



การศึกษาความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศจากข้อมูลภาคพื้นและข้อมูลดาวเทียมที่
ประเทศไทยและประเทศไต้หวัน

โดย

นางสาวอุดมพรรณ นาคศรีโพด



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร



การศึกษาความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศจากข้อมูลภาคพื้นและข้อมูลดาวเทียมที่ประเทศไทยและประเทศไต้หวัน



โดย
นางสาวอุดมพรรณ นาคศรีโพด

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์

มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

THE STUDY OF ATMOSPHERIC CARBON DIOXIDE CONCENTRATION USING
GROUND-BASED AND SATELLITE DATA IN THAILAND AND TAIWAN



By
MISS Udomphan NACKSRIPHOD

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Science PHYSICS
Department of PHYSICS
Academic Year 2023
Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ การศึกษาความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศจาก
ข้อมูลภาคพื้นและข้อมูลดาวเทียมที่ประเทศไทยและประเทศ
ไต้หวัน

โดย นางสาวอุดมพรรณ นาคศรีโพด

สาขาวิชา ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กรทิพย์ ไตะสิงห์

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นรงค์ ฉิมพาลี)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อีสระ มะศิริ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กรทิพย์ ไตะสิงห์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประนมกร ชูศรี)

650720047 : ฟิสิกส์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

คำสำคัญ : คาร์บอนไดออกไซด์, คอลัมน์เฉลี่ยของคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ, อินฟราเรดที่ไม่กระจายตัว, การแก้ไข, การรับรู้ระยะไกล

นางสาว อุดมพรรณ นาคศรีโพด: การศึกษาความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศจากข้อมูลภาคพื้นและข้อมูลดาวเทียมที่ประเทศไทยและประเทศไต้หวัน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กรทิพย์ โตะสิงห์

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในบรรยากาศจากข้อมูลภาคพื้นสำหรับประเทศไทยจากสถานีนครปฐมของมหาวิทยาลัยศิลปากร (2023 - 2024) และเครื่องมือวัดของ intERLab จำนวน 9 แห่ง (2023) สำหรับประเทศไต้หวันที่สถานี Lulin (2017 - 2023) และสถานีของ EPA จำนวน 6 สถานี (2019 - 2022) โดยการแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนพบว่า ค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นทุกสถานีและมีรูปแบบการแปรค่าตามช่วงฤดูกาล เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยาต่าง ๆ ต่อความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนในบรรยากาศในแต่ละช่วงฤดูกาล พบว่า มีเทน และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับที่สถานี Lulin จากนั้นผู้วิจัยได้ทำแผนที่ปริมาณความเข้มข้นของ CO_2 จากข้อมูลรายวันของดาวเทียม GOSAT-2 ดาวเทียม OCO-2 และดาวเทียม OCO-3 (2017 - 2023) ซึ่งข้อมูลมีความละเอียดเชิงพื้นที่และเวลาที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะช่องว่างของข้อมูลอันเนื่องมาจากการโคจรของดาวเทียมแต่ละดวง ในงานวิจัยนี้ได้ใช้การแก้ไขช่องว่างของข้อมูลดาวเทียมด้วยวิธีการ **nearest-neighbor interpolation** ซึ่งใช้ข้อมูลข้างเคียงมาประมาณข้อมูลในช่องว่าง จากนั้นเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการประมาณกับข้อมูลที่วัดได้จากสถานีภาคพื้น พบว่ามีค่าความแตกต่างอยู่ในรูปของ **root mean square error (RMSE)** ต่ำกว่า **5 ppm** สำหรับสถานี Lulin และอยู่ในช่วง **18 ถึง 45 ppm** สำหรับสถานีนครปฐม นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากแผนที่พบว่าการแปรผันตามช่วงฤดูกาลและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับค่าที่วัดได้จากสถานีภาคพื้น

650720047 : Major PHYSICS

Keyword : CO₂, XCO₂, Nondispersive infrared, Interpolation, Remote sensing

MISS Udomphan NACKSRIPHOD : The study of atmospheric carbon dioxide concentration using ground-based and satellite data in Thailand and Taiwan Thesis advisor : Assistant Professor Korntip Tohsing, Ph.D.

In this research, the variation of carbon dioxide (CO₂) concentration in the atmosphere using ground-based measurement data was investigated. In Thailand, data from the Nakhon Pathom Station at Silpakorn University (2023 - 2024) and interERLab's at nine stations (2023), including the data at Lulin station (2017-2023) and six EPA stations (2019 - 2022) for Taiwan were collected. The results of the analysis showed that the monthly average CO₂ concentration increased at every station and exhibited a seasonal pattern. The relationship between various meteorological variables and monthly average CO₂ concentration during each season was investigated. It was found that methane (CH₄) and sulfur dioxide (SO₂) were related to CO₂ concentration, particularly at the Lulin station. After that, CO₂ maps were generated from daily satellite data obtained from GOSAT-2, OCO-2, and OCO-3 (2017 - 2023), which have the different both in spatial and temporal resolutions. The data gaps due to satellite orbits were fulfilled by nearest-neighbor interpolation. The comparison between ground-measured and satellite-extracted CO₂ concentration was then employed. The results were found to be slightly different between both dataset with a discrepancy in terms of root mean square error (RMSE) the RMSE was less than 5 ppm for the data from Lulin station and about 18 - 45 ppm when compared with data from the Nakhon Pathom station. Finally, the variation in CO₂ concentration obtained from the CO₂ maps demonstrated seasonal fluctuations and tended to increase similar to CO₂ concentration measured at ground-based station.

กิตติกรรมประกาศ

ในการศึกษาระดับปริญญาโทฉบับนี้ ผู้วิจัยได้รับข้อมูลในการทำวิจัยจากห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม และทุนวิจัยระยะสั้น ณ ประเทศไต้หวัน ของคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม ซึ่งผู้วิจัยขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้เป็นอย่างสูง

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กรทิพย์ โต้ะสิงห์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ที่ให้ความรู้และคำแนะนำทางวิชาการ รวมทั้งให้คำปรึกษาและประสบการณ์ในการทำงานวิจัย ทำให้งานวิจัยบรรลุผลสำเร็จสมบูรณ์

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. เสริม จันทร์ฉาย ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้ความรู้และคำแนะนำทางวิชาการ พร้อมทั้งจัดหาทุนวิจัย และเครื่องมือที่จำเป็นสำหรับใช้ในการดำเนินงานวิจัย

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อิศระ มะศิริ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำทางวิชาการ รวมทั้งได้สละเวลามาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประพนมกร ชูศรี ที่ได้กรุณาเสียสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้เป็นอย่างสูง

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ นักวิจัยของห้องปฏิบัติการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร รวมถึงเจ้าหน้าที่ของภาควิชาฟิสิกส์ทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

สุดท้ายนี้ คุณประโยชน์ที่เกิดขึ้นจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดาและมารดา รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่าน เพื่อตอบแทนพระคุณที่ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการศึกษา

อุดมพรพรณ นาคศรีโพด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎี.....	4
2.1.1 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	4
2.1.2 อันตรกิริยาของโมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อรังสีอินฟราเรด.....	10
2.1.3 สมดุลพลังงานของโลก.....	17
2.1.3.1 อุณหภูมิของโลก.....	17
2.1.3.2 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงในชั้นบรรยากาศ.....	23
2.1.3.3 ปรากฏการณ์เรือนกระจก.....	24
2.1.3.4 การดูดกลืนสเปกตรัมอินฟราเรดโดยคาร์บอนไดออกไซด์.....	32
2.1.4 ผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์.....	37
2.1.5 การวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ.....	43

2.1.5.1 การวัดและติดตามความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศจากภาคพื้น	47
2.1.5.2 การวัดและติดตามความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศจากดาวเทียม	53
2.1.5.3 การวัดและติดตามความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศจากแบบจำลอง.....	64
2.1.6 ตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศ	64
2.1.6.1 อุณหภูมิอากาศ (T)	64
2.1.6.2 ความกดอากาศ (P).....	65
2.1.6.3 ความชื้นสัมพัทธ์ (RH).....	65
2.1.6.4 ปริมาณน้ำฝน.....	66
2.1.6.5 ความเร็วลม (WS) และ ทิศทางลม (WD).....	66
2.1.6.6 รังสีคลื่นยาว (Longwave radiation).....	66
2.1.6.7 ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV Index).....	66
2.1.6.8 ฝุ่นละออง.....	67
2.1.6.9 คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	68
2.1.6.10 ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO ₂).....	68
2.1.6.11 ไนตริกออกไซด์ (NO) และไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO ₂).....	68
2.1.6.12 มีเทน (CH ₄).....	69
2.1.7 ลักษณะทั่วไปของพื้นที่ศึกษา.....	69
2.1.7.1 ลักษณะทางกายภาพและลักษณะภูมิอากาศของประเทศไทย.....	69
2.1.7.2 ลักษณะทางกายภาพและลักษณะภูมิอากาศของประเทศไทย.....	75
2.1.8 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของพื้นที่ศึกษา.....	77
2.1.8.1 การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในประเทศไทย.....	77
2.1.8.2 การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในประเทศไทย.....	78

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	80
2.2.1 การประมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากข้อมูลดาวเทียม	80
2.2.2 อิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศกับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ใน บรรยากาศ.....	82
บทที่ 3 วิธีการวิจัยและผล.....	84
3.1 การวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศของประเทศไทย และ ประเทศไต้หวัน.....	84
3.1.1 การวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ (CO ₂) จากสถานีภาคพื้น ของประเทศไทยและประเทศไต้หวัน.....	84
3.1.1.1 การวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศจากสถานี ภาคพื้นสำหรับประเทศไทย	84
3.1.1.2 การวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศจากสถานี ภาคพื้นสำหรับประเทศไต้หวัน.....	88
3.1.2 การวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ (XCO ₂) จากดาวเทียม93	
3.2 การแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ (CO ₂) จากสถานีภาคพื้นของ ประเทศไทย และประเทศไต้หวัน	93
3.3 การทำแผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศจากข้อมูลดาวเทียม และการ แปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ (XCO ₂) ที่ได้จากข้อมูลดาวเทียม103	
3.3.1 ขั้นตอนการทำแผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนของประเทศ ไทยและประเทศไต้หวัน	103
3.3.2. การแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO ₂) รายเดือนจากข้อมูลดาวเทียม OCO-2 ของประเทศไทยและประเทศไต้หวัน.....	108
3.4 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ (XCO ₂) ที่ได้จากดาวเทียม กับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ (CO ₂) จากสถานีภาคพื้น	115
3.4.1 แผนที่การแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO ₂) รายเดือนจากข้อมูล ดาวเทียม OCO-2 ของประเทศไทย	121

3.4.2 แผนที่การแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO ₂) รายเดือนจากข้อมูลดาวเทียม OCO-2 ของประเทศไต้หวัน.....	129
3.5 ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศต่อความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์	137
3.5.1 ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศต่อความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ของประเทศไทย	137
3.5.2 ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศต่อความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ของประเทศไทยไต้หวัน	141
3.6 การศึกษาการเคลื่อนที่ของมวลอากาศต่อความแปรปรวนของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ของประเทศไทย และประเทศไต้หวัน	149
3.6.1 การศึกษาการเคลื่อนที่ของมวลอากาศต่อความแปรปรวนของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ของประเทศไทยที่สถานีนครปฐม	149
3.6.2 การศึกษาการเคลื่อนที่ของมวลอากาศต่อความแปรปรวนของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ของประเทศไทยที่สถานี Lulin	156
บทที่ 4 สรุป.....	163
รายการอ้างอิง.....	165
ประวัติผู้เขียน.....	169



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของดาวเคราะห์บางดวง ที่ S_0 คือ ค่าคงที่แสงอาทิตย์ที่ระยะห่าง r จากดวงอาทิตย์ โดย α_p คือ อัลเบโดของดาวเคราะห์ T_e คือ อุณหภูมิที่ปล่อยออกมาซึ่งคำนวณจากสมการ 2.12 T_m คือ อุณหภูมิที่ปล่อยออกมาที่ได้จากการวัด และ T_s คือ อุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยทั่วโลก คือ τ จำนวนวันคาบการหมุนรอบตัวเองของดาวเคราะห์ (Hartmann, 2015).....	17
ตารางที่ 2 อัลบิโดสำหรับพื้นผิวต่าง ๆ อัลบิโดของเมฆมีความแปรปรวนสูงและขึ้นอยู่กับชนิดของเมฆ (Hartmann, 2015)	21
ตารางที่ 3 ผลกระทบต่อฟลักซ์การแผ่รังสีอินฟราเรด (W/m^2) ของการมีอยู่ของบรรยากาศ และก๊าซแต่ละชนิดที่อยู่ภายใน คำนวณจากความแตกต่างระหว่างบรรยากาศที่มีก๊าซทั้งหมดกับบรรยากาศที่ไม่มีก๊าซ.....	37
ตารางที่ 4 กระบวนการทางธรรมชาติหลัก ๆ ที่ใช้ในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากชั้นบรรยากาศ ระยะเวลาที่ใช้ และปฏิกิริยาทางเคมี (Dolman & Dolman, 2019).....	38
ตารางที่ 5 แผนการปล่อยดาวเทียม ดัดแปลงจาก Gao 2022 (สีดำ: Interferometric instruments สีเทา: Rester instruments และสีน้ำเงิน: Mix instruments) (Gao, 2022).....	55
ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบพารามิเตอร์เฉพาะของเครื่องมือที่ใช้ในการวัดคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศของแต่ละดาวเทียม ดัดแปลงจาก Gao 2022 (Gao, 2022).....	56
ตารางที่ 7 ระดับความรุนแรงของ UV Index หรือ ความแรงของแดด (https://www.samitivejhospitals.com/th/article/detail/uv-index).....	67
ตารางที่ 8 รายละเอียดตำแหน่งที่ตั้งของสถานีวัดความเข้มข้นของ CO_2 ทั้ง 10 สถานี สำหรับประเทศไทย	88
ตารางที่ 9 รายละเอียดตำแหน่งที่ตั้งของสถานีวัดความเข้มข้นของ CO_2 ทั้ง 7 สถานี ของประเทศไต้หวัน.....	92
ตารางที่ 10 ค่า MBE RMSE และ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ของข้อมูลดาวเทียม GOSAT- 2 ที่ได้จากกระบวนการทำแผนที่คาร์บอนไดออกไซด์เปรียบเทียบกับข้อมูลที่วัดได้บนสถานีภาคพื้นทั้ง 10 แห่ง ของประเทศไทย	117

ตารางที่ 11 ค่า MBE RMSE และ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ของข้อมูลดาวเทียม OCO - 2 ที่ได้จาก
กระบวนการทำแผนที่คาร์บอนไดออกไซด์เปรียบเทียบกับข้อมูลที่วัดได้บนสถานีภาคพื้นทั้ง 10 แห่ง
ของประเทศไทย..... 117

ตารางที่ 12 ค่า MBE RMSE และ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ของข้อมูลดาวเทียม OCO - 3 ที่ได้จาก
กระบวนการทำแผนที่คาร์บอนไดออกไซด์เปรียบเทียบกับข้อมูลที่วัดได้บนสถานีภาคพื้นทั้ง 10 แห่ง
ของประเทศไทย..... 118

ตารางที่ 13 ค่า MBE RMSE และ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ของข้อมูลดาวเทียม GOSAT - 2 ที่ได้
จากกระบวนการทำแผนที่คาร์บอนไดออกไซด์เปรียบเทียบกับข้อมูลที่วัดได้บนสถานีภาคพื้นทั้ง 7
แห่ง ของประเทศไต้หวัน 118

ตารางที่ 14 ค่า MBE RMSE และ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ของข้อมูลดาวเทียม OCO - 2 ที่ได้จาก
กระบวนการทำแผนที่คาร์บอนไดออกไซด์เปรียบเทียบกับข้อมูลที่วัดได้บนสถานีภาคพื้นทั้ง 7 แห่ง
ของประเทศไทย..... 119

ตารางที่ 15 ค่า MBE RMSE และ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ของข้อมูลดาวเทียม OCO - 3 ที่ได้จาก
กระบวนการทำแผนที่คาร์บอนไดออกไซด์เปรียบเทียบกับข้อมูลที่วัดได้บนสถานีภาคพื้นทั้ง 7 แห่ง
ของประเทศไทย..... 119

ตารางที่ 16 การตีความค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Schober et al., 2018)..... 137

ตารางที่ 17 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันของตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศกับค่าความเข้มข้น
ของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือน ในแต่ละช่วงฤดูกาลที่สถานีนครปฐม ประเทศไทย ตั้งแต่
เมษายน ค.ศ. 2023 ถึง เมษายน ค.ศ. 2024..... 138

ตารางที่ 18 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันของตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศกับค่าความเข้มข้น
ของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือน ในแต่ละช่วงฤดูกาลที่สถานีของ interLab 9 สถานี ประเทศ
ไทย ตั้งแต่ มกราคม ค.ศ. 2023 ถึง ธันวาคม ค.ศ. 2023 140

ตารางที่ 19 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันของตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศกับค่าความเข้มข้น
ของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือน ในแต่ละช่วงฤดูกาลที่สถานี Lulin ประเทศไต้หวัน ตั้งแต่
มกราคม ค.ศ. 2017 ถึง สิงหาคม ค.ศ. 2023..... 142

ตารางที่ 20 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันของตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศกับค่าความเข้มข้น
ของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือน ในแต่ละช่วงฤดูกาลที่สถานี Yangming ประเทศไต้หวัน
ตั้งแต่ กุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2019 ถึง พฤษภาคม ค.ศ. 2022 143

ตารางที่ 21 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันของตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศกับค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือน ในแต่ละช่วงฤดูกาลที่สถานี Songshan ประเทศไต้หวัน ตั้งแต่ กุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2019 ถึง พฤษภาคม ค.ศ. 2022	144
ตารางที่ 22 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันของตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศกับค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือน ในแต่ละช่วงฤดูกาลที่สถานี Yilan ประเทศไต้หวัน ตั้งแต่ กุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2019 ถึง พฤษภาคม ค.ศ. 2022	145
ตารางที่ 23 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันของตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศกับค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือน ในแต่ละช่วงฤดูกาลที่สถานี Dali ประเทศไต้หวัน ตั้งแต่ กุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2019 ถึง พฤษภาคม ค.ศ. 2022	146
ตารางที่ 24 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันของตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศกับค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือน ในแต่ละช่วงฤดูกาลที่สถานี Shanhua ประเทศไต้หวัน ตั้งแต่ กุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2019 ถึง พฤษภาคม ค.ศ. 2022	147
ตารางที่ 25 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศกับค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือน ในแต่ละช่วงฤดูกาลที่สถานี Hengchun ประเทศไต้หวัน ตั้งแต่ กุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2019 ถึง พฤษภาคม ค.ศ. 2022	148



สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1 แผนผังอย่างง่ายของวัฏจักรคาร์บอนของโลก ตัวเลขแสดงถึงมวลของแหล่งกักเก็บ หรือที่เรียกว่าปริมาณคาร์บอนสะสม ในหน่วย PgC ($1 \text{ PgC} = 10^{15} \text{ gC}$) และฟลักซ์การแลกเปลี่ยนคาร์บอนรายปีในหน่วย PgCyr^{-1} (Dolman & Dolman, 2019).....	10
รูปที่ 2 การสั่นของโมเลกุลในโหมด Stretching แบบการยืดแบบสมมาตรและอสมมาตร (Reichenbacher & Popp, 2012).....	12
รูปที่ 3 การสั่นของโมเลกุลในโหมด Bending แบบต่าง ๆ (Reichenbacher & Popp, 2012).....	13
รูปที่ 4 โหมดการสั่นสะเทือนของ CO_2	14
รูปที่ 5 ระดับพลังงานการสั่นสะเทือนของโมเลกุล CO_2 ดัดแปลงจาก Kverno's website.....	15
รูปที่ 6 แผนภาพแสดงเส้นทางตามการแผ่รังสีที่ถูกดูดซับโดยแถบอินฟราเรดของ CO_2 V-V คือ การแลกเปลี่ยนพลังงานการสั่น และ V-T คือ การแปลงพลังงานการสั่นเป็นพลังงานจลน์ในการชน López-Puertas และคณะ (1990) (Werbe-fuentes et al., 2005).....	16
รูปที่ 7 โลกแผ่พลังงานออกไปในอัตราเดียวกับที่ได้รับจากดวงอาทิตย์ อุณหภูมิที่ปล่อยออกมาของโลกคือ 255 เคลวิน และของดวงอาทิตย์คือ 6,000 เคลวิน การแผ่รังสีของพื้นดินออกไปจะมีค่าสูงสุดในช่วงอินฟราเรด การแผ่รังสีอาทิตย์ที่เข้ามาจะอยู่ในช่วงที่ตามองเห็นได้ (Hartmann, 2015).....	17
รูปที่ 8 พลังงานที่ปล่อยออกจากดวงอาทิตย์ซึ่งพลีตกับความยาวคลื่นโดยอ้างอิงจากเส้นโค้งของวัตถุดำโดยที่ $T = T_{\text{sun}}$ พลังงานส่วนใหญ่อยู่ในส่วนที่ตามองเห็น และ 95% ของพลังงานทั้งหมดอยู่ระหว่าง 0.25 ถึง 2.5 ไมโครเมตร (Hartmann, 2015).....	19
รูปที่ 9 พลังงานที่ปล่อยออกมาในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ สำหรับวัตถุดำที่อุณหภูมิหลายอุณหภูมิตามฟังก์ชัน $B_{\lambda}(T)$ (Hartmann, 2015).....	19
รูปที่ 10 แผนภาพแสดงโลกที่กำลังหมุนอยู่และส่วนที่บดบังพลังงานแสงอาทิตย์บนฉากรับรัศมี a และแผ่พลังงานจากบนพื้นโลกออกไปจากทรงกลมแบบไอโซโทรปิก (isotropic) ดัดแปลงมาจาก Hartmann, 1994 (Hartmann, 2015).....	20

รูปที่ 11 อัลบีโดของพื้นผิวโลก บริเวณเหนือมหาสมุทรที่มีขนาดอัลบีโดต่ำ (2 – 10%) ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าพื้นดิน (โดยทั่วไป 34 – 45% บริเวณพื้นที่ทะเลทราย) และมีค่าสูงบริเวณเหนือหิมะและน้ำแข็ง (80% หรือมากกว่า) (Hartmann, 2015)..... 21

รูปที่ 12 (a) สเปกตรัมจากการแผ่รังสีของวัตถุดำ $T^4\lambda B_\lambda$ ของดวงอาทิตย์ ($T = 6,000$ K) และโลก ($T = 255$ K) เป็นฟังก์ชันของ $\ln\lambda$ (ด้านบน) โดยที่ B_λ คือ ฟังก์ชันของวัตถุดำ และ λ คือ ความยาวคลื่น (b) เศษส่วนของรังสีที่ถูกดูดกลืนขณะที่รังสีเคลื่อนที่จากพื้นผิวโลกสู่ชั้นบรรยากาศซึ่งเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น (c) เศษส่วนของรังสีที่ถูกดูดกลืนจากชั้นโทรโปพอส (tropopause) โดยทั่วไปอยู่ที่ระดับความสูง 11 กิโลเมตร ขึ้นไปชั้นบนสุดของบรรยากาศ โดยคำนวณจากความยาวคลื่น นอกจากนี้ยังมีการระบุโมลในชั้นบรรยากาศที่เอื้อต่อคุณสมบัติการดูดกลืนรังสีที่สำคัญในแต่ละช่วงความถี่ Goody และ Yung ในปี ค.ศ. 1989 (Hartmann, 2015) 24

รูปที่ 13 แบบจำลองปรากฏการณ์เรือนกระจกอย่างง่าย ซึ่งประกอบไปด้วยอุณหภูมิพื้นผิว T_s และชั้นบรรยากาศที่มีอุณหภูมิ T_a ขึ้นอยู่กับรังสีดวงอาทิตย์ที่เข้ามา $S_0/4$ รังสีที่แผ่จากพื้นผิวโลกที่เพิ่มขึ้นจะถือว่าชั้นบรรยากาศดูดกลืนได้อย่างสมบูรณ์ (Hartmann, 2015)..... 25

รูปที่ 14 แบบจำลองปรากฏการณ์เรือนกระจกที่พิจารณาช่องโหว่ของเรือนกระจก ซึ่งตรงกันข้ามกับรูปที่ 13 เนื่องจากบรรยากาศในแบบจำลองนี้ดูดกลืน \mathcal{E} รังสีที่แผ่ออกมาจากพื้นผิวโลกบางส่วนเท่านั้น (Hartmann, 2015)..... 27

รูปที่ 15 แบบจำลองปรากฏการณ์เรือนกระจกที่ประกอบด้วยชั้นบรรยากาศมีลักษณะทึบแสง 2 ชั้น แต่ละชั้นจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ตกกระทบกับองค์ประกอบที่มีคุณสมบัติในการดูดกลืนได้อย่างสมบูรณ์ (Hartmann, 2015) 29

รูปที่ 16 แผนผังของแบบจำลองการถ่ายโอนรังสีของบรรยากาศที่มีหลายชั้น (Hartmann, 2015) . 30

รูปที่ 17 โปรไฟล์สมดุลการแผ่รังสีของบรรยากาศที่ได้จากการคำนวณตามแผนผังในรูปที่ 16 โดยพิจารณาว่ารังสีถูกดูดกลืนด้วย H_2O O_3 และ CO_2 รวมถึงผลกระทบของรังสีที่แผ่จากพื้นผิวโลกและดวงอาทิตย์ด้วย หมายเหตุ สังเกตความไม่ต่อเนื่องที่บริเวณพื้นผิวโลก คัดแปลงมาจาก Well 1997 (Hartmann, 2015) 30

รูปที่ 18 ผลงานเฉลี่ยรายปีทั่วโลกของระบบภูมิอากาศของโลก (Zhong & Haigh, 2013) 33

รูปที่ 19 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน คำนวณโดยใช้แบบจำลองการถ่ายโอนรังสีแบบเส้นต่อเส้นโดย Francis และ Edwards 2007 พร้อมฐานข้อมูลสเปกตรัม HITRAN2004 สำหรับไอน้ำ (เส้นโค้งสีดำ) และ คาร์บอนไดออกไซด์ (เส้นโค้งสีแดง) เป็นฟังก์ชันของเลขคลื่น/ความยาวคลื่น ในแกน x คือความ

ยาวคลื่น หน่วย cm^{-1} แกน y ค่าการดูดกลืนความยาวคลื่นของโมเลกุล ซึ่งเป็นฐานข้อมูลทางสเปกโทรสโกปีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการทำนายและจำลองการส่งผ่าน และการแผ่รังสีในชั้นบรรยากาศ (Zhong & Haigh, 2013)..... 34

รูปที่ 20 เส้นโค้งสีดำเป็นสเปกตรัมที่สร้างขึ้นโดยแบบจำลองของฟลักซ์การแผ่รังสีอินฟราเรดที่ปล่อยออกมาสู่อวกาศด้านบนของชั้นบรรยากาศ (OLR) เส้นสีแดงถึงสเปกตรัมของวัตถุดำที่อุณหภูมิต่าง ๆ ขอบเขตของ OLR ที่ลดลงเนื่องจากแถบ H_2O ที่ $0 - 540 \text{ cm}^{-1}$ CO_2 ที่ 15 ไมโครเมตร แถบช่วงความยาวคลื่นที่ $550 - 800 \text{ cm}^{-1}$ O_3 ที่ 9.6 ไมโครเมตรในแถบช่วงความยาวคลื่นที่ $980 - 1100 \text{ cm}^{-1}$ และ H_2O ที่ 6.3 ไมโครเมตรในแถบช่วงความยาวคลื่นที่ $1400 - 1800 \text{ cm}^{-1}$ (Zhong & Haigh, 2013)..... 36

รูปที่ 21 เปอร์เซนต์ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมา และยังคงเหลืออยู่ในบรรยากาศ (Dolman & Dolman, 2019) 39

รูปที่ 22 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนทั่วโลกโดยเฉลี่ยบริเวณพื้นผิวทะเลเส้นประสีแดงที่มีสัญลักษณ์รูปเพชรแสดงถึงค่าเฉลี่ยรายเดือน โดยมีศูนย์กลางอยู่ที่ช่วงกลางเดือนของแต่ละเดือน เส้นสีดำที่มีสัญลักษณ์สี่เหลี่ยมแสดงถึงค่าเฉลี่ยรายเดือน หลังจากแก้ไขรอบฤดูกาลโดยเฉลี่ยแล้ว เส้นสีดำถูกกำหนดเป็นตามรอบของฤดูกาลที่อยู่ติดกันเจ็ดรอบ โดยมีศูนย์กลางอยู่ที่เดือนที่จะแก้ไข ยกเว้นสามปีแรก สามปีสุดท้าย และครึ่งปีสุดท้ายของการบันทึก โดยที่รอบฤดูกาลได้รับค่าเฉลี่ยในช่วงแรกและปีสุดท้ายเจ็ดปีตามลำดับ (<https://www.climate.gov/> ของ NOAA)..... 40

รูปที่ 23 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ (เส้นสีน้ำเงิน) เพิ่มขึ้นพร้อมกับการปล่อย CO_2 ของมนุษย์ (เส้นสีเทา) นับตั้งแต่เริ่มต้นการปฏิวัติอุตสาหกรรมในปี 1750 การปล่อยก๊าซเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เป็นประมาณ 5 กิกะตัน โดยหนึ่งกิกะตันเท่ากับหนึ่งพันล้านเมตริกตันต่อปี ในช่วงกลางศตวรรษที่ 20 ก่อนที่จะพุ่งสูงขึ้นเป็นมากกว่า 35 พันล้านตันต่อปีภายในสิ้นศตวรรษนี้กราฟ NOAA Climate.gov) ดัดแปลงมาจากต้นฉบับโดย Dr. Howard Diamond (NOAA ARL) ข้อมูลบรรยากาศ CO_2 จาก NOAA และ ETHZ ข้อมูลการปล่อยก๊าซ CO_2 ข้อมูลจากโครงการคาร์บอนทั่วโลก (<https://www.climate.gov/> ของ NOAA) 40

รูปที่ 24 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยรายปีทั่วโลก (<https://www.climatecentral.org/climate-matters/yearly-carbon-dioxide-peak>)..... 41

รูปที่ 25 การเปลี่ยนแปลงกำลังการแผ่รังสีที่ส่งผ่านต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นตามฟังก์ชันของ CO_2 44

รูปที่ 26 สเปกตรัมการดูดกลืนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แหล่งที่มา HITRAN96 (Welles & McDermitt, 2005)	46
รูปที่ 27 การดูดกลืนของคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วง 4.26 ไมโครเมตร ซึ่งรวมถึงไอโซโทปหลักสองไอโซโทป ปรับตามความสมดุลของบรรยากาศโดยทั่วไป HITRAN96 (Rothman 1998) (Welles & McDermitt, 2005)	46
รูปที่ 28 Total absorption non-dispersive infrared spectrometer.....	49
รูปที่ 29 Negative filter non-dispersive infrared spectrometer.....	50
รูปที่ 30 Positive filter non-dispersive infrared spectrometer.....	51
รูปที่ 31 Bruker IFS 125HR สเปกโตรมิเตอร์ความละเอียดสูงพิเศษ ที่สถานีวัดเครือข่าย TCCON	52
รูปที่ 32 ส่วนประกอบหลักของ Non-dispersive Infrared (NDIR) และการทำงานของระบบ (Debbagh, 2019)	52
รูปที่ 33 เซ็นเซอร์ใช้เทคนิค NDIR ในการวัด CO ₂ ที่หาซื้อได้ทั่วไป (https://solectroshop.com/en/sensores-calidad-del-aire/5414-ndir-co2-sensor-mh-z14a-carbon-dioxide-detection.html) (https://sandboxelectronics.com/?product=100000ppm-mh-z16-ndir-co2-sensor-with-i2cuart-5v3-3v-interface-for-arduinospeberry-pi) (https://www.co2meter.com/th-th/products/ndir-dual-beam-co2-sensor-module)	52
รูปที่ 34 ภาพยานตัวอย่างดาวเทียม OCO-2 ดาวเทียม GOSAT-2 และดาวเทียม OCO-3 ที่ใช้ในการวัด XCO ₂	54
รูปที่ 35 มุมมองและเส้นทางแสง (optical paths) ที่เป็นไปได้บางส่วนที่โฟตอนของดวงอาทิตย์ถูกบันทึกโดยเครื่องมือที่ติดตั้งอยู่บนดาวเทียม (Taylor et al., 2015)	58
รูปที่ 36 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของ CO ₂ ที่ความยาวคลื่นภายในแถบ CO ₂ ที่แข็งแกร่งใกล้กับความยาวคลื่น 2.08 ไมโครเมตร ที่ความดัน 0.1 100 และ 600 hPa (มิลลิบาร์) (Taylor et al., 2015).	61
รูปที่ 37 ขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องสำหรับการสังเกต OCO-2 (Taylor et al., 2015)	63
รูปที่ 38 ค่าเฉลี่ยรายวันของเศษส่วนโมลเฉลี่ยของคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นโทรโพสเฟียร์อิสระ ตามที่ CarbonTracker จำลองไว้เมื่อวันที่ 20 มีนาคม ปี ค.ศ. 2009 หน่วยไมโครโมลของ CO ₂ ต่อโมลของอากาศแห้ง ($\mu\text{mol โมล}^{-1}$) และค่าต่าง ๆ จะได้รับตามระดับสีที่แสดงอยู่ที่กราฟิก	

"free - troposphere" ที่ความสูงเหนือพื้นดินประมาณ 1.2 กิโลเมตร ถึงความสูงเหนือพื้นดิน
 ประมาณ 5.5 กิโลเมตร (<https://gml.noaa.gov/ccgg/carbontracker/>) 64

รูปที่ 39 แผนที่ประเทศไทย (<https://www.nationsonline.org/oneworld/map/thailand-region-map.htm>) 72

รูปที่ 40 แผนที่ประเทศไต้หวัน (<https://www.nationsonline.org/oneworld/taiwan.htm>).... 76

รูปที่ 41 การปล่อยก๊าซต่อหัวแสดงถึงการปล่อยก๊าซของบุคคลโดยเฉลี่ยในประเทศหรือภูมิภาค โดย
 คำนวณจากการปล่อยก๊าซทั้งหมดหารด้วยจำนวนประชากร
 (<https://ourworldindata.org/consumption-based-co2>) 79

รูปที่ 42 ตำแหน่งที่ตั้ง เครื่องวัด OIZOM ที่สถานีนครปฐม จุดที่แก๊สเข้าสู่ระบบ และออกจากระบบ
 ตามลูกศรสีแดง 85

รูปที่ 43 หน้าต่างเว็บไซต์สำหรับดาวน์โหลดข้อมูล 86

รูปที่ 44 หน้าต่างเว็บไซต์สำหรับดาวน์โหลดข้อมูลรายต่าง ๆ 86

รูปที่ 45 สถานีภายในเครื่องข่ายของโครงการ SEA-HAZEMON@TEIN เครื่องมือ Canarin และการ
 87

รูปที่ 46 ที่ตั้ง Lulin Atmospheric Background Station ของประเทศไต้หวัน และเครื่อง Picarro
 89

รูปที่ 47 สถานี Air Quality Station ของประเทศไต้หวัน และเครื่องมือ
 (<https://pdf.directindustry.com/pdf/ecotech/ec9820-carbon-dioxide-analyzer/50178-143958.html>)..... 91

รูปที่ 48 สถานีวัดคาร์บอนไดออกไซด์ภาคพื้นของประเทศไต้หวันทั้ง 7 สถานี 91

รูปที่ 49 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์รายเดือนของสถานีนครปฐม ประเทศไทย ตั้งแต่เดือน
 เมษายน ปี ค.ศ. 2023 ถึงเดือนเมษายน ปี ค.ศ. 2024..... 94

รูปที่ 50 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์รายเดือนของสถานี intERLab ทั้ง 9 แห่ง ประเทศไทย
 ตั้งแต่เดือนมกราคม ปี ค.ศ. 2023 ถึงเดือนธันวาคม ปี ค.ศ. 2023 สำหรับสถานีดินแดง ลาดกระบัง
 เชียงราย เพชรบูรณ์ พะเยา และตาก ตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2023 ถึงเดือนธันวาคม ปี ค.ศ.
 2023 สำหรับสถานีลุมพินี และเชียงใหม่ และตั้งแต่เดือนมีนาคม ปี ค.ศ. 2023 ถึงเดือนธันวาคม
 ปี ค.ศ. 2023 สำหรับสถานีปทุมธานี 95

รูปที่ 51 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์รายเดือนของสถานี Lulin ประเทศไต้หวัน ตั้งแต่เดือนมกราคม ปี ค.ศ. 2017 ถึงเดือนสิงหาคม ปี ค.ศ. 2023.....	99
รูปที่ 52 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์รายเดือนของสถานี EPA ทั้ง 6 สถานี ประเทศไต้หวัน ตั้งแต่เดือนมีนาคม ปี ค.ศ. 2019 ถึงเดือนพฤษภาคม ปี ค.ศ. 2022.....	100
รูปที่ 53 ตัวอย่างข้อมูลลักษณะของจุดข้อมูลที่ได้จากข้อมูลดาวเทียมรายวัน Level 2 ของดาวเทียม GOSAT-2 ดาวเทียม OCO-2 และ ดาวเทียม OCO-3 ในวันที่ 1 เดือนกุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2024... 104	
รูปที่ 54 จุดข้อมูลคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนของดาวเทียม GOSAT-2 ดาวเทียม OCO-2 และ ดาวเทียม OCO-3 ในเดือนมกราคม เมษายน กรกฎาคม และ ตุลาคม ปี ค.ศ. 2022 ครอบคลุม 95°E ถึง 145°E และ 0°N ถึง 50°N	107
รูปที่ 55 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์รายเดือนที่สถานีนครปฐม ประเทศไทย ตั้งแต่เดือนมกราคม ปี ค.ศ. 2017 ถึงเดือนธันวาคม ปี ค.ศ. 2023 จากข้อมูลดาวเทียม OCO-2.....	109
รูปที่ 56 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์รายเดือนที่พื้นที่ตำแหน่งที่ตั้งเครื่องมือวัดของ intERLab ทั้ง 9 แห่ง ในประเทศไทย ตั้งแต่เดือนมกราคม ปี ค.ศ. 2017 ถึงเดือนธันวาคม ปี ค.ศ. 2023 จากข้อมูลดาวเทียม OCO-2.....	109
รูปที่ 57 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์รายเดือนที่สถานี Lulin ประเทศไต้หวัน ตั้งแต่เดือนมกราคม ปี ค.ศ. 2017 ถึงเดือนธันวาคม ปี ค.ศ. 2023 จากข้อมูลดาวเทียม OCO-2.....	112
รูปที่ 58 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์รายเดือนที่สถานี EPA ทั้ง 6 สถานี ประเทศไต้หวัน ตั้งแต่เดือนมกราคม ค.ศ. 2017 ถึงเดือนธันวาคม ค.ศ. 2023 จากข้อมูลดาวเทียม OCO-2	113
รูปที่ 59 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์จากข้อมูลดาวเทียม GOSAT-2 ดาวเทียม OCO-2 และ ดาวเทียม OCO-3 และข้อมูลที่ได้จากการวัดของสถานี Lulin ประเทศไต้หวัน.....	120
รูปที่ 60 แผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO ₂) เฉลี่ยรายเดือน ของประเทศไทยใน ปี ค.ศ. 2017.....	122
รูปที่ 61 แผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO ₂) เฉลี่ยรายเดือน ของประเทศไทยใน ปี ค.ศ. 2018.....	123
รูปที่ 62 แผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO ₂) เฉลี่ยรายเดือน ของประเทศไทยใน ปี ค.ศ. 2019.....	124

รูปที่ 63 แผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO₂) เฉลี่ยรายเดือน ของประเทศไทยใน
ปี ค.ศ. 2020..... 125

รูปที่ 64 แผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO₂) เฉลี่ยรายเดือน ของประเทศไทยใน
ปี ค.ศ. 2021..... 126

รูปที่ 65 แผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO₂) เฉลี่ยรายเดือน ของประเทศไทยใน
ปี ค.ศ. 2022..... 127

รูปที่ 66 แผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO₂) เฉลี่ยรายเดือน ของประเทศไทยใน
ปี ค.ศ. 2023..... 128

รูปที่ 67 แผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO₂) เฉลี่ยรายเดือน ของประเทศไต้หวันใน
ปี ค.ศ. 2017..... 130

รูปที่ 68 แผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO₂) เฉลี่ยรายเดือน ของประเทศไต้หวันใน
ปี ค.ศ. 2018..... 131

รูปที่ 69 แผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO₂) เฉลี่ยรายเดือน ของประเทศไต้หวันใน
ปี ค.ศ. 2019..... 132

รูปที่ 70 แผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO₂) เฉลี่ยรายเดือน ของประเทศไต้หวันใน
ปี ค.ศ. 2020..... 133

รูปที่ 71 แผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO₂) เฉลี่ยรายเดือน ของประเทศไต้หวันใน
ปี ค.ศ. 2021..... 134

รูปที่ 72 แผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO₂) เฉลี่ยรายเดือน ของประเทศไต้หวันใน
ปี ค.ศ. 2022..... 135

รูปที่ 73 แผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO₂) เฉลี่ยรายเดือน ของประเทศไต้หวันใน
ปี ค.ศ. 2023..... 136

รูปที่ 74 เส้นทางการเคลื่อนที่ของมวลอากาศที่ได้จากแบบจำลอง HYSPLIT แบบย้อนกลับมายังสถานี
นครปฐม ในวันที่ 1 – 30 พฤศจิกายน ปี ค.ศ. 2023 ซึ่งเคลื่อนที่มาจากทิศทางต่าง ๆ (วันที่ได้ระบุจะ
บอกวันเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ โดยจุดถัด ๆ ไปของแต่ละเส้นทางแสดงตำแหน่งของมวลอากาศที่
เคลื่อนที่ไปสำหรับความสูงของมวลอากาศที่แต่ละจุดบอกด้วยกราฟด้านล่างของรูป)..... 150

- รูปที่ 75 กราฟความถี่สะสมของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในทิศทางลมต่าง ๆ ที่พัดเข้ามา
มายังสถานี นครปฐม ในวันที่ 1 – 30 พฤศจิกายน ปี ค.ศ. 2023..... 153
- รูปที่ 76 เส้นทางการเคลื่อนที่ของมวลอากาศที่ได้จากแบบจำลอง HYSPLIT แบบย้อนกลับมายังสถานี
Lulin ในวันที่ 1 – 30 เมษายน ปี ค.ศ. 2023 ซึ่งเคลื่อนที่มาจากทิศทางต่าง ๆ (วันที่ได้รูปจะบอกวัน
เริ่มต้นของการเคลื่อนที่ โดยจุดถัด ๆ ไปของแต่ละเส้นทางแสดงตำแหน่งของมวลอากาศที่เคลื่อนที่ไป
สำหรับความสูงของมวลอากาศที่แต่ละจุดบอกด้วยกราฟด้านล่างของรูป) 157
- รูปที่ 77 กราฟความถี่สะสมของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในทิศทางลมต่าง ๆ ที่พัดเข้ามา
มายังสถานี Lulin ในวันที่ 1 – 30 เมษายน ปี ค.ศ. 2023 160



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นหนึ่งในก๊าซเรือนกระจกที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดจากกระบวนการทางธรรมชาติ เช่น ภูเขาไฟระเบิดและถูกพืชนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง ซึ่งในบรรยากาศของโลกมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.03 - 0.04% และมีบทบาทสำคัญอย่างมากในการกำหนดอุณหภูมิของโลกเนื่องจากมีคุณสมบัติที่สามารถดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความยาวที่แผ่ออกจากพื้นผิวโลกและบรรยากาศ ในช่วง 15, 4.3, 2.7 และ 2 ไมโครเมตร รวมทั้งดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปความร้อนช่วงรังสีอินฟราเรด (thermal infrared) ไว้ในชั้นบรรยากาศ จึงมีผลต่อปริมาณความร้อนที่แผ่ออกสู่อวกาศ บรรยากาศ และพื้นผิวโลก

ตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นของยุคอุตสาหกรรม (ในศตวรรษที่ 18) กิจกรรมของมนุษย์ในการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ การเพิ่มขึ้นของประชากรโลกเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้การใช้ทรัพยากรในการพัฒนาเทคโนโลยีและอุตสาหกรรมนั้นเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศเกินสภาวะปกติ รวมทั้งการตัดไม้ทำลายป่าซึ่งเป็นแหล่งดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นั้นลดน้อยลง ทำให้ในศตวรรษที่ 20 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และในปัจจุบันค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่วัดได้จากสถานีภาคพื้นทั่วโลกเฉลี่ยมีค่ามากกว่า 420 parts per million (ppm) และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ

การสะสมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นในชั้นบรรยากาศ ทำให้อุณหภูมิของโลกเพิ่มสูงขึ้นและเกิดปรากฏการณ์ก๊าซเรือนกระจกที่มากเกินไป (greenhouse effect) นำมาซึ่งการเกิดภาวะโลกร้อน (global warming) และการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ (climate change) ส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต ที่ต้องเผชิญกับคลื่นความร้อนอย่างรุนแรงในบางประเทศ สิ่งมีชีวิตบางชนิดจะสูญพันธุ์เมื่ออุณหภูมิของโลกเพิ่มขึ้น และระดับน้ำทะเลจะเพิ่มสูงขึ้นส่งผลกระทบต่อประเทศที่เป็นหมู่เกาะ

เพื่อติดตามสถานการณ์ความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกให้บรรลุตามเป้าหมายของประเทศและประชาคมโลกต้องอาศัยการวัดและเก็บข้อมูล ซึ่งในปัจจุบันมีการวัดค่าปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้เทคนิคการวัดที่หลากหลาย สำหรับเทคนิคที่เป็นที่นิยมคือ เทคนิคการรับรู้จากระยะไกล (remote sensing) จากดาวเทียม เช่น ดาวเทียม Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) Greenhouse Gases Observing Satellite-2 (GOSAT-2) และ Orbiting

Carbon Observatory-3 (OCO-3) ซึ่งข้อมูลความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้รับการตรวจสอบความถูกต้องจากสถานีภาคพื้นของเครือข่าย Total Carbon Column Observing Network (TCCON) ซึ่งใช้เทคนิค Fourier transform spectrometer ในการวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

สำหรับการวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของประเทศไทยนั้นมีการวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบภาคพื้นโดย int ERLab ของ Asian Institute of Technology (AIT) ที่ติดตั้งในบางพื้นที่ของประเทศไทย แต่ยังไม่มีการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากสถานีภาคพื้นกับข้อมูลที่ได้รับจากดาวเทียม สำหรับการวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของประเทศไทยได้หวั่นั้นมีหน่วยงานที่ติดตั้งเครื่องวัดเพื่อติดตามความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ทั่วประเทศโดย Taiwan Air Quality Monitoring Network ซึ่งตั้งอยู่ในเขตเมือง และมีสถานีที่ตั้งอยู่บนที่สูงซึ่งไม่ได้รับอิทธิพลของมลพิษทางอากาศอย่าง Lulin Atmospheric Background Station ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงจะทำการศึกษาปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศจากข้อมูลภาคพื้นกับดาวเทียม หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดภาคพื้นกับค่าที่วัดได้จากดาวเทียม และศึกษาการแปรค่าปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รายเดือน รวมทั้งศึกษาความสัมพันธ์ของปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศด้วย โดยพิจารณาตามฤดูกาลเพื่อศึกษาอิทธิพลของตัวแปรอื่น ๆ ที่มีผลต่อการแปรค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. รวบรวมข้อมูลปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศจากเครื่องมือวัดภาคพื้นและดาวเทียม ของประเทศไทยและประเทศไต้หวัน
2. เปรียบเทียบและศึกษาความสัมพันธ์ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศระหว่างข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัดภาคพื้นกับดาวเทียม ของประเทศไทยและประเทศไต้หวัน
3. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากสถานีวัดภาคพื้นกับตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศของประเทศไทยและประเทศไต้หวัน

1.3 ขอบเขตการศึกษา

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศจากข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัดภาคพื้นและดาวเทียมที่ประเทศไทยและประเทศไต้หวัน สำหรับประเทศไทยที่สถานีวัดของมหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม ปี ค.ศ. 2023 – 2024 และสถานีวัดของ Internet Education and Research Laboratory (intERLab) จำนวน 9 แห่ง ปี ค.ศ. 2023 สำหรับประเทศไต้หวัน ที่สถานี Lulin Atmospheric Background Station (LABs) ปี ค.ศ. 2017 – 2023 และสถานีวัดของ Environmental Protection Administration (EPA) จำนวน 6 สถานี ปี ค.ศ. 2019 – 2022



บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎี

2.1.1 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนและ ออกซิเจน ก่อตัวขึ้นภายในดาวฤกษ์โดยกระบวนการที่เรียกว่า นิวเคลียร์ฟิวชัน (nuclear fusion) อะตอมทั้งหมดประกอบด้วยนิวเคลียสที่มีประจุบวกซึ่งประกอบด้วยโปรตอนและนิวตรอน ซึ่งล้อมรอบด้วยอิเล็กตรอนที่มีประจุลบ ความดันสูงภายในดาวฤกษ์นั้นเพียงพอที่จะหลอมนิวเคลียสของธาตุที่เบากว่าเข้าด้วยกันจนกลายเป็นธาตุที่หนักกว่า ปฏิกิริยาเหล่านี้จะปล่อยพลังงานและผลิตภัณฑ์ออกไปต้านกับแรงโน้มถ่วงของดาวฤกษ์ที่กำลังดึงสสารเข้าหาศูนย์กลางดาวฤกษ์ไปพร้อมๆ กัน เมื่อปฏิกิริยาฟิวชันดำเนินต่อไปนิวเคลียสจะมีขนาดใหญ่ขึ้น และเมื่อถึงจุดหนึ่งจะมีขนาดใหญ่และเสถียรก่อนที่จะหลอมรวมกันต่อไป เมื่อไม่มีปฏิกิริยานิวเคลียร์กับวัตถุ วัตถุจะไม่ไหลออกไปด้านนอกอีกต่อไป ดาวฤกษ์ก็จะยุบตัวลงภายใต้แรงโน้มถ่วงของมันเองส่งผลให้เกิดการปลดปล่อยสสารและพลังงานจำนวนมากที่เรียกว่า ซูเปอร์โนวา (supernova)

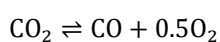
ดาวเคราะห์ในระบบสุริยะเป็นผลมาจากการรวมตัวกันของเนบิวลาสุริยะ ซึ่งก็คือการชนและการสะสมฝุ่นของอนุภาคที่เหลือจากการก่อตัวหมุนรอบดวงอาทิตย์ บรรยากาศในยุคแรกของดาวเคราะห์ทุกดวงเต็มไปด้วยเนบิวลาสุริยะ ซึ่งประกอบไปด้วยไฮโดรเจนเป็นส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตามบรรยากาศของดาวเคราะห์ได้พัฒนาไปตามกาลเวลา มีความหลากหลายโดยมีตั้งแต่ชั้นบางไปจนถึงหนา ชั้นบรรยากาศของดาวเคราะห์อาจประกอบด้วยทุกสิ่งตั้งแต่ไฮโดรเจนและฮีเลียมไปจนถึงออกซิเจน ไนโตรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ แอมโมเนีย และมีเทน ที่น่าสนใจคือ มีดาวเคราะห์เพียงสามดวงที่มี CO₂ ในชั้นบรรยากาศคือ โลก ดาวอังคาร และดาวศุกร์ โลกที่ก่อตัวขึ้นเมื่อประมาณ 5,000 ล้านปีที่ผ่านมา บรรยากาศที่หนาแน่นเกิดขึ้นในช่วง 500 ล้านปีแรกนับจากนั้นไอร่าเฮยและก๊าซที่ถูกผลักออกระหว่างการสลายก๊าซภายในโลก บรรยากาศในยุคแรกจึงเริ่มมีคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) น้ำ (H₂O) ไนโตรเจน (N) และไฮโดรเจน (H) เป็นส่วนใหญ่ และปราศจากออกซิเจน (O₂) โดยสิ้นเชิง

ประมาณ 1,000 ล้านปีก่อน ไอน้ำในชั้นบรรยากาศควบแน่นทำให้เกิดมหาสมุทร ซึ่งก่อให้เกิดสถานะที่กำเนิดสิ่งมีชีวิตในน้ำ ในยุคแรก ๆ รูปแบบของสิ่งมีชีวิตเหล่านี้ใช้พลังงานจากดวงอาทิตย์เพื่อรวมน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยการสังเคราะห์ด้วยแสงให้เป็นสารประกอบอินทรีย์

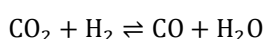
และออกซิเจน ส่วนหนึ่งของออกซิเจนที่ถูกสร้างขึ้นร่วมกับคาร์บอนอินทรีย์เพื่อสร้างคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นมาใหม่ และออกซิเจนที่เหลืออยู่จะสะสมอยู่ในชั้นบรรยากาศ ทำให้เกิดภัยพิบัติทางระบบนิเวศครั้งใหญ่ของสิ่งมีชีวิตแอนนาโรอิก (anaerobic) ซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตในยุคแรก ๆ ในขณะที่ออกซิเจนในบรรยากาศเพิ่มขึ้นและคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศลดลง ออกซิเจนบางส่วนอยู่สูงในบรรยากาศดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์และสร้างอะตอมออกซิเจนเดี่ยว ซึ่งเมื่อทำปฏิกิริยากับโมเลกุลออกซิเจนได้ออกซิเจน (O₃) ออกซิเจนดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตและทำหน้าที่เป็นเกราะบาง ๆ ล้อมรอบโลก โดยดูดกลืนที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 200 ถึง 300 นาโนเมตร ซึ่งคาดว่าออกซิเจนเกิดขึ้นเมื่อประมาณ 600 ล้านปีก่อน ในเวลานี้การวิวัฒนาการของชั้นบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์มีน้อยลง สิ่งมีชีวิตจึงถูกจำกัดอยู่แค่ในมหาสมุทรเท่านั้น ซึ่งการดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตในปริมาณที่เพียงพอทำให้สิ่งมีชีวิตในน้ำได้ขยายตัว อย่างไรก็ตามเมื่อเวลาผ่านไปความเข้มข้นของออกซิเจนที่สังเคราะห์ด้วยแสงเพิ่มขึ้น และก่อตัวเป็นโอโซนในระดับสูงขึ้นไปตามลำดับ ทำให้เกิดสิ่งมีชีวิตบนบกกลุ่มแรกขึ้นมาจึงนับเป็นจุดเริ่มต้นของวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตบนโลก

ศตวรรษแรกก่อนคริสต์ศักราชตามการบันทึกของ Pliny พบไอร่าเหยที่อันตรายในถ้ำต่อมาในปี ค.ศ. 1577-1644 Van Helmont ได้จำแนกก๊าซนี้ให้เป็นก๊าซชนิดหนึ่งซึ่งพบได้ในถ้ำและเหมือง จากนั้นเขาสร้างก๊าซชนิดนี้จากการหมักโดยการใช้อุณหภูมิทำปฏิกิริยาต่อเนื่องกับคาร์บอนที่ได้จากถ่าน และศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ของก๊าซนี้ Hoffmann ตรวจพบว่าก๊าซออกที่มาจากน้ำแร่มีสภาพเป็นกรด ในปี ค.ศ. 1757 Black แสดงให้เห็นว่าในระหว่างการหายใจ ส่วนหนึ่งของอากาศในบรรยากาศมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและค้นพบผลกระทบของก๊าซใน ‘อากาศคงที่’ (fixed air) ต่อชีวิตสัตว์ต่อมา Priestley ซึ่งอาศัยอยู่ในโรงเบียร์ได้สังเกตคุณสมบัติทางกายภาพของก๊าซ โดยพบว่ามีแนวโน้มละลายในน้ำได้ดี Lavoisier ซึ่งเป็นนักเคมีชาวฝรั่งเศสเป็นคนแรกที่พิสูจน์การเกิดของก๊าซคงที่นั้นจะเกิดขึ้นเมื่อคาร์บอนถูกให้ความร้อน และตั้งชื่อว่า กรดคาร์บอนิก (carbonic acid) ประกอบไปด้วยมวลคาร์บอน 23.5 - 28.9 % และมวลออกซิเจน 71.1 - 76.5 %

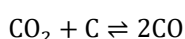
คุณสมบัติทางเคมีของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) หนึ่งโมเลกุลของ CO₂ ประกอบด้วยคาร์บอนหนึ่งอะตอม และออกซิเจนสองอะตอม มีมวลโมเลกุล (M_r) เท่ากับ 44.010 กรัม เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่ติดไฟ มีรสเปรี้ยวเล็กน้อย โดยมีสถานะเป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ที่อุณหภูมิปกติก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะไม่ทำปฏิกิริยา โมเลกุลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ค่อนข้างเสถียรและไม่สลายตัวเป็นสารประกอบได้ง่าย การสลายตัวของโมเลกุลอาจเกิดจากการให้อุณหภูมิสูงด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet light) หรือการจ่ายกระแสไฟฟ้า (electrical discharge)



ปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับสารอื่น ๆ โดยทั่วไปจะเป็นผลมาจากอุณหภูมิหรือการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา การเพิ่มขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์เกิดจากคาร์บอนมอนอกไซด์ทำปฏิกิริยากับน้ำ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาแบบย้อนกลับของปฏิกิริยาการเปลี่ยนน้ำ-ก๊าซ ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนได้น้ำดังสมการ

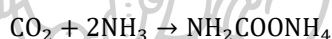


และคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดจากปฏิกิริยาเช่นเดียวกันกับคาร์บอนที่อุณหภูมิสูง



จากสมการของปฏิกิริยาข้างต้นมีความสำคัญอย่างมากที่ในการถลุงแร่เหล็ก เครื่องต้มไค้ค และหินปูนที่ถูกเผาไหม้ในเตาเผา ซึ่งหินปูนนั้นจะสลายตัวกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

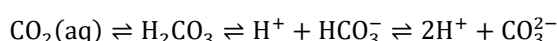
ปฏิกิริยาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับคาร์บอนไดออกไซด์เช่น ปฏิกิริยากับแอมโมเนียเป็นแอมโมเนียมคาร์บาเมต (ammonium carbamate) เมื่อไม่มีน้ำจะได้ยูเรีย (urea) ซึ่งมีความสำคัญในการทำปุ๋ยหมักและเป็นตัวทำปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมพลาสติกดังแสดงในสมการ



ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผสมคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนได้เป็นเมทานอล (methanol) ในอุณหภูมิและความดันปานกลางถูกเร่งปฏิกิริยาด้วย copper-zinc



การเติมคาร์บอนไดออกไซด์ลงในโซเดียมฟีโนเลต (sodium phenolate) จะทำให้ได้เกลือโซเดียมของกรดซาลิไซลิก (sodium salt of salicylic acid) ซึ่งมีความสำคัญในการผลิตแอสไพริน (aspirin) ออกตะไฮเดรตที่เป็นของแข็งของคาร์บอนไดออกไซด์ ($\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) สามารถเกิดขึ้นได้หากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สัมผัสกับน้ำที่อุณหภูมิต่ำและแรงดันสูง คาร์บอนไดออกไซด์ในสารละลายที่เป็นน้ำจะทำปฏิกิริยาจนได้น้ำที่เป็นกรดอ่อน ซึ่งคือกรดคาร์บอนิก (carbonic acid) ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวก่อให้เกิดสมดุลดังสมการ



ในสารละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำมีกรดคาร์บอนิกอยู่ 0.1% ค่าคงที่การแตกตัวของกรด (dissociation constant) มีค่าเท่ากับ 4.31×10^{-7} mol/L ที่อุณหภูมิ 25 °C แสดงให้เห็นว่าสารละลายคาร์บอนไดออกไซด์ในธรรมชาติมีความเป็นกรดอ่อน ๆ

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในธรรมชาติ คาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติในบริเวณ เปลือกโลก (lithosphere) อุทกภาค (hydrosphere) บรรยากาศ (atmosphere) และชีวมณฑล (biosphere) ซึ่งมีความสมดุลกันระหว่างกระบวนการเกิดและการนำไปใช้

1) เปลือกโลก

เปลือกโลกเป็นส่วนหนึ่งของโลกคือ บริเวณที่ไม่ได้ถูกปกคลุมด้วยมหาสมุทร คาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 5.5×10^{16} ตัน อยู่ที่บริเวณเปลือกโลกในรูปของคาร์บอเนตของ แคลเซียม (ซอล์ก) แมกนีเซียม (dolomite) และโลหะอื่น ๆ รวมทั้งเป็นองค์ประกอบของ สารประกอบอินทรีย์หลายชนิด อยู่ในหินอัคนีทุกชนิดที่เมื่อถูกความร้อนภายใต้สภาวะสูญญากาศจะ ปลดปล่อยก๊าซผสมออกมา ซึ่งประกอบไปด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และไฮโดรเจน หินที่มีคาร์บอเนต จะให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่ายเมื่อถูกให้ความร้อน เช่น บิทูมินัส (bituminous) ก๊าซต่าง ๆ นั้น มักจะหลุดออกจากพื้นผิวโลกบริเวณภูเขาไฟและปากปล่องภูเขาไฟที่ปะทุ อันเป็นผลมาจากการ เคลื่อนตัวของหินร้อนในชั้นเปลือกโลก คาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนประกอบของก๊าซผสมเหล่านี้ ซึ่งมีความเข้มข้นตั้งแต่ไม่กี่เปอร์เซ็นต์ไปจนถึงคาร์บอนไดออกไซด์เกือบบริสุทธิ์

นอกจากนี้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมากออกจากผิวโลกในรูปของน้ำแร่ธรรมชาติ ซึ่ง แบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลัก ๆ ประเภทแรกเป็นประเภทอิมิตัวด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้ความดันบางส่วน เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศปกติ และประเภทที่ประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ละลายภายใต้ความดัน โดยที่เมื่อขึ้นสู่ผิวน้ำความดันจะถูกปล่อยออกมาพร้อมกับ คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำเหล่านี้จึงมีสภาพเป็นกรด และมีแนวโน้มที่จะเป็นตัวกรัดกร่อนหินได้มากกว่า จึงได้ชื่อว่า น้ำแร่ (mineral waters)

2) บรรยากาศ

ในชั้นบรรยากาศรวมถึงก๊าซทั้งหมดที่ห่อหุ้มโลกมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ประมาณ 0.03 % โดยปริมาตร ระดับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่หนาแน่นขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ทำการวัดบนพื้นผิว ปริมาณพืชพรรณที่มีอยู่ และช่วงเวลา (ระดับของคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้นในเวลา กลางคืน) ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดในบรรยากาศอยู่ที่ประมาณ 2.3×10^{12} ตัน โดย กระบวนการที่ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศมีมากมายนอกเหนือจากก๊าซที่ปล่อย ออกมาจากพื้นโลกผ่านน้ำพุ บ่อน้ำ และภูเขาไฟแล้ว ยังมีกลไกอื่น ๆ อีกมากมายที่ผลิตก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ เช่น การเผาไหม้ของสารคาร์บอน การหายใจของพืชและสัตว์ การเสื่อมสภาพ หรือการย่อยสลายของวัสดุอินทรีย์ และกระบวนการทางอุตสาหกรรม เช่นการเผาไหม้ปูนขาว การ ผลิตไฮโดรเจนและแอมโมเนีย ล้วนก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด ในการกำจัดก๊าซ

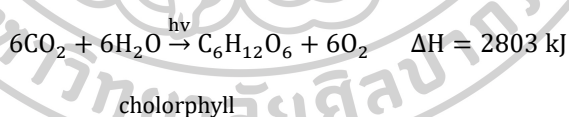
คาร์บอนไดออกไซด์ออกจากอากาศต้องอาศัยกระบวนการการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช (photosynthesis) การผุกร่อนของหิน และการสังเคราะห์ทางเคมีของแบคทีเรียบางชนิด โดยกระบวนการสร้างและใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นที่ ชีวมณฑล (biosphere) ซึ่งจะกล่าวต่อไปในข้อที่ 4)

3) อุทกภาค

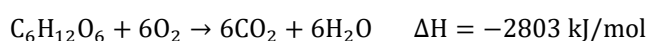
อุทกภาคประกอบไปด้วยมหาสมุทร ทะเล ทะเลสาบ ลำธาร และแหล่งน้ำอื่น ๆ บนโลก ปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมดในทะเลและมหาสมุทรมีค่าประมาณ 1.4×10^{14} ตัน ในน้ำทะเลคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในรูปของคาร์บอเนต ไฮโดรเจนคาร์บอเนต กรดคาร์บอนิก และในรูปของสารละลาย โดยปกติแล้วปริมาณของคาร์บอเนตจะคงที่ แต่ไฮโดรคาร์บอเนตนั้นไม่คงที่และจะปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นก๊าซเมื่ออุณหภูมิของน้ำเพิ่มขึ้นหรือความดันบางส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่เหนือผิวน้ำลดลง ดังนั้นสมดุลไดนามิกจึงขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความดันของมหาสมุทร โดยส่วนที่เย็นกว่าของมหาสมุทรจะดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ และส่วนที่อุ่นกว่าของมหาสมุทรจะปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ

4) ชีวมณฑล

วงจรชีวิตของชีวมณฑลประกอบไปด้วยสิ่งมีชีวิตทุกชนิด ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารสำคัญในวงจรชีวิตของพืชและสัตว์ คาร์บอนไดออกไซด์จึงเป็นพื้นฐานของทุกชีวิตบนโลก พืชดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์จากชั้นบรรยากาศ โดยการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์และสารคลอโรฟิลล์ (chlorophyll) ที่ทำปฏิกิริยากับน้ำเพื่อสร้างกลูโคส (glucose)



ต่อมากลูโคสจะถูกพืชเปลี่ยนให้เป็นน้ำตาลและแป้ง สัตว์ทุกตัวก็อาศัยพืชเพื่อเป็นแหล่งอาหารและแปลงสารประกอบคาร์บอนที่พืชสร้างขึ้นให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ รวมทั้งพลังงานจะถูกปล่อยออกมาพร้อม ๆ กัน ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาที่ตรงข้ามกับการสังเคราะห์ด้วยแสง



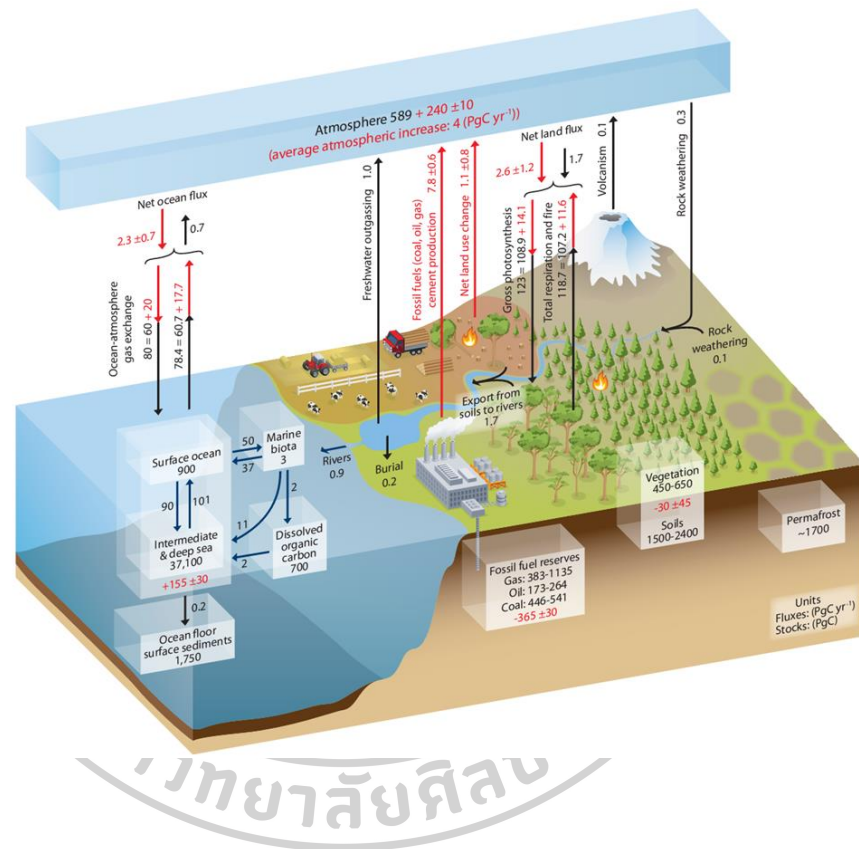
ดังนั้นคาร์บอนจึงมีการแลกเปลี่ยนอย่างต่อเนื่องระหว่างพืชและสัตว์ ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนนี้

Radiocarbon Dating คือ การเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศที่เป็นตัวกำหนดอายุของอิทธิขงวัตถุ คาร์บอนที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติประกอบด้วย ^{12}C 98.89% ^{13}C 1.11% และ ^{14}C ที่มีอยู่เล็กน้อย เมื่อรังสีคอสมิก (cosmic rays) ทำปฏิกิริยากับไนโตรเจนในชั้นบรรยากาศชั้นบนจน

เกิด ^{14}C จากนั้น ^{14}C ได้สลายตัวไป โดยมีครึ่งชีวิต 5,570 ปี นั้นเป็นเวลาเพียงพที่จะทำให้คาร์บอนกลายเป็นส่วนหนึ่งของสิ่งมีชีวิตทุกชนิด ซึ่งอยู่ในสภาวะสมดุลกับคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ เมื่อสิ่งมีชีวิตดังกล่าวตาย ^{14}C ที่อยู่ภายในก็จะสลายตัว เมื่อเปรียบเทียบปริมาณนี้กับสัดส่วนของคาร์บอนกัมมันตภาพรังสีที่มีอยู่ในสิ่งมีชีวิตในปัจจุบัน ซึ่งสามารถหาอายุของสิ่งมีชีวิตที่ตายไปได้ (Topham et al., 2000)

ภาพรวมวัฏจักรคาร์บอนทั่วโลก ดังแสดงในรูปที่ 1 ตัวเลขและลูกศรสีด้าบงบอกถึงมวลของแหล่งกักเก็บและฟลักซ์การแลกเปลี่ยนที่ประมาณไว้ในช่วงก่อนยุคอุตสาหกรรมประมาณปี 1750 การจัดเก็บตะกอนคือผลรวมของคาร์บอนอินทรีย์ 150 PgC ในชั้นผสม และ 1,600 PgC ของ CaCO_3 ในทะเลลึก ลูกศรและตัวเลขสีแดงบงบอกถึงฟลักซ์ที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์รายปี ฟลักซ์เหล่านี้เป็นการก่อกวนวัฏจักรคาร์บอนในช่วงหลังยุคปฏิวัติอุตสาหกรรม ปี ค.ศ. 1750 ฟลักซ์เหล่านี้ (ลูกศรสีแดง) ได้แก่ การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และซีเมนต์ของฟอสซิล การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินสุทธิ และการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศซึ่งโดยเฉลี่ยอัตราการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศเกิดจากการกระทำของมนุษย์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศจะถูกกักเก็บโดยมหาสมุทรและระบบนิเวศบนบก ที่เรียกว่า แหล่งกักเก็บคาร์บอน (ลูกศรสีแดง) เป็นส่วนหนึ่งของฟลักซ์ของพื้นดินสุทธิและการไหลของมหาสมุทรสุทธิ ตัวเลขสีแดงในแหล่งกักเก็บแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงสะสมของคาร์บอนที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ในยุคอุตสาหกรรมช่วงปี ค.ศ. 1750 – 2011 ตามแผนภาพการเปลี่ยนแปลงสะสมเชิงบวกหมายความว่าแหล่งกักเก็บได้รับคาร์บอนมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1750 การเปลี่ยนแปลงสะสมของคาร์บอนที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์ในแหล่งกักเก็บภาคพื้นดินคือ ผลรวมของคาร์บอนที่สูญเสียสะสมจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินและคาร์บอนที่สะสมตั้งแต่ปี ค.ศ. 1750 ในระบบนิเวศอื่น ๆ (ความสมดุลของมวลของปริมาณกักเก็บคาร์บอนในมหาสมุทรทั้งสองแห่ง พื้นผิวมหาสมุทร และมหาสมุทรชั้นกลางและลึก รวมถึงการสะสมของคาร์บอนจากการกระทำของมนุษย์ทุกปี) การประมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และการกักเก็บของพื้นดินและมหาสมุทร (สีแดง) การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ภาคพื้นดินข้างต้น (ลูกศรสีแดงแสดงการสังเคราะห์ด้วยแสงและการหายใจ รวมทั้งการเผาไหม้ของพื้นที่ป่า) ได้รับการประมาณจากแบบจำลอง CMIP5 ส่วนที่มีการแลกเปลี่ยนระหว่างอากาศกับทะเล (ลูกศรสีแดงแสดงการแลกเปลี่ยนของก๊าซในบรรยากาศกับมหาสมุทร) ได้รับการประเมินจากความแตกต่างของความดันย่อยบรรยากาศของคาร์บอนไดออกไซด์ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1750 ฟลักซ์การเปลี่ยนแปลงในแต่ละส่วน และการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ต้นยุคอุตสาหกรรมมีความไม่แน่นอน โดยทั่วไปมากกว่า 20% ในขณะที่ความแตกต่าง (ฟลักซ์บนบกสุทธิและฟลักซ์มหาสมุทรสุทธิในรูปที่ 4) ถูกกำหนดจากการวัดอิสระที่มีความแม่นยำสูง ดังนั้นเพื่อให้เกิดความสมดุลโดยรวม ค่าของฟลักซ์รวมที่ไม่แน่นอนจึงได้รับการปรับเพื่อให้

ความแตกต่างตรงกับค่าฟลักซ์ของบนบกสุทธิและการประมาณค่าของการไหลของมหาสมุทรสุทธิ ฟลักซ์จากการปะทุของภูเขาไฟ การผุกร่อนของหิน (ปฏิกิริยาการผุกร่อนของซิลิเกตและคาร์บอนเนตที่ส่งผลให้เกิดการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศเล็กน้อย) การส่งออกคาร์บอนจากดินไปยังแม่น้ำ การฝังคาร์บอนในทะเลสาบน้ำจืดและแหล่งน้ำ และการขนส่งคาร์บอนทางแม่น้ำสู่มหาสมุทร (Dolman & Dolman, 2019)



