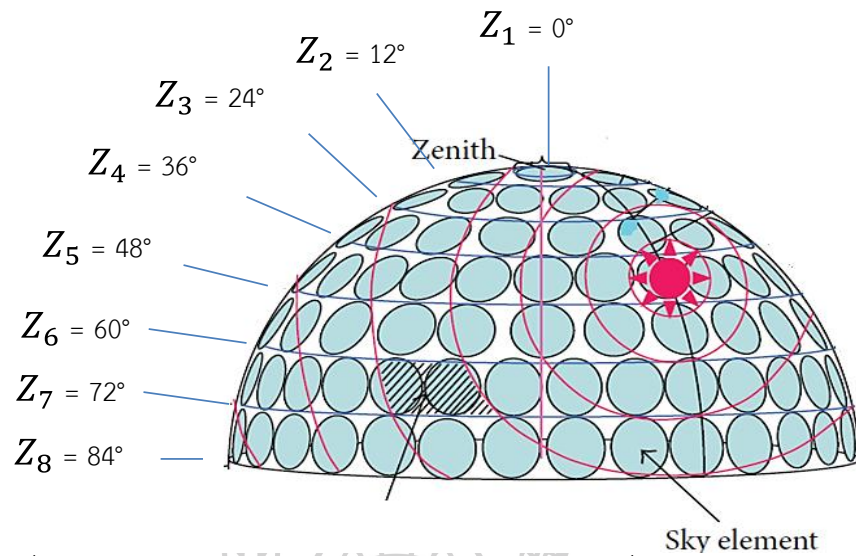
จากค่าเฉลี่ยของปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าที่แต่ละ sky dome ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.2.2 ซึ่งแยก sky dome ในแต่ละช่วงของค่า AOD ทั้งหมด 6 กลุ่ม และ

แบ่งตามมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ Z_s เท่ากับ $0^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 35^\circ, 45^\circ, 55^\circ, 65^\circ$ และ 75° แล้วนั้น ในการหาฟังก์ชัน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ ผู้วิจัยทำการแบ่งโซนข้อมูลใน sky dome ตามค่า χ ที่ค่าต่าง ๆ แต่เนื่องจากเซลล์ของข้อมูลที่ค่า χ คงที่ไม่ได้เรียงต่อกันเป็นระเบียบและอาจผ่านช่องข้อมูลในแนว Z ก็ได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการแบ่งช่วงของค่า χ ออกเป็นโซนจำนวน 30 โซนคิดจากศูนย์กลางของดวงอาทิตย์ แบ่งออกเป็นช่วง ๆ ได้แก่ $5^\circ \leq \chi \leq 10^\circ, 10^\circ < \chi \leq 15^\circ, 15^\circ < \chi \leq 20^\circ, 20^\circ < \chi \leq 25^\circ, 25^\circ < \chi \leq 30^\circ, 30^\circ < \chi \leq 35^\circ, 35^\circ < \chi \leq 40^\circ, 40^\circ < \chi \leq 45^\circ, 45^\circ < \chi \leq 50^\circ, 50^\circ < \chi \leq 55^\circ, 55^\circ < \chi \leq 60^\circ, 60^\circ < \chi \leq 65^\circ, 65^\circ < \chi \leq 70^\circ, 70^\circ < \chi \leq 75^\circ, 75^\circ < \chi \leq 80^\circ, 80^\circ < \chi \leq 85^\circ, 85^\circ < \chi \leq 90^\circ, 90^\circ < \chi \leq 95^\circ, 95^\circ < \chi \leq 100^\circ, 100^\circ < \chi \leq 105^\circ, 105^\circ < \chi \leq 110^\circ, 110^\circ < \chi \leq 115^\circ, 115^\circ < \chi \leq 120^\circ, 120^\circ < \chi \leq 125^\circ, 125^\circ < \chi \leq 130^\circ, 130^\circ < \chi \leq 135^\circ, 135^\circ < \chi \leq 140^\circ, 140^\circ < \chi \leq 145^\circ, 145^\circ < \chi \leq 150^\circ$ และ $150^\circ < \chi \leq 155^\circ$ การแบ่งโซนข้อมูลใน Sky dome ตามค่า χ แสดงดังตัวอย่างในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ตัวอย่างการแบ่งค่า χ ออกเป็นโซน ในกรณีของ $Z_s = 30^\circ$, AOD อยู่ในช่วง 0.00 – 0.19 (Janjai S, 2013)

เนื่องจากเซลล์ข้อมูลในแนว Z จะอยู่ตามค่าของ Z อย่างแน่นอน ดังนั้นในกรณีของการหา $f(\chi)/f(Z_s)$ ผู้วิจัยจะทำการแบ่งโซนของข้อมูลตามแนว Z คงที่ค่าต่าง ๆ ออกเป็น 8 โซน ได้แก่ $0^\circ, 12^\circ, 24^\circ, 36^\circ, 48^\circ, 60^\circ, 72^\circ$ และ 84° ตามแนวสแกนของเครื่องวัด sky scanner แสดงดังรูป 3.15

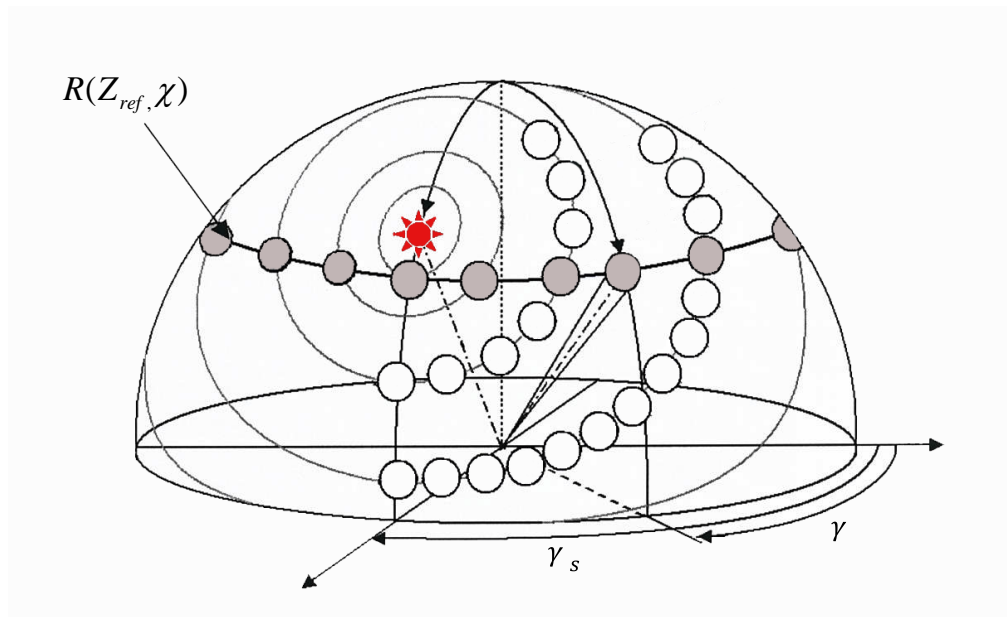


รูปที่ 3.15 ตัวอย่างการแบ่งโซนของข้อมูลตามแนว Z คงที่ค่าต่าง ๆ ในกรณีของ $Z_s = 35$, AOD อยู่ในช่วง 0.00 – 0.19 (Janjai S, 2013)

3.2.3.2 การเตรียมข้อมูลสำหรับฟังก์ชัน $\varphi(Z)/\varphi(0)$

หลังจากที่ได้ทำการแบ่งโซนของข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยจะทำการเตรียมข้อมูลเป็นตารางสำหรับนำไปใช้หาค่าฟังก์ชัน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ การกำหนดค่าปริมาณรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าของเซลล์อ้างอิง $R(Z_{ref})$ ซึ่งเซลล์อ้างอิงเป็นเซลล์ที่จุดตัดของโซนที่แบ่งตามแนว Z และแบ่งตาม χ ดังรูปที่ 3.14

เนื่องจากข้อมูลตามโซนของ χ ที่ Z คงที่ค่าหนึ่ง อาจมีข้อมูลได้หลายเซลล์ ดังนั้นจึงต้องทำการเฉลี่ยข้อมูลในเซลล์เหล่านั้น แล้วใช้เป็นตัวแทนเพื่อเขียนค่าลงในตารางทั้งกรณีของเซลล์ข้อมูลทั่วไปและเซลล์ข้อมูลอ้างอิง ดังตัวอย่างของกรณี $AOD = AOD_1$ และ $Z_s = Z_1$



รูปที่ 3.16 การแบ่งข้อมูลปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า (R) ออกเป็นโซนตามช่วงของมูม χ และการกำหนดตำแหน่งของเซลล์อ้างอิงตามแนว $Z (Z_{ref})$ เพื่อเอาค่า R ตามโซนของ χ ไปหารด้วย $R (Z_{ref})$ สำหรับกำจัดฟังก์ชัน $f(\chi)/f(Z_s)$ (เสริม จันทร์ฉาย, 2547)

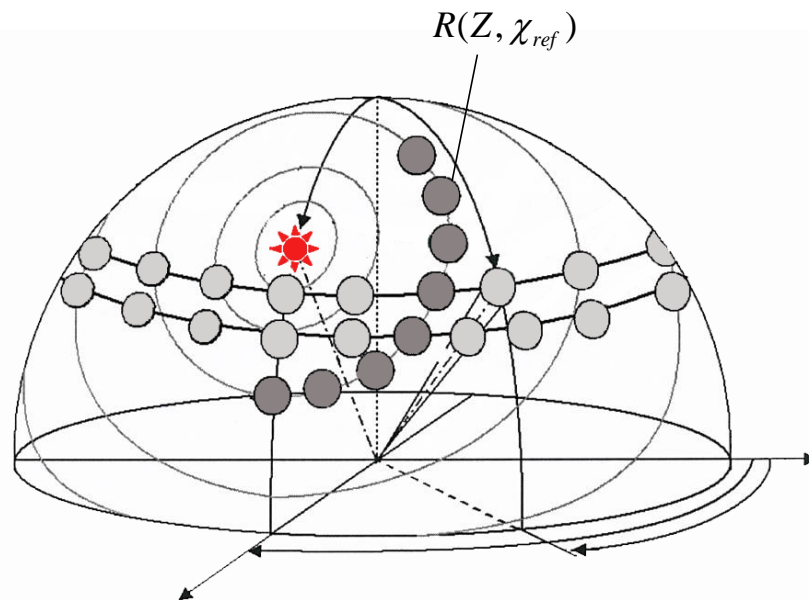


ตารางที่ 3. 2 ตัวอย่างการจัดข้อมูลปริมาณรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า (R) ที่ค่า χ คงที่เท่ากับ χ_1 ถึง χ_{30} โดยแต่ละ χ จะมีค่า Z แปรค่าจาก Z_1 ถึง Z_8 โดย R_{ref} เป็นความเข้มรังสีอาทิตย์บนท้องฟ้าที่ตำแหน่งอ้างอิง Z_{ref} ชุดข้อมูลดังกล่าวเป็นกลุ่มข้อมูลกรณี AOD = AOD₁ และ $Z_S = Z_{S_1}$

χ	ข้อมูลแสดงปริมาณรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า (R)							
	$Z=Z_1$	$Z=Z_2$	$Z=Z_3$	$Z=Z_{ref}$	$Z=Z_5$	$Z=Z_6$	$Z=Z_7$	$Z=Z_8$
$\chi = \chi_1$	$R_{1,1}$	$R_{2,1}$	$R_{3,1}$	$R_{ref,1}$	$R_{5,1}$	$R_{6,1}$	$R_{7,1}$	$R_{8,1}$
$\chi = \chi_2$	$R_{1,2}$	$R_{2,2}$	$R_{3,2}$	$R_{ref,2}$	$R_{5,2}$	$R_{6,2}$	$R_{7,2}$	$R_{8,2}$
$\chi = \chi_3$	$R_{1,3}$	$R_{2,3}$	$R_{3,3}$	$R_{ref,3}$	$R_{5,3}$	$R_{6,3}$	$R_{7,3}$	$R_{8,3}$
$\chi = \chi_4$	$R_{1,4}$	$R_{2,4}$	$R_{3,4}$	$R_{ref,4}$	$R_{5,4}$	$R_{6,4}$	$R_{7,4}$	$R_{8,4}$
$\chi = \chi_5$	$R_{1,5}$	$R_{2,5}$	$R_{3,5}$	$R_{ref,5}$	$R_{5,5}$	$R_{6,5}$	$R_{7,5}$	$R_{8,5}$
$\chi = \chi_6$	$R_{1,6}$	$R_{2,6}$	$R_{3,6}$	$R_{ref,6}$	$R_{5,6}$	$R_{6,6}$	$R_{7,6}$	$R_{8,6}$
$\chi = \chi_7$	$R_{1,7}$	$R_{2,7}$	$R_{3,7}$	$R_{ref,7}$	$R_{5,7}$	$R_{6,7}$	$R_{7,7}$	$R_{8,7}$
$\chi = \chi_8$	$R_{1,8}$	$R_{2,8}$	$R_{3,8}$	$R_{ref,8}$	$R_{5,8}$	$R_{6,8}$	$R_{7,8}$	$R_{8,8}$
$\chi = \chi_9$	$R_{1,9}$	$R_{2,9}$	$R_{3,9}$	$R_{ref,9}$	$R_{5,9}$	$R_{6,9}$	$R_{7,9}$	$R_{8,9}$
$\chi = \chi_{10}$	$R_{1,10}$	$R_{2,10}$	$R_{3,10}$	$R_{ref,10}$	$R_{5,10}$	$R_{6,10}$	$R_{7,10}$	$R_{8,10}$
$\chi = \chi_{11}$	$R_{1,11}$	$R_{2,11}$	$R_{3,11}$	$R_{ref,11}$	$R_{5,11}$	$R_{6,11}$	$R_{7,11}$	$R_{8,11}$
$\chi = \chi_{12}$	$R_{1,12}$	$R_{2,12}$	$R_{3,12}$	$R_{ref,12}$	$R_{5,12}$	$R_{6,12}$	$R_{7,12}$	$R_{8,12}$
$\chi = \chi_{13}$	$R_{1,13}$	$R_{2,13}$	$R_{3,13}$	$R_{ref,13}$	$R_{5,13}$	$R_{6,13}$	$R_{7,13}$	$R_{8,13}$
$\chi = \chi_{14}$	$R_{1,14}$	$R_{2,14}$	$R_{3,14}$	$R_{ref,14}$	$R_{5,14}$	$R_{6,14}$	$R_{7,14}$	$R_{8,14}$
$\chi = \chi_{15}$	$R_{1,15}$	$R_{2,15}$	$R_{3,15}$	$R_{ref,15}$	$R_{5,15}$	$R_{6,15}$	$R_{7,15}$	$R_{8,15}$
$\chi = \chi_{16}$	$R_{1,16}$	$R_{2,16}$	$R_{3,16}$	$R_{ref,16}$	$R_{5,16}$	$R_{6,16}$	$R_{7,16}$	$R_{8,16}$
$\chi = \chi_{17}$	$R_{1,17}$	$R_{2,17}$	$R_{3,17}$	$R_{ref,17}$	$R_{5,17}$	$R_{6,17}$	$R_{7,17}$	$R_{8,17}$
$\chi = \chi_{18}$	$R_{1,18}$	$R_{2,18}$	$R_{3,18}$	$R_{ref,18}$	$R_{5,18}$	$R_{6,18}$	$R_{7,18}$	$R_{8,18}$
$\chi = \chi_{19}$	$R_{1,19}$	$R_{2,19}$	$R_{3,19}$	$R_{ref,19}$	$R_{5,19}$	$R_{6,19}$	$R_{7,19}$	$R_{8,19}$
$\chi = \chi_{20}$	$R_{1,20}$	$R_{2,20}$	$R_{3,20}$	$R_{ref,20}$	$R_{5,20}$	$R_{6,20}$	$R_{7,20}$	$R_{8,20}$
$\chi = \chi_{21}$	$R_{1,21}$	$R_{2,21}$	$R_{3,21}$	$R_{ref,21}$	$R_{5,21}$	$R_{6,21}$	$R_{7,21}$	$R_{8,21}$
$\chi = \chi_{22}$	$R_{1,22}$	$R_{2,22}$	$R_{3,22}$	$R_{ref,22}$	$R_{5,22}$	$R_{6,22}$	$R_{7,22}$	$R_{8,22}$
$\chi = \chi_{23}$	$R_{1,23}$	$R_{2,23}$	$R_{3,23}$	$R_{ref,23}$	$R_{5,23}$	$R_{6,23}$	$R_{7,23}$	$R_{8,23}$
$\chi = \chi_{24}$	$R_{1,24}$	$R_{2,24}$	$R_{3,24}$	$R_{ref,24}$	$R_{5,24}$	$R_{6,24}$	$R_{7,24}$	$R_{8,24}$
$\chi = \chi_{25}$	$R_{1,25}$	$R_{2,25}$	$R_{3,25}$	$R_{ref,25}$	$R_{5,25}$	$R_{6,25}$	$R_{7,25}$	$R_{8,25}$
$\chi = \chi_{26}$	$R_{1,26}$	$R_{2,26}$	$R_{3,26}$	$R_{ref,26}$	$R_{5,26}$	$R_{6,26}$	$R_{7,26}$	$R_{8,26}$
$\chi = \chi_{27}$	$R_{1,27}$	$R_{2,27}$	$R_{3,27}$	$R_{ref,27}$	$R_{5,27}$	$R_{6,27}$	$R_{7,27}$	$R_{8,27}$
$\chi = \chi_{28}$	$R_{1,28}$	$R_{2,28}$	$R_{3,28}$	$R_{ref,28}$	$R_{5,28}$	$R_{6,28}$	$R_{7,28}$	$R_{8,28}$
$\chi = \chi_{29}$	$R_{1,29}$	$R_{2,29}$	$R_{3,29}$	$R_{ref,29}$	$R_{5,29}$	$R_{6,29}$	$R_{7,29}$	$R_{8,29}$
$\chi = \chi_{30}$	$R_{1,30}$	$R_{2,30}$	$R_{3,30}$	$R_{ref,30}$	$R_{5,30}$	$R_{6,30}$	$R_{7,30}$	$R_{8,30}$

3.2.3.3 การเตรียมข้อมูลสำหรับหาฟังก์ชัน $f(\chi)/f(Z_s)$

กรณีของข้อมูลสำหรับหา $f(\chi)/f(Z_s)$ ผู้วิจัยจะทำการกำหนดเซลล์อ้างอิงเช่นเดียวกันกับกรณีของฟังก์ชัน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ ดังแสดงในรูปที่ 3.17 จากนั้นจะนำข้อมูลที่แบ่งเป็นโซนแล้วมาเขียนลงตาราง ดังตัวอย่างในตารางที่ 3.3 ซึ่งเป็นกรณีของ $AOD = AOD_1$ และ $Z_s = Z_{s_1}$



รูปที่ 3.17 การแบ่งข้อมูลปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า (R) ออกเป็นโซนตามช่วงของมุม Z และกำหนดตำแหน่งของเซลล์อ้างอิงตามแนว χ เพื่อเอาค่าของ R ตามโซนของ Z ไปหาร $R(Z_i, \chi_{ref})$ สำหรับกำจัด $\varphi(Z)/\varphi(0)$ (เสริม จันทร์ฉาย, 2547)

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลปริมาณรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า (R) ที่ค่า Z คงที่ เท่ากับ Z_1 ถึง Z_8 โดยแต่ละ Z จะมีค่า χ ที่แปรค่าจาก χ_1 ถึง χ_{30} ทั้งนี้เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์หา $f(\chi)/f(Zs)$ โดยข้อมูลในตารางเป็นชุดข้อมูลกรณี AOD = AOD₁ และ $Zs = Zs_1$

Z	$\chi = \chi_1$	$\chi = \chi_2$	$\chi = \chi_3$	$\chi = \chi_{ref}$	$\chi = \chi_5$	$\chi = \chi_6$	$\chi = \chi_7$	$\chi = \chi_8$	...	$\chi = \chi_{30}$
$Z = Z_1$	$R_{1,1}$	$R_{1,2}$	$R_{1,3}$	$R_{1,ref}$	$R_{1,5}$	$R_{1,6}$	$R_{1,7}$	$R_{1,8}$	...	$R_{1,30}$
$Z = Z_2$	$R_{2,1}$	$R_{2,2}$	$R_{2,3}$	$R_{2,ref}$	$R_{2,5}$	$R_{2,6}$	$R_{2,7}$	$R_{2,8}$	...	$R_{2,30}$
$Z = Z_3$	$R_{3,1}$	$R_{3,2}$	$R_{3,3}$	$R_{3,ref}$	$R_{3,5}$	$R_{3,6}$	$R_{3,7}$	$R_{3,8}$	...	$R_{3,30}$
$Z = Z_4$	$R_{4,1}$	$R_{4,2}$	$R_{4,3}$	$R_{4,ref}$	$R_{4,5}$	$R_{4,6}$	$R_{4,7}$	$R_{4,8}$	...	$R_{4,30}$
$Z = Z_5$	$R_{5,1}$	$R_{5,2}$	$R_{5,3}$	$R_{5,ref}$	$R_{5,5}$	$R_{5,6}$	$R_{5,7}$	$R_{5,8}$	...	$R_{5,30}$
$Z = Z_6$	$R_{6,1}$	$R_{6,2}$	$R_{6,3}$	$R_{6,ref}$	$R_{6,5}$	$R_{6,6}$	$R_{6,7}$	$R_{6,8}$	...	$R_{6,30}$
$Z = Z_7$	$R_{7,1}$	$R_{7,2}$	$R_{7,3}$	$R_{7,ref}$	$R_{7,5}$	$R_{7,6}$	$R_{7,7}$	$R_{7,8}$	...	$R_{7,30}$
$Z = Z_8$	$R_{8,1}$	$R_{8,2}$	$R_{8,3}$	$R_{8,ref}$	$R_{8,5}$	$R_{8,6}$	$R_{8,7}$	$R_{8,8}$	...	$R_{8,30}$

3.2.3.4 การวิเคราะห์หาฟังก์ชัน $\varphi(Z)/\varphi(0)$

ผู้วิจัยนำข้อมูลจากตารางที่ 3.2 สำหรับค่าของฟังก์ชัน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ มากำหนดเซลล์อ้างอิง แล้วนำค่าปริมาณรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า ในตารางไปแทนในแบบจำลองตามสมการที่ (3.1) ที่มีค่า Z ต่าง ๆ ยกตัวอย่าง เช่น กรณีตารางข้อมูลที่ AOD = AOD₁, $Zs = Zs_1$ และ $\chi = \chi_1$ ดังสมการที่ (3.3 - 3.10)

$$\text{ที่ } \chi = \chi_1, Z = Z_1 \quad \frac{R(Z_1, \chi_1)}{R_Z} = \frac{\varphi(Z_1)}{\varphi(0)} \cdot \frac{f(\chi_1)}{f(Zs_1)} \quad (3.3)$$

$$\text{ที่ } \chi = \chi_1, Z = Z_2 \quad \frac{R(Z_2, \chi_1)}{R_Z} = \frac{\varphi(Z_2)}{\varphi(0)} \cdot \frac{f(\chi_1)}{f(Zs_1)} \quad (3.4)$$

$$\text{ที่ } \chi = \chi_1, Z = Z_3 \quad \frac{R(Z_3, \chi_1)}{R_Z} = \frac{\varphi(Z_3)}{\varphi(0)} \cdot \frac{f(\chi_1)}{f(Zs_1)} \quad (3.5)$$

$$\text{ที่ } \chi = \chi_1, Z = Z_{ref} \quad \frac{R_{ref}(Z_{ref}, \chi_1)}{R_Z} = \frac{\varphi(Z_{ref})}{\varphi(0)} \cdot \frac{f(\chi_1)}{f(Zs_1)} \quad (3.6)$$

$$\text{ที่ } \chi = \chi_1, Z = Z_5 \quad \frac{R(Z_5, \chi_1)}{R_Z} = \frac{\varphi(Z_5)}{\varphi(0)} \cdot \frac{f(\chi_1)}{f(Z_{S_1})} \quad (3.7)$$

$$\text{ที่ } \chi = \chi_1, Z = Z_6 \quad \frac{R(Z_6, \chi_1)}{R_Z} = \frac{\varphi(Z_6)}{\varphi(0)} \cdot \frac{f(\chi_1)}{f(Z_{S_1})} \quad (3.8)$$

$$\text{ที่ } \chi = \chi_1, Z = Z_7 \quad \frac{R(Z_7, \chi_1)}{R_Z} = \frac{\varphi(Z_7)}{\varphi(0)} \cdot \frac{f(\chi_1)}{f(Z_{S_1})} \quad (3.9)$$

$$\text{ที่ } \chi = \chi_1, Z = Z_8 \quad \frac{R(Z_8, \chi_1)}{R_Z} = \frac{\varphi(Z_8)}{\varphi(0)} \cdot \frac{f(\chi_1)}{f(Z_{S_1})} \quad (3.10)$$

จากสมการที่ (3.3) ถึง (3.10) จะเห็นว่าเทอมที่ 2 ของด้านขวามือมีค่าเท่ากันหมดคือเท่ากับ $f(\chi)/f(Z_S)$ ดังนั้นถ้านำสมการที่ (3.3) ถึง (3.10) ทหารด้วยสมการที่ (3.6) ซึ่งเป็นสมการอ้างอิง จะเห็นว่าเทอมที่สองด้านขวามือตัดกันหมดสามารถกำจัดฟังก์ชัน $f(\chi)/f(Z_S)$ ออกไปได้ และจะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง R กับ Z ดังสมการ

$$\frac{R(Z_1, \chi_1)}{R_Z(Z_{ref}, \chi_1)} = \frac{\varphi(Z_1)}{\varphi(Z_{ref})} \quad (3.11)$$

$$\frac{R(Z_2, \chi_1)}{R_Z(Z_{ref}, \chi_1)} = \frac{\varphi(Z_2)}{\varphi(Z_{ref})} \quad (3.12)$$

$$\frac{R(Z_3, \chi_1)}{R_Z(Z_{ref}, \chi_1)} = \frac{\varphi(Z_3)}{\varphi(Z_{ref})} \quad (3.13)$$

$$\frac{R(Z_{ref}, \chi_1)}{R_Z(Z_{ref}, \chi_1)} = \frac{\varphi(Z_{ref})}{\varphi(Z_{ref})} \quad (3.14)$$

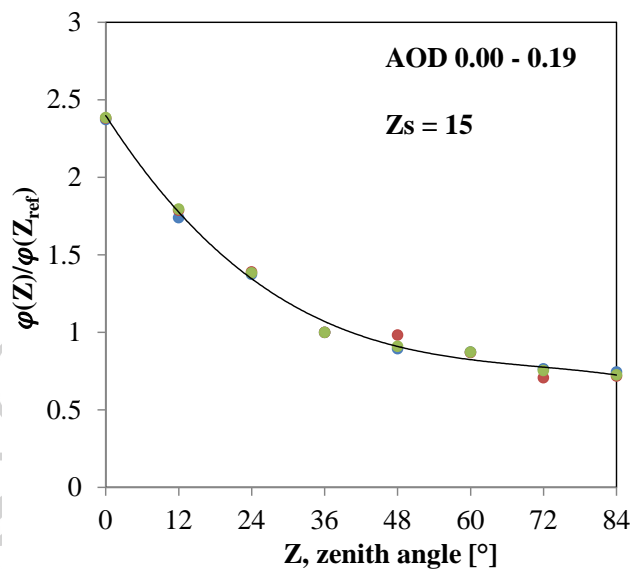
$$\frac{R(Z_5, \chi_1)}{R_Z(Z_{ref}, \chi_1)} = \frac{\varphi(Z_5)}{\varphi(Z_{ref})} \quad (3.15)$$

$$\frac{R(Z_6, \chi_1)}{R_Z(Z_{ref}, \chi_1)} = \frac{\varphi(Z_6)}{\varphi(Z_{ref})} \quad (3.16)$$

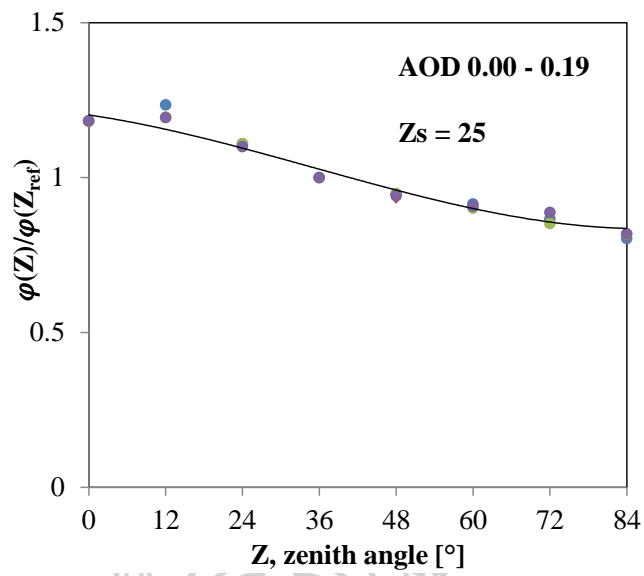
$$\frac{R(Z_7, \chi_1)}{R_Z(Z_{ref}, \chi_1)} = \frac{\varphi(Z_7)}{\varphi(Z_{ref})} \quad (3.17)$$

$$\frac{R(Z_8, \chi_1)}{R_Z(Z_{ref}, \chi_1)} = \frac{\varphi(Z_8)}{\varphi(Z_{ref})} \quad (3.18)$$

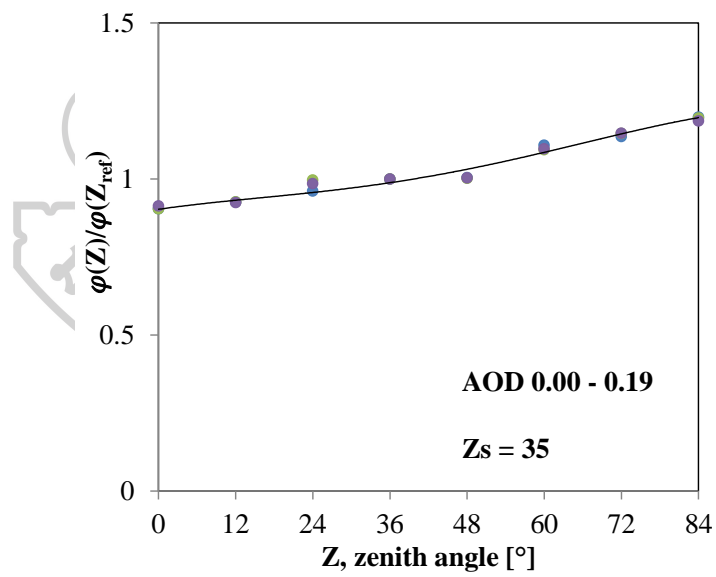
เนื่องจากค่า $R(Z_1, \chi_1)/R_Z(Z_{ref}, \chi_1)$ จนถึง $R(Z_8, \chi_1)/R_Z(Z_{ref}, \chi_1)$ สามารถหาได้จากตารางข้อมูล ดังนั้นจึงสามารถหาค่า $\varphi(Z_1)/\varphi(Z_{ref})$, ..., $\varphi(Z_8)/\varphi(Z_{ref})$ ได้ จากนั้นผู้วิจัยจะทำซ้ำกระบวนการเดิมกับชุดข้อมูลที่ χ_2 จนถึง χ_{30} และ Z_2 จนถึง Z_8 และนำค่า $\varphi(Z_1)/\varphi(Z_{ref})$ จนถึง $\varphi(Z_8)/\varphi(Z_{ref})$ มาเขียนกราฟกับมุมเซนนิธ Z โดยผลของฟังก์ชัน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ สำหรับ AOD แต่ละช่วงและมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์แต่ละค่าที่กำหนด แสดงดังกราฟรูปที่ 3.18 ถึง 3.59



