



การประมาณค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กด้วยข้อมูลความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง
จากดาวเทียมฮิมาวาริ 8 และสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน
บริเวณภาคเหนือของประเทศไทย

AN ESTIMATION OF FINE PARTICULATE MATTER CONCENTRATIONS USING
AEROSOL OPTICAL DEPTH FROM HIMAWARI-8 SATELLITE AND GROUND BASE

กนกวรรณ ภูธรรวม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2563

การประมาณค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กด้วยข้อมูลความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง
จากดาวเทียมฮิมาริ 8 และสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน
บริเวณภาคเหนือของประเทศไทย



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาภูมิสารสนเทศ
คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2563
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

AN ESTIMATION OF FINE PARTICULATE MATTER CONCENTRATIONS USING
AEROSOL OPTICAL DEPTH FROM HIMAWARI-8 SATELLITE AND GROUND BASE
STATIONS OVER NORTHERN THAILAND



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of MASTER OF SCIENCE
(Geoinformatics)

Faculty of Social Sciences, Srinakharinwirot University

2020

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์
 เรื่อง
 การประมาณค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กด้วยข้อมูลความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง
 จากดาวเทียมฮิมาริ 8 และสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน
 บริเวณภาคเหนือของประเทศไทย
 ของ
 กนกวรรณ ภูธรรม

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาภูมิสารสนเทศ
 ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)
 คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก (อาจารย์ ดร.ปรีชาดิ เวชยนต์)	 ประธาน (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ว่่าน วิริยา)
..... ที่ปรึกษาร่วม (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิธิวัฒน์ ชูสกุล)	 กรรมการ (อาจารย์ ดร.อสมมาตรณ์ สิทธิ)

ชื่อเรื่อง	การประมาณค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กด้วยข้อมูลความลึกเชิงแสงของฝุ่น ละออง จากดาวเทียมฮิมาวารี 8 และสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน บริเวณภาคเหนือของประเทศไทย
ผู้วิจัย	กนกวรรณ ภูธรรม
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2563
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. ปรีชาติ เวชยนต์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิธิวัฒน์ ชูสกุล

การศึกษาวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประมาณค่าความเข้มข้นของ PM2.5 จากดาวเทียมฮิมาวารี 8 ด้วยวิธี Principal Component Analysis - General Regression Neural Network (PCA - GRNN) และเปรียบเทียบกับวิธี Multiple Linear Regression (MLR) และเพื่อหาความสัมพันธ์ของปัจจัยกายภาพที่มีผลต่อความเข้มข้นของ PM2.5 บริเวณพื้นที่ภาคเหนือ ปี พ.ศ. 2561 โดยใช้ข้อมูลความเข้มข้น PM2.5 จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน ความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง (Aerosol Optical Depth: AOD) จากดาวเทียมฮิมาวารี 8 และปัจจัยกายภาพ ผลการศึกษาค้นพบความสัมพันธ์ของข้อมูล พบว่า พื้นที่ที่มีค่า PM2.5 สูง จะมีค่า AOD ความกดอากาศและอุณหภูมิอากาศสูง ส่วนความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วลมจะมีค่าต่ำ ซึ่ง PM2.5 จะมีค่าสูงสุดในเดือนมีนาคมเพราะมีจำนวน Hotspot มาก จากการตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ทั้งสองวิธีด้วยข้อมูล PM2.5 จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน ผลการศึกษพบว่า วิธี PCA-GRNN มีประสิทธิภาพมากกว่าวิธี MLR ด้วยค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย เท่ากับ 17.76 มคก./ลบ.ม. และสัมประสิทธิ์การกำหนด เท่ากับ 0.57 ดังนั้น วิธี PCA-GRNN สามารถประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ได้ใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดจากสถานีวัดภาคพื้นดินมากกว่าวิธี MLR จึงเหมาะสมนำมาใช้ในการประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ในพื้นที่ภาคเหนือได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : PM2.5, การสำรวจระยะไกล, ค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง, PCA - GRNN

Title	AN ESTIMATION OF FINE PARTICULATE MATTER CONCENTRATIONS USING AEROSOL OPTICAL DEPTH FROM HIMAWARI-8 SATELLITE AND GROUND BASE STATIONS OVER NORTHERN THAILAND
Author	KANOKWAN PUTHAM
Degree	MASTER OF SCIENCE
Academic Year	2020
Thesis Advisor	Parichat Wetchayont
Co Advisor	Nithiwatthn Choosakul

This study aimed to estimate the concentration of Particulate Matter 2.5 micrometers and smaller (PM_{2.5}) from Himawari-8 satellite using the Principal Component Analysis - General Regression Neural Network (PCA - GRNN) method of comparison with the Multiple Linear Regression (MLR) method. In order to determine the relationship between the physical factors that affected the concentration of PM_{2.5} in 2018, and using PM_{2.5} concentration from ground base stations the Aerosol Optical Depth (AOD) from Himawari-8 satellite and the physical data. The results showed that areas with high PM_{2.5}, which had high AOD values, including surface pressure and air temperature, while relative humidity and wind speeds were low. PM_{2.5} had the highest value in March because of the large number of Hotspots. The estimation results from these two methods were evaluated by PM_{2.5} concentration, which was measured by ground base stations. The evaluation results showed that the PCA-GRNN obtained the Root Mean Square Error (RMSE) of 17.76 micrograms per cubic meter and the coefficient of determination (r^2) of 0.57. Therefore, it was indicated that PCA-GRNN is an appropriate method to estimate PM_{2.5} concentration over Northern Thailand more than MLR.

Keyword : PM_{2.5}, Remote Sensing, Aerosol Optical Depth, PCA - GRNN

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสามารถจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ว่าน วิริยา ประธานกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ ดร.ปรีชาดิ เวชยนต์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิธิวัฒน์ ชูสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษาแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำปริญญานิพนธ์อย่างยิ่ง ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการทำปริญญานิพนธ์นี้ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณด้วยความเคารพอย่างยิ่งไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาภูมิศาสตร์ทุกท่าน ที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้ อันเป็นประโยชน์ต่อการทำปริญญานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณกรมควบคุมมลพิษ และมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้การอนุเคราะห์ข้อมูลความเข้มข้น PM2.5 เพื่อใช้ในการศึกษาครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ให้คำปรึกษา ช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจตลอดระยะเวลาการทำปริญญานิพนธ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณทุกคนในครอบครัวที่ให้กำลังใจ ให้การสนับสนุน จนเกิดแรงผลักดันให้สามารถทำปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จดังที่ตั้งใจไว้

กนกวรรณ ภูธรรม

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพประกอบ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายของงานวิจัย.....	4
1.3 ความสำคัญของการวิจัย	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ.....	5
1.6 กรอบแนวคิดในงานวิจัย.....	6
บทที่ 2 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 ฝุ่นละออง.....	7
2.2 ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร	8
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่กระจายของความเข้มข้น PM2.5 ในอากาศ	8
2.4 การตรวจวัดค่าความเข้มข้น PM2.5	11
2.4.1 การติดตามตรวจวัดคุณภาพอากาศจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน.....	11
2.4.2 การประมาณค่าด้วยเทคโนโลยีการรับรู้จากระยะไกล	14
2.4.2.1 Aerosol Optical Depth (AOD)	19

2.4.2.2 ดาวเทียม Himawari-8	23
2.4.3 แบบจำลองควบคู่อุตุนิยมวิทยา-เคมี (Weather Research and Forecasting (WRF) model coupled with Chemistry: WRF-Chem)	26
2.5 เทคนิคที่ใช้ในการประมาณค่าความเข้มข้นของฝุ่นละอองในอากาศ	27
2.6 Multiple Linear Regression (MLR)	30
2.7 Principal Component Analysis - General Regression Neural Network (PCA - GRNN)	30
บทที่ 3 วิธีการศึกษา	33
3.1 พื้นที่ศึกษา	33
3.1.1 ภูมิประเทศ	34
3.1.2 ภูมิอากาศ.....	35
3.1.3 อาณาเขตติดต่อ	35
3.2 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา.....	35
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา	37
3.4 ขั้นตอนในการศึกษา	37
3.4.1 การรวบรวมข้อมูล (Data collection)	37
3.4.2 การจับคู่ข้อมูลด้วยวิธี Spatio - Temporal Collocation Method	48
3.4.3 จัดทำฐานข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial Database)	49
3.4.4 การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Processing)	50
3.4.4.1 Multiple Linear Regression (MLR)	50
3.4.4.2 Principal Component Analysis - General Regression Neural Network (PCA - GRNN)	51
3.4.5 การตรวจสอบความถูกต้อง (Validation)	52
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล	54

4.1 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาและการผันแปรของข้อมูลในเชิงเวลาและเชิงพื้นที่	54
4.1.1 ความสัมพันธ์ของข้อมูล AOD และความเข้มข้น PM2.5.....	58
4.1.2 การผันแปรของข้อมูลในเชิงเวลาและเชิงพื้นที่.....	60
4.2 จำนวนข้อมูลที่ได้จากการจับคู่ด้วยวิธี Spatio – Temporal Collocation Method	74
4.3 การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MLR และวิธี PCA – GRNN	77
4.3.1 Multiple Linear Regression (MLR)	77
4.3.2 Principal Component Analysis - General Regression Neural Network (PCA - GRNN)	84
4.4 ความถูกต้องของการประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MRL และวิธี PCA – GRNN	93
4.5 กรณีศึกษา: ช่วงเดือนมกราคม – เมษายน.....	95
บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	101
5.1 สรุปผล.....	101
5.2 อภิปรายผล.....	102
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	103
บรรณานุกรม	104
ประวัติผู้เขียน.....	108

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 ค่าความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศเทียบกับค่าดัชนีคุณภาพอากาศ	13
ตาราง 2 เกณฑ์ของดัชนีคุณภาพอากาศของประเทศไทย	13
ตาราง 3 ข้อมูล AOD จากดาวเทียมต่างๆ	20
ตาราง 4 คุณสมบัติเชิงคลื่นของดาวเทียม Himawari-8	23
ตาราง 5 วิธีการที่ใช้ในการประมาณค่าความเข้มข้นของฝุ่นละออง	29
ตาราง 6 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา	36
ตาราง 7 ระดับความสูงจากข้อมูล DEM ของสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน บริเวณภาคเหนือ	41
ตาราง 8 รายชื่อสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินบริเวณพื้นที่ภาคเหนือของกรมควบคุมมลพิษ	46
ตาราง 9 รายชื่อสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินบริเวณพื้นที่ภาคเหนือของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่	47
ตาราง 10 ช่วงเวลาของข้อมูล PM2.5 จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน กรมควบคุมมลพิษ	55
ตาราง 11 ช่วงเวลาของข้อมูล PM2.5 จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	56
ตาราง 12 จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา	58
ตาราง 13 สถิติของข้อมูลที่ได้จากการจับคู่	77
ตาราง 14 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล	78
ตาราง 15 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบหลายตัวแปร (MLR)	78
ตาราง 16 การทดสอบกำหนดช่วงความแปรปรวนเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญ	85
ตาราง 17 ค่าไอเกนและความแปรปรวนของทั้ง 8 องค์ประกอบ	85
ตาราง 18 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA)	87
ตาราง 19 การทดสอบค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เหมาะสม	87
ตาราง 20 ผลลัพธ์การตรวจสอบความถูกต้อง	95
ตาราง 21 ความสัมพันธ์ของแต่ละข้อมูล ในช่วงเดือน ม.ค. – เม.ย.	97

ตาราง 22 ค่าไอเกนทั้ง 8 องค์ประกอบ	98
ตาราง 23 ผลลัพธ์การตรวจสอบความถูกต้องของการใช้ชุดข้อมูลเดือน ม.ค. – เม.ย.....	100



สารบัญภาพประกอบ

หน้า

ภาพประกอบ 1 การจัด AQI ทั่วโลก	1
ภาพประกอบ 2 การตรวจวัดความเข้มข้น PM _{2.5} ในพื้นที่ 12 จังหวัด ปี พ.ศ. 2559.....	2
ภาพประกอบ 3 ข้อมูลคุณภาพอากาศจากเครื่องวัดฝุ่นขนาดเล็ก วันที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2562	3
ภาพประกอบ 4 เปรียบเทียบขนาดของ PM _{2.5}	8
ภาพประกอบ 5 ตัวอย่างสภาพภูมิประเทศที่เป็นตัวกำหนดความเข้มข้นของการกระจายตัวของ สารมลพิษทางอากาศ.....	9
ภาพประกอบ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น PM ₁ ค่า AOD กับปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา .	10
ภาพประกอบ 7 ค่าความเข้มข้นของ PM ₁₀ เฉลี่ยช่วงฤดูไฟป่า พ.ศ. 2539 - 2557	11
ภาพประกอบ 8 รายงานสถานการณ์และคุณภาพอากาศประเทศไทย ณ วันที่ 27 มีนาคม พ.ศ. 2562	12
ภาพประกอบ 9 แสดงประเภทของการรับรู้จากระยะไกล 2 ประเภท คือ (1) Passive Remote Sensing และ (2) Active Remote Sensing	15
ภาพประกอบ 10 สเปกตรัมของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า	15
ภาพประกอบ 11 ประเภทการกระเจิงในชั้นบรรยากาศ	17
ภาพประกอบ 12 การดูดซับในชั้นบรรยากาศ	18
ภาพประกอบ 13 กระบวนการตรวจวัดฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศด้วยดาวเทียม.....	19
ภาพประกอบ 14 ความสัมพันธ์ของค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นสีน้ำเงิน (a), ช่วงคลื่นสีแดง (b) และ ช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (c) ระหว่างดาวเทียม Himawari และ MODIS.....	22
ภาพประกอบ 15 เปรียบเทียบข้อมูล AOD จากดาวเทียม a) Himawari และ b) Terra MODIS. 23	
ภาพประกอบ 16 การตอบสนองทางสเปกตรัมของ Himawari-8.....	25
ภาพประกอบ 17 กระบวนการสร้างข้อมูล AOD จากดาวเทียม Himawari-8	25
ภาพประกอบ 18 ความสัมพันธ์ของค่า AOD ระหว่างดาวเทียม Himawari-8 และ AERONET ..	26

ภาพประกอบ 19 ตัวอย่างผลลัพธ์การแพร่กระจายตัวของก๊าซโอโซนบริเวณจังหวัดลำปางที่ได้จากแบบจำลอง WRF-Chem	27
ภาพประกอบ 20 Multiple Linear Regression.....	30
ภาพประกอบ 21 โครงสร้างของ GRNN.....	32
ภาพประกอบ 22 พื้นที่ศึกษา.....	34
ภาพประกอบ 23 ตัวอย่างข้อมูล AOD ที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ 5 x 5 กิโลเมตร ในวันที่ 6 เดือนมีนาคม พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.....	38
ภาพประกอบ 24 ตัวอย่างข้อมูล NDVI รายวัน ที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ 5 x 5 กิโลเมตร วันที่ 6 เดือนมีนาคม พ.ศ. 2561.....	39
ภาพประกอบ 25 แผนที่การเกิด Hotspot บริเวณภาคเหนือ ในเดือนมีนาคม ปี พ.ศ. 2561	40
ภาพประกอบ 26 ข้อมูล DEM ที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ 5 x 5 กิโลเมตร บริเวณพื้นที่ภาคเหนือ..	41
ภาพประกอบ 27 ข้อมูลอุณหภูมิอากาศ ที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ 5 x 5 กิโลเมตร วันที่ 6 เดือนมีนาคม พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.....	43
ภาพประกอบ 28 ข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ ที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ 5 x 5 กิโลเมตร วันที่ 6 เดือนมีนาคม พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.....	44
ภาพประกอบ 29 ข้อมูลความเร็วลม ที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ 5 x 5 กิโลเมตร วันที่ 6 เดือนมีนาคม ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.....	45
ภาพประกอบ 30 ข้อมูลความกดอากาศ ที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ 5 x 5 กิโลเมตร วันที่ 6 เดือนมีนาคม พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.....	46
ภาพประกอบ 31 Spatio-temporal collocation method	49
ภาพประกอบ 32 ตัวอย่างฐานข้อมูลอุณหภูมิอากาศ ที่ตำแหน่งสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินและเวลาชั่วโมงที่ตรวจวัด.....	50
ภาพประกอบ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล AOD และความเข้มข้น PM2.5	60
ภาพประกอบ 34 การผันแปรข้อมูลระหว่างปี	63

ภาพประกอบ 35 การกระจายตัวเชิงพื้นที่ของข้อมูลอุณหภูมิอากาศ ในเดือนมีนาคม ปี พ.ศ. 2561	64
ภาพประกอบ 36 การกระจายตัวเชิงพื้นที่ของข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ ในเดือนมีนาคม ปี พ.ศ. 2561	64
ภาพประกอบ 37 การกระจายตัวเชิงพื้นที่ของข้อมูลความกดอากาศ ในเดือนมีนาคม ปี พ.ศ. 2561	65
ภาพประกอบ 38 การกระจายตัวเชิงพื้นที่ของข้อมูลความเร็วลม ในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2561	65
ภาพประกอบ 39 การกระจายตัวเชิงพื้นที่ของข้อมูล AOD ในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2561	66
ภาพประกอบ 40 การกระจายตัวเชิงพื้นที่ของข้อมูล Hotspot ในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2561	66
ภาพประกอบ 41 การกระจายตัวเชิงพื้นที่ของข้อมูล NDVI ในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2561	67
ภาพประกอบ 42 ข้อมูลความสูง DEM บริเวณพื้นที่ภาคเหนือ	67
ภาพประกอบ 43 การผันแปรระหว่างวันของข้อมูลความเข้มข้น PM2.5	69
ภาพประกอบ 44 การผันแปรระหว่างวันของข้อมูล AOD	72
ภาพประกอบ 45 การผันแปรระหว่างวันของ (ก) ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศและความเร็วลม และ (ข) ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์และความกดอากาศ ราย 6 ชั่วโมง จาก ECMWF	73
ภาพประกอบ 46 การคำนวณค่าเฉลี่ย AOD ในพื้นที่รัศมี 5 กิโลเมตรจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน โดยมี (ก) 4 จุดภาพ (ข) 3 จุดภาพ (ค) 2 จุดภาพ และ (ง) 1 จุดภาพ	75
ภาพประกอบ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลความเข้มข้น PM2.5 จากกรมควบคุมมลพิษ และ ค่าเฉลี่ย AOD (ก) แบบ 1 (ข) แบบ 2 และ (ค) แบบ 3	76
ภาพประกอบ 48 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MLR ในวันที่ 23 เดือน มกราคม ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.	79
ภาพประกอบ 49 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MLR ในวันที่ 17 เดือน กุมภาพันธ์ ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.	80
ภาพประกอบ 50 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MLR ในวันที่ 6 เดือน มีนาคม ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.	80

ภาพประกอบ 51 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MLR ในวันที่ 12 เดือนเมษายน ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.	81
ภาพประกอบ 52 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MLR ในวันที่ 27 เดือนธันวาคม ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.	81
ภาพประกอบ 53 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MLR ในรูปแบบ AQI ในวันที่ 23 เดือนมกราคม ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.	82
ภาพประกอบ 54 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MLR ในรูปแบบ AQI ในวันที่ 17 เดือนกุมภาพันธ์ ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.	82
ภาพประกอบ 55 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MLR ในรูปแบบ AQI ในวันที่ 6 เดือนมีนาคม ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.	83
ภาพประกอบ 56 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MLR ในรูปแบบ AQI ในวันที่ 12 เดือนเมษายน ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.	83
ภาพประกอบ 57 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MLR ในรูปแบบ AQI ในวันที่ 27 เดือนธันวาคม ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.	84
ภาพประกอบ 58 ร้อยละความแปรปรวนของแต่ละองค์ประกอบ	86
ภาพประกอบ 59 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี PCA - GRNN ในวันที่ 23 เดือนมกราคม ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.	88
ภาพประกอบ 60 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี PCA - GRNN ในวันที่ 17 เดือนกุมภาพันธ์ ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.	89
ภาพประกอบ 61 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี PCA - GRNN ในวันที่ 6 เดือนมีนาคม ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.	89
ภาพประกอบ 62 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี PCA - GRNN ในวันที่ 12 เดือนเมษายน ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.	90
ภาพประกอบ 63 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี PCA - GRNN ในวันที่ 27 เดือนธันวาคม ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.	90

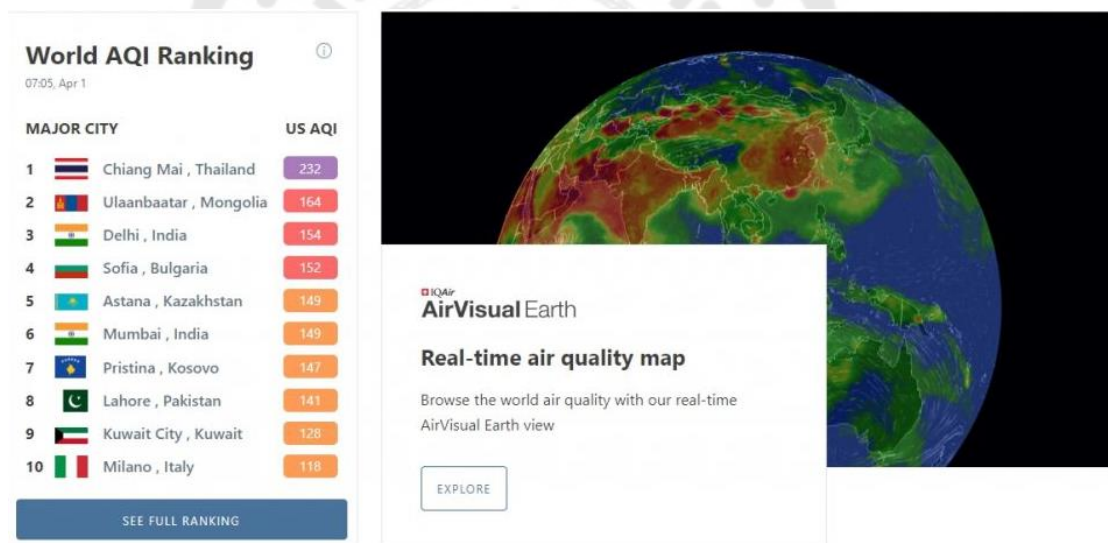
ภาพประกอบ 64 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี PCA - GRNN ในรูปแบบ AQI ในวันที่ 23 เดือนมกราคม ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.....	91
ภาพประกอบ 65 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี PCA - GRNN ในรูปแบบ AQI ในวันที่ 17 เดือนกุมภาพันธ์ ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.....	91
ภาพประกอบ 66 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี PCA - GRNN ในรูปแบบ AQI ในวันที่ 6 เดือนมีนาคม ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.	92
ภาพประกอบ 67 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี PCA - GRNN ในรูปแบบ AQI ในวันที่ 12 เดือนเมษายน ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.	92
ภาพประกอบ 68 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี PCA - GRNN ในรูปแบบ AQI ในวันที่ 27 เดือนธันวาคม ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.....	93
ภาพประกอบ 69 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์การประมาณค่า PM2.5 ด้วยวิธี MLR กับ PM2.5 จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน	94
ภาพประกอบ 70 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์การประมาณค่า PM2.5 ด้วยวิธี PCA - GRNN กับ PM2.5 จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน	95
ภาพประกอบ 71 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล AOD และความเข้มข้น PM2.5 ในช่วงเดือน ม.ค. – เม.ย.	96
ภาพประกอบ 72 ร้อยละความแปรปรวนของแต่ละองค์ประกอบ	98
ภาพประกอบ 73 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MLR โดยใช้ชุดข้อมูลเดือน ม.ค. – เม.ย.....	99
ภาพประกอบ 74 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี PCA - GRNN โดยใช้ชุดข้อมูลเดือน ม.ค. – เม.ย.....	99

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญของปัญหา

ในแต่ละวันเราต้องสัมผัสและหายใจแม้ว่าจะมีสิ่งเจือปนอยู่ มลพิษทางอากาศจึงเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมสำคัญที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อสุขภาพของชาวไทยมาอย่างต่อเนื่อง โดยก่อให้เกิดการเสียชีวิตก่อนวัยอันควรประมาณ 50,000 คนต่อปี (Greenpeace, 2016) จากสถิติการร้องเรียนด้านมลพิษในหลายปีที่ผ่านมา พบว่า มลพิษทางอากาศได้รับการร้องเรียนมากที่สุด โดยเฉพาะฝุ่นละอองในอากาศ (กรมควบคุมมลพิษ, 2548) และจากการจัดอันดับดัชนีคุณภาพอากาศ หรือ Air Quality Index (AQI) เมื่อวันที่ 1 เมษายน 2562 จะพบว่าจังหวัดเชียงใหม่ติดอันดับ 1 ของพื้นที่ที่ค่า AQI สูงถึง 232 ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพมาก (ภาพประกอบ 1)



ภาพประกอบ 1 การจัด AQI ทั่วโลก

ที่มา: AirVisual. (2018)

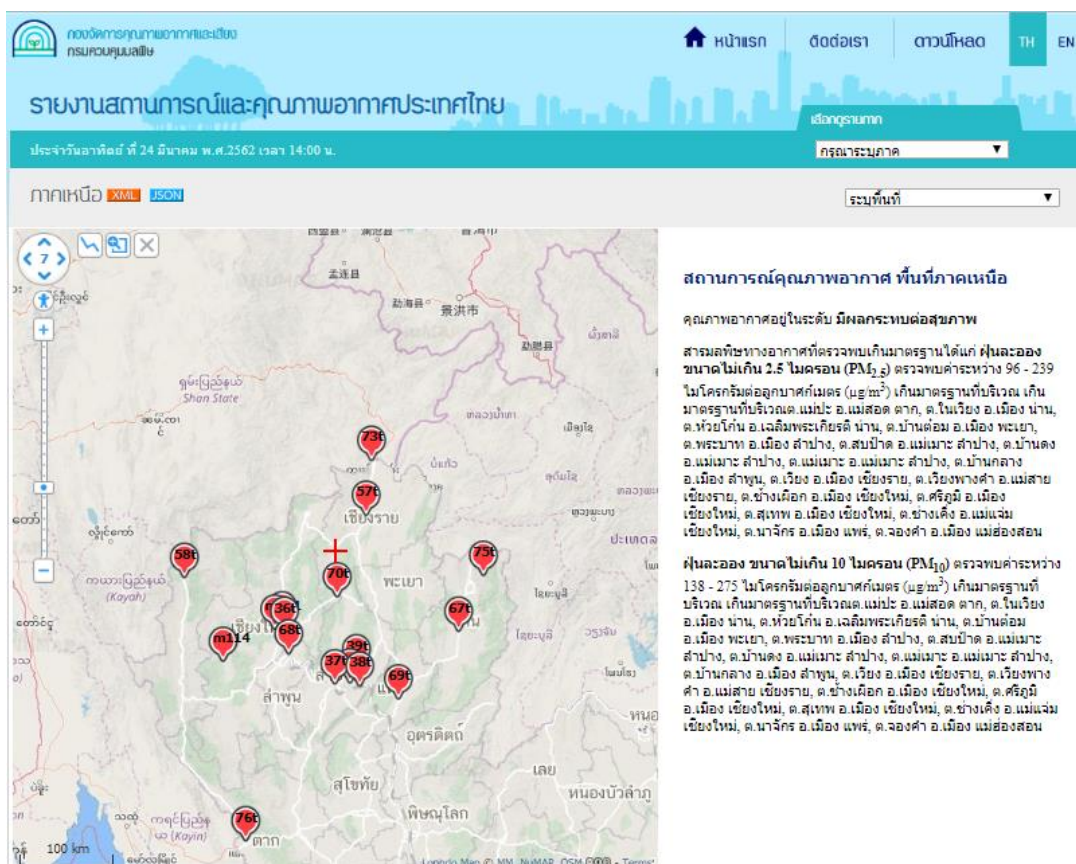
สารมลพิษหลักที่เป็นภัยคุกคามร้ายแรงที่สุดต่อสุขภาพ คือ ฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมโครเมตร (Particulate Matter 2.5 micrometers and smaller: PM2.5) (กรมควบคุมมลพิษ, 2559, อ้างถึงใน Greenpeace, 2016) ซึ่งเป็นฝุ่นละเอียดที่สามารถผ่านขนจมูกเข้าสู่ร่างกายได้ง่าย ทำให้เกิดความเสี่ยงที่จะส่งผลกระทบต่อสุขภาพมากกว่าฝุ่นละอองที่มีขนาดใหญ่

ภาพประกอบ 2 แสดงผลการตรวจวัดความเข้มข้น PM2.5 ในพื้นที่ 12 จังหวัด พบว่า ภาคเหนือมีหลายจังหวัดที่มีค่าความเข้มข้น PM2.5 สูงเกินมาตรฐาน โดยมีสาเหตุมาจากไฟป่าและการเผาพื้นที่เกษตร (มณฑล รายะนาคร, 2553) ทำให้พื้นที่ภาคเหนือเป็นพื้นที่วิกฤตด้านปัญหาฝุ่นละออง



ภาพประกอบ 2 การตรวจวัดความเข้มข้น PM2.5 ในพื้นที่ 12 จังหวัด ปี พ.ศ. 2559

ที่มา: ดัดแปลงจาก Greenpeace. (2016)



ภาพประกอบ 3 ข้อมูลคุณภาพอากาศจากเครื่องวัดฝุ่นขนาดเล็ก วันที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2562

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ. (2561ก)

จากภาพประกอบ 3 แสดงให้เห็นข้อมูลการตรวจวัดคุณภาพอากาศและความเข้มข้น PM_{2.5} ในพื้นที่ภาคเหนือ ประเทศไทย มีการตรวจวัดเป็นรายสถานีตรวจวัดที่มีความถูกต้องและความละเอียดเชิงเวลา แต่เนื่องจากการตรวจวัดเป็นแบบจุดทำให้ความละเอียดเชิงพื้นที่ยังไม่เพียงพอต่อการติดตามและเฝ้าระวัง PM_{2.5} ได้ ปัจจุบันได้มีการประยุกต์เทคโนโลยีการรับรู้จากระยะไกลในการตรวจวัดความเข้มข้นของ PM_{2.5} มากขึ้น เพราะสามารถให้ข้อมูลที่มีความละเอียดทั้งเชิงพื้นที่และเชิงเวลา เช่น ข้อมูลความลึกเชิงแสงของฝุ่นละออง (Aerosol Optical Depth: AOD) เป็นต้น แต่ข้อเสียของการตรวจวัดระยะไกล คือ ข้อมูลที่ได้มีความคลาดเคลื่อน ดังนั้น ผู้วิจัยจึงทำการประมาณค่าความเข้มข้นของ PM_{2.5} โดยใช้ปัจจัยต่างๆ ได้แก่ ข้อมูล AOD จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมฮิมาวาริ 8 และลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ศึกษา ด้วยวิธี Principal Component Analysis - General Regression Neural Network (PCA - GRNN) และเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากวิธี Multiple Linear Regression (MLR) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้

ศึกษา สำหรับประเมินวิธีการที่ให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำ และสามารถนำผลลัพธ์ที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในการติดตาม PM2.5 ได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป

1.2 ความมุ่งหมายของงานวิจัย

1. เพื่อประมาณค่าความเข้มข้นของ PM2.5 ด้วยค่า AOD จากดาวเทียม Himawari-8
2. เพื่อเปรียบเทียบวิธีการประมาณค่าความเข้มข้นของ PM2.5 ด้วยวิธี MLR และ PCA - GRNN
3. เพื่อหาความสัมพันธ์ของปัจจัยทางกายภาพที่มีผลต่อความเข้มข้นของ PM2.5 บริเวณภาคเหนือ

1.3 ความสำคัญของการวิจัย

1. เพื่อให้มีความเข้าใจวิธีการประมาณค่าความเข้มข้นของ PM2.5 ด้วยค่า AOD จากเทคโนโลยีการสำรวจระยะไกล ด้วยวิธี MLR และ PCA - GRNN
2. ทำให้ทราบว่าปัจจัยทางกายภาพใดที่ส่งผลต่อความเข้มข้นของ PM2.5 บริเวณพื้นที่ภาคเหนือ
3. ทำให้สามารถติดตามค่าความเข้มข้นของ PM2.5 ด้วยเทคโนโลยีการสำรวจระยะไกล และบ่งชี้ระดับอันตรายจาก PM2.5 บริเวณพื้นที่ภาคเหนือได้ครอบคลุมพื้นที่กว้างกว่าสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. ขอบเขตด้านพื้นที่ คือ ภาคเหนือ ประเทศไทย ประกอบด้วย 9 จังหวัด เชียงราย เชียงใหม่ น่าน พะเยา แพร่ แม่ฮ่องสอน ลำปาง ลำพูน และอุตรดิตถ์ (จำแนกขอบเขตภาคเหนือตามราชบัณฑิตยสถาน)

2. ขอบเขตด้านเนื้อหา

- 2.1 ศึกษาการคำนวณปริมาณความเข้มข้น PM2.5 ด้วยเทคโนโลยีการสำรวจระยะไกล จากความสัมพันธ์ของปัจจัยทางกายภาพ ในพื้นที่ภาคเหนือ ประเทศไทย

2.2 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา มีดังนี้

2.2.1 ข้อมูลความเข้มข้นของ PM2.5 จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน จากกรมควบคุมมลพิษ และมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

2.2.2 ข้อมูลกายภาพ

2.2.2.1 ปัจจัยอุตุนิยมวิทยา European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) มีดังนี้

- อุณหภูมิอากาศ (Air Temperature) หน่วย: องศาเซลเซียส
- ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity) หน่วย: เปอร์เซ็นต์
- ความกดอากาศ (Surface Pressure) หน่วย: ปาสกาล
- ความเร็วลม (Wind Speed) หน่วย: เมตรต่อวินาที

2.2.3 ข้อมูล Aerosol Optical Depth (AOD) จากดาวเทียมฮิมาวาริ 8 (Himawari-8)

2.2.4 ข้อมูลจุดความร้อน (Hotspot) จากดาวเทียม Terra MODIS

2.2.5 ดัชนีพืชพรรณ (Normalized difference vegetation index: NDVI) จากดาวเทียม Terra MODIS

2.2.6 ข้อมูลแบบจำลองความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model: DEM) จากดาวเทียม Terra ASTER

3. ขอบเขตด้านเวลา คือ ทำการศึกษาวิจัยโดยใช้ข้อมูลในช่วงเดือนมกราคม – ธันวาคม ปี พ.ศ. 2561

1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ

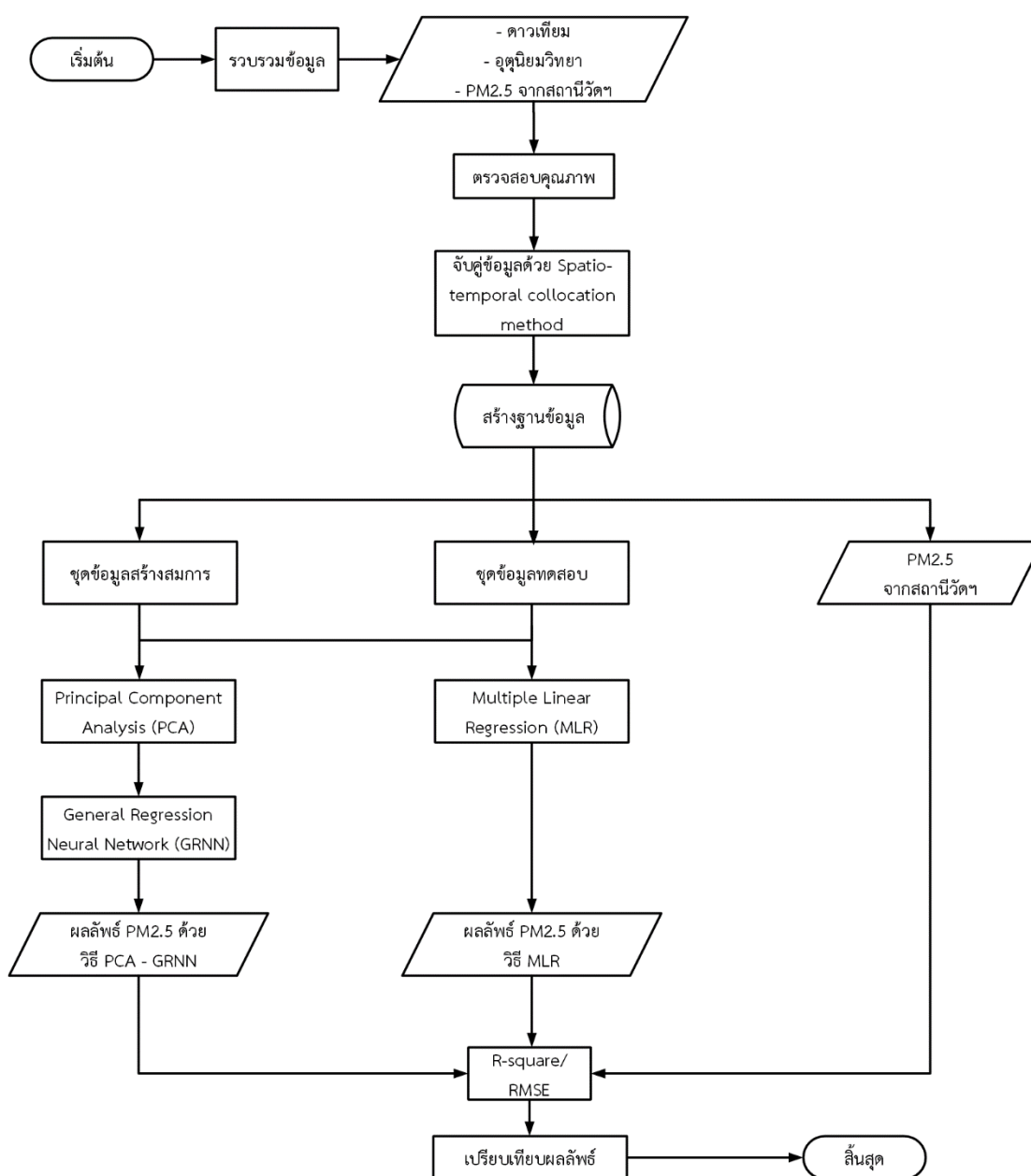
PM2.5 หมายถึง อนุภาคของแข็งหรือของเหลวที่มีอยู่ในอากาศ เป็นอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร (มนตรี ชูติชัยศักดิ์ดา, 2557)

AOD หมายถึง ค่าที่บ่งชี้ถึงปริมาณฝุ่นละอองที่มีอยู่ในแนวตั้งของชั้นบรรยากาศ ซึ่งได้จากการบันทึกข้อมูลด้วยเครื่องตรวจวัดหรือเซ็นเซอร์บนดาวเทียม (ภูวกฤต ใจหอม, 2553)

การรับรู้จากระยะไกล หมายถึง วิทยาศาสตร์ และศิลปะของการได้มาซึ่งข้อมูลเกี่ยวกับวัตถุ พื้นที่ หรือปรากฏการณ์ต่างๆ บนพื้นผิวโลกด้วยการบันทึกข้อมูลโดยใช้คุณสมบัติของ

พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนหรือแผ่จากพื้นผิวโลกผ่านชั้นบรรยากาศไปจนถึงเครื่องมือตรวจวัด ซึ่งปราศจากการเข้าไปสัมผัสวัตถุเป้าหมาย (Lillesand & Kiefer, 1979)

1.6 กรอบแนวคิดในงานวิจัย



บทที่ 2

ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่างๆ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. ฝุ่นละออง
2. ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (Particulate Matter 2.5 micrometers and smaller [PM2.5])
3. ปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่กระจายของความเข้มข้น PM2.5 ในอากาศ
4. การตรวจวัดค่าความเข้มข้น PM2.5
5. เทคนิคที่ใช้ในการประมาณค่าความเข้มข้นของฝุ่นละอองในอากาศ
6. Multiple Linear Regression (MLR)
7. Principal Component Analysis - General Regression Neural Network (PCA – GRNN)

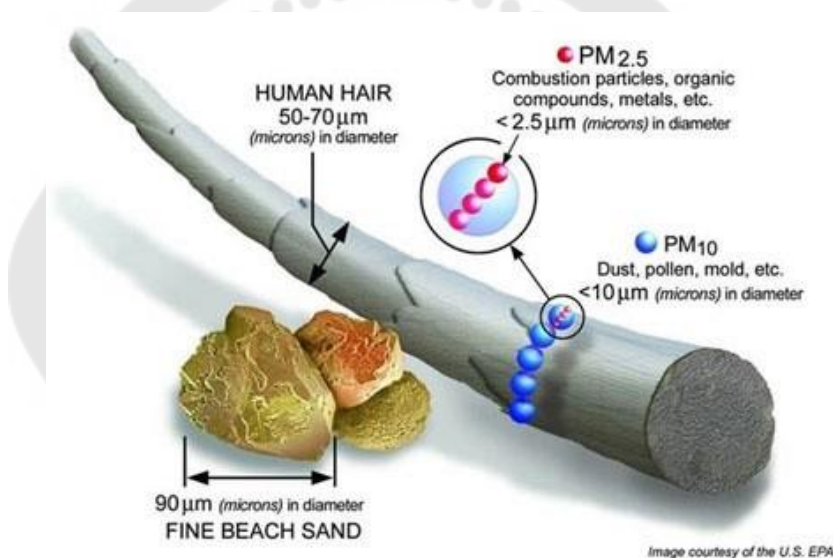
2.1 ฝุ่นละออง

ฝุ่นละออง หมายถึง อนุภาคของแข็งหรือของเหลวที่มีอยู่ในอากาศ ฝุ่นละอองเกิดจากกิจกรรมต่างๆ ทั้งโดยธรรมชาติและจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง โดยเกิดได้ทั้งจากการจราจรขนส่ง กิจกรรมอุตสาหกรรม และการเผาในที่โล่ง (กรมควบคุมมลพิษ, 2554) แหล่งกำเนิดฝุ่นละอองที่แตกต่างกันจะทำให้องค์ประกอบทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของฝุ่นละอองมีความหลากหลาย โดยสามารถจำแนกฝุ่นละอองเป็น 2 ชนิด คือ 1) เกิดขึ้นจากการแพร่กระจายสู่บรรยากาศโดยตรง ที่เรียกว่า “ฝุ่นละอองชนิดปฐมภูมิ” และ 2) เกิดจากการรวมตัวของอนุภาคฝุ่นละอองด้วยกัน หรือเกิดจากการรวมตัวของอนุภาคฝุ่นละอองกับก๊าซ รวมทั้งของแข็งและของเหลวในบรรยากาศ ที่เรียกว่า “ฝุ่นละอองชนิดทุติยภูมิ” ฝุ่นละอองในบรรยากาศมีหลายขนาดอนุภาคประกอบด้วย ฝุ่นละอองขนาดอนุภาคใหญ่ที่สามารถตกลงพื้นดินอย่างรวดเร็ว และสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เช่น อนุภาคของเม็ดทรายและดิน เป็นต้น โดยส่วนใหญ่เกิดจากกิจกรรม