รูปที่ 1 แผนผังอย่างง่ายของวัฏจักรคาร์บอนของโลก ตัวเลขแสดงถึงมวลของแหล่งกักเก็บ หรือที่เรียกว่าปริมาณคาร์บอนสะสม ในหน่วย PgC (1 PgC = 10¹⁵ gC) และฟลักซ์การแลกเปลี่ยนคาร์บอนรายปีในหน่วย PgCyr⁻¹ (Dolman & Dolman, 2019)

2.1.2 อันตรกิริยาของโมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์ต่อรังสีอินฟราเรด

อันตรกิริยาของรังสีอินฟราเรดกับการสั่นของโมเลกุลทำให้เกิดสเปกตรัมอินฟราเรด ถ้าตำแหน่งเฉลี่ยและแนวการวางของโมเลกุลยังคงที่ แต่ระยะห่างระหว่างอะตอมในโมเลกุลเปลี่ยนไป การสั่นของโมเลกุลจะเกิดขึ้น สเปกตรัมที่เกิดจากการสั่นนั้นสังเกตได้จากการทดลองในรูปแบบ

อินฟราเรด โดยสเปกตรัมอินฟราเรดสัมพันธ์กับโมเมนต์ไดโพล (μ) ของพันธะ การสั่นพื้นฐานของโมเลกุลมีสองประเภท

- 1) การยืดการสั่นซึ่งระยะห่างระหว่างอะตอมสองอะตอมเพิ่มขึ้นหรือลดลง แต่อะตอมยังคงอยู่ในแกนพันธะเดียวกัน
- 2) การดัดงอหรือการเสียรูป ซึ่งตำแหน่งของอะตอมเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับแกนพันธะเดิม การสั่นของโมเลกุลโพลียะตอมมิก ในกรณีของโมเลกุลที่ประกอบด้วยอะตอมมากกว่า 2 อะตอมขึ้นไป อาจมีโหมดการสั่นได้หลายโหมด โดยวิธีการโดยตรงในการกำหนดการสั่นทั้งหมดคือ การคำนวณระดับความอิสระที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของโมเลกุลต่าง ๆ

การสั่นสะท้อนมาจากการบีบอัดหรือการขยายของพันธะเคมี หรือการดัดงอ (การเสียรูป) ของมุมพันธะ โหมดการสั่นแต่ละโหมดจะมีความถี่ของการสั่นเป็นลักษณะเฉพาะ เมื่อพิจารณาโมเลกุลที่มีอะตอม N เราสามารถอ้างถึงตำแหน่งของแต่ละอะตอมได้โดยการระบุพิกัดสามพิกัด (เช่น พิกัดคาร์ทีเซียน x , y และ z) ดังนั้นจำนวนค่าพิกัดทั้งหมดคือ $3N$ และเราบอกว่าโมเลกุลมีระดับความอิสระ $3N$ อย่างไรก็ตามเมื่อพิกัด $3N$ ทั้งหมดได้รับการแก้ไขระยะพันธะและมุมพันธะของโมเลกุลก็จะคงที่ และไม่สามารถกำหนดข้อกำหนดเฉพาะเพิ่มเติม

ตอนนี้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในพื้นที่สามมิติโดยรวมโดยไม่มี การเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ที่ระดับความอิสระ $3N$ จาก $3N$ โดยเหลือ $3N - 3$ โดยทั่วไปแล้วการหมุนของโมเลกุลที่ไม่เป็นเส้นตรงยังสามารถแก้ไขได้เป็นส่วนประกอบประมาณสามแกนที่ตั้งฉากกัน ข้อมูลจำเพาะของแกนเหล่านี้ยังต้องมีระดับความเป็นอิสระสามระดับ และโมเลกุลจะเหลือระดับความอิสระ $3N - 6$ การเคลื่อนไหวอื่น ๆ ที่ทำได้คือการสั่นภายใน ดังนั้นเราจึงรู้ได้ทันทีว่าโมเลกุลอะตอม N ที่ไม่เป็นเส้นตรงสามารถมีการสั่นสะท้อนภายในที่แตกต่างกันได้ $3N - 6$ ดังนั้นโมเลกุลที่ไม่ใช่เชิงเส้น : การสั่นพื้นฐาน $3N - 6$

ในทางกลับกันหากโมเลกุลเป็นแบบเส้นตรงจะไม่มี การหมุนรอบแกนพันธะ ดังนั้นจึงมีอิสระในการหมุนเพียงสององศาเท่านั้น โดยเหลือองศาอิสระในการสั่นสะท้อนที่ $3N - 5$ ซึ่งมากกว่าในกรณีของโมเลกุลที่ไม่เป็นเชิงเส้นหนึ่งองศา ดังนั้นโมเลกุลเชิงเส้น : การสั่นสะท้อนพื้นฐาน $3N - 5$

ทั้งสองกรณี เนื่องจากโมเลกุลของอะตอม N มีพันธะ $N - 1$ (acyclic) ระหว่างอะตอมของมัน ($N - 1$) ของการสั่นจึงเป็นการเคลื่อนที่ของพันธะที่ยืดออก $2N - 5$ ไม่ใช่เชิงเส้น หรือ $2N - 4$ สำหรับโมเลกุลเชิงเส้น กำลังเคลื่อนที่แบบโค้งงอ $3N - 5$ สำหรับโมเลกุลเชิงเส้น และ $3N - 6$ สำหรับโมเลกุลที่ไม่ใช่เชิงเส้น การเคลื่อนที่แบบสั่นยังเรียกว่าโหมดการสั่นปกติ โดยทั่วไป โหมดปกติของการสั่น

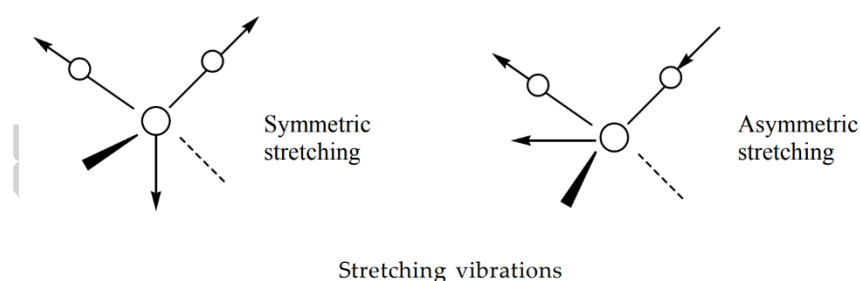
หมายถึงการเคลื่อนที่ของโมเลกุลซึ่งอะตอมทั้งหมดเคลื่อนที่ในเฟสและมีความถี่เท่ากัน ตอนนี้นักเรียนเหล่านี้ถูกจำแนกเป็น

(a) โหมด Stretching ในโหมดนี้ โมเลกุลอาจสั่นโดยการบีบอัดหรือขยายพันธะ เรียกว่าการสั่นสะเทือนแบบยืดพันธะ ระยะห่างระหว่างอะตอมที่สั่นจะเปลี่ยนแปลงเป็นระยะ ๆ ดังนั้นค่าเฉลี่ยจึงเรียกว่าความยาวพันธะ โหมด Stretching แบ่งประเภทเพิ่มเติมได้เป็น

1. การยืดแบบสมมาตร (Symmetric stretching)
2. การยืดแบบอสมมาตร (Asymmetric stretching)

ในพันธะยืดแบบสมมาตร พันธะจะถูกบีบอัดหรือยืดออกเพื่อรักษาความสมมาตรของโมเลกุลไว้ ในการยืดแบบสมมาตร พันธะหนึ่งจะเกิดการยืดออกในขณะที่อีกพันธะหนึ่งถูกบีบอัด

ตัวอย่างเช่น ในกรณีของกลุ่มเมทิลีน $\text{H}-\text{C}-\text{H}$; อะตอม H ทั้งสองเคลื่อนที่ออกจากอะตอมคาร์บอนส่วนกลางโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงมุมพันธะในกรณีของการยืดแบบสมมาตร ในกรณีที่ยืดอสมมาตร อะตอม H หนึ่งอะตอมจะเข้าใกล้อะตอมของคาร์บอน ในขณะที่อะตอม H อีกอะตอมหนึ่งเคลื่อนที่ตัวออกห่างจากอะตอมของคาร์บอน

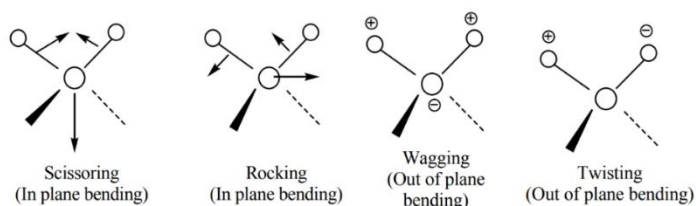


รูปที่ 2 การสั่นของโมเลกุลในโหมด Stretching แบบการยืดแบบสมมาตรและอสมมาตร (Reichenbacher & Popp, 2012)

(b) โหมด Bending: การสั่นดังกล่าวอาจเป็นการเปลี่ยนแปลงมุมพันธะระหว่างพันธะกับอะตอมร่วมหรือการเคลื่อนที่ของกลุ่มอะตอมโดยคำนึงถึงส่วนที่เหลือของโมเลกุลโดยไม่มีการเคลื่อนที่ของอะตอมในโมเลกุล แบ่งออกเป็น 4 ประเภท

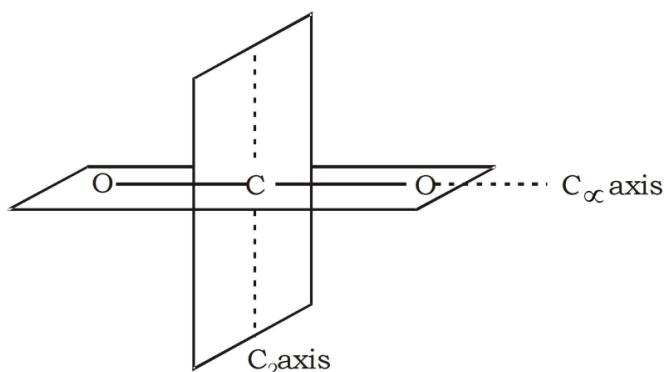
1. Scissoring: แบบกรรไกร คือ ทั้งสองอะตอมที่เกี่ยวข้องกับอะตอมจะเคลื่อนที่เข้าหาและออกจากกันโดยมีการเปลี่ยนรูปของมุมเวเลนซี (ระนาบเกิดการตัด)

2. Rocking: แบบโยก คือ หน่วยโครงสร้างจะแกว่งไปมาในระนาบของโมเลกุล (ระนาบเกิดการงอ)
3. Wagging: แบบกระดิก คือ หน่วยโครงสร้างเคลื่อนที่ไปมาจากระนาบของโมเลกุลออกจากระนาบพันธะ
4. Twisting: แบบการบิด คือ หน่วยโครงสร้างจะหมุนไปรอบพันธะที่เชื่อมเข้ากับส่วนที่เหลือของโมเลกุลของการดีดระนาบ



รูปที่ 3 การสั่นของโมเลกุลในโหมด Bending แบบต่าง ๆ (Reichenbacher & Popp, 2012)

ในโมเลกุลที่มีอะตอมมากกว่าสองอะตอมการสั่นสะเทือนทั้งสี่ประเภทอาจเกิดขึ้นได้ เมื่อพิจารณาสเปกตรัมอินฟราเรดของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งเป็นโมเลกุลไดอะตอมเชิงเส้น และมีโหมดปกติ 4 โหมด ในการสั่นของโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์คิดจากโมเลกุลไดอะตอมเชิงเส้น ที่มี $N = 3$ โหมดของการสั่น $= 3N - 5 = 3 \times 3 - 5 = 4$ โหมดการสั่นสะเทือนแสดงในรูปด้านล่าง



CO_2 เป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้วและไม่มีโมเมนต์ไดโพลถาวร ($\mu = 0$) โหมดการสั่นแบบยืดออกสองโหมดคือ

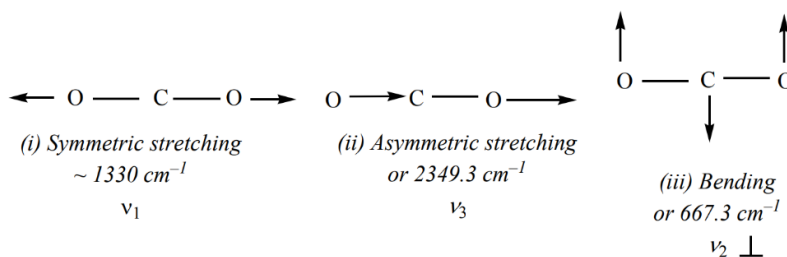
1.การยืดแบบสมมาตร (Symmetric stretching): พันธะโควาเลนต์ทั้งสองอยู่ในระนาบเดียวกัน โมเลกุลยังคงสมมาตรในระหว่างการสั่นสะเทือนโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ไดโพล ดังนั้นการยืดแบบสมมาตรจึงไม่มีการใช้งานในช่วงอินฟราเรด (IR)

2.การยืดแบบอสมมาตร (Asymmetric stretching): คือพันธะหนึ่งพันธะขยายออก สิ่งนี้นำไปสู่การหายไปของความสมมาตรของโมเลกุล ทำให้เกิดการก่อตัวของไดโพลทันทีที่ทำให้แถบ จึงมีการใช้งานในช่วงอินฟราเรด (IR)

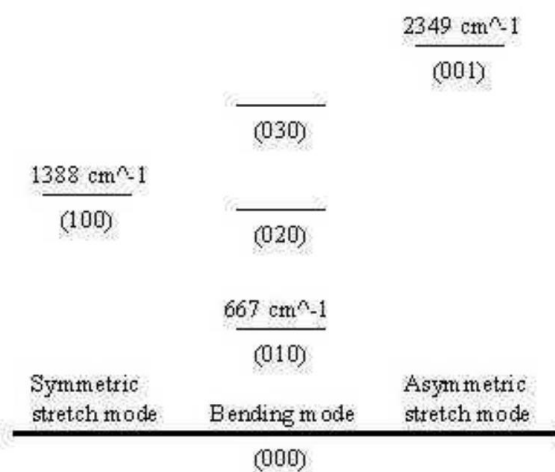
3.การสั่นแบบการดัด (Bending vibration) : โมเลกุลสามารถโค้งงอในสองทิศทางอิสระเป็นมุมฉากซึ่งกันและกัน เกิดขึ้นที่ความถี่เดียวกันและทำให้เกิดการสั่นสองเท่า มีการสูญเสียความสมมาตรในระหว่างการสั่นและงอของโมเลกุล ทำให้เกิดการก่อตัวของไดโพลทันที และอินฟราเรด (IR) ทำงานอยู่ พันธะการดูดซับนี้เกิดขึ้นที่ 667 cm^{-1}

ถ้า CO_2 เป็นโมเลกุลเชิงเส้น คาดว่าจะมีแถบพื้นฐานสองแถบที่ดูดกลืนในช่วงอินฟราเรด แถบที่ดูดกลืนสองเท่าที่ 667 cm^{-1} จากการสั่นแบบการดัด และแถบพลังงานสูงที่ $2,349\text{ cm}^{-1}$ เกิดจากการสั่นแบบอสมมาตร การยืดแบบสมมาตรเกิดจากการยืดแบบอสมมาตรดังแสดงในรูปที่ 4 และปรากฏที่ใกล้ $1,340\text{ cm}^{-1}$

โครงสร้างของ CO_2 มีคุณสมบัติในการสั่นทำให้เกิดการหมุนซึ่งเป็นคุณสมบัติของก๊าซเรือนกระจกที่สามารถดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจากพื้นผิวโลกและบรรยากาศ และแผ่พลังงานออกมาในรูปของพลังงานความร้อน โมเลกุลคาร์บอนไดออกไซด์สามารถดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานควอนตัมเท่ากับพลังงานที่ใช้ในการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนให้มีสถานะพลังงานสูงขึ้น หรือทำให้ทั้งโมเลกุลอยู่ในโหมดการสั่น ความถี่ของโฟตอนและโหมดการสั่นจะต้องตรงกัน รังสีในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ตและช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นมีแนวโน้มที่จะมีพลังงานที่เพียงพอในการยกระดับพลังงานของอิเล็กตรอนไปสู่ระดับสถานะพลังงานใหม่ ในขณะที่ความยาวคลื่นที่ยาวกว่า เช่น ช่วงความยาวคลื่นในช่วงอินฟราเรดนั้นจะตรงกับความถี่ของการสั่นของโมเลกุล



รูปที่ 4 โหมดการสั่นสะเทือนของ CO_2



รูปที่ 5 ระดับพลังงานการสั่นสะเทือนของโมเลกุล CO_2 ดัดแปลงจาก Kverno's website (Werbe-fuentes et al., 2005)

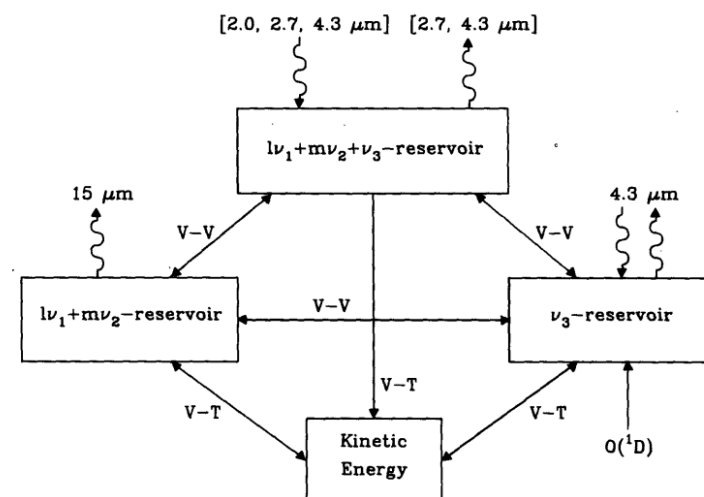
แต่ละโหมดสามารถดูดกลืนความยาวคลื่นได้ในบางช่วงของความยาวคลื่น โดยโหมดโค้งงอนั้นจะดูดกลืนความยาวคลื่นที่ยาวกว่า 667 cm^{-1} และโหมดการสั่นแบบอสมมาตรดูดกลืนความยาวคลื่นที่สั้นกว่าที่ 2349 cm^{-1} เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5 พลังงานจากโฟตอนมี 2 แบบคือ มันสามารถแปลงเป็นพลังงานความร้อนได้โดยการแปลงพลังงานจลน์ภายในของโมเลกุล CO_2 หรือโมเลกุลสามารถส่งโฟตอนกลับมาที่ความยาวคลื่นที่ความถี่ต่ำกว่าได้

CO_2 และโมเลกุลอื่น ๆ ที่มีโครงสร้างคล้ายกัน (เช่น O_3 , H_2O) ทำหน้าที่เหมือนเกราะป้องกันโลกด้วยภาวะเรือนกระจกทำให้พื้นผิวโลกอยู่ในระดับที่สามารถเอื้อต่อสิ่งมีชีวิตสามารถอาศัยให้อยู่ได้ที่อุณหภูมิประมาณ $14 \text{ }^\circ\text{C}$ (57°F) แทนที่จะเป็นอุณหภูมิ $-19 \text{ }^\circ\text{C}$ ($-2.2 \text{ }^\circ\text{F}$) เมื่อไม่มีบรรยากาศดูดซับรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมา ดังนั้นเรือนกระจกทำให้เกิดภาวะโลกร้อนขึ้นประมาณ 33°C (59°F) ด้วยการกักเก็บพลังงาน เรือนกระจกจะทำให้โลกและชั้นบรรยากาศร้อนขึ้นโดยการเพิ่มสมดุลของการแผ่รังสี

ในปี ค.ศ. 1824 Joseph Fourier ค้นพบปรากฏการณ์เรือนกระจกและได้ตรวจสอบในเชิงปริมาณครั้งแรกโดย Svante Arrhenius ในปี ค.ศ. 1896 กล่าวว่า การมีอยู่ของไอน้ำในบรรยากาศและกรดคาร์บอนิก (คาร์บอนไดออกไซด์) เป็นสาเหตุที่สำคัญที่สุดที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก คำนวณจากการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยเปรียบเทียบการแผ่รังสีของดวงจันทร์ที่ปล่อยออกมากับการแผ่รังสีที่สังเกตได้บนโลก ซึ่งดวงจันทร์ใช้เป็นวัตถุที่มีขนาดเทียบเคียงกับโลกได้ โดยที่

ดวงจันทร์แทนวัตถุที่ไม่มีบรรยากาศ จากนั้นคำนวณรังสีที่ดูดซับไว้ในปริมาตรอากาศ แม้ว่าการคำนวณเหล่านี้ได้รับการพิสูจน์ในภายหลังว่าไม่ถูกต้อง แต่ทฤษฎีที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลโดยมนุษย์กับการเพิ่มขึ้นของการกักเก็บรังสีของดวงอาทิตย์ผ่านปรากฏการณ์เรือนกระจกนั้นถูกต้อง

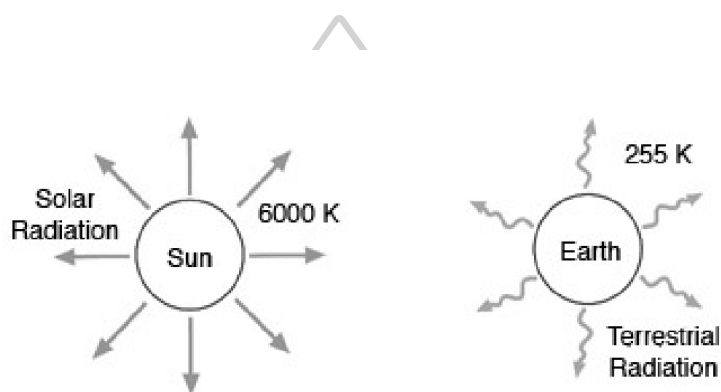
เนื่องจากจุดสูงสุดของการดูดกลืนแสงของ CO_2 อยู่ที่ 15 ไมโครเมตร ซึ่งอยู่ในช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรดไกล อย่างไรก็ตามคาร์บอนไดออกไซด์ยังดูดกลืนรังสีในย่านความถี่ Near-IR (NIR) ระหว่าง 1.05 - 4.3 ไมโครเมตร เมื่อโมเลกุล CO_2 ดูดซับรังสี NIR จะสั่นในโหมดการสั่นแบบอสมมาตรมากขึ้น แบบจำลองที่เหมือนจริงของสมดุลทางอุณหพลศาสตร์แสดงดังรูปที่ 6 พลังงานจะถูกแผ่ออกมาอีกครั้งโดยการปล่อยคลื่นในแถบ NIR และแปลงเป็นพลังงานความร้อนโดยการชนกับโมเลกุลอื่น หรืออยู่ในโหมดการสั่นแบบตัด พลังงานในโหมดนี้จะปล่อยออกมาเป็นโฟตอนที่ความถี่ต่ำกว่าหรือปล่อยพลังงานความร้อนโดยการชนกับโมเลกุลอื่น ในระดับพลังงานความสูงซึ่งมีความดันสูง พลังงานจะถูกแปลงเป็นพลังงานความร้อนมากขึ้นเนื่องจากการชนกับโมเลกุลอื่น ๆ เช่น การดูดกลืน NIR ด้วย CO_2 สามารถมีส่วนทำให้เกิดความร้อนจากแสงอาทิตย์ทั้งหมดในชั้นมีโซสเฟียร์ได้มากถึง 30% ระหว่างความสูง 60-85 กิโลเมตร



รูปที่ 6 แผนภาพแสดงเส้นทางตามการแผ่รังสีที่ถูกดูดซับโดยแถบอินฟราเรดของ CO_2 V-V คือ การแลกเปลี่ยนพลังงานการสั่น และ V-T คือ การแปลงพลังงานการสั่นเป็นพลังงานจลน์ในการชน López-Puertas และคณะ (1990) (Werbe-fuentes et al., 2005)

2.1.3 สมดุลพลังงานของโลก

เมื่อพิจารณาสมดุลการแผ่รังสีของโลก โลกรับรังสีอาทิตย์และดูดกลืนรังสีอาทิตย์ไว้เป็นส่วนใหญ่ เพื่อรักษาสมดุลพลังงานที่แผ่เข้ามาต้องแผ่ออกไปในอัตราเดียวกัน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 7 อุณหภูมิที่ปล่อยออกมาของโลกคือ 255 เคลวิน และรังสีที่ถูกปล่อยออกมานั้นอยู่ในช่วงอินฟราเรด (IR) เป็นหลัก แต่บรรยากาศนั้นดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นนี้ไว้ เนื่องจากการมีอยู่ของก๊าซเรือนกระจกที่มีปริมาณน้อย โดยเฉพาะโมเลกุลของ H_2O และ CO_2 ซึ่งดูดกลืนและแผ่รังสีอินฟราเรด ทำให้อุณหภูมิพื้นผิวโลกสูงกว่าอุณหภูมิที่ถูกแผ่ออกมาจากพื้นผิวโลก กลายเป็นปรากฏการณ์ที่เป็นที่รู้จักกันดี ชื่อภาวะโลกร้อน



รูปที่ 7 โลกแผ่พลังงานออกไปในอัตราเดียวกับที่ได้รับจากดวงอาทิตย์ อุณหภูมิที่ปล่อยออกมาของโลกคือ 255 เคลวิน และของดวงอาทิตย์คือ 6,000 เคลวิน การแผ่รังสีของพื้นดินออกไปจะมีค่าสูงสุดในช่วงอินฟราเรด การแผ่รังสีอาทิตย์ที่เข้ามาจะอยู่ในช่วงที่ตามองเห็นได้ (Hartmann, 2015)

2.1.3.1 อุณหภูมิของโลก

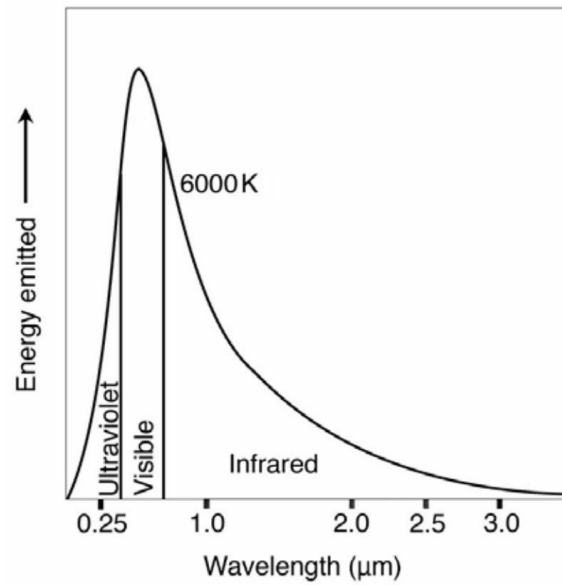
โลกได้รับพลังงานเกือบทั้งหมดจากดวงอาทิตย์ ดวงอาทิตย์ปล่อยพลังงานออกมาในอัตรา $Q = 3.87 \times 10^{26} \text{ W}$ พลักซ์ของพลังงานแสงอาทิตย์ที่แผ่มายังพื้นผิวโลกเรียกว่า “solar constant” ที่ขึ้นอยู่กับระยะห่างของโลกจากดวงอาทิตย์เป็นระยะทาง $r = 150 \times 10^9 \text{ m}$ และกำหนดโดย inverse square law: $S_0 = \frac{Q}{4\pi r^2}$ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของวงโคจรของโลก ค่าคงที่แสงอาทิตย์ที่วัดได้จากภาคพื้นจึงไม่คงที่จริง ๆ ดังนั้นค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่พื้นผิวโลก $S_0 = 1360 \text{ Wm}^{-2}$ ตารางที่ 1 ค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ที่ดาวเคราะห์ดวงอื่น ๆ

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของดาวเคราะห์บางดวง ที่ S_0 คือ ค่าคงที่แสงอาทิตย์ที่ระยะห่าง r จากดวงอาทิตย์ โดย α_p คือ อัลเบโดของดาวเคราะห์ T_c คือ อุณหภูมิที่ปล่อยออกมาซึ่งคำนวณจากสมการ

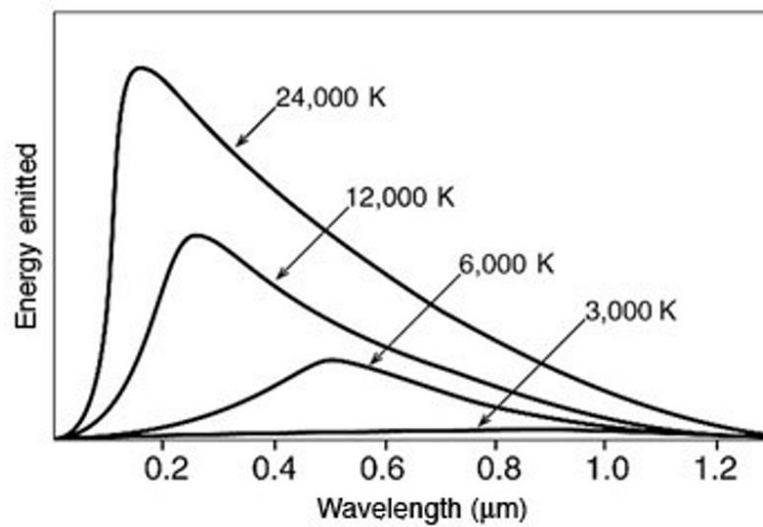
2.12 T_m คือ อุณหภูมิที่ปล่อยออกมาที่ได้จากการวัด และ T_s คือ อุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยทั่วโลก คือ τ จำนวนวันคาบการหมุนรอบตัวเองของดาวเคราะห์ (Hartmann, 2015)

	r $10^9 m$	S_0 Wm^{-2}	α_p	T_e K	T_m K	T_s K	τ <i>Earth days</i>
Venus	108	2632	0.77	227	230	760	243
Earth	150	1367	0.30	255	250	288	1.00
Mars	228	589	0.24	211	220	230	1.03
Jupiter	780	51	0.51	103	130	134	0.41

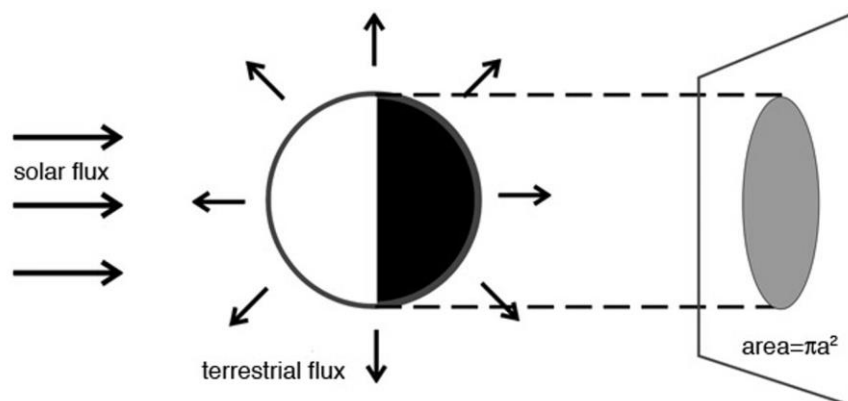
รังสีอาทิตย์มีปฏิกริยากับบรรยากาศขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นและความเข้มของฟลักซ์การแผ่รังสี ความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์พลังงานและความยาวคลื่น (สเปกตรัม) ดังแสดงในรูปที่ 8 ดวงอาทิตย์ปล่อยรังสีส่วนใหญ่อยู่ในช่วงสเปกตรัมที่ตามองเห็น ซึ่งสอดคล้องกับสีของรัง โดยฟลักซ์พลังงานจะลดลงในช่วงรังสีอาทิตย์คลื่นยาวในช่วงอินฟราเรด (IR) และรังสีอาทิตย์คลื่นสั้นในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ซึ่งสเปกตรัมที่แผ่มายังพื้นผิวโลกมีลักษณะเฉพาะของการแผ่รังสีที่ปล่อยออกมาจากวัตถุที่สามารถสังเกตได้ เช่น ไฟจากถ่าน ซึ่งส่วนที่ร้อนที่สุดของไฟเกือบจะเป็นสีขาวและปล่อยรังสีที่มีความเข้มมากที่สุด โดยมีความยาวคลื่นที่สั้นกว่าความยาวคลื่นที่มาจากส่วนที่อุ่นของถ่านซึ่งเป็นสีแดง แต่ในความเป็นจริงแล้วส่วนที่อุ่นนั้นแผ่รังสีอินฟราเรด การทดลองและทฤษฎีแสดงให้เห็นว่าความยาวคลื่นซึ่งมีความเข้มรังสีสูงสุดและฟลักซ์รังสีที่ปล่อยออกมาขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของแหล่งกำเนิดเท่านั้น สเปกตรัมทางทฤษฎีของพลังค์ (Planck) และเป็นที่รู้จักกันในชื่อสเปกตรัม “Plank” และ “blackbody” โดยจะพล็อตเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิดังแสดงในรูปที่ 9 เมื่อวัตถุที่แผ่รังสีความร้อนมากพลังงานที่ปล่อยออกมาก็จะมากขึ้นในช่วงความยาวคลื่นสั้นลง หากสเปกตรัมรังสีที่สังเกตได้ของดวงอาทิตย์ถูกปรับให้เข้ากับส่วนโค้งของวัตถุดำโดยใช้ T เป็นพารามิเตอร์อิสระ ซึ่งอนุมานได้ว่าอุณหภูมิวัตถุดำของดวงอาทิตย์อยู่ที่ประมาณ 6,000 เคลวิน เมื่อพิจารณาสมดุลของพลังงานของโลกดังแสดงในรูปที่ 10 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโลกในส่วนที่บังพลังงานแสงอาทิตย์และแผ่พลังงานออกมาจากพื้นผิวดิน



รูปที่ 8 พลังงานที่ปล่อยออกจากดวงอาทิตย์ซึ่งพล็อตกับความยาวคลื่นโดยอ้างอิงจากเส้นโค้งของวัตถุดำโดยที่ $T = T_{\text{sun}}$ พลังงานส่วนใหญ่อยู่ในส่วนที่ตามองเห็น และ 95% ของพลังงานทั้งหมดอยู่ระหว่าง 0.25 ถึง 2.5 ไมโครเมตร (Hartmann, 2015)



รูปที่ 9 พลังงานที่ปล่อยออกมาในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ สำหรับวัตถุดำที่อุณหภูมิหลายอุณหภูมิ ตามฟังก์ชัน $B_{\lambda}(T)$ (Hartmann, 2015)



รูปที่ 10 แผนภาพแสดงโลกที่กำลังหมุนอยู่และส่วนที่บดบังพลังงานแสงอาทิตย์บนฉากรัศมี a และแผ่พลังงานจากบนพื้นโลกออกไปจากทรงกลมแบบไอโซโทรปิก (isotropic) ดัดแปลงมาจาก Hartmann, 1994 (Hartmann, 2015)

หากอยู่ที่ตำแหน่งของวงโคจรของโลก โดยเฉลี่ยฟลักซ์พลังงานแสงอาทิตย์ที่เข้ามาคือ $S_0 = 1367 \text{ Wm}^{-2}$ ดังนั้นเมื่อพิจารณาที่พื้นที่หน้าตัดของโลกที่บดบังฟลักซ์พลังงานแสงอาทิตย์ คือ πa^2 โดยที่ a คือรัศมีของโลก

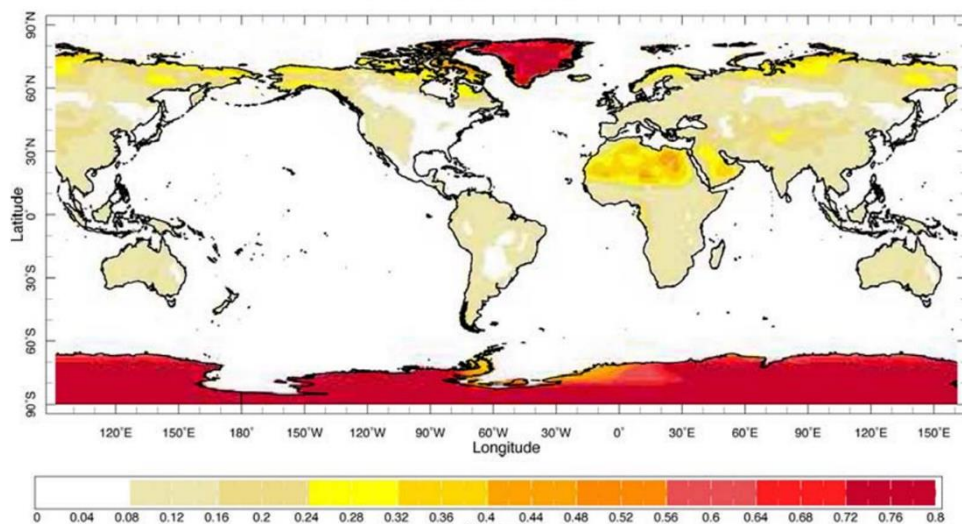
$$\text{พลังงานแสงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นบนโลก} = S_0 \pi a^2 = 1.74 \times 10^{17} \text{ W} \quad (2.8)$$

โลกไม่ได้ดูดซับรังสีอาทิตย์ไว้ทั้งหมดมีบางส่วนที่สะท้อนออกไปในอัตราส่วนของการสะท้อนต่อพลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบเรียกว่า อัลบิโด α (albedo) ตามที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2 และแผนที่อัลบิโดของพื้นผิวที่แสดงในรูปที่ 11 อัลบิโดขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นผิวที่สะท้อน การสะท้อนของเมฆ และผิวพื้นที่สว่าง เช่น ทะเลทราย โดยเฉพาะพื้นที่หิมะและน้ำแข็ง ภายใต้สภาพของโลกในปัจจุบันที่มีเมฆมาก หิมะและน้ำแข็งปกคลุม โดยเฉลี่ยแล้วค่า $\alpha_p \approx 0.30$ ของการแผ่รังสีดวงอาทิตย์เข้ามายังโลกจะสะท้อนกลับไปยังอวกาศ α_p เรียกว่า อัลบิโดของดาวเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อัลบีโดสำหรับพื้นผิวต่าง ๆ อัลบีโดของเมฆมีความแปรปรวนสูงและขึ้นอยู่กับชนิดของเมฆ (Hartmann, 2015)

Type of surface	Albedo (%)
Ocean	2 – 10
Forest	6 – 18
Cities	14 – 18
Grass	7 – 25
Soil	10 – 20
Grassland	16 – 20
Desert (sand)	35 – 45
Ice	20 – 70
Cloud (thin, thick stratus)	30, 60 – 70
Snow (old)	40 – 60
Snow (fresh)	75 – 95

Surface Albedo



รูปที่ 11 อัลบีโดของพื้นผิวโลก บริเวณเหนือมหาสมุทรมีขนาดอัลบีโดต่ำ (2 – 10%) ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าพื้นดิน (โดยทั่วไป 34 – 45% บริเวณพื้นที่ทะเลทราย) และมีค่าสูงบริเวณเหนือหิมะและน้ำแข็ง (80% หรือมากกว่า) (Hartmann, 2015)

การแผ่รังสีที่โลกดูดซับจากการแผ่รังสีอาทิตย์ = $(1 - \alpha_p)S_0\pi a^2 = 1.22 \times 10^{17} \text{ W}$ (2.9)

ในสภาวะสมดุลพลั๊กซ์ภาคพื้นดินทั้งหมดที่แผ่ออกสู่อวกาศจะต้องรักษาสมดุลของรังสีอาทิตย์ที่โลกดูดซับไว้ โดยรวมแล้วในขณะที่โลกหมุนอยู่จะแผ่กระจายรังสีออกไปในทุกทิศทางเหมือนกับวัตถุดำที่มีอุณหภูมิสม่ำเสมอ T_e (เรียกว่า อุณหภูมิดาวเคราะห์สุทธิ ‘effective planetary temperature’ หรือ อุณหภูมิการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ‘emission temperature’) ตามกฎของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ (Stefan-Boltzmann)

$$\text{รังสีที่ปล่อยออกมาต่อหน่วยพื้นที่} = \sigma T_e^4 \quad (2.10)$$

โดยที่ $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ คือ ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์

$$\text{รังสีที่พื้นผิวโลกปล่อยออกมา} = 4\pi a^2 \sigma T_e^4 \quad (2.11)$$

จากสมการที่ 2.11 เป็นคำนิยามของอุณหภูมิที่ปล่อยออกมา T_e ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สามารถอนุมานได้โดยการมองย้อนกลับไปที่โลก หากเส้นโค้งของวัตถุดำพอดีกับสเปกตรัมที่วัดได้ของรังสีที่ส่งออกไป จะได้ว่าสมการที่ 2.9 เท่ากับ สมการที่ 2.11 จะได้

$$T_e = \left[\frac{S_0(1-\alpha_p)}{4\sigma} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.12)$$

หมายเหตุ รัศมีของโลกได้ถูกตัดออกไปแล้ว T_e ขึ้นอยู่กับอัลบีโดของดาวเคราะห์และระยะห่างของโลกจากดวงอาทิตย์เท่านั้น เมื่อใส่ค่าต่าง ๆ ลงในสมการจะพบว่าโลกมีอุณหภูมิเนื่องจากก๊าซเรือนกระจก เท่ากับ 255 เคลวิน จากตารางที่ 1 แสดงพารามิเตอร์ต่าง ๆ สำหรับดาวเคราะห์บางดวงและเปรียบเทียบค่าที่วัดได้โดยประมาณ T_m โดยที่ T_e คำนวณได้สมการ 2.12 จากตารางที่ 1 อุณหภูมิที่ปล่อยออกมาของโลกจะเย็นกว่าอุณหภูมิพื้นผิวโลกโดยเฉลี่ยทั่วโลกที่วัดได้เกือบ 40 เคลวิน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 288 เคลวิน ซึ่งการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ถูกดูดกลืนโดยชั้นบรรยากาศ โดยหลัก ๆ แล้วถูกปกคลุมไปด้วยไอน้ำและการเคลื่อนที่ของของไหล กระแสลม การนำและการพาความร้อนทั้งในแนวตั้งและแนวนอน

2.1.3.2 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงในชั้นบรรยากาศ

คุณสมบัติของเส้นโค้งการแผ่รังสีของวัตถุดำคือ ความยาวคลื่นสูงสุดจากการปล่อยพลังงานสูงสุด (λ_m)

$$\lambda_m T = \text{constant} \quad (2.13)$$

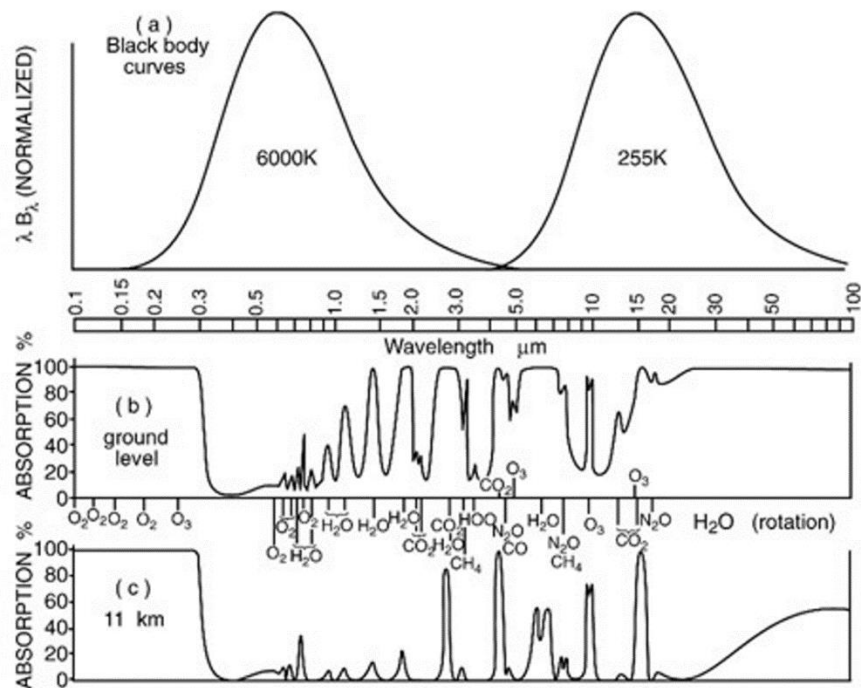
สิ่งนี้เรียกว่า ‘Wien’s displacement law’ เนื่องจากอุณหภูมิที่ปล่อยออกมาจากดวงอาทิตย์อยู่ที่ประมาณ 6,000 เคลวิน และสเปกตรัมสูงสุดของแสงอาทิตย์อยู่ที่ประมาณ 0.6 ไมโครเมตร กล่าวคือ ส่วนที่ตามองเห็นได้และหาค่า T_e เท่ากับ 255 เคลวิน สำหรับโลกได้ จึงเป็นไปตามที่จุดสูงสุดของสเปกตรัมภาคพื้นดินอยู่ที่

$$\lambda_m^{\text{earth}} = 0.6 \mu\text{m} \times \frac{6000}{255} \approx 14 \mu\text{m}$$

ดังนั้นโลกจึงแผ่รังสีไปยังอวกาศโดยอยู่ในช่วงของอินฟราเรดเป็นหลัก สเปกตรัมของวัตถุดำที่ทำให้เป็นมาตรฐานสำหรับดวงอาทิตย์และโลกจะแสดงในรูปที่ 12 สเปกตรัมทั้งสองแทบไม่ซ้อนทับกัน ซึ่งทำให้การถ่ายโอนการแผ่รังสีได้ชัดเจน จากรูปที่ 12 แสดงสเปกตรัมที่ถูกดูดกลืนในชั้นบรรยากาศ ในแต่ละความยาวคลื่นถูกดูดกลืนในเส้นทางแนวตั้งของรังสีที่ผ่านชั้นบรรยากาศจากนั้นจะได้ว่า

1. บรรยากาศเกือบโปร่งแสงอย่างสมบูรณ์ในจุดสูงสุดของสเปกตรัมของแสงอาทิตย์
2. บรรยากาศดูดกลืนรังสียูวีทั้งหมด
3. บรรยากาศมีความทึบซึ่งสเปกตรัมในช่วงอินฟราเรดจะแปรตามความทึบแสงของบรรยากาศ บางช่วงความยาวคลื่นถูกดูดกลืน บางช่วงความยาวคลื่นไม่ถูกดูดกลืน
4. N_2 ไม่ดูดกลืนความยาวคลื่นช่วงใดเลย และ O_2 จะดูดกลืนเฉพาะในช่วงความยาวคลื่นอัลตราไวโอเล็ตไกล (ซึ่งมีฟลักซ์พลังงานแสงอาทิตย์ที่ผ่านลงมายังพื้นผิวโลกเพียงเล็กน้อย) และดูดกลืนช่วงอินฟราเรดไกลเพียงเล็กน้อย
5. รังสีอาทิตย์ก่อนถึงพื้นผิวโลกถูกดูดกลืนด้วยโมเลกุลของ O_3 ในช่วงของอัลตราไวโอเล็ต H_2O CO_2 และอื่น ๆ ดูดกลืนในช่วงอินฟราเรด เพราะมันเกิดขึ้นทันทีที่โมเลกุลที่ประกอบด้วยสามอะตอมนั้นหมุนและสั่นซึ่งเกิดจากคุณสมบัติที่ตอบสนองได้ง่ายเมื่อได้รับพลังงานจากการแผ่รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่สัมพันธ์กับโมเลกุลเหล่านั้น แม้ก๊าซเหล่านี้จะมีความเข้มข้นเพียงเล็กน้อยแต่มีบทบาทสำคัญในการดูดกลืนรังสีที่แผ่ออกมาจากพื้นผิวโลกดังแสดงในรูปที่ 12 ซึ่งก๊าซเหล่านี้เรียกว่า ก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gases) นี้คือเหตุผลพื้นฐานว่าทำไมองค์ประกอบ

ในบรรยากาศที่เกิดจากการกระทำของมนุษย์เสี่ยงต่อการเปลี่ยนแปลงการแผ่รังสี
ในชั้นบรรยากาศ



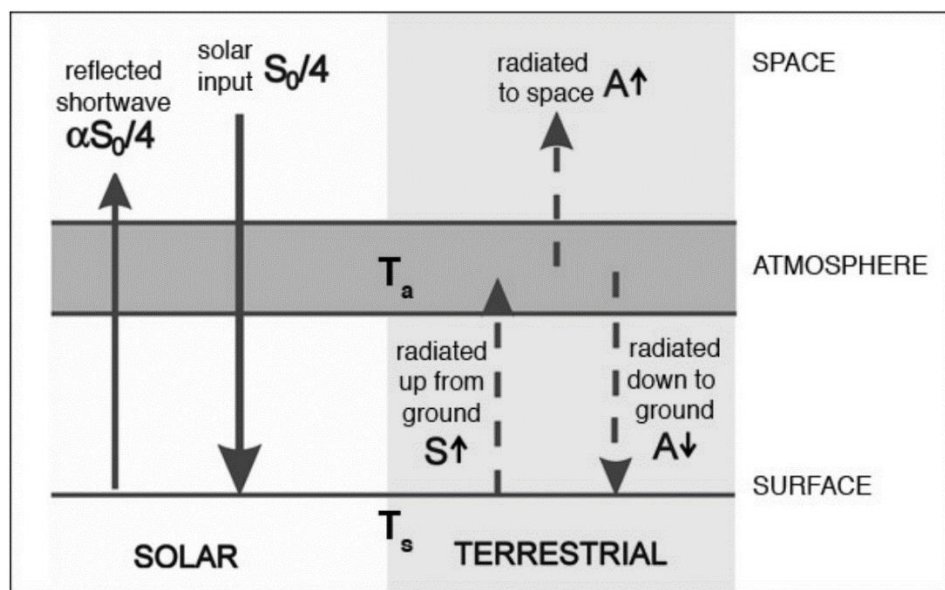
รูปที่ 12 (a) สเปกตรัมจากการแผ่รังสีของวัตถุดำ $T^4 \lambda B_\lambda$ ของดวงอาทิตย์ ($T = 6,000 \text{ K}$) และโลก ($T = 255 \text{ K}$) เป็นฟังก์ชันของ $\ln \lambda$ (ด้านบน) โดยที่ B_λ คือ ฟังก์ชันของวัตถุดำ และ λ คือ ความยาวคลื่น (b) เศษส่วนของการแผ่รังสีที่ถูกดูดกลืนขณะที่รังสีเคลื่อนที่จากพื้นผิวโลกสู่ชั้นบรรยากาศซึ่งเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่น (c) เศษส่วนของการแผ่รังสีที่ถูกดูดกลืนจากชั้นโทรโพพอส (tropopause) โดยทั่วไปอยู่ที่ระดับความสูง 11 กิโลเมตร ขึ้นไปชั้นบนสุดของบรรยากาศ โดยคำนวณจากความยาวคลื่น นอกจากนี้ยังมีการระบุโมเลกุลในชั้นบรรยากาศที่เอื้อต่อคุณสมบัติการดูดกลืนรังสีที่สำคัญในแต่ละช่วงความถี่ Goody และ Yung ในปี ค.ศ. 1989 (Hartmann, 2015)

2.1.3.3 ปรางค์การณณ์เรือนกระจก

อุณหภูมิของพื้นผิวโลกเฉลี่ยทั่วโลกอยู่ที่ 288 เคลวิน จากตารางที่ 1 อนุมานได้ว่าอุณหภูมิที่ปล่อยออกมาจากโลกคือ 255 เคลวิน ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิที่วัดได้มาก จากรูปที่ 12 บรรยากาศลดทอนรังสีจนถึงช่วงความยาวคลื่นของอินฟราเรด ดังนั้นรังสีที่แผ่ออกจากพื้นผิวโลกจะไม่ได้แผ่ออกไปยังอวกาศโดยตรง รังสีบางส่วนส่งผ่านออกจากพื้นผิวโลกไปสู่อวกาศ แต่ส่วนใหญ่ขณะที่จะผ่านชั้นบรรยากาศจะถูกดูดกลืนโดย H_2O เป็นหลัก โดยเฉลี่ยแล้วรังสีที่ส่งผ่านจากชั้นแรกของชั้นบรรยากาศ (โดยทั่วไปแล้วประมาณ 5 กิโลเมตร) สู่อวกาศ ซึ่งเป็นบริเวณที่ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยองค์ประกอบ

ในบรรยากาศที่สามารถดูดกลืนช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรดได้ บริเวณนี้ของบรรยากาศจะต้องมีอุณหภูมิที่ปล่อยออกมาไม่ใช่เพียงจากพื้นผิวโลกเท่านั้น ดังนั้นการแผ่รังสีจากชั้นบรรยากาศจะปล่อยออกมาสู่พื้นผิวโลกและบรรยากาศ พื้นผิวจึงไม่เพียงได้รับรังสีจากดวงอาทิตย์เท่านั้น แต่ยังได้รับรังสีอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจากชั้นบรรยากาศด้วย ทำให้อุณหภูมิของโลก T_e อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า ‘ปรากฏการณ์เรือนกระจก’ (greenhouse effect)

1) แบบจำลองปรากฏการณ์เรือนกระจก



รูปที่ 13 แบบจำลองปรากฏการณ์เรือนกระจกอย่างง่าย ซึ่งประกอบไปด้วยอุณหภูมิพื้นผิว T_s และชั้นบรรยากาศที่มีอุณหภูมิ T_a ขึ้นอยู่กับรังสีดวงอาทิตย์ที่เข้ามา $S_0/4$ รังสีที่แผ่จากพื้นผิวโลกที่เพิ่มขึ้นจะถือว่าชั้นบรรยากาศดูดกลืนได้อย่างสมบูรณ์ (Hartmann, 2015)

จากรูปที่ 13 เนื่องจากบรรยากาศเบาบางจึงกำหนดให้เป็นชั้นบาง ๆ ทำให้ง่ายต่อการสมมติโดยพิจารณาจากเรขาคณิต ซึ่งการแผ่รังสีที่เข้ามาต่อหน่วยพื้นที่จะเท่ากับฟลักซ์เฉลี่ยต่อหน่วยพื้นที่ที่ตกกระทบบนโลก พลังงานแสงอาทิตย์ที่เข้ามาเฉลี่ยต่อหน่วยพื้นที่ของพื้นผิวโลกคือ

ฟลักซ์พลังงานของแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบบนพื้นผิวโลก

$$= \frac{\text{intercepted incoming radiation}}{\text{Earth's surface area}} = \frac{S_0 \pi a^2}{4 \pi a^2} = \frac{S_0}{4} \quad (2.14)$$

จากสมการแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิของบรรยากาศ T_a ขึ้นเดียว และในการคำนวณครั้งแรกนี้สมมติว่า 1) รังสีคลื่นสั้นของดวงอาทิตย์มีการส่งผ่านชั้นบรรยากาศมาสู่พื้นโลกได้อย่างสมบูรณ์ และ

2) รังสีอินฟราเรดหรือรังสีคลื่นยาวที่แผ่ออกมาจากดวงอาทิตย์และพื้นผิวโลกถูกดูดกลืนทั้งหมดและชั้นบรรยากาศนั้นแผ่รังสีออกสู่อวกาศ ระบบของบรรยากาศและโลกอยู่ในสภาวะสมดุล ซึ่งรังสีสุทธิออกสู่ระบบเท่ากับรังสีที่เข้าสู่ระบบ จะได้ฟลักซ์พลังงานของแสงอาทิตย์เฉลี่ยต่อหน่วยพื้นที่ดังสมการที่ 2.14 และเมื่อพิจารณาการสะท้อนกลับของรังสีอาทิตย์ $\frac{1}{4}(1 - \alpha_p)$ ดังนั้นในขณะที่การแผ่รังสีจากพื้นผิวโลกออกสู่อวกาศต่อหน่วยพื้นที่ จะเขียนสมการที่ 2.10 ได้ดังนี้

$$A \uparrow = \sigma T_a^4$$

พบว่า
$$\sigma T_a^4 = \frac{1}{4}(1 - \alpha_p)S_0 = \sigma T_e^4 \quad (2.15)$$

โดยใช้ค่านิยามของ T_e ในสมการที่ 2.12 จะได้อุณหภูมิของบรรยากาศที่ปล่อยออกมา (โดยธรรมชาติแล้วบริเวณบรรยากาศจะปล่อยออกสู่อวกาศ)

ฟลักซ์พลังงานของความยาวคลื่นสั้นที่บริเวณพื้นผิวขาเข้าเฉลี่ยเท่ากับ $\frac{1}{4}(1 - \alpha_p)S_0$ ดังนั้นฟลักซ์ของรังสีคลื่นสั้นที่ปล่อยออกมาจากบรรยากาศเท่ากับ

$$A \downarrow = \sigma T_a^4 = \sigma T_e^4$$

โดยมีฟลักซ์ที่แผ่ขึ้นมาจากพื้นผิวโลกคือ

$$S \uparrow = \sigma T_s^4$$

เมื่อ T_s คืออุณหภูมิพื้นผิว เนื่องจากในสภาวะสมดุลฟลักซ์สุทธิที่พื้นดินต้องเป็นศูนย์

$$S \uparrow = \frac{1}{4}(1 - \alpha_p)S_0 + A \downarrow$$

เมื่อ

$$\sigma T_s^4 = \frac{1}{4}(1 - \alpha_p)S_0 + \sigma T_e^4 = 2\sigma T_e^4 \quad (2.16)$$

โดยที่ใช้สมการที่ 2.15 ดังนั้น

$$T_s = 2^{\frac{1}{4}}T_e \quad (2.17)$$

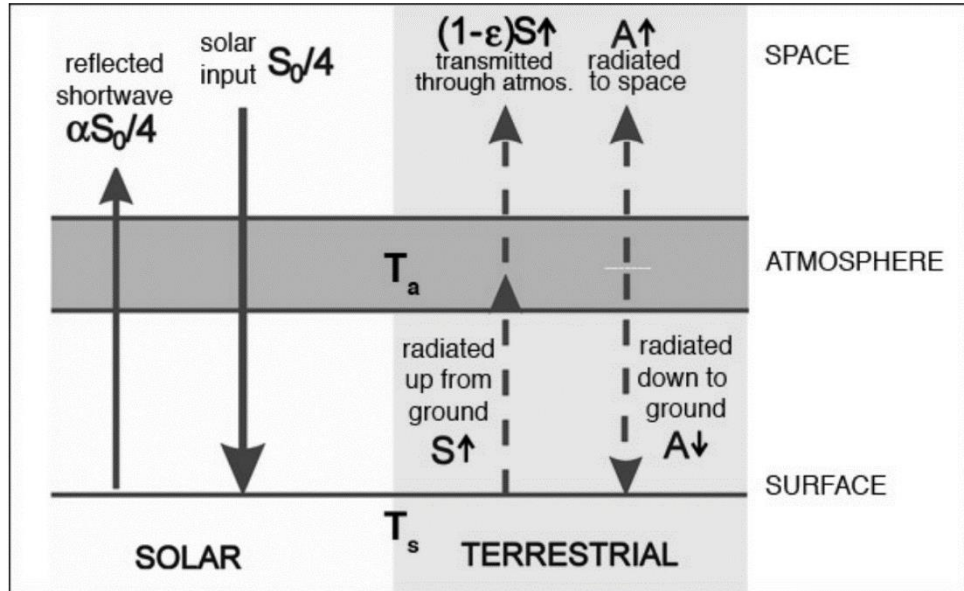
ดังนั้นการมีอยู่ของบรรยากาศที่มีคุณสมบัติในดูดกลืนช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ นั้นทำให้อุณหภูมิที่บริเวณพื้นผิวโลกเพิ่มขึ้น $2^{\frac{1}{4}} = 1.19$ สิ่งที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลโดยตรงมาจากการดูดกลืนรังสีที่แผ่ออกมาจากพื้นผิวโลกโดยชั้นบรรยากาศ ซึ่งในขณะเดียวกันจะแผ่รังสีอินฟราเรดกลับลงสู่พื้นผิวโลกและบรรยากาศ ส่งผลให้ฟลักซ์การแผ่รังสีสุทธิที่พื้นผิวโลกลดลง $A \downarrow$ มีลักษณะเดียวกันกับความเป็นจริงเมื่อพิจารณาในรูปแบบอย่างง่ายเท่านั้น การแผ่รังสีอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกนี้เป็นเรื่องที่ควร

พิจารณาในแบบจำลองที่ซับซ้อนกว่า และแสดงให้เห็นว่าการแผ่รังสีที่ลดลงจากชั้นบรรยากาศเกิดขึ้นได้เนื่องจากฟลักซ์ของรังสีอาทิตย์โดยตรง

เมื่อกำหนดค่าคงที่ $T_e = 255$ เคลวิน สามารถหา $T_s = 2^{\frac{1}{4}} \times 255 = 303$ เคลวิน ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยจริงที่ 288 เคลวิน แต่อุณหภูมิที่ได้สูงเกินไป เนื่องจากแบบจำลองที่พิจารณานั้นเรียบง่ายเกินไป

1. ฟลักซ์ของรังสีอาทิตย์ที่อยู่ด้านบนสุดของชั้นบรรยากาศจะส่งผ่านมายังพื้นผิวโลก โดยทั่วไปแล้วจะถูกดูดกลืนด้วยองค์ประกอบในชั้นบรรยากาศ (เมฆ) อยู่ที่ประมาณ 20 – 25%
2. การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดโดยบรรยากาศเป็นปรากฏการณ์เรือนกระจกที่มีความรุนแรงน้อยกว่าแบบจำลองอย่างง่ายที่สมมติไว้ ดังนั้น T_s จึงน้อยกว่าค่าที่ได้จากสมการที่ 2.17 ดังนั้น จะทำการวิเคราะห์ใหม่โดยการแก้ไขแบบจำลองในรูปที่ 13 เพื่อให้การส่งผ่านของรังสีอินฟราเรดบางส่วนนั้นผ่านชั้นบรรยากาศซึ่งเป็นแบบจำลองที่พิจารณาช่องโหว่ของเรือนกระจก

2) ช่องโหว่ของเรือนกระจก



รูปที่ 14 แบบจำลองปรากฏการณ์เรือนกระจกที่พิจารณาช่องโหว่ของเรือนกระจก ซึ่งตรงกันข้ามกับรูปที่ 13 เนื่องจากบรรยากาศในแบบจำลองนี้ดูดกลืน ϵ รังสีที่แผ่ออกมาจากพื้นผิวโลกบางส่วนเท่านั้น (Hartmann, 2015)

พิจารณารูปที่ 14 สมมติว่าบรรยากาศมีการดูดกลืน ε เช่น ε ของอินฟราเรดที่เพิ่มขึ้นจากรังสีที่แผ่จากพื้นผิวโลกและดูดกลืนไว้ในบรรยากาศ (จากสมการที่ 2.15 ให้ $\varepsilon = 1$) ในสภาวะสมดุลจะได้ว่า พลักซ์สุทธิของชั้นบรรยากาศเท่ากับ

$$\frac{1}{4}(1 - \alpha_p)S_0 = A \uparrow + (1 - \varepsilon)S \uparrow \quad (2.18)$$

พลักซ์สุทธิเป็นศูนย์ที่พื้นผิวที่แผ่รังสีออกสู่บรรยากาศ

$$\frac{1}{4}(1 - \alpha_p)S_0 = A \downarrow = S \uparrow \quad (2.19)$$

เนื่องจากที่สภาวะสมดุล $A \uparrow = A \downarrow$ จะได้

$$S \uparrow = \sigma T_s^4 = \frac{1}{2(2-\varepsilon)}(1 - \alpha_p)S_0 = \frac{2}{(2-\varepsilon)}\sigma T_e^4 \quad (2.20)$$

ดังนั้น

$$T_s = \left(\frac{2}{2-\varepsilon}\right)^{\frac{1}{4}} T_e \quad (2.21)$$

ขอบเขตของ $\varepsilon \rightarrow 0$ (บรรยากาศมีลักษณะโปร่งใส) $T_s = T_e$ และสำหรับ $\varepsilon \rightarrow 1$ (บรรยากาศมีลักษณะทึบแสง) $T_s = 2^{\frac{1}{4}}T_e$ โดยทั่วไปเมื่อ $0 < \varepsilon < 1$, $T_e < T_s < 2^{\frac{1}{4}}T_e$ ดังนั้นเป็นที่แน่นอนว่า ลักษณะความโปร่งใสบางส่วนของบรรยากาศต่อรังสีอินฟราเรด ทำให้เกิดช่องโหว่ของเรือนกระจก ซึ่งช่วยลดผลกระทบจากภาวะโลกร้อนหรืออุณหภูมิสูงเกินความเป็นจริงที่คำนวณได้จากสมการที่ 2.17

ในการคำนวณหาอุณหภูมิของบรรยากาศจำเป็นต้องอ้างอิงกฎของเคอร์ชอฟฟ์ (Kirchhoff's law) ที่กล่าวว่าค่าการแผ่รังสีของบรรยากาศเท่ากับค่าการดูดกลืนของบรรยากาศ ซึ่งจะสามารถหาอุณหภูมิของอากาศจากสมการ

$$A \uparrow = A \downarrow = \varepsilon T_a^4 \quad (2.22)$$

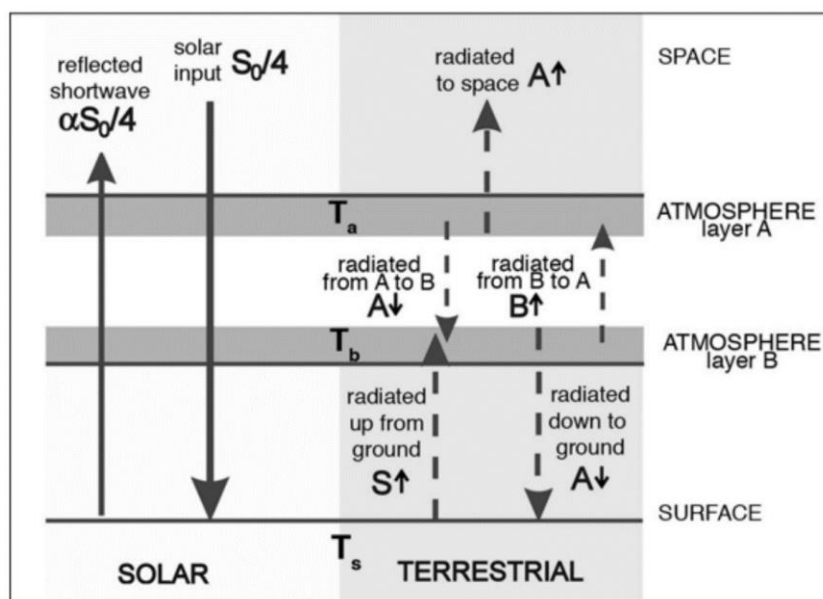
จากแทนสมการ 2.22, 2.18, 2.19 และ 2.20 จะได้

$$T_a = \left(\frac{1}{2-\varepsilon}\right)^{\frac{1}{4}} T_e = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{4}} T_s$$

ดังนั้นสำหรับบรรยากาศ $\varepsilon < 1$ จะเย็นกว่า T_e เนื่องจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจกนั้นมาจากบรรยากาศเพียงบางส่วนเท่านั้น อย่างไรก็ตามโปรดทราบว่า $T_a < T_s$ คือ บรรยากาศจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าพื้นผิวโลกเสมอ

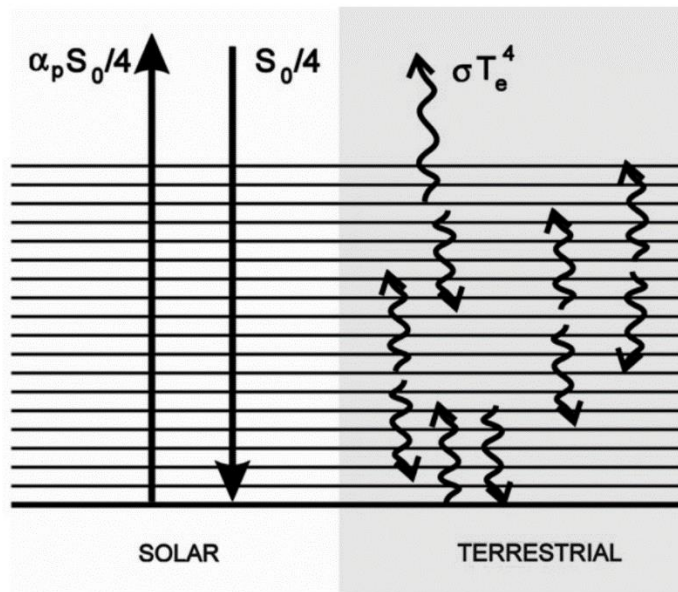
หมายเหตุ กฎของเคอร์ชอฟฟ์ระบุว่าอัตราส่วนของพลักซ์ที่ปล่อยออกมาต่อพลักซ์ที่วัตถุดำปล่อยออกมาที่อุณหภูมิเดียวกันจะเท่ากับค่าการดูดกลืนรังสีของวัตถุดำ

3) เรือนกระจกที่หนามากขึ้น

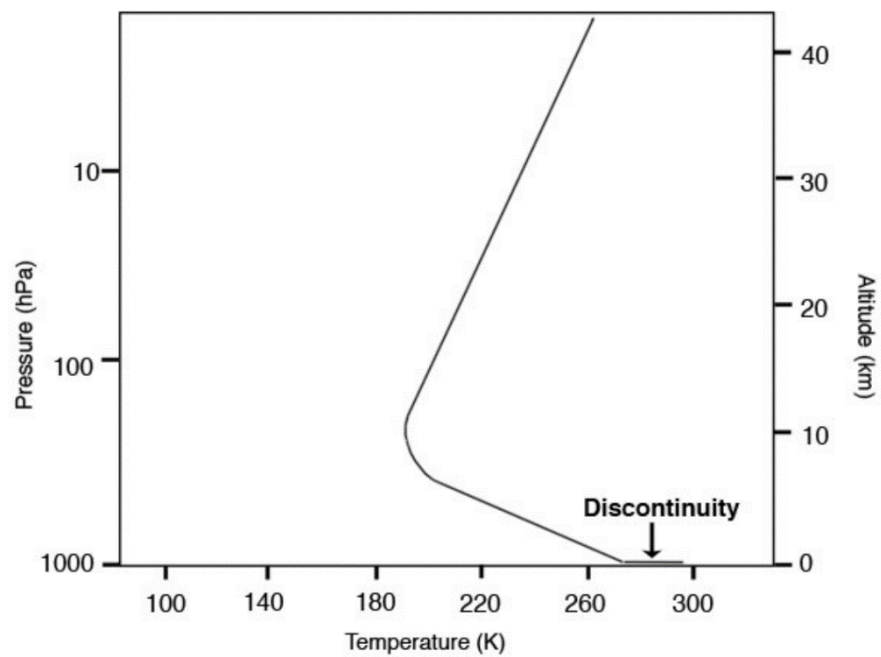


รูปที่ 15 แบบจำลองปรากฏการณ์เรือนกระจกที่ประกอบด้วยชั้นบรรยากาศมีลักษณะทึบแสง 2 ชั้น แต่ละชั้นจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่ตกกระทบกับองค์ประกอบที่มีคุณสมบัติในการดูดกลืนได้อย่างสมบูรณ์ (Hartmann, 2015)

จากแบบจำลองที่พิจารณาช่องโหว่ของเรือนกระจก สมมติว่าบรรยากาศมีความทึบแสงมากจนแม้แต่ชั้นบนสุดของชั้นบรรยากาศก็สามารถดูดกลืนรังสีในช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรดทั้งหมดที่แผ่ออกมาได้ ดังแสดงในรูปที่ 15 พื้นที่และพื้นผิวของบรรยากาศไม่เป็นชั้นเดียวกัน สามารถอธิบายแบบจำลองได้อย่างละเอียดเมื่อชั้นบรรยากาศทั้งสองชั้นดูดกลืนได้อย่างสมบูรณ์ เพื่อที่จะคำนวณได้อย่างถูกต้อง จะแบ่งชั้นบรรยากาศออกเป็นชั้นบาง ๆ ที่ไม่มีขอบเขต และมีเมฆเพื่อศึกษาในแต่ละความยาวคลื่น ในรูปที่ 12 การดูดกลืนในแต่ละช่วงความยาวคลื่นของชั้นบรรยากาศในแต่ละชั้นขึ้นอยู่กับ การกระจายตัวในแนวตั้งขององค์ประกอบในบรรยากาศ โดยเฉพาะ H_2O CO_2 และ O_3 และมีข้อจำกัดในการดูดกลืนรังสีสำหรับแต่ละชั้นบรรยากาศ และที่พื้นผิวของโลก แผนผังลักษณะของบรรยากาศที่ไม่สมบูรณ์ซึ่งมีลักษณะทึบแสดงดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 แผนผังของแบบจำลองการถ่ายโอนรังสีของบรรยากาศที่มีหลายชั้น (Hartmann, 2015)



รูปที่ 17 โพรไฟล์สมดุลการแผ่รังสีของบรรยากาศที่ได้จากการคำนวณตามแผนผังในรูปที่ 16 โดยพิจารณาว่ารังสีถูกดูดกลืนด้วย H_2O , O_3 และ CO_2 รวมถึงผลกระทบของรังสีที่แผ่จากพื้นผิวโลกและดวงอาทิตย์ด้วย หมายเหตุ สังเกตความไม่ต่อเนื่องที่บริเวณพื้นผิวโลก ดัดแปลงมาจาก Well 1997 (Hartmann, 2015)

ผลลัพธ์ที่แสดงเป็นโปรไฟล์ของอุณหภูมิเฉลี่ยของบรรยากาศที่แท้จริง หากการถ่ายเทความร้อนในบรรยากาศเกิดขึ้นผ่านการถ่ายโอนจากการแผ่รังสีเท่านั้น เรียกว่า อุณหภูมิของสมดุลการแผ่รังสี (radiative equilibrium temperature) จากรูปที่ 17 โดยเฉพาะอย่างยิ่งให้สังเกตอุณหภูมิที่ไม่ต่อเนื่องที่บริเวณพื้นผิวโลกในโปรไฟล์สมดุลการแผ่รังสีซึ่งไม่พบในทางปฏิบัติ (จากแบบจำลองปรากฏการณ์เรือนกระจกอย่างง่ายบรรยากาศมีอุณหภูมิต่ำกว่าพื้นผิวโลก) สาเหตุของความไม่ต่อเนื่องของอุณหภูมิที่พื้นผิวโลกนี้เกิดจากสมดุลของการแผ่รังสี คือ ถึงแม้ว่าจะมีการดูดกลืนรังสีบางส่วนในชั้นโทรโพสเฟียร์ (troposphere) แต่ทั้งรังสีที่แผ่มาจากดวงอาทิตย์และที่แผ่มาจากพื้นผิวโลก ซึ่งรังสีอาทิตย์ส่วนใหญ่จะถูกดูดกลืนไว้ที่พื้นผิวโลก ความไม่ต่อเนื่องของอุณหภูมิดังกล่าวสังเกตได้ในธรรมชาติคือ เกิดจากการความร้อนในชั้นบรรยากาศทำให้เกิดรูปแบบการถ่ายเทความร้อนแบบไดนามิกอันเนื่องมาจากการหมุนเวียนของบรรยากาศด้านล่าง ลักษณะที่สังเกตได้จึงแตกต่างกันอย่างมากเมื่อเทียบกับที่ได้จากการคำนวณจากการแผ่รังสีที่อธิบายไว้ข้างต้น

