

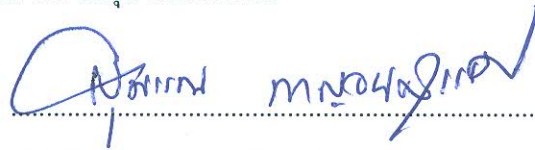
การประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดาวเทียม OCO-2 และ Terra MODIS  
ประเทศไทย

สมกมล รักวีรธรรม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาภูมิสารสนเทศศาสตร์ คณะภูมิสารสนเทศศาสตร์  
มหาวิทยาลัยบูรพา  
สิงหาคม 2560  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณา  
วิทยานิพนธ์ของ สมกมล รักวีรธรรม ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม  
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาภูมิสารสนเทศศาสตร์ ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก  
(ดร.สุพรรณ กาญจนสุธรรม)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(รองศาสตราจารย์ ดร.แก้ว นवलวิ)

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ดร.ภัทรพร สร้อยทอง)

คณะภูมิสารสนเทศศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาภูมิสารสนเทศศาสตร์ของมหาวิทยาลัยบูรพา

  
.....คณบดีคณะภูมิสารสนเทศศาสตร์  
(ดร.สุพรรณ กาญจนสุธรรม)

วันที่.....เดือน.....ปี พ.ศ. 2560

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความกรุณาจาก ดร.สุพรรณ กาญจนสุธรรม อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก รองศาสตราจารย์ ดร.แก้ว นวลฉวี และ ดร.ภัทรพร สร้อยทอง อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์ ดร.สุเพชร จิระจรกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ เรื่องประเทืองสุข ประชานและกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำแนวทางที่ถูกต้อง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความละเอียดถี่ถ้วนและเอาใจใส่ด้วยดีเสมอมา ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่าง สูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์คณะภูมิสารสนเทศศาสตร์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้และได้ให้คำปรึกษา ให้แนวความคิด จนทำให้ผู้วิจัยสามารถทำงานวิจัยสำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา คุณแม่ทิพย์มณี ไหลหลั่ง และครอบครัวของข้าพเจ้า ที่ให้การสนับสนุนทางการศึกษาเป็นอย่างดี อีกทั้งยังให้กำลังใจ และความห่วงใยเสมอมา ท้ายสุดนี้รวมทั้งท่านอื่น ๆ ที่มีได้เอยนามในที่นี้ ที่มีส่วนช่วยให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือทางการศึกษาอบรมสั่งสอนสติปัญญาและคุณธรรม อันเป็นเครื่องชี้นำความสำเร็จ จนการทำวิจัยครั้งนี้สำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี

สมกมล รักวีระธรรม

58910130: สาขาวิชา: ภูมิสารสนเทศศาสตร์; วท.ม. (ภูมิสารสนเทศศาสตร์)

คำสำคัญ: คาร์บอนไดออกไซด์/ OCO-2/ MODIS/ การประมาณค่า

สมกมล รักวีระธรรม : การประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากดาวเทียม OCO-2 และ Terra MODIS ประเทศไทย (THE ESTIMATION OF CARBON DIOXIDE ATMOSPHERIC CONCENTRATION FROM OCO-2 AND TERRA MODIS, THAILAND) คณะกรรมการผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์: สุพรรณ กาญจนสุธรรม, D.Tech.Sc., แก้ว นวลฉวี, Ph.D., ภัทราพร สร้อยทอง Ph.D., 124 หน้า. ปี พ.ศ. 2560

การวิจัยครั้งนี้เป็นการประยุกต์เทคนิคการรับรู้จากระยะไกล เพื่อการประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดาวเทียม Orbiting Carbon Observatory 2 (OCO-2) และชุดผลิตภัณฑ์จากข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิพื้นผิว (LST) ดัชนีพืชพรรณ NDVI และ EVI ดัชนีพื้นผิวใบ (LAI) อัตราการผลิตปฐมภูมิรวม (GPP) และสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง (FPAR) ในช่วงเดือนตุลาคม พ.ศ. 2557 ถึง เดือนตุลาคม พ.ศ. 2559 โดยแบ่งเป็น 3 ฤดูกาล คือ ฤดูหนาว ฤดูร้อน และฤดูฝน เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของแต่ละตัวแปร พร้อมทั้งสร้างสมการแบบถดถอยเชิงเส้นและสมการถดถอยไม่เชิงเส้นแบบ Polynomial สำหรับการประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของประเทศไทย

ผลการศึกษาพบว่า ตัวแปรต้นทุกตัวมีความสัมพันธ์กับค่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับนัยสำคัญมากกว่าหรือเท่ากับ 0.01 และเมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ด้วยวิธีการแบบลำดับขั้น (Stepwise) เพื่อลดความซ้ำซ้อนของตัวแปรแล้ว ในช่วงฤดูหนาวตัวแปรที่ถูกคัดเลือกเข้าสู่สมการ ได้แก่ ค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI และอัตราการผลิตปฐมภูมิรวม (GPP) และพบว่าสมการถดถอยไม่เชิงเส้นแบบ Polynomial เป็นสมการที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อน RMSE ต่ำที่สุด เท่ากับ 1.21 ppm มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.4891 ในช่วงฤดูร้อนตัวแปรที่ถูกคัดเลือกเข้าสู่สมการ ได้แก่ ค่าอุณหภูมิพื้นผิวเพียงตัวแปรเดียว โดยที่สมการถดถอยเชิงเส้นและถดถอยไม่เชิงเส้นมีค่าความคลาดเคลื่อน RMSE ไม่แตกต่างกัน มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 1.27 ppm สมการถดถอยเชิงเส้นจึงมีความไม่ซับซ้อนและเหมาะสมต่อการนำมาใช้งาน ในช่วงฤดูฝนตัวแปรที่ถูกคัดเลือกเข้าสู่สมการ ได้แก่ ค่าอุณหภูมิและอัตราการผลิตปฐมภูมิรวม โดยที่สมการถดถอยไม่เชิงเส้นแบบ Polynomial เป็นสมการที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อน RMSE ต่ำที่สุด เท่ากับ 1.88 ppm มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.4213 และนอกจากนี้ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศของประเทศไทย จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นในฤดูหนาว แล้วเพิ่มขึ้นสูงสุดในช่วงฤดูร้อน และลดลงในฤดูฝน เนื่องจากพืชมีการนำคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง



58910130: MAJOR: GEOINFORMATICS; M.Sc. (GEOINFORMATICS)

KEYWORDS: CARBON DIOXIDE/ OCO-2/ MODIS/ ESTIMATION

SOMKAMON RUKVERATHAM: THE ESTIMATION OF CO<sub>2</sub> ATMOSPHERIC CONCENTRATION BY GEO-INFORMATION TECHNOLOGY, THAILAND. ADVISORY COMMITTEE: SUPAN KARNCHANASUTHAM, D.Tech.Sc., KAEW NUALCHAWEE, Ph.D., PHATTRAPORN SOYTONG, Ph.D., 124 P. 2017

The research was the application of Remote Sensing for estimating concentration carbon dioxide from the Orbiting Carbon Observatory 2 (OCO-2) satellite and Terra MODIS satellite such as Land Surface Temperature (LST), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Enhanced Vegetation Index (EVI), Leaf Area Index (LAI), Gross Primary Productivity (GPP) and Fraction of Photosynthetically Active Radiation (FPAR) in October 2014 to October 2016. The purpose of research was correlations analysis between OCO-2 and MODIS data for creating equations both multiple linear regression and non-linear regression in 3 seasons consisted 1) winter 2) summer and 3) rainy.

The result of study found the correlation between OCO-2 and MODIS data that all independent variables had r correlation at level of significance 0.01 but all variables were selected by stepwise for creating equations. Which NDVI and GPP were suitable variables for winter equation that showed the best RMSE 1.21 ppm ( $R^2=0.4891$ ) for polynomial regression. In summer, LST was a suitable variable that showed the best RMSE 1.27 ppm ( $R^2= 0.3378$ ) for linear regression. Finally, LST and GPP were still suitable variables in the rainy season, which showed the best RMSE 1.88 ppm ( $R^2= 0.4213$ ) for polynomial regression. In addition, carbon dioxide of Thailand has been slowly increasing concentration by winter season, reaching a peak by summer season and it has been decreasing concentration by rainy season because plant absorb amount of carbon dioxide through photosynthesis.

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	5
กรอบแนวคิดในการวิจัย.....	6
2 เอกสารงานและวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
ลักษณะทั่วไปของพื้นที่ศึกษา.....	7
แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	19
การรับรู้จากระยะไกล.....	36
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	45
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	45
ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย.....	45
ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	46
4 ผลการศึกษา.....	57
การศึกษาค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศและชุดผลิตภัณฑ์ จากข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS.....	57
การศึกษาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศและชุดผลิตภัณฑ์จากข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS.....	93

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
การสร้างสมการสำหรับประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้น บรรยากาศ.....	99
5 สรุปและอภิปรายผลการศึกษา.....	111
สรุปผลการศึกษา.....	111
อภิปรายผลการศึกษา.....	112
ข้อเสนอแนะ.....	113
บรรณานุกรม.....	115
ภาคผนวก.....	121
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	124

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 สถิติอุณหภูมิ (°C) ของประเทศไทยในฤดูกาลต่าง ๆ .....	14
2-2 สถิติอุณหภูมิสูงที่สุด (°C) ของประเทศไทยในช่วงฤดูร้อน.....	15
2-3 สถิติอุณหภูมิต่ำที่สุด (°C) ของประเทศไทยในช่วงฤดูหนาว.....	15
2-4 ปริมาณฝน (มิลลิเมตร) ของประเทศไทยในฤดูกาลต่าง ๆ .....	16
2-5 สถิติความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย ( % ) ของประเทศไทยในช่วงฤดูกาลต่าง ๆ .....	17
2-6 สถิติพายุหมุนเขตร้อนที่เคลื่อนผ่านภาคต่างๆ ของประเทศไทยคาบ 65 ปี (พ.ศ. 2494-2558).....	19
3-1 ค่า FOOTPRINT BIAS (FOOT) (ppm) .....	47
3-2 ค่า FEATS.....	48
3-3 ค่า TCCON_ADJUST .....	48
3-4 ค่า RESIDUAL FOOTPRINT BIAS (FOOT2) (ppm) .....	48
3-5 ค่าประสิทธิภาพของสมการ Split-Window.....	50
4-1 ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศปี พ.ศ. 2558 และ 2559 รายภาคแบ่งตามฤดูกาล ของประเทศไทย.....	59
4-2 อุณหภูมิพื้นผิว ปี พ.ศ. 2558 และ 2559 รายภาคแบ่งตามฤดูกาล ของประเทศไทย.....	64
4-3 ค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI ปี พ.ศ. 2558 และ 2559 รายภาคแบ่งตามฤดูกาลของประเทศไทย .....	69
4-4 ค่าดัชนีพืชพรรณ EVI ปี พ.ศ. 2558 และ 2559 รายภาคแบ่งตามฤดูกาล ของประเทศไทย .....	74
4-5 ค่าดัชนีพื้นผิวใบ ปี พ.ศ. 2558 และ 2559 รายภาคแบ่งตามฤดูกาล ของประเทศไทย....	79
4-6 อัตราการผลิตปฐมภูมิรวม ปี พ.ศ. 2558 และ 2559 รายภาคแบ่งตามฤดูกาล ของประเทศไทย.....	85
4-7 สัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง ปี พ.ศ. 2558 และ 2559 รายภาคแบ่งตามฤดูกาล ของประเทศไทย.....	90
4-8 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับชุดผลิตภัณฑ์ จากข้อมูล MODIS ในฤดูหนาว.....	93

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4-9 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับชุดผลิตภัณฑ์ จากข้อมูล MODIS ในฤดูร้อน .....	95
4-10 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับชุดผลิตภัณฑ์ จากข้อมูล MODIS ในฤดูฝน .....	97
4-11 ค่าสถิติของสมการถดถอยในช่วงฤดูหนาวของประเทศไทย .....	100
4-12 ค่าสถิติของสมการถดถอยในช่วงฤดูร้อนของประเทศไทย .....	103
4-13 ค่าสถิติของสมการถดถอยในช่วงฤดูฝนของประเทศไทย.....	107

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1-1 แผนที่ขอบเขตการศึกษา ประเทศไทย.....	4
1-2 กรอบแนวคิด.....	6
2-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการแผ่รังสีของช่วงคลื่นกับอุณหภูมิ.....	27
2-2 ปฏิสัมพันธ์ของชั้นบรรยากาศกับช่วงอินฟราเรดความร้อนในแต่ละความยาวคลื่น.....	27
2-3 ปฏิสัมพันธ์ของช่วงคลื่นอินฟราเรดความร้อนกับวัตถุ.....	28
2-4 การสะท้อนแสงแบบ Bi-Directional Reflectance .....	29
3-1 ขั้นตอนการวิจัย.....	56
4-1 กราฟค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ ปี พ.ศ. 2558 และ 2559 รายภาคแบ่งตามฤดูกาล ของประเทศไทย.....	60
4-2 แผนที่คาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศแต่ละฤดูกาล ปี พ.ศ.2558 ของประเทศไทย	61
4-3 แผนที่คาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศแต่ละฤดูกาล ปี พ.ศ.2559 ของประเทศไทย	62
4-4 กราฟอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ย ปี พ.ศ. 2558 และ 2559 รายภาคแบ่งตามฤดูกาล ของประเทศไทย.....	65
4-5 แผนที่อุณหภูมิพื้นผิว แต่ละฤดูกาล ปี พ.ศ. 2558 ของประเทศไทย .....	66
4-6 แผนที่อุณหภูมิพื้นผิว แต่ละฤดูกาล ปี พ.ศ. 2559 ของประเทศไทย .....	67
4-7 กราฟค่าเฉลี่ยดัชนีพืชพรรณ NDVI ปี พ.ศ. 2558 และ 2559 รายภาคแบ่งตามฤดูกาล ของประเทศไทย.....	70
4-8 แผนที่ดัชนีพืชพรรณ NDVI แต่ละฤดูกาล ปี พ.ศ. 2558 ของประเทศไทย.....	71
4-9 แผนที่ดัชนีพืชพรรณ NDVI แต่ละฤดูกาล ปี พ.ศ. 2559 ของประเทศไทย.....	72
4-10 กราฟค่าเฉลี่ยดัชนีพืชพรรณ EVI ปี พ.ศ. 2558 และ 2559 รายภาคแบ่งตามฤดูกาล ของประเทศไทย.....	75
4-11 แผนที่ดัชนีพืชพรรณ EVI แต่ละฤดูกาล ปี พ.ศ. 2558 ของประเทศไทย.....	76
4-12 แผนที่ดัชนีพืชพรรณ EVI แต่ละฤดูกาล ปี พ.ศ. 2559 ของประเทศไทย.....	77
4-13 กราฟค่าเฉลี่ยดัชนีพื้นผิวใบ ปี พ.ศ. 2558 และ 2559 รายภาคแบ่งตามฤดูกาล ของประเทศไทย.....	80
4-14 แผนที่ดัชนีพื้นผิวใบแต่ละฤดูกาล ปี พ.ศ. 2558 ของประเทศไทย.....	81
4-15 แผนที่ดัชนีพื้นผิวใบแต่ละฤดูกาล ปี พ.ศ. 2559 ของประเทศไทย.....	82

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-16 กราฟค่าเฉลี่ยอัตราการผลิตปฐุมภูมিরวม ปี พ.ศ. 2558 และ 2559 รายภาคแบ่งตามฤดูกาล ของประเทศไทย.....	84
4-17 แผนที่อัตราการผลิตปฐุมภูมিরวมแต่ละฤดูกาล ปี พ.ศ. 2558 ของประเทศไทย .....	86
4-18 แผนที่อัตราการผลิตปฐุมภูมিরวมแต่ละฤดูกาล ปี พ.ศ. 2559 ของประเทศไทย .....	87
4-19 กราฟค่าเฉลี่ยสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง ปี พ.ศ. 2558 และ 2559 รายภาคแบ่งตามฤดูกาล ของประเทศไทย.....	89
4-20 สัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง ปี พ.ศ. 2558 ของประเทศ ไทย.....	91
4-21 สัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง ปี พ.ศ. 2559 ของประเทศ ไทย.....	92
4-22 แผนภาพการกระจายตัวระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับชุด ผลิตภัณฑ์จากข้อมูลจาก MODIS ในฤดูหนาว .....	94
4-23 แผนภาพการกระจายตัวระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับชุด ผลิตภัณฑ์จากข้อมูล MODIS ในฤดูร้อน .....	96
4-24 แผนภาพการกระจายตัวระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับชุด ผลิตภัณฑ์จากข้อมูล MODIS ในฤดูฝน .....	98
4-25 การกระจายตัวของค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากสมการถดถอยเชิง เส้นในช่วงฤดูหนาว ของประเทศไทย .....	100
4-26 การกระจายตัวของค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากสมการถดถอย ไม่ใช่เชิงเส้นแบบ Polynomial ในช่วงฤดูหนาวของประเทศไทย .....	100
4-27 แผนที่การประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศฤดู หนาว พ.ศ. 2558.....	101
4-28 แผนที่การประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศฤดู หนาว พ.ศ. 2559.....	102
4-29 การกระจายตัวของค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากสมการถดถอยเชิง เส้นในช่วงฤดูร้อน ของประเทศไทย.....	104

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4-30 การกระจายตัวของค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากสมการถดถอย ไม่ใช่เชิงเส้นแบบ Polynomial ในช่วงฤดูร้อนของประเทศไทย .....	104
4-31 แผนที่ใช้การประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ ฤดูร้อน พ.ศ. 2558 .....	105
4-32 แผนที่ใช้การประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ ฤดูร้อน พ.ศ. 2559 .....	106
4-33 การกระจายตัวของค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากสมการถดถอยเชิง เส้นในช่วงฤดูฝนของประเทศไทย.....	108
4-34 การกระจายตัวของค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากสมการถดถอย ไม่ใช่เชิงเส้นแบบ Polynomial ในช่วงฤดูฝนของประเทศไทย.....	108
4-35 แผนที่ใช้การประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ ฤดูฝน พ.ศ. 2558 .....	109
4-36 แผนที่ใช้การประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ ฤดูฝน พ.ศ. 2559 .....	110



# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลกเป็นปัญหาที่ประเทศต่าง ๆ ทั่วโลกให้ความสำคัญ เนื่องจากสภาพภูมิอากาศมีผลต่อความรุนแรงของภัยพิบัติ เช่น อุทกภัย วาตภัย และภัยแล้ง ล้วนแต่มีผลกระทบทางตรงและทางอ้อมต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์ ซึ่งสาเหตุหลักที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ คือ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉลี่ยของโลก หรือ ภาวะโลกร้อนที่เป็นผลมาจากปรากฏการณ์เรือนกระจก ซึ่งเป็นปรากฏการณ์จากการกักเก็บความร้อนของก๊าซในชั้นบรรยากาศ ในสภาวะปกติของธรรมชาติก๊าซเรือนกระจกจะรักษาอุณหภูมิ และให้ความอบอุ่นแก่พื้นโลก ก๊าซเรือนกระจกจะประกอบด้วยก๊าซหลายชนิดแต่ก๊าซที่สำคัญ คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีอยู่ในชั้นบรรยากาศประมาณร้อยละ 0.033 โดยปริมาตร (ความเข้มข้น 387 Parts per Million) มีคุณสมบัติดูดซับคลื่นอินฟราเรด ซึ่งเป็นคลื่นความร้อนจากแสงอาทิตย์ และเก็บสะสมความร้อนไว้ในชั้นบรรยากาศ (แสวง เกิดประทุม, 2559) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปกคลุมโลกอยู่ตั้งแต่ 400,000 ปีที่ผ่านมาจนถึงปี ค.ศ. 1950 มีความเข้มข้นในช่วง 180-280 Parts per Million (ppm) แต่ในปัจจุบันตั้งแต่ปี พ.ศ. 2558-2559 มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็น 400 Parts per Million (ppm) (NASA , 2016) เนื่องจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงในภาคอุตสาหกรรม การตัดไม้ทำลายป่า ส่งผลให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่ชั้นบรรยากาศมากขึ้น ปริมาณต้นไม้ซึ่งเป็นแหล่งดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับถูกทำลายลง ทำให้มีคาร์บอนไดออกไซด์เกินสภาวะปกติ และเมื่อถูกปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศจะคงอยู่เป็นเวลา 50 ถึง 200 ปี (กรีนพีซ, 2553) ซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศอย่างมากในอนาคต ปี ค.ศ. 2100 หากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าจากปัจจุบัน อุณหภูมิพื้นผิวโลกจะเพิ่มขึ้น 1 ถึง 3.5 องศาเซลเซียส สถานการณ์ดังกล่าวข้างต้นทำให้หลายประเทศทั่วโลกตระหนักถึงความสำคัญในการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จึงเกิดอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (United Nations Framework Convention on Climate Change: UNFCCC) ขึ้นมาเพื่อเป็นการรณรงค์ลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่ชั้นบรรยากาศ

ประเทศไทยมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามสถิติปี พ.ศ. 2547 อยู่ในลำดับที่ 24 โดยปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 219 ล้านตันต่อปี และตามอนุสัญญาสหประชาชาติว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ประเทศไทยถูกจัดให้อยู่ในกลุ่มนอกภาคผนวกที่ 1 ซึ่งไม่มีพันธกรณีในการลดก๊าซเรือนกระจก แต่ต้องจัดทำรายงานแห่งชาติ และรายงานความก้าวหน้ารายสองปี ซึ่งจะต้องมีข้อมูลการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทยเป็นส่วนประกอบอยู่ด้วย

(องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก, 2558) แม้ว่าประเทศไทยจะไม่มีพันธกรณีในการลดก๊าซเรือนกระจกแต่ประเทศไทยก็ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทั่วโลกเช่นกัน เนื่องจากปัจจุบันประเทศไทยมีอุณหภูมิในแต่ละปีสูงขึ้น โดยในเดือนเมษายน ปี พ.ศ. 2559 วัดได้ 44.6 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าสถิติเดิมที่เคยวัดได้ คือ 44.5 องศาเซลเซียส เมื่อวันที่ 27 เมษายน พ.ศ. 2503 (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2559) ซึ่งจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมินี้ส่งผลต่อกิจกรรมในหลาย ๆ ด้าน อีกทั้งในปัจจุบันประเทศไทยยังมีการเพิ่มขึ้นของภาคอุตสาหกรรม และมีพื้นที่ป่าลดน้อยลง ซึ่งเป็นสาเหตุต้น ๆ ในการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ

จากที่กล่าวข้างต้น ผู้วิจัยได้ตระหนักถึงความสำคัญของภาวะโลกร้อน ซึ่งเป็นผลมาจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกิจกรรมของมนุษย์สู่ชั้นบรรยากาศ จึงนำเทคนิคการรับรู้จากระยะไกลมาใช้ โดยเฉพาะข้อมูลจากดาวเทียมซึ่งสามารถศึกษาและติดตามความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศได้ เนื่องจากประเทศไทยยังไม่มีสถานีตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างเป็นทางการ จึงได้นำข้อมูลจากดาวเทียมที่มีเซนเซอร์ในการตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และมีการเก็บค่าคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศทุก ๆ วันมาใช้ แต่เนื่องจากข้อจำกัดทางข้อมูลที่ไม่ครอบคลุมทุกพื้นที่ในประเทศไทย จึงทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศและอุณหภูมิพื้นผิว (Land Surface Temperature : LST) ดัชนีพืชพรรณ NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) และ EVI (Enhanced Vegetation Index) ดัชนีพื้นที่ผิวใบ (Leaf Area Index : LAI) อัตราการผลิตปฐมภูมิรวม (Gross Primary Productivity : GPP) และสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง (Fraction of Photosynthetically Active Radiation : FPAR) ที่ได้จากชุดผลิตภัณฑ์ข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS ซึ่งมีข้อมูลที่ค่อนข้างละเอียดและครอบคลุมทุกพื้นที่ในประเทศไทย เพื่อเป็นข้อมูลในการศึกษาและประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ

## วัตถุประสงค์

1. ศึกษาค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศและชุดผลิตภัณฑ์จากข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS
2. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศและชุดผลิตภัณฑ์จากข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS
3. สร้างสมการการประมาณค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศของประเทศไทย

## ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

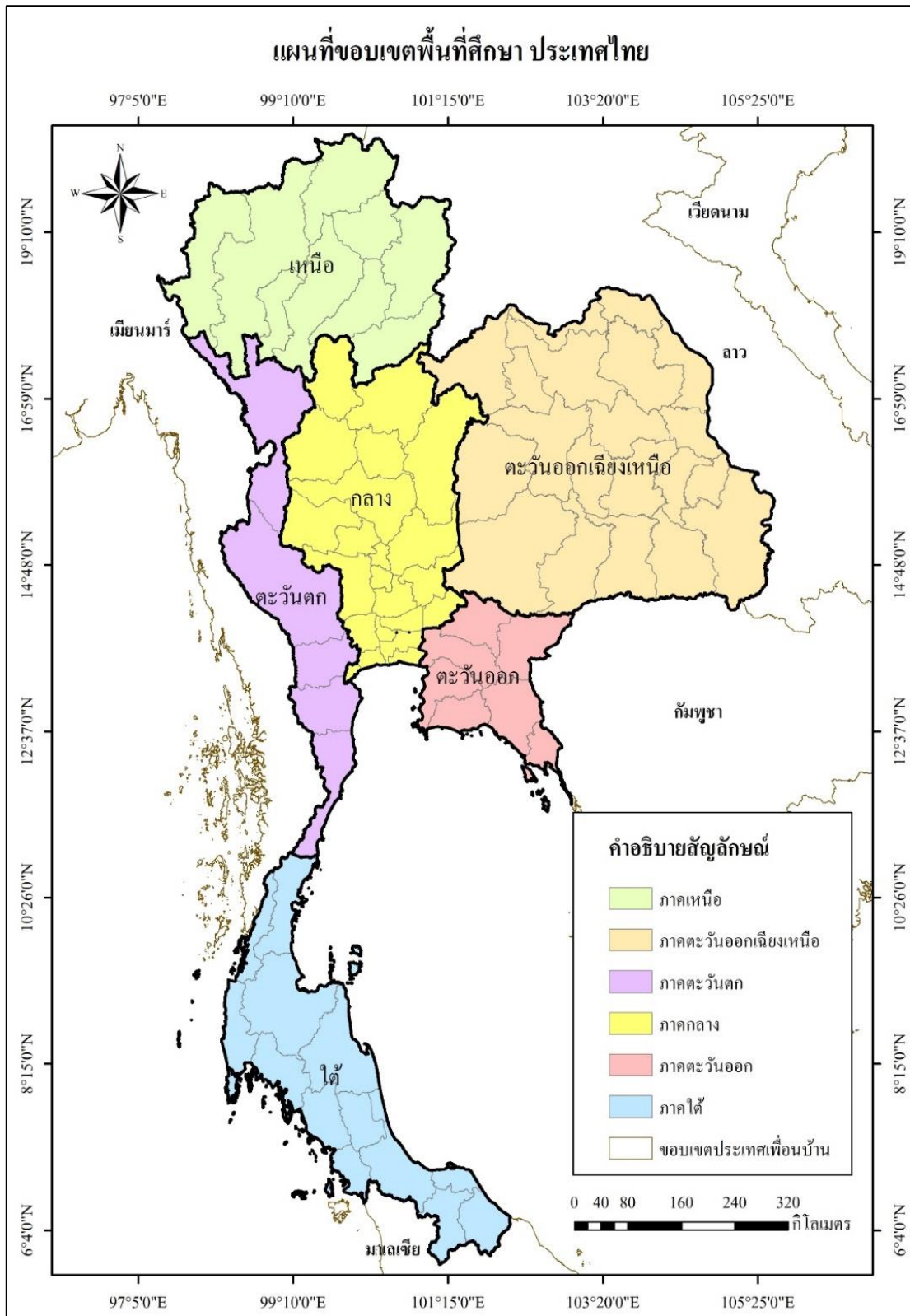
1. ทราบถึงความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ
2. ทราบค่าอนุกรมพี้นผิว ค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI และ EVI ดัชนีพี้นผิวใบ อัตราการผลิปฐมภูมิตรวม และสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง ที่ได้จากชุดผลิตภัณฑ์จากข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS
3. ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศและชุดผลิตภัณฑ์จากข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS ประเทศไทย
4. ทราบสมการการประมาณค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศของประเทศไทย
5. สามารถนำค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศที่ประมาณค่าได้มาใช้ในการตัดสินใจ วางแผนเชิงพื้นที่เพื่อลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ

## ขอบเขตของการวิจัย

### 1. ขอบเขตพื้นที่ศึกษา

การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดาวเทียม OCO-2 และ Terra MODIS ประเทศไทย โดยประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ของทวีปเอเชีย ระหว่างละติจูด  $5^{\circ}37'$  เหนือ กับ  $20^{\circ}27'$  เหนือ และระหว่างลองจิจูด  $97^{\circ}22'$  ตะวันออก กับ  $105^{\circ}37'$  ตะวันออก มีพื้นที่ทั้งหมดประมาณ 513,115 ตารางกิโลเมตร แบ่งการปกครองออกเป็น 77 จังหวัด 6 ภาค ได้แก่ ภาคเหนือ ตะวันออกเฉียงเหนือ ตะวันตก กลาง ตะวันออก และใต้ (ภาพที่ 1-1) มีอาณาเขตติดต่อกับประเทศใกล้เคียง ดังนี้ (วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี, 2559)

ทิศเหนือ	ติดประเทศพม่าและลาว
ทิศตะวันออกเฉียงใต้	ติดประเทศลาว กัมพูชา และอ่าวไทย
ทิศใต้	ติดประเทศมาเลเซีย
ทิศตะวันตก	ติดประเทศพม่าและทะเลอันดามัน



ภาพที่ 1-1 แผนที่ขอบเขตการศึกษา ประเทศไทย

## 2. ขอบเขตเนื้อหา

การศึกษานี้เป็นการประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในพื้นที่ประเทศไทย จากข้อมูลจากดาวเทียม Orbiting Carbon Observatory 2 (OCO-2) เพื่อศึกษาคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ และใช้ชุดผลิตภัณฑ์จากข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิพื้นผิว (LST) ดัชนีพืชพรรณ NDVI และ EVI ดัชนีพื้นผิวใบ (LAI) อัตราการผลิตปฐมภูมิรวม (GPP) และสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง (FPAR) ช่วงเดือนตุลาคมปี พ.ศ. 2557 ถึงเดือนตุลาคมปี พ.ศ. 2559 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ในแต่ละฤดูกาล โดยแบ่งเป็น 3 ฤดูกาลตามกรมอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ ฤดูหนาว ฤดูร้อน ฤดูฝน และสร้างสมการการประมาณค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศในแต่ละฤดูกาลของประเทศไทย

### นิยามศัพท์เฉพาะ

1. คาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ หมายถึง ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศเป็นก๊าซสำคัญในการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ส่งผลให้อุณหภูมิโลกสูงขึ้น
2. ชุดผลิตภัณฑ์จากข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS หมายถึง ชุดผลิตภัณฑ์จากดาวเทียม ซึ่งได้แก่ ข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิว (LST) ดัชนีพืชพรรณ NDVI และ EVI ดัชนีพื้นผิวใบ (LAI) อัตราการผลิตปฐมภูมิรวม (GPP) และสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง (FPAR)
3. อุณหภูมิพื้นผิว หมายถึง อุณหภูมิที่สามารถตรวจวัดได้จากการแผ่รังสีเชิงสเปกตรัมของวัตถุ ในช่วงคลื่นอินฟราเรดความร้อนจากข้อมูลจากดาวเทียม ด้วยวิธีการ Split-window
4. ค่าดัชนีพืชพรรณ หมายถึง อัตราส่วนค่าการสะท้อนของพืชพรรณในช่วงคลื่นอินฟราเรดและช่วงคลื่นแสงจากข้อมูลจากดาวเทียม เพื่อบ่งบอกสถานะของพืชพรรณในประเทศไทย
5. อัตราการผลิตปฐมภูมิรวม หมายถึง อัตราการสังเคราะห์แสงทั้งหมดที่รวมไปถึงการดำรงชีวิตและการหายใจของพืช
6. สัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง หมายถึง สัดส่วนของการแผ่รังสีที่มีอยู่ในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง ถูกดูดซับโดยเรือนยอด โดยค่าสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง จะแสดงถึงความสมบูรณ์ของพืชพรรณ
7. ความสัมพันธ์ หมายถึง ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัวแปรขึ้นไป ด้วยวิธีการทางสถิติเพื่อให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรนั้น ๆ

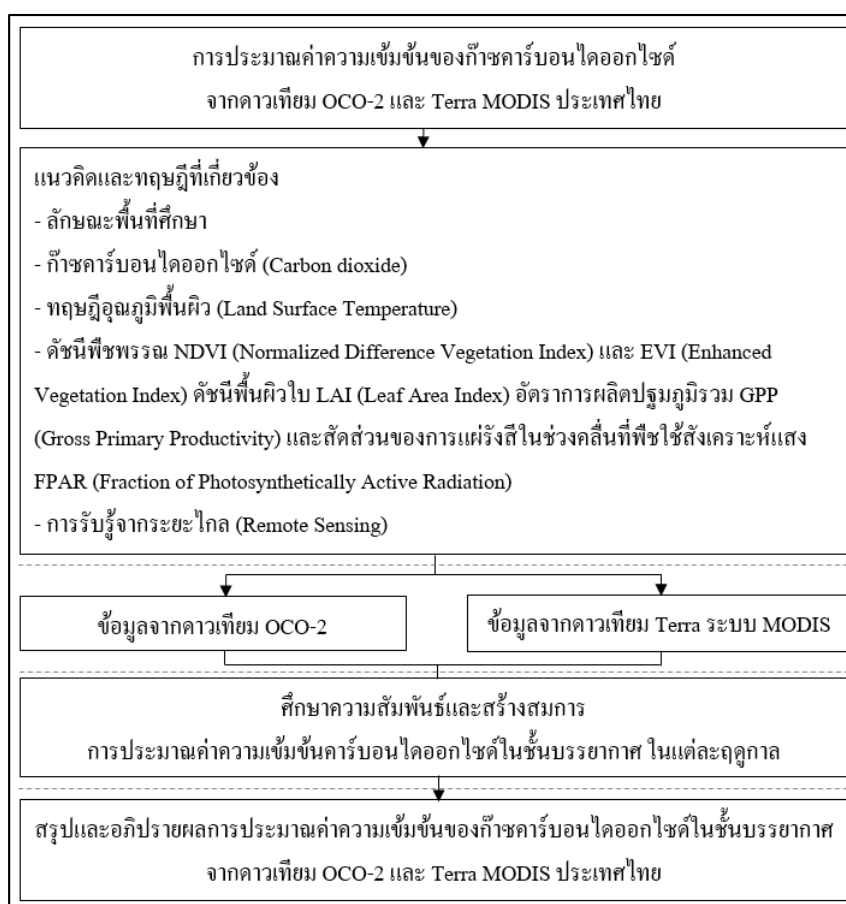
## กรอบแนวคิดในการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดาวเทียม OCO-2 และ Terra MODIS ในพื้นที่ประเทศไทย โดยแบ่งกรอบแนวคิดออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ (ดังภาพที่ 1-2)

ส่วนแรก เป็นการทบทวนและรวบรวมแนวคิดทฤษฎี ความหมาย ขั้นตอนในการศึกษาต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งได้แก่ ข้อมูลลักษณะพื้นที่ที่ศึกษา ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทฤษฎี อุณหภูมิพื้นผิว ดัชนีและข้อมูลเกี่ยวกับพืชพรรณที่สอดคล้องกับเนื้อหาการวิจัย

ส่วนที่สอง เป็นการนำข้อมูลจากดาวเทียม OCO-2 เพื่อศึกษาความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS โดยใช้ข้อมูลระยะเวลา 2 ปี และเฉลี่ยค่าตามช่วงฤดูกาล ซึ่งได้แก่ ฤดูหนาว ฤดูร้อน และฝน

และส่วนที่สาม เป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับปัจจัยต่าง ๆ และนำมาสร้างสมการถดถอยพหุเชิงเส้นและสมการถดถอยที่ไม่ใช่เชิงเส้น เพื่อเป็นสมการในการประมาณค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งประเทศไทย



ภาพที่ 1-2 กรอบแนวคิด

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดาวเทียม OCO-2 และ Terra MODIS ประเทศไทย เป็นการศึกษาความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ กับชุดผลิตภัณฑ์จากข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิพื้นผิว (LST) ดัชนีพืชพรรณ NDVI และ EVI ดัชนีพื้นผิวใบ (LAI) อัตราการผลิตปฐมภูมิรวม (GPP) และสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง (FPAR) แล้วนำมาศึกษาความสัมพันธ์ของแต่ละตัวแปรพร้อมทั้งสร้างสมการการประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของประเทศไทย โดยมีเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. ลักษณะทั่วไปของพื้นที่ศึกษา
2. แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
3. การรับรู้จากระยะไกล
4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### ลักษณะทั่วไปของพื้นที่ศึกษา

##### 1. ทำเลที่ตั้ง

ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ของทวีปเอเชีย ระหว่างละติจูด  $5^{\circ}37'$  เหนือ กับ  $20^{\circ}27'$  เหนือ และระหว่างลองจิจูด  $97^{\circ}22'$  ตะวันออก กับ  $105^{\circ}37'$  ตะวันออก มีพื้นที่ทั้งหมดประมาณ 513,115 ตารางกิโลเมตร มีอาณาเขตติดต่อกับประเทศใกล้เคียง ดังนี้