อุตสาหกรรมและก่อสร้าง ไปจนถึงฝุ่นละอองขนาดอนุภาคเล็กที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตา ที่จะส่งผลกระทบต่อและเป็นอันตรายต่อสุขภาพ เช่น ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร เป็นต้น

2.2 ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร

ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร (Particulate Matter 2.5 micrometers and smaller) หรือที่เรียกว่า PM_{2.5} เป็นฝุ่นละอองที่ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตา มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร (ภาพประกอบ 4) สามารถแพร่กระจายอยู่ในบรรยากาศได้เป็นเวลานาน โดยแหล่งกำเนิดของ PM_{2.5} ส่วนใหญ่เกิดจากการเผาไหม้ต่างๆ อาทิ การเผาไหม้ของน้ำมันดีเซล การเผาพื้นที่ป่าไม้ และการเผาพื้นที่ทางการเกษตร เป็นต้น



ภาพประกอบ 4 เปรียบเทียบขนาดของ PM_{2.5}

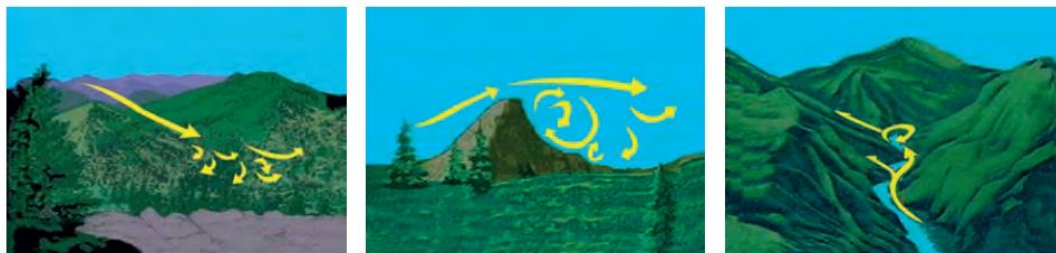
ที่มา: Agency United States Environmental Protection. (2018)

2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่กระจายของความเข้มข้น PM_{2.5} ในอากาศ

การแพร่กระจายของความเข้มข้น PM_{2.5} ส่วนมากจะเกิดขึ้นในบรรยากาศชั้นโทรโพสเฟียร์ ซึ่งเป็นชั้นบรรยากาศที่เราอาศัยอยู่ โดยส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งไม่มีชีวิต ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ สภาพแวดล้อม รวมถึงเกิดภัยพิบัติทางธรรมชาติ

กรมควบคุมมลพิษ (2554) ได้อธิบายว่าปริมาณและชนิดของสารมลพิษที่ถูกระบายออกจากแหล่งกำเนิด สภาวะทางอุตุนิยมวิทยา (meteorology) และสภาพภูมิประเทศ (topography)

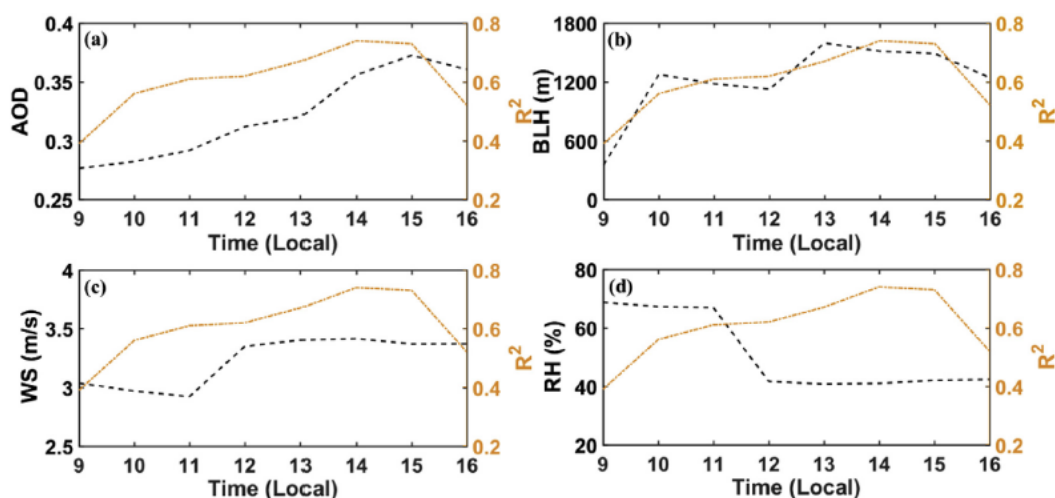
จะเป็นตัวกำหนดความเข้มข้นของสารมลพิษที่เจือปนอยู่ในอากาศสำหรับพื้นที่ที่อยู่ไกลออกไปจากแหล่งกำเนิด ส่วนคุณภาพอากาศจะเป็นตัวกำหนดถึงลักษณะและความรุนแรงของผลกระทบที่เกิดขึ้น ดังภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 ตัวอย่างสภาพภูมิประเทศที่เป็นตัวกำหนดความเข้มข้นของการกระจายตัวของสารมลพิษทางอากาศ

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ. (2554)

การประเมินการแพร่กระจายของมลพิษทางอากาศมีการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของการเกิดมลพิษทางอากาศ โดยจะใช้ข้อมูลปริมาณสารมลพิษ และฝุ่นละอองจากการตรวจวัดด้วยเครื่องมือที่มีมาตรฐาน และจำเป็นต้องใช้ปัจจัยที่สำคัญทางด้านอุตุนิยมวิทยา เช่น ทิศทางและความเร็วลม ความชื้นในบรรยากาศ อุณหภูมิอากาศ ความกดอากาศ และปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ เป็นต้น มีงานวิจัยมากมายทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศที่ศึกษาการแพร่กระจายของมลพิษทางอากาศและฝุ่นละออง โดย Zang et al. (2018) ได้ประมาณค่าความเข้มข้นฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร (Particulate Matter 1 [PM1]) ในประเทศจีน โดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมและปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity [RH]) อุณหภูมิอากาศ Air Temperature [TEMP]) ความเร็วลม (Wind Speed [WS]) ความกดอากาศ (Surface Pressure) และความสูงของชั้นบรรยากาศ (Boundary Layer Height [BLH]) ผลลัพธ์ในภาพประกอบ 6 แสดงให้เห็นว่าข้อมูล AOD, BLH, WS และ RH มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้น PM1

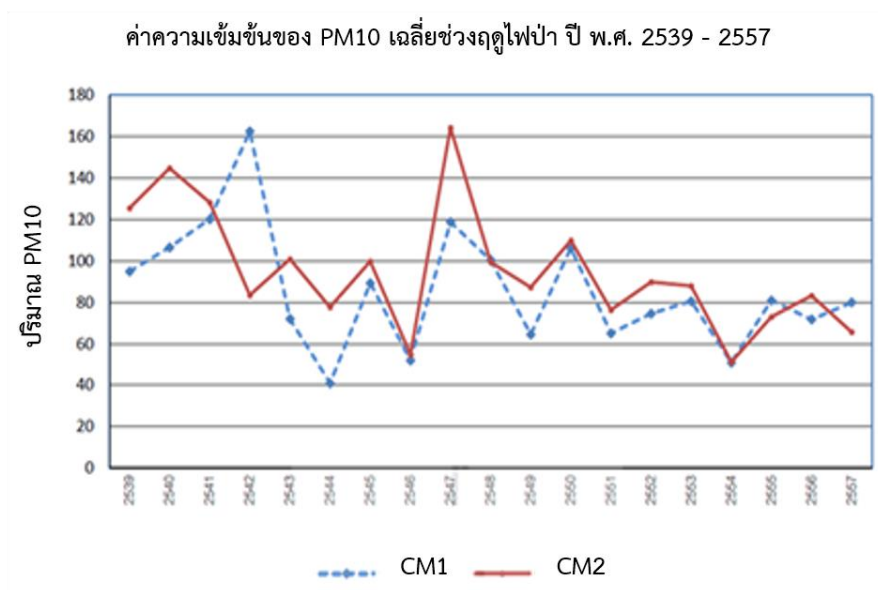


ภาพประกอบ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น PM1 กับค่า AOD และปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา

ที่มา: Zang et al. (2018)

Guo et al. (2016) ได้ศึกษาผลกระทบจากความแปรปรวนของปัจจัยด้านอุตุนิยมวิทยาต่อความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น PM_{2.5} กับค่า AOD ในประเทศจีน ผลการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของ PM_{2.5} จะมีค่าสูงสุดในช่วงเช้าและลดลงในช่วงบ่าย เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพลังงานแสงอาทิตย์ทำให้ความเข้มข้น PM_{2.5} มีการแพร่กระจายอย่างรวดเร็ว ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น PM_{2.5} และข้อมูล AOD จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับพื้นที่และฤดูกาล อีกทั้งยังพบว่าเมฆและความชื้นสัมพัทธ์มีผลทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น PM_{2.5} และข้อมูล AOD มีค่าลดลง ดังนั้นจะเห็นว่าผลกระทบด้านอุตุนิยมวิทยา เป็นปัจจัยที่สำคัญในการอธิบายความสัมพันธ์ของความเข้มข้น PM_{2.5} และข้อมูล AOD ซึ่งหากเข้าใจปัจจัยต่างๆ ก็จะทำให้เข้าใจถึงโครงสร้างของฝุ่นละอองที่ดีได้ในอนาคต

นอกจากปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาจะมีผลต่อการแพร่กระจายของ PM_{2.5} แล้วแหล่งกำเนิด PM_{2.5} ยังเป็นปัจจัยที่กระตุ้นทำให้มลพิษทางอากาศมีค่าความเข้มข้นสูง เช่น พื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยที่มีแหล่งกำเนิดมลพิษส่วนใหญ่มาจากการเผาไหม้และไฟฟ้า รวมถึงลักษณะภูมิประเทศที่มีความสูงต่ำ เป็นต้น พงศ์เทพ สุวรรณวารี และ ฉัตร พยุงวิวัฒน์กุล (2558) ได้ศึกษาผลกระทบของไฟฟ้าต่อความสมบูรณ์ของป่าไม้และคุณภาพอากาศในจังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร (Particulate Matter 10 [PM₁₀]) ที่มีค่าสูงในฤดูไฟฟ้า ช่วง ปี พ.ศ. 2539 - 2557 ดังภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 ค่าความเข้มข้นของ PM10 เฉลี่ยช่วงฤดูไฟป่า พ.ศ. 2539 - 2557

ที่มา: พงศ์เทพ สุวรรณวารี และฉัตร พยุงวิวัฒน์กุล. (2558)

2.4 การตรวจวัดค่าความเข้มข้น PM2.5

ปัจจุบันสามารถติดตามและตรวจวัดค่าความเข้มข้น PM2.5 ได้หลายวิธี ดังนี้

2.4.1 การติดตามตรวจวัดคุณภาพอากาศจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน

กรมควบคุมมลพิษได้มีการติดตั้งสถานีติดตามตรวจวัดคุณภาพอากาศทั่วประเทศจำนวน 65 สถานี โดยมีการติดตามและตรวจสอบความถูกต้องของระบบและข้อมูลอย่างสม่ำเสมอ เพื่อจัดทำเป็นรายงานดัชนีคุณภาพอากาศของประเทศไทย พร้อมทั้งมีการเผยแพร่ข้อมูลสถานการณ์และคุณภาพอากาศรายชั่วโมงและรายวันให้แก่ประชาชนผ่านเว็บไซต์ <http://air4thai.pcd.go.th/webV2/> และแอปพลิเคชัน Air4Thai ดังภาพประกอบ 8

วันที่ 27 มีนาคม พ.ศ.2562

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ. (2561ข)

ในปัจจุบันการคำนวณดัชนีคุณภาพอากาศของประเทศไทยจะใช้สารมลพิษทางอากาศ 6 ชนิด ได้แก่ ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร (PM2.5) ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร (PM10) ก๊าซโอโซน (O₃) ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO₂) และก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO₂) (กรมควบคุมมลพิษ, 2561) และคำนวณดัชนีคุณภาพอากาศด้วยสมการต่อไปนี้ (Salvador & Salvador, 2012)

$$AQI = \left[\frac{(X_{obs} - X_{min}) x (AQI_{max} - AQI_{min})}{(X_{max} - X_{min})} \right] + AQI_{min}$$

โดยที่ AQI คือ ค่าดัชนีย่อยคุณภาพอากาศ

X_{obs} คือ ความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศจากการตรวจวัด

X_{min}, X_{max} คือ ค่าต่ำสุดและสูงสุด ของช่วงความเข้มข้นสารมลพิษที่

มีค่า X

AQI_{min}, AQI_{max} คือ ค่าต่ำสุดและสูงสุด ของช่วงดัชนีคุณภาพอากาศ

ที่ความเข้มข้น X จากค่าดัชนีย่อยที่คำนวณได้ โดยสารมลพิษประเภทใดมีค่าดัชนีสูงสุด จะใช้เป็นดัชนีคุณภาพอากาศ (AQI) ณ ช่วงเวลานั้น ดังตาราง 1

ตาราง 1 ค่าความเข้มข้นของสารมลพิษทางอากาศเทียบกับค่าดัชนีคุณภาพอากาศ

AQI	PM2.5 (มคก./ลบ.ม.)	PM10 (มคก./ลบ.ม.)	O ₃ (ppb)	CO (ppm)	NO ₂ (ppb)	SO ₂ (opb)
	เฉลี่ย 24 ชั่วโมงต่อเนื่อง	เฉลี่ย 8 ชั่วโมงต่อเนื่อง	เฉลี่ย 1 ชั่วโมง			
0 - 25	0 - 25	0 - 50	0 - 35	0 - 4.4	0 - 60	0 - 100
26 - 50	26 - 37	51 - 80	36 - 50	4.5 - 6.4	61 - 106	101 - 200
51 - 100	38 - 50	81 - 120	51 - 70	6.5 - 9.0	107 - 170	201 - 300
101 - 200	51 - 90	121 - 180	71 - 120	9.1 - 30.0	171 - 340	301 - 400
มากกว่า 200	91 ขึ้นไป	181 ขึ้นไป	121 ขึ้นไป	30.1 ขึ้นไป	341 ขึ้นไป	401 ขึ้นไป

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ. (2561ค)

ข้อมูลดัชนีคุณภาพอากาศของประเทศไทยที่คำนวณได้จะมีการเผยแพร่ในรูปแบบแผนที่จุดสถานีและใช้สีแสดงความหมายของระดับคุณภาพอากาศดังตาราง 2 โดยแบ่งเป็น 5 ระดับ คือ ตั้งแต่ 0 ถึง 201 ขึ้นไป ซึ่งแต่ละระดับจะใช้สีเป็นสัญลักษณ์เปรียบเทียบกับระดับของผลกระทบต่อสุขภาพอนามัย

ตาราง 2 เกณฑ์ของดัชนีคุณภาพอากาศของประเทศไทย

AQI	ความหมาย	สีที่ใช้
0 - 25	คุณภาพอากาศดีมาก	ฟ้า
26 - 50	คุณภาพอากาศดี	เขียว

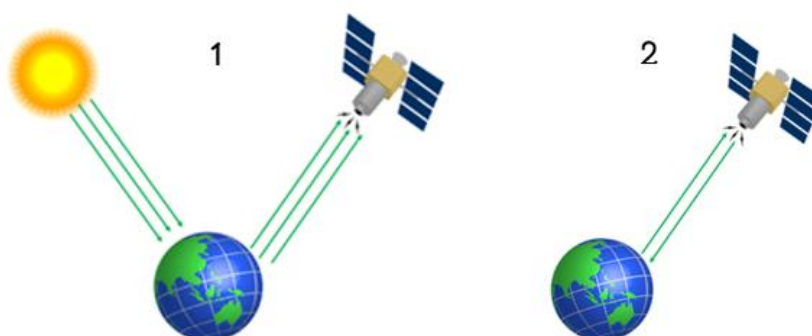
ตาราง 2 (ต่อ)

AQI	ความหมาย	สีที่ใช้
51 - 100	ปานกลาง	เหลือง
101 - 200	เริ่มมีผลกระทบต่อสุขภาพ	ส้ม
201 ขึ้นไป	มีผลกระทบต่อสุขภาพ	แดง

ที่มา: กรมควบคุมมลพิษ. (2561ง)

2.4.2 การประมาณค่าด้วยเทคโนโลยีการรับรู้จากระยะไกล

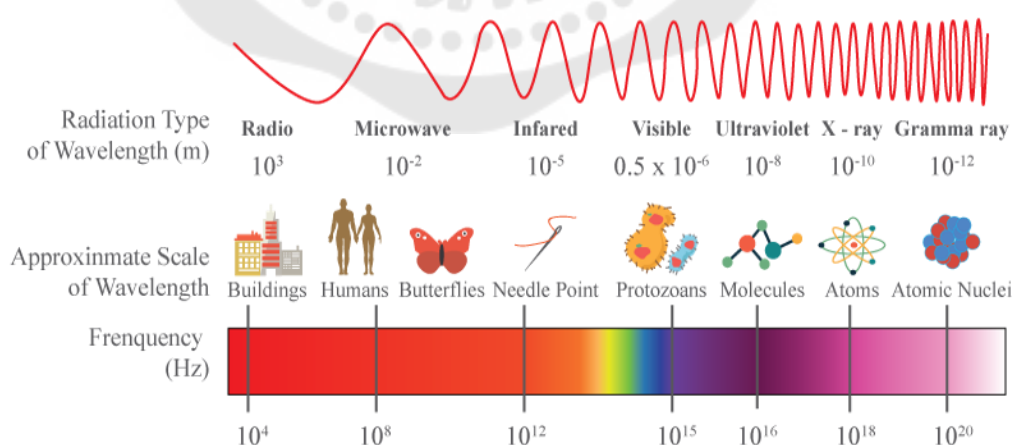
การรับรู้จากระยะไกล หมายถึง วิทยาศาสตร์ และศิลปะของการได้มาซึ่งข้อมูลเกี่ยวกับวัตถุ พื้นที่ หรือปรากฏการณ์ต่างๆ บนพื้นผิวโลกด้วยการบันทึกข้อมูลโดยใช้คุณสมบัติของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สะท้อนหรือแผ่จากพื้นผิวโลกผ่านชั้นบรรยากาศไปจนถึงเครื่องมือตรวจวัด ซึ่งปราศจากการเข้าไปสัมผัสวัตถุเป้าหมาย การรับรู้จากระยะไกล ถูกแบ่งเป็น 2 ประเภทดังภาพประกอบ 9 คือ 1) Passive Remote Sensing เป็นระบบที่อาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิด เช่น ดวงอาทิตย์ เป็นต้น ทำให้สามารถทำงานได้เฉพาะในเวลากลางวันเท่านั้น รวมถึงต้องมีสภาพท้องฟ้าที่ปลอดโปร่ง ไม่มีเมฆฝนในช่วงเวลาทำการตรวจวัด และ 2) Active Remote Sensing เป็นระบบที่สามารถสร้างแหล่งพลังงานได้เอง และส่งพลังงานนั้นไปยังพื้นที่หรือวัตถุเป้าหมาย ทำให้สามารถทำการตรวจวัดได้ทั้งในเวลากลางวันและกลางคืน โดยไม่มีข้อจำกัดด้านสภาพอากาศที่มีเมฆหรือฝน



ภาพประกอบ 9 แสดงประเภทของการรับรู้จากระยะไกล 2 ประเภท คือ (1) Passive Remote Sensing และ (2) Active Remote Sensing

ที่มา: GrindGIS. (2017)

การแผ่รังสีของแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับการรับรู้จากระยะไกลจะเกิดขึ้นตามความยาวคลื่นที่มีความต่อเนื่อง โดยมีความถี่ของคลื่นจากความถี่สูงไปยังความถี่ต่ำหรือจากความยาวคลื่นสั้นไปยังความยาวคลื่นยาว ซึ่งถูกแบ่งประเภทตามขอบเขตของสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic spectrum) ในรูปแบบที่มีความแตกต่างกันดังภาพประกอบ 10 Lillesand & Kiefer (1979) ได้อธิบายไว้ว่า “วัตถุทุกชนิดที่มีอุณหภูมิมากกว่าศูนย์องศาสัมบูรณ์ (0°K หรือ -273°C) จะแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้น วัตถุที่อยู่บนโลกจะเป็นแหล่งกำเนิดของการแผ่รังสี แม้ว่าจะมีขนาดและองค์ประกอบเชิงสเปกตรัมที่แตกต่างกัน”



ภาพประกอบ 10 สเปกตรัมของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า

ที่มา: สมาคมฟิสิกส์ไทย. (2561)

ปฏิสัมพันธ์ของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในชั้นบรรยากาศของโลกที่อยู่ระหว่างเครื่องมือตรวจวัดและเป้าหมายของการตรวจวัด มีความสำคัญในระบบการรับรู้จากระยะไกล ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อข้อมูลที่บันทึก โดยการเกิดปฏิสัมพันธ์ของการแผ่รังสีกับบรรยากาศ ประกอบด้วย 3 กระบวนการ (สุวิทย์ อ่องสมหวัง, 2554) ดังนี้

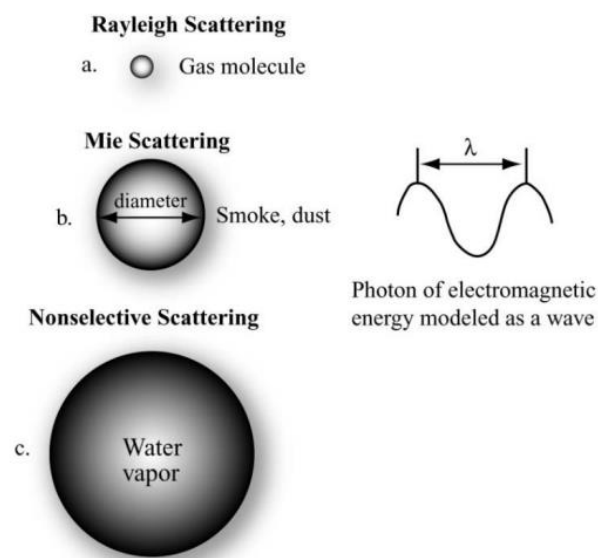
1) การกระเจิง (Scattering)

เป็นการเปลี่ยนรูปแบบและทิศทางของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยอนุภาคหรือโมเลกุลที่ลอยอยู่ในชั้นบรรยากาศ ซึ่งปัจจัยที่มีผลในการเกิดการกระเจิง ได้แก่ ความยาวคลื่นของการแผ่รังสี ความเข้มข้นของอนุภาค ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาค ความหนาแน่นเชิงแสงของบรรยากาศ และความสามารถในการดูดซับของบรรยากาศ การกระเจิง ถูกแบ่งออกเป็น 3 ประเภท (ภาพประกอบ 11) ดังนี้

1.1) การกระเจิงแบบเรย์ลี (Rayleigh Scattering) การกระเจิงประเภทนี้จะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลและอนุภาคขนาดเล็กที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางน้อยกว่าความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านลงมา

1.2) การกระเจิงแบบมี (Mie Scattering) การกระเจิงประเภทนี้จะเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับขนาดของความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านลงมา อาทิ ใต้น้ำ และฝุ่นละอองขนาดอนุภาคต่างๆ เป็นต้น

1.3) การกระเจิงแบบไม่เจาะจง (Nonselective Scattering) การกระเจิงประเภทนี้จะเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางยาวมากกว่าความยาวคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านลงมา เช่น หยดน้ำ เป็นต้น

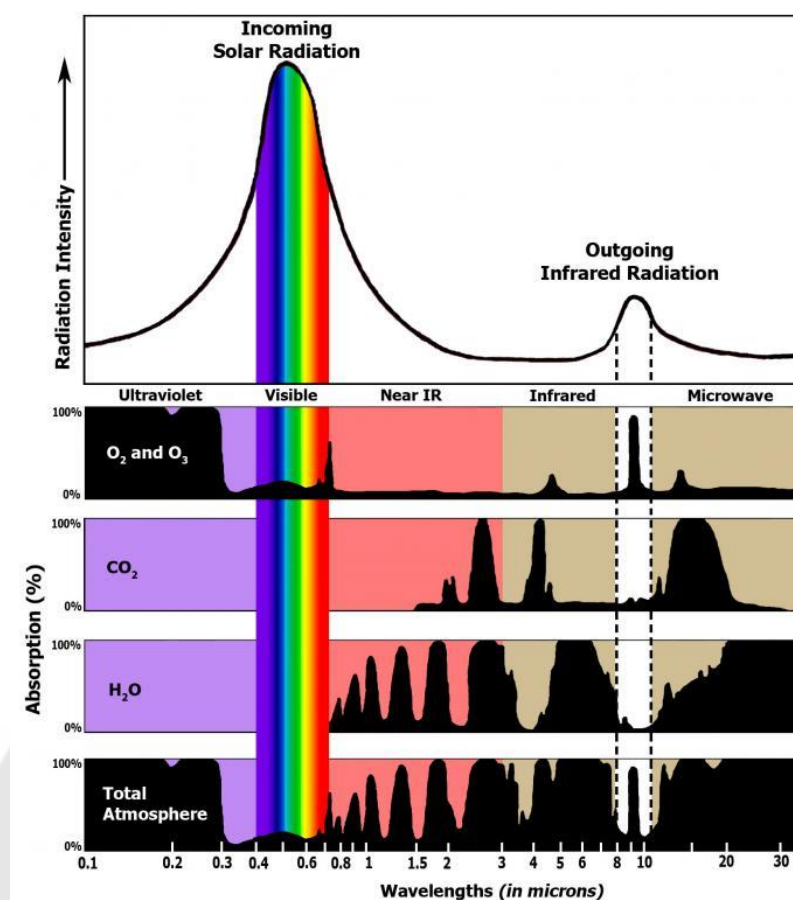


ภาพประกอบ 11 ประเภทการกระเจิงในชั้นบรรยากาศ

ที่มา: Gerardo, A. (2014)

2) การดูดซับ (Absorption)

เป็นการกักเก็บพลังงานจากการแผ่รังสีโดยสสารหรือวัตถุ การดูดซับจะเกิดขึ้นเมื่อบรรยากาศปิดกั้นการส่งผ่านพลังงานหรือการแผ่รังสี กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นจะแปลงรังสีตกกระทบให้เป็นความร้อนแล้วเก็บไว้ จากนั้นจึงแผ่รังสีที่มีความยาวคลื่นที่ยาวกว่าเดิมออกมาภายหลัง โดยปัจจัยสำคัญในการดูดซับพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากดวงอาทิตย์ได้แก่ ก๊าซโอโซน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ภาพประกอบ 12 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับพลังงานของไอน้ำและก๊าซประเภทต่างๆ ในแต่ละช่วงความยาวคลื่น



ภาพประกอบ 12 การดูดซับในชั้นบรรยากาศ

ที่มา: National Aeronautics and Space Administration. (2016)

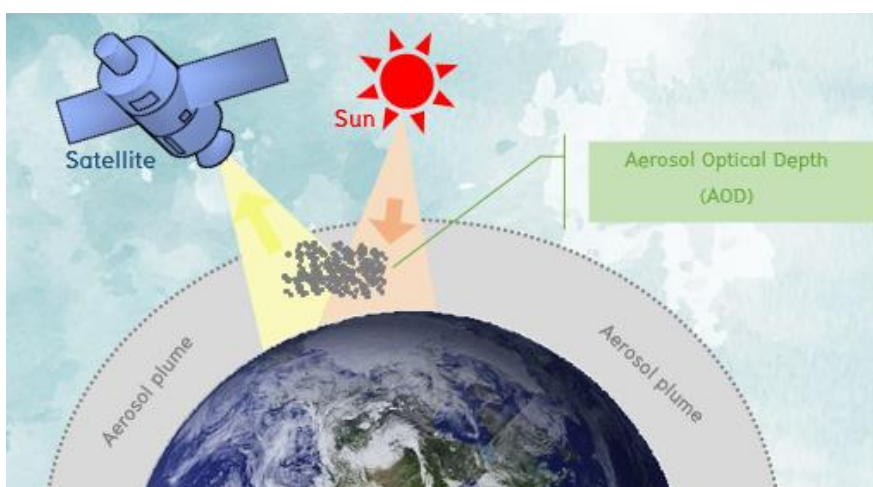
3) การหักเห (Refraction)

เป็นการเปลี่ยนทิศทางและความเข้มของรังสีระหว่างตัวกลางสองตัวที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน โดยจะเกิดการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง

ปฏิสัมพันธ์ของพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในชั้นบรรยากาศดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จะเห็นได้ว่ากระบวนการที่สำคัญต่อการตรวจวัดฝุ่นละอองด้วยเทคโนโลยีการรับรู้จากระยะไกล คือ การกระเจิง ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากระทบกับอนุภาคของฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศ และเกิดการกระเจิงกลับไปยังเครื่องมือตรวจวัด จึงทำให้ได้มาซึ่งข้อมูลอนุภาคของฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศ

2.4.2.1 Aerosol Optical Depth (AOD)

Aerosol Optical Depth (AOD) เป็นค่าที่บอกถึงปริมาณฝุ่นละอองที่มีอยู่ในแนวตั้งของชั้นบรรยากาศ ซึ่งได้จากการบันทึกข้อมูลด้วยเครื่องตรวจวัดหรือเซ็นเซอร์บนดาวเทียม โดยมีกระบวนการได้มาซึ่งข้อมูลดังกล่าวประกอบ 13 เริ่มจากดวงอาทิตย์ส่งพลังงานช่วงคลื่นสั้นและคลื่นยาวมากระทบกับฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศของโลก จากนั้นเกิดจากสะท้อนพลังงานไปยังเซ็นเซอร์ทำให้สามารถบันทึกค่า AOD ได้



ภาพประกอบ 13 กระบวนการตรวจวัดฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศด้วยดาวเทียม

ในปี ค.ศ. 2000 เป็นต้นมา องค์การนาซา (National Aeronautics and Space Administration [NASA]) ของประเทศสหรัฐอเมริกา ได้จัดตั้งเครือข่ายทั่วโลกหรือที่เรียกเครือข่ายดังกล่าวว่า AERONET (Aerosol Robotic Network) โดยมีเป้าหมายเพื่อศึกษาสมบัติเชิงแสง ปริมาณและชนิด รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของฝุ่นทั่วโลกด้วยเซ็นเซอร์ MODIS (MODerate resolution Imaging Spectrometer) ซึ่งเป็นเซ็นเซอร์ที่ติดตั้งอยู่บนดาวเทียม TERRA/AQUA โดยสามารถใช้ศึกษาฝุ่นละอองแบบ Multi - Temporal Series ได้ และยังพบว่าอนุภาคของฝุ่นละอองมีปฏิสัมพันธ์กับพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวเฉพาะ จากนั้นมีการคำนวณและสร้างข้อมูล AOD ซึ่งมีกระบวนการหลักๆ คือ การนำค่าการแผ่รังสีในช่วงคลื่นตามองเห็นถึงอินฟราเรดเข้าโมเดลฝุ่นละออง (Aerosol Model) และวิเคราะห์ด้วยกระบวนการ Radiative transfer simulation

ในปัจจุบันมีการสร้างข้อมูล AOD จากดาวเทียมหลายดวงที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่และความละเอียดเชิงเวลาที่แตกต่างกัน (ดังตาราง 3) ดังนี้

1) Multi-angle Imaging Spectro Radiometer (MISR) พัฒนาขึ้นโดย NASA มีความละเอียดเชิงเวลา 3 รูปแบบ คือ รายเดือน ราย 3 เดือน และรายปี และมีความละเอียดเชิงพื้นที่ 17.6×17.6 กิโลเมตร

2) Ozone Monitoring Instrument (OMI) พัฒนาขึ้นโดย NASA มีความละเอียดเชิงเวลา ได้แก่ รายวัน และรายเดือน ที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ 13×24 กิโลเมตร

3) Polarization & Anisotropy of Reflectances for Atmospheric Sciences coupled with Observations from a Lidar (PARASOL) พัฒนาขึ้นโดย NASA มีความละเอียดเชิงเวลาแบบรายเดือน และมีความละเอียดเชิงพื้นที่ 20×20 กิโลเมตร

4) MODerate resolution Imaging Spectrometer (MODIS) พัฒนาขึ้นโดย NASA ที่ความละเอียดเชิงเวลา 3 รูปแบบ คือ รายวัน ราย 8 วัน และรายเดือน ที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ 10×10 กิโลเมตร และความละเอียด 3×3 กิโลเมตร (สำหรับผลิตภัณฑ์ Collection 6)

5) Himawari พัฒนาขึ้นโดย Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) ที่ความละเอียดเชิงเวลา 10 นาทีและรายชั่วโมง ที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ 5×5 กิโลเมตร

ตาราง 3 ข้อมูล AOD จากดาวเทียมต่างๆ

ดาวเทียม	งานวิจัย	ความละเอียดเชิงเวลา	ความละเอียดเชิงพื้นที่
MISR	Marcin et al. (2018)	Monthly, 3 Month and Annual ^a	$17.6 \times 17.6 \text{ km}^a$
OMI	Buchard et al. (2015)	Daily and Monthly ^a	$13 \times 24 \text{ km}^a$
PARASOL	Tanre et al. (2011)	Monthly ^a	$20 \times 20 \text{ km}^a$

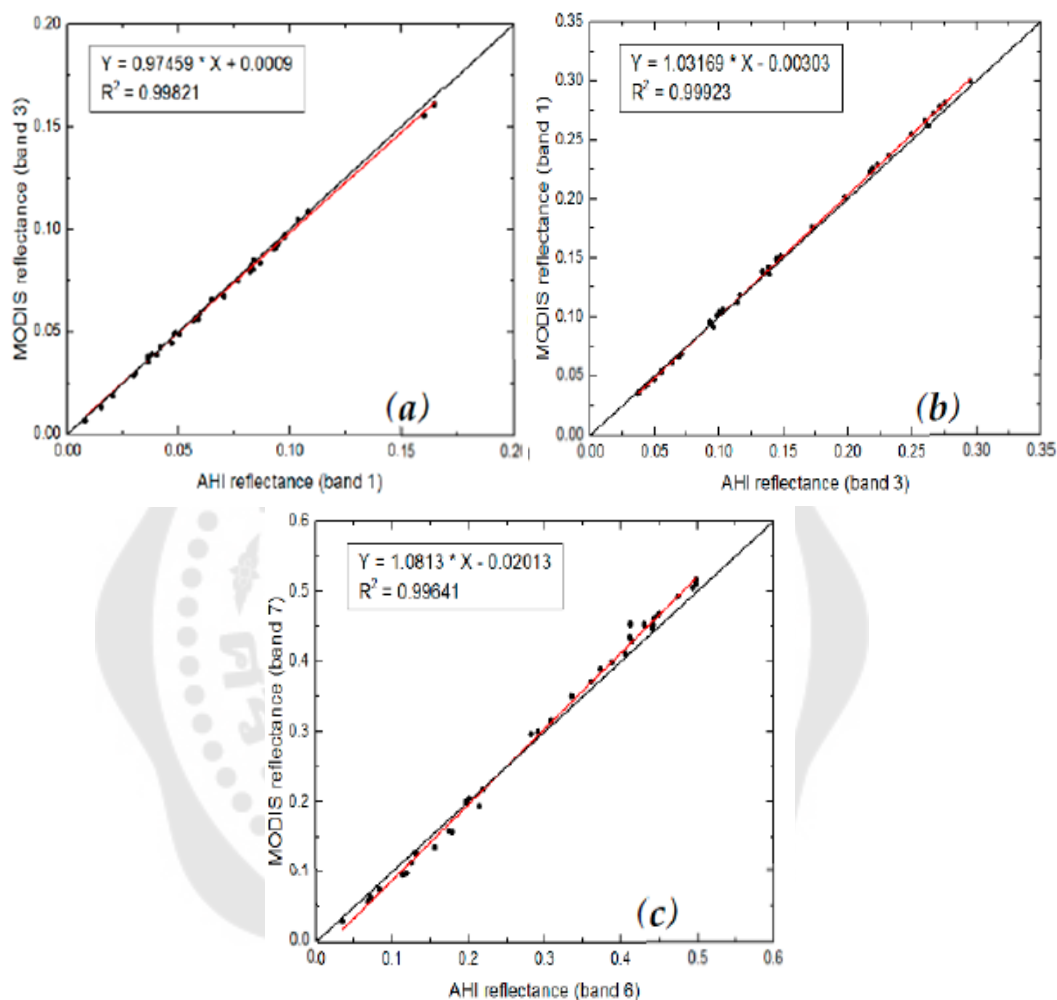
ตาราง 3 (ต่อ)

ดาวเทียม	งานวิจัย	ความละเอียดเชิงเวลา	ความละเอียดเชิงพื้นที่
MODIS	- อรประภา ภูมิเมกะกาญจน์ นะ โรแบร์ และ คีโอซี ฮอนดะ (2552)	Daily, 8 Daily and Monthly ^b	10 x 10 km and 3 x 3 km ^b
	- ฉัตร พยุงวิวัฒน์กุล และ ทรงกต ทศานนท์ (2555)	Daily, 8 Daily and Monthly ^b	10 x 10km and 3 x 3 km ^b
	- จุฬาลักษณ์ สมนวันดี และ และมัลลิกา สุกิจ ปาณีนิจ (2560)		
	- Guo et al. (2016)		
	- Fan et al. (2017)		
	- Wang et al. (2017)		
HIMAWARI	- Zang et al. (2018)	10 mins and Hourly ^c	5 x 5 km ^c
	- Yang et al. (2018)		

หมายเหตุ. ^a("MODIS Aerosol Product", n.d.), ^b("NASA", 2012) และ ^c("JAXA", 2015)

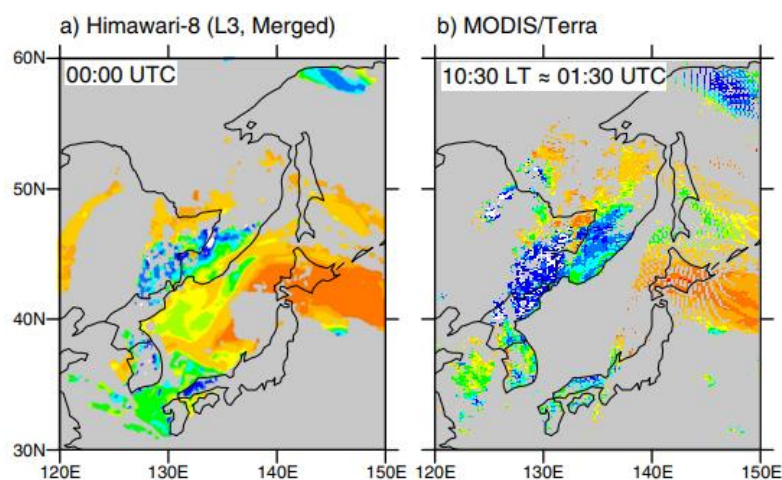
เนื่องจากการติดตามและตรวจวัดฝุ่นละอองจำเป็นต้องใช้ข้อมูลที่มีความละเอียดเชิงเวลาสูง เพราะการแพร่กระจายของฝุ่นละอองมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น สภาวะทางอุตุนิยมวิทยา และลักษณะภูมิประเทศ เป็นต้น จากข้อมูลในตารางข้างต้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูล AOD จากดาวเทียม Himawari มีความเหมาะสมมากที่สุด ที่สามารถให้ความละเอียดเชิงเวลาแบบรายชั่วโมงได้ โดย Yang et al. (2018) ได้ทำการเปรียบเทียบค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นสีน้ำเงิน (Blue) ช่วงคลื่นสีแดง (Red) และช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (Near-infrared) ระหว่าง MODIS และ Himawari ดังภาพประกอบ 14 จะพบว่า

ข้อมูลจากดาวเทียมทั้งสองมีความสัมพันธ์กัน และ Yumimoto et al. (2017) ได้เปรียบเทียบข้อมูล AOD ระหว่าง MODIS และ Himawari ในภาพประกอบ 15 แสดงให้เห็นถึงความใกล้เคียงกันของข้อมูล AOD จากดาวเทียมทั้งสอง ซึ่งสามารถใช้แทนกันได้



ภาพประกอบ 14 ความสัมพันธ์ของค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นสีน้ำเงิน (a), ช่วงคลื่นสีแดง (b) และ ช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (c) ระหว่างดาวเทียม Himawari และ MODIS

ที่มา: Yang et al. (2018)



ภาพประกอบ 15 เปรียบเทียบข้อมูล AOD จากดาวเทียม a) Himawari และ b) Terra MODIS

ที่มา: Yumimoto et al. (2018)

2.4.2.2 ดาวเทียม Himawari-8

ดาวเทียม Himawari-8 พัฒนาขึ้นโดย Meteorological Satellite Center (MSC) จากกรมอุตุนิยมวิทยาของประเทศญี่ปุ่น ถูกปล่อยขึ้นสู่อวกาศเมื่อปี ค.ศ. 2014 มีความละเอียดเชิงเวลาเป็นรายชั่วโมง ความละเอียดเชิงพื้นที่ 0.5×0.5 ถึง 2×2 กิโลเมตร ดังตาราง 4 และภาพประกอบ 16 แสดงให้เห็นการตอบสนองทางสเปกตรัมในช่วงคลื่น 0.455, 0.645, 1.61, และ 2.26 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นช่วงคลื่นที่ใช้ในการคำนวณค่า AOD