4) การตอบสนองของสภาพภูมิอากาศต่อปรากฏการณ์เรือนกระจก

แบบจำลองปรากฏการณ์เรือนกระจกแสดงให้เห็นถึงการสะท้อนกลับของรังสี ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการควบคุมสภาพอากาศของโลก Hartmann (1994) คาดว่าการก่อตัวของระบบภูมิอากาศสามารถทำได้โดยการเพิ่มพลังงานเข้าไปในระบบ dQ (Wm^{-2}) และศึกษาผลลัพธ์ของอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยทั่วโลก dT_s และกำหนดให้ $\frac{dT_s}{dQ}$ อุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยทั่วโลกเป็นการวัดความอ่อนไหวต่อสภาพอากาศ (climate sensitivity)

ผลตอบรับเชิงลบต่อการควบคุมอุณหภูมิของโลกคือ การฟุ้งพากรแผ่รังสีคลื่นยาวที่แผ่ออกไปกับอุณหภูมิของดาวเคราะห์ที่เพิ่มขึ้นจะแผ่ความร้อนกลับไปสู่อวกาศมากขึ้น ดังนั้นการใช้สมการที่ 2.10 และการกำหนดค่า $\delta Q = \delta(\sigma T_e^4) = 4T_e^3 \delta T_s$ โดยสันนิษฐานว่า T_e และ T_s นั้นต่างกันด้วยค่าคงที่ แสดงถึงความไวต่อสภาพอากาศที่เกี่ยวข้องกับการแผ่รังสีของวัตถุดำ

$$\frac{\partial T_s}{\partial Q_{BB}} = (4T_e^3)^{-1} = 0.26 \frac{K}{Wm^{-2}} \quad (2.23)$$

โดยที่ค่า $T_e = 255$ เคลวิน ดังนั้นทุก ๆ $1 Wm^{-2}$ ที่เพิ่มขึ้นจะบังคับให้สมดุลพลังงานที่พื้นผิว T_s เพิ่มขึ้นประมาณ $\frac{1}{4}$ องศา สังเกตว่าการเปลี่ยนแปลงของความเข้มรังสีที่พื้นผิวโลก $1 Wm^{-2}$ จำเป็นต้องเปลี่ยนสมดุลพลังงานของพลังงานแสงอาทิตย์ประมาณ $6 Wm^{-2}$ โดยคำนึงถึงผลกระทบในทางเรขาคณิตและอัลบีโด

ผลตอบรับเชิงบวกต่อการควบคุมอุณหภูมิของโลกเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่ขึ้นอยู่กับความดันไอน้ำอิ่มตัว e_s ใน T หากอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำที่สามารถกักเก็บได้เมื่ออิ่มตัวเพิ่มขึ้นเนื่องจาก H_2O เป็นก๊าซเรือนกระจก อุณหภูมิพื้นผิวจึงสูงขึ้นจะได้ว่า

$$\frac{de_s}{e} = \beta dT \quad (2.24)$$

ดังนั้น เมื่อพิจารณาว่า $\beta = 0.067 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ การเปลี่ยนแปลง 1°C^{-1} คือ อุณหภูมิที่นำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์อิ่มตัวที่สังเกตได้ในบรรยากาศ 7% ความชื้นสัมพัทธ์จะไม่แตกต่างกันมากนัก แม้ในระหว่างรอบช่วงฤดูกาลเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน ผลที่ตามมาคือ การมีอยู่ของ H_2O ที่ปล่อยรังสีอินฟราเรดออกสู่พื้นผิวโลกนั้นขึ้นอยู่กับ T_s น้อยกว่าจากการคำนวณของ สเตฟาน-โบลต์ซมันน์ เมื่อพิจารณา Stefan-Boltzmann และ ไอน้ำ จะคำนวณความไวต่อสภาพอากาศได้ดังสมการ

$$\frac{\partial T_s}{\partial Q_{BB \text{ and } H_2O}} = 0.5 \frac{K}{Wm^{-2}}$$

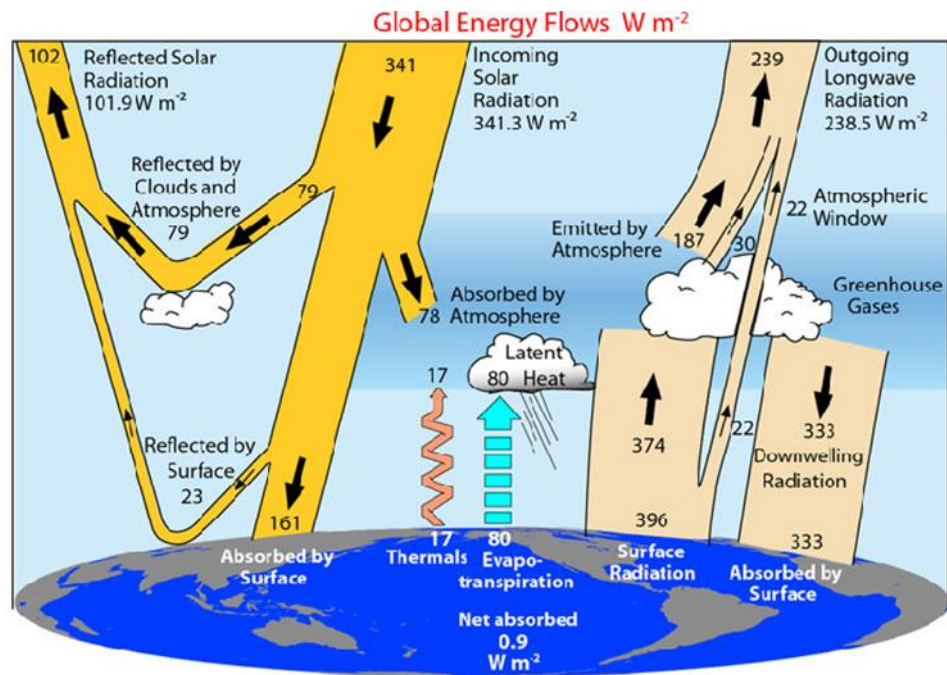
เป็นสองเท่าของสมการที่ 2.24

ทั้งนี้อัลบิโดของน้ำแข็งและเมฆยังมีบทบาทสำคัญในความอ่อนไหวต่อสภาพอากาศอีกด้วย ผลกระทบเบื้องต้นของการถูกปกคลุมด้วยน้ำแข็งคือ อัลบิโดมีค่าสูงเมื่อเทียบกับพื้นผิวดินทั่วไปหรือมหาสมุทร หากพื้นผิวน้ำแข็งขยายไปยังบริเวณที่มีค่าอัลบิโดต่ำ ปริมาณพลังงานแสงอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกดูดซับได้จะลดลง และทำให้เมฆมีอุณหภูมิที่ต่ำลงและเพิ่มการขยายตัวของแผ่นเมฆน้ำแข็งเนื่องจากเมฆที่ประกอบไปด้วยน้ำแข็งนั้นมีปริมาณสูงขึ้น การสะท้อนแสงจึงสูงขึ้นกว่าค่าอัลบิโดปกติของโลกเป็นสองเท่า จาก 15% เป็น 30% และมีผลกระทบสำคัญต่อสมดุลการแผ่รังสีของดาวเคราะห์ อย่างไรก็ตามยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัดว่าจำนวนเมฆหรือเมฆชนิดใดที่มีผลต่อค่าอัลบิโด (ซึ่งทั้งสองอย่างนี้มีความสำคัญต่อสภาพอากาศ) ส่งผลต่อความอ่อนไหวต่อสถานะของสภาพภูมิอากาศหรือการเปลี่ยนแปลงที่อาจเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร เมื่อสภาพอากาศเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เป็นที่น่าเสียดายที่ความเข้าใจเกี่ยวกับการตอบสนองของเมฆต่อรังสียังเป็นหนึ่งในความไม่แน่นอนในวิทยาศาสตร์ภูมิอากาศ

2.1.3.4 การดูดกลืนสเปกตรัมอินฟราเรดโดยคาร์บอนไดออกไซด์

โลกรับรังสีอาทิตย์ทำให้โลกอบอุ่นและให้พลังงานสำหรับการขับเคลื่อนระบบภูมิอากาศ รังสีอาทิตย์ (คลื่นสั้น) บางส่วนถูกสะท้อนกลับไปยังอวกาศโดยเมฆและพื้นผิวโลกที่สว่าง แต่รังสีความร้อนหรือรังสีอินฟราเรด (คลื่นยาว) ที่ถูกแผ่ออกมาจากพื้นผิวโลกไม่ได้แผ่ออกสู่อวกาศโดยตรง แต่ส่วนใหญ่ถูกดูดกลืนโดยก๊าซและเมฆในชั้นบรรยากาศ ซึ่งทำให้โลกอุ่นและแผ่รังสีความร้อนออกไปทั้ง

ออกสู่อวกาศและกลับสู่พื้นผิวโลก สิ่งนี้จะช่วยเพิ่มภาวะโลกร้อนจากแสงอาทิตย์ซึ่งทำให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก สมดุลการแผ่รังสีทั่วโลกกำหนดขึ้นโดยการปรับอุณหภูมิบรรยากาศเพื่อให้ฟลักซ์ของการแผ่รังสีความร้อนที่ออกมาจากโลกเท่ากับรังสีอาทิตย์ที่ถูกดูดซับ ดังแสดงในรูปที่ 18

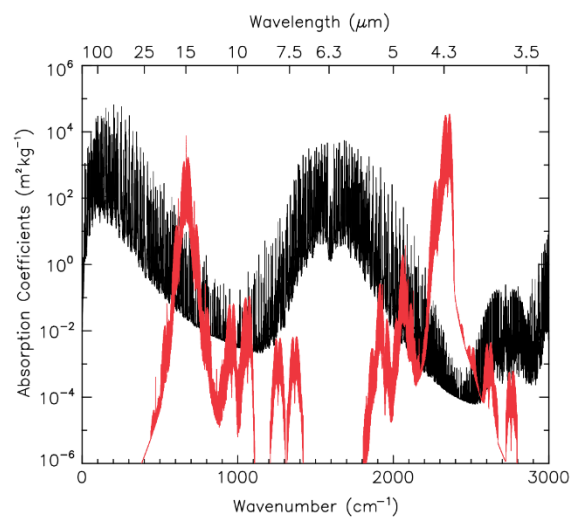


รูปที่ 18 พลังงานเฉลี่ยรายปีทั่วโลกของระบบภูมิอากาศของโลก (Zhong & Haigh, 2013)

จากรูปที่ 18 อ้างอิงจากข้อมูลที่ได้จากการวัด แสดงให้เห็นขนาดของรังสีเหล่านี้ที่ระยะห่างระหว่างโลกจากดวงอาทิตย์ ฟลักซ์ของพลังงานรังสีจะอยู่ที่ประมาณ $1,365 \text{ W/m}^2$ ซึ่งโดยเฉลี่ยทั่วโลกจะเท่ากับ $1,365/4 = 341 \text{ w}$ สำหรับแต่ละตารางเมตรในจำนวนนี้ประมาณ 30% สะท้อนกลับไปยังอวกาศ (โดยพื้นผิวสว่าง เช่น น้ำแข็ง ทะเลทราย และเมฆ) เหลือ $0.7 \times 341 = 239 \text{ W/m}^2$ ในระบบภูมิอากาศบรรยากาศค่อนข้างโปร่งใสต่อรังสีอาทิตย์ที่มีความยาวคลื่นสั้น และมีเพียง 78 W/m^2 เท่านั้นที่ถูกดูดซับโดยบรรยากาศ เหลือไว้ประมาณ 161 W/m^2 ที่ถูกส่งและดูดซับโดยพื้นผิว เนื่องจากก๊าซเรือนกระจกและเมฆ พื้นผิวจึงได้รับความร้อนจากรังสีที่แผ่มาจากบรรยากาศ 333 W/m^2 ดังนั้นการแผ่รังสีความร้อนที่ปล่อยออกมาจากพื้นผิวประมาณ 396 w/m^2 นั้นมากกว่า 157 W/m^2 และมากกว่า 239 W/m^2 ที่ออกจากชั้นบนสุดของบรรยากาศ (เท่ากับรังสีดวงอาทิตย์ที่ถูกดูดซับ)

ปริมาณรังสีที่สะสมขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของก๊าซในบรรยากาศและสเปกตรัม ก๊าซที่เป็นองค์ประกอบหลักในบรรยากาศ ได้แก่ โมเลกุลของไนโตรเจน และออกซิเจน ไม่มีคุณสมบัติในการ

ดูดกลืนที่ความยาวคลื่นอินฟราเรด โดยไอน้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ มีคุณสมบัติในการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นอินฟราเรดดังแสดงในรูปที่ 19 ซึ่งแสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนความยาวคลื่นในช่วงอินฟราเรดต่อหน่วยมวลของก๊าซบริสุทธิ์ที่ความดัน 600 มิลลิบาร์ และอุณหภูมิ 250 เคลวิน H₂O มีช่วงความยาวคลื่นที่ดูดกลืนได้สองช่วงความยาวคลื่นคือ ที่ช่วง > 15 ไมโครเมตร และที่ช่วงความยาวคลื่น 6.3 ไมโครเมตร โดยปล่อยช่วงความยาวคลื่นที่มีค่าการดูดกลืนน้อยกว่าศูนย์อยู่ที่ช่วง 12 ไมโครเมตร และ 4 ไมโครเมตร CO₂ มีคุณสมบัติที่ชัดเจนมากกว่า โดยมีศูนย์กลางอยู่ที่แถบช่วงความยาวคลื่นสองช่วงที่ 15 ไมโครเมตร และ 4.3 ไมโครเมตร ซึ่งบังเอิญอยู่ในช่วงของสเปกตรัมที่ H₂O ซึ่งดูดกลืนในแถบช่วงความยาวคลื่นย่อยของ CO₂ อยู่ในวงใกล้ 10 ไมโครเมตร

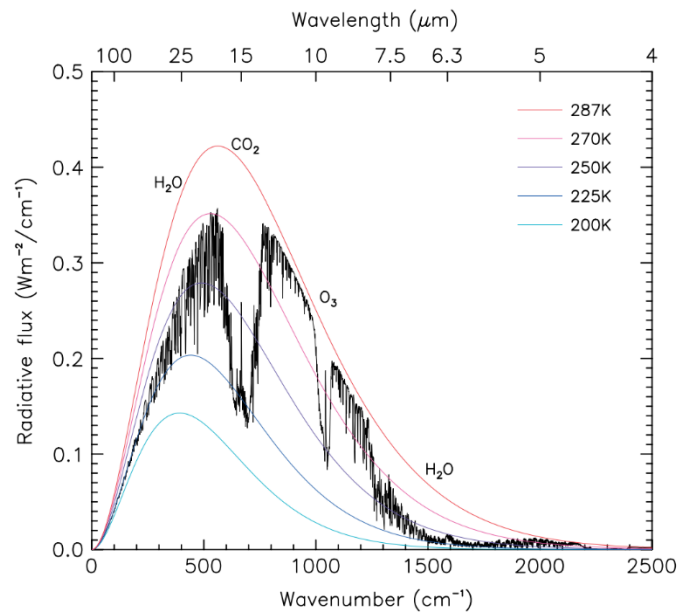


รูปที่ 19 ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน คำนวณโดยใช้แบบจำลองการถ่ายโอนรังสีแบบเส้นต่อเส้นโดย Francis และ Edwards 2007 พร้อมฐานข้อมูลสเปกตรัม HITRAN2004 สำหรับไอน้ำ (เส้นโค้งสีดำ) และ คาร์บอนไดออกไซด์ (เส้นโค้งสีแดง) เป็นฟังก์ชันของเลขคลื่น/ความยาวคลื่น ในแกน x คือความยาวคลื่น หน่วย cm^{-1} แกน y ค่าการดูดกลืนความยาวคลื่นของโมเลกุล ซึ่งเป็นฐานข้อมูลทางสเปกโทรสโกปีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการทำนายและจำลองการส่งผ่าน และการแผ่รังสีในชั้นบรรยากาศ (Zhong & Haigh, 2013)

บทบาทของก๊าซชนิดต่าง ๆ ในการดูดกลืนการแผ่รังสีและการกักเก็บรังสีในชั้นบรรยากาศแสดงไว้ในรูปที่ 20 ซึ่งแสดงสเปกตรัมของฟลักซ์การแผ่รังสีที่ออกมาจากด้านบนของชั้นบรรยากาศ (TOA) ซึ่งคำนวณสำหรับบรรยากาศที่ไม่มีเมฆ โดยมีโปรไฟล์อุณหภูมิแนวตั้งเฉลี่ยทั่วโลกสำหรับ H₂O และ O₃ และเมื่อพิจารณาพื้นผิวโลกที่มีลักษณะเป็นวัตถุดำที่อุณหภูมิ 287.13 เคลวิน ก๊าซเรือนกระจกอีกสามชนิดที่รวมอยู่ในชั้นบรรยากาศคือ CO₂ มีความเข้มข้นที่ 389 part per million by

volume (ppmv) CH_4 มีความเข้มข้นที่ 1.76 ppmv และ N_2O มีความเข้มข้นที่ 0.316 ppmv นอกจากนี้ในรูปที่ 20 แสดงเส้นโค้งสีของสเปกตรัมของการแผ่รังสีซึ่งถูกปล่อยออกมาจากวัตถุดำที่อุณหภูมิที่กำหนด เส้นโค้งสีแดงที่อุณหภูมิพื้นผิวโลกซึ่งไม่มีชั้นบรรยากาศ กระบวนการแผ่รังสีของสเปกตรัมที่ TOA ปล่อยออกมาจะตรงกันกับเส้นโค้งสีแดง อย่างไรก็ตามเห็นได้ชัดว่าเส้นโค้งสีดำตกลงไปต่ำกว่าเส้นสีแดงตลอดช่วงความยาวคลื่นทั้งหมด ซึ่งบ่งชี้ว่ารังสีถูกปล่อยออกสู่อวกาศน้อยกว่าที่ออกจากพื้นผิวโลก การลดลงของเส้นโค้งนั้นบ่งบอกถึงความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนอย่างรุนแรงโดยก๊าซเรือนกระจกของรังสีที่แผ่จากพื้นผิวโลก และส่งผลให้ฟลักซ์ที่ TOA จากชั้นที่สูงขึ้นและเย็นกว่าในชั้นบรรยากาศมีมากขึ้น การแผ่รังสีที่มีประสิทธิภาพในแต่ละความยาวคลื่นสามารถวัดได้โดยการเปรียบเทียบกับเส้นโค้งสีดำที่อุณหภูมิต่ำกว่า พื้นที่ใต้เส้นโค้งสีดำ ซึ่งมีขนาด 257.7 W/m^2 แสดงถึงฟลักซ์รวมของพลังงานรังสีคลื่นยาวที่ออกจากโลก (ซึ่งไม่ใช่ 239 W/m^2 ที่ระบุในรูปที่ 18 เนื่องจากพิจารณาท้องฟ้าไม่มีเมฆ) สเปกตรัมที่คำนวณด้วยวิธีนี้ โดยที่โปรไฟล์ของบรรยากาศสอดคล้องกับการวัดสเปกตรัมอินฟราเรดที่แผ่ออกมาจากพื้นผิวโลกของดาวเทียม เป็นการยืนยันทั้งทฤษฎีการถ่ายโอนการแผ่รังสีและฐานข้อมูลเส้นสเปกตรัม

เส้นโค้งสีดำและสีแดงขีดกันในบริเวณสเปกตรัมที่มีการแผ่รังสีมาบริเวณพื้นผิวโลก บริเวณที่มีการดูดกลืนของ H_2O ตามที่ระบุในรูปที่ 19 ภายใต้สภาวะที่มีความชื้นสูงมีอิทธิพลสำคัญต่อฟลักซ์ที่ความยาวคลื่นยาว เนื่องจากการดูดกลืนอย่างต่อเนื่องซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับฟลักซ์ขาลง แต่การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจะมาจากอากาศบริเวณใกล้พื้นผิวโลก จึงมองไม่เห็นที่ระดับ TOA การเบี่ยงเบนขนาดใหญ่ระหว่างเส้นโค้งสีดำและเส้นโค้งสีแดง สามารถเห็นได้ที่ความยาวคลื่น 15 ไมโครเมตร เนื่องจาก CO_2 และ 9.6 ไมโครเมตร เนื่องจาก O_3 การดูดกลืนของ CO_2 ที่ความยาวคลื่น 15 ไมโครเมตร มีความสำคัญเป็นพิเศษเนื่องจากความยาวคลื่นนี้อยู่ใกล้จุดสูงสุดของสเปกตรัมที่อุณหภูมิแผ่ออกมาของวัตถุดำ อย่างไรก็ตามการดูดกลืนอย่างรุนแรงโดย CO_2 ที่ความยาวคลื่น 4.3 ไมโครเมตร ดังที่ระบุไว้ในรูปที่ 18 นั้นมีอิทธิพลน้อยมากเนื่องจากอยู่ห่างจากจุดสูงสุด



รูปที่ 20 เส้นโค้งสีดำเป็นสเปกตรัมที่สร้างขึ้นโดยแบบจำลองของฟลักซ์การแผ่รังสีอินฟราเรดที่ปล่อยออกมาสู่อวกาศด้านบนของชั้นบรรยากาศ (OLR) เส้นสีแดงแสดงถึงสเปกตรัมของวัตถุดำที่อุณหภูมิต่าง ๆ ขอบเขตของ OLR ที่ลดลงเนื่องจากแถบ H_2O ที่ $0 - 540 \text{ cm}^{-1}$ CO_2 ที่ 15 ไมโครเมตร แถบช่วงความยาวคลื่นที่ $550 - 800 \text{ cm}^{-1}$ O_3 ที่ 9.6 ไมโครเมตรในแถบช่วงความยาวคลื่นที่ $980 - 1100 \text{ cm}^{-1}$ และ H_2O ที่ 6.3 ไมโครเมตรในแถบช่วงความยาวคลื่นที่ $1400 - 1800 \text{ cm}^{-1}$ (Zhong & Haigh, 2013)

จากตารางที่ 3 แสดงผลกระทบของก๊าซแต่ละชนิดที่มีต่อการลดลงของรังสีที่แผ่จากพื้นผิวโลก ส่วนประกอบนี้ถูกรวมโดย H_2O เนื่องจากชั้นบรรยากาศใกล้พื้นผิวโลกมีการแผ่รังสีออกมาผ่าน H_2O อย่างไรก็ตามที่บริเวณด้านบนของชั้นบรรยากาศความต่อเนื่องมีผลเพียงเล็กน้อย เนื่องจากรังสีส่วนใหญ่ที่ปล่อยออกมาจาก H_2O ในชั้นบรรยากาศชั้นล่างดูดกลืนและรังสีที่แผ่ออกมาจากชั้นที่อุณหภูมิต่ำกว่า ในทางกลับกันสำหรับ CO_2 รังสีบางส่วนจากพื้นผิวโลกสามารถส่งผ่านไปสู่อวกาศได้ ดังนั้นผลกระทบสุทธิของ H_2O และ CO_2 ที่ด้านบนของบรรยากาศจึงใกล้เคียงกันมากกว่าที่พื้นผิวโลกมาก และจะเห็นได้ว่าแม้ CO_2 จะมีความเข้มข้นน้อยกว่า 0.04% CO_2 ก็ยังมีส่วนในการดูดกลืนต่อเนื่องเกือบหนึ่งในสี่ของการกักรังสีเรือนกระจกในบรรยากาศภายใต้สภาพท้องฟ้าแจ่มใส

ตารางที่ 3 ผลกระทบต่อฟลักซ์การแผ่รังสีอินฟราเรด (W/m^2) ของการมีอยู่ของบรรยากาศ และก๊าซแต่ละชนิดที่อยู่ภายใน คำนวณจากความแตกต่างระหว่างบรรยากาศที่มีก๊าซทั้งหมดกับบรรยากาศที่ไม่มีก๊าซ

	H ₂ O	CO ₂	O ₃	CH ₄	N ₂ O
Outgoing flux at TOA	-70.6	-25.5	-7.0	-1.7	-1.8
Downward flux at the surface	208.0	16.0	2.6	0.8	0.8
Net (downward - upward) flux change at the tropopause	77.3	38.2	4.3	1.7	2.6

หมายเหตุ การประมาณค่าทำในลักษณะนี้ เนื่องจากการซ้อนทับกันของบริเวณความยาวคลื่นที่เกิดการดูดกลืน หมายความว่าผลกระทบของก๊าซใด ๆ จะไวต่อการมีอยู่ของก๊าซอื่น ๆ การคำนวณผลกระทบของก๊าซที่แยกออกจากกันจึงเป็นการประมาณผลกระทบของก๊าซที่สูงเกินไป

นอกจากนี้ที่แสดงในตารางที่ 3 คือ การเพิ่มขึ้นของฟลักซ์การแผ่รังสีสุทธิ (รังสีขาขึ้นลดลง) ที่โทรโพพอส ขนาดเหล่านี้คล้ายคลึงกับค่าที่ TOA โดยมีความแตกต่างที่กำหนดโดยผลกระทบของสตราโตสเฟียร์ต่อฟลักซ์ขาขึ้นที่โทรโพพอส และฟลักซ์ขาขึ้นที่ TOA ปริมาณพลังงานที่กักอยู่ที่ระบบพื้นผิวทรงกลม (sphere-surface) จะเป็นตัวกำหนด

2.1.4 ผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

โดยเฉลี่ยแล้วโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีการแลกเปลี่ยนระหว่างชั้นบรรยากาศกับพื้นผิวโลกทุก ๆ สองถึงสามปี จากการหมุนเวียนผ่านชั้นบรรยากาศที่รวดเร็วควบคู่ไปกับการหมุนเวียนของคาร์บอนอย่างช้า ๆ ผ่านพืชพรรณบนบก การย่อยสลาย และดิน รวมทั้งพื้นผิวของมหาสมุทร (ในหลายทศวรรษถึงศตวรรษ) จากใต้ดินและทะเลลึก (ศตวรรษถึงพันปี) แห่ล่งกักเก็บคาร์บอนทางธรณีวิทยา เช่น ตะกอนคาร์บอนเนตในทะเลลึก ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศเป็นเพียงส่วนหนึ่งของระบบคาร์บอนของโลก ซึ่งส่วนที่เหลือกักเก็บในแหล่งอื่น ดังนั้นการปล่อยคาร์บอนจากเชื้อเพลิงฟอสซิล และการเพิ่มของการใช้ที่ดินที่มากขึ้น ทำให้ในขณะนี้ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมากเกินไป การที่จะกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่มนุษย์ปล่อยออกมาทั้งหมดอาศัยกระบวนการทางธรรมชาติซึ่งต้องใช้เวลาสองถึงสามแสนปี ตัวอย่างกระบวนการในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากชั้นบรรยากาศตามกระบวนการทางธรรมชาติดังแสดงในตารางที่ 4 Representative Concentration Pathway (RCP) คาดการณ์จากปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ยังคงอยู่ในบรรยากาศ (McInerney และ Wing 2011 ได้อนุมานจากหลักฐานทางธรณีวิทยาพบว่าเมื่อ 55 ล้านปีก่อนในช่วง Paleocene-Eocene มีการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จำนวนมากขึ้นสู่บรรยากาศ) และขนาดของการปล่อยก๊าซในอดีตรวมทั้งในอนาคต

คาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 15 ถึง 40% ที่ปล่อยออกมาถึงปี 2100 จะคงอยู่ในชั้นบรรยากาศนานกว่า 1,000 ปี

ตารางที่ 4 กระบวนการทางธรรมชาติหลัก ๆ ที่ใช้ในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากชั้นบรรยากาศ ระยะเวลาที่ใช้ และปฏิกิริยาทางเคมี (Dolman & Dolman, 2019)

Processes	Time scale (years)	Reactions
Land uptake: Photosynthesis-respiration	1 - 10 ²	$6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + \text{photons} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$ $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 \rightarrow 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + \text{heat}$
Ocean invasion: Seawater buffer	10 - 10 ³	$\text{CO}_2 + \text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 2\text{HCO}_3^-$
Reaction with calcium carbonate	10 ³ - 10 ⁴	$\text{CO}_2 + \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$
Silicate weathering	10 ⁴ - 10 ⁶	$\text{CO}_2 + \text{CaSiO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2$

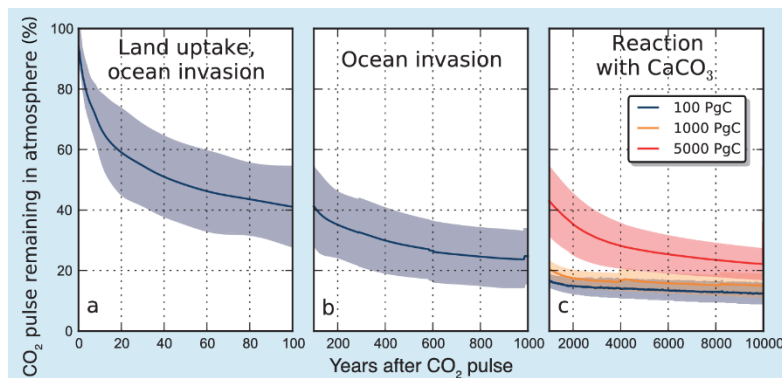
กระบวนการในตารางที่ 4 มีบทบาทในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลาในการกำจัด และระดับการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ดังนั้นระดับคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลกระทบต่อสภาพอากาศของโลก ดังแสดงในรูปที่ 21

ระยะที่ 1 การปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นสู่บรรยากาศหนึ่งในสามหรือครึ่งหนึ่งมาจากการกระทำของมนุษย์จะถูกกักเก็บโดยพื้นดินและมหาสมุทร ในขณะที่ส่วนที่เหลือยังคงอยู่ในชั้นบรรยากาศ ภายในไม่กี่ศตวรรษคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากมนุษย์ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของคาร์บอนอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในมหาสมุทร ส่งผลให้ค่าความเป็น pH ของมหาสมุทรลดลง ภายใน 1,000 ปี สัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหลือในบรรยากาศจะอยู่ระหว่าง 15 ถึง 40% ขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนที่ปล่อยออกมา ความจุคาร์บอนเนตของมหาสมุทรจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงขึ้น ดังนั้นยังปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากขึ้น สัดส่วนของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เหลืออยู่ในบรรยากาศจะยิ่งสูงขึ้นเท่านั้น

ระยะที่ 2 ภายในไม่กี่พันปีค่า pH ของมหาสมุทรที่ลดลงในระยะที่ 1 (มีความเป็นกรดมากขึ้น) ปฏิกิริยาของคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการละลายของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่เป็นตะกอนอยู่ในทะเล ซึ่งบางส่วนจะช่วยเพิ่มความจุคาร์บอนเนตในมหาสมุทร และดึงคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศลงมาอีกครั้ง เนื่องจากสมดุลใหม่ที่ถูกร่างขึ้นระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนต การตกตะกอนในมหาสมุทร และการผุกร่อนของพื้นใต้ทะเล ระยะที่ 2 นี้จะดึงคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศที่เหลืออยู่ได้ 10 ถึง 25%

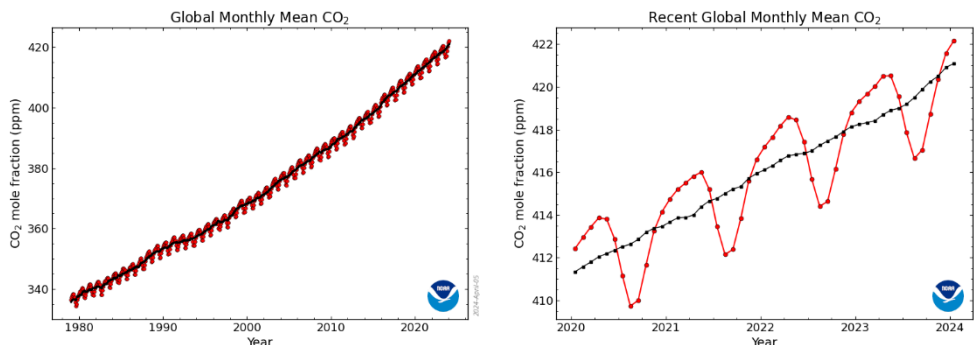
ระยะที่ 3 ภายในเวลาหลายแสนปีส่วนที่เหลือของคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกกำจัดออกจากบรรยากาศโดยการผุกร่อนของซิลิเกต (silicate) ซึ่งเป็นกระบวนการดึงคาร์บอนไดออกไซด์ออกจาก

บรรยากาศที่เข้มข้น โดยคาร์บอนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับแคลเซียมซิลิเกต (CaSiO_3) และแร่ธาตุอื่น ๆ ของหินอัคนี

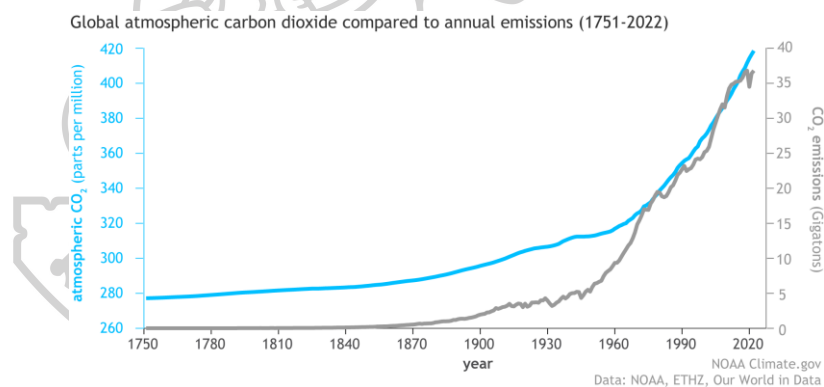


รูปที่ 21 เปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมา และยังคงเหลืออยู่ในบรรยากาศ (Dolman & Dolman, 2019)

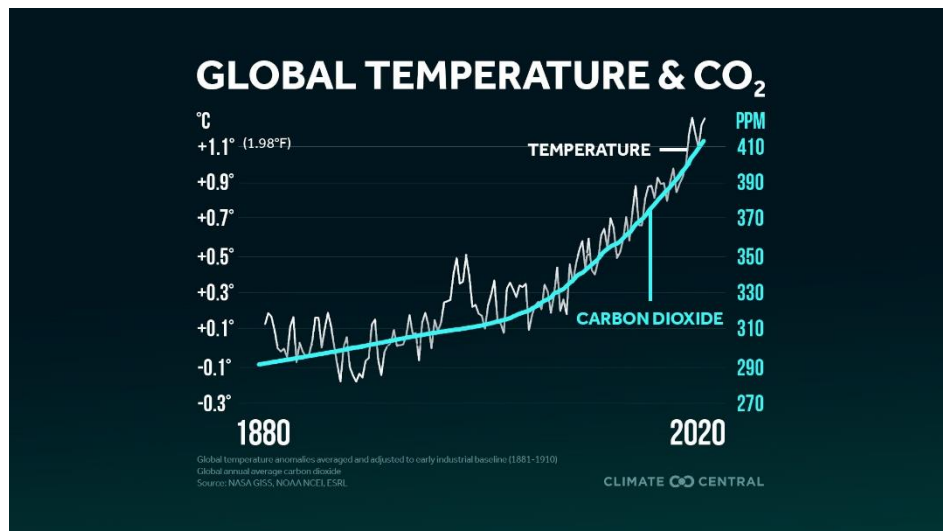
ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นส่วนใหญ่เป็นเพราะเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ผู้คนใช้เผาผลาญเป็นพลังงาน เชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหินและน้ำมัน มีคาร์บอนที่พืชดึงออกมาจากชั้นบรรยากาศผ่านการสังเคราะห์ด้วยแสงเป็นเวลาหลายล้านปี ในศตวรรษที่ 20 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลต่อปีเพิ่มขึ้นทุก ๆ ทศวรรษ จากเกือบ 11 พันล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์ต่อปี ในทศวรรษ 1960 เป็นประมาณ 36.6 พันล้านตันในปี ค.ศ. 2023 ตามรายงานการประมาณคาร์บอนทั่วโลกปี ค.ศ. 2023 เมื่อความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศเพิ่มขึ้นอุณหภูมิของอากาศและพื้นผิวโลกเพิ่มขึ้น ดังรายงานและการติดตามการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์จากสถานีวัดทั่วโลกในรูปที่ 22 กราฟแสดงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนทั่วโลกโดยเฉลี่ยบริเวณพื้นผิวทะเล จากห้องปฏิบัติการติดตามตรวจสอบทั่วโลกได้ตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซเรือนกระจกอื่น ๆ ข้อมูลถูกรายงานเป็นเศษส่วนโมลของอากาศแห้ง ซึ่งหมายถึงจำนวนโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์หารด้วยจำนวนโมเลกุลทั้งหมดในอากาศ รวมถึง CO_2 หลังจากได้ออกน้ำถูกกำจัดออกไปแล้วเศษส่วนของโมลแสดงเป็นส่วนในล้านส่วน (ppm) ตัวอย่าง: 0.000400 แสดงเป็น 400 ppm ซึ่งการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศสอดคล้องกับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นสู่บรรยากาศของมนุษย์ ดังแสดงในรูปที่ 23 ระดับ CO_2 ในชั้นบรรยากาศนั้นควบคุมอุณหภูมิของโลก เมื่อระดับ CO_2 ในบรรยากาศสูงขึ้นอุณหภูมิโลกก็จะสูงขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 24 (Topham et al., 2000)



รูปที่ 22 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนทั่วโลกโดยเฉลี่ยบริเวณพื้นผิวทะเลเส้นประสีแดงที่มีสัญลักษณ์รูปเพชรแสดงถึงค่าเฉลี่ยรายเดือน โดยมีศูนย์กลางอยู่ที่ช่วงกลางเดือนของแต่ละเดือน เส้นสีดำที่มีสัญลักษณ์สี่เหลี่ยมแสดงถึงค่าเฉลี่ยรายเดือน หลังจากแก้ไขรอบฤดูกาลโดยเฉลี่ยแล้ว เส้นสีดำถูกกำหนดเป็นตามรอบของฤดูกาลที่อยู่ติดกันเจ็ดรอบ โดยมีศูนย์กลางอยู่ที่เดือนที่จะแก้ไข ยกเว้นสามปีแรก สามปีสุดท้าย และครั้งปีสุดท้ายของการบันทึก โดยที่รอบฤดูกาลได้รับค่าเฉลี่ยในช่วงแรกและปีสุดท้ายเจ็ดปีตามลำดับ (<https://www.climate.gov/> ของ NOAA)



รูปที่ 23 ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ (เส้นสีน้ำเงิน) เพิ่มขึ้นพร้อมกับการปล่อย CO₂ ของมนุษย์ (เส้นสีเทา) นับตั้งแต่เริ่มต้นการปฏิวัติอุตสาหกรรมในปี 1750 การปล่อยก๊าซเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ เป็นประมาณ 5 กิกะตัน โดยหนึ่งกิกะตันเท่ากับหนึ่งพันล้านเมตริกตันต่อปี ในช่วงกลางศตวรรษที่ 20 ก่อนที่จะพุ่งสูงขึ้นเป็นมากกว่า 35 พันล้านตันต่อปีภายในสิ้นศตวรรษนี้กราฟ NOAA Climate.gov ดัดแปลงมาจากต้นฉบับโดย Dr. Howard Diamond (NOAA ARL) ข้อมูลบรรยากาศ CO₂ จาก NOAA และ ETHZ ข้อมูลการปล่อยก๊าซ CO₂ ข้อมูลจากโครงการคาร์บอนทั่วโลก (<https://www.climate.gov/> ของ NOAA)



รูปที่ 24 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยรายปีทั่วโลก (<https://www.climatecentral.org/climate-matters/yearly-carbon-dioxide-peak>)

จากรายงานของคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change) ประจำปี ค.ศ. 2023 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงอย่างกว้างขวางและรวดเร็วในชั้นบรรยากาศ มหาสมุทร หิมะ (cryosphere) และชีวมณฑลได้เกิดขึ้น การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่เกิดจากมนุษย์ได้ส่งผลกระทบต่อสภาพอากาศและสภาพอากาศสุดขั้วในหลายภูมิภาคทั่วโลก สิ่งนี้นำไปสู่ผลกระทบเชิงลบในวงกว้างและความสูญเสียที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งความเสียหายต่อธรรมชาติ ประชากรในชุมชนที่เปราะบางซึ่งมีส่วนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในปัจจุบันน้อยที่สุดแต่กลับได้รับผลกระทบมากที่สุด ซึ่งผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมีดังนี้

1. บรรยากาศ มหาสมุทร และพื้นดินมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ระดับน้ำทะเลเฉลี่ยทั่วโลกเพิ่มขึ้น 0.20 (0.15 ถึง 0.25) เมตร ระหว่างปี ค.ศ. 1901 ถึงปี ค.ศ. 2018 อัตราการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลโดยเฉลี่ยคือ 1.3 [0.6 ถึง 2.1] มิลลิเมตรต่อปี ระหว่างปี ค.ศ. 1901 และปี ค.ศ. 1971 เพิ่มขึ้นเป็น 1.9 (0.8 ถึง 2.9) มิลลิเมตรต่อปี ระหว่างปี ค.ศ. 1971 ถึงปี ค.ศ. 2006 และเพิ่มขึ้นอีกเป็น 3.7 (3.2 ถึง 4.2) มิลลิเมตร ระหว่างปี ค.ศ. 2006 ถึงปี ค.ศ. 2018 อิทธิพลของมนุษย์เป็นตัวขับเคลื่อนหลักของการเพิ่มขึ้น หลักฐานการเปลี่ยนแปลงสุดขั้วที่สังเกตได้ในปี ค.ศ. 1971 เช่น คลื่นความร้อน ฝนตกหนัก ความแห้งแล้ง และพายุไซโคลนในเขตร้อน และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง อิทธิพลของพายุไซโคลนเหตุการณ์สุดขั้วตั้งแต่ทศวรรษ 1950 รวมถึงความถี่ที่เพิ่มขึ้นของคลื่นความร้อนและความแห้งแล้งพร้อมกัน

2. ผู้คนประมาณ 3.3 ถึง 3.6 พันล้านคนอาศัยอยู่ในความเสี่ยงสูงต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ความเปราะบางของมนุษย์และระบบนิเวศที่ต้องพึ่งพาอาศัยกัน เหตุการณ์สภาพอากาศและสภาพอากาศที่รุนแรงยิ่งขึ้นส่งผลให้ผู้คนหลายล้านคนเผชิญกับความไม่มั่นคงทางอาหารอย่างเฉียบพลัน และความมั่นคงทางน้ำลดลง โดยมีผลกระทบร้ายแรงที่ใหญ่ที่สุดที่พบในพื้นที่หรือชุมชนหลายแห่งในแอฟริกา เอเชีย อเมริกากลางและใต้ ประเทศพัฒนาน้อยที่สุดอย่าง หมู่เกาะขนาดเล็ก และอาร์กติก และสำหรับชนเผ่าพื้นเมืองทั่วโลก ผู้ผลิตอาหารรายย่อย และครัวเรือนที่มีรายได้น้อยระหว่างปี ค.ศ. 2010 ถึงปี ค.ศ. 2020 อัตราการเสียชีวิตของมนุษย์จากน้ำท่วม ภัยแล้ง และพายุสูงขึ้น 15 เท่าในภูมิภาคที่มีความเสี่ยงสูงเมื่อเทียบกับภูมิภาคที่มีความเสี่ยงต่ำ

3. การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทำให้เกิดความเสียหายอย่างมาก และการสูญเสียที่ไม่สามารถย้อนกลับได้เพิ่มมากขึ้นในระบบนิเวศบนบก น้ำจืด ความเย็นเยือกแข็ง รวมถึงชายฝั่งและมหาสมุทร การสูญเสียสายพันธุ์ในท้องถิ่นหลายร้อยชนิดจากการเพิ่มขึ้นของขนาดของความร้อนจัดพร้อมกับเหตุการณ์การเสียชีวิตจำนวนมากที่บันทึกไว้ทั้งบนบกและในมหาสมุทร ผลกระทบต่อระบบนิเวศบางชนิดกำลังใกล้จะกลับคืนไม่ได้ เช่น ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงทางอุทกวิทยาที่เกิดจากการลดลงของธารน้ำแข็ง หรือการเปลี่ยนแปลงในภูเขาบางแห่ง และระบบนิเวศของอาร์กติกโดยการละลายของชั้นดินเยือกแข็งถาวร

4. การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทำให้ความมั่นคงทางอาหารและความมั่นคงทางน้ำลดลงซึ่งเป็นอุปสรรคต่อความพยายามในการบรรลุเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน แม้ว่าผลผลิตทางการเกษตรโดยรวมจะเพิ่มขึ้น แต่การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้ชะลอการเติบโตในช่วง 50 ปีที่ผ่านมาทั่วโลก โดยมีผลกระทบเชิงลบที่เกี่ยวข้องส่วนใหญ่ในภูมิภาคละติจูดกลางและต่ำ แต่ผลกระทบเชิงบวกในบางภูมิภาคที่ละติจูดสูง ภาวะโลกร้อนและความเป็นกรดของมหาสมุทรส่งผลเสียต่อการผลิตอาหารจากการประมงและการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีเปลือกในบางภูมิภาค ปัจจุบันประชากรประมาณครึ่งหนึ่งของโลกประสบปัญหาการขาดแคลนน้ำอย่างรุนแรงเป็นเวลาอย่างน้อยหนึ่งปี เนื่องจากปัจจัยที่ซับซ้อนทั้งสภาพภูมิอากาศและนอกเหนือจากสภาพภูมิอากาศ

5. เหตุการณ์อากาศร้อนจัดที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการเสียชีวิตและการเจ็บป่วยของมนุษย์ การเกิดโรคที่เกิดจากอาหารและน้ำซึ่งเกี่ยวข้องกับสภาพภูมิอากาศ และอุบัติการณ์ของโรคที่เกิดจากแมลงได้เพิ่มขึ้น มีการประเมินด้านสุขภาพจิตบางประการเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความบอบช้ำทางจิตใจจากเหตุการณ์สุดขั้ว และการสูญเสียวิถีชีวิตและวัฒนธรรม สภาพภูมิอากาศและสภาพอากาศสุดขั้วกำลังผลักดันให้เกิดการพลัดถิ่นมากขึ้นในแอฟริกา เอเชีย อเมริกาเหนือ และ

อเมริกากลางและใต้ โดยรัฐที่เป็นเกาะเล็ก ๆ ในทะเลแคริบเบียนและแปซิฟิกใต้ได้รับผลกระทบอย่างมากเมื่อเทียบกับขนาดประชากรที่เล็ก

2.1.5 การวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ

คาร์บอนไดออกไซด์วัดได้จากคุณสมบัติการดูดกลืนรังสีในช่วงอินฟราเรดของสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า คาร์บอนไดออกไซด์เป็นโมเลกุลแบบเฮเทอโรนิวเคลียร์ (heteronuclear) ที่ค่อนข้างเฉื่อย ซึ่งไดโพลที่ผันผวนจะดูดกลืนรังสีอินฟราเรด เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากพลังงานในสถานะการสั่นและการหมุน

หลักในการวัดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์คือ ใช้คุณสมบัติของรังสีอินฟราเรดที่ทำปฏิกิริยากับโมเลกุลได้หลากหลายชนิดเมื่อรังสีอินฟราเรดจะผ่านโมเลกุลอากาศที่มีคุณสมบัติในการดูดกลืนทำให้ความเข้มของรังสีลดลง โดยโมเลกุลของก๊าซที่มีปฏิกิริยากับรังสีอินฟราเรด เมื่อได้รับพลังงานจะมีการเปลี่ยนแปลงของโมเมนต์ไดโพล (μ) ของโมเลกุลจะเกิดขึ้น ไดโพลที่เกิดขึ้นเมื่ออะตอมที่อยู่ติดกันภายในโมเลกุลมีอิเล็กโตรเนกาติวิตี (electronegativities) หรือประจุที่ต่างกัน q และ $-q$ คั่นด้วยระยะทาง r และแทนด้วยเวกเตอร์ μ โมเมนต์ไดโพลเป็นผลคูณของประจุ q และแยกเวกเตอร์ r การเปลี่ยนแปลงของไดโพลโมเมนต์เกิดขึ้น เมื่อระยะทางระหว่างอะตอมทั้งสองที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไดโพลเนื่องจากการสั่นหรือการหมุนในโมเลกุล

หากโมเมนต์ไดโพลเปลี่ยนไปตามการเคลื่อนที่ภายในทำให้เกิดการสั่นของสนามไฟฟ้า รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากเวกเตอร์ไฟฟ้าที่สั่นพร้อม ๆ กัน ความถี่สามารถมีปฏิกิริยาต่อกันและถูกดูดซับโดยโมเลกุล ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในระดับพลังงาน

การวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) ใช้สำหรับการวัดปริมาณหรือความเข้มข้นของสาร ทำได้โดยใช้กฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Atkin 2006) เนื่องจากโมเลกุลดูดกลืนรังสีอาทิตย์ในแถบเฉพาะของโมเลกุล และรังสีที่เกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นเฉพาะเหล่านั้นช่วยให้สามารถหาปริมาณของความเข้มข้นได้

$$A_\lambda = \log_{10} \frac{I_{0,\lambda}}{I_\lambda}$$

โดยที่ A_λ คือ ค่าการดูดกลืนแสงของก๊าซที่ความยาวคลื่น λ [-]

$I_{0,\lambda}$ คือ ความเข้มรังสีที่ตกกระทบบนก๊าซที่ความยาวคลื่น λ [W]

I_λ คือ ความเข้มรังสีที่ผ่านก๊าซที่ความยาวคลื่น λ [W]

กฎของเบียร์-แลมเบิร์ต แสดงการดูดกลืนรังสีเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความเข้มข้นของตัวอย่างที่ความยาวคลื่นคงที่ (Hodgkinson et al., 2013)

$$A_\lambda = \varepsilon_\lambda cl$$

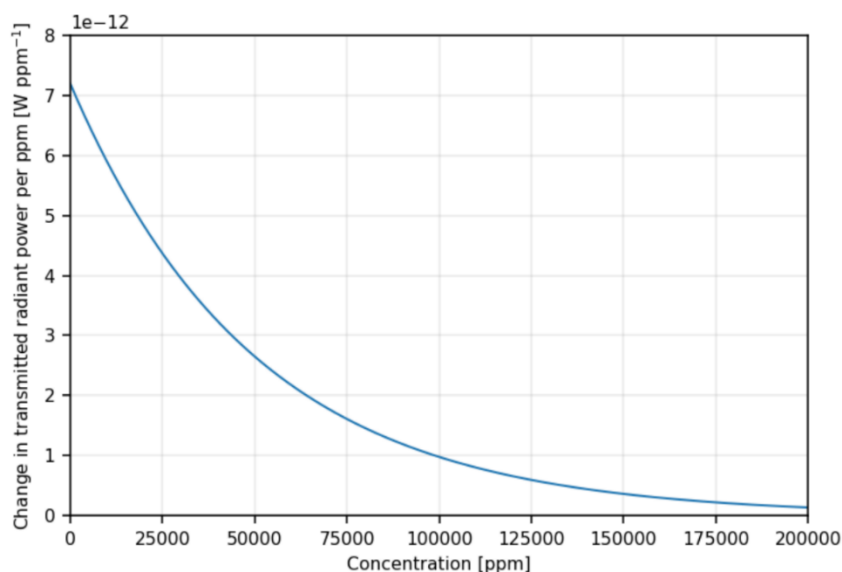
โดยที่ ε_λ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของก๊าซที่ความยาวคลื่น λ [$\text{cm}^{-1} \text{ppm}^{-1}$] หรือ

$$[\text{mol}^{-1} \text{cm}^2]$$

c คือ ความเข้มข้นก๊าซ [ppm] หรือ [mol cm^{-3}]

l คือ ความยาวของเส้นทางที่ความเข้มแสงผ่านก๊าซ [cm]

เมื่อความยาวเส้นทางแสงของก๊าซ (path length) และความยาวคลื่นคงที่ นั้นสามารถสร้างกราฟการดูดกลืนแสงเทียบกับความเข้มข้นของก๊าซได้ กราฟนี้จึงใช้ในการหาค่าความเข้มข้นที่ไม่ทราบค่าได้



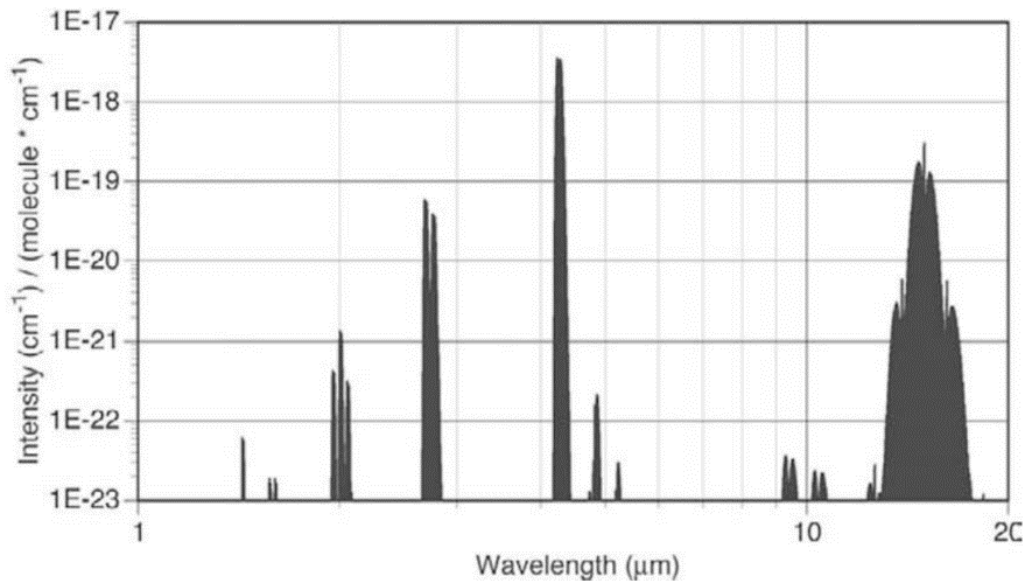
รูปที่ 25 การเปลี่ยนแปลงกำลังการแผ่รังสีที่ส่งผ่านต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นตามฟังก์ชันของ CO_2

คาร์บอนไดออกไซด์มีโหมดการสั่นแบบตัด ที่เท่ากันสองโหมด ซึ่งสร้างแถบการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 15.0 ไมโครเมตร และ โหมดการยืดแบบอสมมาตร ที่สร้างแถบดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 4.26 ไมโครเมตร มีโหมดการยืดแบบสมมาตร ที่ไม่สร้างไดโพลที่ผันผวนดังนั้นจึงไม่ดูดกลืนในช่วงอินฟราเรดมี อีกมากมายที่สร้างแถบการดูดกลืนเพิ่มเติม 11 แถบการดูดกลืน ตั้งแต่ 0.87 ถึง 15.0 ไมโครเมตร ซึ่งแสดงดังรูปที่ 26 แถบความยาวคลื่นที่ยาวกว่ามีบทบาทในการกำหนดอุณหภูมิบรรยากาศ แต่ที่แถบความยาวคลื่น 4.26 ไมโครเมตร เป็นช่วงที่คาร์บอนไดออกไซด์ดูดกลืน

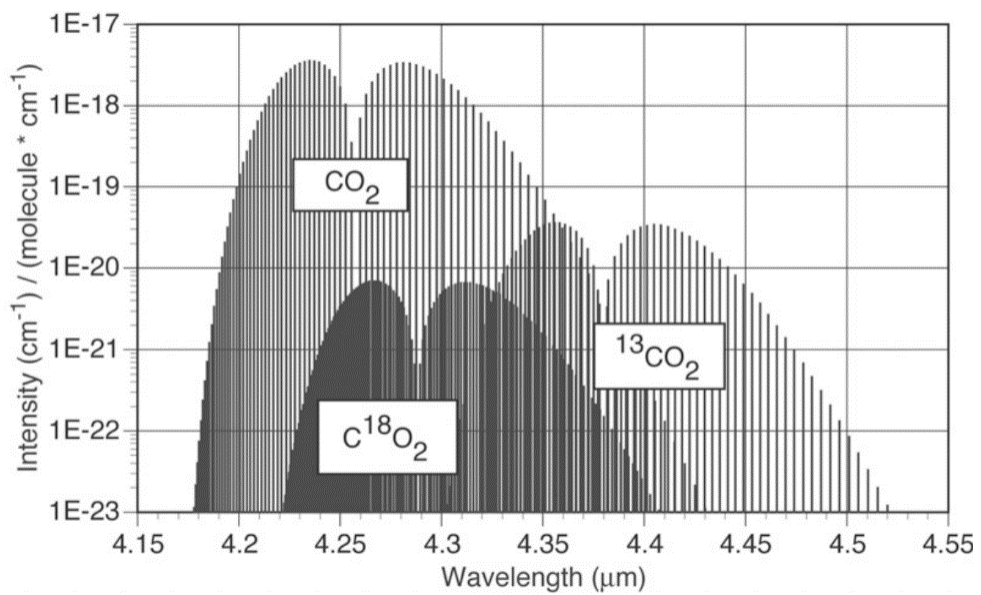
ได้ดีที่สุดจึงมีประโยชน์มากในการนำมาใช้ตรวจวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อพิจารณาที่แถบความยาวคลื่น 4.26 ไมโครเมตร ในรูปที่ 27 แสดงให้เห็นว่าแถบการดูดกลืนแสงนั้นประกอบด้วยเส้นดูดกลืนแสงจำนวนมากซึ่งสอดคล้องกับการสั่นและหมุนของโมเลกุล การวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านการดูดกลืนอินฟราเรด มี 2 วิธี คือ วัดการดูดกลืนแสงทั่วทั้งแถบและวัดการดูดกลืนโดยใช้ช่วงความยาวคลื่นเดียว

วิธีแรกแหล่งกำเนิดอินฟราเรดเกิดจากความร้อนที่ให้กับวัตถุเพื่อปล่อยรังสีผ่านก๊าซตัวอย่างด้วยพลังงานในสเปกตรัมที่กว้าง ตัวกรองจะถูกวางในเส้นทางแสง (optical path) เพื่อที่ความยาวคลื่นแคบที่สอดคล้องกับแถบการดูดกลืนแสงของ CO_2 วิธีนี้มีข้อดีเนื่องจากอุปกรณ์ค่อนข้างเรียบง่าย ราคาไม่แพง และละเอียดมาก แต่จะมีข้อเสียเนื่องจากแถบการดูดกลืนของก๊าซในบรรยากาศมีการซ้อนทับกัน ทำให้การวัดความเข้มข้นของก๊าซมีความสับสน และผลของการดูดกลืนแสงนั้นจะไม่แปรผันตามค่าความเข้มข้นของก๊าซ ซึ่งเป็นไปตามกฎเบียร์-แลมเบิร์ต (LaRocca, 1978) เนื่องจากแถบการดูดกลืนที่เกิดจากการดูดกลืนของก๊าซหลายชนิด บ้างก็มีค่ามากบ้างก็มีค่าน้อย ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของก๊าซที่เป็นตัวดูดกลืนเพิ่มขึ้น เส้นที่เข้มจะอึมตัวในขณะที่เส้นที่อ่อนกว่ายังคงมีส่วนที่ทำให้การดูดกลืนเพิ่มขึ้นต่อไป

วิธีที่สองเป็นการดูดกลืนแสงจากแต่ละความยาวคลื่นสามารถวัดได้โดยการปรับเอาท์พุทของแหล่งกำเนิดของสเปกตรัมเพื่อแถบสเปกตรัมตรงกับก๊าซที่ต้องการวัด โดยวิธีนี้มีข้อดีคือ สามารถแยกแต่ละความยาวคลื่นที่ก๊าซดูดกลืนโดยไม่มีการซ้อนทับกันซึ่งช่วยลดความคลาดเคลื่อนของผลที่ได้จากการดูดกลืนของก๊าซชนิดอื่นได้อย่างมาก และการดูดกลืนแต่ละความยาวคลื่นนั้นเป็นไปตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต ซึ่งวิธีการนี้ขึ้นอยู่กับเลเซอร์ที่มีการปรับให้อยู่ในช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสม โดยเลเซอร์มีราคาแพง และต้องใช้อุณหภูมิที่เย็นจัดในการทำงาน โดยในแถบความยาวคลื่น 4.26 ไมโครเมตร เป็นช่วงที่คาร์บอนไดออกไซด์ดูดกลืนได้มากที่สุด และค่อนข้างปราศจากการดูดกลืนของก๊าซอื่น ๆ ในบรรยากาศ



รูปที่ 26 สเปกตรัมการดูดกลืนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แหล่งที่มา HITRAN96 (Welles & McDermitt, 2005)



รูปที่ 27 การดูดกลืนของคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วง 4.26 ไมโครเมตร ซึ่งรวมถึงไอโซโทปหลักสองไอโซโทป ปรับตามความสมดุลของบรรยากาศโดยทั่วไป HITRAN96 (Rothman 1998) (Welles & McDermitt, 2005)

2.1.5.1 การวัดและติดตามความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศจากภาคพื้น

การวัดภาคพื้นนั้นมีหลายองค์การที่ติดตามและตรวจวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ โดยวิธีในการวัดแบ่งออกได้เป็น 3 แบบ 1) การวัดโดยตรงด้วยหอคอย 2) การสุ่มตัวอย่างปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่สะสมในช่วงเวลาต่าง ๆ และ 3) การประมาณฟลักซ์จากการเปลี่ยนแปลงชั่วคราวของปริมาณคาร์บอน ซึ่งทั้งสามวิธีขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศที่สถานีนั้น ๆ ตัวอย่างเช่น

เครือข่ายสังเกตการณ์คอลัมน์คาร์บอนรวม Total Carbon Column Observing Network (TCCON) ก่อตั้งขึ้นในปี ค.ศ. 2004 โดยเน้นการวัดเชิงคอลัมน์บรรยากาศที่แม่นยำ โดยใช้ Fourier transform spectrometers (FTSs) ซึ่งออกแบบมาเพื่อดึงข้อมูลคอลัมน์ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ไนโตรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ จากสเปกตรัมการดูดกลืนแสงอาทิตย์ช่วงอินฟราเรดใกล้ (NIR) ปัจจุบันมีสถานีนีทั้งหมด 26 สถานีทั่วโลก จุดประสงค์เพื่อตรวจสอบข้อมูลการวัดที่ได้จากดาวเทียม และเป็นมาตรฐานการถ่ายโอนระหว่างการวัดด้วยดาวเทียมและภาคพื้น โดยการวัดในแนวตั้งได้รับอิทธิพลน้อยกว่าการวัดแบบพื้นผิว เนื่องจากการวัดแบบคอลัมน์จะรวมความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เหนือพื้นผิวในแนวตั้ง ซึ่งเป็นวิธีที่ตรงข้ามกับการวัดรังสีอาทิตย์ที่สะท้อนเข้าสู่เซนเซอร์ที่ติดตั้งอยู่บนดาวเทียม และการดึงข้อมูลของ TCCON ไม่ได้รับอิทธิพลจากละอองลอย ความไม่แน่นอนของมวลอากาศหรือการแปรผันของคุณสมบัติที่พื้นผิวดิน

Earth System Research Laboratory's (ESRT) เป็นเครือข่ายก๊าซเรือนกระจกทั่วโลกอย่างของ NOAA ตั้งแต่ต้นทศวรรษ 1990 ทั้งหมด 8 สถานี โดยใช้เสาส่งสัญญาณโทรทัศนและวิทยุที่สูง 300 เมตร ตั้งอยู่ที่สหรัฐอเมริกา ซึ่งข้อมูลที่ได้ใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับ CarbonTraker ของ NOAA ค่าที่วัดได้แสดงถึงอิทธิพลของแหล่งที่มาจากระยะไกลและในท้องถิ่น

Eddy covariance (EC) เป็นเครือข่ายในการหาปริมาณการแลกเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงาน ในระดับระบบที่จัดตั้งเครือข่ายหอฟลักซ์ EC อยู่ทั่วโลกมากกว่า 500 แห่ง ที่เรียกว่า FLUXNET ข้อมูลถูกนำมาใช้ในการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ของ CO_2 H_2O และ การแลกเปลี่ยนพลังงานระหว่างชีวมณฑลและบรรยากาศ แต่เนื่องจากกระบวนการสุ่มมีสัญญาณรบกวนจากความปั่นป่วนของบรรยากาศ ซึ่งใช้การบูรณาการโครงข่ายประสาทเทียม (ANN) และการแปลงคลื่นขนาดเล็กลงแบบแยกส่วน (DWT) ในการประมาณค่าการเปลี่ยนแปลงคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบนิเวศ

The Comprehensive Observation Network for Trace gases by Airliner (CONTRAIL) เป็นเครือข่ายสังเกตการณ์โปรไฟล์คาร์บอนไดออกไซด์ในแนวตั้ง ซึ่งมีสถานีอยู่ในสนามบิน 43 แห่งทั่วโลก อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดเป็นอุปกรณ์เก็บตัวอย่างอากาศอัตโนมัติ (ASE) และ

เครื่องติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดคาร์บอนไดออกไซด์ (CME) ที่ประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ non-dispersive infrared (NDIR) เครื่องบันทึกข้อมูล และกระบอกสอบเทียบสองกระบอกสำหรับการตรวจวัดคาร์บอนไดออกไซด์ โดยอุปกรณ์ต่าง ๆ ควบคุมโดยอัตโนมัติผ่านการป้อนพารามิเตอร์จากระบบข้อมูลเครื่องบิน (Yue et al., 2016)

ส่วนประกอบของอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Infrared Spectrometer Components) สเปกโตรมิเตอร์มีหลากหลายขึ้นอยู่กับการใช้งานและย่านอินฟราเรดที่ใช้ โดยมีส่วนประกอบพื้นฐานคือ แหล่งอินฟราเรด (infrared source) เครื่องตรวจจับ (detector) และระบบแสง (optical system) นอกจากนี้ยังต้องใช้เครื่องมือที่เป็นตัวตะแกรง (grating) ช่วยกระจายแสงอินฟราเรดจากแหล่งปล่อยหรือที่ตรวจจับ และส่วนประกอบอื่น ๆ ที่ใช้ในอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ ตัวอย่างแหล่งปล่อยอินฟราเรดจากวัสดุที่เป็นของแข็ง ซึ่งเมื่อวัสดุปล่อยพลังงานความร้อนออกมาพลังงานจะคล้ายกับพลังงานที่ปล่อยออกมาจากวัตถุดำ ความเข้มที่ออกจากแหล่งเหล่านี้เป็นไปตามการแจกแจงของพลังค์ (Crawley, 2008)

$$\rho = \frac{8\pi hc}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)}$$

โดยที่ ρ คือ ค่าการดูดกลืนของก๊าซตัวอย่าง (W/m^2)

c คือ ความเร็วแสง ($2.997 \times 10^8 ms^{-1}$)

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ ($6.626 \times 10^{-34} Js$)

λ คือ ความยาวคลื่น (m)

k คือ ค่าคงที่ของโบสตันต์ ($1.381 \times 10^{-23} JK^{-1}$)

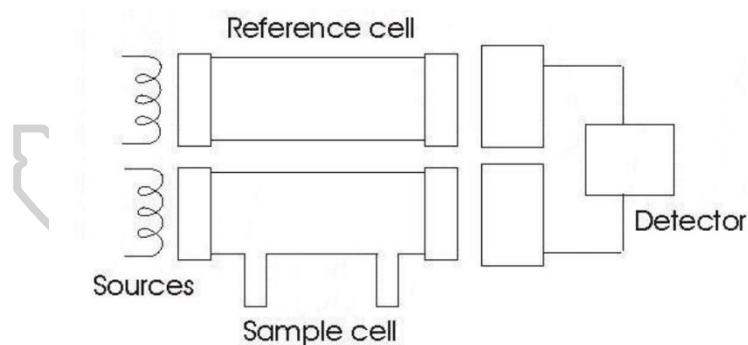
T คืออุณหภูมิ (K)

Non-dispersive Infrared (NDIR) Spectroscopy สเปกโตรมิเตอร์อินฟราเรดแบบไม่กระจายตัวแบ่งออกเป็นสามประเภท คือ แบบกระจาย (dispersive) มัลติเพล็กซ์ (multiplex) และแบบไม่กระจายตัว (non-dispersive) เครื่องมือทำให้เกิดการกระจายตัวโดยใช้ตะแกรงหรือปริซึม เพื่อให้ได้ความยาวคลื่นที่ต้องการ เครื่องมือมัลติเพล็กซ์ (Multiplex instruments) หรือ Fourier Transform Infrared (FTIR) สเปกโตรมิเตอร์ ใช้ Michelson interferometer เพื่อปรับความเข้มของรังสีอินฟราเรดที่เป็นฟังก์ชันความถี่ จากนั้นใช้กระบวนการแปลงฟูเรียร์เพื่อแปลงเวลาที่ขึ้นอยู่กับสเปกตรัม เป็นหมายเลขคลื่นของสเปกตรัม สำหรับ Non-dispersive Infrared NDIR ที่ใช้วัดเชิง

ปริมาณของก๊าซ ในบรรยากาศโดยการดูดกลืน การแผ่รังสี และการสะท้อนแสงสเปกโทรสโกปี (Skooog 1998) ซึ่งมักจะทนทาน บำรุงรักษาง่าย และราคาถูกกว่า FTIR

Non-dispersive Infrared (NDIR) มีสามประเภทหลัก ๆ คือ

1. แบบดูดกลืนทั้งหมด (Total absorption) เครื่องวิเคราะห์แบบดูดกลืนทั้งหมดนั้นไม่มีการเลือกให้สอดคล้องกับก๊าซชนิดใดชนิดหนึ่ง และขึ้นอยู่กับ การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดทั้งหมด เครื่องวิเคราะห์การดูดกลืนแสงทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 28 ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอินฟราเรดสองแหล่ง โดยแหล่งแรกอยู่ในเซลล์ตัวอย่างที่มีก๊าซที่มีคุณสมบัติไม่ดูดกลืนคลื่นที่ความยาวคลื่นช่วงอินฟราเรด และเครื่องตรวจจับ แหล่งที่สองอยู่ในเซลล์ตัวอย่างที่มีก๊าซตัวอย่าง และเครื่องตรวจจับ พลังงานจากอินฟราเรดแต่ละแหล่งจะผ่านไปยังเซลล์อ้างอิงของเซลล์ตัวอย่างไปยังเครื่องตรวจจับทั้งเซลล์ที่เป็นระบบอ้างอิงกับเซลล์ที่มีก๊าซตัวอย่าง รังสีจะถูกดูดกลืนทำให้รังสีที่มาถึงเครื่องตรวจจับลดลงตามความแตกต่างของสัญญาณที่รับจากรังสีทั้งสองเซลล์ ความเข้มของรังสีที่วัดได้มีความสัมพันธ์กับปริมาณความเข้มข้นของก๊าซที่ดูดกลืน เนื่องจากการดูดกลืนแสงทั้งหมดไม่มีการเลือกความยาวคลื่น การดูดกลืนแสงทั้งหมดจึงอาจวัดได้เฉพาะสเปกตรัมอินฟราเรดของเซลล์ตัวอย่างไม่ได้รับผลกระทบจากสิ่งอื่นภายในเซลล์

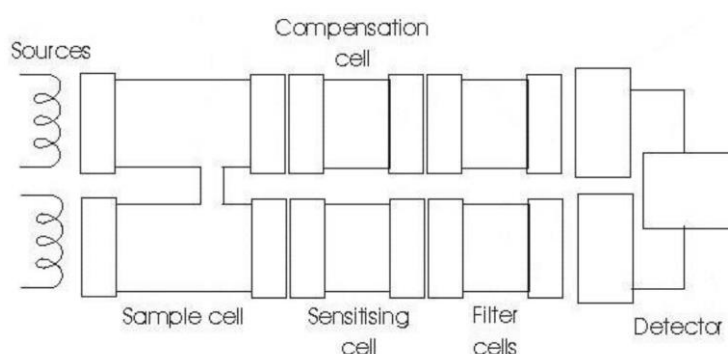


รูปที่ 28 Total absorption non-dispersive infrared spectrometer

2. แบบมีตัวกรองเชิงลบ (Negative filter) มีการเลือกจำกัดพื้นที่ในแถบสเปกตรัมที่เฉพาะ เครื่อง NDIR แบบมีตัวกรองเชิงลบดังแสดงในรูปที่ 29 ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอินฟราเรดสองตัว เซลล์ตัวอย่าง (sample cell) เซลล์ไวแสง (sensitizing cell) เซลล์ในการกรองสองเซลล์ (compensation cell) และเครื่องตรวจจับอีกสองเซลล์ ตัวอย่างไหลผ่านเซลล์ตัวอย่างอย่างต่อเนื่อง แหล่งกำเนิดอินฟราเรดสองลำแสงผ่านเซลล์ตัวอย่าง จากนั้นลำแสงหนึ่งก็จะผ่านไปยังเซลล์ชดเชย (compensation cell) ซึ่งประกอบไปด้วยก๊าซที่ไม่ดูดกลืนในช่วงความยาวคลื่นอินฟราเรด ในขณะที่

อีกเซลล์หนึ่งลำแสงผ่านเซลล์ไวแสง (sensitising cell) ที่มีก๊าซที่ดูดกลืนรังสีอินฟราเรด จากนั้นลำแสงทั้งสองจะเดินทางไปถึงเครื่องตรวจวัดสองตัวซึ่งเป็นโบลอมิเตอร์ (bolometers) เชื่อมต่อกับสะพานไฟฟ้าวีทสโตน (Wheatstone Bridge)

เมื่อเซลล์ก๊าซตัวอย่างว่างเปล่ารังสีจะไม่ไปถึงเครื่องตรวจวัดแต่ละตัวเท่ากัน เนื่องจากการดูดกลืนรังสีในเซลล์ไวแสง (sensitising cell) รังสีที่ส่งจากด้านชดเชย (compensation cell) จึงลดลงจนความเข้มข้นของรังสีเท่ากันในแต่ละโบลอมิเตอร์ เมื่อก๊าซที่สนใจไหลผ่านเซลล์ตัวอย่างลดการแผ่รังสี ด้านชดเชยจากการดูดกลืนโดยก๊าซ อย่างไรก็ตามการแผ่รังสีในด้านที่ไวต่อการกระตุ้นจะไม่ลดลง เนื่องจากก๊าซในเซลล์ไวแสงได้กำจัดพลังงานที่ความยาวคลื่นเฉพาะของก๊าซที่สนใจออกไปแล้ว การแผ่รังสีที่ด้านชดเชยตอนนี้มีพลังงานน้อยกว่าการแผ่รังสีที่ด้านไวต่อการกระตุ้นสภาวะนี้เรียกว่าสภาวะภูมิไวเชิงบวก



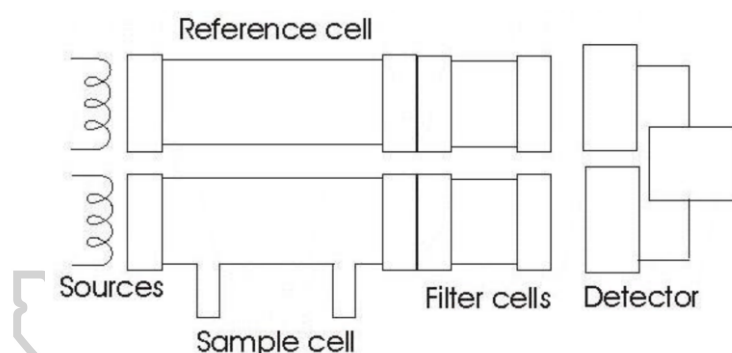
รูปที่ 29 Negative filter non-dispersive infrared spectrometer.

