



การพัฒนาแบบจำลองฝุ่น PM2.5 จากข้อมูลดาวเทียมคาลิโพร
ในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย

วิทยานิพนธ์

ของ

ยุทธพิชัย แจนโกนดี

เสนอต่อมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
มีนาคม 2567
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

การพัฒนาแบบจำลองฝุ่น PM2.5 จากข้อมูลดาวเทียมคาลิโพร
ในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย

วิทยานิพนธ์

ของ

ยุทธพิชัย แจ่มโกนดี

เสนอต่อมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์

มีนาคม 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

A DEVELOPMENT OF PM_{2.5} MODEL FROM CALIPSO SATELLITE DATA
OVER NORTHERN THAILAND

BY
YUTTAPICHAJ JANKONDEE

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
The Master of Physics Degree in Science Sakon Nakhon Rajabhat University
March 2024

All Rights Reserved by Sakon Nakhon Rajabhat University

ประกาศคุณูปการ

ในการศึกษาระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต ผู้เขียนขอขอบคุณ ที่เชื้อเพื่อสถานที่ในการดำเนินการวิจัยสาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

ผู้เขียนขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.วิลาวรรณ คำหาญ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาผู้คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำด้านวิชาการ การวิเคราะห์ข้อมูล การเขียนบทความวิจัย และเผยแพร่ในระดับนานาชาติ พร้อมทั้งจัดหาเครื่องมือ และข้อมูลในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลงด้วยดี

ผู้เขียนขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อิสระ มะศิริ อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่ให้การแนะนำ ช่วยเหลือในการเขียนโปรแกรม IDL ในการวิเคราะห์ข้อมูลในงานวิจัย และกรุณาเสียสละเวลามาเป็นกรรมการในการสอบเค้าโครง และสอบปกป้องวิทยานิพนธ์

ผู้เขียนขอขอบคุณองค์การนาซา เครือข่าย Aerosol Robotic Network ที่เชื้อเพื่อข้อมูลในการวิจัย

สุดท้ายนี้ คุณประโยชน์ที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบให้กับบิดาและมารดา รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่าน เพื่อตอบแทนพระคุณที่ให้การช่วยเหลือผู้เขียนประสบความสำเร็จในการศึกษา

ยุทธพิชัย แจนโกนดี



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์ การพัฒนาแบบจำลองฝุ่น PM2.5 จากข้อมูลดาวเทียมคาบิโซในพื้นทีภาคเหนือของประเทศไทย
ชื่อผู้ทำวิทยานิพนธ์ ยุทธพิชัย แจ่มโกนดี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

..... กรรมการสอบ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หรรษกร วรธนะสาร)

คณะกรรมการบริหารหลักสูตรรับรองแล้ว

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หรรษกร วรธนะสาร)
ประธานหลักสูตร
มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุศักดิ์ แสนทวีสุข)
ผู้อำนวยการบัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

เมื่อวันที่ 26 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

ชื่อเรื่อง	การพัฒนาแบบจำลองฝุ่น PM2.5 จากข้อมูลดาวเทียม คาลิปโซในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย
ผู้วิจัย	ยุทธพิชัย แจนโกนดี
กรรมการที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.วิลาวัณย์ คำหาญ
ปริญญา	วท.ม. (ฟิสิกส์)
สถาบัน	มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร
ปีที่พิมพ์	2567

บทคัดย่อ

การพัฒนาแบบจำลองฝุ่น PM2.5 จากข้อมูลดาวเทียมคาลิปโซในพื้นที่ภาคเหนือ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2560 – 2565 พื้นที่ในภาคเหนือประกอบไปด้วย จังหวัดเชียงใหม่ ลำปาง แม่ฮ่องสอน เชียงราย น่าน ลำพูน แพร่ พะเยา อุตรดิตถ์ ในการศึกษาใช้วิธีการ Linear Mixed Effect ตัวแปรที่ใช้สร้างแบบจำลองประกอบไปด้วย ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง (AOD) อุณหภูมิ (TAMP) ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) อัตราเร็วลม (WS) ดัชนีพืชผล (NDVI) และความสูงชันขอบเขต (HPBL) จากการศึกษา พบว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถทำนายค่าความเข้มข้นฝุ่น PM2.5 ได้ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากภาคพื้นดินที่ R^2 มากกว่า 0.76 นอกจากนี้ยัง พบว่า ฝุ่น PM2.5 มีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงเดือนมีนาคม มีค่าต่ำสุดในเดือนกรกฎาคม ส่วนการเปลี่ยนแปลงรายปีพบว่า ฝุ่น PM2.5 มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น

คำสำคัญ: ฝุ่น PM2.5 แบบจำลอง ความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง ตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา

TITLE	A Development of PM2.5 model from CALIPSO satellite Over northern Thailand
AUTHOR	Yuttapichai Jankondee
ADVISORS	Assoc. Prof. Dr. Wilawan Kumharn
DEGREE	M.Sc. (Physics)
INSTITUTION	Sakon Nakhon Rajabhat University
YEAR	2024

ABSTRACT

Development of the PM2.5 model from CALIPSO satellite data in the Northern region from 2017 – 2021. The northern region comprises Chiang Mai, Lampang, Mae Hong Son, Chiang Rai, Nan, Lamphun, Phrae, Phayao, and Uttaradit provinces. In this study, the Linear Mixed Effect (LME) method was applied to aerosol optical depth (AOD), temperature (TAMP), relative humidity (RH), wind speed (WS), normalized difference vegetation index (NDVI), and the planetary boundary layer (HPBL). It was found that PM2.5 concentrations agreed with ground-based data with R^2 greater than 0.76. In addition, it was found that the maximum value of PM2.5 was in March, while the lowest was in July. As for annual changes, PM2.5 dust tends to increase.

Keywords: PM2.5, Model, Aerosol Optical Depth, Meteorological variables

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญ	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
ขอบเขตการวิจัย	3
คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย/(นิยามศัพท์เฉพาะ).....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
กรอบแนวความคิดของงานวิจัย.....	4
2 แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
ฝุ่นละออง	5
ฝุ่นละอองแบ่งตามแหล่งกำเนิด	6
1. ฝุ่นละอองปฐมภูมิ (PRIMARY AEROSOL)	6
2. ฝุ่นละอองทุติยภูมิ (SECONDARY AEROSOL)	7
ฝุ่นละอองแบ่งตามขนาด	7
การกระจายของตัวฝุ่นตามความสูง	10
สมบัติของแสง (OPTICAL OF LIGHT).....	12
โพลาไรเซชันของแสง (POLARIZATION OF LIGHT)	15
การกระเจิงแสง (SCATTERING OF LIGHT).....	21
NORMALIZED RELATIVE BACKSCATTER (NRB).....	23
สัมประสิทธิ์การดูดกลืนในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (ATMOSPHERIC EXTINCTION)	24
แนวความคิด ทฤษฎีเกี่ยวกับเครื่องมือการวิจัย	25
ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์	30
3 วิธีดำเนินการวิจัย	37
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	37

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
การเก็บรวบรวมข้อมูล	38
การวิเคราะห์ข้อมูล	40
สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล	40
 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	 44
ซอฟต์แวร์สำหรับการวิจัย	44
ข้อมูลสำหรับการวิจัย	45
ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	46
การเปรียบเทียบสัมพันธภาพของตัวแปรที่มีผลต่อแบบจำลอง	48
การเปรียบเทียบข้อมูลความเข้มข้นฝุ่น PM2.5	50
การเปลี่ยนแปลงข้อมูลรายเดือนของความเข้มข้นฝุ่น PM2.5	53
การเปลี่ยนแปลงข้อมูลรายปีของความเข้มข้นฝุ่น PM2.5	60
 5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	 67
ความมุ่งหมายของการวิจัย	67
การเก็บรวบรวมข้อมูล	67
การวิเคราะห์ข้อมูล	68
สรุปผล	68
อภิปรายผล	70
ข้อเสนอแนะ	70
 บรรณานุกรม	 72
 ภาคผนวก	 75

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ภาคผนวก ก.....	76
ภาคผนวก ข.....	84
ภาคผนวก ค	87
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	89

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 กรอบแนวความคิดของงานวิจัย	4
2 แสดงข้อมูลการเปรียบเทียบค่า AOD CALIPSO กับ AOD MODIS และ AOD SUN PHOTOMETER ระหว่างปี พ.ศ.2560-2565 ของพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่	47
3 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ยตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยาจากข้อมูลดาวเทียม	47
4 แสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่มีผลต่อแบบจำลองในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ ระหว่าง ค่า PM _{2.5} กับตัวแปรต่าง ๆ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2560 – 2565	48
5 การสร้างแบบจำลองโมเดล PM 2.5 (LINEAR MIXED MODEL)	49
6 ค่าคงที่ของ FIXED EFFECT OF LME สำหรับแบบจำลองความเข้มข้นของ PM _{2.5} โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2560 – 2565	49
7 ข้อมูลความเข้มข้นฝุ่น PM _{2.5} ภาคพื้นดิน กับ PM _{2.5} ที่ได้จากแบบจำลอง LME	50

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 แหล่งกำเนิดและลักษณะของฝุ่นละอองปฐมนิยาม (EDUCATION, 2013)	7
2 ฝุ่นละอองที่เส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน $2.5\mu\text{m}$ และฝุ่นละอองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 10 ที่มา (NATIONAL, 2018)	9
3 การกระจายตัวของฝุ่นละอองตามความสูงได้จาก CLOUD AEROSOL LIDAR AND INFRARED PATHFINDER SATELLITE OBSERVATIONS ที่มา (UNIVERSITY OF WASHINGTON AND NASA LANGLEY RESEARCH CENTER, 2009)	10
4 ฝุ่นละอองในชั้นขอบเขต และฝุ่นละอองในบรรยากาศอิสระชั้นโทรโพสเฟียร์ (AIR POLLUTION TRAINING INSTITUTE, 2016)	11
5 ปริมาณและชนิดของฝุ่นละอองที่พบที่ระดับความสูงต่าง ๆ ของบรรยากาศ (N เป็นจำนวนของอนุภาค/ cm^3) (IQBAL, 1983)	11
6 แสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงที่ตามองเห็น	12
7 การสะท้อนแบบปกติ (REGULAR REFLECTION)	13
8 การสะท้อนแบบกระจาย	14
9 กฎการสะท้อนของแสงมุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ	14
10 สนามไฟฟ้าของแสง (ก) สนามไฟฟ้าของแสงไมโครเวฟ	15
11 โพลารไรซ์เซชันโดยการดูดกลืนด้วยแผ่นโพลารอยด์	16
12 โพลารไรซ์เซชันโดยการสะท้อน	17
13 การหักเหสองแนวเมื่อแสงไมโครเวฟผ่านผลึกแคลไซต์	19
14 คลื่นวงกลม (รังสี O) และคลื่นวงรี (รังสี E) ในผลึก	19
15 การกระเจิงของแสงไมโครเวฟโดยโมเลกุลในอากาศ	20
16 การกระเจิงแสงแบบเรย์เลย์ (RAYLEIGH SCATTERING)	21
17 การกระเจิงแสงแบบมี (MIE SCATTERING)	22
18 ตัวอย่างกราฟของ NRB, LDR AND CLOUD MASK FOR MPLCMASK	23
19 การดูดกลืนในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (ATMOSPHERIC EXTINCTION)	25

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
20 แผนผังเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี (THAISCIENCE.INFO)	26
21 กลุ่มดาวเทียมบิรารยามบายหรือ "A-TRAIN" ปัจจุบันประกอบด้วยดาวเทียม 5 ดวงที่บินวนรอบโลก (ดาวเทียม AQUA และ AURA ของ NASA และดาวเทียม PARASOL ของ CNES)	27
22 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดของดาวเทียม CALIPSO	28
23 แผนผังทางเดินแสงของไลดาร์เซ็นเซอร์ หรือ CLOUD-AEROSOL LIDAR WITH ORTHOGONAL POLARIZATION (CALIOP)	30
24 แผนภาพการกระจาย	31
25 แสดงการเปรียบเทียบ AOD ระหว่าง AERONET กับ CALIPSO ระหว่างปี พ.ศ. 2560 -2565 ในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่	46
26 แสดงการเปรียบเทียบ AOD ระหว่าง MODIS กับ CALIPSO ระหว่างปี พ.ศ. 2560 -2565 ในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่	47
27 การเปรียบเทียบความเข้มข้น PM _{2.5} ระหว่างค่าที่ได้จากการวัดและค่าที่ได้จาก แบบจำลอง	51
28 การเปรียบเทียบความเข้มข้น PM _{2.5} ระหว่างค่าที่ได้จากการวัดและค่าที่ได้จาก แบบจำลอง	52
29 การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของฝุ่น PM _{2.5} พื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ ระหว่างปี พ.ศ.2560-2565	53
30 การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของฝุ่น PM _{2.5} พื้นที่จังหวัดลำปาง ระหว่างปี พ.ศ.2560-2565	54
31 การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของฝุ่น PM _{2.5} พื้นที่จังหวัดแม่ฮ่องสอน ระหว่างปี พ.ศ.2560-2565	55
32 การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของฝุ่น PM _{2.5} พื้นที่จังหวัดเชียงราย ระหว่างปี พ.ศ. 2560-2565	56
33 การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของฝุ่น PM _{2.5} พื้นที่จังหวัดน่าน	57
34 การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของฝุ่น PM _{2.5} พื้นที่จังหวัดลำพูน	57

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
35 การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดแพร่ ระหว่างปี พ.ศ. 2560-2565	58
36 การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดพะเยา ระหว่างปี พ.ศ.2560-2565	59
37 การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดอุดรดิตถ์ ระหว่างปี พ.ศ.2560-2565	59
38 การเปลี่ยนแปลงรายรายปีของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ ระหว่างปี พ.ศ.2560-2565	60
39 การเปลี่ยนแปลงรายรายปีของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดลำปาง ระหว่างปี พ.ศ.2560-2565	61
40 การเปลี่ยนแปลงรายรายปีของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดแม่ฮ่องสอน ระหว่างปี พ.ศ. 2560-2565	61
41 การเปลี่ยนแปลงรายรายปีของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดเชียงราย ระหว่างปี พ.ศ.2560-2565	62
42 การเปลี่ยนแปลงรายรายปีของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดน่าน ระหว่างปี พ.ศ. 2560-2565	63
43 การเปลี่ยนแปลงรายรายปีของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดลำพูน ระหว่างปี พ.ศ. 2560-2565	63
44 การเปลี่ยนแปลงรายรายปีของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดแพร่ ระหว่างปี พ.ศ. 2560-2565	64
45 การเปลี่ยนแปลงรายรายปีของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดพะเยา ระหว่างปี พ.ศ.2560-2565	65
46 การเปลี่ยนแปลงรายรายปีของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดอุดรดิตถ์ ระหว่างปี พ.ศ.2560-2565	65
47 เข้าร่วมงาน “2023 KAOHSIUNG INTERNATIONAL INVENTION AND DESIGN EXPO” (KIDE 2023)	88

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันประเทศไทยกำลังประสบปัญหาด้านมลพิษทางอากาศอันเนื่องมาจากหมอกควันในเกือบทุกภูมิภาคของประเทศไทย โดยเฉพาะในพื้นที่ภาคเหนือตอนบน ซึ่งปัญหามลพิษทางอากาศในภาคเหนือนี้ส่งผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะปัญหาหมอกควัน (Wilawan Kumharn et al., 2022)) ฝุ่นละออง (aerosol) หมายถึง อนุภาคของแข็งและของเหลว หรือของผสมระหว่างของแข็งและของเหลวที่แขวนลอยอยู่ในอากาศ แต่ไม่รวมถึงเมฆและหมอกซึ่งมีลักษณะเป็นอนุภาคเช่นเดียวกัน (สุนทรโรภาส, 2548) ฝุ่นละอองที่เส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน $2.5\text{ }\mu\text{m}$ PM_{2.5} ตามคำจำกัดความของสำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อม (Environmental Protection Agency, EPA) หมายถึง ฝุ่นละอองแบบละเอียดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า $2.5\text{ }\mu\text{m}$ ฝุ่นละอองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน $10\text{ }\mu\text{m}$ PM₁₀ ตามความหมายของ EPA หมายถึง ฝุ่นละอองแบบหยาบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $2.5 - 10\text{ }\mu\text{m}$ ฝุ่นละออง PM_{2.5} จะมีผลกระทบต่อสุขภาพเป็นอย่างมาก เมื่อมนุษย์หายใจเข้าไปในปอดจะเข้าไปอยู่ในระบบทางเดินหายใจส่วนล่างทำให้เกิดโรคหอบหืด (Asthma) และฝุ่น PM_{2.5} ในบรรยากาศจะมีความสัมพันธ์กับอัตราการเพิ่มของผู้ป่วยที่เป็นโรคหัวใจและโรคปอดที่เข้ารับรักษาตัวในโรงพยาบาล เพิ่มอาการของโรคทางเดินหายใจ ประสิทธิภาพการทำงานของปอดลดลง และเกี่ยวข้องกับ การเสียชีวิตก่อนวัยอันควร โดยเฉพาะผู้ป่วยสูงอายุ ผู้ป่วยโรคหัวใจ โรคหอบหืด และเด็กจะมีอัตราเสี่ยงสูงกว่าคนปกติจากผลกระทบของฝุ่น

ไลดาร์ หรือ เลเซอร์ไลดาร์เป็นเครื่องมือยิงพัลส์ของแสงเลเซอร์ไปที่ชั้นบรรยากาศ ใช้สำหรับสังเกตการแจกแจงของละอองลอยและเมฆในชั้นบรรยากาศ โดยสังเกตรูปแบบแนวตั้ง (Vertical profile) ของสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับ หรือสัมประสิทธิ์

การลดทอนทำให้สามารถประมาณค่าความแตกต่างของอนุภาคเมฆที่เป็นน้ำและเป็นน้ำแข็งได้ และตรวจวัดประเภทของฝุ่นละอองได้ เครื่องไลดาร์กระเจิงแบบมี (Mie Scattering LiDAR) ทำงานโดยอาศัยหลักการเทคนิคออปติคัลรีโมทเซนซิง (Optical Remote Sensing) ที่ใช้การส่งสัญญาณจากแหล่งกำเนิดเลเซอร์ความยาวคลื่น $532\text{ }\mu\text{m}$ ด้วยการยิงสัญญาณลักษณะเป็นพัลส์แสงเลเซอร์ไปยังชั้นบรรยากาศเมื่อสัญญาณไปชนกับอนุภาคที่อยู่ในชั้นบรรยากาศทำให้สะท้อนกลับสู่เครื่องบันทึกการกระเจิงของแสง (backscattering light) ของแสง ซึ่งสามารถบันทึกสัญญาณที่เกิดการกระเจิงเป็นข้อมูลดิบซึ่งนำไปวิเคราะห์ต่อไปได้

จากการศึกษาเกี่ยวกับฝุ่นละอองและโรคระบบทางเดินหายใจเบื้องต้นพบว่า ฝุ่นละอองในประเทศไทยมีแหล่งกำเนิดที่หลากหลายและแตกต่างกันออกไปตามพื้นที่ (Janjai, Kumharn, & Laksanaboonsong, 2003; W. Kumharn, 2005; Wilawan Kumharn, Rimmer, Smedley, Ying, & Webb, 2012; Wilawan Kumharn, Sudhibrabha, & Hanprasert, 2015) ส่วนการศึกษาปริมาณของฝุ่นละอองในแต่ละภูมิภาคของประเทศไทยแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกภูมิภาค รวมทั้งสถานการณ์ของจำนวนผู้ป่วยระบบทางเดินหายใจมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นด้วย (Wilawan Kumharn & Hanprasert, 2016) ซึ่งเป็นพื้นฐานในงานวิจัยครั้งนี้ ส่วนการวิธีการที่ใช้ศึกษาในงานวิจัยนี้คือ วิธีการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองของฝุ่นละอองในแนวตั้งและแนวนอนโดยใช้ข้อมูลดาวเทียม ทำให้เกิดประโยชน์ต่อการความตระหนักของประชาชนเพื่อช่วยกันลดอันตรายที่จะเกิดขึ้นจากฝุ่นละอองได้

ในการพัฒนาแบบจำลองฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ จากข้อมูลดาวเทียมด้วยการทำงานเทคโนโลยีไลดาร์ภาคพื้นดินในประเทศไทยยังคงมีปัญหาในด้านเครื่องมือภาคพื้นดินมีจำนวนจำกัดไม่ครอบคลุมทุกที่ของประเทศไทย ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการวิจัยการพัฒนาแบบจำลองฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ จากข้อมูลดาวเทียมคาบิโซในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาหมอกควันที่เกิดขึ้น และเป็นฐานข้อมูลในการศึกษาฝุ่นละอองในแนวตั้ง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. การพัฒนาแบบจำลองฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ จากข้อมูลดาวเทียม CALIPSO
2. เพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยในระดับนานาชาติ

ขอบเขตการวิจัย

ในการวิจัยนี้จะทำการศึกษาในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย โดยใช้ข้อมูลภาคพื้นและข้อมูลดาวเทียม CALIPSO สำหรับการพัฒนาแบบจำลองฝุ่น PM_{2.5}

เลือกพื้นที่ศึกษา

บริเวณพื้นที่ภาคเหนือ ประกอบด้วย 9 จังหวัด ได้แก่ จังหวัดเชียงใหม่ ลำปาง แม่ฮ่องสอน เชียงราย น่าน ลำพูน แพร่ พะเยา และอุตรดิตถ์

ช่วงเวลาที่ใช้ในการศึกษา

ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2560-2565

คำจำกัดความที่ใช้ในงานวิจัย/(นิยามศัพท์เฉพาะ)

ในการวิจัยเรื่องการพัฒนาแบบจำลองฝุ่น PM_{2.5} จากข้อมูลดาวเทียมด้วยการใช้งานเทคโนโลยีไลดาร์ภาคพื้นดินในประเทศไทย ครั้งนี้ได้ให้นิยามศัพท์เฉพาะไว้ ดังนี้

1. โปรไฟล์ฝุ่นละออง (aerosol profile) หมายถึง การศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ในแนวตั้งด้วยการกระเจิงแสงของฝุ่นละออง

2. ฝุ่นละอองแบบละเอียด หมายถึง อนุภาคขนาดเล็กที่ลอยอยู่ในชั้นบรรยากาศ หรือที่ลอยอยู่ในสภาพแวดล้อมตามธรรมชาติ ตัวอย่างเช่น แก๊ส ของเหลว หรือผสมกัน ฝุ่นละอองในบรรยากาศเป็นตัวแปรสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการพยากรณ์อากาศ และยังมีอิทธิพลต่อการก่อตัวของเมฆ และส่งผลต่อสุขภาพของประชาชน ซึ่งในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาฝุ่น PM_{2.5} เป็นฝุ่นละอองแบบละเอียดมากมีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2.5 μm ในวันที่มีปริมาณฝุ่น PM_{2.5} เกินค่ามาตรฐานจะส่งผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจของประชาชน

3. เครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี หมายถึง เครื่องไลดาร์ที่ใช้สำหรับวัดการสะท้อนกลับของสัญญาณเลเซอร์ข้อมูลโปรไฟล์ฝุ่นละอองโดยใช้ทฤษฎีการกระเจิงแบบมี

4. ความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองในบรรยากาศ (AOD) เป็นการตรวจวัดค่าที่ส่งผ่านของรังสีของรังสีดวงอาทิตย์ที่ส่งผ่านอนุภาคต่าง ๆ ในบรรยากาศลงมายังพื้นผิวโลก เนื่องจากอนุภาคของฝุ่นละออง คาร์บอน และมลพิษที่อยู่ในชั้นบรรยากาศ มีคุณสมบัติการดูดกลืนและสะท้อนรังสีดวงอาทิตย์ ซึ่งตรวจวัดข้อมูลภาคพื้นดิน และข้อมูลดาวเทียม

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. การพัฒนาแบบจำลองฝุ่น PM2.5 จากข้อมูลดาวเทียมคาลิโพรในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย
2. เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศโลก
3. ตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัยในระดับชาติและนานาชาติ

กรอบแนวความคิดของงานวิจัย

ตาราง 1 กรอบแนวความคิดของงานวิจัย

Input (Resource)	Project/ Activities	Output	Outcomes	Final Outcomes (Impact)
ปัญหาหมอก ควันจากฝุ่น ละออง กลายเป็น ปัญหา ระดับประเทศ ที่ต้องรับการ แก้ไขอย่าง เร่งด่วน	1.การพัฒนา แบบจำลองฝุ่น PM2.5 จาก ข้อมูลดาวเทียม CALIPSO 2.เพื่อเผยแพร่ งานวิจัยใน ระดับนานาชาติ	ข้อเสนอแนะ เชิงนโยบาย แนวทางใน การลดวันที่มี ปริมาณฝุ่น ละออง เกินค่า มาตรฐาน องค์ความรู้ การพัฒนา แบบจำลองฝุ่น PM2.5 จาก ข้อมูล ดาวเทียม CALIPSO	ด้านนโยบาย ผลักดันนโยบายหรือ มาตรการแนวทางใน การบริหารจัดการ ด้านสังคม คน ชุมชน ท้องถิ่น สังคม ด้านวิชาการ การนำเสนองานวิจัย และนวัตกรรมไปใช้ ประโยชน์ ด้าน วิชาการ ทั้งการวิจัย การเรียนการสอน	-เป็นแนวทางใน การบริหาร จัดการ PM2.5 -ผลกระทบเชิง บวกต่อประชาชน ในพื้นที่เป้าหมาย เพื่อเป็นข้อมูล พื้นฐานนำไปสู่ สภาพแวดล้อมที่ ดีขึ้น อย่างยั่งยืน เพื่อยกระดับ คุณภาพชีวิตของ ประชาชน

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาวิจัยเรื่อง การพัฒนาแบบจำลองฝุ่น PM2.5 จากข้อมูลดาวเทียม CALIPSO ผู้วิจัยได้ศึกษารวบรวม แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องตามลำดับดังต่อไปนี้

ฝุ่นละออง

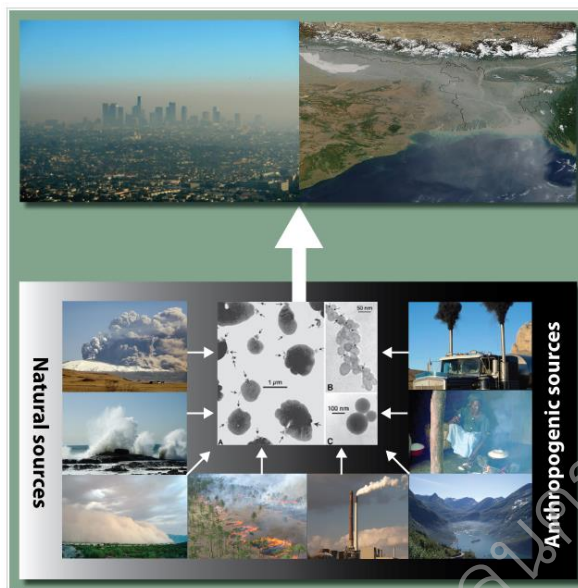
ฝุ่นละออง หมายถึง อนุภาคของแข็งหรือของเหลวที่ลอยอยู่ในบรรยากาศหรือสภาพแวดล้อมที่เป็นแก๊ส อาจเป็นอนุภาคเดี่ยว ๆ ของแข็ง ของเหลว หรือผสมกันระหว่างของแข็งและของเหลวก็ได้ (Halthore, Shettle, Markham, & Mango, 2008) ฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศจะเคลื่อนตัวอยู่ตลอดเวลาไปตามสภาพอากาศ ภูมิอากาศ และลักษณะทางอุตุนิยมวิทยา ฝุ่นละอองที่มีอยู่ในบรรยากาศจะมีอนุภาคตั้งแต่ขนาดเล็กที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าไปจนถึงขนาดใหญ่ที่มองเห็นด้วยตาเปล่า(วิลาวรรณ คำหาญ, 2560) การพิจารณาอนุภาคในบรรยากาศว่าเป็นฝุ่นละอองหรือไม่นั้น พิจารณาจากการ “ลอย (suspended)” ตัวอยู่ในบรรยากาศ หมายความว่า อนุภาคนั้นจะต้องมีช่วงเวลาที่อยู่ในอากาศ เช่น ควัน (smoke) ถือว่าเป็นฝุ่นละออง ส่วนหมอก (fog) และหยดน้ำ (raindrop) ไม่นับว่าเป็นฝุ่นละออง เพราะร่วงลงสู่พื้นเร็วเกินกว่าที่จะลอยอยู่ในอากาศ อะตอมอาร์กอนที่ลอยอยู่ในอากาศ ถึงแม้ว่าจะลอยในอากาศได้ แต่ก็ไม่นับว่าเป็นฝุ่นละออง เพราะวาร์กอนมีสถานะเป็นแก๊ส นอกจากนี้ ถ้าอัตราเร็วของการร่วงลงสู่พื้นดินของอนุภาคมีค่าเวลามากกว่า 0.5 m/s (Schery, 2001) ก็ไม่ถือว่าเป็นอนุภาคฝุ่นละอองเช่นกัน โดยทั่วไป ฝุ่นละอองเกิดจากสาเหตุ 2 ประการ คือ ฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (natural aerosols) ได้แก่ ดิน พงฝุ่น ละอองเกลือ ฝุ่นละอองภูเขาไฟ และ ฝุ่นละอองที่เกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ (anthropogenic aerosols) ได้แก่ ฝุ่นละอองที่เกิดจากการเผาไหม้ของซากพืช ซากสัตว์ และเครื่องยนต์ การคมนาคม และโรงงานอุตสาหกรรม

ฝุ่นละอองในบรรยากาศเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญและมีอิทธิพลต่อการพยากรณ์อากาศ การเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศและการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ รวมถึงผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตบนโลก นอกจากนี้ ฝุ่นละอองยังมีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นรังสีดวงอาทิตย์ที่ผ่านเข้ามาและกลับออกไปจากบรรยากาศโลก นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลต่อการก่อตัวของเมฆ ปัจจุบัน ฝุ่นละออง ที่เกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ ส่งผลให้เกิดภาวะโลกร้อน (global warming) เนื่องจากคาร์บอนดำ (black carbon) มีสมบัติในการดูดกลืนรังสีดวงอาทิตย์ที่ผ่านเข้ามาในบรรยากาศโลกเอาไว้ไม่ให้สะท้อนกลับออกสู่นอกบรรยากาศได้

