



คุณสมบัติเชิงแสงของฝุ่นละออง : กรณีศึกษาประเทศไทยโดยใช้เครือข่าย AERONET,
SKYNET และ MODIS

วิทยานิพนธ์
ของ
อรดี พิลาโฮม

เสนอต่อมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
พฤษภาคม 2562
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

คุณสมบัติเชิงแสงของฝุ่นละออง : กรณีศึกษาประเทศไทยโดยใช้เครือข่าย AERONET,
SKYNET และ MODIS

วิทยานิพนธ์
ของ
อรดี พิลาโฮม

เสนอต่อมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
พฤศจิกายน 2562
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

AEROSOL OPTICAL PROPERTIES: A STUDY USING THAILAND BASED ON
AERONET, SKYNET AND MODIS NETWORKS.

BY
ORADEE PILAHOME

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements for The Master of
Physics Degree in Science Sakon Nakhon Rajabhat University

November 2019

All Rights Reserved by Sakon Nakhon Rajabhat University



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์ คุณสมบัติเชิงแสงของฝุ่นละออง : กรณีศึกษาประเทศไทยโดยใช้เครือข่าย
AERONET, SKYNET และ MODIS

ชื่อผู้ทำวิทยานิพนธ์ อรดี พิลาโสม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการสอบ กรรมการสอบและ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อิสระ มะศิริ) และผู้ทรงคุณวุฒิ (รองศาสตราจารย์ ดร.วิลาวัณย์ คำหาญ) ประธานที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์

..... กรรมการสอบ
(ดร.ทรรษกร วรณะสาร)

คณะกรรมการบริหารหลักสูตรรับรองแล้ว

.....
(ดร.ทรรษกร วรณะสาร)
ประธานคณะกรรมการบริหารหลักสูตร
มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิกานต์ เพียรธัญญกรณ์)
ผู้อำนวยการบัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

เมื่อวันที่ 28 เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2562
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

ประกาศคุณูปการ

ในการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

ผู้เขียนขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์วิลาวรรณ คำหาญ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ผู้คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำด้านวิชาการ การวิเคราะห์ข้อมูล การเขียนบทความวิจัยและ เผยแพร่ในระดับนานาชาติ พร้อมทั้งจัดหาเครื่องมือ และข้อมูลในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจน ทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลงด้วยดี

ผู้เขียนขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์อิสระ มะศิริ อาจารย์ประจำภาควิชา ฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้การแนะนำ ช่วยเหลือในการเขียนโปรแกรม IDL ในการวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัย และกรุณาเสียสละเวลามาเป็นกรรมการในการสอบ เค้าโครง และสอบปกป้องวิทยานิพนธ์

ผู้เขียนขอขอบคุณองค์การนาซา เครือข่าย Aerosol Robotic Network เครือข่าย SKTNET รวมทั้งกรมอุตุนิยมวิทยา ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลในการวิจัย

สุดท้ายนี้ คุณประโยชน์ที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบให้กับบิดาและ มารดา รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่าน เพื่อตอบแทนพระคุณที่ได้ช่วยผู้เขียนประสบความสำเร็จใน การศึกษา

อรดี พิลาโฮม

ชื่อเรื่อง	คุณสมบัติเชิงแสงของฝุ่นละออง : กรณีศึกษาประเทศไทยโดยใช้เครือข่าย AERONET, SKYNET และ MODIS
ผู้วิจัย	อรดี พิลาโฮม
กรรมการที่ปรึกษา	รศ.ดร.วิลาวรรณ คำหาญ
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สถาบัน	มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
ปีที่พิมพ์	2562

บทคัดย่อ

ข้อมูล AOD ภาคพื้นดินที่ได้จาก AERONET และ SKYNET กับข้อมูล AOD ที่ได้จาก ข้อมูลดาวเทียม TERRA/AQUA-MODIS ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ AOD และความสัมพันธ์กับตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา โดยศึกษาทั้งหมด 6 สถานีในประเทศไทย ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2006-2017 ได้แก่ เชียงใหม่ นครปฐม กรุงเทพฯ นครราชสีมา อุบลราชธานี และ สงขลา จากการศึกษา พบว่าสัมพันธ์สหสัมพันธ์มีค่าสูงสุดอยู่ที่อุบลราชธานีที่ค่า $R^2 = 0.76$ slope=0.94 และ $RMB=1.86$ และเชียงใหม่มีค่า $R^2=0.78$ slope=0.60 และ $RMB=0.62$ ตามลำดับ จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพบว่า AOD มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกสถานี มีค่าสูง ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนพฤษภาคม ยกเว้นสถานีสงขลามีค่าสูงในเดือนตุลาคม ส่วน ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ AOD และ AE กับตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา พบว่า ค่าปริมาณน้ำฝน จะส่งผลต่อปริมาณฝุ่นละอองในบรรยากาศ ส่วนความเร็วลมและอุณหภูมิความสัมพันธ์กับขนาด ของฝุ่นละอองในบรรยากาศ และจากการวิเคราะห์ Mann-kendall ค่า AOD ตลอดทั้งมีแนวโน้ม เพิ่มขึ้นทุกสถานี โดยที่ค่า AOD และ AE แนวโน้มลดลง/เพิ่มขึ้น อย่างมีระดับนัยสำคัญที่ 5% ที่ เชียงใหม่และนครราชสีมาในช่วง Post-monsoon

คำสำคัญ: ฝุ่นละออง คุณสมบัติเชิงแสงของฝุ่นละออง

TITLE Aerosol Optical Properties: A Study using Thailand based on AERONET, SKYNET and MODIS Networks.

AUTHOR Oradee Pilahome

ADVISORS Associate professor Dr. Wilawan Kumharn

DEGREE Master of Science Program in Physics

INSTITUTION Sakon Nakhon Rajabhat University

YEAR 2019

ABSTRACT

AOD data obtained from ground-based data (AERONET and SKYNET) and satellite data (TERRA and AQUA-MODIS) were investigated at six stations in Thailand for the years 2006-2017, including Chiang Mai, Nakhon Pathom, Bangkok, Nakhon Ratchasima, and Songkhla. It was found that the correlation coefficient between Aqua and Terra MODIS, and AERONET AOD is equal to or above 0.66 in Chiang Mai and Ubon Ratchathani. The highest value of *Aqua* MODIS-AERONET AOD has been found in Chiang Mai with $R^2=0.78$, slope=0.60, and RMB=0.62, while the highest value of Terra MODIS-AERONET AOD has been observed in Ubon Ratchathani with $R^2=0.76$, slope=0.97, and RMB=1.08. In addition, AODs has tended to increase at all stations during 2006-2017. Higher values of AOD were detected in February to May except at Songkhla station (October). The relationship between AOD and AE and meteorological variables were also examined. The results of this study indicate that rainfall have a significant effect on aerosol concentration, while wind speed and temperature had a major impact on aerosol size distribution. Furthermore, AOD and AE in Post-monsoon at Chiang Mai and Nakhon Ratchasima station tend to both decrease and increase at 5% significance level.

Keywords: Aerosol, Aerosol Optical Properties

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
ที่มาและความสำคัญ	1
วัตถุประสงค์	2
ขอบเขตงานวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
ทฤษฎีเกี่ยวกับฝุ่นละอองในบรรยากาศ	4
ฝุ่นละออง (Aerosol)	4
สเปกตรัมรังสีดวงอาทิตย์ (Solar Radiation Spectrum)	11
คุณสมบัติเชิงแสงของฝุ่นละออง (Aerosol Optical Properties)	13
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
3 วิธีดำเนินการวิจัย	24
เครื่องมือวัดที่ใช้ในการวิจัย	24
ข้อมูลภาคพื้นดิน	24
เครือข่าย AERONET	24
เครือข่าย SKYNET	26

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ข้อมูลดาวเทียม	27
ข้อมูลสภาพอากาศ	29
อุณหภูมิของอากาศ (Air temperature)	29
ปริมาณน้ำฝน (Rainfall)	30
ความเร็วลม	31
การวิเคราะห์ข้อมูล	32
4 ผลการวิจัย	37
การเปรียบเทียบข้อมูล AOD ระหว่างข้อมูล AERONET/SKYNET กับ MODIS-TEERA/AQUA	37
การเปรียบเทียบ AOD ระหว่าง AERONET และ SKYNET กับ TERRA-MODIS	37
การเปรียบเทียบ AOD ระหว่าง AERONET และ SKYNET กับ AQUA-MODIS	38
การเปลี่ยนแปลงข้อมูลรายเดือน รายปี ของ AOD	40
การเปลี่ยนแปลงข้อมูลรายเดือน ของ AOD	40
การเปลี่ยนแปลงข้อมูลรายปีของ AOD	42
การเปลี่ยนแปลง Angstrom Exponent	44

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
เปรียบเทียบข้อมูล AOD , AE กับข้อมูล อุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน ความเร็วลม	46
วิเคราะห์แนวโน้มโดยใช้ Mann-Kendell	56
5 สรุปผลการวิจัย	58
บรรณานุกรม	60
ภาคผนวก	65
ภาคผนวก ก	66
ประวัติย่อของผู้วิจัย	71

มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 แสดงข้อมูลพื้นฐานข้อมูลภาคพื้นดิน	32
2 ข้อมูลรายเดือน AOD ของเครือข่าย AERONET/SKYNET และ MODIS-TERRA/AQUA ของแต่ละสถานี	42
3 ค่าสถิติของแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงข้อมูล AOD ของภาคพื้นดิน AERONET/SKYNET ทั้ง 6 สถานี	44
4 แสดงค่ารายปีของ AE ทั้ง 6 สถานี	46
5 วิเคราะห์แนวโน้ม Mann-Kendell ของ AOD และ AE โดยใช้ข้อมูล AQUA-MODIS ทั้ง 6 สถานี	56
6 แสดงรายละเอียดแถบสเปกตรัมของ MODIS	67

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 การดูดความชื้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ความชื้นต่าง ๆ เส้นทึบแสดง การเพิ่มขึ้นของขนาดอนุภาคเมื่อความชื้นลดลง8	8
2 กระบวนการในเมฆของฝุ่นละออง 9	9
3 Boundary layer ของบรรยากาศโลก10	10
4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของบรรยากาศตามความสูงจากพื้นผิวโลก10	10
5 ปริมาณและชนิดของฝุ่นละอองที่พบที่ระดับความสูงต่าง ๆ ของบรรยากาศ (N เป็นจำนวนของอนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)11	11
6 สเปกตรัมของรังสีดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก12	12
7 การตอบสนองของสายตามนุษย์ตามมาตรฐานของ CIE13	13
8 การตกกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนทรงกลมเดี่ยว14	14
9 การลดลงของรังสีดวงอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นใด ๆ19	19
10 การแปรค่าของ turbidity coefficient ที่กรุงเทพมหานครและเชียงใหม่22	22
11 สถานีตรวจวัดเครือข่าย AERONET ทั่วโลก25	25
12 เครื่องชั้นโฟโตมิเตอร์ (sun photometer)25	25
13 สถานีตรวจวัดเครือข่าย SKYNET ทั่วโลก26	26
14 เครื่องสกายเรดิโอมิเตอร์ (sky radiometer)27	27
15 ดาวเทียม TERRA/AQUA28	28
16 MODIS ติดตั้งบนดาวเทียม TERRA/AQUA29	29

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
17 เทอร์โมมิเตอร์สูงสุด-ต่ำสุด	30
18 เครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบแก้วตวง	31
19 เครื่องวัดความเร็วลม	31
20 แผนที่แสดงที่ตั้งแต่ละสถานี	32
21 การเปรียบเทียบข้อมูล AOD ของ AERONET และ SKYNET กับ TERRA-MODIS ที่สถานี เชียงใหม่ นครปฐม กรุงเทพฯ นครราชสีมา อุบลราชธานี และ สงขลา	38
22 การเปรียบเทียบข้อมูล AOD ของ AERONET และ SKYNET กับ AQUA-MODIS ที่สถานี เชียงใหม่ นครปฐม กรุงเทพฯ นครราชสีมา อุบลราชธานี และ สงขลา	39
23 การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของข้อมูล AOD ที่สถานี เชียงใหม่ นครปฐม กรุงเทพฯ นครราชสีมา อุบลราชธานี และ สงขลา	41
24 การเปลี่ยนแปลงรายปีข้อมูล AOD ที่สถานี เชียงใหม่ นครปฐม กรุงเทพฯ นครราชสีมา อุบลราชธานี และ สงขลา	43
25 การเปลี่ยนแปลง Angstrom Exponent ทั้ง 6 สถานี ได้แก่ เชียงใหม่ นครปฐม กรุงเทพฯ นครราชสีมา อุบลราชธานี และสงขลา ตั้งแต่ ปี 2006 – 2017 จากข้อมูล AERONET/SKYNET TERRA-MODIS และ AQUA-MODIS	45
26 แสดงความสัมพันธ์ช่วง Per-monsoon ของ AOD AE กับ ตัวแปรทาง อุตุนิยมวิทยา ณ สถานีเชียงใหม่	48

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
27 แสดงความสัมพันธ์ช่วง Post-monsoon ของ AOD AE กับ ตัวแปรทาง อุตุนิยมวิทยา ณ สถานีเชียงใหม่	48
28 แสดงความสัมพันธ์ช่วง Per-monsoon ของ AOD AE กับ ตัวแปรทาง อุตุนิยมวิทยา ณ นครปฐม	49
29 แสดงความสัมพันธ์ช่วง Post-monsoon ของ AOD AE กับ ตัวแปรทาง อุตุนิยมวิทยา ณ นครปฐม	49
30 แสดงความสัมพันธ์ช่วง Per-monsoon ของ AOD AE กับ ตัวแปรทาง อุตุนิยมวิทยา ณ กรุงเทพฯ	51
31 แสดงความสัมพันธ์ช่วง Post-monsoon ของ AOD AE กับ ตัวแปรทาง อุตุนิยมวิทยา ณ กรุงเทพฯ	51
32 แสดงความสัมพันธ์ช่วง Per-monsoon ของ AOD AE กับ ตัวแปรทาง อุตุนิยมวิทยา ณ นครราชสีมา	52
33 แสดงความสัมพันธ์ช่วง Post-monsoon ของ AOD AE กับ ตัวแปรทาง อุตุนิยมวิทยา ณ นครราชสีมา	52
34 แสดงความสัมพันธ์ช่วง Per-monsoon ของ AOD AE กับ ตัวแปรทาง อุตุนิยมวิทยา ณ อุบลราชธานี	54
35 แสดงความสัมพันธ์ช่วง Post-monsoon ของ AOD AE กับ ตัวแปรทาง อุตุนิยมวิทยา ณ อุบลราชธานี	54
31 แสดงความสัมพันธ์ช่วง Per-monsoon ของ AOD AE กับ ตัวแปรทาง อุตุนิยมวิทยา ณ สงขลา	55

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
36 แสดงความสัมพันธ์ช่วง Post-monsoon ของ AOD AE กับ ตัวแปรทาง อุตุนิยมวิทยา ณ สงขลา	55
37 ดาวเทียม Terra	68
38 แสดงเส้นวงโคจรของดาวเทียม Terra-MODIS ทั่วโลก ณ วันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2560	69
39 ดาวเทียม Aqua	69
40 แสดงเส้นวงโคจรของดาวเทียม Aqua-MODIS ทั่วโลก ณ วันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2560	69

มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิร

บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญ

ฝุ่นละออง (aerosol) เป็นอนุภาคของแข็งขนาดเล็กที่อยู่อยู่ในบรรยากาศ อาจเป็นอนุภาคเดี่ยว ๆ ของของแข็ง ของเหลว หรือเป็นทั้งของแข็งและของเหลวผสมกัน (Halthore et al., 2008) โดยทั่วไปฝุ่นละอองจะเคลื่อนตัวตามสภาพอากาศและลักษณะทางอุตุนิยมวิทยา ฝุ่นละอองมีแหล่งที่มาจากหลาย ๆ ที่ ทั้งที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติและเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น ฝุ่นที่เกิดจากดินที่ถูกพัดขึ้นมา ฝุ่นจากการระเบิดของภูเขาไฟหรือจากมลภาวะต่าง ๆ ฝุ่นในที่พักอาศัย สำนักงาน หรือแม้แต่ละอองเกสรของพืช ฝุ่นละอองที่ลอยอยู่ในบรรยากาศมีอนุภาคตั้งแต่ขนาดเล็กที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ไปจนถึงขนาดใหญ่ที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (วิลาวรรณ คำหาญ, 2560) ฝุ่นละอองมีขนาดรัศมีตั้งแต่ 10^{-3} ถึง $10^2 \mu\text{m}$ ได้แก่ ฝุ่นละอองขนาดเล็กมีรัศมีตั้งแต่ 10^{-3} ถึง $10^{-1} \mu\text{m}$ ฝุ่นละอองขนาดใหญ่มีรัศมีตั้งแต่ 0.1 ถึง $1 \mu\text{m}$ และฝุ่นละอองมีรัศมีขนาดใหญ่กว่าตั้งแต่ 1 ถึง $100 \mu\text{m}$ (Muhammad Iqbal, 1983)

ฝุ่นละอองในบรรยากาศที่เกิดจากกิจกรรมมนุษย์ส่วนใหญ่เกิดจากการเผาไหม้ชีวมวล การเผาไหม้ชีวมวล การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลในโรงงานอุตสาหกรรมในโรงงานอุตสาหกรรมและยานยนต์ต่าง ๆ ฝุ่นละอองในบรรยากาศเหล่านี้ มีองค์ประกอบและสมบัติทางฟิสิกส์แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น ฝุ่นละอองในบรรยากาศจากการเผาไหม้ชีวมวลเป็นสารอินทรีย์คาร์บอน ซึ่งกระเจิงรังสีดวงอาทิตย์ได้ถึง 90% ส่วนฝุ่นละอองในบรรยากาศจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเครื่องจักรของโรงงานอุตสาหกรรมและยานยนต์ส่วนใหญ่เป็นคาร์บอนดำ (black carbon) ซึ่งดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์มากถึง 50% ฝุ่นละอองในบรรยากาศที่เกิดจากกิจกรรมทางเศรษฐกิจของมนุษย์ดังกล่าว มีปริมาณเพิ่มขึ้นตามการขยายตัวทางเศรษฐกิจของประเทศต่าง ๆ และมีบทบาทสำคัญต่อสมดุลของพลังงานของระบบบรรยากาศโลกทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยผลทางตรงคือ การทำให้รังสีดวงอาทิตย์ที่ผ่านบรรยากาศมายังโลกเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลกระทบต่ออัตราการระเหยของน้ำ การสังเคราะห์แสงของพืชและอุณหภูมิของพื้นผิวโลก จากการคำนวณ

สมดุลของพลังงาน พบว่า ฝุ่นละอองในบรรยากาศประเภทสารอินทรีย์คาร์บอน มีผลทำให้
 อุณหภูมิของบรรยากาศลดลง แต่ฝุ่นละอองในบรรยากาศที่เป็นคาร์บอนดำ สามารถดูดกลืนรังสี
 ดวงอาทิตย์ทำให้อุณหภูมิของบรรยากาศเพิ่มขึ้น แต่ทำให้อุณหภูมิของพื้นผิวโลกลดลง ซึ่งมีผลทำ
 ให้อุณหภูมิอากาศในแนวตั้งลดลงตามระดับ (แบบเกรเดียนต์, gradient) การเปลี่ยนแปลง
 ดังกล่าวจะทำให้อัตราการระเหยของน้ำลดลง ส่งผลให้การก่อตัวของเมฆลดลงด้วย

นอกจากนี้ ฝุ่นละอองในบรรยากาศมีผลทางอ้อมต่อเมฆ ทั้งนี้เพราะโดยทั่วไป
 ฝุ่นละอองในบรรยากาศทำหน้าที่เป็นแกนกลางของการกลั่นตัวของไอน้ำเป็นเมฆ (cloud
 condensation nuclei, CCN) การเพิ่มขึ้นของฝุ่นละอองในบรรยากาศทำให้มีอนุภาคของ
 ละอองน้ำมากขึ้น ซึ่งอาจทำให้ปริมาณฝนเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าฝุ่นละอองในบรรยากาศจึงมีผลทั้ง
 ทางตรงและทางอ้อมต่อระบบบรรยากาศ การเพิ่มขึ้นของฝุ่นละอองในบรรยากาศจากกิจกรรม
 ทางเศรษฐกิจ

ดังนั้น จะเห็นได้ว่าฝุ่นละอองมีบทบาทสำคัญในการวิเคราะห์และการคาดการณ์
 การศึกษาสภาพภูมิอากาศของโลก เฉพาะนั้นการวัดปริมาณของฝุ่นละอองจะต้องแม่นยำและ
 น่าเชื่อถือได้ นำมาสู่การวิจัยในครั้งนี้ โดยผู้วิจัยจึงเสนอที่จะศึกษาความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง
 (Aerosol optical Depth: AOD) โดยใช้ข้อมูลภาคพื้นจากเครือข่าย AERONET, SKYNET และ
 ข้อมูลดาวเทียม จากเครือข่าย MODIS ที่ติดตั้งบนดาวเทียม TERRA และ AQUA

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเปรียบเทียบ AOD ที่ได้จากเครือข่าย AERONET/SKYNET กับ AOD ที่ได้จาก
 MODIS-TERRA/AQUA
2. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ AOD
3. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของ AOD กับตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา

ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมบัติทางแสงของฝุ่นละอองในบรรยากาศ โดยใช้ข้อมูล
 ภาคพื้นดินเครือข่าย AERONET และเครือข่าย SKYNET ข้อมูลดาวเทียมใช้ข้อมูลของเครือข่าย
 MODIS ที่ติดตั้งบนดาวเทียม TERRA และดาวเทียม AQUA และตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา
 ในรอบ 12 ปี (ค.ศ. 2006 - ค.ศ. 2017) ในประเทศไทยได้แก่ เชียงใหม่ นครปฐม
 กรุงเทพมหานคร นครราชสีมา อุบลราชธานี และสงขลา

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อไป
2. เผยแพร่ผลงานวิจัยในวารสารในระดับนานาชาติที่เกี่ยวข้อง 1-2 บทความ และเข้าร่วมสัมมนาในระดับนานาชาติอีก 1 ครั้ง
3. เผยแพร่ผลงานวิจัยในมหาวิทยาลัยและหน่วยงานต่าง ๆ บริการความรู้แก่ประชาชน

มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงสมบัติทางฟิสิกส์ของฝุ่นละอองในบรรยากาศและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาสมบัติเชิงแสงของฝุ่นละออง

ทฤษฎีเกี่ยวกับฝุ่นละอองในบรรยากาศ

1. ฝุ่นละออง (Aerosol)

ฝุ่นละออง เป็นอนุภาคของแข็งขนาดเล็กที่อยู่อยู่ในบรรยากาศ อาจเป็นอนุภาคเดี่ยว ๆ ของของแข็ง ของเหลว หรือเป็นทั้งของแข็งและของเหลวผสมกัน ทั้งนี้ฝุ่นละอองเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์และเกิดจากธรรมชาติรวมถึงควันจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงต่าง ๆ ฝุ่นที่ฟุ้งกระจายจากพื้นดินหรือจากทะเลทราย ละอองเกลือจากน้ำทะเล ละอองเกสรดอกไม้ และละอองของเหลวของสารเคมีต่าง ๆ แต่จะไม่รวมถึงเมฆและหมอกซึ่งมีลักษณะคล้ายกันกับฝุ่นละออง โดยทั่วไปฝุ่นละอองในบรรยากาศมีขนาดตั้งแต่ 0.1-1,000 μm (Iqbal, 1983) โดยจะมีรูปร่างและองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นกับแหล่งกำเนิดของฝุ่นละออง

โดยทั่วไปเราสามารถแบ่งฝุ่นละอองในบรรยากาศได้เป็น 2 ประเภท คือฝุ่นละอองที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ และฝุ่นละอองธรรมชาติ ตัวอย่างฝุ่นละอองที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ได้แก่ ฝุ่นละอองจากการสันดาปของเชื้อเพลิงฟอสซิลต่าง ๆ และการเผาชีวมวล เป็นต้น สำหรับฝุ่นละอองธรรมชาติจะเกิดขึ้นตามกระบวนการต่าง ๆ ในธรรมชาติ เช่น ฝุ่นละอองจากทะเลทราย ฝุ่นละอองจากพื้นดิน ละอองเกลือจากน้ำทะเล และละอองเกสรดอกไม้ เป็นต้น

1.1 กระบวนการเกิดฝุ่นละออง

ฝุ่นละอองในบรรยากาศมีแหล่งกำเนิดมาจากธรรมชาติและกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ ทำให้มีกระบวนการเกิดฝุ่นละอองที่แตกต่างกันออกไป กระบวนการเกิดและแหล่งกำเนิดที่แตกต่างกัน ทำให้ฝุ่นละอองมีขนาด รูปร่าง องค์ประกอบทางฟิสิกส์และเคมีที่แตกต่างกันออกไป สามารถแบ่งฝุ่นละอองตามกระบวนการเกิดได้ ดังนี้

1.1.1 ฝุ่นละอองเกิดเองตามธรรมชาติ

ฝุ่นละอองที่เกิดจากกระแสน้ำพัดผ่านตามธรรมชาติ เช่น ฝุ่นละอองจากทะเลทราย ฝุ่นละอองจากพื้นดิน ละอองเกลือจากน้ำทะเล

1.1.1.1 ฝุ่นละอองเกิดจากทะเล (maritime aerosol)