ก๊าซบางชนิดมีพื้นที่ทับซ้อนในสเปกตรัมซึ่งอาจทำให้เกิดการรบกวนได้ ตัวอย่างของก๊าซสองชนิดที่มีแถบการดูดกลืนที่ทับซ้อนกัน ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ หากต้องการวัดคาร์บอนไดออกไซด์ กรองเซลล์ที่มีน้ำต้องใช้ไอระเหยเพื่อขจัดสัญญาณรบกวน เซลล์ตัวกรองถูกวางไว้บนทั้งสองด้านเซลล์อ้างอิงและเซลล์ตัวอย่าง ดังนั้นเส้นทางแสงทั้งสองจึงลดลงเท่า ๆ กันโดยพลังงานของรังสี เมื่อรังสีผ่านเซลล์กรองน้ำจะดูดกลืนไว้ทั้งหมด รังสีที่ความยาวคลื่นเฉพาะ ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของพลังงานเท่านั้นสำหรับการวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

3. แบบมีตัวกรองเชิงบวก (Positive filter) มีการเลือกโดยใช้เครื่องตรวจวัดอินฟราเรดในช่วงที่สนใจ ตัวกรองสเปกโตรมิเตอร์ NDIR แบบมีตัวกรองเชิงบวกดังแสดงในรูปที่ 30 ประกอบด้วยแหล่งที่มาของอินฟราเรดสองตัว เซลล์อ้างอิงที่มีก๊าซที่ดูดกลืนซึ่งเป็นเซลล์ตัวอย่างที่ก๊าซตัวอย่างไหลผ่าน และเครื่องตรวจวัด สามารถเลือกความยาวคลื่นด้วยหัววัดของเครื่องตรวจวัด เครื่องตรวจวัด

มีเซลล์ก๊าซสองเซลล์ที่บรรจุด้วยก๊าซที่ดูดกลืนอินฟราเรดและคั่นด้วยไดอะแฟรมโลหะบาง เนื่องจาก การดูดกลืนของก๊าซในเครื่องตรวจจับเกิดขึ้นเฉพาะที่ความยาวคลื่นซึ่งสอดคล้องกับสเปกตรัมของก๊าซ นั้น

รังสีปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดจะถูกส่งผ่านจากเซลล์อ้างอิงและเซลล์ตัวอย่าง เซลล์และ ด้านที่สอดคล้องกันของตัวตรวจจับ เมื่อเซลล์ตัวอย่างว่างทำให้เกิดแรงดันเท่ากัน เนื่องจากการ ดูดกลืนรังสีเท่ากัน อย่างไรก็ตามเมื่อตัวก๊าซอย่างไหลผ่านเซลล์ตัวอย่าง รังสีอินฟราเรดจะถูกดูดกลืน เพื่อลดการตกกระทบของรังสีบนด้านเซลล์ตัวอย่างของเครื่องตรวจจับ ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของ แรงดันระหว่างทั้งสองด้านของเครื่องตรวจจับ ความแตกต่างของแรงดันทำให้ไดอะแฟรมโค้งงอ ความ จุระหว่างไดอะแฟรมและอิเล็กโทรดที่อยู่ติดกันเปลี่ยน (differential capacitance manometer) แรงดันเอาต์พุตที่ได้จะเป็นสัดส่วนกับแรงดันความแตกต่างของเครื่องตรวจจับและความเข้มข้นของ ก๊าซในเซลล์ตัวอย่าง (Wong & Anderson, 2012) ตัวอย่างเครื่องมือการวัดและติดตามปริมาณก๊าซ เรือกระจกในบรรยากาศของสถานีภาคพื้นแสดงในรูปที่ 31-33



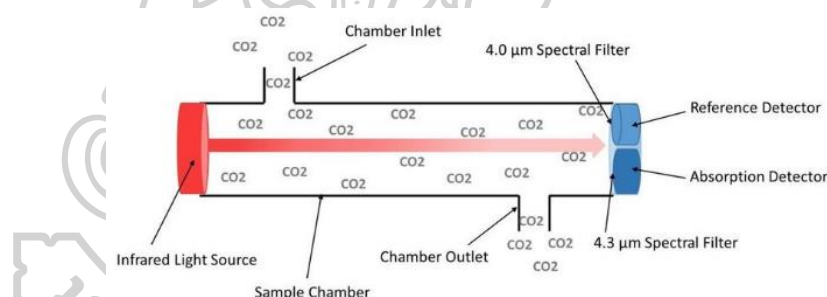
รูปที่ 30 Positive filter non-dispersive infrared spectrometer.

1. FTIR ของสถานภาคพื้นของ Total Carbon Column Observing Network (TCCON) และ Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC)



รูปที่ 31 Bruker IFS 125HR สเปกโตรมิเตอร์ความละเอียดสูงพิเศษ ที่สถานีวัดเครือข่าย TCCON (<https://www.opticsblog.bruker.com/worlds-highest-resolving-ftir-spectrometer-contributes-to-monitor-atmospheric-pollution/>)

2. เซ็นเซอร์วัดคาร์บอนไดออกไซด์ที่ใช้เทคนิคการวัดแบบ NDIR



รูปที่ 32 ส่วนประกอบหลักของ Non-dispersive Infrared (NDIR) และการทำงานของระบบ (Debbagh, 2019)



รูปที่ 33 เซ็นเซอร์ใช้เทคนิค NDIR ในการวัด CO₂ ที่หาซื้อได้ทั่วไป

(<https://solectroshop.com/en/sensores-calidad-del-aire/5414-ndir-co2-sensor-mh-z14a-carbon-dioxide-detection.html>) (<https://sandboxelectronics.com/?product=100000ppm-mh-z16-ndir-co2-sensor-with-i2cuart-5v3-3v-interface-for-arduinoraspeberry-pi>) (<https://www.co2meter.com/th-th/products/ndir-dual-beam-co2-sensor-module>)

2.1.5.2 การวัดและติดตามความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศจากดาวเทียม

การวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยดาวเทียมเป็นหนึ่งในแนวทางที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการติดตามการกระจายตัวของก๊าซเรือนกระจกทั่วโลกที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่สูง และมีการปรับปรุงความแม่นยำในการประมาณค่าแหล่งปล่อยและแหล่งกักเก็บของคาร์บอนไดออกไซด์หรือก๊าซเรือนกระจกอื่น ๆ โดยดาวเทียมได้รับการออกแบบมาเพื่อวัดเป็นสัดส่วนของโมลอากาศแห้งเฉลี่ยคอลัมน์ของ CO_2 หรือที่เรียกว่า XCO_2

ในปี ค.ศ. 2002 เป็นครั้งแรกที่ได้มีการติดตั้งสเปกโตรมิเตอร์การดูดกลืนแสงด้วยการสแกนภาพสำหรับการสร้างแผนภูมิบรรยากาศ (SCIAMACHY) บนดาวเทียม ENVISAT-1 ขององค์การอวกาศของยุโรป European Space Agency (ESA) เพื่อวัดการกระจายตัวของคอลัมน์แนวตั้งของคาร์บอนไดออกไซด์ทั่วโลก SCIAMACHY เป็นสเปกโตรมิเตอร์ไฮเปอร์สเปกตรัมแบบ passive ที่ออกแบบมาเพื่อวัดองค์ประกอบของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์และสตราโตสเฟียร์ โดยใช้ช่วงสเปกตรัมที่ต่ำที่สุดของความยาวคลื่นอินฟราเรดใกล้ที่วัดได้จากการสะท้อนของรังสีอาทิตย์ที่วัดได้ ความละเอียดเชิงพื้นที่อยู่ที่ 60 ตารางกิโลเมตร (Yue et al., 2016)

Greenhouse gas Observing Satellite (GOSAT) ของ The Japanese Aerospace Exploration Agency (JAXA) ดาวเทียมของญี่ปุ่นที่เปิดตัวเมื่อปี ค.ศ. 2009 ที่ใช้ Thermal And Near infrared Sensor for carbon Observation - Fourier Transform Spectrometer (TANSO-FTS) เป็นเครื่องมือในการวัด ต่อมาในปี ค.ศ. 2008 Greenhouse gas Observing Satellite-2 (GOSAT-2) ซึ่งเป็นรุ่นต่อจาก GOSAT เป็นดาวเทียมดวงแรกที่มีความเชี่ยวชาญด้านการสังเกตการณ์ก๊าซเรือนกระจก โดยเซนเซอร์ของเครื่องมือ TANSO-FTS-2 นั้นมีประสิทธิภาพสูงกว่า TANSO-FTS โดยมีความแม่นยำในการวัดความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจกมากขึ้น ด้วยการเพิ่ม short-wave infrared (SWTR) ที่สามารถตรวจวัดในพื้นที่ละติจูดสูงของฉีกโลกเหนือในฤดูหนาวได้ รวมทั้งมีกลไกในการชี้ตำแหน่งเพื่อหลีกเลี่ยงเมฆ โดยเฉพาะเมฆคิวมูลัสในพื้นที่เขตร้อน ทั้งนี้ JAXA วางแผนส่งดาวเทียม GOSAT-GW ขึ้นไปสังเกตการณ์ก๊าซเรือนกระจกและวัฏจักรของน้ำสำหรับการพยากรณ์อากาศในปี ค.ศ. 2024

(Imasu et al., 2023)

ในปี ค.ศ. 2009 ดาวเทียม Orbiting Carbon Observatory (OCO) ภายใต้โครงการ Pathfinder Project Science Earth System (ESSP) ของ NASA เพื่อทำการตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ แต่เนื่องจากเกิดความผิดปกติทำให้ดาวเทียมไม่สามารถขึ้นโคจรได้ ต่อมาในปี ค.ศ. 2012 OCO-2 ที่พัฒนามาจากดาวเทียม OCO ได้ขึ้นโคจรโดยมีภารกิจหลักเพื่อหา

แหล่งที่มาและแหล่งกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีการกระจายทางภูมิศาสตร์อย่างไรในระดับภูมิภาค วัดโดยใช้สเปกโตรมิเตอร์ (OCO-2 spectrometer) ที่ใช้แสงอาทิตย์ที่สะท้อนจากพื้นผิวโลก โดยรังสีอาทิตย์ที่เข้าสู่สเปกโตรมิเตอร์จะผ่านชั้นบรรยากาศมาทั้งหมดสองครั้ง ครั้งแรกในขณะที่รังสีอาทิตย์เดินทางมายังโลก และอีกครั้งเมื่อสะท้อนจากพื้นผิวโลก เครื่องมือนั้นจะวัดแถบการดูดกลืนที่ความยาวคลื่นเฉพาะเจาะจงมากโดยใช้ตะแกรงเลี้ยวเบน (grating) เพื่อแยกพลังงานที่เข้ามาออกเป็นสเปกตรัมขององค์ประกอบแถบความยาวคลื่นต่าง ๆ โดย OCO-2 ครอบคลุมสี่ที่ความยาวคลื่นแตกต่างกัน 17,500 สี่ รวมทั้งมีระบบคงความเย็นเพื่อกำจัดพลังงานจากแหล่งอื่น ซึ่งทำให้การวัดมีความแม่นยำมาก (Wunch et al., 2017) และในปี ค.ศ. 2018 ได้มีการพัฒนาดาวเทียม OCO โดยใช้เทคโนโลยีเพื่อศึกษาคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นดาวเทียม OCO-3 ซึ่งติดตั้งบนสถานีอวกาศนานาชาติ (ISS) วัตถุประสงค์คือ รวบรวมการวัดเชิงพื้นที่เป็นปริมาณความแปรผันในคอลัมน์ค่าเฉลี่ยคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศเฉพาะส่วนโมเลกุลอากาศแห้ง XCO₂ ซึ่งใช้เครื่องมือวัดแบบเดียวกันกับ OCO-2 (Basilio et al., 2019)



รูปที่ 34 ภาพยานตัวอย่างดาวเทียม OCO-2 ดาวเทียม GOSAT-2 และดาวเทียม OCO-3 ที่ใช้ในการวัด XCO₂

(<https://www.jpl.nasa.gov/missions/orbiting-carbon-observatory-2-oco-2>,

https://www.gosat-2.nies.go.jp/about/data_products/

<https://www.jpl.nasa.gov/missions/orbiting-carbon-observatory-3-oco-3>)

รายชื่อดาวเทียมที่ใช้ในการสังเกตการณ์ก๊าซเรือนกระจกตั้งแต่ปี ค.ศ. 2002 จนถึงดาวเทียมที่จะขึ้นโคจรในอนาคตแสดงในตารางที่ 5 ทั้งนี้ดาวเทียมแต่ละดวงมีความแตกต่างกัน ด้านการพัฒนาเทคโนโลยีในการวัดคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ และการปรับปรุงวิธีการในการดึงข้อมูลของดาวเทียม ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 5 แผนการปล่อยดาวเทียม คัดแปลงจาก Gao 2022 (สีดำ: Interferometric instruments สีเทา: Rester instruments และสีน้ำเงิน: Mix instruments) (Gao, 2022)

ชื่อดาวเทียม	ปีดำเนินการ																													
	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	
AIRS																														
IASI																														
GOSAT																														
OCO-2																														
TanSat																														
FY-3D GAS																														
FY-3D HIRAS																														
GF-5																														
GOSAT-2																														
OCO-3																														
GF-5-02																														
GOSAT-GW																														



ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบพารามิเตอร์เฉพาะของเครื่องมือที่ใช้ในการวัดคาร์บอนไดออกไซด์ใน
บรรยากาศของแต่ละดาวเทียม ดัดแปลงจาก Gao 2022 (Gao, 2022)

ชื่อดาวเทียม/ เครื่องมือ	AQUA/AIRS	METOP-A/IASI	GOSAT	OCO-2	TanSat	FT-3D	GF-5	GOSAT-2	OCO-3
Launch time	2002 05	2006 10	2009 01	2014 07	2016 12	2017 11	2018 05	2018 01	2019 05
Substellar point resolution	15 km(d)	12 km(d)	10.5 km(d)	1.29×2.2 5km(d)	2×2 km ²	10 km(d)	10.3 m(d)	9.7 km(d)	4 km ²
Orbital altitude (km)	705	820	666	705	708	836	705	613	400
Instrument	Grating spectromet er	Fouriertransfo rm spectrometer	TANSO-FTS TANSO-CAI	Three channel grating spectrom eters	ACGS, CAPI	GAS, FTS	GMI	TANSO-FTS 2 TANSO-CAI 2	Three channel grating spectromet ers
Wavelength Bandwidth (μm)	3.74-4.61 6.20-8.22 8.80-15.4	3.62-5.0 5.00-8.26 8.26-15.5	0.76-0.78 1.56-1.72 1.92-2.08 5.56-14.30	0.76-0.77 1.59-1.62 2.04-2.08	0.76- 0.77 1.51- 1.62 2.04- 2.08	0.75-0.77 1.56-1.72 1.92-2.08 2.20-2.38	0.76-0.77 1.57-1.58 1.64-1.66 2.04-2.06	0.75-0.77 1.36-1.69 1.92-2.38 5.60-14.3	0.76-0.77 1.56-1.60 2.04-2.08
Signal-to- noise ratio	2000 (4.2 μm) 1400 (3.7- 13.6 μm) 800 (13.6- 15.4 μm)	1000 (12 μm) 500 (4.5 μm)	300 (0.75- 0.77) 300 (1.56- 1.72) 300 (1.92- 2.08) 300 (5.50- 14.3)	>300 (1.60) >240 (2.06)	360 (0.76) 250 (1.60) 180 (2.06)	320 (0.76) 260-300 (1.61) 160-300 (2.00) 140-300 (2.30)	300 (0.76) 300 (1.58) 250 (1.65) 250 (2.05)	400 (0.75- 0.77) 300 (1.56- 1.69) 300 (1.92- 2.33) 300 (5.50- 8.40) 300 (8.4- 14.30)	-
gas observation target	CO ₂ , CH ₄ , O ₃ , CO, H ₂ O, SO ₂	CO ₂ , CH ₄ , O ₃ , CO, H ₂ O, SO ₂ , N ₂ O	CO ₂ , CH ₄ , O ₃ , H ₂ O	CO ₂	CO ₂	CO ₂ , CH ₄ , SO ₂ , N ₂ O, Atmospheric aerosols	CO ₂ , CH ₄ , O ₃ , O ₂ , H ₂ O, CO, black carbon, PM2.5	CO ₂	CO ₂
products accuracy (ppm)	1.5	2	4	1-2	4	-	2.72	0.5	1-2

หมายเหตุ ข้อมูลมาจากอินเทอร์เน็ตและเอกสารอื่น ๆ

หลักการพื้นฐานของการวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ของดาวเทียมมีพื้นฐานมาจากกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต กล่าวคือ ความสัมพันธ์ระหว่างตัวกลางที่ดูดกลืนแสงและความเข้มของการดูดกลืนแสงแบบเอกรงค์เดียว รูปแบบพื้นฐานของนิพจน์ทางคณิตศาสตร์คือ

$$I_t = I_0 \exp(-\alpha(v)CL) \quad (2.25)$$

$$\alpha(v) = S(T)g(v, v_c)P \quad (2.26)$$

เมื่อรังสีอาทิตย์สามารถส่งพลังงานผ่านตัวกลางทำให้ระดับการดูดกลืนแสง ความเข้มของแสงจะแตกต่างกันในตัวกลางที่แตกต่างกัน เมื่ออยู่ในสภาวะคงที่ระดับการดูดกลืนของก๊าซที่ถูกดูดกลืนต่อความเข้มข้นของแสงจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของก๊าซ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมเมื่อความเข้มของแสงตกกระทบบนที่ ความเข้มของแสงจะถูกตรวจวัดโดยโฟโตอิเล็กทริกซาวด์เตอร์ (photoelectric sounder) และหาความเข้มข้นของก๊าซได้จากการจัดรูปสมการ

จุดประสงค์หลักของกระบวนการการดึงข้อมูลคือ การคำนวณประมาณค่าของอัตราส่วนโมลของอากาศแห้ง CO_2 ในช่วงคอลัมน์ (X_{CO_2}) และผลิตภัณฑ์ข้อมูลระดับ Level 2 (L2) อื่น ๆ จากสเปกตรัมที่ได้มาจากการวัดของ OCO-2 อัตราส่วน X_{CO_2} ถูกกำหนดโดยการหารอัตราส่วนของปริมาณคอลัมน์ของ CO_2 กับปริมาณคอลัมน์ของอากาศแห้ง ดังแสดงในสมการที่ 2.27

หมายเหตุ : ข้อมูลระดับ L2 คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการดึงข้อมูล X_{CO_2} ทางฟิสิกส์แบบเต็ม ซึ่งเป็นวิธีการประมาณค่า CO_2 ที่เหมาะสมที่สุด โดยการดึงข้อมูลจะประกอบไปด้วยแบบจำลองการส่งต่อ วิธีการผกผัน และขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อผิดพลาด

$$X_{CO_2} = \frac{\int_0^\infty N_{CO_2}(z) dz}{\int_0^\infty N_{air}(z) dz} \quad (2.27)$$

เมื่อ $N_{CO_2}(z)$ คือความหนาแน่นของ CO_2 ที่ขึ้นอยู่กับความสูง (z) (ตัวอย่างเช่น จำนวนโมเลกุล CO_2 ต่อลูกบาศก์เมตร) และ $N_{air}(z)$ คือความหนาแน่นของอากาศแห้งที่ขึ้นอยู่กับความสูง โดยค่าคงที่ของ O_2 มีค่าเป็น 0.20935 โดยให้ของ N_{air} เป็น N_{O_2} คือความหนาแน่นของ O_2 ที่ความสูง (z)

$$X_{CO_2} = \frac{0.20935 \cdot \int_0^\infty N_{CO_2}(z) dz}{\int_0^\infty N_{O_2}(z) dz} \quad (2.28)$$

ความหนาแน่นของ CO_2 และ O_2 สามารถนำไปประมาณได้จากการสังเกตแสงแดดที่สะท้อนจากพื้นผิวโลกและชั้นบรรยากาศ เนื่องจากความเข้มของแสงที่วัดได้ที่มีความยาวคลื่นที่มีก๊าซเหล่านี้ดูดกลืนมีสัมพันธ์กับจำนวนโมเลกุลทั้งหมดตามเส้นทางแสง (optical path) S :

$$I(\lambda, \theta, \theta_0, \varphi - \varphi_0) = F_0(\lambda) \cos \theta_0 \cdot R(\lambda, \theta, \theta_0, \varphi - \varphi_0) \left\langle \exp \left[- \int_0^S \sum_{m=1}^M [\sigma_m(\lambda, s) N_m(s)] ds \right] \right\rangle \quad (2.29)$$

เมื่อ $I(\lambda, \theta, \theta_0, \varphi, -\varphi_0)$ คือความเข้มของแสงที่สังเกตได้ที่ความยาวคลื่น λ

θ และ φ คือมุม zenith และมุม azimuth

θ_0 และ φ_0 คือมุม corresponding solar zenith และมุม corresponding solar azimuth

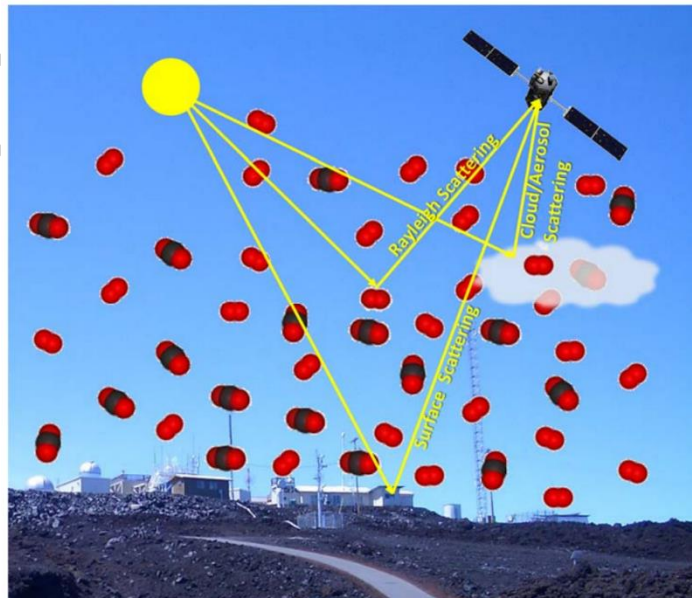
$F_0(\lambda)$ คือ ความเข้มแสงอาทิตย์ที่ปรากฏบนผิวสูงสุดของบรรยากาศ

$R(\lambda, \theta, \theta_0, \varphi - \varphi_0)$ คือการสะท้อนของผิว

$\sigma_m(\lambda, S)$ และ $N_m(s)$ คือพื้นที่หน้าตัดด้านข้างของ m^{th} ส่วนประกอบที่ดูดกลืนสูงสุด (เช่น CO_2 , O_2 , หรือสารดูดกลืนอื่น)

S คือ เส้นทางแสง ระยะเท่ากับความสูงของบรรยากาศไปยังผิวสะท้อนและกลับมายังยานอวกาศ

$\langle \rangle$ แสดงถึงค่าเฉลี่ยของช่วงของเส้นทางแสง ที่โฟตอนสามารถเดินทางได้ ตัวอย่างของเส้นทางแสงบางส่วนได้แสดงในรูปที่ 35



รูปที่ 35 มุมมองและเส้นทางแสง (optical paths) ที่เป็นไปได้บางส่วนที่โฟตอนของดวงอาทิตย์ถูกบันทึกโดยเครื่องมือที่ติดตั้งอยู่บนดาวเทียม (Taylor et al., 2015)

จากพิสูจน์ของเอ็กซ์โพเนนเชียลในสมการที่ 2.29 ขึ้นอยู่กับหน้าตัดขวางของแสงต่อโมเลกุล (σ) และความยาวของเส้นทางแสง (S) รวมทั้งความหนาแน่นของโมเลกุลที่ดูดซึม ข้อผิดพลาดหรือความไม่แน่นอนใน σ หรือ S สามารถเป็นสาเหตุให้เกิดความผิดพลาดและความไม่แน่นอนในการคำนวณค่าความหนาแน่นของโมเลกุลที่วัดได้ อาจเกิดขึ้นได้จาก พิจารณาการถูกบังแสงบางส่วนโดยเมฆซึ่งสามารถสะท้อนส่วนหนึ่งของรังสีกลับไปยังเซ็นเซอร์ก่อนที่จะแสงจะเดินทางในเส้นทางทั้งหมดจากชั้นบนสุดของบรรยากาศไปยังพื้นผิวและกลับมายังดาวเทียม หากการกระจายแสงโดยเมฆนี้ถูกละเลยในขั้นตอนการดึงข้อมูล เส้นทางแสงที่ลดลงเป็นผลให้ความหนาแน่นของโมเลกุลที่ดูดกลืนที่วัดได้ลดลง เช่นเดียวกันหากมีการกระเจิงแสงหลายครั้งระหว่างพื้นผิวและชั้นละอองลอยในอากาศทำให้เกิดเส้นทางแสงที่ยาวขึ้นระหว่างดวงอาทิตย์ พื้นผิว และดาวเทียม หากการกระเจิงหลายครั้งในบรรยากาศนี้ถูกละเลยจะทำให้เส้นทางแสงมากขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นของโมเลกุลที่วัดได้มากขึ้น อาจทำให้การตีความค่าความหนาแน่นของโมเลกุลผิด การประมาณค่าเส้นทางแสงในบรรยากาศอย่างแม่นยำเป็นจุดหมายหลักของขั้นตอนการดึงข้อมูล

เมื่อแบ่งบรรยากาศเป็นชั้น ๆ ที่ไม่ต่อเนื่องกัน (discrete layers) โดยที่การกระจายตามแนวตั้งของโมเลกุลที่เป็นส่วนประกอบที่มีความสามารถในการดูดกลืนเป็นเส้นขนานหรืออย่างน้อยไม่มีความสัมพันธ์ทางพื้นที่ (least spatially-uncorrelated) สามารถเขียนค่านี้ใหม่ได้เป็น

$$\int_0^S \sum_{m=1}^M [\sigma_m(\lambda, s) N_m(s)] ds = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \int_{s(n)}^{s(n+1)} [\sigma_m(\lambda, s) N_m(s)] ds \quad (2.30)$$

หากพิจารณาเส้นทางเชิงเส้นผ่านชั้นระนาบแบบขนาน n ที่มีมุม θ ทางเดินของแสงระหว่างชั้น $s(n)$ และ $s(n+1)$ สามารถประมาณได้เป็น $ds = dz/\cos\theta$ จากนั้นสามารถแสดงค่าที่รวมอยู่ในการบวกเป็นค่าของความหนาแน่นทางเดินของแสงในแนวตั้งในแต่ละชั้นได้

$$\tau_{m,n}(\lambda, z) = \int_{s(n)}^{s(n+1)} [\sigma_m(\lambda, z) N_m(z)] dz \quad (2.31)$$

ความลึกเชิงแสงในแนวตั้งตลอดทั้งคอลัมน์สามารถเขียนได้ดังสมการ

$$\tau(\lambda) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \int_{s(n)}^{s(n+1)} [\sigma_m(\lambda, z) N_m(z)] dz \quad (2.32)$$

ถ้าสมมติให้บรรยากาศขนานไปกับระนาบ และไม่พิจารณาการกระเจิงของก๊าซและอนุภาคในบรรยากาศ จะได้ความเข้มที่ดาวเทียมวัดได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} I(\lambda, \theta, \theta_0, \varphi - \varphi_0) \\ = F_0(\lambda) \cos\theta_0 \cdot R(\lambda, \theta, \theta_0, \varphi - \varphi_0) \times \exp\left\{-\tau(\lambda) \frac{\cos\theta_0 + \cos\theta}{\cos\theta_0 \cdot \cos\theta}\right\} \end{aligned} \quad (2.33)$$

ในการอธิบายข้างต้น ความซับซ้อนที่เกี่ยวข้องกับการกระเจิงของก๊าซและอนุภาคในบรรยากาศ และพื้นที่ผิวไม่ถูกพิจารณา โดยการหาค่าเฉลี่ยเส้นทางแสงด้วยตัวดำเนินการ $\langle \rangle$ ดังแสดงในสมการที่ 2.32 ความเข้มที่วัดได้จะขึ้นอยู่กับทั้งการดูดกลืนและการกระเจิง ซึ่งสามารถเปลี่ยนเส้นทางแสงที่เคลื่อนที่ผ่านโฟตอนของแสงอาทิตย์ กระบวนการทางแสงทั้งหมดนี้สามารถจำลองได้อย่างแม่นยำ โดยการแก้สมการของการถ่ายโอนรังสีดังนี้

$$\mu \frac{dI(\tau, \theta, \phi)}{d\tau} = (\tau, \theta, \phi) - J(\tau, \theta, \phi) \quad (2.34)$$

เมื่อ

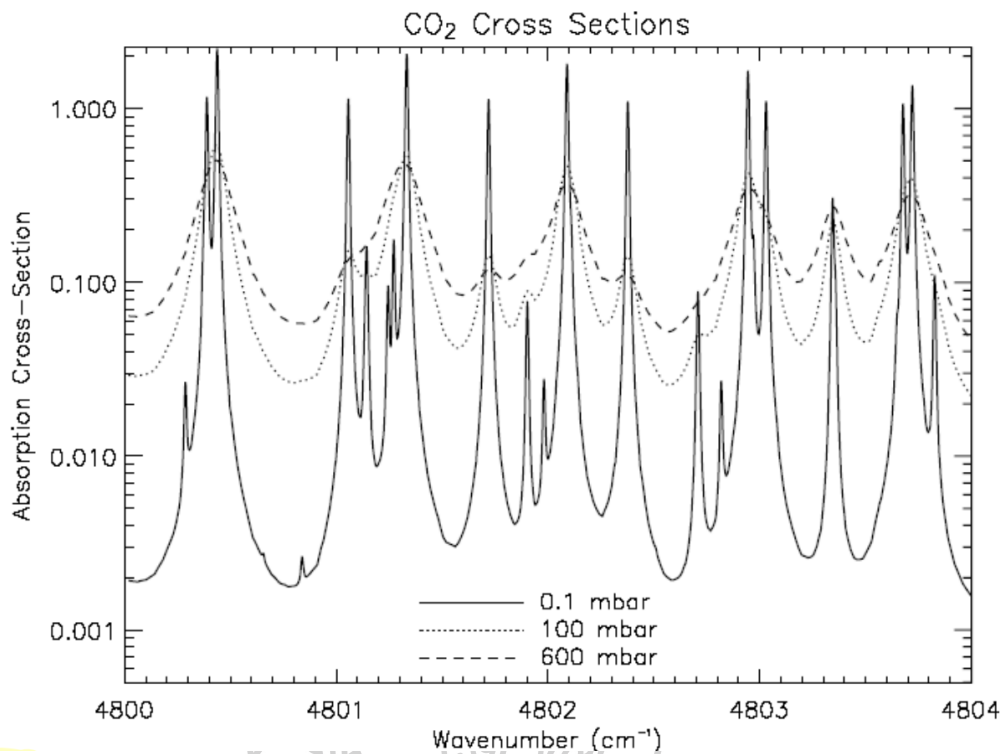
$$J(\tau, \theta, \phi) = \frac{\omega(\tau)}{4\pi} \int_{-1}^1 \int_0^{2\pi} II(\tau, \theta - \theta', \phi - \phi') I(\tau, \theta', \phi') d\phi' d\theta' + Q(\tau, \theta, \phi) \quad (2.35)$$

เมื่อ ω คือ อัลบีโดการกระเจิงเดี่ยว II คือ เมทริกซ์เฟสสำหรับการกระเจิง และ $\mu = \cos\theta$ เทอมแรกในสมการที่ 2.35 แสดงถึงผลของการกระเจิงที่หากไม่นำมาพิจารณาต่อการปล่อยความร้อน เนื่องจากแหล่งกำเนิดไม่เป็นเนื้อเดียวกัน $Q(\tau, \theta, \phi_0)$ ที่อธิบายการกระเจิงของลำแสงอาทิตย์ (แบบลดทอน) เพียงครั้งเดียวสามารถแสดงเป็น

$$Q(\tau, \mu, \phi - \phi_0) = \frac{\omega(\tau)}{4\pi} II(\tau, \mu - \mu_0, \phi - \phi_0) I_0 \exp[-\tau/\mu_0] \quad (2.36)$$

ภายในบริบทของกระบวนการดึงข้อมูลจากการรับรู้ระยะไกลในชั้นบรรยากาศ สมการของการถ่ายโอนการแผ่รังสีของส่วนประกอบต่าง ๆ ในบรรยากาศ

การติดตามการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในปริมาณก๊าซ เช่น O_2 และ CO_2 โดยใช้การดูดกลืนของ NIR เนื่องจากการดูดกลืนและแปรผันอย่างรวดเร็วตามความยาวคลื่นดังแสดงในรูปที่ 36



รูปที่ 36 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของ CO_2 ที่ความยาวคลื่นภายในแถบ CO_2 ที่แข็งแกร่งใกล้กับความยาวคลื่น 2.08 ไมโครเมตร ที่ความดัน 0.1 100 และ 600 hPa (มิลลิบาร์) (Taylor et al., 2015)

การดูดกลืนที่แข็งแกร่งที่สุดเกิดขึ้นใกล้กับจุดศูนย์กลางของเส้นแรงแรง การสั่น-การหมุนที่ความยาวคลื่นอื่น ๆ การดูดกลืนแสงอาจมีขนาดเล็กถึงได้ ดังนั้นสำหรับความหนาแน่นน้อย และความยาวคลื่นของแสงเปลี่ยน การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเหล่านี้จะทำให้เกิดการแปรผันที่บริเวณความยาวคลื่นใกล้กับศูนย์กลางของเส้น อย่างไรก็ตามเมื่อความหนาแน่นของจำนวนหรือความยาวเส้นทางของแสงเพิ่มขึ้น แสงเกือบทั้งหมดนั้นจะถูกดูดกลืนที่ความยาวคลื่นเหล่านี้ และความไวต่อการเปลี่ยนแปลงเพิ่มเติมจะลดลงอย่างมาก บริเวณที่มีความไวสูงสุดจะเคลื่อนต่อไปตามเส้นด้านข้าง

การคำนวณความลึกของการดูดกลืนก๊าซเชิงแสงในแต่ละชั้นบรรยากาศ เมื่อมีตาราง lookup tables เกี่ยวกับความดัน (P) อุณหภูมิ (T) และความยาวคลื่น (λ) ต้องใช้โปรไฟล์ที่แท้จริงของความดัน อุณหภูมิ และความเข้มข้นของก๊าซ เพื่อคำนวณความลึกเชิงแสงสำหรับแต่ละชั้นและชนิดของก๊าซ สมมติว่าชั้นบรรยากาศที่หนาแน่นมีความดันจากด้านล่าง P_{bot} ไปยังความดันด้านบน P_{top} และคำนวณความลึกเชิงแสงของชั้นนี้สำหรับก๊าซบางชนิด ให้อัตราส่วนการผสมปริมาตรอากาศแห้งของก๊าซนี้เป็น q_{gas} ซึ่งกำหนดเป็นจำนวนโมลของก๊าซต่อโมลของอากาศแห้ง นอกจากนี้ให้เรียกภาคตัดขวางการดูดกลืนของก๊าซ (ใน $(\text{m}^2\text{mol}^{-1})k(P, T)$) ที่เลขคลื่นเฉพาะ เนื่องจากอุณหภูมิ (T) เป็นฟังก์ชันภายใน

ความดัน (P) สำหรับโปรไฟล์ที่กำหนด จึงเขียนสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของก๊าซสำหรับชั้นบรรยากาศนี้เป็น $k(P)$

ในชั้นที่เล็กที่สุดสามารถแสดงได้ว่าจำนวนโมลของอากาศแห้ง (เทียบกับที่กำหนดอัตราส่วนการผสมของก๊าซใด ๆ) สามารถเขียนได้เป็น

$$N_{dry} dz = -\frac{dP}{gM_{dry}} (1 - q)Q \quad (2.37)$$

โดยที่ dz คือ ความกว้างของชั้นในหน่วยเมตร N_{dry} คือ จำนวนโมลของอากาศแห้งต่อลูกบาศก์เมตร g คือ ความเร่งโน้มถ่วง q คือ ความชื้นจำเพาะ และ M_{dry} คือ มวลโมลาร์ของอากาศแห้งในหน่วย $kg \cdot mol^{-1}$ ดังนั้นความลึกเชิงแสงทั้งหมดของชั้นบรรยากาศเขียนได้เป็น

$$\tau_{gas} = -\int_{P_{top}}^{P_{bot}} q_{gas} \frac{k(P)[1-q(P)]}{g(P)M_{dry}} dP \quad (2.38)$$

g, q, q_{gas} และ k แปรผันตามฟังก์ชันของแรงกดอากาศชั้นนี้ เฉพาะที่ขอบเขตแต่ละชั้นเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องตั้งสมมติฐานว่าแต่ละชั้นแตกต่างกันอย่างไรเพื่อทำการอินทิเกรตทั้งหมด

ในชั้นตอนแรกปริมาณถูกประมาณอย่างง่าย ๆ ที่กึ่งกลางชั้นโดยถือว่าความแปรผันเชิงเส้น อย่างไรก็ตามวิธีนี้สามารถทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยในความลึกเชิงแสงรวมของก๊าซ และอาจนำไปสู่ความคลาดเคลื่อนของค่า XCO_2 ที่วัดได้ ที่บรรยากาศชั้นบนครอบคลุมความกดอากาศเกือบสองระดับ ที่ 1 ถึง 100 มิลลิบาร์ การแปรผันของชั้น k ค่อนข้างไม่เป็นเชิงเส้นจนไม่สามารถทำได้ง่าย ๆ จึงไม่ได้พิจารณา แนวทางที่ตรงไปตรงมาในการกำจัดความคลาดเคลื่อนนี้คือ การแบ่งแต่ละชั้นออกเป็นชั้นย่อยจำนวนหนึ่ง จากนั้นความลึกเชิงแสงของแต่ละชั้นย่อยจะเขียนได้ตั้งสมการ

$$\tau_{sub} = \frac{q_{gas,cen}(1-q_{cen})}{g_{cen}M_{dry}} \cdot K(P_{cen}, T_{cen}) \cdot \Delta P \quad (2.39)$$

โดยที่ตัวห้อย คือ ปริมาณที่บริเวณกึ่งกลางของชั้นย่อย ปริมาณดังกล่าวทั้งหมดได้จากการประมาณค่าเชิงเส้นภายใต้ความดัน

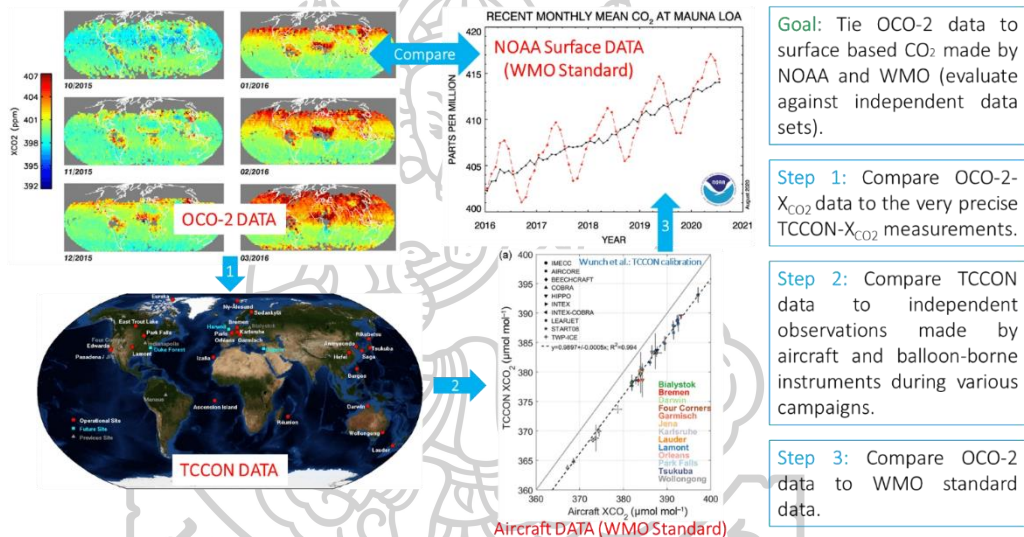
สำหรับแต่ละชั้นย่อย $k(P_{cen}, T_{cen})$ จะถูกประมาณค่าโดยใช้การประมาณค่าเชิงเส้น 2 มิติ ทั้งในความดันและอุณหภูมิ ความลึกเชิงแสงของแต่ละชั้นเป็นเพียงผลรวมของความลึกเชิงแสงของชั้นย่อย

ข้อมูลใน L2 FP แบ่งย่อยแต่ละชั้นออกเป็น 10 ชั้นย่อยที่มีความกว้าง ความดัน ที่เท่ากัน พร้อมทั้งเพิ่มชั้นย่อยตามความดันของ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) แต่ละระดับชั้นย่อย 10 ชั้นจะมีความแปรผันตามตาราง ABSCO ด้วยความดัน ในขณะที่การใช้ระดับความดันตาม ECMWF จะจับโปรไฟล์อุณหภูมิแบบเต็ม เมื่อประมาณความลึกเชิงแสงของชั้นย่อย สามารถสรุปได้ตามกฎของ Simpson เพื่อให้ได้ความลึกเชิงแสงของก๊าซทั้งหมดของแต่ละชั้น และสำหรับก๊าซแต่ละชนิด

ปัจจุบัน L2 ทำการคำนวณสำหรับ O_2 , CO_2 และ H_2O ในแถบสเปกตรัมที่อ่อนและที่แข็งแรง ความอุดมสมบูรณ์ของ (isotopologues) แต่ละไอโซโทปเป็นเศษส่วนคงที่ของอัตราส่วนการผสม ปริมาตรอากาศแห่งทั้งหมด ซึ่งอยู่ภายในตารางทางสเปกโทรสโกปี

การเปรียบเทียบข้อมูลของดาวเทียมกับภาคพื้น โพรไฟล์ของ CO_2 นำมาจากกระบวนการเดียวกับที่ใช้บนสถานีภาคพื้นอย่าง Total Carbon Column Observing Network (TCCON) โดย โพรไฟล์ CO_2 มาจากภูมิอากาศวิทยาตามชุดข้อมูล GLOBALVIEW และเปลี่ยนแปลงตามเวลาของปี และละติจูดของสถานที่ โพรไฟล์ของ CO_2 ในชั้นบรรยากาศชั้นสตราโตสเฟียร์ถูกสร้างขึ้นจากระยะเวลาที่สัมพันธ์ทางอากาศ

OCO-2 DATA: Steps For Validation

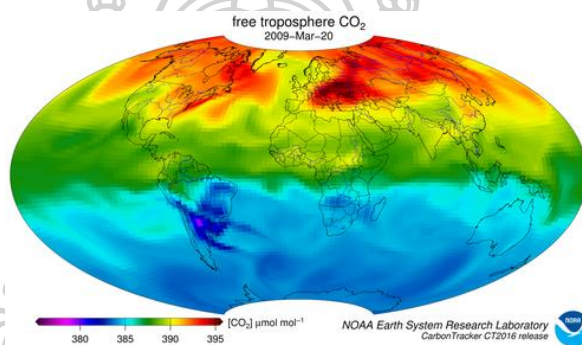


รูปที่ 37 ขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องสำหรับการสังเกต OCO-2 (Taylor et al., 2015)

พารามิเตอร์หลักคือ ความสูงของโทรโพพอส ซึ่งนำมาจากโพรไฟล์อุณหภูมิของ ECMWF (อ่านเพิ่มเติมในส่วนที่ 3.3.2.2 ของคู่มือ) เมทริกซ์ย่อยความแปรปรวนร่วมของ CO_2 โดยธรรมชาติแล้วมีผลกระทบมากที่สุดต่อการดึง X_{CO_2} ปัจจุบันมีการใช้เมทริกซ์ความแปรปรวนร่วม CO_2 เดียวสำหรับการดึงข้อมูลทั้งหมด ความแปรปรวนของรากล้างสองเฉลี่ย (RMSD) ของ X_{CO_2} อยู่ที่ 12 ppm ซึ่งเป็นค่าประมาณความแปรปรวนทั่วโลก ความแปรปรวนตามฟังก์ชันของความสูงจะถือว่าลดลงอย่างรวดเร็วจาก $\sim 10\%$ ที่พื้นผิวเป็น $\sim 1\%$ ในสตราโตสเฟียร์ ความแปรปรวนร่วมระหว่างระดับความสูงในชั้นโทรโพสเฟียร์ถูกประเมินโดยอ้างอิงตามแบบจำลองการไหลเวียนทั่วไปของ Laboratoire de Meteorologic Dynamique แต่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ลดลง

2.1.5.3 การวัดและติดตามความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศจากแบบจำลอง

แบบจำลองเป็นการนำการตรวจวัดคาร์บอนไดออกไซด์จากดาวเทียมและสถานีภาคพื้นมารวมกันเพื่อทำนายความแปรผันตามพื้นที่และเวลาของคาร์บอนไดออกไซด์ ตัวอย่างเช่น CarbonTracker เป็นระบบการวัดและการสร้างแบบจำลองคาร์บอนไดออกไซด์ที่พัฒนาโดย NOAA เพื่อติดตามแหล่งที่มา (การปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศ) และแหล่งกักเก็บ (การกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากชั้นบรรยากาศ) ใช้การสังเกตการณ์คาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ ร่วมกับการจำลองการเคลื่อนที่ของบรรยากาศเพื่อประเมินฟลักซ์ที่พื้นผิวของคาร์บอนไดออกไซด์ CarbonTracker รุ่นปัจจุบัน CT2022 ให้การประมาณค่าฟลักซ์พื้นผิวและบรรยากาศของคาร์บอนไดออกไซด์ทั่วโลก ตั้งแต่เดือนมกราคม ปี ค.ศ. 2000 ถึงธันวาคม ปี ค.ศ. 2020 ซึ่ง CarbonTracker มีหลากหลายแบบ คาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 38



รูปที่ 38 ค่าเฉลี่ยรายวันของเศษส่วนโมลเฉลี่ยของคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นโทรโพสเฟียร์อิสระ ตามที่ CarbonTracker จำลองไว้เมื่อวันที่ 20 มีนาคม ปี ค.ศ. 2009 หน่วยไมโครโมลของ CO₂ ต่อโมลของอากาศแห้ง ($\mu\text{mol mol}^{-1}$) และค่าต่าง ๆ จะได้รับตามระดับสีที่แสดงอยู่ใต้กราฟิก "free - troposphere" ที่ความสูงเหนือพื้นดินประมาณ 1.2 กิโลเมตร ถึงความสูงเหนือพื้นดินประมาณ 5.5 กิโลเมตร (<https://gml.noaa.gov/ccgg/carbontracker/>)

2.1.6 ตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศ

2.1.6.1 อุณหภูมิอากาศ (T)

อุณหภูมิ คือ ระดับความร้อนหรือเย็นของวัตถุต่าง ๆ ที่สามารถบอกค่าความร้อนหรือเย็นได้แน่นอน หรือ ดัชนีวัดค่าพลังงานจลน์เฉลี่ย อุณหภูมิเป็นมาตราที่ใช้บอกระดับความร้อน ณ ระดับความสูงต่างกันอุณหภูมิของอากาศมีค่าไม่เท่ากัน ทั้งนี้อุณหภูมิของอากาศแปรเปลี่ยนไปตามระดับความสูงจากระดับน้ำทะเล โดยอุณหภูมิของอากาศในชั้นโทรโพสเฟียร์จะลดลงตามระดับความสูงที่เพิ่มขึ้นจากพื้นผิวโลก นอกจากนั้นค่าของอุณหภูมิ ความดันอากาศ และความหนาแน่นของอากาศ

ค่อย ๆ ลดลง เมื่อระดับความสูงเพิ่มขึ้นจากพื้นผิวโลก อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามระดับความสูงที่เพิ่มขึ้นจากพื้นผิวโลกมีค่าประมาณ 6.4 องศาเซลเซียสต่อระยะทาง 1 กิโลเมตร กล่าวคือ ถ้าที่ระดับพื้นดินมีอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส แล้วที่ระดับสูงขึ้นไป 1 กิโลเมตร บนท้องฟ้าจะมีอุณหภูมิเท่ากับ $30 - 6.4 = 23.6$ องศาเซลเซียส และถ้ายิ่งขึ้นไปสูงถึง 6 กิโลเมตร อุณหภูมิจะลดลงเป็น -8.4 องศาเซลเซียส เป็นต้น

2.1.6.2 ความกดอากาศ (P)

ค่าแรงดันอากาศที่กระทำต่อ 1 หน่วยพื้นที่ที่รองรับแรงดันนั้น หรือ อัตราส่วนแรงดันต่อหน่วยพื้นที่ที่ตั้งฉากที่แรงดันนั้นกระทำ ซึ่งมีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร ในการพยากรณ์อากาศ จะเรียกความดันอากาศหรือความดันบรรยากาศว่า ความกดอากาศ สามารถหาได้จาก

ความดันอากาศ = แรงดันอากาศ/พื้นที่ โดยความกดอากาศมีคุณสมบัติดังนี้

1. ความดันของอากาศที่กระทำต่อพื้นผิวโลกจะวัดที่ระดับน้ำทะเล มีค่าเท่ากับ 760 มิลลิเมตรปรอท เรียกว่า ความดัน 1 บรรยากาศ (atm) หน่วยวัดความดันของอากาศอาจมีหน่วยเป็นบรรยากาศ มิลลิเมตรปรอท ปาสคาล หรือ บาร์ ซึ่ง เปรียบเทียบกันได้ดังนี้

$$\begin{aligned} 1 \text{ บรรยากาศ} &= 760 \text{ มิลลิเมตรปรอท (mmHg)} \\ &= 1.013 \times 10^5 \text{ นิวตันต่อตารางเมตร} \\ &= 1.013 \text{ บาร์} \\ &= 1.013 \times 10^5 \text{ ปาสคาล} \end{aligned}$$

2. ความกดอากาศจะลดลงตามความสูงของพื้นที่ โดยที่ระดับความสูงเดียวกัน ความกดอากาศจะเท่ากัน

3. ความกดอากาศจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้น

2.1.6.3 ความชื้นสัมพัทธ์ (RH)

ความชื้นสัมพัทธ์ คือ อัตราส่วนของปริมาณไอน้ำที่มีอยู่จริงในอากาศต่อปริมาณไอน้ำที่จะทำให้อากาศอิ่มตัว ณ อุณหภูมิเดียวกัน หรือ อัตราส่วนของความดันไอน้ำที่มีอยู่จริงต่อความดันไอน้ำอิ่มตัว ค่าความชื้นสัมพัทธ์แสดงในรูปของร้อยละ (%)

$$\text{ความชื้นสัมพัทธ์} = (\text{ปริมาณไอน้ำที่อยู่ในอากาศ} / \text{ปริมาณไอน้ำที่ทำให้อากาศอิ่มตัว}) \times 100\%$$

$$\text{ความชื้นสัมพัทธ์} = (\text{ความดันไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศ} / \text{ความดันไอน้ำของอากาศอิ่มตัว}) \times 100\%$$

2.1.6.4 ปริมาณน้ำฝน

หยาดน้ำฟ้า หมายถึง น้ำต่าง ๆ ในบรรยากาศที่สามารถตกลงมาสู่พื้นดินได้ เช่น ฝน ทิมะ ลูกเห็บ เป็นต้น ปกติใช้วัดเป็นความลึกหรือความสูงชันมาจากพื้นดิน หน่วยวัดน้ำฝน มีหน่วยเป็น มิลลิเมตร หรือนิ้ว

2.1.6.5 ความเร็วลม (WS) และ ทิศทางลม (WD)

การวัดทิศทางและความเร็วลม เพื่อให้ทราบถึงการเคลื่อนตัวของมวลอากาศว่าเป็นไปในทิศทางใด สำหรับการวัดทิศทางของลมนั้นจะใช้ศรลม (Wind vane) ส่วนการวัดความเร็วของลมจะใช้เครื่องวัดที่ เรียกว่า อะนิมอมิเตอร์ (Anemometer) ซึ่งมีหลายชนิด

2.1.6.6 รังสีคลื่นยาว (Longwave radiation)

รังสีคลื่นยาว คือ รังสีที่แผ่กระจายออกมาจากพื้นผิวโลกและบรรยากาศจากก๊าซต่าง ๆ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของบรรยากาศรวมถึงเมฆ ฝุ่นละออง ไอน้ำ ที่ความยาวคลื่น 4-100 ไมโครเมตร

2.1.6.7 ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV Index)

รังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นส่วนหนึ่งของสเปกตรัมรังสีอาทิตย์ซึ่งมีความสำคัญต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ เป็นรังสีที่มีความเข้มต่ำแต่มีพลังงานโฟตอนสูง ถ้าได้รับในปริมาณมากเกินไปจะก่อให้เกิดความเสียหายในระดับของหน่วยพันธุกรรมทั้งในมนุษย์ สัตว์ และพืช และเป็นสาเหตุของโรคต่าง ๆ เช่น โรคมะเร็งผิวหนังและโรคต่อกระจก เป็นต้น รังสีอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกจะประกอบไปด้วย รังสีอัลตราไวโอเล็ตเอและรังสีอัลตราไวโอเล็ตบี โดยรังสีอัลตราไวโอเล็ตบีจะถูกควบคุมด้วยโอโซนในบรรยากาศของโลก

รังสีอัลตราไวโอเล็ตจากดวงอาทิตย์มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงประมาณตั้งแต่ 10 – 400 นาโนเมตร โดยสามารถแบ่งได้เป็นช่วงต่าง ๆ ดังนี้

- 1) รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่นสั้นมาก (extreme ultraviolet, XUV) มีความยาวคลื่นระหว่าง 10 – 100 นาโนเมตร
- 2) รังสีอัลตราไวโอเล็ตไกล (far ultraviolet, FUV) มีความยาวคลื่นระหว่าง 100 – 200 นาโนเมตร
- 3) รังสีอัลตราไวโอเล็ตซี (ultraviolet C, UVC) มีความยาวคลื่นระหว่าง 200 – 280 นาโนเมตร
- 4) รังสีอัลตราไวโอเล็ตบี (ultraviolet B, UVB) มีความยาวคลื่นระหว่าง 280 – 320 นาโนเมตร

5) รังสีอัลตราไวโอเล็ตเอ (ultraviolet A, UVA) มีความยาวคลื่นระหว่าง 320 – 400 นาโนเมตร

ดัชนีรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV Index) คือ เป็นการวัดการแผ่รังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) ในพื้นที่หรือเวลานั้นๆ คิดค้นโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวแคนาดาในปี 1992 และได้นำมาปรับใช้ใหม่โดยองค์การอนามัยโลก และองค์การอุตุนิยมวิทยาโลกของสหประชาชาติ ในปี 1994 สำหรับความแรงของแดดเมืองไทยในจังหวัดต่าง ๆ ที่มีระดับที่สูง

ตารางที่ 7 ระดับความรุนแรงของ UV Index หรือ ความแรงของแดด

(<https://www.samitivejhospitals.com/th/article/detail/uv-index>)

UV Index	ระดับความรุนแรง
0 – 2.9	ความรุนแรงต่ำ
3 – 5.9	ความรุนแรงปานกลาง
6 – 7.9	ความรุนแรงสูง
8 – 10.9	ความรุนแรงสูงมาก
11+	ความรุนแรงสูงจัด

2.1.6.8 ฝุ่นละออง

ฝุ่นละอองที่มีลักษณะเป็นอนุภาคของแข็งและกึ่งของแข็งพบในอากาศที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.005 ไมโครอน ถึง 100 ไมโครอน โดยฝุ่นทั่วไป เกิดจากกิจกรรมด้านอุตสาหกรรมการเผาไหม้ทั้งที่อยู่ในรูปอนุภาคของแข็ง เช่น ฝุ่นละอองจากวัตถุติด เม้าควัน เป็นต้น และอนุภาคของเหลวในรูปละอองไอในอากาศ เช่น ละอองในกรดหรือละอองไอของสารเคมีต่าง ๆ เป็นต้น ฝุ่นที่เกิดจากกิจกรรมทั่วไป ที่ไม่มีการเผาไหม้ เช่น ฝุ่นจากการทำเหมือง ฝุ่นจากการก่อสร้าง

ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 10 ไมโครอน (PM₁₀) เป็นฝุ่นละอองที่มีลักษณะเป็นอนุภาคของแข็งกึ่งของแข็งขนาดเล็ก ได้แก่ ฝุ่น (Dust) ควัน (Smoke) และเขม่า (Soot) ประกอบด้วย มวลสารหลายชนิดผสมผสานกันและมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน PM₁₀ เกิดจากแหล่งกำเนิดหลายชนิด โดย PM₁₀ ที่เกิดจากธรรมชาติ เช่น ฝุ่นดิน ฝุ่นละออง ไอทะเล ฝุ่นละอองที่เกิดในอาคาร (Indoor Particulate) เป็นต้น ซึ่งกระบวนการที่ทำให้เกิดฝุ่นละออง เช่น โรงไม้หิน โรงงานปูนซีเมนต์ ซึ่ง PM₁₀ จากแหล่งกำเนิดเหล่านี้จะมีปริมาณคาร์บอนสูง องค์ประกอบเหล่านี้มีบทบาทต่อร่างกายที่ทำ

ให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ เมื่อมนุษย์ได้รับ PM_{10} ทางการหายใจ (Respirable Particulate) และสามารถผ่านเข้าสู่ระบบหายใจส่วนลึกได้ ทำให้เกิดผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ

ฝุ่นละอองขนาดไม่เกิน 2.5 ไมครอน ($PM_{2.5}$) เป็นฝุ่นละอองที่มีลักษณะเป็นอนุภาคของแข็งหรือกึ่งของแข็ง ที่อยู่ในสภาพกึ่งระเหย (Semi-volatile) ประกอบด้วยอนุภาคส่วนละเอียดปฐมภูมิและอนุภาคส่วนละเอียดทุติยภูมิมผสมกันอยู่ แต่ส่วนใหญ่ $PM_{2.5}$ จะเป็นอนุภาคทุติยภูมิซึ่งเกิดขึ้นในอากาศเมื่อก๊าซต่าง ๆ เช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไนโตรเจนไดออกไซด์ และสารประกอบอินทรีย์ระเหยที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงจากแก๊สไปอยู่อากาศ โดยทำปฏิกิริยาทางเคมีและฟิสิกส์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากแก๊สไปอยู่ในรูปของอนุภาคในอากาศ ทั้งอนุภาคละเอียดปฐมภูมิ และอนุภาคส่วนละเอียดทุติยภูมิ มีช่วงเวลาที่อยู่ในอากาศเป็นระยะเวลายาวนาน เป็นวันหรือสัปดาห์ และสามารถเคลื่อนที่ไปได้ระยะไกล 100 - 1,000 กิโลเมตร (US EPA, 1999) โดยมีแนวโน้มที่จะเกิดการแพร่กระจายอย่างสม่ำเสมอในบริเวณเขตเมืองที่มียานพาหนะเป็นจำนวนมาก

2.1.6.9 คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)

คาร์บอนมอนอกไซด์ เป็นก๊าซที่เกิดจากการเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ พบได้ในควันจากไฟไหม้ อุตสาหกรรมต่าง ๆ ที่มีการใช้เครื่องจักรหรือเครื่องยนต์ รวมถึงท่อไอเสียรถยนต์ ก๊าซนี้ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น และไม่ระคายเคือง

2.1.6.10 ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2)

ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นก๊าซที่ไม่มีสีและกลิ่นรุนแรง เป็นของเหลวเมื่ออยู่ภายใต้ความดันปกติ สามารถละลายน้ำได้ง่ายและไม่ติดไฟ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่พบในอากาศมักมาจากการเผาไหม้น้ำมัน ส่วนในธรรมชาติพบได้จากการระเบิดของภูเขาไฟ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ถูกใช้เป็นสารออกซิไดซ์รีดิวซ์หรือเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในอุตสาหกรรมผลิตกระดาษ การผลิตกรดซัลฟูริก สารป้องกันการเน่าเสีย การรมควัน สารฟอกขาวและสำหรับการจุ่มแช่ธาตุพืช

2.1.6.11 ไนตริกออกไซด์ (NO) และไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2)

ไนตริกออกไซด์เป็นก๊าซไม่มีสี บางครั้งหมายถึงไนโตรเจนไดออกไซด์ ไนตริกออกไซด์ (NO) เป็นก๊าซที่มีอายุสั้น โดยจะเปลี่ยนเป็นไนโตรเจนไดออกไซด์ (NO_2) ทันทีเมื่อสัมผัสกับออกซิเจน (O_2) ในอากาศ และ ไนโตรเจนไดออกไซด์ เป็นก๊าซพิษที่ระคายเคืองและแข็งตัว ดังนั้นจึงเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต NO_2 เป็นก๊าซเรือนกระจกที่มีพลังงานความร้อนต่อหน่วยมวลสูงกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มาก เป็นสารตั้งต้นของโอโซน (O_3) ซึ่งเป็นก๊าซระคายเคืองที่ทรงพลังซึ่งเกิดขึ้นเองในอากาศ เมื่อมี NO ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในบรรยากาศ (O_2) NO_2 ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ เมื่อ

อยู่ในชั้นบรรยากาศแล้วผสมกับไอน้ำก็จะกลายเป็นกรดไนตริก (HNO_3) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดฝนกรดที่ละลายพืช หิน และคอนกรีตได้

2.1.6.12 มีเทน (CH_4)

มีเทนเป็นก๊าซชนิดไวไฟ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น เบากว่าอากาศ เป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของก๊าซธรรมชาติโดยประมาณ 75% เป็นสารกลุ่มไฮโดรคาร์บอนอย่างง่ายที่สุด มีเทนเป็นก๊าซเรือนกระจกที่มีความสำคัญเป็นลำดับที่สอง รองจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แหล่งที่มาของก๊าซมีเทนในบรรยากาศมาจากธรรมชาติโดยเฉพาะการย่อยสลายสิ่งปฏิกูลและกำเนิดมาจากสิ่งที่มีมนุษย์กระทำ

2.1.7 ลักษณะทั่วไปของพื้นที่ศึกษา

2.1.7.1 ลักษณะทางกายภาพและลักษณะภูมิอากาศของประเทศไทย

ตำแหน่งที่ตั้งของประเทศไทยอยู่ระหว่างละติจูดที่ 5 องศา 37 ลิปดา ถึง 20 องศา 28 ลิปดาเหนือ และลองจิจูดที่ 97 องศา 21 ลิปดา ถึง 105 องศา 37 ลิปดาตะวันออก โดยมีรอยต่อกับประเทศใกล้เคียง ดังนี้

ทิศเหนือ ติดต่อกับสาธารณรัฐแห่งสหภาพเมียนมาร์และสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว

ทิศตะวันตก ติดต่อกับสาธารณรัฐแห่งสหภาพเมียนมาร์

ทิศตะวันออก ติดต่อกับสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาวและราชอาณาจักรกัมพูชา

ทิศใต้ ติดต่อกับประเทศมาเลเซีย

ประเทศไทยมีพื้นที่ทั้งหมดโดยประมาณ 513,115 ตารางกิโลเมตร 320.70 ล้านไร่ แบ่งการปกครองออกเป็น 76 จังหวัด ตามการแบ่งภาคทางอุตุนิยมวิทยานั้นสามารถจำแนกออกเป็น 5 ภูมิภาค ได้แก่ ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลาง ภาคตะวันออก และภาคใต้

ภาคเหนือ ภูมิประเทศส่วนใหญ่เป็นเทือกเขา มีภูเขาติดกันเป็นพืดในแนวเหนือ-ใต้ สลับกับหุบเขาทั้งแคบและกว้างมากมาย เช่น ทิวเขาแดนลาวที่อยู่ทางตอนเหนือกั้นเขตแดนระหว่างไทยกับพม่า ทางทิศตะวันตกมีทิวเขาถนนธงชัยและทิวเขาตะนาวศรีบางส่วน ตอนกลางของภาคมีทิวเขาผีปันน้ำ ด้านตะวันออกมีทิวเขาหลวงพระบาง และมีทิวเขาเพชรบูรณ์บางส่วนกั้นระหว่างภาคเหนือกับภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ยอดเขาที่สูงที่สุดในประเทศไทยคือ ดอยอินทนนท์ อยู่ในเทือกเขาจอมทองเขตจังหวัดเชียงใหม่ สูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางประมาณ 2,565 เมตร

ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีลักษณะภูมิประเทศที่ราบสูงลาดต่ำไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ ทางทิศตะวันตกมีทิวเขาเพชรบูรณ์ และทิวเขาตองพญาเย็นเป็นแนวกั้นระหว่างภาคตะวันออกเฉียงเหนือกับภาคตะวันออกและทิวเขาพนมดงรักกั้นพรมแดนภาคนี้กับประเทศกัมพูชา ทิวเขาเพชรบูรณ์ ทิวเขาตองพญาเย็น และทิวเขาพนมดงรัก เป็นแนวกั้นกระแสลมตะวันตกเฉียงใต้ ทำให้บริเวณด้านหลังเขาซึ่งได้แก่ พื้นที่ทางด้านตะวันตกของภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีฝนน้อยกว่าทางด้านตะวันออก

ภาคกลาง ภูมิประเทศส่วนใหญ่เป็นที่ราบลุ่ม ระดับพื้นที่ลาดลงมาทางใต้ตามลำดับจนถึงอ่าวไทย ในภาคนี้มีภูเขาบางส่วนซึ่งส่วนใหญ่เป็นภูเขาที่ไม่สูงมาก เว้นแต่ทางด้านตะวันตกใกล้เขตแดนประเทศพม่ามีเทือกเขาตะนาวศรีวางตัวในแนวเหนือ-ใต้ต่อเนื่องมาจากภาคเหนือเป็นแนวกั้นพรมแดนกับประเทศพม่า และมีความสูงเกินกว่า 1,600 เมตร ทางตะวันออกเฉียงมีทิวเขาตองพญาเย็นเป็นแนวแบ่งเขตภาคกลางกับภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

ภาคตะวันออก ลักษณะภูมิประเทศเป็นเทือกเขาและที่ราบทางตะวันออกเฉียงใต้ของภาคมีทิวเขาบรรทัดเป็นแนวกั้นพรมแดนกับประเทศกัมพูชา ถัดมามีทิวเขาจันทบุรี ทางเหนือมีทิวเขาสันกำแพงและพนมดงรักวางตัวในแนวตะวันตก-ตะวันออกเป็นแนวแบ่งเขตภาคตะวันออกกับภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ทางตะวันตกและทางใต้เป็นฝั่งทะเลติดอ่าวไทย มีเกาะใหญ่น้อยมากมาย

ภาคใต้ เป็นคาบสมุทรขนานด้วยทะเลทั้งสองด้าน ด้านตะวันตก คือ ทะเลอันดามัน ด้านตะวันออก คือ อ่าวไทย ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของทะเลจีนใต้ ทางตอนบนของภาคมีทิวเขาตะนาวศรีซึ่งวางตัวในแนวเหนือ-ใต้ ต่อเนื่องมาจากภาคเหนือและภาคกลางเป็นแนวกั้นพรมแดนกับประเทศพม่า ทางตอนล่างของภาคมีทิวเขาภูเก็ตและทิวเขานครศรีธรรมราช วางตัวในแนวเหนือ-ใต้ แบ่งภาคใต้ออกเป็นสองส่วน คือ ที่ราบชายฝั่งทะเลด้านตะวันออกติดกับอ่าวไทยซึ่งมีอาณาเขตกว้างขวาง และที่ราบด้านตะวันตกขนานกับชายฝั่งทะเลอันดามันและช่องแคบมะละกา ซึ่งเป็นบริเวณแคบกว่าที่ราบด้านตะวันออก ทางทิศใต้ของภาคมีทิวเขาสันกาลาศรีเป็นแนวกั้นพรมแดนกับประเทศมาเลเซีย โดยภาคใต้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ภาคใต้ฝั่งตะวันออกเป็นบริเวณตอนบนของภาคต่อเนื่องถึงที่ราบชายฝั่งทะเลด้านตะวันออก และภาคใต้ฝั่งตะวันตก

ลักษณะภูมิประเทศของประเทศไทยสามารถแบ่งออกเป็น 6 ลักษณะ คือ

- 1.1 ที่ราบภาคกลาง บริเวณที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา แม่น้ำท่าจีน และแม่น้ำแม่กลอง เป็นเขตที่ราบที่ใหญ่ที่สุดของประเทศ
- 1.2 ที่ราบสูงภาคตะวันออกเฉียงเหนือ บริเวณที่ราบสูงตั้งแต่ทิวเขาเพชรบูรณ์ ทิวเขาตองพญาเย็น ทิวเขาพนมดงรักถึงแม่น้ำโขง และที่ราบต่ำของกัมพูชาในทิศใต้
- 1.3 เขตภูเขาและที่ราบระหว่างเขาภาคเหนือ เป็นที่ราบแคบ ๆ สลับภูเขาในภาคเหนือ

- 1.4 เขตภูเขาสูงภาคตะวันตก มีลักษณะเป็นทิวเขายาวต่อเนื่องเรียงกันในแนวเหนือใต้
- 1.5 เขตภูเขาและที่ราบชายฝั่งภาคตะวันออก มีทิวเขาจันทบุรี วางตัวในแนวตะวันออกและตะวันตก ทำให้ภาคตะวันออกตอนบนมีลักษณะภูมิประเทศที่ราบลุ่มแม่น้ำบางปะกง และตอนล่างเป็นที่ราบชายฝั่งทะเล
- 1.6 เขตภูเขาและที่ราบชายฝั่งคาบสมุทรภาคใต้ ลักษณะประเทศเป็นคาบสมุทรยาวไปทางใต้มีทะเลขนานทั้งสองด้าน คือ ด้านอ่าวไทย (ทางทิศตะวันออก) และทะเลอันดามัน (ทางทิศตะวันตก)





รูปที่ 39 แผนที่ประเทศไทย (<https://www.nationsonline.org/oneworld/map/thailand-region-map.htm>)

ลักษณะภูมิอากาศของประเทศไทยนั้นอยู่ภายใต้อิทธิพลของมรสุมสองชนิด คือ มรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ

มรสุมตะวันตกเฉียงใต้ พัดปกคลุมประเทศไทยระหว่างกลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม โดยมีแหล่งกำเนิดจากบริเวณความกดอากาศสูงในซีกโลกใต้ บริเวณมหาสมุทรอินเดีย ซึ่งพัดออกจากศูนย์กลางเป็นลมตะวันออกเฉียงใต้ และเปลี่ยนเป็น ลมตะวันตกเฉียงใต้เมื่อพัดข้ามเส้นศูนย์สูตร มรสุมนี้จะนำมวลอากาศชื้นจากมหาสมุทรอินเดียมาสู่ประเทศไทย ทำให้มีเมฆมากและฝนตกชุกทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งตามบริเวณชายฝั่งทะเล และเทือกเขาด้านรับลมจะมีฝนมากกว่าบริเวณอื่น

มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ หลังจากหมดอิทธิพลของมรสุมตะวันตกเฉียงใต้แล้ว ประมาณกลางเดือนตุลาคมจะมีมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือพัดปกคลุมประเทศไทยจนถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ มรสุมนี้มีแหล่งกำเนิดจากบริเวณความกดอากาศสูงในซีกโลกเหนือแถบประเทศมองโกเลียและจีน พัดพาเอามวลอากาศเย็นและแห้งจากแหล่งกำเนิดเข้ามาปกคลุมประเทศไทย ทำให้ท้องฟ้าโปร่ง อากาศหนาวเย็นและแห้งแล้ง โดยเฉพาะภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ส่วนภาคใต้จะมีฝนชุก โดยเฉพาะภาคใต้ฝั่งตะวันออก เนื่องจากมรสุมนี้นำความชุ่มชื้นจากอ่าวไทยเข้ามาปกคลุม

ฤดูกาลของประเทศไทยโดยทั่ว ๆ ไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ฤดู ดังนี้