ฝุ่นละอองแบ่งตามแหล่งกำเนิด

ฝุ่นละอองเมื่อถูกปล่อยออกจากแหล่งกำเนิด อาจลอยอยู่ในชั้นบรรยากาศหรือถูกพัดพาไปโดยอากาศและกระแสลม สามารถจำแนกตามแหล่งกำเนิดได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. **ฝุ่นละอองปฐมภูมิ (primary aerosol)** เป็นฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นและแพร่กระจายออกจากแหล่งกำเนิดไปสู่บรรยากาศโดยตรง ได้แก่ ฝุ่นละอองที่เกิดจากการเผาไหม้ของรถยนต์และโรงงานอุตสาหกรรม เกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ เกิดจากละอองน้ำทะเล (sea spray) และเกิดจากเกษตรกรรม ดังภาพประกอบ 1 ฝุ่นละอองปฐมภูมิมิรูปร่างไม่เป็นทรงกลม ขนาดใหญ่ และสะท้อนแสงน้อย ส่งผลพื้นผิวโลกเกิดปรากฏการณ์ความร้อน (warming effect)



ภาพประกอบ 1 แหล่งกำเนิดและลักษณะของฝุ่นละอองปฐภูมิ ที่มา (EDUCATION, 2013)

2. ฝุ่นละอองทุติยภูมิ (secondary aerosol) เป็นฝุ่นละอองที่เกิดขึ้นจากสะสมตัวของฝุ่น ฝุ่นละอองปฐภูมิ หรือฝุ่นละอองที่รวมตัวกับแก๊ส ของเหลว หรือของแข็ง โดยผ่านกระบวนการดูดซับเข้าสู่อนุภาค ฝุ่นละอองชนิดนี้เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชีวมวลและซากดึกดำบรรพ์ การปล่อยความร้อนใต้พิภพ มหาสมุทรทะเลสาบ แม่น้ำ ดิน พืช การก่อสร้าง และผลิตภัณฑ์สังเคราะห์อื่น ฝุ่นละอองทุติยภูมิโดยส่วนใหญ่จะมีรูปร่างเป็นทรงกลมขนาดเล็ก สะท้อนแสงได้ดีจึงส่งผลให้โลกเกิดปรากฏการณ์เย็นตัว

ฝุ่นละอองแบ่งตามขนาด

ฝุ่นละอองมีรูปร่างเป็นทรงกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลางกลาง $0.01 \mu\text{m} - 100 \mu\text{m}$ จำแนกออกได้ 3 ชนิด คือ ฝุ่นละอองแบบหยาบ ฝุ่นละอองแบบละเอียด ฝุ่นละอองแบบละเอียดมาก

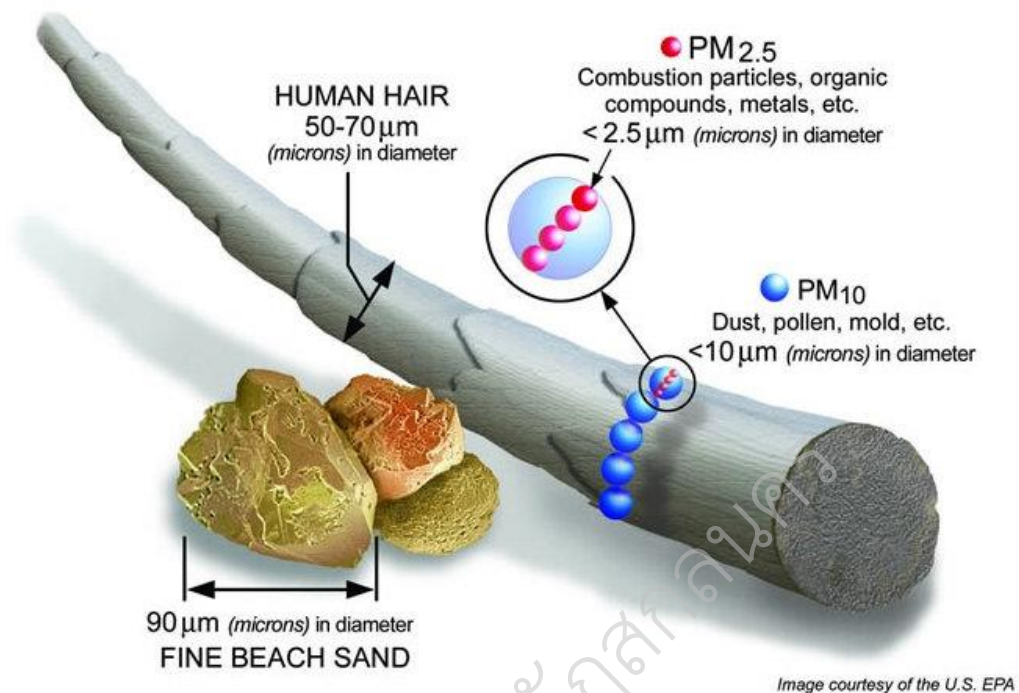
1. ฝุ่นละอองแบบหยาบ มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า $1 \mu\text{m}$ ประกอบด้วย เถ้าละอองแร่ ภูเขาไฟ ละอองละออง ส่วนใหญ่ฝุ่นละอองชนิดนี้มาจากกระบวนการทางกายภาพมีความเข้มข้นเชิงจำนวนน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับฝุ่นละอองชนิดอื่น ๆ มีช่วงอยู่ในอากาศสั้น มีอัตราการตกสะสมแบบแห้งสูง

2. ฝุ่นละอองแบบละเอียด ฝุ่นละอองชนิดนี้ แบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ แบบการสะสมตัวหรืออนุภาคขนาดใหญ่และแบบการเกิดนิวเคลียสหรืออนุภาคเอตคินด์

2.1 แบบการสะสมตัว ฝุ่นละอองชนิดนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $0.1-1\ \mu\text{m}$ เกิดจากกระบวนการจับตัวกันเป็นก้อนของอนุภาคเล็ก ๆ และการควบแน่นของก๊าซบนอนุภาค ความเข้มข้นเชิงจำนวนของฝุ่นละอองชนิดนี้มีค่ามากกว่าฝุ่นละอองแบบหยาบ ช่วงเวลาที่อยู่ในบรรยากาศนานประมาณ 1 สัปดาห์

2.2 แบบการเกิดแนวเคลือบ ฝุ่นละอองชนิดนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง $0.01-0.1\ \mu\text{m}$ เกิดจากกระบวนการควบแน่นของไอน้ำอิมิตัวที่เกิดจากการเผาไหม้ และการจับตัวกันเป็นก้อนของฝุ่นละอองขนาดเล็กที่เกิดจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงจากแก๊สไปเป็นอนุภาคในชั้นบรรยากาศองค์ประกอบส่วนใหญ่เกิดจากกำมะถันที่เกิดจากการออกซิเดชันของกำมะถันเป็นสารตั้งต้น ได้แก่ แก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ แก๊สคาร์บอนไดซัลไฟด์ แก๊สคาร์บอนิลซัลไฟด์ แก๊สเมทิลมีเทน และแก๊สไดเมทิลไดซัลไฟด์ การเผาไหม้จากเครื่องยนต์เป็นแหล่งกำเนิดหลักของฝุ่นละอองชนิดนี้ ฝุ่นละอองชนิดนี้มีขนาดเล็ก และมีการเคลื่อนแบบบราวน์ทำให้เกิดการชนของอนุภาคค่อนข้างสูง

3. ฝุ่นละอองละเอียดมาก มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่าหรือเท่ากับ $0.01\ \mu\text{m}$ เกิดจากการสะสมตัวของอนุภาคเป็นนิวเคลียสของแก๊ส เช่น ฝุ่นละอองของกรดซัลฟิวริก ฝุ่นละอองชนิดนี้จะทำหน้าที่เป็นแกนกลางในการก่อตัวเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ การก่อตัวจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงจากแก๊สไปเป็นอนุภาคและกระบวนการจับตัวกันเป็นก้อน ฝุ่นละอองชนิดนี้มีช่วงเวลาอยู่ในชั้นบรรยากาศสั้นกว่าอนุภาคชนิดอื่น ๆ ทำให้เราสังเกตเห็นฝุ่นชนิดนี้ใกล้กับแหล่งกำเนิดเท่านั้น ฝุ่นละอองที่เส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน $2.5\ \mu\text{m}$ PM_{2.5} และฝุ่นละอองมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน $10\ \mu\text{m}$ ดังภาพประกอบ 2

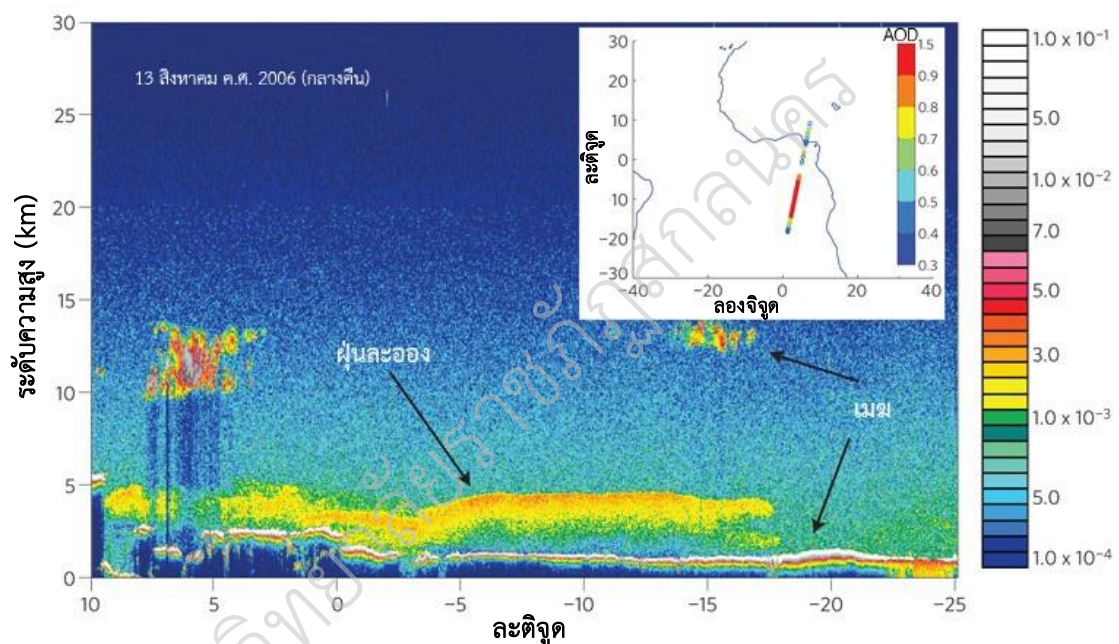


ภาพประกอบ 2 ฝุ่นละอองที่เส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 2.5 μm และฝุ่นละอองมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 10 μm ที่มา (NATIONAL, 2018)

ฝุ่นละอองที่เส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 2.5 μm PM_{2.5} ตามคำจำกัดความของสำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อม หมายถึง ฝุ่นละอองแบบละเอียดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 2.5 μm ฝุ่นละอองมีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 10 μm PM₁₀ ตามคำจำกัดความของ EPA หมายถึง ฝุ่นละอองที่มีผลละอองแบบหยาบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5–10 μm ฝุ่นละออง PM_{2.5} จะมีผลกระทบต่อสุขภาพเป็นอย่างมาก เมื่อหายใจเข้าไปในปอดจะเข้าไปอยู่ในระบบทางเดินหายใจส่วนล่าง ทำให้เกิดโรคหอบหืด ฝุ่น PM_{2.5} ในบรรยากาศจะมีความสัมพันธ์กับอัตราการเพิ่มของผู้ป่วยที่เป็นโรคหัวใจและโรคปอดที่เข้ารับการรักษาในโรงพยาบาล เพิ่มอาการของโรคทางเดินหายใจ ลดประสิทธิภาพการทำงานของปอด และเกี่ยวข้องกับการเสียชีวิตก่อนวัยอันควร โดยเฉพาะผู้ป่วยสูงอายุ ผู้ป่วยโรคหัวใจ โรคหอบหืด และเด็กจะมีอัตราเสี่ยงสูงกว่าคนปกติ (NATIONAL, 2018)

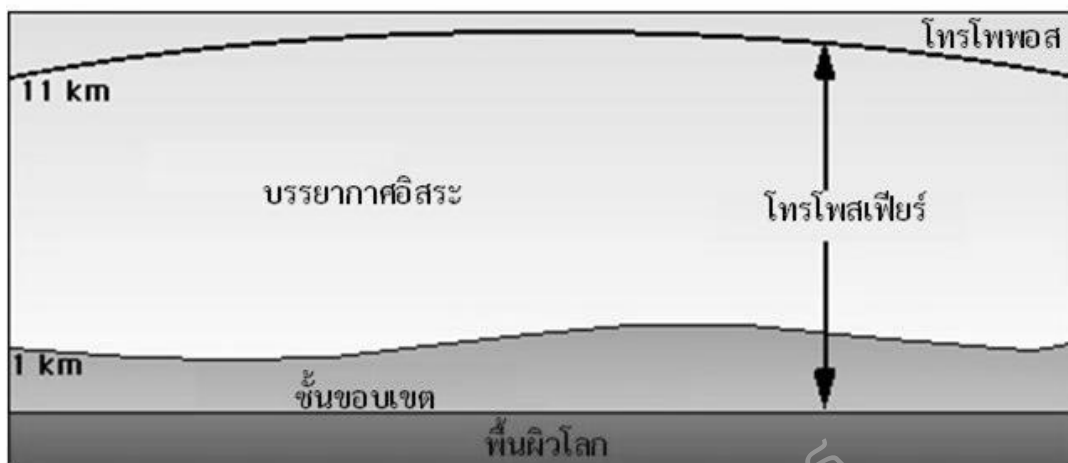
การกระจายของตัวฝุ่นตามความสูง

การกระจายตัวตามความสูงของฝุ่นละอองมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างในแนวตั้งของชั้นบรรยากาศ ดังภาพประกอบ 3 จากการศึกษาดังกล่าวไป บรรยากาศโลกที่ใกล้พื้นผิวโลกจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นวัฏจักรตามเวลาในรอบวัน ประกอบด้วย อุณหภูมิ ความชื้น และความเร็วลม ชั้นบรรยากาศดังกล่าวนี้เรียกว่า ชั้นขอบเขต (boundary layer) ซึ่งมีระยะความสูงจากพื้นผิวโลกประมาณ 1-2 km ดังภาพประกอบ.3



ภาพประกอบ 3 การกระจายตัวของฝุ่นละอองตามความสูงได้จาก Cloud Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations ที่มา (University of Washington and NASA Langley Research Center, 2009)

จากภาพประกอบ 3 อนุภาคฝุ่นละอองในภาพเกิดจากหมอกควันจากไฟภาพถ่ายนี้ได้มาจากบริเวณตะวันออกเฉียงใต้ของมหาสมุทรแอตแลนติก พบว่า การกระจายตัวของอนุภาคฝุ่นละออง โดยส่วนใหญ่อยู่ที่ระดับความสูงประมาณ 0-5 km เหนือพื้นผิวโลก



ภาพประกอบ 4 ฝุ่นละอองในชั้นขอบเขต และฝุ่นละอองในบรรยากาศอิสระชั้นโทรโพสเฟียร์
(Air pollution training Institute, 2016)

ฝุ่นละอองในชั้นขอบเขต และฝุ่นละอองในบรรยากาศอิสระชั้นโทรโพสเฟียร์
แสดงดังภาพประกอบ 4 โดยฝุ่นละอองในชั้นขอบเขตอยู่ที่ระดับความสูงตั้งแต่ 0-2 km
ส่วนขนาดของฝุ่นละอองที่พบในระดับความสูงต่าง ๆ แสดงได้ดังภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 ปริมาณและชนิดของฝุ่นละอองที่พบที่ระดับความสูงต่าง ๆ ของ
บรรยากาศ (N เป็นจำนวนของอนุภาค/cm³) (Iqbal, 1983)

สมบัติของแสง (Optical of light)

การค้นพบธรรมชาติของแสงก่อนศตวรรษที่ 17 การศึกษาเรื่องแสงมีความเชื่อกันว่า แสงเป็นอนุภาคที่ถูกส่งออกมาจากต้นกำเนิดแสงซึ่งสามารถผ่านทะลุวัตถุโปร่งใสและสะท้อนจากผิวของวัตถุทึบแสงได้ เมื่ออนุภาคเหล่านี้ผ่านเข้าสู่ตาจะทำให้เกิดการมองเห็นนิวตัน (Newton) ได้เสนอทฤษฎีอนุภาคของแสง (Particle Theory) ซึ่งสามารถอธิบายปรากฏการณ์สะท้อนและการหักเหของแสง ฮอยเกนส์ (Christian Huygen) ได้เสนอทฤษฎีเกี่ยวกับคลื่นแสง (Wave Theory) กล่าวว่าแสงเป็นแม่เหล็กไฟฟ้าและเดินทางในลักษณะของคลื่น ยังแสดงให้เห็นว่า กฎการสะท้อนและการหักเหสามารถอธิบายได้โดยใช้ทฤษฎีคลื่นแสง ทอมัส ยัง (Thomas Young) ได้ค้นพบปรากฏการณ์การแทรกสอดของแสง เฟรสนีล (Augustin Fresnel) ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับการแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของแสง สามารถมองเห็นในช่วงความยาวคลื่น 400–700 μm และมีความถี่อยู่ในช่วง 10³–10⁵ Hz แสงสีม่วงมีความยาวคลื่นน้อยที่สุด หรือความถี่มากที่สุดจนไปถึงความถี่น้อยที่สุด ดังภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 แสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงที่ตามองเห็น

ที่มา (<https://ngthai.com/science/31390/light-and-properties/>)

แสง (light) คือ เป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้ารูปแบบหนึ่งที่เดินทางผ่านอวกาศเป็นคลื่นเช่นเดียวกับไมโครเวฟและรังสีเอกซ์ คลื่นเหล่านี้มีความยาวคลื่นและมีความถี่มนุษย์มีตัวรับที่สามารถรับรู้พลังงานที่มีความยาวคลื่นระหว่าง 400–700 μm และ

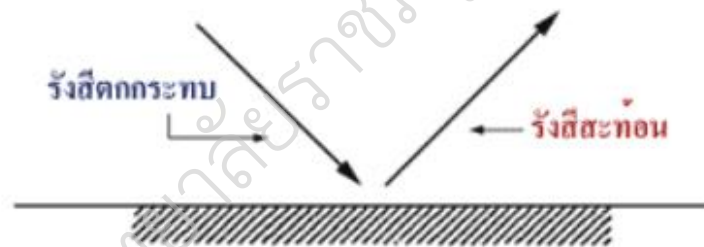
เปลี่ยนเป็นภาพ (Neonics, 2020) แสงมีคุณสมบัติที่สำคัญ 4 ข้อได้แก่ การเดินทางเป็นเส้นตรง (Rectilinear propagation) การหักเห (Refraction) การสะท้อน (Reflection) และการกระจาย (Dispersion) การเดินทางแสงเป็นเส้นตรงในตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเห (refractive index ; n) ของแสงเท่ากัน แสงจะเดินทางเป็นเส้นตรงโดยค่า n สามารถหาได้จากสมการ

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.1)$$

เมื่อ c คือ ความเร็วของแสงในสุญญากาศ

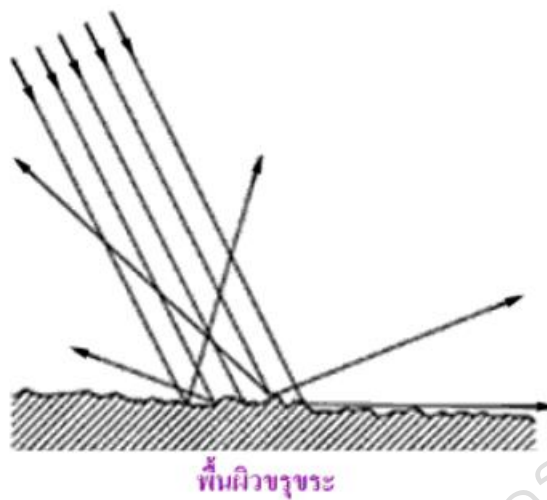
v คือ ความเร็วของแสงในตัวกลาง

การสะท้อนแสง สมบัติการสะท้อนของแสงสามารถจำแนกออกได้ 2 ลักษณะ คือ การสะท้อนแบบปกติ (Regular reflection) จะเกิดขึ้นเมื่อแสงตกกระทบกับวัตถุที่มีผิวเรียบมันวาวดังภาพประกอบ 7



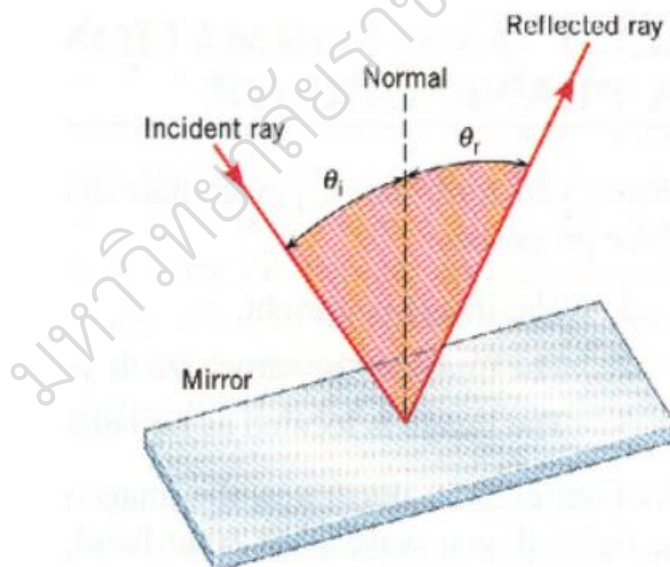
ภาพประกอบ 7 การสะท้อนแบบปกติ (Regular reflection)

การสะท้อนแบบกระจาย (Diffuse reflection) จะเกิดขึ้นเมื่อแสงตกกระทบวัตถุที่มีผิวขรุขระดังภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 การสะท้อนแบบกระจาย

โดยการสะท้อนของแสงไม่ว่าจะเป็นแบบใดก็ตามจะต้องเป็นไปตามกฎการสะท้อนของแสงที่ว่า “มุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ” ซึ่งแสดงให้เห็นในภาพประกอบ 9

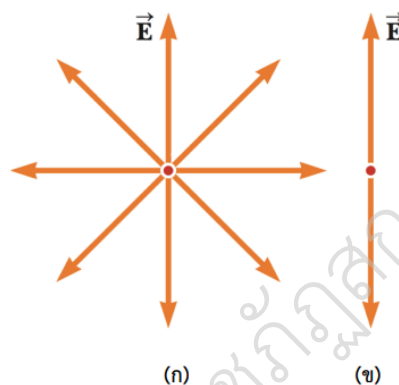


ภาพประกอบ 9 กฎการสะท้อนของแสงมุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ

การหักเหของแสง (Refraction) การหักเหการหักเหของแสงจะเกิดขึ้นเมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางที่มีค่าดัชนีการหักเหไม่เท่ากัน โดยลำแสงที่ตกกระทบจะต้องไม่ทำมุมฉากกับรอยต่อระหว่างตัวกลางทั้งสอง และมุมตกกระทบต้องมีค่าไม่เกินมุมวิกฤต (Critical angle ;) โดยการหักเหของแสงสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กรณี คือ

โพลาไรเซชันของแสง (Polarization of light)

การเคลื่อนที่แม่เหล็กไฟฟ้ามีเวกเตอร์สนามไฟฟ้า (E) สันอยู่ในทิศทางเดียว ทิศของสนามไฟฟ้านี้เรียกว่าเป็นทิศโพลาไรซ์เซชันของคลื่น กรณีที่คลื่นมีสนามไฟฟ้าสันอยู่ในหลายทิศทางจะเป็นคลื่นแบบไม่โพลาไรซ์ (Unpolarized Wave) โพลาไรซ์เซชันของแสงมีหลายชนิด คือ โพลาไรซ์เชิงเส้น (Linear Polarization) หรือโพลาไรซ์ (Plane Polarization) สนามไฟฟ้าสันในทิศทางเดียวกันตลอดเวลา ดังแสดงในภาพประกอบ 10

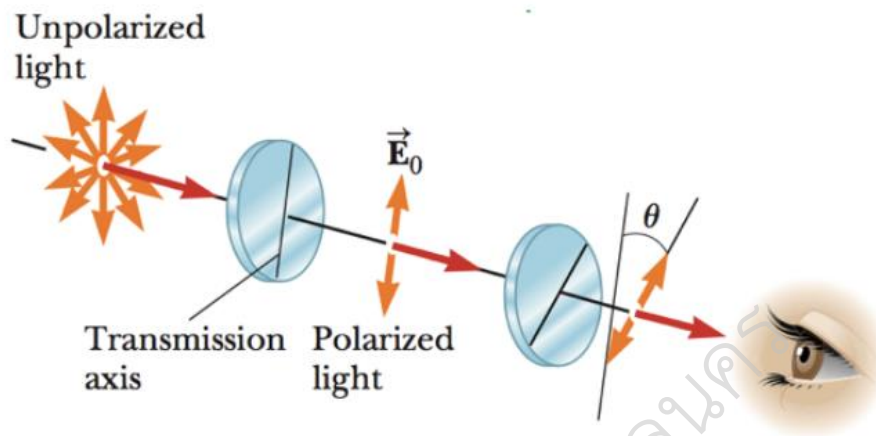


ภาพประกอบ 10 สนามไฟฟ้าของแสง (ก) สนามไฟฟ้าของแสงไม่โพลาไรซ์
(ข) สนามไฟฟ้าของแสงโพลาไรซ์
ที่มา (ชีวะ ทศนา, 2560)

1. โพลาไรเซชันโดยการดูดกลืน

เนื่องจากแสงไม่โพลาไรซ์มีการแกว่งหรือการสั่นของสนามไฟฟ้ารอบทิศทางแบบสุ่มแต่สามารถแยกองค์ประกอบได้เป็นสองแกนหลักซึ่งตั้งฉากกันคือในแนวแกนนอน (แกน x) และแกนตั้ง (แกน y) เท่านั้น ดังนั้นแสงไม่โพลาไรซ์นั้นจึงสามารถทำให้แสงโพลาไรซ์ วัตถุที่สามารถดูดกลืนสนามไฟฟ้าในแนวที่ตั้งฉากกับแกนส่งผ่าน (transmission axis) ของวัตถุเรียกว่า โพลารอยด์ (Polaroid) ทำให้ทำให้แสงผ่านออกมาเป็นโพลาไรซ์ ดังภาพประกอบ 11 เมื่อนำแผ่นโพลารอยด์ P_1 ซึ่งมีแกนส่งผ่านในแนวตั้งมาขวางทางเดินของแสงไม่โพลาไรซ์ ปรากฏว่า แผ่นโพลารอยด์ยอมให้สนามไฟฟ้าของคลื่นแสงมีทิศเดียวกับแกนส่งผ่านเท่านั้นที่สามารถเดินทางผ่านแผ่นโพลารอยด์ไปได้ เรียกแผ่นโพลารอยด์ P_1 ว่าโพลาไรเซอร์ (polarizer) และใช้แผ่นโพลารอยด์ P_2 เป็นตัววิเคราะห์ (analyzer) ว่า แสงที่ผ่านแผ่นโพลารอยด์ P_1 เป็นแสงโพลาไรซ์หรือไม่ โดยนำแผ่นโพลาไรซ์ P_2 มาขวางทางเดินแสงโดยให้แกนส่งผ่านตั้งฉากกับแกนส่งผ่านของแผ่นโพลารอยด์ P_1 ถ้า

ไม่มีแสงเดินทางผ่านโพลาไรซ์ P₂ ออกมาได้เลย แสดงว่า แสงที่เดินทางผ่านแผ่นโพลาไรซ์ P₁ เป็นแสงโพลาไรซ์ที่มีความเข้มแสงเป็น I_0 และสนามไฟฟ้า E_0



ภาพประกอบ 11 โพลาไรซ์เซชันโดยการดูดกลืนด้วยแผ่นโพลาไรซ์
ที่มา (ชีวะ ทัศนฯ, 2560)

ถ้าวางแผ่นโพลาไรซ์ P₂ (ตัววิเคราะห์) โดยให้แกนส่งผ่านทำมุม θ กับแนวของสนามไฟฟ้า E_0 ที่ผ่านออกมาจากแผ่นโพลาไรซ์ P₁ แล้วสนามไฟฟ้าที่เดินทางผ่านแผ่นโพลาไรซ์ P₂ ออกมาจะมีค่าเป็น $E_0 \cos \theta$ และเนื่องจากความเข้มของแสงแปรผันตรงกับแอมพลิจูดยกกำลังสอง ดังนั้นความเข้มของแสงที่ผ่านตัววิเคราะห์ออกมาคือ $I = E_0^2 \cos^2 \theta$ และ $I = E_0^2$ ดังนั้นความเข้มแสงผ่านตัววิเคราะห์ออกมาจึงเป็นไปตามสมการ

$$I = E_0^2 \cos^2 \theta \quad (2.2)$$

เรียกว่ากฎของมาลัส (Malus Law)

เมื่อ I_0 คือ ความเข้มสูงสุดของแสงที่ตกกระทบบตัววิเคราะห์ (แผ่นโพลาไรซ์ P2)

E_0 คือ มุมระหว่างแกนส่งผ่านของแผ่นโพลาไรซ์ P₁ และ P₂
ความเข้มของแสงที่เดินทางผ่านตัววิเคราะห์ (แผ่นโพลาไรซ์ P₂) จะมีค่าสูงสุดเมื่อแนวของแกนส่งผ่านทำมุม 0 หรือ π และความเข้มแสงเป็น ศูนย์ เมื่อ $\theta = \pi/2$ หรือ $3\pi/2$ ดังนั้น ถ้าหมุนตัววิเคราะห์แล้ว ความเข้มแสงที่ผ่านออกมาจะต้องมีค่าอยู่ระหว่าง 0 กับ I_0 แสดงว่าเป็นแสงโพลาไรซ์ แต่ถ้าความเข้มของแสงที่ผ่านออกมาไม่เปลี่ยนแปลง

แสดงเป็นแสงไม่โพลาไรซ์หรือเป็นแสงโพลาไรซ์บางส่วน ซึ่งสามารถหาเปอร์เซ็นต์ของการโพลาไรซ์ P ได้โดยการหมุนตัววิเคราะห์หาความเข้มแสงสูงสุด $I_{\max}$ และต่ำสุด $I_{\min}$ แล้วนำไปคำนวณด้วยสมการ