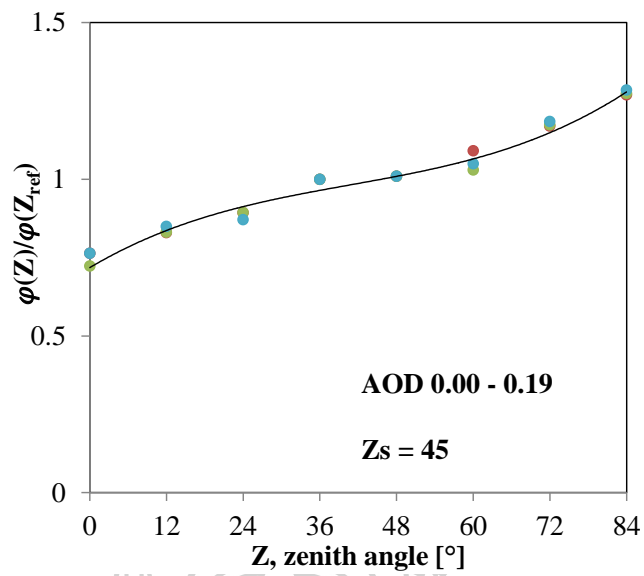
รูปที่ 3.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนนิธ Z ที่มีมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 15^\circ$ และค่า AOD = 0.00 – 0.19



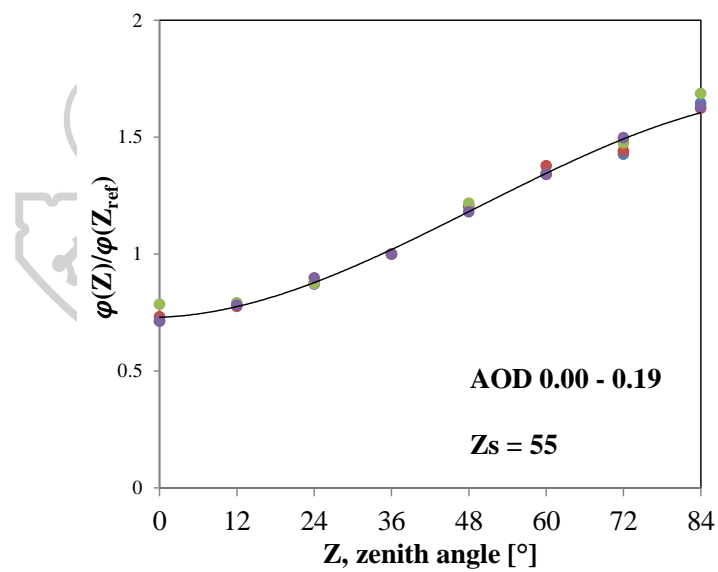
รูปที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 25^\circ$ และค่า AOD = 0.00 – 0.19



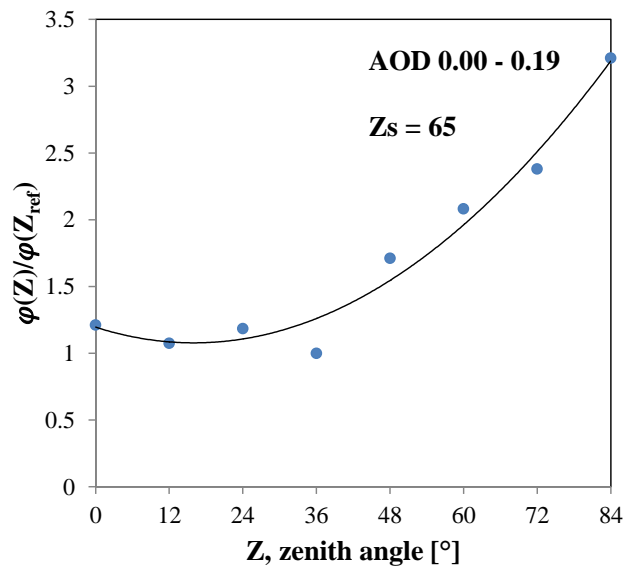
รูปที่ 3.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 35^\circ$ และค่า AOD = 0.00 – 0.19



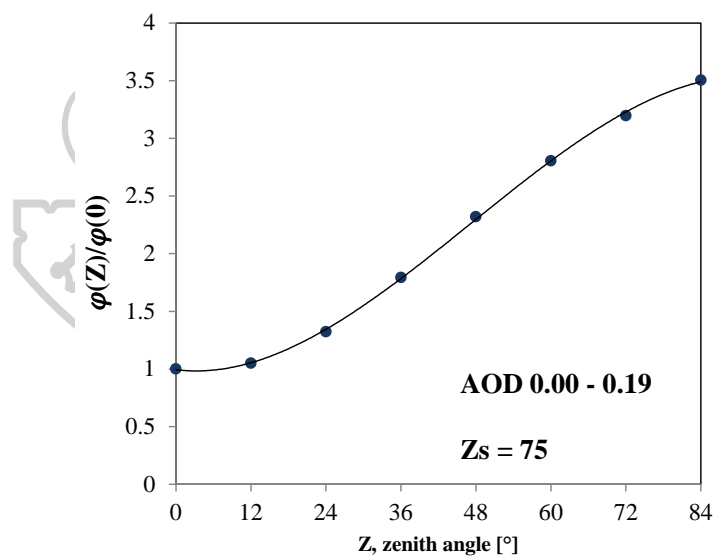
รูปที่ 3.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 45^\circ$ และค่า AOD = 0.00 – 0.19



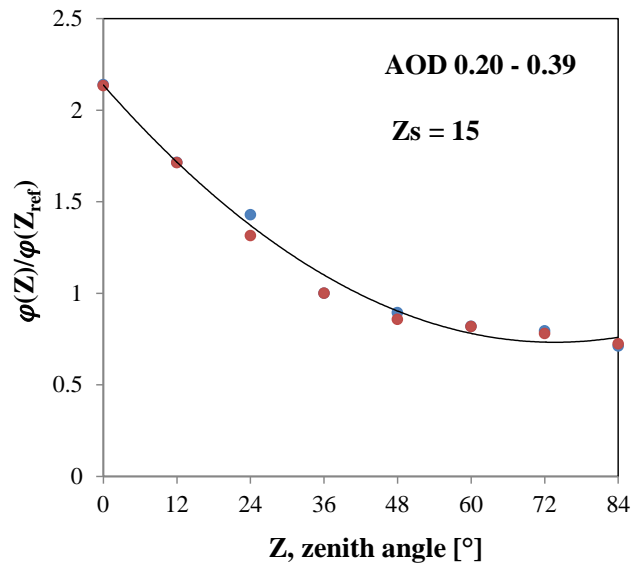
รูปที่ 3.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 55^\circ$ และค่า AOD = 0.00 – 0.19



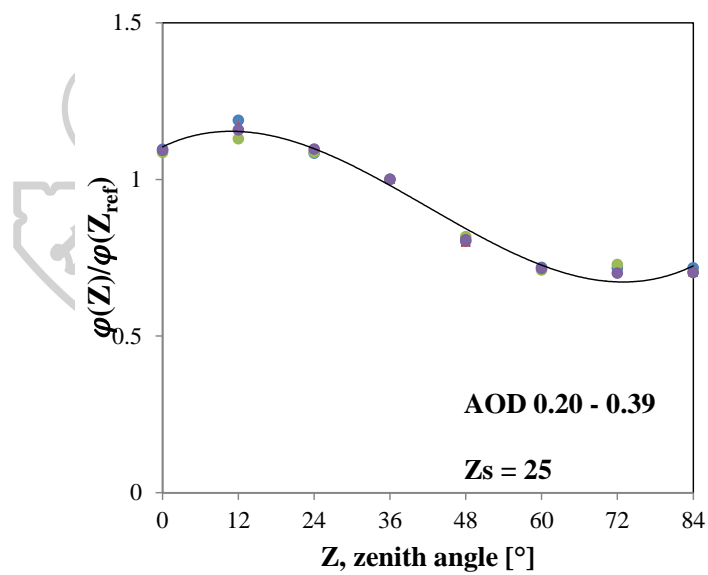
รูปที่ 3.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 65^\circ$ และค่า AOD = 0.00 - 0.19



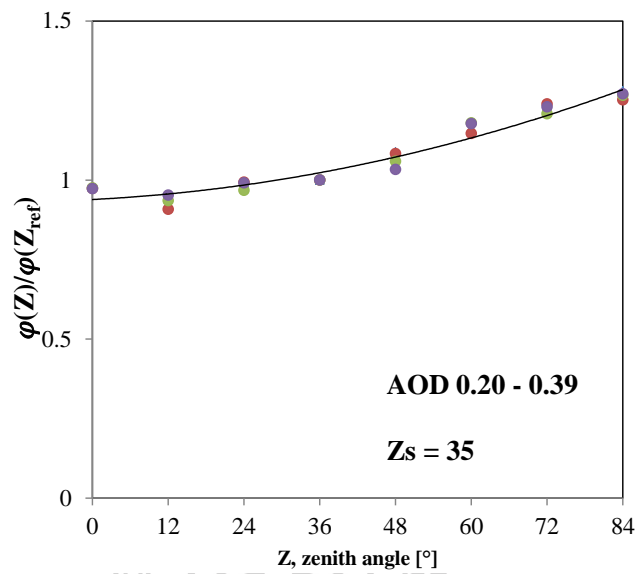
รูปที่ 3.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 75^\circ$ และค่า AOD = 0.00 - 0.19



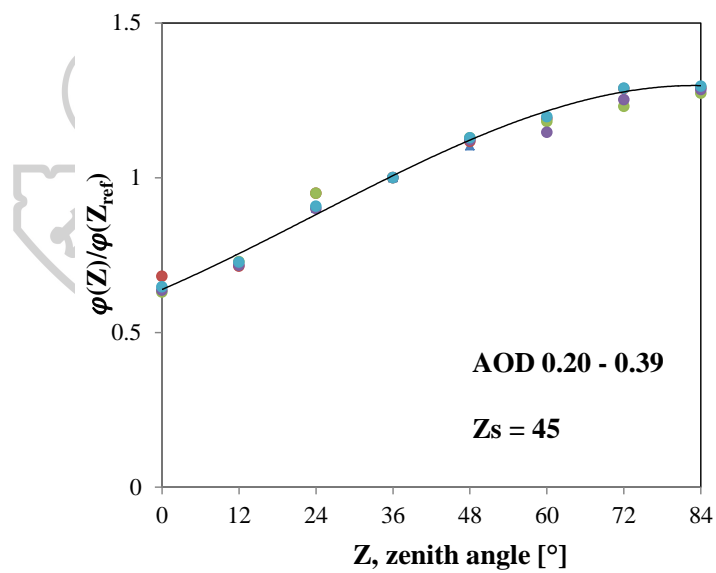
รูปที่ 3.25 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนิธ Z ที่มีมุมเซนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 15^\circ$ และค่า AOD = 0.20 - 0.39



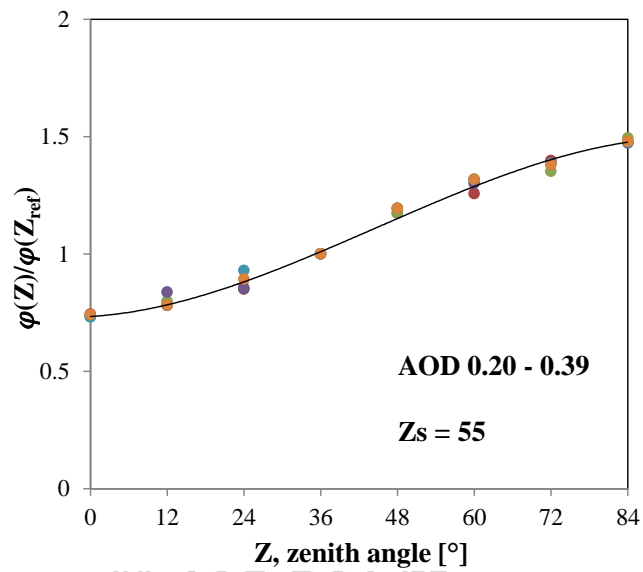
รูปที่ 3.26 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนิธ Z ที่มีมุมเซนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 25^\circ$ และค่า AOD = 0.20 - 0.39



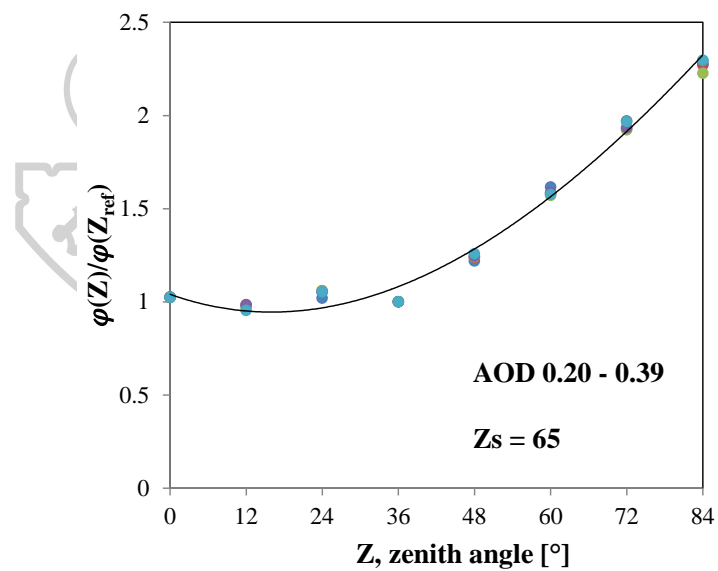
รูปที่ 3.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนนิธ Z ที่มีมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 35^\circ$ และค่า AOD = 0.20 - 0.39



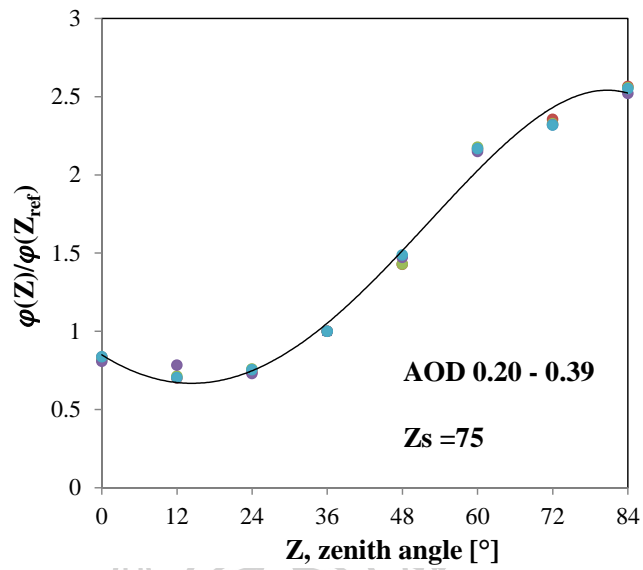
รูปที่ 3.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนนิธ Z ที่มีมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 45^\circ$ และค่า AOD = 0.20 - 0.39



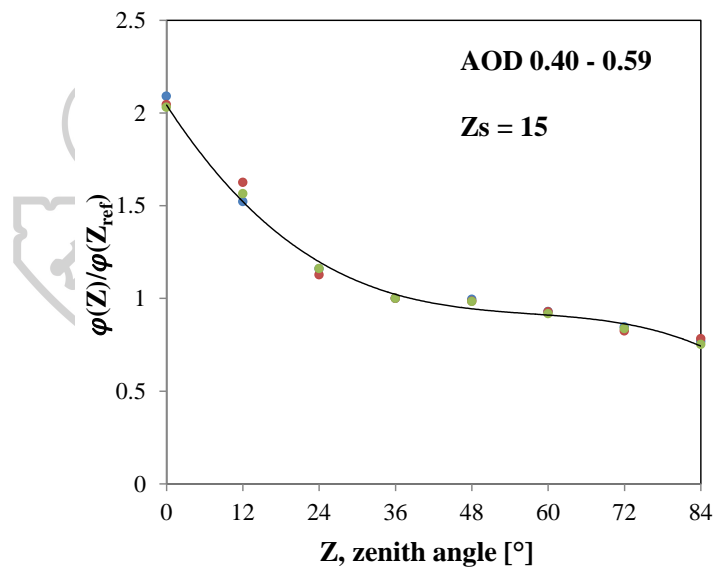
รูปที่ 3.29 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 55^\circ$ และค่า AOD = 0.20 - 0.39



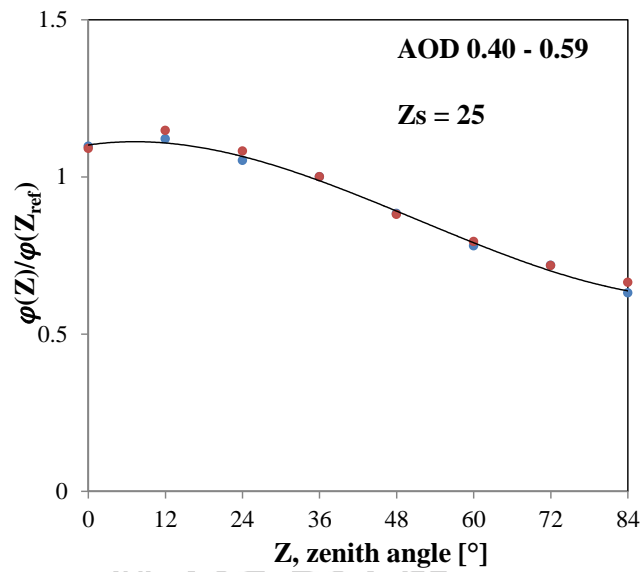
รูปที่ 3.30 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 65^\circ$ และค่า AOD = 0.20 - 0.39



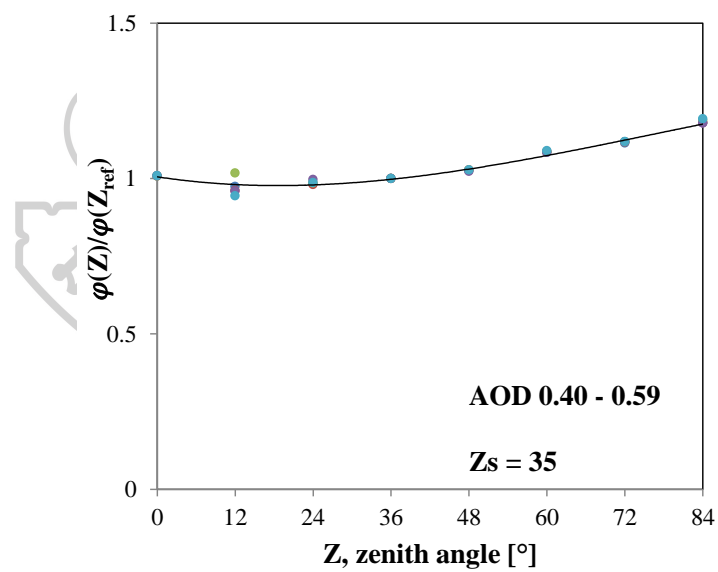
รูปที่ 3.31 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 75^\circ$ และค่า AOD = 0.20 – 0.39



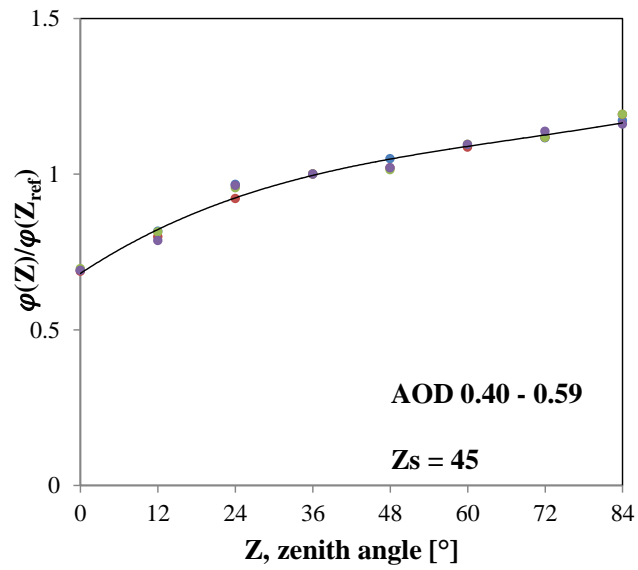
รูปที่ 3.32 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 15^\circ$ และค่า AOD = 0.40 – 0.59



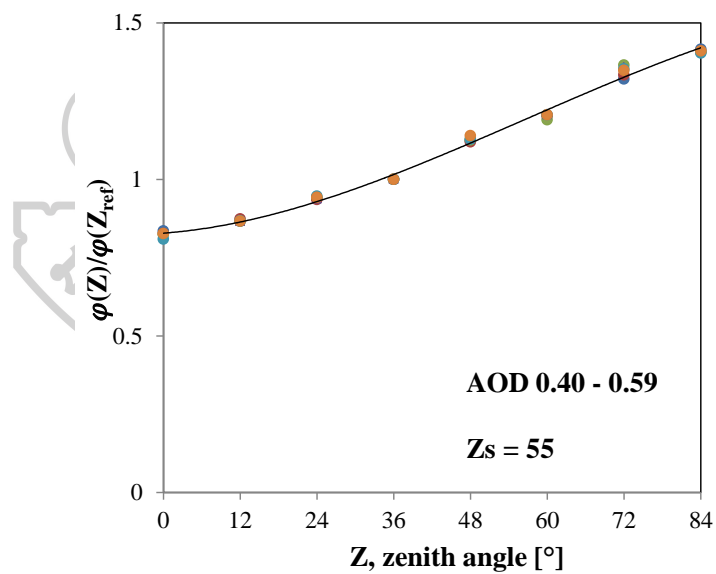
รูปที่ 3.33 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 25^\circ$ และค่า AOD = 0.40 - 0.59



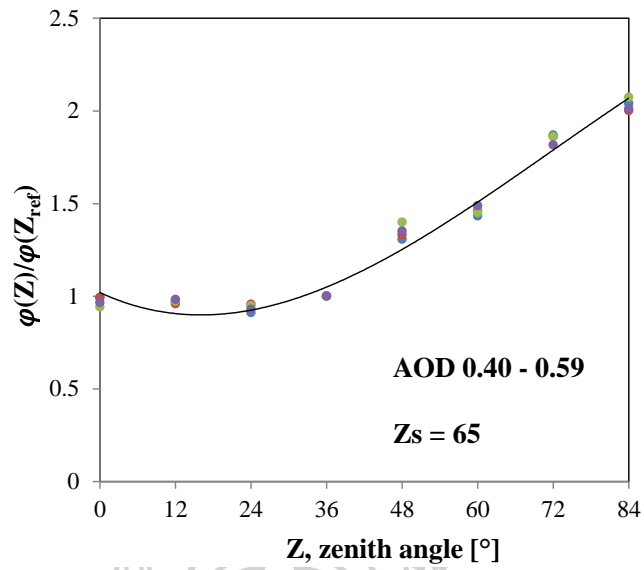
รูปที่ 3.34 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 35^\circ$ และค่า AOD = 0.40 - 0.59



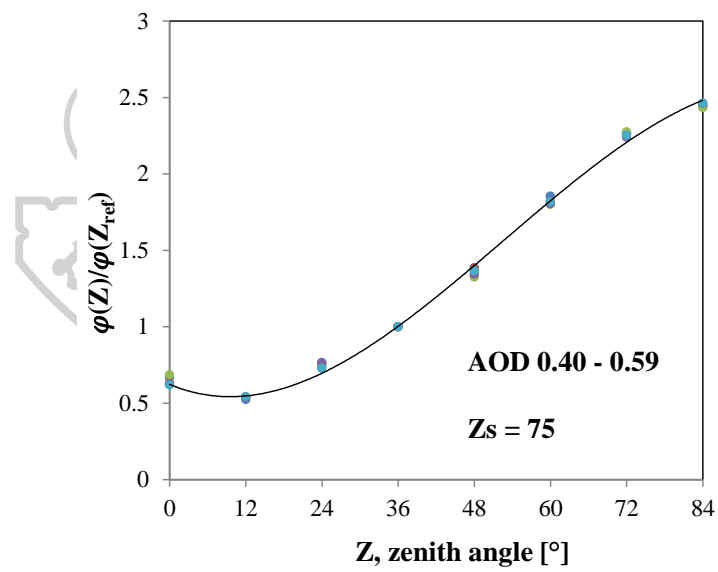
รูปที่ 3.35 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 45^\circ$ และค่า AOD = 0.40 - 0.59



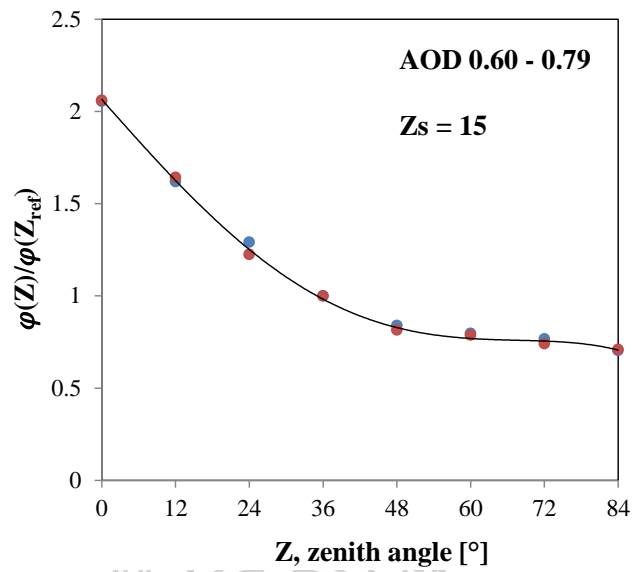
รูปที่ 3.36 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 55^\circ$ และค่า AOD = 0.40 - 0.59



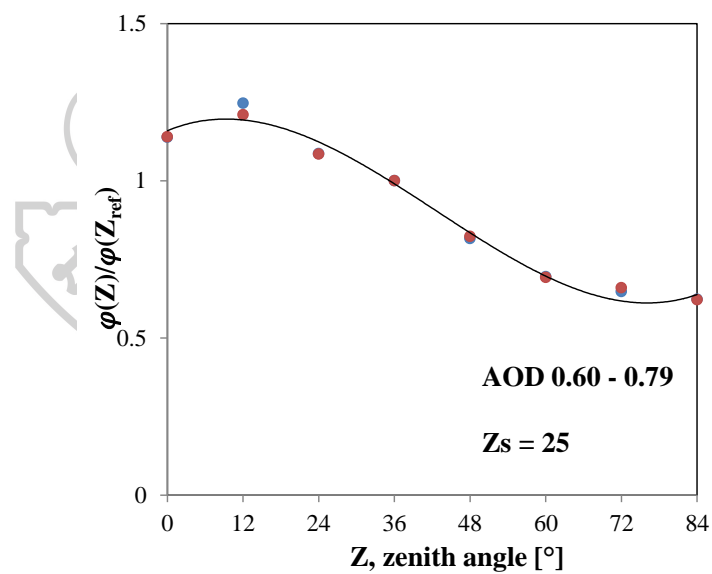
รูปที่ 3.37 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 65^\circ$ และค่า AOD = 0.40 - 0.59



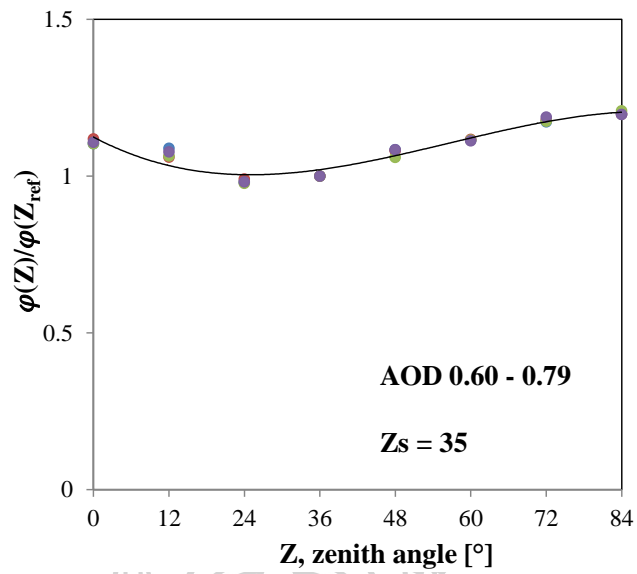
รูปที่ 3.38 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 75^\circ$ และค่า AOD = 0.40 - 0.59



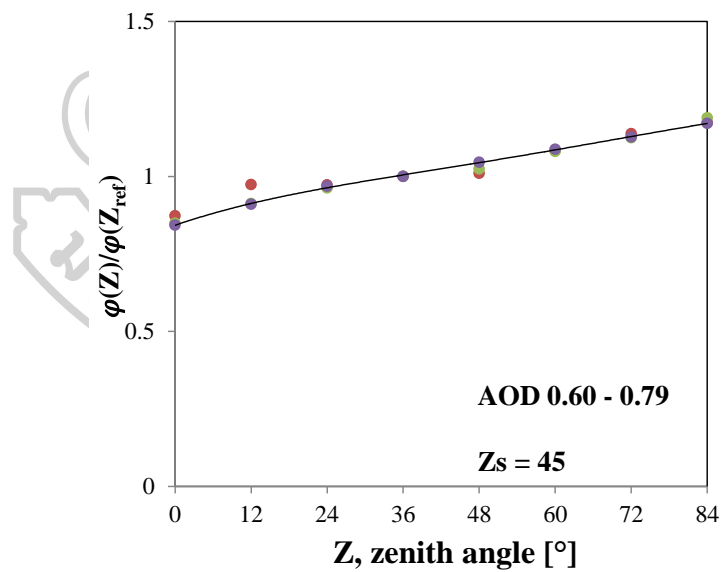
รูปที่ 3.39 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 15^\circ$ และค่า AOD = 0.60 - 0.79