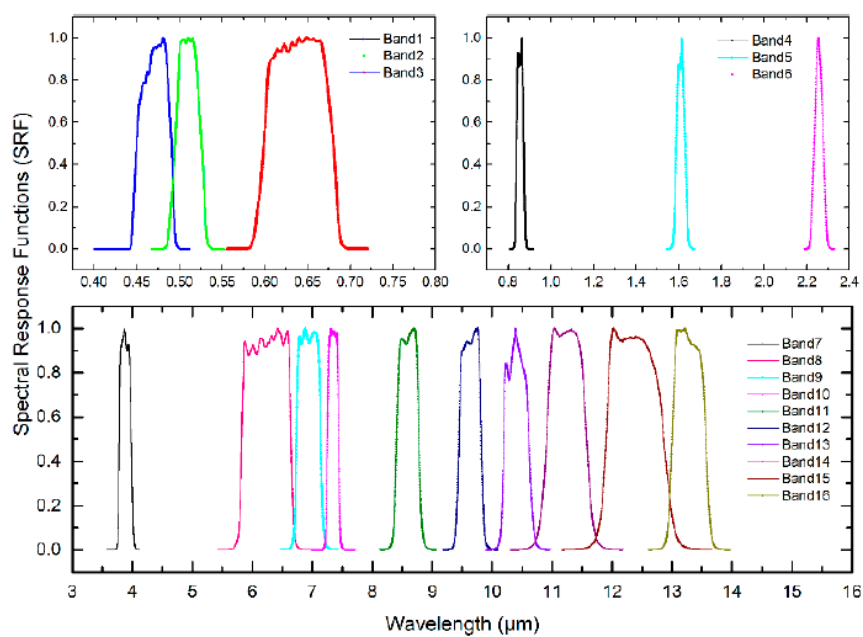
ตาราง 4 คุณสมบัติเชิงคลื่นของดาวเทียม Himawari-8

Band	Central wavelength (μm)	Resolution (km)
1	0.45	1.0
2	0.51	1.0
3	0.64	0.5
4	0.86	1.0
5	1.61	2.0
6	2.26	2.0

ตาราง 4 (ต่อ)

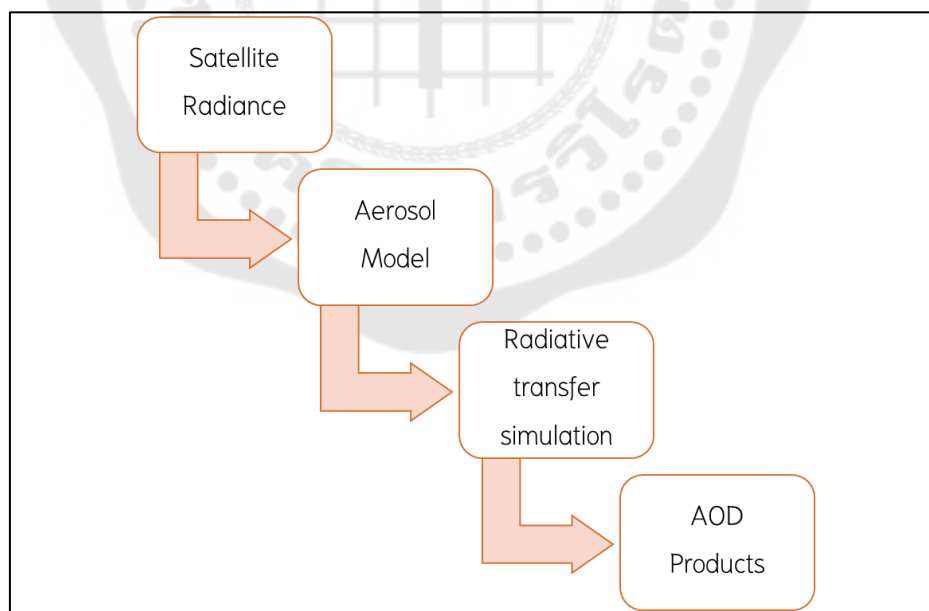
Band	Central wavelength (μm)	Resolution (km)
7	3.85	2.0
8	6.25	2.0
9	6.95	2.0
10	7.35	2.0
11	8.60	2.0
12	9.63	2.0
13	10.45	2.0
14	11.20	2.0
15	12.35	2.0
16	13.30	2.0

ที่มา: Japan Aerospace Exploration Agency. (2015)



ภาพประกอบ 16 การตอบสนองทางสเปกตรัมของ Himawari-8

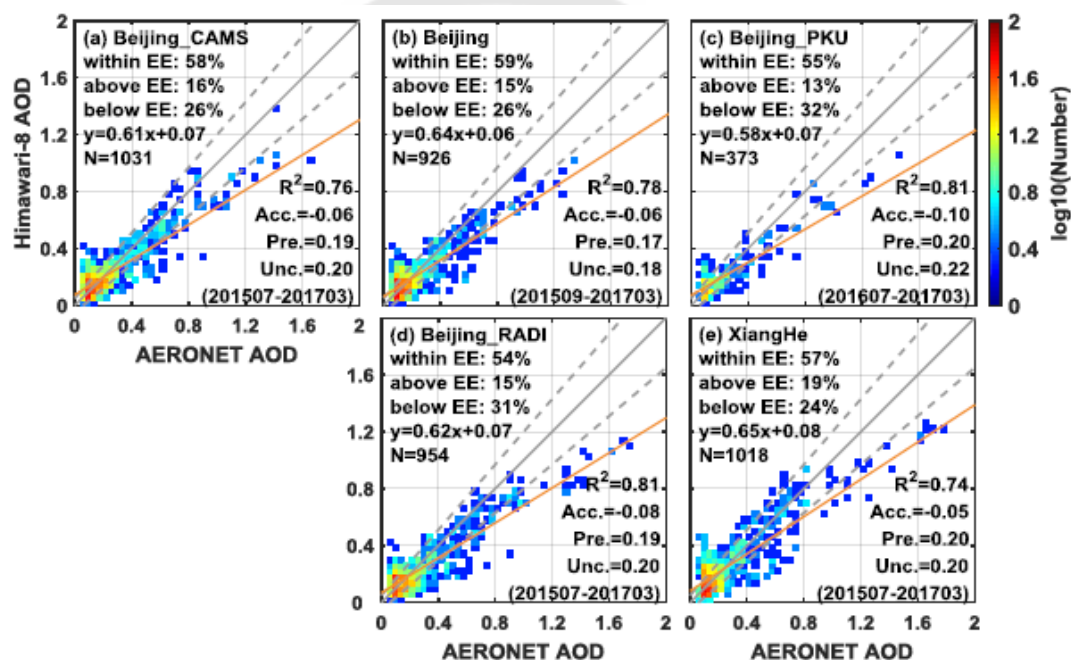
ที่มา: Zhang et al. (2018)



ภาพประกอบ 17 กระบวนการสร้างข้อมูล AOD จากดาวเทียม Himawari-8

ที่มา: ดัดแปลงจาก Kikuchi et al. (2018)

Kikuchi et al. (2018) ได้อธิบายถึงการคำนวณและสร้างข้อมูล AOD จากดาวเทียม Himawari-8 ว่ามีกระบวนการไม่แตกต่างจากดาวเทียมดวงอื่นๆ โดยการนำค่าการแผ่รังสีในช่วงคลื่นตามองเห็นถึงอินฟราเรด สำหรับดาวเทียม Himawari-8 จะใช้แบนด์ 1 ถึงแบนด์ 4 เข้าโมเดลฝุ่นละออง (Aerosol Model) และวิเคราะห์ด้วยกระบวนการ Radiative Transfer Simulation (ดังภาพประกอบ 17) ซึ่ง Wang et al. (2017) ได้ประมาณความเข้มข้นของ PM_{2.5} รายชั่วโมง โดยใช้ข้อมูล AOD จาก Himawari-8 ในพื้นที่กรุงปักกิ่ง-เทียนจิน-เหอเป่ย์ ประเทศจีน ซึ่งผลการศึกษาพบว่าข้อมูล AOD จากดาวเทียม Himawari-8 มีระดับความเชื่อมั่น "ดีมาก" โดยการประเมินจากการเปรียบเทียบค่ากับ AERONET ดังภาพประกอบ 18



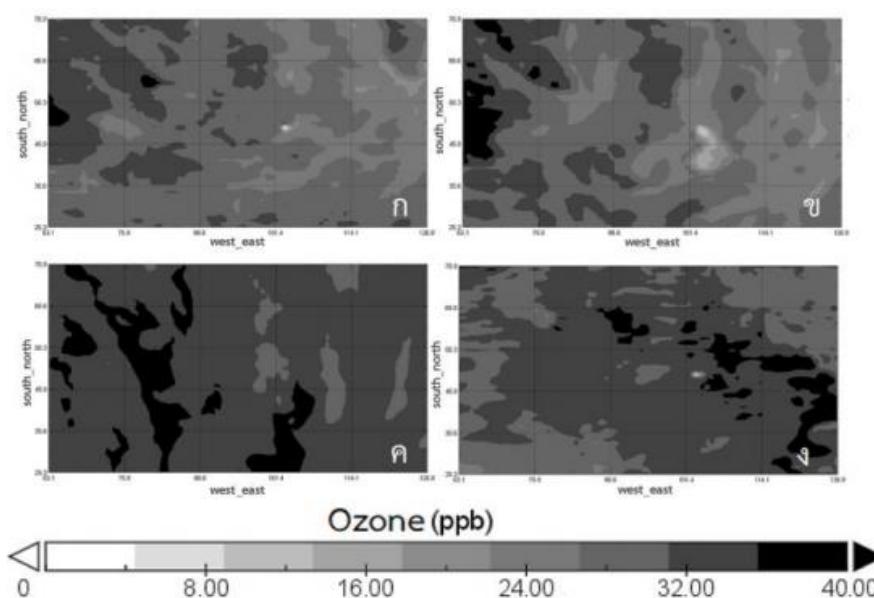
ภาพประกอบ 18 ความสัมพันธ์ของค่า AOD ระหว่างดาวเทียม Himawari-8 และ AERONET

ที่มา: Wang et al. (2017)

2.4.3 แบบจำลองควบคุมอุตุนิยมวิทยา-เคมี (Weather Research and Forecasting (WRF) model coupled with Chemistry: WRF-Chem)

แบบจำลอง WRF-Chem ถูกพัฒนาจากแบบจำลองทางอุตุนิยมวิทยา WRF และถูกออกแบบให้สามารถคำนวณความเข้มข้นและการแพร่กระจายของสารมลพิษ เช่น ก๊าซ และฝุ่นละออง เป็นต้น การประมวลผลแบบจำลองจำเป็นต้องมีการนำเข้าข้อมูล ได้แก่ ข้อมูลพยากรณ์

สภาพอากาศระดับโลก ข้อมูลกายภาพ และข้อมูลแหล่งกำเนิดสารมลพิษ โดยผลลัพธ์ที่ได้จะทำให้สามารถศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะทางอุตุนิยมและแหล่งกำเนิดของสารมลพิษได้ ดังภาพประกอบ 19



ภาพประกอบ 19 ตัวอย่างผลลัพธ์การแพร่กระจายตัวของก๊าซโอโซนบริเวณจังหวัดลำปางที่ได้จากแบบจำลอง WRF-Chem

ที่มา: ณัฐภัทร อธิปัญญาพันธุ์ และนริศรา ทองบุญชู. (2561)

2.5 เทคนิคที่ใช้ในการประมาณค่าความเข้มข้นของฝุ่นละอองในอากาศ

สำหรับประเทศไทย จุฬาลักษณ์ สมวันดี และมัลลิกา สุกิจปาณีนิจ (2560) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการประเมินความสัมพันธ์ปริมาณฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตร (Particulate Matter 10 [PM10]) ที่ได้จากการติดตามตรวจวัดภาคพื้นดินและข้อมูลดาวเทียม Terra MODIS ในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น PM10 กับค่าความหนาเชิงแสงของอนุภาคแขวนลอยในบรรยากาศ (Aerosol Optical Thickness [AOT]) โดยทำการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ของข้อมูลความเข้มข้น PM10 จาก 9 สถานีตรวจวัดภาคพื้นดินของกรมควบคุมมลพิษ และข้อมูล AOT จากดาวเทียม Terra MODIS ระหว่างช่วงเดือนธันวาคม – เมษายน ปี พ.ศ. 2554 - 2559 ผลการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น PM10 กับ ค่า AOT ในบรรยากาศสอดคล้องกัน โดยจังหวัดแม่ฮ่องสอนมีค่าสัมประสิทธิ์

สหสัมพันธ์รายปีมากที่สุด (r^2 เท่ากับ 0.56) และจากการวิเคราะห์ข้อมูลแบบหลายตัวแปร (Multivariate Analysis) ระหว่างความเข้มข้น PM10 AOT และตัวแปรต่างๆ ทางด้านอุตุนิยมวิทยา ด้วยเทคนิคการสกัดปัจจัยแบบการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis) พบว่า อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ และปริมาณเมฆ มีผลต่อความเข้มข้น PM10 และ AOT

วินัส ต่วนเครือ และนิพนธ์ ตั้งธรรม (2558) ได้ศึกษาผลกระทบของฝุ่นละอองในบรรยากาศที่เกิดจากไฟฟ้า และการเผาชีวมวลต่อลักษณะฝนบริเวณภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Terra/Aqua MODIS และข้อมูลจาก AERONET ในปี พ.ศ. 2546 - 2555 ผลการศึกษาพบว่าค่า AOT มีค่าสูงสุดในฤดูก่อนมรสุมโดยเฉพาะอย่างยิ่งเดือนมีนาคมบริเวณจังหวัดเชียงราย พะเยา และแพร่ (เฉลี่ยประมาณ 0.5) ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลจุดความร้อนจากการเผาชีวมวล และลดลงในเดือนมิถุนายนถึงกรกฎาคม นอกจากนี้ยังพบว่าในช่วงฤดูฝนจะพบอนุภาคฝุ่นละอองขนาดใหญ่เป็นส่วนใหญ่ แต่ในช่วงฤดูก่อนมรสุมกับพบฝุ่นละอองอนุภาคขนาดเล็กเกือบทั้งหมด ซึ่งมาจากเขม่าควันไฟที่เกิดจากการเผาชีวมวลในช่วงนั้น

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยต่างประเทศ โดย Wang et al. (2017) ได้อธิบายว่าความถี่หรือรอบวงโคจรผ่านของดาวเทียมเป็นข้อจำกัด ซึ่งยากต่อการทำความเข้าใจรูปแบบการเกิดของ PM2.5 ได้ จึงได้ทำการศึกษาความเข้มข้น PM2.5 รายชั่วโมงจากข้อมูล AOD ของดาวเทียม Himawari-8 ในกรุงปักกิ่ง-เทียนจิน-เหอเป่ย์ (Beijing-Tianjin-Hebei) ประเทศจีน ซึ่งเป็นพื้นที่ที่เกิดมลพิษทางอากาศมากที่สุดแห่งหนึ่งในประเทศจีน โดยทำการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้จาก Aerosol Robotic Network (AERONET) และพัฒนาแบบจำลองด้วยวิธี Linear Mixed - Effect Model (LME) ผลลัพธ์พบว่ามีความสัมพันธ์กันสูง r^2 เท่ากับ 0.86 และค่า RMSE น้อยกว่า 24.5 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

และ Zang et al. (2018) ได้นำเทคโนโลยีการรับรู้จากระยะไกลขั้นสูงมาประยุกต์ใช้เพื่อตรวจจับการกระจายตัวของความเข้มข้น PM1 โดยในการศึกษาได้มีการพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายประสาทการถดถอยแบบพหุคูณ (Principal Component Analysis - General Regression Neural Network (PCA - GRNN) และเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับวิธีอื่นๆ ได้แก่ Multiple Linear Regression (MLR), Linear Mixed Effects (LME), Back-Propagation Neural Network (BPNN) และ General Regression Neural Network (GRNN) ผลการทดสอบพบว่าวิธี

PCA - GRNN มีประสิทธิภาพสูงสุด และยังพบว่าค่าความเข้มข้นของ PM1 ที่คำนวณได้มีความสอดคล้องกับค่าที่วัดจริง r^2 เท่ากับ 0.65 RMSE เท่ากับ $22.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ และ MAE เท่ากับ $13.8 \text{ mg}/\text{m}^3$ โดยจากการตรวจสอบพบว่าพื้นที่ที่มีค่าความเข้มข้น PM1 สูง เป็นพื้นที่อุตสาหกรรมเมือง

ตาราง 5 วิธีการที่ใช้ในการประมาณค่าความเข้มข้นของฝุ่นละออง

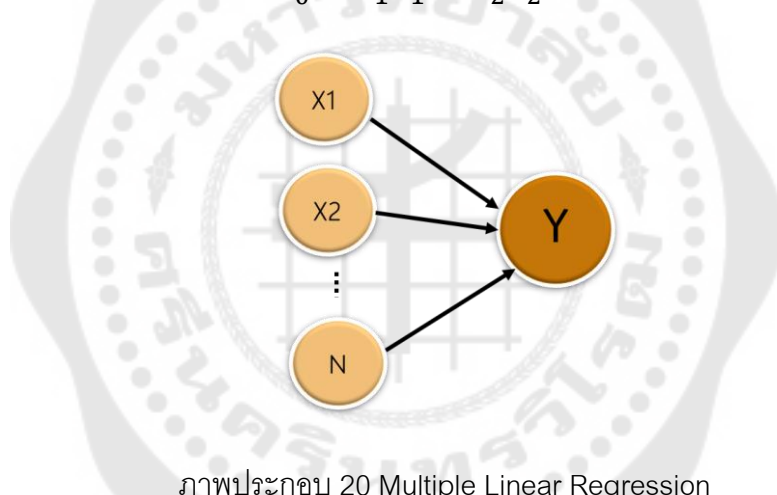
ลำดับ	งานวิจัย	พื้นที่	วิธีการ
1	จุฬาลักษณ์ สมวันดี และ มัลลิกา สุกิจปาณินิจ (2560)	ภาคเหนือตอนบน ประเทศไทย	Principal Component Analysis (PCA)
2	วินัส ต่วนเครือ และ นิพนธ์ ตั้งธรรม (2558)	ภาคเหนือตอนบน ประเทศไทย	Multiple Regression Analysis
3	Wang et al. (2017)	Beijing–Tianjin– Hebei in China	Linear Mixed Effects (LME)
4	Zang et al. (2018)	China	- Multiple Linear Regression (MLR) - Linear Mixed Effects (LME) - Back-Propagation Neural Network (BPNN) - General Regression Neural Network (GRNN) - Principal Component Analysis-General Regression Neural Network (PCA - GRNN)

จากการศึกษาวิจัยทั้งหมดในตาราง 5 สามารถสรุปได้ว่าวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ Principal Component Analysis - General Regression Neural Network (PCA - GRNN) สำหรับในการศึกษานี้ผู้วิจัยเลือกวิธี MLR ซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมนำมาใช้ศึกษา และวิธี PCA - GRNN เป็นวิธีการหลักสำหรับศึกษาวิธีการประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของทั้งสองวิธี โดยมีรายละเอียดของวิธีดังหัวข้อต่อไปนี้

2.6 Multiple Linear Regression (MLR)

เป็นการวิเคราะห์ถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์แบบเส้นตรงระหว่างตัวแปรตาม (Y) กับตัวแปรต้น $X_1, X_2, \dots$ ดังภาพประกอบ 20 และสมการต่อไปนี้ (นงลักษณ์ วิรัชชัย, 2553)

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + n$$



ภาพประกอบ 20 Multiple Linear Regression

2.7 Principal Component Analysis - General Regression Neural Network (PCA - GRNN)

การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis: PCA) จะใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์หลายเทคนิค ที่สามารถนำมาจัดการกับข้อมูลผสมหลายชนิด เพื่อวิเคราะห์รูปแบบของข้อมูล อีกทั้งยังช่วยลดความซับซ้อนและมิติของข้อมูล ผลการวิเคราะห์ทำให้ได้มิติของข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กัน โดยปัจจุบัน PCA มีการนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับ GRNN เพื่อลดจำนวนมิติของข้อมูลนำเข้า และทำให้ GRNN สามารถวิเคราะห์ผลลัพธ์ได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากขึ้น สามารถอธิบายถึง PCA ได้ด้วยสมการต่อไปนี้ (เลิศพันธุ์ เพียรสร้างสรร, 2557)

$$Y = WX$$

โดยที่ Y คือ Matrix ของ component ขนาด $p \times 1$

W คือ Matrix ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร X ขนาด $p \times p$

X คือ Matrix ของตัวแปรตั้งต้น ขนาด $p \times 1$

General Regression Neural Network (GRNN) เป็นโครงข่ายประสาทเทียมประเภทหนึ่งที่มีการประมาณค่าตัวแปรแบบต่อเนื่องทั้งแบบเชิงเส้น (Linear) และไม่ใช่เชิงเส้น (Nonlinear) และใช้ฟังก์ชันความน่าจะเป็นที่มีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ดังสมการต่อไปนี้ (Al-Mahasneh, Anavatti, Garratt, & Pratama, 2018)

$$Y(X) = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i e^{\left(\frac{-D_i^2}{2\sigma^2}\right)}}{\sum_{i=1}^n e^{\left(\frac{-D_i^2}{2\sigma^2}\right)}}$$

โดยที่ $Y(X)$ คือ ผลลัพธ์ที่ได้

Y_i คือ ผลลัพธ์ของตัวอย่าง i

w_0 คือ ค่าถ่วงน้ำหนักผลลัพธ์

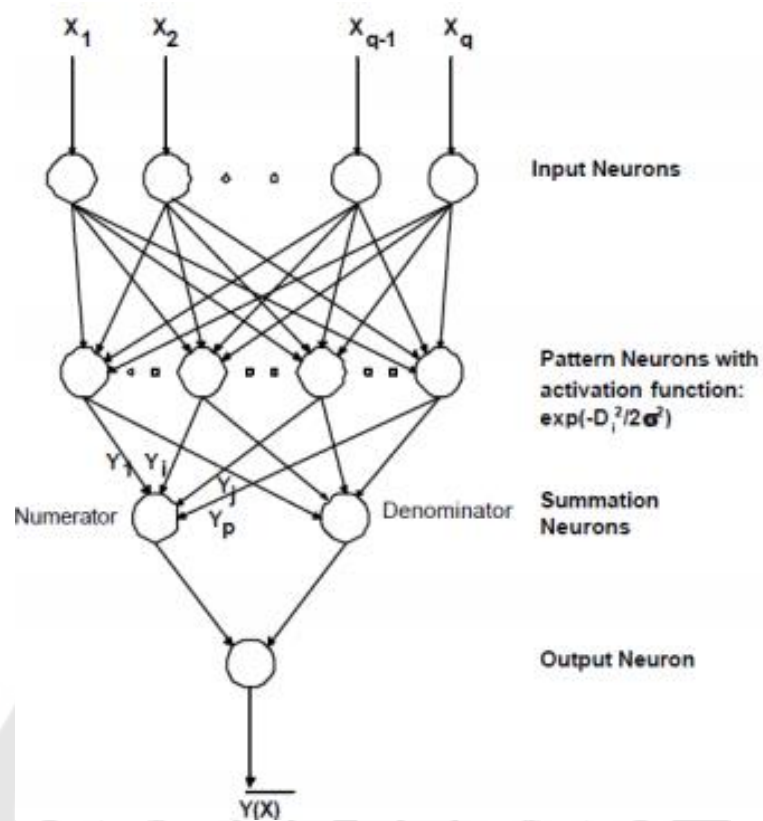
$-D_i^2$ คือ ระยะห่างระหว่าง Training data กับข้อมูลนำเข้า โดยสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$-D_i^2 = (x - x_i)^T (x - x_i)$$

W คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของตัวอย่าง i สามารถคำนวณได้ด้วยสมการดังนี้

$$W = e^{\left(\frac{-D_i^2}{2\sigma^2}\right)}$$

σ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เป็นตัวแปรอิสระที่ต้องกำหนด โดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เหมาะสมสามารถตรวจสอบได้จากผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องมากที่สุด



ภาพประกอบ 21 โครงสร้างของ GRNN

ที่มา: Al-Mahasneh, Anavatti, Garratt, & Pratama (2018)

บทที่ 3

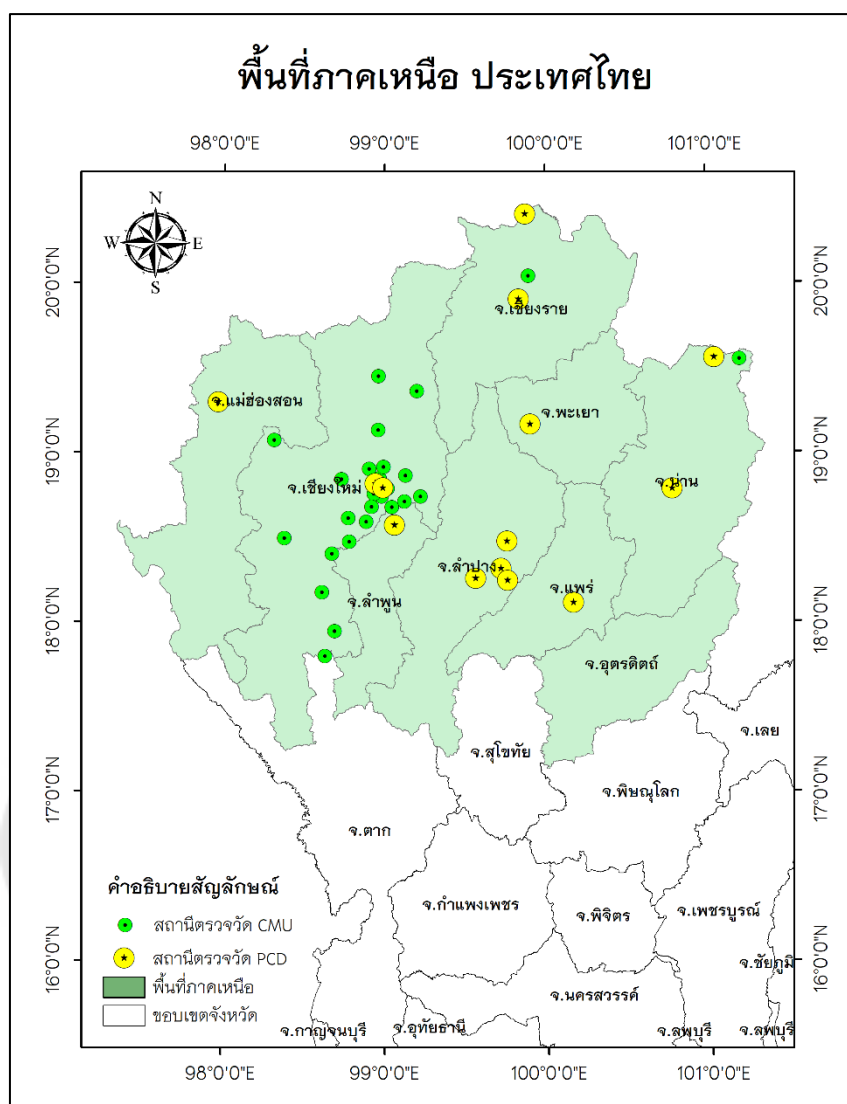
วิธีการศึกษา

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยมุ่งจะศึกษาการประมาณค่าฝุ่นละอองขนาดเล็กจากดาวเทียม Himawari-8 และสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินบริเวณภาคเหนือของประเทศไทย โดยมีวิธีการดำเนินการวิจัย ประกอบด้วยหัวข้อต่อไปนี้

1. พื้นที่ศึกษา
2. ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา
3. เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา
4. ขั้นตอนในการศึกษา

3.1 พื้นที่ศึกษา

การศึกษาในครั้งนี้ได้เลือกศึกษาในพื้นที่ภาคเหนือ ประเทศไทย (ภาพประกอบ 22) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 22 พื้นที่ศึกษา

3.1.1 ภูมิประเทศ

ภาคเหนือมีลักษณะภูมิประเทศเป็นทิวเขายาวจากเหนือลงมาได้ ทิวเขาที่สำคัญ ได้แก่ ทิวเขาถนนธงชัย ทิวเขาแดนลาวกั้นเขตแดนไทยกับพม่า ทิวเขาขุนตาล ทิวเขาผีปันน้ำ ตะวันตก ทิวเขาผีปันน้ำตะวันออก ทิวเขาหลวงพระบาง ซึ่งทิวเขาเหล่านี้ประกอบไปด้วยภูเขาใหญ่น้อย เช่น ดอยอินทนนท์ ดอยขุนตาล ภูชี้ฟ้า และภูผาตั้ง เป็นต้น โดยพื้นที่บนดอยบางส่วนเป็นที่อยู่อาศัยของชาวเขาเผ่าต่างๆ ได้แก่ อีเก้อ ลีซอ ม้ง มูเซอ เย้า และกะเหรี่ยง ส่วนในพื้นที่ราบบริเวณหุบเขาและแถบลุ่มแม่น้ำปิง วัง ยม น่าน และลุ่มน้ำอื่นๆ เป็นพื้นที่ที่มีความอุดมสมบูรณ์เหมาะแก่การทำการเกษตร เช่น การเพาะปลูกข้าว ปลูกพืชไร่ และไม้ผล เป็นต้น

3.1.2 ภูมิอากาศ

ภาคเหนือมีลักษณะภูมิอากาศจัดอยู่ในเขตร้อน มี 3 ฤดู คือ 1) ฤดูฝน (พ.ค.- ต.ค.) 2) ฤดูแล้ง (ต.ค. - ก.พ.) และ 3) ฤดูร้อน (ก.พ. - พ.ค.) โดยปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยของภาคเหนือประมาณ 1,200 มิลลิเมตร/ปี และอุณหภูมิเฉลี่ยของภาคเหนือประมาณ 25 องศาเซลเซียส ซึ่งปัจจัยควบคุมอุณหภูมิในภาคเหนือ มีดังนี้

- ตั้งอยู่ในละติจูดสูง
- ความสูงของพื้นที่ ส่วนใหญ่จะมีเทือกเขาสูง มีอากาศหนาวเย็นมาก โดยเฉพาะในฤดูหนาว
- ระยะไกลจากทะเล ตั้งอยู่ไกลจากทะเล ทำให้ร้อนอบอ้าวและมีฝนตกน้อยในฤดูร้อน
- ทิศทางลมประจำ ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และดีเปรสชันจากทะเลจีนใต้ ทำให้ฝนตกมาก และรับอิทธิพลลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือจากประเทศจีนทำให้มีอากาศหนาวเย็น

3.1.3 อาณาเขตติดต่อ

- ทิศเหนือ: มีอาณาเขตติดต่อกับประเทศพม่าและประเทศลาว มีเทือกเขาแดนลาว แม่น้ำสาย และแม่น้ำรวกกันเขตแดน
- ทิศตะวันออก: มีอาณาเขตติดต่อกับประเทศลาว มีเทือกเขาหลวงพระบางกันเขตแดน
- ทิศตะวันตก: มีอาณาเขตติดต่อกับประเทศพม่า มีแม่น้ำเมย และแม่น้ำสาละวินกันเขตแดน
- ทิศใต้: มีอาณาเขตติดต่อกับภาคกลาง

3.2 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

รายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีดังตาราง 6

ตาราง 6 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

ลำดับ	ชุดข้อมูล	ตัวแปร	แหล่งข้อมูล	หน่วย	ความละเอียดเชิงเวลา	ความละเอียดเชิงพื้นที่
1	ข้อมูลดาวเทียม (Satellite data)	ความลึกเชิงแสง ของฝุ่นละออง (Aerosol Optical Depth: AOD)	Himawari -8	ไม่มีหน่วย	ราย ชั่วโมง	5 x 5 กิโลเมตร
		ดัชนีพืชพรรณ Normalized Difference Vegetation Index: NDVI	MODIS	ไม่มีหน่วย	รายวัน	500 x 500 เมตร
		จุดความร้อน (Hotspot)	MODIS	องศาเคล- วิน	รายวัน	1 x 1 กิโลเมตร
		แบบจำลองระดับ ความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model: DEM)	ASTER	เมตร	-	30 x 30 เมตร
2	ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา (Meteorological data)	อุณหภูมิอากาศ (Air Temperature)	ECMWF	องศา เซลเซียส	ราย 6 ชั่วโมง	0.125° x 0.125°
		ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity)	ECMWF	เปอร์เซ็นต์	ราย 6 ชั่วโมง	0.125° x 0.125°
		ความเร็วลม (Wind Speed)	ECMWF	เมตรต่อ วินาที	ราย 6 ชั่วโมง	0.125° x 0.125°

ตาราง 6 (ต่อ)

ลำดับ	ชุดข้อมูล	ตัวแปร	แหล่งข้อมูล	หน่วย	ความละเอียด เชิงเวลา	ความละเอียด เชิงพื้นที่
		ความกดอากาศ (Surface Pressure)	ECMWF	ปาสกาล	ราย 6 ชั่วโมง	0.125° x 0.125°
3	ข้อมูลการตรวจวัด ความเข้มข้น PM2.5 (Ground-based PM2.5)	ฝุ่นละอองขนาด เล็กกว่า 2.5 ไมโครเมตร (PM2.5)	กรมควบคุม มลพิษ และ มหาวิทยาลัย เชียงใหม่	ไมโครกรัม ต่อ ลูกบาศก์ เมตร	ราย ชั่วโมง	-

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

เครื่องมือที่ใช้ มีดังนี้

- Microsoft Office 2013 ใช้สำหรับจัดเตรียมข้อมูลและทำรายงาน
- RStudio Version 1.1.383 ใช้สำหรับวิเคราะห์ด้วยวิธี MLR และ PCA-GRNN
- PostgreSQL Version 10 ใช้สำหรับจัดทำฐานข้อมูลเชิงพื้นที่
- ArcGIS Pro Version 2 ใช้สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่และสร้างแผนที่

3.4 ขั้นตอนในการศึกษา

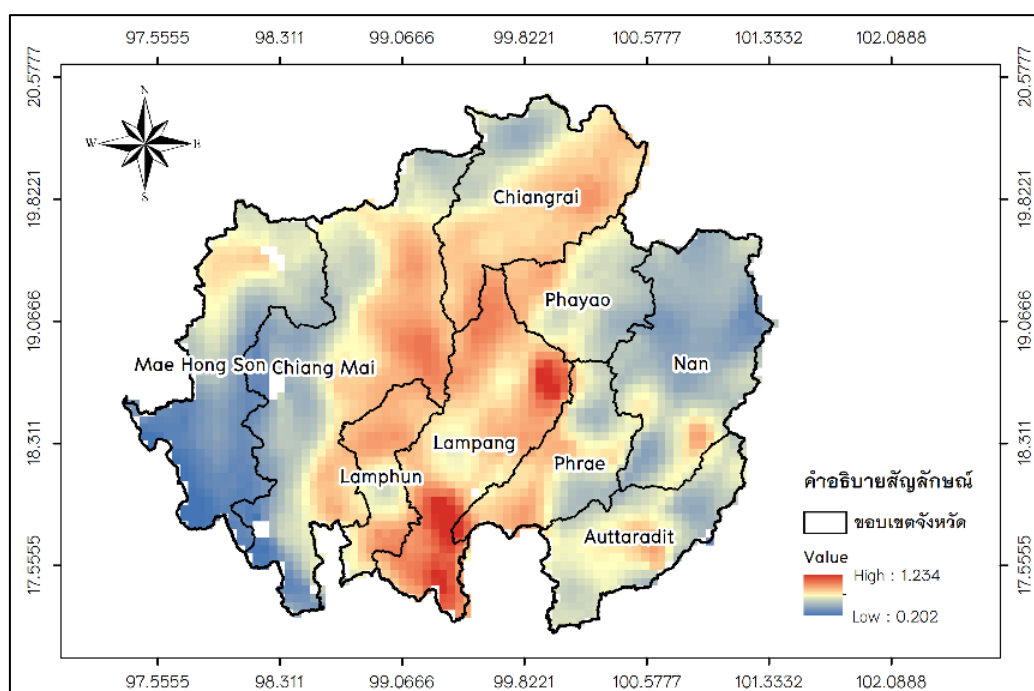
การศึกษาวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนการศึกษาออกเป็น 5 ขั้นตอน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

3.4.1 การรวบรวมข้อมูล (Data collection)

ทำการรวบรวมข้อมูลจากแหล่งต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมด ดังนี้

1) ข้อมูล AOD

ทำการดาวน์โหลดข้อมูล AOD รายชั่วโมง ในรูปแบบไฟล์ netCDF (.nc) ที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ 5 x 5 กิโลเมตร ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ระดับ 3 ของดาวเทียม Himawari-8 จาก JAXA ผ่าน <ftp://ftp.ptree.jaxa.jp/pub/himawari/L3/ARP/> ในช่วงปี พ.ศ. 2561 โดยหลังจากดาวน์โหลดข้อมูลเสร็จสิ้นทำการแปลงข้อมูลไฟล์ให้อยู่ในรูปแบบของไฟล์ GeoTIFF ดังตัวอย่างในภาพประกอบ 23



ภาพประกอบ 23 ตัวอย่างข้อมูล AOD ที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ 5 x 5 กิโลเมตร
ในวันที่ 6 เดือนมีนาคม พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.