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \times 100\% \quad (2.3)$$

ถ้า $P = 100\%$ แล้ว แสดงว่าแสงตกกระทบเป็นแสงโพลาไรซ์

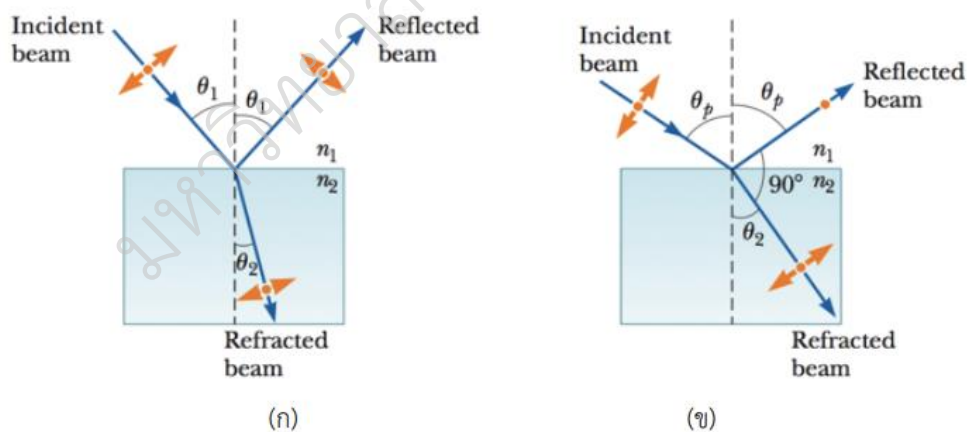
ถ้า $P = 0$ แล้วแสดงว่า เป็นแสงไม่โพลาไรซ์

ถ้า $0 < P < 100\%$ แสดงว่าแสงที่ตกกระทบตัววิเคราะห์เป็นแสงโพลาไรซ์

บางส่วน

2. โพลาไรเซชันโดยการสะท้อน

เมื่อแสงไม่โพลาไรซ์ ตกกระทบลงบนผิวของตัวกลาง เช่น ผิวน้ำ ผิวแก้ว แล้วแสงที่สะท้อนออกมาของตัวกลางอาจจะเป็นแสงโพลาไรซ์หรือแสงไม่โพลาไรซ์ก็ได้ซึ่งจะขึ้นอยู่กับมุมตกกระทบ ทั้งนี้ ถ้าแสงตกกระทบทำมุม 0° หรือ 90° กับผิวของตัวกลางแล้วแสงสะท้อนออกมาจะเป็นแสงไม่โพลาไรซ์ และจากการทดลองพบว่า มีมุมตกกระทบค่าหนึ่งที่แสงสะท้อนเป็นโพลาไรซ์



ภาพประกอบ 12 โพลาไรซ์เซชันโดยการสะท้อน

(ก) มุมตกกระทบ θ ใด ๆ (ข) ที่มุมตกกระทบเท่ากับมุมโพลาไรซ์ (ซีวะ ทัศนฯ, 2560)

ภาพประกอบ 12 แสดงแสงไม่โพลาไรซ์ที่ประกอบด้วยสนามไฟฟ้าสองแนวคือแนวตั้งฉาก (จุด) และแนวขนาน (ลูกศร) กับระนาบของแสงกระทบโดยสนามไฟฟ้าทั้งสอง

แนวนั้นมีแอมพลิจูดเท่ากัน เมื่อแสงไม่โพลาไรซ์ตกกระทบกับผิวของตัวกลางด้วยมุมตกกระทบ θ ค่าหนึ่ง ๆ ดังภาพประกอบ 12 (ก) แล้วเราจะพบว่าทั้งรังสีสะท้อนและรังสีหักเหเป็นแสงโพลาไรซ์บางส่วนและถ้าปรับมุมกระทบไปจนกระทั่งถึงมุมตกกระทบค่าหนึ่งที่ทำให้รังสีสะท้อนกับรังสีหักเหตั้งฉากซึ่งกันและกันแล้วแสงที่สะท้อนจะเป็นโพลาไรซ์ที่มีสนามไฟฟ้าตั้งฉากกับระนาบการเคลื่อนที่แสงที่แสงสะท้อนจากผิวตัวกลางดังภาพประกอบ 12 (ข) และเรียกมุมตกกระทบที่ทำให้เกิดแสงโพลาไรซ์ดังกล่าวนี้ว่า มุมโพลาไรซ์ (Polarizing Angle ; θ_p) หรือ มุมบริวสเตอร์ (Brewster's Angle) ซึ่งจากภาพประกอบ 7.3 และ จากกฎของสเนล จะได้

$$n_1 \sin \theta_p = n_2 \sin \theta_2 \text{ และ } \theta_p + 90^\circ + \theta_2 = 180^\circ \quad (2.4)$$

จะได้

$$\theta_2 = 90^\circ + \theta_p \quad (2.5)$$

แทนค่าสมการ

$$n_1 \sin \theta_p = n_2 \sin(90^\circ + \theta_p) \quad (2.6)$$

$$n_1 \sin \theta_p = n_2 \cos \theta_p \quad (2.7)$$

ดังนั้นจะได้

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \theta_p}{\cos \theta_p} = \tan \theta_p \quad (2.8)$$

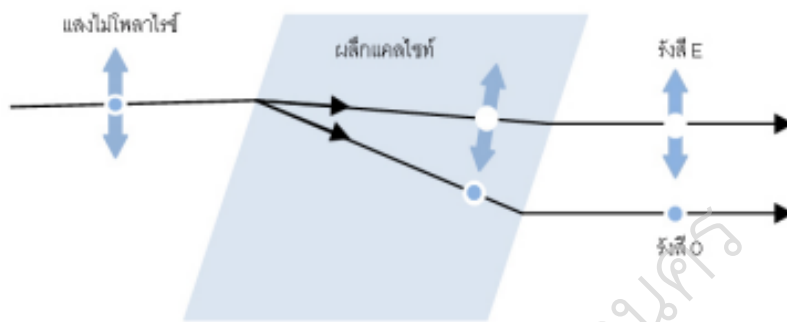
ถ้า n_1 คือ ดรรชนีหักเหของแสงในอากาศ และ n_2 คือดรรชนีหักเหของตัวกลางใด ๆ แล้วจะได้

$$n_2 = \tan \theta_p \quad (2.9)$$

3. โพลาไรเซชันโดยการหักเหสองแนว

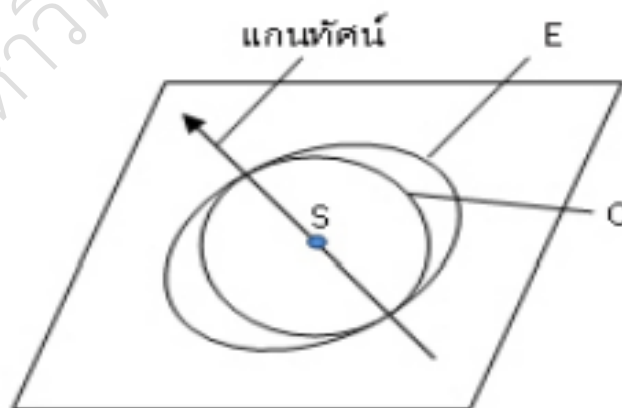
แสงเดินทางผ่านเข้าไปในตัวกลางที่เป็นสัณฐาน (amorphous : วัสดุที่อะตอมเรียงตัวกันแบบสุ่ม เช่น แก้ว) ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแสงจะเท่ากันในทุกทิศทาง เพราะ แก้วที่มีดรรชนีหักเหค่าเดียวเท่านั้น แต่ถ้าแสงเดินทางผ่านตัวกลางที่เป็นผลึก (crystalline : วัสดุที่อะตอม เรียงตัวเหมือนกัน อาทิเช่น โซเดียมแคลไซต์ และควอตซ์) ความเร็วของแสงในแต่ละทิศทางจะมีค่าไม่เท่ากันโดยขึ้นอยู่กับทิศทางการแผ่ของคลื่นและระนาบโพลาไรเซชันของแสง โดยจะเรียก ปรากฏการณ์ที่วัสดุมีดรรชนีหักเหสองค่านี้ว่าการหักเหสองแนว (double refracting หรือ birefringent)

เมื่อแสงไม่โพลาไรซ์เคลื่อนที่เข้าไปในผลึกแคลไซต์ แสงไม่โพลาไรซ์จะแยกออกเป็นรังสีธรรมดาหรือรังสี O (Ordinary Ray) และรังสีพิเศษหรือรังสี E (Extraordinary Ray) ดังแสดงในภาพประกอบ 13 และรังสีของแสงทั้งสองแนวจะเป็นแสงโพลาไรซ์ที่ตั้งฉากกัน และจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วและทิศทางที่แตกต่างกัน



ภาพประกอบ 13 การหักเหสองแนวเมื่อแสงไม่โพลาไรซ์ผ่านผลึกแคลไซต์
ที่มา (ชีวะ ทศนา, 2560)

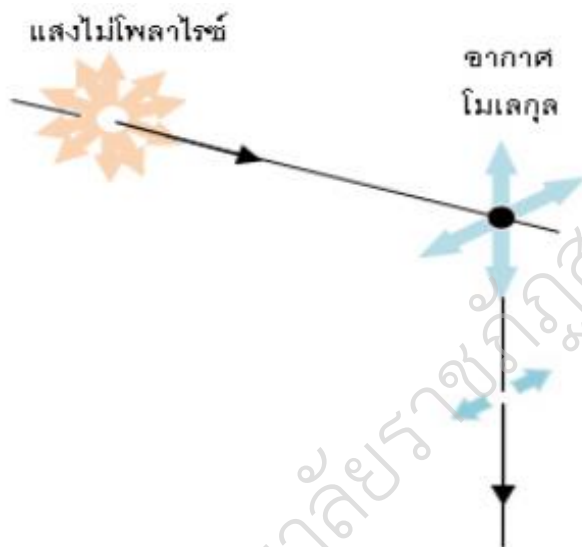
ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแสงโพลาไรซ์ทั้งสองแนวจะสัมพันธ์กับค่าดัชนีหักเห n_o และ n_e เมื่อ n_o มีค่าเท่ากันในทุกทิศทาง ดังนั้นแสงโพลาไรซ์ที่แผ่ขยายจึงมีลักษณะเป็นวงกลม (รังสี O) และ n_e มีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางของการแพร่ของคลื่นซึ่งจะทำให้หน้าคลื่นเป็น ภาพวงรีดังภาพประกอบ 14 เรียก ทิศทางที่คลื่นทั้งสองแนวมีความเร็วเท่ากันว่า แกนทัศน (Optic Axis)



ภาพประกอบ 14 คลื่นวงกลม (รังสี O) และคลื่นวงรี (รังสี E) ในผลึก
ที่มา (ชีวะ ทศนา, 2560)

4. โฟลาไรเซชันโดยการกระเจิง

เมื่อแสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบกับอนุภาค เช่น แก๊สหรืออิเล็กตรอนในโมเลกุลของตัวกลางอนุภาคจะดูดกลืนพลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แล้วแผ่ขยายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาทุกทิศทาง ปรากฏการณ์นี้ เรียกว่า การกระเจิง (Scattering) และเมื่อแสงไม่โพลาไรซ์ไปตกกระทบกับอนุภาค แสงที่กระเจิงออกมาจะเป็นแสงโพลาไรซ์ซึ่งตรวจสอบได้โดยการสังเกตความเข้มของแสงที่เปลี่ยนไป เมื่อมองแผ่นแผ่นโพลาไรซ์ที่มุมต่างๆ



ภาพประกอบ 15 การกระเจิงของแสงไม่โพลาไรซ์โดยโมเลกุลในอากาศ
ที่มา (ชีวะ ทัศนฯ, 2560)

แสงจากดวงอาทิตย์เป็นแสงที่ไม่โพลาไรซ์ เมื่อตกกระทบกับโมเลกุลในอากาศ จะทำให้อิเล็กตรอนในโมเลกุลสั่นโดยที่สนามไฟฟ้าในแนวราบจะทำให้อิเล็กตรอนสั่นในแนวราบ และสนามไฟฟ้าในแนวตั้ง จะทำให้อิเล็กตรอนสั่นในแนวตั้ง ดังนั้นแสงที่กระเจิงออกมานอกจากการสั่นในแนวราบจะเป็นแสงโพลาไรซ์ที่มีทิศโพลาไรเซชันในแนวราบ และแสงที่กระเจิงออกมาในแนวตั้งจะเป็นแสงโพลาไรซ์ที่มีทิศของการโพลาไรเซชันในแนวตั้ง ดังภาพประกอบ 15

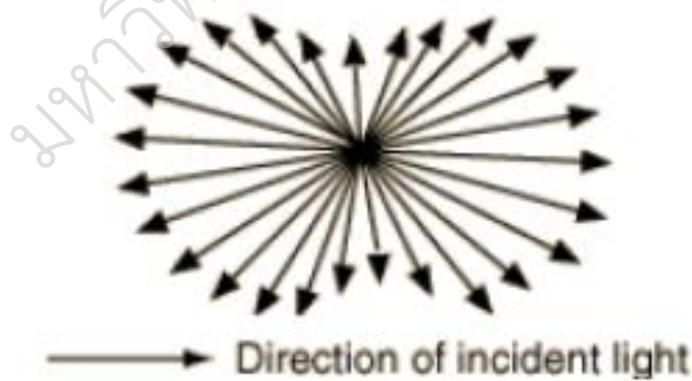
การกระเจิงของแสงในชั้นบรรยากาศของโลกจะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของแสง เนื่องจากอนุภาคในอากาศมีขนาดใกล้เคียงกับความยาวคลื่นแสงในช่วงที่เรามองเห็น (~400–700 μm) และจะกระเจิงแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นได้มากกว่าแสงที่มีความยาวคลื่น

ยาว ดังนั้น แสงสีครามหรือสีฟ้าจึงกระเจิงแสงออกมาได้มากกว่าแสงสีเหลืองและแสงสีแดง ซึ่งเมื่อแสงเดินทางในแนวเกือบตั้งฉากกับดวงอาทิตย์จึงมองเห็นแสงที่กระเจิงออกมาส่วนใหญ่เป็น สีฟ้า และสีคราม ส่วนแสงสีเหลืองและสีแดงซึ่งมีความยาวคลื่นมากกว่าจะเคลื่อนที่ไปตามการเดินทางของแสงที่ส่งผ่าน โมเลกุลของบรรยากาศและในช่วงเวลาเย็นๆ ขณะที่ดวงอาทิตย์กำลังจะลับขอบฟ้า จะเห็นแสงสีแดงหรือสีเหลือง ทั้งนี้เนื่องจากขณะนั้นดวงอาทิตย์อยู่ไกลออกไปในท้องฟ้า แสงจากดวงอาทิตย์ใช้เวลานานจะเดินทางผ่านบรรยากาศมาถึงผู้สังเกต แสงสีฟ้าและสีครามส่วนใหญ่จะถูกกระเจิงออกไปนอกโลกเหลือแต่แสงสีแดงและสีส้ม จึงทำให้มองเห็นท้องฟ้าเป็นสีแดงและสีส้ม แต่ถ้าโลกไม่มีอากาศห่อหุ้มท้องฟ้าจะมีมืดมิด จะเห็นแสงได้เฉพาะในทิศที่ดวงอาทิตย์อยู่เท่านั้น ดังนั้นท้องฟ้าที่สวยงามในโลกของเราจึงเกิดจากการกระเจิงของแสงสีต่างๆ ซึ่งมีความยาวคลื่นไม่เท่ากันนั่นเองที่เป็นสาเหตุที่ทำให้ฟ้าเปลี่ยนสี (ชีวะ ทัศนฯ, 2560)

การกระเจิงแสง (Scattering of light)

1. การกระเจิงแสงแบบเรย์ไลย์ (Rayleigh Scattering Theory)

การกระเจิงแสงแบบเรย์ไลย์ สามารถวัดอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบซึ่งใช้กับอนุภาคขนาดเล็กลักษณะทรงกลมซึ่งการกระเจิงแสงอยู่ในรูปแบบเท่ากันทุกทิศทางอธิบายได้จากรูป 16



ภาพประกอบ 16 การกระเจิงแสงแบบเรย์ไลย์ (Rayleigh scattering)

ภาพประกอบ 16 อธิบายได้ว่าเมื่อแสงตกกระทบบนอนุภาคขนาดเล็กเปรียบเทียบกับค่า $\alpha \ll 1$ จะทำให้เกิดปรากฏการณ์การกระเจิงแสงในทุกทิศทางที่มีขนาด

ค่าความเข้มแสงกระเจิงเท่ากันซึ่งถูกเรียกว่าการกระเจิงแสงแบบเรย์ไลย์ โดยหาได้จากสมการ

$$I_{Ray} = I_0 \frac{(1 + \cos^2 \theta)}{2R^2} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right)^2 \left(\frac{D}{2} \right)^6 \quad (2.10)$$

$$I_{\perp}^s(\theta) = \frac{4\pi D^6}{4\lambda^4 R^2} \left| \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right|^2 I_{\perp}^0 \quad (2.11)$$

$$I_{\parallel}^s(\theta) = \frac{4\pi D^6}{4\lambda^4 R^2} \left| \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \right|^2 \cos^2 \theta I_{\parallel}^0 \quad (2.12)$$

เมื่อ I_0 คือ ค่าความเข้มแสงที่ตกกระทบ

θ คือ มุมของแสงที่ตกกระทบ

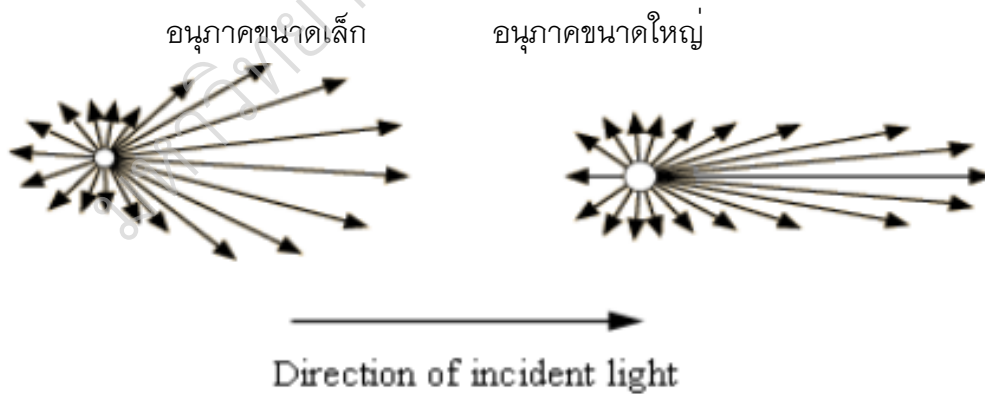
R คือ ระยะทางถึงอนุภาค

n คือ ค่าดัชนีหักเหของอนุภาค

D คือ ขนาดของอนุภาค หรือ $2r$ (r คือรัศมี)

2. การกระเจิงแสงแบบมี (Mie Scattering Theory)

การกระเจิงแสงแบบมี เป็นการกระเจิงที่เกิดขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดประมาณเท่ากับหรือใหญ่กว่าความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบเมื่อเทียบกับการกระเจิงแสงแบบเรย์ไลย์แสดงใน ภาพประกอบ 17



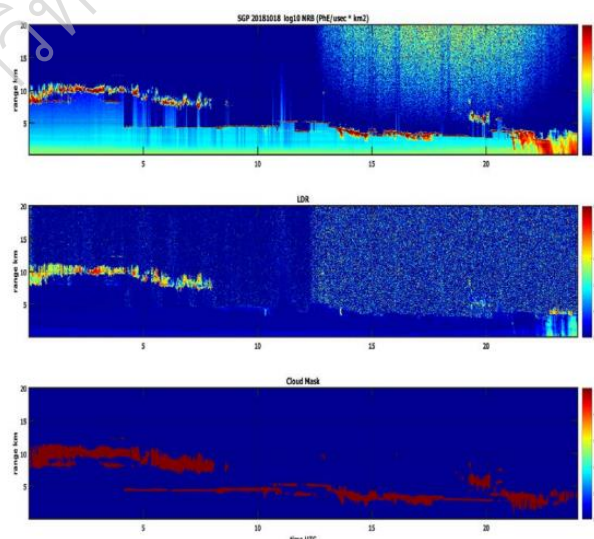
ภาพประกอบ 17 การกระเจิงแสงแบบมี (Mie scattering)

จากรูป อธิบายได้ว่าเมื่อแสงตกกระทบอนุภาคเปรียบเทียบกับค่า $\alpha \approx 1$ จะทำให้เกิดปรากฏการณ์การกระเจิงแสงที่มีลักษณะขนาดค่าความเข้มแสงกระเจิงค่ามากในทิศทางตรงกันข้ามกับแสงที่ตกกระทบประกอบด้วย 2 รูปแบบ คือ แบบมีอนุภาคที่มีขนาดเล็ก

และแบบมีอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้นซึ่งรูปแบบการกระเจิงแสงแบบมีทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ นั้นให้ค่าความเข้มของการกระเจิงแสงมีทิศไปข้างหน้ามากกว่าทิศทางอื่น ๆ และแตกต่างกันตรงที่ค่าความเข้มการกระเจิงแสงของขนาดใหญ่จะให้ค่าความเข้มมากกว่าขนาดเล็กโดยขึ้นอยู่กับขนาดซึ่งถูกเรียกว่าการกระเจิงแสงแบบมี

Normalized Relative Backscatter (NRB)

Normalized Relative Backscatter หรือเรียกว่า การกระจายกลับแบบสัมพัทธ์แบบปกติ (Zhang, 2020) คืออัลกอริทึมการตรวจจับเมฆใน MPLCMASK ช่วงที่มีการแก้ไขสัญญาณ Lidar ที่ปรับค่าพลังงานให้เป็นมาตรฐาน พร้อมการสอบเทียบและการแก้ไขเฉพาะเครื่องมือทั้งหมดที่ใช้ ยกเว้นค่าคงที่ของระบบ Lidar (C) ด้วยเหตุนี้ NRB จึงไม่ใช่หน่วยวัด SI แต่เป็นความแรงของสัญญาณสัมพัทธ์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับกำลังสัญญาณของเลเซอร์อุปกรณ์ (รวมถึงหน้าต่างที่ใช้ในการรวบรวมข้อมูล) NRB นั้นคล้ายคลึงกับระดับ EOS: L1A การแปลงเป็นข้อมูล L1B Attenuated Backscatter (หน่วย SI) ที่สอบเทียบอย่างสมบูรณ์จำเป็นต้องมีการกำหนดค่าคงที่ของระบบ C และการทำให้เป็นมาตรฐานของสัญญาณตามมา NRB ยังมีเครื่องมือวินิจฉัยทั้งหมด เช่น พลังงานเลเซอร์ พื้นหลังแสงอาทิตย์ (อัตราการนับ) และอุณหภูมิเครื่องมือที่สำคัญต่าง ๆ (สภาพแวดล้อม ตัวตรวจจับ เลเซอร์ ฯลฯ) ดังภาพประกอบ 18



ภาพประกอบ 18 ตัวอย่างกราฟของ NRB, LDR and Cloud mask for MPLCMASK ที่มา (Zhang, 2020)

จากสัญญาณการสะท้อนกลับของ Lidar จะสามารถคำนวณ NRB ได้จากสมการดังต่อไปนี้ (Zhang, 2020)

$$NRB = \frac{(n(r)Dtc[n(r)] - n(r)_{ap} - n_b)r^2}{o(r)E} \quad (2.13)$$

เมื่อ $n(r)$ คือ MPL Raw Counts

$Dtc[n(r)]$ คือ Detector Dead-Time Correction

$n(r)_{ap}$ คือ After pulse Correction

n_b คือ Background Correction

r^2 คือ Range Squared

$o(r)$ คือ Overlap Correction

E คือ Energy

นอกจากนี้ยังเขียนได้เป็น

$$NRB = CB(r)T(r)^2 \quad (2.14)$$

เมื่อ C คือ Calibration

$B(r)$ คือ Backscatter Coefficient

$T(r)^2$ คือ Atmospheric Round Trip Transmittance

และ

$$T(r)^2 = \exp[-2 \int \sigma(r)dr] \quad (2.15)$$

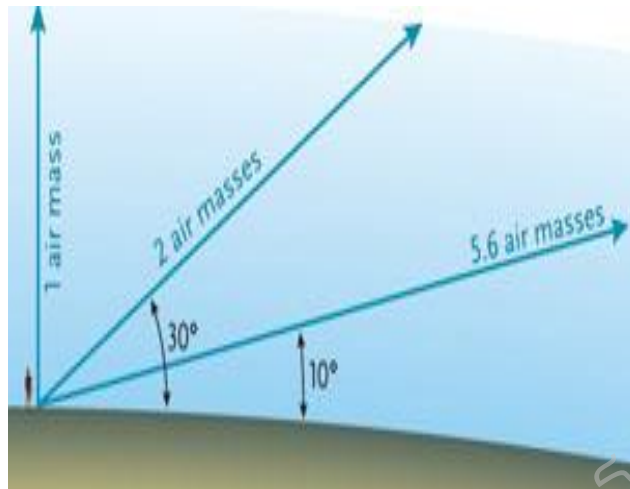
เมื่อ

$\sigma(r)$ คือ Extinction Coefficient

NRB เป็นสัญญาณ Lidar แบบ “กระจายกลับ” (เรียกอีกอย่างว่าการกระจายกลับแบบลดทอน) แต่ตามที่แสดง คือแตกต่างจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับของไลดาร์

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (Atmospheric extinction)

ยิ่งเป้าหมายของคุณอยู่ใกล้ขอบฟ้ามากเท่าไร คุณก็ยิ่งต้องมองผ่านอากาศมากขึ้นเท่านั้น และมุมมองของคุณก็จะเปลี่ยนไปอีก ปริมาณของอากาศโดยตรงเหนือศีรษะเรียกว่า มวลอากาศ (ปริมาณอากาศจริงในมวลอากาศหนึ่งจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับระดับความสูงเหนือระดับน้ำทะเล)



ภาพประกอบ 19 การดูดกลืนในชั้นบรรยากาศโทโพสเฟียร์ (Atmospheric extinction)

ที่มา(<https://skyandtelescope.org/astronomy-resources/transparency-and-atmospheric-extinction>)

สำหรับดาวที่อยู่เหนือขอบฟ้า 30° คุณกำลังมองผ่านมวลอากาศสองก้อน ที่ 10° 5.6 มวลอากาศ และสำหรับวัตถุบนขอบฟ้า 40 มวลอากาศ จำนวนมวลอากาศอยู่ที่ประมาณ $1/\sin(\text{alt})$ แม้ว่าจะต้องมีการปรับเปลี่ยนบริเวณใกล้ขอบฟ้าเนื่องจากความโค้งของโลก ดูบทความของ Green สำหรับสูตรที่แม่นยำยิ่งขึ้น

การดูดกลืนในชั้นบรรยากาศ มักวัดเป็นขนาดต่อมวลอากาศ ตัวอย่างเช่น สมมติว่าการดูดกลืนในชั้นบรรยากาศอยู่ที่ 0.16 แมกนิจูดต่อมวลอากาศ ซึ่งดีที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ที่ระดับน้ำทะเล จากนั้นดาวเหนือศีรษะจะปรากฏจางลง 0.16 แมกนิจูด (สว่าง 86%) ตามที่เป็นจริง ดาวฤกษ์อยู่เหนือขอบฟ้า 30° โดยมีมวลอากาศ 2 ดวงให้มองผ่าน ปรากฏจางลง 0.32 แมกนิจูด หรือสว่างกว่า 74% และดาวฤกษ์ 10° เหนือเส้นขอบฟ้าจะดูจางลง 0.90 แมกนิจูด หรือสว่างเพียง 44%

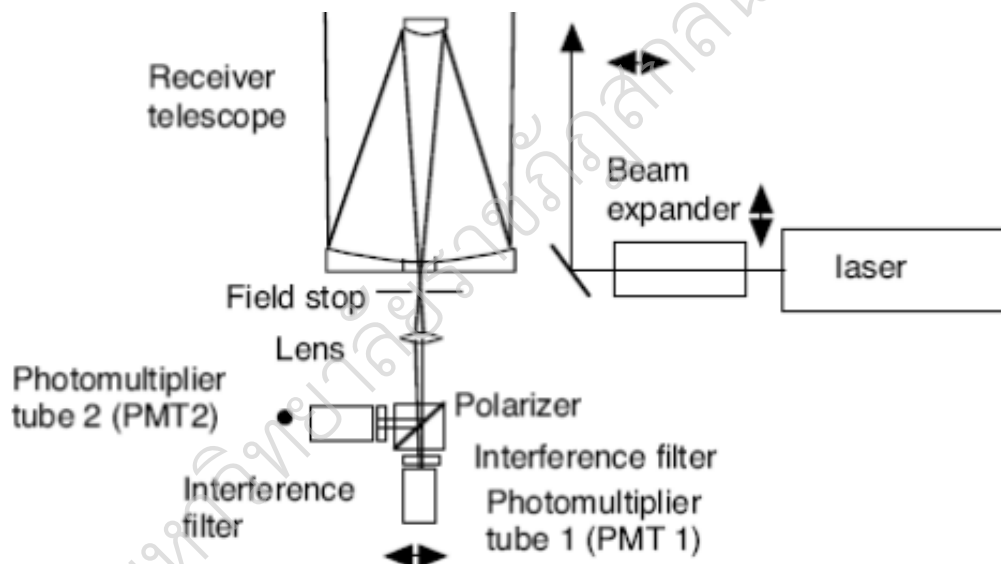
แนวความคิด ทฤษฎีเกี่ยวกับเครื่องมือการวิจัย

ไลดาร์การกระเจิงแบบมี Micro pulse lidar (MPL)

เป็นระบบตรวจวัดระยะไกลแบบออปติคัล (Optical) บนภาคพื้นดินที่ได้รับการออกแบบโดยหลักเพื่อตรวจวัดข้อมูลในแนวตั้งตามระดับความสูงของเมฆ หลักการทาง

ภาพถ่ายเหมือนกับเรดาร์ พัลส์ของพลังงานถูกส่งขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ พลังงานที่สะท้อนกลับไปที่ตัวรับส่งสัญญาณจะถูกรวบรวมและวัดเป็นสัญญาณที่ปรับแก้ไขเวลา จากการหน่วงเวลาระหว่างพัลส์ที่ส่งออกและสัญญาณที่สะท้อนกลับมา ระยะทางถึงตัวกระจายจะถูกอนุมาน นอกจากการตรวจจับเมฆตามเวลาจริงแล้ว ภายหลังการประมวลผลของการสะท้อนกลับของสัญญาณยังสามารถระบุลักษณะและคุณสมบัติของฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศหรือบริเวณที่มีอนุภาคอื่น ๆ