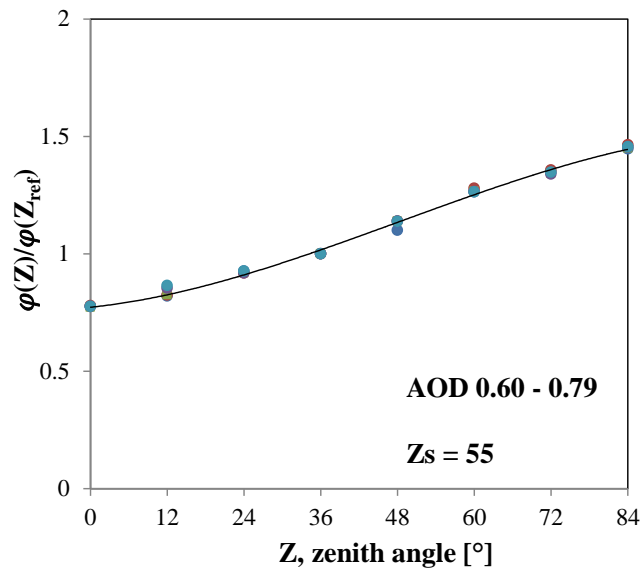
รูปที่ 3.40 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 25^\circ$ และค่า AOD = 0.60 - 0.79



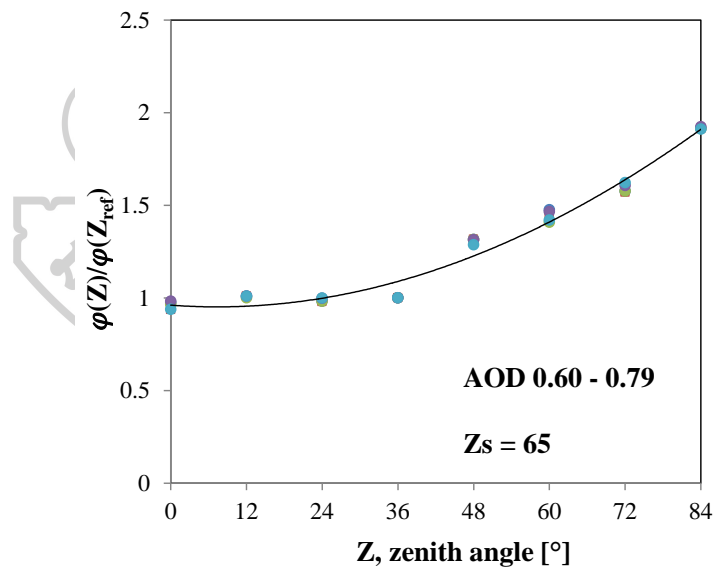
รูปที่ 3.41 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 35^\circ$ และค่า AOD = 0.60 - 0.79



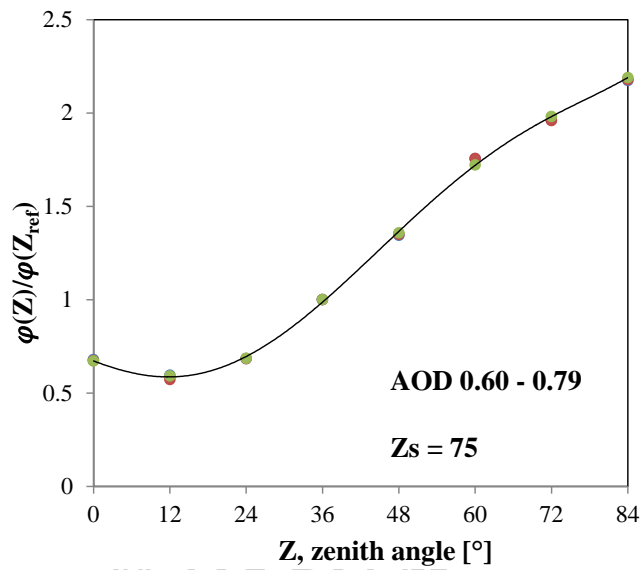
รูปที่ 3.42 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 45^\circ$ และค่า AOD = 0.60 - 0.79



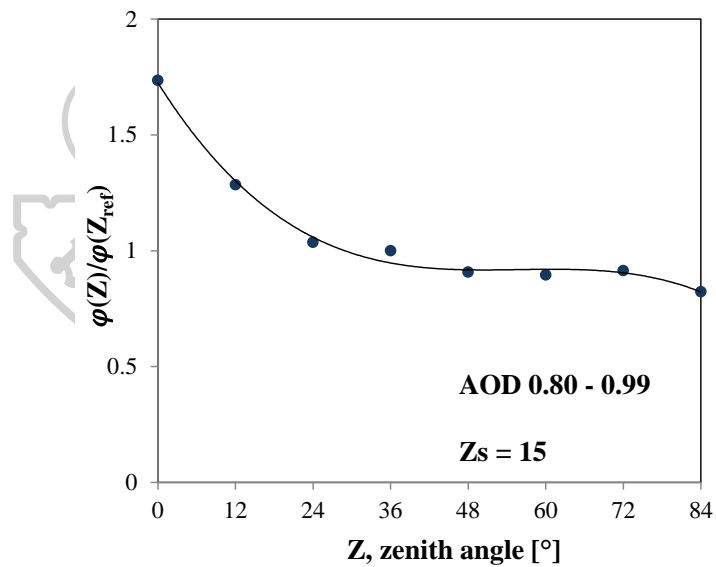
รูปที่ 3.43 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนนิธ Z ที่มีมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 55^\circ$ และค่า AOD = 0.60 – 0.79



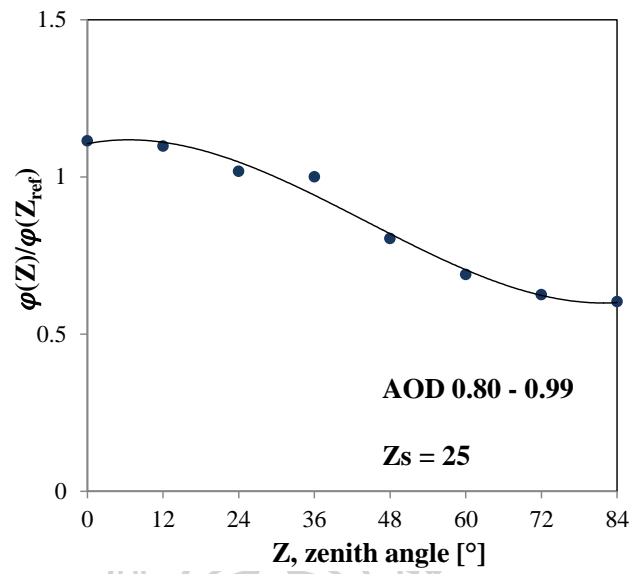
รูปที่ 3.44 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนนิธ Z ที่มีมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 65^\circ$ และค่า AOD = 0.60 – 0.79



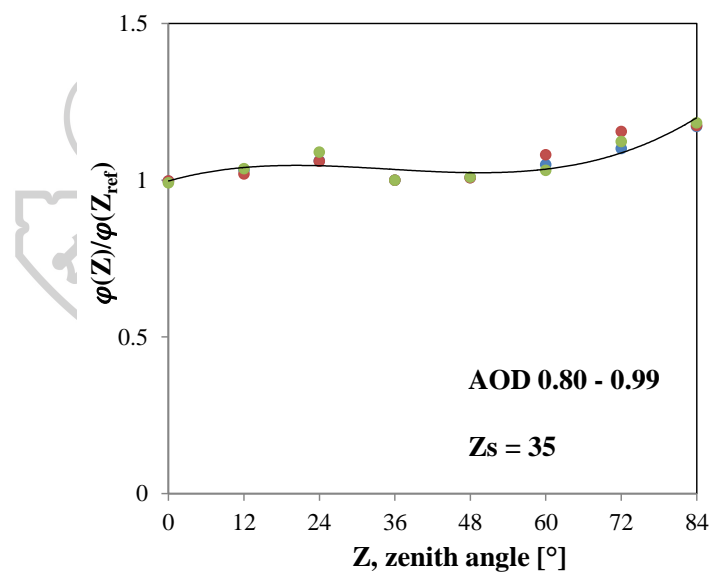
รูปที่ 3.45 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนนิธ Z ที่มีมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 75^\circ$ และค่า AOD = 0.60 - 0.79



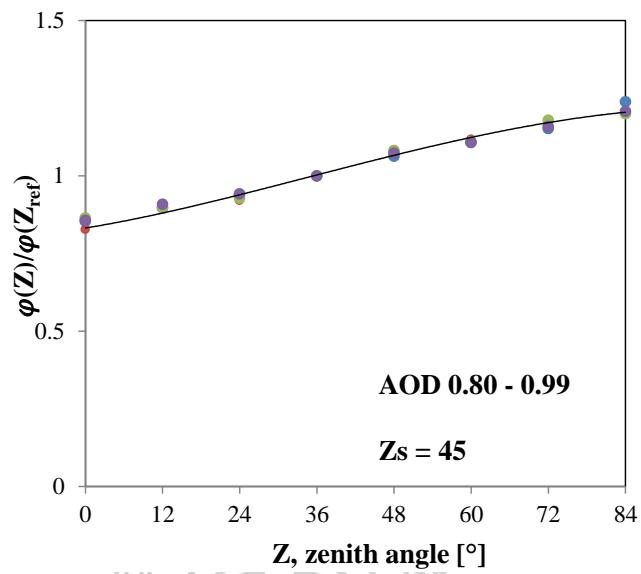
รูปที่ 3.46 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนนิธ Z ที่มีมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 15^\circ$ และค่า AOD = 0.80 - 0.99



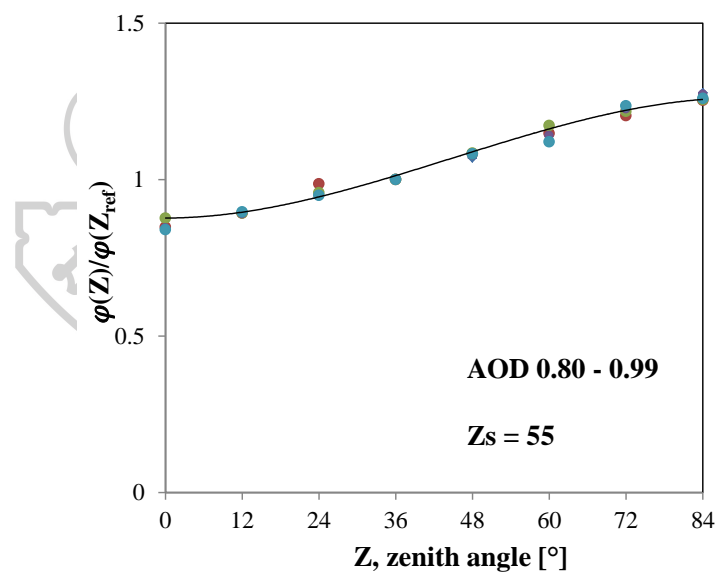
รูปที่ 3.47 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนนิธ Z ที่มีมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 25^\circ$ และค่า AOD = 0.80 - 0.99



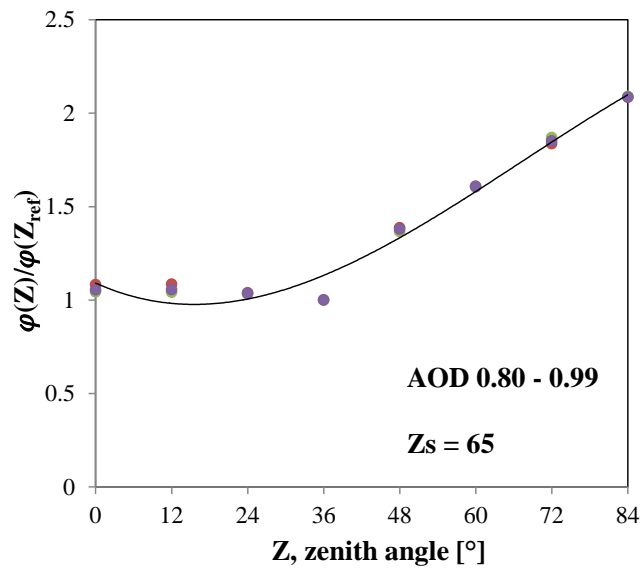
รูปที่ 3.48 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนนิธ Z ที่มีมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 35^\circ$ และค่า AOD = 0.80 - 0.99



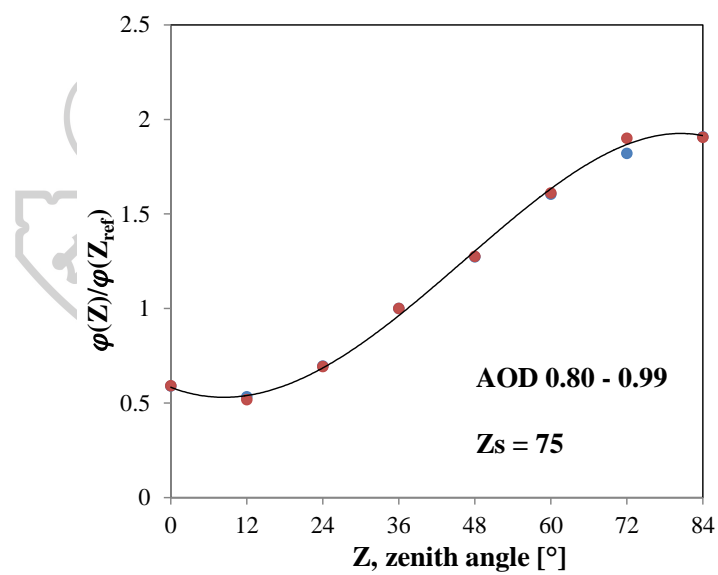
รูปที่ 3.49 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนธิร Z ที่มีมุมเซนธิรของดวงอาทิตย์ $Z_s = 45^\circ$ และค่า AOD = 0.80 - 0.99



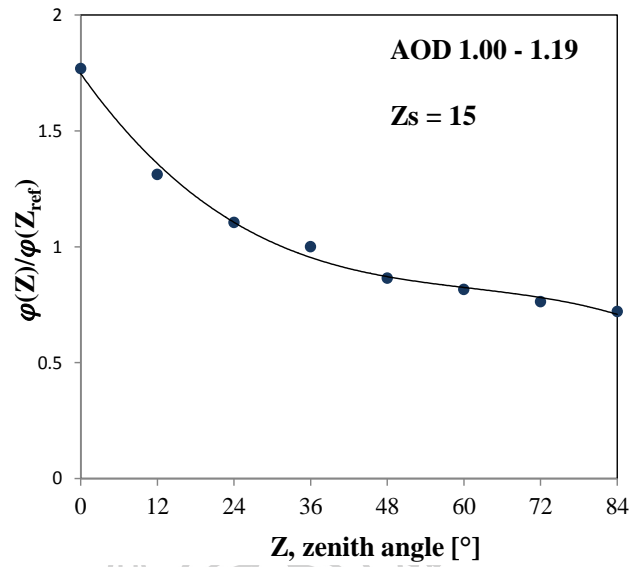
รูปที่ 3.50 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนธิร Z ที่มีมุมเซนธิรของดวงอาทิตย์ $Z_s = 55^\circ$ และค่า AOD = 0.80 - 0.99



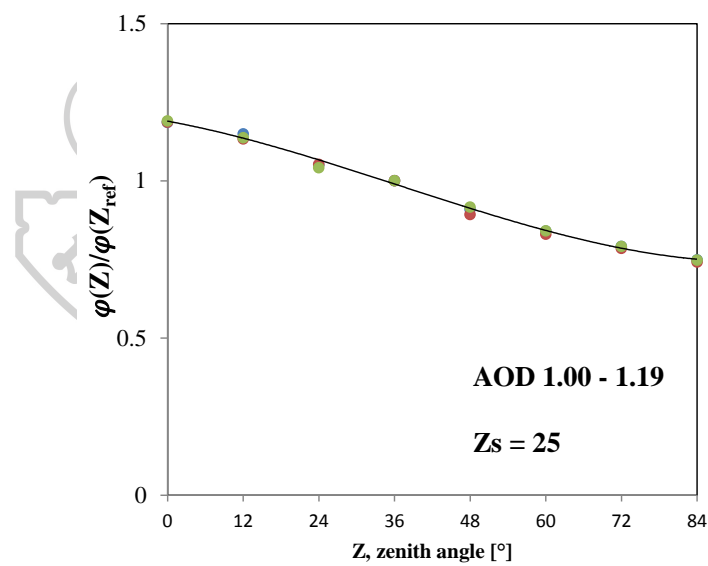
รูปที่ 3.51 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนนิธ Z ที่มีมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 65^\circ$ และค่า AOD = 0.80 - 0.99



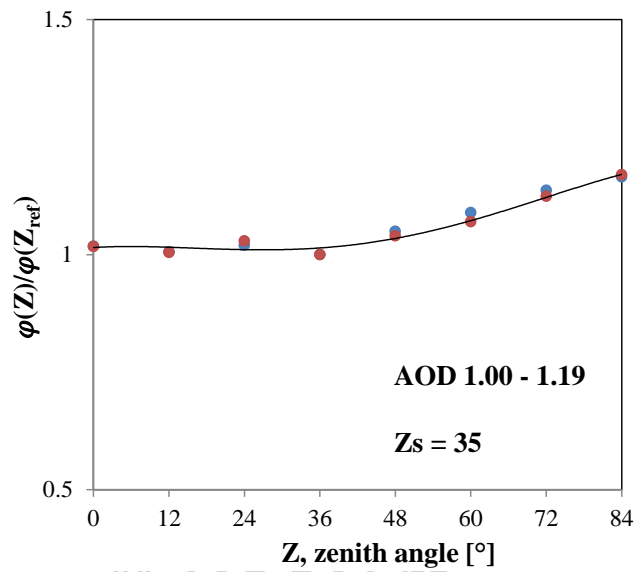
รูปที่ 3.52 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนนิธ Z ที่มีมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 75^\circ$ และค่า AOD = 0.80 - 0.99



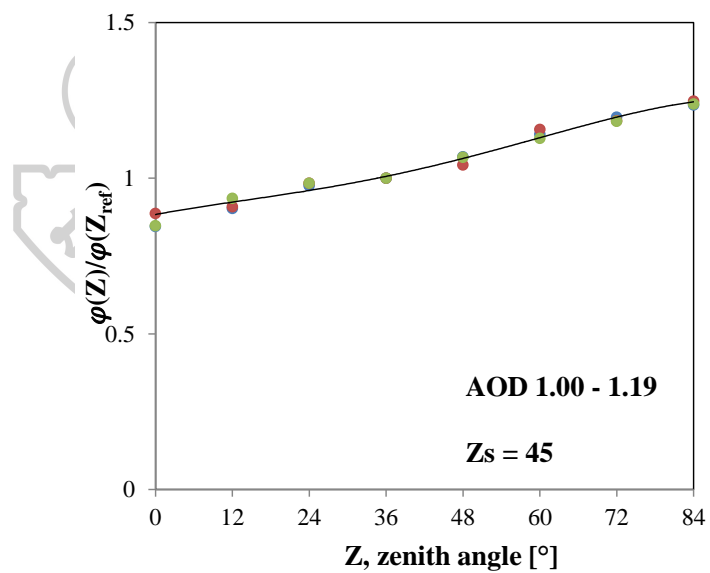
รูปที่ 3.53 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนิธ Z ที่มีมุมเซนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 15^\circ$ และค่า AOD = 1.00 - 1.19



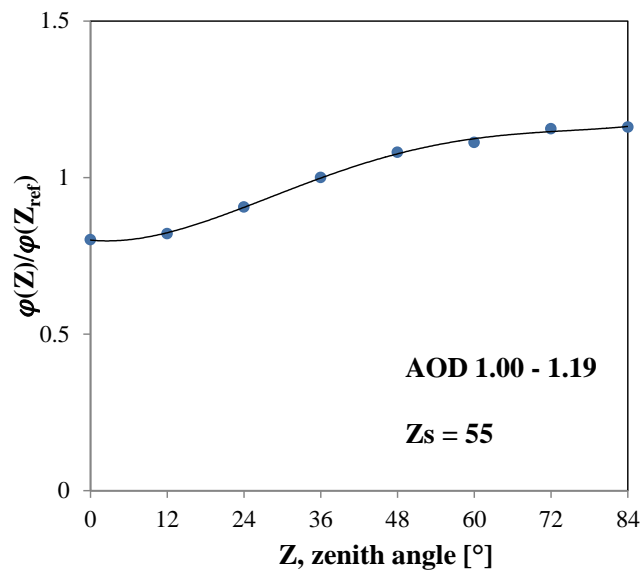
รูปที่ 3.54 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนิธ Z ที่มีมุมเซนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 25^\circ$ และค่า AOD = 1.00 - 1.19



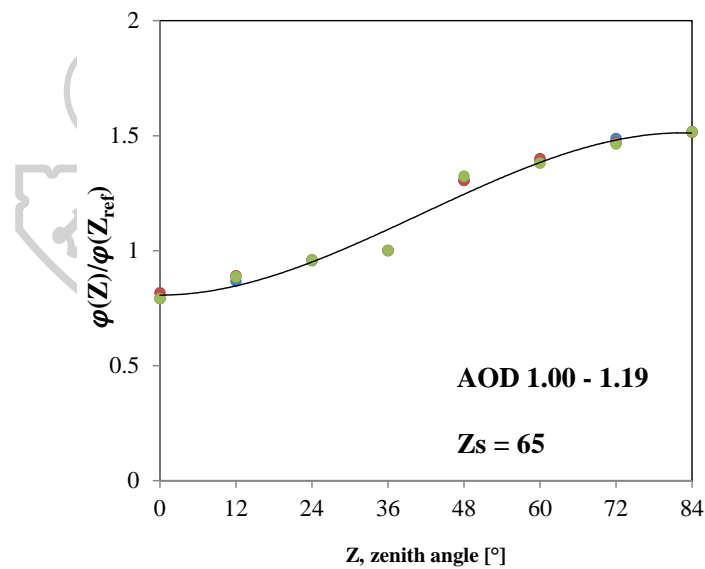
รูปที่ 3.55 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนนิธ Z ที่มีมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 35^\circ$ และค่า AOD = 1.00 - 1.19



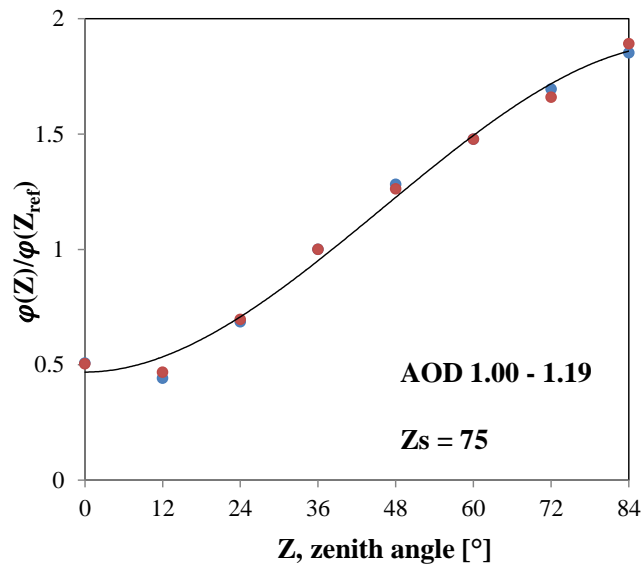
รูปที่ 3.56 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนนิธ Z ที่มีมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 45^\circ$ และค่า AOD = 1.00 - 1.19



รูปที่ 3.57 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนนิธ Z ที่มีมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 55^\circ$ และค่า AOD = 1.00 - 1.19



รูปที่ 3.58 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนนิธ Z ที่มีมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 65^\circ$ และค่า AOD = 1.00 - 1.19



รูปที่ 3.59 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 75^\circ$ และค่า AOD = 1.00 – 1.19

จากกราฟจะเห็นได้ว่า $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ ไม่ขึ้นกับ χ แต่ขึ้นอยู่กับ Z_s ทั้งนี้เพราะตำแหน่งของดวงอาทิตย์มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าและมุมเซนิตของตำแหน่งที่พิจารณา Z

จากกราฟรูปที่ 3.18 – 3.59 ผู้วิจัยทำการพิตเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ กับ Z จากนั้นจะใช้จุดตัดแกน y ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\varphi(0)/\varphi(Z_{ref})$ มาใช้แปลงข้อมูล $\varphi(Z)/\varphi(Z_{ref})$ ให้อยู่ในรูปของ $\varphi(Z)/\varphi(0)$ โดยการใช้อยู่จุดตัดแกน y ดังกล่าวไป normalize กราฟเส้นเดิมตามวิธีดังต่อไปนี้

$$\frac{\varphi(Z_1)}{\varphi(0)} = \frac{\varphi(Z_1)}{\varphi(Z_{ref})} \cdot \frac{f(Z_{ref})}{f(0)} \quad (3.19)$$

$$\frac{\varphi(Z_2)}{\varphi(0)} = \frac{\varphi(Z_2)}{\varphi(Z_{ref})} \cdot \frac{f(Z_{ref})}{f(0)} \quad (3.20)$$

$$\frac{\varphi(Z_3)}{\varphi(0)} = \frac{\varphi(Z_3)}{\varphi(Z_{ref})} \cdot \frac{f(Z_{ref})}{f(0)} \quad (3.21)$$

$$\frac{\varphi(Z_4)}{\varphi(0)} = \frac{\varphi(Z_4)}{\varphi(Z_{ref})} \cdot \frac{f(Z_{ref})}{f(0)} \quad (3.22)$$

$$\frac{\varphi(Z_5)}{\varphi(0)} = \frac{\varphi(Z_5)}{\varphi(Z_{ref})} \cdot \frac{f(Z_{ref})}{f(0)} \quad (3.23)$$

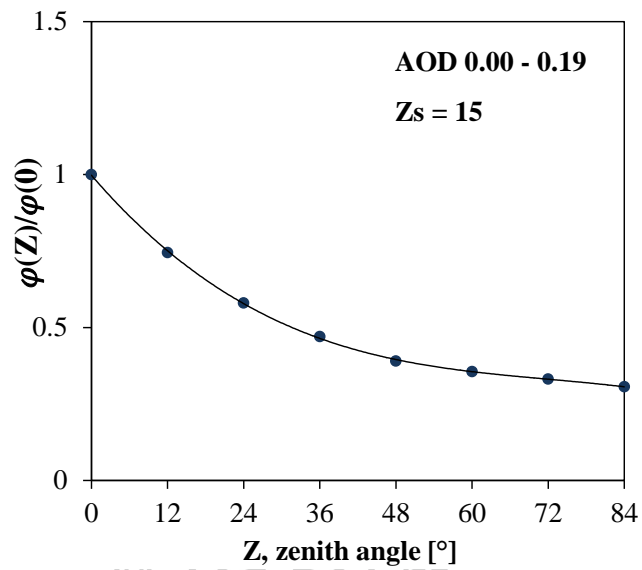
$$\frac{\varphi(Z_6)}{\varphi(0)} = \frac{\varphi(Z_6)}{\varphi(Z_{ref})} \cdot \frac{f(Z_{ref})}{f(0)} \quad (3.24)$$

$$\frac{\varphi(Z_7)}{\varphi(0)} = \frac{\varphi(Z_7)}{\varphi(Z_{ref})} \cdot \frac{f(Z_{ref})}{f(0)} \quad (3.25)$$

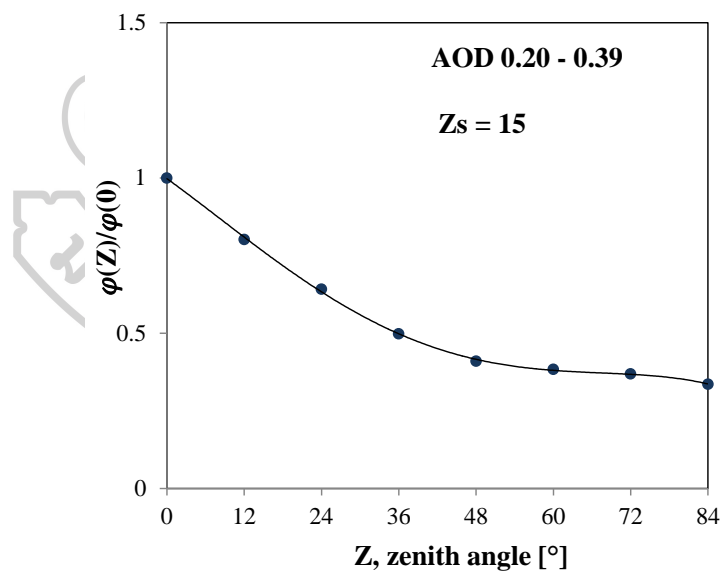
$$\frac{\varphi(Z_8)}{\varphi(0)} = \frac{\varphi(Z_8)}{\varphi(Z_{ref})} \cdot \frac{f(Z_{ref})}{f(0)} \quad (3.26)$$

อย่างไรก็ตามวิธีการ normalize ดังกล่าว ที่ Z มีค่าเท่ากับ $0^\circ, 12^\circ, 24^\circ, 36^\circ, 48^\circ, 60^\circ, 72^\circ$ และ 84° ซึ่งทำให้ได้กราฟ $\varphi(Z)/\varphi(0)$ และ Z_s เท่ากับ $0^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 35^\circ, 45^\circ, 55^\circ, 65^\circ$ และ 75° ผลที่ได้ทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 3.60 – 3.101 นอกจากนี้ผู้วิจัยนำฟังก์ชัน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ ของค่า AOD แต่ละช่วงทุก ๆ มุมเซนติของดวงอาทิตย์ไว้ในกราฟเดียวกัน แสดงดังรูปที่ 3.102 – 3.107