ฤดูร้อน เริ่มตั้งแต่กลางเดือนกุมภาพันธ์ไปจนถึงกลางเดือนพฤษภาคม ซึ่งเป็นช่วงเปลี่ยนจากมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือเป็นมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และเป็นระยะที่ซีกโลกเหนือหันเข้าหาดวงอาทิตย์ โดยเฉพาะเดือนเมษายนบริเวณประเทศไทยมีดวงอาทิตย์อยู่เกือบตรงศีรษะในเวลาเที่ยงวัน ทำให้ได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์เต็มที่ สภาวะอากาศจึงร้อนอบอ้าว ในฤดูนี้แม้ว่าโดยทั่วไปจะมีอากาศร้อนและแห้งแล้ง แต่บางครั้งอาจมีมวลอากาศเย็นจากประเทศจีนแผ่ลงมาปกคลุมถึงประเทศไทยตอนบน ทำให้เกิดการปะทะกันของมวลอากาศเย็นกับมวลอากาศร้อนที่ปกคลุมอยู่เหนือประเทศไทย ซึ่งก่อให้เกิดพายุฝนฟ้าคะนองและลมกระโชกแรงหรืออาจมีลูกเห็บตกก่อให้เกิดความเสียหายได้ พายุฝนฟ้าคะนองที่เกิดขึ้นในฤดูนี้มักเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าพายุฤดูร้อน ลักษณะอากาศในฤดูร้อนพิจารณาจากอุณหภูมิสูงสุดของแต่ละวัน โดยมีเกณฑ์การพิจารณาดังนี้

อากาศร้อน อุณหภูมิระหว่าง 35.0°C - 39.9°C

อากาศร้อนจัด อุณหภูมิตั้งแต่ 40.0°C ขึ้นไป

ฤดูฝน เริ่มตั้งแต่กลางเดือนพฤษภาคมเมื่อมรสุมตะวันตกเฉียงใต้พัดปกคลุมประเทศไทย และร่องความกดอากาศต่ำพาดผ่านประเทศไทยทำให้มีฝนชุก ร่องความกดอากาศต่ำนี้ปกติจะพาดผ่านภาคใต้ในเดือนพฤษภาคม แล้วจึงเลื่อนขึ้นไปทางเหนือตามลำดับจนถึงช่วงประมาณปลายเดือน

มิถุนายน จะพาดผ่านอยู่บริเวณประเทศจีนตอนใต้ ทำให้ฝนในประเทศไทยลดลงระยะหนึ่ง และเรียกว่าเป็นช่วงฝนทิ้ง ซึ่งอาจนานประมาณ 1 - 2 สัปดาห์หรือบางปีอาจเกิดขึ้นรุนแรงและมีฝนน้อย นานนับเดือน ในเดือนกรกฎาคมปกติร่องความกดอากาศต่ำจะเลื่อนกลับลงมาทางใต้พาดผ่านบริเวณ ประเทศไทยอีกครั้ง ทำให้มีฝนชุกต่อเนื่อง จนกระทั่งมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือพัดเข้ามาปกคลุม ประเทศไทยแทนที่มรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ประมาณกลางเดือนตุลาคมประเทศไทยตอนบน จะเริ่มมี อากาศเย็นและฝนลดลง โดยเฉพาะภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เว้นแต่ภาคใต้ยังคงมีฝน ชุกต่อไปจนถึงเดือนธันวาคมและมักมีฝนหนักถึงหนักมากจนก่อให้เกิดอุทกภัย โดยเฉพาะภาคใต้ฝั่ง ตะวันออกซึ่งจะมีปริมาณฝนมากกว่าภาคใต้ฝั่งตะวันตก อย่างไรก็ตามการเริ่มต้นฤดูฝนอาจจะช้าหรือ เร็วกว่ากำหนดได้ประมาณ 1 - 2 สัปดาห์เกณฑ์การพิจารณาปริมาณฝนในระยะเวลา 24 ชั่วโมงของ แต่ละวันตั้งแต่เวลา 07.00 น. ของวันหนึ่งถึงเวลา 07.00 น. ของวันรุ่งขึ้น ตามลักษณะของฝนที่ตกใน ประเทศที่อยู่ในเขตร้อนย่านมรสุมมีดังนี้

ฝนวัดจำนวนไม่ได้	ปริมาณฝนน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร
ฝนเล็กน้อย	ปริมาณฝนระหว่าง 0.1 - 10.0 มิลลิเมตร
ฝนปานกลาง	ปริมาณฝนระหว่าง 10.1 - 35.0 มิลลิเมตร
ฝนหนัก	ปริมาณฝนระหว่าง 35.1 - 90.0 มิลลิเมตร
ฝนหนักมาก	ปริมาณฝนตั้งแต่ 90.1 มิลลิเมตรขึ้นไป

ฤดูหนาว เริ่มตั้งแต่กลางเดือนตุลาคมถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ เมื่อมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ พัดปกคลุมประเทศไทยตั้งแต่กลางเดือนตุลาคม ในช่วงกลางเดือนตุลาคมนานราว 1-2 สัปดาห์ เป็น ช่วงเปลี่ยนฤดูจากฤดูฝนเป็นฤดูหนาว อากาศแปรปรวน ไม่แน่นอน อาจเริ่มมีอากาศเย็นหรืออาจยังมี ฝนฟ้าคะนอง โดยเฉพาะบริเวณภาคกลางตอนล่างและภาคตะวันออกเฉียงใต้ซึ่งจะหมดฝน และเริ่มมี อากาศเย็นช้ากว่าภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ลักษณะอากาศในฤดูหนาวพิจารณาจาก อุณหภูมิต่ำสุดของแต่ละวัน โดยมีเกณฑ์การพิจารณาดังนี้

อากาศหนาวจัดอุณหภูมิต่ำกว่า 8.0°C
อากาศหนาวอุณหภูมิต่ำกว่า 8.0°C - 15.9°C
อากาศเย็นอุณหภูมิต่ำกว่า 16.0°C - 22.9°C

2.1.7.2 ลักษณะทางกายภาพและลักษณะภูมิอากาศของประเทศไต้หวัน

ตำแหน่งที่ตั้งของประเทศไต้หวันอยู่ละติจูดและลองจิจูดทางภูมิศาสตร์อยู่ที่ 25°02'N และ 121°38'W ตามลำดับ โดยมีรอยต่อกับประเทศไต้หวัน ดังนี้

ทิศเหนือ	ประเทศญี่ปุ่น
ทิศตะวันตก	สาธารณรัฐประชาชนจีน
ทิศตะวันออก	ทะเลจีนตะวันออก และทะเลจีนใต้ในมหาสมุทรแปซิฟิก
ทิศใต้	ประเทศฟิลิปปินส์

ประเทศไต้หวันประกอบด้วยเกาะ 168 เกาะ โดยมีพื้นที่รวมกัน 36,193 ตารางกิโลเมตร ทอดยาวประมาณ 180 กิโลเมตร ข้ามช่องแคบไต้หวันจากชายฝั่งตะวันออกเฉียงใต้ของจีน ทะเลจีนตะวันออกตั้งอยู่ทางเหนือ ทะเลฟิลิปปินส์ทางทิศตะวันออก ช่องแคบลูซอนทางทิศใต้ และทะเลจีนใต้ทางตะวันตกเฉียงใต้ เกาะเล็ก ๆ ได้แก่เกาะเผิงหูในช่องแคบไต้หวันเกาะจินเหมินเกาะมัตสึ และเกาะหวู่ฉิวใกล้ชายฝั่งจีน และเกาะในทะเลจีนใต้บางแห่ง โดยทางตะวันออกมีเทือกเขารอบคลุมพื้นที่สองในสาม และที่ราบในทางตะวันตก ซึ่งมีการขยายตัวของเมืองอย่างมาก เมืองหลวงอย่างไทเปอยู่ร่วมกับนิวไทเปซิตีและจีหลงซึ่งเป็นเขตมหานครที่ใหญ่ที่สุดด้วยจำนวนประชากรประมาณ 23.9 ล้านคน ไต้หวันจึงเป็นประเทศที่มีประชากรหนาแน่นที่สุด

ประเทศไต้หวันเป็นเกาะหลักที่อยู่ในแนวรอยเลื่อนที่อยู่ทางทิศตะวันออก ซึ่งประกอบด้วยเทือกเขาซุซเซ่หาลูกขนานไปกับชายฝั่งตะวันออก และที่ราบในทางตะวันตก ซึ่งเป็นพื้นที่ส่วนใหญ่ของไต้หวันที่ประชากรอาศัยอยู่ มียอดเขาหลายแห่งที่มีความสูงกว่า 3,500 เมตร โดยยอดเขาที่สูงที่สุดคือ หยูซานที่ความสูง 3,952 เมตร ทำให้ไต้หวันเป็นเกาะที่สูงเป็นอันดับสี่ของโลก ขอบเขตเปลือกโลกที่ก่อตัวเป็นแนวเทือกเขาเหล่านี้ยังคงทำงานอยู่ และประเทศไต้หวันก็ประสบกับแผ่นดินไหวหลายครั้ง นอกจากนี้ยังมีภูเขาไฟใต้น้ำที่ยังคุกรุ่นอยู่หลายแห่งในช่องแคบไต้หวัน

ไต้หวันประกอบด้วยเขตนิเวศภาคพื้นดินสี่แห่ง ได้แก่ ป่าดิบกึ่งเขตร้อนเจียนหนาน หมู่เกาะ ทะเลจีนใต้ ป่าฝนมรสุมทางใต้ของไต้หวัน และป่าดิบกึ่งเขตร้อนของไต้หวัน ภูเขาทางทิศตะวันออกมีป่าหนาทึบและเป็นที่อยู่อาศัยของสัตว์ป่านานาชนิด ในขณะที่การใช้ประโยชน์ที่ดินในที่ราบลุ่มทางตะวันตกและทางตอนเหนือมีความหนาแน่นมาก



รูปที่ 40 แผนที่ประเทศไต้หวัน (<https://www.nationsonline.org/oneworld/taiwan.htm>)

สภาพภูมิอากาศของประเทศไต้หวันเป็นแบบทะเลเขตร้อน (tropical marine) ความชื้นและปริมาณน้ำฝนจะรุนแรงในช่วงเดือนมิถุนายนถึงเดือนสิงหาคม ภูมิประเทศเป็นภูเขาขรุขระ ตั้งอยู่บนเขตร้อน และภูมิอากาศโดยทั่วไปเป็นแบบเขตร้อนในทะเล ภาคเหนือและภาคกลางเป็นพื้นที่กึ่งเขตร้อน ในขณะที่ภาคใต้เป็นเขตร้อนและพื้นที่ภูเขาที่มีอากาศอบอุ่น ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยอยู่ที่ 2,600 มิลลิเมตรต่อปี ฤดูฝนเกิดขึ้นพร้อมกับการเริ่มต้นของมรสุมเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ออกในเดือนพฤษภาคมและมิถุนายน ทิวทัศน์เกาะจะพบกับสภาพอากาศร้อนชื้นตั้งแต่เดือนมิถุนายนถึงกันยายน ได้ฝุ่นมักเกิดขึ้น

ในเดือนกรกฎาคม สิงหาคม และกันยายน ในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงมีนาคม ภาคตะวันออกเฉียงเหนือจะมีฝนตกสม่ำเสมอ ในขณะที่ทางตอนกลางและตอนใต้ของเกาะจะมีแดดเป็นส่วนใหญ่ (Yuan, 1985)

ฤดูกาลของประเทศได้หวั่นโดยทั่ว ๆ ไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ฤดู ดังนี้

ฤดูหนาว ช่วงเดือนธันวาคม มกราคม และกุมภาพันธ์ ได้รับอิทธิพลของมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ อุณหภูมิในฤดูหนาว อากาศเย็นว่า $< 22^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 14°C

ฤดูใบไม้ผลิ ช่วงเดือนมีนาคม เมษายน และพฤษภาคม ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือที่มีกำลังอ่อนลง ทำให้อุณหภูมิอุ่นขึ้น อุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 25°C

ฤดูร้อน ช่วงเดือนมิถุนายน กรกฎาคม และสิงหาคม ทิศทางลมในช่วงนี้เปลี่ยนจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ โดยลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้พัดปกคลุมในเดือนมิถุนายนและกรกฎาคม และมีกำลังอ่อนกว่ามรสุมตะวันออกเฉียงเหนือในฤดูหนาวมาก มีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 30°C

ฤดูใบไม้ร่วง ช่วงเดือนกันยายน ตุลาคม และพฤศจิกายน ได้รับอิทธิพลของมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือจึงทำให้มีอุณหภูมิต่ำลง โดยมีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 22°C (Jan et al., 2002)

2.1.8 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของพื้นที่ศึกษา

2.1.8.1 การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในประเทศไทย

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศส่งผลกระทบต่อ สังคมและ เศรษฐกิจของประเทศไทยในหลายๆ ด้านตั้งแต่ศตวรรษที่ 20 การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศส่งผลให้อุณหภูมิในประเทศไทยสูงขึ้น ประเทศไทยถือว่าเป็นประเทศที่มีความเสี่ยงสูงต่อผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศความร้อนจัด และระดับน้ำทะเลที่สูงขึ้นคุกคามพื้นที่บางส่วนของประเทศไทย รวมถึงเมืองหลวงของกรุงเทพฯ การกัดเซาะถือเป็นปัญหาสำคัญเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศภายในประเทศ ประเทศไทยได้ลงนามในข้อตกลงปารีส ในปี ค.ศ. 2015 รัฐบาลไทยได้ให้คำมั่นสัญญาที่มุ่งมั่นในระดับประเทศในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อปีลง 20-25% ภายในปี ค.ศ. 2030

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทางธรรมชาติของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของประเทศไทย นักวิจัยพบว่าอุณหภูมิในประเทศไทยเพิ่มขึ้นในช่วงครึ่งศตวรรษที่ผ่านมา แม้ว่าการประเมินจะมีความแปรปรวนอยู่บ้างก็ตาม กรมอุตุนิยมวิทยาของประเทศไทยรายงานว่าอุณหภูมิเฉลี่ยรายปีในประเทศไทยเพิ่มขึ้นหนึ่งองศาเซลเซียสตั้งแต่ปี ค.ศ. 1981 ถึงปี ค.ศ. 2007 การศึกษาอีกชิ้นหนึ่งพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยรายปีในประเทศไทยเพิ่มขึ้น 0.95°C ระหว่างปี 1955 ถึง 2009 มากกว่าอุณหภูมิโลกเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น 0.69°C อุณหภูมิสูงสุดประจำปีเพิ่มขึ้น 0.86°C และอุณหภูมิต่ำสุดประจำปีลดลง

1.45°C ในช่วง 55 ปีที่ผ่านมา ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1993 ถึงปี ค.ศ. 2008 ระดับน้ำทะเลในอ่าวไทยเพิ่มขึ้น 3-5 มิลลิเมตรต่อปี เทียบกับค่าเฉลี่ยทั่วโลกที่ 1.7 มิลลิเมตรต่อปี แदनนิ มาร์กส์ ศาสตราจารย์และที่ปรึกษาด้านสภาพอากาศของมูลนิธิรีอ็อคกี้เฟลเลอร์เตือนว่า การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศกำลังส่งผลกระทบต่ออย่างรุนแรงต่อโลก และประเทศไทยน่าจะเป็นหนึ่งในประเทศที่ได้รับผลกระทบมากที่สุด เมื่อพิจารณาจากภูมิศาสตร์ เศรษฐกิจ และระดับการพัฒนา

ระดับน้ำทะเลที่เพิ่มขึ้นของประเทศไทย ระดับน้ำทะเลที่สูงขึ้นซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศถือเป็นหนึ่งในภัยคุกคามหลักที่การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมีต่อประเทศไทย กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งของรัฐบาลไทย (DMCR) ได้คำนวณว่าการกัดเซาะทำให้ประเทศสูญเสียพื้นที่ชายฝั่งทะเล 30 ตารางกิโลเมตรทุกปี สำนักงานนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมไทยคาดการณ์ว่าระดับน้ำทะเลจะเพิ่มขึ้นหนึ่งเมตรในอีก 40 ถึง 100 ปีข้างหน้า ส่งผลกระทบต่อพื้นที่ชายฝั่งทะเลอย่างน้อย 3,200 ตารางกิโลเมตร ซึ่งอาจสร้างความเสียหายให้กับประเทศไทยถึงสามพันล้านบาท และ 17% ของประชากรไทยหรือมากกว่า 11 ล้านคนจะได้รับผลกระทบโดยตรงจากเรื่องนี้

2.1.8.2 การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในประเทศไทยได้หวั่น

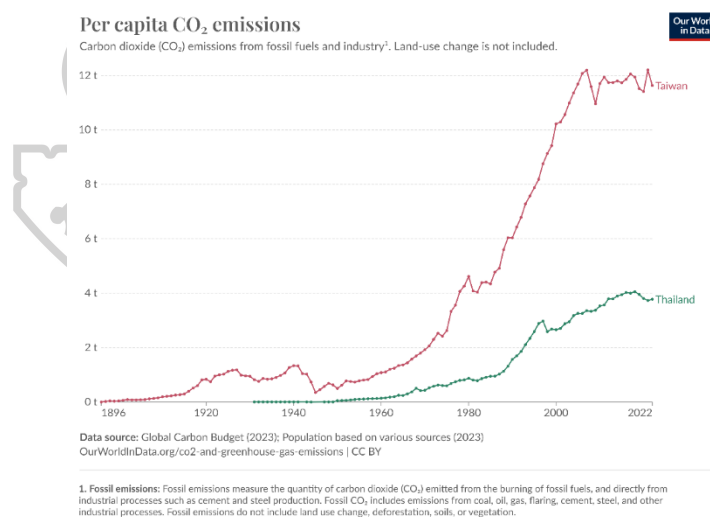
เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ อุณหภูมิเฉลี่ยในได้หวั่นเพิ่มขึ้น 1.4 °C (2.5 °F) ในช่วง 100 ปีที่ผ่านมา ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิทั่วโลกสองเท่า เป้าหมายของรัฐบาลได้หวั่นคือการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนลง 20% ในปี ค.ศ. 2030 และ 50% ในปี ค.ศ. 2050 เมื่อเทียบกับปี ค.ศ. 2005 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศได้หวั่น ในปี ค.ศ. 2020 การปล่อย CO₂ ต่อปีอยู่ที่ 273.17 ล้านตันและ 11.47 ตันต่อหัว ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2005 เป็นต้นมามีการรักษาเสถียรภาพของการปล่อย CO₂ โดยการปล่อย CO₂ ต่อปีเพิ่มขึ้น 2.52% และการปล่อย CO₂ ต่อหัวลดลง 2.26% ระหว่างปี ค.ศ. 2005 ถึงปี ค.ศ. 2020 ในปี ค.ศ. 2020 การปล่อย CO₂ สะสมอยู่ที่ 9.05 พันล้านตัน ในปี 2020 ได้หวั่นรับผิดชอบการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 0.78% ของทั่วโลก รัฐบาลได้หวั่นให้คำมั่นที่จะลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกลง 20% ในปี ค.ศ. 2030 และ 50% ในปี ค.ศ. 2050 เมื่อเทียบกับปี ค.ศ. 2005 โรงไฟฟ้าไถจงได้รับการประเมินว่าเป็นหนึ่งในสิบโรงไฟฟ้าที่ใช้ถ่านหินก่อมลพิษมากที่สุดในโลกในปี ค.ศ. 2018 โดยมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ 29.9 ล้านตัน และการปล่อยก๊าซสัมพัทธ์อยู่ที่ประมาณ 1.282 กิโลกรัมต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทางธรรมชาติของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยได้หวั่น ตามข้อมูลการคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของได้หวั่นและแพลตฟอร์มความรู้การปรับตัว (TCCIP) จำนวนวันที่อุณหภูมิสูงกว่า 36 องศาเซลเซียสในได้หวั่นสามารถเพิ่มขึ้น

จากน้อยกว่า 1 วันต่อปีในปี ค.ศ. 2021 เป็น 48.1 วันในปี ค.ศ. 2100 หากอุณหภูมิโลกเพิ่มขึ้น 1.5 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิโลกเพิ่มขึ้นคงที่ที่ 1.5 องศาเซลเซียส จะมีอุณหภูมิเช่นนี้เพิ่มขึ้นปีละ 6.6 วัน ฤดูร้อนอาจขยายออกไปในช่วงปลายศตวรรษจาก 80 วันเป็น 210 วัน ฤดูหนาวจะสั้นลง 0 ถึง 50 วัน เทียบกับ 70 วันในปี ค.ศ. 2020

ระดับน้ำทะเลที่เพิ่มขึ้นของประเทศไต้หวัน ในรายงานจากกรีนพีซไต้หวันตีพิมพ์เมื่อเดือนสิงหาคม ปี ค.ศ. 2020 ระดับน้ำทะเลรอบ ๆ ไต้หวันเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าของอัตราการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลทั่วโลก หกเมืองของไต้หวันตกอยู่ในอันตรายจากระดับน้ำทะเลที่สูงขึ้นและคลื่นพายุซัดฝั่ง ซึ่งคิดเป็น 70% ของประชากรทั้งหมด สถานที่ต่าง ๆ เช่น อาคารทำเนียบประธานาธิบดีในไทเป สนามบินชงชาน บางส่วนของเกาะสงจะถูกน้ำท่วม และไถหนานจะได้รับความเสียหายครั้งใหญ่ที่สุดจากน้ำท่วม

ซึ่งการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของบุคคลโดยเฉลี่ยของประเทศไทยแสดงในเส้นกราฟสีเขียว ในปี ค.ศ. 2022 ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ประมาณ 4 ตันต่อคน และของประเทศไทยไต้หวันแสดงในเส้นกราฟสีแดง ในปี ค.ศ. 2022 ปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ประมาณ 11 ตันต่อคน ดังแสดงในรูปที่ 41



รูปที่ 41 การปล่อยก๊าซต่อหัวแสดงถึงการปล่อยก๊าซของบุคคลโดยเฉลี่ยในประเทศหรือภูมิภาค โดยคำนวณจากการปล่อยก๊าซทั้งหมดหารด้วยจำนวนประชากร
(<https://ourworldindata.org/consumption-based-co2>)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 การประมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากข้อมูลดาวเทียม

(Liu et al., 2012) ได้เสนอการประมาณการกระจายตัวเชิงพื้นที่ของคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ข้อมูลระดับ 2 ที่วัดได้จากดาวเทียม Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT) รายวันด้วยวิธีการ Kriging โดยศึกษาในภูมิภาคเอเชียตะวันออก ตั้งแต่เดือนมิถุนายน ปี ค.ศ. 2009 ถึงเดือนตุลาคม ปี ค.ศ. 2010 ซึ่งข้อมูลรายวันมีความแตกต่างกันของเส้นทางการโคจรในแต่ละเดือน เมื่อทำแผนที่ด้วยการแก้ไขแบบ Kriging พบว่าค่า XCO_2 มีการเปลี่ยนแปลงตามช่วงฤดูกาล ซึ่งมีค่าสูงในฤดูหนาวและฤดูใบไม้ผลิ ที่อาจเกิดจากควันทะลุและฝุ่นจากการเผาไหม้ถ่านหิน นอกจากนี้ได้มีการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการประมาณด้วยวิธี Kriging Interpolation ที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ $0.8^\circ \times 0.8^\circ$ พบว่าข้อมูลที่ได้มีค่าต่ำกว่าค่าที่วัดได้จากสถานีภาคพื้นของ World Data Centre for Greenhouse Gases (WDCGG)

(Jing et al., 2014) ได้เสนอวิธีการเติมช่องว่างของข้อมูลที่วัดได้จากดาวเทียมโดยใช้วิธีการ Kriging เพื่อสร้างแผนที่การกระจายตัวเชิงพื้นที่ของความเข้มข้น CO_2 โดยใช้ข้อมูลเศษส่วนโมลอากาศแห้งของ CO_2 เฉลี่ยตลอดทั้งคอลัมน์บรรยากาศ (XCO_2) จากดาวเทียม GOSAT และ SCIAMACHY รวมเข้าด้วยกัน หาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับค่า XCO_2 ที่ได้จากการประมาณ และสร้างแบบจำลองเอ็กซ์โปเนนเชียล ผลลัพธ์ของ Semi-variogram บ่งชี้ว่าชุดข้อมูล XCO_2 ที่ได้จากดาวเทียมทั้งสองดวงมีความสัมพันธ์เชิงพื้นที่อย่างมีนัยสำคัญ การทำแผนที่ด้วยวิธีการ Kriging แสดงให้เห็นความแปรผันของความเข้มข้น CO_2 ทั่วโลก ซึ่งการกระจายตัวเชิงพื้นที่ของความเข้มข้นของ CO_2 ทั่วโลกและการคาดการณ์แนวโน้มของการแปรผันของความเข้มข้นของ CO_2 โดยมีความคลาดเคลื่อน 0.5% เมื่อเทียบกับค่า XCO_2 เดิม

(Zhou et al., 2013) เนื่องจากการวัด XCO_2 ด้วยดาวเทียม GOSAT มีช่องว่างขนาดใหญ่ที่มีผลกระทบมาจากเมฆและโหมดในการวัด แม้ว่าการแก้ไขด้วยวิธี Kriging จะให้ผลลัพธ์ในการทำนายเป็นเชิงเส้นตรงที่ดีที่สุด แต่มีราคาแพงสำหรับชุดข้อมูลขนาดใหญ่ จึงได้ใช้วิธีการ Fixed Rank Kriging ในการปิดช่องว่างของข้อมูลซึ่งขึ้นอยู่กับแบบจำลอง Spatial Random Effect (SRE) ที่ให้ความละเอียดเชิงพื้นที่เท่ากับ $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ โดยพื้นที่ศึกษาคือประเทศจีน พบว่าผลลัพธ์มีความสอดคล้องกับวิธีการ Kriging แบบอื่น ๆ และสอดคล้องกับการตรวจวัด CO_2 จากสถานีภาคพื้นที่ตั้งอยู่บนภูเขาทั้งสองแห่งคือที่ Waliguan และ Shangdiazhi

(Jin et al., 2022) พบว่าดาวเทียมสำหรับตรวจวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เช่น SCIAMACHY GOSAT-1/2 OCO-2/3 และ TanSat มีกระบวนการในการดึงข้อมูลที่ใช้ในการวัด

XCO₂ แตกต่างกัน และการวัดรายวันมีข้อจำกัดด้วยระยะเวลาในการโคจรซ้ำ (revisit period) และขอบเขตของการสแกนของดาวเทียมที่มีขนาดเล็กมาก จึงได้ทำการประมาณค่า XCO₂ โดยคำนึงถึงช่วงฤดูกาล ความลึกของละอองลอยเชิงแสง (AOD) อัลเบโดของพื้นผิวดิน และตัวแปรที่ไม่แน่นอนของดาวเทียมทุกดวง โดยกำหนดรอบเวลาที่ 30 วัน และได้มีการเติมเต็มข้อมูลที่ขาดหายไปด้วยข้อมูลจากแบบจำลอง CarbonTracker และใช้วิธีการประมาณข้อมูลด้วย Maximum Likelihood estimation (MLE) และ Optimal interpolation (OI) ได้ค่า XCO₂ ที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 0.5°×0.5° ทุก ๆ 3 ชั่วโมง ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนสิงหาคม และเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการวัดของสถานีภาคพื้นดินอย่าง TCCON และ WDCGG แสดงถึงความสัมพันธ์ที่ดีของข้อมูลที่ได้จากการประมาณที่ใช้ข้อมูลจากดาวเทียมกับข้อมูลที่วัดได้จากสถานีภาคพื้นดิน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) เท่ากับ 0.96 Root Mean Square Error (RMSE) เท่ากับ 2.62 ppm เมื่อเทียบกับข้อมูลของสถานี TCCON และ R เท่ากับ 0.82 RMSE เท่ากับ 6.78 ppm เมื่อเทียบกับข้อมูลของสถานี WDCGG

(Jiang et al., 2022) ได้ประมาณค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศเหนือมหาสมุทร โดยใช้การแก้ไขข้อมูล Data Interpolation Empirical Orthogonal Function (DINEOF) และวิธี Bayesian Maximum Entropy (BME) ในการประมาณค่าข้อมูล XCO₂ ระดับ 2 ที่ได้จากดาวเทียม Orbiting Carbon Observatory -2 และ (OCO-2 และ OCO-3) ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงธันวาคม ปี 2020 ครอบคลุมพื้นที่ช่วง 15°N - 45°N และ 120°E - 150°E (ขนาด 30°×30°) ในขั้นตอนแรกข้อมูลจะถูกวิเคราะห์โดย DINEOF ตามด้วยขั้นตอนที่สองซึ่งเป็นการประมาณโดย DINEOF และรวมข้อมูลของทั้งสองดาวเทียมเข้าด้วยกันด้วย BME ผลลัพธ์แสดงด้วย Mean Absolute Error (MAE) Root Mean Square Error (RMSE) และ Bias ของการประมาณค่าข้อมูลที่ได้หลังจากการใช้ DINEOF มีค่า MAE เท่ากับ 2.106 ppm RMSE เท่ากับ 3.046 ppm และมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1.035 ppm และเมื่อใช้ DINEOF-BME มีค่า MAE เท่ากับ 1.285 ppm RMSE เท่ากับ 2.422 ppm และความคลาดเคลื่อนเท่ากับ -0.085 ppm เมื่อเทียบกับ XCO₂ ที่วัดจากสถานีภาคพื้นดินโดย TCCON

2.2.2 อิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศกับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ

(Sreenivas et al., 2016) ได้ทำการตรวจวัดก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศ เพื่อทำความเข้าใจวัฏจักรคาร์บอน โดยใช้ LGR-GGA ที่เมือง Shanagar ที่เป็นพื้นที่เขตเมืองของประเทศอินเดีย และระบบอัตโนมัติจากสถานีตรวจอากาศ (AWS) รวมทั้งแบบจำลองและดาวเทียมในปี ค.ศ. 2024 คาร์บอนไดออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลอย่างมีนัยสำคัญ ศึกษาการแปรค่าของคาร์บอนไดออกไซด์กับตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา โดยมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับอุณหภูมิ สำหรับความสัมพันธ์กับความเร็วลม ความเข้มข้นของ CO₂ มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R_s) ในช่วงก่อนมรสุมเท่ากับ 0.56 ช่วงมรสุมเท่ากับ 0.32 ช่วงหลังมรสุมเท่ากับ 0.06 และในช่วงฤดูหนาวเท่ากับ 0.67 และมีความสัมพันธ์กับมีเทนมากที่สุดซึ่งมี R_s เท่ากับ 0.80 ในช่วงก่อนมรสุม 0.80 ในช่วงมรสุม 0.61 ในช่วงหลังมรสุม และ 0.72 ในช่วงฤดูหนาว

(Pathakoti et al., 2018) ได้ทำการวัด CO₂ ในบรรยากาศ ที่สถานีภาคพื้นดินในแอนตาร์กติก ระหว่างการสำรวจที่แอนตาร์กติกครั้งที่ 35 ของอินเดีย วัดด้วยเครื่องมือ Li-Cor CO₂/H₂O ที่ใช้เทคนิค NDIR ร่วมกับเครื่องมือวัดตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา อื่น ๆ ในช่วงฤดูร้อนของออสเตรเลีย (มกราคมถึงกุมภาพันธ์) ปี ค.ศ. 2016 และหาความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่น ๆ ในบรรยากาศเช่น ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณฝน ความเร็วลม อุณหภูมิอากาศ และความสูงของชั้นบรรยากาศ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแสดงให้เห็นว่า ปริมาณฝน และความชื้นสัมพัทธ์ มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของ CO₂ มากที่สุด โดยมีค่าความสัมพันธ์ของข้อมูลเท่ากับ 55% และ 32% ตามลำดับ จากนั้นได้ทำการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณจากความสัมพันธ์ที่มีนัยสำคัญ พบว่าปริมาณฝนเป็นตัวแปรเดียวที่สามารถสร้างสมการได้ โดยมีค่า p เท่ากับ 0.003 ทั้งนี้เมื่อวิเคราะห์การขนส่งของมวลอากาศระยะไกล (HYSPLIT) แสดงให้เห็นว่ามวลอากาศส่วนใหญ่เคลื่อนที่มาจากมหาสมุทร

(Pérez et al., 2018) ได้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยาต่อการประเมินการเพิ่มขึ้นของ CO₂ ในบรรยากาศ โดยทำการวัดและเก็บข้อมูลเป็นเวลา 6 ปี ในพื้นที่กึ่งธรรมชาติทางตอนเหนือของประเทศสเปน โดยทำการตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอุตุนิยมวิทยากับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของ CO₂ ในบรรยากาศรายเดือน พบว่า CO₂ มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิและความสูงของขอบเขตชั้นบรรยากาศ โดย CO₂ มีค่ามากที่สุดที่อุณหภูมิ 297 เคลวิน และที่ความสูง 337 เมตร ซึ่งตัวแปรทั้งสองถูกนำมารวมกันเพื่อคำนวณค่าความเข้มข้นของ CO₂ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ประมาณ 22 ± 9 ppm แม้จำนวนข้อมูลมีจำกัดและอยู่ในช่วงฤดูร้อน ดังนั้นตัวแปรบางตัวทางอุตุนิยมวิทยามีผลกระทบอย่างมากต่อความเข้มข้นของ CO₂ และไม่ควรรละเลยตัวแปรเหล่านี้

(Pérez et al., 2021) ได้วัด CO₂ และ CH₄ รายชั่วโมงเป็นเวลา 9 ปี ในพื้นที่ชนบทโดยแบบจำลอง METEX ที่แบ่งความเร็วลมออกเป็น 1 m/s ถึง 8 m/s และคำนวณความเข้มข้นรายวันและรายปี ความแตกต่างระหว่าง CO₂ ที่วัดได้จากการวัดและแบบจำลองประมาณ 5 – 0.03 ppm พบว่าความเข้มข้นเฉลี่ยจะลดลงตามความเร็วลมที่เพิ่มขึ้นที่สถานีในเขตเมือง Valladolid ประเทศสเปน

(Metya et al., 2021) ได้มีการตรวจวัดความเข้มข้นของ CO₂ ที่สถานี Sinhagad ที่อยู่ทางทิศตะวันตกในคาบสมุทรอินเดียของประเทศอินเดีย โดยภายในช่วงเวลาที่ศึกษามีความเข้มข้นเฉลี่ย 406.05 ± 6.36 ppm และแสดงความแปรปรวนตามฤดูกาล โดย CO₂ มีความเข้มข้นต่ำสุดในช่วงมรสุม และมีความเข้มข้นสูงสุดในช่วงก่อนมรสุม พบว่าพลวัตของก๊าซเรือนกระจกในพื้นที่ตะวันตกของอินเดีย ได้รับอิทธิพลอย่างมากจากการหมุนเวียนของลมมรสุม โดยเฉพาะในฤดูร้อนข้อมูลจาก ESRL-NOAA ภายใต้โครงการ Metflux India25 โดยมีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของ CO₂ ในฤดูกาลต่าง ๆ คือ 403.34 ± 5.71 ppm ในช่วงมรสุม 402.87 ± 6.03 ppm ในช่วงหลังมรสุม 409.72 ± 4.33 ppm ในช่วงฤดูหนาว และ 417.06 ± 5.11 ppm ในช่วงก่อนมรสุม

(Xueref-Remy et al., 2023) ได้ศึกษาบทบาทของลมในระดับภูมิภาค และชั้นบรรยากาศระยะไกล สำหรับลมแรงมากจะมี CO₂ ที่เจือจาง โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ CO₂ ในบรรยากาศที่เมือง Marseille ประเทศฝรั่งเศส ทางตอนเหนือของกลุ่มน้ำเมดิเตอร์เรเนียนตะวันตก ทั้งหมด 4 สถานี สองสถานีแรกอยู่กลางเมืองและชายฝั่ง อีกสองสถานีนี้ตั้งอยู่ทางเหนือและที่สถานีสังเกตการณ์เรือนกระจกในชั้นบรรยากาศแห่งชาติของฝรั่งเศส (ICOS) ข้อมูลตั้งแต่กรกฎาคมถึงกุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2018 โดยสถานีที่ตั้งอยู่ในเมืองมีความเข้มข้นความเข้มข้นมากกว่า 10 ppm ซึ่งห่างจากตัวเมืองไม่กี่กิโลเมตร เนื่องจากได้รับอิทธิพลของลมที่พัดแรงโดยเฉพาะจากภาคตะวันตกเฉียงเหนือ

เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการวัดของดาวเทียม OCO-2 GOSAT-2 และ OCO-3 มีช่องว่างของข้อมูลที่แตกต่างกัน ในผู้วิจัยนี้จึงได้เสนอการเติมช่องว่างของข้อมูลด้วยวิธีการประมาณอย่างง่าย รวมทั้งได้มีการเปรียบเทียบข้อมูลกับสถานีวัดภาคพื้น ทั้งนี้การแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เชิงพื้นผิวโลก เกิดจากวัฏจักรตามช่วงฤดูกาลที่เกิดจากการเคลื่อนที่โดยพลวัตของบรรยากาศประจำปี และขึ้นอยู่กับแหล่งปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาตัวแปรต่าง ๆ ทางอุตุนิยมวิทยา ทิศทางการเคลื่อนที่ของมวลอากาศที่เคลื่อนที่มายังสถานีวัดภาคพื้นตามรายละเอียดในบทต่อไป

บทที่ 3 วิธีการวิจัยและผล

การวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ภาคพื้นผิววิจัยใช้ข้อมูลความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์และตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยาจากสถานีวัด สำหรับประเทศไทยที่สถานีนครปฐม และมีเครื่องมือวัดของ intERLab จำนวน 9 พื้นที่ สำหรับประเทศไต้หวันที่สถานี Lulin และสถานีวัดของ EPA จำนวน 6 สถานี เพื่อศึกษาการแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์บริเวณพื้นผิวโลกและศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยาต่อความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ การประมาณความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศจากข้อมูลดาวเทียมผู้วิจัยใช้ข้อมูลจากดาวเทียม OCO-2 GOSAT-2 และ OCO-3 จากนั้นทำการเปรียบเทียบข้อมูลกับข้อมูลที่วัดได้จากสถานีภาคพื้น รวมทั้งศึกษาทิศทางของมวลอากาศที่เคลื่อนที่มายังสถานีนครปฐมของประเทศไทยและสถานี Lulin ของประเทศไต้หวันจากแบบจำลอง HYSPLIT แบบย้อนกลับ โดยมีอุปกรณ์ ชุดข้อมูล วิธีการดำเนินการวิจัย และผลการวิจัยดังนี้

3.1 การวัดปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศของประเทศไทย และประเทศไต้หวัน

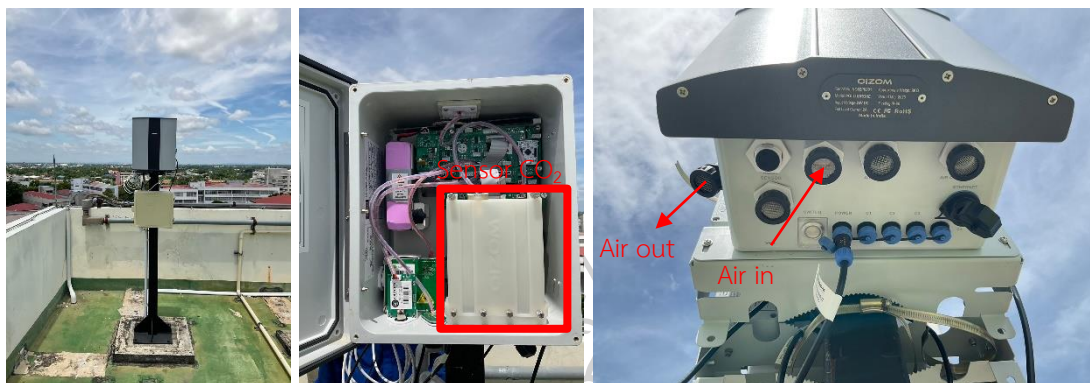
3.1.1 การวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ (CO_2) จากสถานีภาคพื้นของประเทศไทยและประเทศไต้หวัน

3.1.1.1 การวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศจากสถานีภาคพื้นสำหรับประเทศไทย

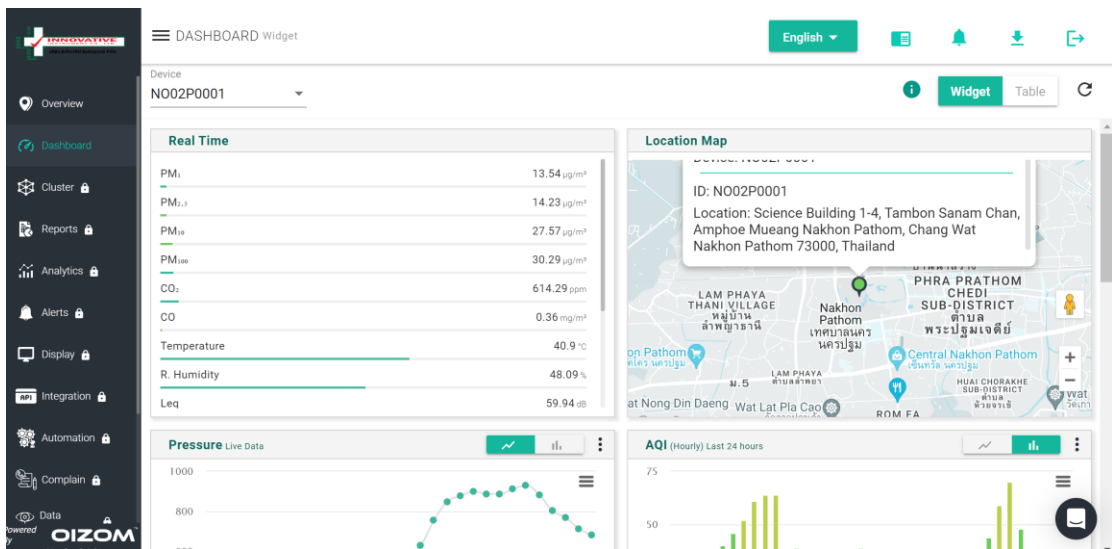
1) สถานีนครปฐมของมหาวิทยาลัยศิลปากร

ห้องปฏิบัติการการวิจัยพลังงานแสงอาทิตย์ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม ได้ทำการติดตั้งเครื่อง OIZOM รุ่น Polludrone หมายเลขเครื่อง N002P0001 ใช้เทคนิคการวัด NDIR โดยมีแหล่งกำเนิดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วง IR แล้วผ่าน filter ที่กรองให้ได้เฉพาะความยาวคลื่น $4.26 \mu\text{m}$ และดูการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านนี้คำนวณออกมาเป็นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งทำการติดตั้งเมื่อ วันที่ 5 เมษายน ค.ศ. 2023 ที่ลานทดลองพลังงานแสงอาทิตย์ของภาควิชาฟิสิกส์ บริเวณตาดฟ้าอาคารวิทยาศาสตร์ 1 ดังแสดงในรูปที่ 42 โดยเครื่องทำการวัดค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ทุก ๆ 2 นาที จากนั้นส่งข้อมูลไปยังระบบของบริษัท ด้วยระบบ cloud ซึ่งใช้สัญญาณอินเทอร์เน็ตจากซิมการ์ด และต่อสายแลนเพื่อเก็บข้อมูลดิบราย 2 นาที หากระบบส่งข้อมูลทางอินเทอร์เน็ตเกิดการขัดข้อง รวมทั้งกรณีไฟฟ้าขัดข้องจะมีแบตเตอรี่สำรองของเครื่องใช้งานได้ 12 ชั่วโมง โดยข้อมูลที่ได้จากการวัดสามารถดาวน์โหลดข้อมูลเป็น ข้อมูล

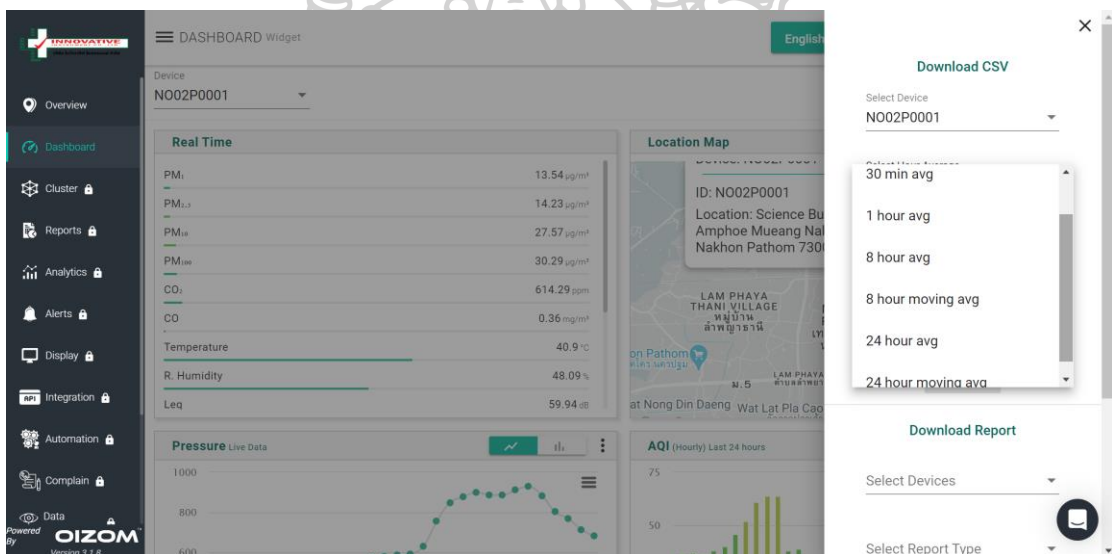
เฉลี่ยราย 15 นาที 30 นาที 1 ชั่วโมง 8 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง ได้ทางเว็บไซต์ <https://terminal.oizom.com/#/u/dashboard/NO02P0001> ดังแสดงในรูปที่ 43 - 44 นอกจากนี้เครื่องมือวัดดังกล่าวมีเซ็นเซอร์อื่น ๆ เช่น เซ็นเซอร์สำหรับวัดฝุ่นขนาดเล็ก PM1 PM2.5 PM10 PM100 เซ็นเซอร์วัดก๊าซเช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ และตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา เช่น อุณหภูมิ ความดันอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ เป็นต้น ซึ่งสามารถดาวน์โหลดข้อมูลได้จากเว็บไซต์เดียวกัน



รูปที่ 42 ตำแหน่งที่ตั้ง เครื่องวัด OIZOM ที่สถานีนครปฐม จุดที่แก๊สเข้าสู่ระบบ และออกจากระบบ ตามลูกศรสีแดง



รูปที่ 43 หน้าต่างเว็บไซต์สำหรับดาวน์โหลดข้อมูล

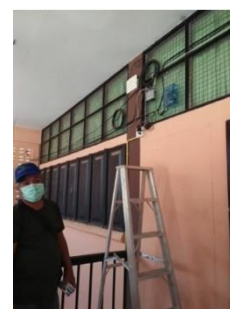
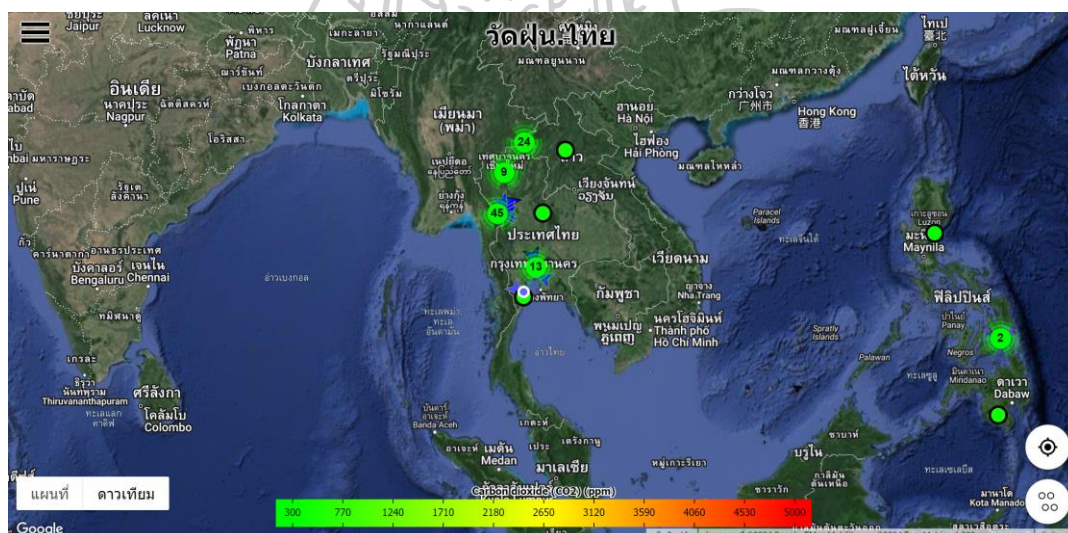


รูปที่ 44 หน้าต่างเว็บไซต์สำหรับดาวน์โหลดข้อมูลรายต่าง ๆ

2) เครื่องมือวัดของ interERLab

Internet Education and Research Laboratory (IntERLab) ของ Asian Institute of Technology ได้ติดตั้งเครื่องวัดและติดตามคาร์บอนไดออกไซด์ภาคพื้นในประเทศไทย ภายใต้โครงการ SEA-HAZEMON@TEIN การตรวจสอบหมอกควันแบบเรียลไทม์และเครือข่ายข้อมูลการตรวจจับไฟฟ้า โครงการนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อใช้เซ็นเซอร์คุณภาพอากาศราคาประหยัดในประเทศ

สมาชิกในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ พร้อมการวิเคราะห์แบบเรียลไทม์เพื่อแจ้งเตือนพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบโดยตรงอย่างทันท่วงที สมาชิกของโครงการจะได้รับการฝึกอบรมเพื่อออกแบบ ติดตั้ง และ บำรุงรักษาเครือข่ายเซ็นเซอร์ Canarin ของตนเองในพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากหมอกควันในประเทศของตน เครือข่ายเซ็นเซอร์คุณภาพอากาศเป็นแอปพลิเคชันที่สำคัญของอินเทอร์เน็ตออฟฟิงส์ (IoT) สำหรับการตรวจสอบสิ่งแวดล้อม ซึ่งไม่เพียงแต่แจ้งเตือนสมาชิกในชุมชนที่ได้รับผลกระทบเท่านั้น แต่ยังตรวจจับการเกิดการเผาไหม้ในที่โล่งอีกด้วย เมื่อใช้ร่วมกับแพลตฟอร์ม SEA-HAZEMON ซึ่งใช้ Information Centric Network (ICN) SEA-HAZEMON@TEIN โดยเครื่องมือใช้เทคนิค NDIR ในการตรวจวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถเข้าถึงข้อมูลได้ผ่านเว็บไซต์ <https://hazemon.in.th/v23.6/map.html> ผู้วิจัยใช้ข้อมูลคาร์บอนไดออกไซด์ที่วัดได้จากเครื่องมือที่ติดตั้งอยู่ในที่ต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 45 และเลือกเฉพาะสถานีที่มีการวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ รวมทั้งมีข้อมูลครบถ้วนตลอดปี ค.ศ. 2023 ดังแสดงในตารางที่ 8



รูปที่ 45 สถานีภายในเครือข่ายของโครงการ SEA-HAZEMON@TEIN เครื่องมือ Canarin และการ ติดตั้งเครื่องมือ (<https://interlab.ait.ac.th/sea-hazemon-tein-project/>) (Basilio et al., 2019)

ตารางที่ 8 รายละเอียดตำแหน่งที่ตั้งของสถานีวัดความเข้มข้นของ CO₂ ทั้ง 10 สถานี สำหรับประเทศไทย

Station	Latitude (°)	Longitude (°)	Province	Location
1. TH_BKK_DinDeang	13.76	100.55	Bangkok	Din Daeng Road, opposite Phibun Prachasan School
2. TH-BKK_Ladkrabang	13.72	100.80	Bangkok	TOYOTA barawindsor, Ladkrabang
3. TH_BKK_Lumphini	14.08	100.61	Bangkok	Opposite Lumphini Park
4. TH_CMI	18.77	98.98	Chiang Mai	P. Oranong Dormitory, near Chiang Mai Airport parking
5. TH_CRI	20.27	99.80	Chiang Rai	Mae Fah Luang Subdistrict Administrative Organization
6. TH_LPN	13.98	100.66	Pathum Thani	Silicon Vanli Learning Center
7. TH_PNB	16.80	100.98	Phetchabun	Thung Saeng Luang Center
8. TH_PYO	19.19	99.80	Phayao	Phayao Province Forest Fire Control Station
9. TH_TAK	16.79	98.59	Tak	Khlong Mae Kuet Luang
10. NP	13.82	100.04	Nakhon Pathom	At the loop top on Science Budding 1, Silpakorn University

3.1.1.2 การวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศจากสถานีภาคพื้นสำหรับประเทศไทย

1) สถานี Lulin

Lulin Atmospheric Background Station (LABs) ตั้งอยู่ที่ความสูง 2,862 เมตรเหนือระดับน้ำทะเลบนยอดเขา Lulin ทางตอนกลางของไต้หวัน ภูเขา Lulin เป็นส่วนหนึ่งของเทือกเขา Central Mountain Range อยู่ในอุทยานแห่งชาติ Yushan เนื่องจาก LABs อยู่ในระดับความสูงที่สูง การตรวจวัดจึงไม่ได้รับผลกระทบจากมลพิษในท้องถิ่นจากโรงงาน การจราจร และแหล่งที่มา

ภายในประเทศอื่น ๆ แต่อยู่ในตำแหน่งที่มีกลยุทธ์ในการตรวจสอบมลพิษทางอากาศที่ขนส่งในระยะยาวจากทวีปเอเชีย

วัตถุประสงค์หลักของ LABS คือการตรวจสอบแนวโน้มในระยะยาวและความแปรผันของมลพิษทางอากาศในภูมิภาคที่เข้าสู่แปซิฟิกเหนือตะวันตก และเพื่อศึกษาผลกระทบในท้องถิ่นต่อไต้หวันและผลกระทบในระดับภูมิภาคต่อคุณภาพอากาศ เคมีในบรรยากาศ รังสี และสภาพภูมิอากาศ วัตถุประสงค์นี้บรรลุได้ด้วยชุดการตรวจวัดอย่างต่อเนื่องที่ LABS ซึ่งรวมถึงการตกตะกอน การแผ่รังสี แสงอาทิตย์ ความเข้มข้นของละอองลอย และคุณสมบัติทางแสง และความเข้มข้นของก๊าซติดตามและปรอทในชั้นบรรยากาศ

งานทางวิทยาศาสตร์ที่ LABS สนับสนุนความร่วมมือแบบสหวิทยาการระหว่างนักวิทยาศาสตร์ในชั้นบรรยากาศ นักเคมี และนักวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมเพื่อทำการตรวจวัดที่สำคัญใช้เทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลแบบใหม่ และสร้างฐานข้อมูลระยะยาว จนถึงขณะนี้ ในขณะที่เป็นเจ้าภาพการทดลองระดับนานาชาติหลายครั้ง (เช่น Seven-South East Asian Studies, 7-SEAS) ผู้ทำงานร่วมกันที่ LABS ได้รวมสำนักงานคุ้มครองสิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา (EPA) การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ (NASA) การบริหารมหาสมุทรและบรรยากาศแห่งชาติ (NOAA) และกลุ่มวิจัยภูเขาไฟฟูจิของญี่ปุ่น



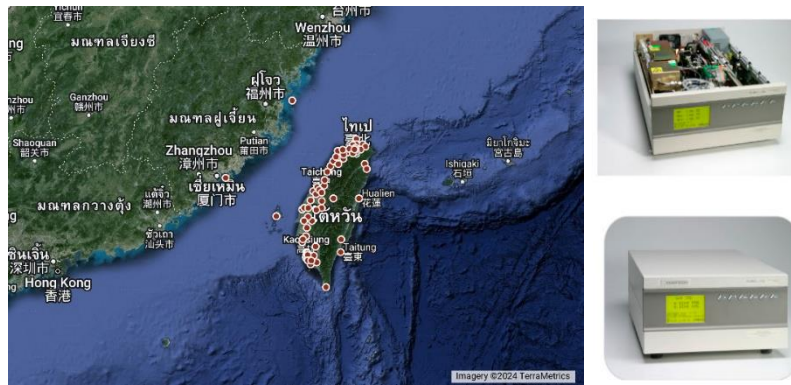
รูปที่ 46 ที่ตั้ง Lulin Atmospheric Background Station ของประเทศไต้หวัน และเครื่อง Picarro CO₂/CH₄ ที่ใช้ในการวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (<http://lulin.tw/about>)

เครื่อง Picarro CO₂/CH₄ เป็นเครื่องติดตามก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบเรียลไทม์สามารถตรวจวัดก๊าซด้วยความไวต่อส่วนต่อพันล้านส่วน (ppbv) เครื่องวิเคราะห์ที่ใช้ Wavelength-Scanned Cavity Ring Down Spectroscopy (WS-CRDS) ซึ่งเป็นการวัดโดยใช้ช่วงอินฟราเรดใกล้เพื่อวัด

ลักษณะทางสเปกตรัมของโมเลกุล ก๊าซถูกหมุนเวียนในช่องตรวจวัดด้วยแสงซึ่งมีเส้นทางที่มีประสิทธิภาพสูงถึง 20 กิโลเมตร เครื่องตรวจวัดความยาวคลื่นที่มีความแม่นยำสูงได้รับการจัดสิทธิบัตรช่วยให้มั่นใจได้ว่า เฉพาะคุณลักษณะทางสเปกตรัมของก๊าซที่สนใจเท่านั้นที่ได้รับการตรวจสอบ ซึ่งช่วยลดความไวของเครื่องวิเคราะห์ต่อการรบกวนชนิดของก๊าซได้อย่างมาก และช่วยให้สามารถตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซแบบ Ultra-Trace แม้ว่าจะมีก๊าซอื่นๆ อยู่ก็ตาม ด้วยเหตุนี้ เครื่องวิเคราะห์จึงรักษาความเป็นเชิงเส้น ความแม่นยำ และความแม่นยำในระดับสูงเหนือสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง (<https://airbornescience.nasa.gov/instrument/Picarro>)

2. สถานี EPA

สถานี EPA Air Quality Station ภายใต้ความร่วมมือกับสำนักงานคุ้มครองสิ่งแวดล้อมไต้หวัน Collaboration with Environmental Protection Administration Taiwan (EPAT) ของประเทศไต้หวัน เป็นเครือข่ายตรวจสอบคุณภาพอากาศของไต้หวัน ไต้หวันเป็นผู้นำด้านสิ่งแวดล้อมในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก EPA จัดทำข้อตกลงกับสถาบันอเมริกันในไต้หวัน (AIT) ในปี ค.ศ. 1993 และทำงานร่วมกับสำนักงานคุ้มครองสิ่งแวดล้อมไต้หวัน (EPAT) เพื่อดำเนินการตามข้อตกลง ความร่วมมืออย่างใกล้ชิดของ EPA กับ EPAT ได้พัฒนาเป็นแพลตฟอร์มที่แข็งแกร่งสำหรับการแบ่งปันประสบการณ์และความเชี่ยวชาญระหว่างกัน ตลอดจนช่วยเหลือหน่วยงานด้านสิ่งแวดล้อมและพันธมิตรในภูมิภาคเอเชียแปซิฟิก ละตินอเมริกา และแอฟริกา ด้วยความร่วมมือนี้ หน่วยงานด้านสิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกาและไต้หวันได้ทำงานเพื่อจัดการสิ่งแวดล้อมและลดมลพิษผ่านโครงการวิจัย และการแลกเปลี่ยนความรู้ ในปี ค.ศ. 2014 EPA และ EPAT ได้เปิดตัวความร่วมมือด้านสิ่งแวดล้อมระหว่างประเทศ (IEP) อย่างเป็นทางการ ซึ่งเป็นเครือข่ายผู้เชี่ยวชาญจากทั่วโลกที่ทำงานร่วมกันเพื่อเสริมสร้างขีดความสามารถในการจัดการกับความท้าทายด้านสิ่งแวดล้อม ในปี ค.ศ. 2020 IEP ได้ขยายความร่วมมือกับกระทรวงสาธารณสุขและสวัสดิการ (MOHW) กระทรวงศึกษาธิการ (MOE) กระทรวงเศรษฐกิจ (MOEA) และสภากิจการมหาสมุทร (OAC) จนถึงปัจจุบัน และมีสถานีตั้งอยู่ทั่วประเทศ ทั้งหมด 78 สถานี โดยเครื่องมือที่ใช้ในการวัดความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์คือ ECOTECH ML9820 CO₂ ที่ใช้เทคนิค NDIR ในการวัด ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลการวัดของสถานีทั้งหมด 6 สถานีซึ่งมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 9 และที่ตั้งของสถานีทั้ง 6 รวมทั้งสถานี Lulin แสดงดังรูปที่ 48



รูปที่ 47 สถานี Air Quality Station ของประเทศไต้หวัน และเครื่องมือ
 (<https://pdf.directindustry.com/pdf/ecotech/ec9820-carbon-dioxide-analyzer/50178-143958.html>)



รูปที่ 48 สถานีวัดคาร์บอนไดออกไซด์ภาคพื้นของประเทศไทยทั้ง 7 สถานี

ตารางที่ 9 รายละเอียดตำแหน่งที่ตั้งของสถานีวัดความเข้มข้นของ CO₂ ทั้ง 7 สถานี ของประเทศ
ไต้หวัน

Site Name	Area Name	County	Site Address	Latitudes(°)	Longitudes (°)	Latitudes (m)	Site Type
Yangming	Northern empty product area	Taipei City	No. 111, Zhuzihu Road, Beitou District, Taipei City	25.18	121.53	805.50	Park measuring station
Songshan	Northern empty product area	Taipei City	No. 746, Section 4, Bade Road, Songshan District, Taipei City	25.05	121.58	5.72	General measuring station
Yilan	Yilan Kongpin District	Yilan County	No. 77, Section 2, Fuxing Road, Yilan City, Yilan County	24.75	121.75	3.52	General measuring station
Dali	Central empty product area	Taichung City	No. 36, Daxin Street, Dali District, Taichung City	24.1	120.68	44.00	General measuring station
Shanhua	Yunjia South Kongpin District	Tainan City	No. 60, Yiminliao, Shanhua District, Tainan City	23.12	120.3	9.41	General measuring station
Hengchun	High-screen empty product area	Pingtung County	No. 44, Gongyuan Road, Hengchun Town, Pingtung County	21.96	120.79	29.05	General measuring station
Lulin	Lulin Atmospheric Background station (LABs)	-	-	23.47	120.87	2,862	-

3.1.2 การวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ (XCO_2) จากดาวเทียม

ผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลรายวันของดาวเทียม GOSAT-2 OCO-2 และ OCO-3 ซึ่งมีรายละเอียดของข้อมูลดาวเทียมที่นำมาใช้ศึกษาดังต่อไปนี้

1) ข้อมูลคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศรายวันจากดาวเทียม Greenhouse gases Observing Satellite-2 จากชุดผลิตภัณฑ์ข้อมูล GOSAT-2 TANSO-FTS-2 SWIR L2 Column-averaged Dry-air Mole Fraction Product ใน Level 2 ตั้งแต่เดือนมีนาคม ค.ศ. 2019 ถึงเดือนกันยายน ค.ศ. 2023 จากเว็บไซต์ <https://prdct.gosat-2.nies.go.jp/app/searchproduct/display> ขอบเขตพื้นที่การเลือกข้อมูล -180°W ถึง 180°E และ -90°S ถึง 90°N

2) ข้อมูลคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศรายวันจากดาวเทียม Orbiting Carbon Observatory-2 จากชุดผลิตภัณฑ์ข้อมูล OCO-2 Level 2 bias-corrected XCO_2 and other select fields from the full-physics retrieval aggregated as daily files, Retrospective processing V11.1r (OCO2_L2_Lite_FP) ใน Level 2 ตั้งแต่เดือนมีนาคม ค.ศ. 2019 ถึงเดือนกันยายน ค.ศ. 2023 จากเว็บไซต์ https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/OCO2_L2_Lite_FP_11.1r/summary?keywords=oco-2 ขอบเขตพื้นที่การเลือกข้อมูล -180°W ถึง 180°E และ -90°S ถึง 90°N

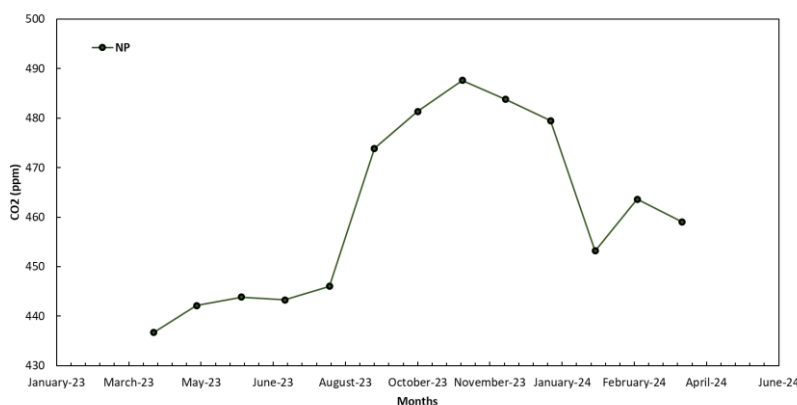
3) ข้อมูลคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศรายวันจากดาวเทียม Orbiting Carbon Observatory-3 จากชุดผลิตภัณฑ์ข้อมูล OCO-3 Level 2 bias-corrected XCO_2 and other select fields from the full-physics retrieval aggregated as daily files, Retrospective processing v10.4r (OCO3_L2_Lite_FP) ใน Level 2 ตั้งแต่เดือนมกราคม ค.ศ. 2020 ถึงเดือนตุลาคม ค.ศ. 2023 จากเว็บไซต์ https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/OCO3_L2_Lite_FP_10.4r/summary?keywords=oco-3 ขอบเขตพื้นที่การเลือกข้อมูล -180°W ถึง 180°E และ -90°S ถึง 90°N

3.2 การแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ (CO_2) จากสถานีภาคพื้นของประเทศไทย และประเทศไต้หวัน

ผู้วิจัยได้ทำการแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์จากสถานีภาคพื้นเฉลี่ยรายเดือนในแต่ละสถานี โดยใช้ข้อมูลความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์รายชั่วโมงที่วัดได้ของทุกสถานี มาเฉลี่ยเป็นค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์รายวัน จากนั้นนำค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์รายวันมาเฉลี่ยเป็นค่าเฉลี่ยความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์รายเดือน

1) การแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์รายเดือนจากสถานีนครปฐม

การแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนตั้งแต่ เดือนเมษายน ปี ค.ศ. 2023 ถึง เดือนเมษายน ปี ค.ศ. 2024 ดังแสดงในรูปที่ 49 พบว่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนเพิ่มขึ้นตั้งแต่เดือนเมษายนจนสูงสุดในเดือนพฤศจิกายน จากนั้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนลดลงจนถึงเดือนกุมภาพันธ์แล้วเพิ่มขึ้นในเดือนมีนาคม และลดลงอีกครั้งในเดือนเมษายน จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนมีค่าต่ำในช่วงฤดูฝนที่เป็นช่วงที่พืชเติบโตและใช้คาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเพิ่มขึ้นและในช่วงฤดูแล้งความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนเพิ่มขึ้น ซึ่งรูปแบบการแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนที่สถานีนครปฐมยังคงไม่สามารถสรุปอย่างชัดเจนได้

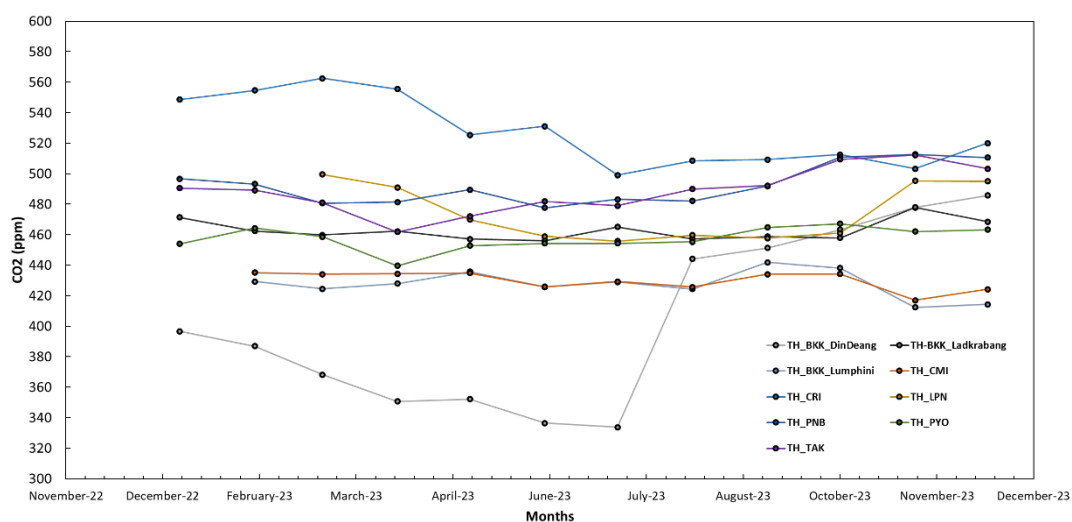


รูปที่ 49 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์รายเดือนของสถานีนครปฐม ประเทศไทย ตั้งแต่เดือนเมษายน ปี ค.ศ. 2023 ถึงเดือนเมษายน ปี ค.ศ. 2024

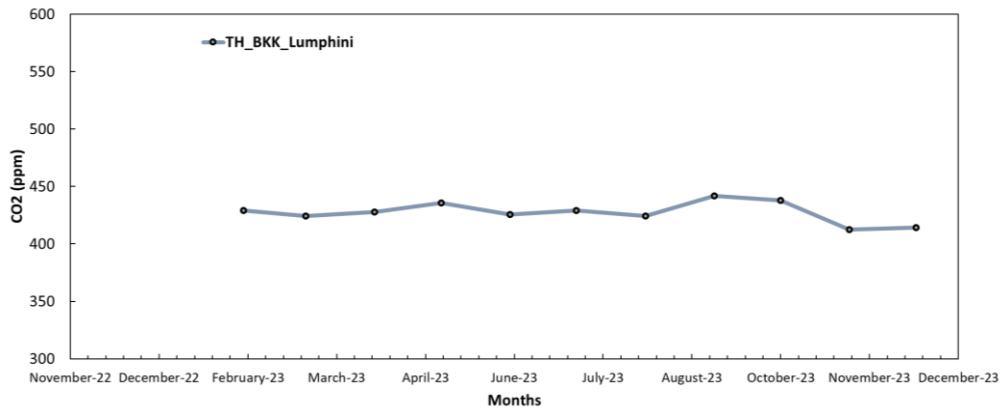
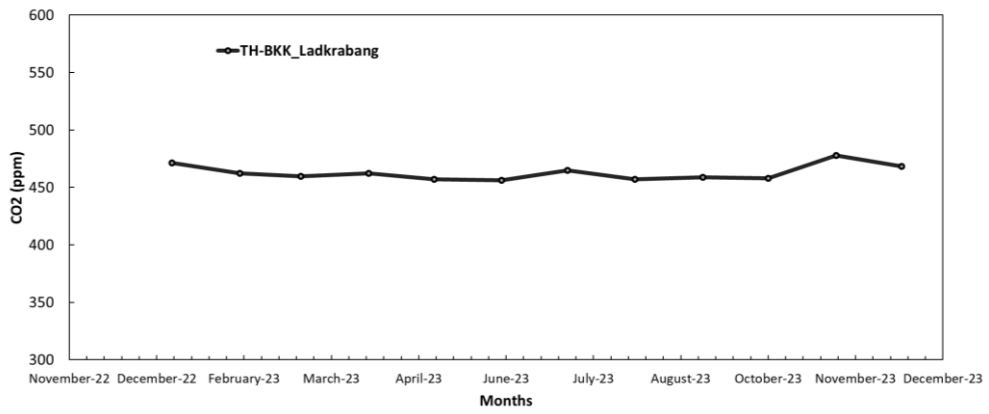
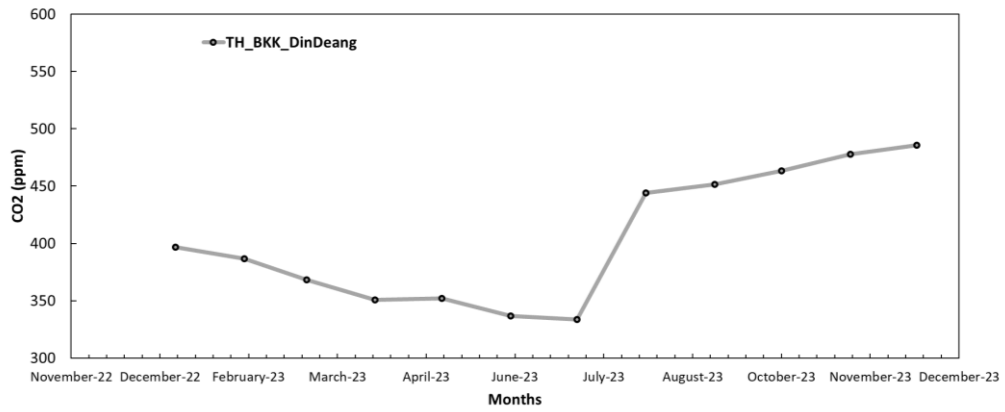
2) การแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์รายเดือนจากสถานี interERLab

การแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนตั้งแต่ เดือนมกราคม ปี ค.ศ. 2023 ถึง เดือนธันวาคม ปี ค.ศ. 2023 สำหรับสถานีดินแดง ลาดกระบัง เชียงราย ปทุมธานี พะเยา และตาก ตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2023 ถึงเดือนธันวาคม ปี ค.ศ. 2023 สำหรับสถานีลุมพินี และเชียงใหม่ และตั้งแต่เดือนมีนาคม ปี ค.ศ. 2023 ถึงเดือนธันวาคม ปี ค.ศ. 2023 สำหรับสถานีปทุมธานี ดังแสดงในรูปที่ 50 พบว่ารูปแบบการแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ของแต่ละตำแหน่งที่ตั้งของเครื่องมือที่แตกต่างกัน ซึ่งมีรูปแบบการแปรค่าดังนี้ ที่สถานีดินแดง ลาดกระบัง ลุมพินี เชียงใหม่ ปทุมธานี เพชรบูรณ์ พะเยา และตากมีรูปแบบการแปรค่าความเข้มข้นของ