เครื่องมือที่ใช้ประกอบงานวิจัย คือเครื่องไลดาร์กระเจิงแสงแบบมี (Mie scattering LIDAR) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีฟังก์ชันของการแบบคู่โพลาไรเซชัน (Dual Polarization) ทำให้สามารถวัดตัวทำกระเจิงที่ไม่เป็นทรงกลมได้ แผนผังเครื่องมือแสดงดังภาพประกอบ 20

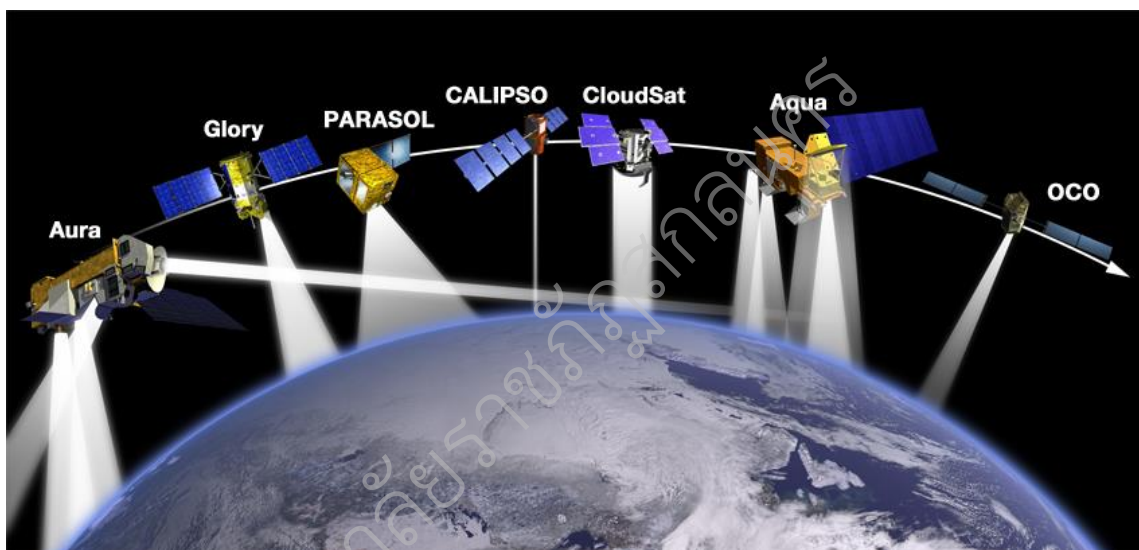


ภาพประกอบ 20 แผนผังเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี (thaiscience.info)

ดาวเทียมคาลิโซ

ดาวเทียมคาลิโซ (CALIPSO) เป็นกลุ่มดาวเทียมยามบ่ายหรือ "A-Train" วงโคจรของดวงอาทิตย์ซึ่งโคจรที่ระดับความสูง 705 km (438 ไมล์) วงโคจรที่เอียง 98.14° ข้ามเส้นศูนย์สูตรในแต่ละวันเวลาประมาณ 13:30 น. ตามเวลาสุริยะ ปัจจุบันประกอบด้วยดาวเทียม 5 ดวงที่บินวนรอบโลก (ดาวเทียม Aqua และ Aura ของ NASA และดาวเทียม PARASOL ของ CNES) ดังภาพประกอบ 21 ภารกิจดาวเทียม CALIPSO และ Cloudsat ถูก

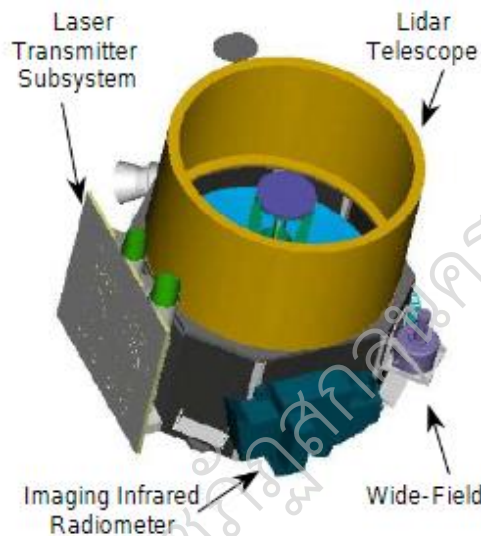
นำเข้าไปในวงโคจรหลัง Aqua ในเดือนเมษายน 2549 ดาวเทียมเพิ่มเติมสองดวง OCO และ Glory จะเข้าร่วมกลุ่มดาวในอีกไม่กี่ปีข้างหน้า ดาวเทียมแต่ละดวงภายใน A-Train มีความสามารถในการวัดที่ไม่เหมือนใครซึ่งเสริมซึ่งกันและกันอย่างมาก นับเป็นครั้งแรกที่มีการตรวจวัดละอองลอย เมฆ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และฟลักซ์การแผ่รังสี (การเปลี่ยนแปลงของรังสีในชั้น) พร้อมกันทั่วโลกในทุกฤดูกาลเป็นครั้งแรก ชุดของการสังเกตนี้จะช่วยให้เข้าใจว่าละอองลอยขนาดใหญ่และคุณสมบัติของเมฆเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรในการตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง



ภาพประกอบ 21 กลุ่มดาวเทียมบริหารยามบ่ายหรือ "A-Train" ปัจจุบันประกอบด้วย ดาวเทียม 5 ดวงที่บินวนรอบโลก (ดาวเทียม Aqua และ Aura ของ NASA และดาวเทียม PARASOL ของ CNES) ที่มา <https://www-CALIPSO.larc.nasa.gov/about/atrain.php> 30032566

นอกจากนี้ยังช่วยให้สามารถระบุได้ว่าการกระจายตัวของเมฆและละอองลอยที่เปลี่ยนแปลงส่งผลต่อสภาพอากาศของเราอย่างไรด้วยความชัดเจนมากขึ้นกว่าที่เคย เป็นมาตลอดอายุการใช้งาน A-Train จะได้รับการดูแลให้อยู่ในวงโคจรภายใน 15 นาทีจากยานอวกาศชั้นนำและตามหลัง CALIPSO จะถูกควบคุมให้เป็นไปตามข้อกำหนดที่ละเอียด ยิ่งขึ้นภายใน 15 วินาทีของกันและกัน ดังนั้นชุดเครื่องมือทั้งสองจะดูพื้นที่เดียวกันในเวลาใกล้เคียงกัน ความสามารถนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการศึกษาเมฆ

CALIPSO ประกอบด้วยเครื่องมือการตรวจวัดข้อมูล 3 ชิ้น ได้แก่ Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization (CALIOP), Imaging Infrared Radiometer (IIR) และ Wide Field Camera (WFC) เครื่องมือได้รับการออกแบบให้ทำงานโดยอัตโนมัติและต่อเนื่อง การจัดวางทางกายภาพของเครื่องมือที่ติดตั้งแสดงในภาพประกอบ 22



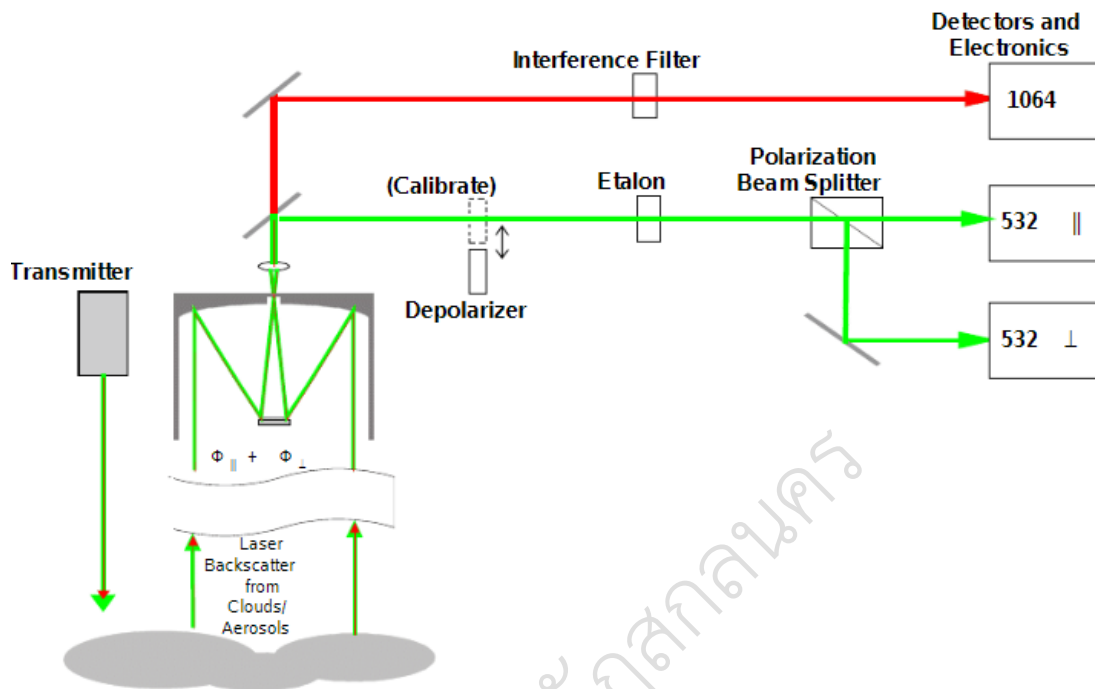
ภาพประกอบ 22 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดของดาวเทียม CALIPSO

ไลนาร์เซ็นเซอร์ หรือ Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization (CALIOP) การออกแบบของ Lidar แสดงในแผนผังในภาพประกอบ 22 เลเซอร์ Nd:YAG ที่ปั๊มด้วยไดโอดจะสร้างพัลส์แสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่ $1,064\ \mu\text{m}$ และ $532\ \mu\text{m}$ ผลตอบแทนในชั้นบรรยากาศถูกรวบรวมโดยกล้องโทรทรรศน์ขนาด $1\ \text{m}$ ซึ่งป้อนเครื่องรับสามช่องสัญญาณที่วัดความเข้มของการสะท้อนกลับที่ $1,064\ \mu\text{m}$ และส่วนประกอบโพลาไรเซชันแบบตั้งฉากสองชั้นที่ $532\ \mu\text{m}$ (ขนานและตั้งฉากกับระนาบโพลาไรเซชันของลำแสงที่ส่ง)

ระบบย่อยของเครื่องรับประกอบด้วยกล้องโทรทรรศน์ เลนส์รีเลย์ เครื่องตรวจจับ ปริ๊อัมป์ และตัวขับสายที่ติดตั้งบนการประมวลผลสัญญาณและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ควบคุมบรรจุอยู่ในกล่องที่ติดตั้งบนตัวเรือนน้ำหนักบรรทุกทุกกล้องโทรทรรศน์ตัวรับเป็นแบบอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $1\ \text{m}$ ซึ่งคล้ายกับกล้องโทรทรรศน์ที่สร้างขึ้นสำหรับ GLAS และ ELISE เดอะกล้องโทรทรรศน์ เสร็จสมบูรณ์แล้วและกำลังรวมเข้ากับน้ำหนักบรรทุก กระเจกหลักของกล้องโทรทรรศน์, กระจกมอง โครงสร้างการวัดแสง และแผ่นกันดำนในทำจากเบริลเลียมทั้งหมด เจดลีคาร์บอนคอมโพสิตจะเป็นเพิ่มเพื่อ

ป้องกันการส่องกระจกจากแสงอาทิตย์โดยตรง พิลด์สตัดอปคงที่อยู่ทีโฟกัสของกล้องโทรทรรศน์ กลไกที่อยู่ในส่วน collimated ของลำแสงประกอบด้วยชัตเตอร์และดีโพลาริเซอร์ที่ใช้ในการปรับเทียบ $532\text{ }\mu\text{m}$ ช่องตั้งฉาก แถบความถี่แคบถูกใช้ในช่อง $532\text{ }\mu\text{m}$ เพื่อลดการส่องสว่างพื้นหลังของแสงอาทิตย์ตัวกรองสัญญาณรบกวนแบบอิเล็กทรอนิกส์ให้การปฏิเสธแสงอาทิตย์ที่เพียงพอสำหรับช่องสัญญาณ $1064\text{ }\mu\text{m}$ ดิจิไทเซอร์สองตัวในแต่ละอันแชนเนลให้ช่วงไดนามิก 22 bit ที่มีประสิทธิภาพซึ่งจำเป็นสำหรับการวัดทั้งสัญญาณคลาวด์และสัญญาณสะท้อนกลับของโมเลกุล หนึ่งในระบบบังคับเลี้ยวแบบแยกที่พีมสเตอร์จึงเพื่อให้แน่ใจว่าตำแหน่งระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับ

ระบบย่อยของเครื่องส่งสัญญาณเลเซอร์ประกอบด้วยเลเซอร์สำหรับสองตัวแต่ละตัวมีตัวขยายลำแสงและระบบบังคับเลี้ยวด้วยลำแสงระบบ. เลเซอร์ Nd:YAG เป็นแบบ Q-switched และเพิ่มความถี่เป็นสองเท่าเพื่อสร้างพัลส์พร้อมกันที่ $1,064\text{ }\mu\text{m}$ และ $532\text{ }\mu\text{m}$ เลเซอร์แต่ละตัวผลิตพลังงาน 110 mJ ที่แต่ละความยาวคลื่นทั้งสองที่อัตราการเกิดซ้ำของพัลส์ที่ 20.2 Hz เท่านั้นหนึ่งเลเซอร์จะดำเนินการในแต่ละครั้ง ตัวขยายลำแสงช่วยลดความแตกต่างเชิงมุมของลำแสงเลเซอร์เพื่อสร้างลำแสงเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 m ที่พื้นผิวโลก เลเซอร์จะถูกระบายความร้อนแบบพาสซีฟโดยใช้แผงหม้อน้ำโดยเฉพาะ หลีกเลี่ยงการใช้ปั๊มและลูบน้ำหล่อเย็น เลเซอร์แต่ละตัวจะบรรจุอยู่ในกระป๋องบรรจุอากาศแห้งที่ความดันบรรยากาศมาตรฐาน



ภาพประกอบ 23 แผนผังทางเดินแสงของไลดาร์เซ็นเซอร์ หรือ Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization (CALIOP)

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

สำหรับสถิติที่ใช้วัดค่าสหสัมพันธ์อย่างง่ายว่ามีความสัมพันธ์มากหรือน้อยเพียงใดคือสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ซึ่งในกรณีของสหสัมพันธ์อย่างง่ายตัวสถิตินี้เรียกว่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อย่างง่าย (Simple Correlation coefficient) เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ ρ หรือ ρ_{xy} ในกรณีที่เป็นพารามิเตอร์ และ r หรือ r_{xy} ในกรณีที่เป็นค่าสถิติโดยที่ ρ และ r จะไม่มีหน่วยและมีค่าตั้งแต่ -1 ถึง 1

1. ความหมายของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่คำนวณได้มีความหมาย ดังนี้

1.1 ถ้า ρ และ r มีค่าเป็นบวก แสดงว่าตัวแปร X และ Y มีความสัมพันธ์เชิงบวกหมายความว่าถ้าตัวแปร X มีค่าเพิ่มขึ้นตัวแปร Y จะเพิ่มขึ้นหรือถ้าตัวแปร X มีค่าลดลง ตัวแปร Y จะมีค่าลดลง

1.2 ถ้า ρ และ r มีค่าเป็นลบ แสดงว่าตัวแปร X และ Y มีความสัมพันธ์เชิงลบหมายความว่าถ้าตัวแปร X มีค่าเพิ่มขึ้นตัวแปร Y จะมีค่าลดลง หรือถ้าตัวแปร X มีค่าลดลง ตัวแปร Y จะมีค่าเพิ่มขึ้น

1.3 ถ้า ρ และ r มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าตัวแปร X และ Y มีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างสมบูรณ์ (Perfect positive correlation)

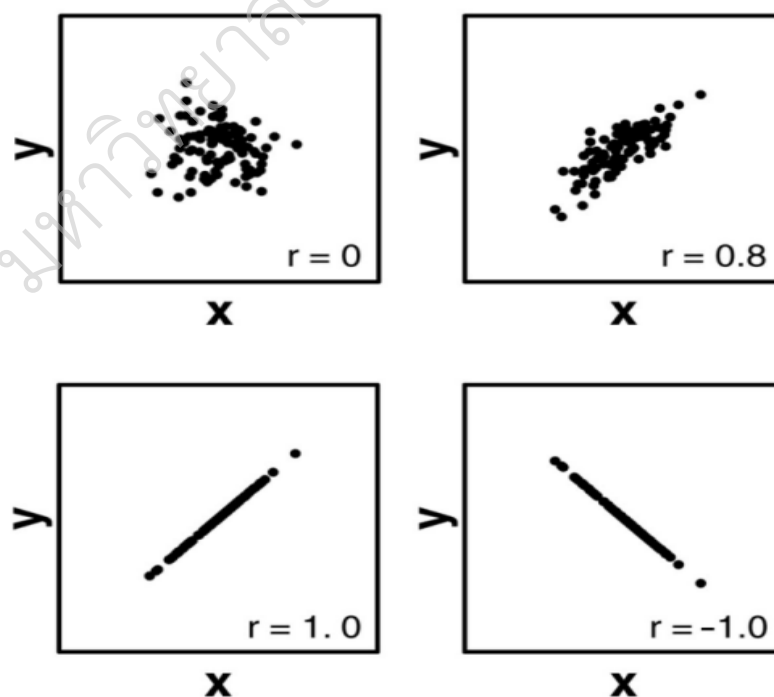
1.4 ถ้า ρ และ r มีค่าเท่ากับ -1 แสดงว่าตัวแปร X และ Y มีความสัมพันธ์เชิงลบอย่างสมบูรณ์ (Perfect negative correlation)

1.5 ถ้า ρ และ r มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าตัวแปร X และ Y มีความสัมพันธ์เชิงบวกและมีความสัมพันธ์มาก

1.6 ถ้า ρ และ r มีค่าเข้าใกล้ -1 แสดงว่าตัวแปร X และ Y มีความสัมพันธ์เชิงลบและมีความสัมพันธ์มาก

1.7 ถ้า ρ และ r มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่าตัวแปร X และ Y มีความสัมพันธ์กันน้อย

1.8 ถ้า ρ และ r มีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่าตัวแปร X และ Y ไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้น



ภาพประกอบ 24 แผนภาพการกระจาย

ที่มา <http://pws.npru.ac.th/chalida/data/files>

2. วิธีการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ วิธีการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน ซึ่งใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเชิงปริมาณ หรือตัวแปรแบบต่อเนื่องสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ ρ ซึ่งคิดค้นโดยคาร์ล เพียร์สัน (Karl Pearson) บ้างครั้งอาจเรียกว่า Pearson product moment correlation coefficient ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$\rho = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad \text{หรือ} \quad \rho = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (2.16)$$

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \mu_y)^2}} \quad (2.17)$$

โดยที่ ρ แทน สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน
 $\text{cov}(x, y)$ หรือ σ_{xy} แทน ความแปรปรวนร่วมของตัวแปร X และ Y
 σ_x, σ_y แทน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปร X และ Y
 μ_x, μ_y แทน ค่าเฉลี่ยของตัวแปร X และ Y

ในทางปฏิบัติเราเก็บรวบรวมข้อมูลจากตัวอย่าง ดังนั้นจะประมาณ ρ และ r

โดยที่

$$\rho = \frac{\text{cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (2.18)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.19)$$

$$\frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\left[n \sum_{i=1}^n (x_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] \left[n \sum_{i=1}^n (y_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right]}} \quad (2.20)$$

โดยที่ r แทน สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน
 $\text{cov}(x, y)$ แทน ความแปรปรวนร่วมของตัวแปร X และ Y
 s_x, s_y แทน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปร X และ Y

$\bar{x}, \bar{y}$	แทน ค่าเฉลี่ยของตัวแปร X และ Y
N	แทน จำนวนตัวอย่าง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อรดี พิลลาโฮม และวิลาวรรณ คำหาญ (2019) ได้ศึกษาวิเคราะห์ความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองและโรคหลอดลมอักเสบที่ 4 สถานีในประเทศไทย ได้แก่ นครปฐม เชียงใหม่ อุบลราชธานี และสงขลา โดยรวบรวมข้อมูลความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองจากเครือข่าย AERONET และ MODIS ในขณะที่ข้อมูลโรคหลอดลมอักเสบได้ข้อมูลจากกระทรวงสาธารณสุข พบว่า จากแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นของจำนวนผู้ป่วยโรคหลอดลมอักเสบ ทั้ง 4 จังหวัด มีความสอดคล้องกันกับแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง เนื่องจากโรคหลอดลมอักเสบมักเกิดจากกิจกรรมประจำวันของมนุษย์ มักเกิดการติดเชื้อทางระบบทางเดินหายใจ ซึ่งมีฝุ่นละอองเป็นตัวแปรในการเกิดโรคหลอดลมอักเสบ

Aerosol Robotic Network, AERONET; Micro-Pulse Lidar Network, MPLNET และข้อมูลดาวเทียม (MODIS, and Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation, CALIPSO) ถูกใช้ใน 13 การตรวจสอบค่า AOD จากการปนเปื้อนของเมฆเซอร์สบางที่พิกัดในประเทศไทย (102.56°E, 15.18°N) ในระหว่างการเผาไหม้ชีวมวลในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้: ภายใต้โครงการ (BASE-ASIA) (กุมภาพันธ์ – พฤษภาคม, 2549) พบว่า AERONET AOD และ MODIS AOD ได้รับอิทธิพลจากเมฆเซอร์สบาง ในการสังเกตการณ์ที่พิกัด AERONET และ MPLNET พบว่า การตรวจคัดกรองเมฆเซอร์สบางจะทำให้ ค่า AOD เฉลี่ยรายเดือนเปลี่ยนแปลง 5% และ AERONET AOD 20% AERONET AOD มีค่าเพิ่มขึ้นพร้อมกับขนาดของอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นสำหรับกรณีที่ไม่มีเมฆเซอร์สบางจนไปถึงการปนเปื้อนของเมฆเซอร์สบาง การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของ MPLNET flag cirrus แสดงให้เห็นว่า RR1.38/0.66 ดีขึ้นเล็กน้อยสำหรับการตรวจคัดกรองการปนเปื้อนของเมฆเซอร์สบางสำหรับการวัด AERONET AOD ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความระมัดระวังเป็นพิเศษและการประเมินการปนเปื้อนของเมฆเซอร์สบางในข้อมูลดาวเทียม และข้อมูลพื้นผิวของ AOD ก่อนที่จะนำมาใช้ในการศึกษาสภาพอากาศที่เกี่ยวข้องกับฝุ่นละออง (Jingfeng et al., 2011)

Ananthavel et al. (2021) AODs ได้มาจาก Mie lidar โดยใช้วิธีการของ Fernald ในช่วงวันที่ 17–20 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2548 ที่อำเภอพิมาย จังหวัดนครราชสีมา พบว่า ฝุ่นละอองมีคาร์บอนสูงบริเวณพื้นที่ใกล้เคียงกับสถานีตรวจวัด ซึ่งมาจากการเผาไหม้ชีวมวลในที่โล่ง มีค่า AOD อยู่ในช่วง 0.6–0.7 เมื่ออนุภาคของฝุ่นละอองแบบหยาบและแบบละเอียดเกิดการระหว่งการเคลื่อนที่ค่าเฉลี่ย AOD มีค่าต่ำสุดและสูงสุดเท่ากับ 0.2187 และ 0.4291 ตามลำดับ (Ruangrungrrote, Limsuwan, & Intasorn, 2013)

สุทธิพันธุ์ จันทราศรี (2553) การสร้างโมเดลขั้นตอนวิธีการวิเคราะห์แสดงผลพารามิเตอร์ของละอองลอยจากข้อมูลเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี ซอฟต์แวร์ APRA (Aerosol Parameter Retrieval Algorithm) ถูกเขียนขึ้นโดยโปรแกรม MATLAB R2008 โดยที่ APRA มีความเป็นไปได้ในการค้นหาโปรไฟล์แนวตั้งของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ได้แก่ ค่าสัญญาณแก้ไขพิสัย (range corrected signals) ค่าอัตราส่วนดีโพลาไรเซชัน (depolarization ratios) ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงกลับเนื่องจากละอองลอย (aerosol volume backscattering coefficients) ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเนื่องจากละออง (aerosol volume extinction coefficients) ได้จากการคำนวณชุดข้อมูลของเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี จากกระบวนการวิเคราะห์ที่ได้จากซอฟต์แวร์มีความละเอียดสอดคล้องกับผลได้จากการคำนวณด้วยมือโดยใช้โปรแกรม excel เมื่อใช้ข้อมูลชุดเดียวกัน โดยที่ APRA ใช้เวลาในการประมวลผล น้อยเพียง 3 นาที ต่อ 1 ไฟล์

Ananthavel et al. (2021) การศึกษาการกระจายตัวในแนวตั้งของฝุ่นละอองจากดาวเทียม CALIOP ระดับ 1 (level 1) และ ระดับ 2 (level2) ร่วมกับการสังเกตภาคพื้นดินภายใต้เงื่อนไขท้องฟ้าที่แตกต่างกันตามสภาพอากาศและฤดูกาล ระหว่างเดือนมีนาคม พ.ศ. 2559– เดือนธันวาคม พ.ศ. 2561 ที่สถานี เมือง Kattankulathur จำนวน 33 โปรไฟล์ในช่วงท้องฟ้าแจ่มใส และมีเมฆมาก มีการสังเกตจากกรณีอยู่ในช่วงฤดูหนาวก่อนมรสุมลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (SW) และฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (NE) ตามลำดับ ในสภาวะท้องฟ้าแจ่มใส ความความแปรปรวนเฉลี่ยของระดับ 1 พบว่าอยู่ที่ $-14 \pm 29\%$ ($18 \pm 19\%$) ต่ำกว่า 3.0 km ในขณะที่อยู่ต่ำกว่า $-39 \pm 26\%$ ($33 \pm 24\%$) 3.0 km (มากกว่า 3–8 km) ได้เมฆเซอร์รัสที่เปรียบเทียบกับที่อยู่ภายใต้เมฆ MT หนานั้นไม่ใช่เชื่อถือได้ อย่างไรก็ตาม จะสังเกตเห็นการเปรียบเทียบที่ดีกว่าในกรณีของเมฆ MT แบบบาง การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลที่แข็งแกร่งในการกระจายในแนวตั้งของละอองลอยใกล้พื้นผิวโดยมีค่าไหลดสูงสุด (ต่ำสุด) $\sim 0.01 \pm 0.005 \text{ km}^{-1} \text{sr}^{-1}$ ($\sim 0.004 \pm 0.002 \text{ km}^{-1} \text{sr}^{-1}$) จะสังเกตได้

ในช่วงฤดู หนาว (SW monsoon) อคติเฉลี่ยของโปรไฟล์ละอองลอยระดับ 2 ที่ระดับความสูง 0.3–5 km พบว่ามีค่าเท่ากับ $14 \pm 28\%$, $15 \pm 44\%$, $-14 \pm 25\%$ และ $24 \pm 34\%$ ในช่วงฤดูหนาว ช่วงก่อนมรสุม ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ

Mamouri et al. (2009) นำเสนอผลการตรวจสอบความถูกต้องของละอองลอยเบื้องต้นของ CALIOP ที่เกิดจากอวกาศ - บนดาวเทียม CALIPSO - ระดับ 1 โปรไฟล์ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายกลับที่ลดทอนลง โดยใช้การสังเกตโดยบังเอิญที่ดำเนินการกับ Lidar บนภาคพื้นดินในเอเธนส์ ประเทศกรีซ (37.9°N , 23.6°E) ระบบกระจายแสงสะท้อนบนพื้น/รามานลิДАРแบบหลายความยาวคลื่นมีการดำเนินงานตั้งแต่ปี 2000 ที่มหาวิทยาลัยเทคนิคแห่งชาติเอเธนส์ (NTUA) ในกรอบของ European Aerosol Research Lidar NETwork (EARLINET) ซึ่งเป็นเครือข่ายลิДАРเครือข่ายแรกสำหรับการศึกษาละอองลอยในชั้นโทรโพสเฟียร์บน α ระดับทวีป ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2549 มีการตรวจวัดลิДАРบนพื้นด้วยละอองลอยโดยบังเอิญทั้งหมด 40 ครั้งเหนือกรุงเอเธนส์ระหว่าง CALIPSO การวัดภาคพื้นดินดำเนินการทุกครั้งที่ CALIPSO ข้ามตำแหน่งสถานีภายในระยะทางสูงสุด 100 กม. ระยะเวลาของการวัดค่าลิДАРภาคพื้นดินคือประมาณสองชั่วโมง โดยมีศูนย์กลางดาวเทียม จากการวิเคราะห์การวัดค่าลิДАРแบบสหสัมพันธ์ภาคพื้นดิน/ดาวเทียม ค่าเฉลี่ยความเอนเอียงของลำดับที่ 22% สำหรับการตรวจวัดในเวลากลางวัน และ 8% สำหรับการตรวจวัดในเวลากลางคืนตามโปรไฟล์ของ CALIPSO พบได้ในระดับความสูงระหว่าง 3 ถึง 10 km ความเอนเอียงเฉลี่ยจะมีขนาดใหญ่ขึ้นมากสำหรับระดับความสูงที่ต่ำกว่า 3 km (จากลำดับที่ 60%) ซึ่งมีสาเหตุมาจากการเพิ่มขึ้นของความไม่สม่ำเสมอในแนวนอนของละอองลอยภายในชั้นขอบเขตของดาวเคราะห์ ส่งผลให้มีการสังเกตมวลอากาศที่อาจแตกต่างกันด้วยเครื่องมือทั้งสอง ในกรณีของชั้นละอองลอยที่อยู่ภายใต้เมฆเซอร์รัส ผลการเปรียบเทียบสำหรับโปรไฟล์โทรโพสเฟียร์ของละอองลอยจะแยกลง นี่เป็นผลจากเอฟเฟกต์การกระเจิงหลายจุดในเมฆ Cirrus ที่ CALIPSO ซึ่งส่งผลให้เกิดการลดทอนซึ่งน้อยกว่าที่วัดโดย Lidar บนพื้นดิน