ทิศเหนือ	ติดประเทศพม่าและลาว
ทิศตะวันออก	ติดประเทศลาว กัมพูชา และอ่าวไทย
ทิศใต้	ติดประเทศมาเลเซีย
ทิศตะวันตก	ติดประเทศพม่าและทะเลอันดามัน

การแบ่งภูมิภาคของประเทศไทยแบ่งออกเป็น 6 ภูมิภาค ใช้เพื่อวัตถุประสงค์ทางภูมิศาสตร์และวิทยาศาสตร์ ซึ่งใช้มาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2478 และจัดให้เป็นการแบ่งภูมิภาคอย่างเป็นทางการในปี พ.ศ. 2520 ตามการแบ่งของคณะกรรมการภูมิศาสตร์แห่งชาติซึ่งได้รับการแต่งตั้งโดยสภาวิจัยแห่งชาติ การแบ่งแบบนี้ประกอบไปด้วย 6 ภูมิภาค (วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี, 2559) ได้แก่

1.1 ภาคเหนือ 9 จังหวัด ได้แก่ เชียงใหม่ เชียงราย ลำปาง ลำพูน แม่ฮ่องสอน น่าน พะเยา แพร่ และ อุตรดิตถ์

1.2 ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 20 จังหวัด ได้แก่ อำนาจเจริญ บึงกาฬ บัรรัมย์ ชัยภูมิ กาฬสินธุ์ ขอนแก่น เลย มหาสารคาม มุกดาหาร นครพนม นครราชสีมาหนองบัวลำภู หนองคาย ร้อยเอ็ด สกลนคร ศรีสะเกษ สุรินทร์ อุบลราชธานี อุตรธานี และยโสธร

1.3 ภาคตะวันตก 5 จังหวัด ได้แก่ ตาก กาญจนบุรี ราชบุรี เพชรบุรี และ ประจวบคีรีขันธ์

1.4 ภาคกลาง 22 จังหวัด ได้แก่ สุโขทัย พิษณุโลก พิจิตร กำแพงเพชร เพชรบูรณ์ นครสวรรค์ อุทัยธานี อ่างทอง ชัยนาท พระนครศรีอยุธยา กรุงเทพมหานคร ลพบุรี นครปฐม นนทบุรี ปทุมธานี สมุทรปราการ สมุทรสาคร สมุทรสงคราม สระบุรี สิงห์บุรี สุพรรณบุรี และ นครนายก

1.5 ภาคตะวันออก 7 จังหวัด ได้แก่ ฉะเชิงเทรา จันทบุรี ชลบุรี ปราจีนบุรี ระยอง สระแก้ว และตราด

1.6 ภาคใต้ 14 จังหวัด ได้แก่ ชุมพร นครศรีธรรมราช นราธิวาส ปัตตานี พัทลุง สงขลา สุราษฎร์ธานี ยะลา กระบี่ พังงา ภูเก็ต ระนอง สตูล และตรัง

## 2. ขนาดและรูปร่าง

ประเทศไทยมีเนื้อที่ 513,115 ตารางกิโลเมตร หรือประมาณ 321 ล้านไร่ ถ้าเทียบขนาด กับประเทศที่อยู่ในภูมิภาคเดียวกันแล้วจะมีขนาดใหญ่เป็นอันดับ 3 ของภูมิภาค รองจากอินโดนีเซีย และพม่า ความยาวสุดของประเทศ วัดจากเหนือสุดที่อำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย ถึงอำเภอเบตง จังหวัดยะลา ประมาณ 1,620 กิโลเมตร

ความกว้างที่สุดวัดจากด่านเจดีย์สามองค์ อำเภอสังขละบุรี จังหวัดกาญจนบุรี ถึงอำเภอ สิรินธร จังหวัดอุบลราชธานี ประมาณ 780 กิโลเมตร

ส่วนที่แคบที่สุดของประเทศไทยอยู่ในเขตอำเภอเมือง จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ วัดจาก พรหมแดนพม่าถึงฝั่งทะเลด้านตะวันออก (อ่าวไทย) มีระยะทางประมาณ 10.6 กิโลเมตร

## 3. อาณาเขตติดต่อ

3.1 พรหมแดนด้านเหนือ ติดต่อกับประเทศพม่า ได้แก่ ดินแดนเหนือสุดในเขตอำเภอ แม่สาย จังหวัดเชียงรายไปทางตะวันตกจนถึงจังหวัดแม่ฮ่องสอน ตามแนวทิวเขาแดนลาว ทิวเขาดนนงชัย และแม่น้ำเมย เป็นพรหมแดนธรรมชาติ ส่วนด้านตะวันออกของภาคเหนือ ติดต่อกับ ประเทศลาว ในเขตอำเภอเชียงแสน จังหวัดเชียงราย เข้าสู่จังหวัดพะเยา น่าน อุตรดิตถ์ มีทิวเขา หลวงพระบาง เป็นพรหมแดนธรรมชาติ

3.2 พรหมแดนด้านตะวันออก ติดต่อกับประเทศลาว กัมพูชา พรหมแดนที่ติดกับ ประเทศลาวเริ่มจากจังหวัดเลย หนองคาย นครพนม มุกดาหาร อำนาจเจริญ และอุบลราชธานี



มีแม่น้ำโขงเป็นพรมแดนธรรมชาติ พรมแดนที่ติดกับประเทศกัมพูชา ได้แก่ พื้นที่บางส่วนของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (อีสานตอนล่าง) จากอำเภอโนนชัย จังหวัดอุบลราชธานี บุรีรัมย์ สุรินทร์ ศรีสะเกษ แล้วไปภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่จังหวัดสระแก้ว จันทบุรี และตราด โดยมีทิวเขาพนมดงรัก และทิวเขาบรรทัดเป็นพรมแดนธรรมชาติ

3.3 พรมแดนด้านตะวันตก ติดต่อกับประเทศพม่า เริ่มที่จังหวัดตาก กาญจนบุรี ราชบุรี เพชรบุรี ประจวบคีรีขันธ์ ชุมพร และระนอง มีทิวเขาถนนธงชัย และทิวเขาตะนาวศรี แม่น้ำเมย แม่น้ำกระบุรี เป็นพรมแดนธรรมชาติ

3.4 พรมแดนด้านใต้ ติดกับประเทศมาเลเซีย มีพื้นที่ 4 จังหวัด คือ จังหวัดสตูล สงขลา ยะลา และนราธิวาส โดยมีทิวเขาสันกาลาคีรี และแม่น้ำโก-ลก เป็นพรมแดนธรรมชาติ

## ลักษณะทางกายภาพของประเทศไทย

### 1. ลักษณะทางกายภาพของประเทศไทย

ลักษณะภูมิประเทศของประเทศไทยสามารถแบ่งออกได้ 6 ลักษณะ คือ

1.1 ที่ราบภาคกลาง ได้แก่ บริเวณที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา แม่น้ำท่าจีน และแม่น้ำแม่กลอง ฯลฯ เป็นเขตที่ราบที่ใหญ่ที่สุดของประเทศ เหมาะแก่การเพาะปลูก ทั้งนี้เพราะดินเป็นดินตะกอนที่แม่น้ำพัดพามาทับถม ทำให้ดินอุดมสมบูรณ์

1.2 ที่ราบสูงภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ได้แก่ พื้นที่บริเวณที่ราบสูง ตั้งแต่ทิวเขาเพชรบูรณ์ ทิวเขาดงพญาเย็น ทิวเขาพนมดงรัก ถึงแม่น้ำโขง และที่ราบต่ำของกัมพูชาในทิศใต้

1.3 เขตภูเขาและที่ราบระหว่างเขาภาคเหนือ เป็นที่ราบแคบ ๆ สลับกับภูเขาในภาคเหนือ เช่น ที่ราบลุ่มแม่น้ำปิง ลุ่มแม่น้ำวัง ลุ่มแม่น้ำยม ลุ่มแม่น้ำน่าน เป็นต้น

1.4 เขตภูเขาสูงภาคตะวันตก มีลักษณะเป็นทิวเขายาวต่อเนื่องเรียงกันในแนวเหนือใต้ ทิวเขาสำคัญ ได้แก่ ทิวเขาถนนธงชัย ทิวเขาตะนาวศรี โดยมีแม่น้ำสายสำคัญ คือ แม่น้ำแควใหญ่ (ศรีสวัสดิ์) แม่น้ำแควน้อย (ไทรโยค) และแม่น้ำแม่กลอง

1.5 เขตภูเขาและที่ราบชายฝั่งภาคตะวันออก มีทิวเขาจันทบุรี วางตัวในแนวตะวันออกและตะวันตก ทำให้ภาคตะวันออกตอนบนมีลักษณะภูมิประเทศเป็นที่ราบลุ่มแม่น้ำบางปะกง และตอนล่างเป็นที่ราบชายฝั่งทะเล

1.6 เขตภูเขา และที่ราบชายฝั่งคาบสมุทรภาคใต้ ลักษณะภูมิประเทศเป็นคาบสมุทรยาวไปทางใต้มีทะเลขนานทั้งสองด้าน คือ ด้านอ่าวไทย (ตะวันออกเฉียง) และทะเลอันดามัน (ตะวันตก)

### 2. โครงสร้างและอายุหินในประเทศไทย

กรมทรัพยากรธรณี กระทรวงอุตสาหกรรม ได้สำรวจและศึกษาถึงอายุของหินประเภทต่าง ๆ ที่พบในประเทศไทย พบหมู่หินต่าง ๆ ดังนี้

- 2.1 หมูหินตะรุเตา เป็นหินทราย มีอายุประมาณ 700 ล้านปี มีความเก่าแก่ที่สุด
- 2.2 หมูหินทุ่งสง เป็นหินปูน สีเทาเข้ม พบที่อำเภอทุ่งสง จังหวัดนครศรีธรรมราช
- 2.3 หมูหินตะนาวศรี เป็นหินดินดาน และหินทราย พบที่จังหวัดกาญจนบุรี
- 2.4 หมูหินราชบุรี เป็นหินปูนสีเทาอ่อน มีชั้นหนา สลับกับหินชนิดอื่น ๆ
- 2.5 หมูหินลำปาง เป็นหินทราย หินปูน หินดินดาน และหินภูเขาไฟแทรกอยู่ พบที่จังหวัดลำปาง และบุรีรัมย์ (หินภูเขาไฟ)
- 2.6 หมูหินโคราช เป็นหินทราย หินกรวด และหินดินดาน บางแห่งมีชั้นหินเกลือแทรกอยู่
- 2.7 หมูหินกระบี่ เป็นหินยุคใหม่ กึ่งแข็งกึ่งร่วน พบในจังหวัดกระบี่ และลำปาง เช่น หินไนต์ หินน้ำมัน

ลักษณะของหินในประเทศไทยมี 3 ประเภท คือ

- 1) หินอัคนี เป็นหินที่เกิดจากหินหนืดได้เปลือกโลก ได้แก่ หินบะซอลต์ หินแกรนิต เป็นต้น ซึ่งจะพบในเขตภูเขาภาคเหนือ ภาคตะวันออก และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
- 2) หินตะกอน หรือหินชั้น เกิดจากการทับถมของตะกอน เศษดิน หินทราย และหินที่เกิดจากการสะสมตัวของซากดึกดำบรรพ์ต่าง ๆ มีการวางตัวเป็นชั้น ๆ ได้แก่ หินกรวดมน หินทราย หินปูน หินที่มีอายุมากจะอยู่ชั้นล่าง
- 3) หินแปร เกิดจากการแปรสภาพของหินชั้นหรือหินอัคนีต่าง ๆ เช่น หินไนต์ แปรสภาพมาจากหินแกรนิต หินอ่อน แปรสภาพมาจากหินปูน และหินชนวน แปรสภาพมาจากหินดินดาน เป็นต้น (จักรกฤษณ์ ดาวโรสง, 2553)

### 3. ลักษณะภูมิอากาศประเทศไทย

#### 3.1 ภูมิประเทศและการแบ่งภาคทางอุตุนิยมวิทยา

ประเทศไทยเป็นประเทศเล็ก ลักษณะภูมิประเทศและลมฟ้าอากาศส่วนใหญ่คล้ายคลึงกัน มีแตกต่างกันบ้างเพียงเล็กน้อย การแบ่งภาคของประเทศไทยในทางอุตุนิยมวิทยาจึงพิจารณารูปแบบภูมิอากาศและแบ่งประเทศไทย (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2558) ออกได้เป็น 5 ภาค ดังนี้

3.1.1 ภาคเหนือ ภูมิประเทศส่วนใหญ่เป็นเทือกเขา มีภูเขาติดกันเป็นพืดในแนวเหนือ-ใต้ สลับกับหุบเขาทั้งแคบและกว้างมากมาย ทิวเขาที่สำคัญได้แก่ ทิวเขาแดนลาว ซึ่งอยู่ทางตอนเหนือ กั้นเขตแดนระหว่างไทยกับพม่า และเป็นต้นกำเนิดของแม่น้ำอิง ทางตะวันตกมีทิวเขาถนนธงชัยและทิวเขาตะนาวศรีบางส่วน ตอนกลางของภาคมีทิวเขาผีปันน้ำ ซึ่งเป็นต้นกำเนิดของแม่น้ำวังและแม่น้ำยม ด้านตะวันออกมีทิวเขาหลวงพระบางซึ่งเป็นต้นกำเนิดของแม่น้ำน่าน และมีทิวเขาเพชรบูรณ์บางส่วนเป็นแนวกั้นระหว่างภาคนี้กับภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ยอดเขาที่สูงที่สุด

ในประเทศไทย คือ ดอยอินทนนท์ อยู่ในเทือกเขาจอมทอง เขตจังหวัดเชียงใหม่ สูงจากระดับทะเลปานกลางประมาณ 2,565 เมตร

3.1.2 ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีลักษณะภูมิประเทศเป็นที่ราบสูงและลาดต่ำไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ ทางตะวันตกมีทิวเขาเพชรบูรณ์และทิวเขาแดงพญาเย็นเป็นแนวกั้นระหว่างภาคนี้กับภาคเหนือและภาคกลาง ส่วนทางใต้มีทิวเขาสันกำแพงกั้นระหว่างภาคนี้กับภาคตะวันออกเฉียงใต้และทิวเขาพนมดงรักกั้นพรมแดนภาคนี้กับประเทศกัมพูชา ทิวเขาเพชรบูรณ์และทิวเขาแดงพญาเย็นซึ่งสูงประมาณ 800 ถึง 1,300 เมตร และทิวเขาพนมดงรัก ซึ่งสูงประมาณ 400 เมตร เป็นแนวกั้นกระแสน้ำตะวันตกเฉียงใต้ ทำให้บริเวณด้านหลังเขาซึ่งได้แก่ พื้นที่ทางด้านตะวันตกของภาคมีฝนน้อยกว่าทางตะวันออก

3.1.3 ภาคกลาง ภูมิประเทศส่วนใหญ่เป็นที่ราบลุ่ม ระดับพื้นที่ลาดลงมาจากใต้ตามลำดับจนถึงอ่าวไทย ในภาคนี้มีภูเขาบ้างแต่ส่วนใหญ่เป็นภูเขาที่ไม่สูงมาก เว้นแต่ทางด้านตะวันตกใกล้ชายแดนประเทศพม่ามีเทือกเขาตะนาวศรีวางตัวในแนวเหนือ-ใต้ต่อเนื่องมาจากภาคเหนือเป็นแนวกั้นพรมแดนกับประเทศพม่า และมีความสูงเกินกว่า 1,600 เมตร ทางตะวันออกมีทิวเขาแดงพญาเย็นเป็นแนวแบ่งเขตภาคนี้กับภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

3.1.4 ภาคตะวันออก ลักษณะภูมิประเทศเป็นที่ราบและที่ราบ ทางตะวันออกเฉียงใต้ของภาคมีทิวเขาบรรทัดเป็นแนวกั้นพรมแดนกับประเทศกัมพูชา ถัดเข้ามามีทิวเขาจันทบุรีทางเหนือมีทิวเขาสันกำแพงและพนมดงรักวางตัวในแนวตะวันตก-ตะวันออกเป็นแนวแบ่งเขตภาคนี้กับภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ทางตะวันตกและทางใต้เป็นฝั่งทะเลติดกับอ่าวไทย มีเกาะใหญ่น้อยมากมาย

3.1.5 ภาคใต้ เป็นคาบสมุทรขนานด้วยทะเลสองด้าน ด้านตะวันตก คือ ทะเลอันดามัน ด้านตะวันออก คือ อ่าวไทยซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของทะเลจีนใต้ ทางตอนบนของภาคมีทิวเขาตะนาวศรีซึ่งวางตัวในแนวเหนือ-ใต้ ต่อเนื่องมาจากภาคเหนือและภาคกลางเป็นแนวกั้นพรมแดนกับประเทศพม่า ทางตอนล่างของภาคมีทิวเขาภูเก็ตและทิวเขานครศรีธรรมราช วางตัวในแนวเหนือ-ใต้แบ่งภาคนี้ออกเป็นสองส่วน คือ ที่ราบชายฝั่งทะเลด้านตะวันออกติดกับอ่าวไทยซึ่งมีอาณาเขตกว้างขวาง และที่ราบด้านตะวันตกขนานกับชายฝั่งทะเลอันดามันและช่องแคบมะละกา ซึ่งเป็นบริเวณแคบกว่าที่ราบด้านตะวันออก ทางทิศใต้ของภาคมีทิวเขาสันกาลาคีรีเป็นแนวกั้นพรมแดนกับประเทศมาเลเซีย ภาคนี้แบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้

3.1.5.1 ภาคใต้ฝั่งตะวันออก ได้แก่ บริเวณตอนบนของภาคต่อเนื่องถึงที่ราบชายฝั่งทะเลด้านตะวันออก ประกอบด้วย 10 จังหวัด ได้แก่ เพชรบุรี ประจวบคีรีขันธ์ ชุมพร สุราษฎร์ธานี นครศรีธรรมราช พัทลุง สงขลา ปัตตานี ยะลา และนราธิวาส

3.1.5.2 ภาคใต้ฝั่งตะวันตก ประกอบด้วย 6 จังหวัด ได้แก่ ระนอง พังงา ภูเก็ต กระบี่ ตรัง และสตูล

### 3.2 ลมมรสุมกับภูมิอากาศของประเทศไทย

ประเทศไทยอยู่ภายใต้อิทธิพลของมรสุมสองชนิด คือ มรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ

3.2.1 มรสุมตะวันตกเฉียงใต้ พัดปกคลุมประเทศไทยระหว่างกลางเดือน พฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม โดยมีแหล่งกำเนิดจากบริเวณความกดอากาศสูงในซีกโลกใต้ บริเวณมหาสมุทรอินเดีย ซึ่งพัดออกจากศูนย์กลางเป็นลมตะวันออกเฉียงใต้ และเปลี่ยนเป็นลมตะวันตกเฉียงใต้เมื่อพัดข้ามเส้นศูนย์สูตร มรสุมนี้จะนำมวลอากาศชื้นจากมหาสมุทรอินเดียมาสู่ ประเทศไทย ทำให้มีเมฆมากและฝนชุกทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งตามบริเวณชายฝั่งทะเลและ เทือกเขาด้านรับลมจะมีฝนมากกว่าบริเวณอื่น

3.2.2 มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือหลังจากหมดอิทธิพลของมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ แล้วประมาณกลางเดือนตุลาคมจะมีมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือพัดปกคลุมประเทศไทยจนถึง กลางเดือนกุมภาพันธ์ มรสุมนี้มีแหล่งกำเนิดจากบริเวณความกดอากาศสูงในซีกโลกเหนือ แถบประเทศมองโกเลียและจีน จึงพัดพาเอามวลอากาศเย็นและแห้งจากแหล่งกำเนิดเข้ามาปกคลุม ประเทศไทย ทำให้ท้องฟ้าโปร่ง อากาศหนาวเย็นและแห้งแล้งทั่วไป โดยเฉพาะภาคเหนือและ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ส่วนภาคใต้จะมีฝนชุกโดยเฉพาะภาคใต้ฝั่งตะวันออก เนื่องจากมรสุมนี้ นำความชุ่มชื้นจากอ่าวไทยเข้ามาปกคลุม การเริ่มต้นและสิ้นสุดมรสุมทั้งสองชนิดอาจผันแปร ไปจากปกติได้ในแต่ละปี

### 3.3 ฤดูกาล ประเทศไทยโดยทั่ว ๆ ไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ฤดู ดังนี้

ฤดูร้อน ระหว่างกลางเดือนกุมภาพันธ์ถึงกลางเดือนพฤษภาคม

ฤดูฝน ระหว่างกลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม

ฤดูหนาว ระหว่างกลางเดือนตุลาคมถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์

3.3.1 ฤดูร้อน เริ่มตั้งแต่กลางเดือนกุมภาพันธ์ไปจนถึงกลางเดือนพฤษภาคม ซึ่งเป็นช่วงเปลี่ยนจากมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือเป็นมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และเป็นระยะที่ขั้วโลกเหนือหันเข้าหาดวงอาทิตย์ โดยเฉพาะเดือนเมษายนบริเวณประเทศไทยมีดวงอาทิตย์อยู่เกือบตรงศีรษะในเวลาเที่ยงวัน ทำให้ได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์เต็มที่ สภาวะอากาศจึงร้อนอบอ้าว ทั่วไป ในฤดูนี้แม้ว่าโดยทั่วไปจะมีอากาศร้อนและแห้งแล้ง แต่บางครั้งอาจมีมวลอากาศเย็น จากประเทศจีนแผ่ลงมาปกคลุมถึงประเทศไทยตอนบน ทำให้เกิดการปะทะกันของมวลอากาศเย็น กับมวลอากาศร้อนที่ปกคลุมอยู่เหนือประเทศไทยซึ่งก่อให้เกิดพายุฝนฟ้าคะนองและลมกระโชกแรง หรืออาจมีลูกเห็บตกก่อให้เกิดความเสียหายได้ พายุฝนฟ้าคะนองที่เกิดขึ้นในฤดูนี้มักเรียกอีกอย่างหนึ่ง

ว่า พายุฤดูร้อน ลักษณะอากาศในฤดูร้อนพิจารณาจากอุณหภูมิสูงสุดของแต่ละวัน โดยมีเกณฑ์การพิจารณาดังนี้

อากาศร้อน อุณหภูมิระหว่าง 35.0 °C - 39.9 °C

อากาศร้อนจัด อุณหภูมิตั้งแต่ 40.0 °C ขึ้นไป

3.3.2 ฤดูฝน เริ่มตั้งแต่กลางเดือนพฤษภาคม เมื่อมรสุมตะวันตกเฉียงใต้พัดปกคลุมประเทศไทยและร่องความกดอากาศต่ำพาดผ่านประเทศไทยทำให้มีฝนชุกทั่วไป ร่องความกดอากาศต่ำนี้ปกติจะพาดผ่านภาคใต้ในเดือนพฤษภาคม แล้วจึงเลื่อนขึ้นไปทางเหนือตามลำดับจนถึงช่วงประมาณปลายเดือนมิถุนายนจะพาดผ่านอยู่บริเวณประเทศจีนตอนใต้ ทำให้ฝนในประเทศไทยลดลงระยะหนึ่ง และเรียกว่าเป็นช่วงฝนทิ้ง ซึ่งอาจนานประมาณ 1 – 2 สัปดาห์หรือบางปีอาจเกิดขึ้นรุนแรงและมีฝนน้อยนานนับเดือน ในเดือนกรกฎาคม ปกติร่องความกดอากาศต่ำจะเลื่อนกลับลงมาทางใต้พาดผ่านบริเวณประเทศไทยอีกครั้งทำให้มีฝนชุกต่อเนื่อง จนกระทั่งมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือพัดเข้ามาปกคลุมประเทศไทยแทนที่มรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ประมาณกลางเดือนตุลาคมประเทศไทยตอนบนจะเริ่มมีอากาศเย็นและฝนลดลง โดยเฉพาะภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เว้นแต่ภาคใต้ยังคงมีฝนชุกต่อไปจนถึงเดือนธันวาคม และมักมีฝนหนักถึงหนักมากจนก่อให้เกิดอุทกภัย โดยเฉพาะภาคใต้ฝั่งตะวันออกซึ่งจะมีปริมาณฝนมากกว่าภาคใต้ฝั่งตะวันตก อย่างไรก็ตาม การเริ่มต้นฤดูฝนอาจจะช้าหรือเร็วกว่ากำหนดได้ประมาณ 1 - 2 สัปดาห์

เกณฑ์การพิจารณาปริมาณฝนในระยะเวลา 24 ชั่วโมงของแต่ละวันตั้งแต่เวลา 07.00 น. ของวันหนึ่งถึงเวลา 07.00 น. ของวันรุ่งขึ้น ตามลักษณะของฝนที่ตกในประเทศที่อยู่ในเขตร้อนเข่านมรสุม มีดังนี้

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

3.3.3 ฤดูหนาว เริ่มตั้งแต่กลางเดือนตุลาคมถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ เมื่อมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือพัดปกคลุมประเทศไทยตั้งแต่กลางเดือนตุลาคม ในช่วงกลางเดือนตุลาคมหนาว 1-2 สัปดาห์ เป็นช่วงเปลี่ยนฤดูจากฤดูฝนเป็นฤดูหนาว อากาศแปรปรวน ไม่แน่นอน อาจเริ่มมีอากาศเย็นหรืออาจยังมีฝนฟ้าคะนอง โดยเฉพาะบริเวณภาคกลางตอนล่างและภาคตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งจะหมดฝนและเริ่มมีอากาศเย็นช้ากว่าภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ลักษณะอากาศในฤดูหนาวพิจารณาจากอุณหภูมิต่ำสุดของแต่ละวัน โดยมีเกณฑ์การพิจารณา ดังนี้

อากาศหนาวจัด อุณหภูมิต่ำกว่า 8.0 °C

อากาศหนาว อุณหภูมิระหว่าง 8.0 °C - 15.9 °C

อากาศเย็น อุณหภูมิระหว่าง 16.0 °C - 22.9 °C

### 3.4 อุณหภูมิ

ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อน สภาพอากาศโดยทั่วไปจึงร้อนอบอ้าวเกือบตลอดปี อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดปีของประเทศไทยมีค่าประมาณ 27.0 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิจะมีความแตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่และฤดูกาล พื้นที่ที่อยู่ลึกเข้าไปในแผ่นดินบริเวณตั้งแต่ภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือขึ้นไปจนถึงภาคเหนือจะมีอุณหภูมิแตกต่างกันมากระหว่างฤดูร้อนกับฤดูหนาวและระหว่างกลางวันกับกลางคืน โดยในช่วงฤดูร้อนอุณหภูมิสูงสุดในตอนบ่ายปกติจะสูงถึงเกือบ 40 องศาเซลเซียส หรือมากกว่านั้นในช่วงเดือนมีนาคมถึงพฤษภาคม โดยเฉพาะเดือนเมษายนจะเป็นเดือนที่มีอากาศร้อนจัดที่สุดในรอบปี ส่วนฤดูหนาวอุณหภูมิต่ำสุดในตอนเช้ามืดจะลดลงอยู่ในเกณฑ์หนาวถึงหนาวจัด โดยเฉพาะเดือนธันวาคมถึงมกราคมเป็นช่วงที่มีอากาศหนาวมากที่สุดในรอบปี ซึ่งในช่วงดังกล่าวอุณหภูมิจากลดลงต่ำกว่าจุดเยือกแข็งได้ในภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือบริเวณพื้นที่ซึ่งเป็นที่กึ่งเขาหรือบนยอดเขาสูง สำหรับพื้นที่ซึ่งอยู่ติดทะเลได้แก่ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคใต้ ความผันแปรของอุณหภูมิในช่วงวันและฤดูกาลจะน้อยกว่าโดยฤดูร้อนอากาศไม่ร้อนจัดและฤดูหนาวอากาศไม่หนาวจัดเท่าพื้นที่ซึ่งอยู่ลึกเข้าไปในแผ่นดิน

ตารางที่ 2-1 สถิติอุณหภูมิ (°C) ของประเทศไทยในฤดูกาลต่าง ๆ (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2558)

อุณหภูมิ	ภาค	ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	ฤดูฝน
	ใต้			
	- ฝั่งตะวันออก	30.4	33.0	32.7
	- ฝั่งตะวันตก	32.0	34.1	31.6
ต่ำสุดเฉลี่ย	เหนือ	17.5	21.8	23.8
	ตะวันออกเฉียงเหนือ	18.7	23.2	24.4
	กลาง	21.2	24.6	24.8
	ตะวันออก	22.3	25.2	25.2
	ใต้			
	- ฝั่งตะวันออก	22.8	24.1	24.4
	- ฝั่งตะวันตก	23.2	24.0	24.3

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยในคาบ 30 ปี (พ.ศ.2524-2553)

ตารางที่ 2-2 สถิติอุณหภูมิสูงสุด (°C) ของประเทศไทยในช่วงฤดูร้อน (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2558)

ภาค	อุณหภูมิสูงสุด	วันที่ เดือน พ.ศ.	จังหวัด
เหนือ	44.5	27 เม.ย. 2503	อุตรดิตถ์ (อ.เมือง)
ตะวันออกเฉียงเหนือ	43.9	28 เม.ย. 2503	อุดรธานี (อ.เมือง)
กลาง	43.5	29 เม.ย. 2501	กาญจนบุรี (อ.เมือง)
		14 เม.ย. 2526	กาญจนบุรี (อ.เมือง)
		14, 20 เม.ย. 2535	กาญจนบุรี (อ.เมือง)
ตะวันออก	42.9	23 เม.ย. 2533	ปราจีนบุรี (อ.กบินทร์บุรี)
ใต้			
- ฟังตะวันออก	41.2	15 เม.ย. 2541	ประจวบคีรีขันธ์ (สภ.หนองพลับ อ.หัวหิน)
- ฟังตะวันตก	40.5	29 มี.ค. 2535	ตรัง (อ.เมือง)

หมายเหตุ 1. สภ. หมายถึง สถานีอากาศเกษตร 2. ข้อมูลในคาบ 65 ปี (พ.ศ.2494 – 2558)

ตารางที่ 2-3 สถิติอุณหภูมิต่ำที่สุด (°C) ของประเทศไทยในช่วงฤดูหนาว (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2558)

ภาค	อุณหภูมิต่ำที่สุด	วันที่ เดือน พ.ศ.	จังหวัด
เหนือ	0.8	27 ธ.ค. 2542	ตาก (อ.อุ้มผาง)
ตะวันออกเฉียงเหนือ	-1.4	2 ม.ค. 2517	สกลนคร (สภ.สกลนคร)
กลาง	5.2	27 ธ.ค. 2536	กาญจนบุรี (อ.ทองผาภูมิ)
ตะวันออก	7.6	16 ม.ค. 2506	สระแก้ว (อ.อรัญประเทศ)
ใต้			
- ฟังตะวันออก	6.4	26 ธ.ค. 2542	ประจวบคีรีขันธ์ (สภ.หนองพลับ อ.หัวหิน)
- ฟังตะวันตก	13.7	21 ม.ค. 2499	ระนอง (อ.เมือง)

หมายเหตุ 1. สภ. หมายถึง สถานีอากาศเกษตร 2. ข้อมูลในคาบ 65 ปี (พ.ศ.2494 – 2558)

### 3.5 ปริมาณฝน

โดยทั่วไปประเทศไทยมีฝนอยู่ในเกณฑ์ดี พื้นที่ส่วนใหญ่มีปริมาณฝน 1,200-1,600 มิลลิเมตรต่อปี ปริมาณฝนรวมตลอดปีเฉลี่ยทั่วประเทศมีค่าประมาณ 1,587.7 มิลลิเมตร ปริมาณฝนในแต่ละพื้นที่ผันแปรไปตามลักษณะภูมิประเทศนอกเหนือจากการผันแปรตามฤดูกาล บริเวณประเทศไทยตอนบนปกดิจะแห้งแล้งและมีฝนน้อยในฤดูหนาว เมื่อเข้าสู่ฤดูร้อน ปริมาณฝนจะเพิ่มขึ้นบ้างพร้อมทั้งมีพายุฟ้าคะนอง และเมื่อเข้าสู่ฤดูฝนปริมาณฝนจะเพิ่มขึ้นมากโดยจะมีปริมาณฝนมากที่สุดในเดือนสิงหาคมหรือกันยายน พื้นที่ที่มีปริมาณฝนมากส่วนใหญ่จะอยู่ด้านหน้าทิวเขาหรือด้านรับลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ ได้แก่ พื้นที่ทางด้านตะวันตกของประเทศและบริเวณภาคตะวันออก โดยเฉพาะที่อำเภอคลองใหญ่ จังหวัดตราด มีปริมาณฝนรวมตลอดปีมากกว่า 4,000 มิลลิเมตร ส่วนพื้นที่ที่มีฝนน้อยส่วนใหญ่อยู่ด้านหลังเขา ได้แก่ พื้นที่บริเวณตอนกลางของภาคเหนือและภาคกลาง และบริเวณด้านตะวันตกของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ สำหรับภาคใต้มีฝนชุกเกือบตลอดปียกเว้นช่วงฤดูร้อน พื้นที่บริเวณภาคใต้ฝั่งตะวันตกซึ่งเป็นด้านรับลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ จะมีปริมาณฝนมากกว่าภาคใต้ฝั่งตะวันออกในช่วงฤดูฝน โดยมีปริมาณฝนมากที่สุดในเดือนกันยายน ส่วนช่วงฤดูหนาวบริเวณภาคใต้ฝั่งตะวันออกซึ่งเป็นด้านรับลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ จะมีปริมาณฝนมากกว่าภาคใต้ฝั่งตะวันตก โดยมีปริมาณฝนมากที่สุดในเดือนพฤศจิกายน พื้นที่ที่มีปริมาณฝนมากที่สุดของภาคใต้อยู่บริเวณจังหวัดระนองซึ่งมีปริมาณฝนรวมตลอดปีมากกว่า 4,000 มิลลิเมตร ส่วนพื้นที่ที่มีฝนน้อย ได้แก่ ภาคใต้ฝั่งตะวันออกตอนบนด้านหลังทิวเขาตะนาวศรี บริเวณ จังหวัดเพชรบุรีและประจวบคีรีขันธ์

ตารางที่ 2-4 ปริมาณฝน (มิลลิเมตร) ของประเทศไทยในฤดูกาลต่าง ๆ (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2558)

ภาค	ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	ฤดูฝน	จำนวนวันฝนตกตลอดปี
เหนือ	100.4	187.3	943.2	122
ตะวันออกเฉียงเหนือ	76.3	224.4	1,103.8	116
กลาง	127.3	205.4	942.5	116
ตะวันออก	178.4	277.3	1,433.2	130
ใต้				
- ฝั่งตะวันออก	827.9	229.0	680.0	145
- ฝั่งตะวันตก	464.6	411.3	1,841.3	178

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยในคาบ 30 ปี (พ.ศ.2524-2553)



### 3.6 ความชื้นสัมพัทธ์

ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนใกล้เส้นศูนย์สูตรจึงมีอากาศร้อนชื้นปกคลุมเกือบตลอดปี เว้นแต่บริเวณที่อยู่ลึกเข้าไปในแผ่นดินตั้งแต่ภาคกลางขึ้นไป ความชื้นสัมพัทธ์จะลดลงชัดเจนในช่วงฤดูหนาวและฤดูร้อน โดยเฉพาะฤดูร้อนจะเป็นช่วงที่ความชื้นสัมพัทธ์ลดลงต่ำสุดในรอบปี ในบริเวณดังกล่าวมีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยตลอดปี 73-75 เปอร์เซ็นต์ และจะลดลงเหลือ 64-69 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงฤดูร้อน และเคยมีความชื้นสัมพัทธ์ลดลงต่ำที่สุดเพียง 9 เปอร์เซ็นต์ เมื่อวันที่ 23 มีนาคม พ.ศ. 2526 ที่จังหวัดเลย และเมื่อวันที่ 23 เมษายน พ.ศ. 2533 ที่จังหวัดเชียงราย ส่วนบริเวณที่อยู่ติดฝั่งทะเล ได้แก่ ภาคตะวันออกและภาคใต้จะมีความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า โดยเฉพาะภาคใต้มีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยตลอดปี 79-80 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2-5 สถิติความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (%) ของประเทศไทยในช่วงฤดูกาลต่าง ๆ

(กรมอุตุนิยมวิทยา, 2558)

ภาค	ฤดูหนาว	ฤดูร้อน	ฤดูฝน	ตลอดปี
เหนือ	74	63	81	74
ตะวันออกเฉียงเหนือ	69	66	80	73
กลาง	70	68	78	73
ตะวันออก	71	75	81	76
ใต้				
- ฝั่งตะวันออก	81	78	79	79
- ฝั่งตะวันตก	78	77	84	80

หมายเหตุ ค่าเฉลี่ยในคาบ 30 ปี (พ.ศ.2524-2553)

### 3.8 พายุฟ้าคะนอง

ประเทศไทยตอนบนมีโอกาสเกิดพายุฟ้าคะนองมากในช่วงเดือนเมษายนถึงตุลาคม โดยเฉพาะเดือนเมษายนถึงพฤษภาคมเป็นช่วงที่มีโอกาสเกิดพายุฟ้าคะนองได้มาก เนื่องจากสภาพอากาศที่ร้อนอบอ้าว จึงมีการยกตัวของมวลอากาศ และอาจมีมวลอากาศเย็นจากประเทศจีนแผ่ลงมาในขณะที่มวลอากาศร้อนปกคลุมอยู่เหนือประเทศไทยทำให้เกิดการปะทะกันของมวลอากาศร้อนและเย็น ซึ่งในกรณีที่มีพายุฟ้าคะนองรุนแรงอาจมีฝนตกหนักถึงหนักมาก มีลมกระโชกแรง และอาจมีลูกเห็บตกก่อให้เกิดความเสียหายได้ ส่วนภาคใต้เกิดขึ้นได้มากในช่วงเดือนมีนาคมถึงพฤศจิกายน