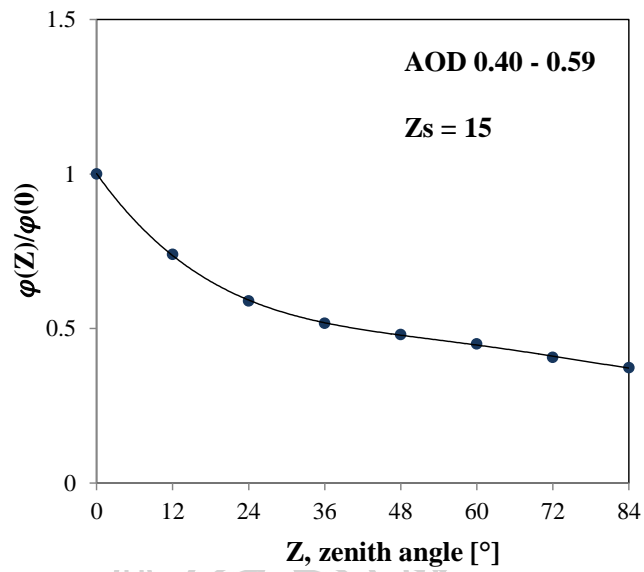




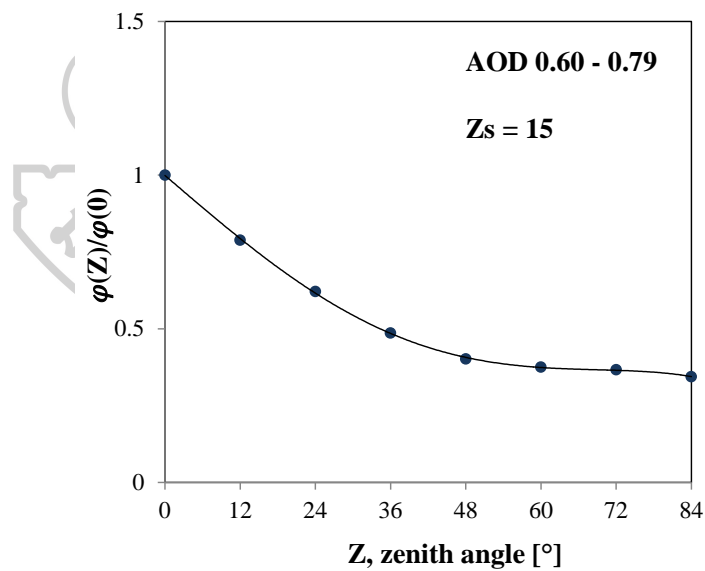
รูปที่ 3.60 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิธ Z ที่มีมุมเซนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 15^\circ$ และค่า AOD = 0.00 - 0.19



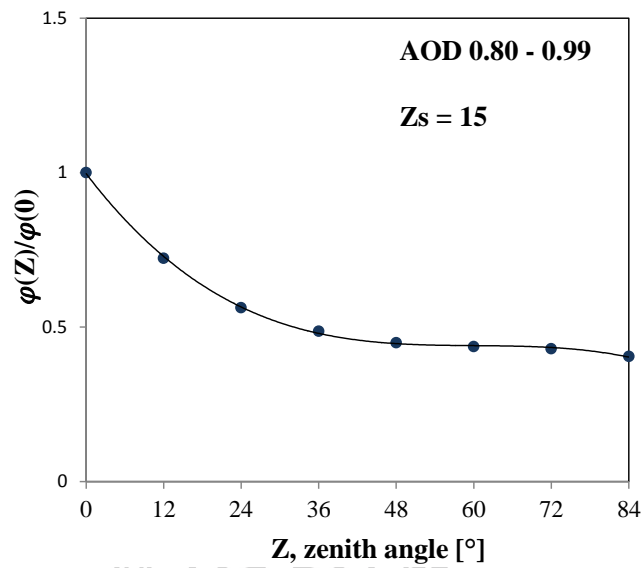
รูปที่ 3.61 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิธ Z ที่มีมุมเซนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 15^\circ$ และค่า AOD = 0.20 - 0.39



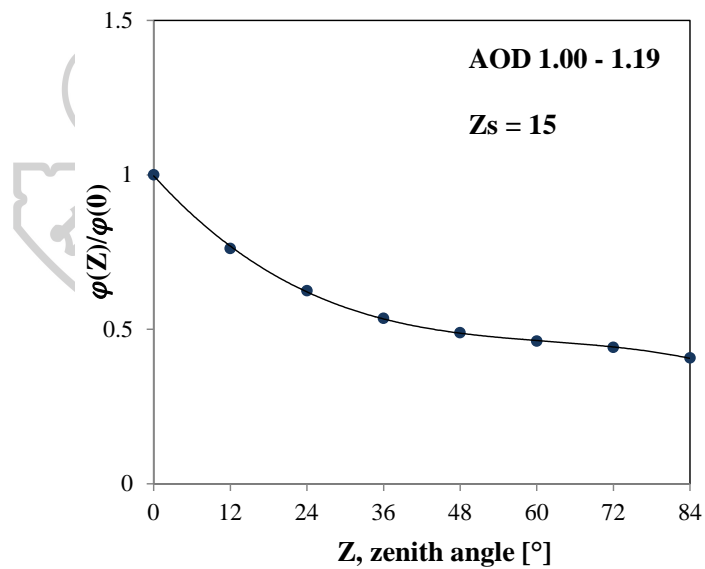
รูปที่ 3.62 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 15^\circ$ และค่า AOD = 0.40 - 0.59



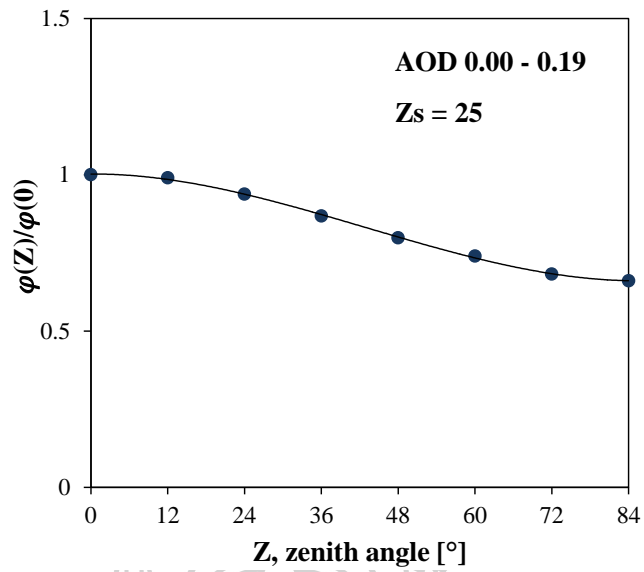
รูปที่ 3.63 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 15^\circ$ และค่า AOD = 0.60 - 0.79



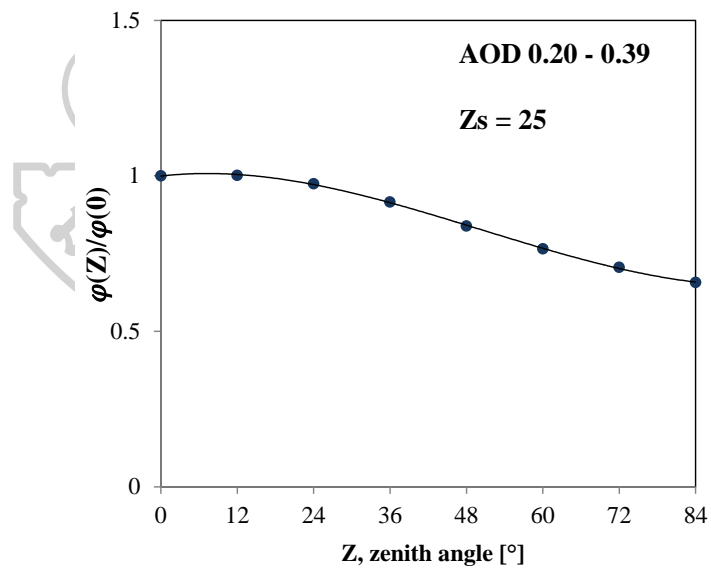
รูปที่ 3.64 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนนิธ Z ที่มีมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 15^\circ$ และค่า AOD = 0.80 - 0.99



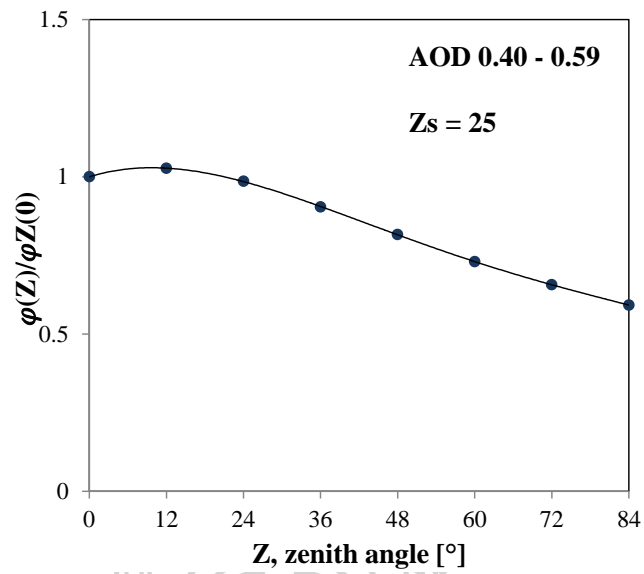
รูปที่ 3.65 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนนิธ Z ที่มีมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 15^\circ$ และค่า AOD = 1.00 - 1.19



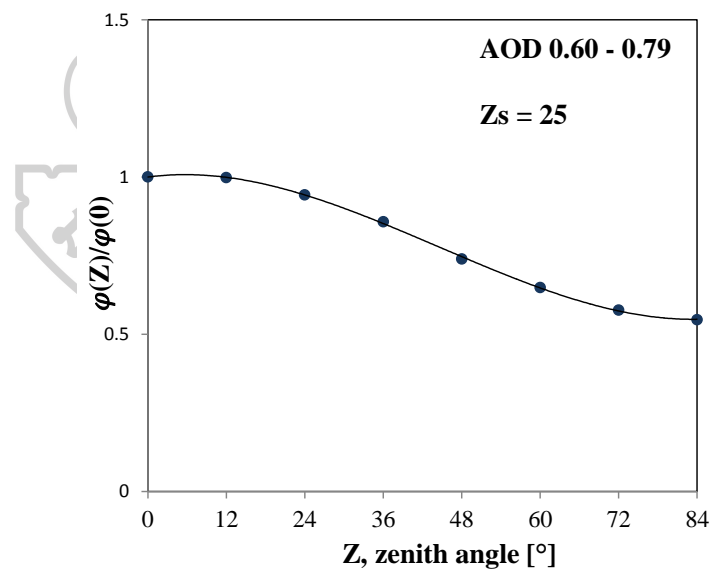
รูปที่ 3.66 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 25^\circ$ และค่า AOD = 0.00 - 0.19



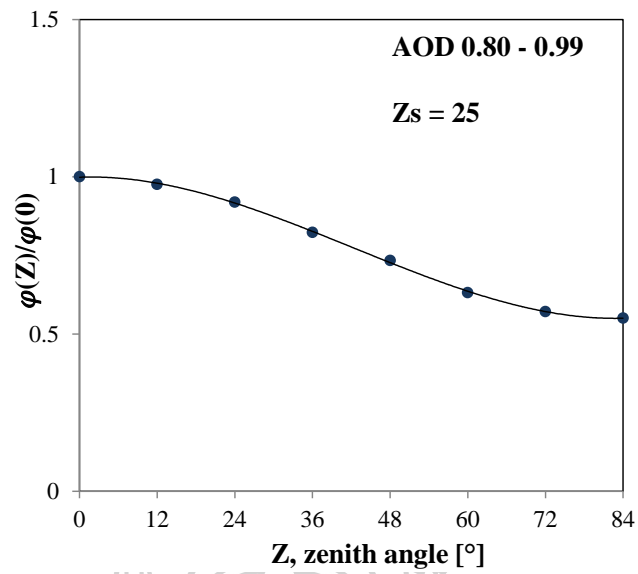
รูปที่ 3.67 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 25^\circ$ และค่า AOD = 0.20 - 0.39



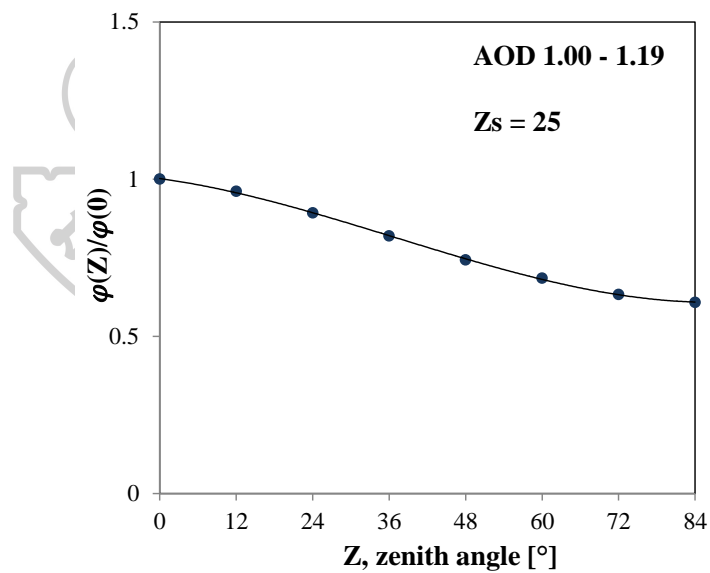
รูปที่ 3.68 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 25^\circ$ และค่า AOD = 0.40 - 0.59



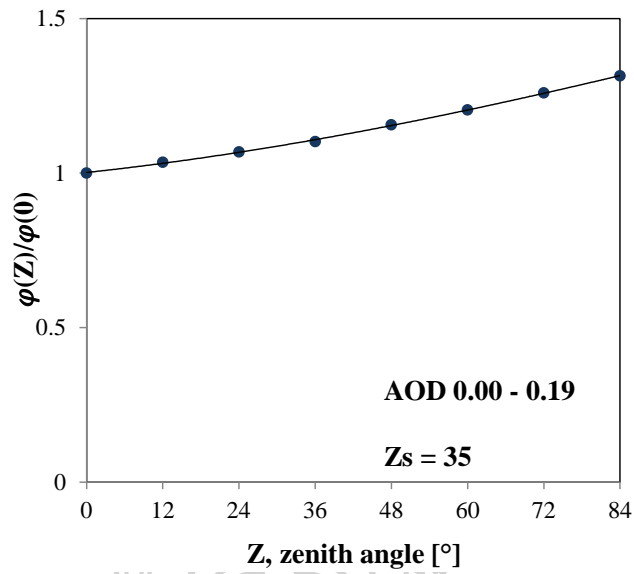
รูปที่ 3.69 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 25^\circ$ และค่า AOD = 0.60 - 0.79



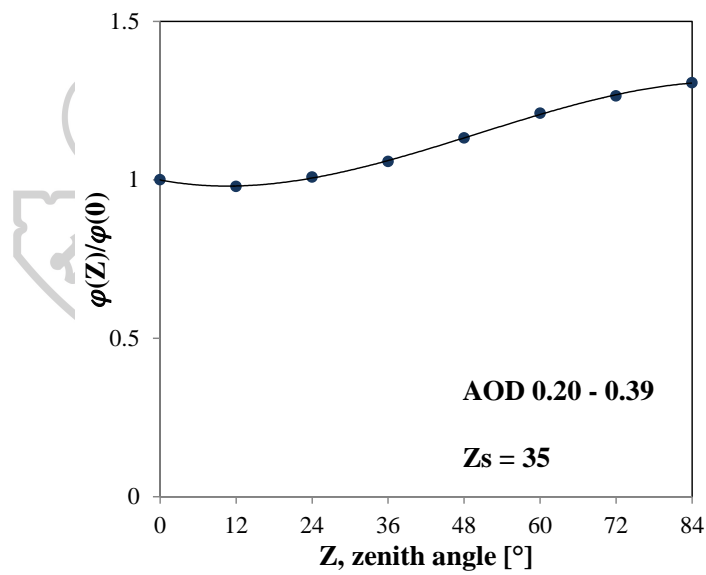
รูปที่ 3.70 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนนิธ Z ที่มีมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 25^\circ$ และค่า AOD = 0.80 - 0.99



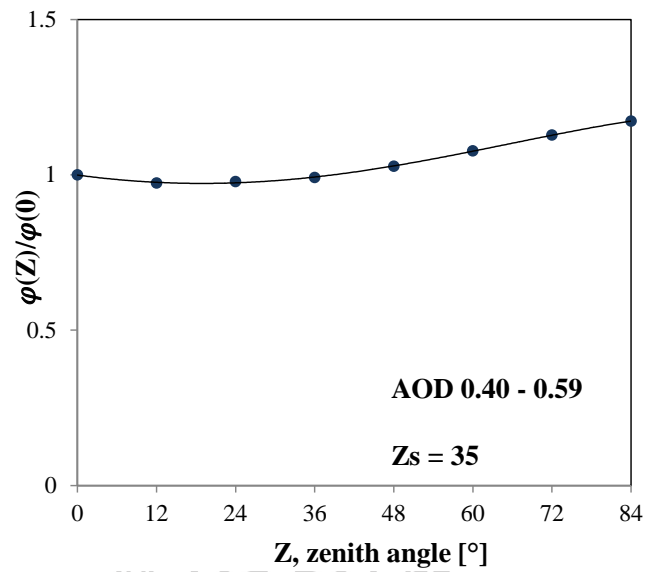
รูปที่ 3.71 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนนิธ Z ที่มีมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 25^\circ$ และค่า AOD = 1.00 - 1.19



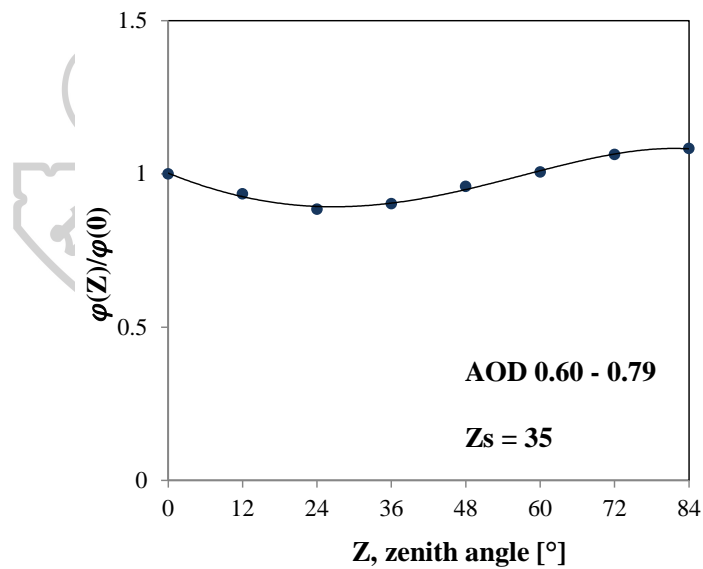
รูปที่ 3.72 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิธ Z ที่มีมุมเซนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 35^\circ$ และค่า AOD = 0.00 - 0.19



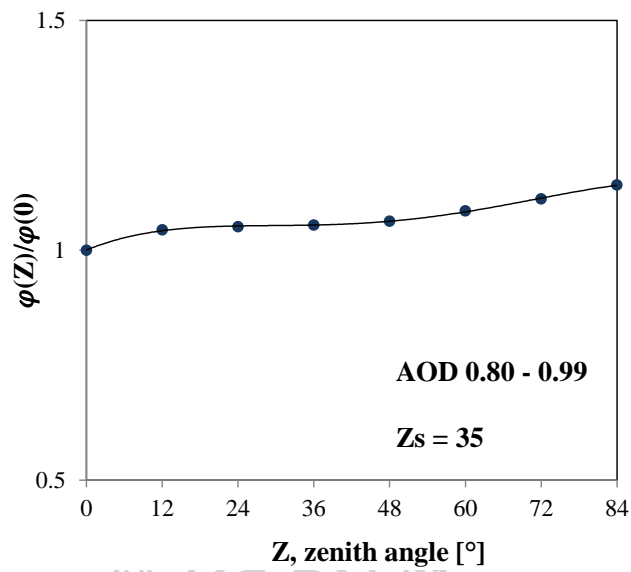
รูปที่ 3.73 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิธ Z ที่มีมุมเซนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 35^\circ$ และค่า AOD = 0.20 - 0.39



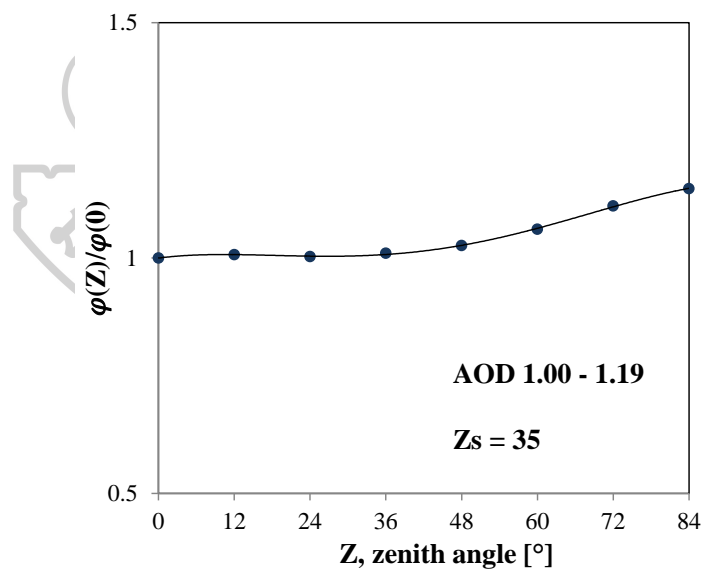
รูปที่ 3.74 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 35^\circ$ และค่า AOD = 0.40 - 0.59



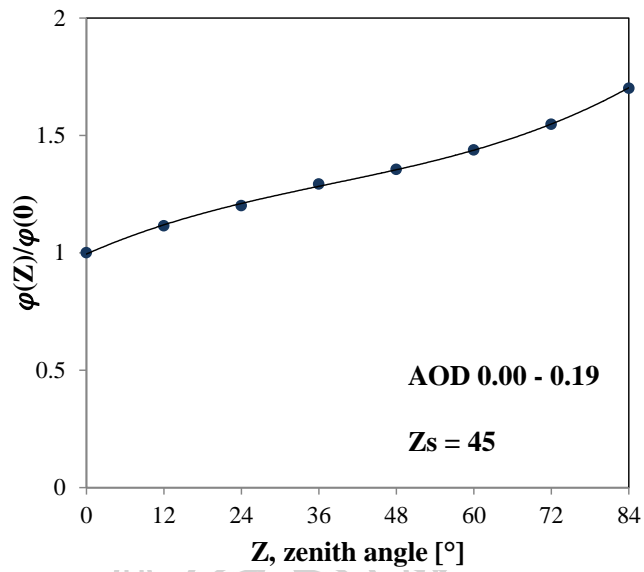
รูปที่ 3.75 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 35^\circ$ และค่า AOD = 0.60 - 0.79



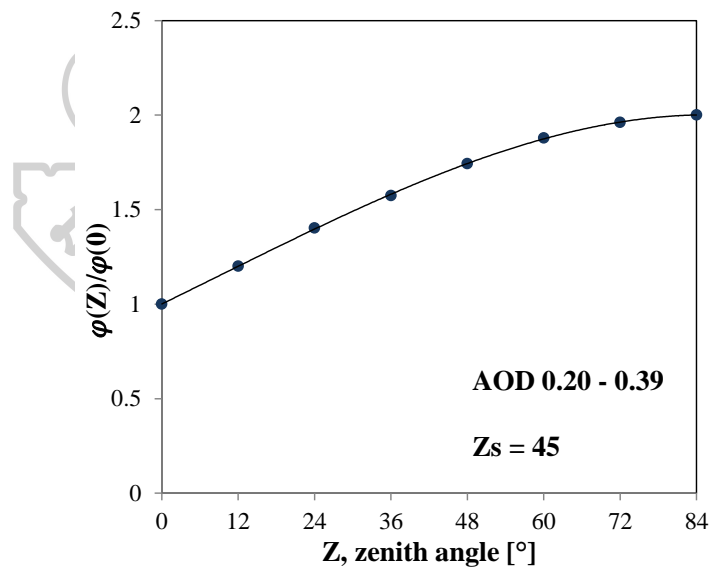
รูปที่ 3.76 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 35^\circ$ และค่า AOD = 0.80 - 0.99



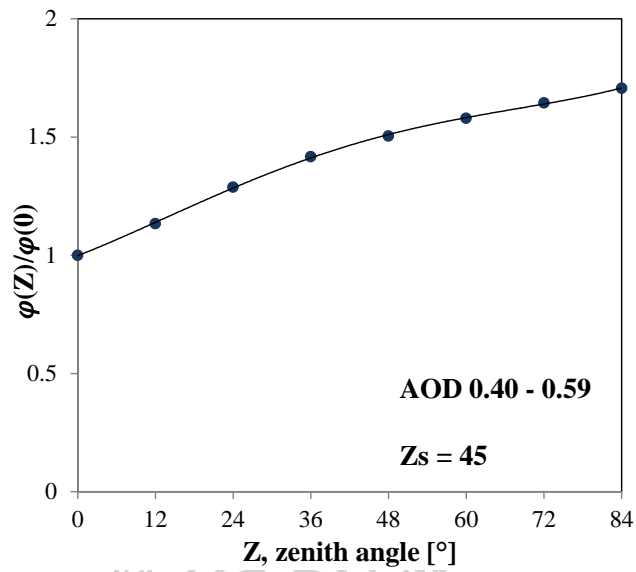
รูปที่ 3.77 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 35^\circ$ และค่า AOD = 1.00 - 1.19



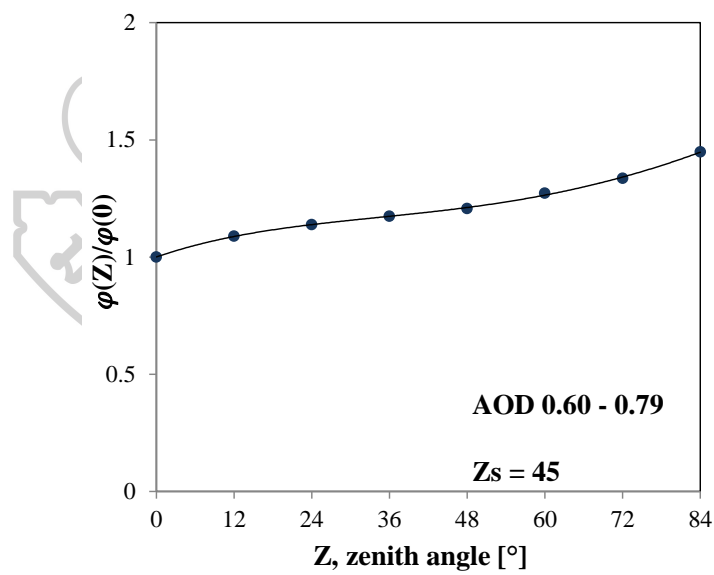
รูปที่ 3.78 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 45^\circ$ และค่า AOD = 0.00 - 0.19



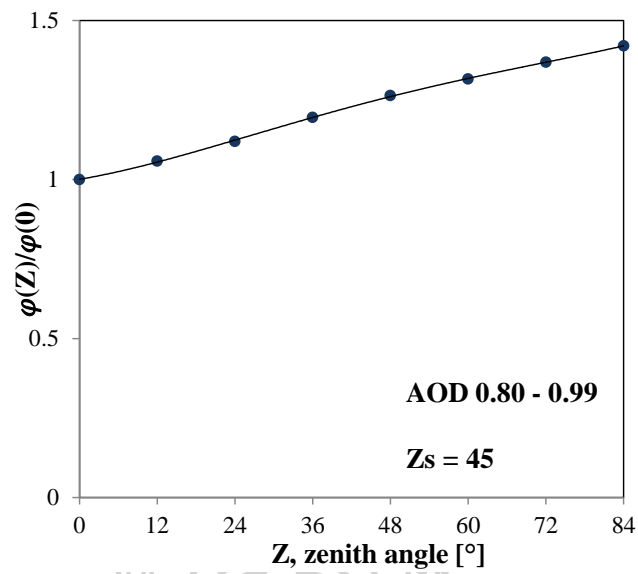
รูปที่ 3.79 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 45^\circ$ และค่า AOD = 0.20 - 0.39



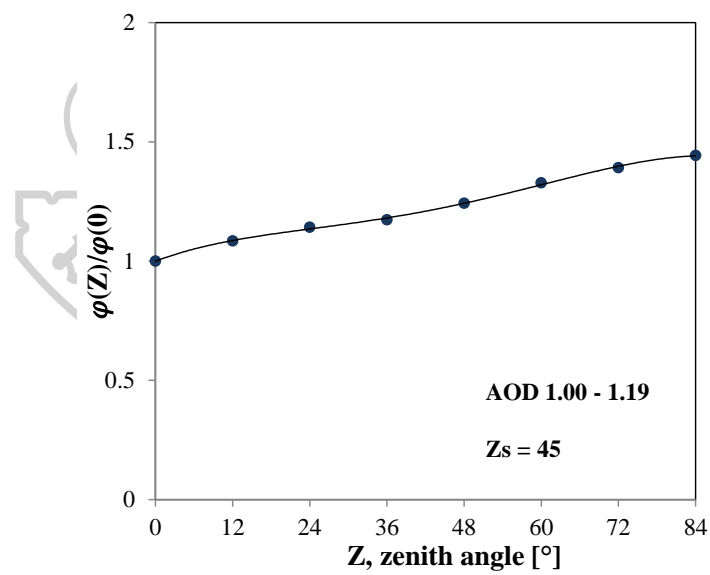
รูปที่ 3.80 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิธ Z ที่มีมุมเซนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 45^\circ$ และค่า AOD = 0.40 - 0.59



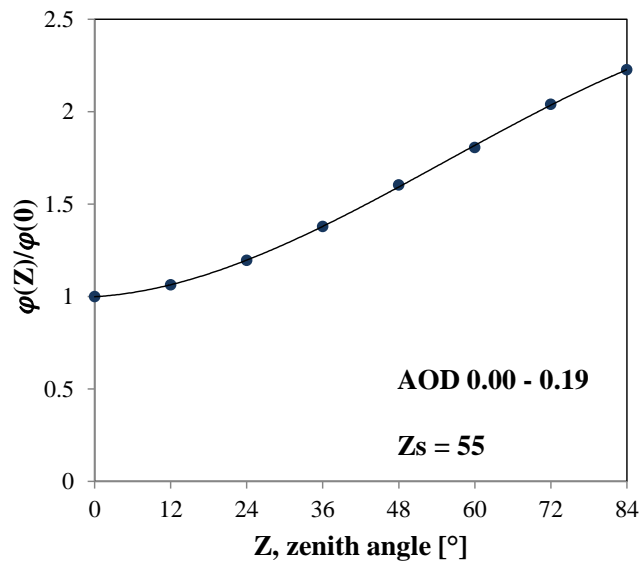
รูปที่ 3.81 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิธ Z ที่มีมุมเซนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 45^\circ$ และค่า AOD = 0.60 - 0.79