Pilathome (2020) ได้วิเคราะห์ข้อมูลตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยาเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศใน 4 สถานีทั่วประเทศไทย ได้แก่ นครปฐม เชียงใหม่ อุบลราชธานี และสงขลา การศึกษานี้ใช้ข้อมูลจากดาวเทียม Aqua (MODIS) โดยใช้สมการการถดถอยเชิงเส้น Mann–Kendall trend และการทดสอบ Sen's slope พบว่า ฝนมีค่าสูงในเดือนกรกฎาคมถึงตุลาคม ทุกสถานียกเว้นในสงขลา ปริมาณน้ำฝนเพิ่มขึ้นในทุกภูมิภาค ฤดูฝน

เกิดจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ซึ่งเป็นเหตุการณ์ปกติในประเทศไทยในช่วงเดือน มิถุนายนถึงกันยายนอย่างไรก็ตาม มรสุมนี้มีแนวโน้มที่จะเริ่มเร็วขึ้นและยาวนานกว่าที่คาดไว้ (พฤษภาคมถึงตุลาคม) ค่าอุณหภูมิเฉลี่ย (T_{mean}) พบว่าสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงพฤษภาคมและเพิ่มขึ้นในทุกสถานี การเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญสูงสุดของ T_{mean} พบในภาคเหนือ ส่วนการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำฝนรายปีไม่มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 1% และ 5% ในทุกสถานี นอกจากนี้ยังพบว่าค่า AOD มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในเกือบทุกสถานี และ AOD เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญสูงสุดในจังหวัดอุบลราชธานี

อรดี พิลาสีม (2562) ศึกษาข้อมูล 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 พบว่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าสูงสุดอยู่ที่อุบลราชธานีที่ค่า $R^2 = 0.76$ slope=0.94 และ $RMB=1.86$ และเชียงใหม่มีค่า $R^2=0.78$ slope=0.60 และ $RMB=0.62$ ตามลำดับ จากการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพบว่า AOD มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกสถานีมีค่าสูง ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนพฤษภาคม

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยเรื่องการพัฒนาแบบจำลองฝุ่น PM2.5 จากข้อมูลดาวเทียมคาลิปโซในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย เป็นรูปแบบการวิจัยโดยการทดลอง (Experimental Research) ซึ่งทำการศึกษาวิจัยในบริเวณจังหวัดเชียงใหม่ ตำบลตอนแก้ว อำเภอแม่ริม จังหวัดเชียงใหม่ และภาคเหนือ 9 จังหวัดของประเทศไทยผู้วิจัยได้ดำเนินการวิจัยดังต่อไปนี้

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

ข้อมูลสำหรับการวิจัยการพัฒนาแบบจำลองฝุ่น PM2.5 จากข้อมูลดาวเทียม CALIPSO ในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยในครั้งนี้ผู้วิจัยรวบรวมข้อมูลอยู่ 2 แหล่ง คือ ข้อมูลดาวเทียม และข้อมูลภาคพื้นดิน (ground based)

ข้อมูลดาวเทียม

ดาวเทียมคาลิปโซ CALIPSO เป็นดาวเทียมที่ติดตั้ง ไลน์ดาเซ็นเซอร์ หรือ Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization (CALIOP) การออกแบบของ Lidar แสดงในแผนผังในภาพประกอบ 22 เลเซอร์ Nd:YAG ที่ปั๊มด้วยไดโอดจะสร้างพัลส์แสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่ 1,064 μm และ 532 μm ผลตอบแทนในชั้นบรรยากาศถูกรวบรวมโดยกล้องโทรทรรศน์ขนาด 1 m ซึ่งป้อนเครื่องรับสามช่องสัญญาณที่วัดความเข้มของการสะท้อนกลับที่ 1,064 μm และส่วนประกอบโพลาไรเซชันแบบตั้งฉากสองชั้นที่ 532 μm (ขนานและตั้งฉากกับระนาบโพลาไรเซชันของลำแสงที่ส่ง) การเก็บรวบรวมข้อมูลดาวเทียมด้วยการเก็บรวบรวมข้อมูลโปรไฟล์ฝุ่นภาคดาวเทียมโดยดาวดาวันโหลดข้อมูล CAL_LID_L2_05kmAPro-Standard-V4-21 จากเว็บไซต์EARTHDATA Atmosphere เพื่อดึงค่าตัวแปร Column_Optical_Depth_Tropospheric_Aerosols_532 เริ่มตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2560 - วันที่ 31 ธันวาคม 2565

ดาวเทียม MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) เป็นเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งอยู่บนดาวเทียม Aqua ถูกออกแบบขึ้นเพื่อใช้ในการติดตามสำรวจทรัพยากรธรรมชาติ โคจรที่ระดับความสูง 705 Km และสามารถบันทึกข้อมูลครอบคลุม

พื้นที่ทั่วโลก โดยจะบันทึกข้อมูล 13.30 น. ตามเวลาท้องถิ่น การศึกษาวิจัยครั้งนี้จะใช้ข้อมูลตัวแปรสภาพอากาศสำหรับสร้างแบบจำลอง ประกอบด้วย AOD RH TEMP HPBL NDVI WS เริ่มตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2560 – วันที่ 31 ธันวาคม 2565 โดยการเขียนโปรแกรมอ่านค่าตัวแปรด้วยโปรแกรม IDL

ข้อมูลภาคพื้นดิน (ground based)

เครื่องซันโฟโตมิเตอร์ (sun photometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวัดสเปกตรัมรังสีตรงของดวงอาทิตย์ ข้อมูลที่วัดได้นั้นสามารถนำมาวิเคราะห์หาสมบัติทางฟิสิกส์ ซึ่งสามารถคำนวณโพลดผ่านเครือข่าย AERONET ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาตัวแปรค่าความลึกเชิงแสง (AOD) โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่ปี 2560 – 2565 จังหวัดเชียงใหม่ สำหรับการเปรียบเทียบข้อมูลความลึกเชิงแสงที่ได้จากข้อมูลดาวเทียม CALIPSO

เครื่องตรวจวัดปริมาณฝุ่นและก๊าซแบบต่อเนื่อง จากแบรนด์ Comde Derenda ประเทศเยอรมนีซึ่งสามารถตรวจวัดและแสดงค่าปริมาณฝุ่นชนิด PM2.5 และ PM10 รวมทั้งสามารถตรวจวัดก๊าซ NO₂, O₃, CO และ SO₂ ได้อีกด้วย นอกจากนี้ยังสามารถบันทึกข้อมูลไว้ในตัวเครื่อง เหมาะสำหรับงานตรวจวัดฝุ่นและก๊าซแบบต่อเนื่อง เช่น ตรวจวัดคุณภาพอากาศในตัวเมืองและโรงงานอุตสาหกรรม บ่อขยะ มลพิษในท้องถนน เป็นต้น เริ่มตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2560 – วันที่ 31 ธันวาคม 2565

การเก็บรวบรวมข้อมูล

การพัฒนาแบบจำลองฝุ่น PM2.5 จากข้อมูลดาวเทียมคาลิปโซในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย การศึกษารวบรวมข้อมูลแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน คือ การศึกษาและประมวลเอกสารที่เกี่ยวข้อง วางแผนการเก็บข้อมูล เก็บข้อมูลการทดลอง การเตรียมข้อมูล การสร้างแบบจำลอง ดังนี้

1 การศึกษาและประมวลเอกสารที่เกี่ยวข้อง

ศึกษาข้อมูลพื้นฐานหลักการทำงานของเครื่องไลดาร์ ศึกษาอัลกอริทึมที่ใช้ในการคำนวณค่าความลึกเชิงแสง (aerosol optical depth, AOD) เพื่อเป็นตัวแทนของค่าฝุ่นละออง จากดาวเทียม CALIPSO ศึกษาหลักการเปรียบเทียบค่าสหภาพสัมพันธ์ (R^2)

2 วางแผนการเก็บข้อมูล

เขียนโปรแกรม IDL ที่ใช้ในการดาวน์โหลดข้อมูลโปรไฟล์ฝุ่นจากดาวเทียม CALIPSO เลือกพื้นที่สำหรับการศึกษาวิจัยในการวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกทำการวิจัยในพื้นที่

ภาคเหนือของประเทศไทย ประกอบด้วยจังหวัดเชียงใหม่ เลือกรวบรวมข้อมูลพื้นที่การวิจัย กำหนดวันที่และเวลาสำหรับการดำเนินการ เตรียมการตามแผนการเก็บข้อมูล และ ตรวจสอบข้อมูลสภาพอากาศ

3 เก็บข้อมูลการทดลอง

ดาวนโหลดข้อมูลดาวเทียมด้วยการเก็บรวบรวมข้อมูลโปรไฟล์ฝุ่นภาคดาวเทียมโดยดาวดาวนโหลดข้อมูล CAL_LID_L2_05kmAPro-Standard-V4-21 จากเว็บไซต์EARTHDATA Atmosphere เพื่อดึงค่าตัวแปร Column_Optical_Depth_Tropospheric_Aerosols_532 เริ่มตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2560 – วันที่ 31 ธันวาคม 2565

ดาวนโหลดข้อมูลตัวแปรสภาพอากาศสำหรับสร้างแบบจำลอง ประกอบด้วย AOD RH TEMP HPBL NDVI WS เริ่มตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2560 – วันที่ 31 ธันวาคม 2565 โดยการเขียนโปรแกรมอ่านค่าตัวแปรด้วยโปรแกรม IDL

ค่าความลึกเชิงแสง (AOD) โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่ปี 2560 – 2565 จังหวัดเชียงใหม่ สำหรับการเปรียบเทียบข้อมูลความลึกเชิงแสงที่ได้จากข้อมูลดาวเทียม CALIPSO

ดาวนโหลดตรวจวัดคุณภาพอากาศในตัวเมืองและโรงงานอุตสาหกรรม บ่อขยะ มลพิษ ในท้องถนน เป็นต้น เริ่มตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2560 – วันที่ 31 ธันวาคม 2565

4 การเตรียมข้อมูล

งานวิจัยเรื่องการพัฒนาแบบจำลองฝุ่น PM2.5 จากข้อมูลดาวเทียมคาลิโซในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย ในครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลภาคพื้นดิน เพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลดาวเทียม สำหรับการศึกษารูปแบบฝุ่นละอองในแนวตั้ง ซึ่งมีการเตรียมข้อมูลดังต่อไปนี้

4.1 ดาวนโหลดข้อมูลฝุ่น PM2.5 ภาคพื้นดินพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ จัดเรียงข้อมูลแบบรายปี รายวัน

4.2 การเขียนโปรแกรม IDL CAL_LID_L2_05kmAPro-Standard-V4-21 จากเว็บไซต์EARTHDATA Atmosphere เพื่อดึงค่าตัวแปร Column_Optical_Depth_Tropospheric_Aerosols_532

4.3 ดาวนโหลดข้อมูล ข้อมูลตัวแปรสภาพอากาศสำหรับสร้างแบบจำลอง ประกอบด้วย AOD RH TEMP HPBL NDVI WS เริ่มตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2560 – วันที่ 31 ธันวาคม 2565 โดยการเขียนโปรแกรมอ่านค่าตัวแปรด้วยโปรแกรม IDL

4.4 จัดเรียงข้อมูลแบบฟอร์มรายปี รายวัน

5 การสร้างแบบจำลอง

5.1 การเขียนโปรแกรมแบบจำลอง ด้วยโปรแกรม R studio

5.2 ประมาณค่าความเข้มข้นฝุ่น PM2.5

การวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้วิจัยดำเนินการวิเคราะห์ข้อมูลวิจัยตามขั้นตอน ดังต่อไปนี้

การเปรียบเทียบข้อมูล AOD ระหว่าง AERONET กับ CALISO และ MODIS กับ CALPSO

การเปรียบเทียบข้อมูลความเข้มข้นฝุ่น PM2.5 ภาคพื้นดิน กับ PM2.5 ที่ได้จากแบบจำลอง การเปรียบเทียบความเข้มข้นฝุ่น PM2.5 การเปลี่ยนแปลงข้อมูลรายเดือนของความเข้มข้นฝุ่น PM2.5 การเปลี่ยนแปลงข้อมูลรายปีของความเข้มข้นฝุ่น PM2.5

สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลในการวิจัยครั้งนี้ ได้แก่

การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน ซึ่งใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเชิงปริมาณ หรือตัวแปรแบบต่อเนื่องสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ ซึ่งคิดค้นโดยคาร์ล เพียร์สัน (Karl Pearson)

ค่า P-value คือ ความน่าจะเป็นที่จะได้ผลลัพธ์เท่ากับหรือเกินกว่าที่สังเกตได้ภายใต้สมมุติฐานหลัก มีความสำคัญอย่างยิ่งในการทำ Regression เพราะมันเป็นตัวบ่งบอกว่า ตัวแปรนั้น ๆ มีความสำคัญต่อระบบความสัมพันธ์หรือสมการหรือไม่ ซึ่งค่า P-value ที่มากกว่า 0.05 บ่งบอกว่าตัวแปรนั้นอาจจะมีผลต่อระบบสมการ ซึ่งเราสามารถถอดออกแล้วทำการ Regression ใหม่ เพื่อหาสมการที่เหมาะสมต่อไปได้

ค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) เป็นสถิติที่ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร เช่น หาค่าสหสัมพันธ์ระหว่างเจตคติวิชาคณิตศาสตร์ กับผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน หาความสัมพันธ์ระหว่างขวัญและกำลังใจในการทำงานกับประสิทธิภาพในการทำงาน เป็นต้น ซึ่งค่าสหสัมพันธ์ที่คำนวณได้ เรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ซึ่งสถิติสำหรับการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีหลายชนิด ซึ่งการเลือกใช้แบบใดนั้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขหลายประการ

สหสัมพันธ์ เป็นค่าที่บอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรของข้อมูลกลุ่มหนึ่ง เช่น ส่วนสูงกับน้ำหนักของนักเรียน คณะนิติศาสตร์กับคะแนนคณิตศาสตร์

ราคาสินค้ากับอายุการใช้งาน เป็นต้น ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าอยู่ระหว่าง -1.00 ถึง $+1.00$ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่พบได้โดยทั่ว ๆ ไปมีดังนี้

0.80 – 0.99 หมายถึง มีความสัมพันธ์สูงทางบวก

0.60 – 0.79 หมายถึง มีความสัมพันธ์ค่อนข้างสูง

0.40 – 0.59 หมายถึง มีความสัมพันธ์ปานกลาง

0.20 – 0.39 หมายถึง มีความสัมพันธ์ค่อนข้างต่ำ

0.00 – 0.19 หมายถึง มีความสัมพันธ์ต่ำหรือไม่มีความสัมพันธ์

สำหรับค่าความสัมพันธ์ทางลบก็มีความหมายเช่นเดียวกัน ในการคำนวณหาความสัมพันธ์สหสัมพันธ์นั้นก็มีหลายวิธีในที่นี้จะกล่าวเพียงวิธีเดียวคือ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson Product Moment Correlation Coefficient) วิธีนี้ใช้เมื่อข้อมูลทั้ง 2 ชุด อยู่ในระดับ ช่วงระยะขึ้นไป สูตรในการคำนวณโดยใช้คะแนนดิบมีดังนี้

$$r_{xy} = \frac{N \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{\{N \sum X^2 - (\sum X)^2\} \{N \sum Y^2 - (\sum Y)^2\}}} \quad (3.1)$$

โดยที่ r_{xy} คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

$\sum XY$ คือ ผลรวมของผลคูณระหว่าง X กับ Y

$\sum X$ คือ ผลรวมของข้อมูล X

$\sum Y$ คือ ผลรวมของข้อมูล Y

$\sum X^2$ คือ ผลรวมของข้อมูล X แต่ละตัวยกกำลังสอง

$\sum Y^2$ คือ ผลรวมของข้อมูล Y แต่ละตัวยกกำลังสอง

การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple linear regression) การวิเคราะห์การถดถอยเป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (Independent Variable) กับตัวแปรตาม (Dependent Variable) จะเป็นการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (Linearity) ถ้าศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวแปรอิสระหนึ่งตัวกับตัวแปรตามหนึ่งตัว เรียกว่า การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นตรงเดี่ยวหรือการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression Analysis) ถ้าตัวแปรอิสระมีมากกว่าหนึ่งตัวกับตัวแปรตามหนึ่งตัว เรียกว่า การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple Linear Regression)

จากสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม (Y) และตัวแปรอิสระ (X) ของประชากรจะเห็นว่า กลุ่มตัวแปรอิสระ $(\alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k)$ สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรตามได้ส่วนหนึ่ง ในส่วนของการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สามารถอธิบายได้นี้ เรียกว่า ค่าความคลาดเคลื่อนในการพยากรณ์ การวิเคราะห์เชิงถดถอยแบบพหุคูณจะเป็นการพยากรณ์หาค่าสัมประสิทธิ์ α และ β_1 จากค่าสถิติ a และ b ที่ได้จากการคำนวณโดยกลุ่มตัวอย่าง โดยหลักการวิเคราะห์ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ที่คำนวณได้จะต้องเป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่ทำให้สมการดังกล่าว มีค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองรวมกันน้อยที่สุด (Ordinary Least Square : OLS)

สมการถดถอยเชิงพหุคูณของประชากร

$$Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \epsilon \quad (3.2)$$

สมการถดถอยเชิงพหุคูณของกลุ่มตัวอย่าง

$$Y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_k X_k \quad (3.3)$$

โดยที่ X คือ ตัวแปรอิสระ

Y คือ ตัวแปรตาม

k คือ จำนวนตัวแปรอิสระ

เมื่อ α และ a เป็นจุดตัดแกน Y ของสมการถดถอย หรือ ค่าของ Y เมื่อให้ตัวแปรอิสระทั้งหมดมีค่าเท่ากับศูนย์

ส่วน β และ b เป็นสัมประสิทธิ์ถดถอย (Partial regression coefficient) ของตัวแปรอิสระแต่ละตัว ซึ่งหมายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม (Y) เมื่อตัวแปรอิสระนั้นเปลี่ยนไป 1 หน่วย โดยตัวแปรอิสระตัวอื่นมีค่าคงที่ โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ a และ b สามารถคำนวณได้จากสูตรดังนี้

$$a = Y - b_1 X_1 - b_2 X_2 - \dots - b_k X_k \quad (3.4)$$

$$b_i = \frac{\sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \quad (3.5)$$

การวิเคราะห์เชิงถดถอยเชิงพหุคูณมีเงื่อนไขที่สำคัญ คือ

1. ความผิดพลาด (error) ต้องเป็นตัวแปรสุ่ม และมีการแจกแจงแบบโค้งปกติ
2. ความแปรปรวนของตัวแปรตาม (Y) ในทุกค่าของตัวแปรอิสระ (X) จะต้องเท่ากัน
3. ค่าความผิดพลาดของตัวแปรตาม (Y) แต่ละค่าเป็นอิสระกัน
4. ตัวแปรอิสระที่นำมาวิเคราะห์จะต้องเป็นอิสระกัน

รากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง Root Mean Square difference ตัวชี้ทางสถิตินี้บอกความเบี่ยงเบนเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการคำนวณจากข้อมูลซึ่งได้จากการวัด

$$RMSD = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{model,i} - X_{meas,i})^2}{N}}}{\frac{\sum_{i=1}^N X_{meas,i}}{N}} \quad (3.6)$$

RMSD คือ รากที่สองของค่าเฉลี่ยความแตกต่างยกกำลังสอง (ค่าสัมพัทธ์) (%)

$X_{model,i}$ คือ ค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองของข้อมูลที่ i

$X_{meas,i}$ คือ ค่าที่ได้จากการวัดข้อมูลที่ i

N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Error: MAE) เป็นวิธีการวัดความคลาดเคลื่อนที่นิยมใช้วิธีนี้จะแสดงให้เห็นถึงขนาดของความคลาดเคลื่อนรวม ในการวัดค่าความแม่นยำด้วยวิธีนี้กรณีค่าที่ได้มีน้อยจะแสดงว่าความแม่นยำของโมเดลที่สร้างขึ้นมีความแม่นยำสูง

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |e_t| \quad (3.7)$$

$e_t = X_{model,i} - X_{meas,i}$ คือ แทนค่าคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์

$X_{model,i}$ คือ ค่าที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองของข้อมูลที่ i

$X_{meas,i}$ คือ ค่าที่ได้จากการวัดข้อมูลที่ i

N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด e_t

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิจัยเรื่องการพัฒนาแบบจำลองฝุ่น PM2.5 จากข้อมูลดาวเทียมคาบิไซในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยครั้งนี้ ผู้วิจัยขอเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล ดังนี้

1. ซอฟต์แวร์สำหรับการวิจัย
2. ข้อมูลสำหรับการวิจัย
3. การสร้างแบบจำลอง PM2.5
4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ซอฟต์แวร์สำหรับการวิจัย

โปรแกรม IDL 8.8.2 (Interactive Data Language) เป็นภาษาโปรแกรมที่ใช้สำหรับการประมวลผลข้อมูลภาพและข้อมูลวิทยาศาสตร์อื่น ๆ โดยเฉพาะในด้านภูมิศาสตร์ รูปภาพ และการวิเคราะห์ข้อมูลของดาวเคราะห์ โปรแกรม IDL มีการใช้งานที่แพร่หลายในวงการวิทยาศาสตร์และวิศวกรรม เวอร์ชัน 8.8.2 เป็นหนึ่งในเวอร์ชันล่าสุดที่ออกให้บริการโดยบริษัท Harris Geospatial Solutions

Jupyter Notebook คือ เครื่องมือที่ใช้เขียน code ในการที่เราจะสร้าง machine learning model เป็นเครื่องมือที่นิยมมากในกลุ่มคนที่ทำงานด้าน Data Science เหมาะกับการทำงานที่เกี่ยวข้องกับการจัดการข้อมูลเป็นจำนวนมากแล้วยังต้องรายงานงานวิจัยที่ตนเองได้ทำขึ้นมาซึ่งตัว Jupyter Notebook ก็ได้ออกแบบมาตรงตามจุดประสงค์การใช้งานไม่ว่าจะเป็น การเรียกใช้งาน library พร้อมทั้งเขียน code และดูผลได้เลย Jupyter Notebook นั้นถูกออกแบบมาให้ทำงานและอ่านได้ง่ายกว่าการที่เรา text editor

R คือ Statistical Programming language พัฒนาต่อยอดมาจากภาษา S โดยนักสถิติชื่อ Ross Ihaka และ Robert Gentleman ที่ประเทศนิวซีแลนด์ในช่วงปี 1990s โดยเป้าหมายแรกของทั้งสองคนคือการสร้างโปรแกรม หรือเครื่องมือสำหรับสอนนิสิตสถิติให้กับนักศึกษา และถูกใช้อย่างแพร่หลายในกลุ่มนักสถิติ Data Miners และนักวิชาการทั่วโลก R version 1.0 เปิดตัวให้ดาวน์โหลดใช้งานวันที่ 29 ก.พ. 2543 อัปเดตต่อเนื่อง เม.ย.

2565 ที่ผ่านมา R พัฒนามาถึงเวอร์ชัน 4.2.0 แล้ว มีฟีเจอร์ใหม่ ๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง อ้างอิงจาก Tiobe Index (พ.ค. 2565) R ได้รับความนิยมอยู่ในอันดับที่ 13 ของภาษาคอมพิวเตอร์ทั่วโลก ส่วนตัวผู้เขียนเองคิดว่าเราจะเอา R มาเทียบกับภาษาอื่น ๆ ยากหน่อย เพราะขอบเขตของ R จะโฟกัสที่การวิเคราะห์ข้อมูลเป็นหลักแตกต่างจากภาษาคอมพิวเตอร์อื่น ๆ

Microsoft Excel เป็นโปรแกรมทำงานด้านตารางคำนวณ (Spreadsheet) สามารถ ทำตาราง สร้างแบบฟอร์ม สร้างการคำนวณ ทำงานกับข้อมูล เตรียมข้อมูล สรุปผลข้อมูล มีเครื่องมือต่าง ๆ มากมาย มีอะไรบางอย่างดูกันได้ในบทความนี้ พร้อม Infographic แบบเข้าใจง่าย ๆ

ข้อมูลสำหรับการวิจัย

ข้อมูลดาวเทียม

ดาวเทียมคาลิปโซ CALIPSO การเก็บรวบรวมข้อมูลดาวเทียมด้วยการเก็บรวบรวมข้อมูลโปรไฟล์ผืนภาคดาวเทียมโดยดาวดาวันโหลดข้อมูล

CAL_LID_L2_05kmAPro-Standard-V4-21 จากเว็บไซต์ EARTHDATA Atmosphere เพื่อดึงค่าตัวแปรโดยอัลกอริทึมคือ Column_Optical_Depth_Tropospheric_Aerosols_532 เริ่มตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2560 – วันที่ 31 ธันวาคม 2565

ดาวเทียม MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) ข้อมูลตัวแปรสภาพอากาศสำหรับสร้างแบบจำลอง ประกอบด้วย AOD RH TEMP HPBL NDVI WS เริ่มตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2560 – วันที่ 31 ธันวาคม 2565 โดยการเขียนโปรแกรมอ่านค่าตัวแปรด้วยโปรแกรม IDL

ข้อมูลภาคพื้นดิน (ground based)

เครื่องชันโฟโตมิเตอร์ (sun photometer) ตัวแปรค่าความลึกเชิงแสง (AOD) โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่ปี 2560 – 2565 จังหวัดเชียงใหม่ สำหรับการเปรียบเทียบข้อมูลความลึกเชิงแสงที่ได้จากข้อมูลดาวเทียม CALIPSO

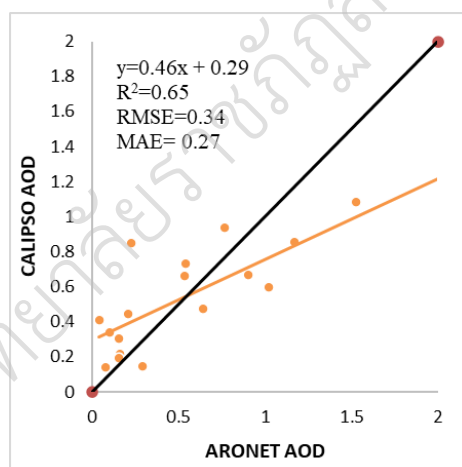
เครื่องตรวจวัดปริมาณฝุ่นและก๊าซแบบต่อเนื่อง จากแบรนด์ Comde Derenda ค่าปริมาณฝุ่นชนิด PM2.5 พื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย 9 จังหวัด ประกอบด้วย เชียงใหม่ ลำปาง แม่ฮ่องสอน เชียงราย น่าน ลำพูน แพร่ พะเยา และอุตรดิตถ์ เริ่มตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2560 – วันที่ 31 ธันวาคม 2565

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การเปรียบเทียบข้อมูล AOD ระหว่าง AERONET กับข้อมูลดาวเทียม

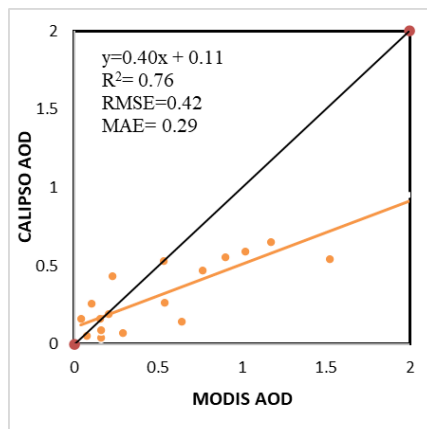
การเปรียบเทียบข้อมูล AOD ภาคพื้นดินที่ได้จากเครือข่าย AERONET กับข้อมูลดาวเทียม CALIPSO ตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2560–2565 ในพื้นที่ภาคเหนือ โดยศึกษาเปรียบเทียบข้อมูลในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ เพื่อสร้างแบบจำลองฝุ่น PM_{2.5} ในบรรยากาศ

1. การเปรียบเทียบ AOD ระหว่าง AERONET กับ CALIPSO โดยใช้ค่าทางสถิติ Pearson Correlation Coefficient (R^2), Root Mean Square Error (RMSE), MAB และ Relative Mean Bias (RMB) พบว่า AOD ARONET กับ AOD CALISO จังหวัดเชียงใหม่ มีค่า $R^2 = 0.65$, slope = 0.46, RMSE = 0.34 และ MAE = 0.27 จากการศึกษาคือจะเห็นว่าค่า R^2 มีค่า 0.65 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้



ภาพประกอบ 25 แสดงการเปรียบเทียบ AOD ระหว่าง AERONET กับ CALIPSO ระหว่างปี พ.ศ. 2560 –2565 ในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่

2 การเปรียบเทียบ AOD ระหว่าง MODIS กับ CALIPSO โดยใช้ค่าทางสถิติ R^2 , RMSE, MAB และ RMB พบว่า AOD ARONET กับ AOD CALISO จังหวัดเชียงใหม่ มีค่า $R^2 = 0.65$, slope = 0.46, RMSE = 0.34 MAE = 0.27 จากการศึกษาคือจะเห็นว่าค่า R^2 มีค่า 0.65 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้



ภาพประกอบ 26 แสดงการเปรียบเทียบ AOD ระหว่าง MODIS กับ CALIPSO ระหว่าง พ.ศ. 2560 –2565 ในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่

ตาราง 2 แสดงข้อมูลการเปรียบเทียบค่า AOD CALIPSO กับ AOD MODIS และ AOD Sun Photometer ระหว่างปี พ.ศ.2560–2565 ของพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่

สถานี	RMES	MBE	MAE	R ²
Sun Photometer	0.34	0.80	0.27	0.65
MODIS	0.40	0.24	0.29	0.76

ตาราง 3 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ยตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยาจากข้อมูลดาวเทียม

สถานี	Lat	Long	AOD	TEMP	RH	WS	HPBL	NDVI
เชียงใหม่	18.85	98.96	0.39	25.28	60.20	17.76	484.70	0.47
ลำปาง	18.28	99.52	0.61	29.66	59.00	11.84	516.59	0.56
แม่ฮ่องสอน	19.31	97.96	0.42	28.34	54.38	17.28	342.80	0.62
เชียงราย	19.70	100.14	0.50	28.60	47.35	17.89	477.30	0.52
น่าน	18.79	100.71	0.53	24.10	55.96	20.43	510.60	0.62
ลำพูน	18.58	99.07	0.71	28.84	37.87	24.34	547.20	0.45
แพร่	18.11	100.17	0.62	29.15	46.43	14.99	532.85	0.46
พะเยา	19.20	99.81	0.59	28.07	42.32	20.27	541.10	0.51
อุตรดิตถ์	17.63	100.07	0.11	26.83	72.15	11.41	477.80	0.70