### 3.9 ลมผิวพื้น

ลมผิวพื้นที่พัดปกคลุมประเทศไทย ผันแปรไปตามฤดูกาลในฤดูหนาวหรือฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือลมที่พัดปกคลุมประเทศไทยตอนบนส่วนใหญ่เป็นลมฝ่ายเหนือ และลมตะวันออกเฉียงเหนือ ส่วนภาคใต้ลมที่พัดปกคลุมส่วนใหญ่เป็นลมตะวันออกเฉียงเหนือและลมตะวันออกเฉียง ในช่วงฤดูฝนหรือฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ลมที่พัดปกคลุมประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นลมตะวันตก ลมตะวันตกเฉียงใต้ และลมใต้ สำหรับช่วงฤดูร้อนเป็นช่วงที่ลมแปรปรวน แต่พื้นที่ส่วนใหญ่โดยเฉพาะประเทศไทยตอนบนมักมีลมฝ่ายใต้พัดปกคลุม

### 3.10 พายุหมุนเขตร้อน

ประเทศไทยตั้งอยู่ระหว่างบริเวณแหล่งกำเนิดของพายุหมุนเขตร้อนทั้งสองด้าน ด้านตะวันออก คือ มหาสมุทรแปซิฟิกและทะเลจีนใต้ ส่วนด้านตะวันตก คือ อ่าวเบงกอล และทะเลอันดามัน โดยพายุมีโอกาสเคลื่อนจากมหาสมุทรแปซิฟิกและทะเลจีนใต้เข้าสู่ประเทศไทยทางด้านตะวันออกมากกว่าทางตะวันตก ปกติประเทศไทยจะมีพายุเคลื่อนผ่านเข้ามาได้โดยเฉลี่ยประมาณ 3 - 4 ลูกต่อปี บริเวณที่พายุมีโอกาสเคลื่อนผ่านเข้ามามากที่สุด คือ ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยเฉพาะทางตอนบนของภาค ในระยะต้นปีระหว่างเดือนมกราคมถึงมีนาคมเป็นช่วงที่ประเทศไทยปลอดจากอิทธิพลของพายุ ต่อมาเดือนเมษายนเป็นเดือนแรกของปีที่พายุเริ่มเคลื่อนเข้าสู่ประเทศไทยทางภาคใต้ แต่มีโอกาสน้อยและเคยเกิดขึ้นเพียงครั้งเดียวในรอบ 62 ปี (พ.ศ. 2494-2555) พายุเริ่มมีโอกาสเคลื่อนเข้าสู่ประเทศไทยมากขึ้นตั้งแต่เดือนพฤษภาคม โดยส่วนใหญ่ยังคงเป็นพายุที่เคลื่อนมาจากด้านตะวันตกเข้าสู่ประเทศไทยตอนบน และตั้งแต่เดือนมิถุนายนเป็นต้นไป พายุส่วนใหญ่จะเคลื่อนเข้าสู่ประเทศไทยทางด้านตะวันออก โดยช่วงระหว่างเดือนมิถุนายนถึงสิงหาคมพายุยังคงเคลื่อนเข้าสู่ประเทศไทยตอนบน ซึ่งบริเวณตอนบนของภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นพื้นที่ที่พายุมีโอกาสเคลื่อนผ่านเข้ามามากที่สุด และเดือนกันยายนถึงตุลาคมพายุมีโอกาสเคลื่อนเข้ามาได้ในทุกพื้นที่ โดยเริ่มเคลื่อนเข้าสู่ภาคใต้ตั้งแต่เดือนกันยายน ในสองเดือนนี้เป็นระยะที่พายุมีโอกาสเคลื่อนเข้าสู่ประเทศไทยได้มาก โดยเฉพาะเดือนตุลาคม มีสถิติเคลื่อนเข้ามาที่สุดในรอบปี สำหรับช่วงปลายปีตั้งแต่เดือนพฤศจิกายนพายุจะเคลื่อนเข้าสู่ประเทศไทยตอนบนได้น้อยลงและมีโอกาสเคลื่อนเข้าสู่ภาคใต้มากขึ้น เมื่อถึงเดือนธันวาคม พายุมีแนวโน้มเคลื่อนเข้าสู่ภาคใต้เท่านั้น โดยไม่มีพายุเคลื่อนเข้าสู่ประเทศไทยตอนบนอีก พายุหมุนเขตร้อนมีชื่อเรียกต่างกันไปตามแหล่งกำเนิด เช่น พายุที่เกิดในอ่าวเบงกอลและมหาสมุทรอินเดีย เรียกว่า “ไซโคลน” (CYCLONE) เกิดในมหาสมุทรแอตแลนติกเหนือ ทะเลแคริบเบียน อ่าวเม็กซิโก และทางด้านตะวันตกของเม็กซิโก เรียกว่า “เฮอริเคน” (HURRICANE) เกิดในมหาสมุทรแปซิฟิกเหนือด้านตะวันตก มหาสมุทรแปซิฟิกใต้ และทะเลจีนใต้ เรียกว่า “ไต้ฝุ่น” (TYPHOON) พายุหมุนเขตร้อนที่มีอิทธิพลต่อลมฟ้าอากาศของประเทศไทยส่วนใหญ่มีแหล่งกำเนิดในมหาสมุทรแปซิฟิก

เหนือด้านตะวันตกและทะเลจีนใต้ ซึ่งมีการแบ่งเกณฑ์ความรุนแรงของพายุตามข้อตกลงระหว่างประเทศโดยใช้ความเร็วลมใกล้ศูนย์กลางพายุ ดังนี้

พายุดีเปรสชัน ความเร็วลมไม่เกิน 34 นอต (63 กิโลเมตร/ ชั่วโมง)

พายุโซนร้อน ความเร็วลม 34 นอต แต่ไม่ถึง 64 นอต (63 แต่ไม่ถึง 118 กิโลเมตร/ ชั่วโมง)

ไต้ฝุ่น ความเร็วลม 64 นอตขึ้นไป (118 กิโลเมตร/ ชั่วโมง ขึ้นไป)

พายุที่เคลื่อนเข้าสู่ประเทศไทยตอนบนส่วนใหญ่เป็นพายุดีเปรสชัน เนื่องจากพื้นดินและเทือกเขาของประเทศพม่า เวียดนาม ลาว และกัมพูชา ที่ล้อมรอบประเทศไทยตอนบนเป็นปัจจัยที่ช่วยลดความรุนแรงของพายุก่อนที่จะเคลื่อนมาถึงประเทศไทย ดังนั้น ความเสียหายที่เกิดจากลมแรงจึงน้อยกว่าภาคใต้ซึ่งมีภูมิประเทศเป็นพื้นที่เปิดสู่ทะเล พายุที่เคลื่อนเข้าสู่อ่าวไทยและขึ้นฝั่งภาคใต้ขณะมีกำลังแรงขนาดพายุโซนร้อนหรือไต้ฝุ่นจะมีผลกระทบเป็นอย่างมากจากคลื่นพายุซัดฝั่งลมที่พัดแรงจัด และฝนที่ตกหนักถึงหนักมากจนเกิดอุทกภัย รวมทั้งคลื่นลมแรงในอ่าวไทย ดังเช่นที่เคยเกิดขึ้น 3 ครั้งในอดีต ได้แก่ พายุโซนร้อน “แฮเรียต” ที่เคลื่อนเข้าสู่แหลมตะลุมพุก จังหวัดนครศรีธรรมราช เมื่อวันที่ 25-26 ตุลาคม พ.ศ. 2505 พายุไต้ฝุ่น “เกย์” ที่เคลื่อนเข้าสู่จังหวัดชุมพร เมื่อวันที่ 4 พฤศจิกายน พ.ศ. 2532 และพายุไต้ฝุ่น “ลินดา” ที่เคลื่อนเข้าสู่จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ขณะมีกำลังแรงเป็นพายุโซนร้อน เมื่อวันที่ 4 พฤศจิกายน พ.ศ. 2540 (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2558)

ตารางที่ 2-6 สถิติพายุหมุนเขตร้อนที่เคลื่อนผ่านภาคต่าง ๆ ของประเทศไทยคาบ 65 ปี ( พ.ศ. 2494-2558) (กรมอุตุนิยมวิทยา, 2558)

ภาค	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รวม
เหนือ		5	2	10	17	25	11	1		71
ตะวันออกเฉียงเหนือ		1	6	4	18	33	25	4		91
กลาง		2	1	1		7	9	2		22
ตะวันออกเฉียงใต้		1	1	1		3	13	2		21
ใต้	1	1				3	15	24	9	53

## แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 1. แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวกับคาร์บอนไดออกไซด์

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ เกิดจากธรรมชาติและเกิดจากฝีมือมนุษย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง การตัดไม้ทำลายป่า นับว่าเป็นตัวการสำคัญที่สุดในการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ ทั้งนี้เนื่องจาก ต้นไม้และป่าไม้มีคุณสมบัติที่ดี สามารถ

ดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไว้ก่อนที่จะลอยขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ ดังนั้น เมื่อพื้นที่ป่าลดน้อยลง ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จึงขึ้นไปสะสมอยู่ในชั้นบรรยากาศได้มากขึ้น จากผลการศึกษา ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยหน่วยงาน IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) ระบุว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซเรือนกระจกที่ทำให้เกิดพลังงานความร้อน สะสมในบรรยากาศของโลกมากที่สุด ในบรรดาก๊าซเรือนกระจกชนิดอื่น ๆ ทั้งยังมีแนวโน้มเพิ่ม มากขึ้นกว่าก๊าซชนิดอื่น ๆ ด้วย ซึ่งหมายถึง ผลกระทบโดยตรงต่ออุณหภูมิของโลกและ ชั้นบรรยากาศจะยิ่งทวีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น ล่าสุดหน่วยงาน IPCC ได้รายงานปริมาณก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น โดยมีมนุษย์ที่ทำให้พลังงานรังสีความร้อนสะสมบนผิวโลก และชั้นบรรยากาศ เพิ่มขึ้นประมาณ 1.56 วัตต์ต่อตารางเมตร ในปริมาณนี้ยังไม่คิดรวมผลกระทบ ที่เกิดขึ้นทางอ้อมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (กรีนพีซ, 2553)

### 1.1 ความสำคัญของคาร์บอนไดออกไซด์

คาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซที่ไม่มีสี อยู่ในชั้นบรรยากาศมีสัดส่วนประมาณร้อยละ 0.03 โครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วย คาร์บอน 1 อะตอมและออกซิเจน 2 อะตอม ( $\text{CO}_2$ ) เมื่ออยู่ใน สถานะของแข็ง จะเรียกว่า น้ำแข็งแห้ง (Dry Ice) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศเกิดจากธรรมชาติ และเกิดจากฝีมือมนุษย์ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอย่างสมบูรณ์ โรงงานอุตสาหกรรม การตัดไม้ทำลายป่า เป็นต้น ปัจจุบันพบว่ามีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่พบในอากาศเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากก๊าซชนิดนี้สามารถสะสมอยู่ในชั้นบรรยากาศได้หลายปีส่งผลให้ เกิดภาวะเรือนกระจก จึงมีความจำเป็นต้องเฝ้าติดตามปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในบรรยากาศ (สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ, มปป.)

การค้นพบก๊าซชนิดนี้ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1630 โดย Jean Baptista van Helmont จากการหมักเบียร์ และตั้งชื่อว่า "ก๊าซซิลเวสเตอร์" (Sylvestre Gas) หรือหมายถึง ก๊าซที่ได้จาก ต้นไม้ อีก 124 ปีต่อมา Joseph Black ได้ศึกษาทดลองใหม่และเตรียมก๊าซชนิดนี้ขึ้นมาได้ และตั้งชื่อว่า "ฟิกซ์แอร์" (Fixed Air) ซึ่งได้จากการผสมระหว่างซอร์คกับกรดเจือจาง หรือถ่าน กับออกซิเจน ต่อมาปี ค.ศ. 1781 Lavoisier พบธาตุที่เป็นส่วนประกอบจึงตั้งชื่อใหม่ว่า "กรด คาร์บอนิก" (ศูนย์รวมตำราเรียนรามคำแหงบนโลกอินเทอร์เน็ต, 2545)

จากทฤษฎีบิ๊กแบง (Big Bang) ซึ่งเป็นจุดกำเนิดของอวกาศและเวลา ดวงดาวต่าง ๆ ซึ่งเกิดจากการรวมตัวของอนุภาคและก๊าซต่าง ๆ ในอวกาศ รวมทั้งระบบสุริยะจักรวาลด้วย โลก นับเป็นดาวเคราะห์ดวงหนึ่งที่ถือกำเนิดขึ้นมา แต่ก็ยังไม่มียังมีชีวิตใด ๆ เกิดขึ้น เนื่องจากมีปัจจัย หลาย ๆ อย่างที่ไม่เหมาะสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุณหภูมิที่ร้อนจัดจนสามารถละลายหินได้ในเวลา กลางวัน และอุณหภูมิเย็นจัดในเวลากลางคืน เนื่องจากไม่มีชั้นบรรยากาศตอนกลางวันเมื่อได้รับ แสงอาทิตย์จะร้อนจัด และตอนกลางคืนจะเย็นจัดเนื่องจากความร้อนจากตอนกลางวัน ไม่สามารถ

สะสมไว้ได้จึงหายไปในเวลากลางคืน แต่จากปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ บนผิวโลกทำให้เกิดก๊าซมากมายขึ้นบนผิวโลก

คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นก๊าซสำคัญมากตัวหนึ่งที่เกิดขึ้นบนผิวโลกในยุคนั้น ซึ่งสมบัติของมันคือ การยอมให้แสงผ่านได้แต่จะกักพลังงานความร้อนไว้ทำให้พลังงานความร้อนที่มากับแสงถูกกักเก็บไว้บนผิวโลก และไม่หลุดหายไปในเวลากลางคืน จึงทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างกลางวันและกลางคืนไม่แตกต่างกันมากนัก นอกจากนี้ยังพบว่า มีก๊าซอื่น ๆ ที่ช่วยในการกรองรังสีต่าง ๆ ที่มากับแสงอาทิตย์ เช่น โอโซน เป็นต้น จากสถานะดังกล่าวนี้ นับเป็นจุดเริ่มต้นในการกำเนิดสิ่งมีชีวิต และวิวัฒนาการมาจนทุกวันนี้

จากการที่คาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหนึ่งของชั้นบรรยากาศโลก ถึงแม้จะมีอยู่ในปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับองค์ประกอบอื่น ๆ คือ มีประมาณร้อยละ 0.033 เท่านั้น แต่คาร์บอนไดออกไซด์กลับมีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศโลกเป็นอย่างมาก โดยมีบทบาทที่สำคัญคือ มีคุณสมบัติเป็นก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas)

ก๊าซที่มีมากเกินไปในชั้นบรรยากาศจะสะสมอยู่ในชั้นบรรยากาศ ก๊าซบางชนิดสามารถสะสมอยู่ในชั้นบรรยากาศได้นานหลายร้อยปี บางชนิดสะสมอยู่ได้ในเวลาเพียงไม่กี่ปีก็สลายไป ก๊าซเรือนกระจกที่กล่าวถึงนี้ก็เช่นกัน เนื่องจากมีปริมาณที่มากเกินไป จึงมีการสะสมอยู่ในชั้นบรรยากาศ และสะสมอยู่ได้เป็นเวลานานหลายปี ก๊าซเรือนกระจกอาจแบ่งได้เป็นสองพวกตามอายุการสะสมอยู่ในชั้นบรรยากาศ คือ พวกที่มีอายุการสะสมอยู่ในชั้นบรรยากาศไม่นาน เนื่องจากก๊าซเหล่านี้สามารถทำปฏิกิริยาได้ดีกับไอน้ำ หรือก๊าซอื่น ๆ จึงทำให้มันมีอายุสะสมเฉลี่ยสั้น ส่วนอีกพวกหนึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจก ซึ่งมีอายุสะสมเฉลี่ยนานหลายปี เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (NO<sub>2</sub>) และก๊าซคลอโรฟลูออโรคาร์บอน (CFC) เป็นต้น ก๊าซเหล่านี้ นับเป็นก๊าซที่เป็นตัวการหลักของการเกิดภาวะเรือนกระจก เนื่องจากมันมีอายุสะสมเฉลี่ยยาวนาน และสามารถดูดกลืนรังสีอินฟราเรดได้ดีกว่าก๊าซเรือนกระจกอื่น ๆ เนื่องจากก๊าซเรือนกระจกนั้นมีคุณสมบัติในการดูดซับความร้อนหรือดูดกลืนรังสีความร้อน โดยเฉพาะรังสีความร้อนที่โลกคายออกไป (ศูนย์รวมตำราเรียนรามคำแหงบนโลกอินเทอร์เน็ต, 2545)

## 1.2 ก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas) ประกอบด้วยก๊าซที่สำคัญ คือ

1.2.1 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ปัจจุบันในชั้นบรรยากาศมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 380 โมเลกุลในทุก ๆ 1 ล้านโมเลกุลของมวลอากาศ หรือ 380 ppm (Part per Million) และมีการเพิ่มขึ้นประมาณปีละ 1 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับราว 100 ปีก่อนในยุคปฏิวัติอุตสาหกรรม ระดับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ที่ประมาณ 280 ppm นักวิทยาศาสตร์คาดการณ์ว่า ในอีก 100 ปีข้างหน้า ถ้าไม่มีการแก้ไขหรือชะลอการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ความเข้มข้น

ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นเป็นเกือบ 1,000 ppm ซึ่งเป็นการเพิ่มในอัตราที่เร็วกว่าที่ผ่านมามาก

1.2.2 ก๊าซมีเทน เป็นก๊าซที่เกิดจากการปลูกข้าว การเลี้ยงสัตว์ และการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงฟอสซิล แม้ว่าก๊าซมีเทนในชั้นบรรยากาศจะมีเพียงเล็กน้อย แต่โมเลกุลของก๊าซมีเทนสามารถดูดกลืนรังสีความร้อนได้มากกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 25 เท่า ปัจจุบันก๊าซมีเทนมีสะสมอยู่ในชั้นบรรยากาศประมาณ 1.8 ppm ก๊าซโอโซนระดับผิวโลก เมื่ออยู่ในชั้นบรรยากาศสูง ๆ ก๊าซโอโซนจะช่วยปกป้องโลกจากรังสีอัลตราไวโอเล็ต แต่โอโซนที่อยู่ในระดับผิวโลกจะทำหน้าที่เป็นสารออกซิแดนท์ ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต ถึงแม้ว่าจะมีอยู่ในบรรยากาศเพียงเล็กน้อยแต่มีความสามารถในการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด ทำให้โลกอบอุ่นขึ้นด้วย ปัจจุบันมีก๊าซโอโซนระดับพื้นผิวโลกสะสมอยู่ในชั้นบรรยากาศประมาณ 0.03 ppm

1.2.3 ก๊าซไนตรัสออกไซด์ โรงงานอุตสาหกรรมที่ผลิตเส้นใยในลอนอุตสาหกรรมเคมีและพลาสติก ใช้กรดไนตริกในกระบวนการผลิต ซึ่งจะปลดปล่อยก๊าซไนตรัสออกไซด์ขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ รวมไปถึงปุ๋ยไนโตรเจนที่ใช้ในการทำการเกษตร และแม้ว่าในธรรมชาติจะมีการปล่อยก๊าซชนิดนี้ออกมา แต่ก๊าซไนตรัสออกไซด์จากโรงงานอุตสาหกรรมมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ความร้อนในชั้นบรรยากาศเพิ่มขึ้น ปัจจุบันมีก๊าซไนตรัสออกไซด์สะสมอยู่ในชั้นบรรยากาศของโลกประมาณ 0.3 ppm

1.2.4 ก๊าซซีเอฟซี ก๊าซชนิดนี้เป็นก๊าซที่มีสารประกอบคลอโรฟลูออโรคาร์บอน มีชื่ออยู่ในเครื่องปรับอากาศ ตู้เย็น สเปร์ย น้ำยาดับเพลิง ฯลฯ เป็นตัวการที่สำคัญที่ทำให้เกิดรูโหว่ของโอโซนในชั้นบรรยากาศ ทำให้รังสีอัลตราไวโอเล็ตส่องลงมาถึงพื้นโลกได้มากขึ้น แม้ว่าปัจจุบันทั่วโลกได้รณรงค์ลดการปล่อยก๊าซซีเอฟซีลงได้ถึงร้อยละ 40 แต่ที่ยังหลงเหลืออยู่ในชั้นบรรยากาศก็มีส่วนดูดกลืนรังสีอินฟราเรด จนเกิดความร้อนสะสมขึ้นประมาณ 0.28 วัตต์/ ตารางเมตร ปัจจุบันก๊าซซีเอฟซีมีสะสมอยู่ในชั้นบรรยากาศประมาณ 1 ppm

### 1.3 ภาวะเรือนกระจก (Greenhouse Effect)

เป็นปรากฏการณ์ที่คล้ายกับการที่เราสร้างเรือนกระจกกลางแจ้ง แสงแดดสามารถผ่านเข้ามาในเรือนกระจก แต่ความร้อนที่เกิดขึ้นไม่สามารถระบายออกข้างนอกได้ ทำให้อุณหภูมิภายในเรือนกระจกสูงขึ้นเรื่อย ๆ

เมื่อแสงอาทิตย์ส่องผ่านลงมาถึงพื้นโลก ก็จะเกิดการดูดซับและสะท้อนกลับ โดยรังสีจากแสงอาทิตย์จะอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดคลื่นสั้น ก๊าซเรือนกระจก ซึ่งได้แก่คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ไนตรัสออกไซด์ และโอโซน จะทำการดูดซับรังสีจากดวงอาทิตย์เอาไว้ส่วนหนึ่งและสะท้อนกลับออกไปส่วนหนึ่ง

ส่วนรังสีคลื่นยาว หรือ รังสีอินฟราเรดที่ถูกส่งออกไปจากโลก นั้นจะถูกดูดซับเอาไว้โดยก๊าซเรือนกระจก จากนั้นก็จะคายพลังงานความร้อน ให้กระจายอยู่ภายในชั้นบรรยากาศและพื้นผิวโลก จึงเปรียบเสมือนกระจกที่ปกคลุมผิวโลกให้มีภาวะสมดุลทางอุณหภูมิตำให้อุณหภูมิต่ำที่พื้นผิวของโลกมีความอบอุ่น

#### 1.4 วัฏจักรของคาร์บอน

คาร์บอนไดออกไซด์นั้นอยู่ในรูปของสารประกอบทางเคมีที่มาจากธาตุคาร์บอน ซึ่งเป็นธาตุที่มีความสำคัญในองค์ประกอบทางเคมีของสิ่งมีชีวิตทุกชนิด ตั้งแต่สิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวไปจนถึงสิ่งมีชีวิตหลายเซลล์ที่มีระบบการทำงานของอวัยวะที่ซับซ้อน โดยคาร์บอนจะอยู่ในรูปของสารประกอบคาร์บอนที่สิ่งมีชีวิตเหล่านั้นเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพความสำคัญ ภายในองค์ประกอบนั้น ๆ โดยสารประกอบอินทรีย์ทุกชนิดจะต้องมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ แหล่งที่มาของคาร์บอนจึงมีอยู่ทั้งที่อยู่ในพื้นดิน ชั้นหิน แหล่งน้ำ และชั้นบรรยากาศ

คาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นได้หลายลักษณะ เช่น ภูเขาไฟระเบิด การหายใจของสิ่งมีชีวิต หรือการเผาไหม้และถ่านหิน ซึ่งคาร์บอนไดออกไซด์เป็นวัตถุดิบสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช เพื่อใช้คาร์บอนในการสังเคราะห์คาร์โบไฮเดรต จากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงนี้ พืชจะปลดปล่อยก๊าซออกซิเจนออกมาสู่บรรยากาศ ทำให้สัตว์ได้ใช้ออกซิเจนนี้ในการหายใจ การนำคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชจึงเป็นการลดก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศลงได้

การหมุนเวียนของคาร์บอนในระบบนิเวศของโลก โดย เริ่มจากคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศที่ละลายในน้ำฝนมีสภาพเป็นกรดคาร์บอนิก ซึ่งเป็นกรดอ่อน ๆ หลผ่านซากอินทรีย์ ดิน ตลอดจนชั้นหินต่าง ๆ ทำให้เกิดการสลายตัวของหิน และเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นแคลเซียมคาร์บอเนตสะสมอยู่ในแหล่งน้ำ พืชน้ำสามารถนำไปใช้ได้ทันที ส่วนพืชบกจะได้รับคาร์บอน ในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการหายใจของพืช สัตว์ และจุลินทรีย์ และจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต่าง ๆ ดังนั้นคาร์บอนจึงหมุนเวียนอยู่ในระบบนิเวศอย่างสมดุล

คาร์บอนที่อยู่ในชั้นบรรยากาศมีโอกาสมหมุนเวียนเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ โดยการสังเคราะห์แสงของผู้ผลิต (พืชพรรณธรรมชาติ) เป็นสำคัญ อัตราการจับคาร์บอนจากชั้นบรรยากาศของพืชในระบบนิเวศแต่ละแห่ง มีค่าไม่เท่ากัน ป่าเขตร้อนมีอัตราการจับคาร์บอน ในอัตราปีละ 1-2 กิโลกรัมต่อตารางกิโลเมตร ในขณะที่เขตอบอุ่นหรือทะเลทรายที่ว่างเปล่าสามารถจับได้เพียง 10-20 กรัมต่อ 1 ตารางกิโลเมตร ซึ่งถือได้ว่าเป็นเพียงร้อยละ 1-2 ของป่าเขตร้อนเท่านั้น ส่วนในเขตอบอุ่นบริเวณที่เป็นป่าหรือบริเวณที่ทำการเพาะปลูก พืชมีอัตราการจับคาร์บอนอยู่ระหว่าง 0.2-0.4 กิโลกรัมต่อตารางกิโลเมตร อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาทั้งโลกนี้เวลานั้นจะพบว่าอัตราการสร้างสารอินทรีย์จากคาร์บอนทั้งหมด คิดเป็นน้ำหนักของสารอินทรีย์ได้ประมาณ

20,000-30,000 ล้านตันต่อปี

1.5 สาเหตุและความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์กับอุณหภูมิของอากาศในอดีต สภาพภูมิอากาศของโลกมีการเปลี่ยนแปลงโดยธรรมชาติเกิดขึ้นหลายครั้ง ซึ่งแตกต่างจากการเปลี่ยนแปลงในปัจจุบันเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยฝีมือมนุษย์ซึ่งก่อให้เกิดผลกระทบในระยะยาว ได้มีการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศกับอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวโลก พบว่าการเพิ่มขึ้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลก จะทำให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้น นักวิทยาศาสตร์จึงทำการสำรวจเพื่อวัดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์และอุณหภูมิของโลกย้อนกลับไปที่เมื่อ 650,000 ปีก่อน โดยทำการวิเคราะห์แท่งน้ำแข็ง Vostok Ice Core ที่ขุดเจาะจากทวีปแอนตาร์กติกา โดยทำการวิเคราะห์ฟองอากาศที่กักเก็บอยู่ในแท่งน้ำแข็ง ทำให้เข้าใจถึงปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ณ ช่วงเวลานั้นและอุณหภูมิขณะเกิดแท่งน้ำแข็ง จากการศึกษาและวิจัยได้พบความสัมพันธ์ของปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) และอุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิวโลก ได้พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยของผิวโลก มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศของโลก เมื่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศของโลกลดลง อุณหภูมิเฉลี่ยของผิวโลกจะลดลงตาม และเมื่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศของโลกเพิ่มขึ้น อุณหภูมิเฉลี่ยของผิวโลกจะเพิ่มขึ้นตาม ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิวโลก

ตลอดระยะเวลา 650,000 ปีที่ผ่านมา ไม่มีช่วงเวลาใดเลยที่ชั้นบรรยากาศโลกมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์สูงเกินระดับ 300 ppm เหมือนในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ทำนายว่า ถ้าปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศสูงถึง 450 ppm เมื่อใด จะก่อให้เกิดความเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วต่อสภาพอากาศอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ หากโลกไม่หยุดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยผ่านกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ที่อาศัยอยู่บนพื้นผิวโลก ประกอบกับการลดลงของพื้นที่ป่าไม้หรือพืชพรรณธรรมชาติที่จะไปช่วยดูดคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศมาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช ในปี ค.ศ. 1890 มีนักวิทยาศาสตร์ชาวสวีเดนชื่อว่า Svante Arrhenius ได้ศึกษาถึงผลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศที่มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิเฉลี่ยของผิวโลกในกรณีที่ลดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศลงครึ่งหนึ่ง หลังจากคำนวณอย่างละเอียดเป็นเวลาหลายปี เขาก็ได้ข้อสรุปว่า ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลกที่ลดลงครึ่งหนึ่งจะทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยพื้นผิวโลกลดลงถึง 5 องศาเซลเซียส และ Svante ยังได้พิจารณาว่า โลกได้เข้าสู่ช่วงเริ่มต้นของยุคอุตสาหกรรมแล้ว ในอนาคตปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศจะต้องเพิ่มขึ้นไม่ใช่ลดลงเนื่องจากการเผาไหม้ของถ่านหินและเชื้อเพลิงต่าง ๆ และจะมีผลทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของโลก



เพิ่มสูงขึ้น จากการคำนวณของเขาพบว่าถ้าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์  
ในชั้นบรรยากาศในขณะนั้นเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าจะทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของพื้นผิวโลกเพิ่มสูงขึ้น  
6 องศาเซลเซียส (กรีนพีซ, 2553)

### 1.6 ลักษณะของการเพิ่มคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ

ในปัจจุบัน สาเหตุที่คาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศมีปริมาณเพิ่มขึ้น  
เนื่องมาจากการเผาไหม้ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิง จากโรงงานอุตสาหกรรม  
การเผาป่าเพื่อใช้เป็นพื้นที่สำหรับอาศัยและทำการเกษตรกรรม ซึ่งการบุกรุกทำลายพื้นที่ป่าถือเป็น  
สาเหตุที่มีการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศได้รวดเร็วมากที่สุด เนื่องจากป่าไม้  
มีคุณสมบัติในการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ไว้ก่อนที่จะลอยขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ ดังนั้น เมื่อพื้นที่ป่าไม้  
ลดน้อยลง คาร์บอนไดออกไซด์จึงลอยขึ้นไปสะสมอยู่ในบรรยากาศได้มากยิ่งขึ้น ทำให้พลังงาน  
ความร้อนมีการสะสมอยู่บนพื้นผิวโลกและในชั้นบรรยากาศเพิ่มขึ้นประมาณ 1.56 วัตต์/ ตาราง  
เมตร (ปริมาณนี้ยังไม่คิดรวมผลกระทบที่เกิดขึ้นทางอ้อม)

ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2500 เป็นต้นมา กราฟเป็น  
ลักษณะฟันปลา สูงต่ำ สลับกันในแต่ละรอบปี มีค่าต่างกันประมาณ 5 – 6 ppm ในฤดูร้อน  
มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการที่มนุษย์บุกรุกทำลายพืชพรรณธรรมชาติหรือป่าไม้บนโลก  
ไปเป็นจำนวนมาก จนเป็นสาเหตุที่ทำให้ระดับของคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศเพิ่มมากขึ้น  
เนื่องจากเกิดการลดลงของปริมาณการสังเคราะห์แสงจากพืชสีเขียว ซึ่งการสังเคราะห์แสงนั้น  
เป็นกระบวนการเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์ไปเป็นพลังงานเคมีของพืช รวมไปถึงกระบวนการ  
แลกเปลี่ยนก๊าซของพืชด้วย ในระหว่างที่เกิดกระบวนการสังเคราะห์แสง คาร์บอนไดออกไซด์  
จะแตกตัวเป็นสารประกอบคาร์บอนและปลดปล่อยก๊าซออกซิเจนออกมา โดยสารประกอบ  
คาร์บอนจะถูกเก็บไว้ ขณะที่ก๊าซออกซิเจนจะถูกปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ จะเห็นได้ว่า พืชนั้นมี  
บทบาทในการควบคุมปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง โดยจะมีความ  
แตกต่างกันตามการเจริญเติบโตของพืชในแต่ละฤดูกาล กล่าวคือ พืชจะดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์  
ได้ดีในช่วงฤดูร้อน แต่จะไม่ดูดซับในช่วงฤดูหนาว (กรณีในประเทศเขตอบอุ่น ที่ต้นไม้จะผลัดใบ  
ในช่วงฤดูหนาว) ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับคาร์บอนไดออกไซด์ที่แตกต่าง  
กันในช่วงปีหนึ่ง ๆ ของโลก (กรีนพีซ, 2553)

## 2. แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวกับอุณหภูมิพื้นผิว

### 2.1 แนวคิดวัตถุดำ (Blackbody Concept)

วัตถุที่มีอุณหภูมิสูง (วัตถุที่ร้อน) นอกจากจะมีการแผ่รังสีแล้วยังมีการดูดกลืนรังสี  
จากสิ่งแวดล้อมด้วย โดยอัตราของรังสีที่แผ่ออกมาจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและชนิดของพื้นผิว วัตถุ  
ต่างชนิดกันจะมีความสามารถในการแผ่และดูดกลืนรังสีต่างกัน วัตถุที่เป็นตัวแผ่และดูดกลืนรังสีได้

อย่างสมบูรณ์และดีที่สุด เรียกว่า วัตถุดำ (Black Body) วัตถุดำจะดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกความถี่ที่ตกกระทบโดยไม่สะท้อนออกมา (ฟิสิกส์ราชมงคล, มปป)

วัตถุดำ เป็นทฤษฎีที่นำเสนอโดยกุสตาฟ เคอร์ชอฟฟ์ (Gustav Krichhoff) ในปี ค.ศ. 1860 ซึ่งอธิบายถึงวัตถุที่สามารถดูดกลืน (Absorbed) พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมดและไม่มี การสะท้อนหรือส่งผ่านพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า การแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ทุกความยาวคลื่นของวัตถุดำที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ สามารถอธิบายได้โดยกฎของพลังค์ (Planck's Law) ในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ ดังภาพที่ 2-1 ซึ่งอธิบายได้ว่า พลังงานที่ได้จากการแผ่รังสี มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อวัตถุมีอุณหภูมิสูงขึ้นและวัตถุจะแผ่รังสีในช่วงคลื่นสั้นมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในช่วงคลื่นที่สายตามนุษย์มองเห็น (Visible) จะสามารถตรวจจับรังสีความร้อนได้ เมื่อมี อุณหภูมิของวัตถุประมาณ 5,800 เคลวิน ซึ่งอุณหภูมิส่วนใหญ่ที่พบบนโลกมีอุณหภูมิต่ำกว่า 800 เคลวิน รังสีความร้อนที่แผ่ออกมาจึงอยู่ในย่านของช่วงคลื่นอินฟราเรด (Infrared Radiation) ที่สายตามนุษย์ไม่สามารถมองเห็นได้ (นราธิป เฟ่งพิศ, 2559) โดยสามารถอธิบายในรูปแบบของ สมการ ได้ดังนี้

$$M_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^2 e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (2-1)$$

เมื่อ  $M_\lambda$  คือ การแผ่รังสีของวัตถุ หน่วย  $W \cdot m^{-2} \cdot \mu m$

$h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์ ( $6.626 \times 10^{-34}$ ) หน่วย  $j \cdot s$

$C$  คือ ความเร็วแสง ( $2.9979246 \times 10^8$ ) หน่วย  $m \cdot s^{-1}$

$k$  คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann ( $1.3806 \times 10^{-23}$ ) หน่วย  $J \cdot K^{-1}$

$T$  คือ ค่าอุณหภูมิสมบูรณ์ (Absolute Temperature) หน่วย  $^\circ K$

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่น หน่วย  $\mu m$

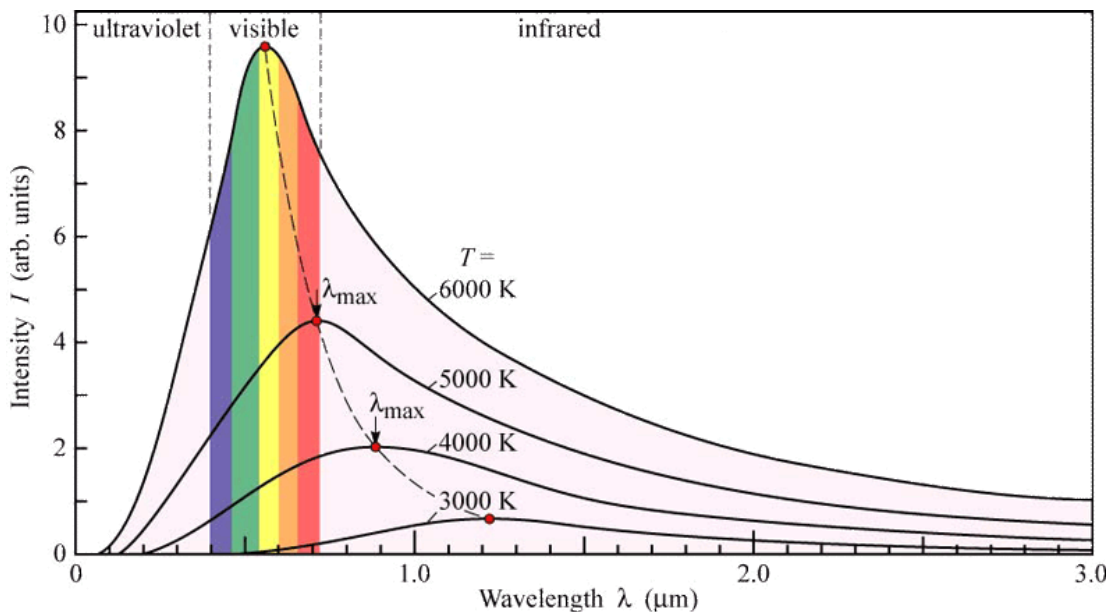
กฎการแทนที่ของเวียน (Wien's Displacement Law) เป็นกฎที่อธิบายถึงอุณหภูมิที่ ผกผันกับความยาวคลื่นตามกฎของพลังค์ ซึ่งกฎการแทนที่ของเวียน จะทำให้ทราบถึงความยาว คลื่นที่ให้พลังงานสูงสุด เมื่อทราบอุณหภูมิหนึ่ง ๆ ดังสมการที่ 2-2

$$\lambda_m = c/T \quad (2-2)$$

เมื่อ  $\lambda_m$  คือ ความยาวคลื่นที่ให้พลังงานสูงสุด หน่วย  $m$

$C$  คือ ค่าคงที่  $2.898 \times 10^{-3}$  หน่วย  $m \cdot K$

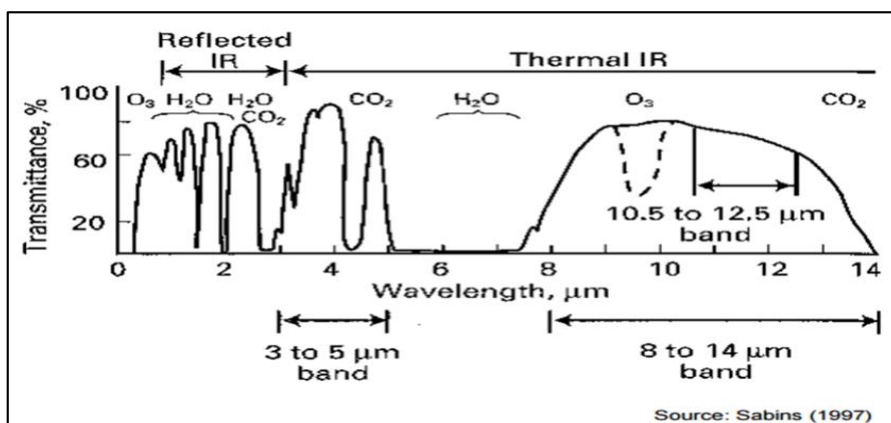
$T$  คือ อุณหภูมิที่ทราบค่า หน่วย  $^\circ K$