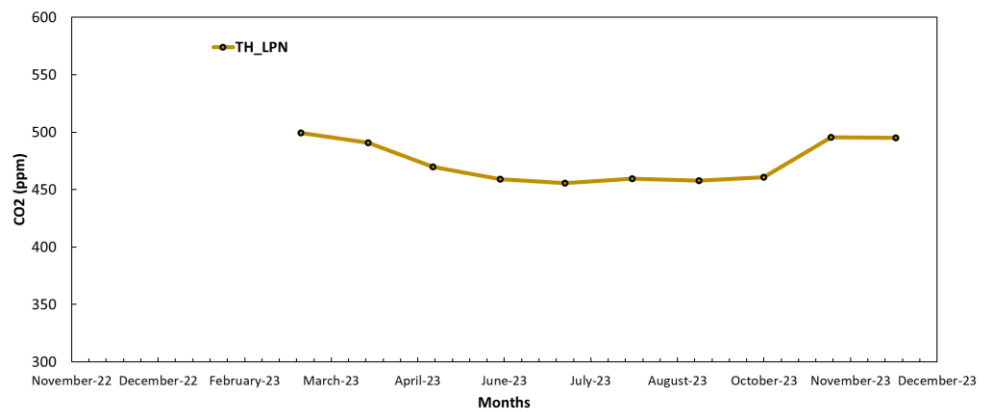
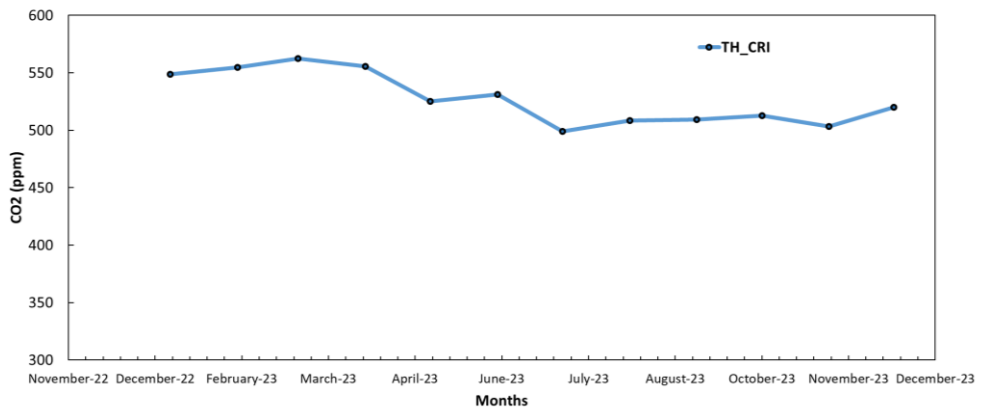
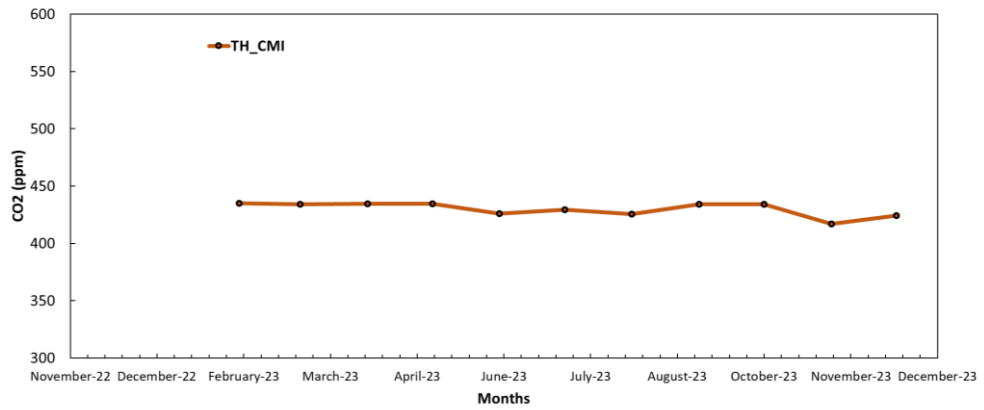
คาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนที่คล้ายคลึงกันคือมีค่าน้อยในช่วงฤดูฝน (กลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม) และมีค่ามากในช่วงฤดูแล้ง (กลางเดือนตุลาคมถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์) แต่ที่สถานีเชียงรามีค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนสูงสุดในเดือนมีนาคม ซึ่งอยู่ในช่วงฤดูร้อน คาดว่าจำนวนของต้นไม้ที่ลดลงจากไฟป่าหรือจากการกระทำของมนุษย์ส่งผลให้อัตราการใช้คาร์บอนไดออกไซด์ของพืชลดลงส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนเพิ่มขึ้น อีกทั้งเชียงรามีค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนสูงที่สุด จากการแปรค่าของแต่ละพื้นที่อาจกล่าวได้ว่า ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนจะมีค่าสูงสุดในช่วงฤดูแล้ง



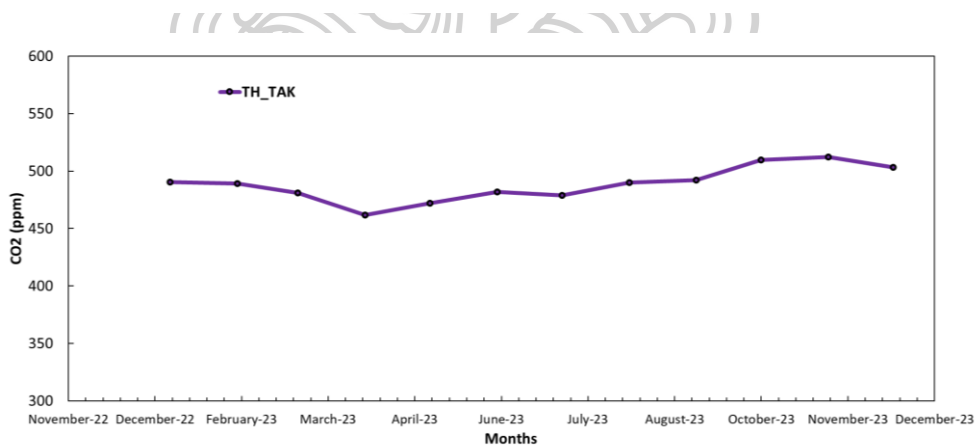
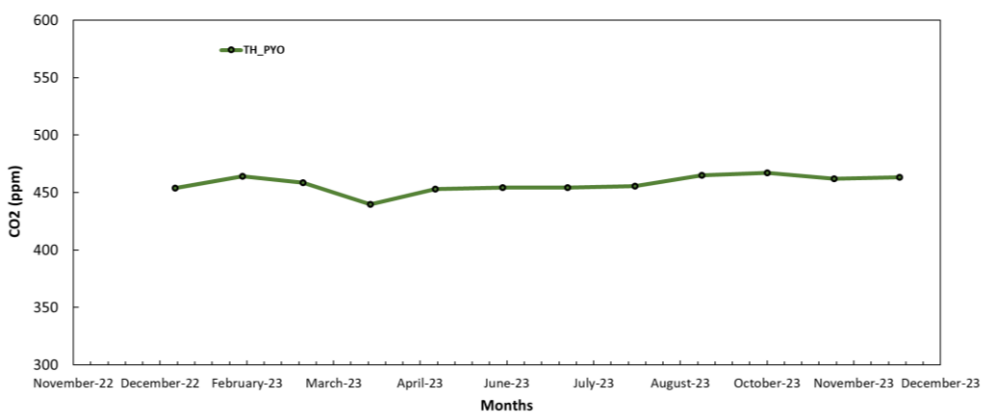
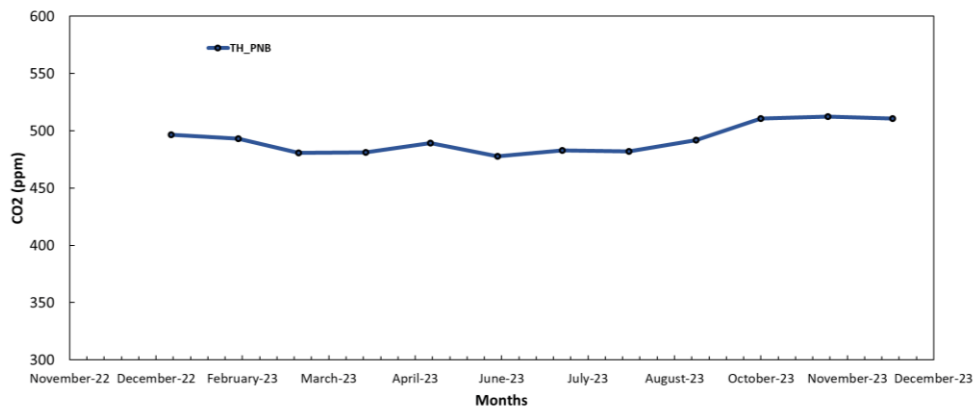
รูปที่ 50 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์รายเดือนของสถานี intERLab ทั้ง 9 แห่ง ประเทศไทย ตั้งแต่เดือนมกราคม ปี ค.ศ. 2023 ถึงเดือนธันวาคม ปี ค.ศ. 2023 สำหรับสถานีดินแดง ลาดกระบัง เชียงราย เพชรบูรณ์ พะเยา และตาก ตั้งแต่เดือนกุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2023 ถึงเดือนธันวาคม ปี ค.ศ. 2023 สำหรับสถานีลุมพินี และเชียงใหม่ และตั้งแต่เดือนมีนาคม ปี ค.ศ. 2023 ถึงเดือนธันวาคม ปี ค.ศ. 2023 สำหรับสถานีปทุมธานี



รูปที่ 50 (ต่อ)



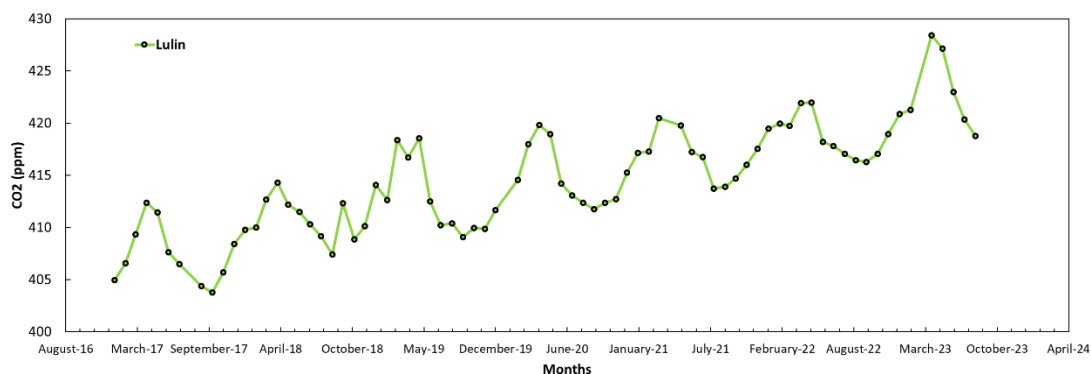
รูปที่ 50 (ต่อ)



รูปที่ 50 (ต่อ)

3) การแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์รายเดือนจากสถานี Lulin

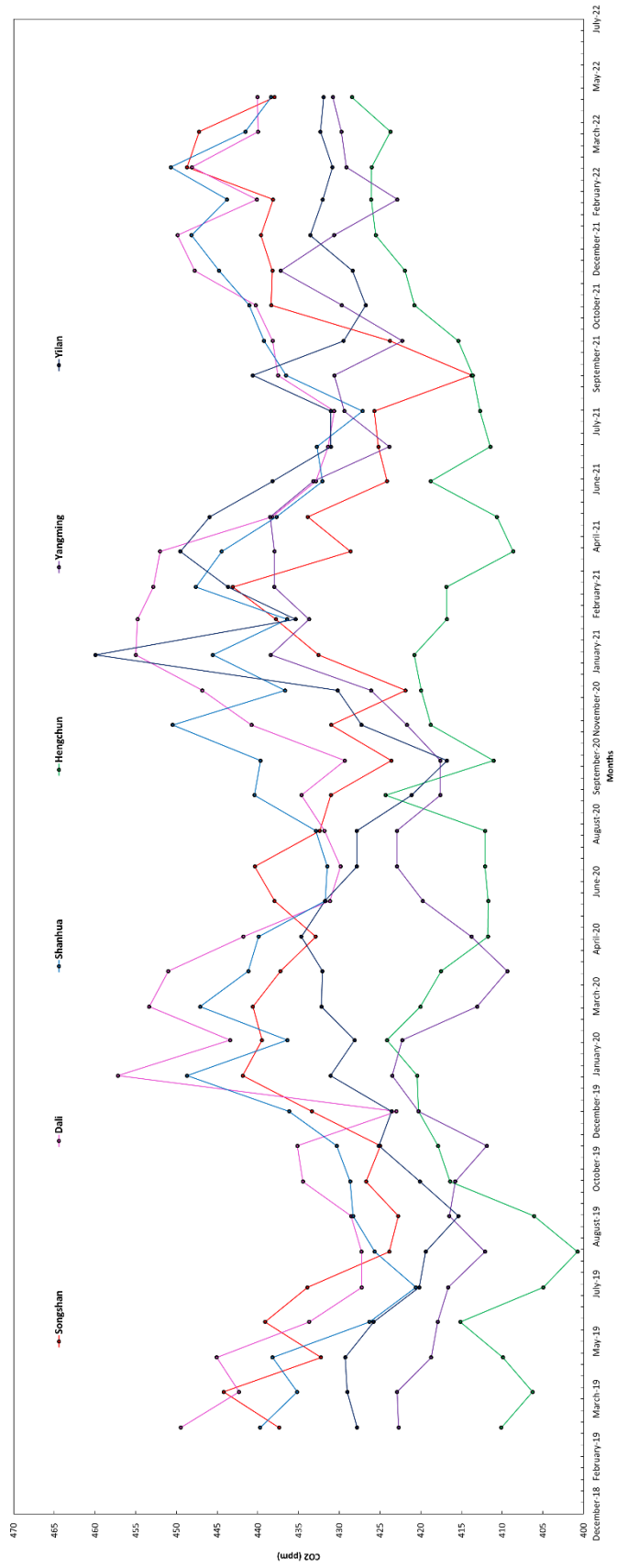
การแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนตั้งแต่ เดือนมกราคม ปี ค.ศ. 2017 ถึงเดือนสิงหาคม ปี ค.ศ. 2023 พบว่าการแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนมีรูปแบบการแปรค่าตามช่วงของฤดูกาลดังนี้ ในช่วงฤดูหนาว (ธันวาคม มกราคม กุมภาพันธ์) ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงในช่วงฤดูใบไม้ผลิ (มีนาคม เมษายน พฤษภาคม) จากนั้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนลดลงในช่วงฤดูร้อน (มิถุนายน กรกฎาคม สิงหาคม) และลดลงต่ำสุดในช่วงฤดูใบไม้ร่วง (กันยายน ตุลาคม พฤศจิกายน) ดังแสดงในรูปที่ 51



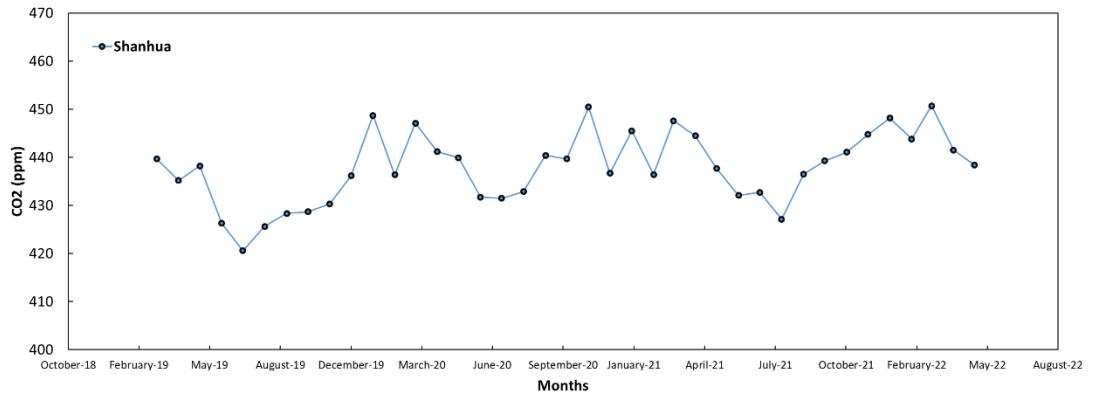
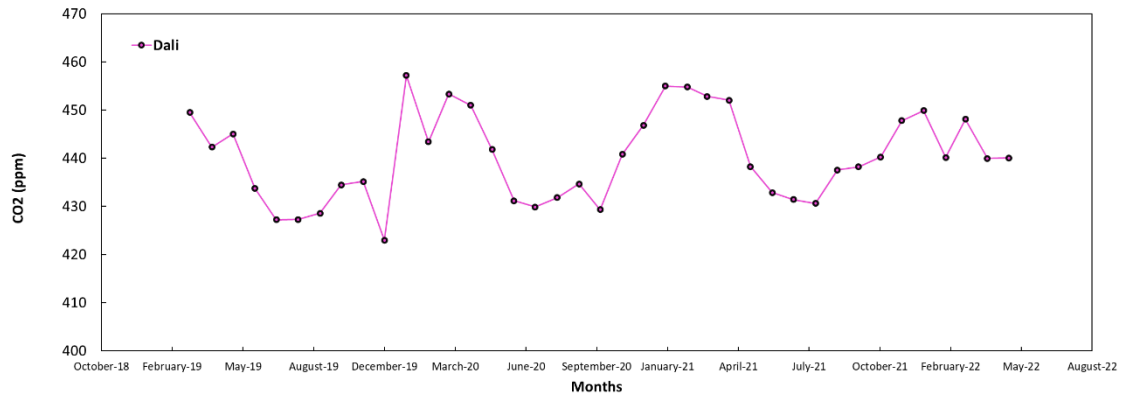
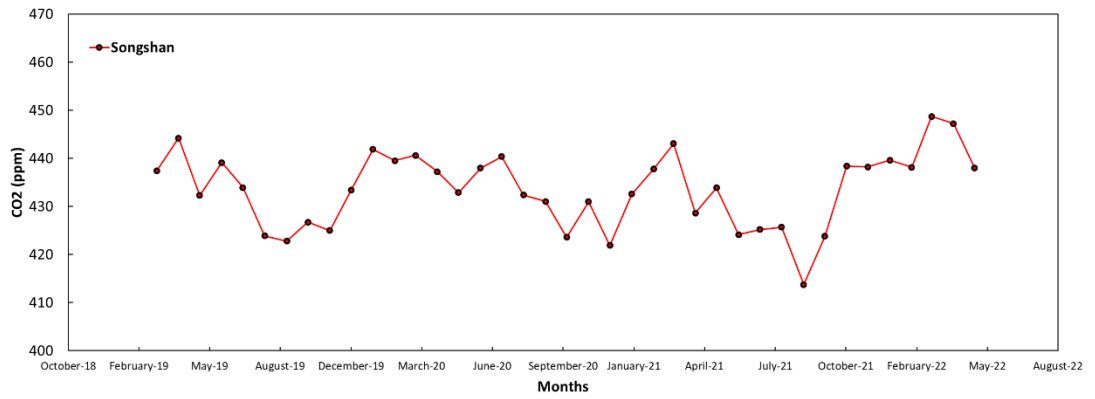
รูปที่ 51 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์รายเดือนของสถานี Lulin ประเทศไต้หวัน ตั้งแต่เดือนมกราคม ปี ค.ศ. 2017 ถึงเดือนสิงหาคม ปี ค.ศ. 2023

4) การแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์รายเดือนจากสถานี EPA

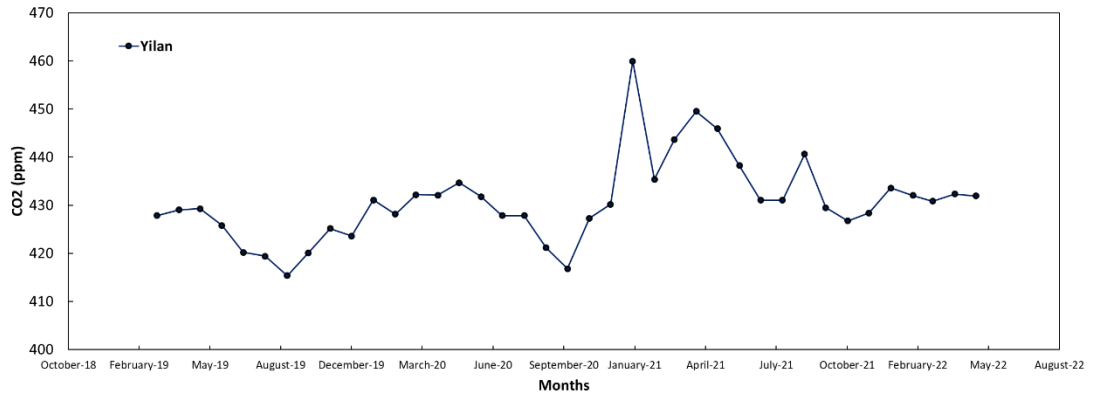
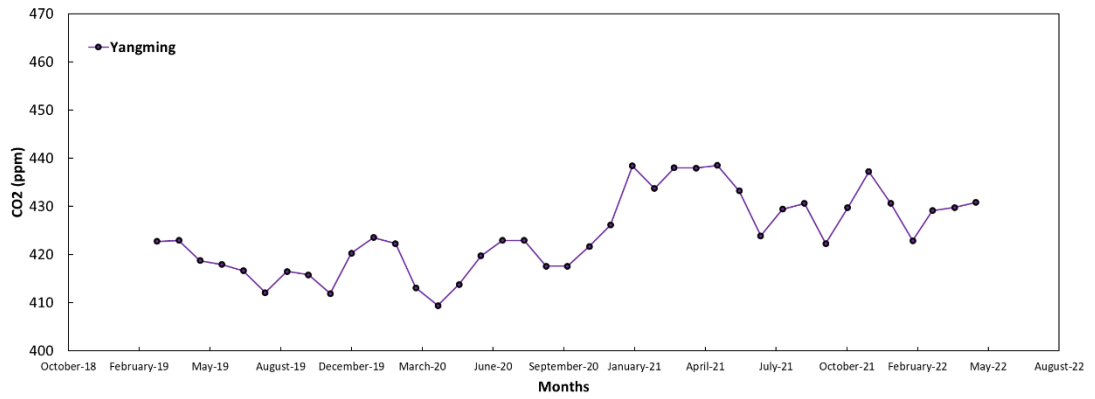
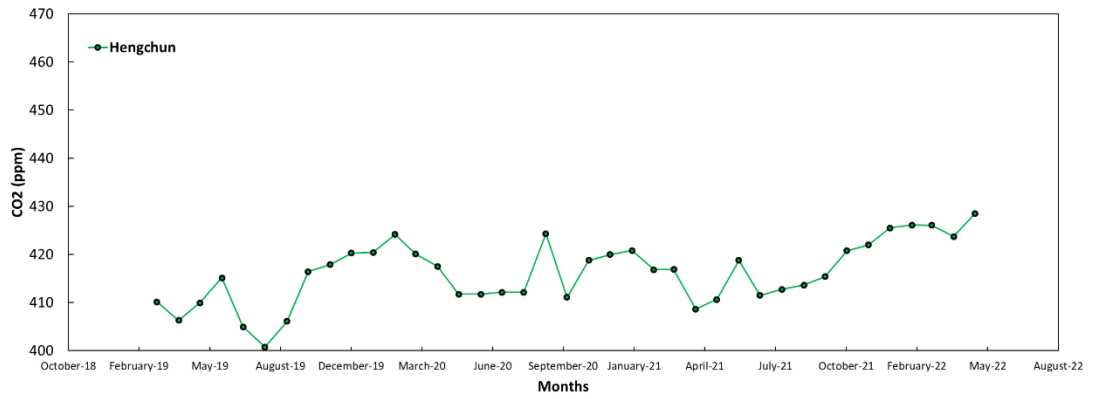
การแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนตั้งแต่ เดือนมีนาคม ปี ค.ศ. 2019 ถึงเดือนพฤษภาคม ปี ค.ศ. 2022 ของสถานี Songshan Dali ShanHua Hengchun Yangming และ Yilan ดังแสดงในรูปที่ 52 พบว่าทุกสถานีมีแนวโน้มที่ค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนมีค่าเพิ่มขึ้น และรูปแบบการแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนแปรผันตามช่วงฤดูกาลแต่ไม่แสดงรูปแบบการแปรค่าได้อย่างชัดเจน โดยสถานีที่มีค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนสูงที่สุดคือ สถานี Dali และสถานีที่มีค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนต่ำสุดคือ สถานี Hengchun



รูปที่ 52 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์รายเดือนของสถานี EPA ทั้ง 6 สถานี ประเทศไต้หวัน ตั้งแต่เดือนมีนาคม ปี ค.ศ. 2019 ถึงเดือนพฤษภาคม ปี ค.ศ. 2022



รูปที่ 52 (ต่อ)



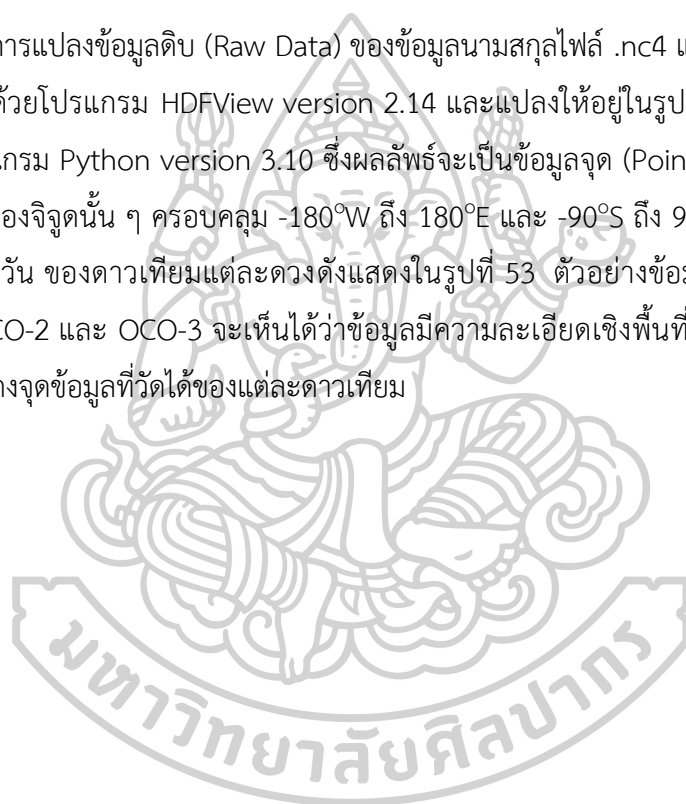
รูปที่ 52 (ต่อ)

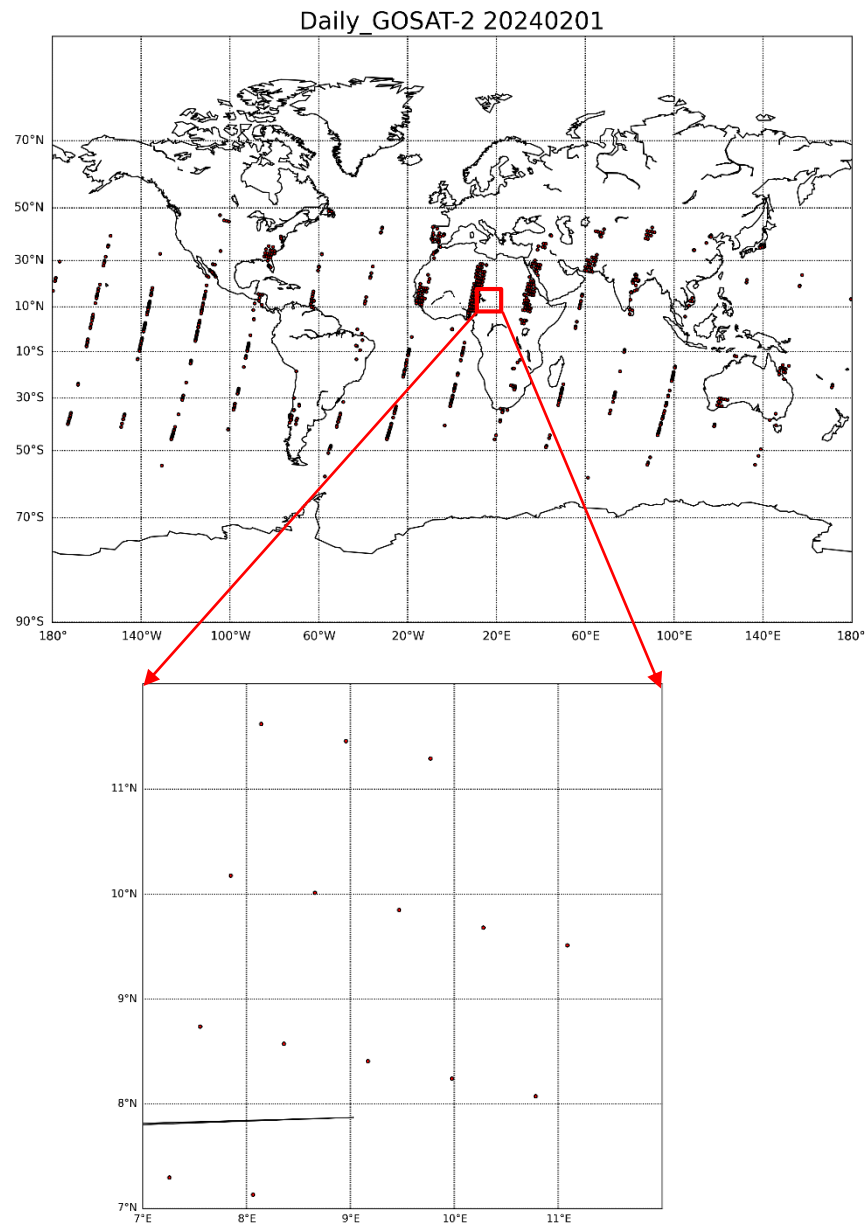
3.3 การทำแผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศจากข้อมูลดาวเทียม และการแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ (XCO_2) ที่ได้จากข้อมูลดาวเทียม

3.3.1 ขั้นตอนการทำแผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนของประเทศไทยและประเทศไต้หวัน

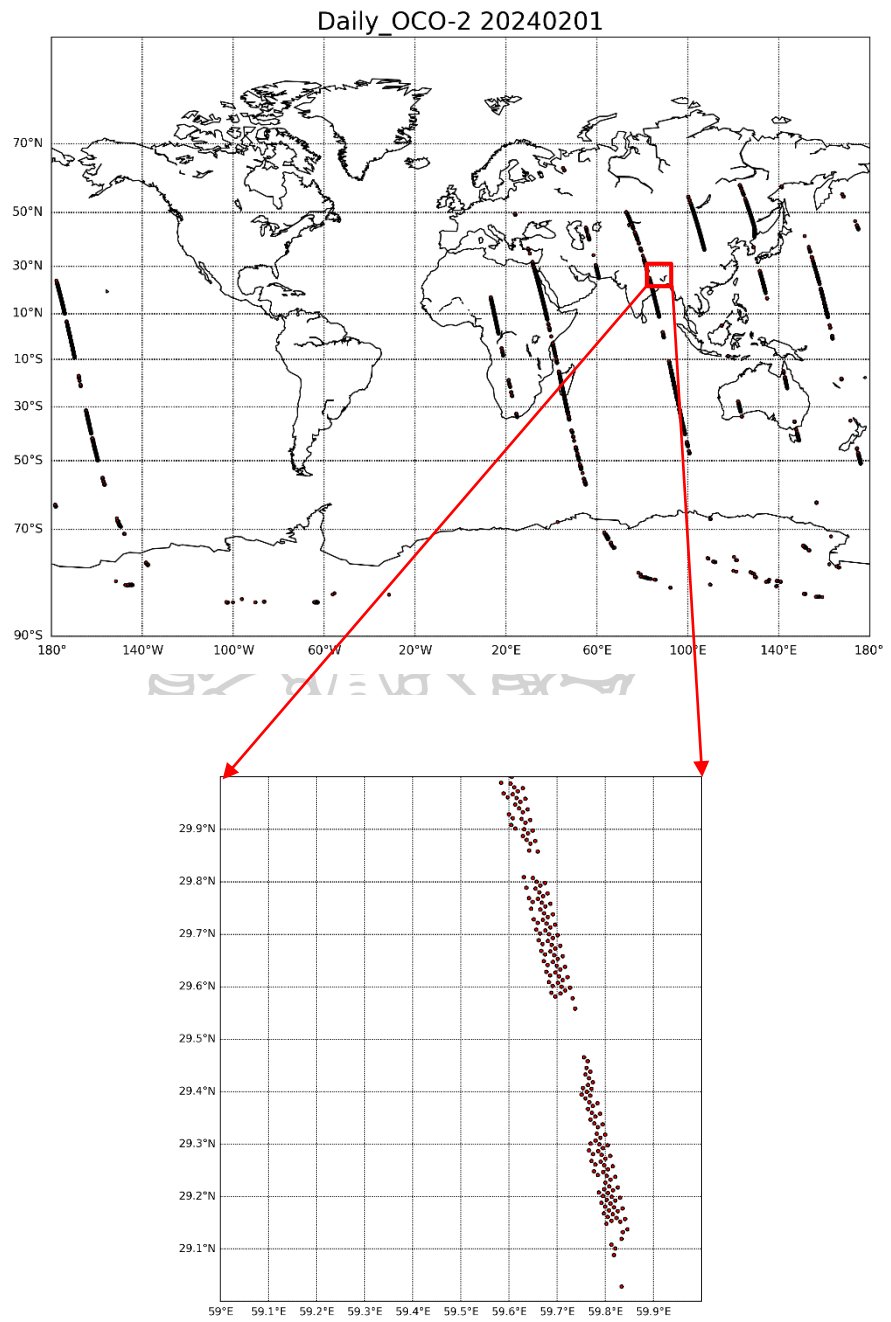
1. ข้อมูลดาวเทียมที่ใช้เป็นข้อมูลรายวันดังแสดงรายละเอียดของข้อมูลในหัวข้อที่ 3.1.2
2. การแปลงข้อมูลคาร์บอนไดออกไซด์จากดาวเทียมรายวันเป็นค่าคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือน

2.1 การแปลงข้อมูลดิบ (Raw Data) ของข้อมูลนามสกุลไฟล์ .nc4 และ .hr5 ซึ่งสามารถเปิดอ่านข้อมูลได้ด้วยโปรแกรม HDFView version 2.14 และแปลงให้อยู่ในรูปแบบของข้อมูลนามสกุลไฟล์ .txt ด้วยโปรแกรม Python version 3.10 ซึ่งผลลัพธ์จะเป็นข้อมูลจุด (Point) คาร์บอนไดออกไซด์ที่ละติจูด และลองจิจูดนั้น ๆ ครอบคลุม $-180^{\circ}W$ ถึง $180^{\circ}E$ และ $-90^{\circ}S$ ถึง $90^{\circ}N$ ของแต่ละชุดข้อมูลดาวเทียมรายวัน ของดาวเทียมแต่ละดวงดังแสดงในรูปที่ 53 ตัวอย่างข้อมูลรายวันของดาวเทียม GOSAT-2 OCO-2 และ OCO-3 จะเห็นได้ว่าข้อมูลมีความละเอียดเชิงพื้นที่และเวลาที่แตกต่างกัน ภาพขยายแสดงจุดข้อมูลที่วัดได้ของแต่ละดาวเทียม

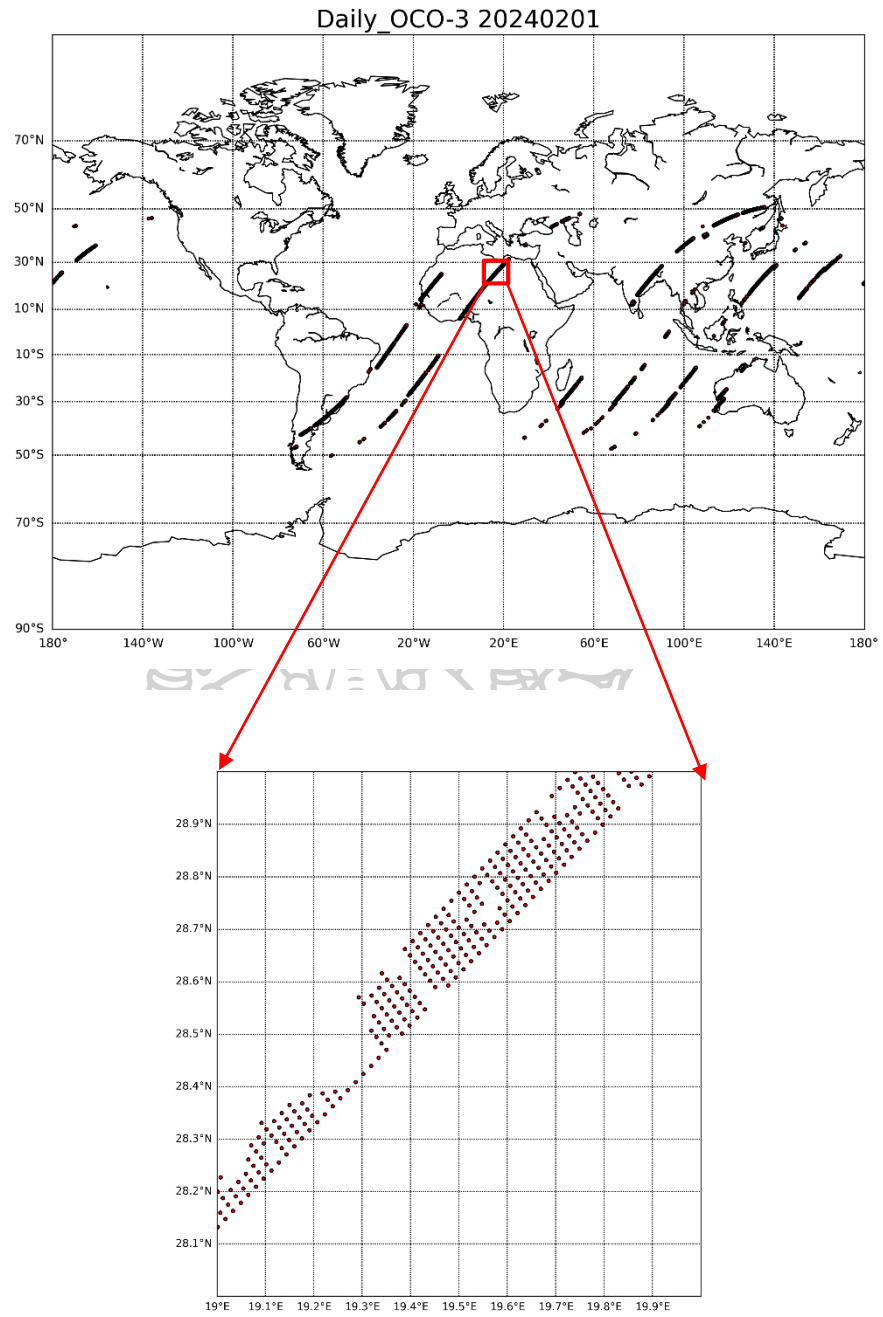




รูปที่ 53 ตัวอย่างข้อมูลลักษณะของจุดข้อมูลที่ได้จากข้อมูลดาวเทียมรายวัน Level 2 ของดาวเทียม GOSAT-2 ดาวเทียม OCO-2 และ ดาวเทียม OCO-3 ในวันที่ 1 เดือนกุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2024

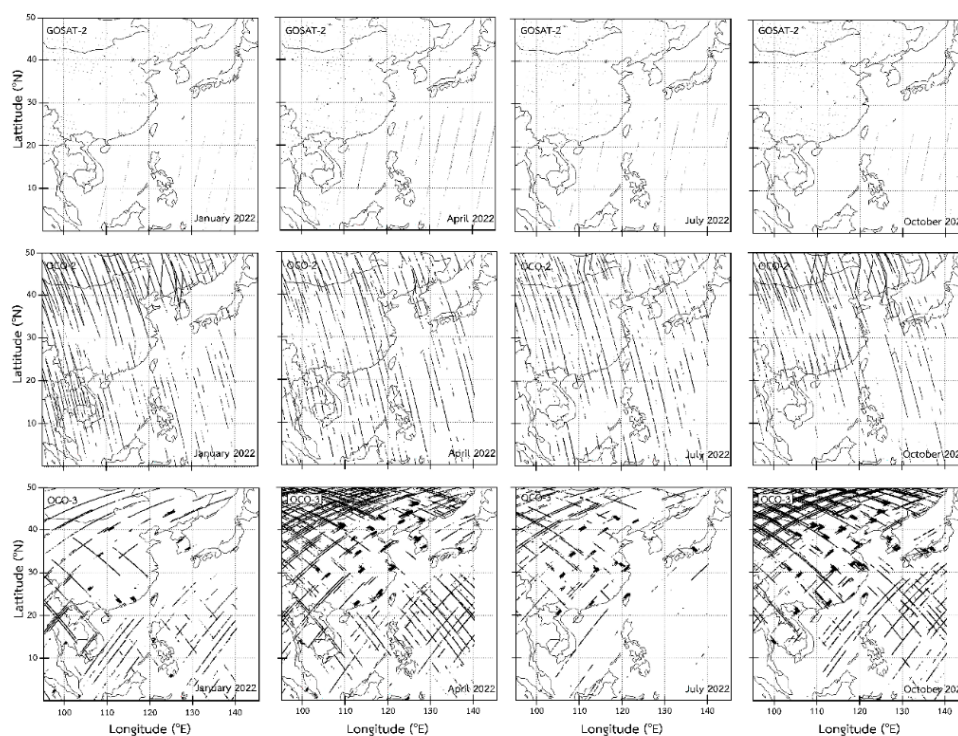


รูปที่ 53 (ต่อ)



รูปที่ 53 (ต่อ)

2.2 การหาค่าเฉลี่ยรายเดือนโดยการเฉลี่ยค่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละติจูด และลองจิจูด นั้น ๆ ที่มีค่าคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า 0 ppm ของแต่ละเดือน ซึ่งสำหรับการทำแผนที่คาร์บอนไดออกไซด์ของประเทศไทยผู้วิจัยเลือกเฉลี่ยข้อมูลในขอบเขต 80°E ถึง 120°E และ 0°N ถึง 40°N กำหนดขนาดที่ 400×400 พิกเซล และสำหรับการทำแผนที่คาร์บอนไดออกไซด์ของประเทศไทยใต้หวันผู้วิจัยเลือกเฉลี่ยข้อมูลในขอบเขต 95°E ถึง 145°E และ 0°N ถึง 50°N กำหนดขนาดที่ 500×500 พิกเซล โดยใช้โปรแกรม IDL version 7.0 จะได้ผลลัพธ์เป็นจุดข้อมูลเฉลี่ยรายเดือนที่ละติจูด และลองจิจูด นั้น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 54 โดยพบว่าลักษณะการกระจายตัวของจุดข้อมูลเฉลี่ยรายเดือนของแต่ละดาวเทียมในเดือนเดียวกันมีลักษณะที่แตกต่างกันเนื่องจากการโคจรของดาวเทียม และการวัดที่ต้องใช้แสงอาทิตย์ดังนั้นบริเวณที่มีเมฆจึงถูกตัดออกเนื่องจากการสะท้อนที่มากเกินไป ทำให้ข้อมูลที่วัดได้คลาดเคลื่อน รวมทั้งดาวเทียมทั้งสามนั้นมีช่องว่างของข้อมูลขนาดใหญ่ ซึ่งจะพบว่าทั้งประเทศไทยและใต้หวันมีจุดข้อมูลน้อย



รูปที่ 54 จุดข้อมูลคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนของดาวเทียม GOSAT-2 ดาวเทียม OCO-2 และดาวเทียม OCO-3 ในเดือนมกราคม เมษายน กรกฎาคม และ ตุลาคม ปี ค.ศ. 2022 ครอบคลุม 95°E ถึง 145°E และ 0°N ถึง 50°N

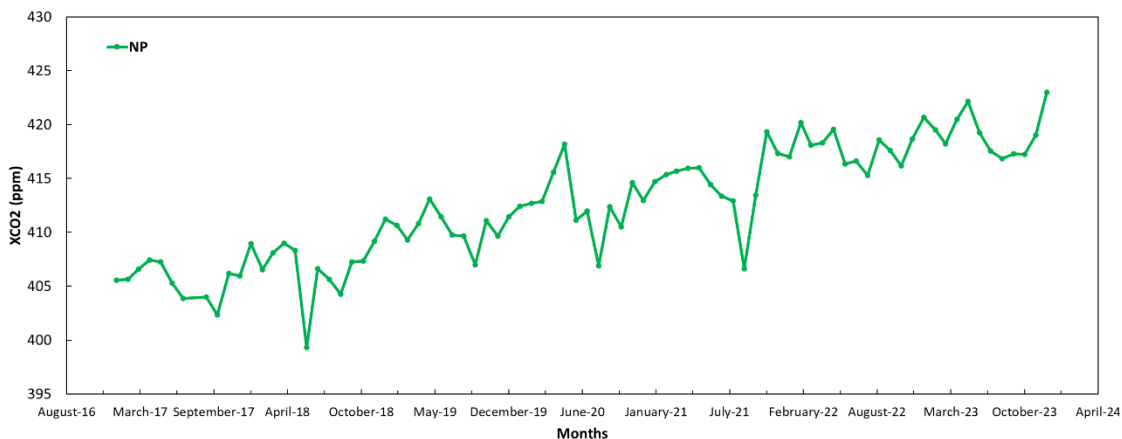
3. การใช้การประมาณอย่างง่ายเพื่อเติมเต็มช่องว่างของข้อมูลที่ได้จากดาวเทียมโดยการประมาณค่าข้างเคียง (interpolation) ด้วย nearest-neighbor interpolation เป็นการคำนวณค่าในพิกเซลที่ว่าง ด้วยการใช้อัตราส่วนที่อยู่ใกล้ที่สุดจำนวน n จุด ในการประมาณ ซึ่งสำหรับขอบเขตในการประมาณค่าของประเทศไทยใช้ข้อมูลครอบคลุม 80°E ถึง 120°E และ 0°N ถึง 40°N นั้นใช้จุดข้อมูลใกล้ที่สุดจำนวน 5 จุด และสำหรับขอบเขตในการประมาณค่าของประเทศไทยได้หวันใช้ข้อมูลครอบคลุม 95°E ถึง 145°E และ 0°N ถึง 50°N ใช้จุดข้อมูลใกล้ที่สุดจำนวน 10 จุด โดยแผนที่ที่ได้มีความละเอียดเชิงพื้นที่ 1 พิกเซลเท่ากับ $1.0^{\circ}\times 1.0^{\circ}$ หรือ 11.1×11.1 กิโลเมตร

4. การดึงข้อมูลจากแผนที่คาร์บอนไดออกไซด์โดยการแปลงพิกัดละติจูด และลองจิจูดของตำแหน่งที่ต้องการเป็นพิกัดตำแหน่งของพิกเซล และทำการหาค่าตำแหน่งนั้นโดยการเฉลี่ยข้อมูลทั้ง 9 พิกเซล รอบตำแหน่งที่ต้องการรวมทั้งตำแหน่งนั้นด้วย

3.3.2. การแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO_2) รายเดือนจากข้อมูลดาวเทียม OCO_2 ของประเทศไทยและประเทศไต้หวัน

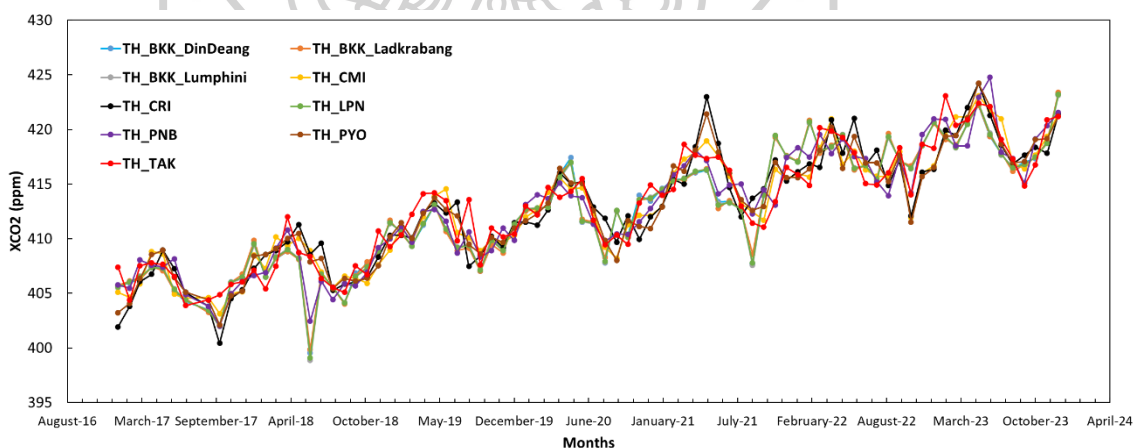
ในงานวิจัยนี้จะแสดงตัวอย่างค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO_2) ที่ได้จากการประมวลผลจากข้อมูลรายวัน Level 2 ของดาวเทียม OCO_2 ในแต่ละตำแหน่งของสถานีภาคพื้น ในประเทศไทยและประเทศไต้หวันโดยแสดงข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม ปี ค.ศ. 2017 ถึงเดือนธันวาคม ปี ค.ศ. 2023 จากข้อมูลดาวเทียม OCO_2

1) การแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์รายเดือน (XCO_2) จากข้อมูลดาวเทียม OCO_2 ที่สถานีนครปฐม ดังแสดงในรูปที่ 55 พบว่าตั้งแต่ปี ค.ศ. 2017 จนถึง ปี ค.ศ. 2023 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานีนครปฐมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยรูปแบบการแปรค่าไม่สามารถสรุปได้

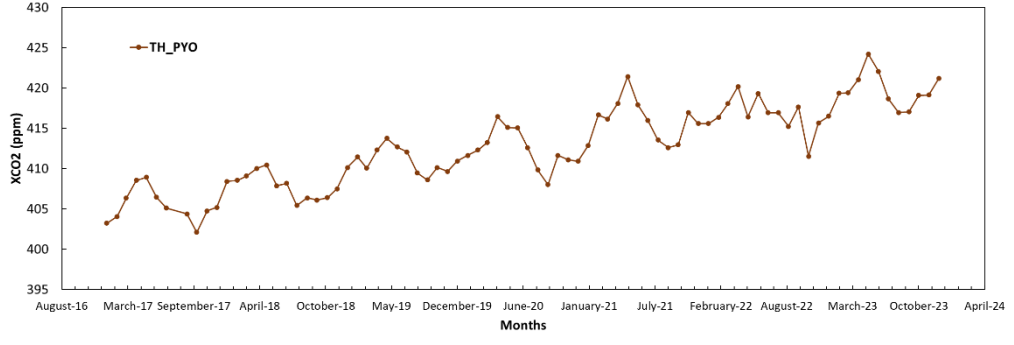
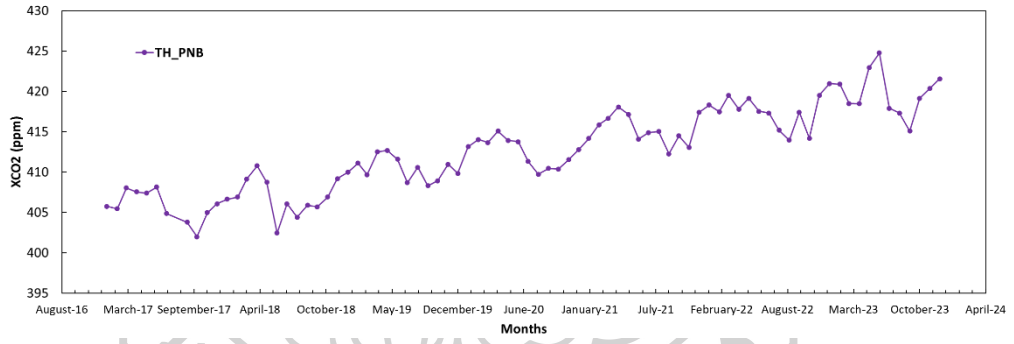
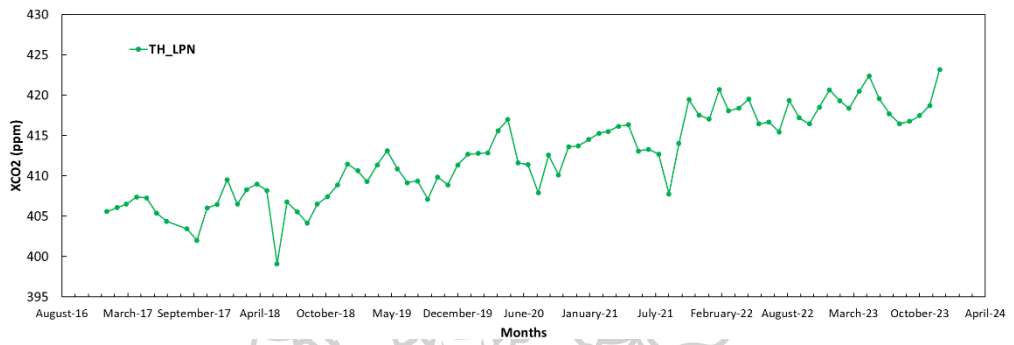
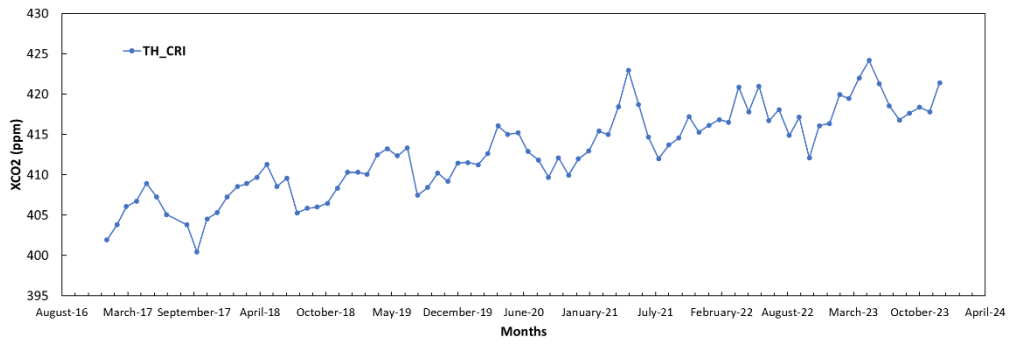


รูปที่ 55 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์รายเดือนที่สถานีนครปฐม ประเทศไทย ตั้งแต่เดือนมกราคม ปี ค.ศ. 2017 ถึงเดือนธันวาคม ปี ค.ศ. 2023 จากข้อมูลดาวเทียม OCO-2

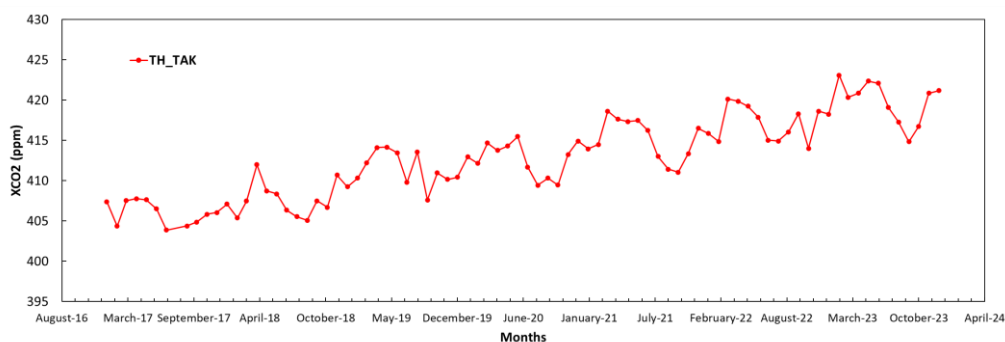
2) การแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์รายเดือน (XCO_2) จากข้อมูลดาวเทียม OCO-2 ที่สถานี intERLab ทั้ง 9 แห่ง ดังแสดงในรูปที่ 56 พบว่าตั้งแต่ปี ค.ศ. 2017 จนถึง ปี ค.ศ. 2023 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแต่ละพื้นที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นที่ใกล้เคียงกัน โดยรูปแบบการแปรค่าของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์นั้นไม่ชัดเจนแต่สามารถเห็นได้ว่ามีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นในช่วงต้นฤดูหนาว และเพิ่มขึ้นสูงสุดในช่วงฤดูร้อนจากนั้นลดลงในช่วงฤดูฝน



รูปที่ 56 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์รายเดือนที่พื้นที่ในตำแหน่งที่ติดตั้งเครื่องมือวัดของ intERLab ทั้ง 9 แห่ง ในประเทศไทย ตั้งแต่เดือนมกราคม ปี ค.ศ. 2017 ถึงเดือนธันวาคม ปี ค.ศ. 2023 จากข้อมูลดาวเทียม OCO-2

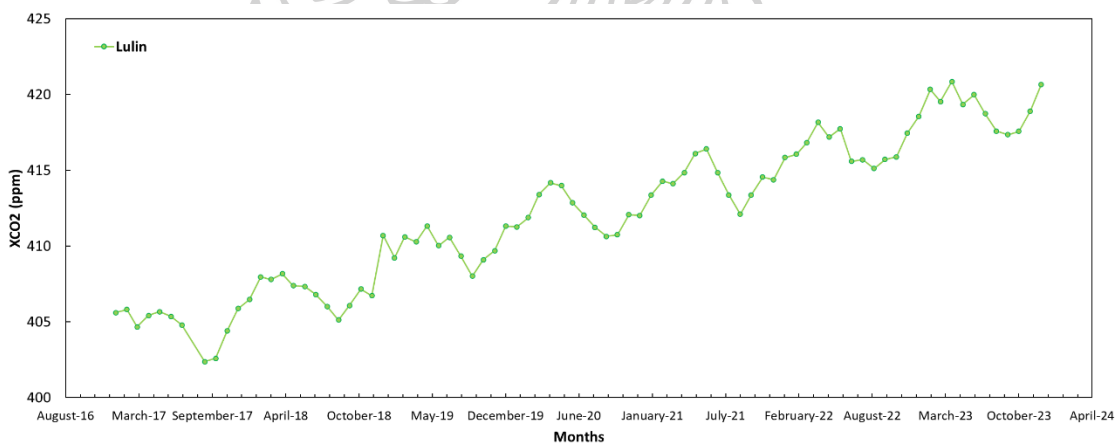


รูปที่ 56 (ต่อ)



รูปที่ 56 (ต่อ)

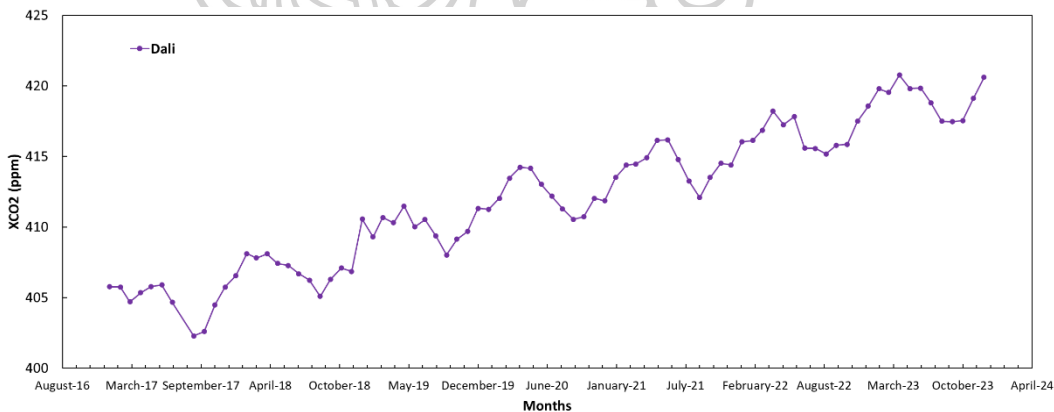
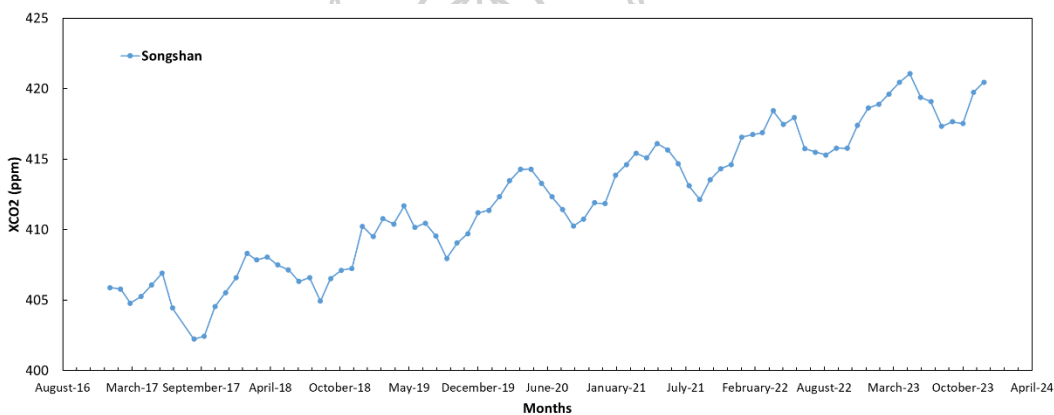
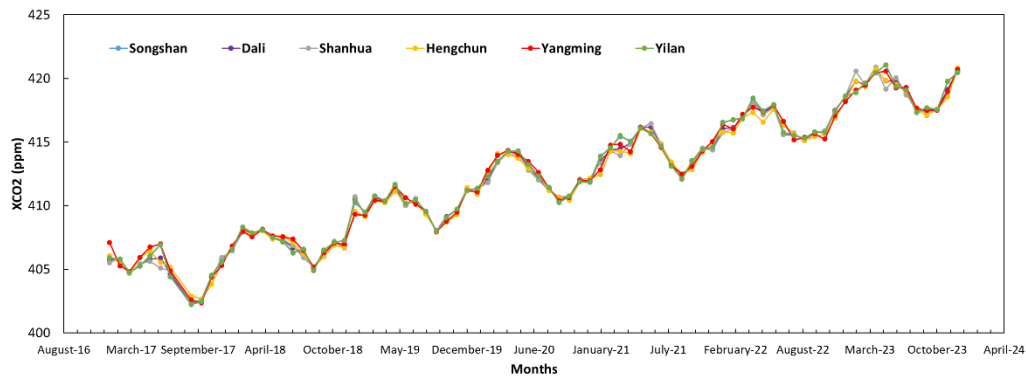
3) การแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์รายเดือน (XCO_2) จากข้อมูลดาวเทียม OCO-2 ที่สถานี Lulin ดังแสดงในรูปที่ 57 พบว่าตั้งแต่ปี ค.ศ. 2017 จนถึง ปี ค.ศ. 2023 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานี Lulin มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยรูปแบบการแปรค่าคือเพิ่มขึ้นในช่วงฤดูหนาวและมีค่าสูงสุดในช่วงฤดูใบไม้ผลิ จากนั้นลดลงในช่วงฤดูร้อนและลดลงต่ำสุดในช่วงฤดูใบไม้ร่วง



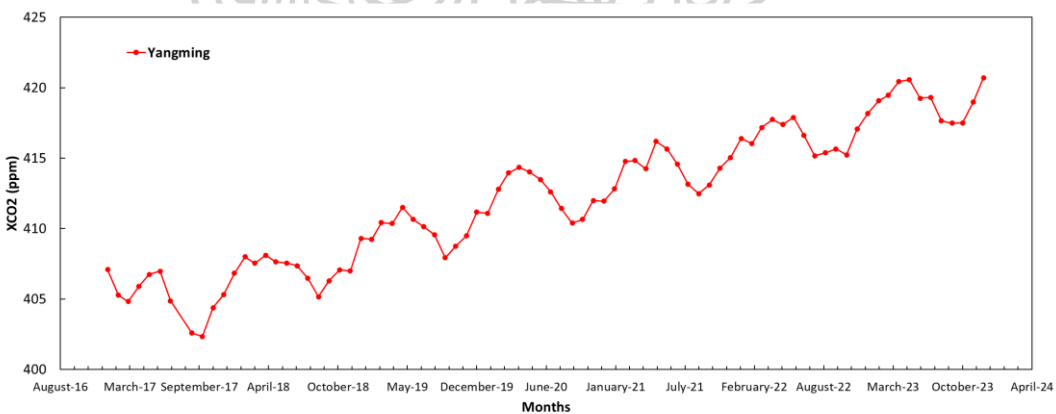
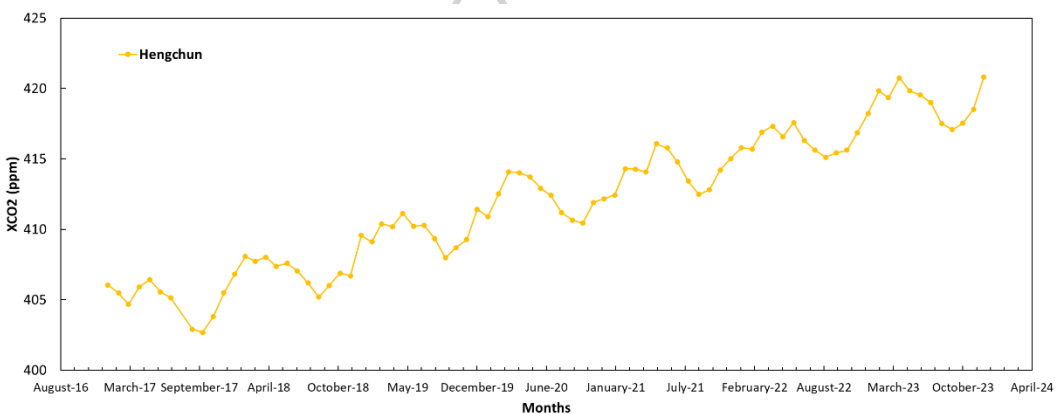
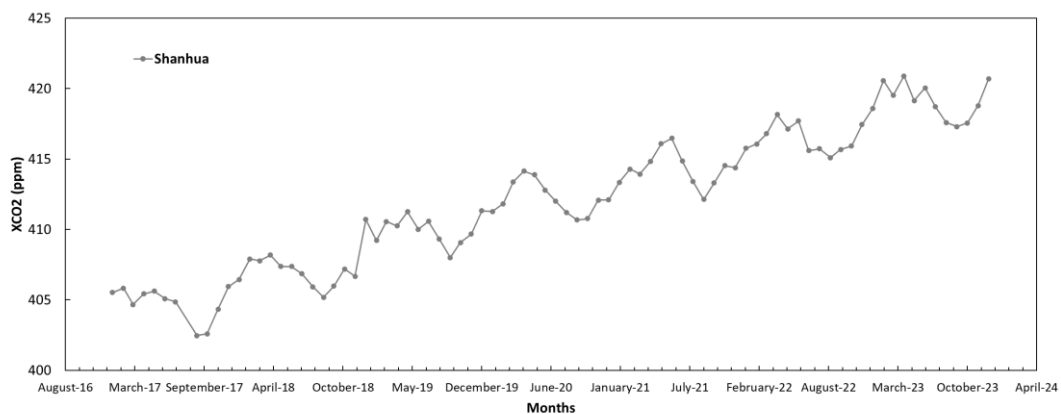
รูปที่ 57 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์รายเดือนที่สถานี Lulin ประเทศไต้หวัน ตั้งแต่เดือน มกราคม ปี ค.ศ. 2017 ถึงเดือนธันวาคม ปี ค.ศ. 2023 จากข้อมูลดาวเทียม OCO-2

4) การแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์รายเดือน (XCO_2) จากข้อมูลดาวเทียม OCO-2 ที่สถานี EPA ทั้ง 6 สถานี ดังแสดงในรูปที่ 58 พบว่าตั้งแต่ปี ค.ศ. 2017 จนถึงปี ค.ศ. 2023 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ทุกสถานีมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไปในทางเดียวกัน โดยรูปแบบการแปร

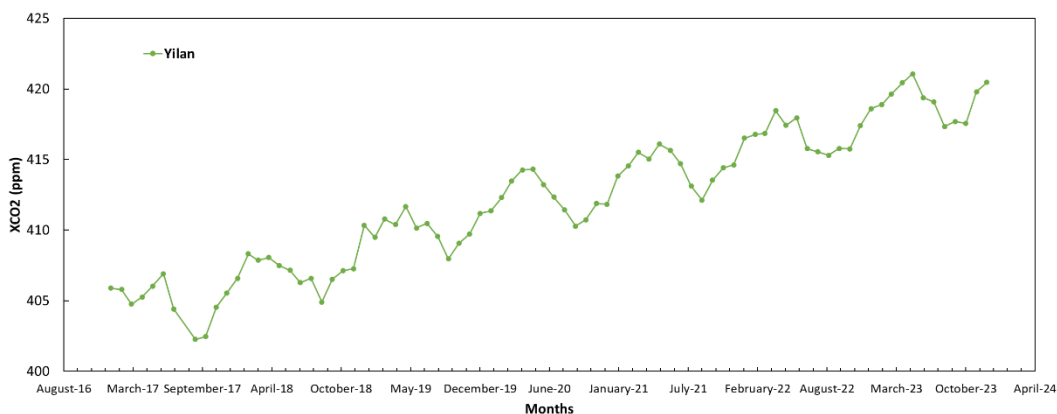
ค่าคือค่าเพิ่มขึ้นในช่วงฤดูหนาวและมีค่าสูงสุดในช่วงฤดูใบไม้ผลิ จากนั้นลดลงในช่วงฤดูร้อนและลดลงต่ำสุดในช่วงฤดูใบไม้ร่วง



รูปที่ 58 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์รายเดือนที่สถานี EPA ทั้ง 6 สถานี ประเทศไต้หวัน ตั้งแต่เดือนมกราคม ค.ศ. 2017 ถึงเดือนธันวาคม ค.ศ. 2023 จากข้อมูลดาวเทียม OCO-2



รูปที่ 58 (ต่อ)



รูปที่ 58 (ต่อ)

3.4 การเปรียบเทียบความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ (XCO_2) ที่ได้จากดาวเทียมกับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ (CO_2) จากสถานีภาคพื้น

ผู้วิจัยทำการเลือกข้อมูลความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือน (XCO_2) ที่ได้จากกระบวนการทำแผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในหัวข้อที่ 3.3 ของดาวเทียม GOSAT-2 OCO-2 และ OCO-3 นำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือน (CO_2) ที่วัดได้จากภาคพื้น โดยการเปรียบเทียบข้อมูลในแต่ละสถานีแตกต่างกันตามช่วงเวลาที่มีข้อมูลตรงกับดาวเทียมนั้น ๆ

ผู้วิจัยทำการแสดงค่าความแตกต่างของข้อมูลทั้งสองในรูปแบบของ mean bias error (MBE) root mean square error (RMSE) และ ความสัมพันธ์ของข้อมูลด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ซึ่งหาได้จากสมการ 3.1 – 3.3

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_1^N (XCO_2 - CO_2) \quad (3.1)$$

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum_1^N (XCO_2 - CO_2)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.2)$$

$$r = \frac{\sum (XCO_2 - \bar{XCO}_2)(CO_2 - \bar{CO}_2)}{(\sum (XCO_2 - \bar{XCO}_2)^2 \sum (CO_2 - \bar{CO}_2)^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (3.3)$$

เมื่อ CO_2 คือ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนที่วัดได้จากสถานีภาคพื้น (ppm)

XCO_2 คือ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนที่วัดได้จากดาวเทียม (ppm)

ผลการเปรียบเทียบแสดงดังตารางที่ 10 - 12 สำหรับดาวเทียม GOSAT-2 OCO-2 และ OCO-3 ตามลำดับ สำหรับประเทศไทย และตารางที่ 13 - 15 สำหรับประเทศไต้หวัน พบว่าข้อมูลที่ได้จากดาวเทียมกับข้อมูลที่ได้จากภาคพื้นมีค่าความแตกต่างของแต่ละสถานีแตกต่างกัน โดยข้อมูลที่ได้จากดาวเทียม GOSAT-2 มีค่า RMSE น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับข้อมูลของสถานีนครปฐม ซึ่งเท่ากับ 17.668 ppm โดยค่าที่วัดได้จากสถานีมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากดาวเทียม และเมื่อความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากดาวเทียม GOSAT-2 ลดลง ค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานีนครปฐมจะเพิ่มขึ้น

กรณีของดาวเทียม OCO-2 ผลการเปรียบเทียบพบว่าข้อมูลที่ได้จากดาวเทียมกับข้อมูลที่ได้จากภาคพื้นนั้นมีความแตกต่างของแต่ละสถานีแตกต่างกันเช่นกันดังแสดงในตารางที่ 11 โดยข้อมูลที่ได้จากดาวเทียม OCO-2 มีค่า RMSE น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับข้อมูลของของเครื่องวัดที่สถานีเชียงใหม่ เท่ากับ 11.617 ppm โดยค่าที่วัดได้จากสถานีมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากดาวเทียม และข้อมูลทั้งสองชุดไม่มีความสัมพันธ์กัน

สำหรับดาวเทียม OCO-3 ดังแสดงในตารางที่ 12 ผลการเปรียบเทียบพบว่าข้อมูลที่ได้จากดาวเทียมกับข้อมูลที่ได้จากภาคพื้นนั้นมีความแตกต่างของแต่ละสถานีแตกต่างกันเช่นกัน โดยข้อมูลที่ได้จากดาวเทียม OCO-3 มีค่า RMSE น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับข้อมูลของของเครื่องวัดที่สถานีเชียงใหม่ เท่ากับ 11.980 ppm โดยค่าที่วัดได้จากสถานีมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากดาวเทียม และเมื่อความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากดาวเทียมเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่วัดได้จากเครื่องวัดที่ตั้งอยู่ที่เชียงใหม่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 10 ค่า MBE RMSE และ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ของข้อมูลดาวเทียม GOSAT- 2 ที่ได้จากกระบวนการทำแผนที่คาร์บอนไดออกไซด์เปรียบเทียบกับข้อมูลที่วัดได้บนสถานีภาคพื้นทั้ง 10 แห่งของประเทศไทย

Stations	GOSAT-2 satellite			
	MBE	RMSE	r	N
TH_BKK_DinDeang	39.796	59.444	-0.798	7
TH_BKK_Ladkrabang	-45.315	46.161	0.254	7
TH_BKK_Lumphini2	-15.070	21.124	-0.773	6
TH_CMI	-16.608	19.516	0.128	6
TH_CRI	-115.710	117.663	0.722	7
TH_LPN	-59.410	61.128	0.574	5
TH_PNB	-69.975	70.756	-0.204	7
TH_PYO	-36.243	38.075	-0.493	7
TH_TAK	-63.703	66.432	-0.456	7
NP	-14.919	17.668	-0.981	4

ตารางที่ 11 ค่า MBE RMSE และ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ของข้อมูลดาวเทียม OCO - 2 ที่ได้จากกระบวนการทำแผนที่คาร์บอนไดออกไซด์เปรียบเทียบกับข้อมูลที่วัดได้บนสถานีภาคพื้นทั้ง 10 แห่งของประเทศไทย