2) ข้อมูล NDVI

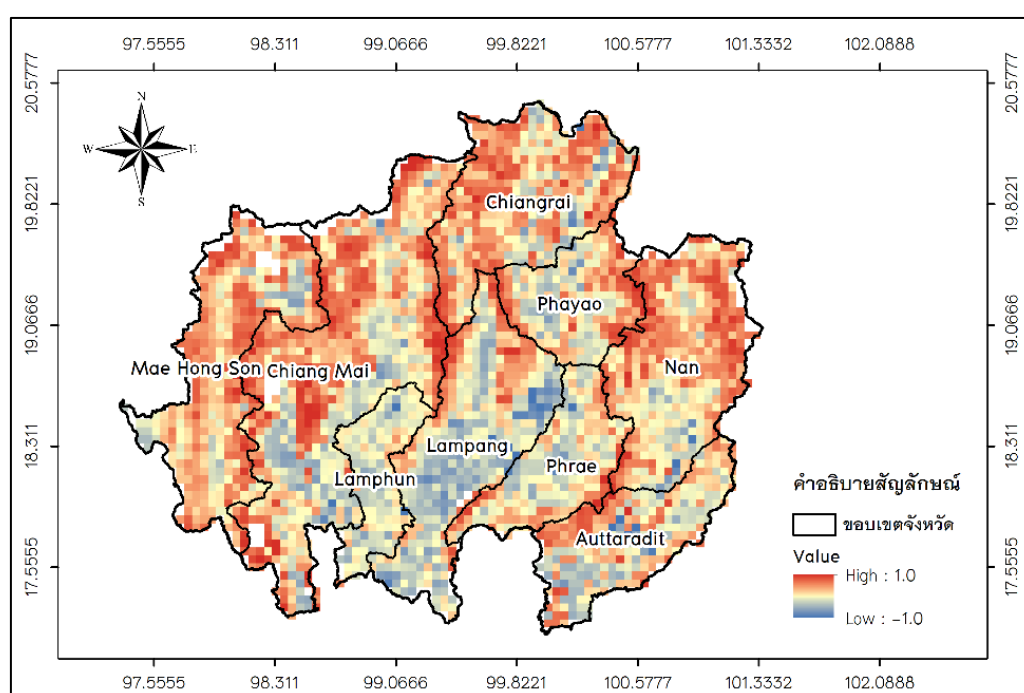
ทำการดาวน์โหลดข้อมูลการสะท้อนพื้นผิว (Surface Reflectance) หรือ MOD09GA รายวัน (.tif) ที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ 500 x 500 เมตร ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ระดับ 2 ของดาวเทียม Terra MODIS จาก NASA ผ่าน <https://modis.gsfc.nasa.gov/> ในช่วงปี พ.ศ. 2561

จากนั้นนำข้อมูลช่วงคลื่นสีแดงและช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ มาคำนวณดัชนีพืชพรรณ NDVI โดยใช้ Library MODISsp (R)¹ ดังสมการต่อไปนี้ (ตัวอย่างข้อมูล NDVI ในภาพประกอบ 24)

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

โดยที่ *NIR* คือ ช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้

RED คือ ช่วงคลื่นสีแดง

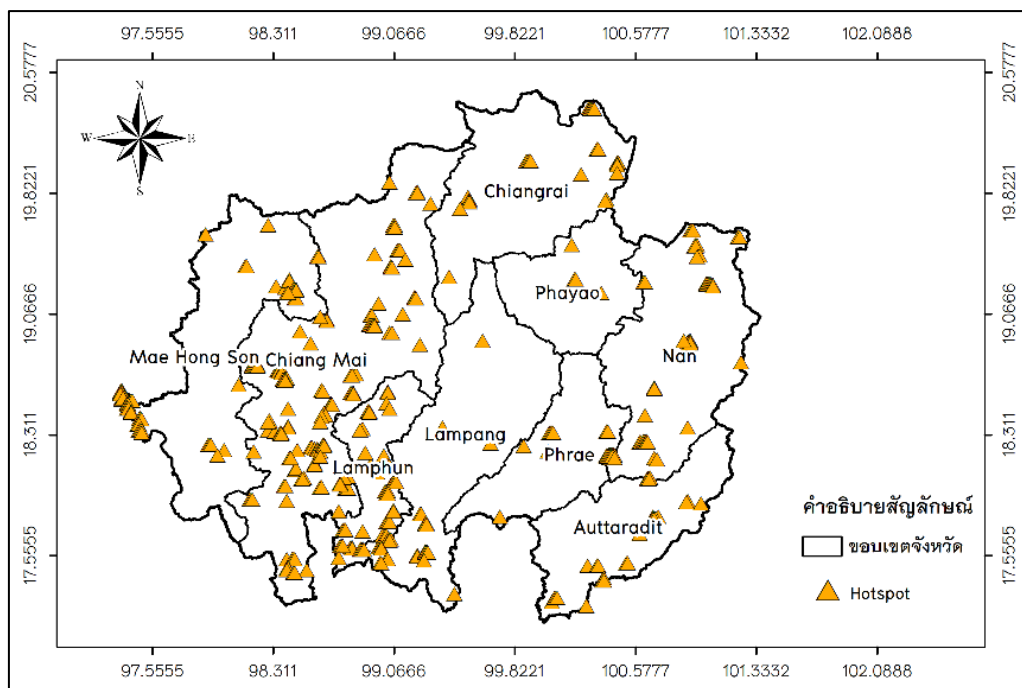


ภาพประกอบ 24 ตัวอย่างข้อมูล NDVI รายวัน ที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ 5 x 5 กิโลเมตร
วันที่ 6 เดือนมีนาคม พ.ศ. 2561

3) ข้อมูลจุดความร้อน (Hotspot)

ทำการดาวน์โหลดข้อมูล Hotspot รายวัน (.tif) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ระดับ 2 ของ ดาวเทียม Terra MODIS ที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ 1 x 1 กิโลเมตร จาก NASA ผ่าน <https://earthdata.nasa.gov/> ในช่วงปี พ.ศ. 2561 และแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบจุด (.shp) ดังตัวอย่างในภาพประกอบ 25

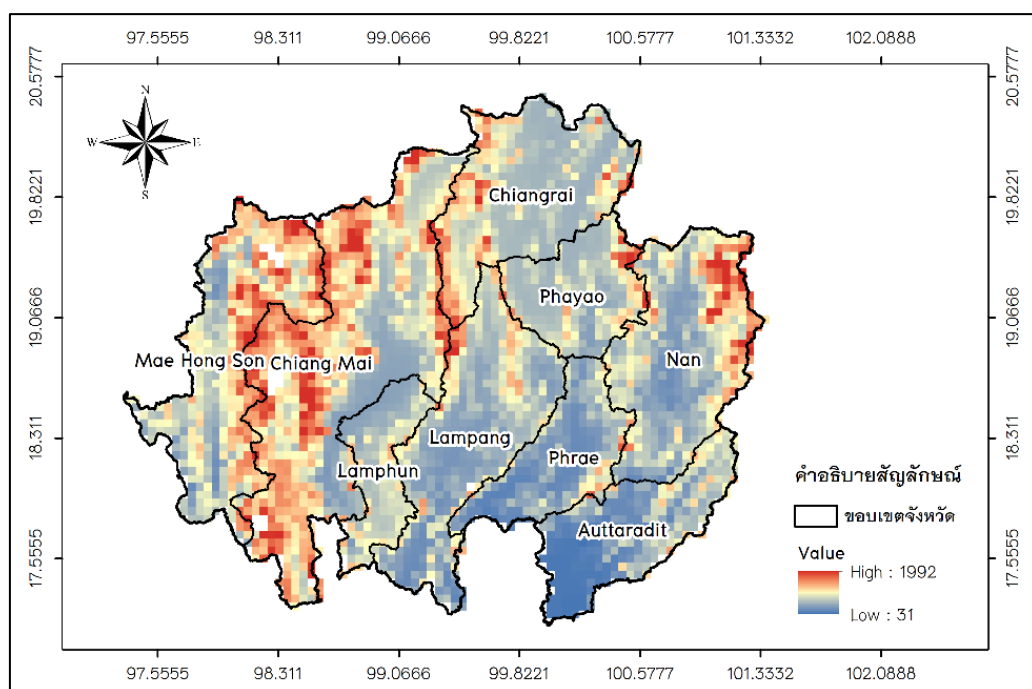
¹ เป็น library ที่พัฒนาขึ้นสำหรับสร้างผลิตภัณฑ์จาก MODIS ด้วยภาษา R



ภาพประกอบ 25 แผนที่การเกิด Hotspot บริเวณภาคเหนือ ในเดือนมีนาคม ปี พ.ศ. 2561

4) ข้อมูล DEM

ทำการดาวน์โหลดข้อมูล DEM (.tif) จากดาวเทียม Terra ASTER ที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ 30 x 30 เมตร จาก NASA ผ่าน <https://lpdaac.usgs.gov/> ดังแสดงตัวอย่างในภาพประกอบ 26 และดึงข้อมูลความสูง ณ ตำแหน่งสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน จากกรมควบคุมมลพิษ ดังตาราง 7



ภาพประกอบ 26 ข้อมูล DEM ที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ 5 x 5 กิโลเมตร บริเวณพื้นที่ภาคเหนือ

ตาราง 7 ระดับความสูงจากข้อมูล DEM ของสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน บริเวณภาคเหนือ

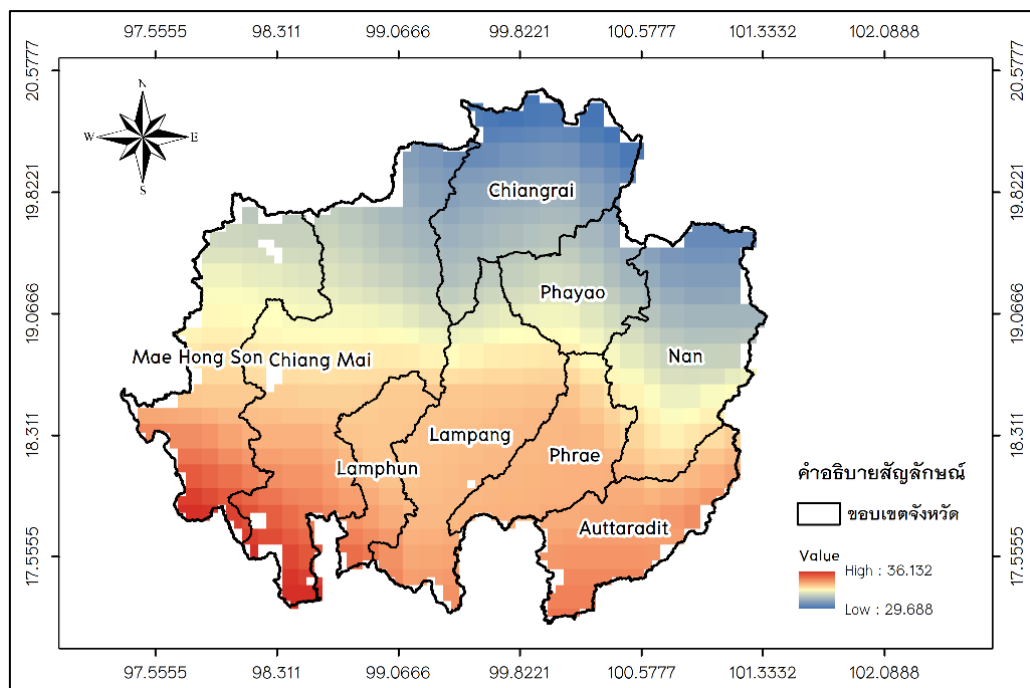
รหัส สถานี	ชื่อสถานี	จังหวัด	DEM (หน่วย: เมตร)
35t	ศูนย์ราชการจังหวัดเชียงใหม่	เชียงใหม่	371.11
36t	โรงเรียนยุพราชวิทยาลัย	เชียงใหม่	309.46
37t	สถานีอุตุนิยมวิทยาลำปาง	ลำปาง	248.71
38t	โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลบ้านสบป่าด	ลำปาง	366.90
39t	โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลท่าสี่	ลำปาง	406.41
40t	การประปาส่วนภูมิภาคแม่เกาะ	ลำปาง	384.66
57t	สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัด เชียงราย	เชียงราย	396.21
58t	สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัด แม่ฮ่องสอน	แม่ฮ่องสอน	328.27
67t	สำนักงานเทศบาลเมืองน่าน	น่าน	208.05

ตาราง 7 (ต่อ)

รหัส สถานี	ชื่อสถานี	จังหวัด	DEM (หน่วย: เมตร)
68t	สถานีอุตุนิยมวิทยาจังหวัดลำพูน	ลำพูน	294.36
69t	สถานีอุตุนิยมวิทยาจังหวัดแพร่	แพร่	161.19
70t	อุทยานการเรียนรู้ องค์การบริหารส่วนจังหวัดพะเยา	พะเยา	398.90
73t	สำนักงานสาธารณสุขแม่สาย	เชียงราย	447.81
75t	โรงพยาบาลเฉลิมพระเกียรติ	น่าน	1,044.81

5) ข้อมูลอุณหภูมิกอากาศ

ทำการดาวน์โหลดข้อมูลอุณหภูมิกอากาศ (.nc) ราย 6 ชั่วโมง ที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ ในช่วงปี พ.ศ. 2561 จาก European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ผ่าน <https://apps.ecmwf.int/datasets/> โดยเลือกโมเดล ERA-Interim ซึ่งเป็นโมเดลคาดการณ์และวิเคราะห์ข้อมูล หรือที่เรียกว่า "Reanalysis Datasets" ที่ใช้ข้อมูลสภาพอากาศจากสถานีตรวจวัดทั่วโลกมาสร้างเป็นข้อมูลเชิงพื้นที่ และหลังจากดาวน์โหลดข้อมูลเสร็จสิ้นจะทำการแปลงข้อมูลไฟล์ให้อยู่ในรูปแบบของไฟล์ GeoTIFF ดังภาพประกอบ



ภาพประกอบ 27 ข้อมูลอุณหภูมิอากาศ ที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ 5 x 5 กิโลเมตร
วันที่ 6 เดือนมีนาคม พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.

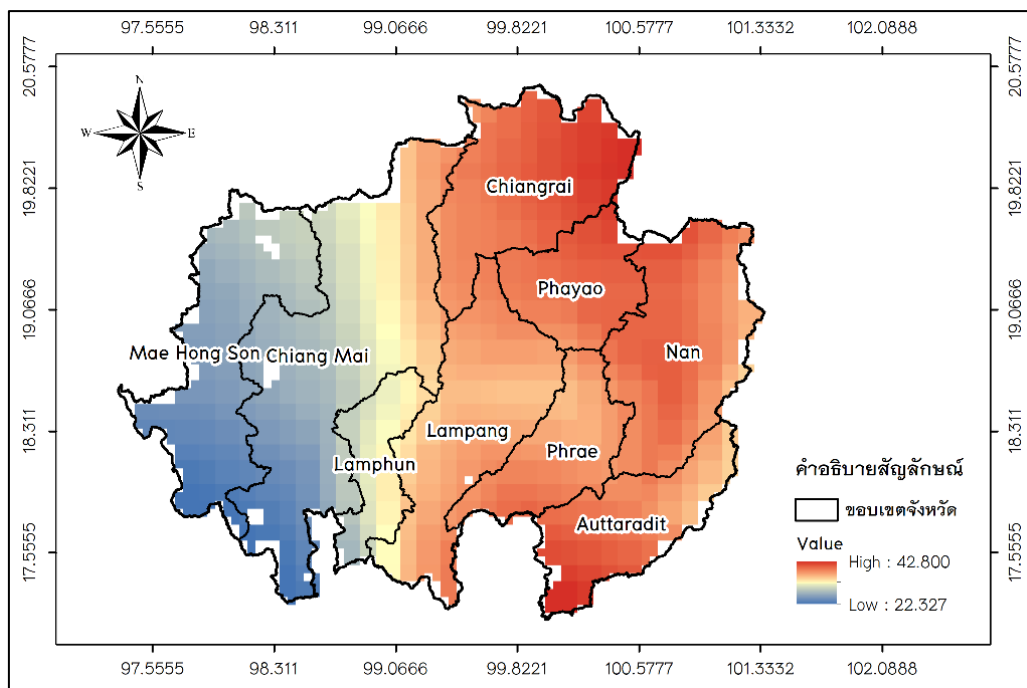
6) ข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์

ทำการดาวน์โหลดข้อมูลอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew Point Temperature) หน่วยใน องศาเซลเซียส (.nc) ราย 6 ชั่วโมง ที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ 0.125° x 0.125° ในช่วงปี พ.ศ. 2561 จาก ECMWF สำหรับนำมาคำนวณความชื้นสัมพัทธ์ โดยหลังจากดาวน์โหลดข้อมูลเสร็จสิ้นจะทำการแปลงข้อมูลไฟล์ให้อยู่ในรูปแบบของไฟล์ GeoTIFF และคำนวณด้วยสมการดังนี้ (Alduchov & Eskridge, 1996) ซึ่งมีผลลัพธ์ดังภาพประกอบ 28

$$\text{Relative Humidity} = 100 * \left(\frac{\text{EXP} \left(\frac{17.625 * \text{TD}}{243.04 + \text{TD}} \right)}{\text{EXP} \left(\frac{17.625 * \text{T}}{243.04 + \text{T}} \right)} \right)$$

โดยที่ TD คือ Dew Point Temperature

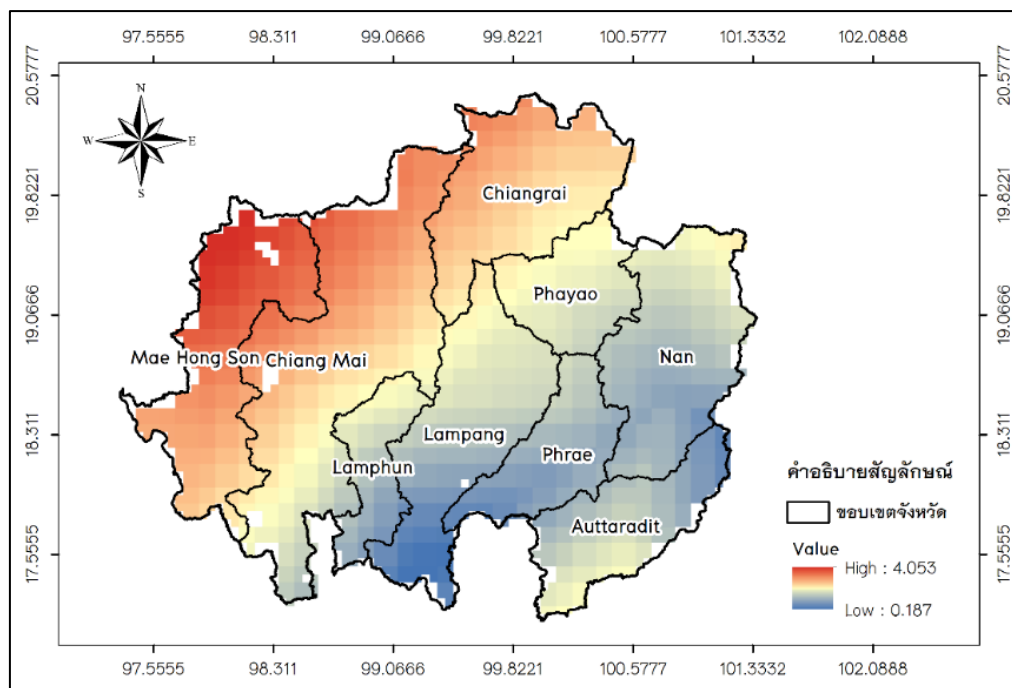
T คือ Air Temperature



ภาพประกอบ 28 ข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ ที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ 5 x 5 กิโลเมตร
วันที่ 6 เดือนมีนาคม พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.

7) ข้อมูลความเร็วลม

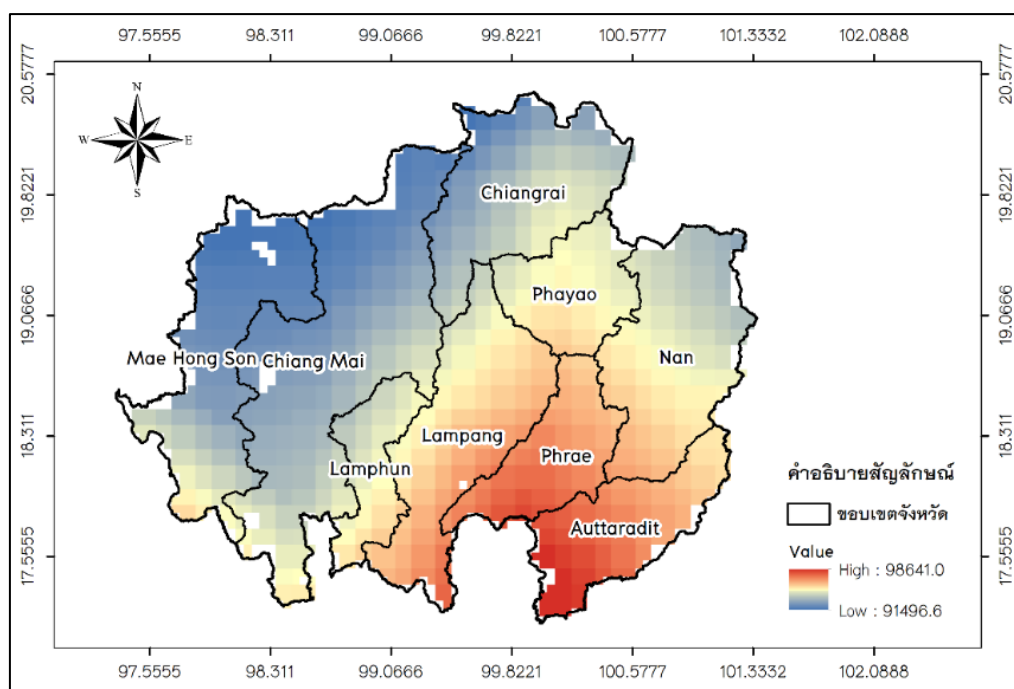
ทำการดาวน์โหลดข้อมูลความเร็วลม (.nc) ราย 6 ชั่วโมง ที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ ในช่วงปี พ.ศ. 2561 จาก ECMWF โดยหลังจากดาวน์โหลดข้อมูลเสร็จสิ้นจะทำการแปลงข้อมูลไฟล์ให้อยู่ในรูปแบบของไฟล์ GeoTIFF ดังภาพประกอบ 29



ภาพประกอบ 29 ข้อมูลความเร็วลม ที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ 5×5 กิโลเมตร
วันที่ 6 เดือนมีนาคม ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.

8) ความกดอากาศ

ทำการดาวน์โหลดข้อมูลความกดอากาศ (.nc) ราย 6 ชั่วโมง ที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ ในช่วงปี พ.ศ. 2561 จาก ECMWF โดยหลังจากดาวน์โหลดข้อมูลเสร็จสิ้นจะทำการแปลงข้อมูลไฟล์ให้อยู่ในรูปแบบของไฟล์ GeoTIFF ดังภาพประกอบ 30



ภาพประกอบ 30 ข้อมูลความกดอากาศ ที่ความละเอียดเชิงพื้นที่ 5 x 5 กิโลเมตร
วันที่ 6 เดือนมีนาคม พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.

9) ข้อมูลความเข้มข้น PM2.5

ทำหนังสือถึงกรมควบคุมมลพิษเพื่อขอข้อมูลความเข้มข้น PM2.5 รายชั่วโมง ที่ได้จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินของกรมควบคุมมลพิษ พื้นที่ภาคเหนือ จำนวน 14 สถานี (ตาราง 8) และดาวน์โหลดข้อมูลความเข้มข้น PM2.5 จาก Climate Change Data Center (CCDC) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ผ่าน <https://www.cmuccdc.org/opendata> จำนวน 26 สถานี ดังตาราง 9 ในช่วงปี พ.ศ. 2561

ตาราง 8 รายชื่อสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินบริเวณพื้นที่ภาคเหนือของกรมควบคุมมลพิษ

ชื่อสถาน	ละติจูด	ลองจิจูด
สำนักงานเทศบาลเมืองน่าน	18°47'19.96"N	100°46'34.89"E
โรงพยาบาลเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดน่าน	19°19'20.57"N	101°01'31.31"E
อุทยานการเรียนรู้ องค์การบริหารส่วนจังหวัดพะเยา	19°12'0.81"N	99°53'34.97"E
สถานีอุตุนิยมวิทยาลำปาง	18°16'41.70"N	99°30'23.21"E

ตาราง 8 (ต่อ)

ชื่อสถาน	ละติจูด	ลองจิจูด
โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลบ้านสบป่าด จังหวัดลำปาง	18°15'2.69"N	99°45'50.35"E
โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลท่าสี่ จังหวัดลำปาง	18°25'9.93"N	99°43'37.37"E
การประปาส่วนภูมิภาคแม่เมาะ จังหวัดลำปาง	18°16'57.59"N	99°39'35.54"E
สถานีอุตุนิยมวิทยาลำพูน	18°34'1.84"N	99°2'18.82"E
สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดเชียงราย	19°54'33.27"N	99°49'24.19"E
สำนักงานสาธารณสุขแม่สาย จังหวัดเชียงราย	20°25'38.04"N	99°53'1.41"E
ศูนย์ราชการจังหวัดเชียงใหม่	18°50'26.28"N	98°58'10.78"E
โรงเรียนยุพราชวิทยาลัย จังหวัดเชียงใหม่	18°47'27.31"N	98°59'17.18"E
สถานีอุตุนิยมวิทยาจังหวัดแพร่	18°7'44.14"N	100°9'44.44"E
สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดแม่ฮ่องสอน	19°18'16.87"N	97°58'15.6"E

ตาราง 9 รายชื่อสถานที่ตรวจวัดภาคพื้นดินบริเวณพื้นที่ภาคเหนือของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

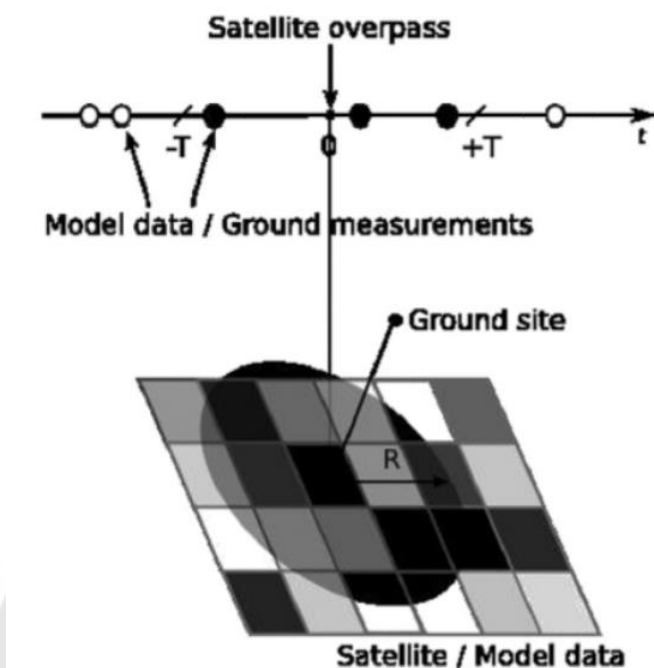
ชื่อสถานที่	ละติจูด	ลองจิจูด
ตำบลแม่แรม	18°54'25.2"N	98°54'14.4"E
ตำบลป่าแดด	18°44'42"N	98°58'48"E
ตำบลแม่เหียะ	18°45'39.6"N	98°55'55.2"E
แม่ฟ้าหลวง เชียงราย	20°2'42"N	99°53'38.4"E
Cafe My Day Off เชียงดาว	19°27'21.6"N	98°57'43.2"E
อำเภอเฉลิมพระเกียรติ จังหวัดน่าน	19°33'0"N	101°12'10.8"E
หอการค้าเชียงใหม่	18°47'31.2"N	99°1'4.8"E
โรงพยาบาลนครพิงค์	18°51'7.2"N	98°58'1.2"E
โรงพยาบาลสันทราย	18°55'12"N	98°56'31.2"E
โรงพยาบาลดอยสะเก็ด	18°52'8.4"N	99°7'40.8"E

ตาราง 9 (ต่อ)

ชื่อสถาน	ละติจูด	ลองจิจูด
โรงพยาบาลสันกำแพง	18°42'57.6"N	99°7'19.2"E
โรงพยาบาลแม่อน	18°44'42"N	99°13'19.2"E
โรงพยาบาลสารภี	18°40'51.6"N	99°2'34.8"E
โรงพยาบาลหางดง	18°40'58.8"N	98°55'4.8"E
โรงพยาบาลสะเมิง	18°50'49.2"N	98°43'55.2"E
โรงพยาบาลสันป่าตอง	18°35'42"N	38°53'6"E
โรงพยาบาลแม่ว้าง	18°36'57.6"N	38°46'26.4"E
โรงพยาบาลดอยหล่อ	18°28'40.8"N	98°46'51.6"E
โรงพยาบาลจอมทอง	18°24'21.6"N	98°40'22.8"E
โรงพยาบาลดอยเต่า	17°57'0"N	98°41'27.6"E
โรงพยาบาลฮอด	18°10'44.4"N	98°36'43.2"E
โรงพยาบาลลอมก๋อย	17°48'7.2"N	98°37'55.2"E
โรงพยาบาลเทพรัตนเวชชานุกูล	18°29'52.8"N	98°22'48"E
โรงพยาบาลวัดจันทร์เฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษา	19°4'40.8"N	98°18'57.6"E
โรงพยาบาลแม่แตง	19°8'13.2"N	98°57'36"E
โรงพยาบาลพร้าว	19°22'1.2"N	99°12'0"E

3.4.2 การจับคู่ข้อมูลด้วยวิธี Spatio - Temporal Collocation Method

จากรายละเอียดของข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาข้างต้น จะเห็นได้ว่าแต่ละข้อมูลมีความแตกต่างกันทั้งความละเอียดในเชิงพื้นที่และเชิงเวลา ดังนั้นจึงจำเป็นต้องจับคู่ข้อมูลทั้งหมดสำหรับขั้นตอนการวิเคราะห์ต่อไป ด้วยวิธี Spatio - Temporal Collocation Method (Hirtl et al., 2014) โดยเริ่มจากการใช้ โปรแกรม ArcGIS Pro ด้วยฟังก์ชัน “Rescale” ในการปรับความละเอียดเชิงพื้นที่ของข้อมูลทั้งหมดให้เท่ากับ 5 x 5 กิโลเมตร (เท่ากับขนาดของข้อมูล AOD) และใช้ฟังก์ชัน “Extract multi values to points” ในการดึงค่าข้อมูลทั้งหมด ณ ตำแหน่งสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน ที่เวลา (ชั่วโมง) ของสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน และ Himawari-8 AOD ทำการตรวจวัดและทำการคำนวณจากค่าเฉลี่ยของข้อมูลภายในพื้นที่วงกลมรัศมี 5 กิโลเมตรจากตำแหน่งสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน ดังตัวอย่างในภาพประกอบ 31



ภาพประกอบ 31 Spatio-temporal collocation method

ที่มา: Hirtl et al. (2014)

3.4.3 จัดทำฐานข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial Database)

เนื่องจากข้อมูลมีจำนวนมาก การจัดการกับข้อมูลทั้งหมดจึงเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยุ่งยาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องจัดทำฐานข้อมูลเชิงพื้นที่ โดยใช้โปรแกรม PostgreSQL เพื่อให้ง่ายต่อการเรียกค้น จัดการข้อมูล และวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดได้ โดยมีการจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบตารางฐานข้อมูลดังตัวอย่างในภาพประกอบ 32 ที่มีจัดเก็บข้อมูล ได้แก่ รหัส (id) ข้อมูลอุณหภูมิอากาศ (temp) วันที่และเวลาที่ตรวจวัด (timestamp) และรหัสสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน (station_name) ซึ่งรูปแบบการจัดเก็บข้อมูลของแต่ละข้อมูลจะจัดเก็บแยกตารางกัน สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลจะมีการเรียกข้อมูลด้วยรหัสสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินและวันที่และเวลาที่ตรวจวัดตรงกัน

temp						
	id	temp	timestamp	station_name	flag	
1	1	19.883	2018-01-01 07:00:00.0	76t	[NULL]	
2	2	20.252	2018-01-01 07:00:00.0	37t	[NULL]	
3	3	20.321	2018-01-01 07:00:00.0	38t	[NULL]	
4	4	19.649	2018-01-01 07:00:00.0	35t	[NULL]	
5	5	19.635	2018-01-01 07:00:00.0	36t	[NULL]	
6	6	19.096	2018-01-01 07:00:00.0	m9	[NULL]	
7	7	20.037	2018-01-01 07:00:00.0	69t	[NULL]	
8	8	28.248	2018-01-03 13:00:00.0	76t	[NULL]	
9	9	27.213	2018-01-03 13:00:00.0	37t	[NULL]	
10	10	27.7	2018-01-03 13:00:00.0	38t	[NULL]	
11	11	24.583	2018-01-03 13:00:00.0	35t	[NULL]	
12	12	24.903	2018-01-03 13:00:00.0	36t	[NULL]	
13	13	23.747	2018-01-03 13:00:00.0	m9	[NULL]	
14	14	27.911	2018-01-03 13:00:00.0	69t	[NULL]	
15	15	22.999	2018-01-26 01:00:00.0	76t	[NULL]	
16	16	20.337	2018-01-26 01:00:00.0	37t	[NULL]	
17	17	20.885	2018-01-26 01:00:00.0	38t	[NULL]	
18	18	16.708	2018-01-26 01:00:00.0	35t	[NULL]	
19	19	17.019	2018-01-26 01:00:00.0	36t	[NULL]	
20	20	16.306	2018-01-26 01:00:00.0	m9	[NULL]	

ภาพประกอบ 32 ตัวอย่างฐานข้อมูลอุณหภูมิอากาศ ที่ตำแหน่งสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินและ
เวลาชั่วโมงที่ตรวจวัด (เวลาอ้างอิงตามเวลาประเทศไทย)

3.4.4 การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Processing)

ในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อประมาณค่าความเข้มข้น PM_{2.5} ในการศึกษา
สำหรับขั้นแรกจะใช้วิธีการ Multiple Linear Regression (MLR) ซึ่งเป็นวิธีการที่นิยมใช้ สำหรับ
นำมาเปรียบเทียบกับวิธีการหลักที่เลือกใช้ศึกษา คือ PCA - GRNN และทำการประเมิน
ประสิทธิภาพของวิธีการทั้งสอง ดังนี้

3.4.4.1 Multiple Linear Regression (MLR)

เป็นการวิเคราะห์ถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์แบบเส้นตรงระหว่างตัว
แปรตาม (Y) กับตัวแปรต้นตั้งแต่หนึ่งตัวขึ้นไป $X_1, X_2, \dots$ ซึ่งคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้ (นง
ลักษณ์ วิรัชชัย, 2553)

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots e$$

3.4.4.2 Principal Component Analysis - General Regression Neural Network (PCA - GRNN)

การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธี PCA - GRNN ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

1) PCA เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก จะถูกนำมาใช้เพื่อลดมิติของข้อมูล ผลลัพธ์ที่ได้จะใช้เป็นอินพุตในขั้นตอน GRNN ทำให้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้ (เลิศพันธุ์ เพียรสร้างสรร, 2557)

$$Y = WX$$

โดยที่ Y คือ Matrix ของ component ขนาด $p \times 1$

W คือ Matrix ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร X ขนาด $p \times p$

X คือ Matrix ของตัวแปรตั้งต้น ขนาด $p \times 1$

ในการศึกษานี้จะทดสอบค่าความแปรปรวนที่เหมาะสมในการพิจารณาองค์ประกอบสำคัญของข้อมูลและวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก ซึ่งกำหนดค่าความแปรปรวนที่ใช้ทดสอบตั้งแต่ 0.3 - 0.9 (step ที่ละ 0.1) โดยใช้ฟังก์ชัน "prcomp" ด้วยโปรแกรม RStudio

2) GRNN เป็นวิธีการที่นำมาใช้ในการประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 โดยใช้อินพุต คือผลลัพธ์จาก PCA ซึ่งจะนำมาคำนวณด้วยสมการดังนี้ (Al-Mahasneh, Anavatti, Garratt, & Pratama, 2018)

$$Y(X) = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i e^{\left(\frac{-D_i^2}{2\sigma^2}\right)}}{\sum_{i=1}^n e^{\left(\frac{-D_i^2}{2\sigma^2}\right)}}$$

โดยที่ $Y(X)$ คือ ผลลัพธ์ที่ได้

Y_i คือ ผลลัพธ์ของตัวอย่าง i

w_0 คือ ค่าถ่วงน้ำหนักผลลัพธ์

$-D_i^2$ คือ ระยะห่างระหว่าง Training data กับข้อมูลนำเข้า โดยสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$-D_i^2 = (x - x_i)^T (x - x_i)$$

W คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของตัวอย่าง i สามารถคำนวณได้ด้วยสมการ ดังนี้

$$W = e^{\left(\frac{-D_i^2}{2\sigma^2}\right)}$$

σ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เป็นตัวแปรอิสระที่ต้องกำหนดโดยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เหมาะสมสามารถตรวจสอบได้จากผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องมากที่สุด

ส่วนการวิเคราะห์ GRNN จะใช้ฟังก์ชัน “grnn” ด้วยโปรแกรม RStudio ซึ่งมีการแบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 2 ชุดข้อมูล ได้แก่ 1) ข้อมูลสร้างสมการ (Train) จำนวน 70% และ 2) ข้อมูลทดสอบ (Test) จำนวน 30% โดยการกำหนดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะเลือกจากผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องมากที่สุด จากการทดสอบกำหนดค่าในช่วง 0.1 - 1.0 (step ที่ละ 0.1)

3.4.5 การตรวจสอบความถูกต้อง (Validation)

การตรวจสอบความถูกต้องในการประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 จะใช้ 2 วิธีการ ดังนี้

1) สัมประสิทธิ์การกำหนด (The Coefficient of determination) เป็นการทดสอบความสัมพันธ์ของผลลัพธ์ค่าความเข้มข้น PM2.5 ที่ได้กับค่าความเข้มข้น PM2.5 จริงจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน (Y) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้ (นิคม ถนนเสียง, ม.ป.ป.)

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

2) รากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Squared Error: RMSE) เป็นการประเมินความแม่นยำของผลลัพธ์จากค่าผิดพลาดของผลลัพธ์ ซึ่งคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้ (Sayad, 2019)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - a_i)^2}{n}}$$

โดยที่ p คือ ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5

a คือ ความเข้มข้น PM2.5 จริงที่ได้จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน



บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การศึกษาวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อประมาณค่าความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 จากดาวเทียม Himawari-8 และสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน บริเวณภาคเหนือ ในปี พ.ศ. 2561 มีผลลัพธ์การวิเคราะห์ ประกอบด้วยหัวข้อดังต่อไปนี้

1. ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาและการผันแปรของข้อมูลในเชิงเวลาและเชิงพื้นที่
2. จำนวนข้อมูลที่ได้จากการจับคู่ด้วยวิธี Spatio - Temporal Collocation Method
3. การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MRL และวิธี PCA - GRNN
4. ความถูกต้องของการประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MRL และวิธี PCA - GRNN
5. กรณีศึกษา: ช่วงเดือนมกราคม – เมษายน

4.1 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาและการผันแปรของข้อมูลในเชิงเวลาและเชิงพื้นที่

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมดในช่วงเดือนมกราคม – ธันวาคม พ.ศ. 2561 ได้แก่ 1) ข้อมูลความเข้มข้น PM2.5 รายชั่วโมงจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน กรมควบคุมมลพิษ จำนวน 14 สถานี ซึ่งแต่ละสถานีมีช่วงเวลาของข้อมูลที่แตกต่างกันดังตาราง 10 จะเห็นได้ว่ามีจำนวน 4 สถานีที่มีข้อมูลครอบคลุมตั้งแต่เดือนมกราคม – ธันวาคม พ.ศ. 2561 คือ ศูนย์ราชการจังหวัดเชียงใหม่ (35t) โรงเรียนยุพราชวิทยาลัย (36t) การประปาส่วนภูมิภาคแม่เมาะ (40t) และโรงพยาบาลเฉลิมพระเกียรติ (75t) นอกจากนั้นมี 4 สถานีที่มีข้อมูลในช่วงเดือนกรกฎาคม – ธันวาคม พ.ศ. 2561 ได้แก่ สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดเชียงราย (57t) สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดแม่ฮ่องสอน (58t) สำนักงานเทศบาลเมืองน่าน (67t) และสถานีอุตุนิยมวิทยาจังหวัดลำพูน (68t) และอีกจำนวน 6 สถานีที่มีข้อมูลในช่วงเดือนตุลาคม – ธันวาคม พ.ศ. 2561 ได้แก่ สถานีอุตุนิยมวิทยาลำปาง (37t) โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลบ้านสบป่าด (38t) โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลท่าสี่ (39t) สถานีอุตุนิยมวิทยาจังหวัดแพร่ (69t) อุทยานการเรียนรู้ องค์การบริหารส่วนจังหวัดพะเยา (70t) และสำนักงานสาธารณสุขแม่สาย (73t) ส่วนข้อมูลความเข้มข้น PM2.5 รายชั่วโมงจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จำนวน 26 สถานี จากตาราง 11 จะเห็นได้ว่าสถานีส่วนใหญ่มีการติดตั้งในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ และมีข้อมูลในช่วงเดือนเมษายน – ธันวาคม พ.ศ. 2561 โดยคิดเป็นความเข้มข้น PM2.5 รวมจากทั้งสองแหล่งจำนวน 140,095 ข้อมูล 2) ข้อมูล AOD รายชั่วโมงจากดาวเทียม Himawari-8 ในเดือนมกราคม – ธันวาคม พ.ศ. 2561 จำนวน 8,760 ข้อมูล 3) NDVI รายวันจากดาวเทียม Terra MODIS ในเดือนมกราคม – ธันวาคม พ.ศ. 2561 จำนวน 365 ข้อมูล 4) ข้อมูล DEM จากดาวเทียม Terra ASTER จำนวน 1 ข้อมูล 5) ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ อุณหภูมิอากาศ (TEMP) ความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ความกดอากาศ (SP) และความเร็วลม (WS) ราย 6 ชั่วโมงจาก ECMWF ในเดือนมกราคม – ธันวาคม พ.ศ. 2561 จำนวน 1,460 ดังตาราง 12 ซึ่งข้อมูลทั้งหมดจะถูกนำไปศึกษาความผันแปรของข้อมูลในเชิงเวลาและเชิงพื้นที่ รวมทั้งการจับคู่ข้อมูลสำหรับเตรียมในขั้นตอนการวิเคราะห์ต่อไป

ตาราง 10 ช่วงเวลาของข้อมูล PM2.5 จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน กรมควบคุมมลพิษ

รหัสสถานี	ชื่อสถานี	จังหวัด	ช่วงของข้อมูล
35t	ศูนย์ราชการจังหวัดเชียงใหม่	เชียงใหม่	1 มกราคม - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561
36t	โรงเรียนยุพราชวิทยาลัย	เชียงใหม่	1 มกราคม - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561
37t	สถานีอุตุนิยมวิทยาลำปาง	ลำปาง	17 ตุลาคม - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561
38t	โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล บ้านสบป่าด	ลำปาง	17 ตุลาคม - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561
39t	โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล ท่าสี่	ลำปาง	17 ตุลาคม - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561
40t	การประปาส่วนภูมิภาคแม่เกาะ	ลำปาง	1 มกราคม - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561
57t	สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและ สิ่งแวดล้อมจังหวัดเชียงราย	เชียงราย	18 กรกฎาคม - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561
58t	สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและ สิ่งแวดล้อมจังหวัดแม่ฮ่องสอน	แม่ฮ่องสอน	21 กรกฎาคม - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561

ตาราง 10 (ต่อ)

รหัสสถานี	ชื่อสถานี	จังหวัด	ช่วงของข้อมูล
67t	สำนักงานเทศบาลเมืองน่าน	น่าน	20 กรกฎาคม - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561
68t	สถานีอุตุนิยมวิทยาจังหวัดลำพูน	ลำพูน	18 กรกฎาคม - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561
69t	สถานีอุตุนิยมวิทยาจังหวัดแพร่	แพร่	17 ตุลาคม - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561
70t	อุทยานการเรียนรู้ องค์การบริหาร ส่วนจังหวัดพะเยา	พะเยา	17 ตุลาคม - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561
73t	สำนักงานสาธารณสุขแม่สาย	เชียงราย	17 ตุลาคม - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561
75t	โรงพยาบาลเฉลิมพระเกียรติ	น่าน	1 มกราคม - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561

ตาราง 11 ช่วงเวลาของข้อมูล PM2.5 จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รหัสสถานี	ชื่อสถานี	จังหวัด	ช่วงของข้อมูล
DustBoy002	ตำบลแม่แรม	เชียงใหม่	7 เมษายน - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561
DustBoy005	ตำบลป่าแดด	เชียงใหม่	9 เมษายน - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561
DustBoy006	ตำบลแม่เหียะ	เชียงใหม่	7 เมษายน - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561
DustBoy009	แม่ฟ้าหลวง	เชียงราย	7 เมษายน - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561
DustBoy011	Cafe My Day Off เชียงดาว	เชียงใหม่	7 เมษายน - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561
DustBoy040	อำเภอเฉลิมพระเกียรติ	น่าน	16 เมษายน - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561

ตาราง 11 (ต่อ)