ฝุ่นละอองทะเลมีแหล่งกำเนิดในทะเลจากฝุ่นละอองเกลือ (sea-salt aerosol) เกิดจากการแตกฟองของอากาศที่ผิวน้ำทะเล จากกระบวนการทางชีววิทยา เคมี หรือการระเหยของน้ำทะเล ถ้าอัตราเร็วลมที่ผิวน้ำทะเลมีค่ามากกว่า 3 m/s จะทำให้สันคลื่นแตกกระจายเป็นฝอยและเกิดฟองอากาศขึ้น มีเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 2-10 μm ฟองอากาศเหล่านี้มีผิวเป็นแผ่นฟิล์มบาง ๆ ของน้ำทะเล เมื่อแตกออกก็จะเกิดเป็นหยดน้ำเล็ก ๆ เหล่านี้จะถูกกระแสน้ำพัดฟุ้งกระจายขึ้นไปในอากาศ หยดน้ำเหล่านี้จะระเหยกลายเป็นไอ ทำให้อนุภาคของเกลือฟุ้งกระจายอยู่ในอากาศต่อไป ฝุ่นละอองชนิดนี้มีเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 0.25-2 μm พบมากทางภาคใต้ของประเทศไทย (Kumharn and Hanprasert, 2016) โดยทั่วไป องค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองที่เกิดจากน้ำทะเล จะเหมือนกับองค์ประกอบของน้ำทะเล ประกอบด้วยโซเดียมคลอไรด์ ซึ่งมีสมบัติดูดและคายความชื้นได้ดี

1.1.1.2 ฝุ่นละอองเกิดจากกระบวนการแก๊สไปเป็นอนุภาค (gas-to-particle)

กระบวนการแก๊สไปเป็นอนุภาคของฝุ่นละออง เป็นกระบวนการที่ทำให้ความเข้มข้นเชิงมวลของอนุภาคเพิ่มขึ้น ฝุ่นละอองในกระบวนการนี้เกิดจากสารที่เป็นเนื้อเดียวกัน อยู่ในสถานะแก๊สเกิดการอิมิตัวจากกระบวนการทางฟิสิกส์และทางเคมี ฝุ่นละอองที่เกิดจากกระบวนการนี้ส่วนใหญ่เป็นฝุ่นละอองแบบละเอียด (fine particle) ที่พบอยู่เหนือน้ำทะเลมีส่วนประกอบของกรดซัลฟิวริกประมาณ 40 % และแอมโมเนียมซัลเฟตประมาณ 60 % กรดซัลฟิวริกที่พบมีแหล่งกำเนิดจากการปล่อยออกมาจากโรงงานอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังมีการค้นพบกรดซัลฟิวริกจากแหล่งกำเนิดในน้ำทะเลด้วย ฝุ่นละอองที่เกิดจากกระบวนการดังกล่าวจะมีขนาดเล็ก เพราะเกิดจากปฏิกิริยาเคมีที่มีการเปลี่ยนจากสารเดิมที่มีสภาพเป็นก๊าซและเกิดสารใหม่ที่มีสภาพเป็นของเหลว

1.1.1.3 ฝุ่นละอองเกิดจากเปลือกโลก (coarse aerosol)

ฝุ่นละอองชนิดนี้มีกระบวนการเกิดจากแรงทางกลศาสตร์เป็นหลัก โดยทั่วไปจะเกิดจากการสึกกร่อนของดิน หิน หรือของแข็งอื่น ๆ เนื่องมาจากวัตถุปะทะกับแรงลม ซึ่งทำให้อนุภาคของแข็งหลุดออกมาจากวัตถุและฟุ้งกระจายไปตามทิศทางที่ไหลของ

กระแสม ผุ่นละอองชนิดนี้มีรูปร่างไม่แน่นอน (irregular sharp) และเป็นผุ่นละอองแบบหยาบ (coarse particle) ซึ่งอนุภาคมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 4–100 μm

1.1.2 ผุ่นละอองเกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์

ผุ่นละอองที่เกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ มนุษย์เป็นต้นเหตุก่อให้เกิด ผุ่นละออง เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของประชากรส่งผลให้เกิดความต้องการบริโภคพลังงาน เชื้อเพลิง ทั้งในครัวเรือนและอุตสาหกรรม ผุ่นละอองที่ได้จากยวดยานพาหนะ จากโรงงานอุตสาหกรรมที่เกิด การเผาไหม้ในกระบวนการต่าง ๆ การก่อสร้างถนน หรือการปรับปรุงผิวจราจร ส่วนใหญ่เกิดจาก กระบวนการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ต่าง ๆ มีทั้งผุ่นละอองแบบละเอียดและหยาบ เช่น เขม่าและ คาร์บอนไฟ บางครั้งอาจจะอยู่ในรูปของของเหลวหรือของผสมระหว่างของเหลวกับของแข็ง ผุ่นละอองนี้มีการกระจายตัวอย่างหนาแน่นในย่านอุตสาหกรรมและชุมชนเมือง

1.2 ผุ่นละอองในชั้นบรรยากาศ

ผุ่นละอองส่วนใหญ่จะอยู่ในบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ที่ช่วงความสูงตั้งแต่ พื้นผิวโลกจนถึงที่ระดับความสูง 2 km และจะลอยไปตามกระแสลม โดยทั่วไปผุ่นละอองใน บรรยากาศชั้นนี้จะอยู่ในบรรยากาศประมาณ 1-2 สัปดาห์ (Colbeck, 2008) จากนั้นจะร่วง หล่นลงสู่พื้นผิวโลกด้วยแรงโน้มถ่วงหรือการชะล้างของฝน เราสามารถพบผุ่นละอองได้เล็กน้อย ในบรรยากาศชั้นสเตรโทสเฟียร์ โดยส่วนใหญ่เกิดจากเถ้าที่พ่นจากภูเขาไฟ และสามารถฟุ้ง กระจายไปได้ทั่วโลก ผุ่นละอองนี้อาจอยู่ในบรรยากาศได้นานหลายปี เนื่องจากในบรรยากาศ ชั้นสเตรโทสเฟียร์ไม่มีฝนช่วยชะล้างและอยู่ในระดับสูง ซึ่งได้รับอิทธิพลจากแรงโน้มถ่วงน้อย

1.3 วิวัฒนาการของผุ่นละออง (aerosol evolution)

ผุ่นละอองในบรรยากาศมีแหล่งที่มาทั้งจากธรรมชาติและจากกิจกรรมต่าง ๆ ของ มนุษย์ เมื่อผุ่นละอองกระจายจากแหล่งกำเนิดขึ้นสู่บรรยากาศ โดยจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาด รูปร่าง ความเข้มข้น จำนวนอนุภาค และบางครั้งมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางฟิสิกส์และ เคมี สามารถจำแนกจากวิวัฒนาการต่อไปนี้

1.3.1 การจับกันเป็นก้อน

การจับกันเป็นก้อนเป็นกระบวนการที่ผุ่นละอองที่เคลื่อนที่แบบบราวน์ (Brownian motion) มาชนกันและจับกันเป็นอนุภาคเดี่ยว กระบวนการนี้ทำให้อนุภาคขนาดเล็ก มีจำนวนลดลง ส่งผลให้อนุภาคขนาดใหญ่มีจำนวนเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปกระบวนการนี้เกิดกับ อนุภาคที่มีขนาดเล็กเท่านั้น

1.3.2 การกลั่นตัวของไอสารที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous condensation)

ไอสารอาจเป็นไอน้ำหรือไอของสารอื่น ๆ เกิดจากสสารบนอนุภาคฝุ่นละอองในบรรยากาศที่เป็นของแข็งกลั่นตัวทำให้อนุภาคของแข็งมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยกระบวนการนี้จะหยุดเมื่อถึงจุดสมดุล คือไม่มีการกลั่นตัวของสารเป็นอนุภาคอีก โดยทั่วไปอัตราการโตขึ้นของอนุภาคของแข็งเนื่องจากการกลั่นตัว ถูกควบคุมด้วยอัตราการชนกันระหว่างอนุภาคในสถานะไอกับอนุภาคที่เป็นของแข็ง อัตราดังกล่าวจะแปรตามพื้นที่ผิวยังผล (effective surface) ของอนุภาคของแข็ง สามารถหาได้จากสมการ (1)

$$S_{\text{eff}}(r) = \frac{s(r)}{1 + \frac{2r}{\pi d}} \quad (1)$$

- เมื่อ $S_{\text{eff}}(r)$ คือ พื้นที่ผิวยังผล (μm^2)
 $s(r)$ คือ พื้นที่ผิวของอนุภาค (μm^2)
 l คือ รัศมีของอนุภาค (μm)
 d คือ ระยะเฉลี่ยระหว่างอนุภาคของเหลว (μm)

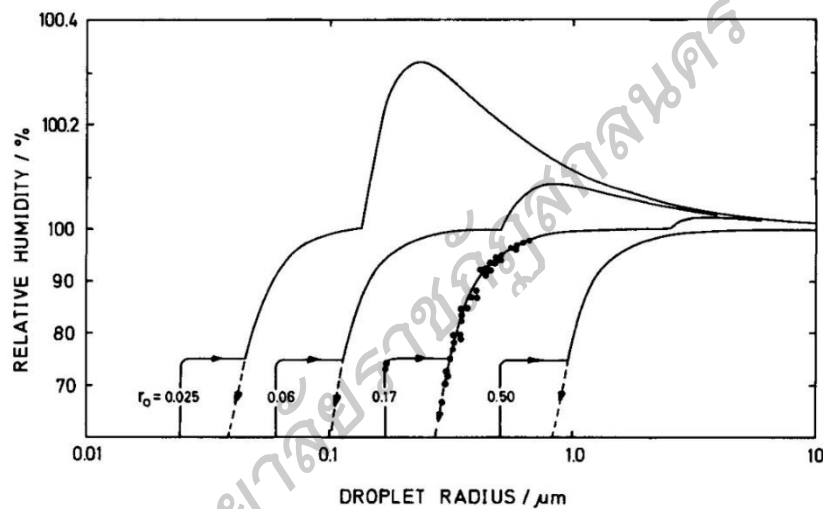
จากสมการ (1) พบว่าค่า $S_{\text{eff}}(r)$ ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อมีอนุภาครัศมีที่ใหญ่กว่า $0.3 \mu\text{m}$ ดังนั้น กระบวนการกลั่นตัวเป็นเนื้อเดียวกันจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่ออนุภาครัศมี $0.1-0.5 \mu\text{m}$ ฮอปเพลและคณะ (Hoppel et al., 1990) ได้ศึกษากระบวนการดังกล่าวนี้กับฝุ่นละอองทะเล พบว่า รัศมีของอนุภาคจะเพิ่มขึ้นจาก $0.0005-0.02 \mu\text{m}$ ในช่วงระยะเวลาประมาณ 14 วัน โดยทั่วไป การเปลี่ยนแปลงของฝุ่นละอองจากกระบวนการกลั่นตัวของไอสารบนอนุภาคของแข็ง เกิดขึ้นมากกว่ากระบวนการจับกันเป็นก้อนประมาณ 10 เท่า

1.3.3 การออกซิเดชันของสารไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (heterogeneous oxidation)

การออกซิเดชันของสารไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เกิดจากอนุภาคฝุ่นละอองที่เป็นของเหลวเกิดการออกซิเดชันกับแก๊สออกซิเจนในบรรยากาศแล้วเกิดเป็นสารใหม่ เช่น แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ที่ละลายอยู่ในละอองน้ำเกลือทะเลเกิดออกซิเดชันกับแก๊สออกซิเจนหรือแก๊สไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ เกิดเป็นสารไบซัลไฟต์อออน และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ปฏิกิริยานี้จะเกิดเร็วขึ้นเมื่อมีตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) เป็นไอออนของธาตุหนัก เช่น ไอออนของเหล็กและแมงกานีส กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่สำคัญที่ทำให้กำมะถัน (S) ที่อยู่ในละอองน้ำทะเลลดลง เนื่องจากถูกออกซิเดชัน ทำให้มีมวลเพิ่มขึ้นแล้วเกิดการร่วงหล่นลงสู่พื้นผิวโลกได้เร็วขึ้น

1.3.4 การดูดความชื้นของอนุภาคฝุ่นละออง

การดูดความชื้นของอนุภาคฝุ่นละออง เป็นกระบวนการที่ฝุ่นละอองดูดและคายความชื้นออกสู่บรรยากาศ ดังนั้น ฝุ่นละอองในบรรยากาศที่ดูดความชื้นเข้าไปจึงมีมวลเพิ่มขึ้น ขณะที่ฝุ่นละอองที่คายความชื้นออกสู่บรรยากาศจะมีมวลลดลง การดูดและคายความชื้นของอนุภาคฝุ่นละอองขึ้นกับชนิดของฝุ่นละออง ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิของบรรยากาศ วาร์เนก (Warneck, 1988) ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดของฝุ่นละอองโซเดียมคลอไรด์ (NaCl aerosol) ที่ความชื้นสัมพัทธ์ค่าต่าง ๆ ผลที่ได้ ดังภาพประกอบ 1



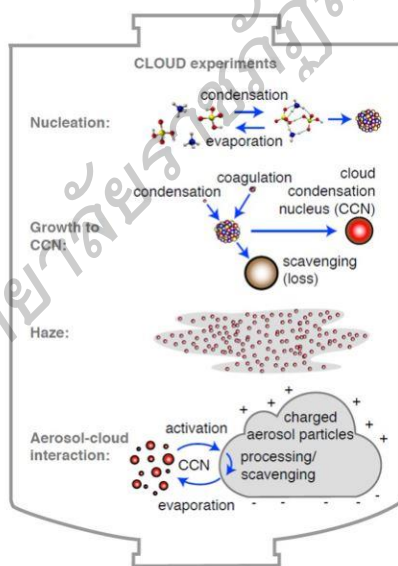
ภาพประกอบ 1 การดูดความชื้นของโซเดียมคลอไรด์ที่ความชื้นต่าง ๆ เส้นทึบแสดงการเพิ่มขึ้นของขนาดอนุภาคเมื่อความชื้นลดลง (Warneck, 1988)

จากกราฟจะเห็นว่า การเพิ่มขึ้นและลดลงของขนาดอนุภาคจะไม่ย้อนรอยเดิม แต่มีลักษณะเป็นวัฏจักรฮิสเทอรีซิส (hysteretic cycles) ซึ่งเป็นคุณสมบัติโดยทั่วไปของสารดูดความชื้น

1.3.5 กระบวนการในเมฆเช่น การเกิดนิวเคลียสของหยดน้ำ (cloud droplet nucleation) และการป้อนกลับของการแผ่รังสีของเมฆ (cloud radiation feedbacks) (Knote and Pousse-Nottelmann, 2011) เมฆประกอบด้วยหยดน้ำซึ่งสามารถดูดกลืนแก๊สต่าง ๆ ได้ เมื่อหยดน้ำเกิดการดูดกลืนแก๊สบางชนิด เช่น แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์หรือไอโซนจะกลายเป็นอนุภาค แลงเนอร์และคณะ (Langner et al., 1992) ได้ศึกษาปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่

ลอยขึ้นสู่บรรยากาศตามธรรมชาติ พบว่า ปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพียง 14 % เท่านั้นที่ถูกออกซิไดซ์เป็นกรดซัลฟิวริก ส่วนอีกครึ่งหนึ่งของแก๊สซัลเฟอร์ออกไซด์จะถูกนำออกไปจากบรรยากาศโดยการร่วงหล่นลงสู่พื้น ส่วนที่เหลือจะถูกออกซิไดซ์ในหยดน้ำแล้วควบแน่นเป็นเมฆในกระบวนการในเมฆ ซึ่งได้แก่ การระเหย การควบแน่น และอื่น ๆ

กระบวนการในเมฆของฝู่นละออง เริ่มต้นจากการเกิดนิเคลียสโดยการควบแน่นของไอน้ำไปเป็นหยดน้ำขนาดเล็ก (droplet) มีอนุภาคฝู่นละอองเป็นแกนกลางของการควบแน่น เมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นจากการควบแน่นหรือการจับตัวกันเป็นก้อน อนุภาคนี้จะทำหน้าที่เป็นแกนกลางในการก่อตัวของเมฆ และบางส่วนของอนุภาคในบรรยากาศจะทำให้เกิดฟ้าผ่า ส่วนกระบวนการสุดท้าย คือ อันตรกิริยาอนุภาคฝู่นละอองกับเมฆ โดยอนุภาคฝู่นละอองที่ทำหน้าที่เป็นแกนกลางในการก่อตัวของเมฆ ถูกกระตุ้นให้มีประจุเมื่อเกิดการระเหย ทำให้อนุภาคฝู่นละอองที่มีประจุการระเหยแล้วกลับมาเป็นอนุภาคดั้งเดิม ดังภาพประกอบ 2

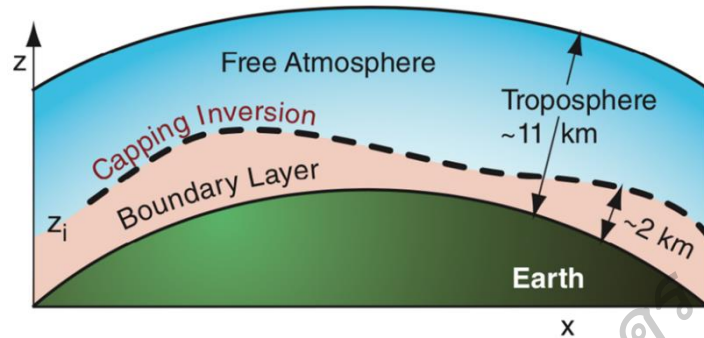


ภาพประกอบ 2 กระบวนการในเมฆของฝู่นละออง (Kirkby, 2013)

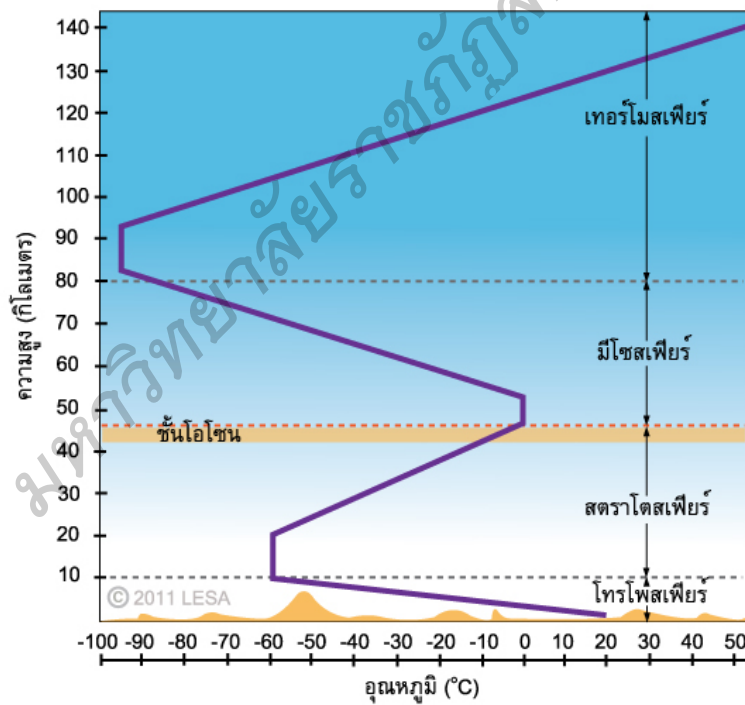
1.4 การกระจายตัวของฝู่นละอองตามความสูง

การกระจายของฝู่นละอองตามความสูงจะมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างในแนวตั้งของบรรยากาศ โดยทั่วไป บรรยากาศของโลกที่อยู่ใกล้พื้นผิวโลกมีการเปลี่ยนแปลงเป็นวัฏจักรตามเวลาในรอบวัน อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลมชั้นดังกล่าวจะเรียกว่า Boundary layer

ซึ่งสูงจากพื้นผิวโลก ดังภาพประกอบ 3 โดยอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงตามความสูง
ดังภาพประกอบ 4



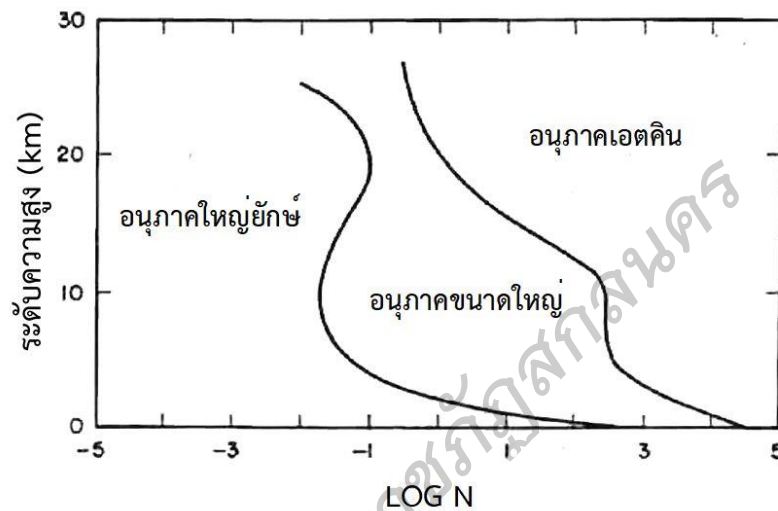
ภาพประกอบ 3 Boundary layer ของบรรยากาศโลก (Stull, 2018)



ภาพประกอบ 4 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของบรรยากาศตามความสูงจากพื้นผิวโลก
(ศูนย์การเรียนรู้วิทยาศาสตร์โลกและดาราศาสตร์, 2561)

จากการเปลี่ยนแปลงตามความสูงของอุณหภูมิของบรรยากาศ boundary layer
จะเห็นว่ามีความคั่งที่หลังจากนั้นจะมีการเพิ่มขึ้น ลักษณะการเปลี่ยนแปลงนี้มีผลทำให้สามารถแบ่ง

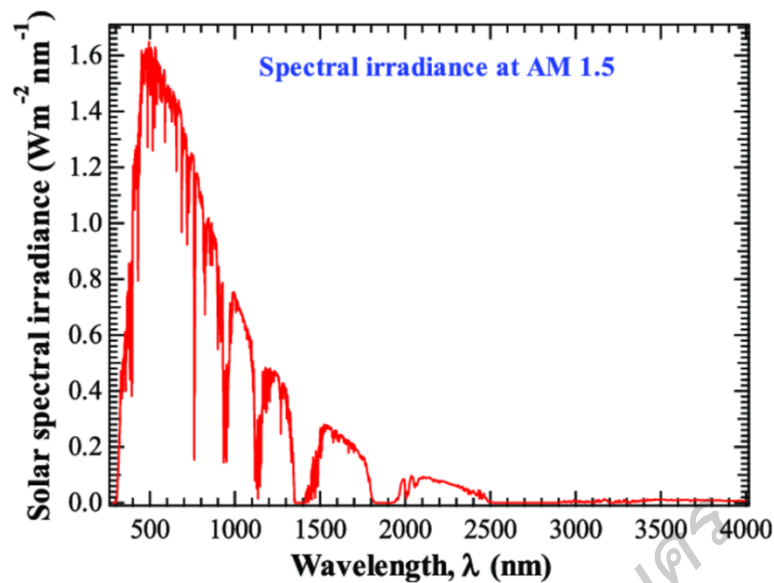
ชั้นของฝุ่นละออง ได้เป็นฝุ่นละอองในชั้น boundary layer และฝุ่นละอองอิสระในชั้นโทรโพสเฟียร์ โดยฝุ่นละออง ในชั้น boundary layer จะอยู่ที่ระดับความสูง 0 – 2 km จากนั้นจะเป็นฝุ่นละอองที่อยู่ในชั้นสเตรโทสเฟียร์ (stratosphere) ที่ระดับความสูง 2 – 11 km ปริมาณของฝุ่นละอองที่พบในระดับความสูงต่าง ๆ ดังภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 ปริมาณและชนิดของฝุ่นละอองที่พบที่ระดับความสูงต่าง ๆ ของบรรยากาศ (N เป็นจำนวนของอนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) (Iqbal, 1983)

2. สเปกตรัมรังสีดวงอาทิตย์ (Solar Radiation Spectrum)

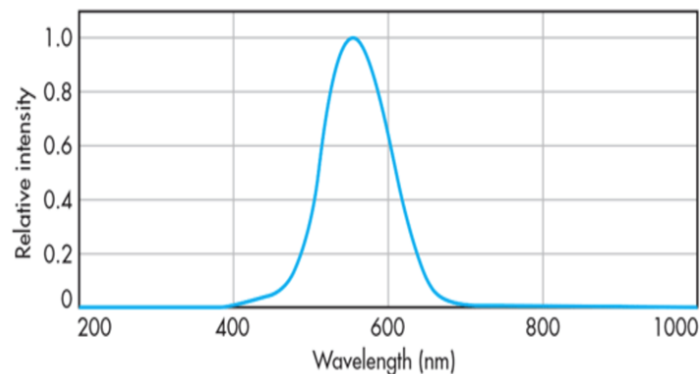
รังสีดวงอาทิตย์ที่นอกบรรยากาศโลกจะประกอบด้วย รังสีแกมมา รังสีเอกซ์ รังสีอัลตราไวโอเล็ต แสงที่ตามองเห็น รังสีอินฟราเรด และคลื่นวิทยุ โดยความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงแสงที่ตามองเห็นและรังสีอินฟราเรด ซึ่งสามารถแสดงสเปกตรัมดังภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 สเปกตรัมของรังสีดวงอาทิตย์นอกบรรยากาศโลก (Islam, 2017)