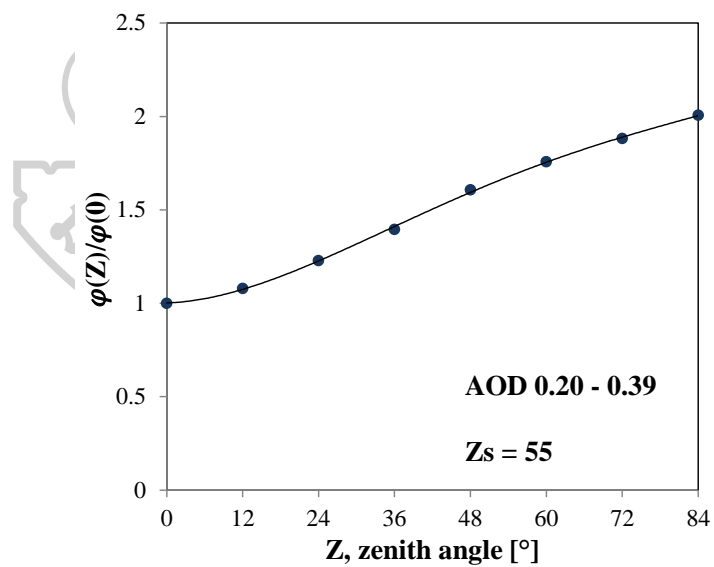
รูปที่ 3.82 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิธ Z ที่มีมุมเซนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 45^\circ$ และค่า AOD = 0.80 - 0.99



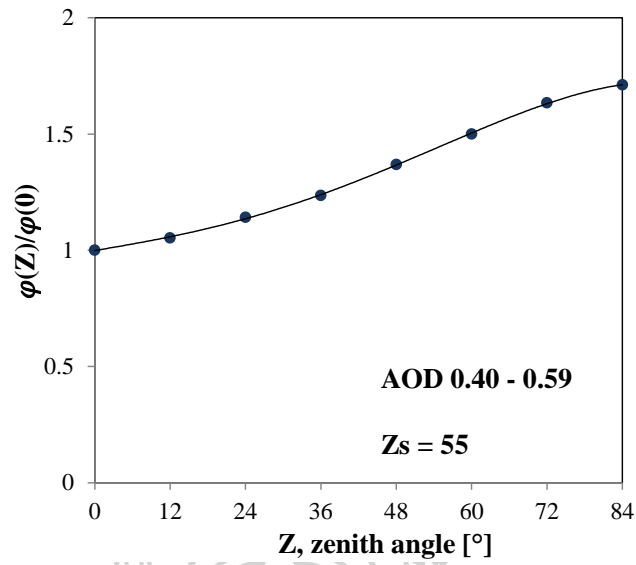
รูปที่ 3.83 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิธ Z ที่มีมุมเซนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 45^\circ$ และค่า AOD = 1.00 - 1.19



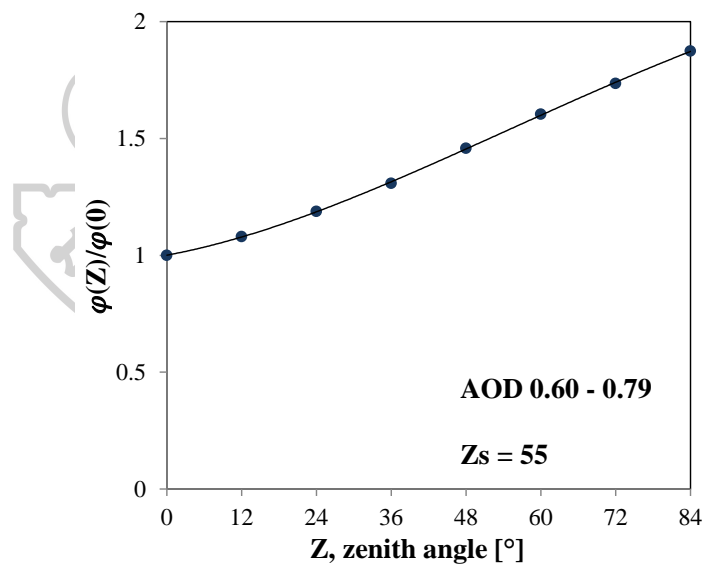
รูปที่ 3.84 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 55^\circ$ และค่า AOD = 0.00 - 0.19



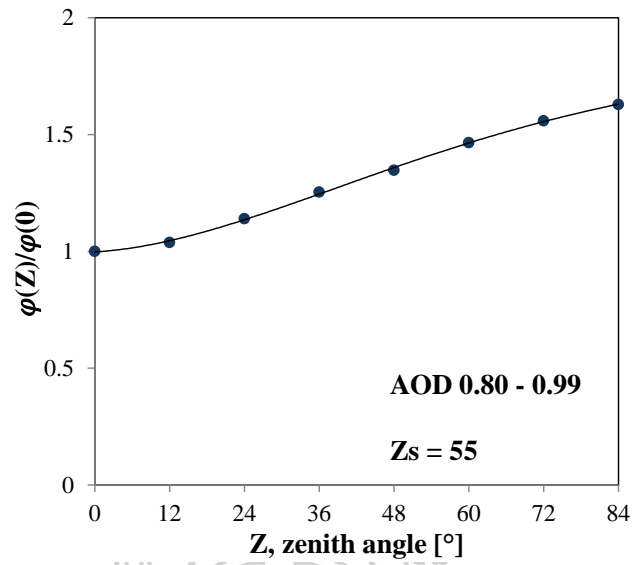
รูปที่ 3.85 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 55^\circ$ และค่า AOD = 0.20 - 0.39



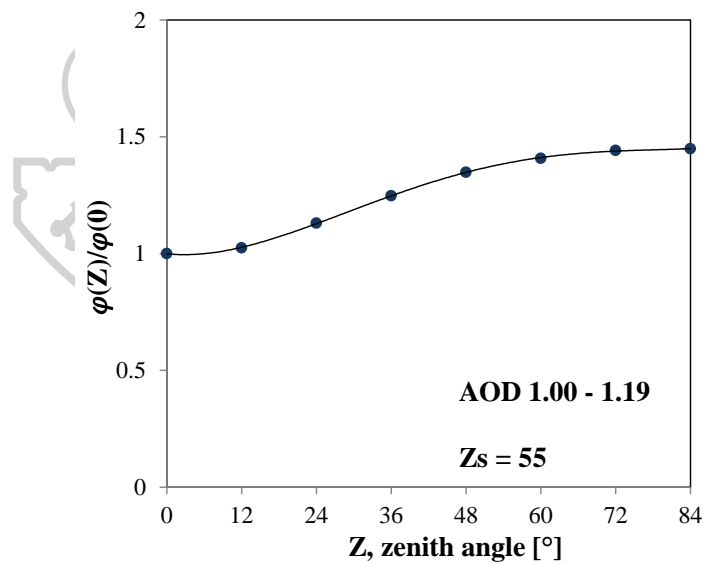
รูปที่ 3.86 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิธ Z ที่มีมุมเซนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 55^\circ$ และค่า AOD = 0.40 - 0.59



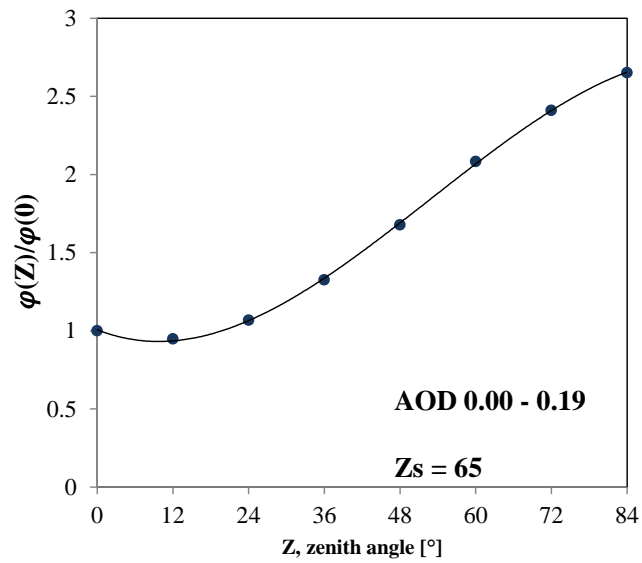
รูปที่ 3.87 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิธ Z ที่มีมุมเซนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 55^\circ$ และค่า AOD = 0.60 - 0.79



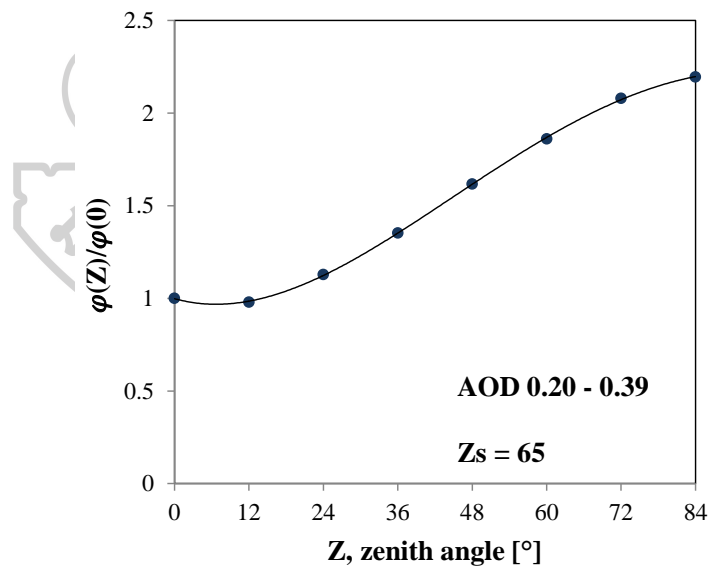
รูปที่ 3.88 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 55^\circ$ และค่า AOD = 0.80 - 0.99



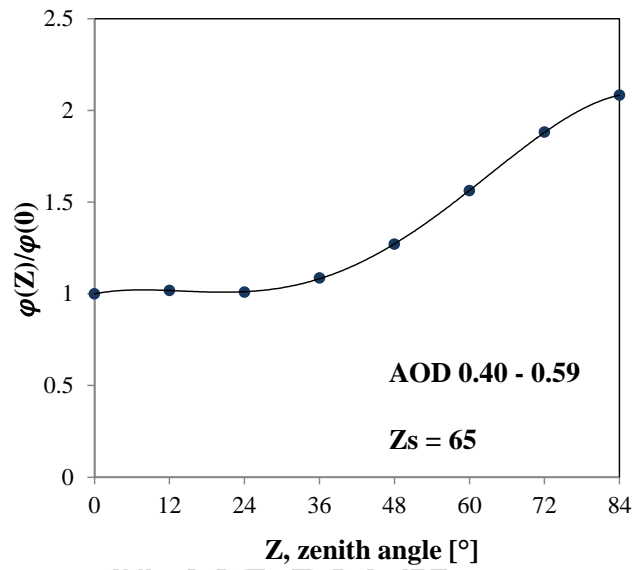
รูปที่ 3.89 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 55^\circ$ และค่า AOD = 1.00 - 1.19



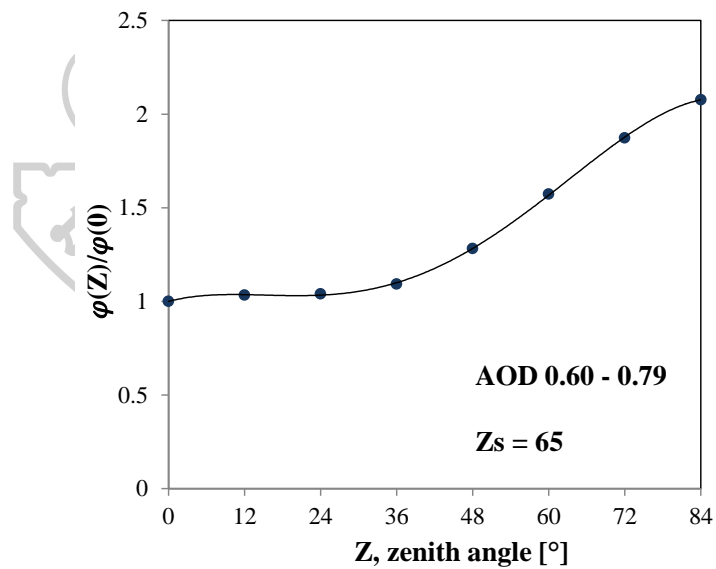
รูปที่ 3.90 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 65^\circ$ และค่า AOD = 0.00 - 0.19



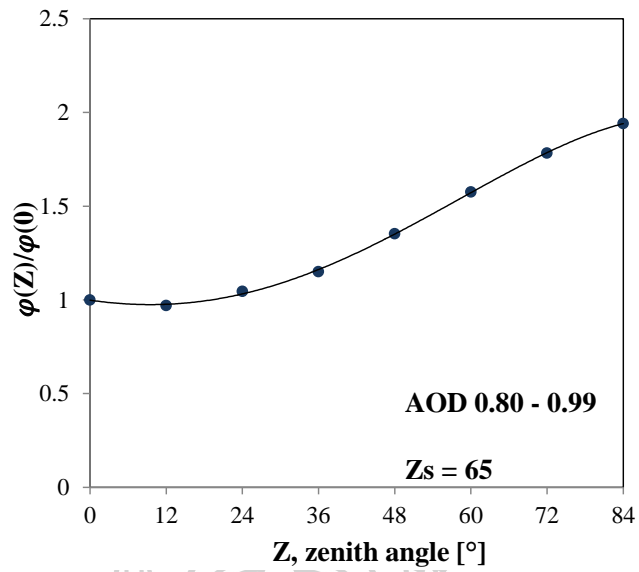
รูปที่ 3.91 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 65^\circ$ และค่า AOD = 0.20 - 0.39



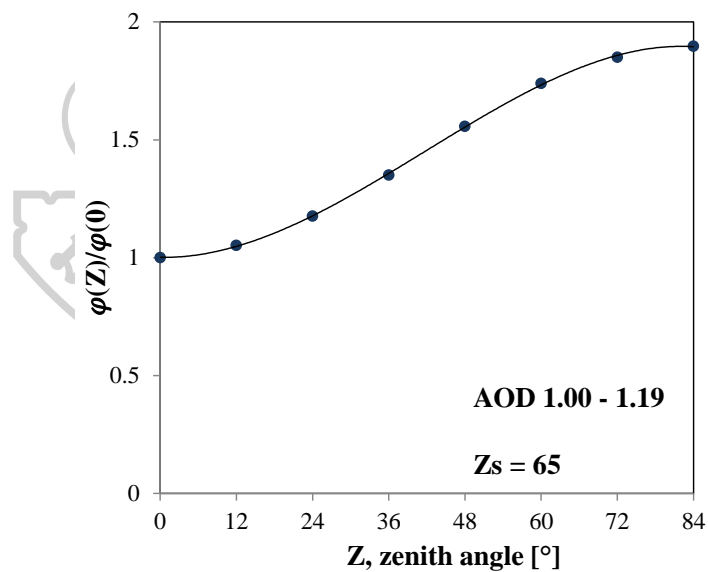
รูปที่ 3.92 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 65^\circ$ และค่า AOD = 0.40 - 0.59



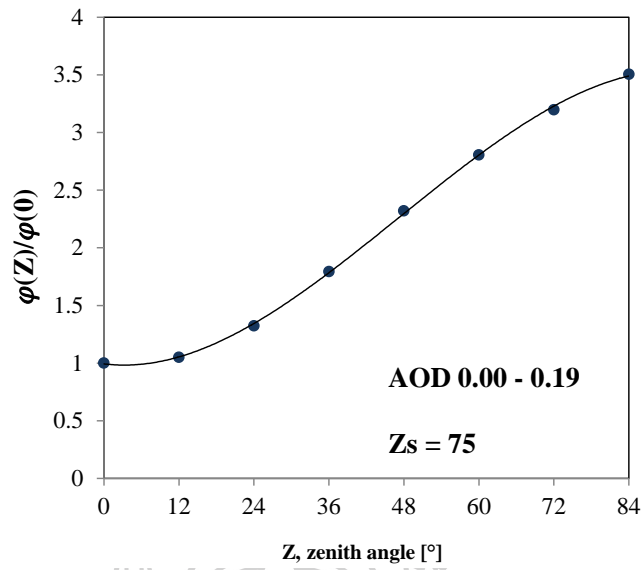
รูปที่ 3.93 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิต Z ที่มีมุมเซนิตของดวงอาทิตย์ $Z_s = 65^\circ$ และค่า AOD = 0.60 - 0.79



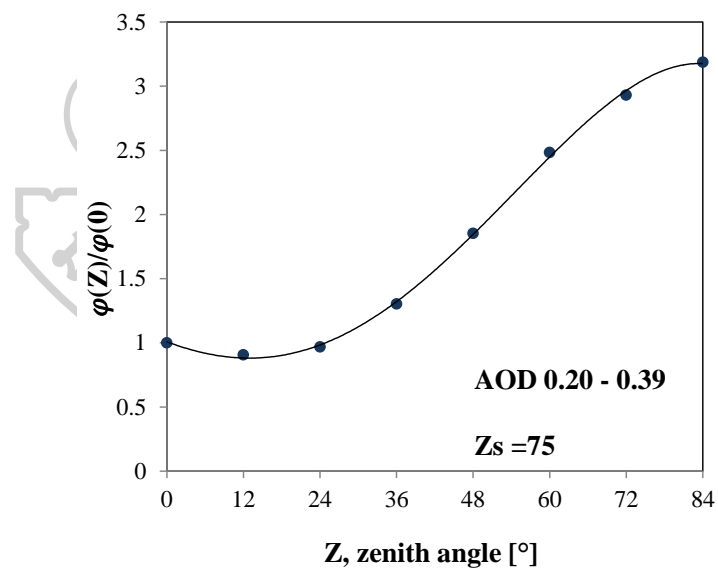
รูปที่ 3.94 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิธ Z ที่มีมุมเซนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 65^\circ$ และค่า AOD = 0.80 - 0.99



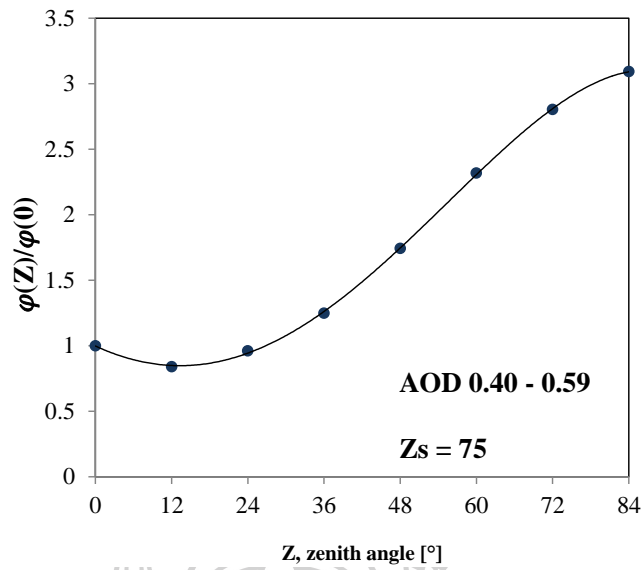
รูปที่ 3.95 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิธ Z ที่มีมุมเซนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 65^\circ$ และค่า AOD = 1.00 - 1.19



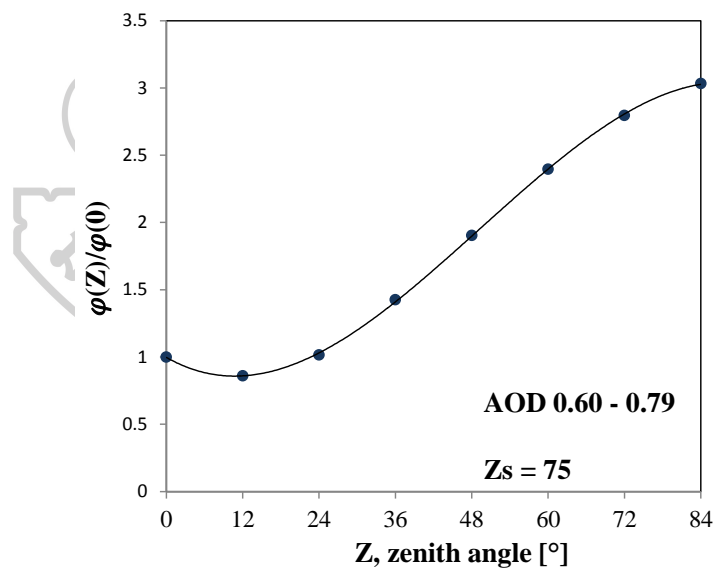
รูปที่ 3.96 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิธ Z ที่มีมุมเซนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 75^\circ$ และค่า AOD = 0.00 - 0.19



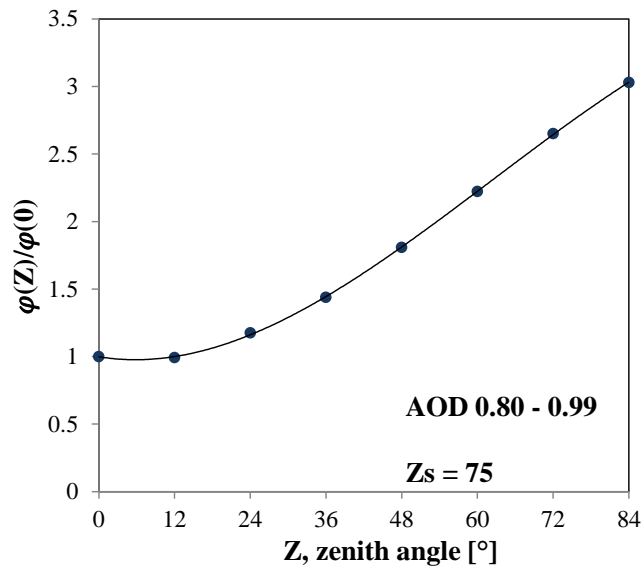
รูปที่ 3.97 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิธ Z ที่มีมุมเซนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 75^\circ$ และค่า AOD = 0.20 - 0.39



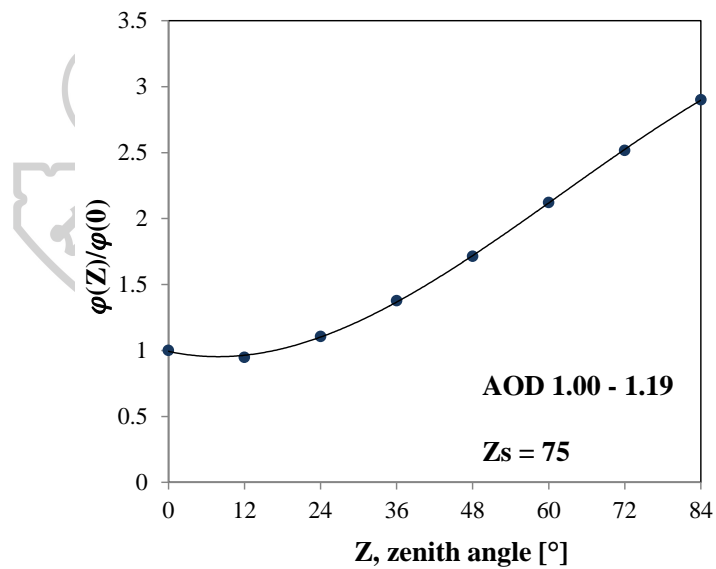
รูปที่ 3.98 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิธ Z ที่มีมุมเซนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 75^\circ$ และค่า AOD = 0.40 - 0.59



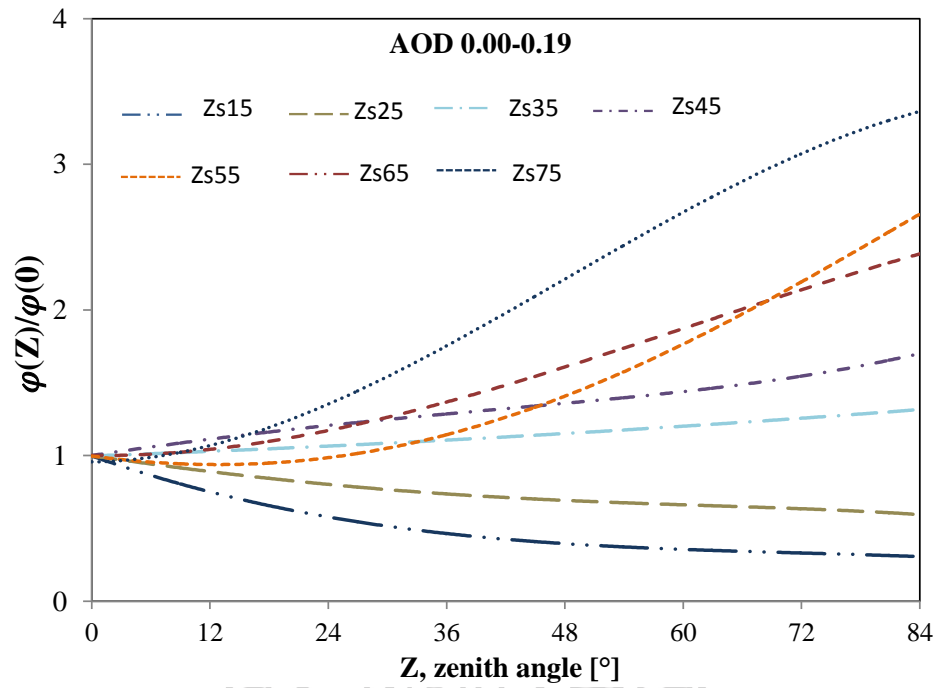
รูปที่ 3.99 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิธ Z ที่มีมุมเซนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 75^\circ$ และค่า AOD = 0.60 - 0.79



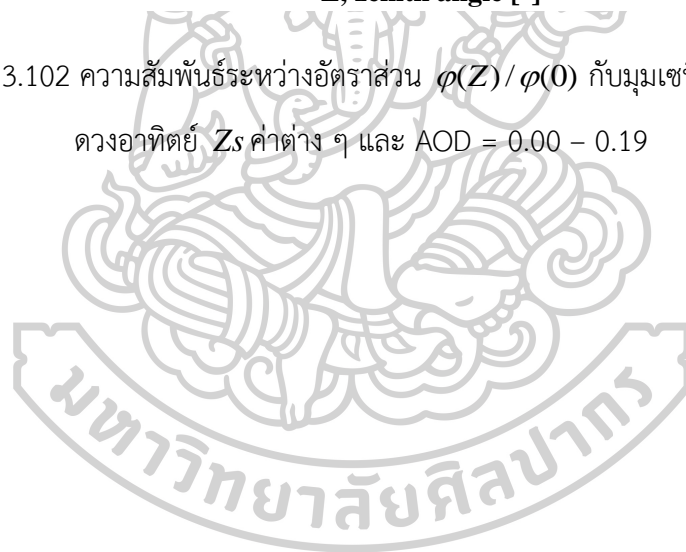
รูปที่ 3.100 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนนิธ Z ที่มีมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 75^\circ$ และค่า AOD = 0.80 - 0.99

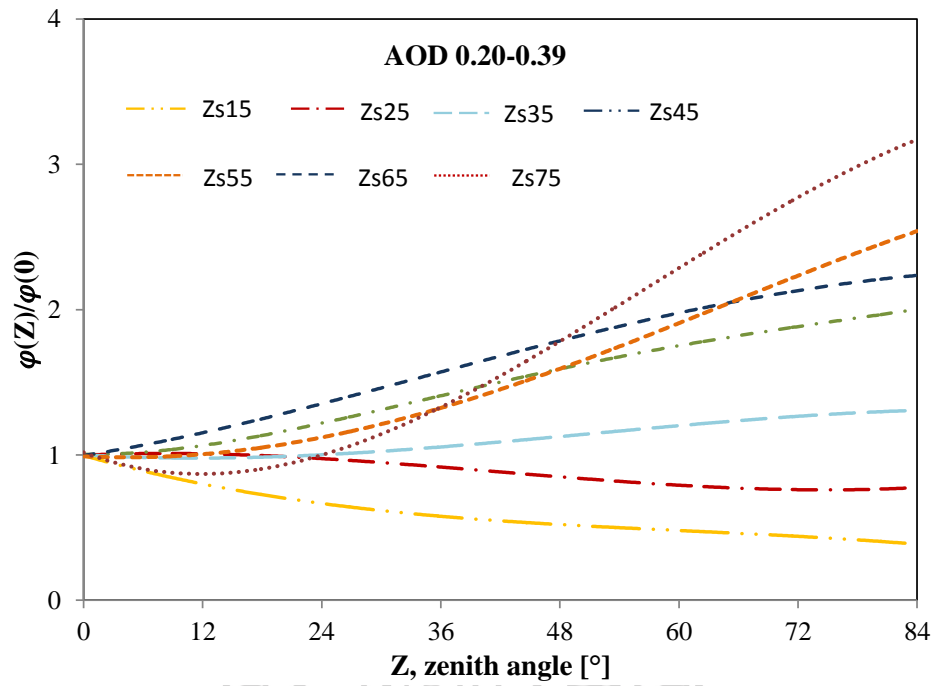


รูปที่ 3.101 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนนิธ Z ที่มีมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ $Z_s = 75^\circ$ และค่า AOD = 1.00 - 1.19

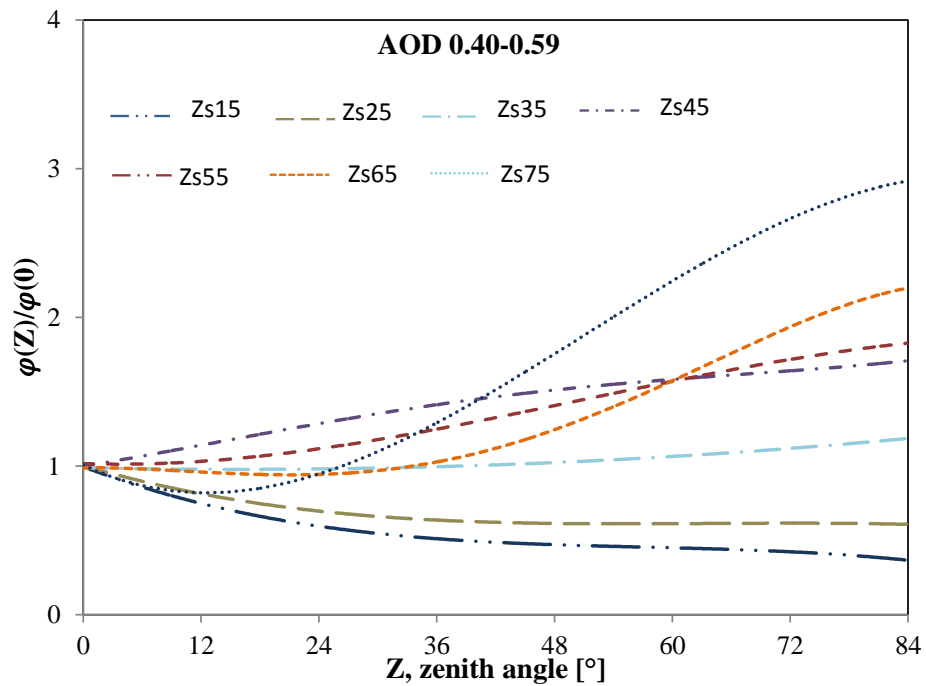


รูปที่ 3.102 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิธ Z ที่มุมเซนิธของ
ดวงอาทิตย์ Z_s ค่าต่าง ๆ และ AOD = 0.00 – 0.19