ภาพที่ 2-1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการแผ่รังสีของช่วงคลื่นกับอุณหภูมิ (Quora, 2016)

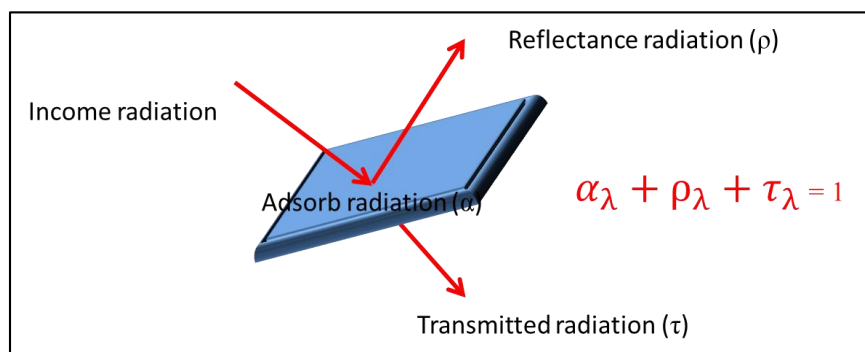
### 2.2 การแผ่รังสีของช่วงคลื่นอินฟราเรดความร้อน

วัตถุทุกวัตถุที่มีอุณหภูมิมากกว่า 0 เคลวินหรือ -273 องศาเซลเซียสจะมีการแผ่พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาอย่างต่อเนื่อง โดยช่วงคลื่นอินฟราเรดความร้อน จะมีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 3-14 ไมโครเมตร ซึ่งความยาวคลื่นประมาณ 5-7 และ 9-10 ไมโครเมตร จะถูกดูดกลืนในชั้นบรรยากาศโดยไอน้ำ (H<sub>2</sub>O) และ โอโซน (O<sub>3</sub>) ดังภาพที่ 2-2 ช่วงคลื่นดังกล่าวจึงไม่เป็นที่นิยมในการนำมาใช้งาน



ภาพที่ 2-2 ปฏิสัมพันธ์ของชั้นบรรยากาศกับช่วงอินฟราเรดความร้อนในแต่ละความยาวคลื่น (Sabins, 1997)

โดยทั่วไปช่วงคลื่นอินฟราเรดความร้อนจะมีปฏิสัมพันธ์กับวัตถุอยู่ 3 รูปแบบ คือ การดูดกลืน ( $\alpha$ ) การสะท้อน ( $\rho$ ) และการส่งผ่าน ( $\tau$ ) ที่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและคุณสมบัติของวัตถุหรือพื้นผิวนั้น ในอีกทางหนึ่ง ปฏิสัมพันธ์ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น (Wavelength) และขึ้นอยู่กับสัดส่วนระหว่างการดูดกลืน การสะท้อนและการส่งผ่าน ดังภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 ปฏิสัมพันธ์ของช่วงคลื่นอินฟราเรดความร้อนกับวัตถุ (Kuenzer, C., 2013)

### 2.3 วิธีการประมาณค่าสภาพเปล่งรังสีของพื้นผิวโลก

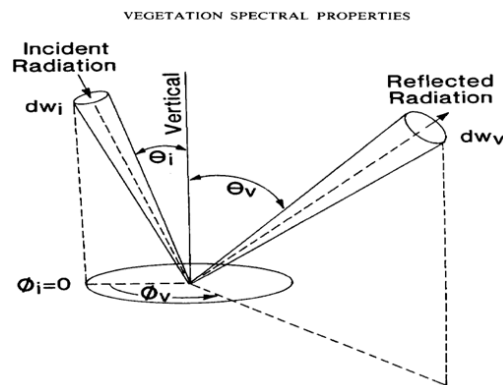
พื้นผิวโลกจะมีสภาพเปล่งรังสีในทิศทางที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ สามารถวัดสภาพเปล่งรังสีทางอ้อม (Indirect) ได้ที่มุมซันิธ (Zenith) 10 องศา แต่ในทางทฤษฎีสามารถวัดได้ที่มุมซันิธ ตั้งแต่ 0-90 องศา เนื่องจากจะทำให้การวัดสภาพเปล่งรังสีมีความยืดหยุ่นมากขึ้น ในการศึกษาอุณหภูมิพื้นผิว สภาพเปล่งรังสีของพื้นผิวโลกเปรียบเสมือนการปรับแก้หรือเพิ่มคุณภาพอุณหภูมิพื้นผิวดินจากการประมาณค่าให้มีความถูกต้องเพิ่มขึ้น

Salisbury et al. (1994) กล่าวว่า มีวิธีการตรวจวัดสภาพเปล่งรังสีของพื้นผิวโลกอยู่ 2 วิธี คือ การตรวจวัดทางตรง (Direct) และการตรวจวัดทางอ้อม

#### 2.3.1 การตรวจวัดสภาพเปล่งรังสีของพื้นผิวโลกทางอ้อม

ตั้งอยู่บนกฎของกูดสตอฟ เคอร์ชอฟฟ์ โดยวัตถุที่ทึบแสงสภาพเปล่งรังสี ได้มาจาก ส่วนต่างของค่าการสะท้อนของวัตถุในช่วงคลื่นอินฟราเรด คือ ( $\epsilon_\lambda = 1 - \rho_\lambda$ ) เมื่อ  $\rho_\lambda$  เป็นทิศทาง การสะท้อนแบบ Bi-Directional Reflectance

การวัดสภาพเปล่งรังสี โดยอาศัยหลักการสะท้อนของแสงแบบ Bi-Directional Reflectance ที่ทิศทางหนึ่งเป็นทิศทางที่แสงตกกระทบและอีกทิศทางหนึ่งเป็นทิศทางที่แสงสะท้อนออกไป โดยมุมที่แสงสะท้อนจะเท่ากับมุมที่แสงตกกระทบ ซึ่งวิธีการวัดทิศทาง การสะท้อนดังกล่าว จะสมมุติครึ่งวงกลมที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วนเท่า ๆ กันขึ้นมา ดังภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 การสะท้อนแสงแบบ Bi-Directional Reflectance (ICTinternational, n.d.)

### 2.3.2 วิธีการตรวจวัดสภาพเปล่งรังสีทางตรง

วิธีการวัดสภาพเปล่งรังสีแบบกล่อง (Emissivity Box) เป็นวิธีที่มีการนำมาใช้งานอย่างแพร่หลาย วิธีการนี้จะใช้กล่องที่มีก้นลึกเพื่อให้ครอบคลุมวัตถุเป้าหมาย ซึ่งผิวของกล่องจะมีคุณสมบัติการสะท้อนสูง จากนั้นปิดฝาครอบ (Cover Plates) ด้วยวัสดุ 2 ประเภทที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน คือ วัสดุหนึ่งมีค่าการสะท้อนสูง ในขณะที่อีกวัสดุหนึ่งมีสภาพเปล่งรังสีสูง โดยใช้สลับกันระหว่างฝาครอบทั้ง 2 ประเภท ผลคือ สภาพแวดล้อมแต่ละประเภทมีสภาพเปล่งรังสีที่แตกต่างกัน ถึงแม้ว่าวิธีนี้ไม่มีความสัมพันธ์กับการตรวจวัดอุณหภูมิโดยตรง แต่สามารถควบคุมการแผ่รังสีของสภาพแวดล้อมอื่น ๆ ได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม ความแม่นยำของวิธีการนี้มีข้อจำกัด คือ คุณสมบัติของวัสดุที่อยู่ข้างในผิวของกล่อง

## 2.4 ค่าอุณหภูมิพื้นผิว (Land Surface Temperature)

2.4.1 เทอร์โมไดนามิกส์หรืออุณหภูมิ Kinetic ปกติอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากพื้นผิววัตถุสามารถวัดได้อย่างแม่นยำด้วยเครื่องเทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) โดยนำเครื่องเทอร์โมมิเตอร์สัมผัสกับวัตถุ

2.4.2 อุณหภูมิความสว่าง (Brightness Temperature) มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวางในการวัดอุณหภูมิพื้นผิวดินในช่วงคลื่นอินฟราเรดความร้อน (Thermal Infrared) และนำมาประยุกต์ในการรับรู้จากระยะไกลเมื่อการแผ่รังสีวัตถุจริงเท่ากับการแผ่รังสีของวัตถุดำ อุณหภูมิกายภาพของวัตถุดำจะเป็นตัวกำหนดอุณหภูมิความสว่างของวัตถุ โดยอุณหภูมิความสว่างเป็นหนึ่งในมิติของอุณหภูมิ แต่ขาดความหมายทางกายภาพของอุณหภูมิ

2.4.3 อุณหภูมิรังสี (Radiometric Temperature) อุณหภูมิรังสี ( $R_\lambda$ ) เป็นค่าการแผ่รังสีที่วัดได้จากเครื่องวัดพลังงานรังสี (Radiometer) ซึ่งถูกกำหนดโดยค่าการแผ่รังสีที่ถูกปล่อยออกมาจากพื้นผิวดินในที่นี้ใช้สัญลักษณ์แทน ( $L_\lambda$ ) สภาพเปล่งรังสีของสิ่งปกคลุมดินในที่นี้ใช้สัญลักษณ์แทน ( $\epsilon_\lambda$ ) สามารถหาได้จากสมการ ดังต่อไปนี้

$$R_\lambda = L_\lambda + (1 - \varepsilon_\lambda)R_{u,\lambda} \quad (2-3)$$

เมื่อ  $L_\lambda$  คือ  $\varepsilon_\lambda B_\lambda$  หน่วย  $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$

$T$  คือ ค่าอุณหภูมิรังสีของพื้นผิวดิน หน่วย K

$R_{u,\lambda}$  คือ ชั้นบรรยากาศที่ทำให้การแผ่รังสีต่ำลง หน่วย  $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$

$B_\lambda$  คือ ฟังก์ชันพลังค์ (Planck Function) ดังสมการที่ 2-4

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\pi\lambda^5 \left( e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1 \right)} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left( e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (2-4)$$

เมื่อ  $h$  คือ ค่าคงที่  $(6.626 \times 10^{-34})$  หน่วย J·s

$c$  คือ ความเร็วแสง  $(2.99793 \times 10^8)$  หน่วย m/s

$k$  คือ ค่าคงที่  $(1.3806 \times 10^{-23})$  หน่วย J/K

$C_2$  คือ  $hc/k$  (14388) หน่วย  $\mu m \cdot K$

อุณหภูมิรังสีเป็นอุณหภูมิของวัตถุค่ากับสภาพเปล่งรังสีของ  $L_\lambda / \varepsilon_\lambda$  ดังสมการที่ 2-5

$$B^{-1}[L_\lambda / \varepsilon_\lambda] = \frac{C_2}{k \ln \left( \frac{C_1}{\lambda^5 (L_\lambda / \varepsilon_\lambda)} + 1 \right)} \quad (2-5)$$

#### 2.4.4 อุณหภูมิเทียบเท่าหรืออุณหภูมิเฉลี่ย (Equivalent or Average Temperature)

ความแตกต่างและความไม่คงที่ของอุณหภูมิในแต่ละพิกเซลของภาพ ถึงแม้ว่าแต่ละพิกเซลย่อยจะเป็นอุณหภูมิจากวัตถุค่า แต่การแผ่รังสีทั้งหมดไม่สามารถอธิบาย โดยวัตถุค่าที่มีอุณหภูมิคงที่ได้ ในคลื่นอินฟราเรดความร้อนที่มียาวคลื่นระหว่าง 8-14  $\mu m$  ในที่นี้แนวความคิดของอุณหภูมิเทียบเท่า หรืออุณหภูมิเฉลี่ยจะต้องมีการนำวิธีการประมาณค่าอุณหภูมิและการแผ่รังสีของผิวดิน ที่ได้จากการรับรู้จากระยะไกลที่ไม่ได้มีการนำลักษณะความแตกต่างหรือไม่คงที่ของอุณหภูมิมาพิจารณา โดยสมมุติว่าพื้นผิวดินมีอุณหภูมิคงที่ (Isothermal) มาประมาณอุณหภูมิที่คงที่ในแต่ละความยาวคลื่น (Wavelength) ของเครื่องตรวจวัดสัญญาณ สำหรับอุณหภูมิเทียบเท่าหรืออุณหภูมิเฉลี่ยในแต่ละพิกเซลสามารถวัดได้จากการตรวจวัดเชิงรังสีของเครื่องตรวจวัดสัญญาณ (Gillespie et al., 1998) และ (Wan, Z., & Dozier, J., 1996)

#### 2.5 การประมาณค่าอุณหภูมิเฉลี่ยพื้นผิวโลก (Estimation of Average LST)

แม้ว่ามีการนิยามความหมายของอุณหภูมิพื้นผิวดินหลายความหมายดังที่กล่าวมาข้างต้น

แต่อุณหภูมิเฉลี่ยของแต่ละพิกเซลเป็นเพียงปริมาณ (Quantity) ที่สามารถได้รับการรับรู้จากระยะไกล โดยจะเรียกอุณหภูมิพื้นผิวดินว่า “LST” ในระดับภูมิภาคหรือระดับโลกส่วนใหญ่สามารถตรวจจับ LST ได้ในช่วงคลื่นอินฟราเรด (Infrared) และช่วงคลื่น Passive Microwave ทั้งนี้การตรวจจับอุณหภูมิในช่วงคลื่นอินฟราเรดความร้อนนั้น ให้รายละเอียดที่ดีกว่า คือ ตั้งแต่รายละเอียด 90 เมตรจากดาวเทียม ASTER ถึงรายละเอียด 1 กิโลเมตร จากดาวเทียมระบบ MODIS ไปจนถึงรายละเอียดขนาดหลาย 10 กิโลเมตรในดาวเทียมออดินัมวิทยา แต่มีข้อจำกัดทางด้านการทะลุทะลวงของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นอินฟราเรด ซึ่งจะต้องปราศจากเมฆหรือท้องฟ้าแจ่มใส ซึ่งตรงกันข้ามกับการแผ่รังสีในช่วงคลื่นไมโครเวฟที่ได้รับผลกระทบจากอิทธิพลของชั้นบรรยากาศเพียงเล็กน้อย ซึ่งช่วยให้ LST ของไมโครเวฟสามารถตรวจวัดได้ในทุกสภาพอากาศ แต่เมื่อเปรียบเทียบการตรวจวัดในช่วงคลื่นอินฟราเรดและช่วงคลื่น Passive Microwave พบว่า Passive Microwave ให้รายละเอียดที่ต่ำกว่าและมีความแม่นยำน้อยกว่า (นราธิป เฟงพิศ, 2559)

### 2.5.1 Single-Channel Algorithms

เป็นการแผ่รังสีของสเปกตรัมที่ได้รับ โดยเครื่องตรวจจับสัญญาณของช่วงคลื่นอินฟราเรดความร้อนในทิศทาง  $(\theta_r, \phi_r)$  ซึ่งค่าการทะลุผ่านของการแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์ไม่ได้นำมาพิจารณา ทำให้ความละเอียดของเซนเซอร์รับสัญญาณถูกจำกัดและแต่ละช่อง (Channel) มีความกว้างไม่มาก การตอบสนองของฟังก์ชันของแต่ละช่อง การแสดงสำหรับการแผ่รังสีของสเปกตรัมในแต่ละช่วง จะได้รับการสมมติพื้นผิวดินแบบ Lambertian ที่ไม่ได้สนใจการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ สามารถแสดงสมการการแผ่รังสีของช่วงคลื่นอินฟราเรดความร้อนได้ดังสมการที่ 2-6

$$L_i = [\varepsilon_i B_i(T_s) + (1 - \varepsilon_i)L_{d,i}] \tau_i + L_{u,i} \quad (2-6)$$

เมื่อ  $L_{d,i}$  คือ การแผ่รังสีที่ตกลงในชั้นบรรยากาศ (Atmospheric Downward Radiance)

$L_{u,i}$  คือ การแผ่รังสีขึ้นไปบนชั้นบรรยากาศ (Atmospheric Upward Radiance)

สภาพเปล่งรังสีของพื้นผิวโลก (LSE) และพารามิเตอร์ของชั้นบรรยากาศ ( $L_{d,i}$   $L_{u,i}$ ) เป็นสิ่งที่จำเป็นต้องทราบก่อนการประมาณค่าอุณหภูมิ โดยสามารถแก้ไขได้จาก  $L_i$  สำหรับเซนเซอร์รับสัญญาณที่มีช่วงคลื่นอินฟราเรดความร้อนเพียงแบนด์เดียว ยกตัวอย่างเช่น ดาวเทียม LANDSAT-5 TM และดาวเทียม LANDSAT-7 ETM+ ถึงแม้ว่าเป็นเรื่องยากที่จะสามารถประมาณค่าอุณหภูมิที่ได้จากการตรวจวัดเชิงรังสีเพียงแบนด์เดียว ภายใต้เงื่อนไขแนวความคิดที่ว่าสภาพเปล่งรังสี อุณหภูมิและความชื้นในชั้นบรรยากาศเป็นสิ่งที่จำเป็นต้องกล่าวถึง แม้ว่าการประมาณค่า LST สามารถแก้ไขได้

### 2.5.2 วิธีการประมาณค่าแบบ Split-Window Algorithm

McMillin, L. M. (1975) ได้นำเสนออัลกอริทึมที่มีชื่อว่า Split-Window สำหรับการประมาณค่าอุณหภูมิพื้นผิวทะเล (Sea Surface Temperature) จากข้อมูลการรับรู้จากระยะไกลอย่างเต็มประสิทธิภาพ โดยใช้ความแตกต่างของลักษณะการดูดกลืนในชั้นบรรยากาศของทั้ง 2 แบนด์ ในช่วงคลื่นอินฟราเรดความร้อน ที่ความยาวคลื่นประมาณ 10.5-12.5 ไมโครเมตร อิทธิพลของชั้นบรรยากาศถูกลบออกจากอุณหภูมิความสว่างของทั้ง 2 แบนด์ โดยอัลกอริทึมนี้ปฏิบัติตามข้อสมมุติที่ว่า น้ำทะเลสามารถประมาณเป็นวัตถุดำกับสภาพเปล่งรังสีที่มีค่าเท่ากับ 1 ชั้นบรรยากาศมีการดูดกลืนค่อนข้างน้อยและไอน้ำมีการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์คงที่และฟังก์ชันของ Planck สามารถประมาณการขยายตัวของชุดข้อมูล Taylor รอบส่วนกลางของความยาวคลื่นปกติอัลกอริทึม Split-Window สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$T_s = a_0 + a_1T_i + a_2T_j \quad (2-7)$$

เมื่อ  $a_i$  ( $i = 1, 2$ ) คือ ค่าสัมประสิทธิ์

$T_i$  และ  $T_j$  คือ ค่าอุณหภูมิความสว่างของแบนด์  $i$  และ  $j$

Price, J. C. (1984) เป็นบุคคลแรกที่ประยุกต์อุณหภูมิผิวน้ำทะเลและพัฒนาไปสู่อุณหภูมิพื้นผิวดิน สามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$T_s = [T_4 + 3.33(T_4 - T_5)] \left( \frac{3.5 + \varepsilon_4}{4.5} \right) + 0.75T_5 (\varepsilon_4 - \varepsilon_5) \quad (2-8)$$

เมื่อ  $T_4$  และ  $T_5$  คือ อุณหภูมิความสว่างแบนด์ 4 และ 5 ของดาวเทียม AVHRR

$\varepsilon_4$  และ  $\varepsilon_5$  คือ สภาพเปล่งรังสีของพื้นผิวโลก

Becker, F., & Li, Z.-L. (1995) ได้นำเสนอเนื้อหาเกี่ยวกับไอน้ำในชั้นบรรยากาศของอัลกอริทึม Split-Window ที่นำเสนอไปก่อนหน้านี้ในปี ค.ศ. 1990 ทำให้อัลกอริทึมนี้จึงถูกนำเสนองานของชั้นบรรยากาศมาใช้เป็นส่วนใหญ่ สามารถแสดงได้จากสมการต่อไปนี้

$$T_s = A_0P \frac{T_4 + T_5}{2} + M \frac{T_4 - T_5}{2} \quad (2-9)$$

เมื่อ  $A_0$  คือ  $-7.49 - 0.407w$



P คือ  $1.03 + (0.211 - 0.031\cos\theta \cdot w)(1 - \varepsilon_4) - (0.37 - 0.074w)(\varepsilon_4 - \varepsilon_5)$

M คือ  $4.25 + 0.56w + (3.41 + 1.59w)(1 - \varepsilon_4) - (23.58 - 3.89w)(\varepsilon_4 - \varepsilon_5)$

Sobrino, J. A., Li, Z. L., Stoll, M. P., & Becker, F. (1996) ได้นำเสนออัลกอริทึม Spilt-Window ที่ใช้ค่าเฉลี่ยสภาพเปล่งรังสี (Mean Land Surface Emissivity) และค่าความแตกต่างสภาพเปล่งรังสี (Difference Land Surface Emissivity) ของทั้ง 2 ช่วงคลื่นในการประมาณค่า อุณหภูมิพื้นผิวดินสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$T_s = T_i + a_1(T_i - T_j) + a_2(T_i - T_j)^2 + a_3(1 - \varepsilon) + a_4w(1 - \varepsilon) + a_5\Delta\varepsilon + a_6w\Delta\varepsilon + a_0 \quad (2-10)$$

เมื่อ  $T_s$  คือ อุณหภูมิพื้นผิวดิน หน่วย °K

$T_i$  และ  $T_j$  คือ ค่าอุณหภูมิความสว่าง ในแบนด์ i และ j หน่วย °K

$\varepsilon$  คือ ค่าเฉลี่ยสภาพเปล่งรังสีของพื้นผิวโลก

$\Delta\varepsilon$  คือ ค่าความแตกต่างสภาพเปล่งรังสีของพื้นผิวโลก

W คือ ไอน้ำในชั้นบรรยากาศทั้งหมด หน่วย  $g \cdot cm^{-2}$

$a_i$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของอัลกอริทึม

### 3. แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับดัชนีพืชพรรณ

#### 3.1 ดัชนีพืชพรรณ NDVI

ดัชนีพืชพรรณ NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) เป็นการนำค่าความแตกต่างของการสะท้อนของพื้นผิวระหว่างช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้กับช่วงคลื่นตามองเห็นสีแดง มาทำสัดส่วนกับค่าผลบวกของทั้งสองช่วงคลื่นเพื่อปรับให้เป็นลักษณะการกระจายแบบปกติ โดยทฤษฎีนี้ได้ถูกเสนอขึ้น โดย Kriegler et al. ในปี ค.ศ. 1969 (Gibson & Power, 2000) มีสมการในการคำนวณ ดังนี้

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} \quad (2-11)$$

โดยให้  $\rho_{NIR}$  = ค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้

$\rho_{Red}$  = ค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นสีแดง

ค่าของ NDVI ที่ได้จะอยู่ในช่วง -1 ถึง +1 ซึ่งจะช่วยในการแปลผลได้ง่ายขึ้น บริเวณที่ค่า NDVI อยู่ในช่วงค่าลบพื้นที่จะเป็นพื้นที่น้ำ ในบริเวณที่มีค่า NDVI เข้าใกล้ค่า 0 แสดงถึงพื้นที่ที่มีพืชพรรณสีเขียวน้อย และในพื้นที่ที่มีพืชสีเขียวปกคลุมมากจะมีค่าเข้าใกล้ +1 เนื่องจากคุณสมบัตินี้ NDVI จึงเป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ และทำนายการเปลี่ยนแปลงของพืชพรรณที่มีผลจากการกระทบจากสิ่งแวดล้อมรอบ ๆ ได้ (Singh et al., 2003; Wang et al., 2003) และข้อมูลจากสำนักภูมิสารสนเทศอุตุนิยมหาวิทยาลัย ได้กล่าวว่า ค่าของ NDVI ช่วง -1 ถึง +1 นั้น ค่า 0 หมายถึงไม่มีพืชพรรณใบเขียวอยู่ในพื้นที่สำรวจ ในขณะที่ค่า 0.8 หรือ 0.9 หมายถึง มีพืชมรกพืชพรรณใบเขียวหนาแน่นมาก กรณีที่พื้นที่ผิวน้ำมีพืชพรรณปกคลุมจะมีค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นใกล้อินฟราเรดสูงกว่าช่วงคลื่นตามองเห็นสีแดงทำให้ NDVI มีค่าเป็นบวก ในขณะที่พื้นที่ผิวน้ำเป็นดินจะมีค่าการสะท้อนระหว่างสองช่วงคลื่นใกล้เคียงกันทำให้ NDVI มีค่าใกล้เคียงกับศูนย์ ส่วนกรณีที่พื้นที่ผิวน้ำเป็นน้ำจะมีค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นใกล้อินฟราเรดต่ำกว่าช่วงคลื่นตามองเห็นสีแดง ทำให้ NDVI มีค่าติดลบ ทั้งนี้โดยปกติค่านี้จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.7 เท่านั้น

#### ประโยชน์ที่สำคัญของค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI

- 3.1.1 ศึกษาการกระจายตัวและความสมบูรณ์ของพืชพรรณโดยรวม
- 3.1.2 จำแนกประเภทของพืชพรรณ รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาของปริมาณพืชพรรณ
- 3.1.3 ศึกษาสถานะความแห้งแล้งและความสมบูรณ์ของพื้นที่ในช่วงเวลา
- 3.1.4 ใช้ในการคำนวณค่ามวลชีวภาพสัมพัทธ์ (Relative Biomass)

#### 3.2 ดัชนีพืชพรรณ EVI

โดยใช้ข้อมูลจากดาวเทียม Terra MODIS มาใช้ในศึกษาดัชนีพืชพรรณ EVI (Enhanced Vegetation Index) (Huete et al., 1996; 1997) ดังสมการที่ 2-12

$$EVI = 2.5 \frac{NIR - Red}{1 + NIR + 6Red - 7.5Blue} \quad (2-12)$$

เมื่อ	NIR	คือ ค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้
	Red	คือ ค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นสีแดง
	Blue	คือ ค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นสีน้ำเงิน

### 3.3 ดัชนีพื้นที่ผิวใบ

ดัชนีพื้นที่ผิวใบ Leaf Area Index (LAI) คือ ผลรวมของพื้นที่ด้านหนึ่งของใบทั้งหมดภายในเรือนยอดที่ถูกกำหนดขอบเขต LAI เป็นโครงสร้างของพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญในเชิงปริมาณของพลังงานและลักษณะการแลกเปลี่ยนมวลของระบบนิเวศบนดิน เช่น การสังเคราะห์แสงของพืช การหายใจ การคายน้ำ การหมุนเวียนคาร์บอนและสารอาหาร รวมถึงการสกัดกั้นปริมาณน้ำฝน (Peng Gong et al., 2003) ดังสมการที่ 2-13

$$LAI = (3.618 * EVI - 0.118) \quad (2-13)$$

## 4. แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวกับอัตราผลิตในระบบนิเวศ (Productivity in Ecosystem)

พลังงานจากดวงอาทิตย์เคลื่อนย้ายสู่ระบบนิเวศทางผู้ผลิตโดยขบวนการสังเคราะห์แสง ผลของขบวนการนี้ คือ การเปลี่ยนพลังงานแสงไปอยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์ และถูกส่งต่อไปยังผู้บริโภคลำดับต่าง ๆ โดยการกิน เราสามารถตรวจสอบพลังงานที่มีหรือคงเหลืออยู่ในแต่ละลำดับขั้นบริโภคได้โดยการวัดอัตราการผลิตที่วัดได้ 4 ระดับด้วยกัน คือ

4.1 อัตราการผลิตปฐมภูมิรวม (Gross Primary Productivity หรือ GPP) หมายถึง อัตราการสังเคราะห์แสงทั้งหมด รวมทั้งอินทรีย์สารที่ได้ใช้ไปในการหายใจภายในช่วงเวลาที่ทำกรวัด ดังนั้น จึงเรียกว่าเป็น “อัตราการสังเคราะห์แสงทั้งหมด” (Total Photosynthesis หรือ Total Assimilation) ก็ได้

4.2 อัตราการผลิตปฐมภูมิสุทธิ (Net Primary Productivity หรือ NPP) หมายถึง อัตราการเก็บสะสมพลังงานในรูปสารอินทรีย์ในพืช ซึ่งได้หักส่วนที่ใช้ในการหายใจในช่วงเวลาที่ทำการวัดไปแล้ว ดังนั้น ค่านี้จึงอาจกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่าเป็น “อัตราการสังเคราะห์แสงที่ปรากฏ” (Apparent Photosynthesis) หรือ “อัตราผลิตสุทธิ” (Net Assimilation) เนื่องจากเป็นพลังงานส่วนที่เหลืออยู่ในพืชจริง ๆ

4.3 อัตราผลิตทุติยภูมิ (Secondary Productivity) หมายถึง อัตราการเก็บสะสมพลังงานในรูปอินทรีย์สารระดับผู้บริโภค และเนื่องจากผู้บริโภคใช้สารอาหารที่ได้ผลิตขึ้นเรียบร้อยแล้วเท่านั้น โดยมีส่วนหนึ่งที่ใช้หรือสูญเสียไปกับการหายใจ นอกนั้นที่เหลือจะถูกเปลี่ยนแปลงไปเป็นเนื้อเยื่อต่าง ๆ ในผู้บริโภค ดังนั้น อัตราการผลิตทุติยภูมิจึงไม่มีการแบ่งออกเป็นอัตราผลิตรวมและอัตราผลิตสุทธิ

4.4 อัตราผลิตสุทธิของชุมชน (Net Community Productivity) หมายถึง อัตราการเก็บสะสมอินทรีย์สารที่เหลือจากการใช้โดยผู้บริโภคแล้วในช่วงเวลาหนึ่งที่กำหนดให้ โดยปกติจะเป็นหนึ่งปีหรือหนึ่งฤดู ค่าอัตราผลิตนี้จึงหาได้จากการนำเอาค่าของอินทรีย์สารทั้งหมดที่ผู้บริโภค

ได้ใช้ไป หักออกจากอัตราผลิตปฐมภูมิสุทธิของชุมชนนั้น ๆ (มหาวิทยาลัยแม่โจ้, มปป.)

เนื่องจากอัตราการผลิตปฐมภูมিরวม (GPP) และ อัตราการผลิตปฐมภูมิสุทธิ (NPP) เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์แสงและการหายใจของพืชซึ่งมีคาร์บอนไดร็อกไซด์ เป็นก๊าซหนึ่งที่สำคัญ ทำให้มีการศึกษาความสัมพันธ์ของ GPP และ NPP โดยใช้ข้อมูล GPP และ NPP จากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS เพื่อศึกษาความสัมพันธ์กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของโลกที่ได้จากข้อมูลจากดาวเทียม GOSAT คิวย (Meng Guo et al., 2012)

## 5. แนวคิดและทฤษฎีการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง

5.1 Fraction of Photosynthetically Active Radiation (FPAR) เป็นอัตราส่วนระหว่างค่า Absorbed Photosynthetically Active Radiation (APAR) กับค่า Photosynthetically Active Radiation (PAR)

5.2 Photosynthetically Active Radiation (PAR) เป็นค่ารังสีแสงอาทิตย์คลื่นสั้นที่สามารถใช้สำหรับการสังเคราะห์แสงของพืชได้ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงคลื่นแสงที่มองเห็น (Visible Light) ระหว่าง 0.4 – 0.7 ไมโครเมตร โดยค่า PAR สามารถแสดงความสัมพันธ์กับค่ารังสีแสงอาทิตย์คลื่นสั้นที่ตกกระทบพื้นผิวได้

5.3 Absorbed Photosynthetically Active Radiation (APAR) เป็นสัดส่วนของการดูดซึมรังสีแสงอาทิตย์โดยเรือนยอด เพื่อใช้ในการดึงดูดคาร์บอนไดออกไซด์สำหรับการสังเคราะห์แสงของพืช มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อตารางเมตร (ชาญณรงค์ ตั้งคณาทรัพย์, 2551)

## การรับรู้จากระยะไกล

การรับรู้จากระยะไกล หรือการสำรวจจากระยะไกล หมายถึง วิทยาศาสตร์และศิลปะของการได้มาซึ่งข้อมูลเกี่ยวกับวัตถุและพื้นที่ หรือปรากฏการณ์ จากเครื่องมือบันทึกข้อมูลโดยปราศจากการเข้าไปสัมผัสวัตถุ ทั้งนี้อาศัยคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสื่อการได้มาของข้อมูล 3 ลักษณะ คือ ช่วงคลื่น (Spectral) รูปทรงสัญญาณของวัตถุบนพื้นผิวโลก (Spatial) และการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลา (Temporal) โดยมีกระบวนการและองค์ประกอบการรับรู้จากระยะไกลประกอบด้วย

1. การได้มาซึ่งข้อมูล (Data Acquisition) โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดพลังงาน เช่น ดวงอาทิตย์เคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศเกิดปฏิสัมพันธ์ของพลังงานกับรูปลักษณะพื้นผิวโลก และเดินทางเข้าสู่เครื่องรับรู้ที่ติดตั้งในตัวยาน ได้แก่ เครื่องบิน ยานอวกาศ และดาวเทียม ถูกบันทึก และผลิตเป็นข้อมูลในรูปแบบภาพ (Pictorial หรือ Photograph) หรือรูปแบบเชิงเลข (Digital Form)

2. การวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis) ประกอบด้วย การแปลตีความข้อมูลด้วยสายตา (Visual Interpretation) และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเลข (Digital Analysis) โดยมีข้อมูลอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วยข้อมูลอ้างอิงต่าง ๆ เช่น แผนที่ดิน ข้อมูลปฏิทินและสถิติการปลูกพืช และอื่น ๆ ได้ผลิตผลของการแปลตีความในรูปแบบแผนที่ ข้อมูลเชิงเลข ตาราง คำอธิบาย หรือแผนภูมิ เป็นต้น

แหล่งพลังงานและหลักการแผ่รังสี (Energy Sources and Radiation Principle) ได้แก่ ความยาวคลื่น และการแผ่รังสีของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า

ความยาวคลื่นของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นพลังงานต่อเนื่องที่มีค่าความยาวของช่วงคลื่นหลายเมตรถึงเศษส่วนของพันล้านเมตร โดยดวงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานในรูปแม่เหล็กไฟฟ้าทางธรรมชาติที่สำคัญและเป็นหลักทางการรับรู้จากระยะไกล ซึ่งจะแผ่พลังงานไปตามทฤษฎีของการแผ่พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Theory) แยกออกเป็น ทฤษฎีคลื่น (Wave Theory) และทฤษฎีอนุภาค (Particle Theory) ซึ่งในทางการรับรู้จากระยะไกล จะใช้ทฤษฎีคลื่นเป็นหลักที่มีการเคลื่อนที่แบบฮาร์โมนิก (Harmonic Motion) มีช่วงซ้ำและจังหวะเท่ากันในเวลาหนึ่งมีความเร็วเท่าความเร็วแสง ( $c$ ) ระยะทางจากยอดคลื่นถึงยอดคลื่นถัดไป เรียกว่า ความยาวคลื่น ( $\lambda$ ) และจำนวนยอดคลื่นที่เคลื่อนผ่านจุดคงที่จุดหนึ่งต่อหน่วยเวลาเรียกว่า ความถี่คลื่น ( $f$ ) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความเร็วคลื่น และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบ่งตามความยาวคลื่นที่เรียกว่า ช่วงคลื่น (Band) ตั้งแต่ช่วงคลื่นที่สั้นที่สุด คือ รังสีคอสมิก (Cosmic Rays) จนถึงช่วงคลื่นวิทยุที่มีความยาวคลื่นหลายกิโลเมตร สำหรับคุณสมบัติของช่วงคลื่น ประกอบด้วยช่วงคลื่นตามลำดับความยาว ดังนี้ รังสีแกมมา รังสีเอกซ์ อัลตราไวโอเล็ต ช่วงคลื่นตามองเห็น อินฟราเรด ไมโครเวฟ และคลื่นวิทยุ โดยช่วงคลื่นที่ใช้ประกอบในการรับรู้จากระยะไกล แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ

1. ช่วงคลื่นเชิงแสง (Optical Wavelength) อยู่ระหว่าง 0.4-14 ไมโครเมตร สามารถถ่ายภาพและบันทึกภาพด้วยฟิล์มถ่ายรูป และเครื่องรับรู้ ประกอบไปด้วย ช่วงคลื่นที่มีผลตอบสนองต่อตาของมนุษย์ หรือช่วงคลื่นตามองเห็น (Visible Light) อยู่ระหว่าง 0.4-0.7 ไมโครเมตร แบ่งเป็น 3 ช่วง คือ น้ำเงิน เขียวและแดง

2. ช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (Near Infrared) หรืออินฟราเรดสะท้อนซึ่งอยู่ระหว่าง 0.7-3 ไมโครเมตร และอินฟราเรดความร้อน (Thermal Infrared) ระหว่าง 3-15 ไมโครเมตร ช่วงคลื่นไมโครเวฟ อยู่ระหว่าง 1 มิลลิเมตรถึง 1 เมตร โดยช่วงคลื่นในกลุ่มนี้ มักนิยมเรียกหน่วยนับเป็นหน่วยความถี่ ต่างจากกลุ่มช่วงคลื่นเชิงแสงที่มีหน่วยเป็นความยาวคลื่น ที่รู้จักกันดีก็คือ ระบบเรดาร์ ซึ่งจะทำให้การบันทึกข้อมูลในช่วงคลื่นความถี่ระหว่าง 3-12.5 GHz (ความยาวคลื่นระหว่าง 2.4-100 เซนติเมตร) นิยมใช้ตัวอักษรบอกช่วงคลื่น

การแผ่รังสีของพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถอธิบายด้วยทฤษฎีอนุภาค กล่าวคือ การแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบด้วยหน่วยอิสระที่เรียกว่าโฟตอน (Photon)

หรือควอนตัม (Quantum) พลังงานของแต่ละควอนตัมจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ของคลื่น ดังนั้น พลังงานจะเป็นสัดส่วนผกผันกับความยาวคลื่น คือ ความยาวคลื่นมากจะให้พลังงานต่ำ ถ้าวัตถุใดส่งพลังงานช่วงคลื่นยาว เช่น ไมโครเวฟ การตรวจรับพลังงานโดยอุปกรณ์ทางการรับรู้จากระยะไกลที่ช่วงคลื่นนี้จะยากกว่าการตรวจรับพลังงานที่ช่วงคลื่นสั้น ถ้าต้องการบันทึกพลังงานช่วงคลื่นยาวจะต้องบันทึกพลังงานในบริเวณกว้าง และใช้เวลาในการบันทึกนาน ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่สำคัญที่สุดของการรับรู้จากระยะไกล อย่างไรก็ตาม สสารทุกชนิดที่มีอุณหภูมิสูงกว่าองศาสัมบูรณ์ ( $0^{\circ}\text{K}$  หรือ  $-273^{\circ}\text{C}$ ) สามารถเปล่งพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่อง โดยมีขนาดและส่วนประกอบของช่วงคลื่นแตกต่างกันไป ซึ่งพลังงานที่วัตถุแผ่ออกมามากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของผิววัตถุ

ดังนั้น อุณหภูมิของพื้นผิวโลก (พืช ดิน และน้ำ) ประมาณ  $300^{\circ}\text{K}$  มีพลังงานที่แผ่ออกมาสูงสุดเกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นประมาณ 10 ไมโครเมตร หรือที่ช่วงคลื่นอินฟราเรดความร้อน เนื่องจาก การแผ่รังสีออกมามีความสัมพันธ์กับความร้อนของพื้นผิวโลก จึงนิยมเรียกรังสีที่แผ่ออกมานี้ว่า พลังงานอินฟราเรดความร้อน (Thermal Infrared Energy) พลังงานนี้ไม่สามารถตรวจวัดได้ด้วยการบันทึกด้วยกล้องถ่ายรูปที่ใช้ฟิล์มทั่ว ๆ ไป แต่สามารถบันทึกด้วยเครื่องมือพิเศษ เช่น เรดิโอมิเตอร์ (Radiometer) หรือ เครื่องกวาดภาพ ดวงอาทิตย์มีพลังงานที่แผ่ออกมาสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 0.5 ไมโครเมตร ตาของมนุษย์และฟิล์มถ่ายรูปทั่วไปไวต่อพลังงานในช่วงคลื่นขนาดนี้ ดังนั้น เมื่อดวงอาทิตย์ขึ้นเราสามารถมองเห็นพื้นผิวโลก เนื่องจากการสะท้อนของแสงอาทิตย์ พลังงานที่ความยาวคลื่นที่ยาวกว่านี้จะแผ่รังสีออกจากพื้นโลกเช่นกัน แต่สามารถสังเกตหรือตรวจวัดได้ด้วยระบบอื่นที่ไม่ใช่ฟิล์มถ่ายรูปทั่ว ๆ ไป (สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน), 2552)

ทรงกต ทศานนท์ (2550) ได้นิยามความหมายของการรับรู้จากระยะไกลว่า เป็นศาสตร์ของการศึกษาโครงสร้างและองค์ประกอบของพื้นผิวและบรรยากาศโลกจากระยะไกล โดยอาศัยอุปกรณ์ตรวจวัด ซึ่งมักใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสื่อในการได้มาซึ่งข้อมูล อาทิเช่น กล้องถ่ายภาพทางอากาศ ภาพถ่ายจากดาวเทียมและการประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์จากดาวเทียม OCO-2 และ Terra MODIS ประเทศไทย ได้นำการรับรู้จากระยะไกลซึ่งอาศัยหลักการและการได้มาซึ่งข้อมูลจากภาพถ่ายจากดาวเทียม 2 ดาวเทียมเป็นหลัก ได้แก่ Orbiting Carbon Observatory 2 (OCO-2) และ Terra ระบบ MODIS โดยมีรายละเอียดของดาวเทียมและข้อมูล ดังนี้

1. ดาวเทียม Orbiting Carbon Observatory 2 (OCO-2) ถูกพัฒนาโดยประเทศสหรัฐอเมริกา ส่งขึ้นเมื่อวันที่ 1 กรกฎาคม พ.ศ. 2557 ขนาด 140 กิโลกรัม รายละเอียดเชิงพื้นที่  $1.29 \text{ กิโลเมตร} \times 2.25 \text{ กิโลเมตร}$  บินถ่ายซ้ำที่เดิมทุก ๆ 16 วัน ช่วงคลื่นที่ใช้ 3 ช่วงคลื่น คือ 2.06 1.61 และ 0.765 ไมครอน มีภารกิจเพื่อศึกษาตรวจวัดค่าคาร์บอน ไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ (NASA, 2016)

2. ดาวเทียม Terra ระบบ MODIS เป็นดาวเทียมสำรวจทรัพยากรที่เน้นทรัพยากร เช่น สิ่งปกคลุมดิน เมฆ อุณหภูมิพื้นผิว เป็นต้น ซึ่งเหมาะกับการติดตามการเปลี่ยนแปลง หรือภัยธรรมชาติ

ได้ ระบบ MODIS พัฒนาโดย NASA และถูกส่งขึ้นสู่อวกาศประมาณปี พ.ศ. 2542 ขนาด 228.7 กิโลเมตร โดยดาวเทียม Terra ระบบ MODIS มีรายละเอียดเชิงพื้นที่ที่แตกต่างกันไปตามแต่ละช่วงคลื่น คือ แบนด์ 1-2 รายละเอียดเชิงพื้นที่ 250 เมตร แบนด์ 3-7 รายละเอียดเชิงพื้นที่ 500 เมตร และแบนด์ 8-36 รายละเอียดเชิงพื้นที่ 1 กิโลเมตร นอกจากนี้ ดาวเทียม Terra MODIS ยังได้จัดทำชุดผลิตภัณฑ์ข้อมูลเพื่ออำนวยความสะดวกการนำข้อมูลมาใช้ศึกษา (NASA, 2017) โดยในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ใช้ชุดผลิตภัณฑ์ทั้งสิ้น 4 ชุด ข้อมูลได้แก่

2.1 ชุดผลิตภัณฑ์ MOD11A2 เป็นข้อมูลที่ใช้สำหรับศึกษาอุณหภูมิพื้นผิว (Land Surface Temperature/ Emissivity) ข้อมูลที่ได้ทุก ๆ 8 วัน รายละเอียดภาพ 1 กิโลเมตร ใช้แบนด์ที่ 31 ช่วงคลื่น 10.780 – 11.280 ไมโครเมตร และแบนด์ที่ 32 ช่วงคลื่น 11.770 - 12.270 ไมโครเมตร

2.2 ชุดผลิตภัณฑ์ MOD13Q1 เป็นข้อมูลที่ใช้สำหรับศึกษาดัชนีพืชพรรณ NDVI และ EVI ซึ่งเป็นดัชนีที่เน้นความสมบูรณ์พืชพรรณ สามารถติดตามการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของพืชพรรณได้ ข้อมูลที่ได้ทุก ๆ 16 วัน รายละเอียดภาพ 250 เมตร ใช้ช่วงคลื่นตามมองเห็น สีน้ำเงิน ประมาณ 469 นาโนเมตร สีแดงประมาณ 645 นาโนเมตร และช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ประมาณ 858 นาโนเมตร

2.3 ชุดผลิตภัณฑ์ MOD15A2 เป็นข้อมูลที่ใช้สำหรับศึกษาดัชนีพื้นผิวใบ เน้นศึกษาพื้นที่ผิวใบต่อหน่วยพื้นที่ และสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง ซึ่งจะตอบสนองได้ดีในช่วงคลื่น 400-700 นาโนเมตร โดยชุดผลิตภัณฑ์นี้จะเน้นไปที่ไม้ยืนต้นเป็นหลัก ข้อมูลที่ได้ทุก ๆ 8 วัน รายละเอียดภาพ 500 เมตร

2.4 ชุดผลิตภัณฑ์ MOD17A2 เป็นข้อมูลที่ใช้สำหรับศึกษาอัตราการผลิตปฐมภูมิรวม ซึ่งเป็นการวัดการเจริญเติบโตของพืชบนบก โดยอาศัยค่าการสังเคราะห์รายวัน และรวมข้อมูลทุก ๆ 8 วัน เพื่อเป็นแบบจำลองในการคำนวณพลังงาน และกระบวนการสังเคราะห์แสงทางชีววิทยา รายละเอียดภาพ 1 กิโลเมตร

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

คมกฤษณ์ ศิริรัมย์ (2554) ศึกษาอัตราการแพร่กระจายก๊าซมีเทนในนาข้าวจากดัชนีพืชพรรณ โดยประยุกต์ภาพถ่ายดาวเทียม LANDSAT 5 ในพื้นที่อำเภอบางน้ำเปรี้ยว จังหวัดฉะเชิงเทรา เพื่อศึกษาค่าการสะท้อนของค่าดัชนีพืชพรรณ และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพืชพรรณกับค่ามีเทนตามระยะการเจริญเติบโต พร้อมทั้งประเมินอัตราการแพร่กระจายของก๊าซมีเทนจากดัชนีพืชพรรณ ผลการศึกษาพบว่า ค่าการสะท้อนของดัชนีพืชพรรณ ได้แก่ NDVI RVI SAVI MSAVI และ GNDVI ทุกค่ามีแนวโน้มค่าเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตั้งแต่หลังจากเริ่มเพาะปลูกไปแล้ว 16 วัน และสูงสุดเมื่อหลังการเพาะปลูก 80 วัน ส่วนความสัมพันธ์ของดัชนีพืชพรรณกับอัตราการกระจายของก๊าซ

มีเทนตามระยะการเจริญเติบโตของข้าวมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งดัชนีพืชพรรณ GNDVI และ MSAVI สามารถนำมาใช้ในการสร้างสมการเนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์กันสูงสุดเท่ากับ 0.823 และ 0.843

ศักรินทร์ นนทพจน์ และมัลลิกา สมพลกรัง (2557) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวของการท่องเที่ยวกับการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในประเทศไทย ทั้งการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากภาคขนส่ง ภาคการใช้พลังงาน และการใช้ไฟฟ้าของประเทศไทย ผลการศึกษาพบว่า การขยายตัวของการท่องเที่ยวและการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นเหตุเป็นผลซึ่งกันและกัน ในขณะที่การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากภาคขนส่งและภาคการใช้ไฟฟ้าเป็นเหตุจากการขยายตัวของการท่องเที่ยว ทั้งนี้ เพื่อเป็นการลดปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จึงควรมีการรณรงค์สำหรับการท่องเที่ยวสีเขียวสำหรับนักท่องเที่ยว

ภารดี ช่วยบำรุง และชญัญญา ประพันธ์พจน์ (2558) ได้ศึกษาความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในระบบขนส่งมวลชนทางบกในเขตกรุงเทพมหานคร โดยตรวจวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในรถไฟฟ้าบีทีเอส รถไฟฟ้าใต้ดิน รถโดยสารประจำทางปรับอากาศและรถตู้โดยสาร และใช้เครื่องมือที่อ่านค่าได้ในทันทีเพื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของ American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) ซึ่งกำหนดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไว้ที่ 1,000 ppm อันแสดงถึงการระบายอากาศที่มีประสิทธิภาพ ผลการตรวจวัดพบว่า ในรถไฟฟ้าบีทีเอสมีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 430-2,225 ppm (ผู้ใช้บริการ 8- 168 คน) โดยจำนวนคนเฉลี่ยในตู้โดยสารที่ไม่ทำให้ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกินค่ามาตรฐาน คือ 75 คนต่อตู้โดยสาร ขณะที่รถไฟฟ้าใต้ดินพบก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 364-2,544 ppm (ผู้ใช้บริการ 6-250 คน) จำนวนคนเฉลี่ยที่ไม่ทำให้ระดับก๊าซเกิน 1,000 ppm คือ 73 คน ต่อตู้โดยสาร ส่วนรถโดยสารประจำทางปรับอากาศพบก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 458-3,546 ppm (ผู้ใช้บริการ 5-73 คน) และรถตู้โดยสารพบอยู่ในช่วง 760-7,316 ppm (ผู้โดยสารสูงสุด 16 คน) ซึ่งนอกจากจำนวนผู้ใช้บริการจะมีผลต่อระดับของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว สภาพการจราจรยังส่งผลต่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในรถอีกด้วย โดยสันนิษฐานว่า อากาศจากภายนอกมีการปนเปื้อนเข้าสู่รถโดยสาร ซึ่งในรถตู้โดยสารสาธารณะมีจำนวนผู้โดยสารน้อยที่สุดในระบบขนส่งมวลชนทั้งหมด แต่มีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุด สรุปได้ว่า การระบายอากาศภายในระบบขนส่งมวลชนที่ทำการศึกษาทุกประเภทมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอ โดยมีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกินค่ามาตรฐานที่ ASHRAE กำหนดไว้ที่ 1,000 ppm

สายรุ้ง แวดตะคุ สุจิตินา กรรณสุด และสุรัตน์ บัวเลิศ (2558) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างพื้นที่สีเขียวในเขตเมืองและพื้นที่สีเขียวในเขตชนบท



ผลการศึกษาพบว่า ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศบริเวณพื้นที่สีเขียวในเขตชนบท (บริเวณป่าชายเลน โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ย อันเนื่องมาจากพระราชดำริ จังหวัดเพชรบุรี) มีค่าเฉลี่ยรายวันอยู่ที่  $2.41 \text{ mg/m}^3$  และพื้นที่สีเขียวในเขตเมือง คือ สวนเบญจสิริกรุงเทพมหานคร มีค่าเฉลี่ยรายวันอยู่ที่  $4.82 \text{ mg/m}^3$  เกณฑ์ในการพิจารณาประสิทธิภาพการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คือ 1) ความเข้มของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$  Flux) ที่เคลื่อนที่ผ่านต่อพื้นที่ต่อเวลา ( $\text{CO}_2$  flux) และ 2) ความถี่ของการเคลื่อนที่แนวตั้ง (แกน z) ที่มีทิศทางเคลื่อนที่ลง (มีค่าลบ) ในเวลากลางวันเนื่องจากความต้องการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในขณะที่พืชสังเคราะห์แสง พบว่า พื้นที่สีเขียวในเขตชนบทมีการดูดซับสูงสุด  $-0.06 \text{ mg}/(\text{m}^2 \text{ s})$  และมีความถี่ร้อยละ 25 ที่มีการเคลื่อนที่ลงในแนวตั้งของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในขณะที่พื้นที่สีเขียวในเขตเมืองมีค่าเฉลี่ยรายวันอยู่ที่  $-0.02 \text{ mg}/(\text{m}^2 \text{ s})$  และมีความถี่ร้อยละ 41.7 ที่มีการเคลื่อนที่ลง การที่ความถี่ของการเคลื่อนที่ในพื้นที่สีเขียวชนบทมีน้อยกว่าพื้นที่สีเขียวในเมือง ถึงร้อยละ 50 แต่ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เคลื่อนที่ลงสู่พื้นที่สีเขียวในชนบทที่สูงกว่าพื้นที่สีเขียวในเมือง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของพื้นที่สีเขียวในชนบทมีความสามารถในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่า

วลดา เดชะพงค์ธนา (2559) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวและดัชนีพืชพรรณ NDVI ของพื้นที่นาข้าวในแต่ละช่วงการเจริญเติบโต จากข้อมูลดาวเทียม LANDSAT 8 เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิพื้นผิวและค่าดัชนีพืชพรรณในพื้นที่อำเภอบางน้ำเปรี้ยว จังหวัดฉะเชิงเทรา โดยทำการเก็บข้อมูลตัวอย่างพื้นที่นาข้าวแต่ละระยะการเติบโต และนำข้อมูล 4 ช่วงคลื่นมาคำนวณอุณหภูมิพื้นผิวด้วยวิธีการ Split-Window และคำนวณค่า NDVI ผลการศึกษาเมื่อทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์พบว่า อุณหภูมิพื้นผิวกับค่า NDVI มีความสัมพันธ์ในทิศทางลบหรือแปรผกผันกัน

Meng Guo et al. (2012) ได้ประเมินความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของโลก โดยใช้ข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS และดาวเทียม GOSAT ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ ( $\text{XCO}_2$ ) กับชุดข้อมูลที่วิเคราะห์ได้จากดาวเทียม Terra MODIS คือ อุณหภูมิพื้นผิว (Land Surface Temperature: LST) ดัชนีพืชพรรณ (NDVI และ EVI) ดัชนีพื้นที่ใบ (Leaf Area Index: LAI) สัดส่วนของการสังเคราะห์แสง (Fraction of Photosynthetically Active Radiation: FPAR) อัตราการผลิตปฐมภูมิรวม (Gross Primary Productivity: GPP) และ อัตราการผลิตปฐมภูมิสุทธิ (Net Primary Production: NPP) ของทวีปต่าง ๆ รวม 5 ทวีป ได้แก่ ทวีปยูเรเชีย ทวีปออสเตรเลีย ทวีปแอฟริกา ทวีปอเมริกาเหนือ และทวีปอเมริกาใต้ ผลการศึกษาพบว่า ในทวีปแอฟริกาข้อมูล  $\text{XCO}_2$  มีความสัมพันธ์กับค่า NPP มากที่สุด มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.61 ส่วนทวีปยูเรเชีย  $\text{XCO}_2$  มีความสัมพันธ์กับค่า NDVI

และค่า EVI มากที่สุด มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.44 และ 0.42 ตามลำดับ และทวีปอเมริกาใต้ พบว่า  $XCO_2$  มีค่าความสัมพันธ์กับค่า LST มากที่สุด มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.64 ซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนว่า

ค่า ( $XCO_2$ ) มีความสัมพันธ์กับค่า LST NPP NDVI และ EVI

Qinqin Sun, Zhifeng Wu & Jianjun Tan. (2012) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวกับสิ่งปกคลุมดิน ในกวางโจว สาธารณรัฐประชาชนจีน ด้วยการประยุกต์ข้อมูลจากดาวเทียม Landsat ระบบ TM รวมถึงการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ดัชนีของสิ่งปกคลุมดิน ได้แก่ ดัชนีพืชพรรณ NDVI ดัชนีสิ่งปลูกสร้าง NDBI ผลการศึกษาพบว่า ดัชนีพืชพรรณ NDVI มีความสัมพันธ์ทางลบกับอุณหภูมิพื้นผิว ในทางตรงข้ามดัชนีสิ่งปลูกสร้างนั้น มีความสัมพันธ์ในทางบวกกับอุณหภูมิพื้นผิว ทั้งนี้ ยังมีการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) สำหรับทำนายอุณหภูมิพื้นผิวจากปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กัน

Gary Witt (2013) ได้ใช้ข้อมูลสภาพภูมิอากาศสำหรับเป็นตัวอย่างในการสอนสถิติเบื้องต้นสำหรับวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ อุณหภูมิและพลังงานการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ ระหว่างปี ค.ศ. 1979 ถึงปี ค.ศ. 2010 โดยข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิวและพื้นผิวน้ำทะเลของโลก จากสถาบันศึกษาอวกาศก็อดดาร์ด (Goddard Institute of space Studies: GISTEM) มีหน่วยเท่ากับ 1/100 องศาเซนติเกรดซึ่งมักจะอ้างอิงมาจากอุณหภูมิพื้นผิวโลก (Global Surface Temperature) และข้อมูลคาร์บอนไดออกไซด์ได้มาจากห้องปฏิบัติการวิจัยของ NOAA เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์พบว่า อุณหภูมิโลกจาก GISTEM มีความสัมพันธ์ในทางบวกกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 0.857 ทั้งนี้ ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ดังกล่าวยังสามารถสร้างสมการพหุคูณถดถอยเชิงเส้น (Multiple Linear Regression) สำหรับคาดการณ์อุณหภูมิ GISTEM จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และพลังงานการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ได้เป็นอย่างดี มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $r$ ) เท่ากับ 0.764

Meng Guo et al. (2015) ได้ประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ในช่วงฤดูฝนจากข้อมูลดาวเทียม Terra ระบบ MODIS และดาวเทียม GOSAT บริเวณเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ด้วยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $XCO_2$  กับชุดข้อมูลที่วิเคราะห์จากดาวเทียม Terra MODIS คือ ชุดข้อมูล LST NDVI EVI LAI FPAR และ GPP ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ในช่วงเดือนพฤษภาคม ถึงเดือนตุลาคม ผลการศึกษาพบว่า ในแต่ละเดือนค่า  $XCO_2$  มีความสัมพันธ์กับตัวแปรหรือชุดข้อมูลที่แตกต่างกัน ซึ่งค่า  $XCO_2$  ในเดือนพฤษภาคมและเดือนสิงหาคมมีความสัมพันธ์กับตัวแปรทุกตัวแปร เมื่อพบความสัมพันธ์ดังกล่าวจึงนำตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับ  $XCO_2$  มาสร้างสมการพหุคูณถดถอยเชิงเส้น (Multiple Linear Regression) สำหรับประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศได้เป็นอย่างดี และมีข้อเสนอแนะว่า

การใช้ข้อมูลดาวเทียมมาสร้างแบบจำลองการถดถอยสำหรับกำหนดความเข้มข้นของค่า  $XCO_2$  นั้น มีความเหมาะสมสำหรับนำมาใช้ในระดับภูมิภาค

Venkatesh Reddy Chejarla, Pramod Kumar Maheshuni & Venkata Ravibabu Mandla (2015) ได้วิเคราะห์อุณหภูมิพื้นผิวดินและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยช่วงคลื่นอินฟราเรดความร้อนจากดาวเทียม LANDSAT-8 รวมถึงวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวจากข้อมูลดาวเทียม LANDSAT-8 แบนด์ 10 และแบนด์ 11 กับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากสถานีตรวจวัดข้อมูลในช่วงเดือนเมษายน พฤษภาคมและเดือนมิถุนายน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ที่สูงระหว่างข้อมูลดาวเทียมและสถานีตรวจวัดข้อมูล และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ของในเดือนเมษายนเท่ากับ 0.994 เดือนมิถุนายนเท่ากับ 0.934 และเดือนพฤษภาคมเท่ากับ 0.297 สำหรับอุณหภูมิพื้นผิว แบนด์ 10 และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของเดือนเมษายนเท่ากับ 0.217 เดือนพฤษภาคมเท่ากับ 0.914 และเดือนมิถุนายนเท่ากับ 0.934 สำหรับอุณหภูมิพื้นผิว แบนด์ 11 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิพื้นผิวดินแบนด์ 10 และ 11 สามารถประมาณค่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่เป็นก๊าซเรือนกระจกได้

จากการทบทวนเอกสาร วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องสามารถสรุปได้ว่า ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซที่มีความสำคัญชนิดหนึ่งของก๊าซเรือนกระจก และส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิเฉลี่ยของโลกให้มีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของชุมชนเมืองและการลดลงของพื้นที่สีเขียวอย่างพื้นที่ป่าไม้ ทั้งนี้ การตรวจวัดคาร์บอนไดออกไซด์สามารถทำได้ 2 วิธีหลัก คือ 1. การตรวจวัดจากสถานีภาคพื้นดิน และ 2. การตรวจวัดจากการรับรู้จากระยะไกลด้วยช่วงคลื่นอินฟราเรด ในปัจจุบันสามารถได้ข้อมูลคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ จากดาวเทียมหลายดวงแต่ที่หลัก ๆ คือ ข้อมูลจากดาวเทียม GOSAT ของประเทศญี่ปุ่น และดาวเทียม OCO-2 ของประเทศสหรัฐอเมริกา ที่สามารถตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ แต่อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่ได้นี้ยังมีข้อจำกัด คือ มีแนวโคจรไม่ครอบคลุมในระดับประเทศ ส่งผลให้มีข้อมูลเชิงพื้นที่ขาดหายไปบางส่วน จึงเกิดคำถามการวิจัยถึงความเป็นไปได้ในการเติมเต็มข้อมูลดังกล่าว จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า มีการนำข้อมูลจากข้อมูลดาวเทียม Terra ระบบ MODIS และข้อมูลคาร์บอนไดออกไซด์จากดาวเทียม มาวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์และสร้างสมการคณิตศาสตร์ในการประมาณค่าทั้งในช่วงและนอกช่วง เพื่อให้ได้มาซึ่งค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ แต่การวิเคราะห์ที่ผ่านมาการสร้างสมการคณิตศาสตร์นั้นได้คัดเลือกตัวแปรเข้าสู่สมการจากตัวแปรทุกตัวแปรที่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญ จึงทำให้สมการผลลัพธ์ยาวและนำมาใช้งานยาก ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้เพิ่มการวิเคราะห์แบบลำดับขั้น (Stepwise) ซึ่งจะคัดตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันเองออกจากสมการ เพื่อเป็นการ

แก้ปัญหาดังกล่าว นอกจากนี้ ยังมีการสร้างสมการถดถอยทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น เพื่อเป็นทางเลือกในการตัดสินใจสำหรับผู้ใช้งานเพิ่มขึ้นด้วย

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการวิจัย

การประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดาวเทียม OCO-2 และ Terra MODIS ประเทศไทย เป็นการศึกษาความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในชั้นบรรยากาศ กับชุดผลิตภัณฑ์จากข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิพื้นผิว (LST) ดัชนีพืชพรรณ NDVI และ EVI ดัชนีพื้นผิวใบ (LAI) อัตราการผลิตปฐมภูมิรวม (GPP) และสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง (FPAR) แล้วนำมาศึกษาความสัมพันธ์ของแต่ละตัวแปรพร้อมทั้งสร้างสมการการประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของประเทศไทย โดยมีอุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย ดังนี้

#### อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย

##### 1. ฮาร์ดแวร์ (Hardware)

###### 1.1 โน้ตบุ๊กคอมพิวเตอร์

1.2 CPU Intel (R) Core (TM) i7-6700HQ 2.60 GHz

1.3 Memory 8.00 GB

1.4 Hard Disk 1 TB

##### 2. ซอฟต์แวร์ (Software)

2.1 โปรแกรม ArcGIS for Desktop เวอร์ชัน 10 จากคณะภูมิสารสนเทศศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2.2 Microsoft Word 2010 จากสำนักคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2.3 Microsoft Excel 2010 จากสำนักคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

#### ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย

1. ข้อมูลคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ จากดาวเทียม Orbiting Carbon Observatory 2 (OCO-2) เดือนตุลาคม พ.ศ. 2557 ถึง เดือนตุลาคม พ.ศ. 2559 จากชุดผลิตภัณฑ์ OCO-2 Lite ใน Level 2 จากเว็บไซต์ <https://co2.jpl.nasa.gov/build/?dataset=OCO2L2Stdv7r&product=FULL#>

2. ชุดผลิตภัณฑ์จากข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS เดือนตุลาคม พ.ศ. 2557 ถึงเดือนตุลาคม พ.ศ. 2559 จากเว็บไซต์ <https://earthexplorer.usgs.gov/> ได้แก่

2.1 ข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิว จากชุดผลิตภัณฑ์ MOD11A2 สำหรับข้อมูล Land Surface Temperature and Emissivity 8-Day L3 Global รายละเอียดภาพ 1 กิโลเมตร

2.2 ดัชนีพืชพรรณ NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) จากชุดผลิตภัณฑ์ MOD13Q1 รวมข้อมูลดัชนีพืชพรรณทุก ๆ 16 วัน รายละเอียดภาพ 250 เมตร

2.3 ดัชนีพืชพรรณ EVI (Enhanced Vegetation Index) จากชุดผลิตภัณฑ์ MOD13Q1 รวมข้อมูลดัชนีพืชพรรณทุก ๆ 16 วัน รายละเอียดภาพ 250 เมตร

2.4 ดัชนีพื้นที่ใบ (Leaf Area Index : LAI) จากชุดผลิตภัณฑ์ MOD15A2 รวมข้อมูลทุก ๆ 8 วัน รายละเอียดภาพ 500 เมตร

2.5 อัตราการผลิตปฐมภูมิรวม (Gross Primary Productivity : GPP) จากชุดผลิตภัณฑ์ MOD17A2 รวมข้อมูลทุก ๆ 8 วัน รายละเอียดภาพ 1 กิโลเมตร

2.6 สัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง (Fraction of Photosynthetically Active Radiation : FPAR) จากชุดผลิตภัณฑ์ MOD15A2 รวมข้อมูลทุก ๆ 8 วัน รายละเอียดภาพ 500 เมตร

3. ขอบเขตการปกครองประเทศไทย จากสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน)

## ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

### 1. การรวบรวมข้อมูล

ศึกษาและรวบรวมข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิพื้นผิว ดัชนีพืชพรรณ NDVI และ EVI ดัชนีพื้นที่ใบ อัตราการผลิตปฐมภูมิรวม และสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง ขั้นตอนการได้มาซึ่งข้อมูล การศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรและสมการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ทั้งจากเล่มวิจัยและข้อมูลจากอินเทอร์เน็ต

### 2. การศึกษาค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ

2.1 การแปลงข้อมูลดิบ (Raw Data) ในรูปแบบของข้อมูลตาราง (Comma Separated Value: CSV) ให้อยู่ในรูปแบบของข้อมูลเวกเตอร์ (Vector) ซึ่งผลลัพธ์จะเป็นข้อมูลจุด (Point)

2.2 การแปลงระบบพิกัดภูมิศาสตร์ (Decimal Degree) เป็นระบบพิกัดกริด (Universal Transverse Mercator: UTM) โซน 47 เหนือ ด้วยคำสั่ง Projection and Transformation

ผ่านโปรแกรม ArcGIS เวอร์ชัน 10

### 2.3 การปรับแก้ข้อมูลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ ( $XCO_{2Raw}$ )

จากดาวเทียม Orbiting Carbon Observatory 2 (OCO-2) ดังสมการที่ 3-1 และ 3-2 (NASA, 2016)

$$XCO_{2Corrected} = \frac{XCO_{2Raw} - FOOT[fp, mode] - FEATS[mode]}{TCCON\_ADJUST[mode]} \quad (3-1)$$

เมื่อ	$XCO_{2Corrected}$	คือ ค่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปรับแก้
	$XCO_{2Raw}$	คือ ค่าคาร์บอนไดออกไซด์ดั้งเดิม
	$FOOT[fp, mode]$	คือ ฟุตพริ้นท์ (Footprint) ดังตารางที่ 3-1
	$FEATS[mode]$	คือ Feature Bias ดังตารางที่ 3-2
	$TCCON\_ADJUST[mode]$	คือ Total Carbon Column Observing Network ดังตารางที่ 3-3

$$XCO_{2Final} = XCO_{2Corrected} - FOOT2[fp, mode] \quad (3-2)$$

เมื่อ	$XCO_{2Final}$	คือ ค่าคาร์บอนไดออกไซด์
	$XCO_{2Corrected}$	คือ ค่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปรับแก้
	$FOOT2[fp, mode]$	คือ ฟุตพริ้นท์ (Footprint) ดังตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-1 ค่า FOOTPRINT BIAS (FOOT) (ppm) (NASA, 2016)

Footprint (fp)	FOOTPRINT BIAS (FOOT) (ppm)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
LAND GLINT	0.06	0.07	-0.05	0.02	-0.13	0.18	-0.13	-0.02
LAND NADIA	0.19	0.13	0.00	-0.01	-0.16	0.11	-0.21	-0.05
LAND TARGET	0.06	0.00	-0.12	0.00	-0.05	0.21	-0.12	-0.04
SEA GLINT	-0.23	-0.07	-0.13	-0.10	-0.03	0.35	-0.03	0.24

ตารางที่ 3-2 ค่า FEATS (NASA, 2016)

FEATURE BIAS (FEATS) (ppm)	
LAND (ALL)	$-0.3*(dP - 1.4) - 0.6*(\log\_DWS + 2.9) - 0.028*(co2\_grad\_del - 8.4)$
SEA GLINT	$-0.08*(dP - 3.1) + 0.077*(co2\_grad\_del + 7.7)$

ตารางที่ 3-3 ค่า TCCON\_ADJUST (NASA, 2016)

	OVERALL DIVISOR (TCCON_ADJUST)	Method
LAND GLINT	0.9970	Assigned (similar to Target)
LAND NADIR	0.9955	Propagated via mean(XCO <sub>2</sub> )
LAND TARGET	0.9970	Derived using TCCON + Target Mode
SEA GLINT	0.9990	Propagated via mean(XCO <sub>2</sub> )

ตารางที่ 3-4 ค่า RESIDUAL FOOTPRINT BIAS (FOOT2) (ppm) (NASA, 2016)

FOOTPRINT BIAS (FOOT) (ppm)								
Footprint (fp)	1	2	3	4	5	6	7	8
LAND GLINT	-0.13	-0.09	-0.01	-0.14	0.00	0.06	0.09	0.21
LAND NADIA	-0.17	-0.10	-0.02	-0.09	0.04	0.03	0.13	0.18
LAND TARGET	-0.17	-0.04	0.02	-0.10	0.05	0.01	0.07	0.16
SEA GLINT	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	-0.08	0.02	0.01

2.4 การแปลงข้อมูลก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (XCO<sub>2</sub> Final) ที่ปรับแก้แล้ว ให้อยู่ในรูปแบบของข้อมูลแรสเตอร์ (Raster) ด้วยคำสั่ง Point to Raster โดยมีการกำหนดรายละเอียดภาพเท่ากับ 0.25 องศา ผ่านโปรแกรม ArcGIS เวอร์ชัน 10

### 3. การศึกษาชุดผลิตภัณฑ์จากข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS

การศึกษาชุดผลิตภัณฑ์จากข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิพื้นผิว (LST) ดัชนีพืชพรรณ NDVI และ EVI ดัชนีพื้นผิวใบ (LAI) อัตราการผลิตปฐมภูมิรวม



(GPP) และสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง (FPAR) จะมีการเตรียมข้อมูลก่อนการประมวลผลและการประมวลผลข้อมูล ดังต่อไปนี้

3.1 การเตรียมข้อมูลก่อนการประมวลผล (Pre-processing) ประกอบด้วย การปรับแก้ระบบพิกัดของภาพถ่ายดาวเทียม การต่อภาพ (Mosaic Image) การตัดภาพ (Clip Image) และการแปลงข้อมูลเชิงเลขเป็นค่าการสะท้อน (DN to Reflectance)

3.1.1 การปรับแก้ระบบพิกัดของภาพถ่ายดาวเทียม จากระบบ MODIS Sinusoida เป็นระบบพิกัดกริดแบบ UTM (Universal Transverse Mercator) โซน 47 เหนือ และปรับขนาดของจุดภาพ (Resample Pixel) เท่ากับขนาดของจุดภาพเดิม ด้วยคำสั่ง Projection and Transformations ผ่าน โปรแกรม ArcGIS

3.1.2 การต่อภาพถ่ายดาวเทียม Terra ระบบ MODIS จำนวน 5 ภาพ ครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทย ได้แก่ ตำแหน่ง h27v06, h27v07, h27v08, h28v07 และ h28v08 เป็นภาพผืนเดียวกัน

3.1.3 การตัดภาพดาวเทียม Terra ระบบ MODIS ด้วยขอบเขตประเทศไทย

3.1.4 การแปลงข้อมูลเชิงเลขเป็นค่าการสะท้อน (Reflectance) สำหรับชุดข้อมูลดัชนีพืชพรรณและอัตราผลิตในระบบนิเวศ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3-3 และสำหรับค่าอุณหภูมิพื้นผิว ได้จากสมการที่ 3-4 (Earth Data, 2014)

$$\rho_{\lambda} = DN * 0.0001 \quad (3-3)$$

เมื่อ  $\rho_{\lambda}$  คือ ค่าการสะท้อนของแต่ละช่วงคลื่น  
DN คือ ค่าเชิงเลขของแต่ละช่วงคลื่น

$$LST = DN * 0.02 \quad (3-4)$$

เมื่อ  $LST$  คือ ค่าอุณหภูมิพื้นผิว  
DN คือ ค่าเชิงเลขของช่วงคลื่นอินฟราเรดร้อน