เมื่อรังสีดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ผ่านบรรยากาศ ยังพื้นผิวโลกจะถูกโมเลกุลอากาศ ฝุ่นละอองและเมฆดูดกลืน (absorb) และกระเจิง (scatter) ส่วนที่ถูกกระเจิงจะทำให้เกิดรังสีกระจาย (diffuse radiation) และส่วนที่เหลือพุ่งตรงมายังผู้สังเกตจะเรียกว่า รังสีตรง (direct radiation) ผลรวมของรังสีทั้งสองจะเรียกว่า รังสีรวม (global radiation) สเปกตรัมของรังสีตรง รังสีกระจาย และรังสีรวม ในกรณีท้องฟ้าปราศจากเมฆจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของบรรยากาศที่สำคัญ ได้แก่ โอโซน ไอน้ำ ฝุ่นละออง และก๊าซต่าง ๆ นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับมวลอากาศ (air mass) ที่รังสีดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ผ่าน

สำหรับสเปกตรัมในส่วนที่เป็นแสงสว่างจะมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 380–770 nm โดยสายตาของมนุษย์จะตอบสนองต่อความเข้มที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ไม่เท่ากัน โดย International Commission of Illumination (Centre International d'Éclairage, CIE) ได้กำหนดมาตรฐานการตอบสนองของ สายตามนุษย์ในสภาพแสงปกติ ดังภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 การตอบสนองของสายตามนุษย์ตามมาตรฐานของ CIE (Harmon, 2015)

เมื่อรังสีดวงอาทิตย์เดินทางผ่านบรรยากาศมายังพื้นโลกในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆ จะถูกดูดกลืนและถูกกระเจิง โดยโมเลกุลของอากาศ ไอน้ำ และ ฝุ่นละอองของแข็งที่ฟุ้งกระจายอยู่ในบรรยากาศ เราสามารถจำแนกออกเป็น 3 ชนิด คือ รังสีรวม รังสีกระเจิง และรังสีตรง

รังสีตรง คือ รังสีที่เหลือจากการกระเจิงแล้วพุ่งตรงมายังพื้นโลก

รังสีกระเจิง คือ รังสีที่เกิดจากการกระเจิงเนื่องจากองค์ประกอบต่าง ๆ ของชั้นบรรยากาศ

รังสีรวม คือ ผลรวมของรังสีตรงและรังสีกระเจิง

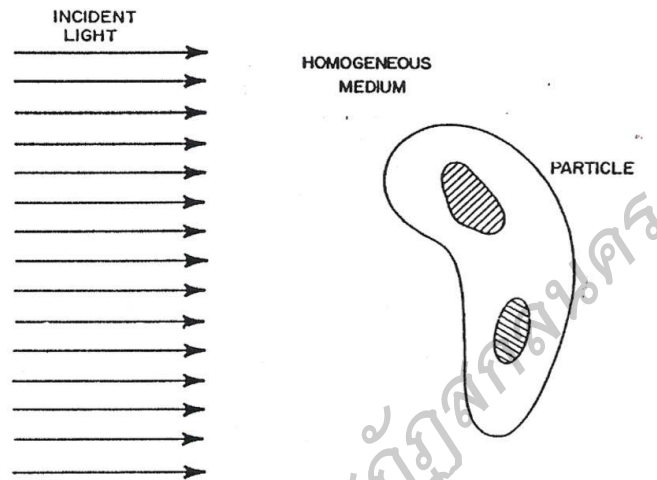
โดยทั่วไปข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ จะได้มาจากการจัดตั้งสถานีวัดความเข้มรังสีดวงอาทิตย์และทำการวัดต่อเนื่องกันหลาย ๆ ปี แล้วนำค่าที่ได้มาหาค่าทางสถิติของความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ของบริเวณที่วัดสำหรับบริเวณที่ไม่มีสถานีวัดโดยทั่วไปจะแก้ปัญหาโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

3. คุณสมบัติเชิงแสงของฝุ่นละออง (Aerosol Optical Properties)

ฝุ่นละอองมีอิทธิพลโดยตรงต่อกระบวนการแผ่รังสีในบรรยากาศผ่านกระบวนการดูดกลืนและกระเจิงรังสีดวงอาทิตย์ ส่วนทางอ้อม ฝุ่นละอองจะทำหน้าที่เป็นแกนกลางของการกลั่นตัวของไอน้ำเป็นเมฆ ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติเชิงแสงของเมฆ เนื่องจากขนาดของฝุ่นละอองมีค่าใกล้เคียงกับความยาวคลื่นแสงสว่างจากดวงอาทิตย์ดังนั้นการอธิบายการกระเจิงแสงของฝุ่นละอองจึงไม่สามารถใช้ทฤษฎี Rayleigh หรือหลักการของทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิตได้ ดังนั้นการกระเจิงแสงของฝุ่นละอองจำเป็นต้องใช้ทฤษฎีของมอดิบายเท่านั้น

3.1 ทฤษฎีของมี

กระเจิงแสงของฝุ่นละอองโดยอาศัยทฤษฎีของมี จะเริ่มต้นจากการพิจารณาอนุภาคทรงกลมเดี่ยว ๆ ที่มีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบระนาบและสันทิศทางเดียวกัน (plane parallel electromagnetic) มาตกกระทบบนทรงกลมนั้น โดยความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีขนาดใกล้เคียงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค ดังภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 การตกกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนทรงกลมเดี่ยว

จากสมการแมกซ์เวลล์สามารถหาความเข้มของสนามไฟฟ้าที่กระเจิงออกมาเป็น A_1 และ A_2 ดังสมการต่อไปนี้

$$A_1(\eta, x, f) = \frac{\lambda}{2\pi} \sum_{l_1=1}^{\infty} \frac{2l_1+1}{l_1(l_1+1)} (a_1(\eta, x)\pi_1(f) + b_1(\eta, x)\tau_1(\phi)) \quad (2)$$

$$A_2(\eta, x, \phi) = \frac{\lambda}{2\pi} \sum_{l_1=1}^{\infty} \frac{2l_1+1}{l_1(l_1+1)} (a_1(\eta, x)\pi_1(\phi) + b_1(\eta, x)\tau_1(\phi)) \quad (3)$$

เมื่อ A_1 คือ เวกเตอร์สนามไฟฟ้าต่อรังสีตกกระทบหนึ่งหน่วยในทิศตั้งฉากกับระนาบกระเจิง

A_2 คือ เวกเตอร์สนามไฟฟ้าต่อรังสีตกกระทบหนึ่งหน่วยในทิศขนานกับระนาบกระเจิง

η คือ ดัชนีหักเหของตัวกลางโยให้เป็นอากาศ มีค่าประมาณ 1

- ϕ คือ มุมของการกระเจิงไปข้างหน้า
 l_1 คือ ตัวเลขจำนวนเต็มบวก
 b_1 คือ สัมประสิทธิ์ของมี (Mie coefficient)
 x คือ พารามิเตอร์ขนาดของอนุภาค

$$\text{หาได้จากสมการ} \quad x = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (4)$$

- เมื่อ r คือ รัศมีของอนุภาค (m)
 λ คือ ความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบ (m)
 π_1 และ τ_1 เป็นฟังก์ชันของมุมตกกระทบ เขียนรูปของพหุนามเลอจอง (Legendre polynomials) ได้ดังนี้

$$\pi_1 = \frac{1}{\sin \phi} P_n^1(\cos \phi) \quad (5)$$

$$\tau_1 = \frac{d}{df} P_n^1(\cos \phi) \quad (6)$$

เมื่อรังสีดวงอาทิตย์ตกกระทบที่ผิวของทรงกลม ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่กระเจิงออกมาเมื่อเขียนปรากฏในรูปฟังก์ชันเชิงซ้อน เรียกว่า พลังงานของการกระเจิง (scattered energy) เขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{1}{2} (A_1 A_1^* + A_2 A_2^*) \quad (7)$$

พลังงานของการกระเจิงสำหรับมุมตัน ($d\omega$) แสดงในเทอมของภาคตัดขวางของทรงกลม, $d\sigma(\mathbf{m}, \mathbf{x}, \phi)$ เขียนสมการได้ดังนี้

$$d\sigma(\mathbf{m}, \mathbf{x}, \phi) = \frac{1}{2} (A_1 A_1^* + A_2 A_2^*) d\omega \quad (8)$$

การกระเจิงในภาคตัดขวาง (scattering cross section) คือ อัตราส่วนของรังสีดวงอาทิตย์ที่สูญเสียไปเนื่องจากการกระเจิงต่อรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบ การกระเจิงทั้งหมดในภาคตัดขวางหาได้จากการอินทิเกรตมุมตันทั้งหมด เขียนสมการได้ดังนี้

$$\sigma_{sc}(m, x) = \int_{\Omega} d\sigma(m, x, \phi) = \frac{1}{2} \int_{\Omega} (A_1 A_1^* + A_2 A_2^*) d\omega \quad (9)$$

เมื่อ σ_{sc} คือ การกระเจิงทั้งหมดในภาคตัดขวาง
 ω คือ มุมตัน
 A_1^* คือ ค่าสังยุคของ A_1
 A_2^* คือ ค่าสังยุคของ A_2

อัตราส่วนของการกระเจิงทั้งหมดในภาคตัดขวางต่อพื้นที่หน้าตัดของทรงกลม คือ ตัวประกอบประสิทธิภาพของการกระเจิง (scattering efficiency factor, Q_{sc}) เป็น พารามิเตอร์ที่บอกอัตราส่วนของรังสีดวงอาทิตย์ที่ถูกกระเจิงต่อรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบบน พื้นที่หน้าตัดของทรงกลม เขียนสมการดังนี้

$$Q_{sc}(m, x) = \frac{\sigma_{sc}(m, x)}{\pi r^2} \quad (10)$$

เมื่อ Q_{sc} คือ ตัวประกอบประสิทธิภาพของการกระเจิง

ในขณะเดียวกันสามารถคำนวณหาตัวประกอบประสิทธิภาพของการดูดกลืน (absorption efficiency factor, Q_{ab}) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของพลังงานที่ถูกดูดกลืนต่อพลังงานที่ ตกกระทบบนพื้นที่หน้าตัดของทรงกลม ผลรวมของรังสีดวงอาทิตย์ที่ถูกดูดกลืนและกระเจิงต่อ รังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบ เรียกว่า ตัวประกอบประสิทธิภาพของการลดทอน (extinction efficiency factor, Q_{ext}) เขียนได้ดังสมการ

$$Q_{ext} = Q_{sc} + Q_{ab} \quad (11)$$

เนื่องจากฝุ่นละอองที่กระจายอยู่ในบรรยากาศประกอบด้วยอนุภาคจำนวนมาก ซึ่งมีขนาดแตกต่างกันทฤษฎีการกระเจิงของมี ที่กล่าวไปแล้วพิจารณาเฉพาะอนุภาคเดี่ยว ดังนั้น ในการคำนวณพลังงานที่ถูกกระเจิงจึงต้องทำการอินทิเกรตพลังงานที่เกิดจากการกระเจิงทั้งหมด ของอนุภาคในคอลัมน์ที่สูงจากพื้นโลกเป็นระยะทาง z โดยสมมุติฐานว่าการกระเจิงของคลื่น

แม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้นครั้งเดียวและไม่รบกวนซึ่งกันและกัน จากข้อกำหนดดังกล่าวทำให้เราหาประสิทธิภาพของการกระเจิงและประสิทธิภาพของการลดทอน ได้ดังสมการ

$$K_{sc}(Z) = \int_0^{\infty} \pi r^2 Q_{sc}(r) n(r, z) dr \quad (12)$$

$$K_{ext}(Z) = \int_0^{\infty} \pi r^2 Q_{ext}(r) n(r, z) dr \quad (13)$$

เมื่อ K_{sc} คือ อัตราส่วนของรังสีกระเจิงต่อรังสีตกกระทบต่อระยะทาง z ในปริมาตรใด ๆ (m^{-1})

K_{ext} คือ อัตราส่วนของรังสีกระเจิงและดูดกลืนต่อรังสีตกกระทบต่อระยะทาง z ในปริมาตรใด ๆ (m^{-1})

$n(r, z)dr$ คือ จำนวนอนุภาคที่มีรัศมี r ถึง $r + dr$ ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่ความสูง z

3.2 ความลึกเชิงแสงองุ่นละออง

K_{sc} เป็นพารามิเตอร์ที่บอกอัตราส่วนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกกระเจิงต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบที่หนึ่งหน่วยระยะทาง ส่วน K_{ext} เป็นพารามิเตอร์ที่บอกอัตราส่วนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกลดทอนต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบที่หนึ่งหน่วยระยะทาง เนื่องจาก K_{sc} และ K_{ext} เป็นการพิจารณาพลังงานที่สูญเสียไปที่ระยะความสูง z จากพื้นผิวโลก ถ้าต้องการทราบพลังงานที่สูญเสียไปทั้งหมดในแนวตั้งของอากาศ ตั้งแต่พื้นผิวโลกไปถึงชั้นบนสุดของบรรยากาศ ต้องทำการอินทิเกรตทั้งหมดในแนวตั้งฉากของ K_{sc} และ K_{ext} ซึ่งจะได้พารามิเตอร์ตัวใหม่เป็น

$$\tau'_{sc} = \int_0^{\infty} K_{sc}(z) dz = \int_0^{\infty} \pi r^2 Q_{sc}(r) n_a(r) dr \quad (14)$$

$$\tau'_{ext} = \int_0^{\infty} K_{ext}(z) dz = \int_0^{\infty} \pi r^2 Q_{sc}(r) n_a(r) dr \quad (15)$$

เมื่อ τ'_{sc} คือ ความลึกเชิงแสงของการกระเจิง

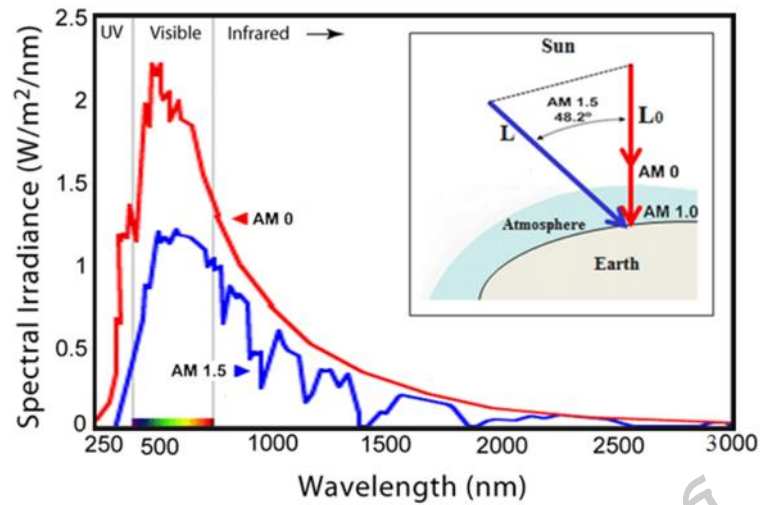
τ'_{ext} คือ ความลึกเชิงแสงของการลดทอน

ดังนั้น τ'_{ext} เรียกว่า ความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง (AOD) เป็นพารามิเตอร์ที่บอกถึงระดับความสามารถในการป้องกันการส่งผ่านแสงจากการดูดกลืนหรือการกระเจิงของฝุ่นละอองในบรรยากาศว่าได้มากน้อยเพียงใด พารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่า AOD ได้ การกระจายตัวของฝุ่นละอองส่วนใหญ่ฝุ่นละอองจะมีความเข้มข้นสูงจากพื้นผิวโลกที่ระยะความสูงประมาณ 2 km (Ricketts 2009) อีกหนึ่งพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับการคำนวณค่า AOD คือมวลอากาศ เมื่อมวลอากาศเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ AOD มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น ในการศึกษาค่า AOD จึงนิยมใช้ค่ามวลอากาศไม่สูงมากนัก สำหรับบริเวณเส้นศูนย์สูตรจึงนิยมศึกษาค่ามวลอากาศน้อยกว่า 4 (Slusser et al. 1999)

AOD จะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น แต่บางครั้งก็พบว่า AOD มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มขึ้นในช่วงรังสี UV (Arola and Koskela, 2004; Cachorro, De Frutos and Gonzalez 1993, Jacovides, Steven and Asimakopoulos, 2000; Kirchhoff, 2002; Kumharn, 2010; Marengo et al., 1997; Silva and Kirchhoff, 2004) เนื่องมาจากการวัดความเข้มรังสีในช่วงความยาวคลื่นสั้นมีความไม่แน่นอนค่อนข้างสูง (Arola and Koskela, 2004; Silva and Kirchhoff, 2004)

3.3 ความลึกเชิงแสงและการส่งผ่าน

เมื่อรังสีดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ผ่านบรรยากาศโลก รังสีดวงอาทิตย์จะถูกดูดกลืนและกระเจิงด้วยแก๊สต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของบรรยากาศแตกต่างกันไป โดยโอโซนจะดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ในช่วงความยาวคลื่นรังสี UV ส่วนไอน้ำจะมีอิทธิพลในช่วงความยาวคลื่นรังสีอินฟราเรด ดังภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 การลดลงของรังสีดวงอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นใด ๆ (Dragons flight, 2007)

อนุภาคฝุ่นละอองในบรรยากาศจะลดทอนรังสีดวงอาทิตย์ที่ผ่านเข้ามาในบรรยากาศโลกที่ทุกความยาวคลื่น รังสีดวงอาทิตย์จะลดทอนลงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ ขนาดของฝุ่นละออง ดัชนีหักเหของตัวกลาง และความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบ (JH Seinfeld and SN Pandis, 1998)

การลดลงของรังสีดวงอาทิตย์เมื่อเคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศสามารถคำนวณตามกฎของเบียร์ (Beer's law) (Iqbal, 1983) ได้ดังนี้

$$I_{\lambda} = I_{0\lambda} E_0 \exp(-m\tau) \quad (16)$$

เมื่อ I_{λ} คือ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์บนพื้นผิวโลกที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ

(W/m^2)

$I_{0\lambda}$ คือ ความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่นอกบรรยากาศโลกที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ

(W/m^2)

E_0 คือ ตัวประกอบสำหรับแก้ผลจากการแปรค่าของระยะทางระหว่างโลกกับดวงอาทิตย์

เทอมของ $\exp(-m\tau)$ เรียกว่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านรังสีดวงอาทิตย์

เมื่อ m คือ มวลอากาศ

τ คือ ความลึกเชิงแสงขององค์ประกอบของบรรยากาศ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เมื่อรังสีดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศของโลก ในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆจะมีความเข้มลดลง (attenuation) เนื่องจากกระบวนการต่าง ๆ ได้แก่ การกระเจิงโดยโมเลกุลของอากาศหรือ Rayleigh scattering การกระเจิงและการดูดกลืนของฝุ่นละอองในบรรยากาศ และการดูดกลืนในบางช่วงของความยาวคลื่นอันเนื่องมาจากก๊าซต่าง ๆ ในบรรยากาศ (selective absorption) โดยทั่วไปมักไม่มีปัญหาในการคำนวณความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ถูกกระเจิงโดยโมเลกุลของอากาศและการดูดกลืนบางช่วงของความยาวคลื่นจากโมเลกุล แต่ปัญหาสำคัญอยู่ที่การดูดกลืนและการกระเจิงรังสีดวงอาทิตย์ของฝุ่นละอองในบรรยากาศ ทั้งนี้เพราะฝุ่นละอองมีหลายชนิดแต่ละชนิดมีคุณสมบัติไม่เหมือนกัน นอกจากนี้ยังมีการกระจายในแนวตั้ง และการกระจายตามพื้นที่และเวลาในรอบปีที่ยากต่อการศึกษา ถึงแม้ว่าเราจะสามารถใช้ทฤษฎีของมีฮาการกระเจิงและการดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ของฝุ่นละอองได้ก็ตาม แต่ทฤษฎีดังกล่าวมีความสลับซับซ้อนและยากต่อการนำมาใช้ในทางปฏิบัติ ในช่วงต้นทศวรรษที่ 20 Angstrom (1929) เป็นคนแรกที่เสนอวิธีการคำนวณการลดลงของรังสีดวงอาทิตย์เนื่องจากฝุ่นละออง โดยพิจารณาผลรวมของการลดลงทั้งจากการดูดกลืนและการกระเจิงรังสีดวงอาทิตย์ของฝุ่นละออง และบอกเป็นค่าความขุ่นมัวของบรรยากาศเนื่องจากฝุ่นละออง โดยใช้ค่า Turbidity coefficient (β) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับปริมาณฝุ่นละอองในบรรยากาศ ต่อมา Moon (1940) ได้ตั้งสมมติฐานว่าการลดลงของรังสีดวงอาทิตย์เนื่องจากฝุ่นละอองเกิดจากการกระเจิงเพียงอย่างเดียว และได้เสนอสูตรสำหรับการคำนวณค่า scattering coefficient ของฝุ่นละออง

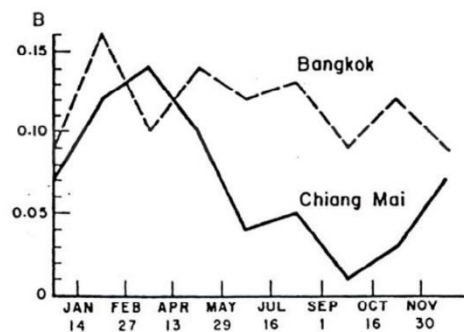
ในช่วงทศวรรษที่ 1930 เป็นต้นมา นักวิจัยของประเทศสหภาพรัสเซียได้ทำการศึกษาความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ ทั้งยังพัฒนาอุปกรณ์วัดและทฤษฎี ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการคำนวณผลของฝุ่นละอองที่มีต่อรังสีดวงอาทิตย์ งานวิจัยที่สำคัญงานหนึ่งได้แก่การพัฒนาทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าโดยฝุ่นละออง โดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อว่า Mie เป็นคนตั้งชื่อเรียกทฤษฎีนี้ว่า Mie's theory (Bohren and Huffmar, 1983) โดยทฤษฎีดังกล่าวอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของ Maxwell ซึ่งยังคงใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน งานวิจัยที่สำคัญอีกชิ้นหนึ่งของนักวิจัยชาวรัสเซีย คือการศึกษาการลดลงของรังสีดวงอาทิตย์เนื่องจากฝุ่นละอองโดยอาศัยการวัดรังสีตรงที่พื้นผิวโลก ซึ่งดำเนินการโดย Genikhovich and Rusian (Berlyand, 1974) ในงานดังกล่าวผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลความเข้มรังสีตรงซึ่งวัดได้ที่เมือง Repetek ในเดือนตุลาคม ค.ศ. 1970 มาทำการวิเคราะห์ ในการวัดดังกล่าวได้ใช้แผ่นกรองแสงมาช่วยตัดแสงในบางความยาวคลื่นออกไป จากนั้นจึงทำการคำนวณหาค่า Aerosol Optical Depth ในช่วงความ

ยาวคลื่น 0.38-0.53 μm และ 0.53-0.69 μm จากผลการวิเคราะห์พบว่าค่า Aerosol Optical Depth ที่ได้มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในรอบวัน และค่า Aerosol Optical Depth ในช่วงความยาวคลื่น 0.38-0.53 μm มีค่าสูงกว่าในช่วง 0.53-0.69 μm

Watt (1978) ได้ทำการศึกษาองค์ประกอบของบรรยากาศในวันที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆที่มีผลต่อการลดลงของรังสีดวงอาทิตย์ สรุปได้ว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการลดลงของรังสีดวงอาทิตย์คือโอโซน 0.5-3.0% โมเลกุลอากาศแห้ง 11-13% ไอน้ำ 3.5-14% และฝุ่นละอองในบรรยากาศ 0.1-26%

ในช่วงทศวรรษ 1970 เป็นต้นมา ได้มีการนำเทคนิคการใช้ข้อมูลดาวเทียมมาช่วยในการศึกษาค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่พื้นผิวโลก เช่น ในประเทศออสเตรเลีย Dr. Nunez แห่งมหาวิทยาลัย Tasmania ได้พัฒนาการใช้ข้อมูลดาวเทียมในการคำนวณค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ซึ่งมีผลงานตั้งแต่ช่วงปลายทศวรรษ 1970 ต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบัน ในงานวิจัย Nunez (1993) ได้ใช้ข้อมูลดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา GMS ทำการศึกษาค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกในบริเวณเขตร้อนของมหาสมุทรแปซิฟิก ซึ่งครอบคลุมพื้นที่บางส่วนของประเทศไทย ฟิลิปปินส์ อินโดนีเซีย และภาคเหนือของประเทศออสเตรเลีย ตามโครงการ Tropical Ocean Global Atmosphere (TOGA) ในโครงการดังกล่าว Dr.Nunez ได้พัฒนาแบบจำลองเชิงฟิสิกส์ซึ่งใช้คำนวณค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ในเขตร้อนได้ดี จากการวิจัยนี้ (Nunez 1993) ได้พบว่าฝุ่นละอองในอากาศมีผลในการดูดกลืนและกระเจิงรังสีดวงอาทิตย์ ผลการศึกษาพบว่าบริเวณกรุงเทพมหานครฝุ่นละอองมีผลทำให้รังสีดวงอาทิตย์ลดลง 19%

สำหรับประเทศไทย Exell (1978) สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชียได้ทำการหาค่าสภาพขุ่นมัวของบรรยากาศ (atmospheric turbidity) โดยอาศัยตารางคำนวณค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ในสภาพท้องฟ้าปราศจากเมฆของ Schiiepp (Robinson, 1966) จากตารางดังกล่าวสามารถหาค่าความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ในสภาพปราศจากเมฆ ถ้าทราบปริมาณไอน้ำในอากาศและการลดลงของรังสีดวงอาทิตย์เนื่องจากฝุ่นละออง Exell ได้ใช้ข้อมูลความเข้มรังสีดวงอาทิตย์ของสถานีกรุงเทพมหานคร และเชียงใหม่ ในวันที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆคำนวณหาสัมประสิทธิ์ความขุ่นมัวของบรรยากาศ โดยใช้ตารางของ Schiiepp จากนั้นนำค่า turbidity coefficient ที่ได้มาหาความสัมพันธ์กับข้อมูลทัศนวิสัย ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ ดังภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 การแปรค่าของ turbidity coefficient (β) ที่กรุงเทพมหานครและเชียงใหม่ (Exell, 1987)