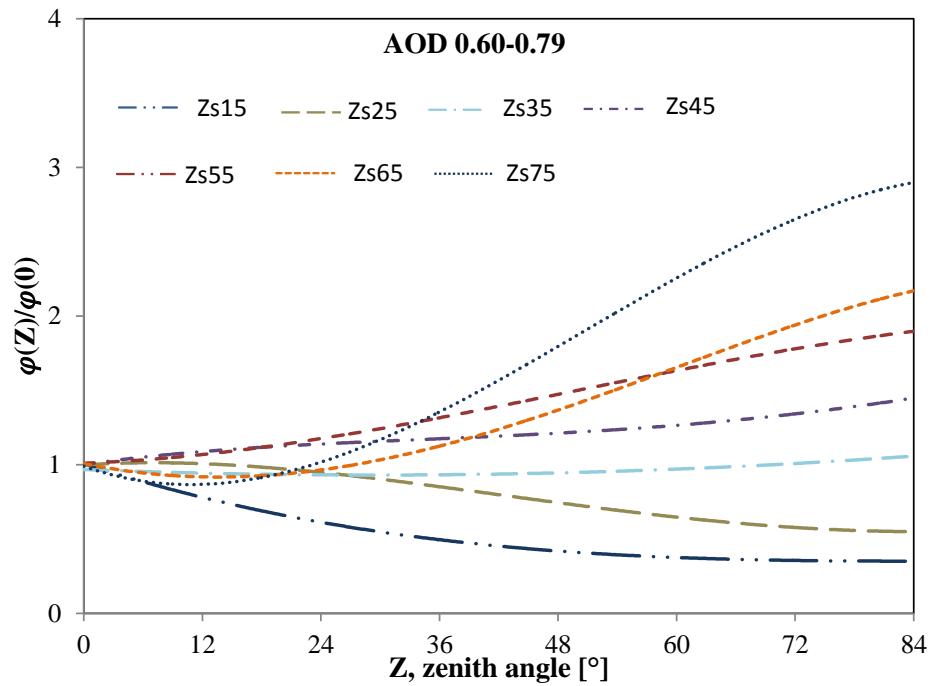




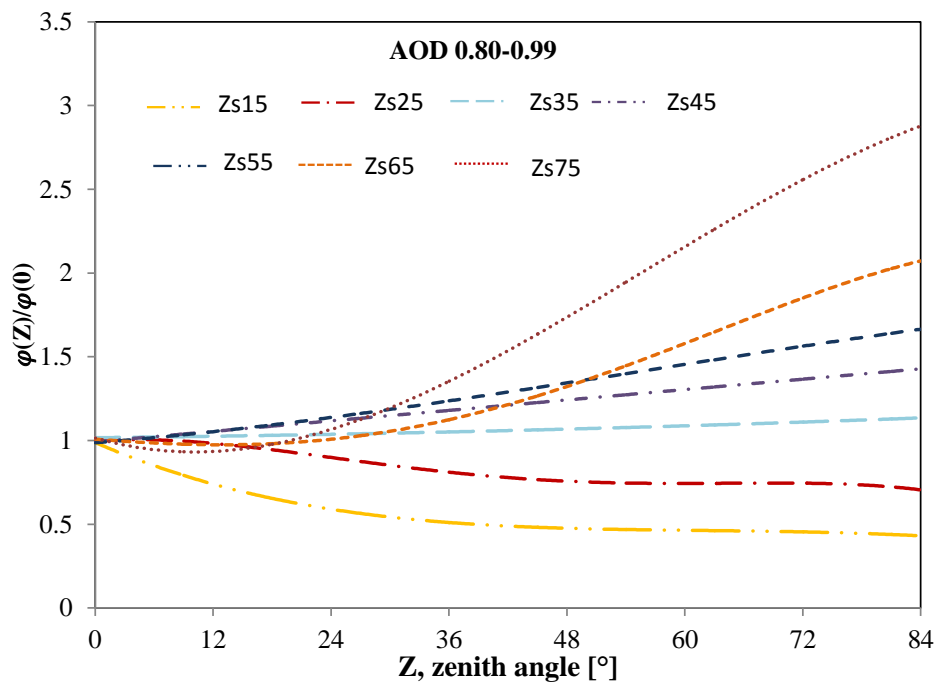
รูปที่ 3.103 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนนิธ Z ที่มุมเซนนิธของ
ดวงอาทิตย์ Z_s ค่าต่าง ๆ และ $AOD = 0.20 - 0.39$



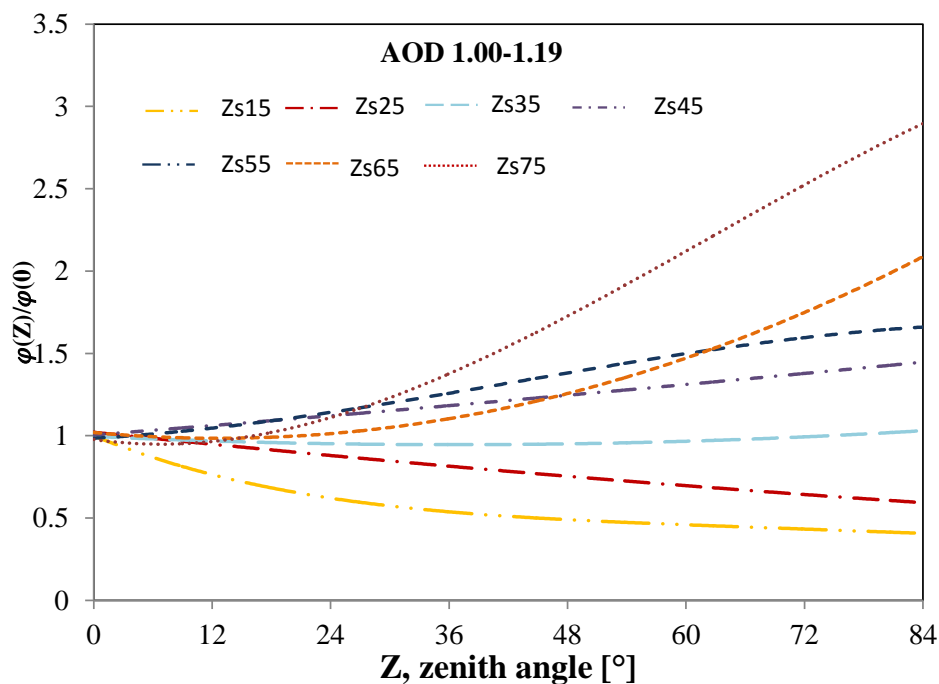
รูปที่ 3.104 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนนิธ Z ที่มุมเซนนิธของ
ดวงอาทิตย์ Z_s ค่าต่าง ๆ และ $AOD = 0.40 - 0.59$



รูปที่ 3.105 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิธ Z ที่มุมเซนิธของ
ดวงอาทิตย์ Z_s ค่าต่าง ๆ และ AOD = 0.60 – 0.79



รูปที่ 3. 106 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนิธ Z ที่มุมเซนิธของ
ดวงอาทิตย์ Z_s ค่าต่าง ๆ และ AOD = 0.80 – 0.99



รูปที่ 3.107 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนนิธ Z ที่มุมเซนนิธของ
ดวงอาทิตย์ Z_s ค่าต่าง ๆ และ AOD = 1.00 – 1.19

จากผลการเปรียบเทียบกราฟ $\varphi(Z)/\varphi(0)$ กับมุมเซนนิธ Z ตามรูปที่ 3.102 – 3.107 จะเห็นว่า $\varphi(Z)/\varphi(0)$ ที่สภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆซึ่งจำแนกสภาพท้องฟ้าด้วย AOD นอกจากจะแปรตามมุมเซนนิธของตำแหน่งที่พิจารณา Z แล้ว ยังแปรตามมุมเซนนิธของดวงอาทิตย์ Z_s ด้วย ผลดังกล่าวสอดคล้องกับความเป็นจริง ทั้งนี้เพราะที่ตำแหน่งของดวงอาทิตย์ส่งผลต่อปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนท้องฟ้า

หลังจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาโปรแกรม STATISTICA โดยวิธี non-linear estimation ซึ่งเขียน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ ได้เป็นฟังก์ชันของ Z และ Z_s โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของ a_0, a_1, a_2, a_3 และ a_4 แบ่งเป็นกลุ่มตามค่าของ AOD ซึ่งเขียนได้ดังสมการที่ 3.27

$$\frac{\varphi(Z)}{\varphi(0)} = [1 + a_0 Z \exp\left(\frac{\cos a_1}{\cos a_2}\right) + a_3 Z Z_s \exp(a_4 Z)] \quad (3.27)$$

สมการที่ (3.27) เป็น analysis form ของฟังก์ชัน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.87, 0.87, 0.87, 0.88 และ 0.73 ที่กรณี AOD เท่ากับ 0.00 – 0.19, 0.20 – 0.39, 0.40 – 0.59,

0.60 – 0.79, 0.80 – 0.99 และ 1.00 – 1.19 ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์ของ a_0, a_1, a_2, a_3 และ a_4 มีค่าขึ้นอยู่กับ AOD ดังแสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ a_0, a_1, a_2, a_3 และ a_4 ที่ได้จากตารางการวิเคราะห์ด้วยวิธี Non-linear estimation

AOD	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	R^2
0.00-0.19	-0.01392	10.98124	0.10172	0.00028	0.00069	0.87
0.20-0.39	-0.01393	10.98349	0.10208	0.00028	0.00068	0.87
0.40-0.59	-0.01392	10.98252	0.10172	0.00028	0.00690	0.87
0.60-0.79	-0.01260	10.97600	0.10370	0.00020	0.00880	0.88
0.80-0.99	-0.00509	1.66609	0.12080	0.000001	0.08682	0.78
1.00-1.19	-0.00603	-4.68275	0.10802	0.00010	0.07399	0.73

3.2.3.5 การวิเคราะห์หาฟังก์ชัน $f(x)/f(Z_s)$

ในทำนองเดียวกัน สำหรับการหาฟังก์ชัน $f(x)/f(Z_s)$ ผู้วิจัยจะนำค่าในตารางที่ 3.3 ไปแทนในสมการที่ (3.1) โดยที่ค่า Z คงที่ค่าหนึ่งจะหา R/R_z ที่ x ต่าง ๆ ตัวอย่างเช่นกรณี AOD = AOD₁, $Z = Z_1$ และ $Z_s = Z_{s1}$ ดังสมการ

$$\text{ที่ } Z = Z_1, x = x_1 \quad \frac{R(Z_1, x_1)}{R_z} = \frac{\varphi(Z_1)}{\varphi(0)} \cdot \frac{f(x_1)}{f(Z_{s1})} \quad (3.28)$$

$$\text{ที่ } Z = Z_1, x = x_2 \quad \frac{R(Z_1, x_2)}{R_z} = \frac{\varphi(Z_1)}{\varphi(0)} \cdot \frac{f(x_2)}{f(Z_{s1})} \quad (3.29)$$

$$\text{ที่ } Z = Z_1, x = x_3 \quad \frac{R(Z_1, x_3)}{R_z} = \frac{\varphi(Z_1)}{\varphi(0)} \cdot \frac{f(x_3)}{f(Z_{s1})} \quad (3.30)$$

$$\text{ที่ } Z = Z_1, x = x_4 \quad \frac{R(Z_1, x_4)}{R_z} = \frac{\varphi(Z_1)}{\varphi(0)} \cdot \frac{f(x_4)}{f(Z_{s1})} \quad (3.31)$$

$$\text{ที่ } Z = Z_1, x = x_5 \quad \frac{R(Z_1, x_5)}{R_z} = \frac{\varphi(Z_1)}{\varphi(0)} \cdot \frac{f(x_5)}{f(Z_{s1})} \quad (3.32)$$

$$\text{ที่ } Z = Z_1, \chi = \chi_6 \quad \frac{R(Z_1, \chi_6)}{R_Z} = \frac{\varphi(Z_1)}{\varphi(0)} \cdot \frac{f(\chi_6)}{f(\chi_{ref})} \quad (3.33)$$

$$\text{ที่ } Z = Z_1, \chi = \chi_{ref} \quad \frac{R(Z_1, \chi_4)}{R_Z} = \frac{\varphi(Z_1)}{\varphi(0)} \cdot \frac{f(\chi_4)}{f(\chi_{ref})} \quad (3.34)$$

$$\vdots$$

$$\text{ที่ } Z = Z_1, \chi = \chi_{30} \quad \frac{R(Z_1, \chi_{30})}{R_Z} = \frac{\varphi(Z_1)}{\varphi(0)} \cdot \frac{f(\chi_{30})}{f(\chi_{ref})} \quad (3.35)$$

จากนั้นนำสมการ (3.28) ถึง (3.35) หาคงตลอดด้วยสมการ (3.34) ได้สมการดังนี้

$$\frac{R(Z_1, \chi_1)}{R_Z(Z_1, \chi_{ref})} = \frac{f(\chi_1)}{f(\chi_{ref})} \quad (3.36)$$

$$\frac{R(Z_1, \chi_2)}{R_Z(Z_1, \chi_{ref})} = \frac{f(\chi_2)}{f(\chi_{ref})} \quad (3.37)$$

$$\frac{R(Z_1, \chi_3)}{R_Z(Z_1, \chi_{ref})} = \frac{f(\chi_3)}{f(\chi_{ref})} \quad (3.38)$$

$$\frac{R(Z_1, \chi_4)}{R_Z(Z_1, \chi_{ref})} = \frac{f(\chi_4)}{f(\chi_{ref})} \quad (3.39)$$

$$\frac{R(Z_1, \chi_5)}{R_Z(Z_1, \chi_{ref})} = \frac{f(\chi_5)}{f(\chi_{ref})} \quad (3.40)$$

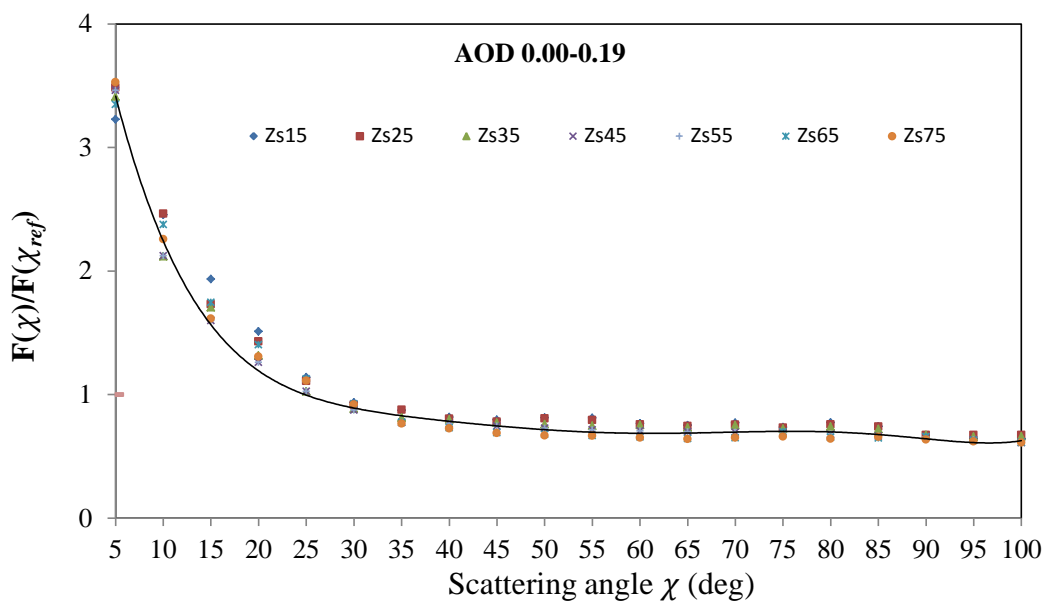
$$\frac{R(Z_1, \chi_6)}{R_Z(Z_1, \chi_{ref})} = \frac{f(\chi_6)}{f(\chi_{ref})} \quad (3.41)$$

$$\frac{R(Z_1, \chi_7)}{R_Z(Z_1, \chi_{ref})} = \frac{f(\chi_7)}{f(\chi_{ref})} \quad (3.42)$$

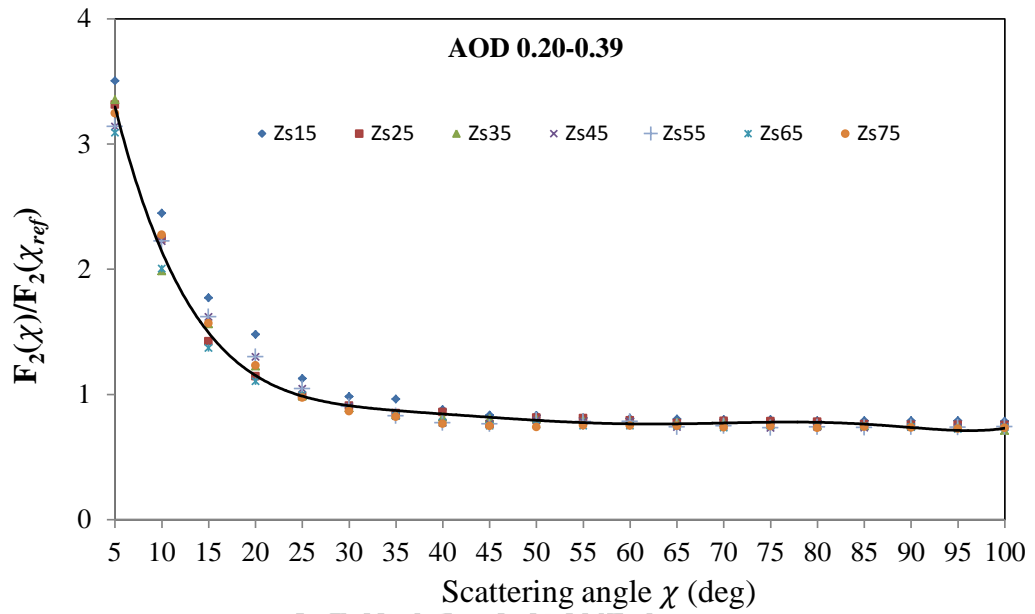
$$\vdots$$

$$\frac{R(Z_1, \chi_{30})}{R_Z(Z_1, \chi_{ref})} = \frac{f(\chi_{30})}{f(\chi_{ref})} \quad (3.43)$$

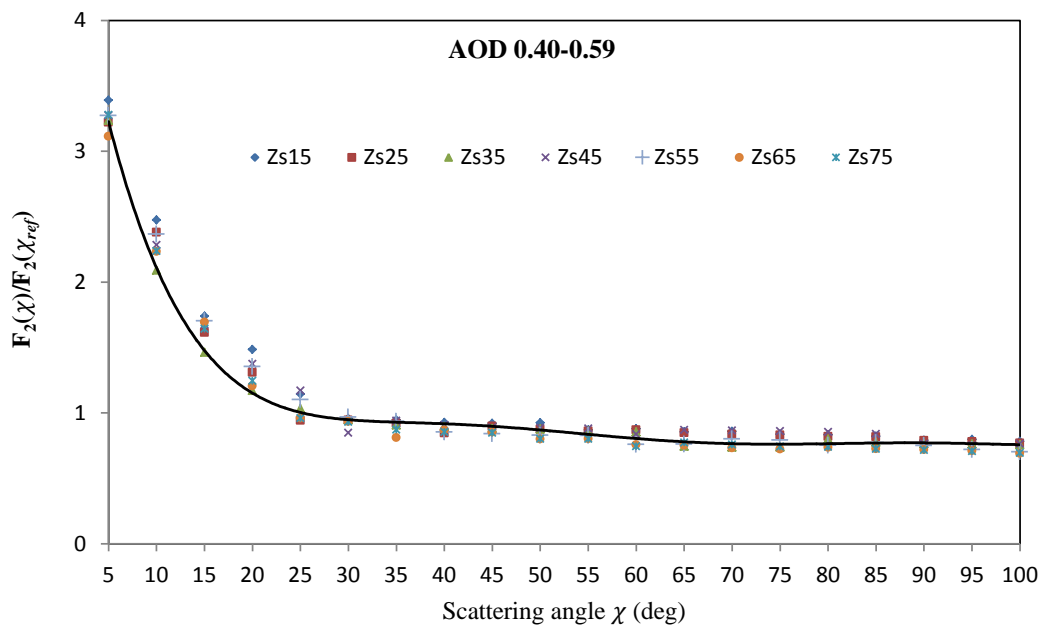
เนื่องจากค่า $R(Z_1, \chi_1)/R_Z(Z_1, \chi_{ref})$ จนถึง $R(Z_1, \chi_{30})/R_Z(Z_1, \chi_{ref})$ สามารถหาได้จากข้อมูลซึ่งจัดเตรียมไว้จากตารางที่ 3.3 ดังนั้นจึงสามารถหาค่า $f(\chi_1)/f(\chi_{ref}), \dots, f(\chi_{30})/f(\chi_{ref})$ ได้ จากนั้นผู้วิจัยจะทำซ้ำกระบวนการเดิมกับชุดข้อมูลที่ Z_2 จนถึง Z_8 และ χ_2 จนถึง χ_{30} และหาค่าอัตราส่วนของฟังก์ชันที่กรณี AOD และ Z_s ค่าอื่น ๆ จากนั้นผู้วิจัยจะนำค่า $f(\chi)/f(\chi_{ref})$ ที่ได้ไปเขียนกราฟกับค่า χ ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 3.108 – 3.113 และนำมาเขียนรวม AOD ทุกช่วง ดังรูปที่ 3.114



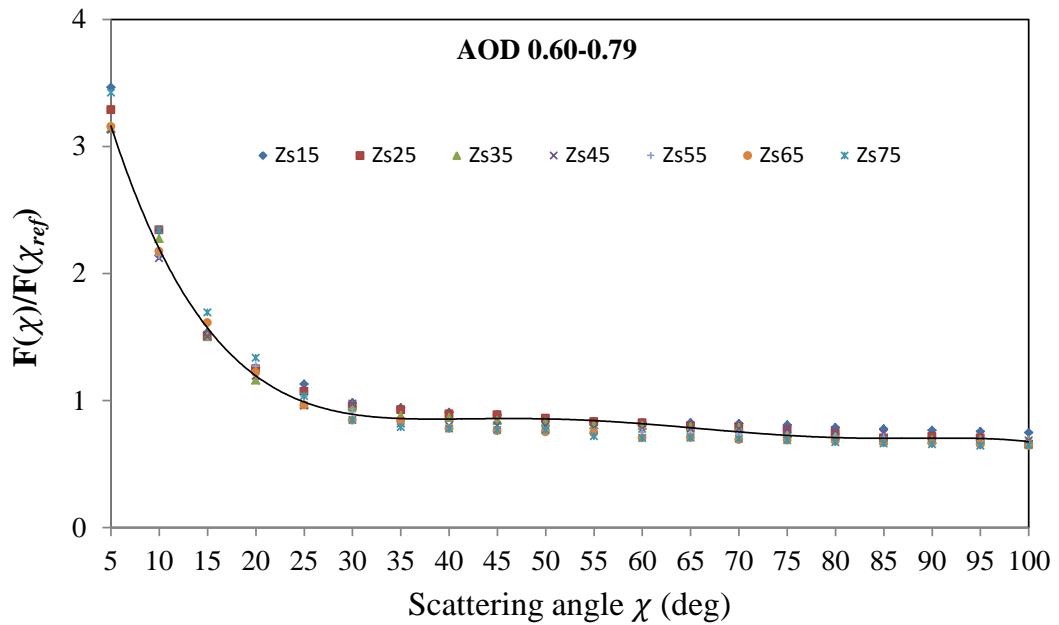
รูปที่ 3.108 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $f(\chi)/f(Z_s)$ กับ χ ที่ AOD = 0.00 - 0.19 ที่ Z_s ค่าต่าง ๆ



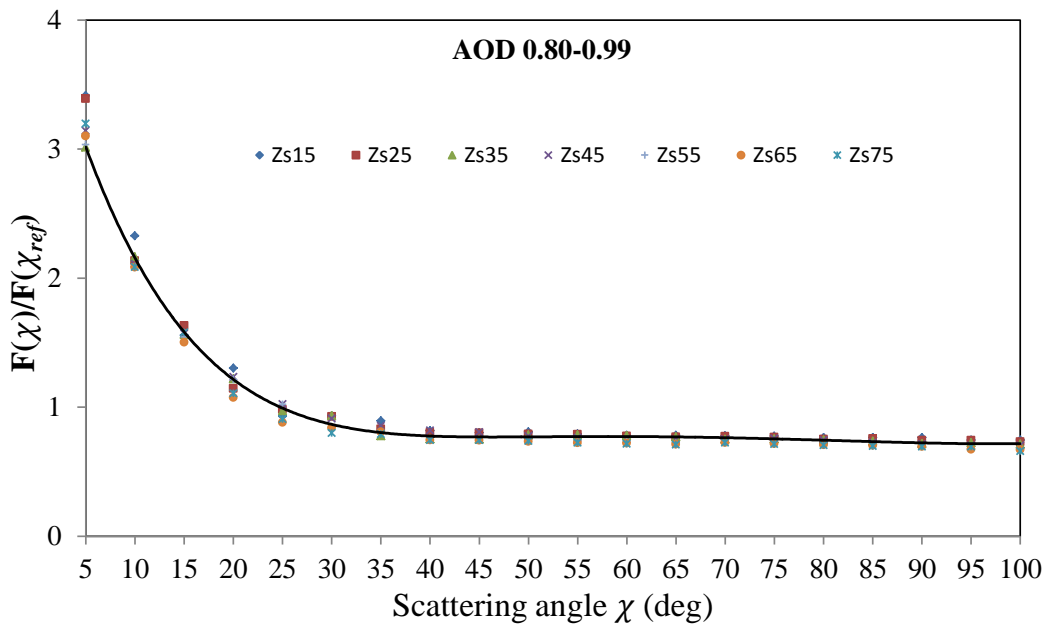
รูปที่ 3.109 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $f(\chi)/f(Z_s)$ กับ χ ที่ AOD = 0.20 - 0.39
ที่ Z_s ค่าต่าง ๆ



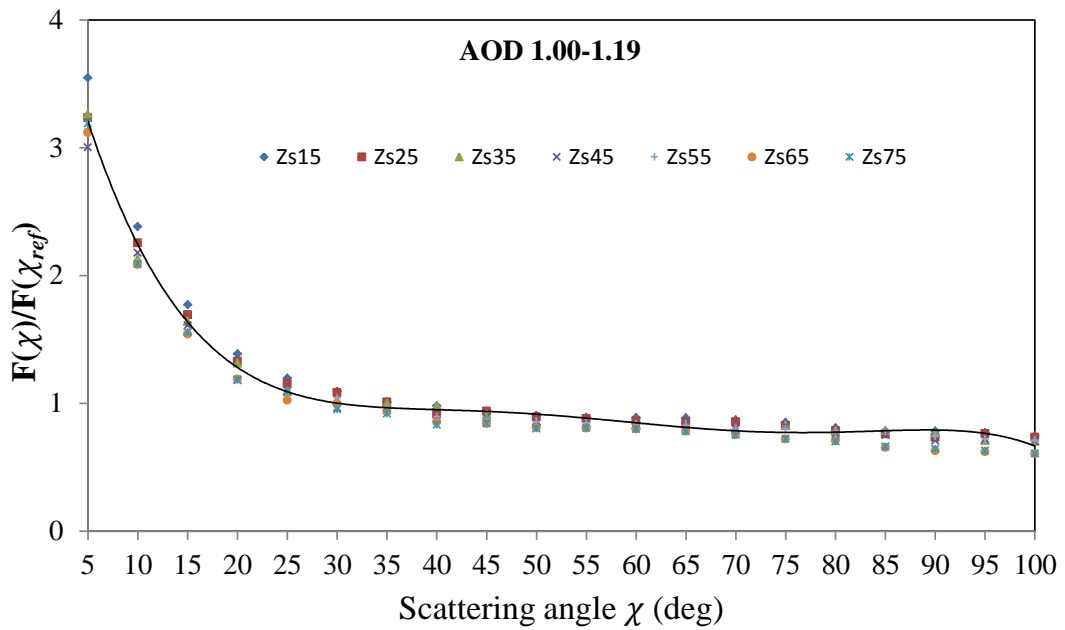
รูปที่ 3.110 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $f(\chi)/f(Z_s)$ กับ χ ที่ AOD = 0.40 - 0.59
ที่ Z_s ค่าต่าง ๆ



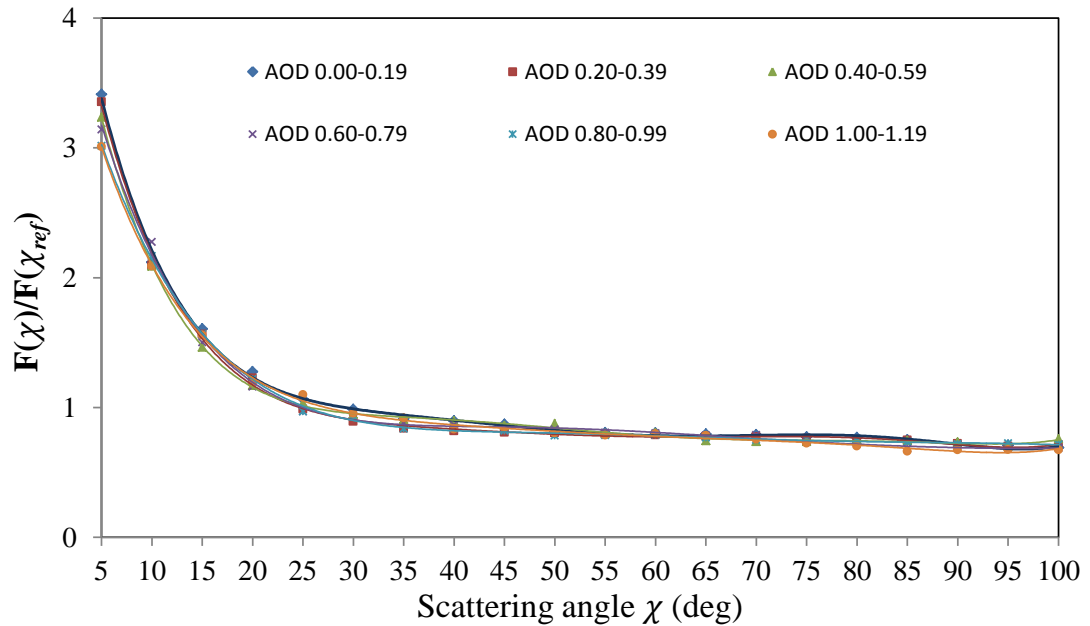
รูปที่ 3.111 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $f(\chi)/f(Zs)$ กับ χ ที่ AOD = 0.60 - 0.79
ที่ Zs ค่าต่าง ๆ