3.2 การประมวลผลข้อมูลดาวเทียม Terra ระบบ MODIS ได้แก่ อุณหภูมิพื้นผิว (LST) ดัชนีพืชพรรณ NDVI และ EVI ดัชนีพื้นผิวใบ (LAI) อัตราการผลิตปฐมภูมิรวม (GPP) และสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง (FPAR) มีวิธีการศึกษา ดังนี้

3.2.1 การศึกษาอุณหภูมิพื้นผิว

เป็นการศึกษาอุณหภูมิพื้นผิวโดยใช้ช่วงคลื่นอินฟราเรดความร้อนช่วงคลื่นที่ 31 และช่วงคลื่นที่ 32 จากข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS ด้วยวิธี Split-Window ซึ่งมีพารามิเตอร์หลัก 3 พารามิเตอร์ ได้แก่ อุณหภูมิความสว่าง สภาพเปล่งรังสี และไอน้ำในชั้นบรรยากาศ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3-5

$$T_s = T_{31} + c_1(T_{31} - T_{32}) + c_2(T_{31} - T_{32})^2 + c_0 + (c_3 + c_4W)(1 - \epsilon) + (c_5 + c_6)\Delta\epsilon \quad (3-5)$$

เมื่อ	$T_s$	คือ อุณหภูมิพื้นผิว
	$T_{31}$	คือ อุณหภูมิความสว่างของแบนด์ 31 จาก MODIS หน่วย °K
	$T_{32}$	คือ อุณหภูมิความสว่างของแบนด์ 32 จาก MODIS หน่วย °K
	$W$	คือ ค่าไอน้ำในชั้นบรรยากาศ หน่วย $g/cm^2$
	$\epsilon$	คือ สภาพเปล่งรังสีของพื้นผิวเฉลี่ยของแบนด์ 31 และ 32
	$\Delta\epsilon$	คือ ความแตกต่างของสภาพเปล่งรังสีของพื้นผิว ของแบนด์ 31 และ 32 เท่ากับ $\epsilon_{31} - \epsilon_{32}$
	$C_0-C_6$	คือ ค่าคงที่รายละเอียดดังตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-5 ค่าประสิทธิ์ของสมการ Split-Window (Jimenez-Munoz, J. C., & Soborino, J. A. 2003)

ค่าคงที่ (Constant)	ค่า (Value)
$C_0$	-0.004
$C_1$	2.625
$C_2$	0.424
$C_3$	41.4
$C_4$	0.04
$C_5$	- 201
$C_6$	26.6

### 3.2.2 การศึกษาค่าดัชนีพืชพรรณ

#### 3.2.2.1 การศึกษาค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI

โดยใช้ข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS มาใช้ในศึกษาดัชนีพืชพรรณ NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Rouse et al., 1974) ดังสมการที่ 3-6

$$NDVI = (NIR-Red) / (NIR+Red) \quad (3-6)$$

เมื่อ NIR คือ ค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้  
Red คือ ค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นสีแดง

### 3.2.2.2 การศึกษาดัชนีพืชพรรณ EVI

โดยใช้ข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS มาใช้ในศึกษาดัชนีพืชพรรณ EVI (Enhanced Vegetation Index) (Huete et al., 1996; 1997) ดังสมการที่ 3-7

$$EVI = 2.5 \frac{NIR-Red}{1+NIR+6Red-7.5Blue} \quad (3-7)$$

เมื่อ NIR คือ ค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้  
Red คือ ค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นสีแดง  
Blue คือ ค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นสีน้ำเงิน

### 3.2.2.3 การศึกษาดัชนีพื้นที่ผิวใบ

โดยใช้ข้อมูลจากดาวเทียม Terra MODIS มาใช้ในศึกษาดัชนีพื้นที่ผิวใบ Leaf Area Index (LAI) (Peng Gong et al., 2003) ดังสมการที่ 3-8

$$LAI = (3.618 * EVI - 0.118) \quad (3-8)$$

### 3.2.3 การศึกษาอัตราการผลิตปฐมภูมิรวม

อัตราการผลิตปฐมภูมิรวม (Gross Primary Productivity: GPP) โดยใช้ข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS เป็นอัตราการสังเคราะห์แสงทั้งหมด รวมทั้งอินทรีย์สารที่ได้ใช้ไปในการหายใจภายในช่วงเวลาที่ทำการวัด

### 3.2.4 การศึกษาสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง

Fraction of Photosynthetically Active Radiation (FPAR) โดยใช้ข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS เป็นอัตราส่วนระหว่างค่า Absorbed Photosynthetically Active Radiation (APAR) กับค่า

Photosynthetically Active Radiation (PAR) ที่ถูกดูดซับ โดยเรือนยอด

#### 4. การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศและชุดผลิตภัณฑ์จากข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS

4.1 สร้างตารางกริดขนาด 0.25 x 0.25 องศา ให้ครอบคลุมพื้นที่ศึกษาประเทศไทย เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการหาค่าสถิติด้วยวิธีการ Zonal Statistic as Table ของคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ และชุดผลิตภัณฑ์จากข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS

4.2 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับอุณหภูมิพื้นผิว ด้วยสมการสหสัมพันธ์ของเพียร์สันที่มีระดับนัยสำคัญมากกว่าหรือเท่ากับ 0.05 สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 3-9

$$r = \frac{n \sum x_{LST} y - \sum x_{LST} \sum y}{\sqrt{[n \sum x_{LST}^2 - (\sum x_{LST})^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (3-9)$$

เมื่อ  $r$  คือ สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน  
 $X_{LST}$  คือ อุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของพื้นที่ทั้งหมดในแต่ละฤดูกาล  
 $Y$  คือ ค่าเฉลี่ยคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศในแต่ละฤดูกาล

4.3 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI ด้วยสมการสหสัมพันธ์ของเพียร์สันที่มีระดับนัยสำคัญมากกว่าหรือเท่ากับ 0.05 สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 3-10

$$r = \frac{n \sum x_{NDVI} y - \sum x_{NDVI} \sum y}{\sqrt{[n \sum x_{NDVI}^2 - (\sum x_{NDVI})^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (3-10)$$

เมื่อ  $r$  คือ สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน  
 $X_{NDVI}$  คือ ค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI เฉลี่ยของพื้นที่ทั้งหมดในแต่ละฤดูกาล  
 $Y$  คือ ค่าเฉลี่ยคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศในแต่ละฤดูกาล

4.4 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับค่าดัชนีพืชพรรณ EVI ด้วยสมการสหสัมพันธ์ของเพียร์สันที่มีระดับนัยสำคัญมากกว่าหรือเท่ากับ 0.05 สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 3-11

$$r = \frac{n \sum x_{EVI} y - \sum x_{EVI} \sum y}{\sqrt{[n \sum x_{EVI}^2 - (\sum x_{EVI})^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (3-11)$$

เมื่อ	r	คือ สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน
	X <sub>EVI</sub>	คือ ค่าดัชนีพืชพรรณ EVI เฉลี่ยของพื้นที่ทั้งหมดในแต่ละ ฤดูกาล
	Y	คือ ค่าเฉลี่ยคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศในแต่ละ ฤดูกาล

4.5 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับค่าดัชนีพื้นผิวใบ ด้วยสมการสหสัมพันธ์ของเพียร์สันที่มีระดับนัยสำคัญมากกว่าหรือเท่ากับ 0.05 สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 3-12

$$r = \frac{n \sum x_{LAI} y - \sum x_{LAI} \sum y}{\sqrt{[n \sum x_{LAI}^2 - (\sum x_{LAI})^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (3-12)$$

เมื่อ	r	คือ สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน
	X <sub>LAI</sub>	คือ ค่าดัชนีพื้นผิวใบเฉลี่ยของพื้นที่ทั้งหมดในแต่ละฤดูกาล
	Y	คือ ค่าเฉลี่ยคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศในแต่ละ ฤดูกาล

4.6 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับค่าอัตราการผลิตปฐมภูมิจميعด้วยสมการสหสัมพันธ์ของเพียร์สันที่มีระดับนัยสำคัญมากกว่าหรือเท่ากับ 0.05 สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 3-13

$$r = \frac{n \sum x_{GPP} y - \sum x_{GPP} \sum y}{\sqrt{[n \sum x_{GPP}^2 - (\sum x_{GPP})^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (3-13)$$

เมื่อ	r	คือ สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน
	X	คือ ค่าอัตราการผลิตปฐมภูมิจميعเฉลี่ยของพื้นที่ทั้งหมดในแต่ละ ฤดูกาล
	Y	คือ ค่าเฉลี่ยคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศในแต่ละ ฤดูกาล

4.7 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับค่าสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง ด้วยสมการสหสัมพันธ์ของเพียร์สันที่มีระดับนัยสำคัญมากกว่าหรือเท่ากับ 0.05 สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ 3-14

$$r = \frac{n \sum x_{FPAR} y - \sum x_{FPAR} \sum y}{\sqrt{[n \sum x_{FPAR}^2 - (\sum x_{FPAR})^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (3-14)$$

เมื่อ	r	คือ สหสัมพันธ์ของเพียร์สัน
	$X_{FPAR}$	คือ ค่าสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสงของพื้นที่ทั้งหมดในแต่ละฤดูกาล
	Y	คือ ค่าเฉลี่ยคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศในแต่ละฤดูกาล

## 5. การวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณแบบเป็นขั้นตอน

เมื่อได้ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศแล้ว จะเป็นขั้นตอนการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณแบบเป็นขั้นตอน (Stepwise Multiple Regression analysis) ซึ่งเป็นการทดสอบตัวแปรอิสระทุกตัว เพื่อป้องกันปัญหาความสัมพันธ์ภายในของตัวแปรพหุคูณ (Multicollinearity) โดยพิจารณาจากค่าความคงทนของการยอมรับ (Tolerance) ดังสมการที่ 3-15 มีค่าไม่น้อยกว่า 0.10 และค่าปัจจัยการขยายตัวของความแปรปรวน (VIF) ดังสมการที่ 3-16 มีค่าที่น้อยกว่า 10

$$\text{Tolerance} = 1 - R^2 \quad (3-15)$$

$$\text{VIF} = 1/(1-R^2) \quad (3-16)$$

## 6. การสร้างสมการคาดการณ์คาร์บอนไดออกไซด์

การสร้างสมการถดถอยพหุเชิงเส้น (Multiple Linear Regression Analysis) และสมการถดถอยที่ไม่ใช่เชิงเส้น (Non-linear Regression) เพื่อประมาณค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ จากชุดผลิตภัณฑ์จากข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS แต่ละฤดูกาลที่มีความสัมพันธ์กับคาร์บอนไดออกไซด์ในพื้นที่ที่ระดับนัยสำคัญมากกว่าหรือเท่ากับ 0.05

6.1 สมการถดถอยพหุเชิงเส้น (Multiple Linear Regression Analysis) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3-17

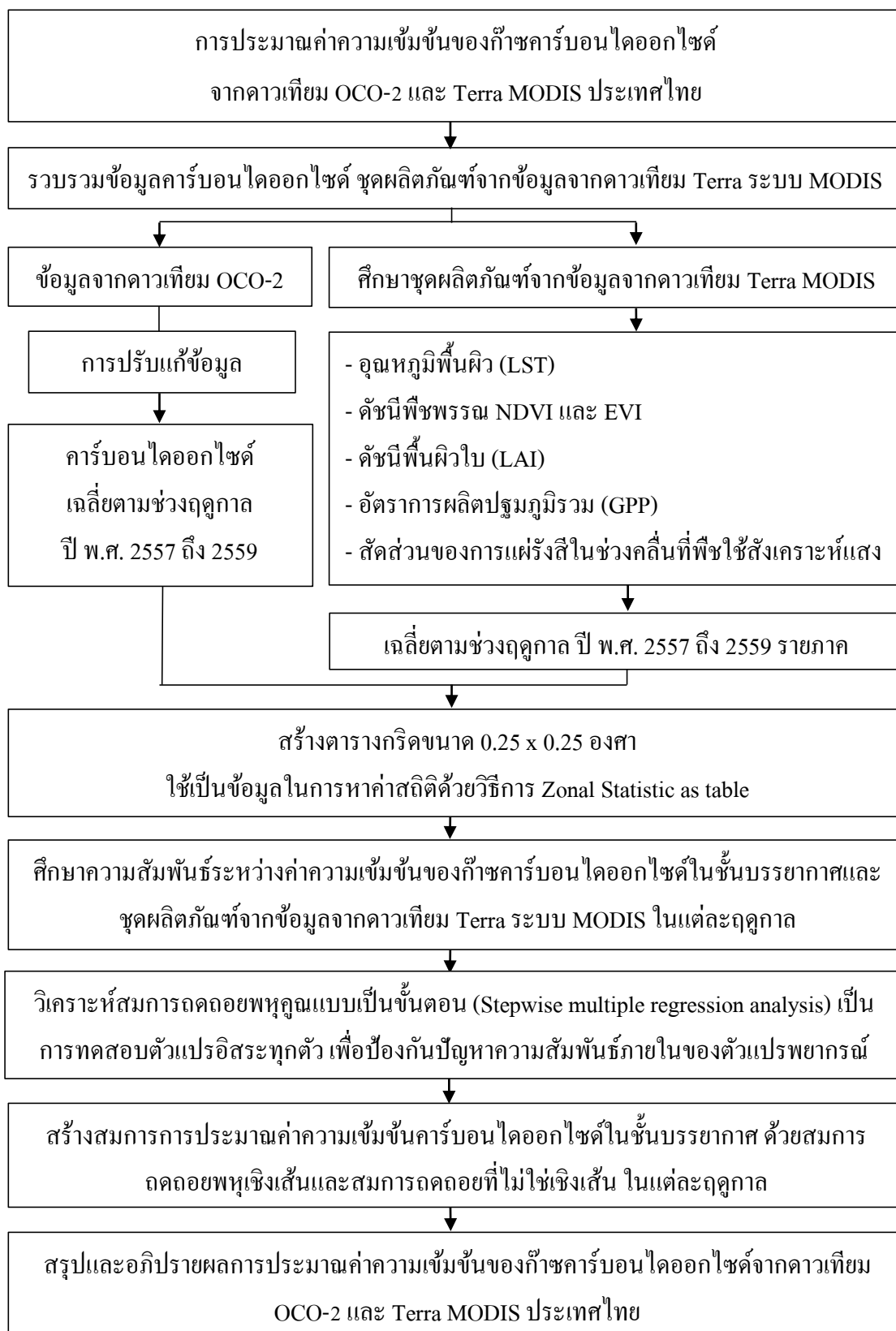
$$Y = \beta_0 + \beta_1(X_1) + \beta_2(X_2) + \beta_3(X_3) + \dots + \beta_n(X_n) \quad (3-17)$$

เมื่อ	Y	คือ ค่าเฉลี่ยคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศในแต่ละ ฤดูกาล
	X	คือ ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิพื้นผิว ดัชนีพืชพรรณ NDVI และ EVI ดัชนีพื้นผิวใบ อัตราการผลิตปฐมภูมิรวม และสัดส่วนของ การแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง
	$\beta_0 \dots \beta_n$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ถดถอย

6.2 สมการถดถอยแบบพหุนาม (Polynomial Regression) มากกว่า 1 ตัวแปรสามารถ  
คำนวณได้ดังสมการที่ 3-18

$$Y = \beta_0 + \beta_1(X_1) + \beta_2(X_2) + \beta_{11}(X_1^2) + \beta_{22}(X_2^2) + \beta_{12}X_1X_2 \dots + \beta_n(X_n) \quad (3-18)$$

เมื่อ	Y	คือ ค่าเฉลี่ยคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศในแต่ละ ฤดูกาล
	X	คือ ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิพื้นผิว ดัชนีพืชพรรณ NDVI และ EVI ดัชนีพื้นผิวใบ อัตราการผลิตปฐมภูมิรวม และสัดส่วนของ การแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง
	$\beta_0 \dots \beta_n$	คือ ค่าสัมประสิทธิ์ถดถอย



ภาพที่ 3-1 ขั้นตอนการวิจัย



## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

การประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดาวเทียม OCO-2 และ Terra MODIS ประเทศไทย เป็นการศึกษาความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ กับชุดผลิตภัณฑ์จากข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิพื้นผิว (LST) ดัชนีพืชพรรณ NDVI และ EVI ดัชนีพื้นผิวใบ (LAI) อัตราการผลิตปฐมภูมิรวม (GPP) และสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง (FPAR) โดยแบ่งผลการศึกษาออกเป็น 3 ประเด็น คือ

1. ศึกษาค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศและชุดผลิตภัณฑ์จากข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS
2. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศและชุดผลิตภัณฑ์จากข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS
3. สร้างสมการการประมาณค่าความเข้มข้นคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ ของประเทศไทย มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### การศึกษาค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศและชุดผลิตภัณฑ์จากข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS

1. การศึกษาค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ จากข้อมูลจากดาวเทียม OCO-2 ปรากฏแบ่งตามฤดูกาล ดังตารางที่ 4-1 อธิบายถึงค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยมีหน่วยความเข้มข้นเป็น ppm (Part per Million) คือ หน่วยส่วนในล้านส่วน โดยค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศมีความเข้มข้นมาก จะแสดงแทนด้วยสีแดง และหากมีความเข้มข้นน้อยแทนด้วยสีเขียวเข้ม ดังภาพที่ 4-2 และ 4-3 ผลการศึกษาพบว่า

ฤดูหนาว ปี พ.ศ. 2558 ภาคตะวันตกของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศมากที่สุดเท่ากับ 401.67 ppm รองลงมา คือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคใต้ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 401.11 400.89 และ 400.72 ppm ตามลำดับ ซึ่งภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุด เท่ากับ 399.46 ppm และในปี พ.ศ. 2559 พบว่า ภาคกลางของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศมากที่สุดเท่ากับ 403.07 ppm รองลงมา คือ ภาคเหนือ ภาคตะวันตกและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 402.89

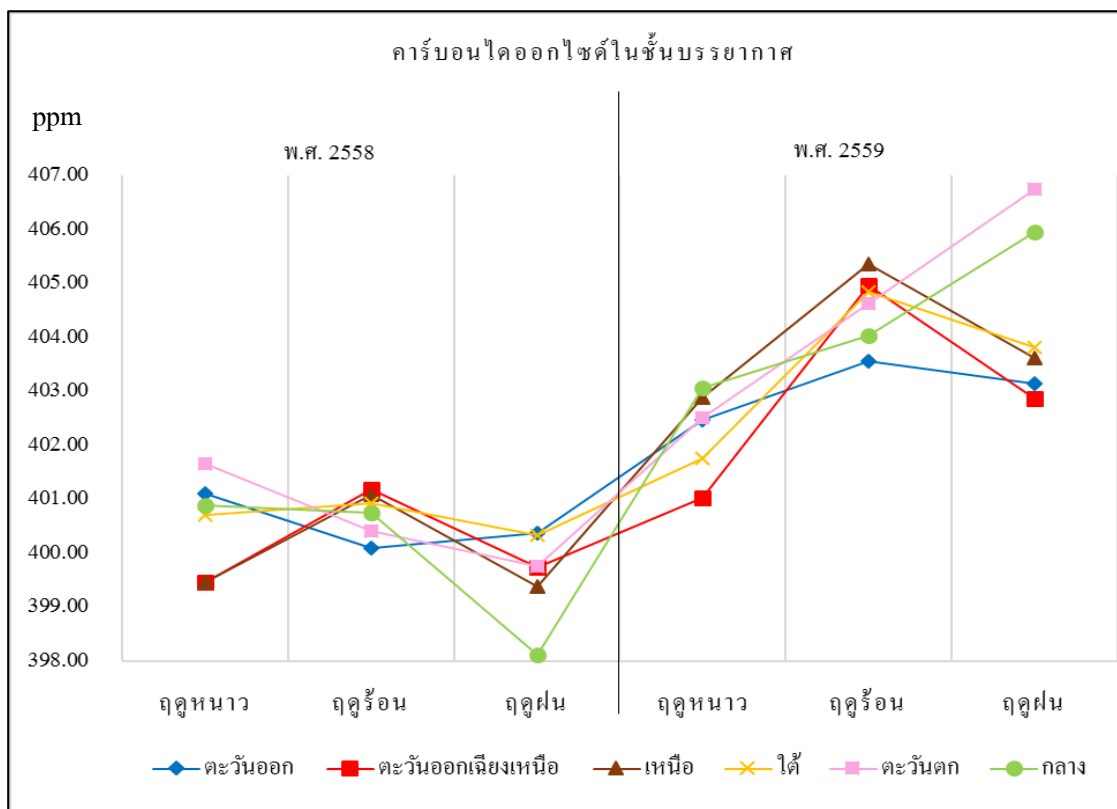
402.51 และ 402.48 ppm ตามลำดับ ซึ่งภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคใต้เป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุด เท่ากับ 401.03 และ 401.76 ppm ตามลำดับ

ฤดูร้อน ปี พ.ศ. 2558 ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศมากที่สุด เท่ากับ 401.19 ppm รองลงมาคือ ภาคเหนือ ภาคใต้ และภาคกลาง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 401.09 400.94 และ 400.76 ppm ตามลำดับ ซึ่งภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคตะวันตกเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุด เท่ากับ 400.10 และ 400.42 ppm ตามลำดับ และในปี พ.ศ. 2559 พบว่า ภาคเหนือของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศมากที่สุด เท่ากับ 405.36 ppm รองลงมา คือ ตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคใต้และภาคตะวันตก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 404.97 404.84 และ 404.63 ppm ตามลำดับ ซึ่งภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลางเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุด เท่ากับ 403.57 และ 404.04 ppm ตามลำดับ

ฤดูฝน ปี พ.ศ. 2558 ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศมากที่สุด เท่ากับ 400.38 ppm รองลงมา คือ ภาคใต้ ภาคตะวันตกและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 400.34 399.76 และ 399.75 ppm ตามลำดับ ซึ่งภาคกลางและภาคเหนือเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศต่ำที่สุด เท่ากับ 398.12 และ 399.40 ppm ตามลำดับ และในปี พ.ศ. 2559 พบว่า ภาคตะวันตกของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศสูงที่สุด เท่ากับ 406.74 ppm รองลงมา คือ ภาคกลาง ภาคใต้ และภาคเหนือ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 405.95 403.82 และ 403.62 ppm ตามลำดับ ซึ่งภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคตะวันออกเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำที่สุดเท่ากับ 402.87 และ 403.15 ppm ตามลำดับ

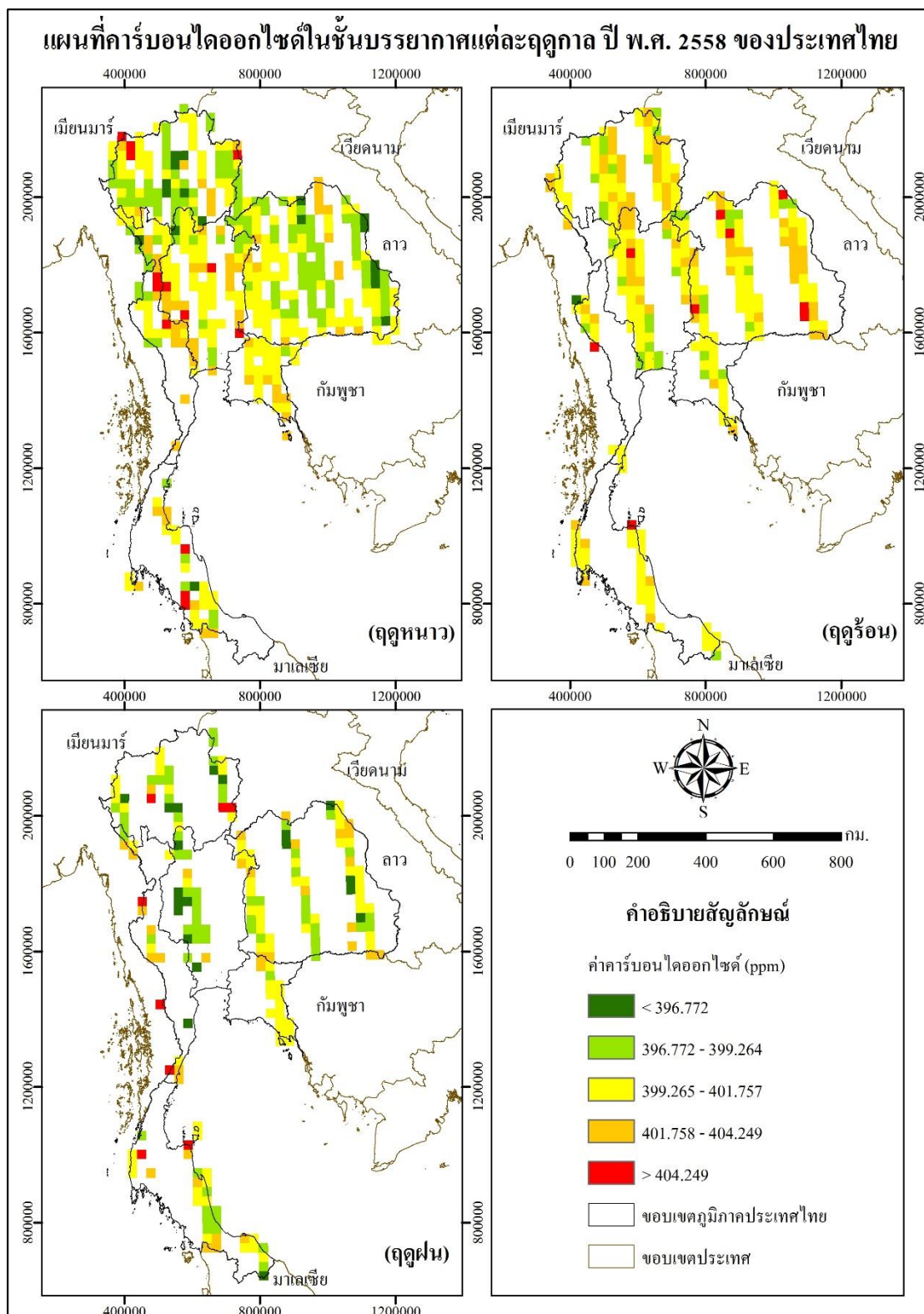
ตารางที่ 4-1 ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ ปี พ.ศ. 2558 และ 2559 รายภาคแบ่งตามฤดูกาล ของประเทศไทย

ปี พ.ศ.	ภาค	ฤดูหนาว			ฤดูร้อน			ฤดูฝน		
		ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด
2558	ตะวันออก	399.25	401.11	403.30	396.99	400.10	403.13	398.76	400.38	403.42
	ตะวันออกเฉียงเหนือ	387.98	399.46	403.33	397.41	401.19	406.89	394.21	399.75	403.92
	เหนือ	390.68	399.46	405.13	397.69	401.09	404.15	394.98	399.40	408.35
	ใต้	396.65	400.72	406.81	399.29	400.94	402.36	393.89	400.34	405.67
	ตะวันตก	399.04	401.67	407.31	398.56	400.42	402.28	394.96	399.76	402.77
	กลาง	396.31	400.89	405.62	397.62	400.76	404.56	389.89	398.12	404.10
2559	ตะวันออก	397.87	402.48	407.28	401.35	403.57	406.60	402.78	403.15	403.56
	ตะวันออกเฉียงเหนือ	392.92	401.03	406.34	402.60	404.97	411.58	396.40	402.87	410.38
	เหนือ	399.21	402.89	407.07	401.16	405.36	417.84	397.25	403.62	410.18
	ใต้	377.21	401.76	406.96	402.32	404.84	407.15	401.74	403.82	406.89
	ตะวันตก	397.86	402.51	405.24	402.49	404.63	407.96	405.21	406.74	408.50
	กลาง	397.73	403.07	408.40	401.84	404.04	407.56	397.49	405.95	410.35

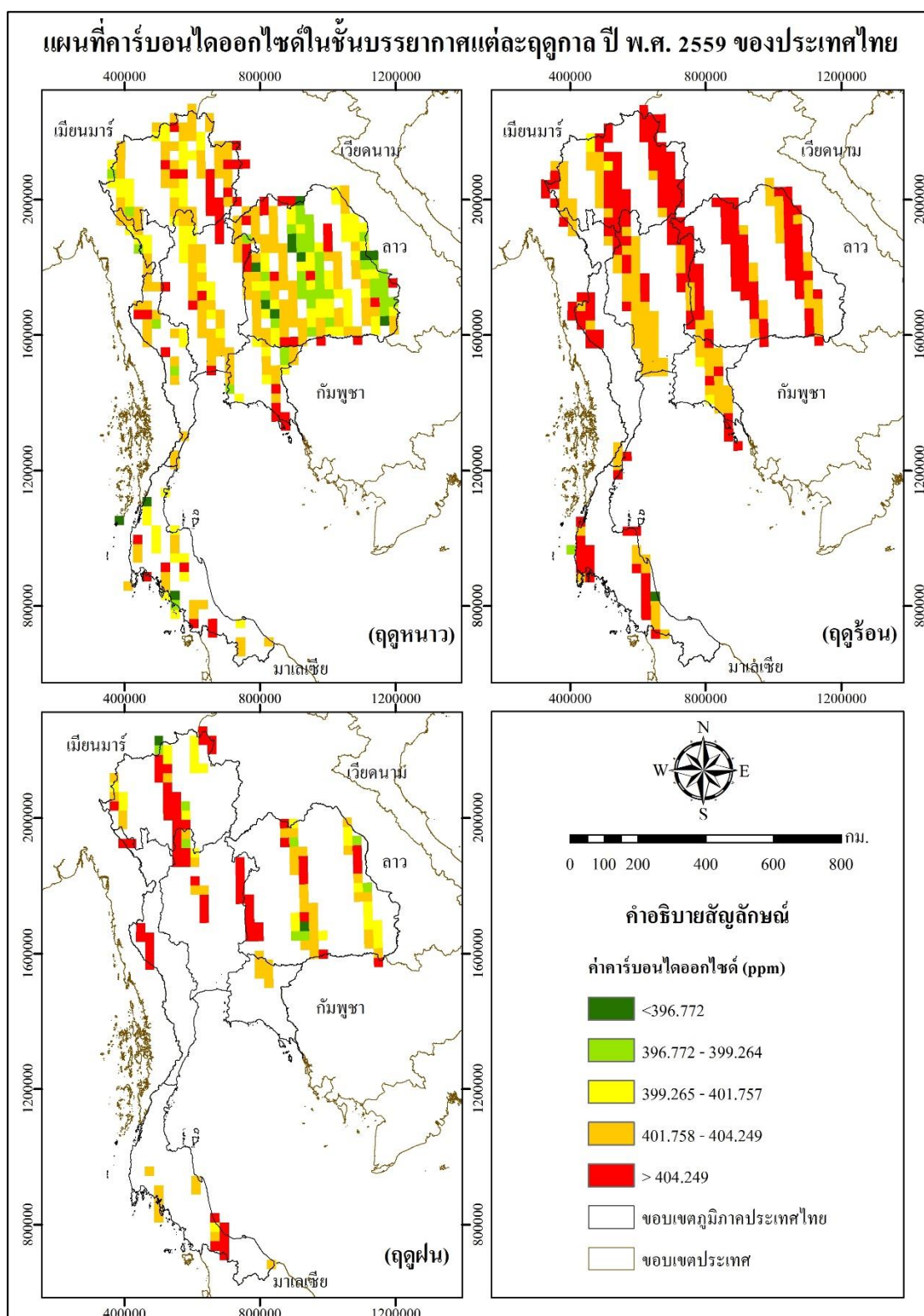


ภาพที่ 4-1 กราฟค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศปี พ.ศ. 2558 และ 2559 รายภาคแบ่งตามฤดูกาล ของประเทศไทย

จากภาพที่ 4-1 พบว่า รูปแบบของค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศของภาคเหนือ ภาคตะวันออก ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคใต้มีค่าเฉลี่ยสูงสุดในฤดูร้อนและลดความเข้มข้นลงในช่วงฤดูฝนและฤดูหนาว ส่วนภาคกลาง ภาคตะวันตก และภาคตะวันออกมีรูปแบบของค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ชัดเจนและมีค่าเฉลี่ยสูงสุดแตกต่างกันในแต่ละฤดูกาล นอกจากนี้ ใน พ.ศ. 2558 ค่าความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศของแต่ละฤดูกาล จากภาพที่ 4-2 จะอยู่ในช่วงสี่เหลี่ยมและสี่เหลี่ยมผืนผ้า ซึ่งมีค่าระหว่างประมาณ 396 – 401 ppm เมื่อเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ใน พ.ศ. 2559 จากภาพที่ 4-3 แล้วนั้น เห็นได้ว่า ในทุกฤดูกาลค่าจะอยู่ในช่วงสี่เหลี่ยมและสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งมีค่ามากกว่า 401 ppm เป็นส่วนมาก



ภาพที่ 4-2 แผนที่คาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศแต่ละฤดูกาล ปี พ.ศ. 2558 ของประเทศไทย



ภาพที่ 4-3 แผนที่คาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศแต่ละฤดูกาล ปี พ.ศ. 2559 ของประเทศไทย

2. การศึกษาอุณหภูมิพื้นผิว จากชุดผลิตภัณฑ์ MOD11A2 จากข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS รายภาคแบ่งตามฤดูกาล ดังตารางที่ 4-2 อธิบายถึง อุณหภูมิพื้นผิวของสิ่งปกคลุมดิน ที่ได้จากการแผ่รังสีในช่วงคลื่นอินฟราเรดความร้อน มีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส โดยอุณหภูมิพื้นผิวสูงจะแทนด้วยสีแดง และอุณหภูมิพื้นผิวต่ำแทนด้วยสีเขียวเข้ม ดังภาพที่ 4-5 และ 4-6 ซึ่งผลการศึกษาพบว่า

ฤดูหนาว ปี พ.ศ. 2558 ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 28.80 องศาเซลเซียส รองลงมา คือ ภาคกลาง ภาคตะวันออก และภาคใต้ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 28.61 28.20 และ 25.99 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งภาคเหนือและภาคตะวันตก เป็นภูมิภาคที่มีอุณหภูมิพื้นผิวต่ำที่สุด เท่ากับ 24.53 และ 25.96 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และในปี พ.ศ. 2559 พบว่า ภาคกลางของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 29.37 องศาเซลเซียส รองลงมา คือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันออก และภาคตะวันตก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 29.35 28.87 และ 27.24 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งภาคเหนือและภาคใต้เป็นภูมิภาคที่มีอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยต่ำที่สุด เท่ากับ 25.33 และ 26.10 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

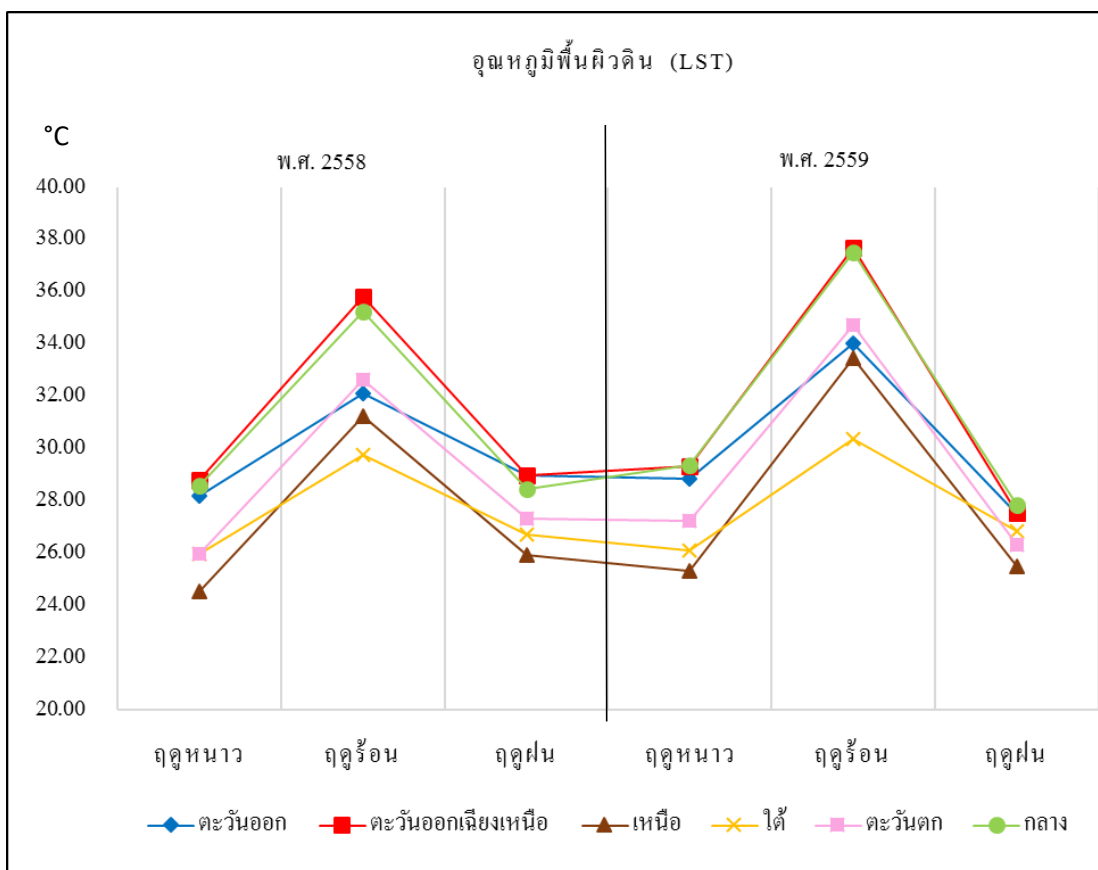
ฤดูร้อน ปี พ.ศ. 2558 ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 35.83 องศาเซลเซียส รองลงมา คือ ภาคกลาง ภาคตะวันตก และภาคตะวันออก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 35.33 32.63 และ 32.09 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งภาคใต้และภาคเหนือเป็นภูมิภาคที่มีอุณหภูมิพื้นผิวต่ำที่สุด เท่ากับ 29.77 และ 31.25 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และในปี พ.ศ. 2559 พบว่า ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 37.68 องศาเซลเซียส รองลงมา คือ ภาคกลาง ภาคตะวันตก และภาคตะวันออก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 37.50 34.74 และ 34.04 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งภาคใต้และภาคเหนือเป็นภูมิภาคที่มีอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยต่ำที่สุด เท่ากับ 30.39 และ 33.46 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ฤดูฝน ปี พ.ศ. 2558 ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 29.00 องศาเซลเซียส รองลงมา คือ ภาคตะวันออก ภาคกลาง และภาคตะวันตก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 28.99 28.44 และ 27.32 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งภาคเหนือและภาคใต้เป็นภูมิภาคที่มีอุณหภูมิพื้นผิวต่ำที่สุด เท่ากับ 25.93 และ 26.71 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และในปี พ.ศ. 2559 พบว่า ภาคกลางของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 27.84 องศาเซลเซียส รองลงมา คือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันออก และภาคใต้ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 27.56 27.50 และ 26.85 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งภาคเหนือและภาคตะวันตกเป็นภูมิภาคที่มีอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยต่ำที่สุด เท่ากับ 25.50 และ 26.32 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