ข้อมูลดาวเทียมที่ใช้สำหรับการสร้างแบบจำลองฝุ่น PM2.5 ผู้วิจัยใช้ข้อมูลดาวเทียม CALIPSO โดย AOD เป็นตัวแปรสำคัญในการสร้างแบบจำลอง และใช้ข้อมูลตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยาจากดาวเทียม Aqua ดาวนั้โหลดผ่านเว็บไซต์ NCEP-NCAR ประกอบด้วยข้อมูล TEMP RH WS HPBL และ NDVI พื้นที่ภาคเหนือ 9 จังหวัด ประกอบด้วย เชียงใหม่ ลำปาง แม่ฮ่องสอน เชียงราย น่าน ลำพูน แพร่ พะเยา และอุตรดิตถ์ ระหว่างปี พ.ศ. 2560 – 2565 ได้ค่าเฉลี่ยในตาราง 3

การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อแบบจำลอง

ในการสร้างแบบจำลองผู้วิจัยทำการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีผลต่อแบบจำลองในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ ระหว่างค่า PM2.5 กับตัวแปรต่าง ๆ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2560 – 2565 เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างแบบจำลอง

ตาราง 4 แสดงความสัมพันธ์ของข้อมูลที่มีผลต่อแบบจำลองในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ ระหว่างค่า PM2.5 กับตัวแปรต่าง ๆ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2560 – 2565

ตัวแปร	Units	slope	R ²
RH	(%)	0.720	0.55
NDVI	ไม่มีหน่วย	0.002	0.39
WS	(m/s ²)	0.220	0.32
TEMP	(°C)	0.590	0.30
HPBL	(ไม่มีหน่วย)	0.430	0.05

จากตาราง 4 ความสัมพันธ์ของข้อมูลที่มีผลต่อแบบจำลองในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ พบว่า ความสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่า RH NDVI WS TEMP และ HPBL มีความสัมพันธ์เรียงลำดับจากมากไปหาน้อยตามลำดับได้ดังนี้ RH = 0.56, NDVI = 0.39, WS = 0.32, TEMP = 0.30 และ HPBL = 0.05 ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้นำข้อมูลไปสู่การสร้างแบบจำลองโดยเรียงลำดับจากตัวแปรที่มีความสัมพันธ์มากที่สุดไปน้อยที่สุด และนำข้อมูลเป็นต้นแบบไปใช้แบบจำลองในจังหวัดอื่น ๆ ในภาคเหนือ

ตาราง 5 การสร้างแบบจำลองโมเดล PM 2.5 (Linear Mixed Model)

โมเดล	AOD	RH	NDVI	WS	TEMP	HPBL
1	/					
2	/	/				
3	/	/	/			
4	/	/	/	/		
5	/	/	/	/	/	
6	/	/	/	/	/	/

จากตารางการสร้างแบบจำลอง PM 2.5 โดยใช้วิธีการเชิงเส้นผสม Fixed effect of the linear mixed – effects (LME) ผู้วิจัยได้สร้างแบบจำลองที่ 1 ประกอบด้วยตัวแปร AOD แบบจำลองที่ 2 ประกอบด้วยตัวแปร AOD + RH แบบจำลองที่ 3 ประกอบด้วยตัวแปร AOD + RH + NDVI แบบจำลองที่ 4 ประกอบด้วยตัวแปร AOD + RH + NDVI + WS แบบจำลองที่ 5 ประกอบด้วยตัวแปร AOD + RH + NDVI + WS + TEMP และแบบจำลองที่ 6 ประกอบด้วยตัวแปร AOD + RH + NDVI + WS + TEMP + HPBL ซึ่งการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยใช้ทั้ง 6 แบบจำลอง เพื่อหาแบบจำลองที่มีค่าใกล้เคียงค่าจากการตรวจวัดภาคพื้นดินมากที่สุดใช้ในการประมาณค่าฝุ่น PM2.5 จำนวน 9 จังหวัดในภาคเหนือของประเทศไทย

ตาราง 6 ค่าคงที่ของ Fixed effect of LME สำหรับแบบจำลองความเข้มข้นของ PM2.5 โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2560 –2565

สถานี	Model	$\beta_{0(\text{Intercept})}$	$\beta_{1(\text{AOD})}$	$\beta_{2(\text{RH})}$	$\beta_{3(\text{NDVI})}$	$\beta_{4(\text{WS})}$	$\beta_{5(\text{TEMP})}$	$\beta_{6(\text{HPBL})}$
เชียงใหม่	2	69.06***	24.28***	-0.65***				
ลำปาง	2	49.48***	6.02*	-0.47***				
แม่ฮ่องสอน	3	125.04***	7.25	-0.34*	-120.81***			
เชียงราย	2	65.57***	29.10*	-0.75***				
น่าน	2	27.85**	46.02***	-0.27*				

ตาราง 6 (ต่อ)

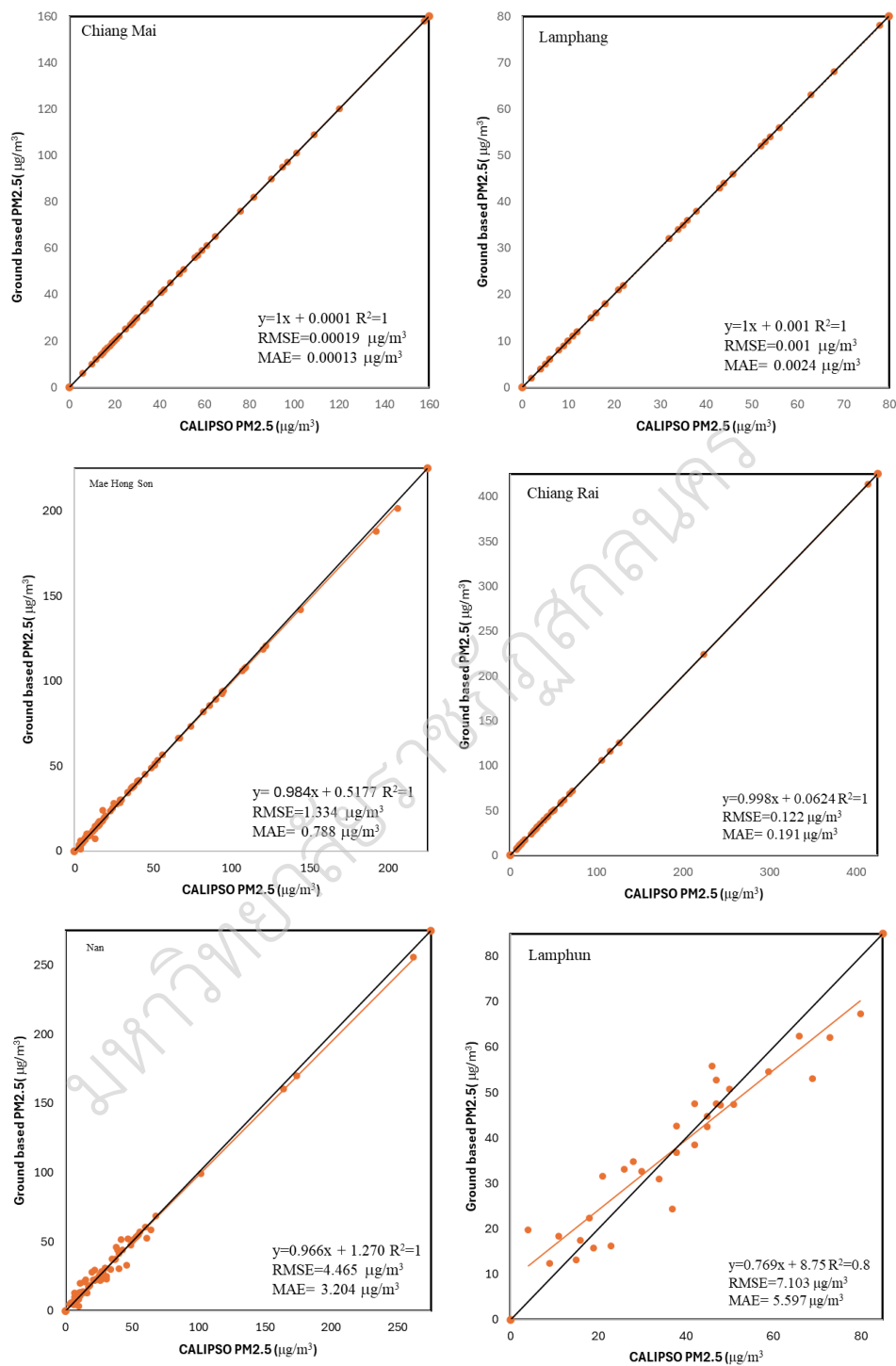
สถานี	Model	$\beta_{0(\text{Intercept})}$	$\beta_{1(\text{AOD})}$	$\beta_{2(\text{RH})}$	$\beta_{3(\text{NDVI})}$	$\beta_{4(\text{WS})}$	$\beta_{5(\text{TEMP})}$	$\beta_{6(\text{HPBL})}$
ลำพูน	6	90.19	21.90	-0.20	1.85	0.31	-0.84	-0.08
แพร่	5	-71.69	10.79	-0.45*	81.39	2.13	2.07	
พะเยา	5	161.58**	9.71	-0.68**	-34.81	-0.28	-3.02*	
อุตรดิตถ์	3	48.106	1.34	-0.14	-30.66			

การเปรียบเทียบข้อมูลความเข้มข้นฝุ่น PM2.5

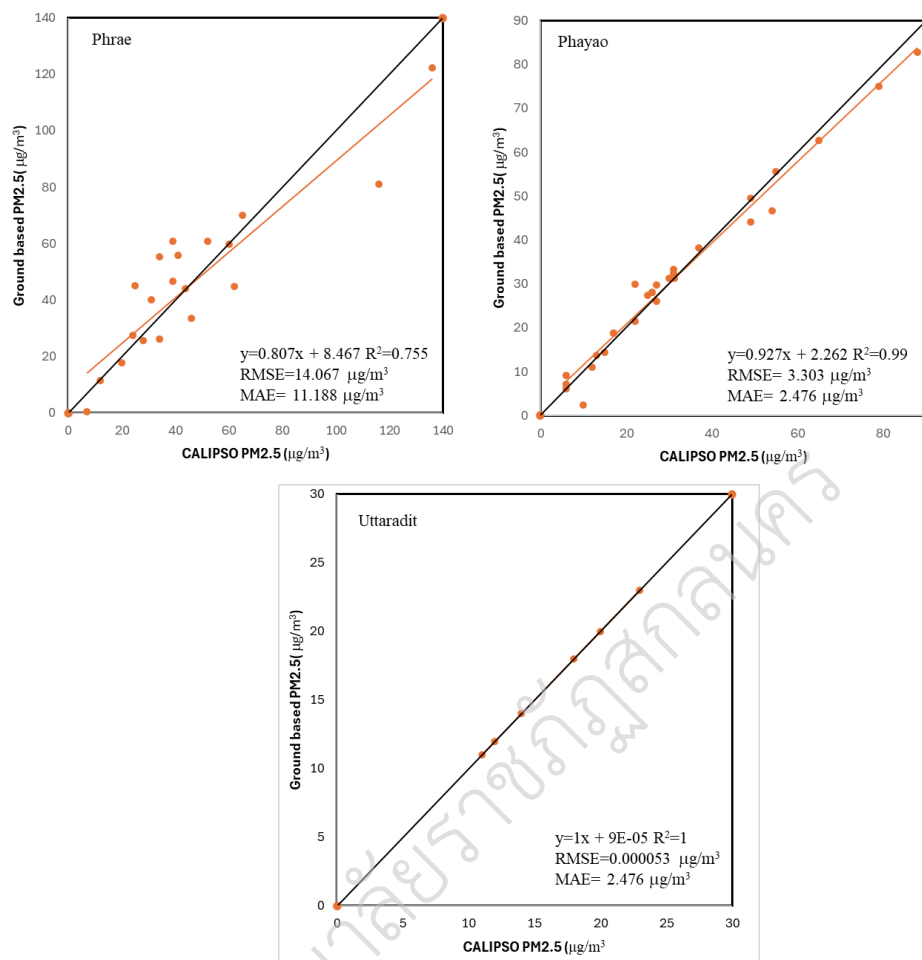
ตาราง 7 ข้อมูลความเข้มข้นฝุ่น PM2.5 ภาคพื้นดิน กับ PM2.5 ที่ได้จากแบบจำลอง LME

สถานี	PM2.5 _{measured} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM2.5 _{predictor}	Bias	R ²	MAE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	RMSE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
เชียงใหม่	39.18	39.18	0	1.00	0.00	0.00
ลำปาง	25.16	25.16	0	1.00	0.00	0.00
แม่ฮ่องสอน	33.43	33.43	0	1.00	0.79	1.33
เชียงราย	44.27	44.27	0	1.00	0.19	0.12
น่าน	37.57	37.57	0	1.00	3.20	4.47
ลำพูน	37.96	37.96	0	0.80	5.60	7.10
แพร่	43.90	43.90	0	0.76	11.19	14.07
พะเยา	31.29	31.29	0	0.99	2.48	3.30
อุตรดิตถ์	16.33	16.33	0	1.00	0.00	0.00

กราฟแสดงการเปรียบเทียบความเข้มข้น PM2.5 ระหว่างค่าที่ได้จากการวัด และค่าที่ได้จากแบบจำลองในพื้นที่ภาคเหนือ 9 จังหวัด ประกอบด้วย เชียงใหม่ ลำปาง แม่ฮ่องสอน เชียงราย น่าน ลำพูน แพร่ พะเยา และอุตรดิตถ์ ของประเทศไทย



ภาพประกอบ 27 การเปรียบเทียบความเข้มข้น PM2.5 ระหว่างค่าที่ได้จากการวัดและค่าที่ได้จากแบบจำลอง



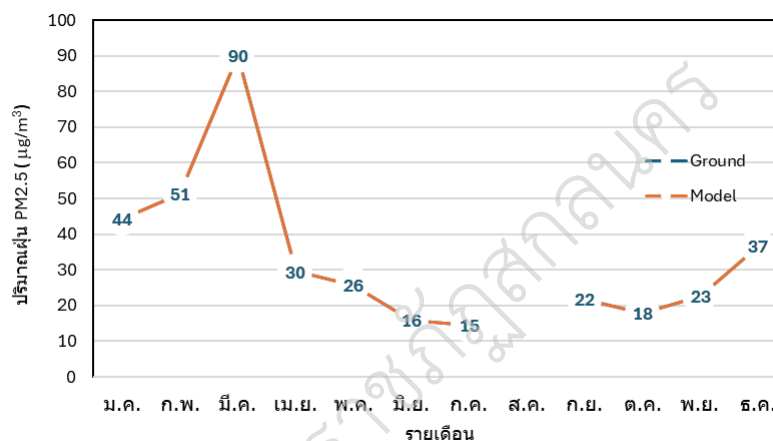
ภาพประกอบ 28 การเปรียบเทียบความเข้มข้น PM2.5 ระหว่างค่าที่ได้จากการวัดและค่าที่ได้จากแบบจำลอง

จากการเปรียบเทียบความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 ระหว่างภาคพื้นดินกับค่าที่ได้จากแบบจำลอง ระหว่างปี พ.ศ.2560 – 2565 จำนวน 9 จังหวัดในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย พบว่า จังหวัดเชียงใหม่ ลำปาง แม่ฮ่องสอน เชียงราย น่าน และอุดรดิตถ์ มีค่า R^2 มากที่สุด $R^2 = 1$ ส่วนจังหวัดพะเยา ลำพูน แพร่ มีค่า R^2 เท่ากับ 0.93 0.80 0.76 ตามลำดับ จังหวัดแพร่มีค่าน้อยที่สุด $R^2 = 0.76$ ซึ่งการเปรียบเทียบความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 แสดงให้เห็นว่าการสร้างแบบจำลองมีความแม่นยำสำหรับการประมาณค่าฝุ่น PM2.5 ในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย

การเปลี่ยนแปลงข้อมูลรายเดือนของความเข้มข้นฝุ่น PM2.5

การพัฒนาแบบจำลองฝุ่น PM2.5 จากข้อมูล AOD ที่ได้จากดาวเทียมคาไลปโซ กับตัวแปรต่าง ๆ ในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย ผู้วิจัยได้มีการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงรายเดือนของความเข้มข้นฝุ่น PM2.5 ที่ได้จากแบบจำลองกับข้อมูลภาคพื้นดิน ได้ผล ดังนี้

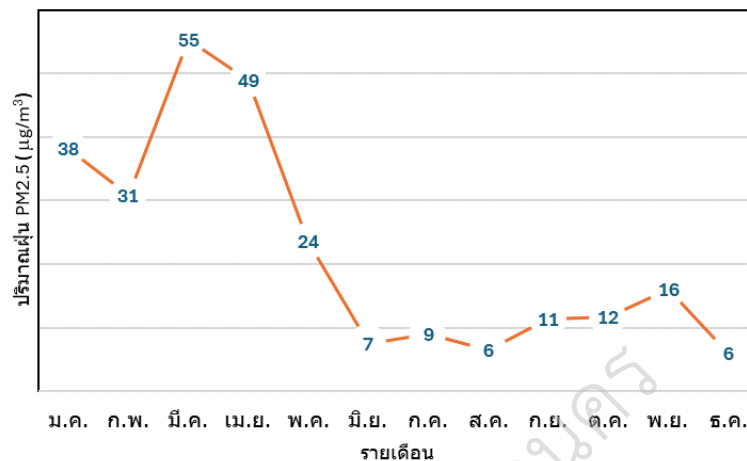
1. จังหวัดเชียงใหม่



ภาพประกอบ 29 การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ ระหว่างปี พ.ศ.2560-2565

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรายเดือนของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ พบว่า ช่วงเดือนมีนาคมปริมาณฝุ่น PM2.5 สูงสุด มีค่าเท่ากับ $90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ มีค่าต่ำสุดในเดือนกรกฎาคม มีค่าเท่ากับ $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ค่าเฉลี่ยเท่ากับ $39.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ข้อมูลการเปรียบเทียบข้อมูล PM2.5 ภาคพื้น กับแบบจำลองมีค่า $R^2 = 1.00$

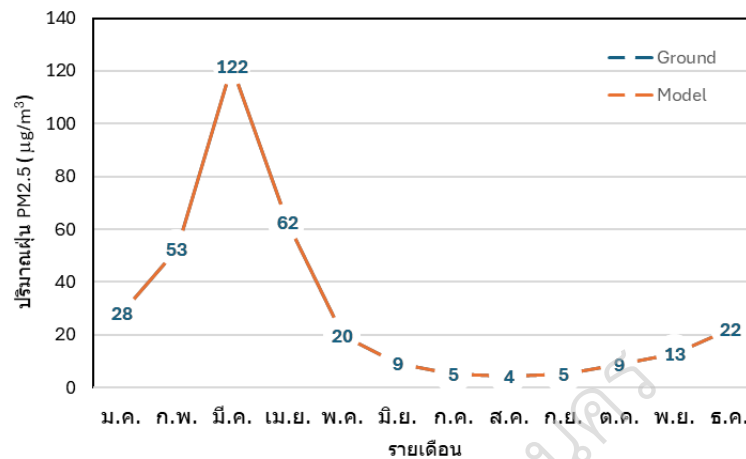
2. จังหวัดลำปาง



ภาพประกอบ 30 การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดลำปาง ระหว่างปี พ.ศ.2560-2565

การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของฝุ่น PM2.5 จังหวัดลำปาง ค่าสูงสุดในเดือน สิงหาคมปริมาณฝุ่น PM2.5 สูงสุดมีค่าเท่ากับ $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ค่าต่ำสุดในเดือนกรกฎาคม และ เดือนธันวาคมมีค่าเท่ากับ $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ค่าเฉลี่ยเท่ากับ $25.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ข้อมูลการเปรียบเทียบ ข้อมูล PM2.5 ภาคพื้น กับแบบจำลองมีค่า $R^2 = 1.00$

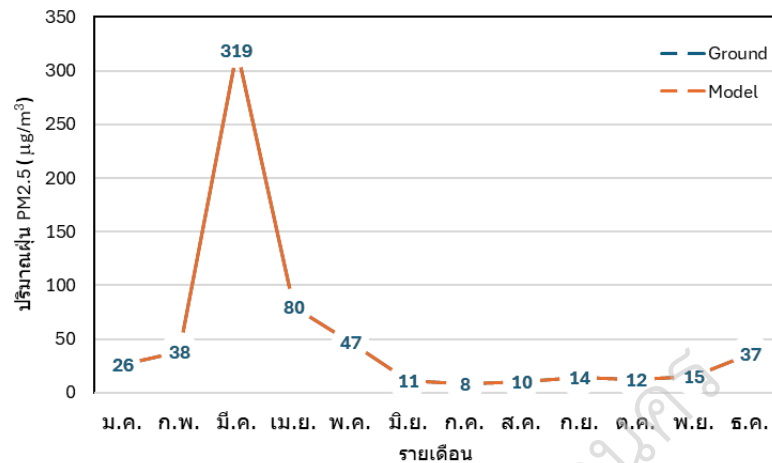
3. จังหวัดแม่ฮ่องสอน



ภาพประกอบ 31 การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดแม่ฮ่องสอน
ระหว่างปี พ.ศ.2560-2565

การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของฝุ่น PM2.5 จังหวัดแม่ฮ่องสอน พบว่ามีค่าสูงสุดในเดือนมีนาคมปริมาณฝุ่นค่าเท่ากับ $122 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ค่าต่ำสุดในเดือนสิงหาคม มีค่าเท่ากับ $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ค่าเฉลี่ยเท่ากับ $33.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ข้อมูลการเปรียบเทียบข้อมูล PM2.5 ภาคพื้น กับแบบจำลองมีค่า $R^2 = 1.00$

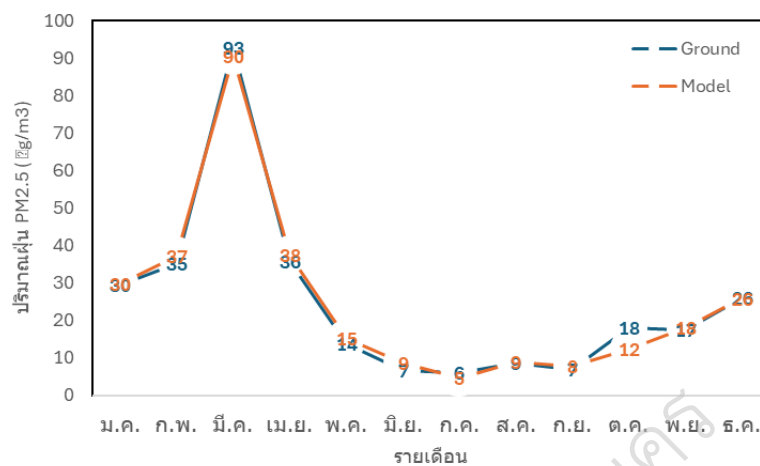
4. จังหวัดเชียงราย



ภาพประกอบ 32 การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของฝุ่น PM_{2.5} พื้นที่จังหวัดเชียงราย ระหว่างปี พ.ศ. 2560-2565

การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของฝุ่น PM_{2.5} จังหวัดเชียงราย พบว่ามีค่าสูงสุดในเดือนมีนาคม ปริมาณฝุ่นค่าเท่ากับ 319 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ มีค่าต่ำสุดในเดือนกรกฎาคมมีค่าเท่ากับ 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 44.27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ข้อมูลการเปรียบเทียบข้อมูล PM_{2.5} ภาคพื้นกับแบบจำลองมีค่า $R^2 = 1.00$

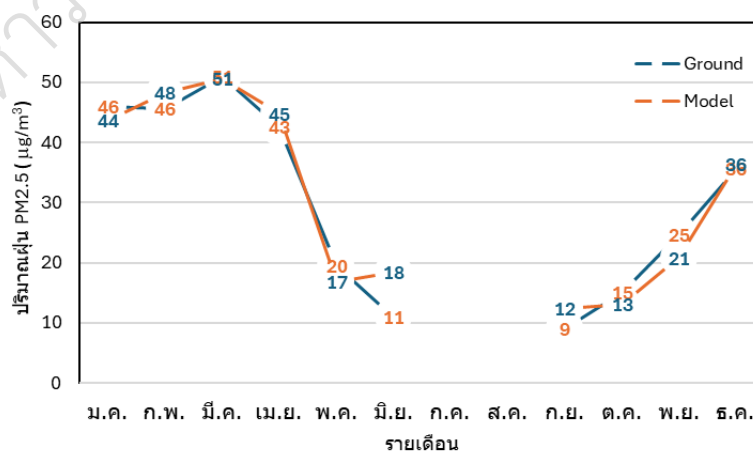
5. จังหวัดน่าน



ภาพประกอบ 33 การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดน่าน
ระหว่างปี พ.ศ. 2560-2565

การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของฝุ่น PM2.5 จังหวัดน่าน พบว่ามีค่าสูงสุดในเดือน มีนาคมปริมาณฝุ่นมีค่าเท่ากับ $93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ มีค่าต่ำสุดในเดือนกรกฎาคมมีค่าเท่ากับ $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ค่าเฉลี่ยเท่ากับ $37.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ข้อมูลการเปรียบเทียบข้อมูล PM2.5 ภาคพื้น กับแบบจำลองมีค่า $R^2 = 1.00$

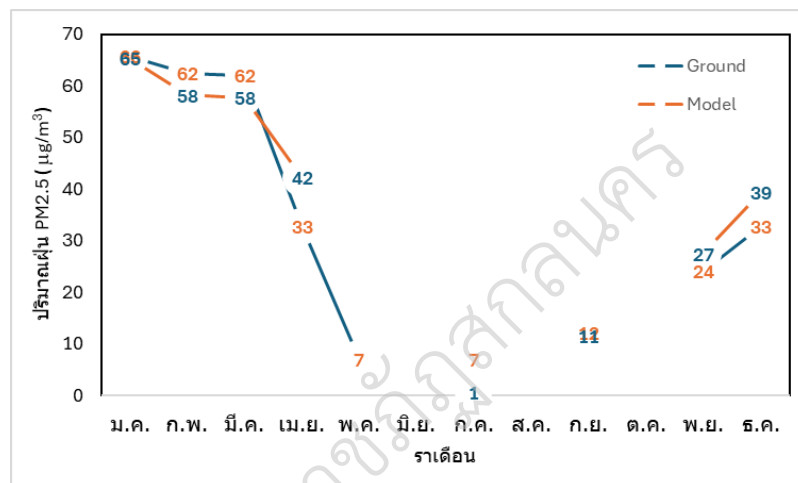
6. จังหวัดลำพูน



ภาพประกอบ 34 การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดลำพูน
ระหว่างปี พ.ศ.2560-2565

การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของฝุ่น PM2.5 จังหวัดลำพูน พบว่ามีค่าสูงสุดในเดือน มีนาคมปริมาณฝุ่น PM2.5 ค่าเท่ากับ $51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ มีค่าต่ำสุดในเดือนกันยายน มีค่าเท่ากับ $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ค่าเฉลี่ยเท่ากับ $37.96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ข้อมูลการเปรียบเทียบข้อมูล PM2.5 ภาคพื้น กับ แบบจำลองมีค่า $R^2 = 0.80$

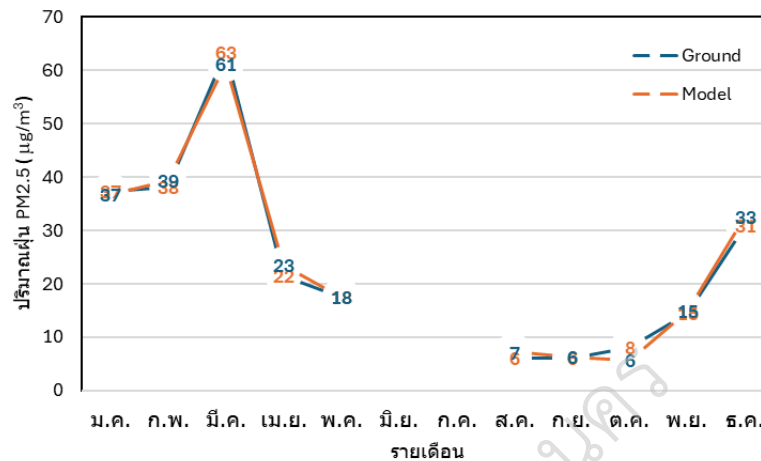
7. จังหวัดแพร่



ภาพประกอบ 35 การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดแพร่ ระหว่างปี พ.ศ. 2560-2565

การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของฝุ่น PM2.5 จังหวัดแพร่ พบว่ามีค่าสูงสุดในเดือน มกราคมปริมาณเท่ากับ $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ มีค่าต่ำสุดในเดือนพฤษภาคม และกรกฎาคมเท่ากับ $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ค่าเฉลี่ยเท่ากับ $43.90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ข้อมูลการเปรียบเทียบข้อมูล PM2.5 ภาคพื้น กับ แบบจำลองมีค่า $R^2 = 0.76$

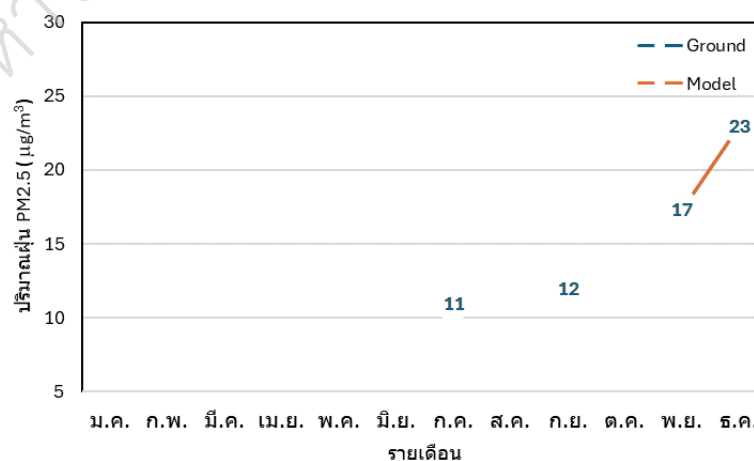
8. จังหวัดพะเยา



ภาพประกอบ 36 การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดพะเยา ระหว่างปี พ.ศ.2560-2565

การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของฝุ่น PM2.5 จังหวัดพะเยาพบว่ามีค่าสูงสุดในเดือนมีนาคมปริมาณฝุ่นมีค่าเท่ากับ $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ค่าต่ำสุดในเดือนกันยายน และเดือนตุลาคม มีค่าเท่ากับ $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ค่าเฉลี่ยเท่ากับ $31.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ข้อมูลการเปรียบเทียบข้อมูล PM2.5 ภาคพื้น กับแบบจำลองมีค่า $R^2 = 0.93$

9. จังหวัดอุดรธานี



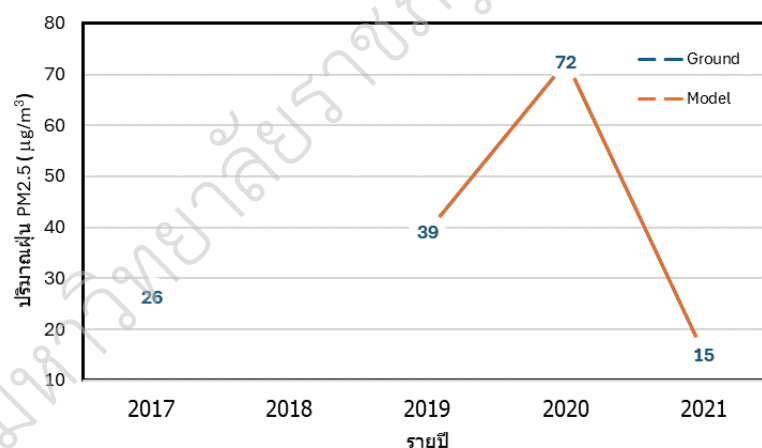
ภาพประกอบ 37 การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดอุดรธานี ระหว่างปี พ.ศ.2560-2565

การเปลี่ยนแปลงรายเดือนของฝุ่น PM2.5 จังหวัดอุดรดิตถ์ พบว่ามีค่าสูงสุดในเดือนพฤศจิกายนปริมาณฝุ่นมีค่าเท่ากับ $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ มีค่าต่ำสุดในเดือนกรกฎาคม มีค่าเท่ากับ $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ค่าเฉลี่ยเท่ากับ $16.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ข้อมูลการเปรียบเทียบข้อมูล PM2.5 ภาคพื้นกับแบบจำลองมีค่า $R^2 = 1.00$

การเปลี่ยนแปลงข้อมูลรายปีของความเข้มข้นฝุ่น PM2.5

การพัฒนาแบบจำลองฝุ่น PM2.5 ในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย ผู้วิจัยได้มีการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงข้อมูลรายปีของความเข้มข้นฝุ่น PM2.5 โดยใช้โดยข้อมูลความเข้มข้นฝุ่น PM2.5 ภาคพื้นดิน และจากการสร้างแบบจำลอง เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงรายปีของข้อมูลฝุ่น PM2.5 ในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย ประกอบไปด้วย 9 จังหวัดดังต่อไปนี้

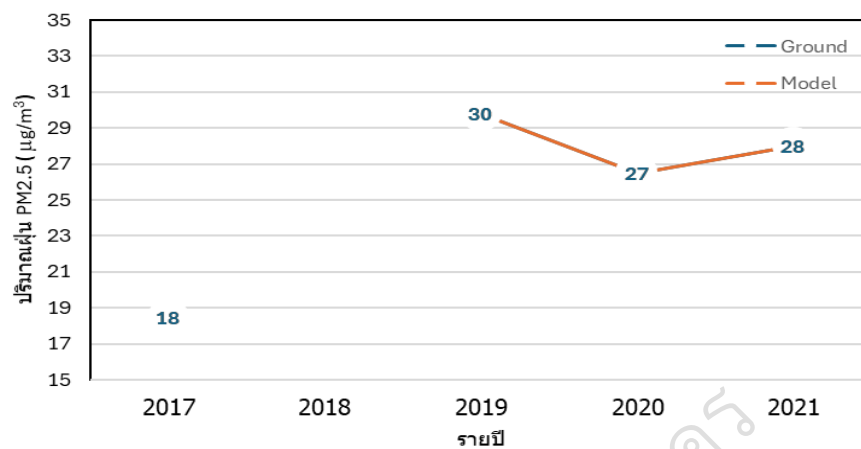
1. จังหวัดเชียงใหม่



ภาพประกอบ 38 การเปลี่ยนแปลงรายปีของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ ระหว่างปี พ.ศ.2560-2565

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรายปีของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ ระหว่างปี พ.ศ. 2560 – 2565 พบว่า ปีพ.ศ. 2560 ค่าเฉลี่ยของปริมาณฝุ่น PM2.5 สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ $72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ มีค่าต่ำสุดในปี พ.ศ. 2565 มีค่าเท่ากับ $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$

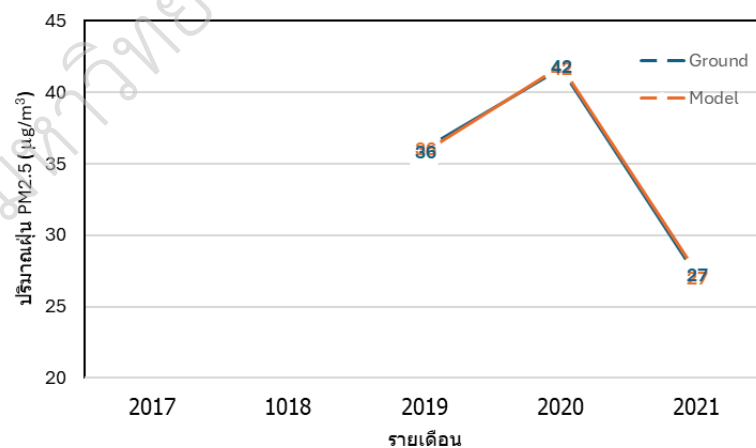
2. จังหวัดลำปาง



ภาพประกอบ 39 การเปลี่ยนแปลงรายรายปีของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดลำปาง ระหว่างปี พ.ศ.2560-2565

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรายรายปีของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดลำปาง ระหว่างปี พ.ศ. 2560 – 2565 พบว่าปี พ.ศ. 2562 มีค่าเฉลี่ยของปริมาณฝุ่น PM2.5 สูงสุดค่าเท่ากับ $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ค่าต่ำสุดในปี พ.ศ. 2565 มีค่าเท่ากับ $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$

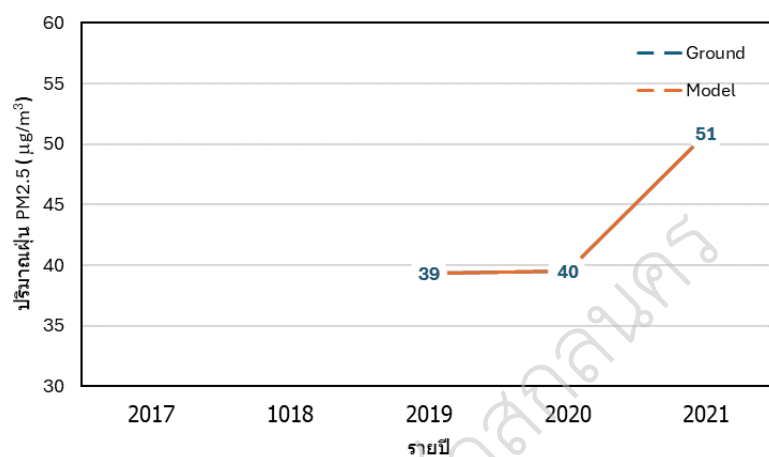
3. จังหวัดแม่ฮ่องสอน



ภาพประกอบ 40 การเปลี่ยนแปลงรายรายปีของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดแม่ฮ่องสอน ระหว่างปี พ.ศ. 2560-2565

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรายปีของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดแม่ฮ่องสอน ระหว่างปี พ.ศ. 2560 – 2565 พบว่า ปี พ.ศ. 2563 ค่าเฉลี่ยของปริมาณฝุ่น PM2.5 สูงสุด มีค่าเท่ากับ $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ มีค่าต่ำสุดในปี พ.ศ. 2565 มีค่าเท่ากับ $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$

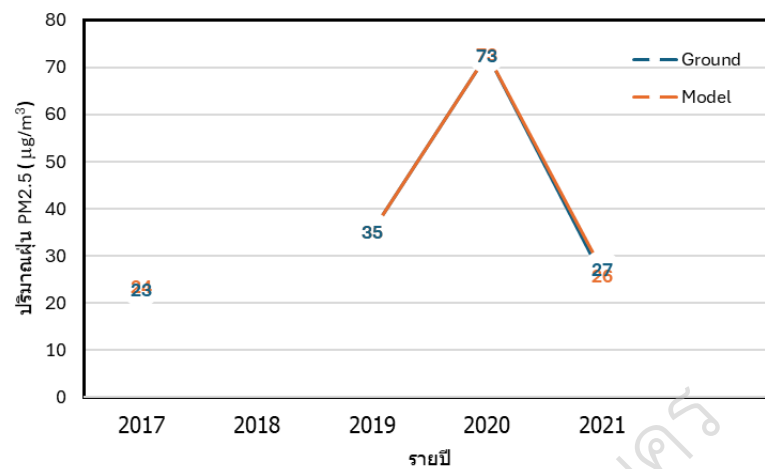
4. จังหวัดเชียงราย



ภาพประกอบ 41 การเปลี่ยนแปลงรายรายปีของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดเชียงราย ระหว่างปี พ.ศ.2560-2565

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรายปีของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดเชียงราย ระหว่างปี พ.ศ. 2560 – 2565 พบว่า ปี พ.ศ. 2565 ค่าเฉลี่ยของปริมาณฝุ่น PM2.5 สูงสุด มีค่าเท่ากับ $51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ มีค่าต่ำสุดในปี พ.ศ. 2562 มีค่าเท่ากับ $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$

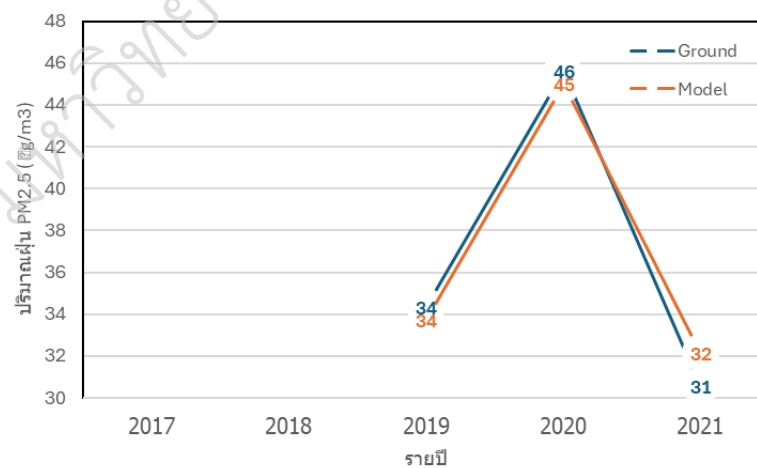
5. จังหวัดน่าน



ภาพประกอบ 42 การเปลี่ยนแปลงรายรายปีของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดน่าน ระหว่างปี พ.ศ. 2560-2565

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรายรายปีของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดน่านระหว่างปี พ.ศ. 2560 – 2565 พบว่า ปี พ.ศ. 2563 ค่าเฉลี่ยของปริมาณฝุ่น PM2.5 สูงสุด มีค่าเท่ากับ 73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ มีค่าต่ำสุดในปี พ.ศ. 2565 มีค่าเท่ากับ 27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

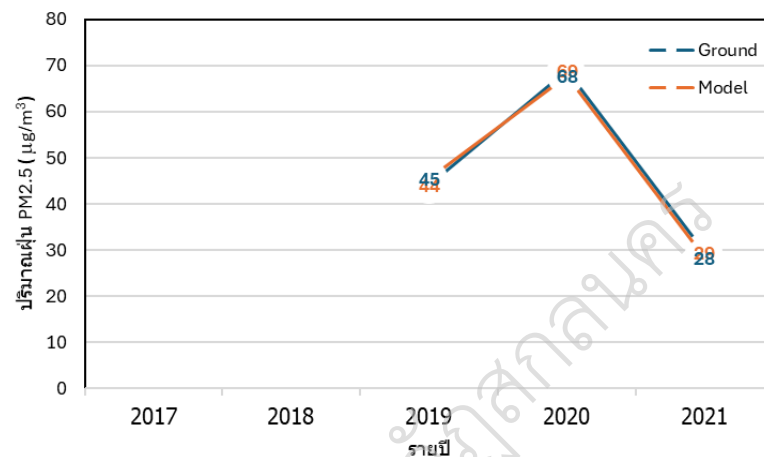
6. จังหวัดลำพูน



ภาพประกอบ 43 การเปลี่ยนแปลงรายรายปีของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดลำพูน ระหว่างปี พ.ศ. 2560-2565

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรายปีของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดลำพูน ระหว่างปี พ.ศ. 2560 – 2565 พบว่า ปี พ.ศ. 2563 ค่าเฉลี่ยของปริมาณฝุ่น PM2.5 สูงสุด มีค่าเท่ากับ $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ มีค่าต่ำสุดในปี พ.ศ. 2565 มีค่าเท่ากับ $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$

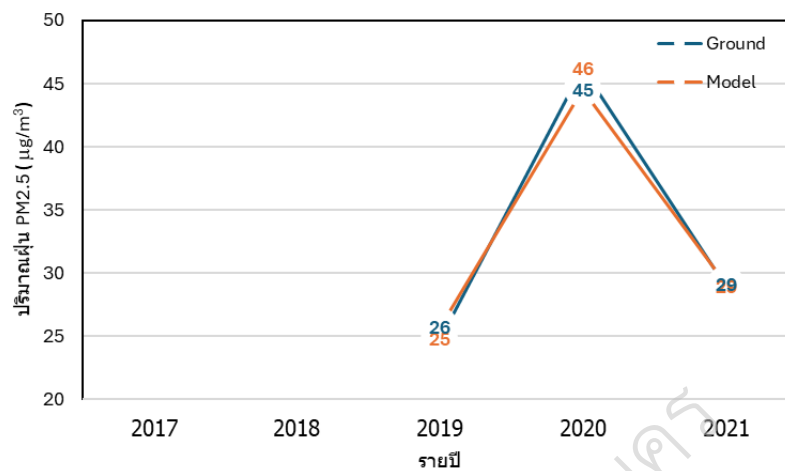
7. จังหวัดแพร่



ภาพประกอบ 44 การเปลี่ยนแปลงรายปีของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดแพร่ ระหว่างปี พ.ศ. 2560–2565

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรายปีของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดแพร่ระหว่างปี พ.ศ. 2560 – 2565 พบว่า ปี พ.ศ. 2563 ค่าเฉลี่ยของปริมาณฝุ่น PM2.5 สูงสุด มีค่าเท่ากับ $68 \mu\text{g}/\text{m}^3$ มีค่าต่ำสุดในปี พ.ศ. 2565 มีค่าเท่ากับ $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$

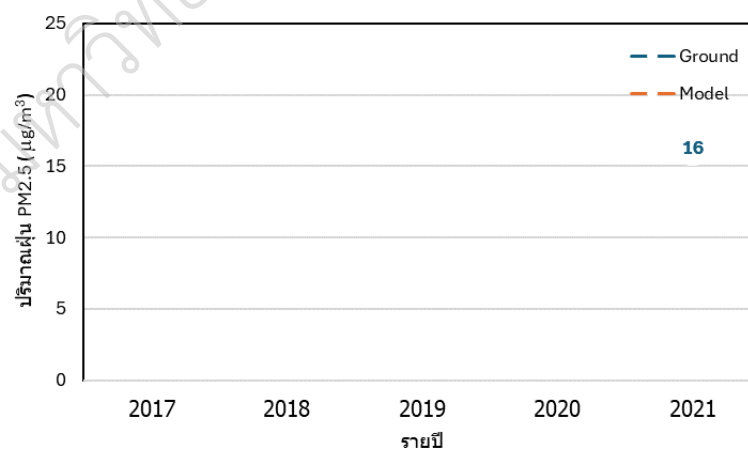
8. จังหวัดพะเยา



ภาพประกอบ 45 การเปลี่ยนแปลงรายรายปีของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดพะเยา ระหว่างปี พ.ศ.2560-2565

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรายปีของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดน่านระหว่างปี พ.ศ. 2560 – 2565 พบว่า ปี พ.ศ. 2563 ค่าเฉลี่ยของปริมาณฝุ่น PM2.5 สูงสุด มีค่าเท่ากับ 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ มีค่าต่ำสุดในปี พ.ศ. 2565 มีค่าเท่ากับ 26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

9. จังหวัดอุดรธานี



ภาพประกอบ 46 การเปลี่ยนแปลงรายรายปีของฝุ่น PM2.5 พื้นที่จังหวัดอุดรธานี ระหว่างปี พ.ศ.2560-2565

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงรายปีของฝุ่น PM_{2.5} พื้นที่จังหวัดอุดรดิตถ์
ระหว่างปี พ.ศ. 2560 – 2565 พบว่า ปี พ.ศ. 2565 ค่าเฉลี่ยของปริมาณฝุ่น PM_{2.5} มีค่า
เท่ากับ 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การพัฒนาแบบจำลองฝุ่น PM2.5 ในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย สรุปผลตามลำดับ ดังนี้

1. ความมุ่งหมายของการวิจัย
2. การเก็บรวบรวมข้อมูล
3. สรุปผล
4. อภิปรายผล
5. ข้อเสนอแนะ

ความมุ่งหมายของการวิจัย

ในการวิจัยการพัฒนาแบบจำลองฝุ่น PM2.5 ในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดความมุ่งหมายของการวิจัย ดังนี้

1. การพัฒนาแบบจำลองฝุ่น PM2.5 จากข้อมูลดาวเทียม CALIPSO และตัวแปรต่าง ๆ
2. เพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยในระดับนานาชาติ

การเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่าง ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอน ดังนี้

1. ผู้วิจัยรวบรวมข้อมูลความเข้มข้นของฝุ่น PM2.5 ภาคพื้นดิน จากการดาวน์โหลดข้อมูลผ่านเว็บไซต์ Air4 Thailand กรมควบคุมมลพิษ ระหว่างปี พ.ศ. 2560 – พ.ศ. 2565 ในพื้นที่ 9 จังหวัดภาคเหนือของประเทศไทย
2. ผู้วิจัยรวบรวมข้อมูลตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณฝุ่น PM2.5 ภาคข้อมูลดาวเทียม ประกอบด้วย ข้อมูล AOD จากดาวเทียม CALIPSO ผ่านเว็บไซต์ Earth

data และข้อมูล RH HPBL NDVI TEMP WS จากเว็บไซต์ NCEP/NCAR ระหว่างปี พ.ศ. 2560 – พ.ศ. 2565 ในพื้นที่ 9 จังหวัดภาคเหนือของประเทศไทย

3. เตรียมข้อมูลสำหรับสร้างแบบจำลองฝุ่น PM2.5 จากข้อมูลดาวเทียม CALIPSO ในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย

การวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้วิจัยนำข้อมูลที่ได้จากการวิจัยการพัฒนาแบบจำลองฝุ่น PM2.5 จากข้อมูลดาวเทียมคาลิโซ ในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย ดังนี้

1. การเปรียบเทียบ AOD ระหว่าง AERONET กับ CALIPSO โดยใช้ค่าทางสถิติ Pearson Correlation Coefficient (R^2), Root Mean Square Error (RMSE), MAB และ Relative Mean Bias (RMB) พบว่า AOD ARONET กับ AOD CALISO จังหวัดเชียงใหม่

2. การเปรียบเทียบ AOD ระหว่าง MODIS กับ CALIPSO โดยใช้ค่าทางสถิติ R^2 , RMSE, MAB และ RMB พบว่า AOD ARONET กับ AOD CALISO จังหวัดเชียงใหม่

3. การสร้างแบบจำลอง PM2.5

3.1 การเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ของตัวแปรของข้อมูลความเข้มข้นฝุ่น PM2.5

3.2 การเปรียบเทียบความเข้มข้นฝุ่น PM2.5

4. การเปลี่ยนแปลงข้อมูลรายเดือนของความเข้มข้นฝุ่น PM2.5

4.1 การเปลี่ยนแปลงข้อมูลรายเดือนของความเข้มข้นฝุ่น PM2.5

4.2 การเปลี่ยนแปลงข้อมูลรายปีของความเข้มข้นฝุ่น PM2.5

ผู้วิจัยสรุปการวิจัยการพัฒนาแบบจำลองฝุ่น PM2.5 ในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย ดังนี้

สรุปผล

ผลการวิจัย เรื่องการพัฒนาแบบจำลองฝุ่น PM2.5 จากข้อมูลดาวเทียม CALIPSO ในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยเพื่อการพัฒนาแบบจำลองฝุ่น PM2.5 จากข้อมูลดาวเทียม CALIPSO และเพื่อเผยแพร่ผลงานวิจัยในระดับนานาชาติ

การเปรียบเทียบข้อมูล AOD จังหวัดเชียงใหม่ ประกอบด้วย การเปรียบเทียบ AOD ระหว่าง AERONET กับ CALIPSO พบว่า มีค่า $R^2 = 0.65$, slope = 0.46, RMSE =

0.34 MAE = 0.27 และการเปรียบเทียบ AOD ระหว่าง MODIS กับ CALIPSO พบว่า มีค่า $R^2 = 0.76$, slope = 0.40, RMSE = 0.42 MAE = 0.29 จากการศึกษาค่า R^2 มีค่า 0.65 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้

การเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ของตัวแปรของข้อมูลความเข้มข้นฝุ่น PM2.5 กับ ตัวแปรต่าง ๆ ความสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่า RH NDVI WS TEMP และ HPBL มีความสัมพันธ์เรียงลำดับจากมากไปหาน้อยตามลำดับได้ดังนี้ $R^2(\text{RH}) = 0.56$, $R^2(\text{NDVI}) = 0.39$, $R^2(\text{WS}) = 0.32$, $R^2(\text{TEMP}) = 0.30$ และ $R^2(\text{HPBL}) = 0.05$ การเปลี่ยนแปลงข้อมูลรายเดือนของความเข้มข้นฝุ่น PM2.5 จังหวัดในภาคเหนือของประเทศไทย ระหว่างปี พ.ศ. 2560 -2565 พบว่า จังหวัดที่มีแนวโน้ม PM2.5 สูงสุด คือ จังหวัดเชียงราย แม่ฮ่องสอน น่าน เชียงใหม่ แพร่ พะเยา ลำปาง ลำพูน อุตรดิตถ์ มีค่า 319, 122, 93, 90, 65, 61, 55, 51 และ 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ และมีค่าฝุ่น PM2.5 ต่ำสุดคือ จังหวัดแม่ฮ่องสอน น่าน แพร่ เชียงราย ลำพูน อุตรดิตถ์ ลำปาง พะเยา เชียงใหม่ มีค่าเท่ากับ 4, 67, 8, 12, 16, 25, 31, และ 39.18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ตามลำดับ

การเปลี่ยนแปลงข้อมูลรายเดือนของความเข้มข้นฝุ่น PM2.5 จังหวัดในภาคเหนือของประเทศไทย ระหว่างปี พ.ศ. 2560 -2565 จังหวัดเชียงใหม่ปี พ.ศ. 2560 ค่าเฉลี่ยของปริมาณฝุ่น PM2.5 สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ต่ำสุดในปี พ.ศ. 2565 มีค่าเท่ากับ 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ จังหวัดลำปาง ปี พ.ศ. 2562 มีค่าเฉลี่ยของปริมาณฝุ่น PM2.5 สูงสุดค่าเท่ากับ 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ต่ำสุดในปี พ.ศ. 2565 มีค่าเท่ากับ 27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ จังหวัดแม่ฮ่องสอน ปี พ.ศ. 2563 ค่าเฉลี่ยของปริมาณฝุ่น PM2.5 สูงสุด มีค่าเท่ากับ 42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ต่ำสุดในปี พ.ศ. 2565 มีค่าเท่ากับ 27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ จังหวัดเชียงราย ปี พ.ศ. 2565 ค่าเฉลี่ยของปริมาณฝุ่น PM2.5 สูงสุด มีค่าเท่ากับ 51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ค่าต่ำสุดใน พ.ศ. 2562 มีค่าเท่ากับ 27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ จังหวัดน่าน พ.ศ. 2563 ค่าเฉลี่ยของปริมาณฝุ่น PM2.5 สูงสุด มีค่าเท่ากับ 73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ค่าต่ำสุดในพ.ศ. 2565 มีค่าเท่ากับ 27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ จังหวัดลำพูน พ.ศ. 2563 ค่าเฉลี่ยของปริมาณฝุ่น PM2.5 สูงสุด มีค่าเท่ากับ 46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ค่าต่ำสุดใน พ.ศ. 2565 มีค่าเท่ากับ 31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ จังหวัดแพร่ พ.ศ. 2563 ค่าเฉลี่ยของปริมาณฝุ่น PM2.5 สูงสุด มีค่าเท่ากับ 68 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ค่าต่ำสุดใน พ.ศ. 2565 มีค่าเท่ากับ 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ จังหวัดพะเยา พ.ศ. 2563 ค่าเฉลี่ยของปริมาณฝุ่น PM2.5 สูงสุด มีค่าเท่ากับ 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ค่าต่ำสุดใน พ.ศ. 2565 มีค่าเท่ากับ 26

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ จังหวัดอุดรธานี พ.ศ. 2565 ค่าเฉลี่ยของปริมาณฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ มีค่าเท่ากับ $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$

อภิปรายผล

ในการวิจัยเรื่อง เรื่องการพัฒนาแบบจำลองฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ จากข้อมูลดาวเทียมคาลิปโซ ในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย ผู้วิจัยขอเสนอการอภิปรายผลการวิจัย ดังนี้

1. การพัฒนาแบบจำลองฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ จากข้อมูลดาวเทียม CALIPSO ในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย ได้ศึกษาการเปรียบเทียบข้อมูล AOD ระหว่าง AERONET กับ CALIPSO จังหวัดเชียงใหม่ พบว่า มีค่า $R^2 = 0.65$ และการเปรียบเทียบ AOD ระหว่าง MODIS กับ CALIPSO จังหวัดเชียงใหม่ พบว่า มีค่า $R^2 = 0.76$ ค่าเฉลี่ยรายปีปริมาณฝุ่นจากการประมาณค่าแบบจำลอง $\text{PM}_{2.5} = 39.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ซึ่งมีค่า $R^2 = 1.00$ มีความแม่นยำของข้อมูลอย่างมีนัยสำคัญ อาจเป็นเพราะการสร้างแบบจำลองได้มีการเปรียบเทียบค่าตัวแปร

ที่มีผลต่อประมาณความเข้มข้นของฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ จากการเปรียบเทียบปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ (RH) มีผลต่อปริมาณความเข้มข้นฝุ่นมากที่สุด $R^2 = 0.55$ เป็นตัวแปรที่มีความสัมพันธ์มากที่สุด และตัวแปรอื่นทางอุตุนิยมวิทยาอื่น ๆ มีผลต่อค่า $\text{PM}_{2.5}$ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำตัวแปรดังกล่าวมาเป็นข้อมูลข้อที่ 1 และคัดเลือกแบบจำลองที่ดีที่สุดเพื่อพัฒนาแบบจำลองในพื้นที่

2. ผู้วิจัยพบว่าข้อมูลค่าความลึกเชิงแสง (AOD) มีจำนวนค่อนข้างจำกัด เนื่องจากดาวเทียม CALIPSO เป็นดาวเทียมขั้วโลกเคลื่อนที่ผ่านประเทศไทยวันละ 1 ครั้ง และดาวเทียม CALIPSO เป็นการเก็บข้อมูลโปรไฟล์ฝุ่นในแนวตั้งซึ่งมีรัศมีการตรวจวัดค่อนข้างแคบ ทำให้ได้ข้อมูลดาวเทียมน้อยไม่ครอบคลุมทุกพื้นที่

ข้อเสนอแนะ

ผู้วิจัยขอเสนอแนะปฏิบัติ ดังนี้

1. การเก็บข้อมูลค่าความลึกเชิงแสง (AOD) จากดาวเทียม CALIPSO ควรกำหนดให้อยู่ในพื้นที่ใกล้เคียงกับข้อมูลภาคพื้นดินให้มากที่สุด เพราะอาจส่งผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าของฝุ่น $\text{PM}_{2.5}$ ได้

2. การพัฒนาแบบจำลองฝุ่น PM2.5 จากข้อมูลดาวเทียม CALIPSO ในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย สามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงฝุ่น PM2.5 ในแต่ละพื้นที่ได้แม่นยำ แต่อย่างไรก็ตามในการประมาณค่าต้องมีการเปรียบเทียบตัวแปรที่มีปัจจัยต่อการเปลี่ยนแปลงฝุ่น PM2.5 เพื่อสร้างแบบจำลองที่ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด

3. จากการการพัฒนาแบบจำลองฝุ่น PM2.5 จากข้อมูลดาวเทียม CALIPSO ในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย สามารถพัฒนาแบบจำลอง และการสร้างแอปพลิเคชัน สำหรับการพยากรณ์และเฝ้าระวังฝุ่นละออง PM2.5 หรือข้อมูลการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์บรรยากาศ เพื่อเป็นฐานข้อมูลในการศึกษาวิจัย สนับสนุน การศึกษาต่อไปได้