รูปที่ 3.112 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $f(\chi)/f(Zs)$ กับ χ ที่ AOD = 0.80 - 0.99
ที่ Zs ค่าต่าง ๆ



รูปที่ 3.113 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $f(\chi)/f(Z_s)$ กับ χ ที่ AOD = 1.00 - 1.19
ที่ Z_s ค่าต่าง ๆ



รูปที่ 3.114 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน $f(\chi)/f(Z_s)$ กับ χ ที่ AOD ทุก ๆ ช่วง

จากกราฟจะเห็นว่า $f(\chi)/f(\chi_{ref})$ ไม่ขึ้นกับ Zs ซึ่งแตกต่างจากกรณีฟังก์ชัน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้พัฒนาโปรแกรม STATISTICA โดยวิธี non-linear estimation ซึ่งเขียน $f(\chi)/f(\chi_{ref})$ ได้เป็นฟังก์ชันของเอกซ์โพเนนเชียลซึ่งขึ้นกับค่า χ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แบ่งเป็นกลุ่มตามค่าของ AOD ผลที่ได้แสดงดังสมการที่ (3.44)

$$\frac{f(\chi)}{f(\chi_{ref})} = b_0 + b_1\chi \exp(b_2\chi) \quad (3.44)$$

สมการที่ (3.44) เป็น analysis form ของฟังก์ชัน $f(\chi)/f(\chi_{ref})$ โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.64, 0.66, 0.63, 0.65, 0.66 และ 0.64 ที่กรณี AOD เท่ากับ 0.00 – 0.19, 0.20 – 0.39, 0.40 – 0.59, 0.60 – 0.79, 0.80 – 0.99 และ 1.00 – 1.19 ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์ b_0 , b_1 และ b_2 ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า AOD ที่ได้จากวิธี non-linear estimation ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการของ $f(\chi)/f(\chi_{ref})$ ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี non-linear estimation

AOD	b_0	b_1	b_2	R^2
0.00-0.19	15.01905	-0.68238	0.01838	0.64
0.20-0.39	16.86554	-0.81100	-0.01902	0.66
0.40-0.59	17.16929	-0.80827	-0.01884	0.63
0.60-0.79	20.41401	-1.01575	-0.01947	0.65
0.80-0.99	21.31779	-1.08092	-0.01971	0.66
1.00-1.19	15.72933	-0.71650	-0.01848	0.64

เมื่อแทนค่า $\chi = Zs$ ลงในสมการที่ (3.44) จะได้

$$\frac{f(Zs)}{f(\chi_{ref})} = b_0 + b_1Zs \exp(b_2Zs) \quad (3.45)$$

จากนั้นนำสมการ (3.44) ทหารด้วยสมการ (3.45) จะได้

$$\frac{f(\chi)}{f(Zs)} = \frac{b_0 + b_1\chi \exp(b_2\chi)}{b_0 + b_1Zs \exp(b_2Zs)} \quad (3.46)$$

สมการที่ (3.46) เป็น analytical form ของ $f(\chi)/f(Zs)$ ตามที่ต้องการ

3.2.4 แบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า

จากการวิเคราะห์ข้อมูลข้างต้นจะได้ฟังก์ชัน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ ตามสมการ (3.27) และฟังก์ชัน $f(\chi)/f(Zs)$ ตามสมการ (3.46) จากนั้นนำฟังก์ชัน $\varphi(Z)/\varphi(0)$ และ $f(\chi)/f(Zs)$ ที่ได้ไปแทนค่าในสมการ (3.1) ทำให้ได้แบบจำลองสำหรับคำนวณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า (relative sky radiance) ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ โดยสามารถเขียนได้ดังสมการ (3.47)

$$\frac{R}{R_z} = [1 + a_0Z \exp(\frac{\cos a_1}{\cos a_2}) + a_3ZZs \exp(a_4Z)] \times \frac{b_0 + b_1\chi \exp(b_2\chi)}{b_0 + b_1Zs \exp(b_2Zs)} \quad (3.47)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์ $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, b_0, b_1$ และ b_2 แบ่งเป็นกลุ่มตามค่าของ AOD ซึ่งพัฒนาด้วยโปรแกรม STATISTICA โดยวิธี non-linear estimation ดังแสดงในตารางที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ

3.3 การทดสอบแบบจำลอง

ถึงแม้ว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นจะพิจารณาตัวแปรที่มีผลต่อความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าครบถ้วนแล้ว แต่ก่อนที่จะนำแบบจำลองมาใช้งานได้ ผู้วิจัยจะทำการทดสอบความละเอียดถูกต้องของแบบจำลอง โดยการนำแบบจำลองดังกล่าวไปคำนวณหาค่า R/R_z โดยใช้ข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าที่วัดด้วยเครื่อง sky scanner ที่สถานีเชียงใหม่

ในการทดสอบแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นผู้วิจัยทำการเลือกชั่วโมงที่ปราศจากเมฆโดยสังเกตจากภาพถ่ายท้องฟ้าของเครื่อง sky view และหาค่า AOD ในช่วงเวลาที่สอดคล้องกัน จากนั้นนำค่า AOD ไปเลือกใช้ค่าสัมประสิทธิ์ต่าง ๆ ของแบบจำลองตามที่กล่าวมาแล้ว พร้อมทั้งคำนวณค่าอัตราส่วนของความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าที่ตำแหน่งใด ๆ และที่ตำแหน่งกลางท้องฟ้า R/R_z แล้วนำค่าอัตราส่วนดังกล่าวมาทำการเปรียบเทียบกับอัตราส่วนที่ได้จากการวัดโดย

เครื่อง sky scanner จากนั้นทำการทดสอบแบบจำลองโดยการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองและการวัด ซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 3.115 – 3.136 ค่าความแตกต่างของความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าที่ได้จากแบบจำลองและการวัดโดยมีความแตกต่างแสดงผลในรูปของ mean bias difference (MBD) และ root mean square difference (RMSD) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการ 3.48 และ 3.49 ตามลำดับ (Iqbal, 1983)

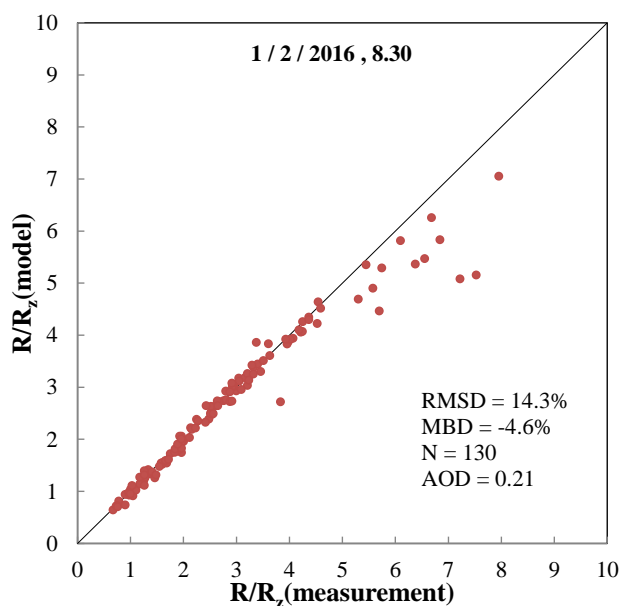
$$MBD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{R}{R_{Z \text{ Model}}} - \frac{R}{R_{Z \text{ Measure}}} \right) \times 100\% \quad (3.46)$$

$$RMSD = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{R}{R_{Z \text{ Model}}} - \frac{R}{R_{Z \text{ Measure}}} \right)^2}}{\frac{\bar{R}}{R_{Z \text{ Measure}}}} \times 100\% \quad (3.47)$$

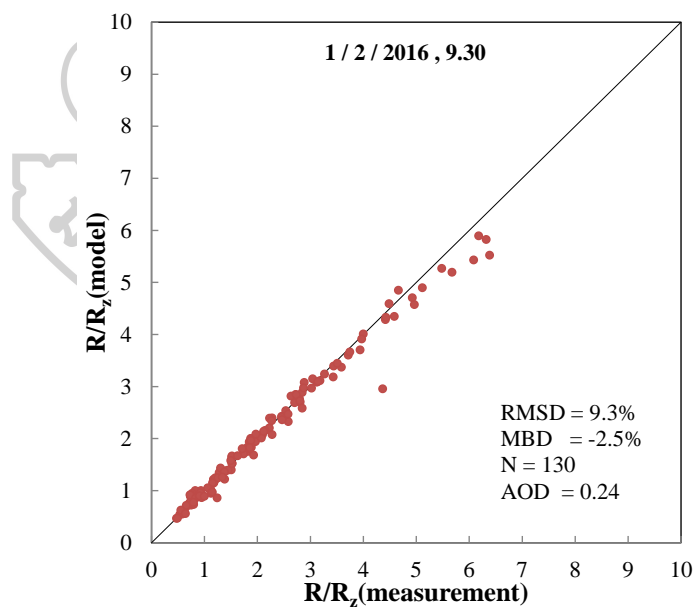
เมื่อ $\frac{R}{R_{Z \text{ Measure}}}$ คือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ จากท้องฟ้าที่ตำแหน่งพิจารณาเทียบกับตำแหน่งกลางท้องฟ้าที่ได้จากการวัด

$\frac{R}{R_{Z \text{ Model}}}$ คือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ จากท้องฟ้าที่ตำแหน่งพิจารณาเทียบกับตำแหน่งกลางท้องฟ้าที่ได้จากแบบจำลอง

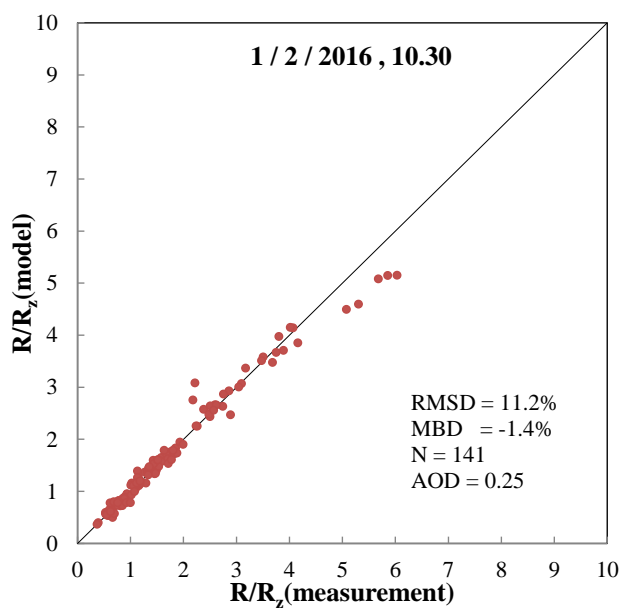
$\frac{\bar{R}}{R_{Z \text{ Measure}}}$ คือ อัตราส่วนเฉลี่ยระหว่างความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ จากท้องฟ้าที่ตำแหน่งพิจารณาเทียบกับตำแหน่งกลางท้องฟ้าที่ได้จากการวัด



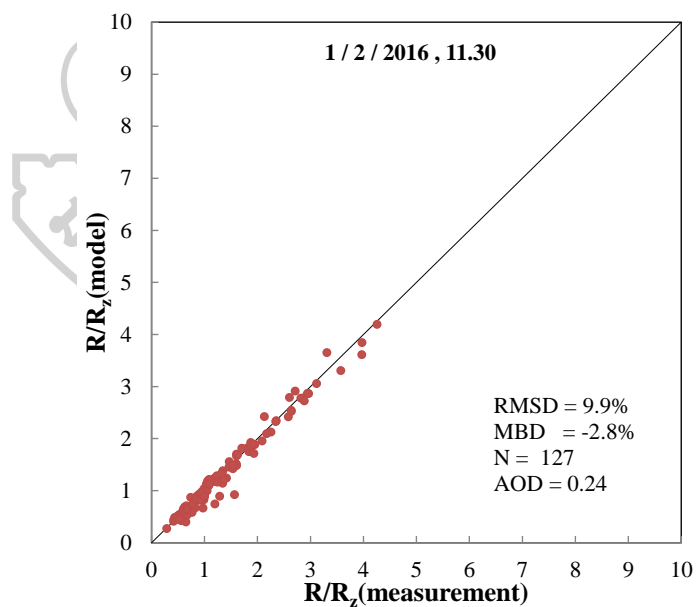
รูปที่ 3.115 การเปรียบเทียบค่า R/R_z ซึ่งได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดที่ เชียงใหม่ วันที่ 1 กุมภาพันธ์ ค.ศ. 2016 เวลา 8.30 นาฬิกา



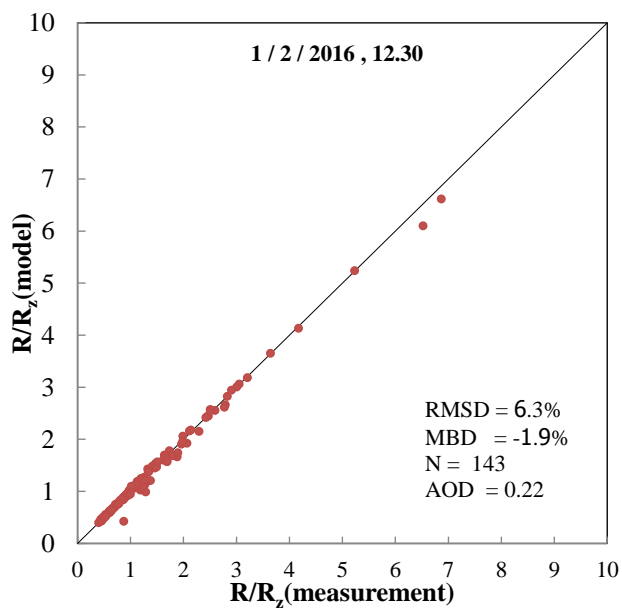
รูปที่ 3.116 การเปรียบเทียบค่า R/R_z ซึ่งได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดที่ เชียงใหม่ วันที่ 1 กุมภาพันธ์ ค.ศ. 2016 เวลา 9.30 นาฬิกา



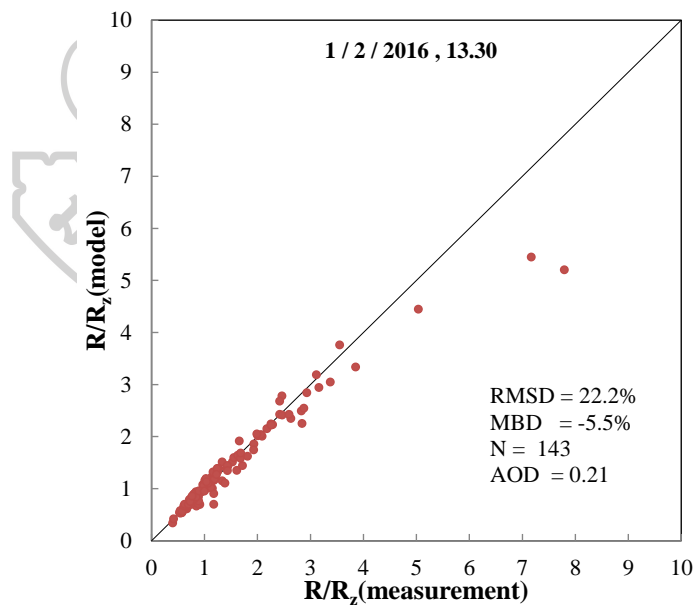
รูปที่ 3.117 การเปรียบเทียบค่า R/R_z ซึ่งได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดที่
 เชียงใหม่ วันที่ 1 กุมภาพันธ์ ค.ศ. 2016 เวลา 10.30 นาฬิกา



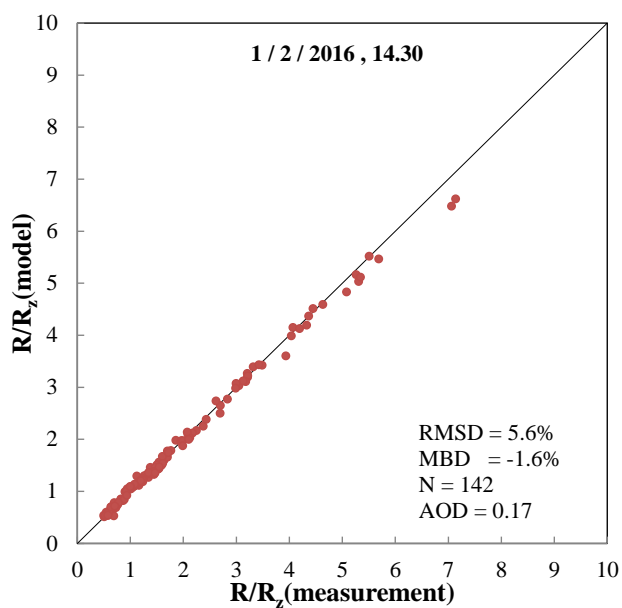
รูปที่ 3.118 การเปรียบเทียบค่า R/R_z ซึ่งได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดที่
 เชียงใหม่ วันที่ 1 กุมภาพันธ์ ค.ศ. 2016 เวลา 11.30 นาฬิกา



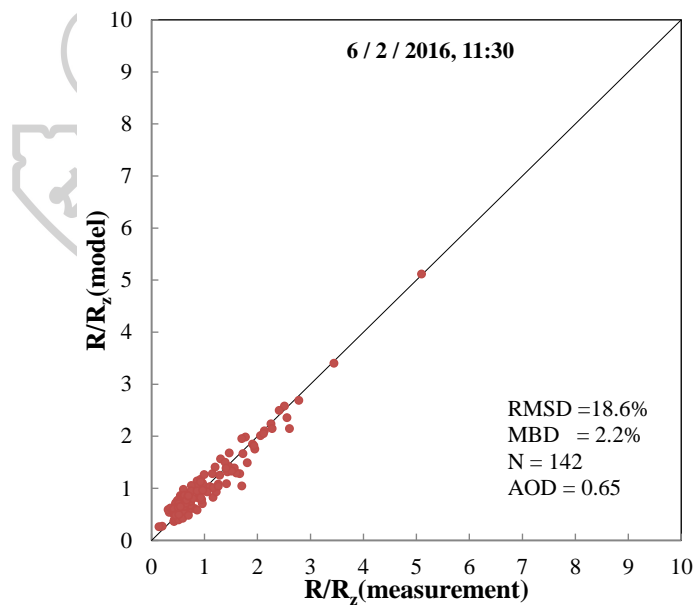
รูปที่ 3.119 การเปรียบเทียบค่า R/R_z ซึ่งได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดที่
เชียงใหม่ วันที่ 1 กุมภาพันธ์ ค.ศ. 2016 เวลา 12.30 นาฬิกา



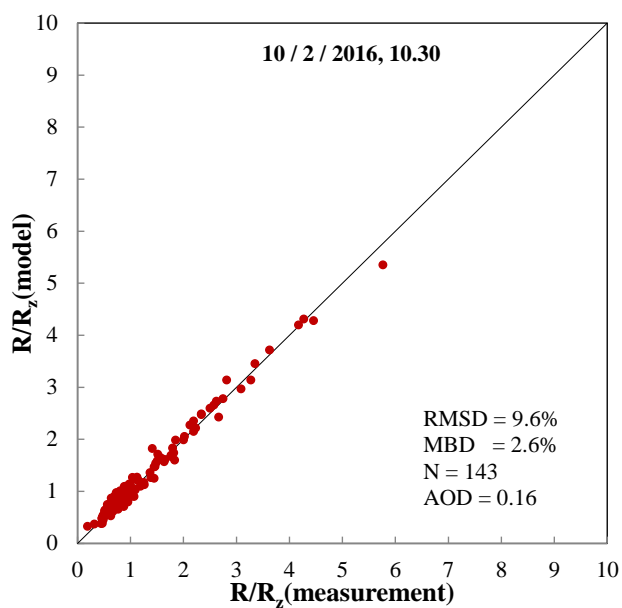
รูปที่ 3.120 การเปรียบเทียบค่า R/R_z ซึ่งได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดที่
เชียงใหม่ วันที่ 1 กุมภาพันธ์ ค.ศ. 2016 เวลา 13.30 นาฬิกา



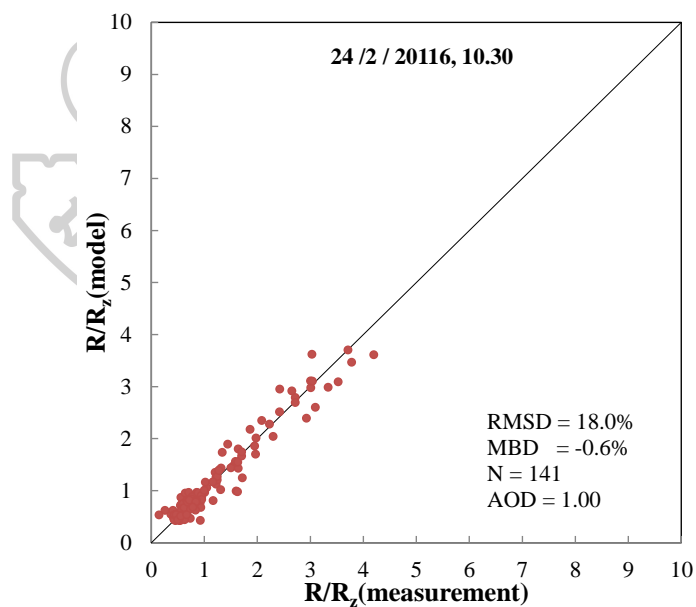
รูปที่ 3.121 การเปรียบเทียบค่า R/R_z ซึ่งได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดที่ เชียงใหม่ วันที่ 1 กุมภาพันธ์ ค.ศ. 2016 เวลา 14.30 นาฬิกา



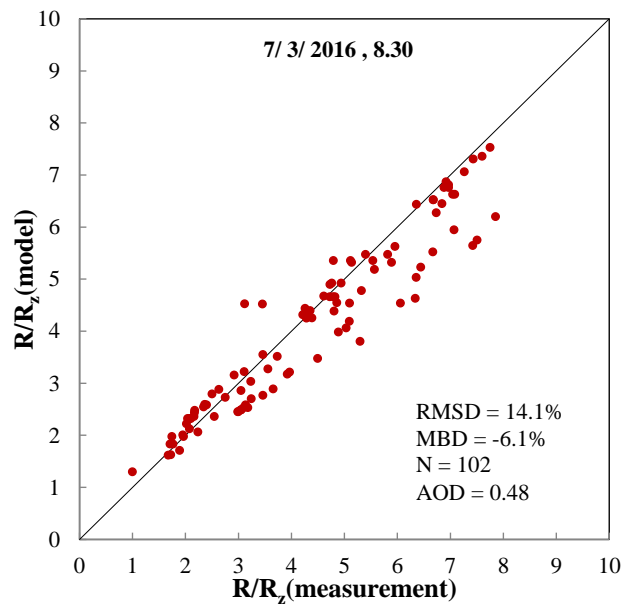
รูปที่ 3.122 การเปรียบเทียบค่า R/R_z ซึ่งได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดที่ เชียงใหม่ วันที่ 6 กุมภาพันธ์ ค.ศ. 2016 เวลา 11.30 นาฬิกา



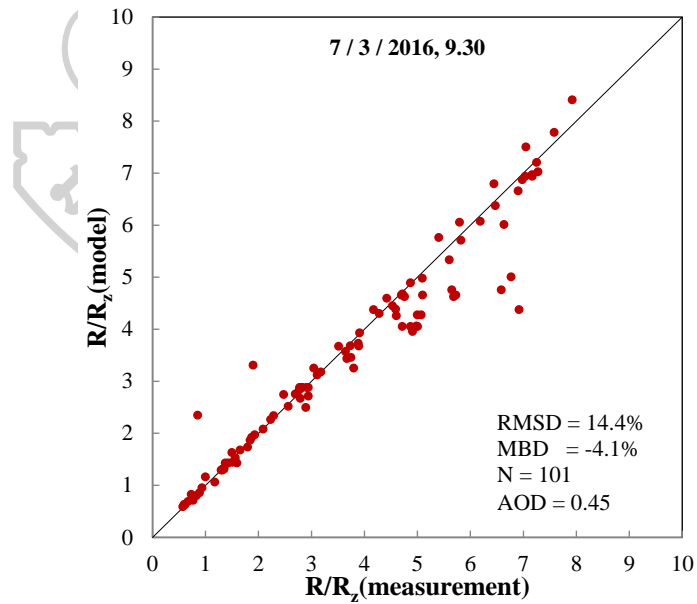
รูปที่ 3.123 การเปรียบเทียบค่า R/R_z ซึ่งได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดที่ เชียงใหม่ วันที่ 10 กุมภาพันธ์ ค.ศ. 2016 เวลา 10.30 นาฬิกา



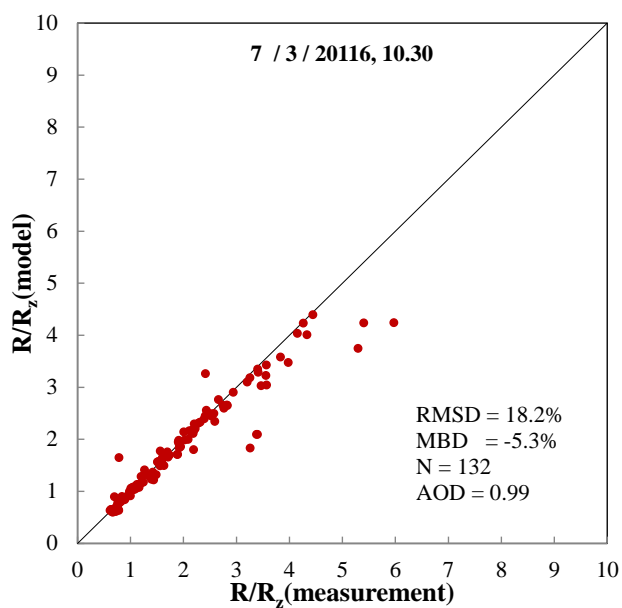
รูปที่ 3.124 การเปรียบเทียบค่า R/R_z ซึ่งได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดที่ เชียงใหม่ วันที่ 24 กุมภาพันธ์ ค.ศ. 2016 เวลา 10.30 นาฬิกา



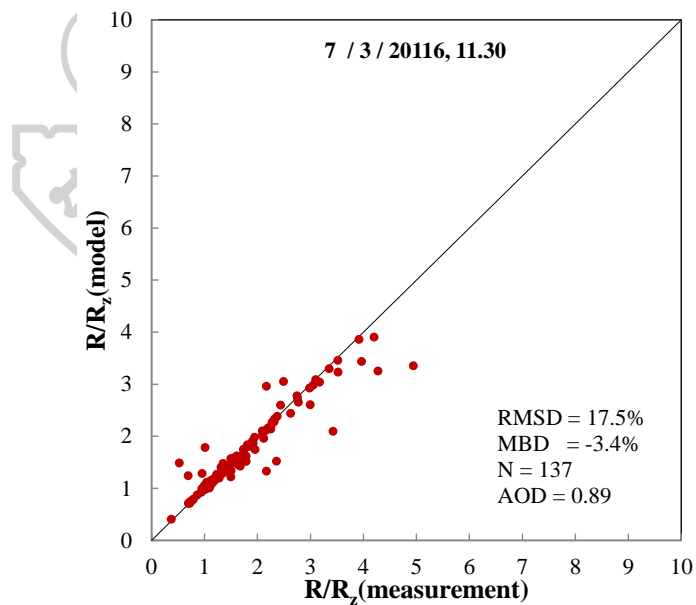
รูปที่ 3.125 การเปรียบเทียบค่า R/R_z ซึ่งได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดที่
เชียงใหม่ วันที่ 7 มีนาคม ค.ศ. 2016 เวลา 8.30 นาฬิกา



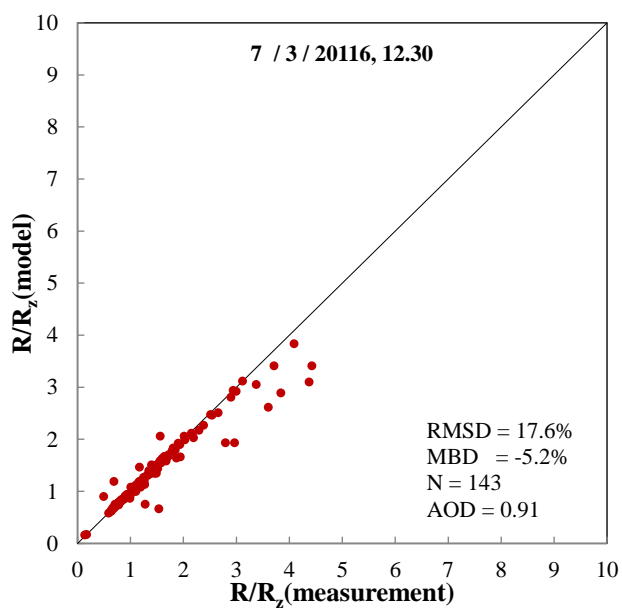
รูปที่ 3.126 การเปรียบเทียบค่า R/R_z ซึ่งได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดที่
เชียงใหม่ วันที่ 7 มีนาคม ค.ศ. 2016 เวลา 9.30 นาฬิกา



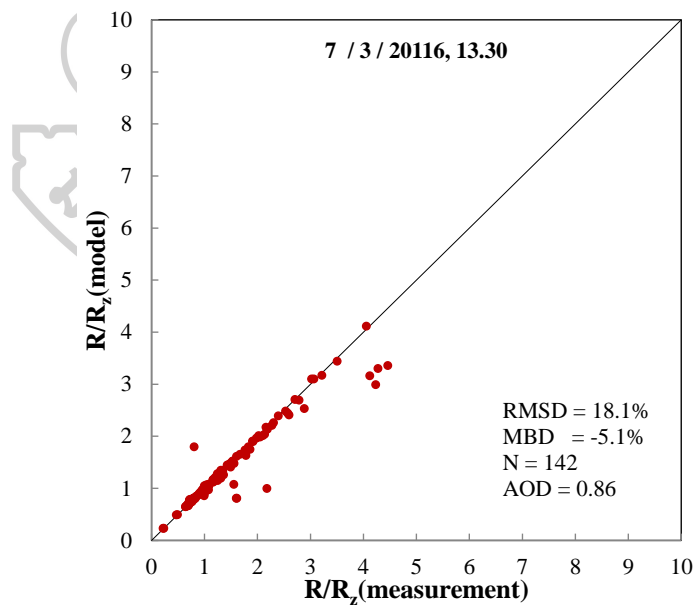
รูปที่ 3.127 การเปรียบเทียบค่า R/R_z ซึ่งได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดที่
เชียงใหม่ วันที่ 7 มีนาคม ค.ศ. 2016 เวลา 10.30 นาฬิกา