นับตั้งแต่ปี 2000 เป็นต้นมา องค์การนาซา (NASA) ของประเทศสหรัฐอเมริกา ได้จัดตั้งเครือข่ายเครื่อง sunphotometer ทั่วโลก และเรียกเครือข่ายดังกล่าวว่า AERONET (Aerosol Robotic Network) ซึ่งปัจจุบันมีสถานีทั้งหมด 655 แห่ง โดยมีเป้าหมายเพื่อศึกษาสมบัติเชิงแสง (optical properties) ปริมาณและชนิด รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของฝุ่นละอองทั่วโลก

Estelles และคณะ (2002) ได้ทำการเปรียบเทียบค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองที่ความยาวคลื่น ของ 2 ฤดูกาล คือ ฤดูร้อน และฤดูหนาว พบว่าในฤดูหนาวมีค่าความลึกเชิงแสงต่ำที่สุดในเดือนมกราคม คือ 0.1 และมีค่าสูงในฤดูร้อนเท่ากับ 0.4-0.5 ในเดือนมิถุนายน ขณะเดียวกันได้ทำการหาค่า wavelength exponent โดยในเดือนมกราคม มีค่าเท่ากับ 1.2 และในเดือนมิถุนายน มีค่าเท่ากับ 0.8

สำหรับงานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ เป็นงานเกี่ยวกับการจำแนกชนิดของฝุ่นละออง มีงานวิจัยหลายชิ้นที่พยายามใช้ปริมาณต่าง ๆ มาจำแนกชนิดฝุ่นละออง ซึ่งงานที่สำคัญที่สุดคืองานของ Dubovik et al. (2001) ใช้ข้อมูล 8 ปีที่ได้จาก AERONET โดยเป็นค่า SSA และการแจกแจงขนาดฝุ่นละออง สามารถใช้แยกชนิดของฝุ่นละอองตามที่มา ได้แก่ ฝุ่นจากทะเลทราย ฝุ่นจากทะเล ฝุ่นจากการเผาชีวมวล และฝุ่นจากเมืองและอุตสาหกรรม ได้เป็นอย่างดี

ตั้งแต่นั้นปี 2003 นักวิจัยกลุ่ม AERONET ขององค์การนาซาได้เริ่มเข้าศึกษาฝุ่นละอองในประเทศไทยมากขึ้น โดยตั้งเป็นเครือข่ายเครื่องซันโฟโตมิเตอร์ มีสถานีประจำ 4 แห่ง อำเภออมก๋อย จังหวัดเชียงใหม่ อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา อำเภอหัวหิน จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ อำเภอเมือง จังหวัดมุกดาหาร ทำการสำรวจข้อมูลภาคพื้นดินร่วมกับข้อมูลจากชุดดาวเทียม เช่น MODIS, TOMS, OMI และ GOES เป็นต้นมา ผลที่ได้พบว่าฝุ่นละอองที่วัดได้

ในประเทศไทยถูกพัดพามาจากภูมิภาคใกล้เคียง เช่น อินเดีย จีน เป็นต้น โดยฝุ่นละอองมีค่า single scattering albedo ประมาณ 0.895-0.915 ที่ 500 nm และฝุ่นละอองส่วนใหญ่เป็นขนาดเล็กกว่า 0.6 μm ขนาดส่วนใหญ่ประมาณ 0.15 μm เนื่องมาจากอิทธิพลของไฟป่าในหลายพื้นที่ใกล้เคียง

จันทราช และคณะ (2011) ได้ทำการเปรียบเทียบข้อมูลความลึกเชิงแสงที่ได้จาก MODIS กับข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์โฟโตมิเตอร์ ที่จังหวัดเชียงใหม่ อุบลราชธานี นครปฐม และสงขลา พบว่าค่าที่ได้จากดาวเทียมแตกต่างจากค่าที่ได้จากการวัด 33.8% ถึง 53.7% ซึ่งก็แสดงว่าค่าที่ได้จากดาวเทียมยังมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างมาก

วิทยา ทานะมัย ได้ทำการศึกษาสมบัติของฝุ่นละอองในประเทศไทย ข้อมูลที่ได้จากเครื่องเซ็นเซอร์โฟโตมิเตอร์ที่สถานีวัด 3 แห่ง คือ จังหวัดเชียงใหม่ มหาลัทธิศิลปากร จังหวัดนครปฐม และจังหวัดสงขลา พบว่าค่า AOD จากข้อมูลทั้งหมดที่ 500 nm ทั้ง 3 สถานี มีค่าเท่ากับ 0.47 ± 0.31 , 0.54 ± 0.28 และ 0.21 ± 0.28 ตามลำดับ

ด้วยความร่วมมือจาก AERONET SKYNET และ NASA การศึกษาเรื่องฝุ่นละอองในประเทศไทยจึงพัฒนาไปค่อนข้างมาก ทั้งนี้ผู้วิจัยจึงเสนอที่จะทำการศึกษาสมบัติเชิงแสงและเชิงฟิสิกส์ใน 6 สถานีที่แตกต่างกันในประเทศไทย โดยวิธีการศึกษาจะกล่าวในบทถัดไป

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

ในการศึกษา AOD และตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา โดยออกแบบการเก็บข้อมูลฝุ่นละอองในบรรยากาศ โดยจะเก็บข้อมูลจากสถานีตรวจวัดฝุ่นละอองภาคพื้นดินทั้งหมด 6 สถานี ในภูมิภาคต่าง ๆ ซึ่งปัจจุบันมีอยู่ 2 เครื่องข่าย คือ เครื่องข่าย AERONET และเครื่องข่าย SKYNET และข้อมูลดาวเทียมจากเครื่องข่าย MODIS ที่ติดตั้งบนดาวเทียม TERRA และดาวเทียม AQUA ดังรายละเอียดต่อไปนี้

เครื่องมือวัดที่ใช้ในการวิจัย

ข้อมูลฝุ่นละอองในบรรยากาศมีข้อมูลอยู่ 2 แหล่ง คือ ข้อมูลภาคพื้นดิน (ground based) และข้อมูลดาวเทียม

ข้อมูลภาคพื้นดิน

1. เครื่องข่าย AERONET

AERONET (AErosol Robotic NETwork) เป็นสหพันธ์เครื่องข่ายการสำรวจระยะไกลของฝุ่นละอองภาคพื้นดิน ข้อมูลฝุ่นละอองที่ได้จาก เครื่องข่าย AERONET ประกอบด้วย ข้อมูล ฝุ่นละออง (Aerosol optical depth) ข้อมูลรังสีสตรอมพารามิเตอร์ และข้อมูลอื่น ๆ ปัจจุบัน เครื่องข่าย AERONET สถานีวัดฝุ่นละอองทั้งหมด 1,254 สถานีครอบคลุมทั่วโลก ดังภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 111 สถานีตรวจวัดเครือข่าย AERONET ทั่วโลก (NASA, 2019)

ฝุ่นละอองที่ได้จาก AERONET ประกอบไปด้วยข้อมูล AOD ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ พารามิเตอร์อังสตรอม ปริมาณไอน้ำที่กลั่นตัวได้ และการแจกแจงขนาดของฝุ่นละออง ข้อมูล AOD มีระดับคุณภาพของข้อมูลอยู่ 3 ระดับ ได้แก่ ระดับ 1.0 (ไม่ได้ผ่านการกรอง) ระดับ 1.5 (ปราศจากเมฆ) และระดับ 2.0 (ปราศจากเมฆและคุณภาพดี) ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอยู่ 4 จากเครือข่าย AERONET ได้แก่ เชียงใหม่ นครปฐม อุบลราชธานี และสงขลา โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่ปี 2006 ถึง 2017

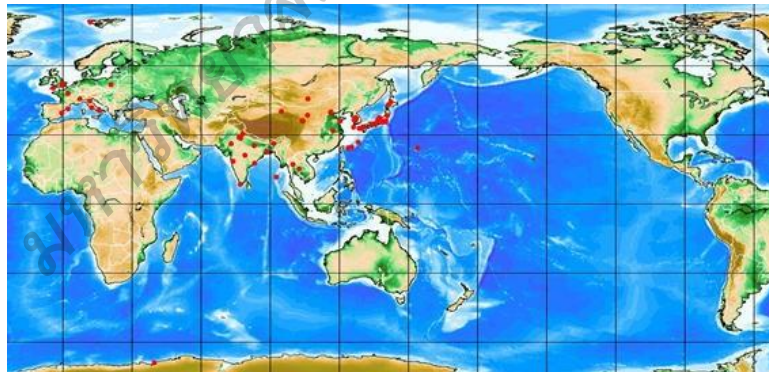
โดยเครือข่าย AERONET จะใช้เครื่องซันโฟโตมิเตอร์ (sun photometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดสเปกตรัมรังสีตรงของดวงอาทิตย์ ข้อมูลที่วัดได้นั้นสามารถนำมาวิเคราะห์หาสมบัติทางฟิสิกส์ของฝุ่นละอองในบรรยากาศ ซันโฟโตมิเตอร์เป็นเครื่องมือติดตามตำแหน่งของดวงอาทิตย์อัตโนมัติ ซึ่งทดแทนคนได้ดี การวัดของเครื่องนี้มีเฉพาะในช่วงเวลากลางวันเท่านั้น (ดวงอาทิตย์อยู่เหนือขอบฟ้า) ดังภาพประกอบ 12



ภาพประกอบ 112 เครื่องซันโฟโตมิเตอร์ (sun photometer)

2. เครือข่าย SKYNET

SKYNET เป็นเครือข่ายการสังเกตการณ์ที่มุ่งวิจัยการปฏิสัมพันธ์ของผืนละอองและรังสีเอกซ์ โครงการนี้ได้ริเริ่มขึ้นภายใต้โครงการ WCRP / GAME และขยายไปสู่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้เป็นการตรวจสอบของ ADEOS / GLI วัดคุณสมบัติหลักของ SKYNET คือ 1) เพื่อประเมินรูปแบบของอนุภาคละอองลอยเมฆ และรังสีในอากาศในระยะยาวและ 2) เพื่อทำความเข้าใจถึงผลกระทบต่อสภาพภูมิอากาศด้วยการปฏิสัมพันธ์ของผืนละออง และรังสีเอกซ์ นอกจากนี้การตรวจสอบความถูกต้องของการสังเกตการณ์ด้วยดาวเทียม (เช่น GOSAT, GOSAT-2, GCOM-C, EarthCARE และ Himawari-8) รวมถึงการจำลองแบบจำลองสภาพภูมิอากาศและการรวบรวมข้อมูลจะอยู่ในขอบเขตของกิจกรรมของ SKYNET เพื่อบรรลุวัตถุประสงค์เหล่านี้ SKYNET จะสังเกตเห็นคุณสมบัติทางแสง และทางจุลภาคของผืนละอองเมฆ การแผ่รังสีในชั้นบรรยากาศทั่วโลกภายใต้ความร่วมมืออย่างใกล้ชิดระหว่างหน่วยงานสถาบันและมหาวิทยาลัยแห่งชาติ ทุกพื้นที่ของ SKYNET มีเครื่องวัดรังสี หนึ่งเครื่องหรือมากกว่าหนึ่งเครื่อง เพื่อเพิ่มความสามารถของ SKYNET จะมีการวัดพร้อมกันกับเครื่องมืออื่น ๆ เช่น pyranometer, pyrgeometer, ไมโครเวฟเครื่องวัดการดูดกลืน, กล้องเมฆ, lidar และ MAX-DOAS สำหรับบางพื้นที่ที่เลือก ดังภาพประกอบ 13



ภาพประกอบ 113 สถานีตรวจวัดเครือข่าย SKYNET ทั่วโลก (Center for Environmental Remote Sensing, 2013)

โดยเครือข่าย SKYNET จะใช้เครื่องสกายเรดิโอมิเตอร์ (skyradiometer) เป็นเครื่องมือวัดรังสีแสงอาทิตย์แบบอัตโนมัติ วัดรังสีตรงที่ 7 ความยาวคลื่น ได้แก่ 315, 340, 440, 500, 675, 970 และ 1020 nm หัววัดของเครื่องมือหมุนตามการหมุนของดวงอาทิตย์ เครื่องมือนี้นำมาใช้ในเครือข่ายสกายเอเชียแปซิฟิกเพื่อใช้ในการตรวจวัดผืนละอองในชั้นบรรยากาศ และ

ใช้ในการสอบเทียบข้อมูลดาวเทียม ข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลของเครื่องนี้ได้แก่ AOD
สัมประสิทธิ์การกระเจิงของฝุ่นละออง การแจกแจงขนาดของฝุ่นละออง ดังภาพประกอบ 14



ภาพประกอบ 114 เครื่องสกายเรดิโอมิเตอร์ (sky radiometer)

เครื่อง sunphotometer กับ เครื่อง skyradiometer จะประกอบด้วยหัววัดและเครื่องบันทึกข้อมูล ส่วนหัววัดมีลักษณะเป็นทรงกระบอกมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 10 cm และจะหมุนปากกระบอกตามดวงอาทิตย์ sun tracker แบบอัตโนมัติเพื่อให้รังสีดวงอาทิตย์ส่องตรงเข้าไปในหัววัดที่อยู่ภายใน จากนั้นเครื่องบันทึกข้อมูลจะนำสัญญาณไฟฟ้าที่ได้ต่อเข้า data logger และบันทึกข้อมูลทุก 1 นาที ข้อมูลที่ได้จะแสดงผลเป็นค่าความต่างศักย์มีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์ (mV) ในการนำข้อมูลมาใช้งานจะต้องนำค่าที่วัดได้ไปหารค่าแฟคเตอร์ของการสอบเทียบ (calibration factor) ของหัววัดในแต่ละความยาวคลื่น แล้วจึงจะได้ข้อมูลเป็นค่าความเข้มรังสีตรงของดวงอาทิตย์ในแต่ละความยาวคลื่น ซึ่งมีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2)

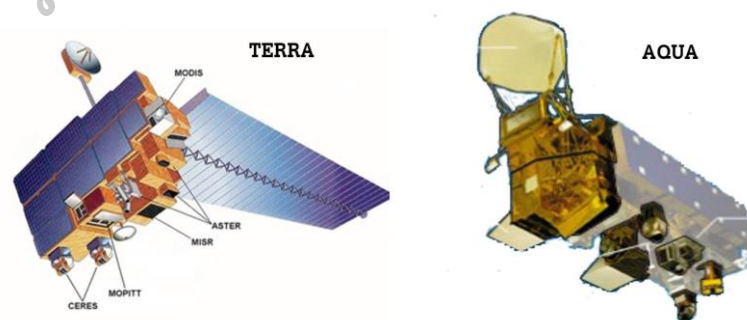
เครื่อง sunphotometer และเครื่อง skyradiometer จะทำการวัดรังสีกระจายโดยการกวาดพร้อมกันวัดค่า 2 รูปแบบ คือมุมเงยคงที่ตามดวงอาทิตย์แต่กวาดไปทางซ้ายและขวาของดวงอาทิตย์ (almucantar) และแบบกวาดตามแนวตั้ง (principal plane)

ข้อมูลดาวเทียม

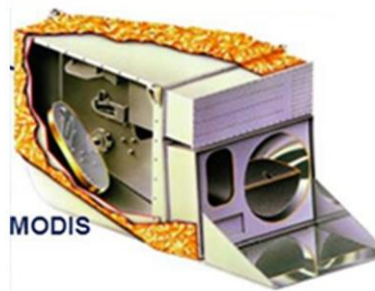
ข้อมูลที่ได้จากดาวเทียมส่วนใหญ่จะเป็นภาพถ่ายเรดาร์และภาพถ่ายอินฟราเรด เนื่องจากดาวเทียมสามารถถ่ายภาพครอบคลุมพื้นที่ได้เป็นบริเวณกว้างในครั้งเดียวและได้ข้อมูลที่ค่อนข้างทันต่อเหตุการณ์ เนื่องจากสามารถตรวจวัดได้ อย่างต่อเนื่อง ทั้งในช่วงกลางวันและช่วงกลางคืน ในส่วนของความละเอียดของข้อมูล ทั้งความละเอียดเชิงพื้นที่และความละเอียดเชิงรังสีขึ้นอยู่กับความสามารถของอุปกรณ์ และระดับความสูงของสถานีติดตั้ง และสามารถสำรวจ

ตรวจวัดในพื้นที่ที่ห่างไกลและมีความยากลำบากในการเข้าถึงได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การตรวจวัดจากระยะไกล ก็ยังมีข้อจำกัดในหลายด้าน เนื่องจากต้องใช้งบประมาณในการลงทุนและจัดการสูง มีความจำเป็นที่ต้องใช้บุคลากรที่มีความชำนาญ และข้อมูลที่ได้บางครั้งยังมีความละเอียดเชิงพื้นที่ไม่มากพอ และบางครั้งข้อมูลที่ได้ก็มีความคลาดเคลื่อนสูง ซึ่งเกิดมาได้จากหลายสาเหตุ ทั้งส่วนที่เกิดจากความบกพร่องของตัวระบบเอง และส่วนที่เกิดมาจากสภาวะแวดล้อมขณะทำการตรวจวัด

MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) เป็นเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งอยู่บนดาวเทียม TERRA/AQUA ดังภาพประกอบ 15-16 ซึ่งถูกออกแบบขึ้นเพื่อใช้ในการติดตามและตรวจสอบข้อมูลทรัพยากรธรรมชาติ โดยเริ่มเข้าสู่วงโคจรตั้งแต่ปี ค.ศ. 1999 และปี ค.ศ. 2002 โคจรที่ระดับความสูง 705 km และสามารถบันทึกข้อมูลครอบคลุมพื้นที่ทั่วโลกได้ภายใน 2 วัน โดยจะบันทึกข้อมูลในเวลาประมาณ 10.30 น. (TERRA) และ 13.30 น. (AQUA) ตามเวลาท้องถิ่น MODIS มีแถบสเปกตรัมถึง 36 แถบสเปกตรัม ใช้ในการสำรวจโลกทั้งระดับใน regional scale และ global scale แบบ multi-temporal series ในการศึกษาทางด้านสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ มีการนำไปประยุกต์ใช้ในการศึกษาวิจัยด้านดิน มหาสมุทร และชั้นบรรยากาศ ภาพถ่ายในระบบ MODIS มีความกว้าง หรือ Swath ประมาณ 2,330 km และสามารถบันทึกข้อมูลครอบคลุมพื้นที่ทั่วโลกได้ภายใน 2 วัน ข้อมูลที่ได้รับประกอบด้วย 36 ช่วงคลื่น ระหว่าง 0.4 -14 nm โดยมีความละเอียดเชิงพื้นที่แตกต่างกันไปในแต่ละช่วงคลื่น โดยช่วงคลื่นที่ 1-2 มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 250 m ช่วงคลื่น 3-7 มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 500 m และช่วงคลื่น 8-36 มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 1,000 m โดยข้อมูลนั้นมีหลายประเภท ซึ่งการดำเนินงานครั้งนี้เลือกใช้ข้อมูลความลึกเชิงแสงของผืนละออง MODIS ให้ข้อมูลในช่วงกว้าง สามารถเห็นได้ทุกวัน



ภาพประกอบ 115 ดาวเทียม TERRA/AQUA (Jenner, 2017)



ภาพประกอบ 116 MODIS ติดตั้งบนดาวเทียม TERRA/AQUA (Maccherone, 2019)

ข้อมูลสภาพอากาศ

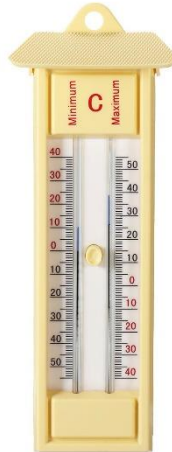
1. อุณหภูมิของอากาศ (Air temperature)

ปัจจัยพื้นฐานในการศึกษาสภาพอากาศ (weather) เนื่องจากอุณหภูมิอากาศมีเปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงเวลา เช่น ปี ฤดูกาล เดือน วัน หรือแม้กระทั่งรายชั่วโมง นักอุตุนิยมวิทยา จึงศึกษาค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิอากาศ ดังนี้

- อุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละวัน (Daily mean temperature) ใช้ค่าอุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิต่ำสุดรวมกันหารสอง
- อุณหภูมิเฉลี่ยของเดือน (Monthly mean temperature) ใช้ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของแต่ละวันรวมกันหารด้วยจำนวนวัน
- อุณหภูมิเฉลี่ยของปี (Yearly mean temperature) ใช้ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของแต่ละเดือนรวมกันหารด้วยสิบสอง

ปัจจัยสำคัญที่สุดที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอากาศในรอบวันคือการหมุนรอบตัวเองของโลก ซึ่งทำให้มุมที่แสงอาทิตย์ตกกระทบพื้นผิวโลกเปลี่ยนแปลงไป เวลาเที่ยงวันดวงอาทิตย์อยู่สูงเหนือขอบฟ้ามากที่สุด แสงอาทิตย์ตกกระทบพื้นโลกเป็นมุมฉากจึงมีความเข้มสูง ส่วนในเวลาเช้าและเย็น ดวงอาทิตย์อยู่ใกล้ขอบฟ้า แสงตกกระทบพื้นโลกเป็นมุมเฉียง ถ้าแสงครอบคลุมพื้นที่กว้างทำให้ความเข้มของแสงจึงมีน้อยกว่าเวลาเที่ยง อีกประการหนึ่งในช่วงเวลาเที่ยงแสงอาทิตย์ส่องผ่านบรรยากาศเป็นระยะทางไม่มาก แต่ในเวลาเช้าและเย็นแสงอาทิตย์ทำมุมลาดและเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศเป็นระยะทางไกล ความเข้มของแสงจึงถูกบรรยากาศกรองให้ลดน้อยลง ยังผลให้อุณหภูมิต่ำลงไปอีก

เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) คืออุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาสภาพอากาศ เรียกว่า เทอร์โมมิเตอร์ชนิดสูงสุด-ต่ำสุด ซึ่งสามารถวัดค่าอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในรอบวัน ดังภาพประกอบ 17



ภาพประกอบ 117 เทอร์โมมิเตอร์สูงสุด-ต่ำสุด (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2019)

2. ปริมาณน้ำฝน (Rainfall)

เป็นการตรวจวัดด้วยเครื่องวัดน้ำฝนที่ติดตั้งอยู่บนพื้นโลก และวัดความแรง หรือ ความหนาแน่นจากปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมายังพื้นดินโดยตรง เครื่องวัดปริมาณน้ำฝน จะมีลักษณะใหญ่ ๆ เป็นโลหะรูปทรงกระบอก โดยมีความยาวและเส้นผ่าศูนย์กลาง แตกต่างกันไป เช่น แบบมาตรฐานของกรมอุตุนิยมวิทยาของสหรัฐอเมริกา มีความยาว 24” ผ่านกลางกว้าง 8” แต่ของอังกฤษมีความยาว 12” ผ่านกลางกว้าง 5” เป็นต้น เครื่องวัดน้ำฝนที่กล่าวมาวัดได้เฉพาะ ปริมาณทั้งหมดของฝน และวัดในช่วงเวลา 24 hr.