รหัสสถานี	ชื่อสถานี	จังหวัด	ช่วงของข้อมูล
DustBoyCC001	หอการค้าเชียงใหม่	เชียงใหม่	9 เมษายน - 27 ธันวาคม พ.ศ. 2561
DustBoyH001	โรงพยาบาลนครพิงค์	เชียงใหม่	23 เมษายน - 27 ธันวาคม พ.ศ. 2561
DustBoyH002	โรงพยาบาลสันทราย	เชียงใหม่	23 เมษายน - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561
DustBoyH003	โรงพยาบาลดอยสะเก็ด	เชียงใหม่	10 เมษายน - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561
DustBoyH004	โรงพยาบาลสันกำแพง	เชียงใหม่	10 เมษายน - 24 ธันวาคม พ.ศ. 2561
DustBoyH005	โรงพยาบาลแม่ออน	เชียงใหม่	7 เมษายน - 30 ธันวาคม พ.ศ. 2561
DustBoyH006	โรงพยาบาลสารภี	เชียงใหม่	7 เมษายน - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561
DustBoyH007	โรงพยาบาลหางดง	เชียงใหม่	23 เมษายน - 28 ธันวาคม พ.ศ. 2561
DustBoyH008	โรงพยาบาลสะเมิง	เชียงใหม่	17 เมษายน - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561
DustBoyH009	โรงพยาบาลสันป่าตอง	เชียงใหม่	7 เมษายน - 20 ธันวาคม พ.ศ. 2561
DustBoyH010	โรงพยาบาลแม่วาง	เชียงใหม่	9 เมษายน - 20 ธันวาคม พ.ศ. 2561
DustBoyH011	โรงพยาบาลดอยหล่อ	เชียงใหม่	19 เมษายน - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561
DustBoyH012	โรงพยาบาลจอมทอง	เชียงใหม่	9 เมษายน - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561
DustBoyH013	โรงพยาบาลฮอด	เชียงใหม่	7 เมษายน - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561

ตาราง 11 (ต่อ)

รหัสสถานี	ชื่อสถานี	จังหวัด	ช่วงของข้อมูล
DustBoyH014	โรงพยาบาลดอยเต่า	เชียงใหม่	19 เมษายน - 22 ธันวาคม พ.ศ. 2561
DustBoyH015	โรงพยาบาลอมก๋อย	เชียงใหม่	18 เมษายน - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561
DustBoyH016	โรงพยาบาลเทพรัตนเวชชานุกูล	เชียงใหม่	18 เมษายน - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561
DustBoyH017	โรงพยาบาลวัดจันทร์เฉลิมพระเกียรติ 80 พรรษา	เชียงใหม่	13 เมษายน - 25 ธันวาคม พ.ศ. 2561
DustBoyH018	โรงพยาบาลแม่แตง	เชียงใหม่	7 เมษายน - 21 ธันวาคม พ.ศ. 2561
DustBoyH019	โรงพยาบาลพร้าว	เชียงใหม่	7 เมษายน - 31 ธันวาคม พ.ศ. 2561

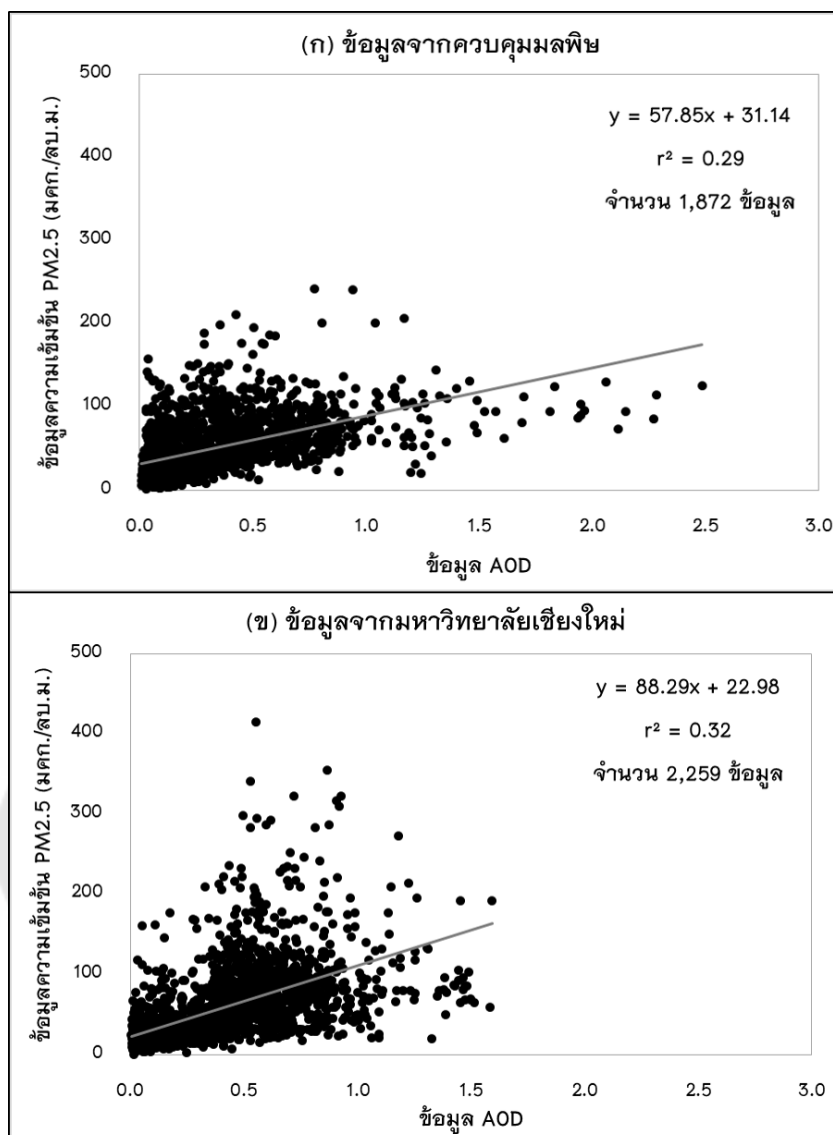
ตาราง 12 จำนวนข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

ข้อมูล	รูปแบบ	จำนวนข้อมูล
PM2.5	รายชั่วโมง	140,095
AOD	รายชั่วโมง	8,760
NDVI	รายวัน	365
DEM	-	1
SP	ราย 6 ชั่วโมง	1,460
TEMP	ราย 6 ชั่วโมง	1,460
RH	ราย 6 ชั่วโมง	1,460
WS	ราย 6 ชั่วโมง	1,460

4.1.1 ความสัมพันธ์ของข้อมูล AOD และความเข้มข้น PM2.5

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูล AOD จากดาวเทียม Himawari-8 และข้อมูลความเข้มข้น PM2.5 จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน จากกรมควบคุมมลพิษ และ

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยคำนวณค่าเฉลี่ยของข้อมูล AOD ภายในพื้นที่รัศมี 5 กิโลเมตรจากตำแหน่งสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน ดังภาพประกอบ 33 พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล AOD กับความเข้มข้น PM2.5 จากกรมควบคุมมลพิษ มีความสัมพันธ์ r^2 เท่ากับ 0.29 โดยมีค่าต่ำสุดและสูงสุดของค่าความเข้มข้น PM2.5 คือ 0 และ 242 มคก./ลบ.ม. และค่า AOD เท่ากับ 0.0 และ 2.5 และความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล AOD กับข้อมูล ความเข้มข้น PM2.5 จากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พบว่า มีความสัมพันธ์ r^2 เท่ากับ 0.32 ซึ่งมีค่าต่ำสุดและสูงสุดของค่าความเข้มข้น PM2.5 คือ 0 และ 415 มคก./ลบ.ม. และค่า AOD เท่ากับ 0.0 และ 1.6 จะเห็นได้ว่าช่วงค่าของข้อมูลความเข้มข้น PM2.5 จากทั้งสองแหล่งมีความแตกต่างกัน โดยชุดข้อมูลจากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่มีค่าความเข้มข้น PM2.5 สูงสุดมากกว่าชุดข้อมูลจากกรมควบคุมมลพิษ ในขณะที่ข้อมูล AOD ที่จับคู่ได้ ณ ตำแหน่งสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่มีค่าสูงสุดน้อยกว่าค่า AOD ที่จับคู่ได้ ณ ตำแหน่งสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินของกรมควบคุมมลพิษ ซึ่งบริเวณใดมีค่าความเข้มข้น PM2.5 สูง ค่า AOD ควรจะมีค่าสูงด้วย เพราะฉะนั้นข้อมูลจากทั้งสองแหล่งจึงไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ร่วมกันได้ เนื่องจากมีช่วงค่าที่ตอบสนองต่อค่า AOD ต่างกัน แม้ข้อมูลความเข้มข้น PM2.5 จากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่มีค่า r^2 หรือความสัมพันธ์ที่ดีกว่าข้อมูลความเข้มข้น PM2.5 จากกรมควบคุมมลพิษ อีกทั้งข้อมูลจากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ มีข้อมูลในช่วงเดือน เมษายน – ธันวาคม พ.ศ. 2561 ซึ่งไม่ครอบคลุมช่วงเวลาทั้งปีตามที่ต้องการศึกษาได้ ดังนั้น ในการศึกษานี้จึงเลือกใช้ข้อมูลความเข้มข้น PM2.5 จากกรมควบคุมมลพิษมาวิเคราะห์ เพราะมีข้อมูลครอบคลุมตั้งแต่เดือนมกราคม – ธันวาคม และมีช่วงค่าข้อมูลที่สอดคล้องกับค่า AOD มากกว่าชุดข้อมูลจากมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยที่พื้นที่ที่มีความเข้มข้นของ PM2.5 สูงจะมีค่า AOD สูง และในพื้นที่ที่มีความเข้มข้นของ PM2.5 ต่ำจะมีค่า AOD ต่ำ



ภาพประกอบ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล AOD และความเข้มข้น PM2.5
จาก (ก) กรมควบคุมมลพิษ และ (ข) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

4.1.2 การผันแปรของข้อมูลในเชิงเวลาและเชิงพื้นที่

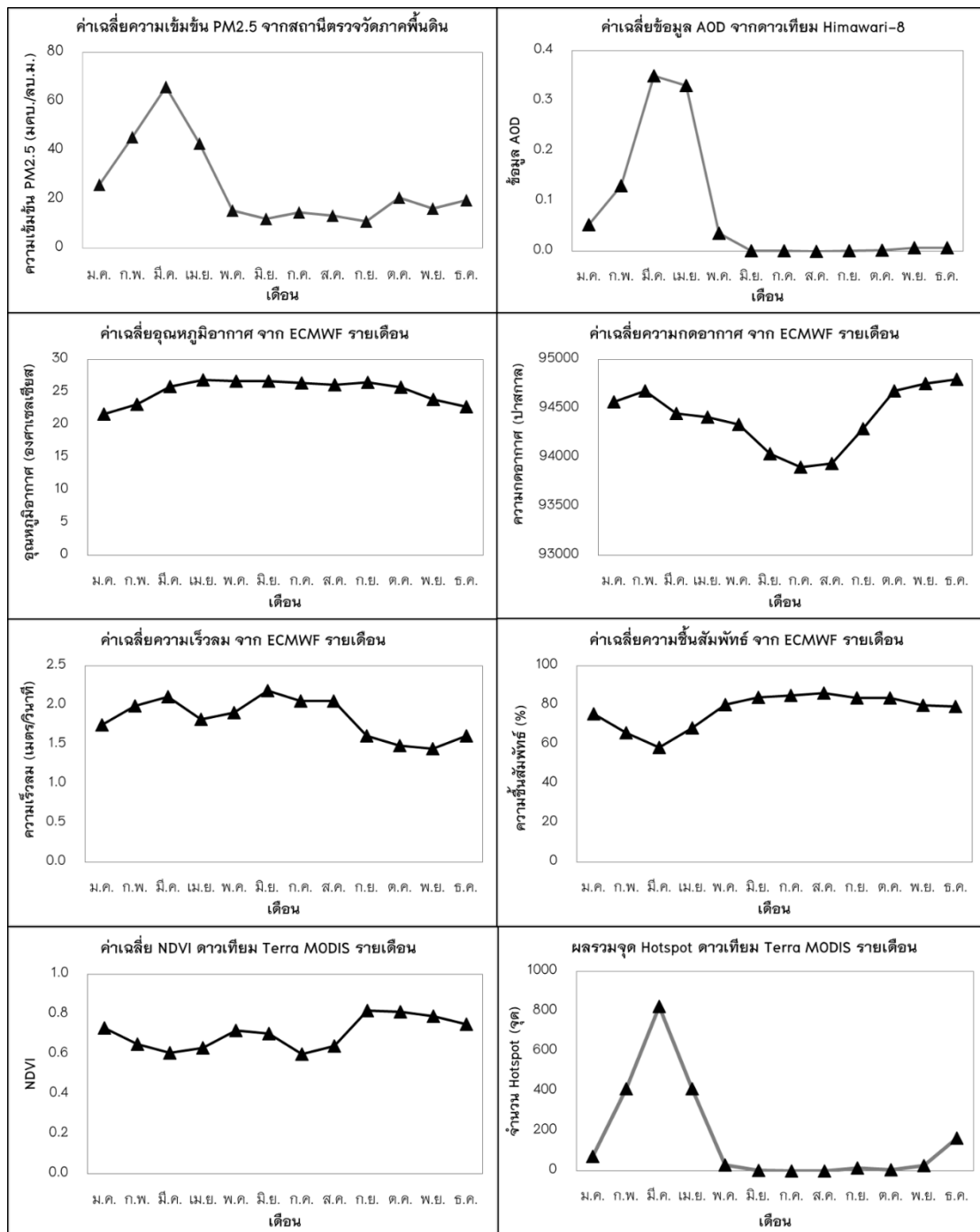
ผลการศึกษาความผันแปรของข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมด ประกอบด้วย ข้อมูลความเข้มข้น PM2.5 AOD NDVI DEM ความกดอากาศ อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม บริเวณพื้นที่ภาคเหนือ ในช่วงเดือนมกราคม – ธันวาคม ปี พ.ศ. 2561 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) การผันแปรข้อมูลระหว่างปี (Interannual Variation)

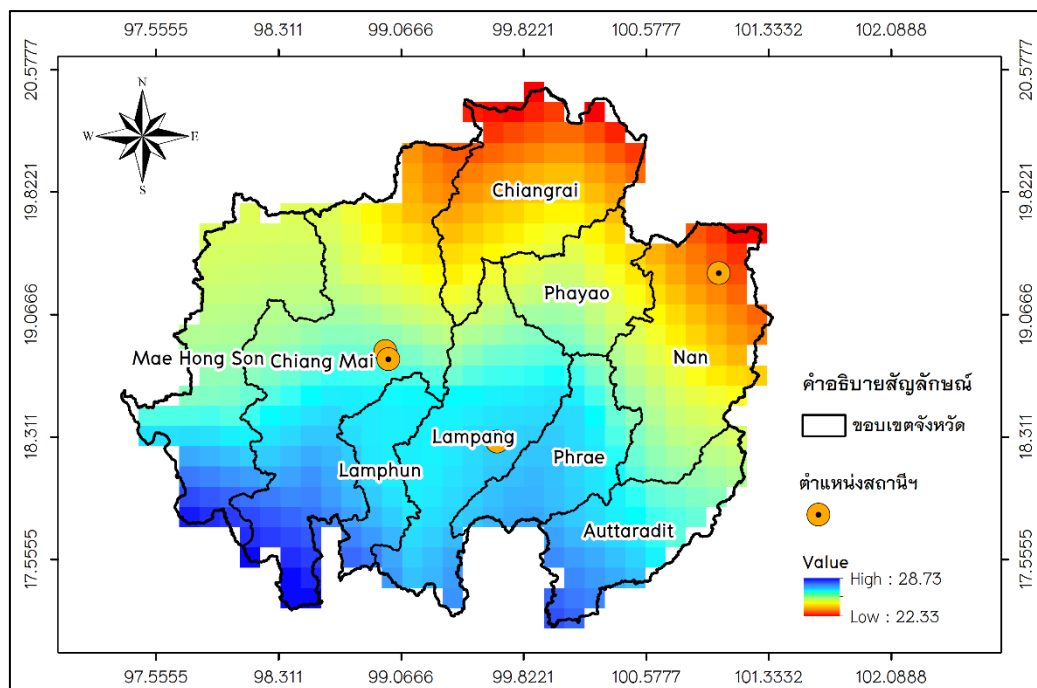
การผันแปรของข้อมูลระหว่างปีพิจารณาได้จากสถิติข้อมูลรายเดือนที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมด จากภาพประกอบ 34 พบว่า ค่าเฉลี่ยความเข้มข้น PM2.5 รายเดือน ในปี พ.ศ. 2561 มีค่าสูงในเดือนมีนาคม เท่ากับ 66.00 มคก./ลบ.ม. รองลงมาคือ เดือนกุมภาพันธ์ เท่ากับ 45.30 มคก./ลบ.ม. เดือนเมษายน เท่ากับ 42.8 มคก./ลบ.ม. และในเดือนมกราคม เท่ากับ 25.90 มคก./ลบ.ม. และมีค่าน้อยกว่า 20 มคก./ลบ.ม. ในช่วงเดือนพฤษภาคม - ธันวาคม ค่าเฉลี่ย AOD จากดาวเทียม Himawari-8 รายเดือน ในปี พ.ศ. 2561 มีค่าสูงสุดในช่วงเดือนมีนาคม - เมษายน ประมาณ 0.30 รองลงมาคือเดือนกุมภาพันธ์ มกราคม และพฤษภาคม ส่วนในช่วงเดือน มิถุนายน - ธันวาคม เป็นช่วงเดือนที่มีค่าต่ำกว่า 0.05 ค่าเฉลี่ย NDVI จากดาวเทียม Terra MODIS รายเดือน ในปี พ.ศ. 2561 จะมีค่าสูงในช่วงเดือนกันยายน - ธันวาคม และมีช่วงค่าต่ำใน 2 เดือน คือ มีนาคมและกรกฎาคม ส่วนค่าเฉลี่ยความกดอากาศ จาก ECMWF รายเดือน ในปี พ.ศ. 2561 มีค่าสูงในช่วงเดือนกันยายน - กุมภาพันธ์ รองลงมาคือ ช่วงเดือนมีนาคม - พฤษภาคม และมีค่าต่ำลงตั้งแต่เดือนมิถุนายน - สิงหาคม ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศ จาก ECMWF รายเดือน ในปี พ.ศ. 2561 มีค่าอยู่ระหว่าง 18 – 29 องศาเซลเซียส โดยมีค่าสูงสุดมากกว่า 25 องศาเซลเซียส ในช่วงเดือนเมษายน - ตุลาคม ซึ่งนอกจากช่วงเดือนดังกล่าวคือ ช่วงเดือน พฤศจิกายน - มีนาคม จะมีค่าต่ำกว่า 25 องศาเซลเซียส ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ จาก ECMWF รายเดือน ในปี พ.ศ. 2561 มีค่าต่ำในช่วงเดือนมกราคม - เมษายน และมีความมากกว่า 80% ในช่วงเดือนพฤษภาคม - ธันวาคม และค่าเฉลี่ยความเร็วลม จาก ECMWF รายเดือน ในปี พ.ศ. 2561 มีค่าสูงในช่วงเดือนพฤษภาคม - สิงหาคม เท่ากับ 1.84 เมตร/วินาที รองลงมาคือช่วงเดือนมกราคม - เมษายน เท่ากับ 1.13 เมตร/วินาที และต่ำสุดในช่วงเดือนกันยายน - ธันวาคม เท่ากับ 0.76 เมตร/วินาที รวมถึงข้อมูล Hotspot จากดาวเทียม Terra MODIS ซึ่งถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ ความสอดคล้องของการเกิด PM2.5 โดยวิเคราะห์เป็นผลรวมรายเดือนของจุด Hotspot ที่เกิดขึ้น ในบริเวณภาคเหนือ ตั้งแต่เดือนมกราคม - ธันวาคม ปี พ.ศ. 2561 โดยพบว่าเดือนที่มีจำนวนจุด Hotspot มากที่สุด คือ เดือนมีนาคม เท่ากับ 825 จุด รองลงมา คือ เดือนกุมภาพันธ์ เมษายน ธันวาคม และมกราคม เท่ากับ 413, 412, 165 และ 73 ตามลำดับ โดยในเดือนพฤษภาคม - พฤศจิกายน มีจำนวนจุด Hotspot น้อยกว่า 30 จุด

จากผลลัพธ์ดังกล่าว พบว่า ความผันแปรเชิงเวลาในเดือนมีนาคมความเข้มข้น PM2.5 จะมีค่าสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับค่า AOD นอกจากนี้ยังมีความผันแปรของข้อมูลราย

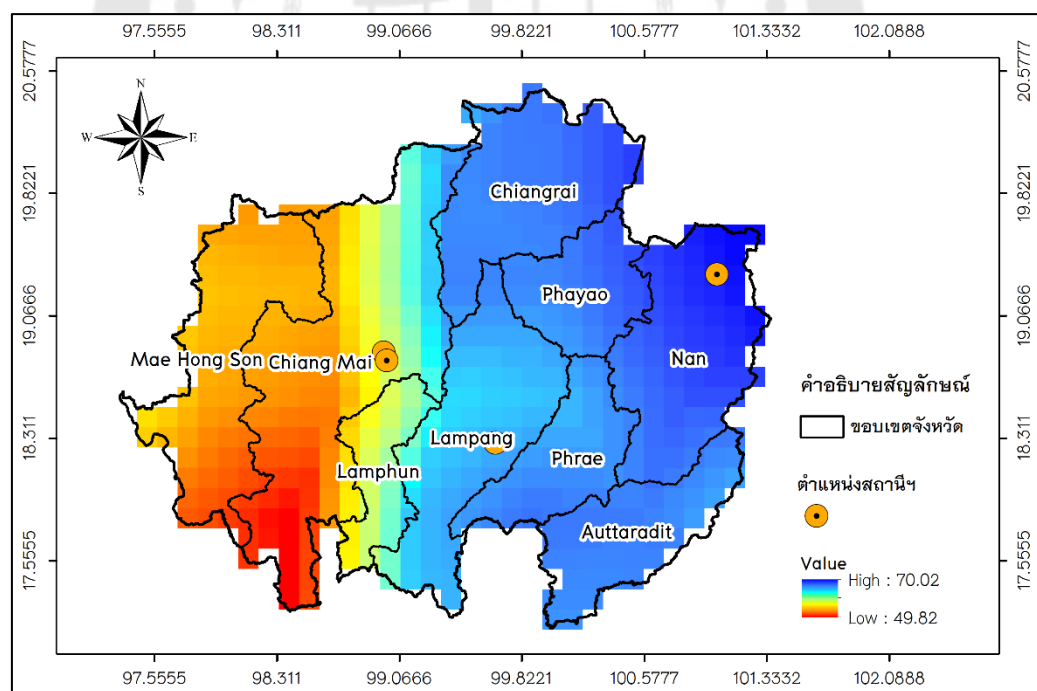
เดือนในแต่ละเดือนที่สอดคล้องกัน ทำให้สรุปได้ว่าข้อมูล AOD จากดาวเทียม Himawari-8 ในรูปแบบรายเดือน สามารถบ่งชี้ถึงข้อมูลความเข้มข้น PM_{2.5} ได้ รวมถึงจำนวนจุด Hotspot ที่เกิดขึ้นในเดือนมีนาคมมีจำนวนมากกว่าเดือนอื่นๆ ซึ่งอาจเป็นแหล่งกำเนิดที่ทำให้ค่าความเข้มข้น PM_{2.5} มีค่าสูงขึ้น อีกทั้งพบว่าข้อมูล Hotspot มีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับข้อมูล NDVI ที่แสดงให้เห็นถึงพื้นที่ที่มีพืชพรรณสีเขียวในเดือนเดียวกัน (ดังภาพประกอบ 41) โดยจำนวน Hotspot มากแต่มีค่า NDVI ลดลง ซึ่งอาจจะมีสาเหตุจากการเผาในพื้นที่การเกษตรหรือป่าไม้ในบริเวณพื้นที่ภาคเหนือ นอกจากนี้สภาพอุตุนิยมวิทยาในพื้นที่ยังเอื้อต่อการเกิดฝุ่นละออง PM_{2.5} โดยมีความกดอากาศสูง ความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วลมต่ำ ทำให้ฝุ่นละอองไม่สามารถแพร่กระจายในอากาศได้ จากภาพประกอบ 35 ถึงภาพประกอบ 38 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวเชิงพื้นที่ของข้อมูลสภาพอุตุนิยมวิทยาที่สอดคล้องกับความสูงจากข้อมูล DEM (ภาพประกอบ 42) โดยพื้นที่ที่มีความสูงมากส่วนใหญ่จะมีความกดอากาศน้อยและมีค่าอุณหภูมิอากาศต่ำ แต่มีความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วลมค่อนข้างสูง ส่วนความผันแปรเชิงพื้นที่ในเดือนมีนาคมของข้อมูล AOD ในภาพประกอบ 39 และข้อมูล Hotspot ในภาพประกอบ 40 พบว่า พื้นที่ที่มีค่า AOD สูงจะมีจำนวน Hotspot จำนวนมาก ยกเว้นพื้นที่บางส่วนในจังหวัดลำปาง ซึ่งมีค่า AOD สูงแต่มีจำนวน Hotspot น้อย ผลดังกล่าวอาจเกิดจากแหล่งกำเนิดอื่น ซึ่งมีรายละเอียดของผลการศึกษาในหัวข้อถัดไป



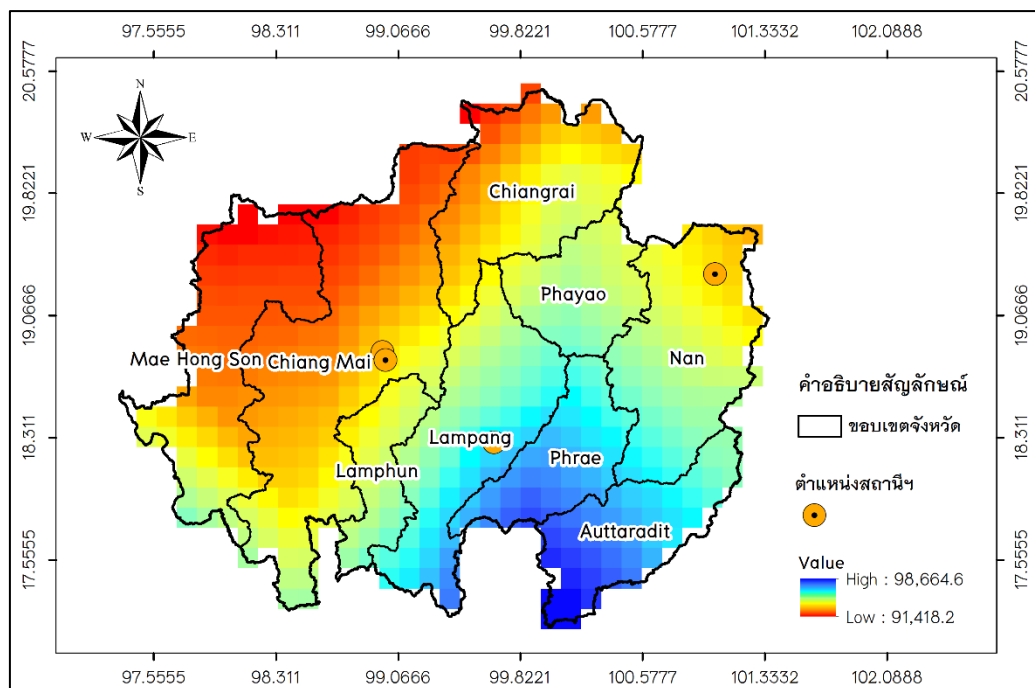
ภาพประกอบ 34 การผันแปรข้อมูลระหว่างปี



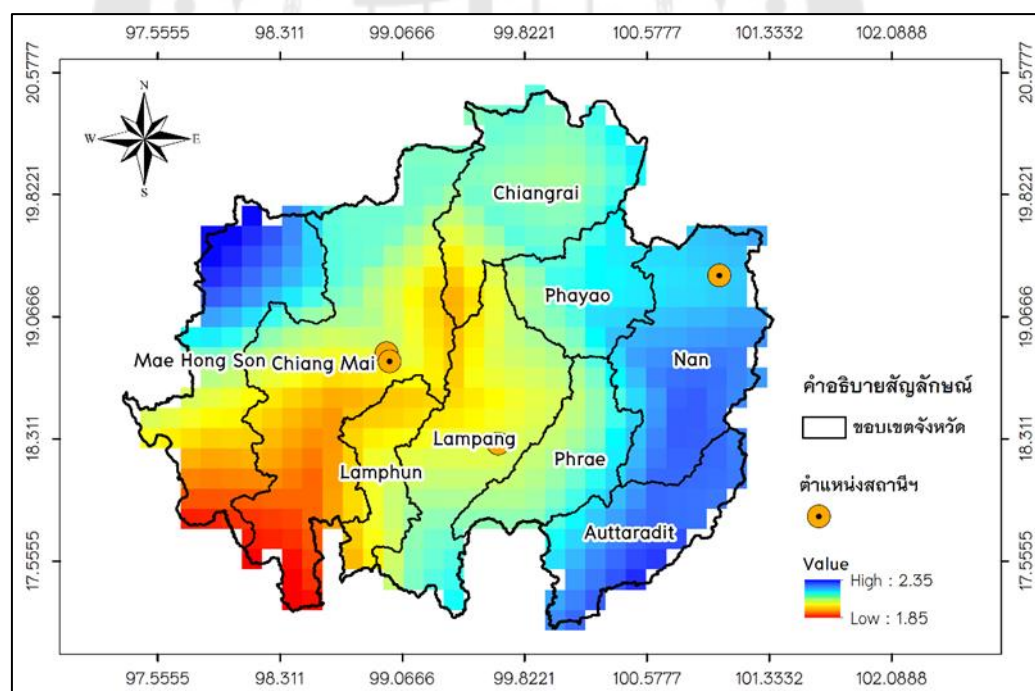
ภาพประกอบ 35 การกระจายตัวเชิงพื้นที่ของข้อมูลอุณหภูมิอากาศ ในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2561



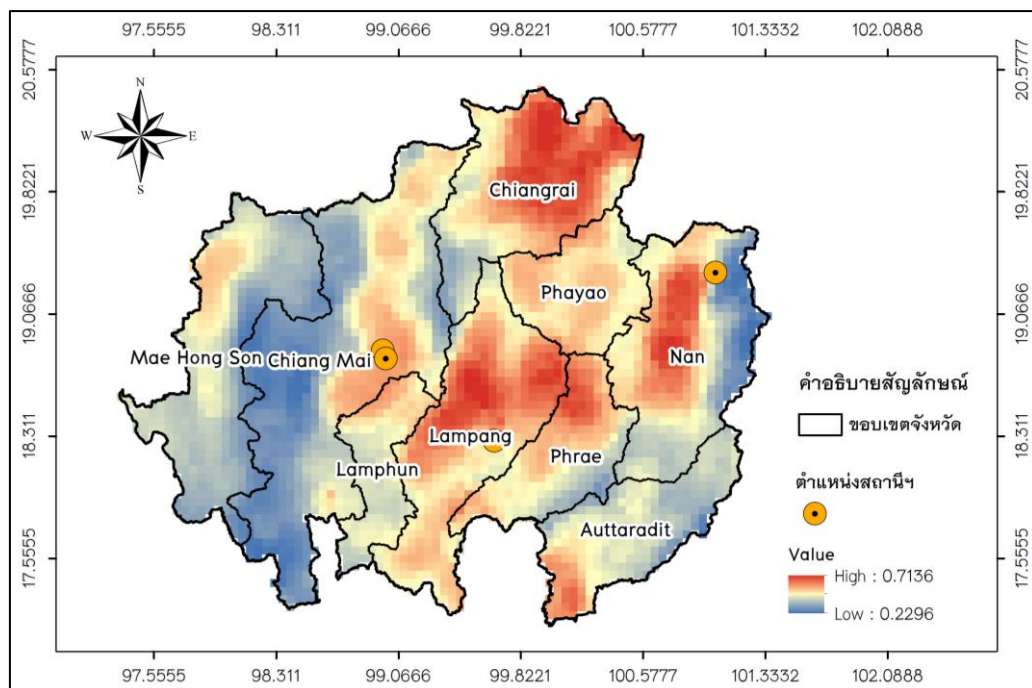
ภาพประกอบ 36 การกระจายตัวเชิงพื้นที่ของข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ ในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2561



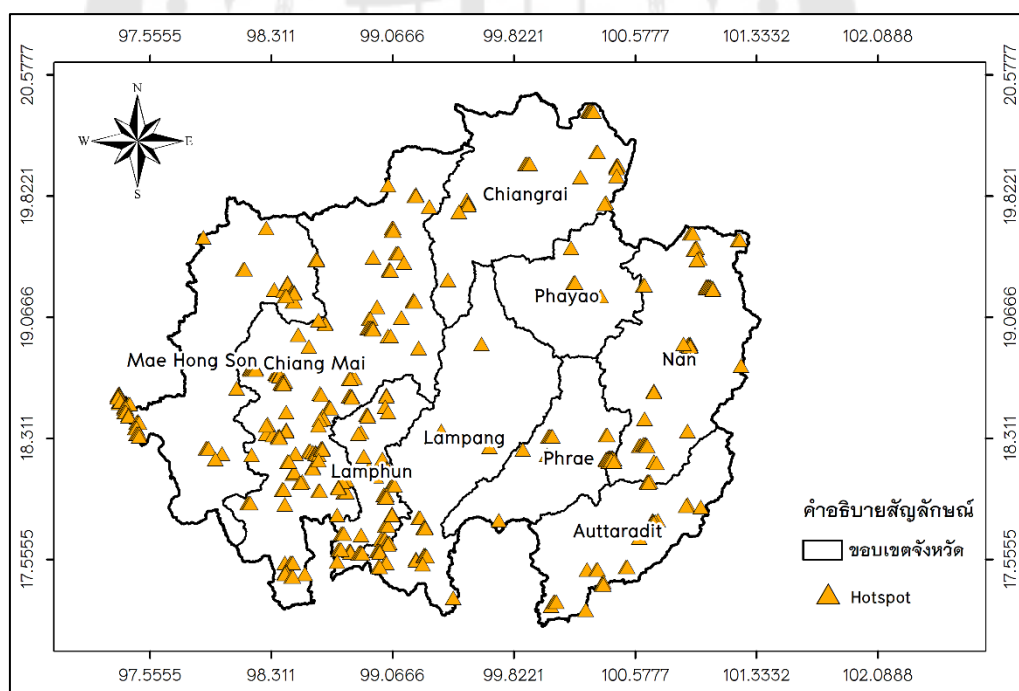
ภาพประกอบ 37 การกระจายตัวเชิงพื้นที่ของข้อมูลความกดอากาศ ในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2561



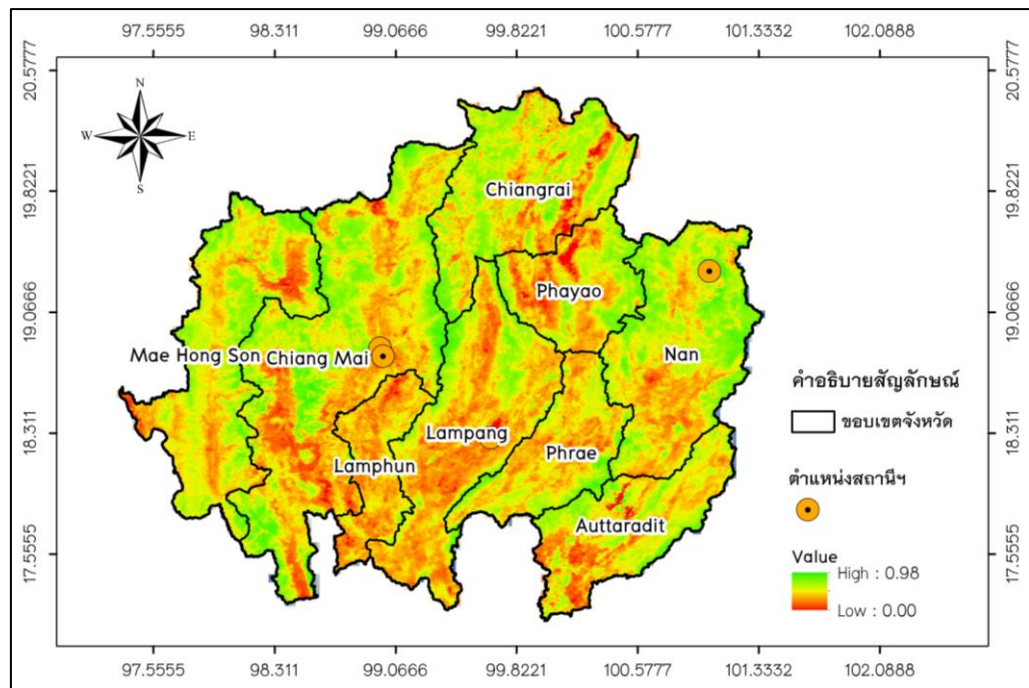
ภาพประกอบ 38 การกระจายตัวเชิงพื้นที่ของข้อมูลความเร็วลม ในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2561



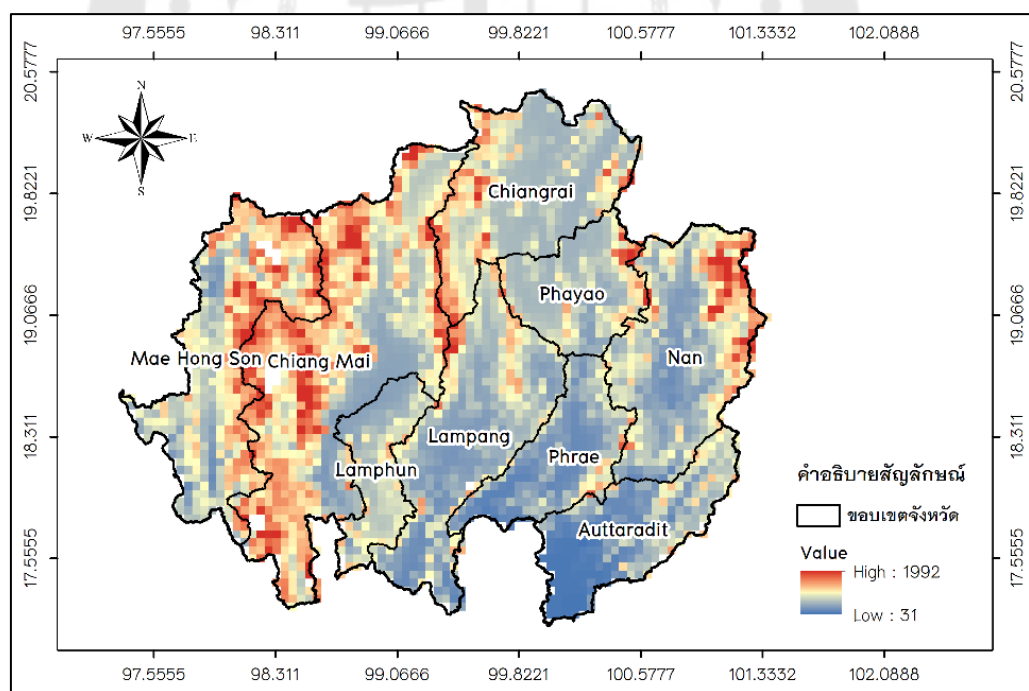
ภาพประกอบ 39 การกระจายตัวเชิงพื้นที่ของข้อมูล AOD ในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2561



ภาพประกอบ 40 การกระจายตัวเชิงพื้นที่ของข้อมูล Hotspot ในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2561



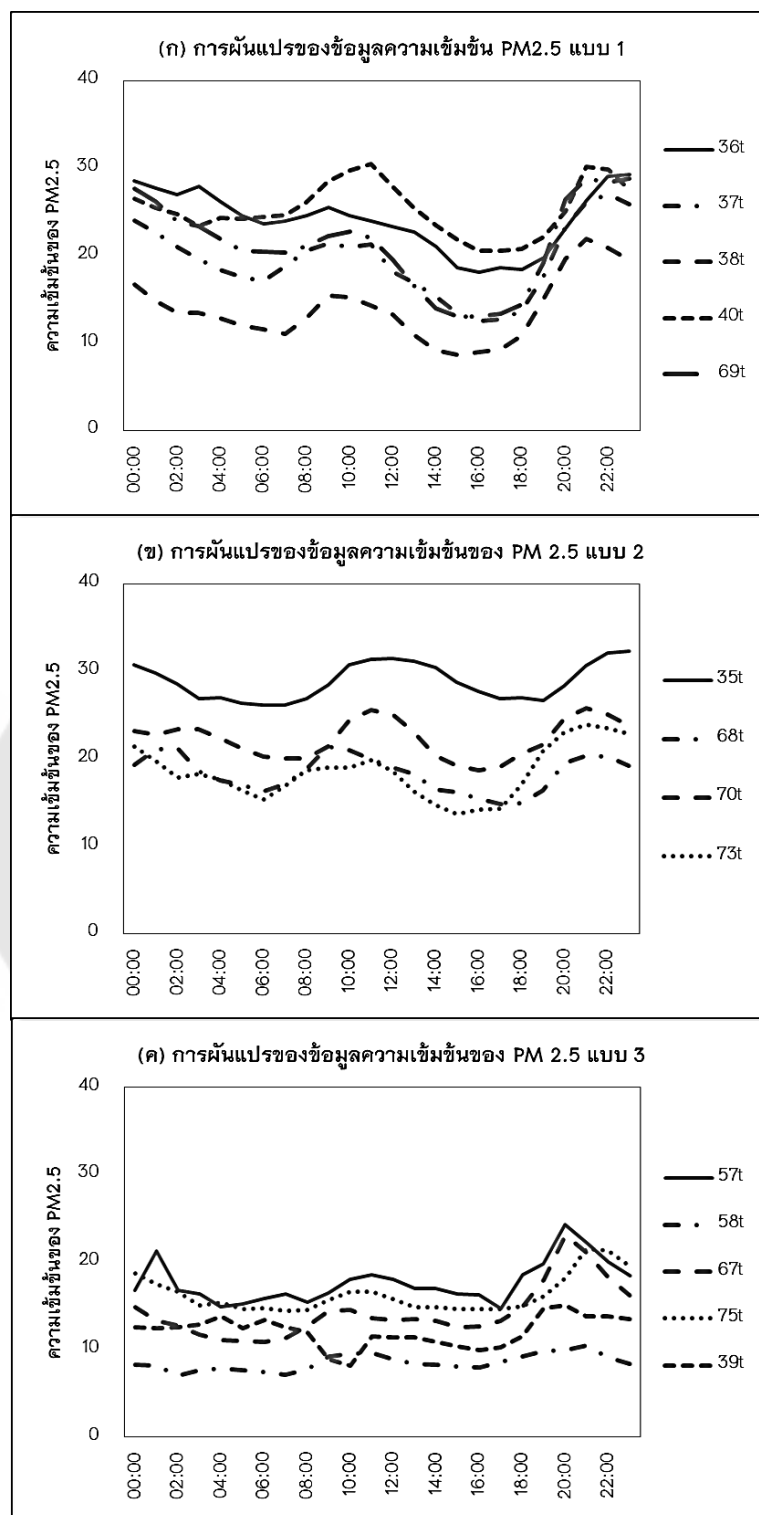
ภาพประกอบ 41 การกระจายตัวเชิงพื้นที่ของข้อมูล NDVI ในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2561