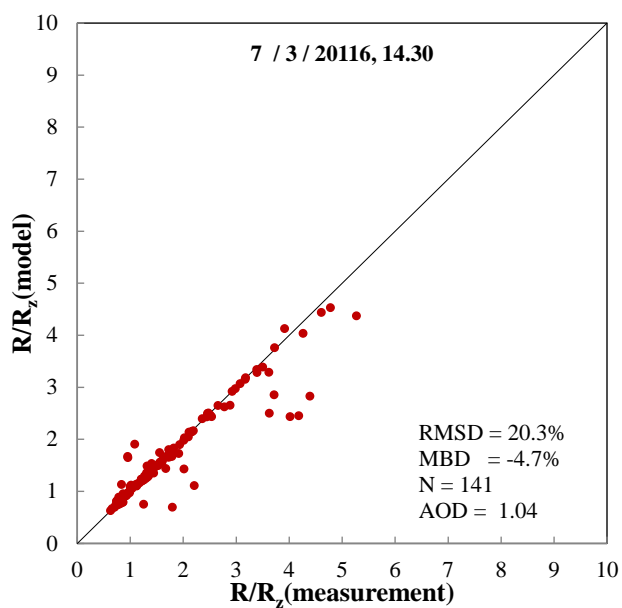
รูปที่ 3.128 การเปรียบเทียบค่า R/R_z ซึ่งได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดที่
เชียงใหม่ วันที่ 7 มีนาคม ค.ศ. 2016 เวลา 11.30 นาฬิกา



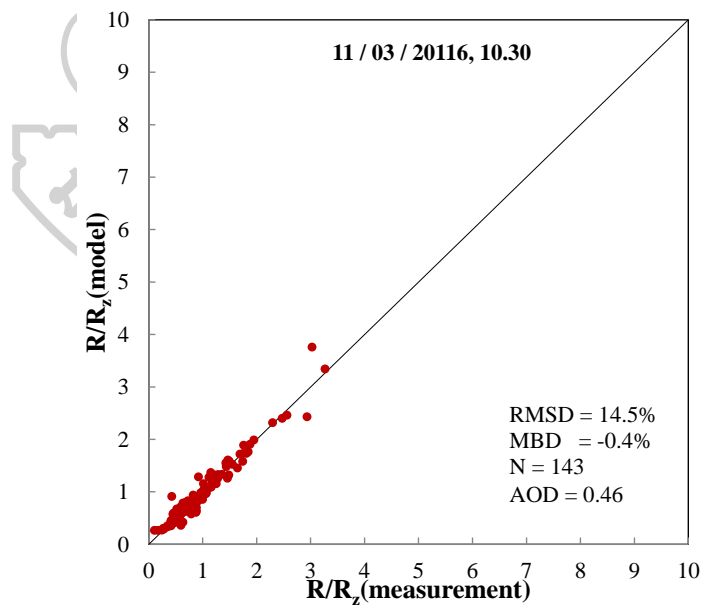
รูปที่ 3.129 การเปรียบเทียบค่า R/R_z ซึ่งได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดที่
 เชียงใหม่ วันที่ 7 มีนาคม ค.ศ. 2016 เวลา 12.30 นาฬิกา



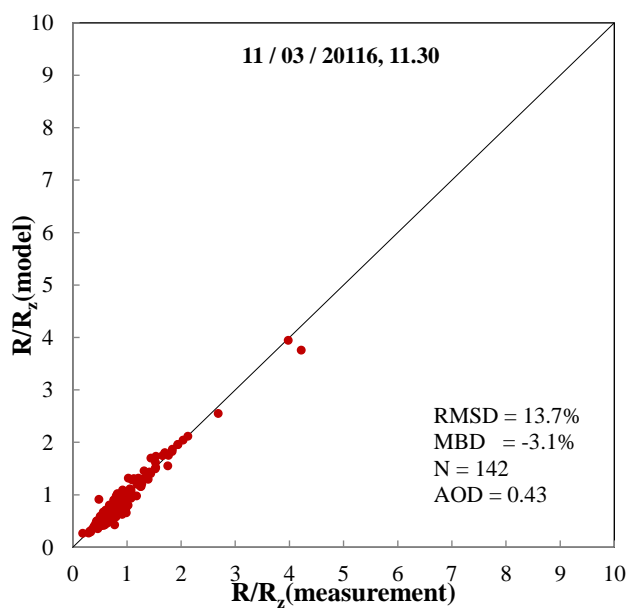
รูปที่ 3.130 การเปรียบเทียบค่า R/R_z ซึ่งได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดที่
 เชียงใหม่ วันที่ 7 มีนาคม ค.ศ. 2016 เวลา 13.30 นาฬิกา



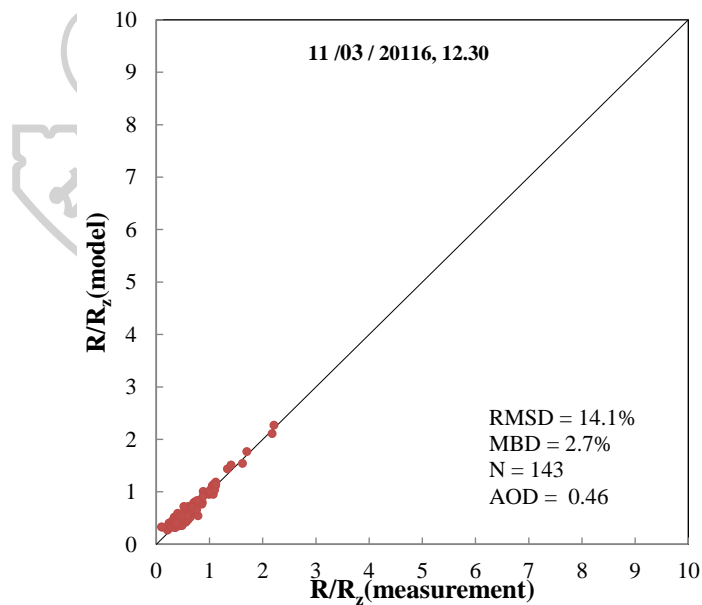
รูปที่ 3.131 การเปรียบเทียบค่า R/R_z ซึ่งได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดที่
 เชียงใหม่ วันที่ 7 มีนาคม ค.ศ. 2016 เวลา 14.30 นาฬิกา



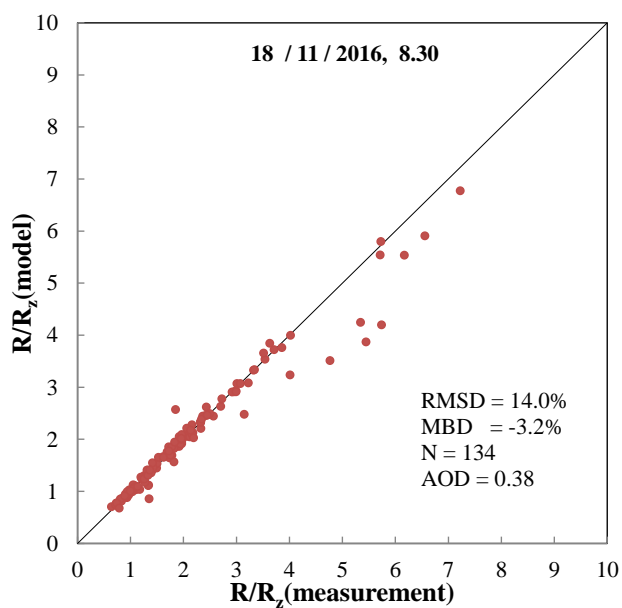
รูปที่ 3.132 การเปรียบเทียบค่า R/R_z ซึ่งได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดที่
 เชียงใหม่ วันที่ 11 มีนาคม ค.ศ. 2016 เวลา 10.30 นาฬิกา



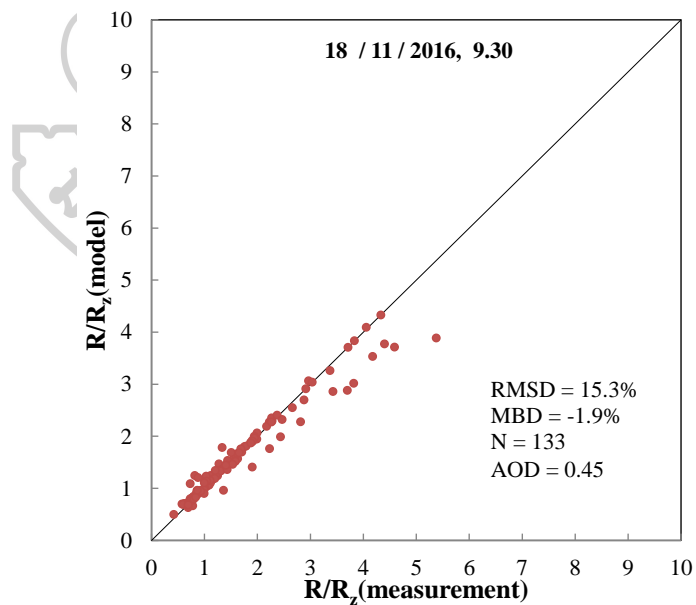
รูปที่ 3.133 การเปรียบเทียบค่า R/R_z ซึ่งได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดที่ เชียงใหม่ วันที่ 11 มีนาคม ค.ศ. 2016 เวลา 11.30 นาฬิกา



รูปที่ 3.134 การเปรียบเทียบค่า R/R_z ซึ่งได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดที่ เชียงใหม่ วันที่ 11 มีนาคม ค.ศ. 2016 เวลา 12.30 นาฬิกา

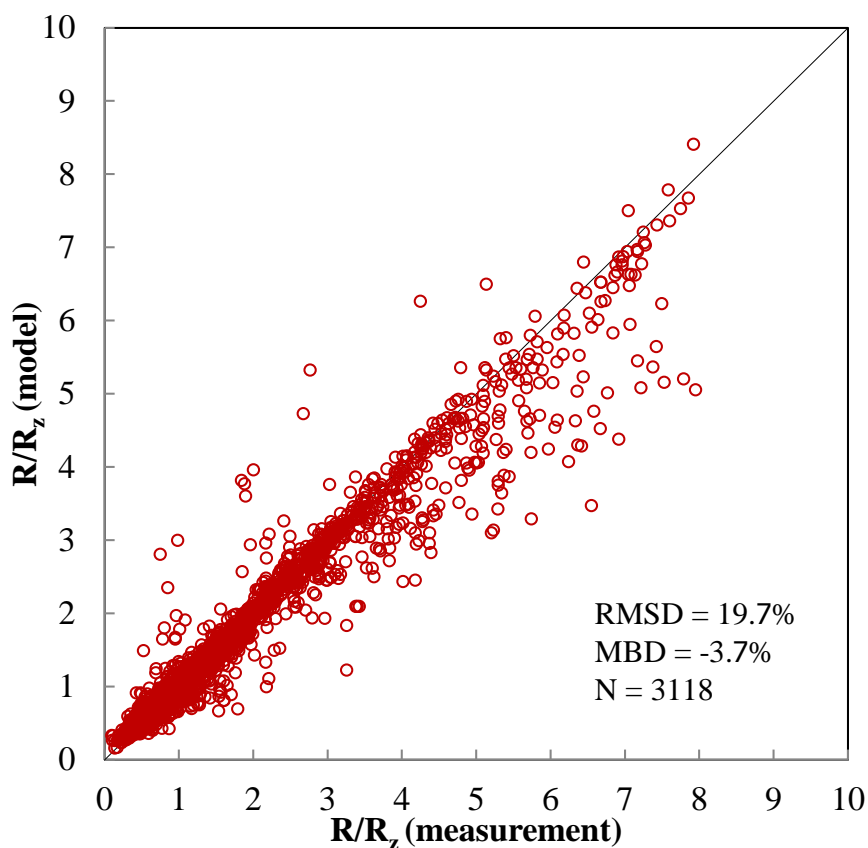


รูปที่ 3.135 การเปรียบเทียบค่า R/R_z ซึ่งได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดที่
 เชียงใหม่ วันที่ 18 พฤศจิกายน ค.ศ. 2016 เวลา 8.30 นาฬิกา



รูปที่ 3.136 การเปรียบเทียบค่า R/R_z ซึ่งได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดที่
 เชียงใหม่ วันที่ 18 พฤศจิกายน ค.ศ. 2016 เวลา 9.30 นาฬิกา

เมื่อนำผลการเปรียบเทียบความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าในช่วงเวลาที่ทำ การทดสอบแบบจำลองมาเขียนกราฟรวม สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.137



รูปที่ 3.137 การเปรียบเทียบค่า R/R_z ซึ่งได้จากแบบจำลองกับค่าที่ได้จากการวัดที่เชียงใหม่

ผลการทดสอบแบบจำลองสำหรับข้อมูลเดือนสิงหาคม ค.ศ. 2015 ถึง สิงหาคม ค.ศ. 2016 ของข้อมูลสถานีเชียงใหม่ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.137 พบว่าค่า MBD และ RMSD เท่ากับ -3.7% และ 19.7 % ตามลำดับ จากผลการทดสอบแบบจำลองค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า ที่ได้จากแบบจำลองมีความสอดคล้องกันดีกับความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าที่ได้จากการวัด ข้อมูลที่มีการกระจายออกไปอาจเนื่องมาจากเป็นชุดข้อมูลที่อยู่ใกล้ตำแหน่งดวงอาทิตย์ ซึ่งอาจทำให้เกิดความแตกต่างได้ อย่างไรก็ตามแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปใช้คำนวณหาความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า ครอบคลุมทุกบริเวณที่ต้องการได้

บทที่ 4

สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาแบบจำลองเพื่อคำนวณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า ภายใต้สภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆ โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง (aerosol optical depth, AOD) ในการจำแนกสภาพท้องฟ้า ผู้วิจัยได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลจากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าที่ทำการวัดโดยใช้เครื่องสแกนท้องฟ้า (sky scanner) ซึ่งติดตั้งที่ลานทดลองพลังงานแสงอาทิตย์ อาคารวิทยาศาสตร์ 1 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม และที่ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคเหนือจังหวัดเชียงใหม่ พร้อมกันนี้ได้ทำการเลือกข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆโดยใช้ภาพถ่ายท้องฟ้าจากเครื่อง sky view และรวบรวมข้อมูลความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองในช่วงเวลาที่สอดคล้องกับข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าทั้ง 2 สถานีด้วย

เพื่อพัฒนาแบบจำลองดังกล่าวผู้วิจัยได้เลือกใช้ข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าซึ่งทำการวัดที่นครปฐม ในช่วงระหว่าง มกราคม ค.ศ.2008 ถึง ธันวาคม ค.ศ.2015 ที่เวลา 8.30, 9.30, 10.30, 11.30, 12.30, 13.30, 14.30, 15.30 และ 16.30 นาฬิกา มาใช้สำหรับสร้างแบบจำลอง โดยจำแนกข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าตามค่า AOD ซึ่งแบ่งออกเป็น 6 ช่วง แปรค่าอยู่ระหว่าง 0 – 1.2 จากนั้นทำการหมุนและเฉลี่ยชุดข้อมูลที่อยู่ในกลุ่มเดียวกันให้เหลือเพียง 1 sky dome โดยให้เป็นตัวแทนของค่า AOD ในช่วงนั้น ๆ และที่ตำแหน่งดวงอาทิตย์ค่าหนึ่ง เพื่อนำไปใช้สร้างแบบจำลองความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า สำหรับแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเป็นแบบจำลองทางสถิติที่พิจารณาความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าเป็นผลคูณของ 2 ฟังก์ชัน ได้แก่ gradation function ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งบนท้องฟ้าที่พิจารณา (Z) และตำแหน่งของดวงอาทิตย์ (Z_s) และ indicatrix function ซึ่งขึ้นอยู่กับระยะห่างเชิงมุมระหว่างดวงอาทิตย์และตำแหน่งที่พิจารณา (χ) ผู้วิจัยใช้ข้อมูลความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า มาทำการหาฟังก์ชันทั้ง 2 พร้อมทั้งฟิตฟังก์ชันทั้ง 2 ด้วยสมการเอกซ์โพเนนเชียลสุดท้ายแล้วทำให้ได้แบบจำลองความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าในกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆสำหรับ AOD ค่าต่าง ๆ

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมรรถนะของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยนำค่าความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าที่ได้จากแบบจำลองมาทำการเปรียบเทียบกับค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ได้จากการวัดที่สถานีเชียงใหม่ ในช่วงเดือนสิงหาคม ค.ศ. 2015 ถึง สิงหาคม ค.ศ. 2016 ผลการทดสอบพบว่าแบบจำลองสามารถนำไปคำนวณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าได้ค่อนข้างดี โดยมีความแตกต่างในรูปของ MBD และ RMSD เท่ากับ -3.7% และ 19.7% ตามลำดับ

จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นซึ่งมีพื้นฐานมาจากข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง sky scanner รวมทั้งหมด 8 ปี ยังไม่ครอบคลุมสภาพท้องฟ้าทุกแบบ ผู้วิจัยจึงเสนอแนะให้ทำการวิเคราะห์ความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้าภายใต้สภาพท้องฟ้าที่แตกต่างกัน ได้แก่ ท้องฟ้าปราศจากเมฆ ท้องฟ้ามีเมฆบางส่วน และท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมเต็มท้องฟ้า พร้อมกับพิจารณาเมฆ ซึ่งมีความสำคัญต่อการแปรค่าความเข้มรังสีอาทิตย์มาทำการวิเคราะห์ด้วย เพื่อให้แบบจำลองมีความละเอียดถูกต้องและครอบคลุมทุกสภาพท้องฟ้ามากยิ่งขึ้น



รายการอ้างอิง

- เสริม จันทร์ฉาย (2547). "การพัฒนาแผนที่และฐานข้อมูลศักยภาพแสงสว่างธรรมชาติจากภาพถ่ายดาวเทียม." บริษัท จีรังรัชต์ จำกัด.
- เสริม จันทร์ฉาย (2560). "รังสีอาทิตย์." พิมพ์ครั้งที่ 2, บริษัท เพชรเกษมพรีนติ้ง กรุ๊ป จำกัด
- Chirarattananon, S., & Chaiwiwatworakul, P. (2006). "Distributions of sky luminance and radiance of North Bangkok under standard distributions." *Renewable Energy*, 32(8), 1328-1345.
- Iqbal, M. (1983). *An introduction to solar radiation*: Elsevier.
- Janjai, S. (2013). "A satellite-based sky luminance model for the tropics." *International Journal of Photoenergy*.
- Kittler, R. (1967). "Standardisation of outdoor conditions for the calculation of daylight factor with clear skies." *Paper presented at the Proc. CIE Intercessional Conference on Sunlight and Buildings*.
- Kómar, L., Rusnák, A., & Dubnička, R. (2013). "Analysis of diffuse irradiance from two parts of sky vault divided by solar meridian using portable spectral sky-scanner." *Solar Energy*, 96, 1-9.
- Tohsing, K., Klomkliang, W., Masiri, I., & Janjai, S. (2017). "An investigation of sky radiance from the measurement at a tropical site." *Paper presented at the AIP Conference Proceedings*.
- Torres, J., García, A., de Blas, M., Gracia, A., & Illanes, R. (2010). "A study of zenith radiance in Pamplona under different sky conditions." *Renewable Energy*, 35(4), 830-838.
- Uetani, Y., Aydinli, S., Joukoff, A., Kendrick, J., Kittler, R., & Koga, Y. (2003). "Spatial distribution of daylight-CIE standard general sky." *Vienna, Austria*.



ภาคผนวก ก
รูปแบบของไฟล์ข้อมูลดิบ

รูปแบบของไฟล์ข้อมูลดิบ

ข้อมูลดิบที่ได้จากเครื่อง sky scanner จะอยู่ในรูปของไฟล์นามสกุล .CSV (Comma Sarated Value) ซึ่งสามารถเปิดใช้งานข้อมูลดังกล่าวได้โดยโปรแกรม Excel ซึ่งการสแกนข้อมูลครั้งหนึ่งจะถูกเก็บไว้ในไฟล์ทันที และข้อมูลที่ได้ ณ เวลาหนึ่งจะถูกเรียงในแนวของแถวที่เวลานั้น และการสแกนที่เวลาถัดไป ข้อมูลจะถูกเรียงในแนวของแถวที่เวลานั้น และการสแกนที่เวลาถัดไป ข้อมูลจะเรียงต่อกันลงมาตามแนวคอลัมน์ จนกระทั่งถึงเวลาสิ้นสุดการสแกน และจะเริ่มบันทึกเป็นไฟล์ใหม่เมื่อเริ่มวันถัดไปตามที่ตั้งโปรแกรมไว้ โดยส่วนบนของไฟล์ข้อมูลจะแสดงชื่อ Title วันที่ Comment ลองติจุด ละติจูด เบอร์ของเซลล์ และหน่วย ที่คอลัมน์แรกของไฟล์จะแสดงสัญลักษณ์ R ซึ่งหมายถึงแถวข้อมูลของ Radiance และ R หมายถึงแถวข้อมูล Radiance ดังตัวอย่างแสดงในตารางที่ E1



ตารางที่ E1 แสดงรูปแบบของไฟล์ข้อมูลดิบที่ได้จากเครื่อง sky scanner

Title	Sky Scanner MS-321LR Sky Luminance and Radiance distributions									
Firmware	1.1									
Date	1/1/2015									
Comment										
Longitude	+100 d 2.4 m									
Latitude	+13 d 48.0 m									
Timezone	UTC +7:00									
Unit	W/(m ² *sr)									
	1-Jan-15 Cell number									
	Time	1	2	3	4	5	6 ...	145		
R	6:00:00	0	0	0	0	0	0 ...	0		
R	6:10:00	0	0	0	0	0	0 ...	0		
R	6:20:00	0	0	0	0	0	0 ...	0		
R	6:30:00	0	0	0	0	0	0 ...	0		
R	6:40:00	1.27	1.06	0.88	0.78	0.72	0.63 ...	0.5		
R	6:50:00	5.16	4.32	3.57	3.12	2.78	2.84 ...	1.77		
R	7:00:00	12.05	9.99	8.07	7.05	6.4	6.23 ...	3.45		
R	7:10:00	19.65	15.99	12.81	10.92	9.91	9.6 ...	4.74		
R	7:20:00	27.11	22.07	17.49	14.8	13.45	13.04 ...	6.06		
R	7:30:00	34.28	27.67	21.99	18.49	16.86	16.29 ...	7.46		
							...			
							...			
R	18:00:00	46.27	37.34	29.44	24.76	22.34	21.36 ...	9.73		

รูปแบบของชื่อไฟล์ของ sky scanner จะถูกกำหนดโดยอัตโนมัติตามวันที่ เดือน ปี และเวลาของการสแกน ด้วยโปรแกรม MS321LRExp ซึ่งอ้างอิงจากนาฬิกาบนเครื่องคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกับตัว sky scanner รูปแบบของไฟล์ข้อมูลในโหมดของการสแกนแบบอัตโนมัติ จะมีชื่อเป็นไฟล์ yyyyymmdd_LR_A.CSV ซึ่งสามารถเปิดใช้งานได้กับโปรแกรม Excel หรือ MS321LRExp

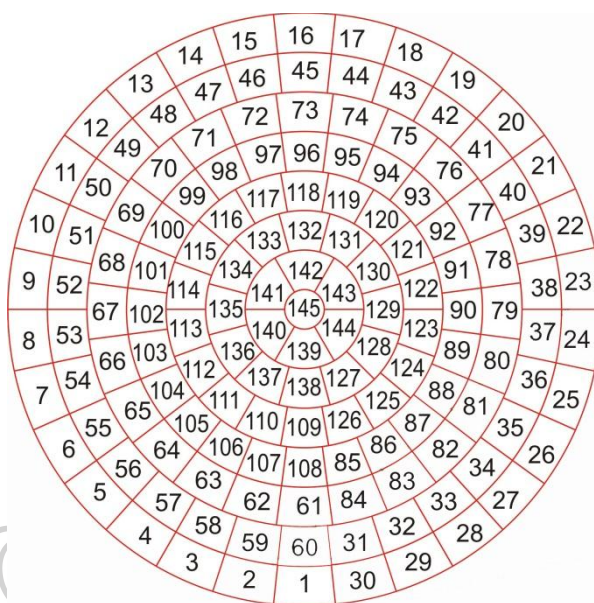


ภาคผนวก ข

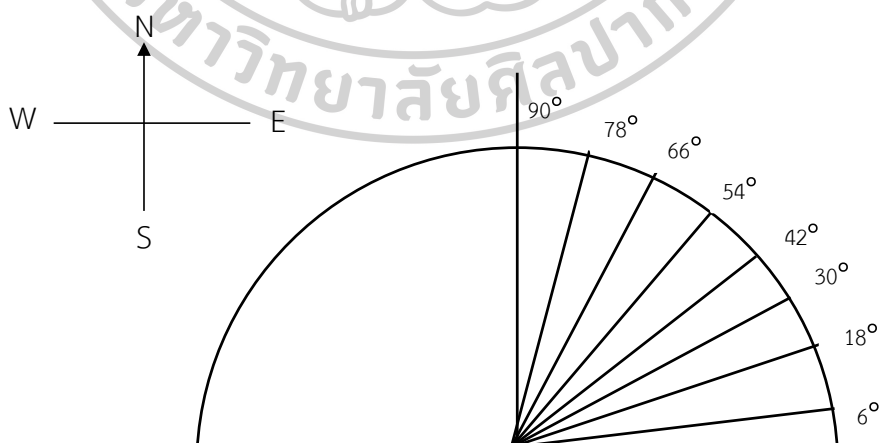
เรขาคณิตของข้อมูลวัดที่ได้จากเครื่อง sky scanner

เรขาคณิตของข้อมูลวัดที่ได้จากเครื่อง sky scanner

เครื่อง sky scanner รุ่น MS-321LR เป็นเครื่องวัดปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้า โดยให้ output จากการวัดเป็นเซลล์ข้อมูล 145 เซลล์ ซึ่งแสดงลักษณะทางเรขาคณิตแสดงดังรูปที่ A1 – A2



รูปที่ A1 แสดงตำแหน่งของเซลล์ข้อมูล output จำนวน 145 เซลล์ ของเครื่อง sky scanner

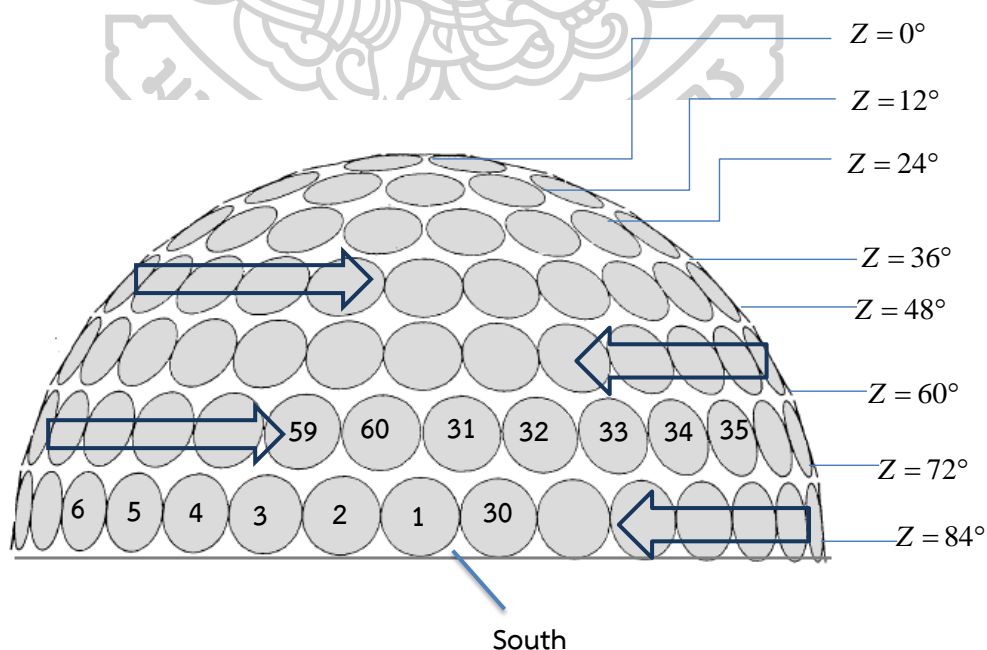


รูปที่ A2 แสดงมุมยกของแต่ละรอบการหมุนของข้อมูลวัดจากเครื่อง sky scanner

ตาราง A1 แสดงจำนวนเซลล์ของรอบการหมุน ค่ามุมยก และระยะห่างของเซลล์ในรอบการสแกน
ข้อมูล ที่ระดับ มุมยกค่าต่าง ๆ

Step	มุมยก	จำนวนเซลล์ต่อรอบของการหมุน	ระยะห่างเชิงมุม
1	6°	30 cells	12°
2	18°	30 cells	12°
3	30°	24 cells	15°
4	42°	24 cells	15°
5	54°	18 cells	20°
6	66°	12 cells	30°
7	78°	6 cells	60°
8	90°	1 cells	-

เครื่อง sky scanner เป็นเครื่องที่ออกแบบมาให้หวััดมีการวัดในทิศที่ทำมุมกวาดและมุมยก เพื่อวัดปริมาณความเข้มรังสีอาทิตย์จากส่วนต่าง ๆ ของท้องฟ้า โดยทิศทางการหมุนสลับด้านกัน ตลอดไปในแต่ละระดับมุมยกค่าต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ A3 โดยการเริ่มต้นการสแกนจะเริ่มจากทิศใต้ เป็นเซลล์ตำแหน่งที่ 1



รูปที่ A3 แสดงลักษณะทิศทางการหมุนสแกนการวัดค่า R ของเครื่อง sky scanner

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วลัยพร กล่อมเกลี้ยง
วัน เดือน ปี เกิด	16 มีนาคม 2535
วุฒิการศึกษา	วท.บ. ฟิสิกส์
ที่อยู่ปัจจุบัน	565/1 ถ.เพชรเกษม ต.ท้ายช้าง อ.เมือง จ.พังงา 82000
ผลงานตีพิมพ์	การเปรียบเทียบความเข้มรังสีอาทิตย์ที่กระเจิงจากส่วนต่างๆ ของท้องฟ้าที่ได้จากแบบจำลอง CIE กับที่ได้จากการวัดในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆ Comparison of the sky radiance calculated from the CIE model and the measurement in Thailand under cloudless sky