เครื่องวัดน้ำฝนแบบแก้วดวงเป็นที่นิยมกันแพร่หลาย รูปร่างเป็นรูป ทรงกระบอกกลมตลอดหรือบางที่ทำให้ก้นผายออกเพื่อให้ตั้งได้มั่นคงขึ้น ตัวเครื่องทำด้วยเหล็ก หรือทองแดงที่ไม่เป็นสนิม ตอนขอบบนของเครื่องทำเป็นปากรับน้ำหนักฝน ขนาดแน่นอน (นิยม ใช้ปากถังขนาด 8 นิ้ว) ที่ขอบปากถังต้องทำให้หนาเป็นพิเศษกันบุงเปี้ยวหรือเสียรูปทรง ติดตั้งไว้ บนพื้นดินเรียบและสูงจากพื้นดินไม่เกิน 1 m ห้ามติดตั้งไว้ที่ลาดชัน ดังภาพประกอบ 18



ภาพประกอบ 118 เครื่องวัดปริมาณน้ำฝนแบบแก้วตวง (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2019)

3. ความเร็วลม

เป็นเครื่องมือวัดความเร็วของลม ที่นิยมใช้กันมากเป็นมาตรวัดลม แบบรูปถ้วย (cup anemometer) ประกอบด้วยลูกถ้วยทรงกรวย 3 หรือ 4 ใบ มีแขนยึดติดกันกับแกน ซึ่งอยู่ในแนวตั้ง ดังภาพประกอบ 19 และติดอยู่กับเครื่องอ่านความเร็ว ลูกถ้วยจะหมุนรอบเพลาตามแรงลม จำนวนรอบหมุนจะเปลี่ยนเป็นระยะทาง โดยมีหน่วยเป็นกิโลเมตรหรือไมล์ อ่านได้จากหน้าปัดของเครื่องอ่านความเร็ว



ภาพประกอบ 119 เครื่องวัดความเร็วลม (จักรกฤษณ์, 2010)

การวิเคราะห์ข้อมูล

1. การเก็บรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูล AOD จากเครือข่าย AERONET, SKYNET และ MODIS โดยเลือกเก็บข้อมูลในประเทศไทยทั้งหมด 6 สถานี ได้แก่ เชียงใหม่ นครปฐม กรุงเทพมหานครราชสีมา (อำเภอพิมาย) อุบลราชธานี และสงขลา ดังภาพประกอบ 20 และตาราง 1 โดยศึกษาตั้งแต่ปี ค.ศ. 2006 – 2017



ภาพประกอบ 20 แผนที่แสดงที่ตั้งแต่ละสถานี

ตาราง 1 แสดงข้อมูลพื้นฐานข้อมูลภาคพื้นดิน

สถานี	ตำแหน่ง	ความยาวคลื่น (nm)	เครื่องมือ	ช่วงเวลาของ ข้อมูล
AERONET				
เชียงใหม่	18.78°N, 98.98°E	380,440,500, 675,870,1020	Cimel sun- photometer model CE318	ค.ศ. 2006 - ค.ศ. 2018

ตาราง 1 (ต่อ)

สถานี	ตำแหน่ง	ความยาวคลื่น (nm)	เครื่องมือ	ช่วงเวลาของ ข้อมูล
อุบลราชธานี	15.25°N, 104.87°E	380,440,500, 675,870,1020		ค.ศ. 2009 - ค.ศ. 2018
นครปฐม (มหาวิทยาลัย ศิลปากร)	13.82°N, 100.04°E	380,440,500, 675,870,1020	Cimel sun- photometer model CE318	ค.ศ. 2006 - ค.ศ. 2018
สงขลา	7.2°N, 100.60°E	380,440,500, 675,870,1020		ค.ศ. 2007 - ค.ศ. 2018
SKYNET				
กรุงเทพมหานคร	13.67°N, 100.60°E	380,400,443, 500,675,870,1020	Sky radiometer	ค.ศ. 2009 - ค.ศ. 2018
นครราชสีมา (อำเภอพิมาย)	15.18°N, 102.57°E	380,400,500, 675,870,1020	model POM-01	ค.ศ. 2005 - ค.ศ. 2018

ข้อมูลฝุ่นละอองในบรรยากาศมีข้อมูลอยู่ 2 แหล่ง ข้อมูลภาคพื้นดิน (ground-based data) และข้อมูลดาวเทียม (Satellite data) ข้อมูลที่ได้จาก 2 แหล่งนี้จะมีค่าแตกต่างกันน้อยขึ้นอยู่กับวิธีการและกระบวนการได้มาของข้อมูล

ข้อมูลภาคพื้นดิน (ground based data) เป็นข้อมูลที่ได้จากการติดตั้งเครื่องมือวัดภาคพื้นดิน ซึ่งข้อมูลภาคพื้นดินจะใช้ในการสอบเทียบข้อมูลดาวเทียม เนื่องจากเครื่องนี้อยู่ใกล้พื้นผิวโลกมากกว่าข้อมูลดาวเทียม ทำให้ข้อมูลที่ได้มีความแม่นยำและถูกต้อง

1.1 เครื่องข่าย AERONET

รวบรวมข้อมูล AOD รายวัน รายเดือน รายปี จากสถานีตรวจวัด เชียงใหม่ อุบลราชธานี นครปฐม (มหาวิทยาลัยศิลปากร) และสงขลา สามารถดาวน์โหลดข้อมูลได้ที่ https://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/draw_map_display_aod_v3 และเปิดข้อมูลโดยโปรแกรม Excel ข้อมูล AOD ที่ใช้เป็นข้อมูลที่อยู่ในชุดผลิตภัณฑ์ level 2

1.2 เครือข่าย SKYNET

รวบรวมข้อมูล AOD รายวัน รายเดือน รายปี จากสถานีตรวจวัด กรุงเทพมหานคร และนครราชสีมา (อำเภอมีมาย) สามารถดาวน์โหลดข้อมูลได้ที่ <http://atmos3.cr.chiba-u.jp/skyNET/> และเปิดข้อมูลโดยโปรแกรม Excel ข้อมูล AOD ที่ใช้เป็นข้อมูลที่อยู่ในชุดผลิตภัณฑ์ level 2

ข้อมูลดาวเทียม (Satellite data) ข้อมูลที่ได้จากดาวเทียมส่วนใหญ่จะเป็นภาพถ่ายเรดาร์และภาพถ่ายอินฟราเรด เนื่องจากดาวเทียมสามารถถ่ายภาพครอบคลุมพื้นที่ได้เป็นบริเวณกว้างในครั้งเดียวและได้ข้อมูลที่ค่อนข้างทันต่อเหตุการณ์ เนื่องจากสามารถตรวจวัดได้อย่างต่อเนื่อง ทั้งในช่วงกลางวันและช่วงกลางคืน ในส่วนของความละเอียดของข้อมูล ทั้งความละเอียดเชิงพื้นที่และความละเอียดเชิงรังสี ขึ้นอยู่กับความสามารถของอุปกรณ์ และระดับความสูงของสถานีติดตั้ง อย่างไรก็ตาม การตรวจวัดจากระยะไกล ก็ยังมีข้อจำกัดในหลายด้าน เนื่องจากต้องใช้งบประมาณในการลงทุนและจัดการสูง มีความจำเป็นที่ต้องใช้บุคลากรที่มีความชำนาญ และข้อมูลที่ได้บางครั้งยังมี ความละเอียดเชิงพื้นที่ไม่มากพอ และบางครั้งข้อมูลที่ได้ก็มีความคลาดเคลื่อนสูง ซึ่งเกิดมาได้จากหลายสาเหตุ ทั้งส่วนที่เกิดมาจากความบกพร่องของตัวระบบเอง และส่วนที่เกิดมาจากสภาวะแวดล้อมขณะทำการตรวจวัด

1.3 เครือข่าย MODIS

รวบรวมข้อมูล AOD จากสถานีตรวจวัดตามพิกัดของสถานีทั้ง 6 สถานี ยึดตามข้อมูลภาคพื้นดิน สามารถดาวน์โหลดได้ที่ <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/> และเปิดข้อมูลโดยโปรแกรม IDL ข้อมูล AOD ที่ใช้เป็นข้อมูลที่อยู่ในชุดผลิตภัณฑ์ level 2 ชื่อ MOD04_L2 ช่วงเวลา 10.00-11.00 น. และ MYD04_L2 ช่วงเวลา 13.00 - 14.00 น. (ตามเวลาท้องถิ่น UTC+7) ตามลำดับ

1.4 ข้อมูลสภาพอากาศ

รวบรวมข้อมูล อุณหภูมิเฉลี่ย ปริมาณน้ำฝน และความเร็วม เป็นข้อมูลรายเดือนทั้งหมด 6 สถานี โดยขอข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา

2. วิเคราะห์ข้อมูล

2.1 ความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง

อนุภาคฝุ่นละอองในบรรยากาศจะลดทอนรังสีดวงอาทิตย์ที่ผ่านเข้ามาในบรรยากาศโลกที่ทุกความยาวคลื่น รังสีดวงอาทิตย์จะลดทอนลงมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ ขนาดของฝุ่นละออง ดัชนีหักเหของตัวกลาง และความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบ (JH Seinfeld and SN Pandis 1998)

การลดลงของรังสีดวงอาทิตย์เมื่อเคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศสามารถคำนวณตามกฎของเบียร์ (Beer's law) (Iqbal 1983) ได้ดังนี้

$$I_{\lambda} = I_{0\lambda} E_0 \exp(-m\tau)$$

2.2 การตรวจสอบข้อมูล AERONET (ภาคพื้นดิน) กับ MODIS (ดาวเทียม) ของความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง

ข้อมูลความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองที่ได้จากเครือข่าย AERONET ทำการวัดสเปกตรัมรังสีตรงของดวงอาทิตย์ที่ความยาวคลื่น 340, 380, 440, 500, 675, 870, 940 และ 1,020 nm เพื่อให้ได้ความยาวคลื่นที่ตรงกับข้อมูล MODIS ที่ความยาวคลื่น 550 nm จึงใช้สมการพหุนามลำดับที่สอง (Polynomial) ถูกนำไปใช้กับข้อมูล AERONET เพื่อให้ได้ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองที่ 550 nm ซึ่งหาได้จากสมการ

$$AOD_{550} = a\lambda^2 + b\lambda + c$$

2.3 การวิเคราะห์การถดถอย (Linear Regression)

การถดถอยเชิงเส้นเป็นวิธีการวิเคราะห์เชิงทำนายขั้นพื้นฐานและที่ใช้กันทั่วไปซึ่งนำมาใช้กับข้อมูลความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองภาคพื้นดินและดาวเทียม

$$AOD_{\text{satellite}} = m \times AOD_{\text{AERONET}} + c$$

2.4 การทดสอบแนวโน้ม Mann-Kendall

Mann-Kendall สถิติทดสอบ S (Mann, 1945; Kendall, 1975) เป็นการคำนวณ

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (17)$$

เมื่อ n คือ จำนวนของข้อมูล โดย x_i และ x_j เป็นค่าของข้อมูลในชุดเวลา i และ j ($j > i$) ตามลำดับ และ $\text{sgn}(x_j - x_i)$ คือ เครื่องหมายฟังก์ชันเป็น

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & \text{if } x_j - x_i > 0 \\ 0, & \text{if } x_j - x_i = 0 \\ -1, & \text{if } x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (18)$$

ความแปรปรวนคำนวณได้ดังนี้

$$\text{Var } S = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)}{18} \quad (19)$$

โดย n คือจำนวนของข้อมูล ส่วน m คือ จำนวนของกลุ่มข้อมูลที่เกี่ยวข้งกัน และ t_i คือ จำนวนความสัมพันธ์ภายในขอบเขตข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับ i , กลุ่มข้อมูล A ที่มีความ

เกี่ยวข้องกันเป็นเซตของข้อมูลตัวอย่างที่มีค่าเท่ากัน ในกรณีที่ขนาดกลุ่มตัวอย่าง $n > 10$ สถิติการทดสอบมาตรฐานปกติ Z_s คำนวณโดยใช้ Eq. (20):

$$Z_s = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var } S}}, & \text{if } S > 0 \\ \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var } S}}, & \text{if } S = 0 \\ \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var } S}}, & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (20)$$

ค่าบวกของ Z_s บ่งบอกถึงแนวโน้มการเพิ่มขึ้นในขณะที่เดียวกับค่า Z_s เป็นลบแสดงถึงค่าแนวโน้มที่ลดลง ซึ่งการทดสอบแนวโน้มเป็นการกระทำที่เฉพาะเจาะจงต่อ α ที่ระดับนัยสำคัญ เมื่อ $|Z_s| > Z_{1-\alpha/2}$

การทดสอบสมมติฐานเมื่อปฏิเสธและมีแนวโน้มสำคัญอยู่ในช่วงเวลา เมื่อ $Z_{1-\alpha/2}$ คือ ค่าที่ได้จากตารางการกระจายมาตรฐานปกติ ซึ่งในการศึกษานี้ ใช้ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.01$ และ $\alpha = 0.05$ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 5%

การทดสอบสมมติฐานแบบไม่มีแนวโน้มเป็นการปฏิเสธเมื่อ $|Z_s| > 1.96$ และ $|Z_s| > 2.576$ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 1%

บทที่ 4

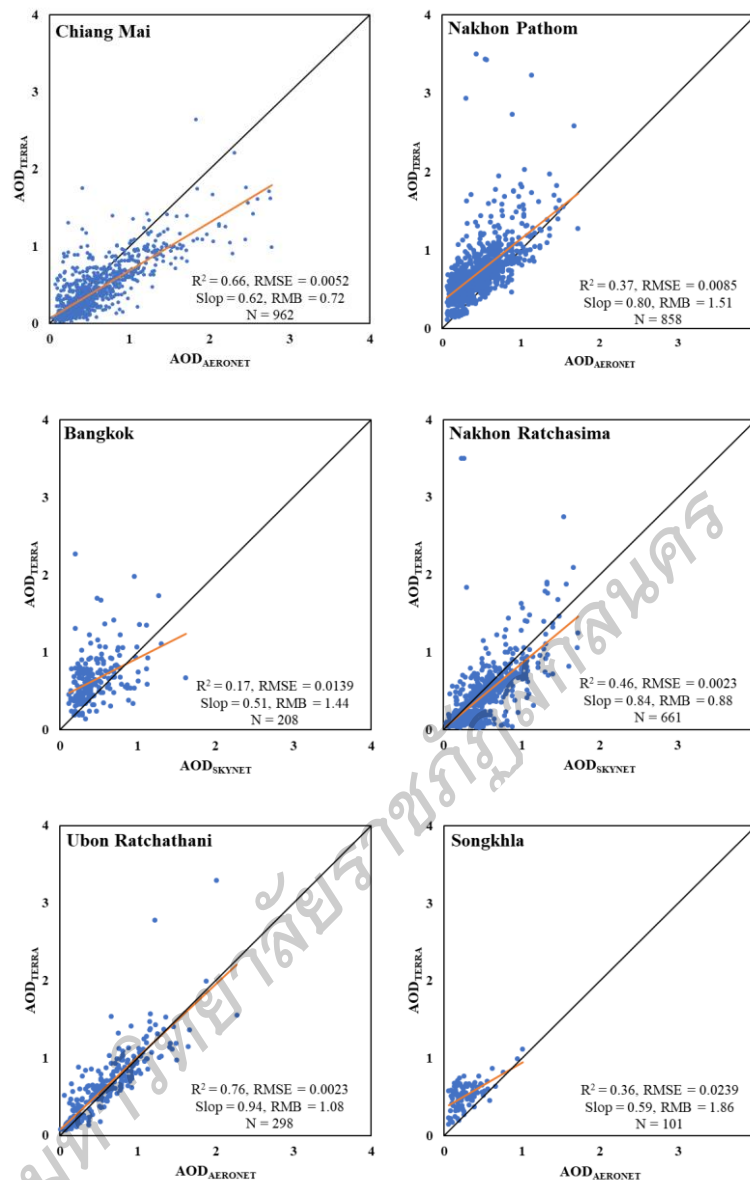
ผลการวิจัย

การเปรียบเทียบข้อมูล AOD ระหว่างข้อมูล AERONET/SKYNET กับ MODIS-TEERA/AQUA

การเปรียบเทียบข้อมูล AOD ข้อมูลภาคพื้นดินที่ได้จาก เครื่องข่าย AERONET และ SKYNET กับ ข้อมูลดาวเทียม TERRA และ AQUA จากเครือข่าย MODIS ตั้งแต่ปี 2006 – 2017 จากทั้งหมด 6 สถานี ได้แก่ เชียงใหม่ นครปฐม กรุงเทพมหานคร นครราชสีมา อุบลราชธานี และ สงขลา

1. การเปรียบเทียบ AOD ระหว่าง AERONET และ SKYNET กับ TERRA-MODIS

การเปรียบเทียบ AOD ระหว่างข้อมูลภาคพื้นดินที่ได้จากเครือข่ายเครื่องข่าย AERONET และ SKYNET กับข้อมูลดาวเทียม TERRA จากเครือข่าย MODIS โดยใช้ค่าทางสถิติ Pearson Correlation Coefficient (R^2), Root Mean Square Error (RMSE) และ Relative Mean Bias (RMB) พบว่า การเปรียบเทียบ AERONET และ SKYNET กับ TERRA-MODIS มีค่าสูงสุดที่อุบลราชธานี มีค่า $R^2=0.76$ slope=0.94 และ RMB=1.86 และมีค่าต่ำสุดพบใน กรุงเทพมหานคร มีค่า $R^2=0.17$ slope=0.51 และ RMB=1.44 อาจมีสาเหตุมาจากการขาดหายของข้อมูลที่มีอยู่ในสถานีนี้ และยังพบค่า R^2 ต่ำในสถานี นครปฐม นครราชสีมา และสงขลา ดังภาพประกอบ 21 ค่า AOD ที่ได้จาก TERRA-MODIS มีค่าต่ำกว่า AERONET และ SKYNET ที่สถานีเชียงใหม่และนครราชสีมา เนื่องจากผลของการสะท้อนแสงของพื้นผิวและลักษณะทางภูมิศาสตร์ ส่วน AOD ของ TERRA-MODIS มีค่าสูงกว่า AERONET และ SKYNET ใน กรุงเทพมหานคร นครปฐม และสงขลา อาจเนื่องมาจากสงขลามีแหล่งน้ำขนาดใหญ่รอบ ๆ ซึ่งน่าจะส่งผลกระทบต่อค่าการสะท้อนแสงของพื้นผิว นอกจากนี้ยังพบว่า TERRA-MODIS มีแนวโน้มที่จะประเมินค่า AOD ต่ำภายใต้เงื่อนไข AOD ที่มีค่าต่ำมาก และประเมินค่า AOD สูงภายใต้เงื่อนไข AOD ที่มีค่าปานกลางหรือสูง

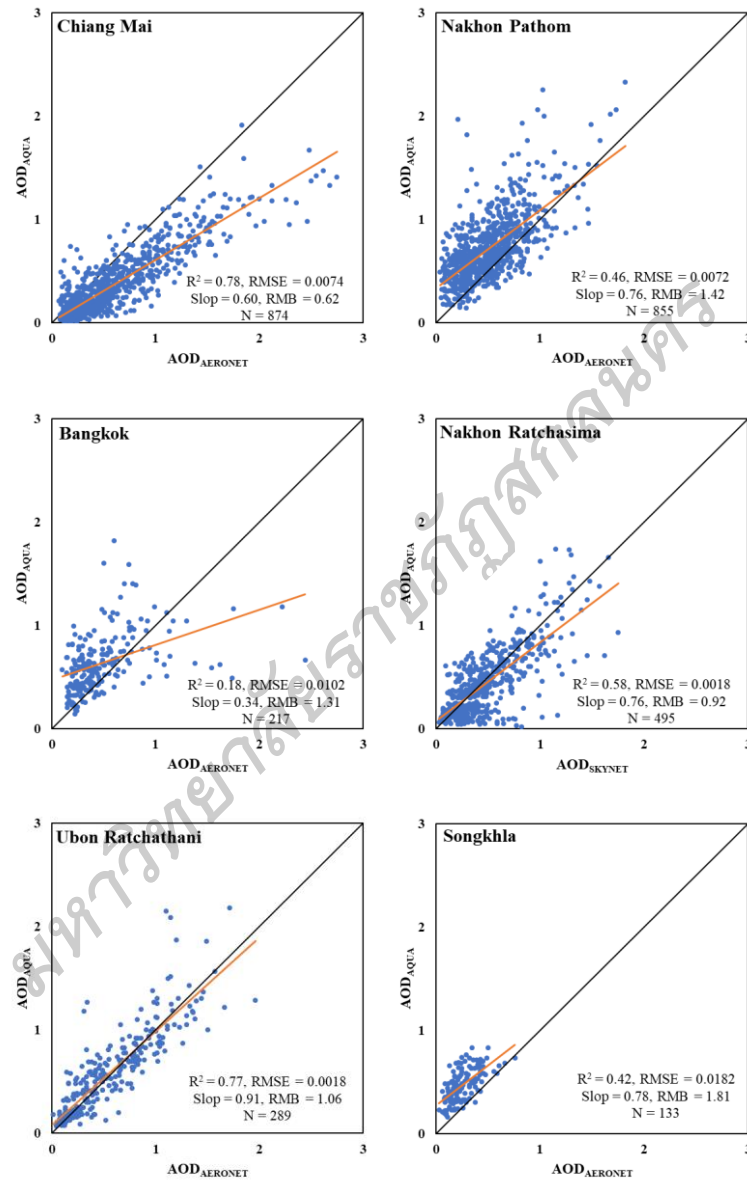


ภาพประกอบ 221 การเปรียบเทียบข้อมูล AOD ของ AERONET และ SKYNET กับ TERRA-MODIS ที่สถานี เชียงใหม่ นครปฐม กรุงเทพมหานคร นครราชสีมา อุบลราชธานี และ สงขลา

2. การเปรียบเทียบ AOD ระหว่าง AERONET และ SKYNET กับ AQUA-MODIS

การเปรียบเทียบความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองระหว่างข้อมูลภาคพื้นดินที่ได้จากเครือข่าย AERONET และ SKYNET กับข้อมูลดาวเทียม AQUA จากเครือข่าย MODIS โดยใช้ค่าทางสถิติ Pearson Correlation Coefficient (R^2), Root Mean Square Error (RMSE) และ

Relative Mean Bias (RMB) พบว่า การเปรียบเทียบ AERONET และ SKYNET กับ AQUA-MODIS ผลที่ได้มีลักษณะเดียวกันกับที่ได้จาก TERRA-MODIS ดังภาพประกอบ 22

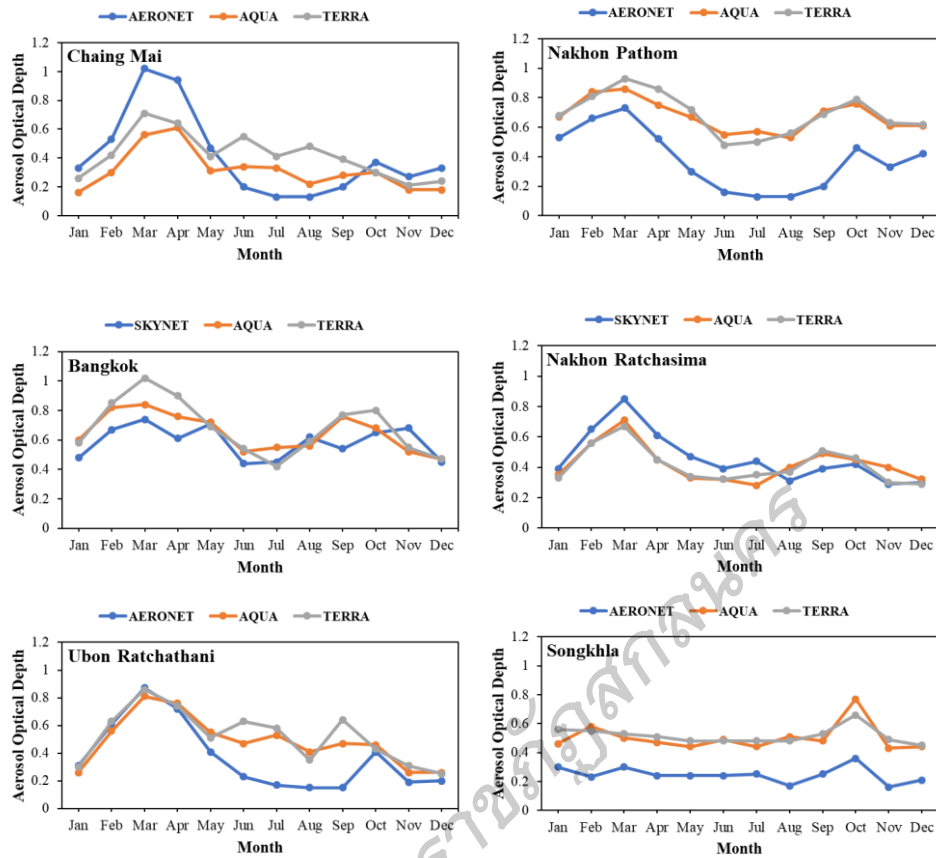


ภาพประกอบ 222 การเปรียบเทียบข้อมูล AOD ของ AERONET และ SKYNET กับ AQUA-MODIS ที่สถานี เชียงใหม่ นครปฐม กรุงเทพมหานคร นครราชสีมา อุบลราชธานี และ สงขลา

การเปลี่ยนแปลงข้อมูลรายเดือน รายปี ของ AOD

1. การเปลี่ยนแปลงข้อมูลรายเดือน ของ AOD

การเปลี่ยนแปลงข้อมูลรายเดือนของ AOD ทั้ง 6 สถานี ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2006 – 2017 พบว่า เชียงใหม่ นครปฐม กรุงเทพมหานคร นครราชสีมา และอุบลราชธานี จากการวิเคราะห์ การถดถอย AOD ของ TERRA และ AQUA-MODIS เทียบกับ AOD ของ AERONET และ SKYNET มีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล และสถานีทั้งหมดมีรูปแบบการถดถอยที่คล้ายกัน ดังภาพประกอบ 23 พบว่า เชียงใหม่ นครปฐม กรุงเทพมหานคร นครราชสีมา และอุบลราชธานี มีค่า AOD สูงในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนเมษายน ในขณะที่ค่า AOD ต่ำจะพบในช่วงเดือน มิถุนายนถึงเดือนกรกฎาคม ในทางตรงกันข้ามไม่มีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนของ AOD ในสงขลา ค่า AOD ที่ได้จาก AQUA-MODIS นั้นต่างจากที่ได้จาก TERRA-MODIS ความแตกต่าง ของ AQUA-MODIS และ TERRA-MODIS เนื่องมาจากการเคลื่อนที่ผ่านประเทศไทยในเวลา ที่ต่างกัน ซึ่ง TERRA-MODIS เคลื่อนที่ผ่านในตอนเช้า ส่วน AQUA-MODIS เคลื่อนที่ผ่านประเทศ ไทยในตอนบ่าย ทั้ง AQUA-MODIS และ TERRA-MODIS แสดงค่า AOD มีรูปแบบที่เหมือนกัน ในนครปฐมและสงขลา ส่วนแนวโน้มของ AOD จาก AQUA-MODIS และ TERRA-MODIS มี รูปแบบที่เหมือนกันเฉพาะในช่วงฤดูแล้ง แต่มีความแตกต่างกันในช่วงฤดูฝนในสถานีอุบลราชธานี นครราชสีมา และกรุงเทพมหานคร เนื่องมาจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ที่ผ่านเข้ามาใน ประเทศไทยจะทำให้เกิดพายุ ฝน พัดคะนอง ซึ่งจะทำให้เกิดเมฆขึ้นเต็มท้องฟ้า ส่งผลให้ค่า AOD ของ AQUA-MODIS และ TERRA-MODIS แตกต่างกับค่าที่ได้จาก AOD ของ AERONET นอกจากนี้ยังพบว่า AOD มีค่าสูงในช่วงฤดูแล้ง พบค่าสูงสุดที่สถานีเชียงใหม่ (1.02) พบค่าต่ำ ในช่วงฤดูฝน พบมีค่าต่ำสุดที่สถานีนครปฐม (0.13) รายละเอียดแสดงดังตาราง 2