ภาพประกอบ 42 ข้อมูลความสูง DEM บริเวณพื้นที่ภาคเหนือ

2) การผันแปรข้อมูลระหว่างวัน (Diurnal Variation)

ข้อมูลความเข้มข้น PM_{2.5} รายชั่วโมง ปี พ.ศ. 2561 ที่ได้จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน บริเวณพื้นที่ภาคเหนือ ในแต่ละสถานีมีช่วงเวลาของข้อมูลที่แตกต่างกัน โดยแสดงค่าเฉลี่ยความเข้มข้น PM_{2.5} ชั่วโมงแยกตามช่วงเวลาของข้อมูลได้ 3 แบบ ดังภาพประกอบ 43 คือ แบบ 1 สถานีที่มีค่าสูงในช่วงเช้า ตั้งแต่เวลา 06:00 – 12:00 น. ได้แก่ โรงเรียนยุพราชวิทยาลัย (36t) สถานีอุตุนิยมวิทยาลำปาง (37t) โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลบ้านสบป่าด (38t) การประปาส่วนภูมิภาคแม่เกาะ (40t) และสถานีอุตุนิยมวิทยาจังหวัดแพร่ (69t) จากการซ้อนทับข้อมูลบนแผนที่ฐาน พบว่า ตำแหน่งสถานียังกล่าวอยู่ใกล้ 2 พื้นที่ ได้แก่ สนามบิน และโรงไฟฟ้าแม่เกาะ โดยช่วงบ่ายตั้งแต่ 13:00 – 18:00 น. มีค่าความเข้มข้นลดลง และค่อยๆ เพิ่มขึ้นอีกครั้งตั้งแต่เวลา 19:00 – 23:00 น. ส่วนแบบ 2 สถานีที่มีค่าสูงในช่วงเวลา 08:00 – 12:00 น. ได้แก่ ศูนย์ราชการจังหวัดเชียงใหม่ (35t) ซึ่งเป็นสถานีที่มีค่าความเข้มข้น PM_{2.5} สูงสุด เท่ากับ 30.33 มคก./ลบ.ม. สถานีอุตุนิยมวิทยาจังหวัดลำพูน (68t) อุทยานการเรียนรู้ องค์การบริหารส่วนจังหวัดพะเยา (70t) และสำนักงานสาธารณสุขแม่สาย (73t) จากการซ้อนทับตำแหน่งสถานีบนแผนที่ฐาน พบว่า สถานีดังกล่าวมีตำแหน่งอยู่ริมถนน ซึ่งช่วงบ่ายตั้งแต่ 13:00 – 18:00 น. มีค่าความเข้มข้นลดลง และค่อยๆ เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 20:00 – 23:00 น. และแบบ 3 สถานีที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น PM_{2.5} ในแต่ละช่วงเวลาน้อยหรือคงที่ แต่มีค่าสูงในช่วงเวลาตั้งแต่ 18:00 – 23:00 น. โดยมีค่าสูงสุดในช่วงเวลา 20:00 น. ได้แก่ โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลท่าสี่ (39t) สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดเชียงราย (57t) สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดแม่ฮ่องสอน (58t) สำนักงานเทศบาลเมืองน่าน (67t) และโรงพยาบาลเฉลิมพระเกียรติ (75t) จากการซ้อนทับข้อมูลบนแผนที่ พบว่า บริเวณพื้นที่ดังกล่าวส่วนใหญ่เป็นป่าไม้ ล้อมรอบไปด้วยต้นไม้ และมีลักษณะภูมิประเทศเป็นพื้นที่ราบ ผลการศึกษาทำให้พบว่าความเข้มข้น PM_{2.5} ในแต่ละช่วงเวลามีผลเนื่องมาจากแหล่งกำเนิดจากบริเวณโดยรอบ



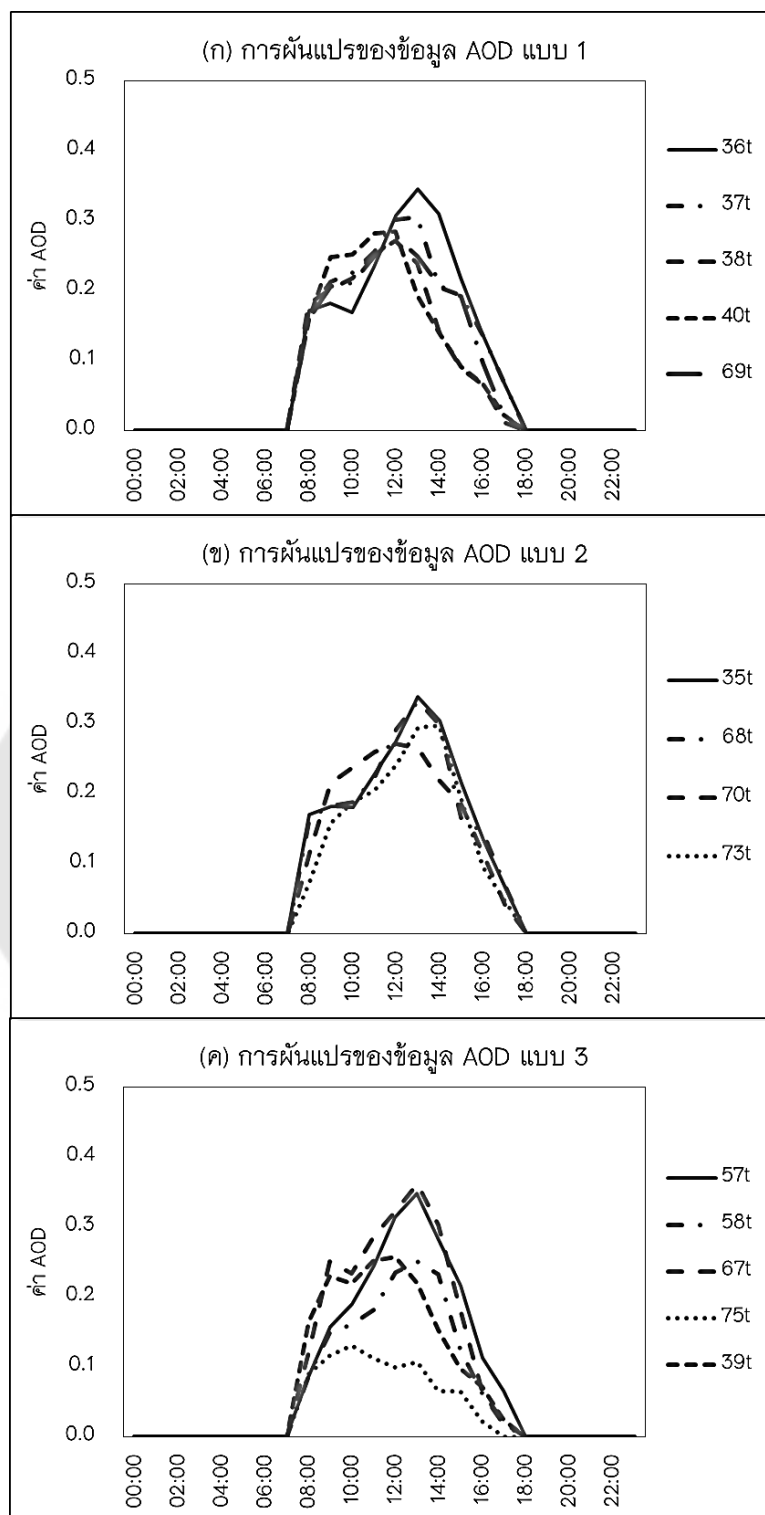
ภาพประกอบ 43 การผันแปรระหว่างวันของข้อมูลความเข้มข้น PM2.5

การผันแปรของค่าเฉลี่ย AOD รายชั่วโมง จากดาวเทียม Himawari-8 ปี พ.ศ. 2561 ที่มีการแบ่งข้อมูลสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินเป็น 3 แบบเช่นเดียวกันกับข้อมูลความเข้มข้น PM_{2.5} จากภาพประกอบ 44 พบว่า ข้อมูล AOD ณ ตำแหน่งสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน บริเวณภาคเหนือ แต่ละสถานีมีรูปแบบการกระจายตัวของข้อมูลที่สอดคล้องกัน โดยข้อมูล AOD จะมีค่าเฉพาะในช่วงเวลากลางวัน คือ ตั้งแต่เวลา 08:00 – 18:00 น. (ไม่มีข้อมูลในช่วงเวลา 07:00 – 19:00 น.) ซึ่งมีค่าเฉลี่ยสูงสุดในช่วงเวลา 10.00 – 14.00 น. การศึกษาข้อมูล AOD แยก รายสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน พบว่า มีค่าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 0.21 ทั้งหมด 5 สถานี คือ ศูนย์ราชการจังหวัดเชียงใหม่ (35t) ซึ่งสอดคล้องกับค่าความเข้มข้น PM_{2.5} สูงสุด ณ ตำแหน่งสถานีเดียวกัน โรงเรียนยุพราชวิทยาลัย (36t) สถานีอุตุนิยมวิทยาลำปาง (37t) สำนักงานเทศบาลเมืองน่าน (67t) และสถานีอุตุนิยมวิทยาจังหวัดลำพูน (68t) รองลงมา คือ สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดเชียงราย (57t) สถานีอุตุนิยมวิทยาจังหวัดแพร่ (69t) อุทยานการเรียนรู้ องค์การบริหารส่วนจังหวัดพะเยา (70t) สำนักงานสาธารณสุขแม่สาย (73t) โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลบ้านสบป่าด (38t) โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลท่าสี่ (39t) การประปาส่วนภูมิภาคแม่เกาะ (40t) สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัดแม่ฮ่องสอน (58t) และโรงพยาบาลเฉลิมพระเกียรติ (75t) เท่ากับ 0.20, 0.19, 0.19, 0.18, 0.17, 0.17, 0.17, 0.15 และ 0.08 ตามลำดับ แต่แนวโน้มของข้อมูล AOD รายชั่วโมงระหว่างวันของทั้ง 3 แบบมีความสอดคล้องกับข้อมูลความเข้มข้น PM_{2.5} น้อยกว่าข้อมูลแบบรายเดือน การผันแปรระหว่างวันของข้อมูลสภาพอุตุนิยมวิทยา ราย 6 ชั่วโมง จาก ECMWF บริเวณพื้นที่ภาคเหนือ ดังภาพประกอบ 45 พบว่า ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ มีค่าสูงสุดในเวลา 07:00 น. รองลงมาคือ 01:00, 19:00 และค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสุดในเวลา 13:00 น. ค่าเฉลี่ยความกดอากาศ มีค่าสูงสุดในเวลา 07:00 น. รองลงมาคือเวลา 01:00, 13:00 และ 19:00 น. ส่วนค่าเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศมีค่าสูงสุดในเวลา 13:00 น. รองลงมาคือ 19:00, 01:00 และต่ำสุดในเวลา 07:00 น. และค่าเฉลี่ยความเร็วลมมีค่าสูงสุดในเวลา 19:00 น. รองลงมาคือ 13:00, 01:00 และมีค่าต่ำสุดในเวลา 07:00 น.

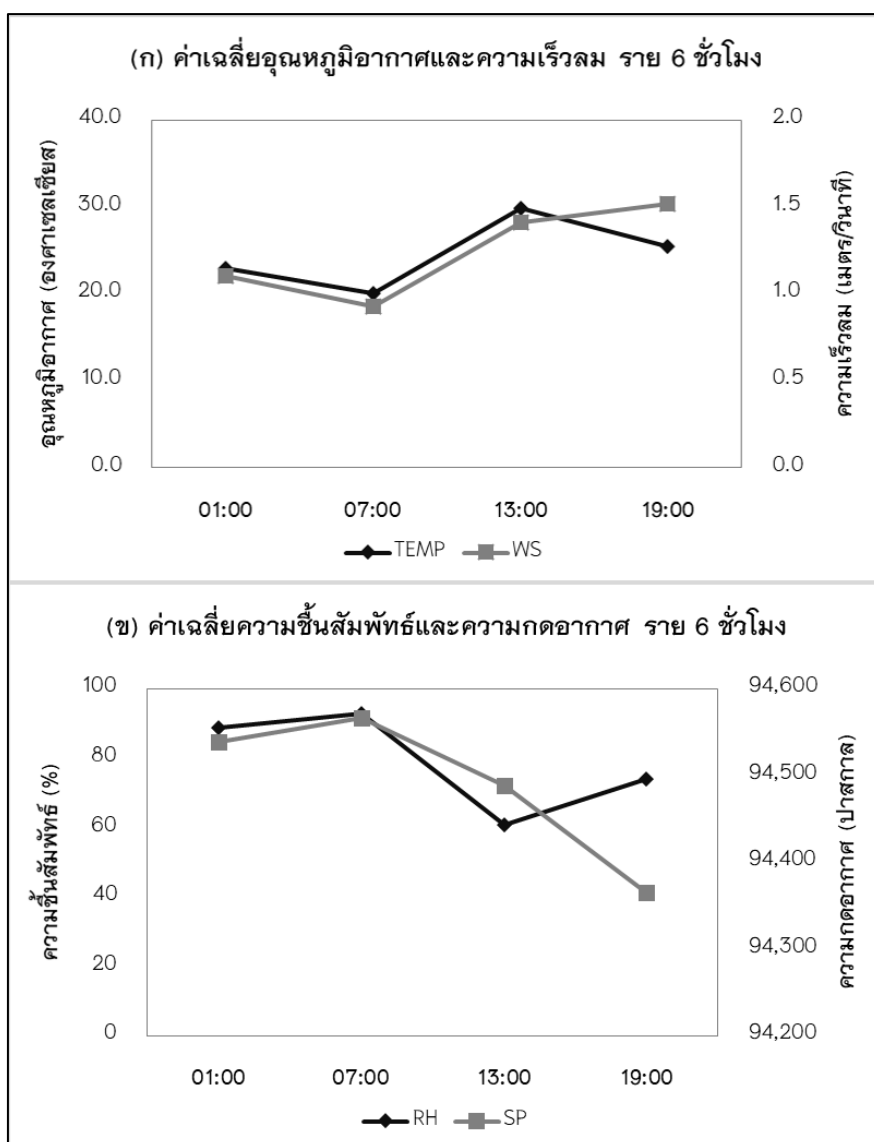
จากผลลัพธ์การศึกษาความผันแปรของข้อมูลในเชิงเวลาและเชิงพื้นที่ ซึ่งพบว่า ความเข้มข้น PM_{2.5} ในแต่ละช่วงเวลามีผลเนื่องมาจากแหล่งกำเนิดที่เกิดขึ้นจากบริเวณโดยรอบ เช่น สนามบินและโรงงานไฟฟ้า ริมถนน และพื้นที่ป่าไม้ เป็นต้น รวมถึงลักษณะภูมิประเทศ โดยพื้นที่ราบขนาดกว้างจะมีการแพร่กระจายของฝุ่นละอองในอากาศได้ดี จึงทำให้ความเข้มข้นของ PM_{2.5} ที่น้อยกว่าสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินที่ติดตั้งในพื้นที่อื่นๆ ส่วนช่วงเย็นตั้งแต่

เวลา 19:00 – 23:00 น. ที่มีความเข้มข้น PM2.5 สูงทุกสถานี ซึ่งอาจเกิดจากสภาพอากาศในพื้นที่ โดยความกดอากาศและอุณหภูมิมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนความชื้นสัมพัทธ์และความเร็วลมมีค่าลดลงทำให้ความสามารถในการแพร่กระจายลดลง จากผลการศึกษาเบื้องต้นสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลทั้งหมดที่ใช้ในการศึกษาการประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 มีความสอดคล้องกันทั้งในเชิงพื้นที่และเชิงเวลา นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูลความเข้มข้น PM2.5 กับแต่ละข้อมูลด้วยวิธีการจับคู่ข้อมูล ณ ตำแหน่งและเวลาเดียวกัน ในหัวข้อถัดไปนี้





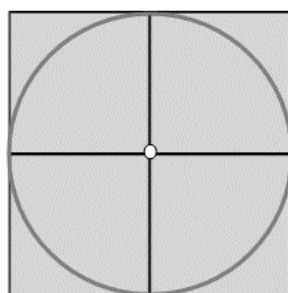
ภาพประกอบ 44 การผันแปรระหว่างวันของข้อมูล AOD



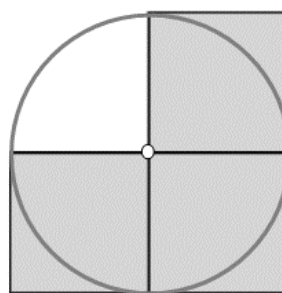
ภาพประกอบ 45 การผันแปรระหว่างวันของ (ก) ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิอากาศและความเร็วลม และ (ข) ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์และความกดอากาศ ราย 6 ชั่วโมง จาก ECMWF

4.2 จำนวนข้อมูลที่ได้จากการจับคู่ด้วยวิธี Spatio – Temporal Collocation Method

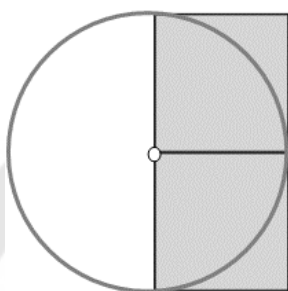
ผลจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล AOD จากดาวเทียม Himawari-8 กับ ข้อมูลความเข้มข้น PM2.5 จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน กรมควบคุมมลพิษ พบว่า มีความสัมพันธ์ r^2 เท่ากับ 0.29 โดยผลจากการคำนวณค่าเฉลี่ยภายในพื้นที่รัศมี 5 กิโลเมตร จะมี จำนวนข้อมูลตั้งแต่ 1 - 4 จุดภาพ (ดังภาพประกอบ 46) และแบ่งข้อมูลเป็น 3 รูปแบบเพื่อ วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูล ได้แก่ 1) ค่าเฉลี่ย AOD ที่คำนวณจากจุดภาพตั้งแต่ 1 จุดภาพ ไปจนถึง 4 จุดภาพ 2) ค่าเฉลี่ย AOD ที่คำนวณจากจุดภาพตั้งแต่ 2 จุดภาพ ไปจนถึง 4 จุดภาพ เท่านั้น และ 3) ค่าเฉลี่ย AOD ที่คำนวณจากจุดภาพเท่ากับ 4 จุดภาพเท่านั้น ผลลัพธ์ ภาพประกอบ 47 พบว่า แบบ 1 - 4 จุดภาพ มีความเหมาะสมมากที่สุด จากนั้นทำการจัดเตรียม ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมด ที่ความละเอียดเชิงพื้นที่เท่ากับ 5×5 กิโลเมตร และคำนวณ ค่าเฉลี่ยภายในพื้นที่รัศมี 5 กิโลเมตรจากตำแหน่งสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินด้วยรูปแบบดังกล่าว และจับคู่ข้อมูลที่ตำแหน่งและเวลาที่ตรงกัน โดยผลจากการจับคู่ทำให้ได้จำนวนชุดข้อมูลทั้งหมด จำนวน 124 ข้อมูล โดยแบ่งข้อมูลเป็น 2 ชุด คือ 1) ชุดสร้างสมการ จำนวน 87 ชุดข้อมูล คิดเป็น 70% และ 2) ชุดทดสอบ จำนวน 37 ชุดข้อมูล ซึ่งมีสถิติค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด และค่าเฉลี่ยดังตาราง 13 พบว่า ค่าเฉลี่ยความเข้มข้น PM2.5 เท่ากับ 60.70 มคก./ลบ.ม. ค่าเฉลี่ย AOD เท่ากับ 0.55 ค่าเฉลี่ย NDVI เท่ากับ 0.40 ความสูงโดยเฉลี่ยของพื้นที่ เท่ากับ 307.31 เมตร และมีสภาพอากาศ บริเวณภาคเหนือ ประกอบด้วย ค่าเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์ เท่ากับ 35.69% ความกดอากาศ เท่ากับ 94,407 ปาสกาล อุณหภูมิอากาศ เท่ากับ 32.96 องศาเซลเซียส และค่าเฉลี่ยความเร็วลม เท่ากับ 1.61 เมตร/วินาที



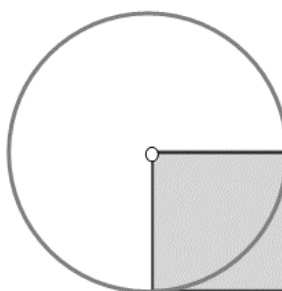
(ก) แบบ 4 จุดภาพ



(ข) แบบ 3 จุดภาพ

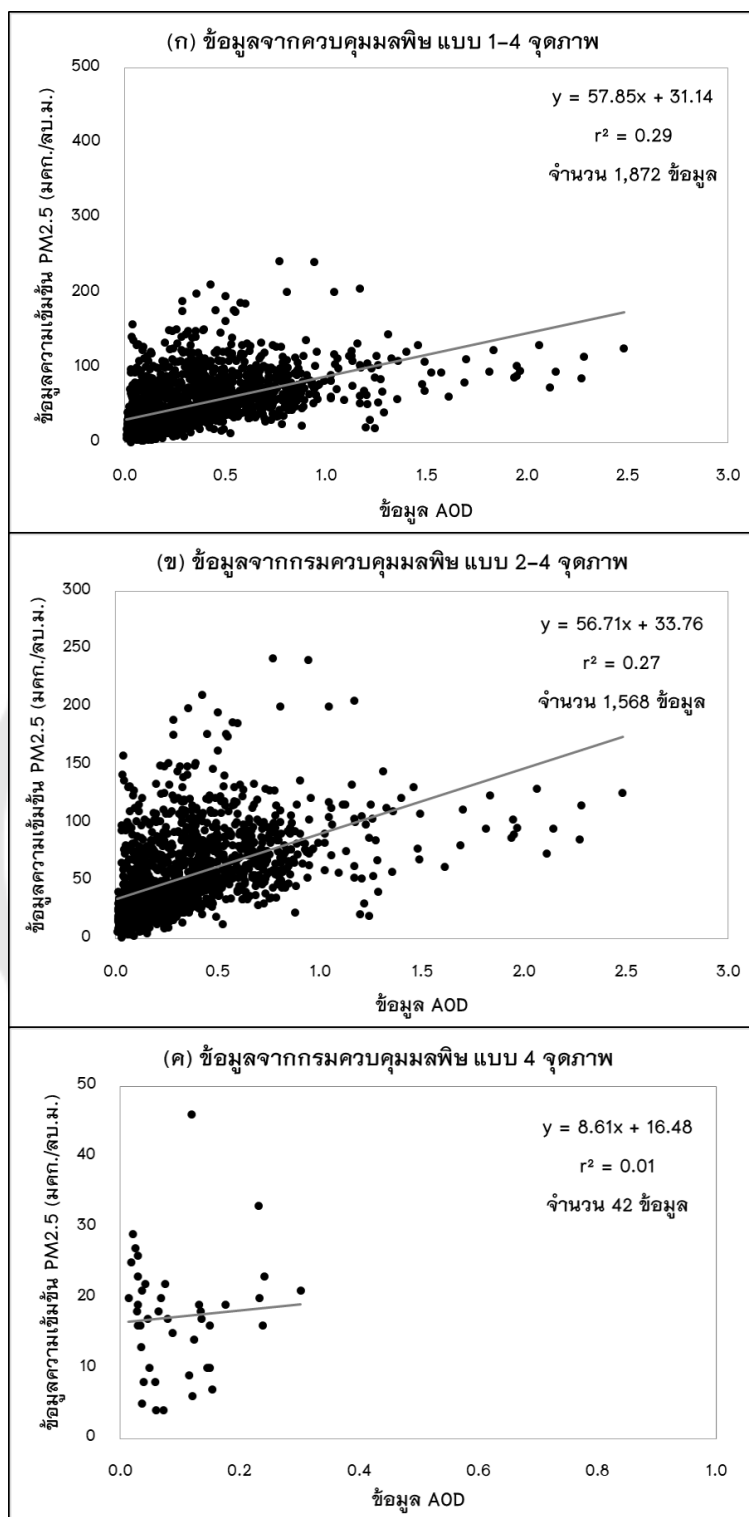


(ค) แบบ 2 จุดภาพ



(ง) แบบ 1 จุดภาพ

ภาพประกอบ 46 การคำนวณค่าเฉลี่ย AOD ในพื้นที่รัศมี 5 กิโลเมตรจากสถานีตรวจวัด
ภาคพื้นดิน โดยมี (ก) 4 จุดภาพ (ข) 3 จุดภาพ (ค) 2 จุดภาพ และ (ง) 1 จุดภาพ



ภาพประกอบ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลความเข้มข้น PM2.5 จากดาวเทียมและค่าเฉลี่ย AOD (ก) แบบ 1 (ข) แบบ 2 และ (ค) แบบ 3

ตาราง 13 สถิติของข้อมูลที่ได้จากการจับคู่

ข้อมูล	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	ค่าเฉลี่ย
ความเข้มข้น PM2.5 (หน่วย: มคก./ลบ.ม.)	134.00	12.00	60.70
AOD (ไม่มีหน่วย)	2.48	0.02	0.55
NDVI (ไม่มีหน่วย)	0.64	0.10	0.40
DEM (หน่วย: เมตร)	371.11	235.04	307.31
ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	62.03	17.74	35.69
ความกดอากาศ (หน่วย: ปาสกาล)	96,542.90	93,269.60	94,407.99
อุณหภูมิอากาศ (หน่วย: องศาเซลเซียส)	38.69	26.60	32.96
ความเร็วลม (หน่วย: เมตร/วินาที)	4.63	0.01	1.61

4.3 การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MLR และวิธี PCA – GRNN

จากการประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 โดยใช้ข้อมูลความเข้มข้น PM2.5 จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน และข้อมูลดาวเทียม ได้แก่ ข้อมูล AOD NDVI DEM ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ประกอบด้วย ความกดอากาศ อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม ด้วย 2 วิธี ดังนี้

4.3.1 Multiple Linear Regression (MLR)

การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MLR จะเริ่มจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในตาราง 14 ซึ่งใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient: r) ที่มีค่าตั้งแต่ -1 ถึง 1 โดยค่าเข้าใกล้ 1 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ในเชิงบวกหรือแปรผันตาม และเข้าใกล้ -1 เป็นความสัมพันธ์ในเชิงลบหรือแปรผกผัน ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ พบว่า ข้อมูลความเข้มข้น PM2.5 มีความสัมพันธ์กับข้อมูล AOD สูงที่สุดด้วยค่า r เท่ากับ 0.62 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ในเชิงบวก โดยที่ค่าความเข้มข้น PM2.5 มีค่าสูง ค่า AOD ก็จะมีค่าสูงตาม รองลงมาคือข้อมูลอุณหภูมิอากาศ มีความสัมพันธ์เชิงบวก ด้วย r เท่ากับ 0.56 นอกจากนี้ข้อมูล PM2.5 ยังมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับข้อมูล DEM และ WS แต่มีความสัมพันธ์ในเชิงลบกับข้อมูล NDVI RH และ SP อีกทั้งผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นหลายตัวแปรระหว่างต้นแปรต้น คือ ข้อมูล AOD, DEM, NDVI, ความชื้นสัมพัทธ์ (RH), ความกดอากาศ (SP), อุณหภูมิอากาศ (TEMP) และความเร็วลม (WS) กับตัวแปรตาม คือ ความเข้มข้น PM2.5 ดังตาราง 15 โดยพบว่า ความเข้มข้น PM2.5 มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อค่า AOD DEM ความกดอากาศ และ

อุณหภูมิอากาศมีค่าสูงขึ้น หรือมีความสัมพันธ์ในเชิงบวก แต่ NDVI ความชื้นสัมพัทธ์ และ ความเร็วลมจะมีค่าลดลง หรือมีความสัมพันธ์ในเชิงลบ

ตาราง 14 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล

	PM2.5	AOD	DEM	NDVI	RH	SP	TEMP	WS
PM2.5	1.00							
AOD	0.62	1.00						
DEM	0.07	0.10	1.00					
NDVI	-0.34	-0.47	0.18	1.00				
RH	-0.49	-0.11	0.21	0.17	1.00			
SP	-0.05	-0.16	-0.86	0.09	-0.18	1.00		
TEMP	0.56	0.39	-0.24	-0.12	-0.67	0.14	1.00	
WS	0.01	0.05	0.05	-0.04	-0.15	-0.11	0.09	1.00

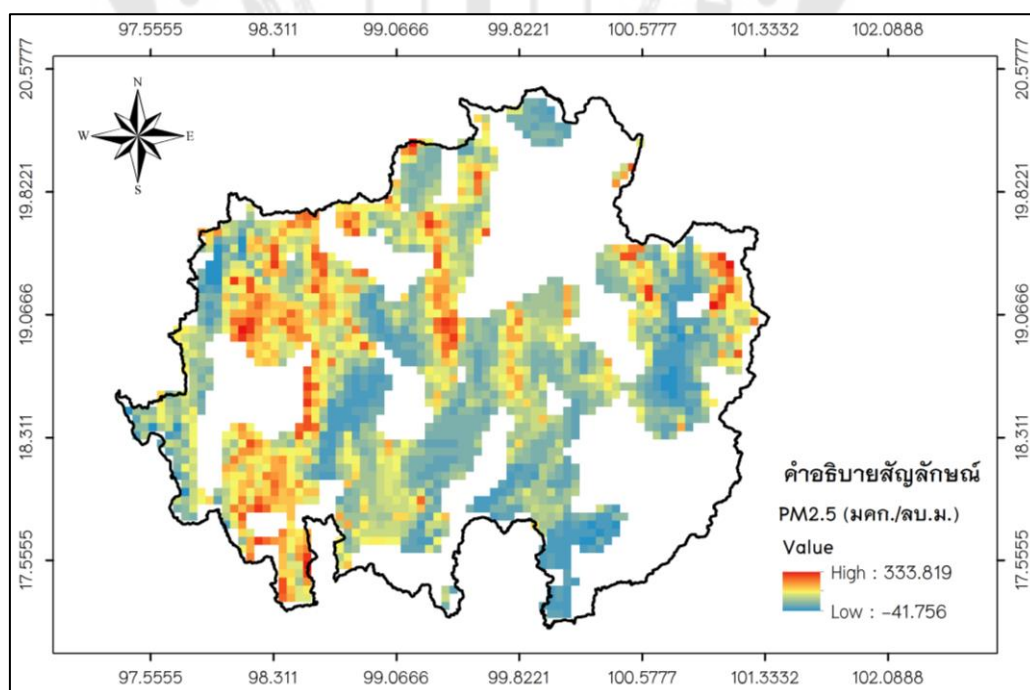
ตาราง 15 ผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นแบบหลายตัวแปร (MLR)

	ค่าสัมประสิทธิ์	r ²
Intercept	-794.33	-
AOD	27.58	0.39
DEM	0.23	0.01
NDVI	-33.58	0.12
RH	-1.04	0.24
SP	0.01	0.00
TEMP	1.80	0.32
WS	-2.24	0.00

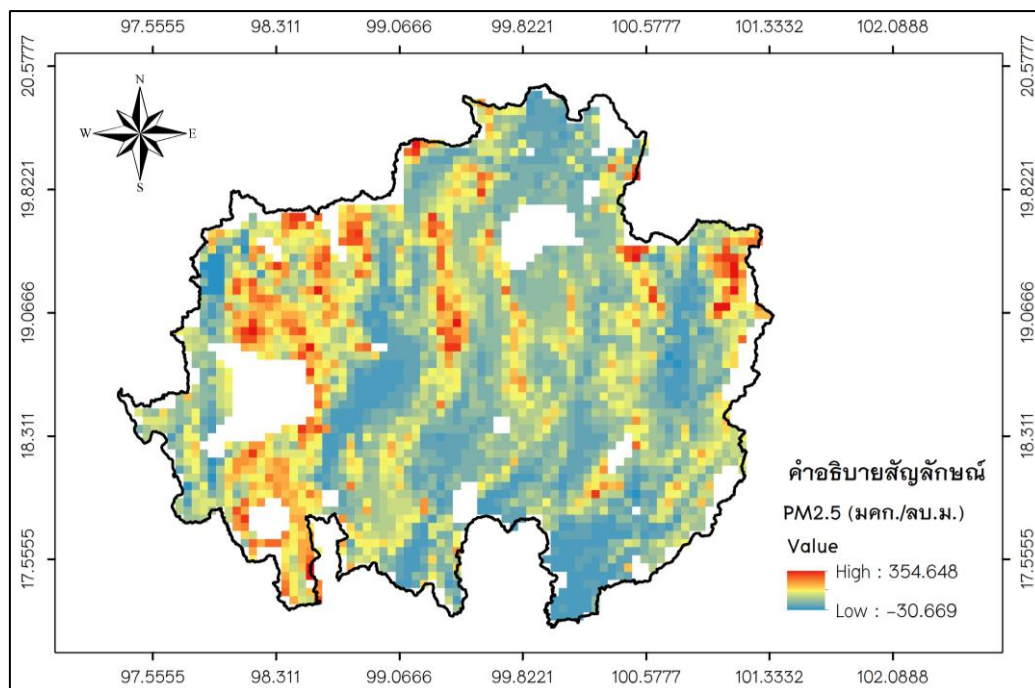
นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ สามารถเขียนเป็นสมการสำหรับประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MLR ดังนี้

$$\text{PM2.5(MLR)} = -794.33 + 27.58\text{AOD} + 0.23\text{DEM} - 33.58\text{NDVI} - 1.04\text{RH} + 0.01\text{SP} + 1.80\text{TEMP} - 2.24\text{WS}$$

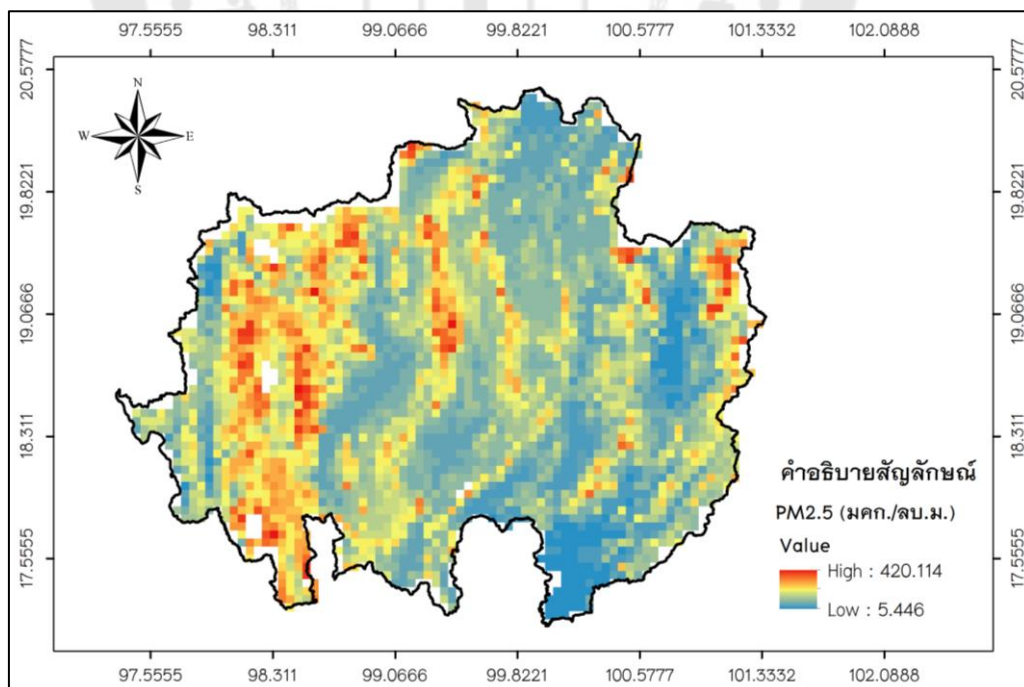
ผลลัพธ์จากการประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ในภาพประกอบ 48 ถึงภาพประกอบ 52 แสดงตัวอย่างผลลัพธ์ในวันที่มีค่าความเข้มข้น PM2.5 สูงมากถึงต่ำมาก จำนวน 5 วัน คือ วันที่ 23 มกราคม พ.ศ. 2561, 17 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561, 6 มีนาคม พ.ศ. 2561, 12 เมษายน พ.ศ. 2561 และวันที่ 27 ธันวาคม พ.ศ. 2561 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 69.83, 92.35, 114.26, 78.51 และ 73.05 มคก./ลบ.ม. ตามลำดับ ผลลัพธ์ที่ได้ด้วยวิธี MLR มีค่าต่ำสุดเป็นค่าลบ และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 420.11 มคก./ลบ.ม. ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าความเข้มข้น PM2.5 จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน และเมื่อสร้างเป็นแผนที่ความเข้มข้น PM2.5 ในรูปแบบดัชนีคุณภาพอากาศ (AQI) โดยมีการแบ่งช่วงเป็น 5 ระดับตามกรมควบคุมมลพิษ ดังผลลัพธ์ในภาพประกอบ 53 ถึงภาพประกอบ 57 จะเห็นได้ว่าความเข้มข้น PM2.5 ที่ประมาณค่าได้มีค่าค่อนข้างสูงหรืออยู่ในระดับมีผลกระทบต่อสุขภาพ ทำให้การแสดงผลบนแผนที่ส่วนใหญ่เป็นสีแดง



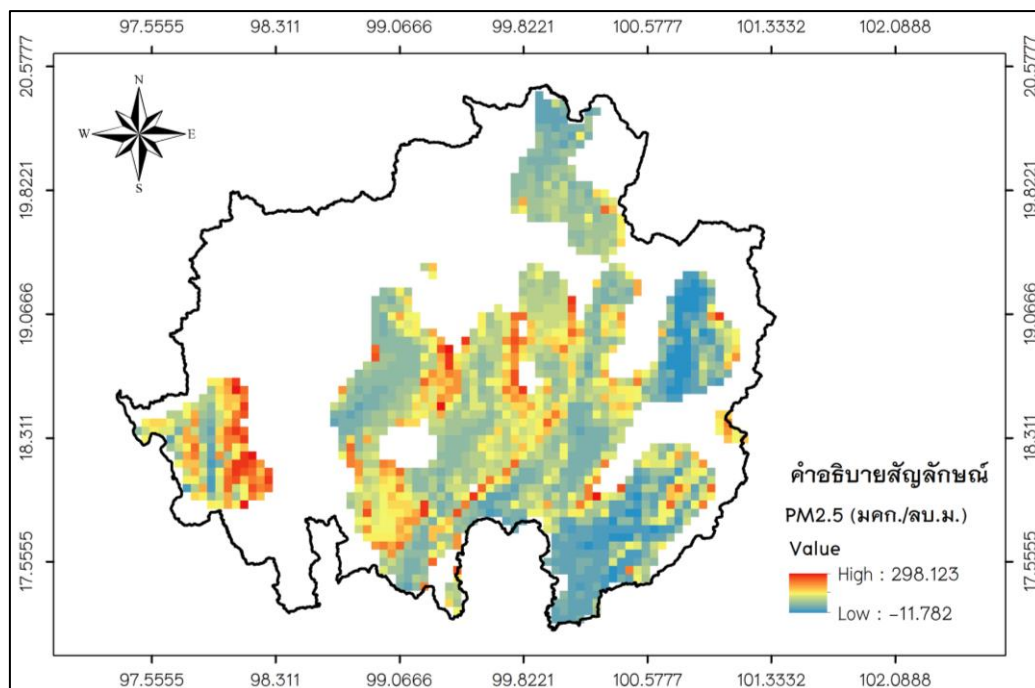
ภาพประกอบ 48 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MLR
ในวันที่ 23 เดือนมกราคม ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.



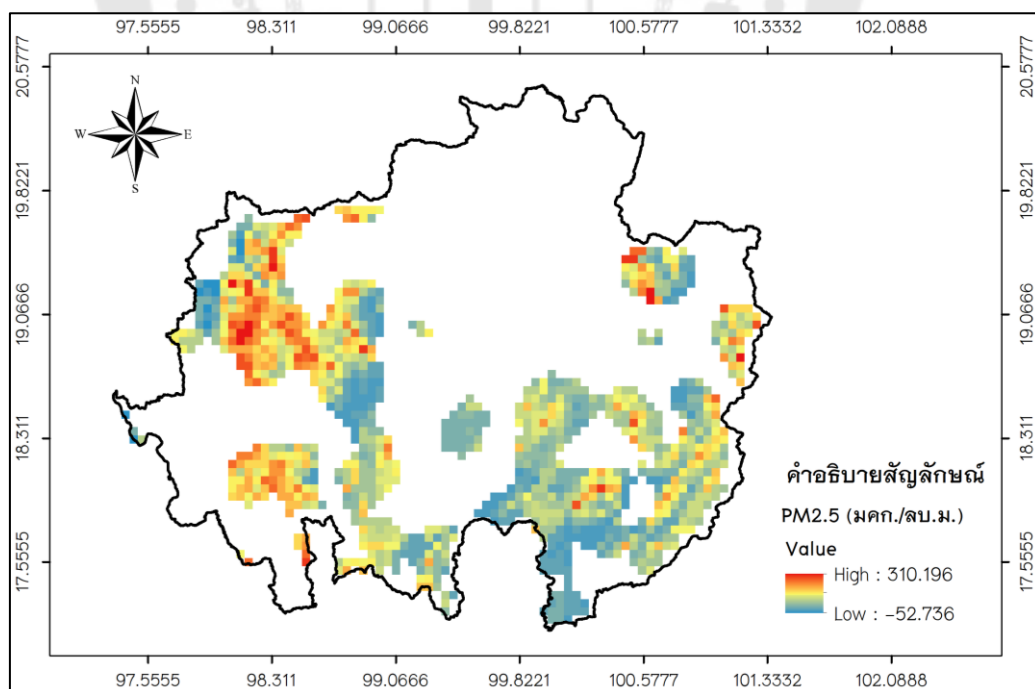
ภาพประกอบ 49 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MLR
ในวันที่ 17 เดือนกุมภาพันธ์ ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.