Stations	OCO-2 satellite			
	MBE	RMSE	r	N
TH_BKK_DinDeang	15.320	57.197	-0.101	12
TH_BKK_Ladkrabang	-43.618	44.056	0.287	12
TH_BKK_Lumphini2	-8.422	12.684	-0.321	11
TH_CMI	-9.936	11.617	0.016	11
TH_CRI	-108.023	110.054	0.284	12
TH_LPN	-55.284	57.694	0.487	10
TH_PNB	-72.686	73.703	0.082	12
TH_PYO	-37.976	38.837	-0.289	12
TH_TAK	-68.769	70.405	-0.302	12
NP	-40.994	44.849	0.090	12

ตารางที่ 12 ค่า MBE RMSE และ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ของข้อมูลดาวเทียม OCO - 3 ที่ได้จากกระบวนการทำแผนที่คาร์บอนไดออกไซด์เปรียบเทียบกับข้อมูลที่วัดได้บนสถานีภาคพื้นทั้ง 10 แห่งของประเทศไทย

Stations	OCO-3 satellite			
	MBE	RMSE	r	N
TH_BKK_DinDeang	30.905	58.240	-0.738	10
TH_BKK_Ladkrabang	-41.475	41.769	0.245	10
TH_BKK_Lumphini2	-11.624	14.853	-0.643	9
TH_CMI	-11.628	11.980	0.620	9
TH_CRI	-110.733	104.739	0.641	10
TH_LPN	-50.542	52.747	0.267	8
TH_PNB	-68.969	69.843	-0.378	10
TH_PYO	-36.157	37.175	-0.271	10
TH_TAK	-66.376	68.042	-0.575	10
NP	-33.750	39.422	-0.713	7

จากตารางที่ 13 จากผลการเปรียบเทียบพบว่าข้อมูลที่ได้จากดาวเทียมกับข้อมูลที่ได้จากภาคพื้นนั้นมีค่าความแตกต่างของแต่ละสถานีแตกต่างกัน โดยข้อมูลที่ได้จากดาวเทียม GOSAT-2 มีค่า RMSE น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับข้อมูลของสถานี Lulin อยู่ที่ 2.892 ppm โดยค่าที่วัดได้จากสถานีมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากดาวเทียม และเมื่อความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากดาวเทียม GOSAT-2 เพิ่มขึ้น ค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สถานี Lulin จะเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 13 ค่า MBE RMSE และ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ของข้อมูลดาวเทียม GOSAT - 2 ที่ได้จากกระบวนการทำแผนที่คาร์บอนไดออกไซด์เปรียบเทียบกับข้อมูลที่วัดได้บนสถานีภาคพื้นทั้ง 7 แห่งของประเทศไทย

Stations	GOSAT-2 satellite			
	MBE	RMSE	r	N
Yangming	-8.359	10.599	0.621	39
Songshan	-18.336	19.885	0.300	39
Yilan	-15.582	17.283	0.491	39
Dali	-24.859	26.284	0.353	39
Shanhua	-22.335	23.244	0.476	39
Hengchun	-0.271	6.087	0.369	39
Lulin	0.092	2.892	0.800	51

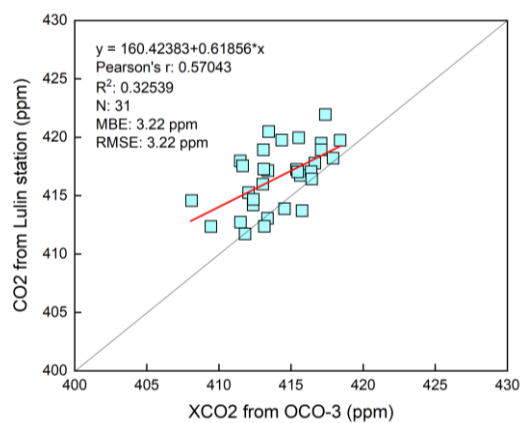
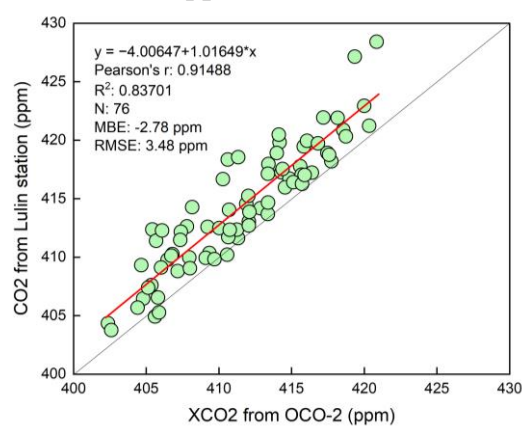
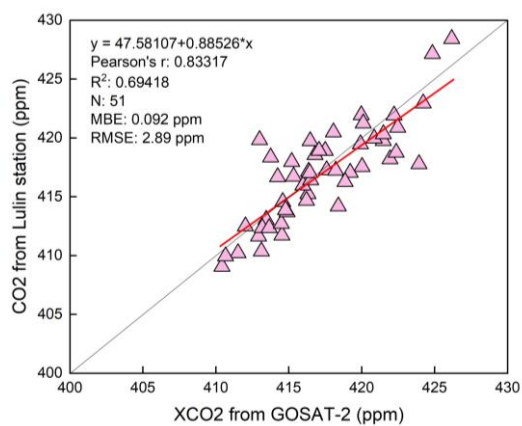
ตารางที่ 14 ค่า MBE RMSE และ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ของข้อมูลดาวเทียม OCO - 2 ที่ได้จากการคำนวณการทำแผนที่คาร์บอนไดออกไซด์เปรียบเทียบกับข้อมูลที่วัดได้บนสถานีภาคพื้นทั้ง 7 แห่งของประเทศไต้หวัน

Stations	OCO-2 satellite			
	MBE	RMSE	r	N
Yangming	-11.216	12.685	0.596	39
Songshan	-20.463	20.272	0.421	39
Yilan	-17.684	18.753	0.592	39
Dali	-27.260	27.648	0.370	39
Shanhua	-24.923	24.651	0.494	39
Hengchun	-3.382	5.985	0.540	39
Lulin	-2.782	3.489	0.915	76

ตารางที่ 15 ค่า MBE RMSE และ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ของข้อมูลดาวเทียม OCO - 3 ที่ได้จากการคำนวณการทำแผนที่คาร์บอนไดออกไซด์เปรียบเทียบกับข้อมูลที่วัดได้บนสถานีภาคพื้นทั้ง 7 แห่งของประเทศไต้หวัน

Stations	OCO-3 satellite			
	MBE	RMSE	r	N
Yangming	-13.450	15.091	0.455	26
Songshan	-19.607	21.097	0.207	26
Yilan	-19.625	21.322	0.309	26
Dali	-28.344	29.738	0.050	26
Shanhua	-26.559	27.426	0.026	26
Hengchun	-3.991	6.934	0.062	26
Lulin	-2.371	3.223	0.570	31

ความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้จากการวัดจากดาวเทียม GOSAT-2 กับข้อมูลที่วัดได้จากสถานีภาคพื้นทีสถานี Lulin ซึ่งเป็นสถานีที่ตั้งอยู่บนภูเขาสูงและไม่ได้รับอิทธิพลจากมลพิษในเขตเมือง มีความแตกต่างของข้อมูลน้อยที่สุด ซึ่งเท่ากับ 2.89 ppm รองลงมาคือข้อมูลจากดาวเทียม OCO-3 ที่มีความแตกต่างของข้อมูลเท่ากับ 3.22 ppm โดยข้อมูลที่ได้จากดาวเทียมมากกว่าข้อมูลที่ได้จากภาคพื้น และดาวเทียม OCO-2 มีความแตกต่างของข้อมูลเท่ากับ 3.48 ppm โดยที่ข้อมูลที่ได้จากภาคพื้นมากกว่าข้อมูลที่ได้จากดาวเทียมดังแสดงในรูปที่ 59 โดยที่ R^2 คือ R-squared



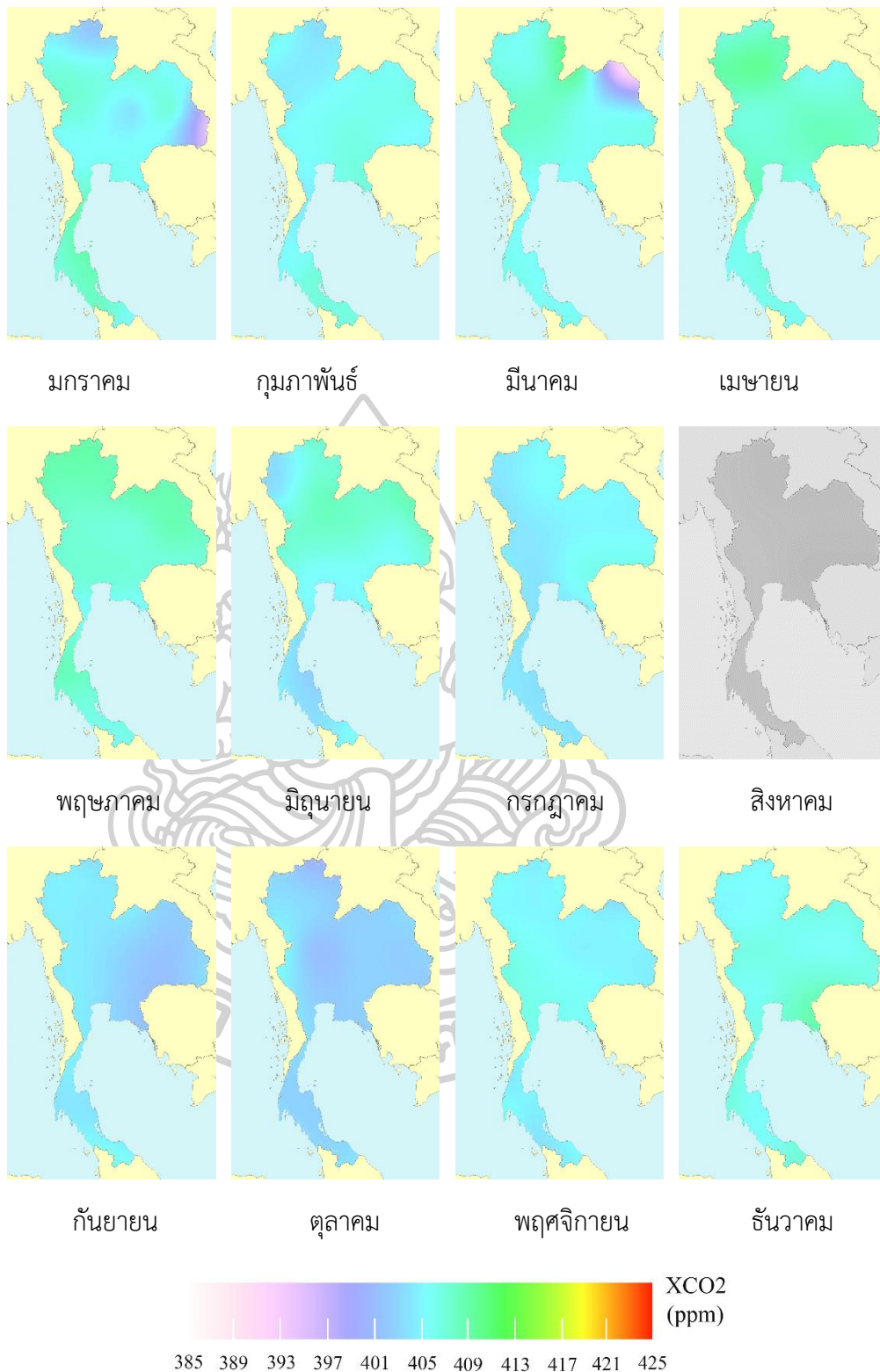
รูปที่ 59 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์จากข้อมูลดาวเทียม GOSAT-2 ดาวเทียม OCO-2 และดาวเทียม OCO-3 และข้อมูลที่ได้จากการวัดของสถานี Lulin ประเทศไต้หวัน

3.4.1 แผนที่มีการแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO_2) รายเดือนจากข้อมูลดาวเทียม OCO-2 ของประเทศไทย

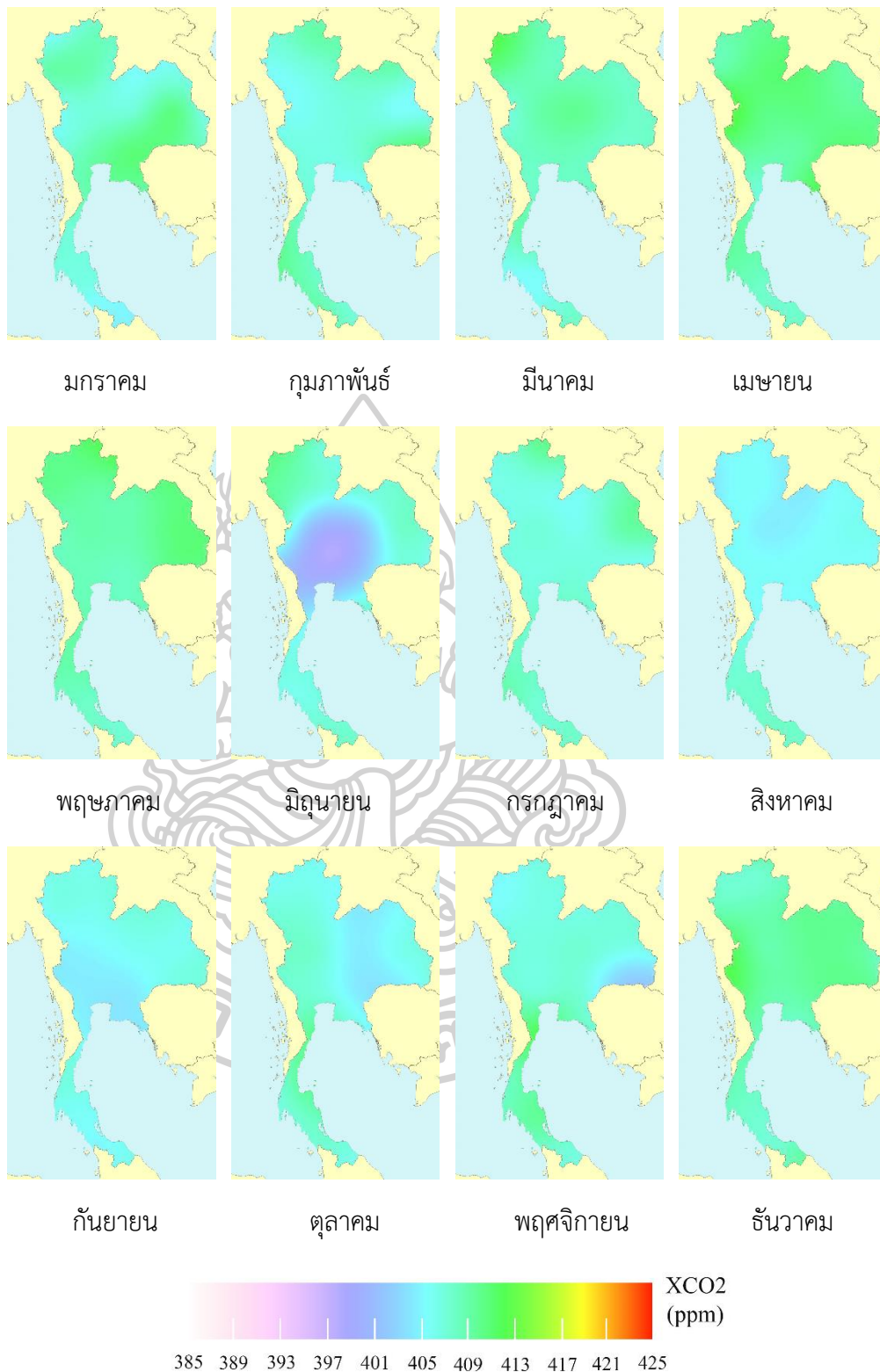
เนื่องจากผู้วิจัยต้องการศึกษาการแปรค่าระยะยาวของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์จากข้อมูลดาวเทียมจึงเลือกข้อมูลรายวัน level 2 ที่ได้จากการวัดของดาวเทียม OCO_2 ซึ่งมีข้อมูลที่เป็นปัจจุบันโดยมีข้อมูลถึงเดือนมีนาคม ค.ศ. 2024 และมีค่า RMSE เท่ากับ 3.48 ppm เมื่อเทียบกับข้อมูลภาคพื้นดินที่สถานี Lulin ซึ่งจากดาวเทียม GOSAT-2 มีถึงเดือนกันยายน ปี ค.ศ. 2023 และข้อมูลจากดาวเทียม OCO-3 มีข้อมูลถึงวันเดือนตุลาคม ปี ค.ศ. 2023 (สำรวจจากเว็บไซต์ของดาวเทียมทั้งสามดวง เมื่อวันที่ 9 พฤษภาคม ค.ศ. 2024)

แผนที่มีการแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO_2) ของประเทศไทย ตั้งแต่เดือนมกราคม ปี ค.ศ. 2017 ถึงเดือนธันวาคม ปี ค.ศ. 2023 (ไม่ข้อมูลดาวเทียมในเดือนในเดือนสิงหาคม 2017) พบว่าการแปรค่าของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศของประเทศไทยผันผวนตามช่วงฤดูกาล อีกทั้งมีค่าความเข้มข้นเพิ่มขึ้นทุกปี และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 60 – 66

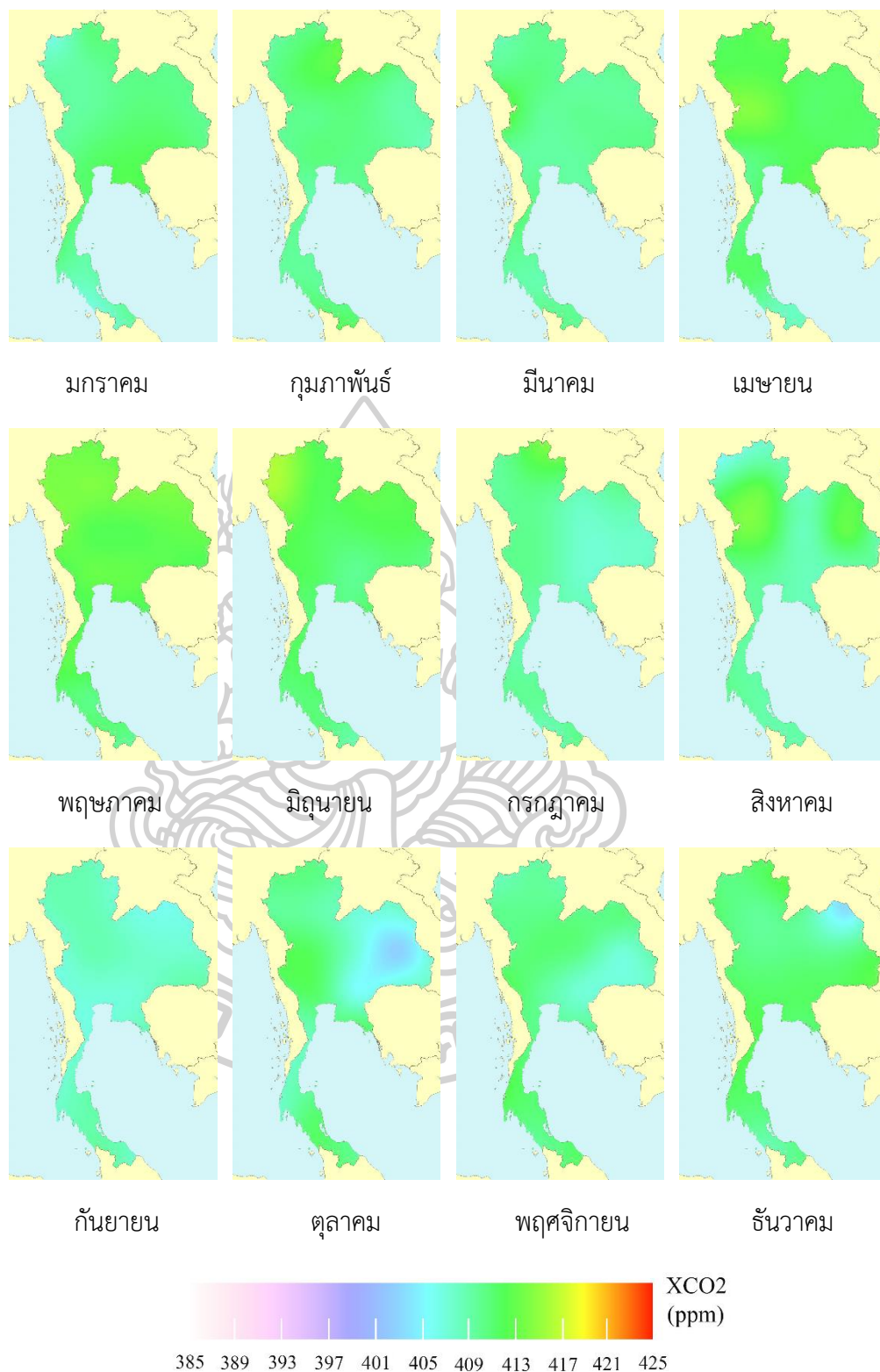




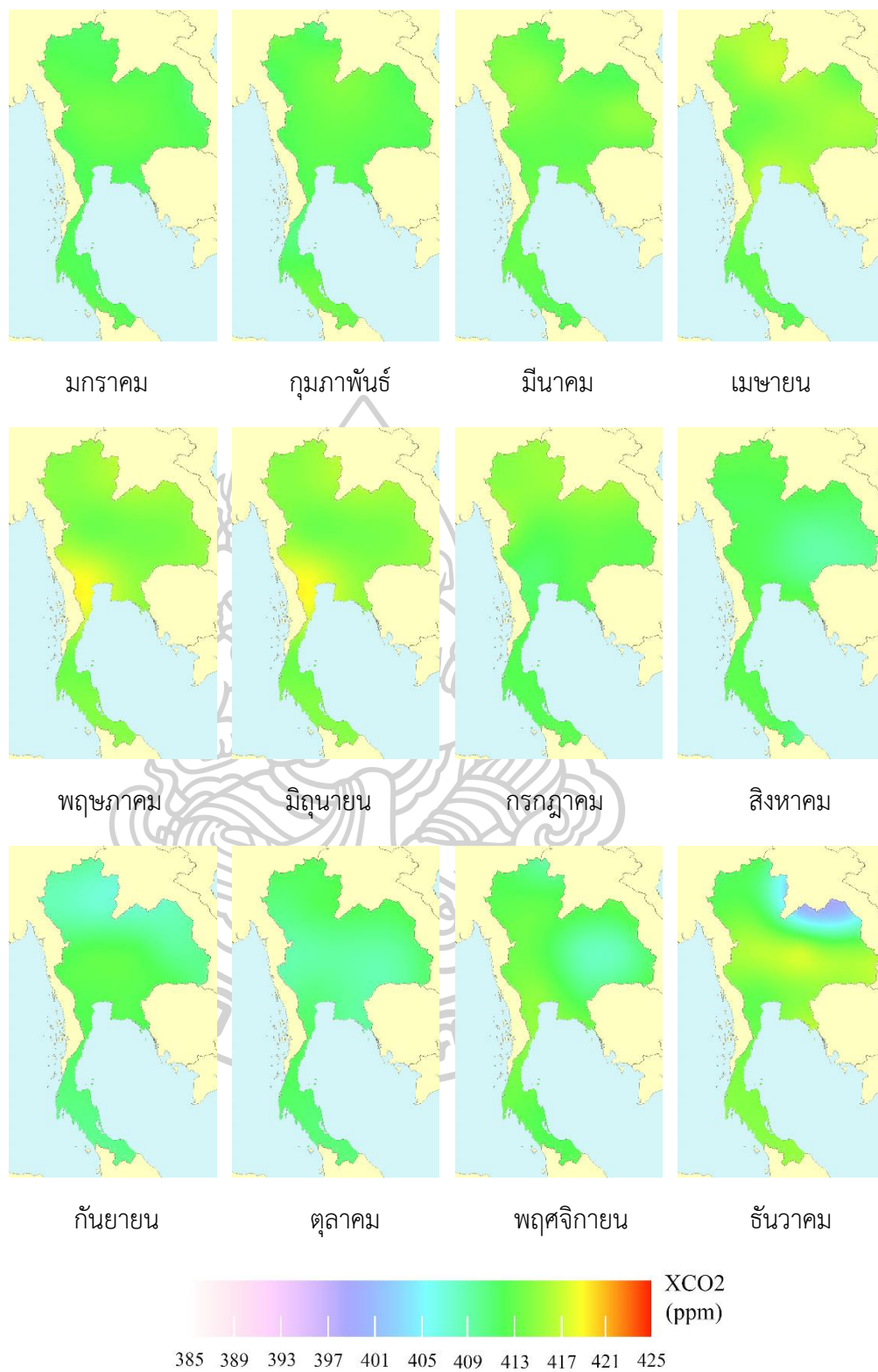
รูปที่ 60 แผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO₂) เฉลี่ยรายเดือน ของประเทศไทยในปี ค.ศ. 2017



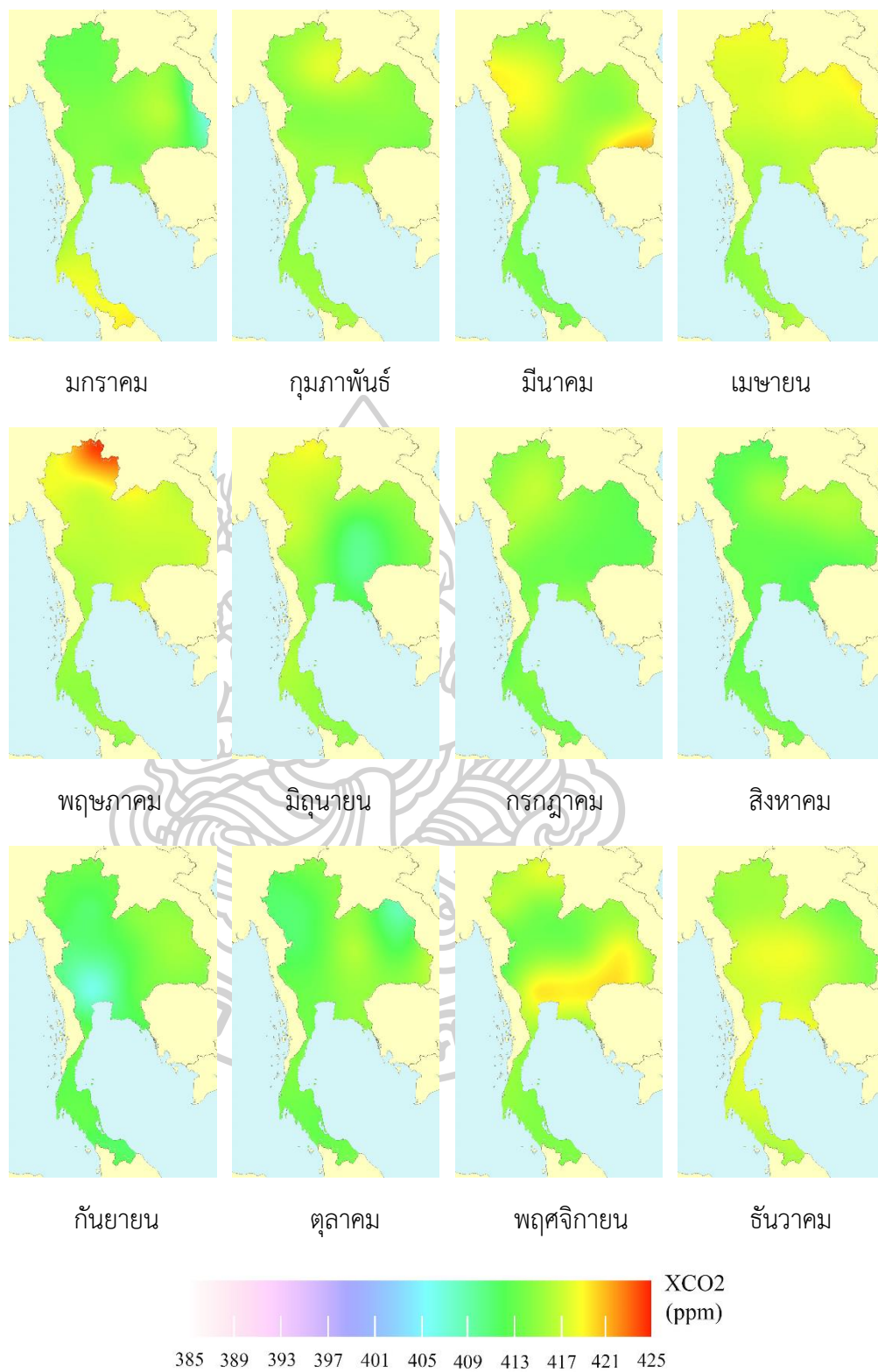
รูปที่ 61 แผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO₂) เฉลี่ยรายเดือน ของประเทศไทยในปี ค.ศ. 2018



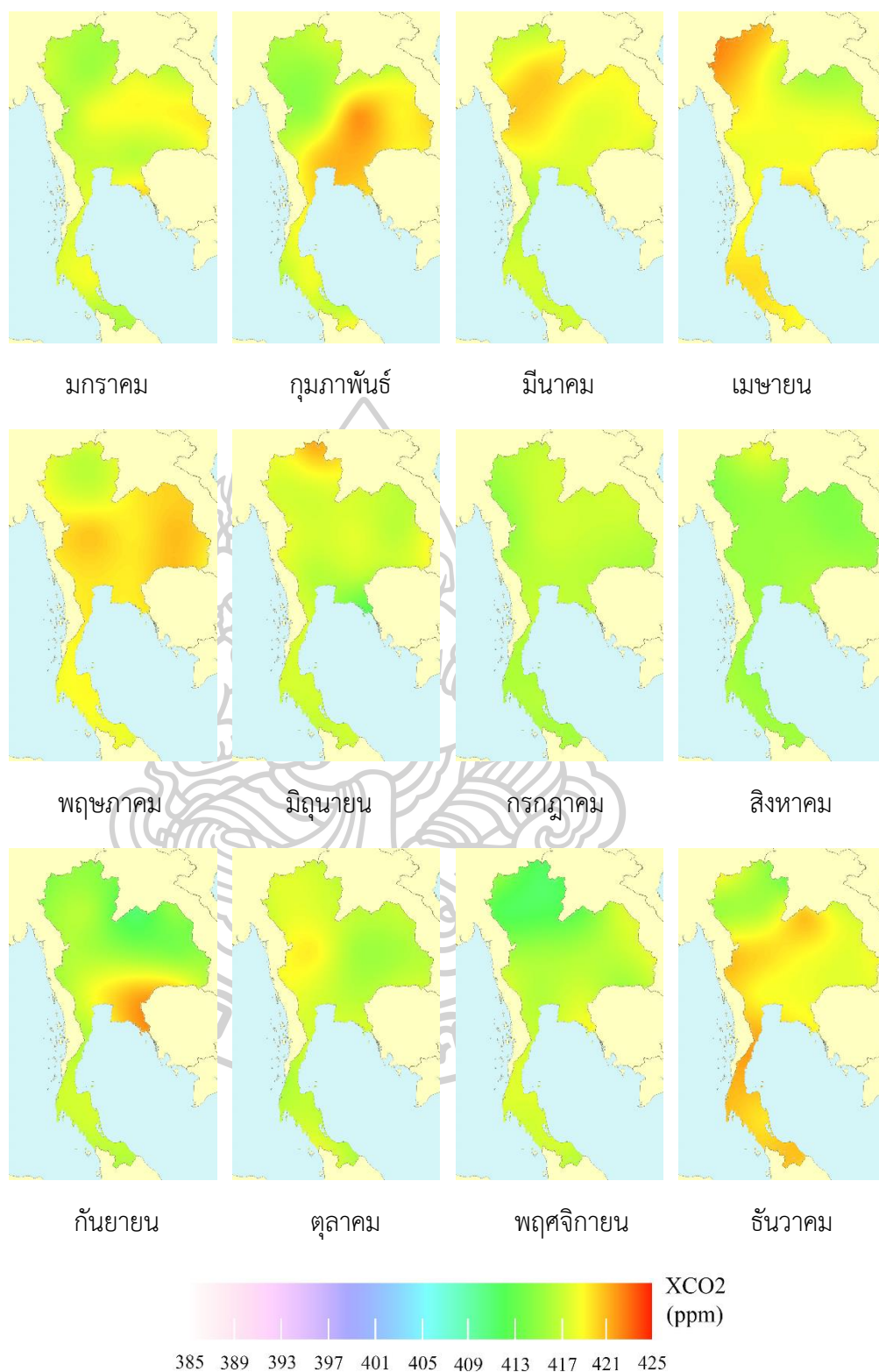
รูปที่ 62 แผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO₂) เฉลี่ยรายเดือน ของประเทศไทยในปี ค.ศ. 2019



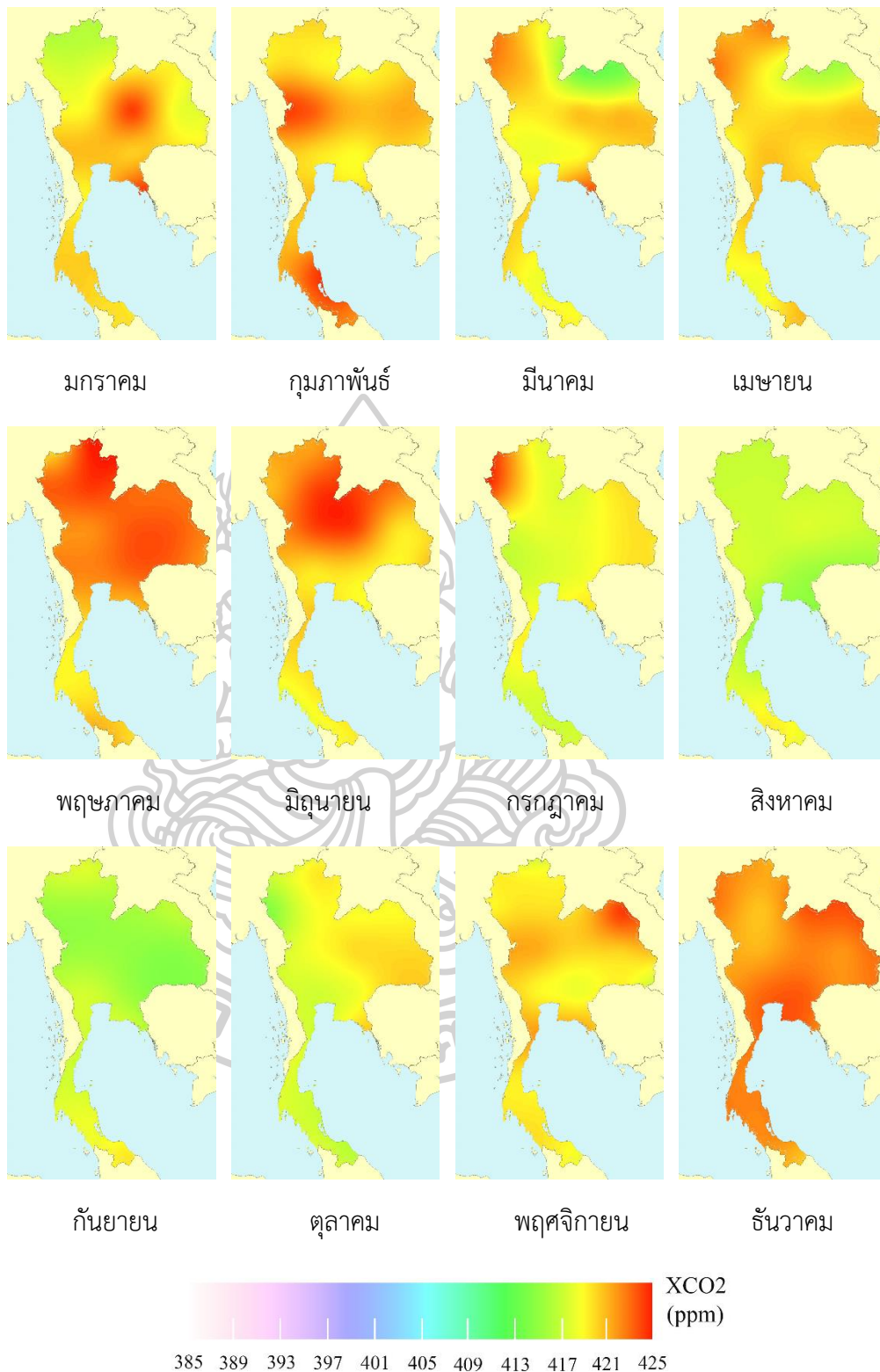
รูปที่ 63 แผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO₂) เฉลี่ยรายเดือน ของประเทศไทยในปี ค.ศ. 2020



รูปที่ 64 แผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO₂) เฉลี่ยรายเดือน ของประเทศไทยในปี ค.ศ. 2021



รูปที่ 65 แผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO₂) เฉลี่ยรายเดือน ของประเทศไทยในปี ค.ศ. 2022

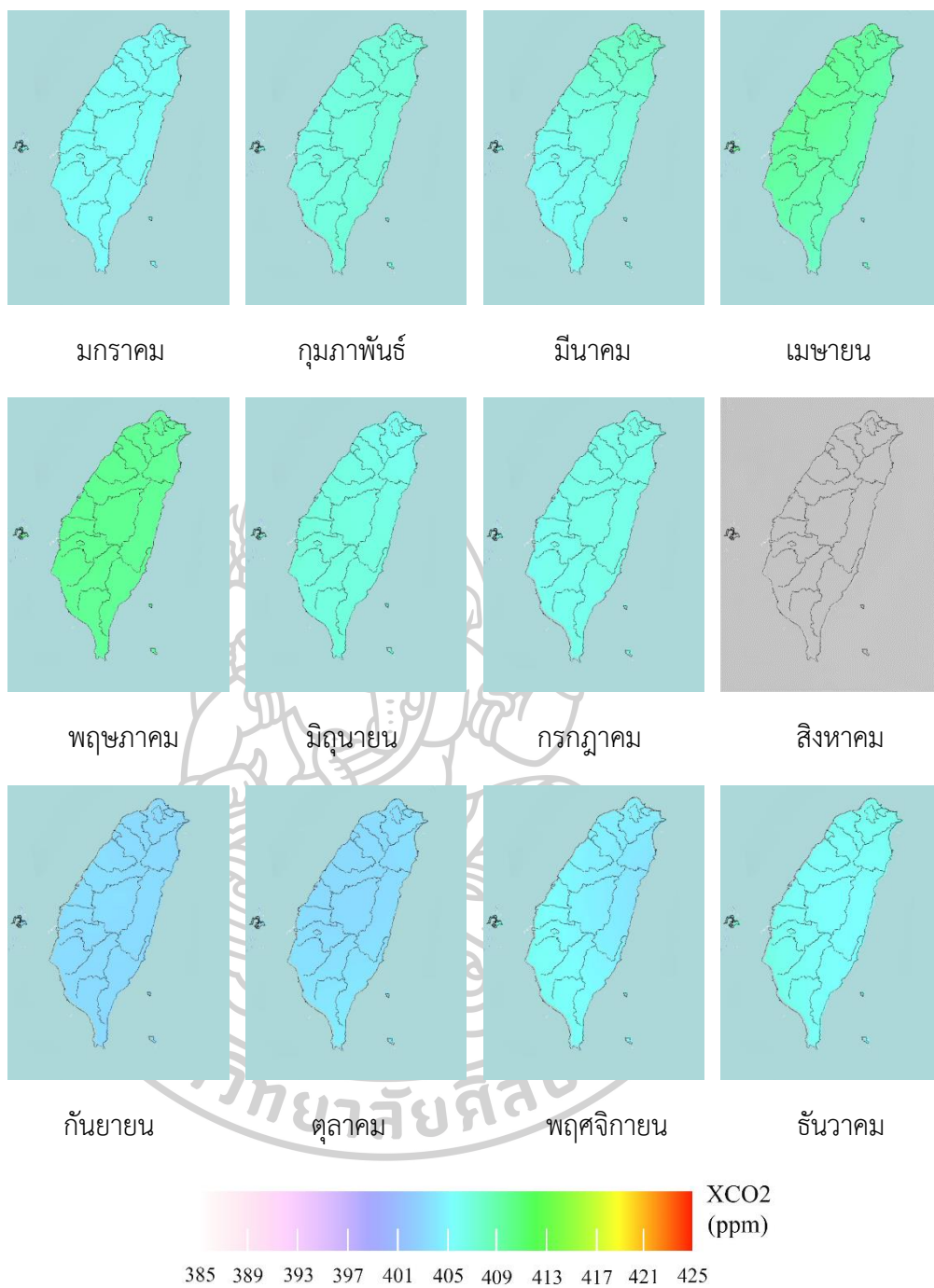


รูปที่ 66 แผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO₂) เฉลี่ยรายเดือน ของประเทศไทยในปี ค.ศ. 2023

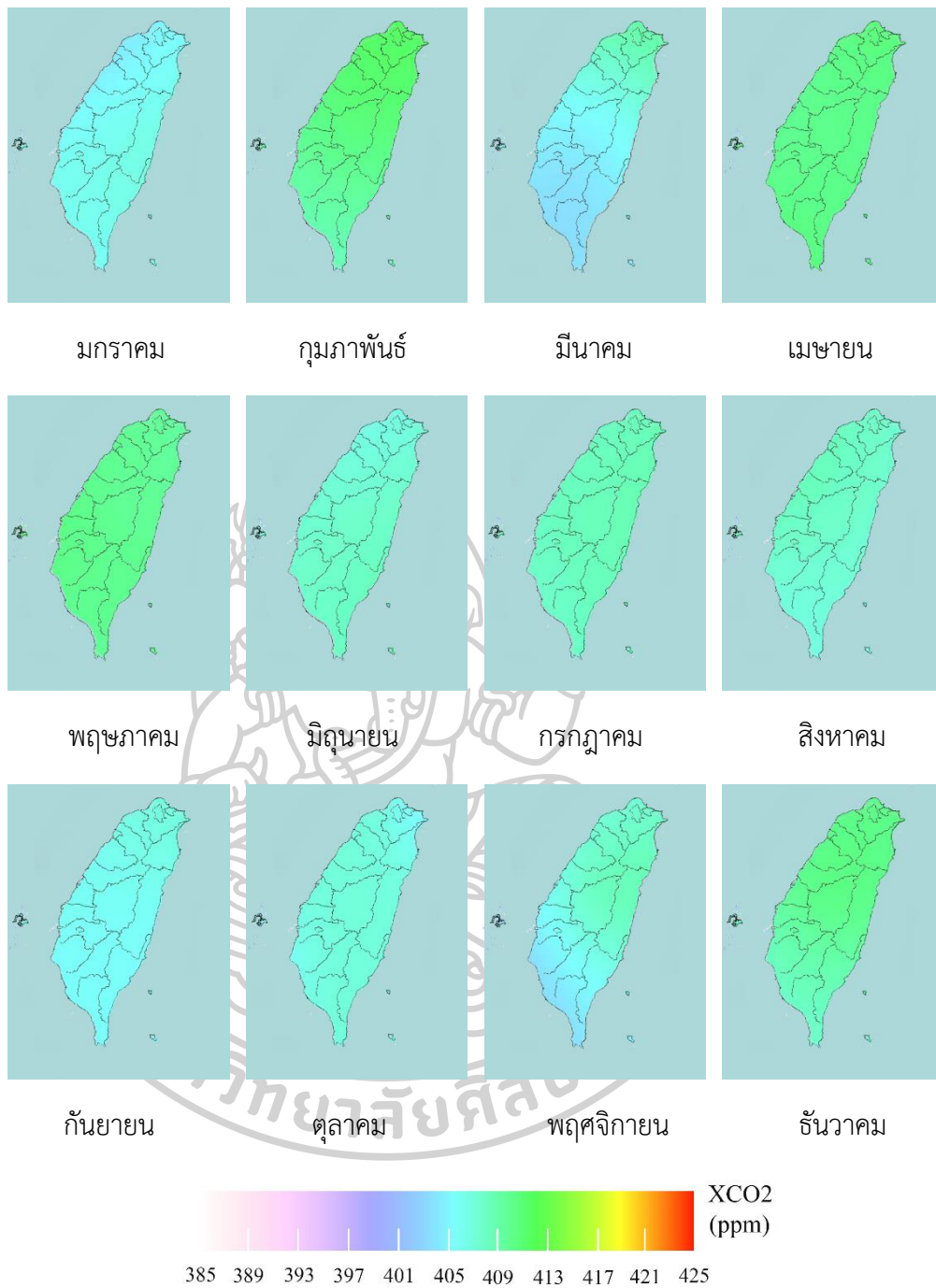
3.4.2 แผนที่การแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO_2) รายเดือนจากข้อมูลดาวเทียม OCO-2 ของประเทศไต้หวัน

แผนที่คาร์บอนไดออกไซด์ตั้งแต่เดือนมกราคม ค.ศ. 2017 ถึงเดือนธันวาคม ค.ศ. 2023 (ไม่มีข้อมูลดาวเทียมในเดือนสิงหาคม 2017) พบว่าการแปรค่าของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศของประเทศไต้หวันผันผวนตามช่วงฤดูกาล อีกทั้งมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นทุกปี และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับประเทศไทย ดังแสดงในรูปที่ 67 - 73

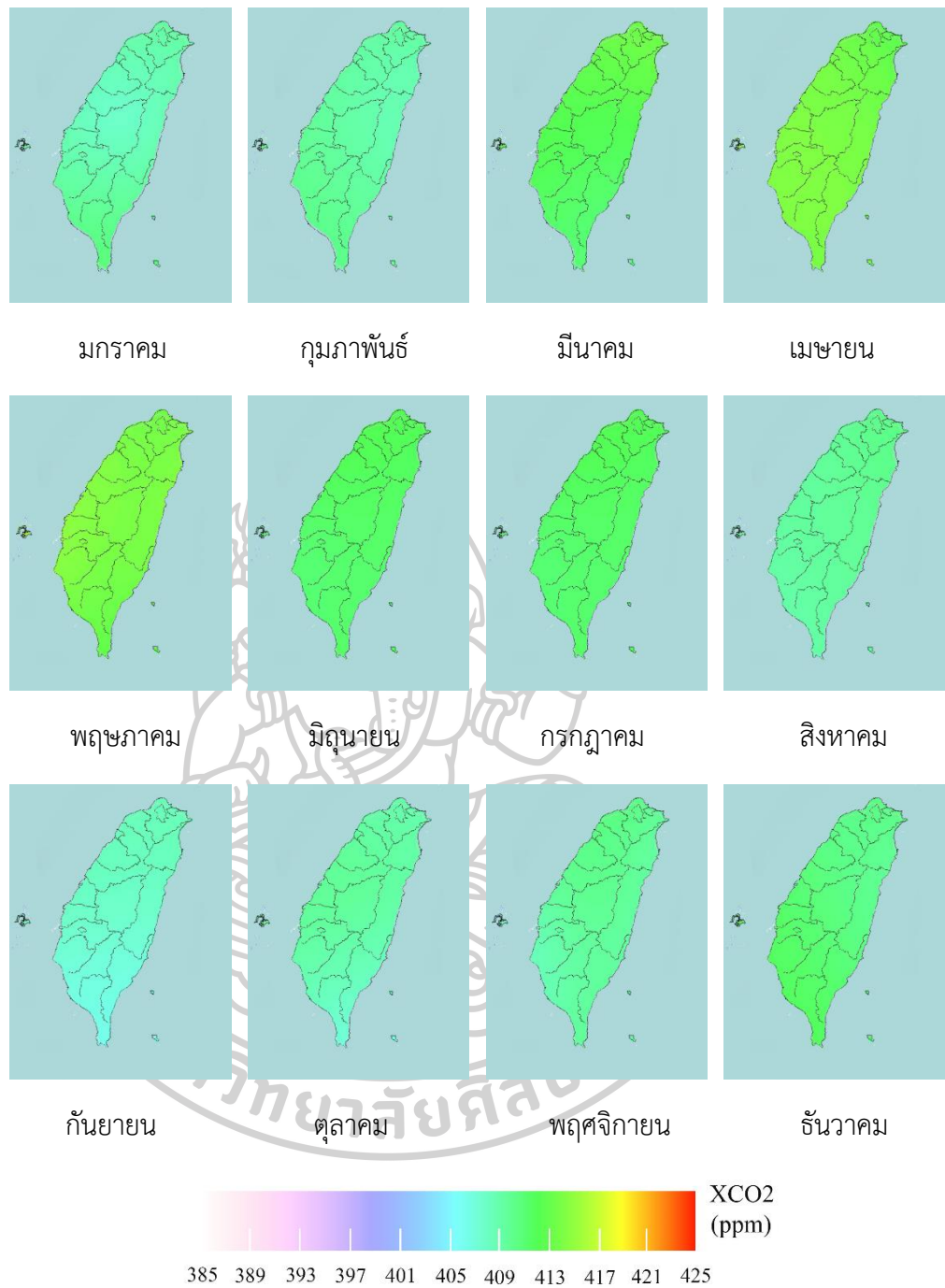




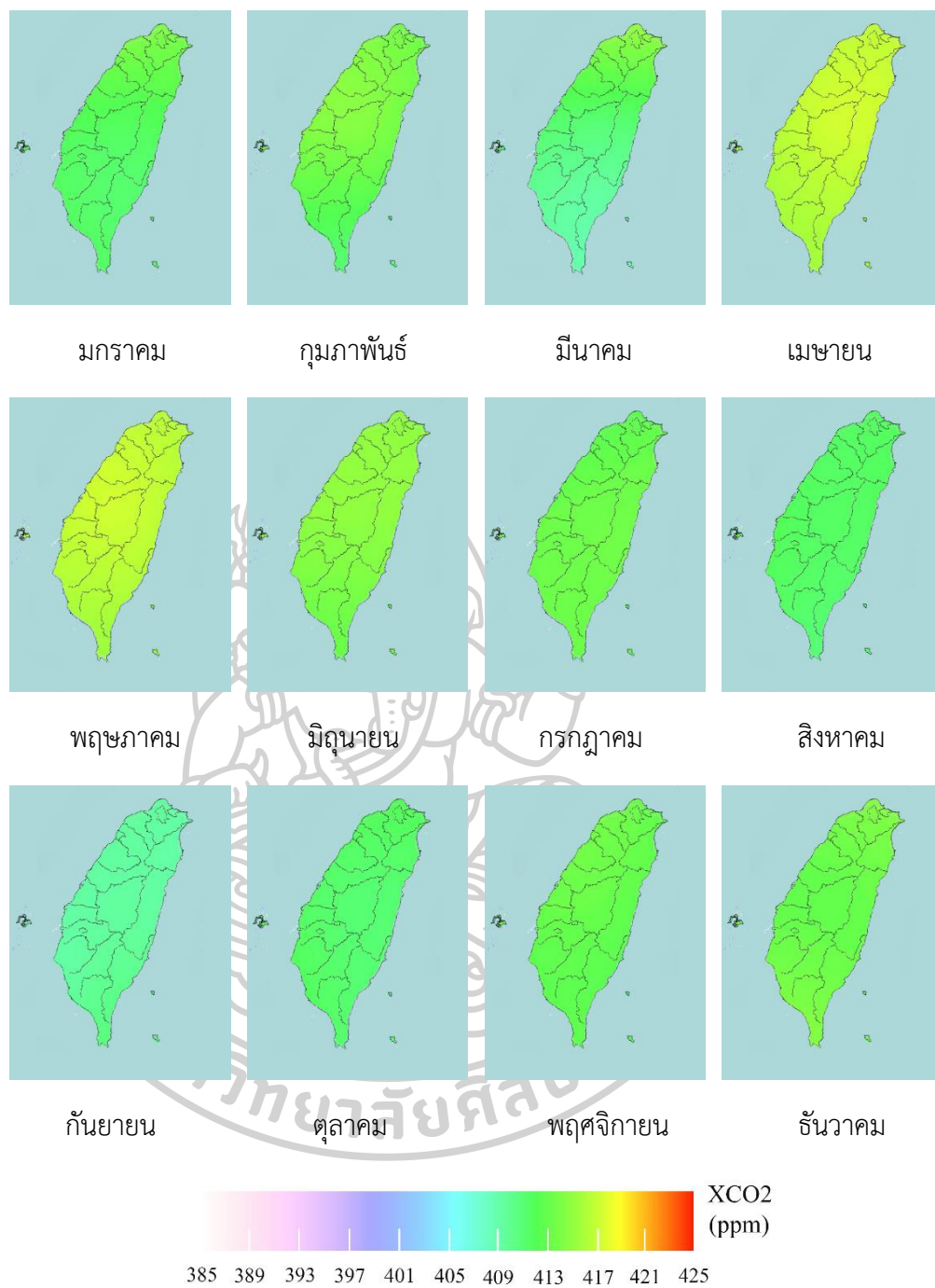
รูปที่ 67 แผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO₂) เฉลี่ยรายเดือน ของประเทศไต้หวันในปี ค.ศ. 2017



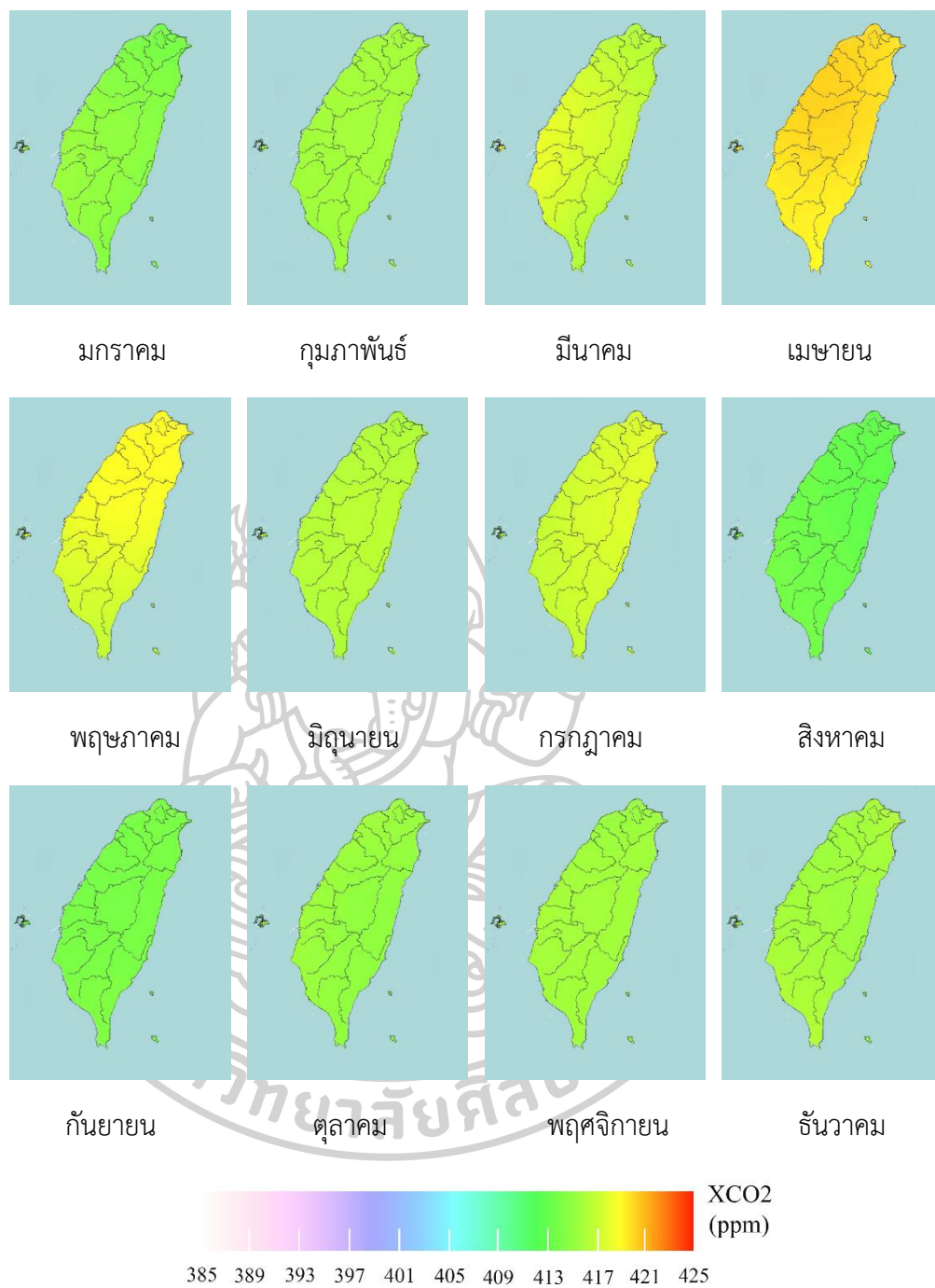
รูปที่ 68 แผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO₂) เฉลี่ยรายเดือน ของประเทศได้หวั่นใน ปี ค.ศ. 2018



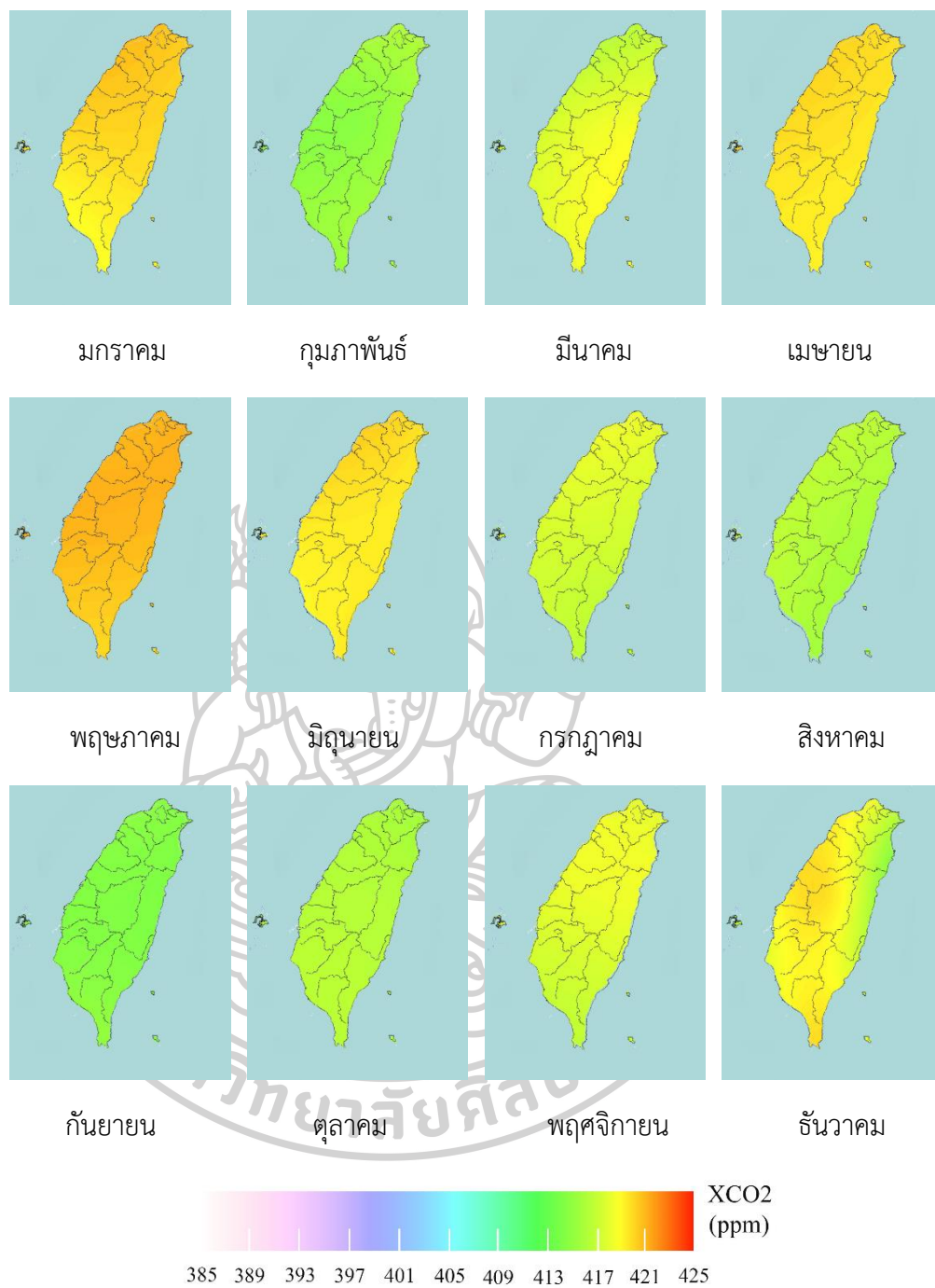
รูปที่ 69 แผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO₂) เฉลี่ยรายเดือน ของประเทศไต้หวันในปี ค.ศ. 2019



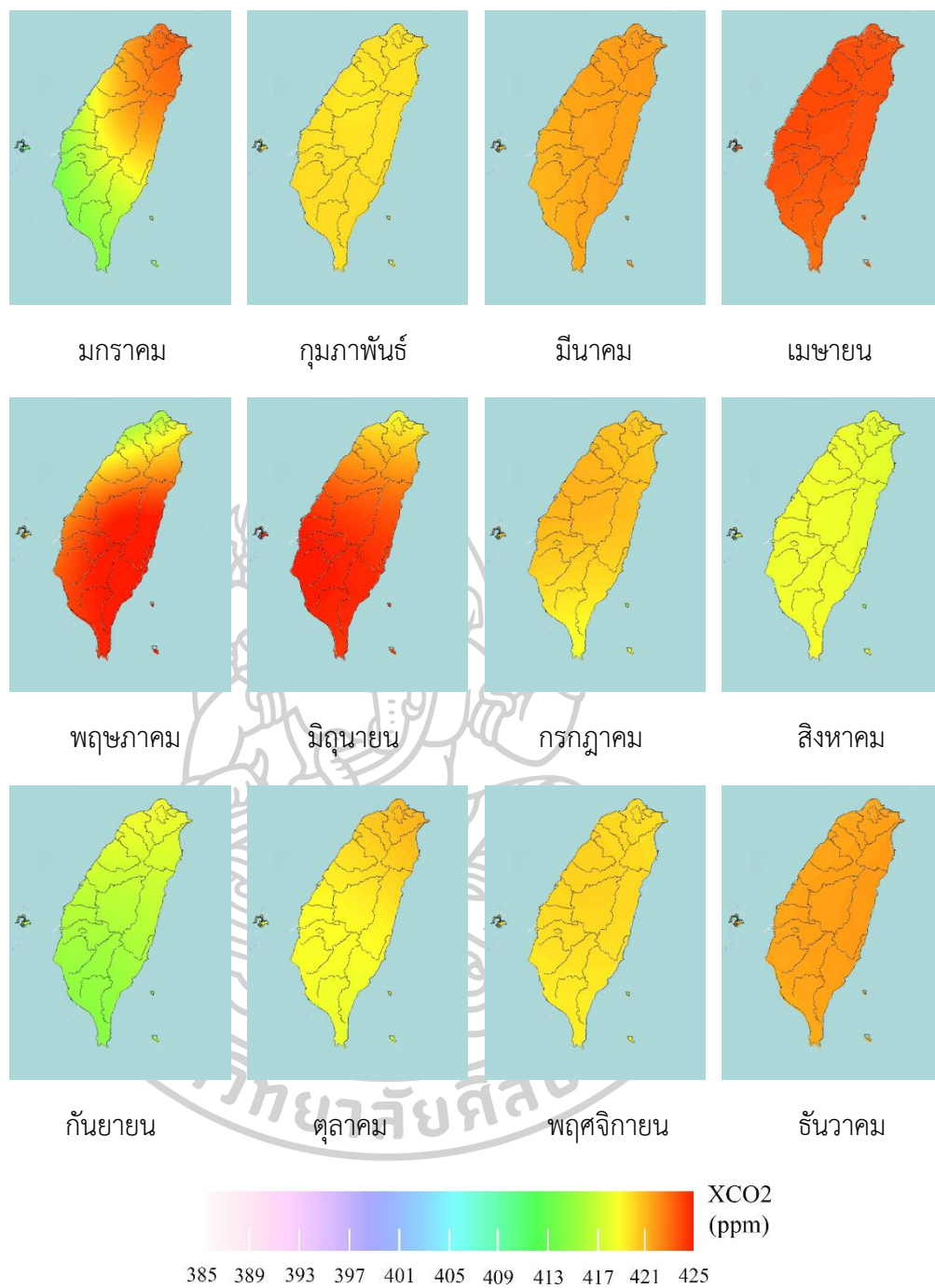
รูปที่ 70 แผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO₂) เฉลี่ยรายเดือน ของประเทศได้หวั่นใน ปี ค.ศ. 2020



รูปที่ 71 แผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO₂) เฉลี่ยรายเดือน ของประเทศไต้หวันในปี ค.ศ. 2021



รูปที่ 72 แผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO₂) เฉลี่ยรายเดือน ของประเทศไต้หวันในปี ค.ศ. 2022



รูปที่ 73 แผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO₂) เฉลี่ยรายเดือน ของประเทศได้หวั่นใน ปี ค.ศ. 2023

3.5 ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศต่อความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์

ในการศึกษานี้ได้หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศของสถานีต่าง ๆ โดยใช้สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson correlation coefficient) ในการบอกความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศกับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ โดยใช้ข้อมูลเฉลี่ยรายเดือนและแยกพิจารณาตามช่วงฤดูกาลของแต่ละสถานี

ผู้วิจัยใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลหรือตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปว่ามีความสัมพันธ์กันในระดับใด และมีความสัมพันธ์ในทิศทางใด โดยในงานวิจัยนี้ให้ x เป็นตัวแปรทางต่าง ๆ ในบรรยากาศ และ y เป็นค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ 16 การตีความค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Schober et al., 2018)

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Pearson Correlation Coefficient)	การตีความ (Interpretation)
0.00 – 0.10	ตัวแปรทั้งสองตัวมีความสัมพันธ์กันต่ำมาก
0.10 – 0.39	ตัวแปรทั้งสองตัวมีความสัมพันธ์กันต่ำ
0.40 – 0.69	ตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันปานกลาง
0.70 – 0.89	ตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันสูง
0.90 – 1.00	ตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันสูงมาก

3.5.1 ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศต่อความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ของประเทศไทย

1) ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศต่อความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ของประเทศไทย ที่สถานีนครปฐม

จากตารางที่ 17 ในฤดูร้อน ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนมีความสัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์สูงมาก โดยเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น มีความสัมพันธ์กับ PM₁₀ สูงเมื่อฝุ่น PM₁₀ มีปริมาณเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลง และมีความสัมพันธ์กับคาร์บอนมอนอกไซด์สูง เมื่อปริมาณของคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น

ในฤดูฝน ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนมีความสัมพันธ์กับคาร์บอนมอนอกไซด์สูงที่สุด เมื่อปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น มีความสัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์สูงมาก โดยเมื่อความชื้นสัมพัทธ์

เพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น มีความสัมพันธ์กับความเข้มแสงสูงมาก เมื่อความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง มีความสัมพันธ์กับค่าความรุนแรงของรังสี UV สูงมาก เมื่อความรุนแรงของรังสี UV เพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง มีความสัมพันธ์กับความดันอากาศสูง เมื่อความดันอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น และมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิสูง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง

ในฤดูหนาว ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิสูง เมื่ออุณหภูมิมิค่าเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลง และมีความสัมพันธ์สูงกับความรุนแรงของรังสี UV สูง เมื่อความรุนแรงของรังสี UV เพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 17 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันของตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศกับค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือน ในแต่ละช่วงฤดูกาลที่สถานีนครปฐม ประเทศไทย ตั้งแต่ เมษายน ค.ศ. 2023 ถึง เมษายน ค.ศ. 2024

Parameter	Summer		Rainy		Winter	
	r	N	r	N	r	N
CO (ppb)	0.725	4	0.979	4	-0.605	4
RH (%)	0.916	4	0.969	4	0.318	4
Light (Lux)	-0.687	4	-0.956	4	0.296	4
PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	-0.351	4	-0.670	4	-0.361	4
PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	-0.750	4	-0.667	4	-0.250	4
Pressure (hPa)	0.435	4	0.887	4	0.175	4
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	-0.158	4	-0.843	4	-0.871	4
UV (Index)	-	-	-0.947	4	0.829	4

2) ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศต่อความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ ของประเทศไทย ที่สถานีของ inTerLab ทั้ง 9 แห่ง

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แสดงดังตารางที่ 18 ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนของสถานีดินแดงมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนสูงมากในช่วงฤดูร้อน โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง ที่สถานีลาดกระบัง ค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนมีความสัมพันธ์กับความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยรายเดือนมากที่สุด ในช่วงฤดูหนาว โดยเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง สถานีลุมพินี ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือนมากที่สุดในช่วงฤดูหนาว โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนเพิ่มขึ้นที่เชียงใหม่ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์มีความสัมพันธ์เฉลี่ยรายเดือนกับอุณหภูมิมากที่สุดในช่วงฤดูหนาว เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น

สถานีเชียงราย ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์มีความสัมพันธ์เฉลี่ยรายเดือนกับอุณหภูมิมากที่สุดในช่วงฤดูหนาว เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ที่สถานีปทุมธานี ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์มีความสัมพันธ์กับความดันอากาศมากที่สุด ในช่วงฤดูหนาว เมื่อความดันอากาศเพิ่มมากขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มมากขึ้น สำหรับสถานีเพชรบูรณ์ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิมากที่สุด ในช่วงฤดูหนาว เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น เนื่องจากข้อมูลของตัวแปรทั้งสามขาดหายในช่วงฤดูฝนและฤดูหนาวที่สถานีพะเยา ทำให้ไม่สามารถสรุปได้ว่ามีตัวแปรใดบ้างที่มีผลต่อความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ และสถานีตาก ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิมากที่สุดในช่วงฤดูหนาว เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น

จากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนของสถานีส่วนใหญ่ได้รับอิทธิพลของอุณหภูมิ โดยเฉพาะในฤดูหนาวที่ความเข้มข้นเฉลี่ยรายเดือนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากข้อมูลเฉลี่ยรายเดือนในปี ค.ศ. 2023 มีเพียง 12 ค่า ความสัมพันธ์อาจมีความคลาดเคลื่อน และไม่ครอบคลุม ดังนั้นควรทำการวัดและเก็บข้อมูลในระยะยาว

ตารางที่ 18 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันของตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศกับค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือน ในแต่ละช่วงฤดูกาลที่สถานีของ interLab 9 สถานี ประเทศไทย ตั้งแต่ มกราคม ค.ศ. 2023 ถึง ธันวาคม ค.ศ. 2023

Stations /Province	Location	Parameter	Summer		Rainy		Winter	
			r	N	r	N	r	N
1. TH_BKK_DinDeang/ Bangkok	Din Daeng Road, opposite Phibun Prachasan School	RH (%)	-0.920	4	0.761	4	0.494	4
		Pressure (hPa)	0.942	4	0.964	4	-0.141	4
		AMB_TEMP (°C)	-0.994	4	-0.712	4	0.887	4
2. TH-BKK_Ladkrabang/ Bangkok	TOYOTA barawindsor, Ladkrabang	RH (%)	-0.028	4	-0.104	4	-0.817	4
		Pressure (hPa)	0.468	4	-0.081	4	-0.572	4
		AMB_TEMP (°C)	-0.578	4	-0.029	4	-0.585	4
3. TH_BKK_Lumphini/ Bangkok	Opposite Lumpini Park	RH (%)	-0.021	4	0.893	4	0.880	3
		Pressure (hPa)	-0.623	4	-	-	0.424	3
		AMB_TEMP (°C)	0.625	4	-0.187	4	0.993	3
4. TH_CMI/ Chiang Mai	P. Oranong Dormitory, near Chiang Mai Airport parking	RH (%)	-0.663	4	0.730	4	0.686	3
		Pressure (hPa)	-0.097	4	0.135	4	0.817	3
		AMB_TEMP (°C)	-0.292	4	0.566	4	0.839	3
5. TH_CRI/ Chiang Rai	Mae Fah Luang Subdistrict Administrative Organization	RH (%)	-0.802	4	-0.563	4	-0.751	4
		Pressure (hPa)	0.546	4	-0.260	4	-0.248	4
		AMB_TEMP (°C)	-0.252	4	0.533	4	-0.913	4
6. TH_LPN/ Lamphun	Silicon Vanli Learning Center	RH (%)	-0.778	3	0.195	4	-0.940	3
		Pressure (hPa)	0.666	3	-0.108	4	0.975	3
		AMB_TEMP (°C)	-0.632	3	-0.526	4	-0.830	3
7. TH_PNB/Phetchabun	Thung Saeng Luang Center	RH (%)	0.384	4	0.705	4	0.618	4
		Pressure (hPa)	0.251	4	-	-	-0.104	4
		AMB_TEMP (°C)	-0.708	4	-0.149	4	0.950	4
8. TH_PYO/ Phayao	Phayao Province Forest Fire Control Station	RH (%)	0.816	4	-	-	-	-
		Pressure (hPa)	0.878	4	-	-	-	-
		AMB_TEMP (°C)	-0.891	4	-	-	-	-
9. TH_TAK /Tak	Khlong Mae Kuet Luang	RH (%)	-0.424	4	0.843	4	0.943	4
		Pressure (hPa)	0.934	4	0.618	4	-0.379	4
		AMB_TEMP (°C)	-0.972	4	-0.809	4	0.974	4

3.5.2 ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศต่อความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ของประเทศไต้หวัน

1) ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศต่อความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ของประเทศไต้หวัน ที่สถานี Lulin แสดงดังตารางที่ 19 โดย

ในฤดูหนาว ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนมีความสัมพันธ์สูงมากกับความเข้มข้นของมีเทนเพียงตัวแปรเดียว โดยเมื่อปริมาณความเข้มข้นของมีเทนเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้น

ในฤดูใบไม้ผลิ ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของมีเทนสูงมาก โดยเมื่อปริมาณความเข้มข้นของมีเทนเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้น มีความสัมพันธ์กับปริมาณความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์สูง เมื่อปริมาณความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลง และมีความสัมพันธ์กับทิศทางของลมปานกลาง ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์จะมีความเข้มข้นลดลงเมื่อลมเปลี่ยนทิศจากทิศใต้เป็นมาจากทิศตะวันตกเฉียงใต้