ภาพประกอบ 223 การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของข้อมูล AOD ที่สถานี เชียงใหม่ นครปฐม กรุงเทพมหานคร นครราชสีมา อุบลราชธานี และ สงขลา

ตาราง 2 ข้อมูลรายเดือน AOD ของเครือข่าย AERONET/SKYNEY และ MODIS-TERRA/AQUA ของแต่ละสถานี

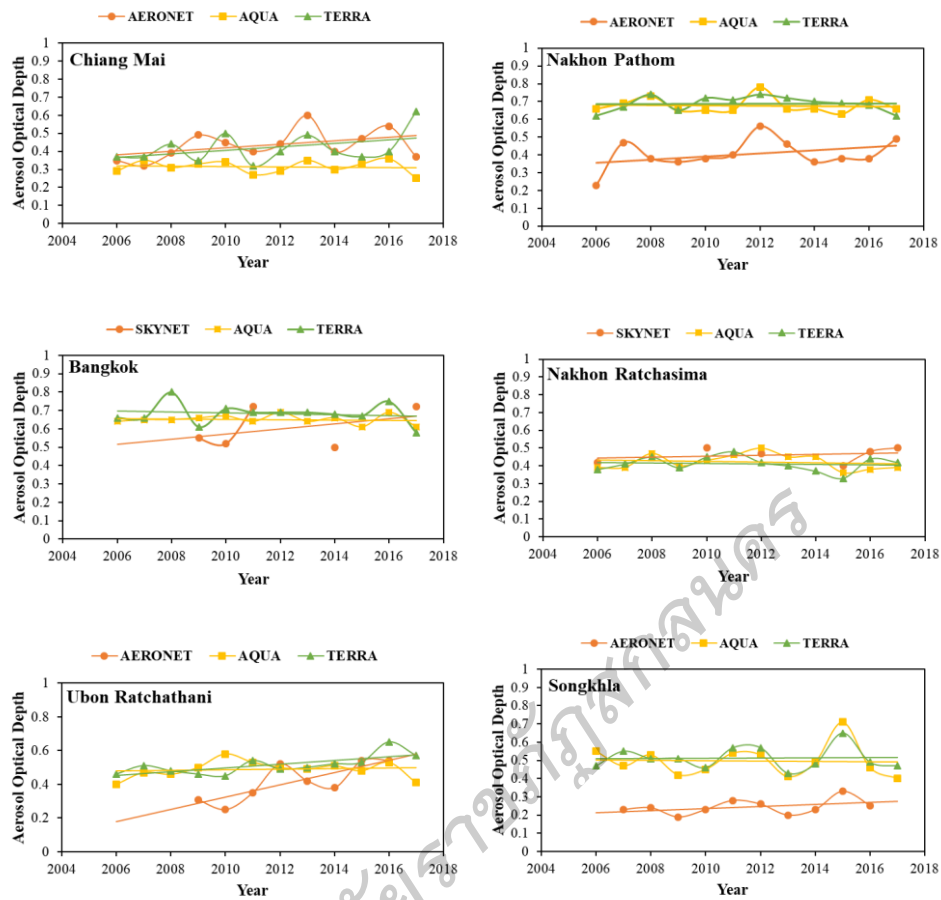
สถานี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ษ.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
เชียงใหม่												
AERONET	0.33	0.53	1.02	0.94	0.47	0.2	0.13	0.13	0.2	0.37	0.27	0.33
MODIS-TERRA	0.26	0.42	0.71	0.64	0.41	0.55	0.41	0.48	0.39	0.3	0.21	0.24
MODIS-AQUA	0.16	0.3	0.56	0.61	0.31	0.34	0.33	0.22	0.28	0.3	0.18	0.18
นครปฐม												
AERONET	0.53	0.66	0.73	0.52	0.3	0.16	0.13	0.13	0.2	0.46	0.33	0.42
MODIS-TERRA	0.68	0.81	0.93	0.86	0.72	0.48	0.5	0.56	0.69	0.79	0.63	0.62
MODIS-AQUA	0.67	0.84	0.86	0.75	0.67	0.55	0.57	0.53	0.71	0.76	0.61	0.61

ตาราง 2 (ต่อ)

สถานี	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
กรุงเทพมหานคร												
SKYNET	0.48	0.67	0.74	0.61	0.71	0.44	0.45	0.62	0.54	0.65	0.68	0.45
MODIS-TERRA	0.58	0.85	1.02	0.9	0.69	0.54	0.42	0.59	0.77	0.8	0.55	0.47
MODIS-AQUA	0.48	0.67	0.74	0.61	0.71	0.44	0.45	0.62	0.54	0.65	0.68	0.45
นครราชสีมา												
SKYNET	0.39	0.65	0.85	0.61	0.47	0.39	0.44	0.31	0.39	0.42	0.29	0.3
MODIS-TERRA	0.33	0.56	0.67	0.45	0.34	0.32	0.35	0.37	0.51	0.46	0.3	0.29
MODIS-AQUA	0.35	0.56	0.71	0.45	0.33	0.32	0.28	0.4	0.49	0.45	0.4	0.32
อุบลราชธานี												
AERONET	0.31	0.61	0.87	0.72	0.41	0.23	0.17	0.15	0.15	0.41	0.19	0.2
MODIS-TERRA	0.3	0.63	0.86	0.74	0.51	0.63	0.58	0.35	0.64	0.43	0.31	0.25
MODIS-AQUA	0.26	0.56	0.81	0.76	0.55	0.47	0.53	0.41	0.47	0.46	0.26	0.26
สงขลา												
AERONET	0.3	0.23	0.3	0.24	0.24	0.24	0.25	0.17	0.25	0.36	0.16	0.21
MODIS-TERRA	0.46	0.58	0.5	0.47	0.44	0.49	0.44	0.51	0.48	0.77	0.43	0.44
MODIS-AQUA	0.56	0.55	0.53	0.51	0.48	0.48	0.48	0.48	0.53	0.66	0.49	0.45

2. การเปลี่ยนแปลงข้อมูลรายปี ของ AOD

การเปลี่ยนแปลงข้อมูลรายปีของ AOD ทั้ง 6 สถานี ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2006 – 2017 พบว่า เชียงใหม่ นครปฐม กรุงเทพมหานคร นครราชสีมา และอุบลราชธานี จากการวิเคราะห์การถดถอย AOD ของ TERRA และ AQUA-MODIS เทียบกับ AOD ของ AERONET และ SKYNET พบว่า การเปลี่ยนแปลง AOD ของ TERRA-MODIS และ AERONET ที่เชียงใหม่ นครปฐม อุบลราชธานี และสงขลา มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเปลี่ยนแปลง AOD ของ AQUA-MODIS มีแนวโน้มเป็นลบลด ยกเว้นที่อุบลราชธานี ดังภาพประกอบ 24 พบว่าการเปลี่ยนแปลง AOD ของ TERRA-MODIS และ AQUA-MODIS สอดคล้องกับ AOD ของ AERONET ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า AOD ของ TERRA-MODIS และ AQUA-MODIS มีแนวโน้มของข้อมูลทั้งเหมือนและตรงข้ามกันขึ้นอยู่กับปีและสถานี อย่างไรก็ตาม AOD ของ TERRA-MODIS และ AQUA-MODIS มีแนวโน้มค่อนข้างไปในทางเดียวกัน



ภาพประกอบ 224 การเปลี่ยนแปลงรายปีข้อมูล AOD ที่สถานี เชียงใหม่ นครปฐม
กรุงเทพมหานคร นครราชสีมา อุบลราชธานี และ สงขลา

การเปลี่ยนแปลงข้อมูล AOD รายปี ได้ค่าสถิติแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง ดังตาราง 3
ตาราง 3 ค่าสถิติของแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงข้อมูล AOD ของภาคพื้นดิน AERONET/SKYNET
ทั้ง 6 สถานี

สถานี	AOD _{AERONET/SKYNET}		
	สมการการเปลี่ยนแปลง	ค่าความแตกต่าง	ค่าเฉลี่ย
เชียงใหม่	$y=0.0098x-19.258$	0.11	0.44
นครปฐม	$y=0.0086x-16.827$	0.09	0.40
กรุงเทพมหานคร	$y=0.0137x-27.042$	0.11	0.60

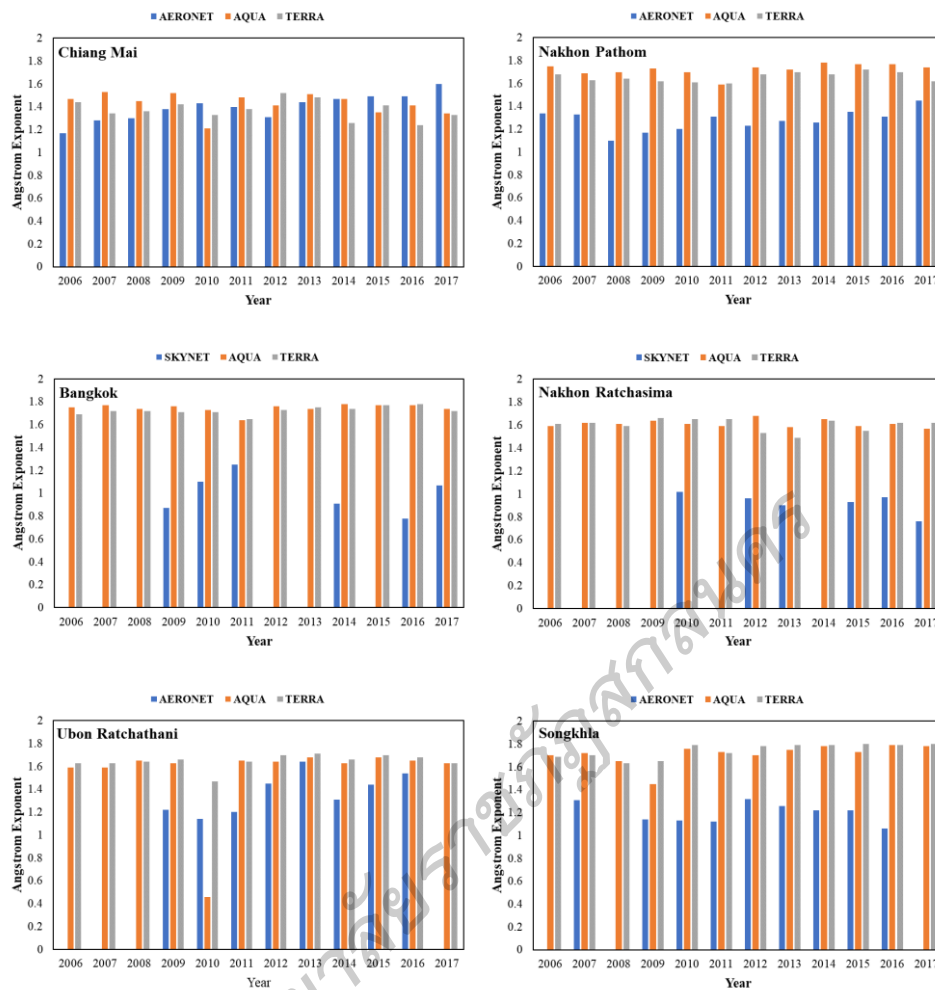
ตาราง 3 (ต่อ)

สถานี	AOD _{AERONET/SKYNET}		
	สมการการเปลี่ยนแปลง	ค่าความแตกต่าง	ค่าเฉลี่ย
อุบลราชธานี	$y=0.0363x-72.659$	0.25	0.41
นครราชสีมา	$y=0.0029x-5.3766$	0.03	0.46
สงขลา	$y=0.0055x-10.728$	0.05	0.24

จากตาราง 3 ผลการวิเคราะห์ค่าสถิติแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง AOD ภาคพื้นดิน พบว่าข้อมูลรายปีของ ตั้งแต่ปี 2006 – 2017 ทั้ง 6 สถานี มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกสถานี โดยที่ สถานีเชียงใหม่ นครปฐม กรุงเทพมหานคร นครราชสีมา อุบลราชธานี และสงขลา มีแนวโน้ม เพิ่มขึ้น 0.11, 0.09, 0.11, 0.03, 0.25, และ 0.03 ตามลำดับ และค่าเฉลี่ย AOD อยู่ที่ 0.44, 0.40, 0.60, 0.46, 0.41 และ 0.24 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง AOD มีค่าสูงสุดที่เชียงใหม่ และต่ำสุดที่นครราชสีมา

การเปลี่ยนแปลง Angstrom Exponent

การเปลี่ยนแปลงของข้อมูล AE ภาคพื้นดิน AERONET/SKYNET เปรียบเทียบกับข้อมูล ดาวเทียม MODIS-TERRA/AQUA ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2006 – 2017 ของทั้ง 6 สถานี ได้แก่ เชียงใหม่ นครปฐม กรุงเทพมหานคร นครราชสีมา อุบลราชธานี และสงขลา ดังภาพประกอบ 25 พบว่า AE ที่ได้มาจาก AERONET/SKYNET ต่ำกว่าค่าที่ได้จาก TERRA-MODIS และ AQUA-MODIS ที่สถานีนครปฐม กรุงเทพมหานคร นครราชสีมา และสงขลา ยกเว้นสถานีอุบลราชธานี พบว่า AE ที่ได้มาจาก AERONET ต่ำกว่าค่าที่ได้จาก TERRA-MODIS และ AQUA-MODIS และในปี 2010 พบว่า AE ที่ได้มาจาก AERONET สูงกว่าค่าที่ได้จาก TERRA-MODIS และ AQUA-MODIS ถึง อย่างไรก็ตามที่เชียงใหม่ AE ที่ได้มาจาก AERONET มีค่าใกล้เคียงกับ TERRA-MODIS และ AQUA-MODIS ค่า AE ของทุกสถานีมีค่าอยู่ระหว่าง 1.44-1.48 พบค่าต่ำสุดของ AE ได้จาก AQUA-MODIS ในปี 2010 ที่สถานีอุบลราชธานี มีค่าอยู่ที่ 0.46 ส่วนค่าสูงสุดได้จาก AQUA-MODIS ในปี 2014 ที่สถานีกรุงเทพมหานคร และสงขลา มีค่าอยู่ที่ 1.78 ค่ารายปีของ AE ทั้ง 6 สถานี แสดงในตาราง 4



ภาพประกอบ 225 การเปลี่ยนแปลง Angstrom Exponent ทั้ง 6 สถานี ได้แก่ เชียงใหม่ นครปฐม กรุงเทพมหานคร นครราชสีมา อุบลราชธานี และสงขลา ตั้งแต่ปี 2006 – 2017 จากข้อมูล AERONET/SKYNET TERRA-MODIS และ AQUA-MODIS

ตาราง 4 แสดงค่ารายปีของ AE ทั้ง 6 สถานี

สถานี	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
เชียงใหม่												
AERONET	1.17	1.28	1.3	1.38	1.43	1.4	1.31	1.44	1.47	1.49	1.49	1.6
MODIS-TERRA	1.44	1.34	1.36	1.42	1.33	1.38	1.52	1.48	1.26	1.41	1.24	1.33
MODIS-AQUA	1.47	1.53	1.45	1.52	1.21	1.48	1.41	1.51	1.47	1.35	1.41	1.34

ตาราง 4 (ต่อ)

สถานี	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
นครปฐม												
AERONET	1.34	1.35	1.1	1.17	1.2	1.31	1.23	1.27	1.26	1.35	1.31	1.45
MODIS-TERRA	1.68	1.63	1.64	1.62	1.61	1.6	1.68	1.7	1.68	1.72	1.7	1.62
MODIS-AQUA	1.75	1.69	1.7	1.73	1.7	1.59	1.74	1.72	1.78	1.77	1.77	1.74
กรุงเทพมหานคร												
SKYNET				0.87	1.1	1.25			0.91	0.78	1.07	
MODIS-TERRA	1.69	1.72	1.72	1.71	1.71	1.65	1.73	1.75	1.74	1.77	1.78	1.72
MODIS-AQUA	1.75	1.77	1.74	1.76	1.73	1.64	1.76	1.74	1.78	1.77	1.77	1.74
นครราชสีมา												
SKYNET					1.02		0.96	0.9		0.93	0.97	0.76
MODIS-TERRA	1.61	1.62	1.59	1.66	1.65	1.65	1.53	1.49	1.64	1.55	1.62	1.62
MODIS-AQUA	1.59	1.62	1.61	1.64	1.61	1.59	1.68	1.58	1.65	1.59	1.61	1.57
อุบลราชธานี												
AERONET				1.22	1.14	1.2	1.45	1.64	1.31	1.44	1.54	
MODIS-TERRA	1.63	1.63	1.64	1.66	1.47	1.64	1.7	1.71	1.66	1.7	1.68	1.63
MODIS-AQUA	1.59	1.59	1.65	1.63	0.46	1.65	1.64	1.68	1.63	1.68	1.65	1.63
สงขลา												
AERONET				1.13		1.1	1.26	1.07	1.28	1.22	1.08	
MODIS-TERRA	1.59	1.64	1.59	1.58	1.8	1.72	1.8	1.78	1.78	1.79	1.8	1.8
MODIS-AQUA	1.65	1.75	1.38	1.07	1.78	1.69	1.65	1.76	1.79	1.72	1.8	1.8

จากตาราง 4 แสดงค่า AE รายปีของทั้ง 6 สถานีได้แก่ เชียงใหม่ นครปฐม กรุงเทพมหานคร นครราชสีมา อุบลราชธานี และสงขลา พบว่าค่า AE ที่ดึงค่าจาก AERONET มีขนาดตั้งแต่ 1.28-1.6 1.1-1.45 0.78-1.25 0.76-1.02 1.14-1.64 1.07-1.28 ตามลำดับ AE ที่ดึงค่าจาก TERRA_MODIS มีขนาดตั้งแต่ 1.24-1.52 1.6-1.72 1.65-1.78 1.49-1.65 1.47-1.71 และ 1.58-1.8 ตามลำดับ และ AE ที่ดึงค่า AQUA-MODIS มีขนาดตั้งแต่ 0.21-1.51 1.59-1.78 1.64-1.78 1.57-1.68 0.46-1.68 และ 1.07-1.8 ตามลำดับ

เปรียบเทียบข้อมูล AOD, AE กับข้อมูล อุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน ความเร็วลม

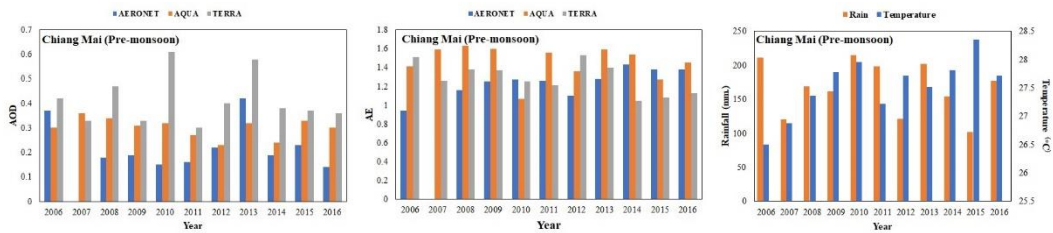
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ AOD และ AE กับตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ อุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน และความเร็วลม โดยแบ่งช่วงที่ศึกษาเป็นช่วง Pre-monsoon (เดือนพฤษภาคม-เดือนตุลาคม) และช่วง Post-monsoon (เดือนพฤศจิกายน-เดือนกุมภาพันธ์) ตั้งแต่

ปี 2006-2017 ทั้งหมด 6 สถานี ได้แก่ เชียงใหม่ นครปฐม กรุงเทพมหานคร นครราชสีมา อุบลราชธานี และสงขลา

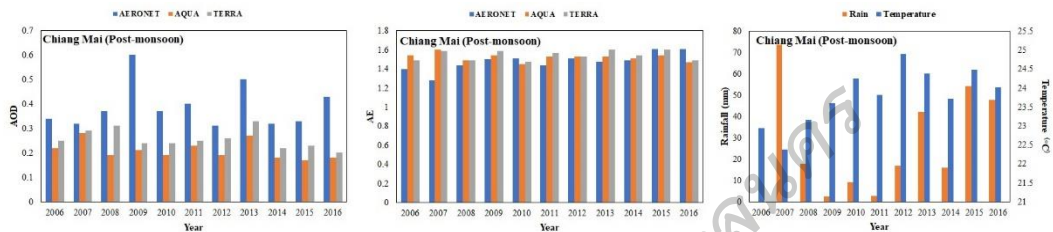
1. เชียงใหม่

1.1 Pre-monsoon ค่าเฉลี่ยของ AOD AERONET มีค่าอยู่ระหว่าง 0.13-0.42 AOD มีค่าสูงในปี 2013 ในระยะเวลา 12 ปี AOD TERRA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 0.3-0.61 และมีค่าสูงในปี 2010 AQUA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 0.22-0.34 มีค่าสูงในปี 2008 ค่า AOD AERONET และ AOD TERR-AQUA/MODIS มีความสอดคล้องกัน โดยมีค่าสูงในปี 2013 ค่าเฉลี่ย AE AERONET มีค่าอยู่ระหว่าง 0.94-1.43 AE มีค่าสูงในปี 2014 AE TERRA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 1.13-1.53 AE มีค่าสูงในปี 2012 AE AQUA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 1.07-1.63 มีค่าสูงในปี 2008 ค่า AE ระหว่าง AERONET และ AQUA-MODIS มีความสอดคล้องกัน ค่าตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา อุณหภูมิสูงสุดในปี 2015 (28.36 °C) ปริมาณน้ำฝนสูงสุดในปี 2010 (214.72 mm) และความเร็วลมสูงสุดในปี 2007 (3.08 knot) ดัชนีภาพประกอบ 26 พบว่า ในปี 2010 ค่า AOD มีค่าต่ำ AE มีค่าสูง ปริมาณน้ำฝนมีค่าสูง ทิศทางลมมีค่าต่ำ และอุณหภูมิมียุคต่ำ แสดงว่าปริมาณน้ำฝนจะส่งผลต่อปริมาณฝุ่นละอองในบรรยากาศ ส่วนความเร็วลมและอุณหภูมิต่างมีความสัมพันธ์กับขนาดของฝุ่นละอองในบรรยากาศ

1.2 Post-monsoon ค่าเฉลี่ยของ AOD AERONET มีค่าอยู่ระหว่าง 0.28-0.6 AOD มีค่าสูงในปี 2009 ในระยะเวลา 12 ปี TERRA-MODIS อยู่ระหว่าง 0.2-0.33 AOD มีค่าสูงในปี 2013 และ AQUA-MODIS อยู่ระหว่าง 0.16-0.28 มีค่าสูงในปี 2007 ค่า AOD AERONET และ AOD TERR-AQUA/MODIS มีความสอดคล้องกัน โดยมีค่าสูงในปี 2013 ค่าเฉลี่ย AE AERONET มีค่าอยู่ระหว่าง 1.1-1.64 AE มีค่าสูงในปี 2013 ข้อมูลมีการขาดหายไปในปี 2006 2007 2008 และ 2017 TERRA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 1.51-1.66 AE มีค่าสูงในปี 2008 และ AQUA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 0.67-1.66 มีค่าสูงในปี 2008 ค่า AE ระหว่าง TERRA-AQUA และ AQUA-MODIS มีความสอดคล้องกัน ค่า AE สูงในปี 2008 ค่าตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา อุณหภูมิสูงสุดในปี 2012 (25 °C) ปริมาณน้ำฝนสูงสุดในปี 2016 (47.70 mm) และความเร็วลมสูงสุดในปี 2007 (1.88 knot) ดัชนีภาพประกอบ 27 พบว่า ในปี 2009 ค่า AOD มีค่าสูง AE ปริมาณน้ำฝนต่ำ ความเร็วลมสูง อุณหภูมิสูง แสดงว่าค่าอุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน และความเร็วลมส่งผลต่อปริมาณฝุ่นละอองในบรรยากาศและมีความสัมพันธ์กับขนาดของฝุ่นละอองในบรรยากาศ



ภาพประกอบ 26 แสดงความสัมพันธ์ช่วง Per-monsoon ของ AOD AE กับ ตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา ณ สถานีเชียงใหม่



ภาพประกอบ 27 แสดงความสัมพันธ์ช่วง Post-monsoon ของ AOD AE กับ ตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา ณ สถานีเชียงใหม่

2. นครปฐม

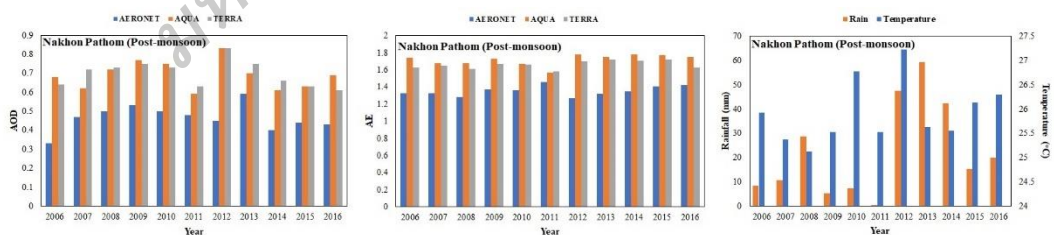
2.1 Pre-monsoon ค่าเฉลี่ยของ AOD AERONET มีค่าอยู่ระหว่าง 0.16-0.57 AOD มีค่าสูงในปี 2012 ในระยะเวลา 12 ปี AOD TERRA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 0.5-0.69. และมีค่าสูงในปี 2008 AQUA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 0.49-0.77 มีค่าสูงในปี 2012 AOD AERONET และ AOD AQUA/MODIS มีความสอดคล้องกัน โดยมีค่าสูงในปี 2012 ค่าเฉลี่ย AE AERONET มีค่าอยู่ระหว่าง 0.9-1.34 AE มีค่าสูงในปี 2006 AE TERRA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 1.51-1.72 AE มีค่าสูงในปี 2006 AE AQUA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 1.52-1.78 มีค่าสูงในปี 2014 ค่า AE ระหว่าง AERONET และ TERRA-MODIS มีความสอดคล้องกัน โดยมีค่าสูงในปี 2006 ค่าตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา อุณหภูมิไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลา 15 ปี ปริมาณน้ำฝนสูงสุดในปี 2010 (223.22 mm) และความเร็วลมสูงสุดในปี 2011 (2.28 knot) ดังภาพประกอบ 28 พบว่า ในปี 2012 ค่า AOD มีค่าสูง AE มีค่าสูง ปริมาณน้ำฝนมีค่าต่ำ ความเร็วลมมีค่าต่ำ และอุณหภูมิมีค่าสูง แสดงว่าค่าอุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน และความเร็วลม ส่งผลต่อปริมาณฝุ่นละอองในบรรยากาศและมีความสัมพันธ์กับขนาดของฝุ่นละอองในบรรยากาศ