ตารางที่ 4-2 อุณหภูมิพื้นผิว ปี พ.ศ. 2558 และ 2559 รายภาคแบ่งตามฤดูกาล ของประเทศไทย

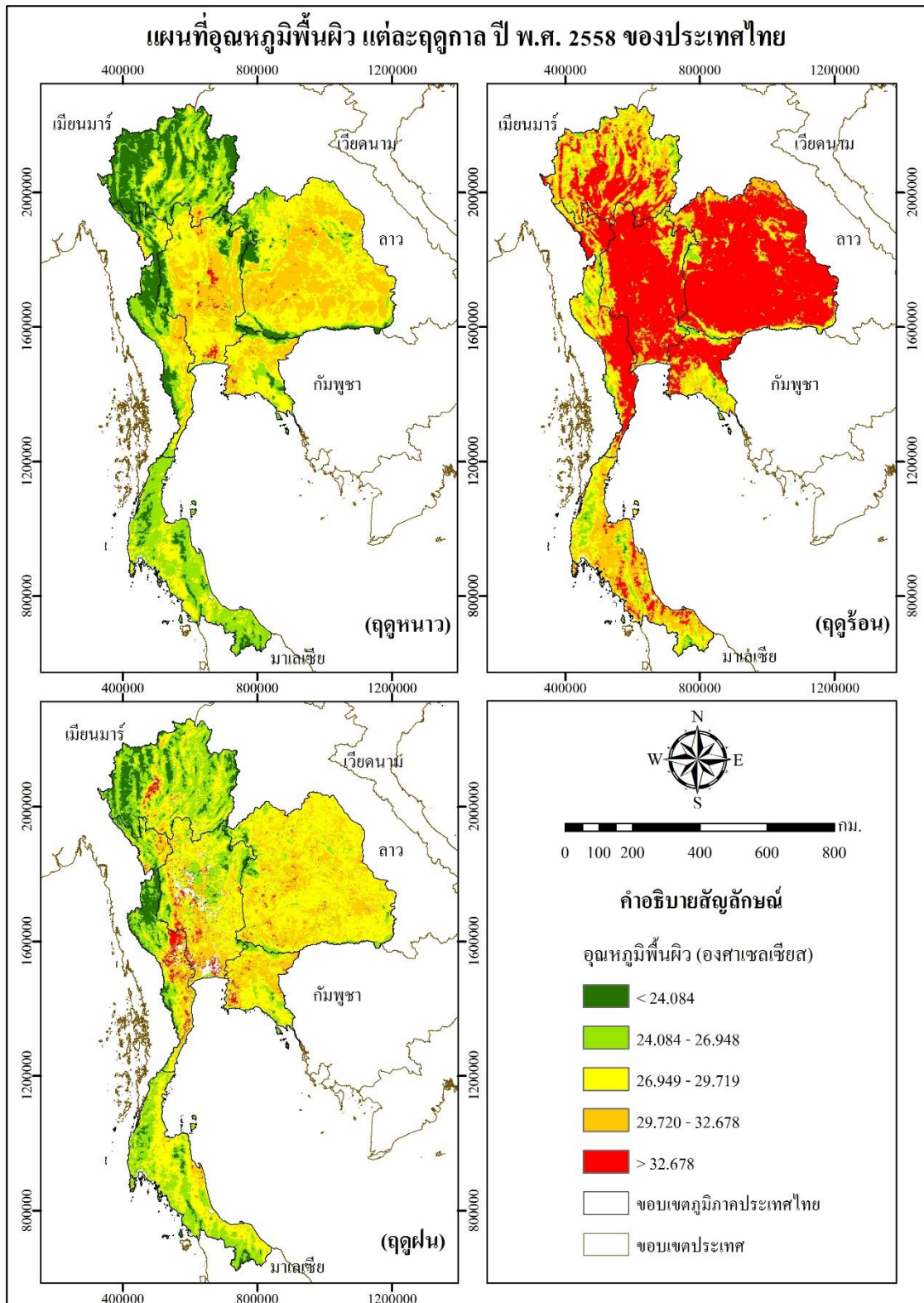
ปี พ.ศ.	ภาค	ฤดูหนาว			ฤดูร้อน			ฤดูฝน		
		ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด
2558	ตะวันออก	19.58	28.20	34.67	22.18	32.09	44.87	-7.27	28.99	39.71
	ตะวันออกเฉียงเหนือ	19.06	28.80	33.77	22.68	35.83	48.55	14.81	29.00	39.85
	เหนือ	14.89	24.53	34.01	19.10	31.25	42.37	13.15	25.93	44.09
	ใต้	17.61	25.99	33.67	20.25	29.77	39.88	9.93	26.71	36.78
	ตะวันตก	17.64	25.96	34.07	21.45	32.63	44.00	16.63	27.32	41.91
	กลาง	18.24	28.61	35.33	22.42	35.25	45.99	11.47	28.44	40.99
2559	ตะวันออก	20.21	28.87	35.28	23.52	34.04	45.78	7.25	27.50	36.07
	ตะวันออกเฉียงเหนือ	18.62	29.35	35.46	24.69	37.68	50.32	9.97	27.56	36.31
	เหนือ	14.81	25.33	34.47	20.17	33.46	45.45	13.41	25.50	34.55
	ใต้	19.36	26.10	34.08	21.60	30.39	39.40	15.67	26.85	37.08
	ตะวันตก	18.31	27.24	36.70	23.60	34.74	46.12	15.16	26.32	37.85
	กลาง	19.11	29.37	36.13	24.92	37.50	48.75	15.73	27.84	37.89



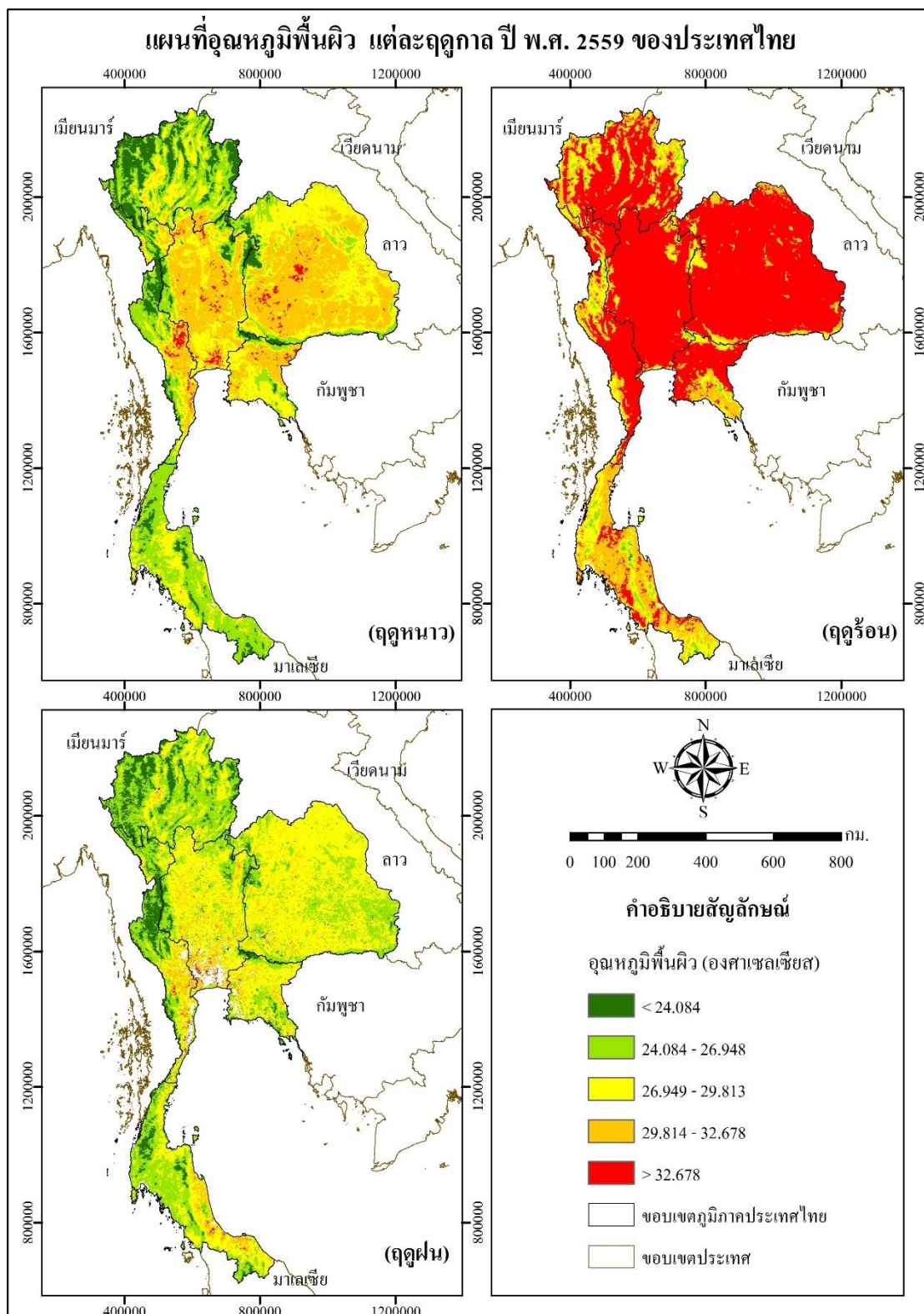


ภาพที่ 4-4 กราฟอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ย ปี พ.ศ. 2558 และ 2559 รายภาคแบ่งตามฤดูกาล ของประเทศไทย

จากภาพที่ 4-4 พบว่า รูปแบบของอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยของภาคตะวันออก ภาคเหนือ ภาคใต้ ภาคตะวันตก มีอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยสูงสุดในฤดูร้อน ลดลงในฤดูฝนและฤดูหนาว ตามลำดับ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลางมีค่าเฉลี่ยสูงสุดในฤดูร้อน ลดลงในฤดูฝนและกลับมาเพิ่มขึ้นในฤดูหนาว นอกจากนี้ ยังเห็นได้ชัดว่าบริเวณภาคเหนือ ภาคตะวันตก และภาคใต้ อุณหภูมิจะต่ำกว่าบริเวณภาคกลาง ภาคตะวันออก และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ทั้ง พ.ศ. 2558 และ พ.ศ. 2559 ซึ่งพื้นที่อุณหภูมิต่ำจะแสดงเป็นสีเขียวซึ่งส่วนมากจะเป็นลักษณะพื้นที่ป่าและภูเขา และพื้นที่อุณหภูมิสูงที่สุดจะแสดงเป็นสีแดง ซึ่งเป็นพื้นที่ราบ ดังภาพที่ 4-5 และ 4-6



ภาพที่ 4-5 แผนที่อุณหภูมิพื้นผิว แต่ละฤดูกาล ปี พ.ศ. 2558 ของประเทศไทย



ภาพที่ 4-6 แผนที่อุณหภูมิพื้นผิว แต่ละฤดูกาล ปี พ.ศ. 2559 ของประเทศไทย

3. การศึกษาดัชนีพืชพรรณ NDVI จากชุดผลิตภัณฑ์ MOD13Q1 จากข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS รายภาคแบ่งตามฤดูกาล ดังตารางที่ 4-3 อธิบายถึง ค่าความแตกต่างของการสะท้อนของพื้นผิว ระหว่างช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้กับช่วงคลื่นตามองเห็นสีแดง ค่าของ NDVI จะอยู่ในช่วง -1 ถึง +1 โดยค่า NDVI เข้าใกล้ +1 แสดงถึงความสมบูรณ์ของพืชพรรณมาก แทนด้วยสีเขียวเข้ม และค่าเข้าใกล้ -1 จะแทนด้วยสีแดง ดังภาพที่ 4-8 และ 4-9 ซึ่งผลการศึกษาพบว่า

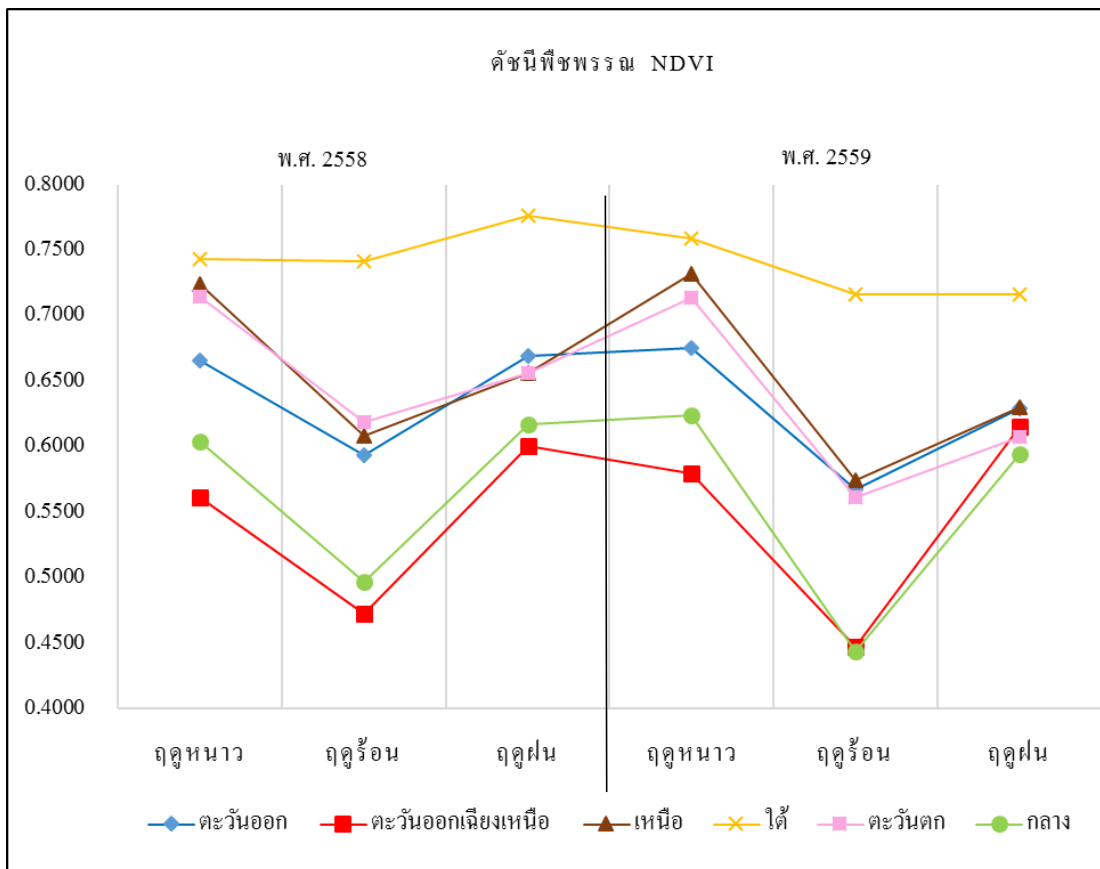
ฤดูหนาว ปี พ.ศ. 2558 ภาคใต้ของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยดัชนีพืชพรรณ NDVI มากที่สุดเท่ากับ 0.7429 รองลงมา คือ ภาคเหนือ ภาคตะวันตก และภาคตะวันออก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.7245 0.7146 และ 0.6655 ตามลำดับ ซึ่งภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลางเป็นภูมิภาคที่มีค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI ต่ำที่สุด เท่ากับ 0.5615 และ 0.6043 ตามลำดับ และในปี พ.ศ. 2559 พบว่า ภาคใต้ของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยดัชนีพืชพรรณ NDVI มากที่สุดเท่ากับ 0.7585 รองลงมา คือ ภาคเหนือ ภาคตะวันตก และภาคตะวันออก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.7316 0.7139 และ 0.6751 ตามลำดับ ซึ่งภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลางเป็นภูมิภาคที่มีค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI ต่ำที่สุด เท่ากับ 0.5792 และ 0.6242 ตามลำดับ

ฤดูร้อน ปี พ.ศ. 2558 ภาคใต้ของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยดัชนีพืชพรรณ NDVI มากที่สุดเท่ากับ 0.7411 รองลงมา คือ ภาคตะวันตก ภาคเหนือ และภาคตะวันออก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.6191 0.6082 และ 0.5938 ตามลำดับ ซึ่งภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลางเป็นภูมิภาคที่มีค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI ต่ำที่สุด เท่ากับ 0.4729 และ 0.4968 ตามลำดับ และในปี พ.ศ. 2559 พบว่า ภาคใต้ของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยดัชนีพืชพรรณ NDVI มากที่สุดเท่ากับ 0.7167 รองลงมา คือ ภาคเหนือ ภาคตะวันออก และภาคตะวันตก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.5741 0.5675 และ 0.5612 ตามลำดับ ซึ่งภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นภูมิภาคที่มีค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI ต่ำที่สุด เท่ากับ 0.44386 และ 0.4469 ตามลำดับ

ฤดูฝน ปี พ.ศ. 2558 ภาคใต้ของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยดัชนีพืชพรรณ NDVI มากที่สุดเท่ากับ 0.7760 รองลงมา คือ ภาคตะวันออก ภาคตะวันตก และภาคเหนือ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.6689 0.6563 และ 0.6559 ตามลำดับ ซึ่งภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลาง เป็นภูมิภาคที่มีค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI ต่ำที่สุด เท่ากับ 0.6006 และ 0.6170 ตามลำดับ และในปี พ.ศ. 2559 พบว่า ภาคใต้ของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยดัชนีพืชพรรณ NDVI มากที่สุดเท่ากับ 0.7164 รองลงมา คือ ภาคเหนือ ภาคตะวันออก และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.6297 0.6293 และ 0.6157 ตามลำดับ ซึ่งภาคกลางและภาคตะวันตก เป็นภูมิภาคที่มีค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI ต่ำที่สุด เท่ากับ 0.5944 และ 0.6073 ตามลำดับ

ตารางที่ 4-3 ค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI ปี พ.ศ. 2558 และ 2559 รายภาคแบ่งตามฤดูกาล ของประเทศไทย

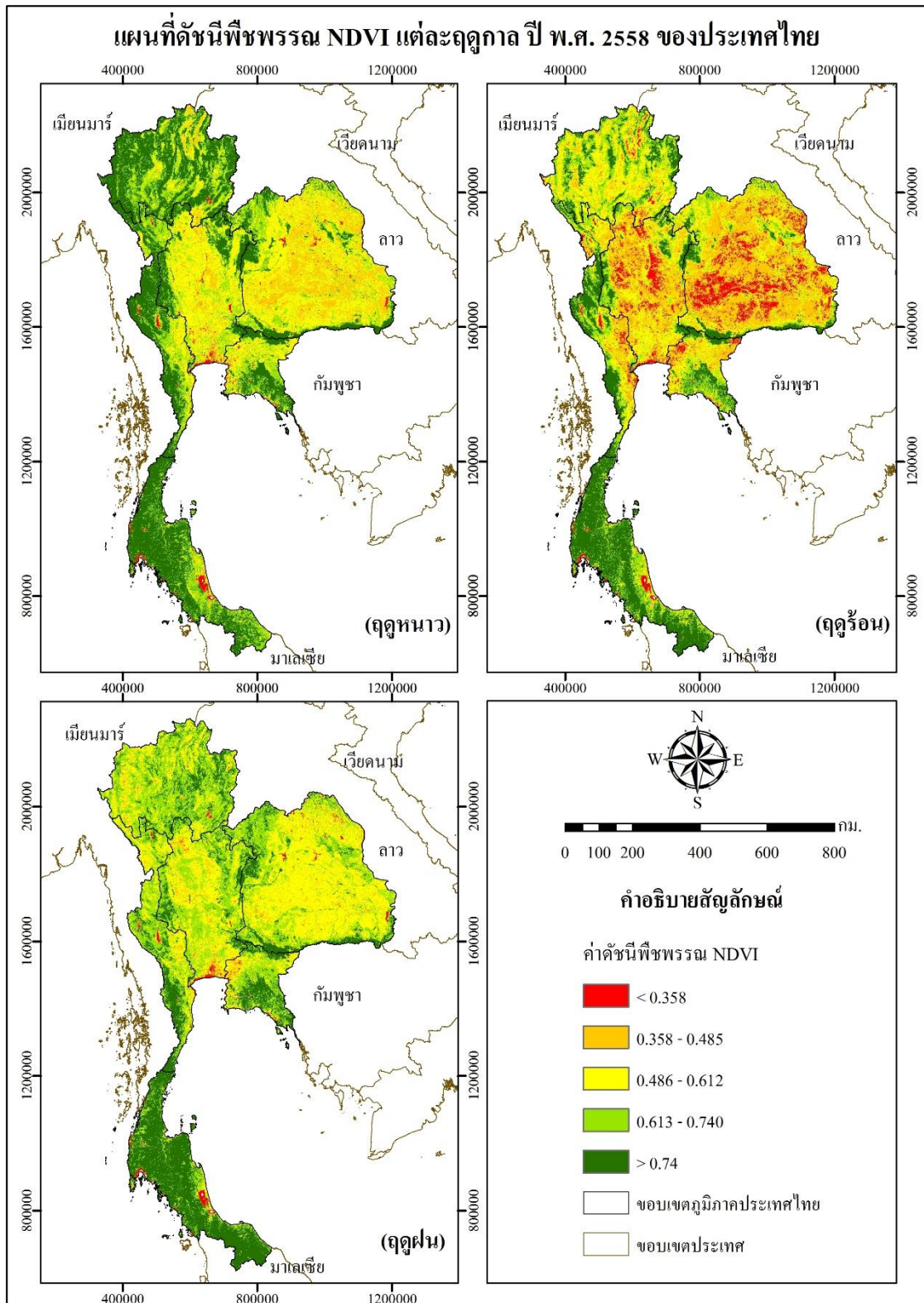
ปี พ.ศ.	ภาค	ฤดูหนาว			ฤดูร้อน			ฤดูฝน		
		ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด
2558	ตะวันออก	-0.1799	0.6655	0.9591	-0.2000	0.5938	0.9988	-0.1913	0.6689	0.9902
	ตะวันออกเฉียงเหนือ	-0.1656	0.5615	0.9014	-0.1734	0.4729	0.9001	-0.0901	0.6006	0.8963
	เหนือ	-0.1613	0.7245	0.8995	-0.1509	0.6082	0.9045	-0.0824	0.6559	0.9074
	ใต้	-0.1992	0.7429	0.9991	-0.2000	0.7411	0.9874	-0.1991	0.7760	0.9973
	ตะวันตก	-0.1336	0.7146	0.9573	-0.1522	0.6191	0.9044	-0.0627	0.6563	0.9157
	กลาง	-0.1995	0.6043	0.8956	-0.1956	0.4968	0.8917	-0.1871	0.6170	0.8848
2559	ตะวันออก	-0.1915	0.6751	0.9945	-0.1957	0.5675	0.9966	-0.1974	0.6293	0.9931
	ตะวันออกเฉียงเหนือ	-0.1765	0.5792	0.9169	-0.1754	0.4469	0.8799	-0.0791	0.6157	0.8971
	เหนือ	-0.1411	0.7316	0.9190	-0.1478	0.5741	0.9004	-0.0319	0.6297	0.8774
	ใต้	-0.2000	0.7585	0.9890	-0.2000	0.7167	0.9957	-0.2000	0.7164	0.9985
	ตะวันตก	-0.1397	0.7139	0.9266	-0.1717	0.5612	0.8998	-0.0217	0.6073	0.8530
	กลาง	-0.2000	0.6242	0.9221	-0.1993	0.4439	0.8812	-0.1993	0.5944	0.8940



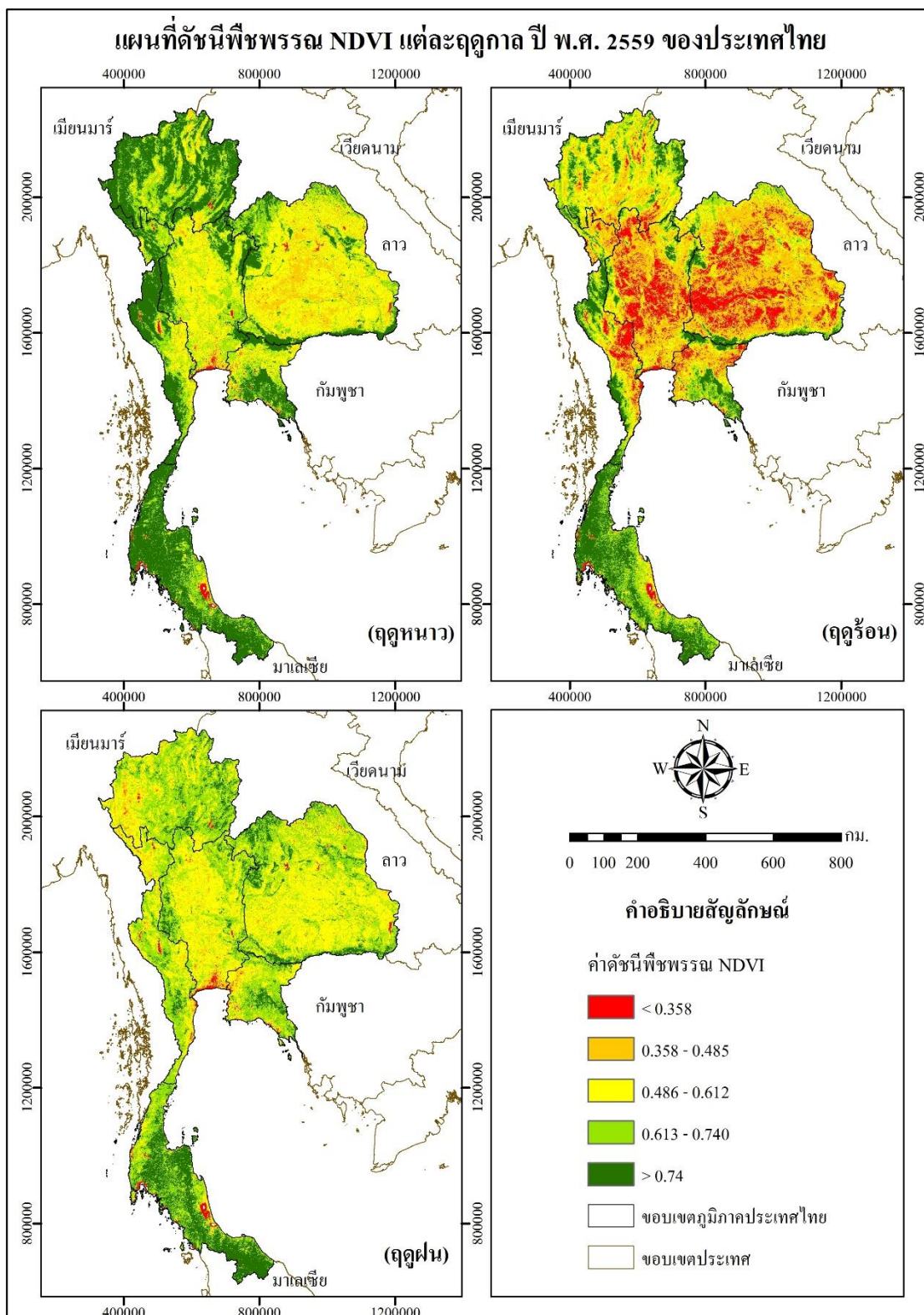
ภาพที่ 4-7 กราฟค่าเฉลี่ยดัชนีพืชพรรณ NDVI ปี พ.ศ. 2558 และ 2559 รายภาคแบ่งตามฤดูกาล ของประเทศไทย

จากภาพที่ 4-7 พบว่า รูปแบบของค่าเฉลี่ยดัชนีพืชพรรณ NDVI ของภาคตะวันออก ภาคเหนือ ภาคตะวันตก และภาคกลาง ค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI มีค่าเฉลี่ยสูงสุดในฤดูหนาว ลดลงในฤดูร้อนและเพิ่มขึ้นอีกครั้งในฤดูฝน ภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีค่าเฉลี่ยสูงสุดในฤดูฝนลดลงในฤดูหนาวและฤดูร้อนตามลำดับ ส่วนภาคใต้มีรูปแบบของค่าเฉลี่ย NDVI สูงกว่าทุก ๆ ภาค และทุกฤดูกาลทั้ง 2 ปี พื้นที่ภาคใต้ส่วนใหญ่รวมไปถึงตอนล่างของภาคตะวันออกที่แสดงแทนด้วยสีเขียวซึ่งมีค่า NDVI > 0.74 ดังภาพที่ 4-8 และ 4-9 ซึ่งแตกต่างจากภาคอื่น ๆ ที่มีการเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกันของค่า NDVI ทั้งนี้ เนื่องด้วยลักษณะของพืชพรรณในเขตร้อนชื้นและลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ภาคใต้และพื้นที่ตอนล่างของภาคตะวันออกซึ่งเป็นพื้นที่รับมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ จึงทำให้พืชมีความอุดมสมบูรณ์ในทุกฤดูกาล





ภาพที่ 4-8 แผนที่ดัชนีพืชพรรณ NDVI แต่ละฤดูกาล ปี พ.ศ. 2558 ของประเทศไทย



ภาพที่ 4-9 แผนที่ดัชนีพืชพรรณ NDVI แต่ละฤดูกาล ปี พ.ศ. 2559 ของประเทศไทย



4. การศึกษาดัชนีพืชพรรณ EVI จากชุดผลิตภัณฑ์ MOD13Q1 จากข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS รายภาคแบ่งตามฤดูกาล ดังตารางที่ 4-4 อธิบายถึงการใช้ช่วงคลื่นอินฟราเรด ใกล้กับช่วงคลื่นตามองเห็นสีแดงและสีน้ำเงิน เพื่อเน้นพืชพรรณ โดยค่าของ EVI จะอยู่ในช่วง -1 ถึง +1 โดยค่า EVI เข้าใกล้ +1 แสดงถึงพืชพรรณที่สมบูรณ์มาก แทนด้วยสีเขียวเข้ม และค่าเข้าใกล้ -1 จะมีพืชพรรณน้อยถึงไม่มีพืชพรรณ แทนด้วยสีแดง ดังภาพที่ 4-11 และ 4-12 ซึ่งผลการศึกษาพบว่า

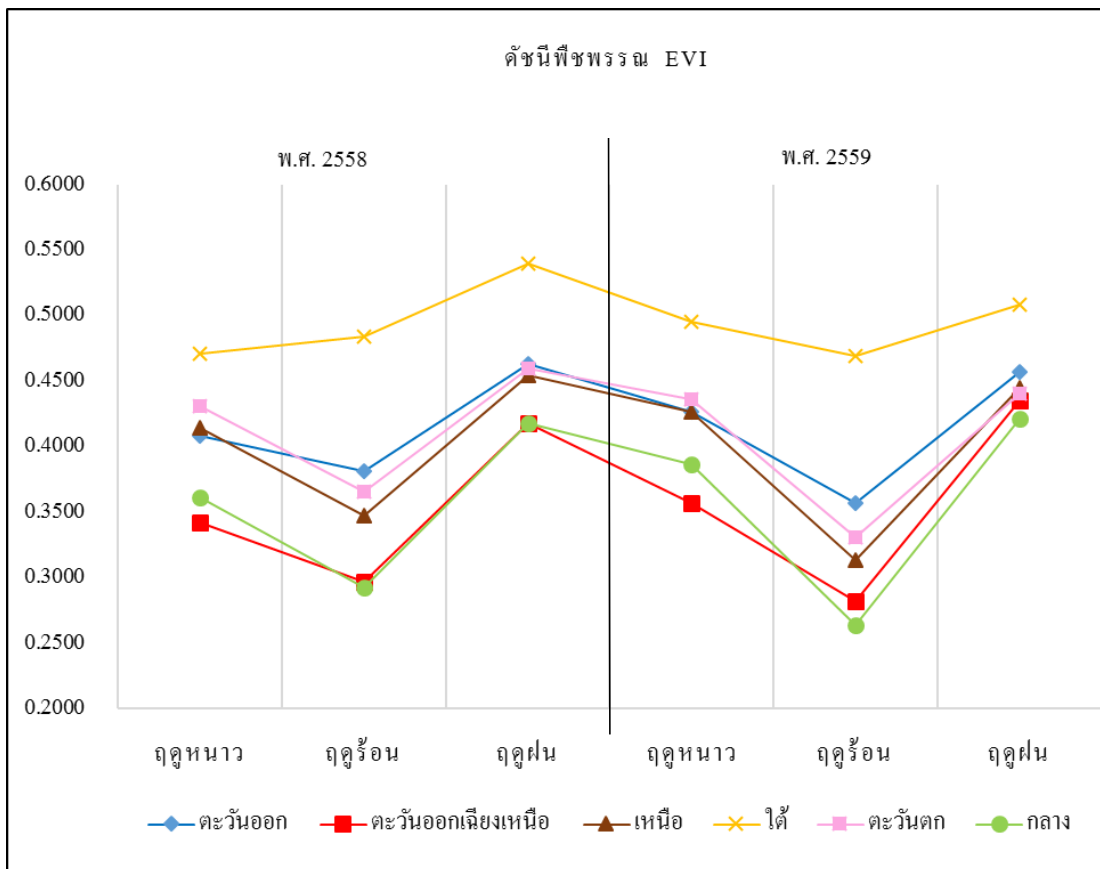
ฤดูหนาว ปี พ.ศ. 2558 ภาคใต้ของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยดัชนีพืชพรรณ EVI มากที่สุดเท่ากับ 0.4711 รองลงมา คือ ภาคตะวันตก ภาคเหนือ และภาคตะวันออก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.4310 0.4141 และ 0.4080 ตามลำดับ ซึ่งภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลางเป็นภูมิภาคที่มีค่าดัชนีพืชพรรณ EVI ต่ำที่สุด เท่ากับ 0.3418 และ 0.3617 ตามลำดับ และในปี พ.ศ. 2559 พบว่า ภาคใต้ของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยดัชนีพืชพรรณ EVI มากที่สุดเท่ากับ 0.4956 รองลงมา คือ ภาคตะวันตก ภาคตะวันออก และภาคเหนือ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.4364 0.4268 และ 0.4264 ตามลำดับ ซึ่งภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลางเป็นภูมิภาคที่มีค่าดัชนีพืชพรรณ EVI ต่ำที่สุด เท่ากับ 0.3571 และ 0.3861 ตามลำดับ

ฤดูร้อน ปี พ.ศ. 2558 ภาคใต้ของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยดัชนีพืชพรรณ EVI มากที่สุดเท่ากับ 0.4838 รองลงมา คือ ภาคตะวันออก ภาคตะวันตก และภาคเหนือ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.3811 0.3658 และ 0.3472 ตามลำดับ ซึ่งภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นภูมิภาคที่มีค่าดัชนีพืชพรรณ EVI ต่ำที่สุด เท่ากับ 0.2927 และ 0.2966 ตามลำดับ และในปี พ.ศ. 2559 พบว่า ภาคใต้ของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยดัชนีพืชพรรณ EVI มากที่สุดเท่ากับ 0.4696 รองลงมา คือ ภาคตะวันออก ภาคตะวันตก และภาคเหนือ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.3568 0.3310 และ 0.3134 ตามลำดับ ซึ่งภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นภูมิภาคที่มีค่าดัชนีพืชพรรณ EVI ต่ำที่สุด เท่ากับ 0.2637 และ 0.2818 ตามลำดับ

ฤดูฝน ปี พ.ศ. 2558 ภาคใต้ของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยดัชนีพืชพรรณ EVI มากที่สุดเท่ากับ 0.5398 รองลงมา คือ ภาคตะวันออก ภาคตะวันตก และภาคเหนือ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.4631 0.4600 และ 0.4543 ตามลำดับ ซึ่งภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นภูมิภาคที่มีค่าดัชนีพืชพรรณ EVI ต่ำที่สุด เท่ากับ 0.4176 และ 0.4182 ตามลำดับ และในปี พ.ศ. 2559 พบว่า ภาคใต้ของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยดัชนีพืชพรรณ EVI มากที่สุดเท่ากับ 0.5080 รองลงมา คือ ภาคตะวันออก ภาคเหนือ และภาคตะวันตก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.4566 0.4448 และ 0.4402 ตามลำดับ ซึ่งภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นภูมิภาคที่มีค่าดัชนีพืชพรรณ EVI ต่ำที่สุด เท่ากับ 0.4216 และ 0.4350 ตามลำดับ