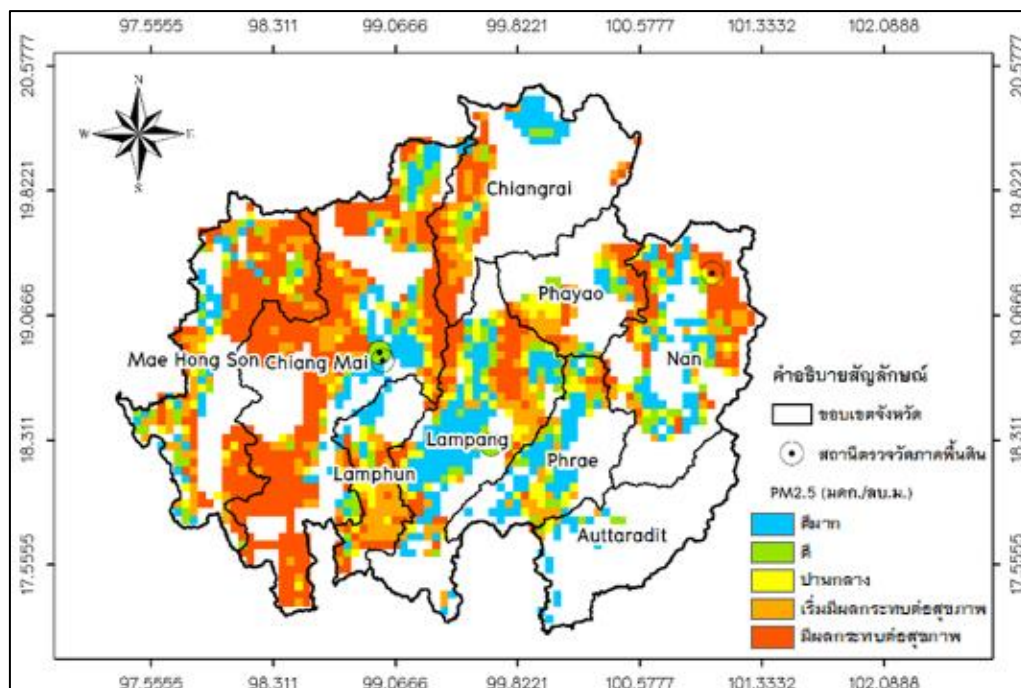
ภาพประกอบ 50 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MLR
ในวันที่ 6 เดือนมีนาคม ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.



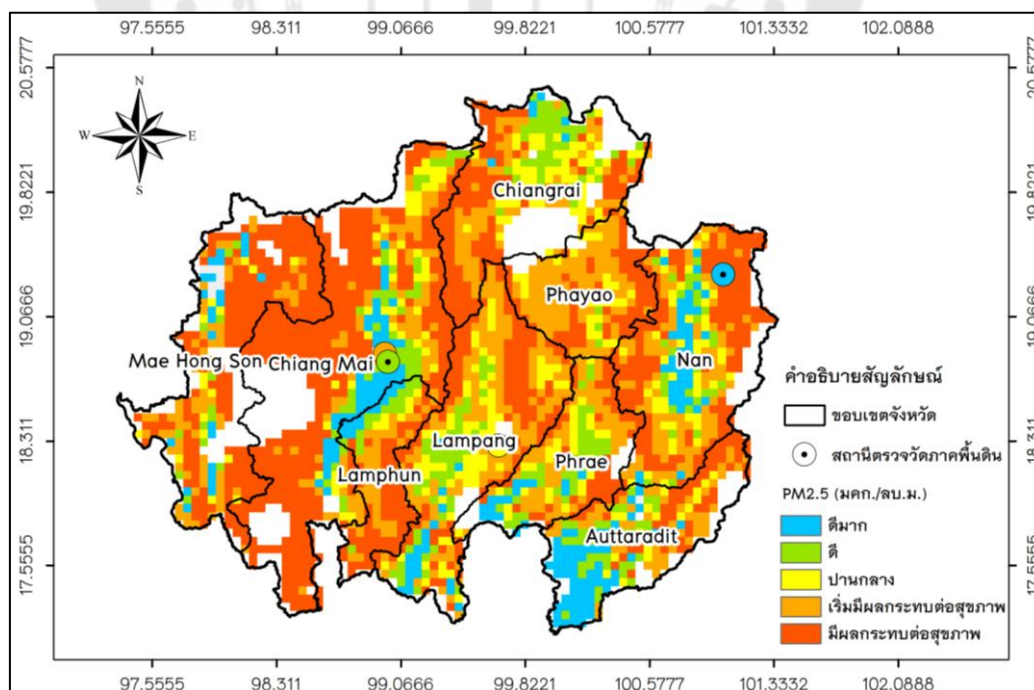
ภาพประกอบ 51 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MLR
ในวันที่ 12 เดือนเมษายน ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.



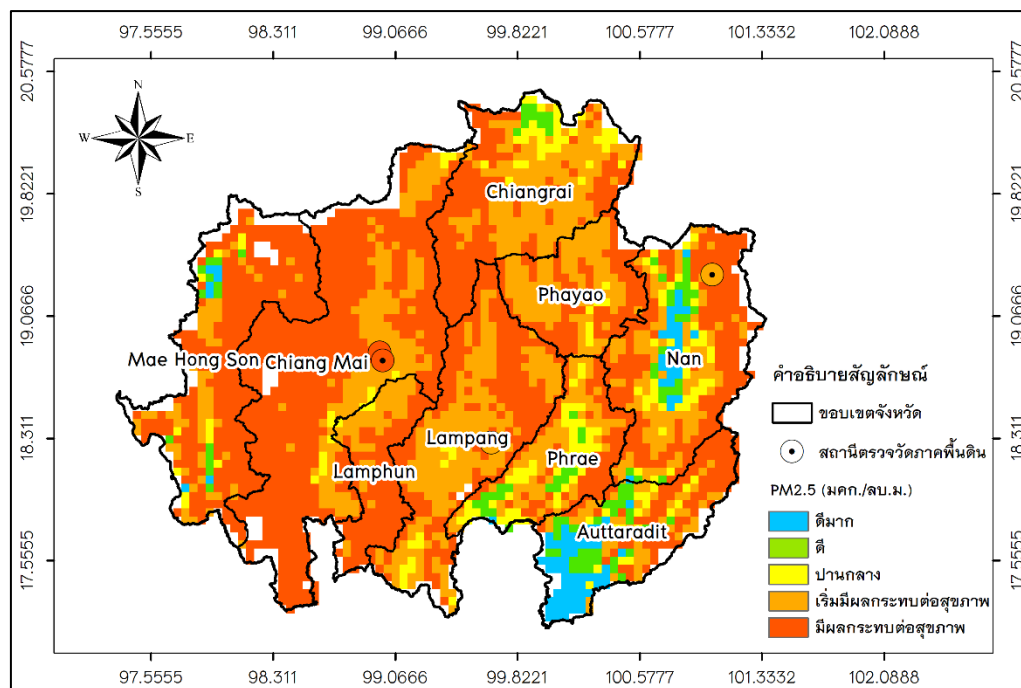
ภาพประกอบ 52 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MLR
ในวันที่ 27 เดือนธันวาคม ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.



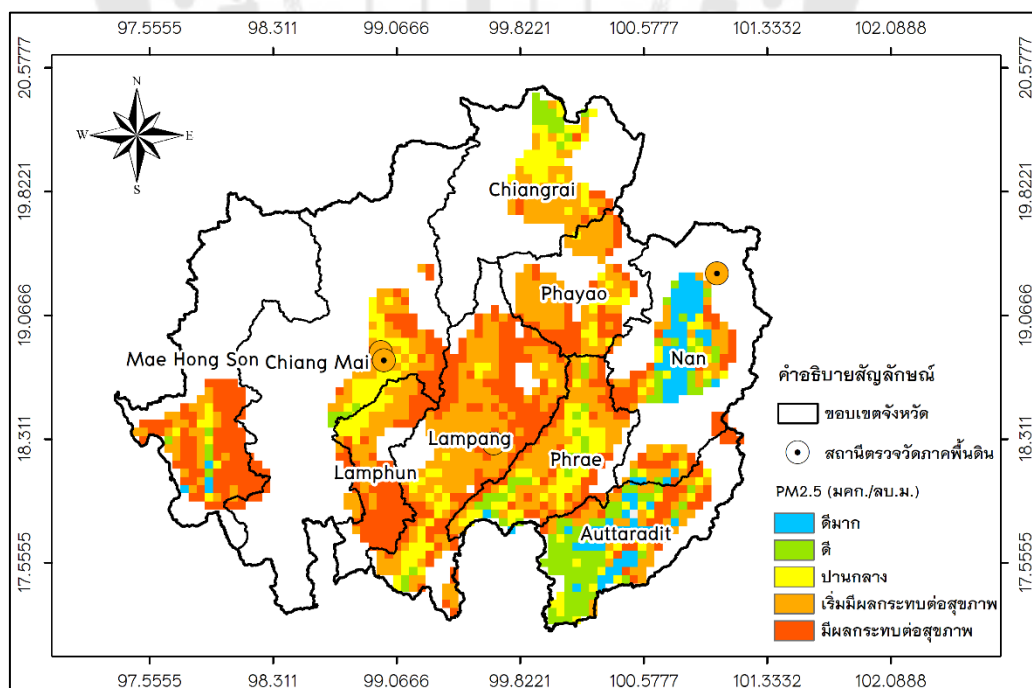
ภาพประกอบ 53 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MLR ในรูปแบบ AQI ในวันที่ 23 เดือนมกราคม ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.



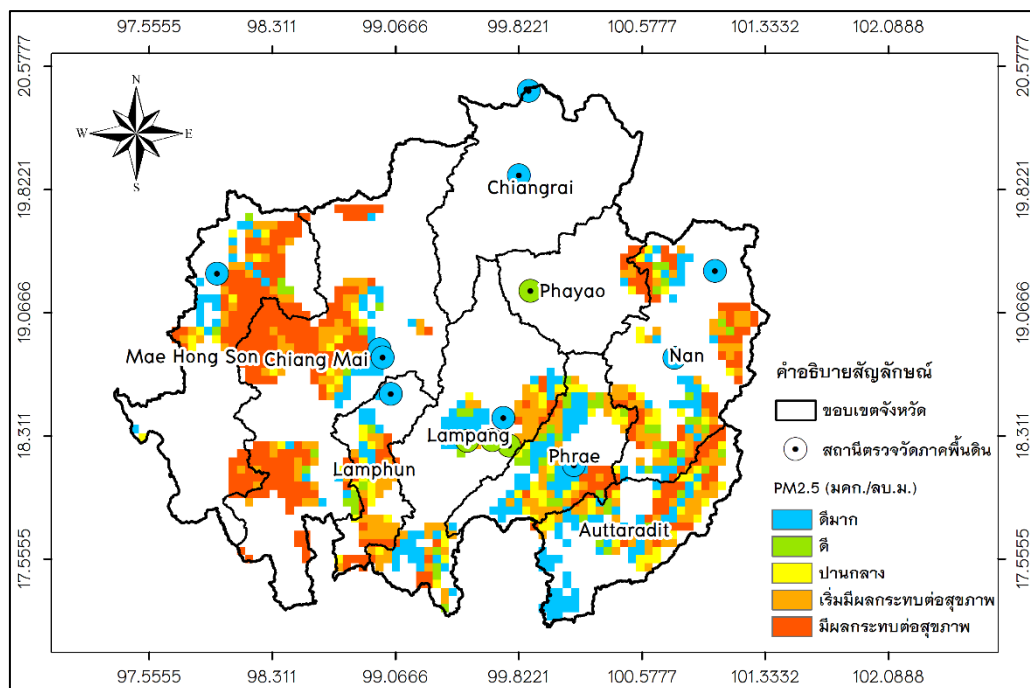
ภาพประกอบ 54 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MLR ในรูปแบบ AQI ในวันที่ 17 เดือนพฤษภาคม ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.



ภาพประกอบ 55 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MLR ในรูปแบบ AQI ในวันที่ 6 เดือนมีนาคม ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.



ภาพประกอบ 56 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MLR ในรูปแบบ AQI ในวันที่ 12 เดือนเมษายน ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.



ภาพประกอบ 57 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MLR ในรูปแบบ AQI ในวันที่ 27 เดือนธันวาคม ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.

4.3.2 Principal Component Analysis - General Regression Neural Network (PCA - GRNN)

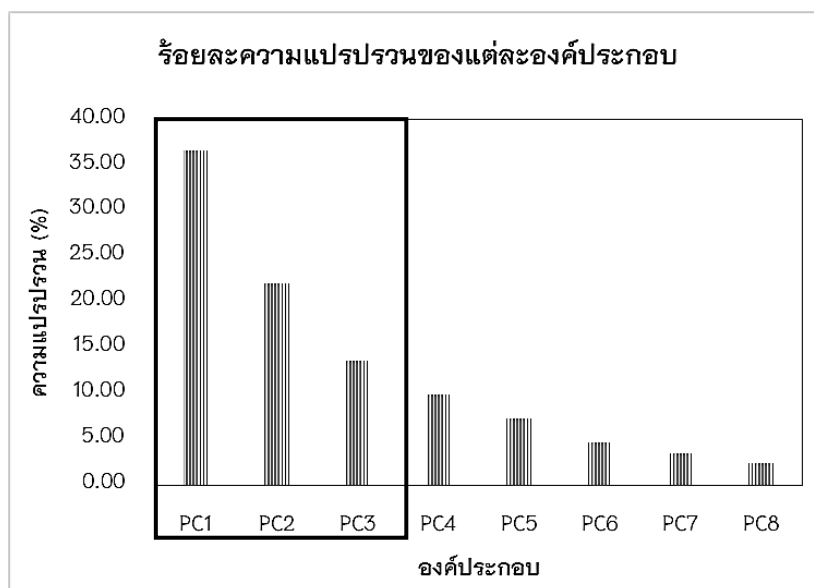
การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี PCA - GRNN เริ่มจากขั้นตอนการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของข้อมูลหรือ PCA ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแต่ละตัวแปรในรูปแบบเมตริกซ์สหสัมพันธ์ และวิเคราะห์ความแปรปรวนของแต่ละองค์ประกอบเพื่อลดมิติของข้อมูล ผลการทดสอบการกำหนดความแปรปรวนที่จะนำมาใช้ในการพิจารณาองค์ประกอบหลักที่สำคัญ โดยกำหนดช่วงความแปรปรวนในการทดสอบ คือ 0.3 – 1.0 (step ที่ละ 0.2) ผลลัพธ์ในตาราง 16 พบว่า ค่าความแปรปรวนเท่ากับ 0.9 เป็นค่าที่ให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องมากที่สุด โดยมีความคลาดเคลื่อน RMSE เท่ากับ 17.76 และ r^2 เท่า 0.68 ซึ่งสอดคล้องกับงานของวิจัยของ Zang et al. (2018) ดังนั้น ในขั้นตอนการวิเคราะห์ PCA จึงมีองค์ประกอบหลักทั้งหมด 3 องค์ประกอบ คือ PC1, PC2 และ PC3 และผลลัพธ์ในตาราง 17 และภาพประกอบ 58 จะเห็นได้ว่า PC1 ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญ มีค่าที่อธิบายความแปรปรวน (Variance) ของข้อมูลมากที่สุด เท่ากับ 36.64% ซึ่งจากการพิจารณาปัจจัยที่มีค่าน้ำหนักมากกว่า 0.4

ตาราง 16 การทดสอบกำหนดช่วงความแปรปรวนเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบสำคัญ

วิธีที่	ความแปรปรวน	จำนวนองค์ประกอบ	RMSE	r^2
1	0.3	6	33.68	0.34
2	0.5	5	20.95	0.50
3	0.7	4	19.12	0.58
4	0.9	3	17.76	0.68

ตาราง 17 ค่าไอเกนและความแปรปรวนของทั้ง 8 องค์ประกอบ

องค์ประกอบหลัก	ค่าไอเกน	ค่าที่อธิบายความแปรปรวน (%)
PC1	2.93	36.64
PC2	1.77	22.08
PC3	1.09	13.58
PC4	0.80	9.94
PC5	0.58	7.25
PC6	0.37	4.64
PC7	0.28	3.48
PC8	0.19	2.39



ภาพประกอบ 58 ร้อยละความแปรปรวนของแต่ละองค์ประกอบ

จากตาราง 18 จะเห็นได้ว่าความเข้มข้น PM_{2.5} มีค่าเพิ่มขึ้น อุณหภูมิอากาศก็มีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าลดลง ส่วน PC2 มีความแปรปรวนเท่ากับ 22.08% แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ที่มีความสูงลดลงจะมีค่าความกดอากาศเพิ่มขึ้น และ PC3 มีความแปรปรวนเท่ากับ 13.58% โดยที่ข้อมูล AOD เพิ่มขึ้น เมื่อความเร็วลมมีค่าลดลง จากผลการวิเคราะห์ PCA ดังกล่าวจึงสรุปได้ว่าความเข้มข้น PM_{2.5} มีค่าสูงขึ้น ค่า AOD อุณหภูมิอากาศ และความกดอากาศก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนความชื้นสัมพัทธ์ ความสูง และความเร็วลมจะมีค่าแปรผันขึ้นหรือลดลง การทดสอบหาตัวแปรอิสระที่เหมาะสม คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน สำหรับกำหนดในสมการ GRNN ซึ่งการทดสอบจะใช้ชุดข้อมูลสร้างสมการและกำหนดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในช่วง 0.1 – 1.0 (step ค่าทีละ 0.1) จากนั้นเลือกค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ผลลัพธ์มีความคลาดเคลื่อน (Error) น้อยที่สุด ผลการทดสอบ พบว่า ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.6 เป็นค่าที่มีความเหมาะสมมากที่สุด ดังตาราง 19 การประมาณค่าความเข้มข้น PM_{2.5} ในวิธีการนี้ จะใช้ผลลัพธ์จาก PCA มาคำนวณในสมการ GRNN โดยมีการกำหนดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เท่ากับ 0.6 โดยผลลัพธ์จากการประมาณค่าความเข้มข้น 2.5 ในภาพประกอบ 59 ถึงภาพประกอบ 63 จำนวน 5 วัน ได้แก่ วันที่ 23 มกราคม พ.ศ. 2561 (แทนด้วยวันที่มีค่าความเข้มข้น PM 2.5 ต่ำมาก), 17 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2561 (แทนด้วยวันที่มีค่าความเข้มข้น PM 2.5 ต่ำ), 6 มีนาคม พ.ศ. 2561 (แทนด้วยวันที่มีค่า

ความเข้มข้น PM2.5 สูงมาก), 12 เมษายน พ.ศ. 2561 (แทนด้วยวันที่มีค่าความเข้มข้น PM 2.5 สูง), และวันที่ 27 ธันวาคม พ.ศ. 2561 (แทนด้วยวันที่มีค่าความเข้มข้น PM2.5 ปานกลาง) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 29.91, 42.75, 50.74, 51.68 และ 35.11 มคก./ลบ.ม. ตามลำดับ โดยแสดงถึงประสิทธิภาพของวิธี PCA – GRNN ที่สามารถประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ได้ตั้งแต่วันที่มีความเข้มข้น PM2.5 สูงถึงค่าความเข้มข้น PM2.5 ต่ำ และสร้างผลลัพธ์เป็นแผนที่การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี PCA - GRNN ดังภาพประกอบ 64 ถึงภาพประกอบ 68 จะเห็นได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความสอดคล้องกับข้อมูลความเข้มข้น PM2.5 ณ สถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน จากกรมควบคุมมลพิษ โดยมีพื้นที่ที่มีค่าสูง (สีแดง) ตั้งแต่เดือนมกราคม – เมษายน แต่ในเดือนธันวาคมพื้นที่ส่วนใหญ่มีคุณภาพอากาศในระดับดีมากถึงดี (สีฟ้า – สีเขียว) ยกเว้นบางพื้นที่ในจังหวัดอุดรธานีที่มีค่าอยู่ในระดับสีส้ม

ตาราง 18 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA)

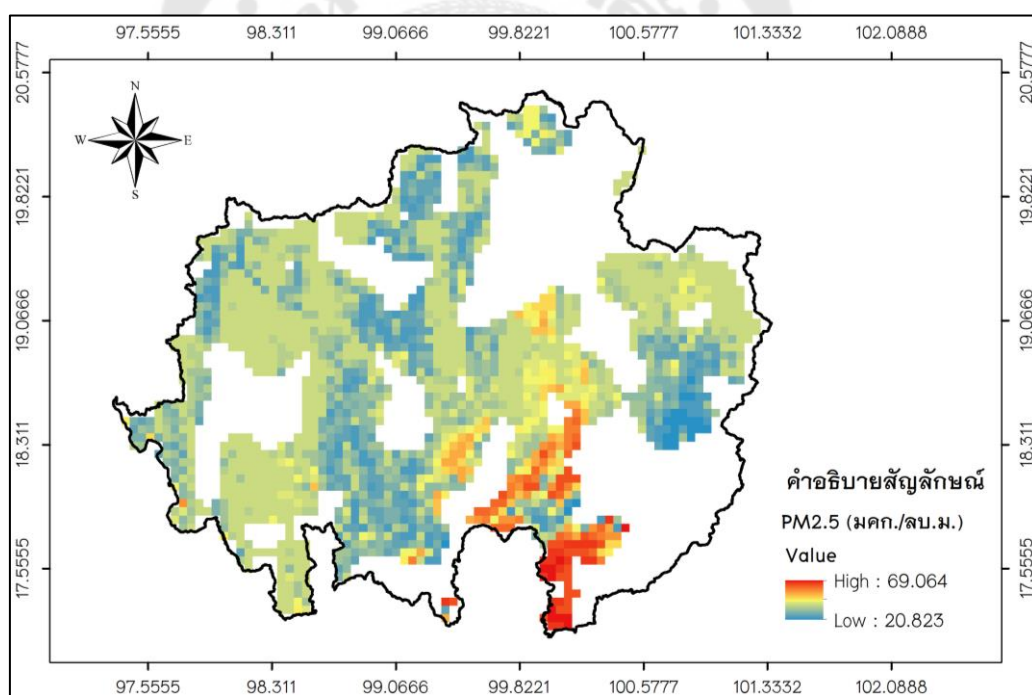
	PC1	PC2	PC3
AOD	0.35	-0.32	0.43
DEM	-0.20	-0.60	-0.10
NDVI	-0.34	-0.27	-0.14
RH	-0.45	0.00	0.33
SP	0.15	0.62	0.04
TEMP	0.48	-0.19	-0.09
WS	0.18	-0.05	-0.79
PM2.5	0.48	-0.19	0.23

ตาราง 19 การทดสอบหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เหมาะสม

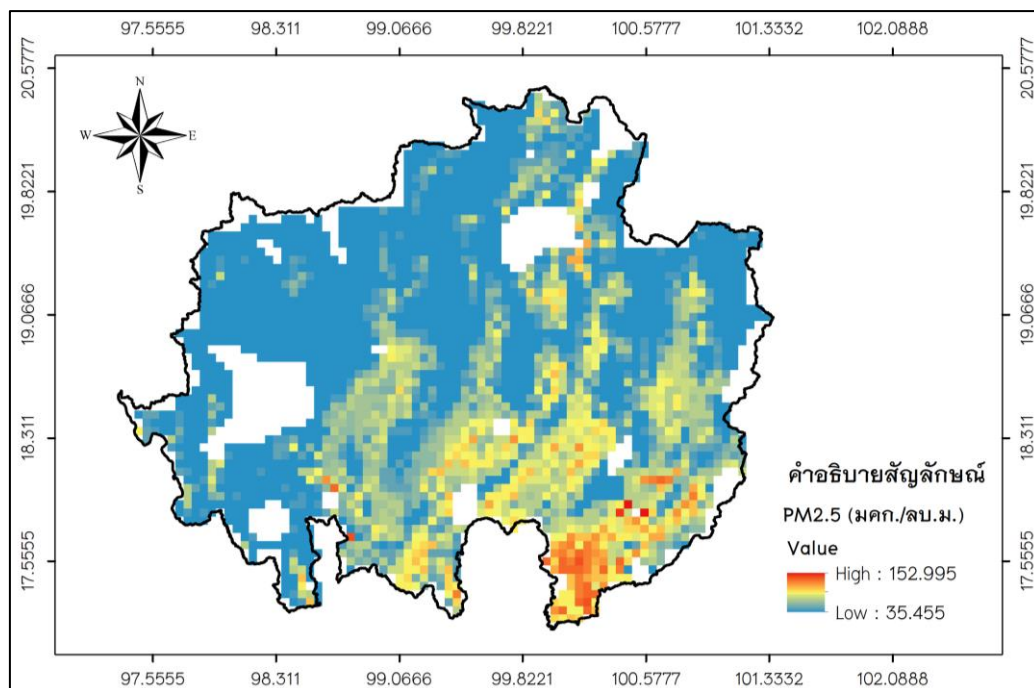
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ความคลาดเคลื่อน
0.1	4.12
0.2	4.36

ตาราง 19 (ต่อ)

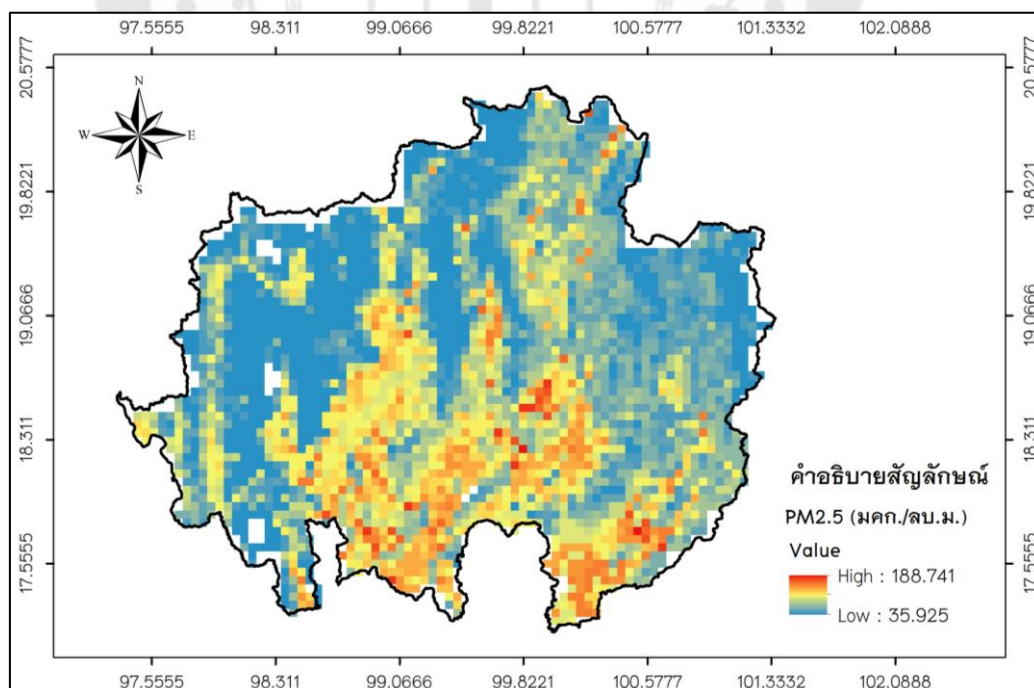
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ความคลาดเคลื่อน
0.3	3.72
0.4	3.30
0.5	3.15
0.6	3.13
0.7	3.16
0.8	3.21
0.9	3.27
1	3.35



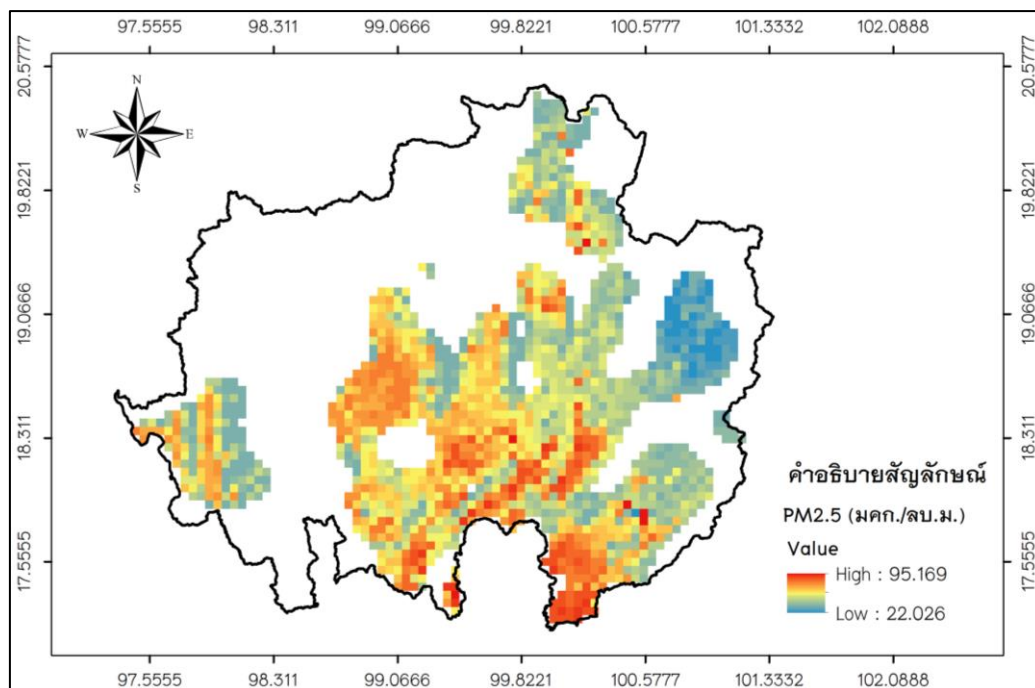
ภาพประกอบ 59 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี PCA - GRNN
ในวันที่ 23 เดือนมกราคม ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.



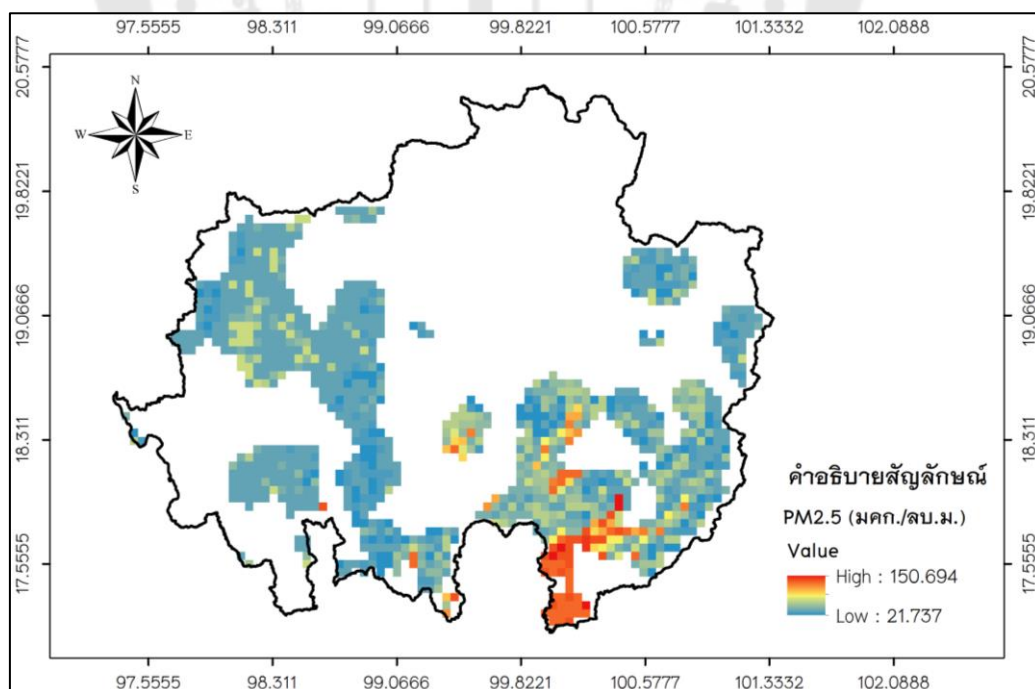
ภาพประกอบ 60 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี PCA - GRNN
ในวันที่ 17 เดือนกุมภาพันธ์ ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.



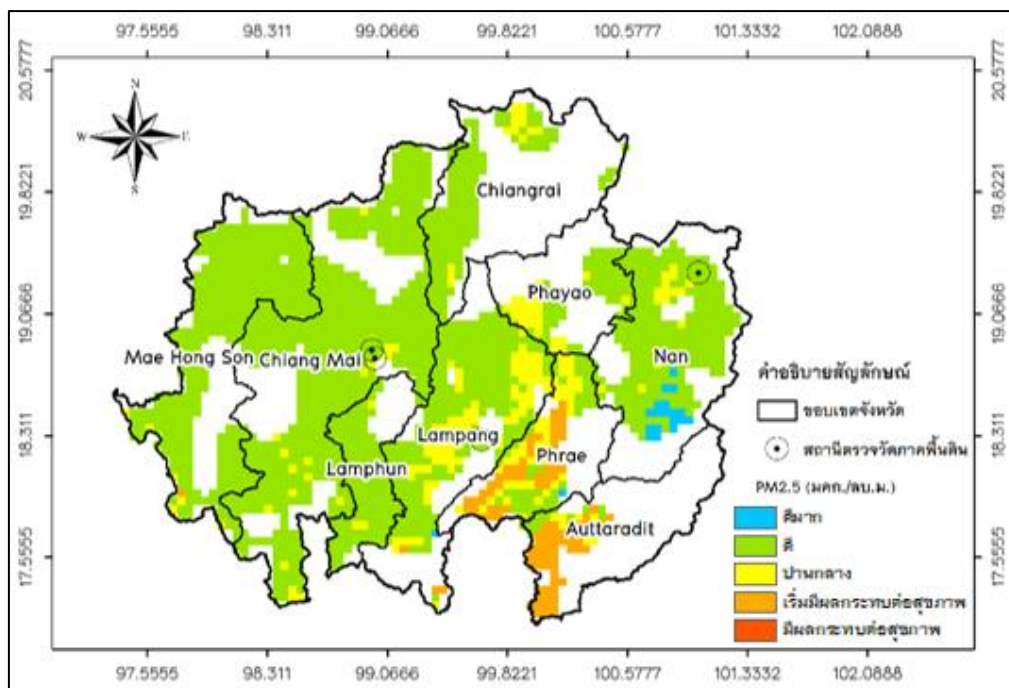
ภาพประกอบ 61 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี PCA - GRNN
ในวันที่ 6 เดือนมีนาคม ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.



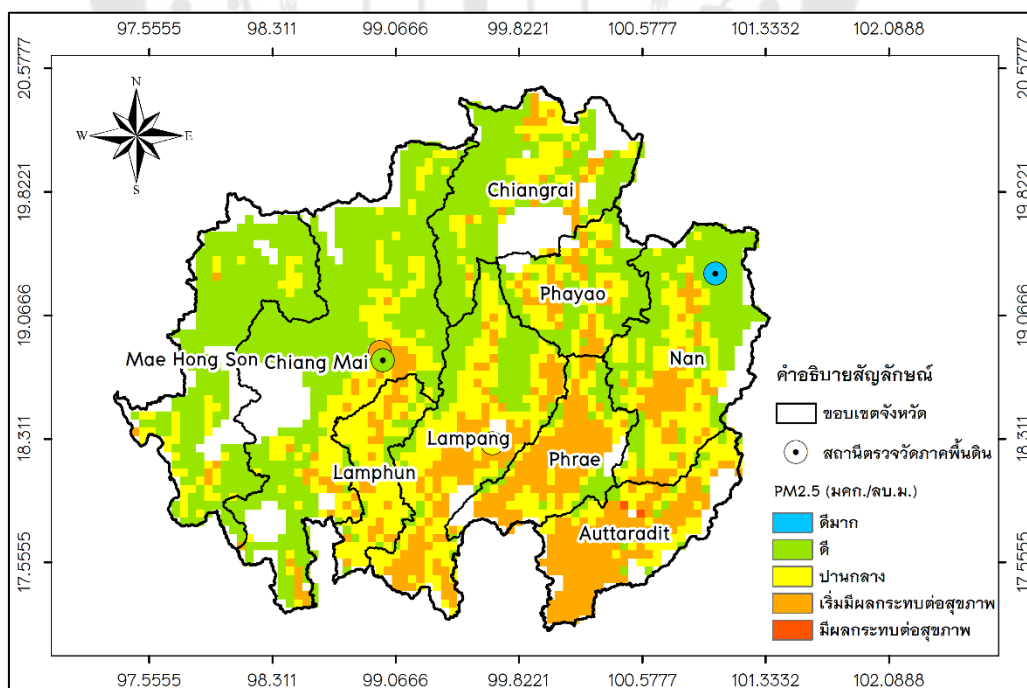
ภาพประกอบ 62 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี PCA - GRNN
ในวันที่ 12 เดือนเมษายน ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.



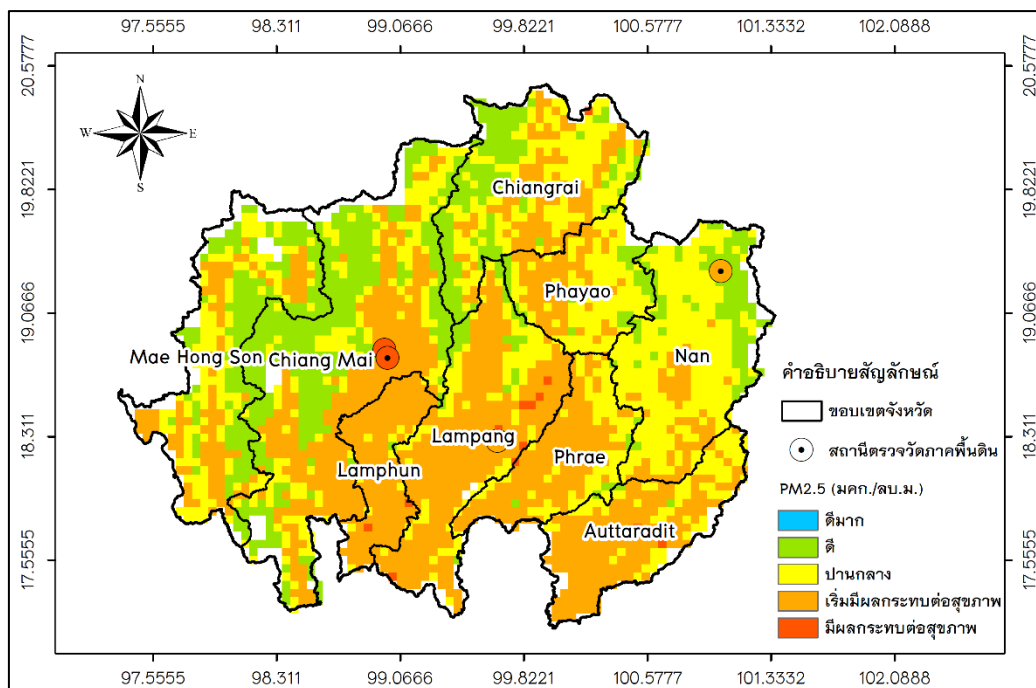
ภาพประกอบ 63 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี PCA - GRNN
ในวันที่ 27 เดือนธันวาคม ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.



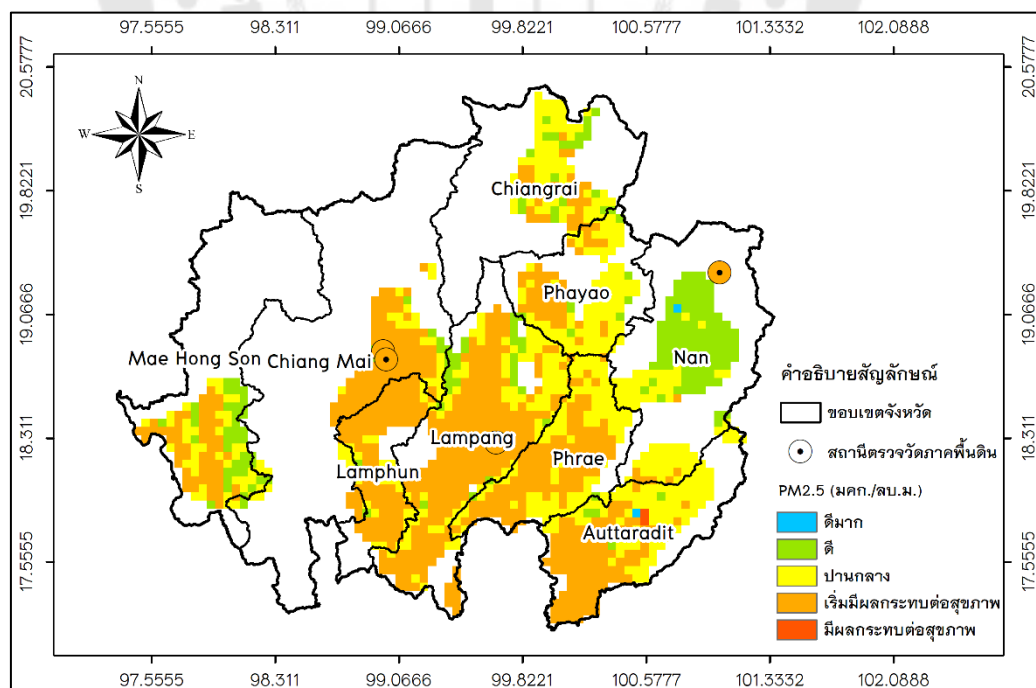
ภาพประกอบ 64 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี PCA - GRNN
ในรูปแบบ AQI ในวันที่ 23 เดือนมกราคม ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.