2.2 Post-monsoon ค่าเฉลี่ยของ AOD AERONET มีค่าอยู่ระหว่าง 0.33-0.59 AOD มีค่าสูงในปี 2013 ในระยะเวลา 13 ปี AOD TERRA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 0.55-0.83

และมีค่าสูงในปี 2012 AQUA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 0.62-0.83 มีค่าสูงในปี 2012 AOD TERR-AQUA/MODIS มีความสอดคล้องกัน โดยมีค่าสูงในปี 2012 ค่าเฉลี่ย AE AERONET มีค่าอยู่ระหว่าง 1.32-1.46 AE มีค่าสูงในปี 2011 AE TERRA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 1.61-1.66 AE มีค่าสูงในปี 2010 AE AQUA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 1.68-1.78 มีค่าสูงในปี 2014 ค่า AE ระหว่าง AERONET TERRA-MODIS และ AQUA-MODIS ในระยะ 13 ปีมีความแตกต่างกันออกไป ค่าตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา อุณหภูมิไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลา 15 ปี (26°C) ปริมาณน้ำฝนสูงสุดในปี 2012 (47.54 mm) และความเร็วลมสูงสุดในปี 2016 (2.57 knot) ดัชนีภาพประกอบ 29 พบว่า ในปี 2012 ค่า AOD มีค่าสูง AE มีค่าสูง ปริมาณน้ำฝนมีค่าสูง ความเร็วลมมีค่าต่ำ และอุณหภูมิมีค่าสูง แสดงว่าอุณหภูมิจะส่งผลต่อปริมาณฝุ่นละอองในบรรยากาศ ส่วนความเร็วลมและปริมาณน้ำฝนความสัมพันธ์กับขนาดของฝุ่นละอองในบรรยากาศ



ภาพประกอบ 28 แสดงความสัมพันธ์ช่วง Per-monsoon ของ AOD AE กับ ตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา ณ นครปฐม

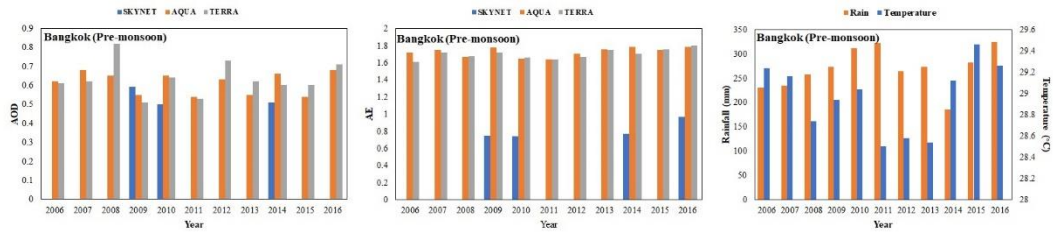


ภาพประกอบ 29 แสดงความสัมพันธ์ช่วง Post-monsoon ของ AOD AE กับ ตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา ณ นครปฐม

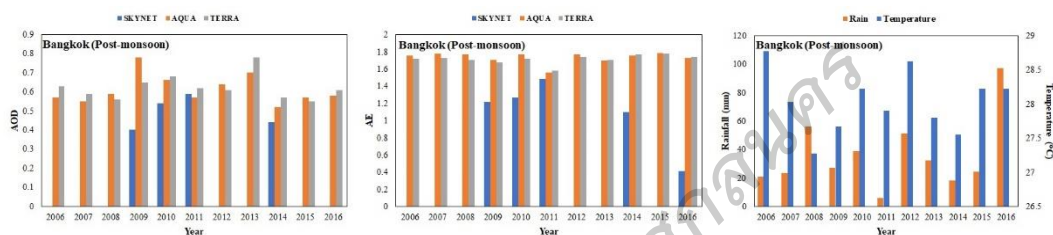
3. กรุงเทพมหานคร

3.1 Pre-monsoon ค่าเฉลี่ยของ AOD SKYNET อยู่ระหว่าง 0.5-0.6 AOD มีค่าสูงในปี 2017 มี TERRA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 0.49-0.82 AOD มีค่าสูงในปี 2008 และ AQUA-MODIS อยู่ระหว่าง 0.62-0.68 มีค่าสูงในปี 2007 และ 2016 AOD SKYNET และ AOD TERR-AQUA/MODIS ในระยะเวลา 13 ปี มีค่าแตกต่างกันออกไป ค่าเฉลี่ยของ AE SKYNET มีค่าอยู่ระหว่าง 0.77-1.16 AE มีค่าสูงในปี 2017 AE TERRA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 1.61-1.76 AE มีค่าสูงในปี 2006 และ 2013 และ AE AQUA-MODIS อยู่ระหว่าง 1.52-1.78 มีค่าสูงในปี 2015 AOD AERONET และ AOD TERR-AQUA/MODIS ในระยะเวลา 13 ปี มีค่าแตกต่างกันออกไป ข้อมูล AOD และ AE ของ SKYNET มีการขาดหายของข้อมูลในปี 2006 2007 2008 2011 2013 2014 2015 และ 2016 ค่าตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา อุณหภูมิไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลา 15 ปี (29°C) ปริมาณน้ำฝนสูงสุดในปี 2017 (385.24 mm) และความเร็วลมสูงสุดในปี 2007 (2.36 knot) ดังภาพประกอบ 30 พบว่าในปี 2011 AOD มีค่าต่ำ AE มีค่าต่ำ ปริมาณน้ำฝนมีค่าสูง ความเร็วลมมีค่าสูง และอุณหภูมิต่ำ ปริมาณน้ำฝนจะส่งผลต่อปริมาณฝุ่นละอองในบรรยากาศ ส่วนความเร็วลมและอุณหภูมิต่ำมีความสัมพันธ์กับขนาดของฝุ่นละอองในบรรยากาศ

3.2 Post-monsoon ค่าเฉลี่ย AOD SKYNET มีค่าอยู่ระหว่าง 0.4-0.59 AOD มีค่าสูงในปี 2011 AOD TERRA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 0.51-0.78 มีค่าสูงในปี 2010 และ AOD AQUA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 0.52-0.78 มีค่าสูงในปี 2009 AOD SKYNET และ AOD TERR-AQUA/MODIS ในระยะเวลา 13 ปี มีค่าแตกต่างกันออกไป ค่าเฉลี่ย AE SKYNET มีค่าอยู่ระหว่าง 0.41-1.49 AE มีค่าสูงในปี 2011 AE TERRA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 1.58-1.79 AE มีค่าสูงในปี 2015 และ AE AQUA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 1.56-1.79 มีค่าสูงในปี 2015 ค่า AE ระหว่าง SKYNET และ AQUA-MODIS มีความสอดคล้องกัน มีค่าสูงในปี 2015 ข้อมูล AOD และ AE ของ SKYNET มีการขาดหายของข้อมูลในปี 2006 2007 2008 2009 2012 2013 และ 2015 ค่าตัวแปรสภาพอากาศ อุณหภูมิเฉลี่ยไม่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลา 15 ปี (29°C) ปริมาณน้ำฝนสูงสุดในปี 2008 (56.03 mm) และความเร็วลมสูงสุดในปี 2007 (1.78 knot) จากการเปรียบเทียบ ดังภาพประกอบ 31 พบว่าในปี 2011 ค่า AOD มีค่าสูง AE มีค่าสูง ปริมาณน้ำฝนมีค่าต่ำ อุณหภูมิสูง ความเร็วลมมีค่าสูง แสดงว่าค่าอุณหภูมิต่ำ ปริมาณน้ำฝน และความเร็วลมส่งผลต่อปริมาณฝุ่นละอองในบรรยากาศและมีความสัมพันธ์กับขนาดของฝุ่นละอองในบรรยากาศ



ภาพประกอบ 30 แสดงความสัมพันธ์ช่วง Per-monsoon ของ AOD AE กับ ตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา ณ กรุงเทพมหานคร

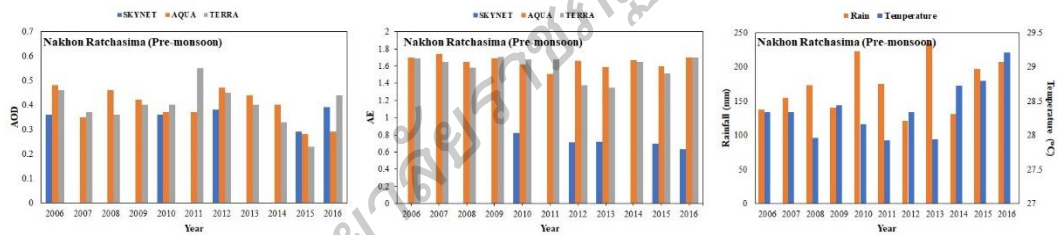


ภาพประกอบ 31 แสดงความสัมพันธ์ช่วง Post-monsoon ของ AOD AE กับ ตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา ณ กรุงเทพมหานคร

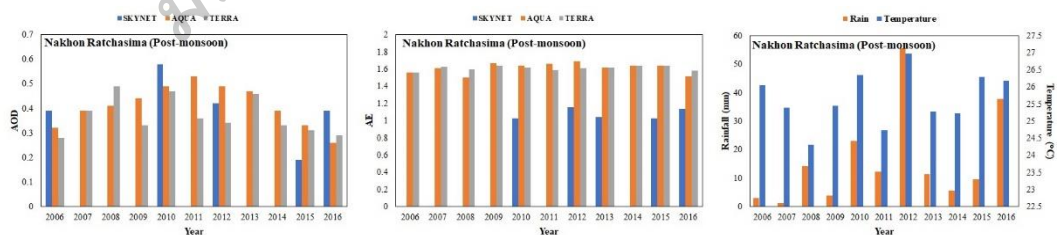
4. นครราชสีมา

4.1 Pre-monsoon ค่าเฉลี่ย AOD AERONET มีค่าอยู่ระหว่าง 0.29-0.53 มีค่าสูงในปี 2017 AOD TERRA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 0.23-0.55 มีค่าสูงในปี 2011 และ AOD AQUA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 0.62-0.68 มีค่าสูงในปี 2007 และ 2016 AOD AERONET และ AOD TERR-AQUA/MODIS ในระยะเวลา 13 ปี มีค่าแตกต่างกันออกไป ค่าเฉลี่ย AE AERONET มีค่าอยู่ระหว่าง 0.77-1.16 มีค่าสูงในปี 2017 AE TERRA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 1.61-1.76 มีค่าสูงในปี 2006 และ 2013 และ AE AQUA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 1.52-1.78 มีค่าสูงในปี 2015 AOD AERONET และ AOD TERR-AQUA/MODIS ในระยะเวลา 13 ปี มีค่าแตกต่างกันออกไป ข้อมูล AOD และ AE ของ AERONET มีการขาดหายของข้อมูลในปี 2006 2007 2008 2011 2013 2014 2015 และ 2016 ค่าตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา อุณหภูมิสูงสุดใน 2016 (29°C) ปริมาณน้ำฝนสูงสุดในปี 2013 (233.48 mm) และความเร็วลมสูงสุดในปี 2012 (3.24 knot) ดังภาพประกอบ 32 พบว่าในปี 2010 ค่า AOD มีค่าต่ำ AE มีค่าต่ำ ปริมาณน้ำฝนมีค่าสูง อุณหภูมิมีค่าต่ำ และความเร็วลมมีค่าต่ำ แสดงว่า ปริมาณน้ำฝนจะส่งผลต่อปริมาณฝุ่นละอองในบรรยากาศ ส่วนความเร็วลมและอุณหภูมิจึงมีความสัมพันธ์กับขนาดของฝุ่นละอองในบรรยากาศ

4.2 Post-monsoon ค่าเฉลี่ยของ AOD SKYNET มีค่าอยู่ระหว่าง 0.19-0.58 AOD มีค่าสูงในปี 2010 ในระยะเวลา 13 ปี AOD TERRA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 0.31-0.49 และมีค่าสูงในปี 75 AOD AQUA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 0.26-0.53 มีค่าสูงในปี 2010 AOD SKTNET และ AOD TERR-AQUA/MODIS มีความสอดคล้องกัน โดยมีค่าสูงในปี 2010 ค่าเฉลี่ย AE AERONET มีค่าอยู่ระหว่าง 0.9-1.16 AE มีค่าสูงในปี 0.16 AE TERRA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 1.52-1.64 AE มีค่าสูงในปี 2014 และ 2015 AE AQUA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 1.5>. มีค่าสูงในปี 2012 ค่า AE ระหว่าง SKYNET และ AQUA-MODIS มีความสอดคล้องกัน ค่าตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา อุณหภูมิสูงสุดในปี 2012 (27 °C) ปริมาณน้ำฝนสูงสุดในปี 2016 (37.9 mm) และความเร็วลมสูงสุดในปี 2017 (3.12 knot) ดังภาพประกอบ 32 พบว่า ในปี 2012 ค่า AOD มีค่าต่ำ AE มีค่าสูง ปริมาณน้ำฝนมีค่าสูง ทิศทางลมมีค่าต่ำ และอุณหภูมิมีค่าสูง แสดงว่าปริมาณน้ำฝนจะส่งผลต่อปริมาณฝุ่นละอองในบรรยากาศ ส่วนความเร็วลมและอุณหภูมิมีความสัมพันธ์กับขนาดของฝุ่นละอองในบรรยากาศ



ภาพประกอบ 32 แสดงความสัมพันธ์ช่วง Per-monsoon ของ AOD AE กับ ตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา ณ นครราชสีมา

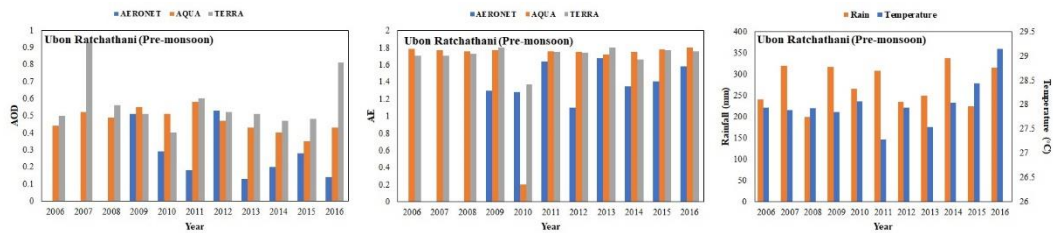


ภาพประกอบ 33 แสดงความสัมพันธ์ช่วง Post-monsoon ของ AOD AE กับ ตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา ณ นครราชสีมา

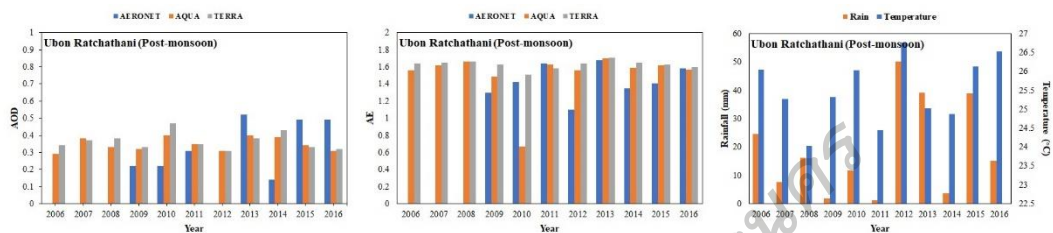
5. อุบลราชธานี

5.1 Pre-monsoon ค่าเฉลี่ยของ AOD AERONET มีค่าอยู่ระหว่าง 0.13-0.53 AOD มีค่าสูงในปี 2012 ในระยะเวลา 13 ปี AOD TERRA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 0.4-0.93 และมีค่าสูงในปี 2007 AQUA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 0.4-0.58 มีค่าสูงในปี 2011 AOD AERONET และ AOD TERRA-AQUA/MODIS ในระยะเวลา 13 ปี มีค่าแตกต่างกันออกไป ค่าเฉลี่ย AE AERONET มีค่าอยู่ระหว่าง 1.1-1.68 AE มีค่าสูงในปี 2011 AE TERRA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 1.37-1.8 AE มีค่าสูงในปี 2009 และ 2013 AE AQUA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 0.2-1.8 มีค่าสูงในปี 2016 ค่า AE ระหว่าง AERONET และ TERRA-MODIS มีความสอดคล้องกัน โดยมีค่าสูงในปี 2013 ค่าตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา อุณหภูมิสูงสุดในปี 2016 (29 °C) ปริมาณน้ำฝนสูงสุดในปี 2014 (337.84 mm) และความเร็วลมสูงสุดในปี 2016 (4.14) ดังภาพประกอบ 34 พบว่า ในปี 2009 ค่า AOD มีค่าต่ำ AE มีค่าสูง ปริมาณน้ำฝนมีค่าสูง ความเร็วลมมีค่าสูง และอุณหภูมิมี่ค่าต่ำ แสดงว่าปริมาณน้ำฝน ค่าอุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน และความเร็วลมส่งผลต่อปริมาณฝุ่นละอองในบรรยากาศและมีความสัมพันธ์กับขนาดของฝุ่นละอองในบรรยากาศ

5.2 Post-monsoon ค่าเฉลี่ยของ AOD AERONET มีค่าอยู่ระหว่าง 0.14-0.52 AOD มีค่าสูงในปี 2013 ในระยะเวลา 13 ปี AOD TERRA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 0.31-0.47. และมีค่าสูงในปี 2010 AOD AQUA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 0.23-0.4 มีค่าสูงในปี 2010 และ 2013 AOD AERONET และ AOD AQUA-AQUA/MODIS มีความสอดคล้องกัน โดยมีค่าสูงในปี 2013 ค่าเฉลี่ย AE AERONET มีค่าอยู่ระหว่าง 1.1-1.6 AE มีค่าสูงในปี 2013 AE TERRA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 1.51-1.71 AE มีค่าสูงในปี 2013 AE AQUA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 0.67-1.7 มีค่าสูงในปี 2013 ค่า AE ระหว่าง AERONET และ AQUA TERRA-MODIS มีความสอดคล้องกัน โดยมีค่าสูงใน 2013 ค่าตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา อุณหภูมิสูงสุดในปี 2012 (27°C) ปริมาณน้ำฝนสูงสุดในปี 2012 (50.17 mm) และความเร็วลมสูงสุดในปี 2016 (617 knot) ดังภาพประกอบ 35 พบว่า ในปี 2010 ค่า AOD มีค่าสูง AE มีค่าต่ำ ปริมาณน้ำฝนมีค่าต่ำ ทิศทางลมมีค่าสูง และอุณหภูมิมี่ค่าสูง แสดงว่าปริมาณน้ำฝนจะส่งผลต่อปริมาณฝุ่นละอองในบรรยากาศ ส่วนความเร็วลมและอุณหภูมิมี่ความสัมพันธ์กับขนาดของฝุ่นละอองในบรรยากาศ



ภาพประกอบ 34 แสดงความสัมพันธ์ช่วง Per-monsoon ของ AOD AE กับ ตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา ณ อุบลราชธานี



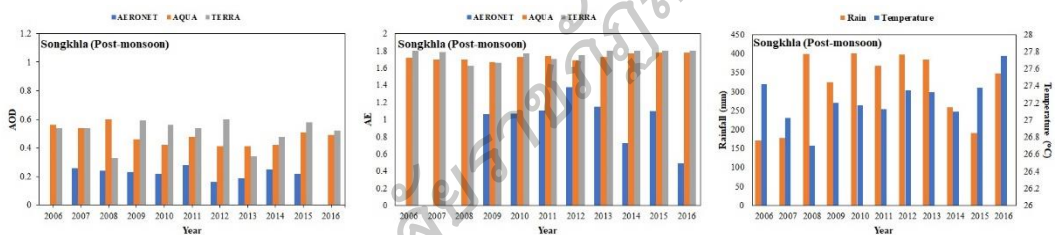
ภาพประกอบ 35 แสดงความสัมพันธ์ช่วง Post-monsoon ของ AOD AE กับ ตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา ณ อุบลราชธานี

6. สังขลา

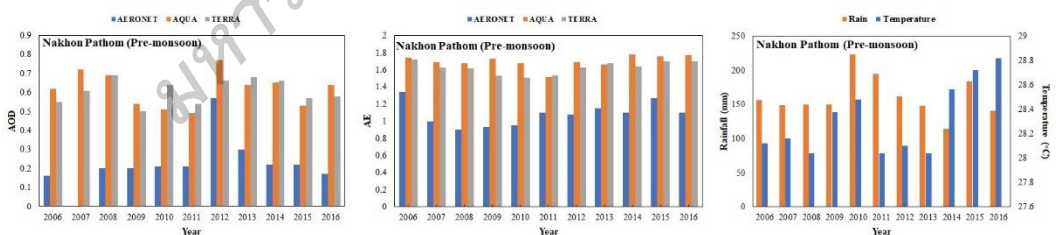
6.1 Pre-monsoon ค่าเฉลี่ยของ AOD AERONET มีค่าอยู่ระหว่าง 0.13-0.46 AOD มีค่าสูงในปี 2015 ในระยะเวลา 13 ปี AOD TERRA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 0.39-0.72 และมีค่าสูงในปี 2015 AQUA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 0.24-1.06 มีค่าสูงในปี 2015 AOD AERONET และ AOD TERRA-AQUA/MODIS มีความสอดคล้องกัน โดยมีค่าสูงในปี 2015 ค่าเฉลี่ย AE AERONET มีค่าอยู่ระหว่าง 1.07-1.28 AE มีค่าสูงในปี 2014 AE TERRA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 1.58-1.8 AE มีค่าสูงในปี 2010 2016 และ 2017 AE AQUA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 1.07-1.8 มีค่าสูงในปี 2016 และ 2017 ค่า AE ระหว่าง TERRA-MODIS และ AQUA-MODIS มีความสอดคล้องกัน ค่าตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา อุณหภูมิสูงสุดในปี 2016 และ 2017 (28.78 °C) ปริมาณน้ำฝนสูงสุดในปี 2010 (233.64 mm) และความเร็วลมสูงสุดในปี 2009 (3.54 knot) ดังภาพประกอบ 36 พบว่า ในปี 2015 ค่า AOD มีค่าสูง AE มีค่าสูง ปริมาณน้ำฝนมีค่าต่ำ ความเร็วลมมีค่าต่ำ และอุณหภูมิมีค่าสูง แสดงว่าปริมาณน้ำฝน ความเร็วลม และอุณหภูมิ จะส่งผลต่อปริมาณฝุ่นละอองในบรรยากาศและขนาดของฝุ่นละอองในบรรยากาศ

6.2 Post-monsoon ค่าเฉลี่ยของ AOD AERONET มีค่าอยู่ระหว่าง 0.16-0.28 AOD มีค่าสูงในปี 2011 ในระยะเวลา 13 ปี AOD TERRA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 0.34-0.59

และมีค่าสูงในปี 2009 AQUA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 0.41-0.6 มีค่าสูงในปี 2008 AOD AERONET และ AOD TERR-AQUA/MODIS ในระยะเวลา 13 ปี มีค่าแตกต่างกันออกไป ค่าเฉลี่ย AE AERONET มีค่าอยู่ระหว่าง 0.49-1.38 AE มีค่าสูงในปี 2012 AE TERRA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 1.71-1.8 AE มีค่าสูงในปี 2006 2013 2014 2015 2016 และ 2017 AE AQUA-MODIS มีค่าอยู่ระหว่าง 1.67-1.78 มีค่าสูงในปี 2015 และ 2016 ค่า AE ระหว่าง AERONET และ AQUA-MODIS มีความสอดคล้องกัน ค่าตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา อุณหภูมิ สูงสุดในปี 2017 (27.75 °C) ปริมาณน้ำฝนสูงสุดในปี 2010 (400.375 mm) และความเร็วลม สูงสุดในปี 2011 (4.4 knot) ดึงภาพประกอบ 37 พบว่า ในปี 2009 ค่า AOD มีค่าสูง AE มีค่าสูง ปริมาณน้ำฝนมีค่าต่ำ ความเร็วลมมีค่าสูง และอุณหภูมิมีค่าสูง แสดงว่าปริมาณน้ำฝนจะส่งผลต่อ ปริมาณฝุ่นละอองในบรรยากาศ ส่วนความเร็วลมและอุณหภูมิความสัมพันธ์กับขนาดของฝุ่น ละอองในบรรยากาศ



ภาพประกอบ 36 แสดงความสัมพันธ์ช่วง Per-monsoon ของ AOD AE กับ ตัวแปรทาง อุตุนิยมวิทยา ณ สงขลา



ภาพประกอบ 37 แสดงความสัมพันธ์ช่วง Per-monsoon และ Post-monsoon ของ AOD AE กับ ตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา ณ สงขลา

วิเคราะห์แนวโน้มโดยใช้ Mann-Kendell

ตาราง 5 วิเคราะห์แนวโน้ม Mann-Kendell ของ AOD และ AE โดยใช้ข้อมูล AQUA-MODIS ทั้ง 6 สถานี