ในฤดูร้อน ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของมีเทนสูง โดยเมื่อความเข้มข้นของมีเทนเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนจะเพิ่มขึ้น มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมปานกลาง โดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง มีความสัมพันธ์กับปริมาณของโอโซนปานกลาง โดยเมื่อปริมาณโอโซนเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น และมีความสัมพันธ์กับปริมาณ PM2.5 สูง เมื่อปริมาณความเข้มข้นของ PM2.5 เพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง และมีความสัมพันธ์กับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เมื่อความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง

ในฤดูใบไม้ร่วง ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนมีความสัมพันธ์กับปริมาณความเข้มข้นของมีเทนสูงมาก เมื่อความเข้มข้นของมีเทนเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น มีความสัมพันธ์กับ PM2.5 สูง เมื่อความเข้มข้นของ PM2.5 เพิ่มขึ้นปริมาณความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง และมีความสัมพันธ์กับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่มีความสัมพันธ์ปานกลาง โดยความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง

ตารางที่ 19 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันของตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศกับค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือน ในแต่ละช่วงฤดูกาลที่สถานี Lulin ประเทศไต้หวัน ตั้งแต่ มกราคม ค.ศ. 2017 ถึง สิงหาคม ค.ศ. 2023

Parameter	Winter		Spring		Summer		Fall	
	r	N	r	N	r	N	r	N
AMB_TEMP (°C)	-0.374	19	-0.192	20	-0.517	19	-0.416	21
CO (ppb)	-0.077	20	0.256	20	-0.278	21	-0.079	24
CH ₄ (ppm)	0.930	20	0.907	20	0.809	21	0.890	24
CGR4 (W m ⁻²)	-0.179	12	0.173	18	-0.019	15	-0.236	20
O ₃ (ppb)	0.206	16	0.162	18	0.613	14	0.120	18
PM2.5 (micro gram m ⁻³)	-0.215	15	-0.011	16	-0.786	17	-0.703	18
Pressure (mm Hg)	-0.305	19	-0.341	20	-0.115	18	0.011	20
Rainfall (mm hr ⁻¹)	-0.115	19	-0.172	18	-0.304	18	0.261	18
RH (%)	-0.317	19	-0.330	20	-0.169	19	-0.115	18
SO ₂ (ppb)	-0.838	11	-0.830	11	-0.828	11	-0.638	18
Solar radiation (W m ⁻²)	-0.268	16	-0.265	16	0.070	16	-0.363	16
UVB (UV index)	-0.439	19	0.009	20	-0.298	19	0.028	21
WD (degree)	-0.089	18	-0.579	17	0.220	17	0.273	21
WS (m s ⁻¹)	-0.247	16	-0.458	17	-0.208	17	0.255	20
Visible (km)	0.222	16	0.070	14	0.189	16	0.308	18



2) ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศต่อความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ของประเทศไทยได้หวั่น ที่สถานีของ EPA 6 สถานี โดยผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 20 – 25

สำหรับสถานี Yangming ในช่วงฤดูหนาวและในช่วงฤดูใบไม้ผลิมีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยต่อเดือนไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา ในช่วงฤดูร้อน พบว่าค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยต่อเดือน มีความสัมพันธ์สูงกับความเข้มข้นของซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และ PM2.5 โดยเมื่อ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และ PM2.5 เพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง และเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ในช่วงฤดูใบไม้ร่วง พบว่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยต่อเดือน มีความสัมพันธ์สูงกับ ทิศทางลม PM10 ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และไนตริกออกไซด์ เมื่อ PM10 ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และไนตริกออกไซด์เพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยต่อเดือนลดลง ดังแสดงในตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันของตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศกับค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือน ในแต่ละช่วงฤดูกาลที่สถานี Yangming ประเทศไทยได้หวั่น ตั้งแต่ กุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2019 ถึง พฤษภาคม ค.ศ. 2022

Parameter	Winter		Spring		Summer		Fall	
	r	N	r	N	r	N	r	N
AMB_TEMP (°C)	-0.444	9	-0.068	9	-0.785	9	-0.545	9
CO (ppb)	-0.490	9	-0.177	9	-0.708	8	-0.635	9
NO (ppm)	-0.411	9	-0.068	9	-0.629	8	-0.757	9
NO2 (ppm)	-0.423	9	-0.211	9	-0.655	8	-0.665	9
O ₃ (ppb)	0.449	9	0.017	9	0.642	9	-0.062	8
PM10 (micro gram m ⁻³)	-0.121	9	-0.199	9	-0.741	7	-0.803	7
PM2.5 (micro gram m ⁻³)	-0.172	8	-0.252	9	-0.865	7	-0.599	9
Rainfall (mm hr ⁻¹)	0.034	9	-0.131	9	-0.414	9	0.245	9
RH (%)	0.480	9	0.322	9	0.759	7	0.607	9
SO ₂ (ppb)	-0.014	8	-0.281	9	-0.818	9	-0.777	9
WD (degree)	0.131	9	-0.773	9	-0.284	9	0.834	6
WS (m s ⁻¹)	0.352	9	0.245	9	0.442	9	0.624	6

ตารางที่ 21 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันของตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศกับค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือน ในแต่ละช่วงฤดูกาลที่สถานี Songshan ประเทศไต้หวัน ตั้งแต่ กุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2019 ถึง พฤษภาคม ค.ศ. 2022

Parameter	Winter		Spring		Summer		Fall	
	r	N	r	N	r	N	r	N
AMB_TEMP (°C)	-0.068	9	0.264	9	0.725	9	-0.370	8
CO (ppb)	0.291	9	0.129	9	0.243	9	0.661	9
NO (ppm)	-0.052	9	0.040	9	0.471	9	0.212	9
NO2 (ppm)	0.302	9	0.275	9	0.191	9	0.687	9
O ₃ (ppb)	0.340	9	-0.318	9	-0.389	9	0.208	9
PM10 (micro gram m ⁻³)	0.413	9	0.046	9	0.095	7	0.072	8
PM2.5 (micro gram m ⁻³)	0.193	9	0.067	9	-0.444	7	-0.011	9
Rainfall (mm hr ⁻¹)	-0.518	9	-0.249	9	-0.255	9	-0.276	9
RH (%)	-0.419	9	-0.068	9	-0.262	9	0.365	9
SO ₂ (ppb)	-0.653	9	-0.444	9	0.193	8	0.193	9
WD (degree)	0.069	9	-0.064	9	0.097	9	-0.192	9
WS (m s ⁻¹)	-0.018	9	-0.084	9	0.016	9	0.022	9

สำหรับสถานี Yilan ในช่วงฤดูหนาวและฤดูร้อนความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา ในช่วงฤดูใบไม้ผลิความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนมีความสัมพันธ์กับไนตริกออกไซด์สูง และความเร็วลมสูงมาก เมื่อไนตริกออกไซด์ และความเร็วลมเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนจะเพิ่มขึ้นและในช่วงฤดูใบไม้ร่วงความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนมีความสัมพันธ์กับซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ทิศทางลม ความชื้นสัมพัทธ์ และโอโซนสูง เมื่อค่าของตัวแปรเหล่านี้เพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนลดลง ดังแสดงในตารางที่ 22

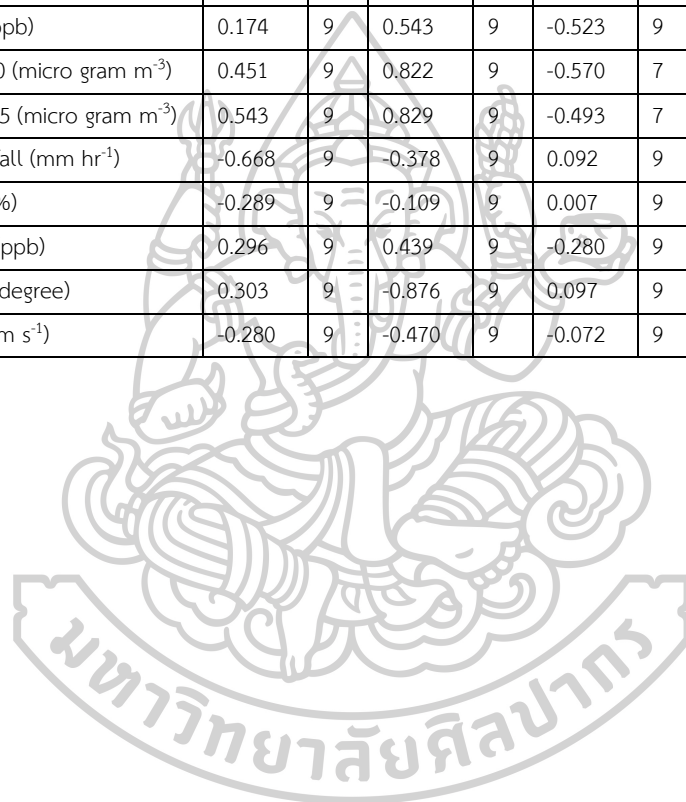
ตารางที่ 22 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันของตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศกับค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือน ในแต่ละช่วงฤดูกาลที่สถานี Yilan ประเทศไต้หวัน ตั้งแต่ กุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2019 ถึง พฤษภาคม ค.ศ. 2022

Parameter	Winter		Spring		Summer		Fall	
	r	N	r	N	r	N	r	N
AMB_TEMP (°C)	-0.617	7	0.530	8	0.238	6	-0.643	6
CO (ppb)	0.047	9	-0.360	8	-0.307	9	-0.527	9
NO (ppm)	0.390	7	0.826	8	-0.045	7	0.263	7
NO ₂ (ppm)	-0.167	7	-0.434	8	-0.553	7	0.608	7
O ₃ (ppb)	0.169	9	-0.347	8	0.402	9	-0.723	9
PM ₁₀ (micro gram m ⁻³)	0.409	9	-0.077	12	-0.132	7	-0.471	8
PM _{2.5} (micro gram m ⁻³)	0.430	9	-0.108	8	-0.720	7	-0.336	9
Rainfall (mm hr ⁻¹)	-0.195	9	-0.312	11	0.054	9	-0.367	9
RH (%)	-0.192	9	0.013	11	0.215	9	-0.727	9
SO ₂ (ppb)	-0.107	7	0.111	8	-0.370	8	-0.810	8
WD (degree)	0.214	9	-0.341	12	-0.702	9	-0.760	9
WS (m s ⁻¹)	0.568	9	0.952	11	0.654	9	0.693	8

ในช่วงฤดูหนาวและฤดูร้อนความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยาที่สถานี Dali แต่ในช่วงฤดูใบไม้ผลิความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนมีความสัมพันธ์กับทิศทางลม ไนโตรเจนไดออกไซด์ PM_{2.5} PM₁₀ และคาร์บอนมอนอกไซด์สูง โดยเมื่อทิศทางลมเปลี่ยนความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนลดลง และเมื่อ ไนโตรเจนไดออกไซด์ PM_{2.5} PM₁₀ และคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนเพิ่มขึ้น และในช่วงฤดูใบไม้ร่วงความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนมีความสัมพันธ์กับความเร็วลม ซึ่งเมื่อความเร็วลมเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนลดลง ดังแสดงในตารางที่ 24

ตารางที่ 23 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันของตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศกับค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือน ในแต่ละช่วงฤดูกาลที่สถานี Dali ประเทศไต้หวัน ตั้งแต่ กุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2019 ถึง พฤษภาคม ค.ศ. 2022

Parameter	Winter		Spring		Summer		Fall	
	r	N	r	N	r	N	r	N
AMB_TEMP (°C)	-0.354	9	-0.783	9	-0.274	9	-0.408	9
CO (ppb)	0.213	9	0.821	9	-0.259	9	0.097	9
NO (ppm)	-0.002	9	0.539	9	0.488	9	0.689	9
NO ₂ (ppm)	0.203	9	0.836	9	-0.086	9	0.377	9
O ₃ (ppb)	0.174	9	0.543	9	-0.523	9	-0.670	9
PM ₁₀ (micro gram m ⁻³)	0.451	9	0.822	9	-0.570	7	0.307	8
PM _{2.5} (micro gram m ⁻³)	0.543	9	0.829	9	-0.493	7	0.375	9
Rainfall (mm hr ⁻¹)	-0.668	9	-0.378	9	0.092	9	-0.473	9
RH (%)	-0.289	9	-0.109	9	0.007	9	0.524	9
SO ₂ (ppb)	0.296	9	0.439	9	-0.280	9	-0.582	9
WD (degree)	-0.303	9	-0.876	9	0.097	9	0.448	9
WS (m s ⁻¹)	-0.280	9	-0.470	9	-0.072	9	-0.803	9



ตารางที่ 24 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันของตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศกับค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือน ในแต่ละช่วงฤดูกาลที่สถานี Shanhua ประเทศไต้หวัน ตั้งแต่ กุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2019 ถึง พฤษภาคม ค.ศ. 2022

Parameter	Winter		Spring		Summer		Fall	
	r	N	r	N	r	N	r	N
AMB_TEMP (°C)	0.058	9	-0.624	12	0.145	8	0.008	8
CO (ppb)	-0.790	9	0.403	12	-0.404	8	0.049	8
NO (ppm)	-0.284	9	-0.214	11	-0.527	8	-0.047	8
NO ₂ (ppm)	0.327	9	0.795	11	0.692	8	0.303	8
O ₃ (ppb)	-0.508	9	0.366	12	-0.331	8	-0.597	7
PM ₁₀ (micro gram m ⁻³)	-0.485	9	0.321	12	-0.556	6	-0.423	7
PM _{2.5} (micro gram m ⁻³)	-0.486	9	0.619	12	-0.698	6	-0.371	8
Rainfall (mm hr ⁻¹)	0.558	9	-0.431	12	-0.091	8	0.192	8
RH (%)	0.252	9	-0.306	12	0.082	8	0.563	7
SO ₂ (ppb)	-0.543	8	0.133	11	0.321	8	-0.282	8
WD (degree)	0.055	9	0.640	12	0.056	8	0.432	8
WS (m s ⁻¹)	-0.225	9	0.078	12	-0.477	8	-0.353	8

สำหรับสถานี Hengchun ดังแสดงในตารางที่ 25 ในช่วงฤดูหนาวและฤดูใบไม้ร่วงความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยา ในช่วงฤดูใบไม้ผลิความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนมีความสัมพันธ์กับไนโตรเจนไดออกไซด์ และในช่วงฤดูร้อนความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนมีความสัมพันธ์กับไนตริกไดออกไซด์สูง เมื่อไนตริกไดออกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนเพิ่มขึ้น และมีความสัมพันธ์กับ PM_{2.5} เมื่อ PM_{2.5} เพิ่มขึ้นความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนลดลง

ตารางที่ 25 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศกับค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือน ในแต่ละช่วงฤดูกาลที่สถานี Hengchun ประเทศไต้หวัน ตั้งแต่ กุมภาพันธ์ ปี ค.ศ. 2019 ถึง พฤษภาคม ค.ศ. 2022

Parameter	Winter		Spring		Summer		Fall	
	r	N	r	N	r	N	r	N
AMB_TEMP (°C)	-0.151	9	-0.273	12	0.516	8	-0.112	9
CO (ppb)	0.520	9	-0.142	12	0.199	8	0.205	9
NO (ppm)	-0.442	8	-0.045	10	0.904	8	0.157	9
NO ₂ (ppm)	-0.304	8	-0.916	10	-0.193	8	-0.294	9
O ₃ (ppb)	-0.624	9	-0.209	12	0.055	8	0.193	9
PM ₁₀ (micro gram m ⁻³)	-0.468	9	-0.595	12	-0.361	6	-0.119	8
PM _{2.5} (micro gram m ⁻³)	-0.460	9	-0.729	11	-0.838	7	-0.134	9
Rainfall (mm hr ⁻¹)	0.479	9	0.242	12	-0.239	8	-0.524	9
RH (%)	0.645	9	0.342	12	-0.299	8	-0.305	9
SO ₂ (ppb)	0.503	8	-0.594	12	-0.181	8	-0.294	7
WD (degree)	0.116	9	-0.428	12	0.281	8	-0.283	9
WS (m s ⁻¹)	-0.023	9	0.137	12	-0.574	8	0.014	9

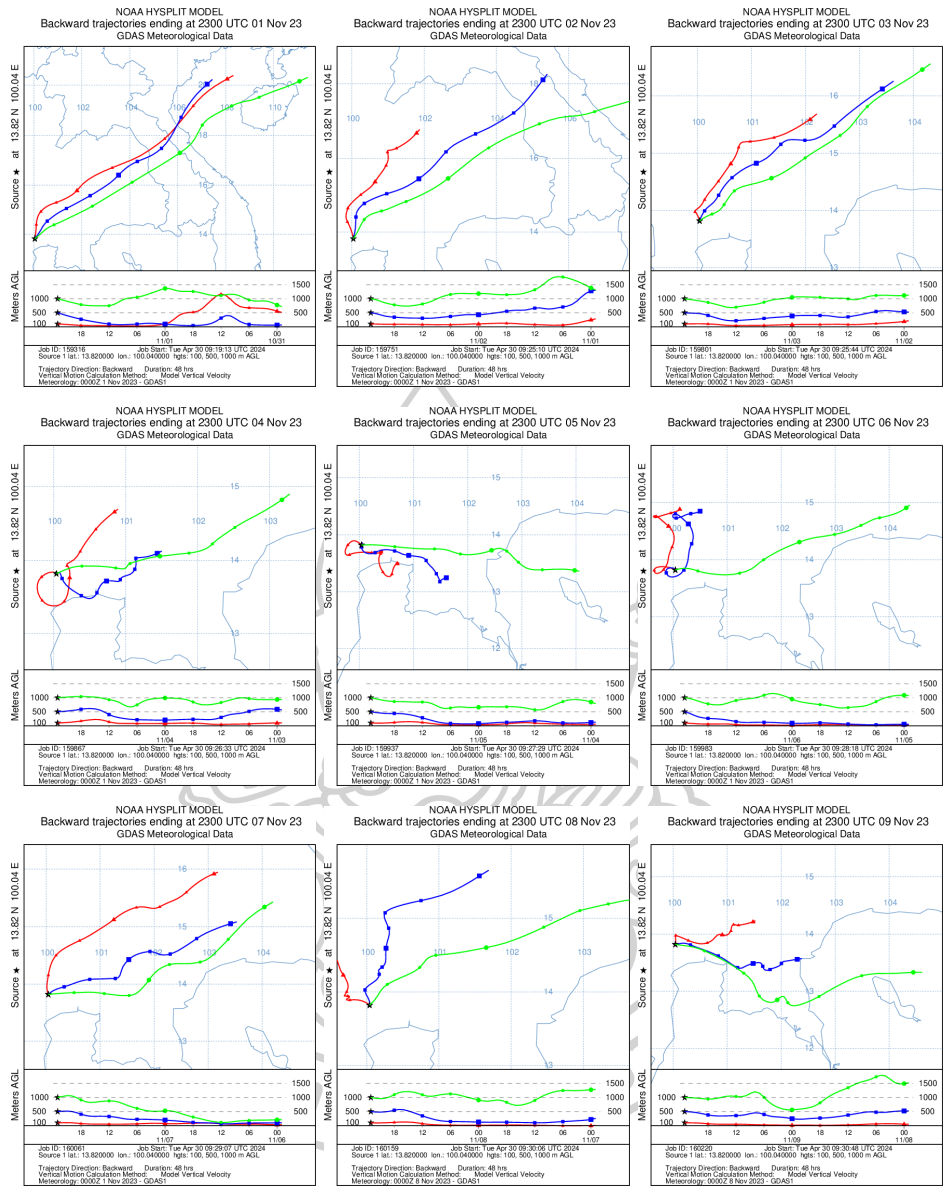
สำหรับสถานี Songshan และสถานี Shanhua ในทุกช่วงฤดูกาลความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรต่าง ๆ ในบรรยากาศดังแสดงในตารางที่ 21 และ ตารางที่ 24

3.6 การศึกษาการเคลื่อนที่ของมวลอากาศต่อความแปรปรวนของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ของประเทศไทย และประเทศไต้หวัน

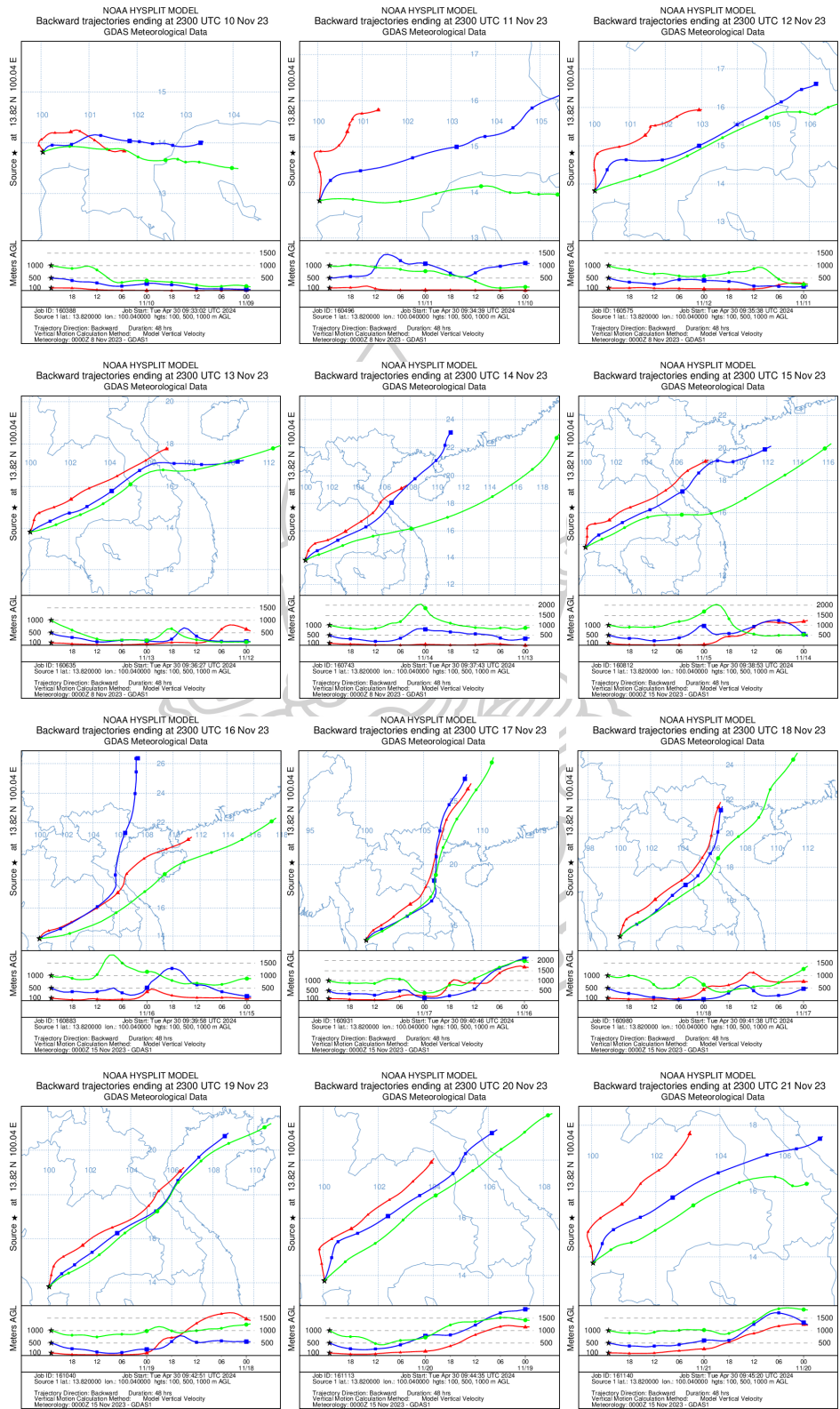
ในการศึกษาที่มาของมวลอากาศที่เคลื่อนที่มายังสถานีวัดภาคพื้นจากแบบจำลอง HYSPLIT ซึ่งเป็นแบบจำลองการเคลื่อนที่ที่ให้ข้อมูลวิถีการเคลื่อนที่ของควันโดยการติดตามผืนอากาศที่ถูกพัดพาโดยกระแสลมเฉลี่ย 3 มิติของแบบจำลองอุตุนิยมวิทยา ซึ่งไม่รวมความปั่นป่วนของอากาศจากเว็บไซต์ <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php> โดยผู้วิจัยใช้ในการศึกษาทิศทางของมวลอากาศที่เคลื่อนที่มายังสถานีนครปฐม และสถานี Lulin และวิเคราะห์ร่วมกับกราฟสถิติสะสมของค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในทิศทางลมต่าง ๆ รายชั่วโมง ของสถานีนครปฐม และสถานี Lulin ในแต่ละวันในเดือนที่มีค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนสูงที่สุดในช่วงข้อมูลที่ใช้ทำการศึกษาคือ ตั้งแต่เดือนเมษายน ปี ค.ศ. 2023 ถึง เดือนเมษายน ปี ค.ศ. 2024 ซึ่งมีค่าสูงที่สุดในเดือน พฤศจิกายน ปี ค.ศ. 2023 ของสถานีนครปฐมประเทศไทย และ ตั้งแต่เดือนมกราคม ปี ค.ศ. 2017 ถึง เดือนสิงหาคม ปี ค.ศ. 2024 ของสถานี Lulin ที่มีค่าสูงที่สุดในเดือนเมษายน ปี ค.ศ. 2023

3.6.1 การศึกษาการเคลื่อนที่ของมวลอากาศต่อความแปรปรวนของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ของประเทศไทยที่สถานีนครปฐม

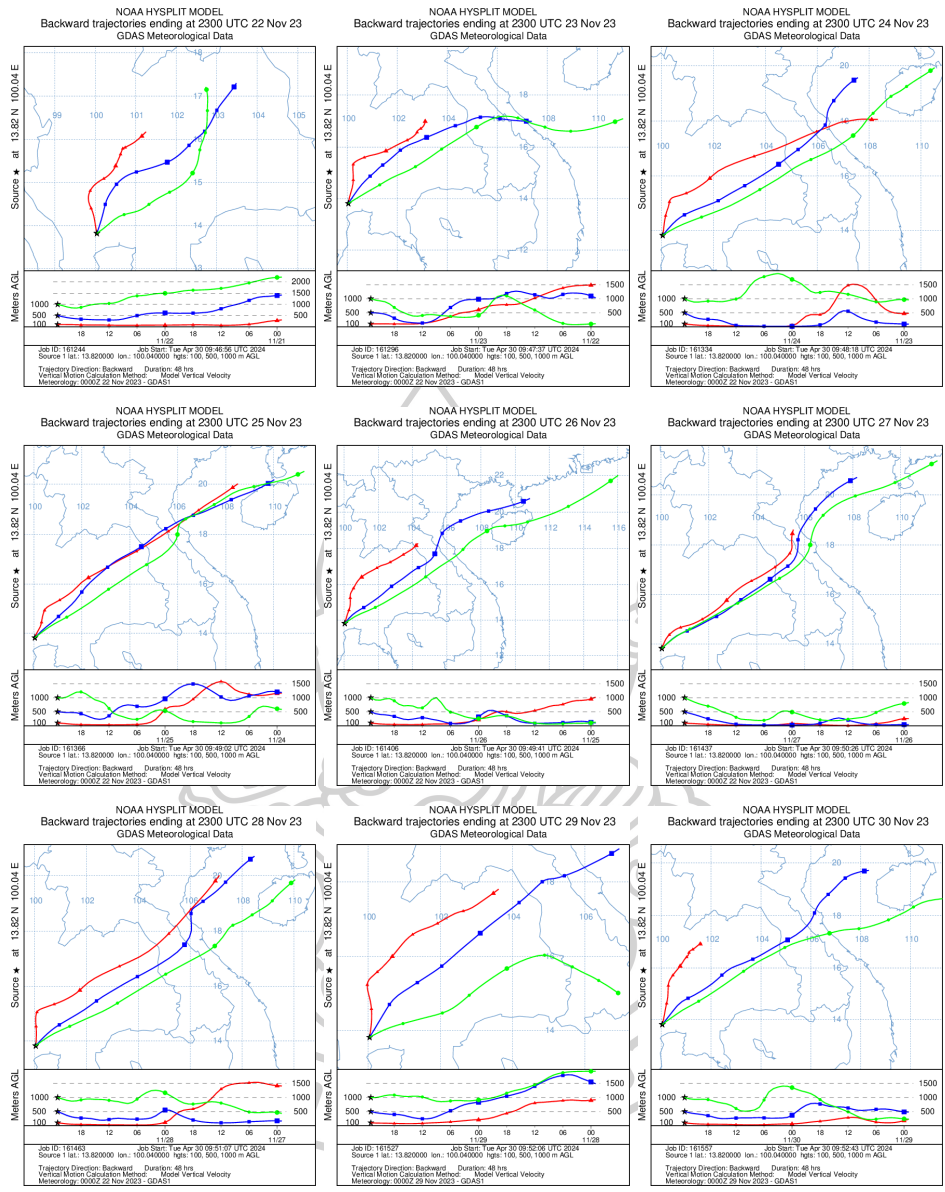
การเคลื่อนที่ของมวลอากาศต่อความแปรปรวนของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ของประเทศไทย ที่สถานีนครปฐม ซึ่งเครื่องมือวัดตั้งอยู่ที่ความสูง 72 เมตรเหนือระดับน้ำทะเล จากข้อมูลที่ได้จากการวัดในช่วงที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่สุดในเดือนพฤศจิกายน ปี ค.ศ. 2023 โดยผู้วิจัยเลือกศึกษาที่ระดับความสูง 100 500 และ 1000 เมตรเหนือระดับน้ำทะเล พบว่ามีมวลของอากาศเคลื่อนที่มาจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือ สอดคล้องกันกับผลที่ได้จากกราฟสถิติสะสม ซึ่งมีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ประมาณ 400-500 ppm (สีน้ำเงิน) สะสมจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NNE) ดังแสดงในรูปที่ 74 - 75



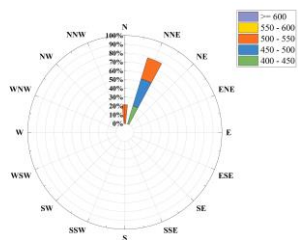
รูปที่ 74 เส้นทางการเคลื่อนที่ของมวลอากาศที่ได้จากแบบจำลอง HYSPLIT แบบย้อนกลับมายังสถานี นครปฐม ในวันที่ 1 – 30 พฤศจิกายน ปี ค.ศ. 2023 ซึ่งเคลื่อนที่มาจากทิศทางต่าง ๆ (วันที่ได้รับจะ บอกวันเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ โดยจุดตัด ๆ ไปของแต่ละเส้นทางแสดงตำแหน่งของมวลอากาศที่ เคลื่อนที่ไปสำหรับความสูงของมวลอากาศที่แต่ละจุดบอกด้วยกราฟด้านล่างของรูป)



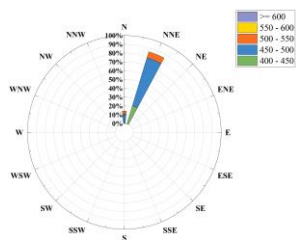
รูปที่ 74 (ต่อ)



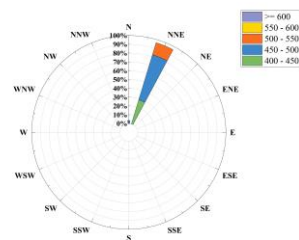
รูปที่ 74 (ต่อ)



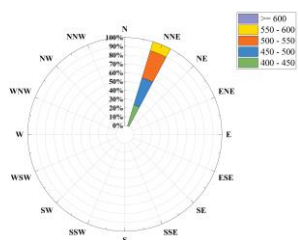
01/11/2023



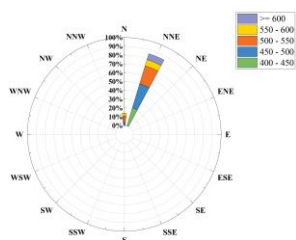
02/11/2023



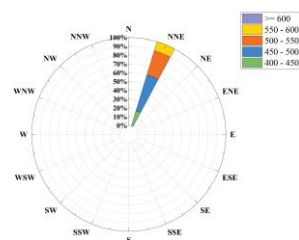
03/11/2023



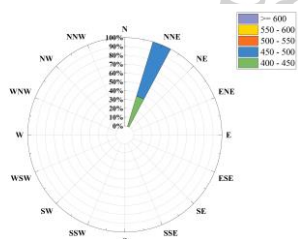
04/11/2023



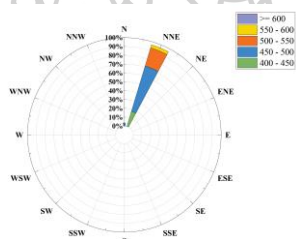
05/11/2023



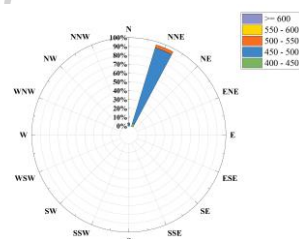
06/11/2023



07/11/2023

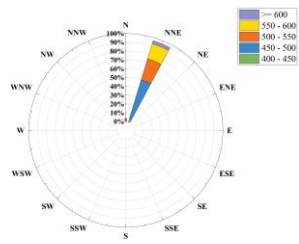


08/11/2023

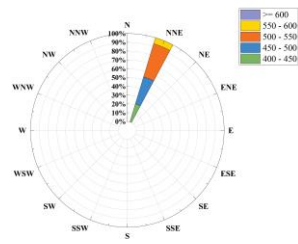


09/11/2023

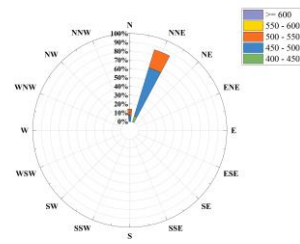
รูปที่ 75 กราฟความถี่สะสมของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในทิศทางลมต่าง ๆ ที่พัดเข้ามามายังสถานี นครปฐม ในวันที่ 1 – 30 พฤศจิกายน ปี ค.ศ. 2023



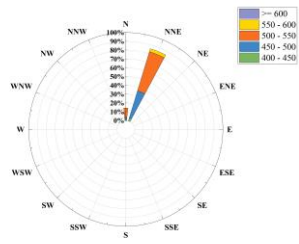
10/11/2023



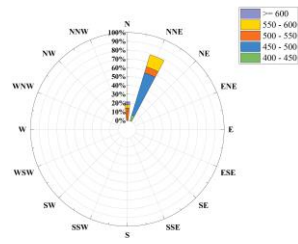
11/11/2023



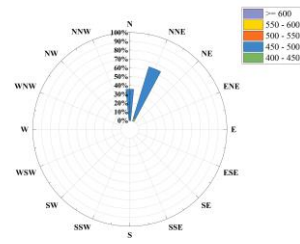
12/11/2023



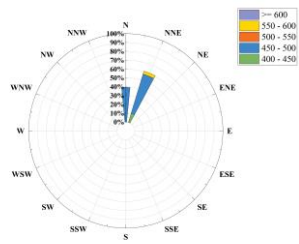
13/11/2023



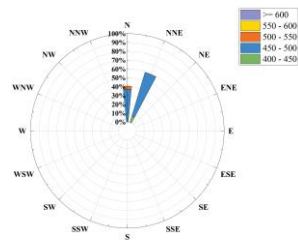
14/11/2023



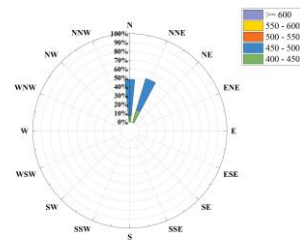
15/11/2023



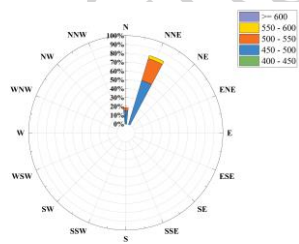
16/11/2023



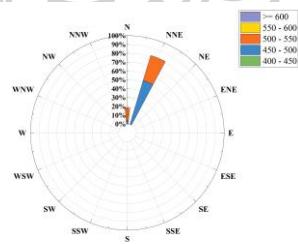
17/11/2023



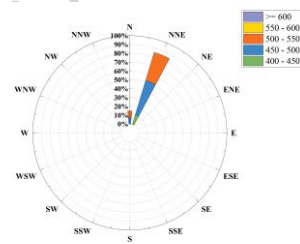
18/11/2023



19/11/2023

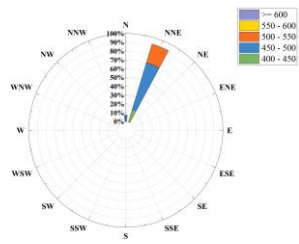


20/11/2023

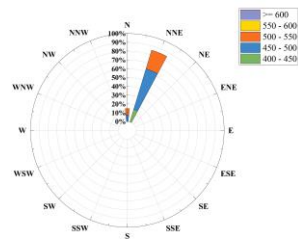


21/11/2023

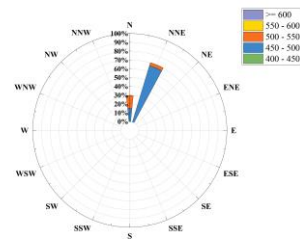
รูปที่ 75 (ต่อ)



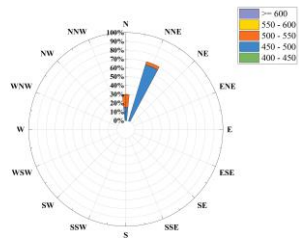
22/11/2023



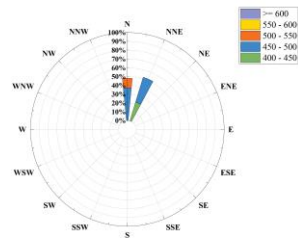
23/11/2023



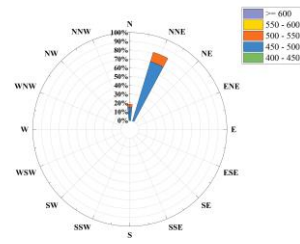
24/11/2023



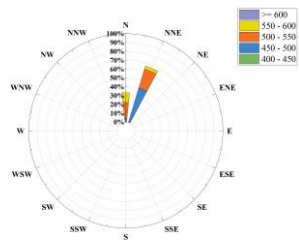
25/11/2023



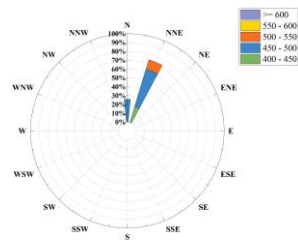
26/11/2023



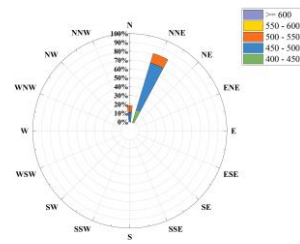
27/11/2023



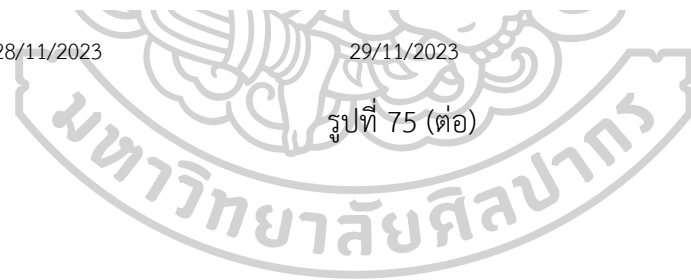
28/11/2023



29/11/2023



30/11/2023

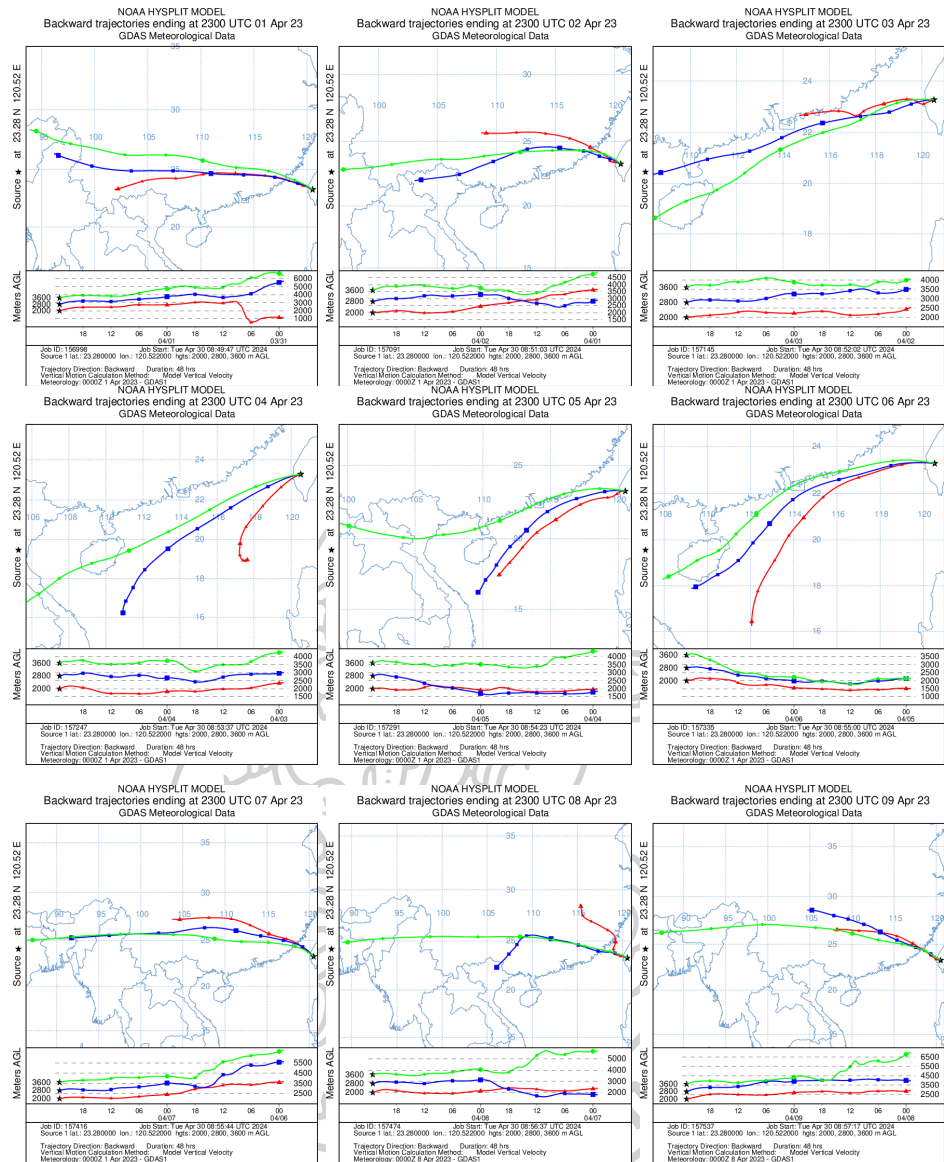


รูปที่ 75 (ต่อ)

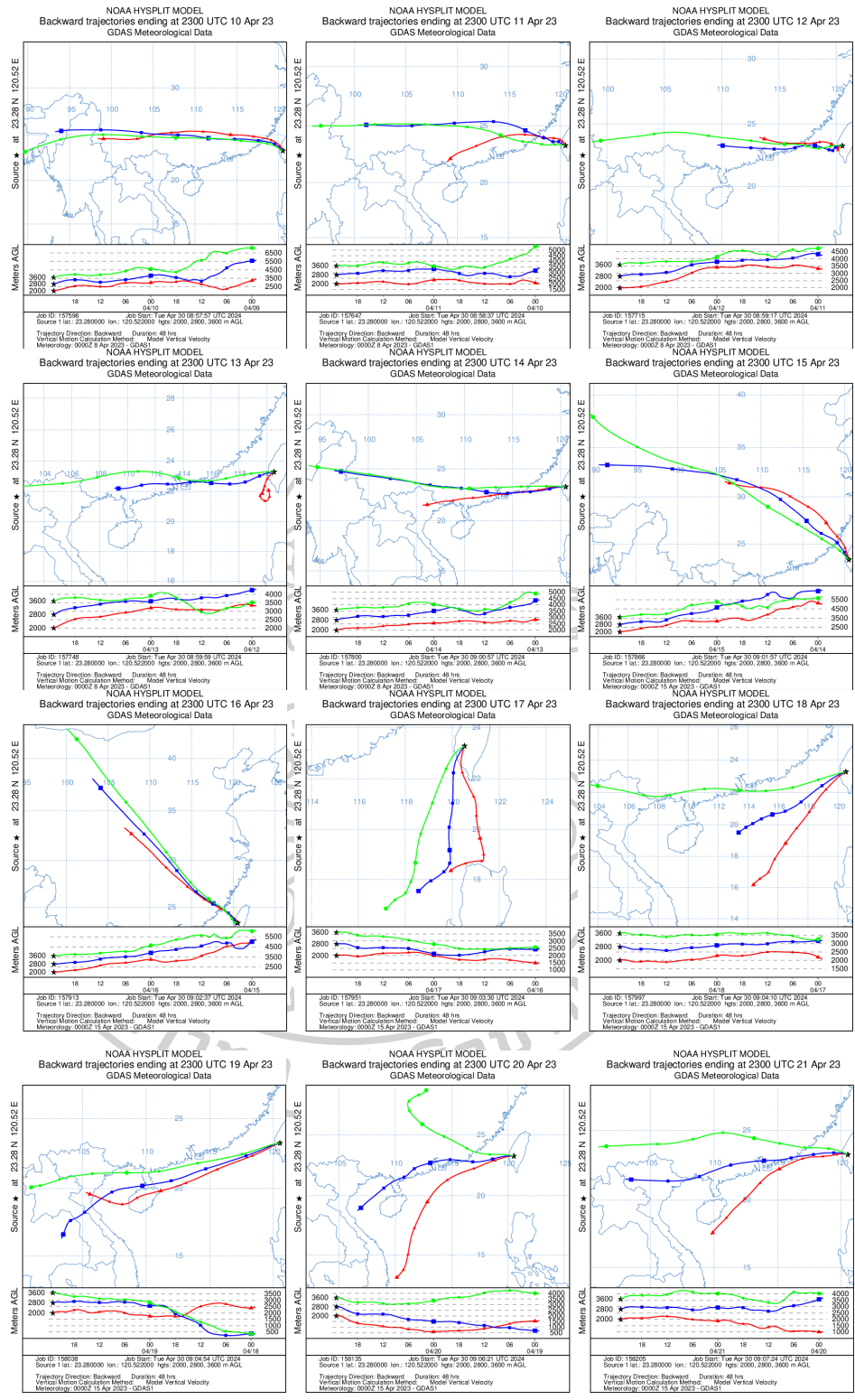
3.6.2 การศึกษาการเคลื่อนที่ของมวลอากาศต่อความแปรปรวนของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ของประเทศไต้หวัน ที่สถานี Lulin

การศึกษาการเคลื่อนที่ของมวลอากาศต่อความแปรปรวนของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ของประเทศไต้หวัน ที่สถานี Lulin จากข้อมูลที่มีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดของสถานี Lulin ในเดือนเมษายน ปี ค.ศ. 2023 ซึ่งสถานีตั้งอยู่ที่ความสูง 2,862 กิโลเมตรเหนือระดับน้ำทะเล โดยผู้วิจัยเลือกศึกษาที่ระดับความสูง 2000 2800 และ 3600 เมตรเหนือระดับน้ำทะเล พบว่ามีมวลของอากาศส่วนใหญ่เคลื่อนที่มาจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ ซึ่งสอดคล้องกันกับผลที่ได้จากกราฟสถิติสะสม ยกตัวอย่างในวันที่ 19 เมษายน ปี ค.ศ. 2023 ซึ่งมีความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ประมาณ 420-430 ppm (สีน้ำเงิน) สะสมจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ (SSW) ดังแสดงในรูปที่ 76 -77

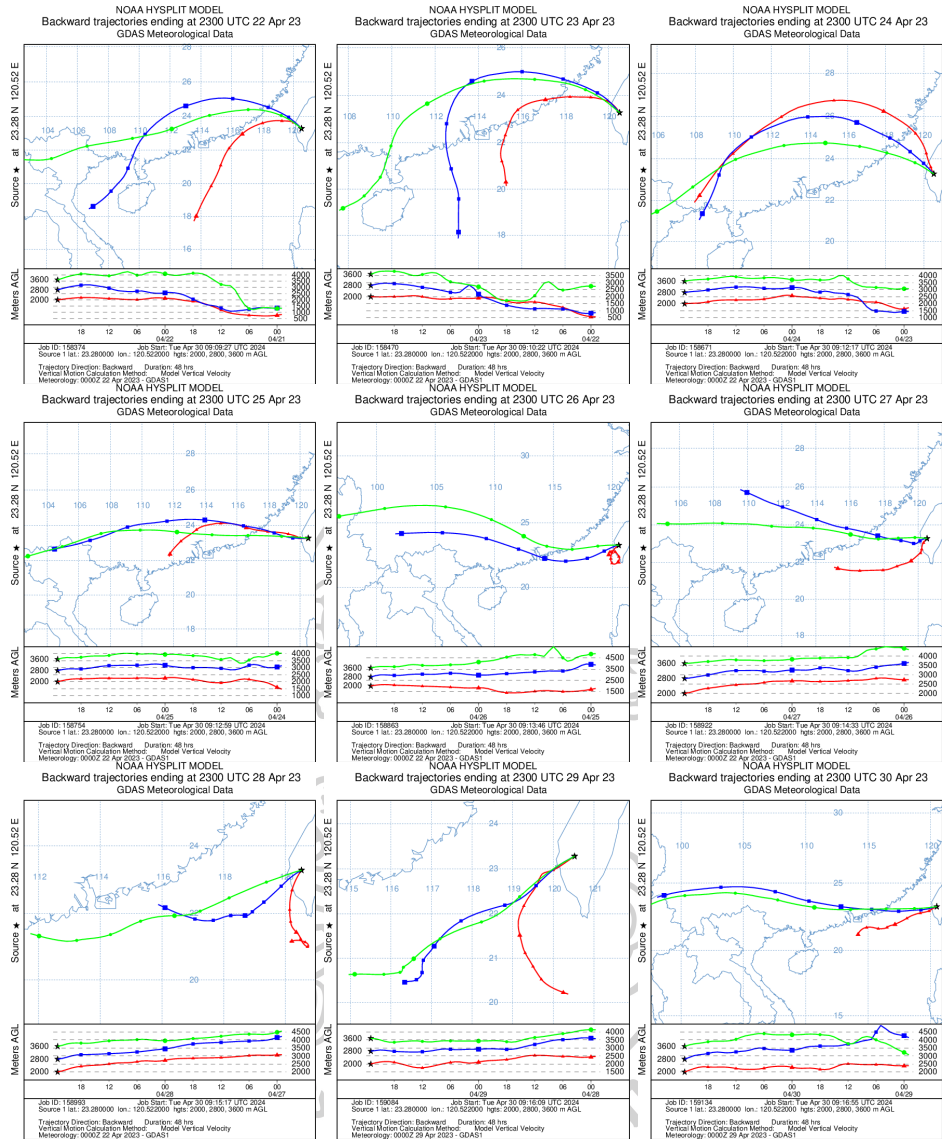




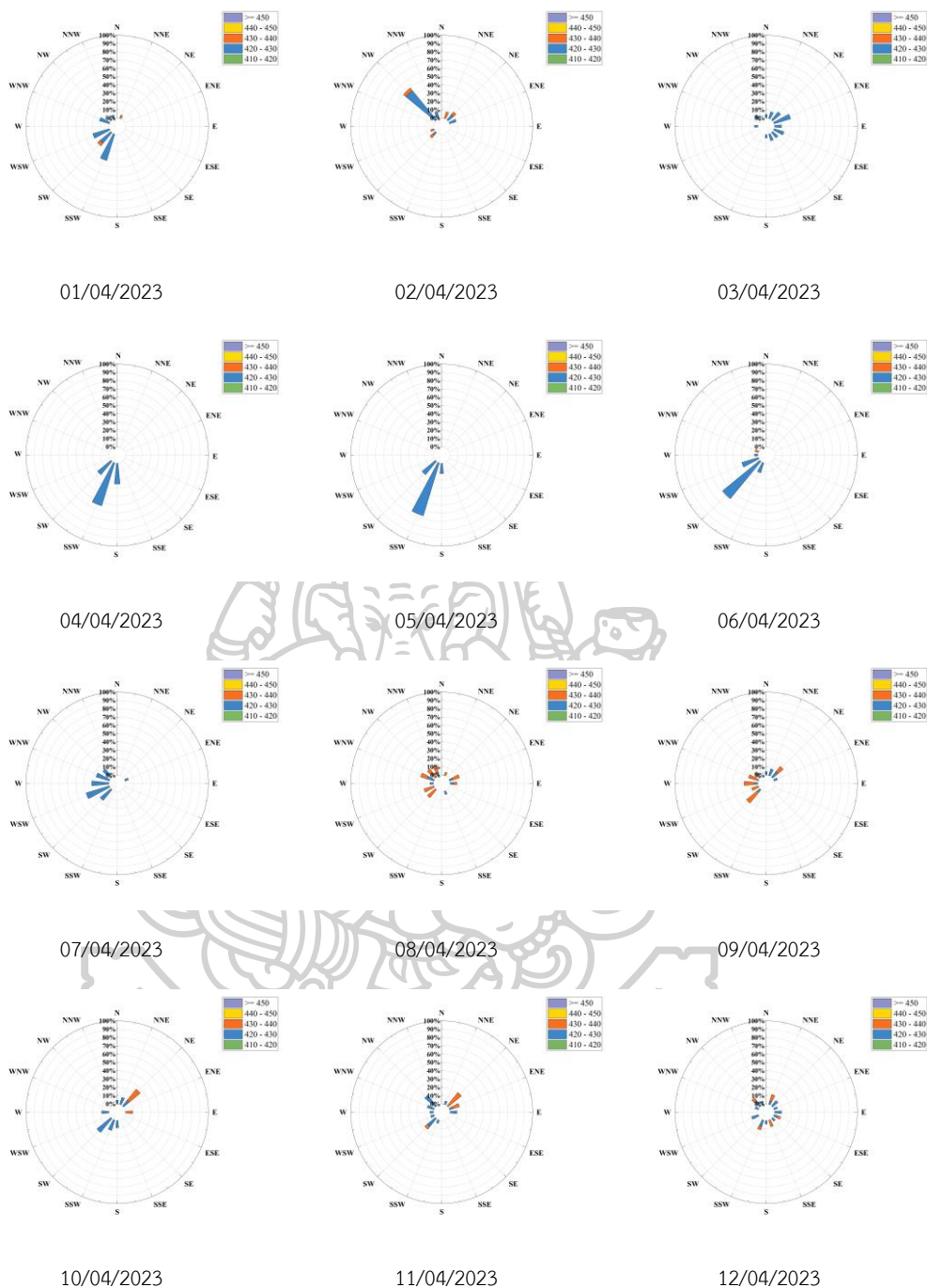
รูปที่ 76 เส้นทางการเคลื่อนที่ของมวลอากาศที่ได้จากแบบจำลอง HYSPLIT แบบย้อนกลับมายังสถานี Lulin ในวันที่ 1 – 30 เมษายน ปี ค.ศ. 2023 ซึ่งเคลื่อนที่มาจากทิศทางต่าง ๆ (วันที่ได้รูปจะบอกวันเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ โดยจุดตัด ๆ ไปของแต่ละเส้นทางแสดงตำแหน่งของมวลอากาศที่เคลื่อนที่ไปสำหรับความสูงของมวลอากาศที่แต่ละจุดบอกด้วยกราฟด้านล่างของรูป)



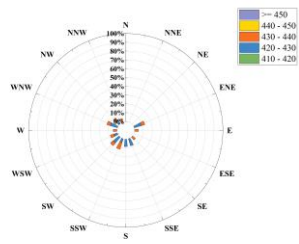
รูปที่ 76 (ต่อ)



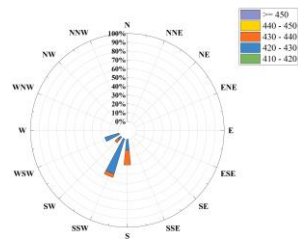
มหาวิทยาลัย
รูปที่ 76 (ต่อ)



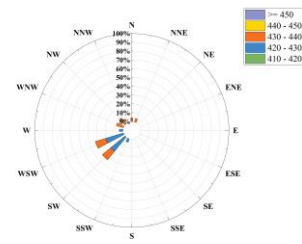
รูปที่ 77 กราฟความถี่สะสมของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในทิศทางลมต่าง ๆ ที่พัดเข้ามายังสถานี Lulin ในวันที่ 1 – 30 เมษายน ปี ค.ศ. 2023



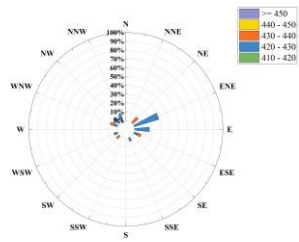
13/04/2023



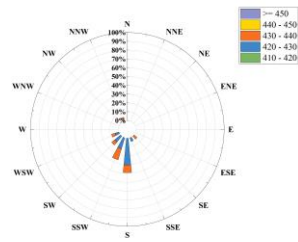
14/04/2023



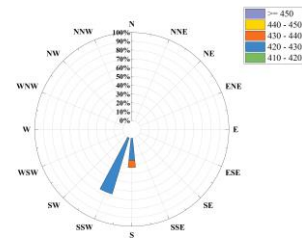
15/04/2023



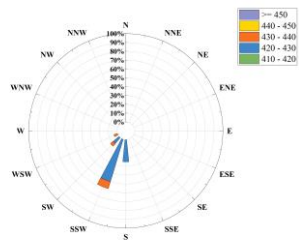
16/04/2023



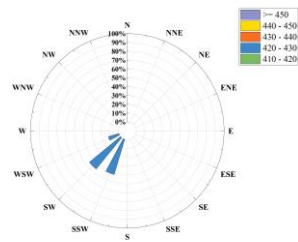
17/04/2023



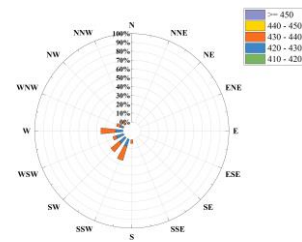
18/04/2023



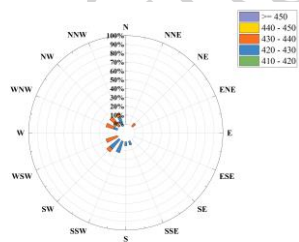
19/04/2023



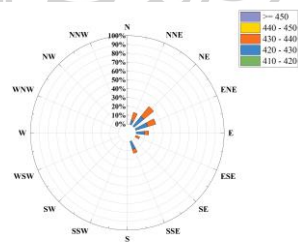
20/04/2023



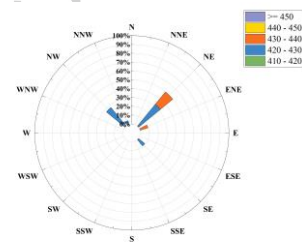
21/04/2023



22/04/2023

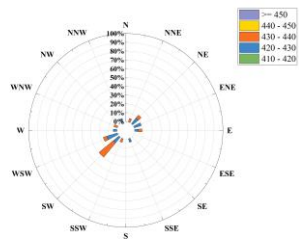


23/04/2023

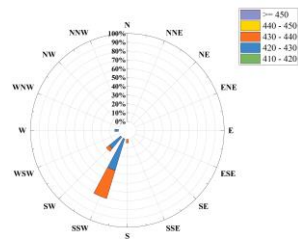


24/04/2023

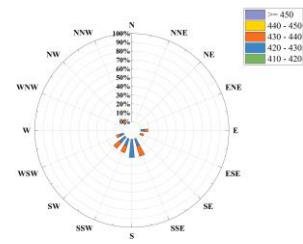
รูปที่ 77 (ต่อ)



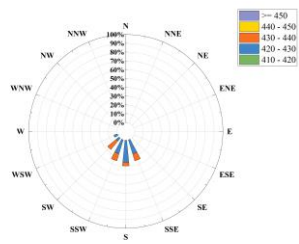
25/04/2023



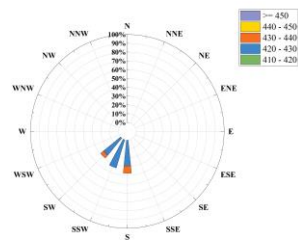
26/04/2023



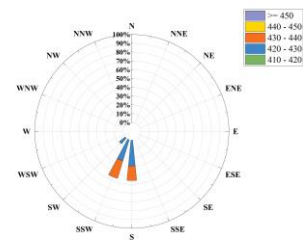
27/04/2023



28/04/2023



29/04/2023



30/04/2023

รูปที่ 77 (ต่อ)



บทที่ 4

สรุป

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศจากข้อมูลภาคพื้นและข้อมูลดาวเทียมของประเทศไทยและประเทศไต้หวัน โดยแบ่งการดำเนินงานออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้ ส่วนแรกการศึกษาการแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศจากข้อมูลภาคพื้นและดาวเทียมของประเทศไทยและไต้หวัน โดยใช้ข้อมูลวัดที่สถานีนครปฐมในช่วงเดือนเมษายน ปี ค.ศ. 2023 ถึงเดือนเมษายน ปี ค.ศ. 2024 และเครื่องมือวัดของ intERLab จำนวน 9 แห่งซึ่งเป็นข้อมูลของปี ค.ศ. 2023 และของประเทศไต้หวันที่สถานี Lulin ในช่วงเดือนมกราคม ปี ค.ศ. 2017 ถึงเดือนสิงหาคม ปี ค.ศ. 2023 และสถานีของ EPA จำนวน 6 สถานี ในช่วงเดือนมกราคม ปี ค.ศ. 2019 ถึงเดือนพฤษภาคม ปี ค.ศ. 2022 สำหรับข้อมูลดาวเทียม ผู้วิจัยใช้ข้อมูลรายวันของดาวเทียม OCO-2 ที่ตำแหน่งเดียวกันกับสถานีภาคพื้น ผลการศึกษาพบว่าค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนของทุกสถานีวัดภาคพื้นมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ขณะที่การแปรค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศเฉลี่ยรายเดือนที่ได้จากแผนที่คาร์บอนไดออกไซด์จากข้อมูลดาวเทียม OCO-2 พบว่าค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนตั้งแต่เดือน มกราคม ปี ค.ศ. 2017 ถึงเดือนธันวาคม ปี ค.ศ. 2023 มีค่าเพิ่มขึ้นทุกปีและมีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นไปในทิศทางเดียวกันกับข้อมูลวัดจากสถานีภาคพื้น รวมทั้งมีรูปแบบการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความเข้มข้นตามช่วงฤดูกาลในแต่ละพื้นที่ของสถานี

สำหรับส่วนที่สองเป็นการศึกษาเปรียบเทียบข้อมูลความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศที่ได้จากการทำแผนที่โดยใช้ข้อมูลรายวันของดาวเทียม GOSAT-2 ดาวเทียม OCO-2 และดาวเทียม OCO-3 กับข้อมูลวัดภาค ข้อมูลดาวเทียมของทั้ง 3 ดวงที่นำมาใช้อยู่ในเดือนมกราคม ปี ค.ศ. 2017 ถึงเดือนธันวาคม ปี ค.ศ. 2023 และเป็นข้อมูลที่มีความแตกต่างกันทั้งความละเอียดเชิงพื้นที่และเวลา ผู้วิจัยได้ใช้เทคนิค nearest-neighbor interpolation เพื่อเติมข้อมูลในบริเวณที่ขาดหายไป จากนั้นทำการสร้างแผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ โดยพบว่าข้อมูลที่ได้จากดาวเทียมนั้นมีค่าแตกต่างกับค่าที่วัดได้จากภาคพื้นค่อนข้างมาก เนื่องจากการวัดของสถานีภาคพื้นอยู่ติดกับพื้นผิวโลกที่มีความหนาแน่นของมวลอากาศที่มากกว่า รวมทั้งความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในแนวตั้งอยู่ในชั้นบรรยากาศประมาณ 10 กิโลเมตร ทำให้ข้อมูลการวัดที่ได้จากดาวเทียมที่เฉลี่ยตามคอลัมน์ความสูงของชั้นบรรยากาศจึงมีค่าน้อยกว่า อย่างไรก็ตามพบว่าข้อมูลที่ได้จากดาวเทียมมีค่าความแตกต่างน้อยเมื่อพิจารณาสถานีวัดที่ตั้งอยู่บนที่สูงอย่าง สถานี Lulin ซึ่งมีความแตกต่างระหว่างข้อมูลวัดภาคพื้นและจากดาวเทียม GOSAT-2 ในรูป RMSE เท่ากับ 2.89 ppm ดาวเทียม OCO-2 มีค่า RMSE เท่ากับ 3.48 ppm และ ดาวเทียม OCO-3 มีค่า RMSE เท่ากับ 3.22 ppm

ในส่วนสุดท้ายผู้วิจัยทำการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ กับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่วัดได้จากสถานีภาคพื้น รวมทั้งศึกษาการเคลื่อนที่ของมวลอากาศที่เคลื่อนที่มายังสถานีวัด ซึ่งพบว่าตัวแปรบางตัวมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนสูง เช่น มีเทน และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ในกรณีสถานี Lulin แต่โดยส่วนใหญ่ตัวแปรต่าง ๆ ไม่มีความสัมพันธ์ต่อความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของมวลอากาศและสถิติสะสมของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในทิศต่าง ๆ ของเดือนที่มีค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนที่มากที่สุดในเดือนเมษายน ปี ค.ศ. 2023 จากสถานีภาคพื้นสำหรับสถานี Lulin ที่ตั้งอยู่บนภูเขาได้รับอิทธิพลของลมที่มาจากทิศตะวันตกเฉียงใต้ และในเดือนพฤษภาคม ปี ค.ศ. 2023 ที่สำหรับสถานีนครปฐม ซึ่งตั้งอยู่ในเขตเมืองได้รับได้รับอิทธิพลของลมที่มาจากทิศตะวันออกเฉียงเหนือ ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ผันผวนตามช่วงฤดูกาลและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศจากกิจกรรมของมนุษย์

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากความละเอียดเชิงพื้นที่ของข้อมูลที่ได้จากการวัดของดาวเทียมมีช่องว่างของข้อมูลมากจึงควรศึกษาวิธีการประมาณค่าที่ได้จากช่องว่างเพื่อพัฒนาแผนที่คาร์บอนไดออกไซด์ให้ดียิ่งขึ้น โดยเฉพาะบริเวณประเทศไทยและได้หวั่นที่มีข้อมูลน้อย อาจใช้ข้อมูลดาวเทียม ข้อมูลภาคพื้น และข้อมูลจากแบบจำลอง นำมารวมกันและสร้างเป็นแผนที่ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น

รายการอ้างอิง

- Basilio, R. R., Bennett, M. W., Eldering, A., Lawson, P. R., & Rosenberg, R. A. (2019). Orbiting Carbon Observatory-3 (OCO-3), remote sensing from the International Space station (ISS). *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XXIII*,
- Crawley, L. H. (2008). Application of non-dispersive infrared (NDIR) spectroscopy to the measurement of atmospheric trace gases.
- Debbagh, M. (2019). *Development of a low-cost wireless sensor network for passive in situ measurement of soil greenhouse gas emissions*. McGill University (Canada).
- Dolman, A. J., & Dolman, H. (2019). *Biogeochemical cycles and climate*. Oxford University Press, USA.
- Gao, R. (2022). Research progress of atmospheric CO₂ monitoring by satellite remote sensing. *Journal of Physics: Conference Series*,
- Hartmann, D. L. (2015). *Global physical climatology* (Vol. 103). Newnes.
- Hodgkinson, J., Smith, R., Ho, W. O., Saffell, J. R., & Tatam, R. P. (2013). Non-dispersive infra-red (NDIR) measurement of carbon dioxide at 4.2 μm in a compact and optically efficient sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 186, 580-588.
- Imasu, R., Matsunaga, T., Nakajima, M., Yoshida, Y., Shiomi, K., Morino, I., Saitoh, N., Niwa, Y., Someya, Y., & Oishi, Y. (2023). Greenhouse gases Observing SATellite 2 (GOSAT-2): mission overview. *Progress in Earth and Planetary Science*, 10(1), 33.
- Jan, S., Wang, J., Chern, C.-S., & Chao, S.-Y. (2002). Seasonal variation of the circulation in the Taiwan Strait. *Journal of Marine Systems*, 35(3-4), 249-268.
- Jiang, Y., Gao, Z., He, J., Wu, J., & Christakos, G. (2022). Application and analysis of XCO₂ data from OCO satellite using a synthetic DINEOF-BME spatiotemporal interpolation framework. *Remote Sensing*, 14(17), 4422.
- Jin, C., Xue, Y., Jiang, X., Zhao, L., Yuan, T., Sun, Y., Wu, S., & Wang, X. (2022). A long-term global XCO₂ dataset: Ensemble of satellite products. *Atmospheric Research*, 279, 106385.

- Jing, Y., Shi, J., & Wang, T. (2014). Mapping global land XCO₂ from measurements of GOSAT and SCIAMACHY by using kriging interpolation method. 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium,
- Liu, Y., Wang, X., Guo, M., & Tani, H. (2012). Mapping the FTS SWIR L2 product of XCO₂ and XCH₄ data from the GOSAT by the Kriging method—a case study in East Asia. *International Journal of Remote Sensing*, 33(10), 3004-3025.
- Metya, A., Datye, A., Chakraborty, S., Tiwari, Y. K., Sarma, D., Bora, A., & Gogoi, N. (2021). Diurnal and seasonal variability of CO₂ and CH₄ concentration in a semi-urban environment of western India. *Scientific reports*, 11(1), 2931.
- Pathakoti, M., Gaddamidi, S., Gharai, B., Sudhakaran Syamala, P., Rao, P. V. N., Choudhury, S. B., Raghavendra, K. V., & Dadhwal, V. K. (2018). Influence of meteorological parameters on atmospheric CO₂ at Bharati, the Indian Antarctic research station. *Polar Research*, 37(1), 144-2072.
- Pérez, I. A., García, M. d. l. Á., Sánchez, M. L., & Pardo, N. (2021). Influence of wind speed on CO₂ and CH₄ concentrations at a rural site. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(16), 8397.
- Pérez, I. A., Sánchez, M. L., García, M. Á., Pardo, N., & Fernández-Duque, B. (2018). The influence of meteorological variables on CO₂ and CH₄ trends recorded at a semi-natural station. *Journal of environmental management*, 209, 37-45.
- Reichenbacher, M., & Popp, J. (2012). *Challenges in molecular structure determination*. Springer Science & Business Media.
- Schober, P., Boer, C., & Schwarte, L. A. (2018). Correlation coefficients: appropriate use and interpretation. *Anesthesia & analgesia*, 126(5), 1763-1768.
- Sreenivas, G., Mahesh, P., Subin, J., Kanchana, A. L., Rao, P. V. N., & Dadhwal, V. K. (2016). Influence of meteorology and interrelationship with greenhouse gases (CO₂ and CH₄) at a suburban site of India. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(6), 3953-3967.
- Taylor, T. E., O'Dell, C. W., Frankenberg, C., Partain, P., Cronk, H. W., Savtchenko, A., Nelson, R. R., Rosenthal, E. J., Chang, A., & Crisp, D. (2015). Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) cloud screening; validation against collocated MODIS and initial comparison to CALIOP data.

- Topham, S., Bazzanella, A., Schiebahn, S., Luhr, S., Zhao, L., Otto, A., & Stolten, D. (2000). Carbon dioxide. *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry*, 1-43.
- Welles, J. M., & McDermitt, D. K. (2005). Measuring carbon dioxide in the atmosphere. *Micrometeorology in agricultural systems*, 47, 287-320.
- Werbe-fuentes, J., Moody, M., Korol, O., & Kading, T. (2005). Carbon dioxide absorption in the near infrared. *New York, USA*.
- Wong, J. Y., & Anderson, R. L. (2012). *Non-dispersive infrared gas measurement*. Lulu.com.
- Wunch, D., Wennberg, P. O., Osterman, G., Fisher, B., Naylor, B., Roehl, C. M., O'Dell, C., Mandrake, L., Viatte, C., & Kiel, M. (2017). Comparisons of the orbiting carbon observatory-2 (OCO-2) X CO₂ measurements with TCCON. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(6), 2209-2238.
- Xueref-Remy, I., Milne, M., Zoghbi, N., Lelandais, L., Riandet, A., Armengaud, A., Gille, G., Lanzi, L., Oppo, S., & Brégonzio-Rozier, L. (2023). Analysis of atmospheric CO₂ variability in the Marseille city area and the north-west Mediterranean basin at different time scales. *Atmospheric environment: X*, 17, 100208.
- Yuan, E. (1985). Statistical Yearbook. *China-Statistics*, 1300, 30.
- Yue, T., Zhang, L., Zhao, M., Wang, Y., & Wilson, J. (2016). Space-and ground-based CO₂ measurements: A review. *Science China Earth Sciences*, 59, 2089-2097.
- Zhong, W., & Haigh, J. D. (2013). The greenhouse effect and carbon dioxide. *Weather*, 68(4), 100-105.
- Zhou, C., Shi, R., & Gao, W. (2013). Interpolation of XCO₂ retrieved from GOSAT in China using fixed rank kriging. *Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability X*,



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล

อุดมพรรณ นาคศรีโพด

วุฒิการศึกษา

พ.ศ. 2564 สำเร็จการศึกษาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะ
วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม

พ.ศ. 2567 สำเร็จการศึกษาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะ
วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม

ผลงานตีพิมพ์

The 48 th International Congress on Science, Technology and
Technology-Based Innovation "Science and Technology for
Advancing Towards SDGs" (48th STT) 29 November - 1
December, 2022. Walailak University, Nakhon Si Thammarat,
Thailand.

E-Proceeding Book: An attenuation of solar radiation by different
cloud types at Nakhon Pathom.

The 49 th International Congress on Science, Technology and
Technology-Based Innovation "SDGs for the benefit of mankind"
(49th STT) 23 - 25 January, 2024.

Abstract Book: A Comparison of Atmospheric Carbon Dioxide
Concentrations Between Ground - and
Satellite - Based Measurements at Lulin Atmospheric
Background Station (LABs), Taiwan

The 4 th International Conference on Science Technology &
Innovation (4th ICSTI) March 29, 2024. Meajo University,
Chiang Mai, Thailand.

E-Proceeding Book: Atmospheric Carbon dioxide concentration
over Thailand obtaining from satellite data and ground-based
monitoring at Nakhon Pathom.