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- ชีวะ ทศนา. (2560). *โพลาริเซชันของแสง*. จันทบุรี: มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี.
- วิลาวรรณ คำหาญ. (2560). *ฝุ่นละอองในบรรยากาศ (ATMOSPHERIC AEROSOLS)*.
กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุทธิพัฒน์ จันทราศรี. (2553). การสร้างโมเดลขั้นตอนวิธีวิเคราะห์และแสดงผล
พารามิเตอร์ของละอองลอยจากข้อมูลเครื่องไลดาร์การกระเจิงแบบมี.
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
- Ananthavel, A., Mehta, S. K., Ali, S., Reddy, T. V. R., Annamalai, V., & Rao, D. N.
(2021). Micro Pulse Lidar measurements in coincidence with CALIPSO
overpasses: Comparison of tropospheric aerosols over Kattankulathur (12.82oN,
80.04oE). *Atmospheric Pollution Research*, 12(6), 101082.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101082>. May 4th, 2023
- EDUCATION, t. n. (2013). Aerosols and their Relation to Global Climate and Climate
Sensitivity. Retrieved from
[https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/aerosols-and-their-
relation-to-global-climate-102215345](https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/aerosols-and-their-relation-to-global-climate-102215345). May 26th, 2023
- Halhore, R. N., Shettle, E. P., Markham, B. L., & Mango, S. A. (2008). Role of aerosol
absorption in satellite sensor calibration. *IEEE Geoscience and Remote Sensing
Letters*, 5(2), 157–161. May 10th, 2023
- Janjai, S., Kumharn, W., & Laksanaboonsong, J. (2003). Determination of Angstrom's
turbidity coefficient over Thailand. *Renewable Energy*, 28(11), 1685–1700.
doi:[https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(03\)00010-7](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(03)00010-7). May 12th, 2023
- Kumharn, W. (2005). *A Study of Atmospheric Aerosol changes in North-eastern
Thailand*. Retrieved from Sakon Nakhon: .May 4th, 2023
- Kumharn, W., & Hanprasert, K. (2016). Aerosol optical properties in ultraviolet ranges
and respiratory diseases in Thailand. *Atmospheric Environment*, 142, 221–228.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.07.046> .June 8th, 2023

- Kumharn, W., Rimmer, J. S., Smedley, A. R. D., Ying, T. Y., & Webb, A. R. (2012). Aerosol Optical Depth and the Global Brewer Network: A Study Using U.K.- and Malaysia-Based Brewer Spectrophotometers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 29(6), 857–866. doi:10.1175/jtech-d-11-00029.1 May 4th, 2023
- Kumharn, W., Sudhibrabha, S., & Hanprasert, K. (2015). Aerosol Optical Depth: A study using Thailand based Brewer Spectrophotometers. *Advances in Space Research*, 56(11), 2384–2388. doi:https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.09.031 May 5th, 2023
- Kumharn, W., Sudhibrabha, S., Hanprasert, K., Janjai, S., Masiri, I., Buntoung, S., . . . Jankondee, Y. (2022). Improved Hourly and long-term PM_{2.5} Prediction Modeling Based on MODIS in Bangkok. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 28, 100864. doi:https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100864 May 10th, 2023
- Mamouri, R. E., Amiridis, V., Papayannis, A., Giannakaki, E., Tsaknakis, G., & Balis, D. S. (2009). Validation of CALIPSO space-borne-derived attenuated backscatter coefficient profiles using a ground-based lidar in Athens, Greece. *Atmos. Meas. Tech.*, 2(2), 513–522. doi:10.5194/amt-2-513-2009 May 25th, 2023
- Pilahome, O., CKumharn, W., (2020). *Trends of Climate Variables and Aerosol optical Depth in Thailand*. Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. May 23th, 2023
- Zhang, D. F. C. S. J. C. D. (2020). Micropulse Lidar Cloud Mask (MPLCMASK) ValueAdded Product for the Fast-Switching Polarized Micropulse Lidar Technical Report. May 30th, 2023

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลงานตีพิมพ์

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี



PM2.5 modeling based on CALIPSO in Bangkok

Yuttapichai Jankondee¹, Wilawan Kumham^{1,2,*}, Choedtrakool Homchampa^{1,2}, Oradee Pilahome¹, Waichaya Nissawan²

¹Department of Physics, Sakon Nakhon Rajabhat University, Sakon Nakhon, 47000 Thailand

²The Centre for Atmospheric and Space Sciences, Sakon Nakhon Rajabhat University, Sakon Nakhon, 47000 Thailand

*Corresponding Author: wilawan_kumham@snru.ac.th

DOI: 10.55674/cs.v16i3.257117

Received: 12 June 2024; Revised: 1 August 2024; Accepted: 2 August 2024; Available online: 1 September 2024

Abstract

Air quality has become a severe issue in Bangkok, mainly due to PM2.5 (fine particulate matter with particle size less than 2.5 μm). Aerosol optical depth (AOD) obtained from active satellite data has been widely used to estimate PM2.5 near the ground. Nevertheless, passive satellite data are rarely used to estimate PM2.5 near the ground. In this study, a total AOD in troposphere data achieved from the Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization (CALIOP) was used to determine PM2.5 with climate parameters (Temperature (TEM), relative humidity (RH), wind speed (WS), boundary layer height (BLH), and the normalized difference vegetation index (NDVI) using Linear Mixed Effect Method (LMEM). It was found that the coefficient (R^2) increases from model 1 (0.87) to model 6 (0.99), and the root mean square error (RMSE) reduces from 2.65 to 0.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. The best model gives an $R^2=0.99$ (models 5 and 6). PM2.5 patterns between observed and predicted show similar representative patterns. Therefore, our study provides CALIPSO AOD data with a potentially helpful estimation of PM2.5.

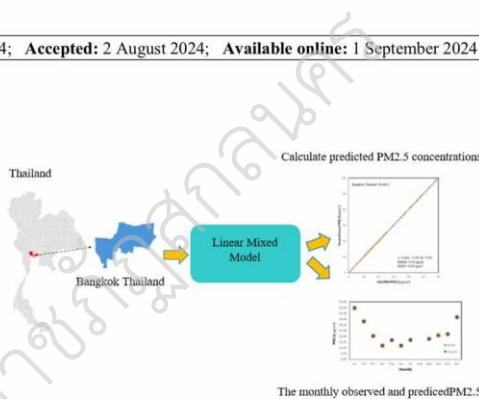
Keyword: PM2.5; AOD; CALIPSO; Satellite data; Linear mixed effect

©2024 CREATIVE SCIENCE reserved

1. Introduction

Atmospheric aerosol has become a big issue in Bangkok, especially PM2.5, which substantially impacts the worldwide climate, environmental change, and human health [1 – 3]. PM2.5 warning and monitoring are essential for human protection. Nevertheless, due to a lack of budget, PM2.5 monitoring is limited and only covers some areas. A previous study confirmed

that PM2.5 obtained from satellite AOD correlates well with ground-based data [4, 5]. Currently, many studies are focused on the PM2.5-AOD model achieved from satellite data such as the Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), the Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS), the Goddard Earth Observing System Data



(GEOS), and the geostationary meteorological satellite Himawari [6, 7].

PM2.5 models are obtained from various methods [8, 9]. Recent studies have focused on the variation in PM2.5 concentrations at the Earth's surface [1, 2]. A few studies have investigated PM2.5 only in the troposphere. CALIPSO satellite monitors atmospheric clouds and aerosols with a cloud-aerosol lidar with orthogonal polarization in a vertical column of high-resolution clouds and aerosols to resourcefully produce the cloud and the aerosol categories. Much of the current literature on aerosol models pays particular attention to using CALIPSO [10, 11].

Therefore, this work focused on estimating ground-based PM2.5 concentrations obtained from the CALIPSO AOD observation data with climate parameters, BLH, and NDVI using LMEM. Hourly PM2.5 concentrations from ground observation were addressed with PM2.5 concentrations obtained from the best models.

2. Materials and Methods

Bangkok (13.60 N, 100.60 E) is a populated and overcrowded city. In 2022, about 11 million people lived in about 1,570 km² along the Chao Phraya Delta.



Fig. 1 Map of Bangkok

AODs and PM2.5 data

CALIPSO satellite was established to produce aerosol and cloud data in a vertical distribution at one depolarization and two scattering channels. The CALIPSO onboard instrument enhances the accuracy for estimating aerosol radiative effect and assessing clouds' feedback. AOD data obtained from CALIPSO were used daily level 2 data with 1 km x 1 km spatial resolution products downloaded from <https://search.earthdata.nasa.gov/search>. PM2.5 data were collected from department.

Climate, NDVI, and BLH parameters

TEM, WS, and BLH are obtained from the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) and the National Center for Atmospheric Research (NCAR) (a spatial resolution of 2.5 × 2.5). NDVI data (a spatial resolution of 1 km) were downloaded from <https://search.earthdata.nasa.gov>.

Linear mixed effect method

PM2.5 concentrations were retrieved by using the LMEM [12, 13], which is described in Equation (1). Data were separated into two groups: train (80%) and test (20%).

$$\text{PM2.5} = (\beta_0 + \mu_0) + (\beta_1 + \mu_1) \times \text{AOD} + (\beta_2 + \mu_2) \text{TEM} + (\beta_3 + \mu_3) \text{RH} + (\beta_4 + \mu_4) \text{WS} + (\beta_5 + \mu_5) \text{BLH} + (\beta_6 + \mu_6) \text{NDVI} + \varepsilon_r \quad (1)$$

where PM2.5 is a fine particulate matter.

β is the fixed intercept.

μ is the random intercept.

ε is the residual error.

AOD, TEM (°C), RH (%), WS (m/s), NDVI, and BLH (m) are the factors at Bangkok station. $\beta_1 \sim \beta_6$ are the fixed slopes and $\mu_1 \sim \mu_6$ are random slopes.

3. Results

Descriptive statistics

Ground-based PM2.5 concentrations were obtained from January 2017 to December 2021, Bangkok's seasons can be classified as summer (February to June), rainy (June to October), and winter (October to February). Average PM2.5 concentrations were high in winter months, reaching a peak in January at 48.00 µg/m³. Low levels were found in summer months, reaching the lowest in April at 11.00 µg/m³. AOD data

range from 0.02 to 2.05 with an average of 0.47. Average meteorological factors are TEM, RH, and WS, which are 28.60°C, 63.38%, and 10.13 m/s, respectively. The averages of BLH and NDVI are 672.51 m and 0.38, respectively.

MODIS AOD Validation

As shown in Fig. 2, CALIPSO AODs have been compared to AERONET AOD and MODIS AOD data. CALIPSO AOD at 10 km

products (a 1×1-pixel sampling area with 10×10 km²) were compared to AERONET and MODIS AOD.

The results of comparing CALIPSO with AERONET AODs ($R^2=0.41$, $RMSE=0.33$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$, and $MAE=0.07$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$) and CALIPSO with MODIS AODs ($R^2=0.54$, $RMSE = 0.33$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$, and $MAE=0.07$ $\mu\text{g}/\text{m}^3$) are given a lower RMSE and MAE, respectively, implying tiny aerosol estimation uncertainty.

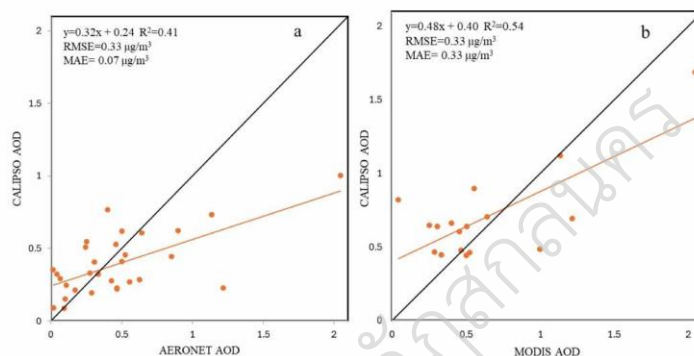


Fig. 2 Comparing CALIPSO AODs with AERONET and MODIS AODs from 2017 – 2021

PM2.5 model

The LMEM was used in PM2.5 model with AOD, TEM, RH, WS, BLH, and NDVI. AOD is the most critical parameter because it implies how many aerosol particles are in a vertical column from the earth to the top atmosphere. The other factors were additional to improving the predictive capabilities of PM2.5. In addition, weather conditions are necessary for assessing because they influence PM2.5

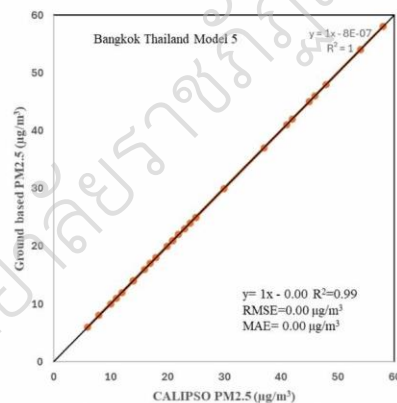
concentrations near the ground [14 – 16]. All factors were included to the LMEM with significant level at $\alpha = 0.001$, 0.01, and 0.05. Table 1 exhibits LMEM models. Table 1 shows the results using the 5th model compared with Model 1, R^2 significantly raises 15%, and RMSE falls 100 %. The best model is in the 5th and 6th, giving an R^2 of 0.99 and an RMSE of 0.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Table 2).

Table 1 The fixed effect of the LMEM model was used to predict the ground-level PM2.5 concentrations collected from 2017-2021.

Model	β_0 (Intercept)	β_1 (AOD)	β_2 (RH)	β_3 (NDVI)	β_4 (WS)	β_5 (TEM)	β_6 (BLH)	RMSE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MAE
1	17.76***	15.92*						2.65	2.09
2	42.41***	5.90	-0.31*					1.78	1.44
3	7.48	5.58	-0.50*	122.92				1.51	1.22
4	1.47	5.89	-0.49*	133.98*	0.11			1.50	1.25
5	72.69***	11.53*	-0.60***	135.39***	-0.23***	-2.25***		0.00	0.00
6	148.99***	9.95.	-0.65***	112.28***	-0.18**	-3.00**	-0.06	0.00	0.00

***independent parameter is significant at the $\alpha = 0.001$ level**independent parameter is significant at the $\alpha = 0.01$ level*Independent parameter is significant at the $\alpha = 0.05$ level**Table 2** PM2.5 concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) is observed at Bangkok in Thailand.

Model	PM2.5	PM2.5 _{predicted} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Bias	R ²	RMSE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MAE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1		26.77	-1.15	0.87	2.65	2.09
2		26.39	-0.77	0.93	1.78	1.44
3	25.62	26.38	-0.76	0.94	1.51	1.22
4		26.42	-0.08	0.93	1.50	1.25
5		25.62	0	0.99	0.00	0.00
6		25.66	-0.04	0.99	0.00	0.00

**Fig. 3** LMEM was calculated by 38 for predicted PM2.5 concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

All factors are essential for estimating PM2.5 concentrations. Table 2 establishes the model's fixed intercept (β_0) and slopes ($\beta_1 \sim \beta_5$). RH, and TEM are significant at $\alpha = 0.01$ and 0.01 (Table 2). R² of model 5th give the highest value, with all parameters being significant. Therefore, the 5th model showed the best performance. Positive relations were observed between AOD and other NDVI. At the same time, negative β (RH, TEM, and WS) imply a negative relationship with PM2.5.

PM_{2.5} predictions

Fig. 4 shows the monthly observed PM_{2.5} and predicted PM_{2.5} from 2017 to 2021. PM_{2.5} values give a high value in 2021 compared with 2017. A similar pattern is detected between observed and predicted PM_{2.5}. PM_{2.5} from two sources is an insignificant rise from 2017 to 2021. High PM_{2.5} was found in winter compared to the rainy season due to low temperature, light wind, and non/less rain.

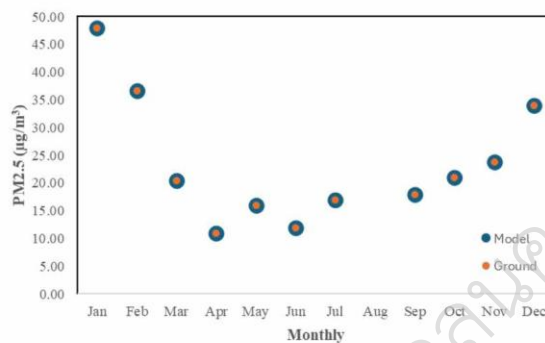


Fig. 4 The monthly observed and predicted PM_{2.5} from 2017 – 2021.

4. Conclusion and Discussion

PM_{2.5} concentrations in Bangkok from 2017 to 2021 were estimated using LMEM. Active satellite data is more reasonable in spatial and temporal resolutions to achieve precise data for measuring aerosol particles in a vertical profile. The aerosol profile will encourage more information to investigate aerosol health effects. Since AOD satellite data is easy to access, the PM_{2.5} model can be an effective prediction tool.

All factors are essential in the PM_{2.5} model. For example, reducing PM_{2.5} may explain a negative association between WS and PM_{2.5} during high wind speeds. Wind speed can spread aerosol particles and decrease concentrations [17, 18]. In winter and summer, TEM and WS have a negative relation, causing the formation of secondary aerosols [19]. A slight negative relation between RH and PM_{2.5} indicates a slightly antagonistic association. BLH and NDVI also affect PM_{2.5} because adding those parameters improves the models.

Increased PM_{2.5} concentrations in winter may be related to biomass-burning seasons [20, 21]. Necessary weather conditions retain aerosol particles suspended in the air for an extended time.

This work can improve the estimation of PM_{2.5} concentrations near the ground in Bangkok, revealing information on harmful pollutant air and possible health risks.

5. Acknowledgement

We thank the pollution control department for providing PM_{2.5} data and the Thai Meteorological Department for providing climate variables data.

6. References

- [1] W. Kumharn, S. Sudhibrabha, K. Hanprasert, S. Janjai, I. Masiri, S. Buntoung, S. Pattarapanitchai, R. Wattan, O. Pilahome, W. Nissawan, Y. Jankondee, Improved Hourly and long-term PM_{2.5} Prediction Modeling Based on MODIS in Bangkok, Remote Sens. Appl.: Soc.

- Environ. 28 (2022) 100864. 10.1016/j.rsase.2022.100864.
- [2] W. Kumharn, S. Sudhibrabha, K. Hanprasert, S. Janjai, I. Masiri, S. Buntoung, S. Pattarapanitchai, R. Wattan, C. Homchampa, T. Srimaha, O. Pilahome, W. Nissawan, Y. Jankondee, Estimating hourly full-coverage PM_{2.5} concentrations model based on MODIS data over the northeast of Thailand, MODEL EARTH SYST ENV. 10 (2024) 1273 – 1280. 10.1007/s40808-023-01839-7.
- [3] O. Pilahome, W. Nissawan, Y. Jankondee, S. Janjai, W. Kumharn, Long-term variations and comparison of aerosol optical properties based on MODIS and ground-based data in Thailand, Atmos. Environ. 286 (2022) 119218. 10.1016/j.atmosenv.2022.119218.
- [4] Q. Yang, Q. Yuan, L. Yue, T. Li, H. Shen, L. Zhang, The relationships between PM_{2.5} and aerosol optical depth (AOD) in mainland China: About and behind the spatio-temporal variations, Environ. Pollut. 248 (2019) 526 – 535. 10.1016/j.envpol.2019.02.071.
- [5] L. Yang, H. Xu, Z. Jin, Estimating ground-level PM_{2.5} over a coastal region of China using satellite AOD and a combined model, J. Clean. Prod. 227 (2019) 472 – 482. 10.1016/j.jclepro.2019.04.231.
- [6] X. Ma, J. Wang, F. Yu, H. Jia, Y. Hu, Can MODIS AOD be employed to derive PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei over China?, Atmos. Res. 181 (2016) 250 – 256. 10.1016/j.atmosres.2016.06.018.
- [7] H. Zhao, K. Gui, Y. Ma, Y. Wang, Y. Wang, H. Wang, Y. Zheng, L. Li, L. Zhang, H. Che, X. Zhang, Climatological variations in aerosol optical depth and aerosol type identification in Liaoning of Northeast China based on MODIS data from 2002 to 2019, Sci. Total Environ. 781 (2021), 146810. 10.1016/j.scitotenv.2021.146810.
- [8] G. Geng, X. Meng, K. He, Y. Liu, Random forest models for PM_{2.5} speciation concentrations using MISR fractional AODs, Environ. Res. Lett. 15(3) (2020) 034056. 10.1088/1748-9326/ab76df
- [9] Z. Ma, S. Dey, S. Christopher, R. Liu, J. Bi, P. Balyan, Y. Liu, A review of statistical methods used for developing large-scale and long-term PM_{2.5} models from satellite data, Remote Sens. Environ. 269 (2022) 112827. 10.1016/j.rse.2021.112827.
- [10] Z. Fang, H. Yang, M. Zhao, Y. Cao, C. Li, K. Xing, X. Deng, C. Xie, and D. Liu, Assessing PM_{2.5}, Aerosol, Aerosol Optical Depth Concentrations in Hefei Using Modis, Calipso, and Ground-Based Lidar, J. Appl. Spectrosc. 88(4) (2021) 794 – 801. 10.1007/s10812-021-01242-z.
- [11] C. Lin, L. D. Labzovskii, H. W. Leung Mak, J. C. H. Fung, A. K. H. Lau, S. T. Kenea, M. Bilal, J. D. Vande Hey, X. Lu, J. Ma, Observation of PM_{2.5} using a combination of satellite remote sensing and low-cost sensor network in Siberian urban areas with limited reference monitoring, Atmos. Environ. 227 (2020) 117410. 10.1016/j.atmosenv.2020.117410.
- [12] D. Fu, Z. Song, X. Zhang, X. Xia, J. Wang, H. Che, H. Wu, X. Tang, J. Zhang, M. Duan, Mitigating MODIS AOD non-random sampling error on surface PM_{2.5} estimates by a combined use of Bayesian Maximum Entropy method and linear mixed-effects model, Atmos. Pollut. Res. 11(3) (2020) 482 – 490. 10.1016/j.apr.2019.11.020.
- [13] S.L.K. Unnithan, L. Gnanappazham, Spatiotemporal mixed effects modeling for the estimation of PM_{2.5} from MODIS AOD over the Indian subcontinent, GIScience Remote Sens. 57(2) (2020) 159 – 173. 10.1080/15481603.2020.1712101.
- [14] F.-Y. Cheng, C.-Y. Feng, Z.-M. Yang, C.-H. Hsu, K.-W. Chan, C.-Y. Lee, S.-C. Chang, Evaluation of real-time PM_{2.5} forecasts with the WRF-CMAQ modeling system and weather-pattern-dependent bias-adjusted PM_{2.5} forecasts in Taiwan, Atmos. Environ. 244 (2021) 117909. 10.1016/j.atmosenv.2020.117909.

- [15] Z. Luo, F. Huang, H. Liu, PM2.5 concentration estimation using convolutional neural network and gradient boosting machine, *J. Environ. Sci.* 98 (2020) 85 – 93. 10.1016/j.jes.2020.04.042.
- [16] F. L. Luo, J. L. Jing, A. N. Wang, L. S. Liang, research on PM2.5 mass concentration retrieval method based on himawari-8 in beijing, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLII-3/W10 (2020) 903 – 910. 10.5194/isprs-archives-XLII-3-W10-903-2020.
- [17] X. Wang, R. Zhang, W. Yu, The Effects of PM2.5 Concentrations and Relative Humidity on Atmospheric Visibility in Beijing, *J. Geophys. Res.* 124(4) (2019) 2235 – 2259. 10.1029/2018JD029269.
- [18] F. Liu, Q. Tan, X. Jiang, F. Yang, W. Jiang, Effects of relative humidity and PM2.5 chemical compositions on visibility impairment in Chengdu, China, *J. Environ. Sci.* 86 (2019) 15 – 23. 10.1016/j.jes.2019.05.004.
- [19] X. Liu, X. Yu, Z. Zhang, PM2.5 Concentration Differences between Various Forest Types and Its Correlation with Forest Structure, *J. Atmos.* 6(11) (2015) 1801 – 1815. 10.3390/atmos6111801.
- [20] J. Kayee, P. Sompongchaiyakul, N. Sanwlani, S. Bureekul, X. Wang, R. Das, Metal Concentrations and Source Apportionment of PM2.5 in Chiang Rai and Bangkok, Thailand during a Biomass Burning Season, *ACS Earth Space Chem.* 4(7) (2020) 1213 – 1226. 10.1021/acsearthspacechem.0c00140.
- [21] S. Pongpiachan, M. Hattayanone, J. Cao, Effect of agricultural waste burning season on PM2.5-bound polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) levels in Northern Thailand, *Atmos. Pollut. Res.* 8(6) (2017) 1069 – 1080. 10.1016/j.apr.2017.04.009.

ภาคผนวก ข

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในระดับนานาชาติ

งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในระดับนานาชาติ

1. Pilahome, O., Ninssawan, W., *Jankondee, Y.*, Janjai, S., & Kumharn, W., 2022. Long-term variations and comparison of aerosol optical properties based on MODIS and ground-based data in Thailand. *Atmospheric Environment* 286, 119218, **Impact factor 5.755 (Q₁)**.
2. Kumharn, W., Sudhibrabha, S., Hanprasert, K., Janjai, S., Masiri, I., Buntoung, S., Pattarapanitchai, S., Wattan., R., Pilahome, O., Ninssawan, W., & *Jankondee, Y.* (2022). Improved Hourly and long-term PM_{2.5} Prediction Modeling Based on MODIS in Bangkok. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 28, 100864. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100864>, **Impact factor 4.93 (Scopus) (Q₁)**.
3. Kumharn, W., Piwngam, W., Pilahome, O., *Jankondee, Y.*, & Chaochai-kong, S. (2022). Effects of meteorological factors on dengue incidence in Bangkok city: a model for dengue prediction. *Modeling Earth Systems and Environment*, DOI:10.1007/s40808-022-01557-6. **Impact factor 3.899 (Scopus) (Q₁)**.
4. Pilahome, O., Ninssawan, W., *Jankondee, Y.*, Janjai, J., Masiri, I., & Kumharn, W., 2022. Variations in aerosols and aerosols–cloud interactions in Bangkok using MODIS satellite data during high PM_{2.5} concentrations. *Advances in Space research*, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.12.018>, **Impact factor 2.611 (Q₂)**.
5. Kumharn, W., Sudhibrabha, S., Hanprasert, K., Janjai, S., Masiri, I., Buntoung, S., Pilahome, O., *Jankondee, Y.*, & Homjampa, C., *Jankondee, Y.* (2023): Estimating Hourly Full-Coverage PM_{2.5} Concentrations Based on MODIS Data over the Northeast of Thailand. *Modeling Earth Systems and Environment*, **In press. Impact factor 3.899 (Scopus) (Q₁)**.
6. Buntoung, S., Kumharn, W., Sudhibrabha, S., Hanprasert, K., Janjai, S., Masiri, I., Pattarapanitchai, S., Wattan., R., Pilahome, O., Ninssawan, W., & *Jankondee, Y.* (2024). Variation in cloud microphysics properties over Thailand. *Atmospheric Environment*, **Submitted, Impact factor 5.755 (Q₁)**.

7. Masiri, I., Kumharn, W., Sudhibrabha, S., Hanprasert, K., Janjai, S., Buntoung, S., Pattarapanitchai, S., Wattan., R., Pilahome, O., Ninssawan, W., & *Jankondee, Y.* (2024). Rian Cloud and non-Rain clouds properties during high PM2.5 concentration in Thailand for artificial rainmaking. *Atmospheric Environment*. **Submitted, Impact factor 5.755 (Q₁)**.

8. Kumharn, W., Sudhibrabha, S., Hanprasert, K., Janjai, S., Masiri, I., Buntoung, S., Wattan., R., Pattarapanitchai, S., Pilahome, O., Ninssawan, W., & *Jankondee, Y.* (2024). Association between rain and PM2.5 during high PM2.5 concentrations over Thailand. *Atmospheric Environment*. **Submitted, Impact factor 5.755 (Q₁)**.

9. Kumharn, W., Sudhibrabha, S., Hanprasert, K., Janjai, S., Masiri, I., Buntoung, S., Pattarapanitchai, S., Wattan., R., Pilahome, O., Ninssawan, W., & *Jankondee, Y.* (2024). Warm and clod cloud formation during high PM2.5 concentrations in Bangkok. *Geophysical Research Letter*. **Submitted, Impact factor 5.576 (Q₁)**.

10 . Ninssawan, W., Kumharn, W., Masiri, I., Pilahome, O., & *Jankondee, Y.* (2024). A model small reservoir evaporation in Mekong basin. *Journal of the Atmospheric Sciences*. **Submitted, Impact factor 3.203 (Q₁)**.

11. *Jankondee, Y.*, Ninssawan, W., Masiri, I., Pilahome, O., & W., Kumharn (2024). Obtaining of PM2.5 Model based on CALIPSO over the North of Thailand. *Journal of the Atmospheric Sciences*. In process, Impact factor 3.203 (Q₁).

ภาคผนวก ค

ร่วมแสดงผลงานระดับนานาชาติ

ร่วมแสดงผลงานระดับนานาชาติ

1. งาน “2023 Kaohsiung International Invention and Design EXPO” (KIDE 2023) ได้รับ 2 รางวัล คือ *Hong Kong Special Gold Award* จาก Hong King Yan Chai Steam Faire และ Silver Medal โดยมี ดร.วิภารัตน์ ดีอ่อง ผู้อำนวยการสำนักงานการวิจัยแห่งชาติให้เกียรติมอบรางวัล และร่วมแสดงความยินดีกับคณะนักวิจัย



ภาพประกอบ 47 เข้าร่วมงาน “2023 Kaohsiung International Invention and Design EXPO” (KIDE 2023)

2. งาน “The 35th International Invention, Innovation & Technology Exhibition” (ITEX 2024) ณ กรุงกัวลาลัมเปอร์ สหพันธรัฐมาเลเซีย 16-18 พฤษภาคม 2024

- PM.2.5 Absorber for Use in the Standard Classroom
- A Low-cost PM2.5 Monitoring on AirSync Mobile Alert System

ภาคผนวก ง
ประวัติย่อของผู้วิจัย

ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ - สกุล	นายยุทธพิชัย แจ่มโกนดี
วัน เดือน ปีเกิด	วัน 2 เดือนธันวาคม ปี พ.ศ.2541
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 62 หมู่ 6 ตำบลอากาศ อำเภอบางบาล อำเภอบางบาล จังหวัดสุพรรณบุรี
ตำแหน่งปัจจุบัน	บ้านเลขที่ 62 หมู่ 6 ตำบลอากาศ อำเภอบางบาล อำเภอบางบาล จังหวัดสุพรรณบุรี
สถานที่ทำงาน	มหาวิทยาลัยราชภัฏสุพรรณบุรี
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2560	ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนอากาศอำนวยศึกษา อำเภอบางบาล อำเภอบางบาล จังหวัดสุพรรณบุรี
พ.ศ. 2564	ปริญญาตรี วิทยาศาสตร์บัณฑิต (วทบ.) สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุพรรณบุรี
พ.ศ. 2567	ปริญญาโท วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วทม.) สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุพรรณบุรี
ประวัติการทำงาน (ตั้งแต่เริ่มปฏิบัติงานจนถึงปัจจุบัน โดยไล่ปีเริ่มต้นที่ได้รับตำแหน่ง)	
พ.ศ. 2567	นักวิจัยประจำศูนย์วิทยาศาสตร์บรรยากาศและอวกาศ มหาวิทยาลัยราชภัฏสุพรรณบุรี