สถานี	ทดสอบ	AOD			AE		
		Pre-Monsoon	Post-Monsoon	Annual	Pre-Monsoon	Post-Monsoon	Annual
เชียงใหม่	Slope MK	-0.010	-0.014	0.020	-0.007	-0.011	-0.069
	Z_Value	-0.645	-2.487*	0.396	-0.311	-1.419	-1.245
	P_Value	0.519	0.013*	0.692	0.755	0.156	0.213
นครปฐม	Slope MK	0.030	0.010	0.020	-0.015	0.006	0.012
	Z_Value	0.693	0.298	0.744	-1.175	0.000	0.000
	P_Value	0.488	0.765	0.457	0.240	1.000	1.000
กรุงเทพมหานคร	Slope MK	0.027	0.008	0.038	-0.040	-0.005	-0.073
	Z_Value	0.693	0.347	0.038	-1.018	-0.3916	-1.174
	P_Value	0.488	0.728	0.198	0.308	0.695	0.240
นครราชสีมา	Slope MK	-0.004	0.001	0.032	0.015	0.059	0.185
	Z_Value	-0.142	0.546	0.546	0.000	2.179*	1.556
	P_Value	0.882	1.000	0.585	1.000	0.029*	0.119
อุบลราชธานี	Slope MK	0.024	-0.022	0.085	0.190	0.021	0.400
	Z_Value	0.644	-0.990	1.538	0.628	0.311	1.712
	P_Value	0.519	0.322	0.124	0.529	0.755	0.086
สงขลา	Slope MK	0.90	-0.023	0.043	0.107	-0.103	-0.003
	Z_Value	1.485	-0.891	0.297	0.000	-2.264	-0.155
	P_Value	0.138	0.373	0.767	1.000	0.023	0.876

*นัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 5%

**นัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 1%

จากตาราง 5 วิเคราะห์แนวโน้ม Mann-Kendell ของ AOD และ AE โดยใช้ข้อมูล AQUA-MODIS ทั้ง 15 ปี ตั้งแต่ปี ค.ศ.2003 -2017 ทั้ง 6 สถานี ได้แก่ เชียงใหม่ นครปฐม

กรุงเทพมหานคร นครราชสีมา อุบลราชธานี และสงขลา พบว่าค่า AOD ในช่วง Pre-monsoon ของสถานีเชียงใหม่ และนครราชสีมา มีแนวโน้มลดลง ซึ่งตรงกันข้ามกับ นครปฐม

กรุงเทพมหานคร อุบลราชธานี และสงขลา มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในช่วง Post-monsoon ที่สถานี เชียงใหม่ อุบลราชธานี สงขลา ค่า AOD มีแนวโน้มลดลง ซึ่งตรงกันข้ามกับ นครปฐม

กรุงเทพมหานคร นครราชสีมา ค่า AOD มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนมีสถานีเชียงใหม่ค่า AOD มี แนวโน้มลดลงอย่างมีระดับนัยสำคัญที่ 5% ที่ 0.014 ต่อปี ส่วนค่า AOD ตลอดทั้งปีของทุกสถานี มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตลอด 15 ปีที่ผ่านมาอย่างไม่มีนัยสำคัญ

ในช่วง Pre-monsoon ค่า AE ของเชียงใหม่ นครปฐม กรุงเทพมหานคร มีแนวโน้ม ลดลง ตรงข้ามกับ นครราชสีมา อุบลราชธานี และสงขลา มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในช่วง Post-monsoon ค่า AE ที่สถานีเชียงใหม่ กรุงเทพมหานคร และสงขลา มีแนวโน้มลดลง ตรงข้ามกับ นครปฐม นครราชสีมา และอุบลราชธานี มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในช่วง Post-monsoon ค่า AE ที่นคร ราชสีมา มีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นอย่างมีระดับนัยสำคัญที่ 5% ที่ 0.059 ต่อปี ส่วน AE ในตลอดทั้งปีที่ เชียงใหม่ กรุงเทพมหานคร และสงขลา มีแนวโน้มลดลง ตรงข้ามกับ นครปฐม นครราชสีมา และ อุบลราชธานีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

การศึกษาความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองระหว่างข้อมูลเครือข่าย AERONET/SKYNET ที่ได้จากข้อมูลภาคพื้นดินกับข้อมูลเครือข่าย MODIS-TERRA/AQUA ที่ได้จากข้อมูลดาวเทียม ทั้ง 6 สถานี ได้แก่ เชียงใหม่ นครปฐม กรุงเทพฯ นครราชสีมา อุบลราชธานี และสงขลา ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2006 -2017 พบว่า

1. การเปรียบเทียบข้อมูล AOD ระหว่างข้อมูลภาคพื้นดินที่ได้จากระหว่างเครือข่าย AERONET และ SKYNET กับข้อมูลดาวเทียม TERRA และ AQUA จากเครือข่าย MODIS โดยใช้ค่า R^2 , RMSE, และ RMB ในการเปรียบเทียบข้อมูล พบว่า

1.1 AOD ของ AERONET/SKYNET กับ TERRA-MODIS พบค่าสูงสุดอยู่ที่อุบลราชธานี มีค่า $R^2 = 0.76$ slope=0.94 และ RMB=1.86 และต่ำสุดพบในกรุงเทพฯ อาจเกิดจากการขาดหายของข้อมูล R^2 ของ TERRA-MODIS นั้นต่ำกว่า AERONET/SKYNET ที่ประเมินค่า AOD ต่ำกว่าจะสังเกตเห็นได้ชัดเจนกว่าในเชียงใหม่และนครราชสีมาเนื่องจากผลกระทบของการสะท้อนแสงของพื้นผิวและลักษณะทางภูมิศาสตร์ ทำให้ การตั้งค่า AOD ของ TERRA-MODIS ตั้งค่าสูงเกินไปในกรุงเทพฯ นครปฐม และสงขลาอย่างมีนัยสำคัญ

1.2 AOD ของ AERONET/SKYNET กับ AQUA-MODIS พบพบในเชียงใหม่ มีค่า $R^2 = 0.78$ slope=0.60 และ RMB=0.62 และต่ำสุดพบในกรุงเทพฯ และยังพบค่า R^2 ต่ำในสถานี นครปฐม นครราชสีมา และสงขลา

2. การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของข้อมูล AOD พบว่าที่สถานี เชียงใหม่ นครปฐม กรุงเทพฯ นครราชสีมา และอุบลราชธานี มีค่าสูงในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนพฤษภาคม ส่วนสงขลามีค่าสูงในเดือนตุลาคม การเปลี่ยนแปลงข้อมูลรายปี AOD พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกสถานี โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอยู่ที่ 0.11 0.09 0.11 0.03 0.25 และ 0.03 ตามลำดับ ค่าเฉลี่ย AOD อยู่ที่ 0.44 0.40 0.60 0.41 และ 0.24 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าแนวโน้มการเปลี่ยนแปลง AOD สูงสุดอยู่ที่เชียงใหม่ และต่ำสุดอยู่ที่ นครราชสีมา

3. การเปลี่ยนแปลงข้อมูลรายปีของ AOD พบว่าการเปลี่ยนแปลง AOD ของ TERRA-MODIS และ AERONET ที่เชียงใหม่ นครปฐม อุบลราชธานี และสงขลา มีแนวโน้มเป็นบวก ในขณะที่การเปลี่ยนแปลง AOD ของ AQUA-MODIS มีแนวโน้มเป็นลบตามลำดับ ยกเว้นที่อุบลราชธานี ที่อุบลราชธานี การเปลี่ยนแปลง AOD ของ TERRA-MODIS และ AQUA-MODIS

สอดคล้องกับ AOD ของ AERONET มีแนวโน้มเชิงบวกที่บ่งบอกถึงความเสถียรของข้อมูลใน สถานีอุบลราชธานี แนวโน้มระยะยาวบ่งชี้ว่า AOD ของ TERRA-MODIS และ AQUA-MODIS ที่ให้ข้อมูลแนวโน้มตรงข้ามกัน นั้นขึ้นอยู่กับสถานี

4. การเปลี่ยนแปลงข้อมูลรายปีของ AE พบว่าที่สถานีเชียงใหม่ AE ที่ได้มาจาก AERONET มีค่าใกล้เคียงกับ TERRA-MODIS และ AQUA-MODIS ค่า AE ของทุกสถานีมีค่าอยู่ระหว่าง 1.44-1.48 พบค่าต่ำสุดของ AE ได้จาก AQUA-MODIS ในปี 2010 ที่สถานีอุบลราชธานี มีค่าอยู่ที่ 0.46 ส่วนค่าสูงสุดได้จาก AQUA-MODIS ในปี 2014 ที่สถานีกรุงเทพ และสงขลา มีค่าอยู่ที่ 1.78 ค่ารายปีของ AE ทั้ง 6 สถานี

5. ความสัมพันธ์ระหว่างค่าของ AOD และ AE กับตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ อุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน และความเร็วลม โดยแบ่งช่วงที่ศึกษาเป็นช่วง Pre-monsoon และช่วง Post-monsoon ตั้งแต่ปี 2006-2017 พบว่า ค่าปริมาณน้ำฝนจะส่งผลต่อปริมาณฝุ่นละอองในบรรยากาศ ส่วนความเร็วลมและอุณหภูมิจึงมีความสัมพันธ์กับขนาดของฝุ่นละอองในบรรยากาศ

6. การวิเคราะห์ Mann-kendell ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2003 – 2017 โดยใช้ข้อมูล AOD AQUA-MODIS ตลอดทั้งปีของทุกสถานีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในช่วง Post-monsoon ที่สถานีเชียงใหม่มีแนวโน้มลดลงอย่างมีระดับนัยสำคัญที่ 5% ส่วน AE ตลอดทั้งปีที่สถานีนครปฐม นครราชสีมา และอุบลราชธานีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นของ AE ในช่วง Post-monsoon ที่สถานีเชียงใหม่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างมีระดับนัยสำคัญ 5%

บรรณานุกรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

บรรณานุกรม

- กรมอุตุนิยมวิทยา. (ม.ป.ป.). *เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจอากาศผิวพื้น-การบินและชั้นบนแบบทั่วไป*. เข้าถึงได้จาก <http://www.cmmet.tmd.go.th/instrument/instruments.php>. 3 สิงหาคม 2562.
- จักรกฤษณ์ ดาวโรสง. (2553). *ตอนที่ 2 เครื่องมือทางภูมิศาสตร์*. เข้าถึงได้จาก <http://jakkrit-geography1.blogspot.com/2010/07/2.html>. 3 สิงหาคม 2562.
- ศูนย์การเรียนรู้วิทยาศาสตร์โลกและดาราศาสตร์. (2561). *ชั้นบรรยากาศ*. เข้าถึงได้จาก <http://www.lesa.biz/earth/atmosphere/atm-structure>. 1 สิงหาคม 2561.
- Arola, A. & T. Koskela. (2004). *On the sources of bias in aerosol optical depth retrieval in the UV range*. *J.Geophys. Res*, 109.
- Brandon Maccherone. (n.d.). *MODIS: MODERATE RESOLUTION IMAGING SPECTRORADIOMETER*. Retrieved from <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod04.php>. 3 August 2019.
- Cachorro, V. E., A. M. De Frutos & M. J. Gonzalez. (1993). *Analysis of the relationships between junge size distribution and Angstrom turbidity parameter from spectral measurements of atmospheric aerosol extinction*. *Atmospheric Environment-Part A General Topics*, 27 A, 1585-1591.
- Center for Environmental Remote Sensing. (2013). *SKYNET*. Retrieved from <http://atmos3.cr.chiba-u.jp/skyenet/index.html>. 3 August 2019.
- Den Harmon. (2015). *Why Does Accuracy Matter So Much with an Ambient Light Sensor?*. Retrieved from <https://www.electronicdesign.com/technologies/optical/article/21801146/why-does-accuracy-matter-so-much-with-an-ambient-light-sensor>. 6 May 2019.

- Dragons flight. (2007). *Solar Spectrum*. ed. p. *T. f. s. t. s. r. s. f. d. l. a. b. t. t. o. t. E. s. a. a. a. s. Spectrum.png* (Ed.)(Vol. 800x595 pixels.
- Exell, R. H. B. (1987). *The water content and trubidity of the atmoshere in Thailand Solar Energy*, 20, 429-230.
- Hoppel, W. A., J. W. Fitzgerald, G. M. Frick, R. E. Larson & E. J. Mack. (1990). *Aerosol size distributions and optical properties found in the marine boundary layer over the Atlantic Ocean. Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 95, 3659-3686.
- Iqbal, M. (1983). *An Introduction to Solar Radiation*. New York: ACADEMIC PRESS.
- Islam, S. (2017). *Analytical modeling of organic solar cells including monomolecular recombination and carrier generation calculated by optical transfer matrix method*. *Organic Electronics*, 41, 143-156.
- Jacovides, C. P., M. D. Steven & D. N. Asimakopoulos. (2000). *Spectral solar irradiance and some optical properties for various polluted atmospheres. Solar Energy*, 60, 215-227.
- JH Seinfeld & SN Pandis. (1998). *Atmospheric chemistry and physics :from air pollution to climate change*. New York: J Wiley.
- Kirchhoff, V. W. J. H. (2002). *Wavelength dependence of aerosol optical thickness in the UV-B band. Geophysical Research Letters*, 29, 1620.
- Kirkby, J. (2013). *The CLOUD Experiment*. Retrieved from <http://ep-news.web.cern.ch/content/cloud-experiment-0>. 3 August 2019.
- Knote, C. & S. Pousse-Nottelmann. (2011). *Role of chemistry-aerosol-cloud interaction in climate stabilization*.
- Kumharn, W. (2010). *Assessing the Role of Brewer Spectrophotometer in Determining Aerosol Optical Properties in the UK and Tropics*. The University of Manchester: Manchester.

- Kumharn, W. & K. Hanprasert. (2016). *Aerosol optical properties in ultraviolet ranges and respiratory diseases in Thailand*. *Atmospheric Environment*, 142, 221-228.
- Langner, J., H. Rodhe, P. J. Crutzen & P. Zimmermann. (1992). *Anthropogenic influence on the distribution of tropospheric sulphate aerosol*. *Nature*, 359, 712.
- Lynn Jenner. (2017). *TERRA Spacecraft*. Retrieved from https://www.nasa.gov/mission_pages/terra/spacecraft/index.html. 3 August 2019.
- Maccherone, B. *MODERATE RESOLUTION IMAGING SPECTRORADIOMETER*. Retrieved from <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>. 3 August 2019.
- Marenco, F., V. Santacesaria, A. F. Bais, D. Balis, A. Di Sarra, A. Papayannis & e. al. (1997). *Optical properties of tropospheric aerosol determined by lidar and spectrophotometric measurements (Photochemical Activity and Solar Ultraviolet Radiation Campaign)*. *Applied Optics*, 36, 6875-6886.
- Nasa. (2019). *AERONET (AEROSOL ROBOTIC NETWORK)*. Retrieved from https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/aerosols.html. 3 August 2019.
- Ricketts, H. M. A. (2009). *A lidar system to measurement aerosol and ozone profiles in the atmosphere boundary layer and free troposphere*. The University of Manchester: Manchester.
- Silva, A. A. & V. W. J. H. Kirchoff. (2004). *Aerosol optical thickness from Brewer spectrophotometer and an investigation into the stray-light effect*. *Applied Optics*, 43, 2484-2489.
- Roland Stull. (2018). *Boundary Layer and Obstacle/Mountain Turbulence*. Retrieved from https://www.eoas.ubc.ca/courses/atsc113/flying/met_concepts/03-met_concepts/03f-BL_obstacle_wake/index.html. 6 May 2019.

Slusser, J., J. Gibson, D. Bigelow, D. Kolinski, P. Disterhoft, K. Lantz & e. al. (1999).

Langley method of calibrating UV filter radiometer. J.Geophys. Res, 105.

Warneck, P. (1988). *Chemistry of the Natural Atmosphere second edition*.

Orlando: Academic Press.

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

ภาคผนวก ก

ดาวเทียม Terra/Aqua-MODIS

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

ภาคผนวก ก

ดาวเทียม Terra/Aqua-MODIS

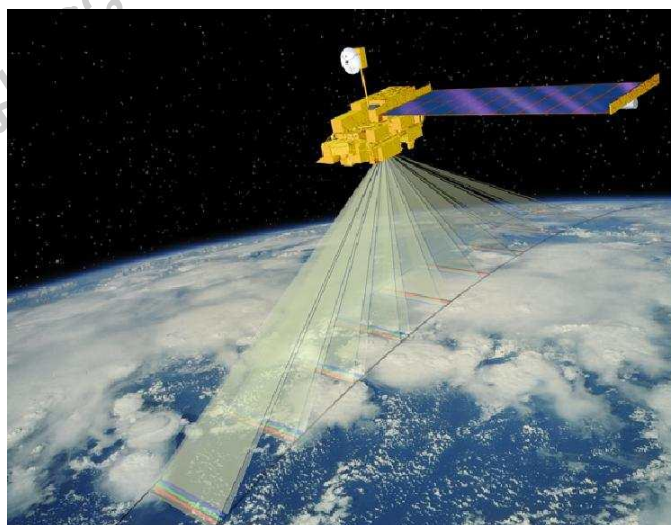
ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2000 เป็นต้นมา องค์การนาซา (NASA) ของประเทศสหรัฐอเมริกา ได้จัดตั้งเครือข่าย เครื่อง sun photometer ทั่วโลก และเรียกเครือข่ายดังกล่าวว่า AERONET (Aerosol Robotic Network) ซึ่ง ปัจจุบันมีสถานีทั้งหมด 655 แห่ง โดยมีเป้าหมายเพื่อศึกษาสมบัติเชิงแสง (optical properties) ปริมาณและ ชนิด รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของฝุ่นทั่วโลก โดย MODIS (MODerate resolution Imaging Spectrometer (MODIS)) เป็นเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งอยู่บนดาวเทียม TERRA จากนั้นต่อมาในปี ค.ศ. 2002 ได้ทำการติดตั้งเซ็นเซอร์ MODIS เพิ่มเติมไว้บนดาวเทียม AQUA ด้วย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อทำการสำรวจสภาพแวดล้อมของโลก ทั้งทางพื้นดิน มหาสมุทร และบรรยากาศชั้นล่าง ดาวเทียม TERRA จะโคจรจากขั้วโลกเหนือไปยังขั้วโลกใต้ผ่านเส้นศูนย์สูตรของโลกในตอนเช้า (10.00-11.00 น.) ดังภาพประกอบ 38 ตามเวลาในประเทศไทย ในขณะที่ดาวเทียม AQUA จากโคจรจากขั้วโลกใต้ไปยังขั้วโลกเหนือเหนือเส้นศูนย์สูตรในตอนบ่าย (13.00-14.00 น.) ดังภาพประกอบ 40 ตามเวลาในประเทศไทย ดาวเทียม TERRA/AQUA จะโคจรที่ระดับความสูงประมาณ 705 km โดยข้อมูลที่ได้จาก MODIS จะมีจำนวนทั้งหมด 36 แถบสเปกตรัม ภาพถ่ายในระบบ MODIS มีความกว้าง หรือ Swath ประมาณ 2,330 กิโลเมตร และสามารถบันทึกข้อมูลครอบคลุมพื้นที่ทั่วโลกได้ภายใน 2 วัน ข้อมูลที่ได้รับประกอบด้วย 36 ช่วงคลื่น ระหว่าง 0.4 -14 nm โดยมีความละเอียดเชิงพื้นที่แตกต่างกันไปในแต่ละช่วงคลื่น โดยช่วงคลื่นที่ 1-2 มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 250 เมตร ช่วงคลื่น 3-7 มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 500 เมตร และช่วงคลื่น 8-36 มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 1,000 เมตร ดังตาราง

ตาราง 6 แสดงรายละเอียดแถบสเปกตรัมของ MODIS

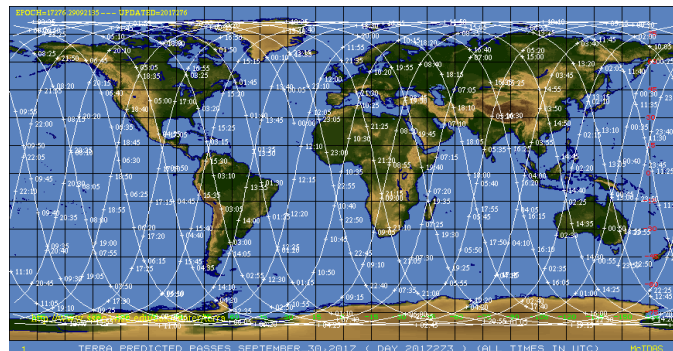
Primary Use	Band	Bandwidth ¹	Spectral Radiance ²	Required SNR ³
Land/Cloud/Aerosols Boundaries	1	620 - 670	21.8	128
	2	841 - 876	24.7	201
Land/Cloud/Aerosols Properties	3	459 - 479	35.3	243
	4	545 - 565	29.0	228
	5	1230 - 1250	5.4	74
	6	1628 - 1652	7.3	275
	7	2105 - 2155	1.0	110
Ocean Color/ Phytoplankton/ Biogeochemistry	8	405 - 420	44.9	880
	9	438 - 448	41.9	838
	10	483 - 493	32.1	802
	11	526 - 536	27.9	754
	12	546 - 556	21.0	750
	13	662 - 672	9.5	910
	14	673 - 683	8.7	1087
	15	743 - 753	10.2	586
Atmospheric Water Vapor	16	862 - 877	6.2	516
	17	890 - 920	10.0	167
	18	931 - 941	3.6	57
Surface/Cloud Temperature	19	915 - 965	15.0	250
	20	3.660 - 3.840	0.45(300K)	0.05
	21	3.929 - 3.989	2.38(335K)	2.00
	22	3.929 - 3.989	0.67(300K)	0.07
	23	4.020 - 4.080	0.79(300K)	0.07

ตาราง 6 (ต่อ)

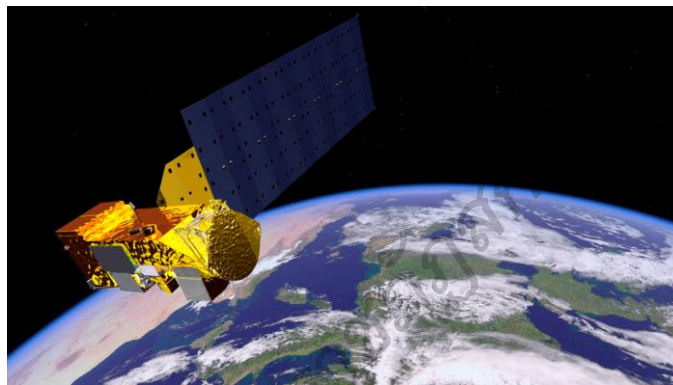
Primary Use	Band	Bandwidth ¹	Spectral Radiance ²	Required SNR ³
Atmospheric Temperature	24	4.433 - 4.498	0.17(250K)	0.25
	25	4.482 - 4.549	0.59(275K)	0.25
Cirrus Clouds Water Vapor	26	1.360 - 1.390	6.00	150(SNR)
	27	6.535 - 6.895	1.16(240K)	0.25
	28	7.175 - 7.475	2.18(250K)	0.25
Cloud Properties	29	8.400 - 8.700	9.58(300K)	0.05
Ozone	30	9.580 - 9.880	3.69(250K)	0.25
Surface/Cloud Temperature	31	10.780 - 11.280	9.55(300K)	0.05
	32	11.770 - 12.270	8.94(300K)	0.05
Cloud Altitude Top	33	13.185 - 13.485	4.52(260K)	0.25
	34	13.485 - 13.785	3.76(250K)	0.25
	35	13.785 - 14.085	3.11(240K)	0.25
	36	14.085 - 14.385	2.08(220K)	0.35



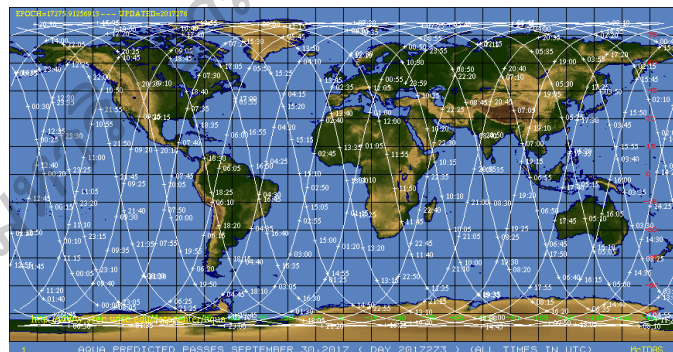
ภาพประกอบ 37 ดาวเทียม Terra



ภาพประกอบ 38 แสดงเส้นวงโคจรของดาวเทียม Terra-MODIS ทั่วโลก
ณ วันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2560



ภาพประกอบ 39 ดาวเทียม Aqua



ภาพประกอบ 40 แสดงเส้นวงโคจรของดาวเทียม Aqua-MODIS ทั่วโลก
ณ วันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2560

ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	อรดี พิลาโฮม
วัน เดือน ปีเกิด	27 เมษายน 2538
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลสกจนคร
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์)
ที่อยู่ปัจจุบัน	1169/1 ถนนรอบเมือง ซอย 3 ตำบลธาตุเชิงชุม อำเภอเมือง จังหวัดสกจนคร 47000
การศึกษา	
พ.ศ. 2554-2556	ระดับมัธยมปลาย โรงเรียนสกลราชวิทยานุกูล
พ.ศ. 2556-2560	ระดับปริญญาตรี มหาวิทยาลัยราชภัฏสกจนคร
พ.ศ. 2560-2563	ระดับปริญญาโท มหาวิทยาลัยราชภัฏสกจนคร