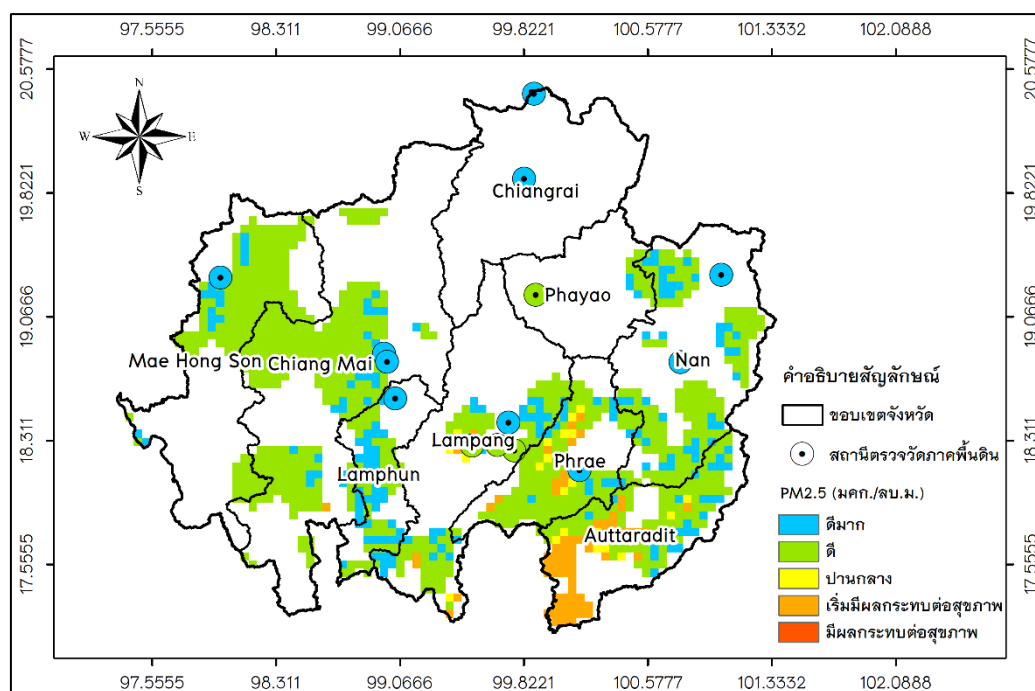
ภาพประกอบ 65 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี PCA - GRNN
ในรูปแบบ AQI ในวันที่ 17 เดือนกุมภาพันธ์ ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.



ภาพประกอบ 66 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี PCA - GRNN
ในรูปแบบ AQI ในวันที่ 6 เดือนมีนาคม ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.



ภาพประกอบ 67 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี PCA - GRNN
ในรูปแบบ AQI ในวันที่ 12 เดือนเมษายน ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.



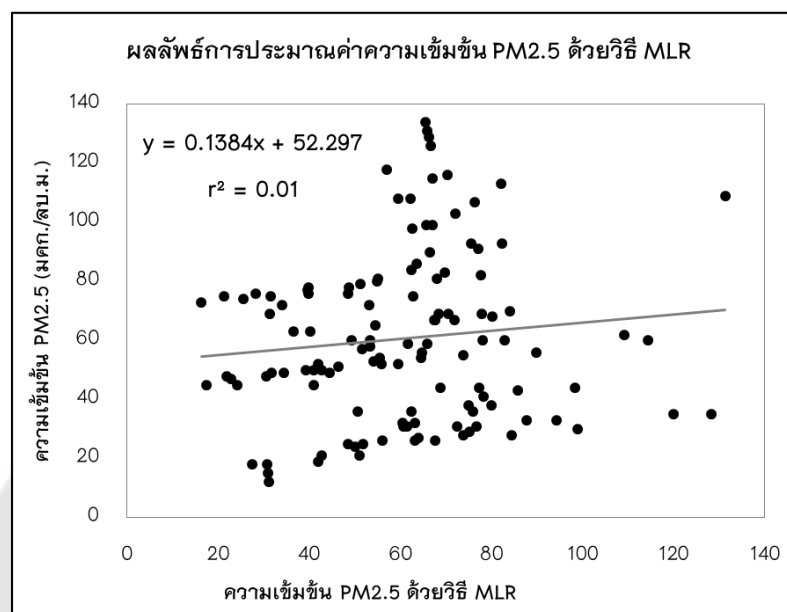
ภาพประกอบ 68 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี PCA - GRNN

ในรูปแบบ AQI ในวันที่ 27 เดือนธันวาคม ปี พ.ศ. 2561 เวลา 13:00 น.

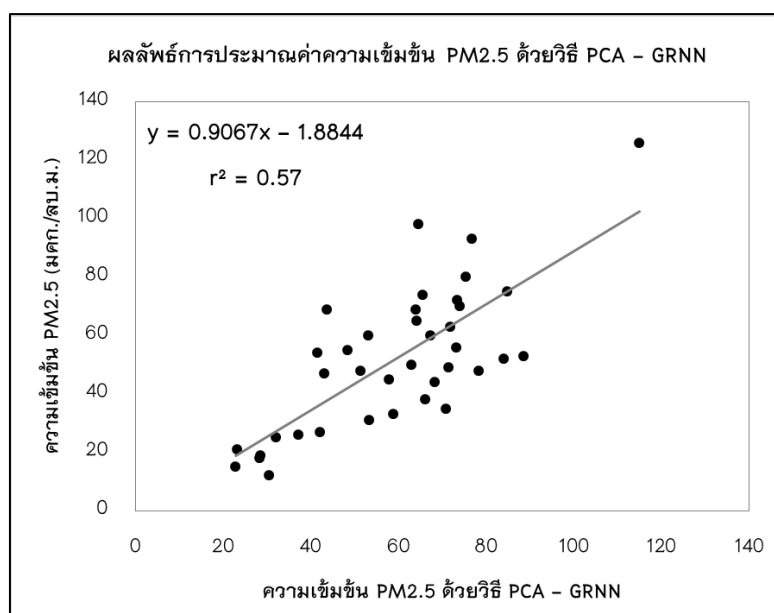
4.4 ความถูกต้องของการประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MRL และวิธี PCA - GRNN

การตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยข้อมูลความเข้มข้น PM2.5 ที่ตรวจวัดได้จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน บริเวณภาคเหนือ ของกรมควบคุมมลพิษ ที่ตำแหน่งและเวลาเดียวกัน เป็นข้อมูลชุดทดสอบหรือไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการสร้างสมการ จำนวน 37 ชุดข้อมูล ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MLR กับข้อมูลความเข้มข้น PM2.5 ที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน ที่ตำแหน่งและเวลาเดียวกัน พบว่าข้อมูลทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์กัน ดังภาพประกอบ 69 ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี PCA - GRNN กับข้อมูลความเข้มข้น PM2.5 ที่วัดได้จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน ที่ตำแหน่งและเวลาเดียวกัน พบว่าข้อมูลทั้งสองมีความสัมพันธ์กันที่ r^2 เท่ากับ 0.57 ดังภาพประกอบ 70 จากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของทั้งสองวิธีการด้วยสัมประสิทธิ์การกำหนด (r^2) และรากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในตาราง 20 จะเห็นได้ว่า ผลลัพธ์ความเข้มข้น PM2.5 จากวิธี PCA - GRNN มีความสอดคล้องกับข้อมูลความเข้มข้น PM2.5 จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน ด้วยค่า r^2

เท่ากับ 0.57 ซึ่งมีความสัมพันธ์ที่ดีกว่าวิธี MLR ที่มีค่า r^2 เท่ากับ 0.01 และความคลาดเคลื่อนของวิธี PCA - GRNN มีความคลาดเคลื่อนที่ต่ำกว่า ด้วย RMSE เท่ากับ 17.76 มคก./ลบ.ม. นอกจากนี้ยังมีค่าเฉลี่ยความแตกต่างที่น้อยกว่า เท่ากับ 0.58 มคก./ลบ.ม. จึงสรุปได้ว่า วิธี PCA - GRNN มีความเหมาะสมในการประมาณค่าความเข้มข้น PM 2.5 มากกว่าวิธี MLR



ภาพประกอบ 69 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์การประมาณค่า PM2.5 ด้วยวิธี MLR กับ PM2.5 จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน



ภาพประกอบ 70 ความสัมพันธ์ระหว่างผลลัพธ์การประมาณค่า PM2.5 ด้วยวิธี PCA - GRNN กับ PM2.5 จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน

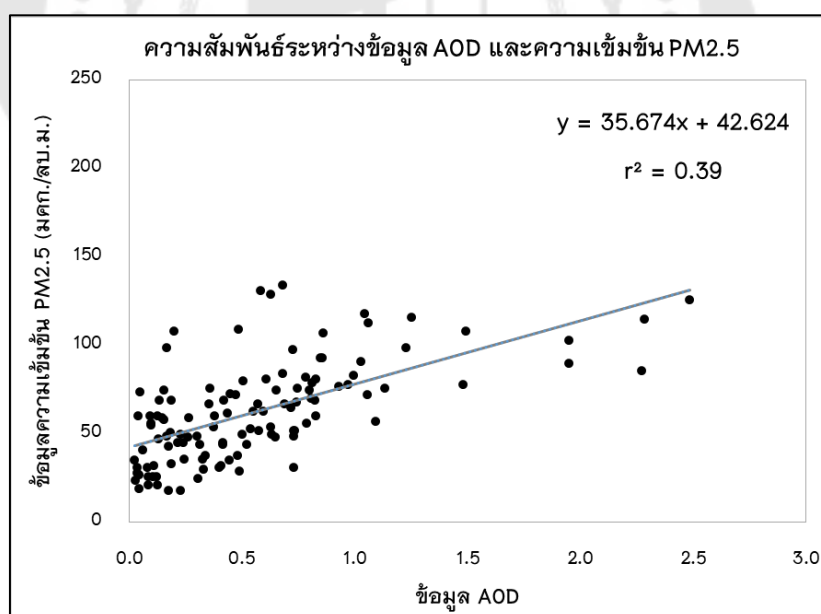
ตาราง 20 ผลลัพธ์การตรวจสอบความถูกต้อง

วิธีการ	จำนวนคู่ที่ใช้ สร้างสมการ	จำนวนคู่ที่ใช้ ทดสอบสมการ	r^2	RMSE (มคก./ลบ.ม.)	ค่าความแตกต่าง (มคก./ลบ.ม.)
MLR	87	37	0.01	33.90	22.22
PCA - GRNN	87	37	0.57	17.76	0.58

4.5 กรณีศึกษา: ช่วงเดือนมกราคม – เมษายน

เนื่องจากผลลัพธ์การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น PM2.5 และปัจจัยกายภาพ ในช่วงเดือน ม.ค. – ธ.ค. ปี พ.ศ. 2561 เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยเฉลี่ยในทุกฤดูกาลของปี พ.ศ. 2561 ซึ่งในแต่ละฤดูกาลของปีอาจจะมีความสัมพันธ์ของปัจจัยสภาพอากาศและปริมาณการปลดปล่อยมลสาร PM2.5 ไม่เท่ากัน จึงทำให้ค่าความเข้มข้นของ PM2.5 ไม่เท่ากัน จากผลการศึกษาในข้อ 4.1.2.1 พบว่า ทุกปีภาคเหนือประสบปัญหาหมอกพิษทางอากาศเนื่องจากค่าความเข้มข้น PM2.5 เกินค่ามาตรฐานในเดือน ม.ค. - เม.ย. ดังนั้น จึงได้เลือกทำการศึกษาเพิ่มเติมเฉพาะด้วยใช้ข้อมูลในช่วงเดือนที่มีความเข้มข้นของ PM2.5 สูง และเป็นช่วงที่มีจุด Hotspot จำนวนมาก คือ ในช่วงเดือน ม.ค. – เม.ย. ปี พ.ศ. 2561 ด้วยชุดข้อมูลจากกรม

ควบคุมมลพิษ จำนวน 118 ชุดข้อมูล ซึ่งผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล AOD กับ ความเข้มข้น PM2.5 ทำให้เห็นความสอดคล้องของข้อมูลมากขึ้น ด้วย r^2 เท่ากับ 0.37 ดัง ภาพประกอบ 71 นอกจากนี้ได้มีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของแต่ละข้อมูลในตาราง 21 ผลลัพธ์ พบว่า ความเข้มข้น PM2.5 สูงในช่วงเดือนดังกล่าว ข้อมูล AOD DEM SP และ TEMP จะมี แนวโน้มสูงหรือแปรผันตาม แต่ข้อมูล NDVI RH และ WS จะมีแนวโน้มลดลงหรือแปรผกผัน ซึ่ง แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่ชัดเจนมากขึ้นระหว่างข้อมูลความเข้มข้น PM2.5 กับข้อมูลอื่นๆ โดยที่ค่า AOD ที่แสดงถึงปริมาณฝุ่นละอองที่อยู่ในบรรยากาศมีค่ามากสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้น PM2.5 สูง รวมถึงมีค่า NDVI ที่แสดงถึงพื้นที่ที่เป็นพืชพรรณสีเขียวลดลงเนื่องจากมีจำนวน Hotspot เพิ่มขึ้น และมีสภาพอุทุนิยมวิทยา ได้แก่ SP TEMP สูง แต่ RH และ SP ลดลง ซึ่งเอื้อต่อ การเก็บกักฝุ่นละออง PM2.5 จึงสรุปได้ว่าปัจจัยทางกายภาพของพื้นที่ที่มีต่อความเข้มข้นของ PM2.5 อีกทั้งได้ใช้ชุดข้อมูลในช่วงเดือน ม.ค. – เม.ย. ดังกล่าว โดยแบ่งเป็น 1) ชุดสร้างสมการ 70% และ 2) ชุดทดสอบ 30% สำหรับทดสอบประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MLR และ PCA – GRNN



ภาพประกอบ 71 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล AOD และความเข้มข้น PM2.5
ในช่วงเดือน ม.ค. – เม.ย.

ตาราง 21 ความสัมพันธ์ของแต่ละข้อมูล ในช่วงเดือน ม.ค. – เม.ย.

	PM2.5	AOD	DEM	NDVI	RH	SP	TEMP	WS
PM2.5	1.00							
AOD	0.61	1.00						
DEM	0.01	0.08	1.00					
NDVI	-0.30	-0.48	0.18	1.00				
RH	-0.46	-0.13	0.23	0.09	1.00			
SP	0.04	-0.12	-0.90	0.02	-0.23	1.00		
TEMP	0.53	0.37	-0.28	-0.29	-0.71	0.21	1.00	
WS	-0.09	0.00	0.06	0.03	-0.10	-0.07	0.01	1.00

จากการวิเคราะห์หาสัมประสิทธิ์ สามารถเขียนเป็นสมการสำหรับประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MLR ที่ใช้ข้อมูลในช่วงเดือน ม.ค. – เม.ย. ได้ดังนี้

$$\text{PM2.5 (MLR)} = -1,180.57 + 27.69\text{AOD} + 0.90\text{DEM} - 29.79\text{NDVI} - 0.87\text{RH} + 0.01\text{SP} + 2.03\text{TEMP} - 2.69\text{WS}$$

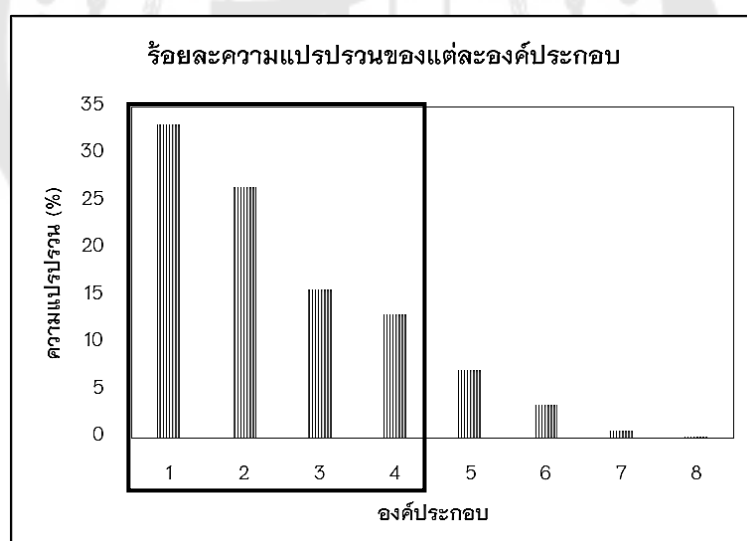
สำหรับการประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี PCA – GRNN โดยใช้ข้อมูลในช่วงเดือน ม.ค. – เม.ย. ซึ่งจะพิจารณาค่าไอเกนที่มากกว่า 0.9 ทำให้ได้องค์ประกอบทั้งหมด 4 องค์ประกอบ คิดเป็นความแปรปรวนหรือสามารถบอกถึงการกระจายตัวของข้อมูลรวมได้เท่ากับ 88.51% ดังตาราง 22 และภาพประกอบ 72

ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 พบว่า วิธี PCA – GRNN มีประสิทธิภาพมากกว่าวิธี MLR ซึ่งวิธีการทั้งสองให้ผลลัพธ์ที่มีความสอดคล้องกับค่าความเข้มข้น PM2.5 มากกว่าการใช้ชุดข้อมูลเดือน ม.ค. – ธ.ค. (ทั้งปี) โดยที่วิธี MLR มีค่า r^2 เท่ากับ 0.15 (ภาพประกอบ 73) และวิธี PCA – GRNN มีค่า r^2 เท่ากับ 0.58 (ภาพประกอบ 74) แต่ความคลาดเคลื่อนของทั้งสองวิธีการมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่วิธี MLR มีค่า RMSE เท่ากับ 45.79 มคก./ลบ.ม. และวิธี PCA – GRNN มีค่า RMSE เท่ากับ 20.08 มคก./ลบ.ม. (ดังตาราง 23) เนื่องจากจำนวนชุดข้อมูลที่ใช้สร้างสมการและการทดสอบมีจำนวนลดลง ดังนั้นการเพิ่มจำนวนชุดข้อมูลสำหรับศึกษาวิเคราะห์ใน

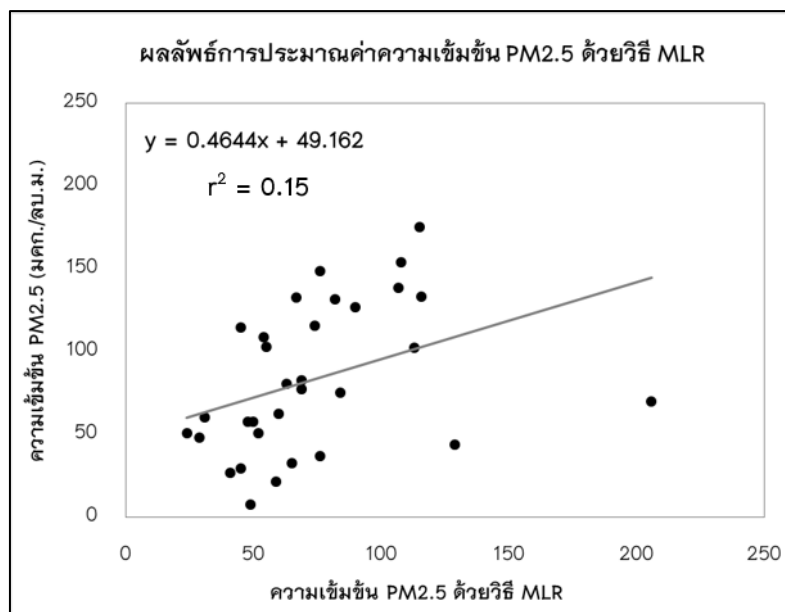
อนาคตจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธีการทั้งสองได้

ตาราง 22 ค่าไอเกนทั้ง 8 องค์ประกอบ

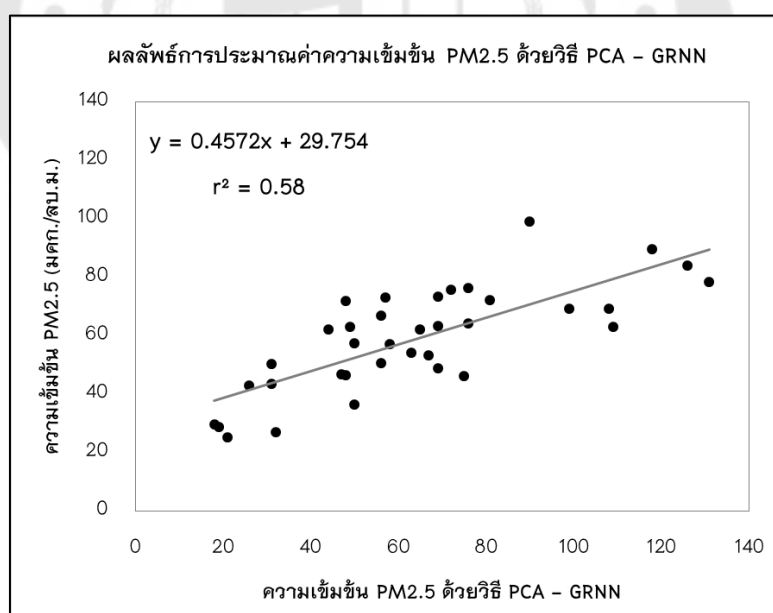
องค์ประกอบหลัก	ค่าไอเกน
PC1	2.32
PC2	1.86
PC3	1.10
PC4	0.92
PC5	0.50
PC6	0.25
PC7	0.05
PC8	0.01



ภาพประกอบ 72 ร้อยละความแปรปรวนของแต่ละองค์ประกอบ



ภาพประกอบ 73 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี MLR
โดยใช้ชุดข้อมูลเดือน ม.ค. – เม.ย.



ภาพประกอบ 74 ผลลัพธ์การประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ด้วยวิธี PCA - GRNN
โดยใช้ชุดข้อมูลเดือน ม.ค. – เม.ย.

ตาราง 23 ผลลัพธ์การตรวจสอบความถูกต้องของการใช้ชุดข้อมูลเดือน ม.ค. – เม.ย.

วิธีการ	จำนวนคู่ที่ใช้ สร้างสมการ	จำนวนคู่ที่ใช้ ทดสอบสมการ	r^2	RMSE (มคก./ลบ.ม.)
MLR	82	36	0.15	45.79
PCA - GRNN	82	36	0.58	20.07



บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การศึกษาวิจัยการประมาณค่าฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 จากดาวเทียม Himawari-8 และสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน บริเวณภาคเหนือ ในช่วงเดือนมกราคม – ธันวาคม ปี พ.ศ. 2561 ในครั้งนี้ สามารถสรุปผลประกอบด้วยหัวข้อดังต่อไปนี้

1. สรุปผล
2. อภิปรายผล
3. ข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

การศึกษากการประมาณค่าความเข้มข้นของฝุ่นละอองขนาดเล็ก PM2.5 ด้วยค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองจากดาวเทียม Himawari-8 ข้อมูลความเข้มข้น PM2.5 จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน และข้อมูลกายภาพ ประกอบด้วย ข้อมูล NDVI จากดาวเทียม Terra MODIS DEM จากดาวเทียม Terra ASTER และข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ ความกดอากาศ อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลม จาก ECMWF บริเวณภาคเหนือ ในเดือนมกราคม - ธันวาคม ปี พ.ศ. 2561 สามารถสรุปผลตามวัตถุประสงค์ 3 ข้อ คือ การศึกษาตามวัตถุประสงค์ข้อที่ 1 พบว่า สามารถใช้ข้อมูล AOD จากดาวเทียม Himawari-8 และปัจจัยทางกายภาพในการประมาณค่าความเข้มข้นของ PM2.5 ได้ โดยผลการเปรียบเทียบการประมาณค่าความเข้มข้นของ PM2.5 ด้วยวิธี MLR และวิธี PCA - GRNN ตามวัตถุประสงค์ข้อที่ 2 พบว่า ผลลัพธ์วิธี PCA - GRNN มีความเหมาะสมในการประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ในเชิงพื้นที่และเชิงเวลามากกว่าวิธี MLR โดยมีความสอดคล้องกับข้อมูลจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน ด้วย r^2 เท่ากับ 0.57 และมีความคลาดเคลื่อน RMSE เท่ากับ 17.76 มคก./ลบ.ม. ส่วนผลลัพธ์วิธี MLR ไม่มีความสอดคล้องกับข้อมูลจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน (r^2 เท่ากับ 0.01) และมีความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์มากกว่าที่ RMSE เท่ากับ 33.90 มคก./ลบ.ม. จากการศึกษาความผันแปรเชิงเวลาและเชิงพื้นที่ของข้อมูลความเข้มข้น PM2.5 และข้อมูลกายภาพ ตามวัตถุประสงค์ข้อที่ 3 พบว่า ความเข้มข้น PM2.5 จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับพื้นที่และช่วงเวลา โดยมีค่าสูงสุดในเดือนมีนาคม ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูล AOD ที่มีค่าสูง ผลเนื่องมาจากแหล่งกำเนิดฝุ่นละอองคือมีจำนวนจุด Hotspot มากในเดือน

ดังกล่าว ส่วนการผันแปรของข้อมูลระหว่างวัน ความเข้มข้น PM2.5 ในแต่ละช่วงเวลามีผลเนื่องมาจากแหล่งกำเนิดที่เกิดขึ้นจากสภาพแวดล้อมบริเวณโดยรอบ เช่น สนามบิน โรงงานไฟฟ้า และริมถนน เป็นต้น รวมถึงลักษณะภูมิประเทศที่มีผลต่อรูปแบบการแพร่กระจายของความเข้มข้น PM2.5 ในอากาศ และมีสภาพอุตุนิยมวิทยาเป็นปัจจัยที่ส่งผลทำให้ความเข้มข้นของ PM2.5 แตกต่างกัน โดยผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น PM2.5 จากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดินกับข้อมูลกายภาพในช่วงเดือน ม.ค. - เม.ย. ซึ่งเป็นช่วงที่มีค่าความเข้มข้น PM2.5 สูง โดยที่ความเข้มข้น PM2.5 สูง ข้อมูล AOD DEM ความกดอากาศ และอุณหภูมิอากาศจะมีแนวโน้มสูงหรือแปรผันตาม ส่วนข้อมูล NDVI ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลมจะมีแนวโน้มลดลงหรือแปรผกผัน

5.2 อธิบายผล

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการรับรู้จากระยะไกลในการประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 จะใช้ข้อมูลดาวเทียมที่มีความละเอียดในเชิงพื้นที่และเชิงเวลาที่สามารถติดตามฝุ่นละอองที่อยู่ในชั้นบรรยากาศได้อย่างเหมาะสม โดยข้อมูล AOD ดาวเทียม Himawari-8 เป็นหนึ่งในข้อมูลที่มีประสิทธิภาพ (Wang et al., 2017) และมีความสอดคล้องกับข้อมูล AOD จากดาวเทียม Terra/Aqua MODIS (Yang et al., 2018) ที่นิยมนำมาใช้ศึกษาส่วนใหญ่ อีกทั้งมีความละเอียดในเชิงพื้นที่และเชิงเวลาที่เทียบเท่าหรือดีกว่าดาวเทียม Terra/Aqua MODIS แต่เนื่องจากข้อมูลดาวเทียมเป็นการตรวจวัดระยะไกลทำให้ข้อมูลที่ได้มีความคลาดเคลื่อน จึงต้องใช้ข้อมูลกายภาพของพื้นที่ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่กระจายของฝุ่นละอองในอากาศ ได้แก่ ลักษณะภูมิประเทศ และสภาพทางอุตุนิยมวิทยา (กรมควบคุมมลพิษ, 2554) จากการศึกษาด้วยข้อมูลในช่วงเดือน ม.ค. - ธ.ค. ซึ่งใช้สำหรับประเมินประสิทธิภาพของวิธีการประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 ในช่วงที่มีค่าต่ำจนถึงค่าสูง โดยผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูล พบว่า ความเข้มข้น PM2.5 มีค่าสูง ข้อมูล AOD DEM และอุณหภูมิอากาศจะมีค่าสูง ส่วน NDVI ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าต่ำ แต่ความกดอากาศและความเร็วลมมีความสัมพันธ์ที่ไม่ชัดเจน เนื่องจากเป็นความสัมพันธ์เฉลี่ยทั้งปี จึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมโดยเลือกเฉพาะช่วงเดือน ม.ค. - เม.ย. ซึ่งเป็นช่วงที่มีค่าความเข้มข้น PM2.5 สูงที่สุดของปี โดยมีค่าความเข้มข้น PM2.5 สูงสัมพันธ์กับข้อมูล AOD DEM ความกดอากาศ และอุณหภูมิอากาศที่มีค่าสูง ส่วน NDVI ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลมมีค่าต่ำ ซึ่งทำให้เห็นความสัมพันธ์ของปัจจัยกายภาพกับข้อมูลความเข้มข้น PM2.5 ได้ชัดเจนกว่าแบบใช้ข้อมูลในช่วงเดือน ม.ค. - ธ.ค. (พงศ์เทพ สุวรรณาวรี และฉัตร พญาวีวัฒนกุล,

2558) (จุฬาลักษณ์ สมวันดี และมัลลิกา สุกิจปาณินิจ, 2560) การศึกษาวิจัยครั้งนี้เลือกใช้วิธี PCA – GRNN และเปรียบเทียบกับวิธี MLR ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมนำมาใช้ศึกษา สำหรับประเมินวิธีการที่เหมาะสม ผลการศึกษาในครั้งนี้ พบว่า วิธี PCA – GRNN มีประสิทธิภาพในการประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 มากกว่าวิธี MLR ผลลัพธ์สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zang et al. (2018) โดยมีผลลัพธ์ r^2 เท่ากับ 0.57 และ RMSE เท่ากับ 17.76 มคก./ลบ.ม. หากเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับงานวิจัยของ Zang et al. (2018) ที่ได้ทำการประมาณค่า PM1 บริเวณพื้นที่ประเทศจีน ด้วยข้อมูลในช่วงเดือนกรกฎาคม ปี พ.ศ. 2558 ถึงเดือนธันวาคม ปี พ.ศ. 2559 โดยมีผลลัพธ์ r^2 เท่ากับ 0.65 และ RMSE เท่ากับ 22.00 มคก./ลบ.ม. ซึ่งดีกว่าหรือไม่แตกต่างกันมาก จึงสรุปได้ว่าสามารถใช้วิธี PCA – GRNN ในการประมาณค่าความเข้มข้น PM2.5 บริเวณพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. สำหรับแนวทางการศึกษาต่อไปควรมีการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับแหล่งกำเนิด PM2.5 เช่น ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Landuse) และ Hotspot เป็นต้น เพื่อให้เข้าใจรูปแบบการเกิด PM2.5 มากขึ้น
2. ผลลัพธ์การประมาณ PM2.5 ยังมีความคลื่อนคลาด เนื่องจากจำนวนชุดข้อมูลที่ใช้ในการศึกษามีจำนวนไม่มากพอ ในการศึกษาต่อไปจึงควรเพิ่มช่วงเวลาของข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา เพื่อให้เข้าใจรูปแบบการแพร่กระจายของ PM2.5 มากยิ่งขึ้น
3. ควรศึกษาแยกตามฤดูกาลหรือตามช่วงเวลาที่เกิด PM2.5 เพื่อให้เข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น PM2.5 กับปัจจัยกายภาพของพื้นที่มากขึ้น

บรรณานุกรม

- Agency United States Environmental Protection. (2018). Particulate Matter (PM) Pollution. Retrieved from <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>
- AirVisual. (2018). World AQI Ranking. Retrieved from <https://www.airvisual.com/>
- Al-Mahasneh, A. J., Anavatti, S., Garratt, M., & Pratama, M. (2018). Applications of General Regression Neural Networks in Dynamic Systems. *Digital Systems*, 133-154.
- Alduchov, O. A., & Eskridge, R. E. (1996). Improved Magnus' form approximation of saturation vapor pressure. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 35(4), 601-609.
- Buchard, V., Silva, A. M., Colarco, P. R., Darmenov, A., Randles, C. A., Govindaraju, R., . . . Spurr, R. (2015). Using the OMI aerosol index and absorption aerosol optical depth to evaluate the NASA MERRA Aerosol Reanalysis. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 5743-5760.
- Fan, A., Chen, W., Liang, L., Sun, W., Lin, Y., Che, H., & Zhao, X. (2017). Evaluation and Comparison of Long-Term MODIS C5.1 and C6 Products against AERONET Observations over China. *Remote sensing*, 9, 1-16.
- Gerardo, A. (2014). Electromagnetic radiation : Interaction with matter and atmosphere. Retrieved from <https://www.slideserve.com/alden/electromagnetic-radiation-interaction-with-matter-and-atmosphere>
- Greenpeace. (2016). Right to Clean Air. Retrieved from <http://www.greenpeace.org/seasia/th/>
- GrindGIS. (2017). A to Z about Active and Passive Remote Sensing. Retrieved from <https://grindgis.com/remote-sensing/active-and-passive-remote-sensing>
- Guo, J., Xia, F., Zhang, Y., Liu, H., Li, J., Lou, M., . . . Zhai, P. (2016). Impact of diurnal variability and meteorological factors on the PM_{2.5} - AOD relationship: Implications for PM_{2.5} remote sensing. *Environmental Pollution*, 221, 94-104.
- Hirtl, M., Mantovani, S., Kruger, B. C., Triebnig, G., Flandorfer, C., Bottoni, M., & Cavicchi, M. (2014). Improvement of air quality forecasts with satellite and ground based.

- Atmospheric Environment*, 84, 20-27.
- Japan Aerospace Exploration Agency [JAXA]. (2015). JAXA Himawari Monitor. Retrieved from <https://www.eorc.jaxa.jp/ptree/userguide.html>
- Kikuchi, M., Murakami, H., Suzuki, K., Nagao, M. T., & Higurashi, A. (2018). Improved Hourly Estimates of Aerosol Optical Thickness Using Spatiotemporal Variability Derived From Himawari-8 Geostationary Satellite. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 56, 3442-3455.
- Lillesand, T. M., & Kiefer, R. W. (1979). *Remote Sensing and Image Interpretation*. In. Marcin, L. W., Michael, J. G., David, J. D., Michael, A. B., & Felix, C. S. (2018). New approach to the retrieval of AOD and its uncertainty from MISR observations over dark water. *Atmospheric Measurement Techniques*(11), 429-439.
- National Aeronautics and Space Administration. (2012). *NASA Aerosol (Particulate Matter) Products*. In.
- National Aeronautics and Space Administration. (2016). Energy: The Driver of Climate. Retrieved from <http://www.ces.fau.edu/nasa/module-2/how-greenhouse-effect-works.php>
- National Aeronautics and Space Administration. (n.d.). MODIS Aerosol Product.
- Salvador, S., & Salvador, E. (2012). *Air Quality Index (AQI)*. United States: Environment Protection Agency.
- Sayad, S. (2019). Model Evaluation - Regression. Retrieved from https://www.saedsayad.com/model_evaluation_r.htm
- Tanre, D., Breon, F. M., Deuze, J. L., Dubovik, O., Ducos, F., Francois, P., . . . Waquet, F. (2011). Remote sensing of aerosols by using polarized, directional and spectral measurements within the A-Train: the PARASOL mission. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4, 1383-1395.
- Wang, W., Mao, F., Du, L., Pan, Z., Gong, W., & Fang, S. (2017). Deriving Hourly PM_{2.5} Concentrations from Himawari-8 AODs over Beijing–Tianjin–Hebei in China. *Remote sensing*, 9, 1-17.
- Yang, F., Wang, Y., Tao, J., Wang, Z., Fan, M., Leeuw, D. G., & Chen, L. (2018).

- Preliminary Investigation of a New AHI Aerosol Optical Depth (AOD) Retrieval Algorithm and Evaluation with Multiple Source AOD Measurements in China. *Remote sensing*, 10, 1-19.
- Yumimoto, K., Tanaka, T. Y., Yoshida, M., Kikuchi, M., Nagao, T. M., Murakami, H., & Maki, T. (2017). Assimilation and Forecasting Experiment for Heavy Siberian Wildfire Smoke in May 2016 with Himawari-8 Aerosol Optical Thickness. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 133-149.
- Zang, L., Mao, F., Guo, J., Wang, W., & Pan, X. (2018). Estimating hourly PM1 concentrations from Himawari-8 aerosol optical depth in China. *Environmental Pollution*, 241, 654-663.
- Zhang, W., Xu, H., & Zheng, F. (2018). Aerosol Optical Depth Retrieval over East Asia Using Himawari-8/AHI Data. *Remote sensing*, 1-19.
- เลิศพันธุ์ เพียรสร้างสรร. (2557). การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก. สืบค้นจาก <https://www.gotoknow.org/posts/566063>
- กรมควบคุมมลพิษ. (2548). สถานการณ์และการจัดการปัญหามลพิษทางอากาศและเสียง ปี 2547. กรุงเทพฯ: บริษัท ฮีธ จำกัด.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2554). รื้ออบทิศ มลพิษทางอากาศ บทเรียน แนวคิด และการจัดการ. กรุงเทพฯ: กชกร พับลิชชิ่ง.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2561). ข้อมูลดัชนีคุณภาพอากาศ. http://air4thai.pcd.go.th/webV2/aqi_info.php
- จุฬาลักษณ์ สมวันดี และ และมัลลิกา สุกิจปาณีนิจ. (2560). การประเมินความสัมพันธ์ปริมาณฝุ่นละออง (PM10) ที่ได้จากการติดตามตรวจสอบภาคพื้นดินและข้อมูลดาวเทียม MODIS ในภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (คณะอักษรศาสตร์, ภาควิชาภูมิศาสตร์).
- ฉัตร พยุงวิวัฒน์กุล และ ทรงกต ทศานนท์. (2555). การจำลองความเข้มข้นพื้นที่ของสารแขวนลอยในอากาศโดยใช้ข้อมูล MODIS ในภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย. (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, ม.ป.ท. (สาขาวิชาการรับรู้ระยะไกล).
- ณัฐภัทร อธิปัญญาพันธุ์ และ นริศรา ทองบุญชู. (2561, 8-9 พฤศจิกายน 2561). การศึกษาการแพร่กระจายของมลพิษที่เกิดจากไฟป่าในพื้นที่ภาคเหนือโดยใช้แบบจำลองควบคุม

- อุตุนิยมหาวิทยาลัย WRF-Chem. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28, โรงแรมเอ-วัน เดอะ รอยัล คอร์ท พัทยา.
- นงลักษณ์ วิรัชชัย. (2553). ชุดวิชา 21701 การวิจัยหลักสูตรและการเรียนการสอน หน่วยที่ 7 การศึกษาวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง และหน่วยที่ 10 สถิติวิเคราะห์เชิงปริมาณ: สถิติบรรยาย และสถิติพาราเมตริก.
- นิคม ถนอมเสียง. (ม.ป.ป.). สมการถดถอยอย่างง่าย Simple Linear Regression. สืบค้นจาก https://home.kku.ac.th/nikom/regsimp_nk2560_2page.pdf
- พงศ์เทพ สุวรรณวารี และ ฉัตร พยุงวิวัฒนกุล. (2558). ผลกระทบของไฟฟ้าต่อความสมบูรณ์ของป่าไม้และคุณภาพอากาศในจังหวัดเชียงใหม่. 1-61.
- ภูวกฤต ใจหอม. (2553). ความลึกเชิงแสงของละอองลอยที่ขึ้นกับความยาวคลื่นในปี 2546 ณ อำเภอศรีสำโรง จังหวัดสุโขทัย. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. (ปริญญาโทปริญญา มหาบัณฑิต). http://thesis.swu.ac.th/swuthesis/Phys/Poovakit_J.pdf
- มงคล ราชะนาคร. (2553). หมอกควันและมลพิษทางอากาศในจังหวัดเชียงใหม่ ชุดความรู้นโยบาย สาธารณะ. เชียงใหม่: ล็อกอินดีไชน์เวิร์ด.
- มนตรี ชูติชัยศักดิ์. (2557). วิธีการตรวจวัดฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 10 ไมครอน ระบบ VFC HIGH VOLUMN เอกสารประกอบการบรรยาย. กรุงเทพฯ: กรมควบคุมมลพิษ.
- วินัส ต่วนเครือ และ นิพนธ์ ตั้งธรรม. (2558). ผลกระทบของละอองลอยในบรรยากาศที่เกิดจากไฟฟ้า และการเผาชีวมวลต่อลักษณะของฝนบริเวณภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย. วารสารวน ศาสตร์, 34, 1-15.
- สมาคมฟิสิกส์ไทย. (2561). คลื่นเทระเฮิรตซ์ (Terahertz waves). สืบค้นจาก <http://www.thaiphysoc.org/article/20/>
- สุวิทย์ อ่องสมหวัง. (2554). หลักการของการรับรู้จากระยะไกลและการประมวลผลภาพเชิงเลข (Principles of Remote Sensing and Digital Image Processing): มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- อรประภา กุมมะกาญจนะ โรแบร์ และ คิโยชิ ฮอนดะ. (2552). การตรวจติดตามคุณภาพอากาศแบบ Real-time ในสิ่งแวดล้อมเมืองโดยการใช้เครื่องตรวจวัดจากภาคพื้นดิน และภาพถ่าย ดาวเทียมผ่านระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์แบบอินเทอร์เน็ต.

ประวัติผู้เขียน

ឯក-សក្ខី

กนกวรรณ ภูธรรม

วัน เดือน ปี เกิด

12 เมษายน 2535

สถานที่เกิด

โรงพยาบาลกาฬสินธุ์

วุฒิการศึกษา

พ.ศ. 2552 ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนสามชัย จังหวัด
กาฬสินธุ์

พ.ศ. 2557 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาภูมิสารสนเทศศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

พ.ศ. 2563 วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาภูมิสารสนเทศ
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ที่อยู่ปัจจุบัน

300/135 ถนนกาญจนาภิเษก แขวงท่าแร้ง เขตบางเขน กรุงเทพฯ 10220