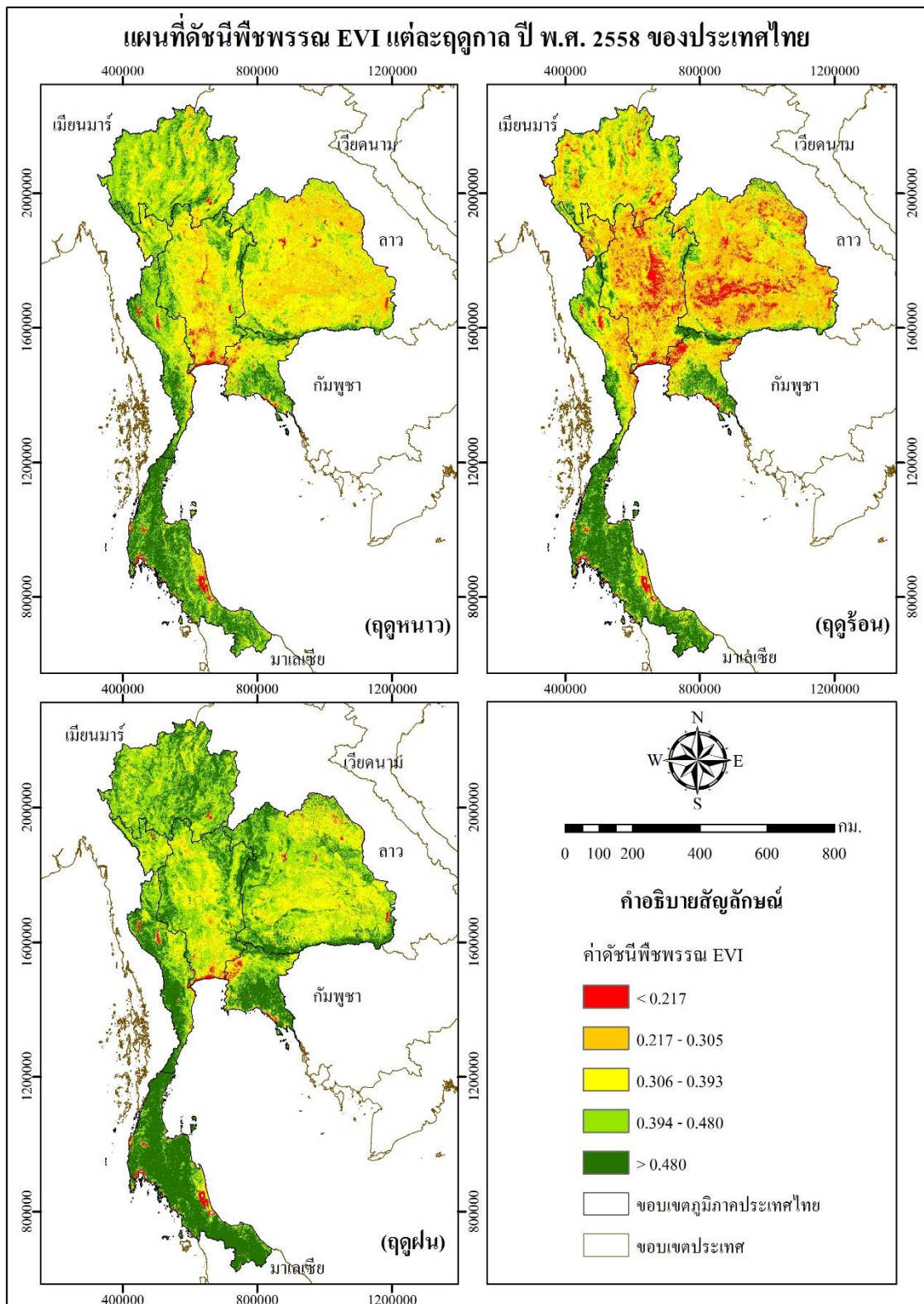
ตารางที่ 4-4 ค่าดัชนีพืชพรรณ EVI ปี พ.ศ. 2558 และ 2559 รายภาคแบ่งตามฤดูกาล ของประเทศไทย

ปี พ.ศ.	ภาค	ฤดูหนาว			ฤดูร้อน			ฤดูฝน		
		ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด
2558	ตะวันออก	-0.0585	0.4080	0.7549	-0.0529	0.3811	0.7730	-0.0823	0.4631	0.9430
	ตะวันออกเฉียงเหนือ	-0.0705	0.3418	0.7102	-0.0437	0.2966	0.6884	-0.0213	0.4182	0.7322
	เหนือ	-0.0529	0.4141	0.7093	-0.0361	0.3472	0.6579	0.0020	0.4543	0.7325
	ใต้	-0.1324	0.4711	0.7811	-0.1318	0.4838	0.7491	-0.1118	0.5398	0.7949
	ตะวันตก	-0.0501	0.4310	0.6899	-0.0383	0.3658	0.6916	-0.0071	0.4600	0.7671
	กลาง	-0.0987	0.3617	0.7135	-0.0681	0.2927	0.6802	-0.0574	0.4176	0.7450
2559	ตะวันออก	-0.0582	0.4268	0.7764	-0.0732	0.3568	0.7071	-0.0804	0.4566	0.7642
	ตะวันออกเฉียงเหนือ	-0.0854	0.3571	0.7284	-0.0846	0.2818	0.6601	-0.0078	0.4350	0.7106
	เหนือ	-0.0299	0.4264	0.7254	-0.0333	0.3134	0.6173	0.0137	0.4448	0.7375
	ใต้	-0.1168	0.4956	0.7968	-0.0998	0.4696	0.8882	-0.0998	0.5080	0.8748
	ตะวันตก	-0.0354	0.4363	0.7485	-0.0381	0.3310	0.7014	0.0081	0.4402	0.6826
	กลาง	-0.0938	0.3861	0.7073	-0.0932	0.2637	0.6468	-0.0576	0.4216	0.6992



ภาพที่ 4-10 กราฟค่าเฉลี่ยดัชนีพืชพรรณ EVI ปี พ.ศ. 2558 และ 2559 รายภาคแบ่งตามฤดูกาล ของประเทศไทย

จากภาพที่ 4-10 พบว่า รูปแบบของค่าเฉลี่ยดัชนีพืชพรรณ EVI ของภาคตะวันออก ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคเหนือ ภาคตะวันตก และภาคกลาง มีค่าเฉลี่ยดัชนีพืชพรรณ EVI สูงสุดในฤดูฝน ลดลงในฤดูหนาวและฤดูร้อนตามลำดับ ส่วนภาคได้มีรูปแบบของค่าเฉลี่ยสูงกว่าทุก ๆ ภาค และทุกฤดูกาลทั้ง 2 ปี พื้นที่ภาคได้ส่วนใหญ่รวมไปถึงตอนล่างของภาคตะวันออกที่แสดงแทนด้วยสีเขียวซึ่งมีค่า EVI > 0.480 ดังภาพที่ 4-11 และ 4-12 ซึ่งแตกต่างจากภาคอื่นที่มีการเพิ่มขึ้นและลดลงของค่า EVI สลับกัน ทั้งนี้ เนื่องด้วยลักษณะของพืชพรรณในเขตร้อนชื้นและลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ภาคได้และตอนล่างของภาคตะวันออกซึ่งเป็นพื้นที่รับมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ จึงทำให้พืชมีความอุดมสมบูรณ์ในทุกฤดูกาล



ภาพที่ 4-11 แผนที่ดัชนีพืชพรรณ EVI แต่ละฤดูกาล ปี พ.ศ. 2558 ของประเทศไทย



5. การศึกษาค้นคว้าพื้นผิวใบจากชุดผลิตภัณฑ์ MOD15A2 จากข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS รายภาคแบ่งตามฤดูกาล ดังตารางที่ 4-5 อธิบายถึงอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวใบต่อพื้นที่ได้เรือนยอดที่ปกคลุม มีหน่วยเป็นตารางเมตรต่อตารางเมตร ( $m^2/m^2$ ) โดยค่าดัชนีพื้นผิวใบมากจะแสดงถึงความสมบูรณ์ของพืชพรรณ แสดงแทนด้วยสีเขียวเข้ม และค่าดัชนีพื้นผิวใบแสดงแทนด้วยสีแดง ดังภาพที่ 4-14 และ 4-15 ซึ่งผลการศึกษาพบว่า

ฤดูหนาว ปี พ.ศ. 2558 ภาคตะวันตกของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยดัชนีพื้นผิวใบมากที่สุดเท่ากับ  $6.3681 m^2/m^2$  รองลงมา คือ ภาคเหนือ ภาคใต้ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $6.6190$   $5.8492$  และ  $5.6489 m^2/m^2$  ตามลำดับ ซึ่งภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลางเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยดัชนีพื้นผิวใบต่ำที่สุด เท่ากับ  $4.4505$  และ  $4.9404 m^2/m^2$  ตามลำดับ และในปี พ.ศ. 2559 พบว่า ภาคเหนือของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยดัชนีพื้นผิวใบมากที่สุดเท่ากับ  $6.8247 m^2/m^2$  รองลงมา คือ ภาคตะวันตก ภาคใต้ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $6.4299$   $6.1072$  และ  $5.6907 m^2/m^2$  ตามลำดับ ซึ่งภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลางยังเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยดัชนีพื้นผิวใบต่ำที่สุดเท่ากับ  $4.6706$  และ  $5.1106 m^2/m^2$  ตามลำดับ

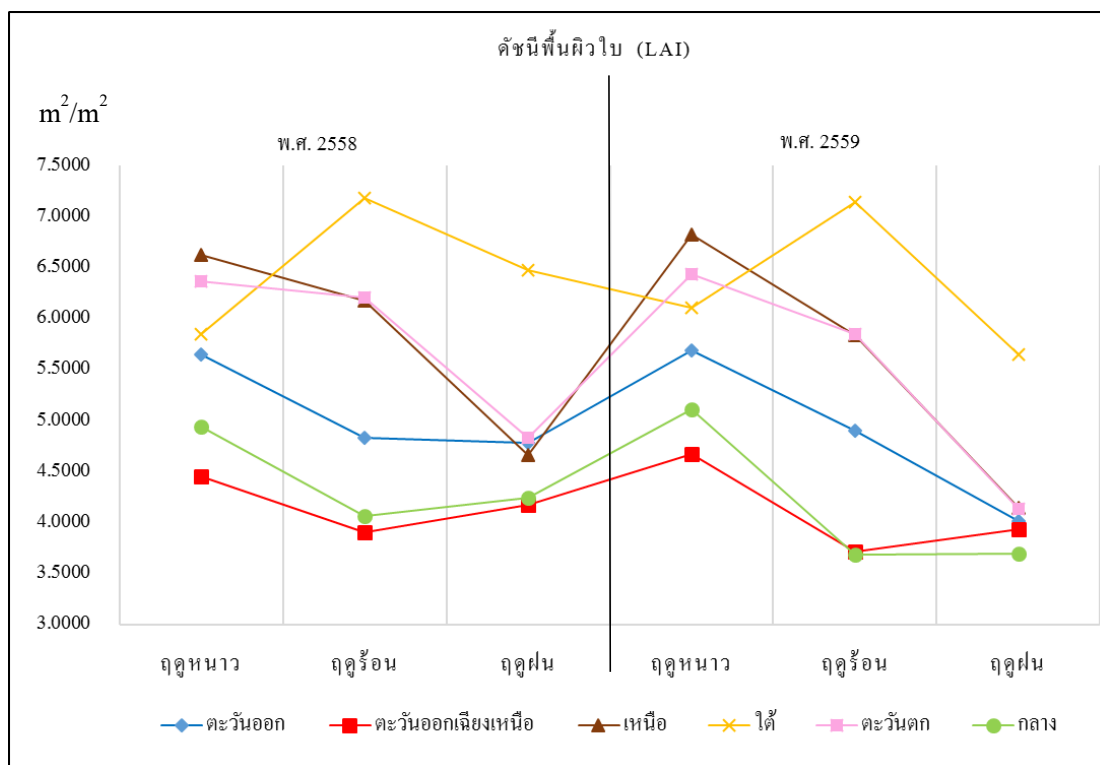
ฤดูร้อน ปี พ.ศ. 2558 ภาคใต้ของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยดัชนีพื้นผิวใบมากที่สุดเท่ากับ  $7.1812 m^2/m^2$  รองลงมา คือ ภาคตะวันตก ภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $6.2042$   $6.1721$  และ  $4.8340 m^2/m^2$  ตามลำดับ ซึ่งภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลางเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยดัชนีพื้นผิวใบต่ำที่สุด เท่ากับ  $3.9020$  และ  $4.0525 m^2/m^2$  ตามลำดับ และในปี พ.ศ. 2559 พบว่า ภาคใต้ของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยดัชนีพื้นผิวใบมากที่สุดเท่ากับ  $7.1440 m^2/m^2$  รองลงมา คือ ภาคตะวันตก ภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $5.8458$   $5.8374$  และ  $4.9029 m^2/m^2$  ตามลำดับ ซึ่งภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยดัชนีพื้นผิวใบต่ำที่สุดเท่ากับ  $3.6809$  และ  $3.7105 m^2/m^2$  ตามลำดับ

ฤดูฝน ปี พ.ศ. 2558 ภาคใต้ของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยดัชนีพื้นผิวใบมากที่สุดเท่ากับ  $6.4773 m^2/m^2$  รองลงมา คือ ภาคตะวันตก ภาคเหนือ และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $4.8244$   $4.6597$  และ  $4.7788 m^2/m^2$  ตามลำดับ ซึ่งภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลางเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยดัชนีพื้นผิวใบต่ำที่สุด เท่ากับ  $4.1733$  และ  $4.2408 m^2/m^2$  ตามลำดับ และในปี พ.ศ. 2559 พบว่า ภาคใต้ของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยดัชนีพื้นผิวใบมากที่สุดเท่ากับ  $5.6488 m^2/m^2$  รองลงมา คือ ภาคเหนือ ภาคตะวันตกและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $4.1413$   $4.1273$  และ  $4.0076 m^2/m^2$  ตามลำดับ ซึ่งภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยดัชนีพื้นผิวใบต่ำที่สุดเท่ากับ  $3.6932$  และ  $3.9313 m^2/m^2$  ตามลำดับ

ตารางที่ 4-5 ค่าดัชนีพื้นผิวใบ ปี พ.ศ. 2558 และ 2559 รายภาคแบ่งตามฤดูกาล ของประเทศไทย

ปี พ.ศ.	ภาค	ฤดูหนาว			ฤดูร้อน			ฤดูฝน		
		ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด
2558	ตะวันออก	0.7069	5.6489	8.6563	0.5833	4.8340	9.1917	0.5600	4.7788	8.6200
	ตะวันออกเฉียงเหนือ	0.5606	4.4505	8.6119	0.5917	3.9020	9.1333	0.6300	4.1733	8.8100
	เหนือ	0.7694	6.6190	8.6250	0.6917	6.1721	9.1583	0.9650	4.6597	8.1300
	ใต้	0.4769	5.8492	8.6181	0.5500	7.1812	9.1417	0.5550	6.4773	9.2300
	ตะวันตก	0.5819	6.3681	8.5625	0.5500	6.2042	9.1500	0.6050	4.8244	8.6250
	กลาง	0.5288	4.9400	8.6175	0.4583	4.0652	9.0833	0.5750	4.2408	8.3500
2559	ตะวันออก	0.6035	5.6907	8.7282	0.5818	4.9029	9.1636	0.5584	4.0076	7.8642
	ตะวันออกเฉียงเหนือ	0.4224	4.6706	8.6988	0.5909	3.7105	9.0455	0.6795	3.9313	7.9884
	เหนือ	0.7271	6.8247	8.6776	0.7455	5.8374	9.1182	0.9326	4.1413	7.6589
	ใต้	0.4441	6.1072	8.7394	0.5091	7.1440	9.2636	0.5584	5.6488	8.5895
	ตะวันตก	0.6035	6.4299	8.7171	0.5364	5.8458	9.2818	0.5637	4.1273	7.4342
	กลาง	0.3135	5.1106	8.7147	0.2091	3.6809	9.1818	0.5321	3.6932	7.7274

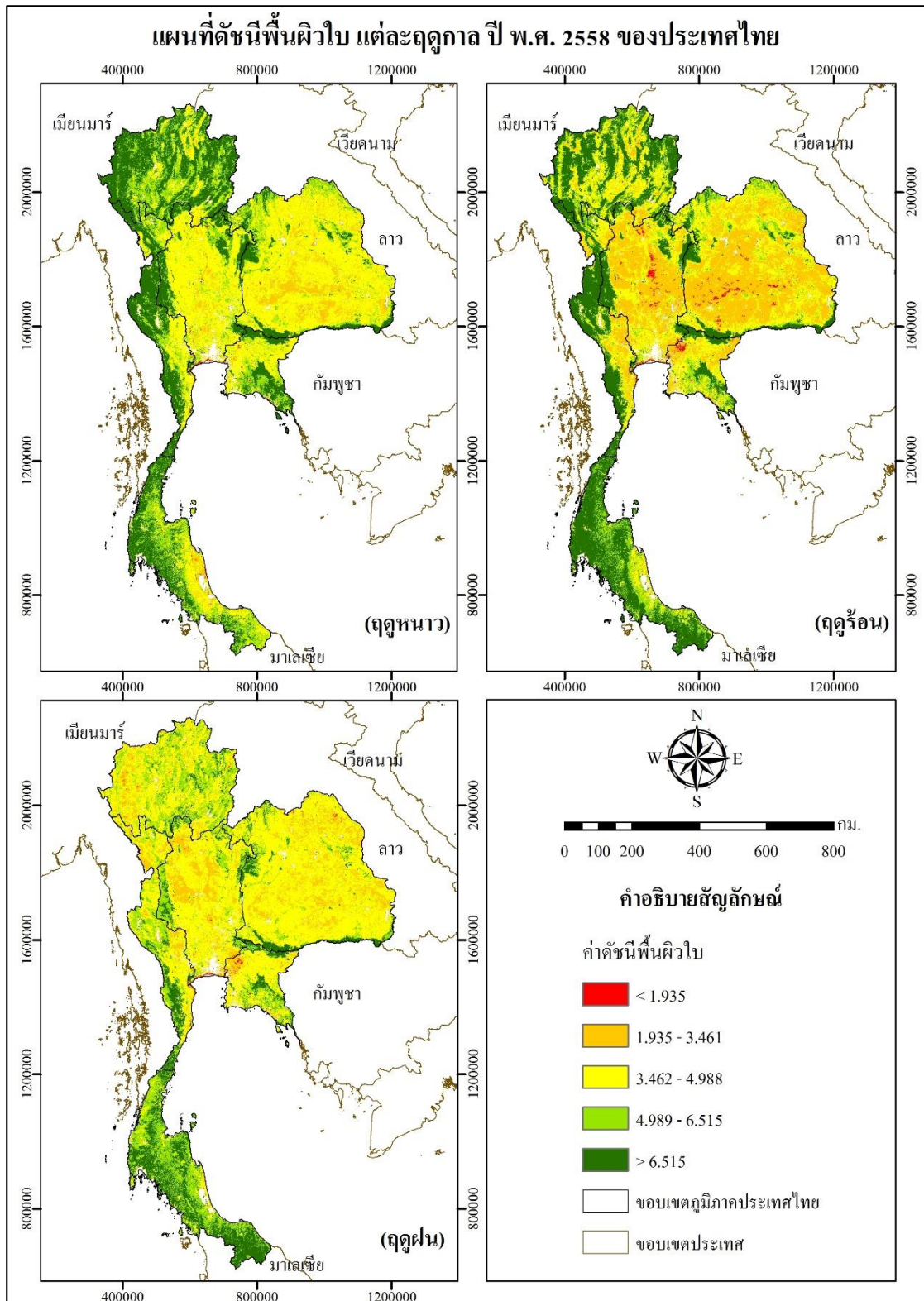




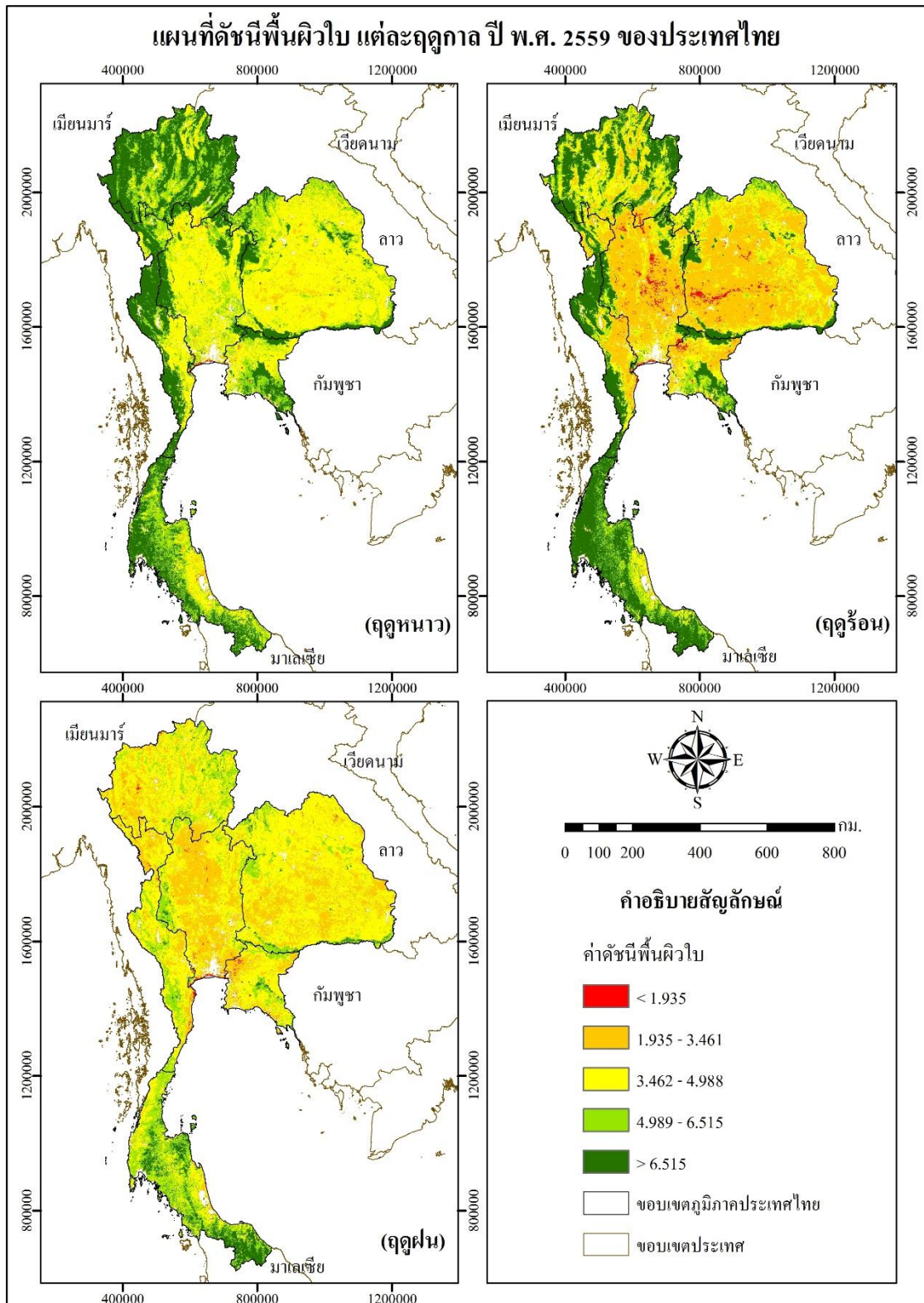
ภาพที่ 4-13 กราฟค่าเฉลี่ยดัชนีพื้นที่ผิวใบ ปี พ.ศ. 2558 และ 2559 รายภาคแบ่งตามฤดูกาล ของประเทศไทย

จากภาพที่ 4-13 พบว่า รูปแบบของค่าเฉลี่ยดัชนีพื้นที่ผิวใบของภาคเหนือ ภาคตะวันตก ค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบมีค่าเฉลี่ยสูงสุดในฤดูหนาว และลดลงในฤดูร้อนและฤดูฝน ตามลำดับ ภาคกลาง ภาคตะวันตก และภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีค่าเฉลี่ยสูงสุดในฤดูหนาว ลดลงในฤดูร้อนและเพิ่มขึ้นอีกครั้งในฤดูฝน ส่วนภาคใต้มีรูปแบบของค่าเฉลี่ยสูงสุดในฤดูร้อนและลดลงในฤดูหนาวและฤดูฝน จากภาพที่ 4-14 และ 4-15 สังเกตได้ว่า ค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบซึ่งเป็นค่าแสดงอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวใบต่อพื้นที่ใต้เรือนยอดที่ปกคลุม ที่มีค่า > 6.515 นั้นจะเป็นพื้นที่ที่เป็นลักษณะป่าไม้ในแต่ละภาค โดยภาคใต้จะมีค่าสูงในทุกฤดูกาล แตกต่างกับภาคเหนือและภาคตะวันตกที่ค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบสูงในฤดูหนาวและฤดูร้อน แต่กลับลดลงในฤดูฝน ซึ่งอาจบ่งบอกถึงลักษณะพืชพรรณที่แตกต่างกันและความแปรปรวนของสภาพอากาศ ณ ช่วง พ.ศ. นั้น ๆ





ภาพที่ 4-14 แผนที่ดัชนีพื้นผิวใบแต่ละฤดูกาล ปี พ.ศ. 2558 ของประเทศไทย



ภาพที่ 4-15 แผนที่ดัชนีพื้นผิวใบแต่ละฤดูกาล ปี พ.ศ. 2559 ของประเทศไทย

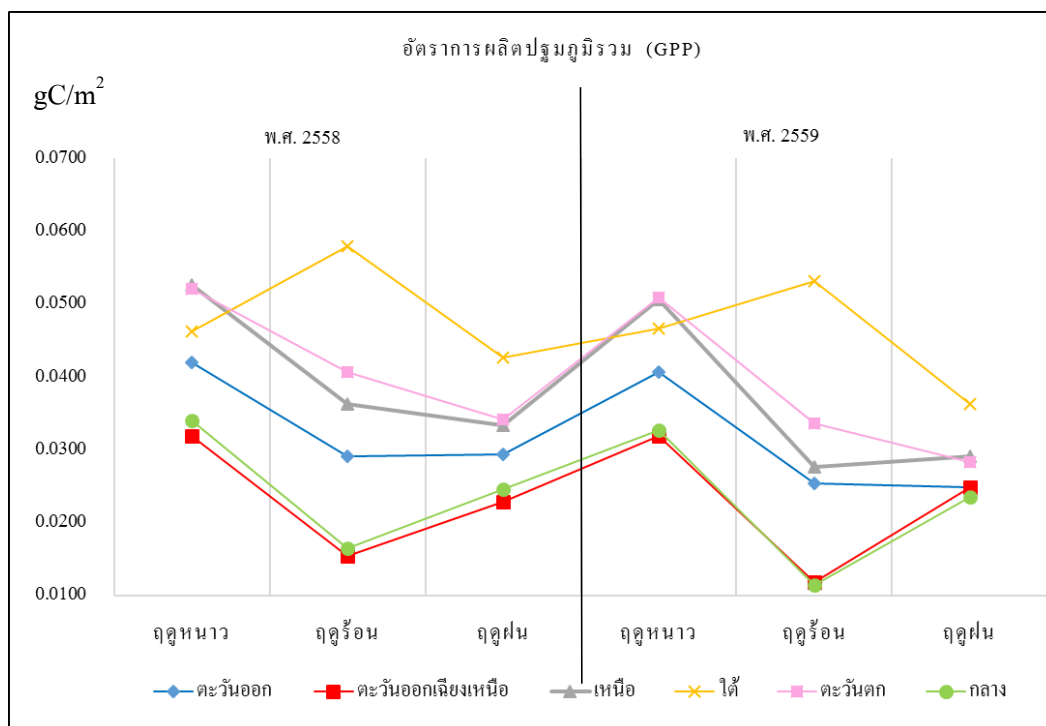
6. การศึกษาอัตราการผลิตปฐมภูมิรวมจากชุดผลิตภัณฑ์ MOD17A2 จากข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS ปรากฏแบ่งตามฤดูกาล ดังตารางที่ 4-6 อธิบายถึงอัตราการสังเคราะห์แสงทั้งหมดที่รวมไปถึงการดำรงชีวิตและการหายใจ มีหน่วยเป็นเกรมคาร์บอนต่อตารางเมตร ( $\text{gC/m}^2$ ) โดยพืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์สำหรับกระบวนการสังเคราะห์แสงเป็นหลัก หากมีค่าอัตราการผลิตปฐมภูมิรวมมากจะแสดงถึงความสมบูรณ์ของระบบนิเวศมากแสดงแทนด้วยสีเขียวเข้มและค่าอัตราการผลิตปฐมภูมิรวมน้อยจะแสดงแทนด้วยสีแดง ดังภาพที่ 4-17 และ 4-18 ผลการศึกษาพบว่า

ฤดูหนาว ปี พ.ศ. 2558 ภาคเหนือของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยอัตราการผลิตปฐมภูมิรวมมากที่สุดเท่ากับ  $0.0525 \text{ gC/m}^2$  รองลงมา คือ ภาคตะวันตก ภาคใต้และภาคตะวันออก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.0521$   $0.0463$  และ  $0.0419 \text{ gC/m}^2$ ตามลำดับ ซึ่งภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลางเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยอัตราการผลิตปฐมภูมิรวมต่ำที่สุด เท่ากับ  $0.0319$  และ  $0.0340 \text{ gC/m}^2$ ตามลำดับ และในปี พ.ศ. 2559 พบว่า ภาคตะวันตกของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยอัตราการผลิตปฐมภูมิรวมมากที่สุดเท่ากับ  $0.0509 \text{ gC/m}^2$  รองลงมา คือ ภาคเหนือ ภาคใต้และภาคตะวันออก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.0505$   $0.0466$  และ  $0.0407 \text{ gC/m}^2$ ตามลำดับ ซึ่งภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลางเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยอัตราการผลิตปฐมภูมิรวมต่ำที่สุด เท่ากับ  $0.0318$  และ  $0.0326 \text{ gC/m}^2$ ตามลำดับ

ฤดูร้อน ปี พ.ศ. 2558 ภาคใต้ของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยอัตราการผลิตปฐมภูมิรวมมากที่สุดเท่ากับ  $0.0579 \text{ gC/m}^2$  รองลงมา คือ ภาคตะวันตก ภาคเหนือและภาคตะวันออก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.0407$   $0.0363$  และ  $0.0291 \text{ gC/m}^2$ ตามลำดับ ซึ่งภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลางเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยอัตราการผลิตปฐมภูมิรวมต่ำที่สุด เท่ากับ  $0.0154$  และ  $0.0164 \text{ gC/m}^2$ ตามลำดับ และในปี พ.ศ. 2559 พบว่า ภาคใต้ของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยอัตราการผลิตปฐมภูมิรวมมากที่สุดเช่นเดียวกัน มีค่าเท่ากับ  $0.0532 \text{ gC/m}^2$  รองลงมา คือ ภาคตะวันตก ภาคเหนือและภาคตะวันออก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.0335$   $0.0276$  และ  $0.0253 \text{ gC/m}^2$ ตามลำดับ ซึ่งภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยอัตราการผลิตปฐมภูมิรวมต่ำที่สุด เท่ากับ  $0.0114$  และ  $0.0118 \text{ gC/m}^2$ ตามลำดับ

ฤดูฝน ปี พ.ศ. 2558 ภาคใต้ของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยอัตราการผลิตปฐมภูมิรวมมากที่สุดเท่ากับ  $0.0426 \text{ gC/m}^2$  รองลงมา คือ ภาคตะวันตก ภาคเหนือและภาคตะวันออก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.0342$   $0.0334$  และ  $0.0294 \text{ gC/m}^2$ ตามลำดับ ซึ่งภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลางเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยอัตราการผลิตปฐมภูมิรวมต่ำที่สุด เท่ากับ  $0.0228$  และ  $0.0245 \text{ gC/m}^2$ ตามลำดับ และในปี พ.ศ. 2559 พบว่า ภาคใต้ของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยอัตราการผลิต

ปฐมภูมิตั้งมากที่สูงสุดเช่นเดียวกัน มีค่าเท่ากับ  $0.0362 \text{ gC/m}^2$  รองลงมา คือ ภาคเหนือ ภาคตะวันตก และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคตะวันออก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $0.0290$   $0.0282$   $0.0248$  และ  $0.0248 \text{ gC/m}^2$  ตามลำดับ ซึ่งภาคกลางเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยอัตราการผลิตปฐมภูมิตั้งต่ำที่สุด เท่ากับ  $0.0235 \text{ gC/m}^2$  ตามลำดับ



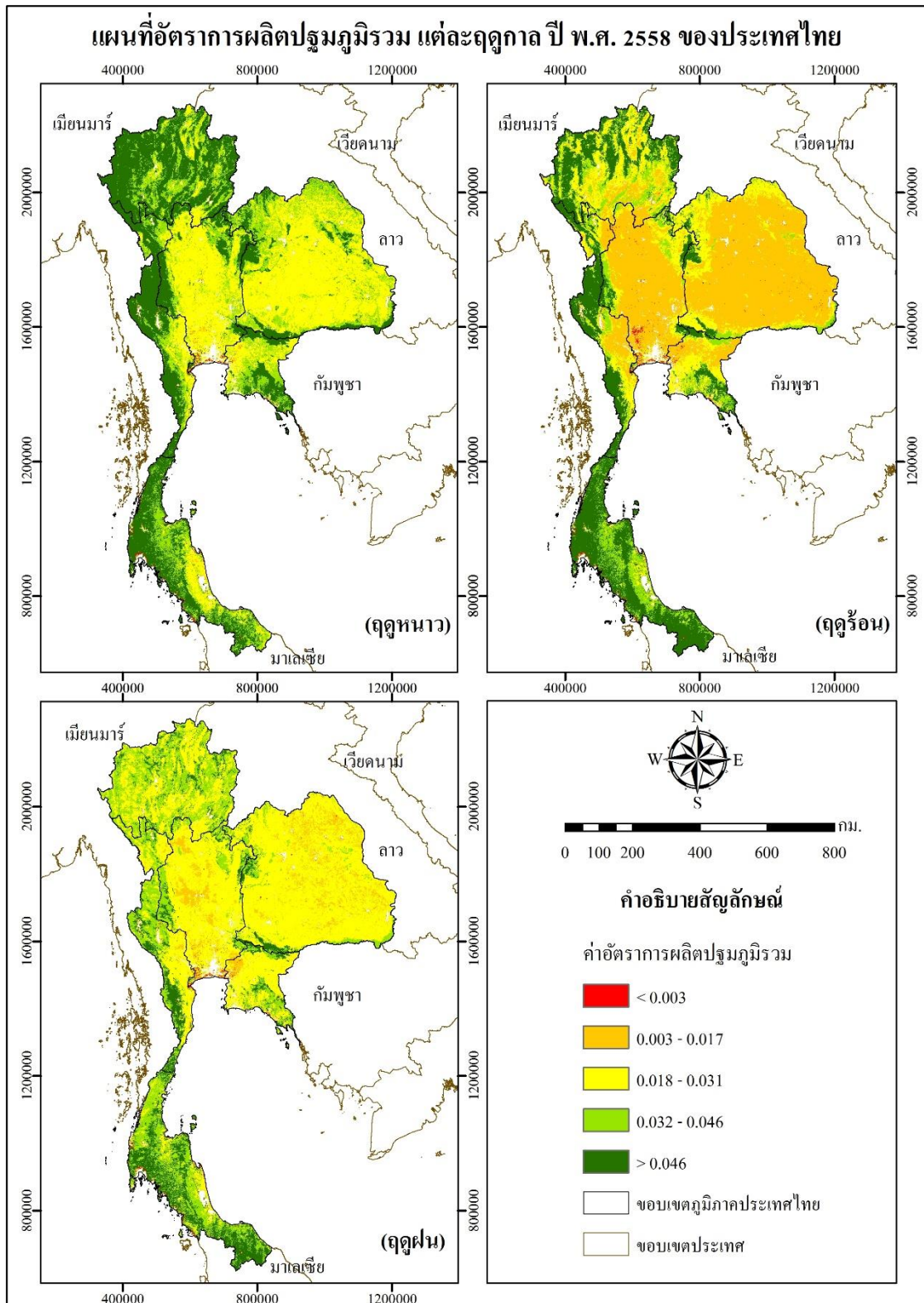
ภาพที่ 4-16 กราฟค่าเฉลี่ยอัตราการผลิตปฐมภูมิตั้ง ปี พ.ศ. 2558 และ 2559 รายภาคแบ่งตามฤดูกาล ของประเทศไทย

จากภาพที่ 4-16 พบว่า รูปแบบของค่าเฉลี่ยอัตราการผลิตปฐมภูมิตั้งของภาคเหนือ ภาคตะวันออก ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันตก และภาคกลางมีค่าเฉลี่ยสูงสุดในฤดูหนาวและลดอัตราการผลิตปฐมภูมิตั้งลงในช่วงฤดูฝนและร้อน ส่วนภาคใต้มีรูปแบบของค่าเฉลี่ยอัตราการผลิตปฐมภูมิตั้งสูงสุดในฤดูร้อนและลดอัตราการผลิตปฐมภูมิตั้งลงในช่วงฤดูหนาวและฤดูฝน จากภาพที่ 4-17 และ 4-18 สังเกตได้ว่า อัตราการผลิตปฐมภูมิตั้งสูงสุด มีค่า  $> 0.046$  แสดงแทนด้วยสีเขียวเข้มนั้น จะเป็นพื้นที่ที่เป็นลักษณะป่าไม้ในแต่ละภาค โดยเฉพาะภาคใต้จะมีค่าสูงในทุกฤดูกาล เนื่องด้วย ลักษณะพืชพรรณในเขตร้อนชื้น ที่มีความอุดมสมบูรณ์ อัตราการสังเคราะห์แสง และกระบวนการสร้างอาหารมาก จึงทำให้มีค่าอัตราการผลิตปฐมภูมิตั้งสูงในทุกฤดูกาล

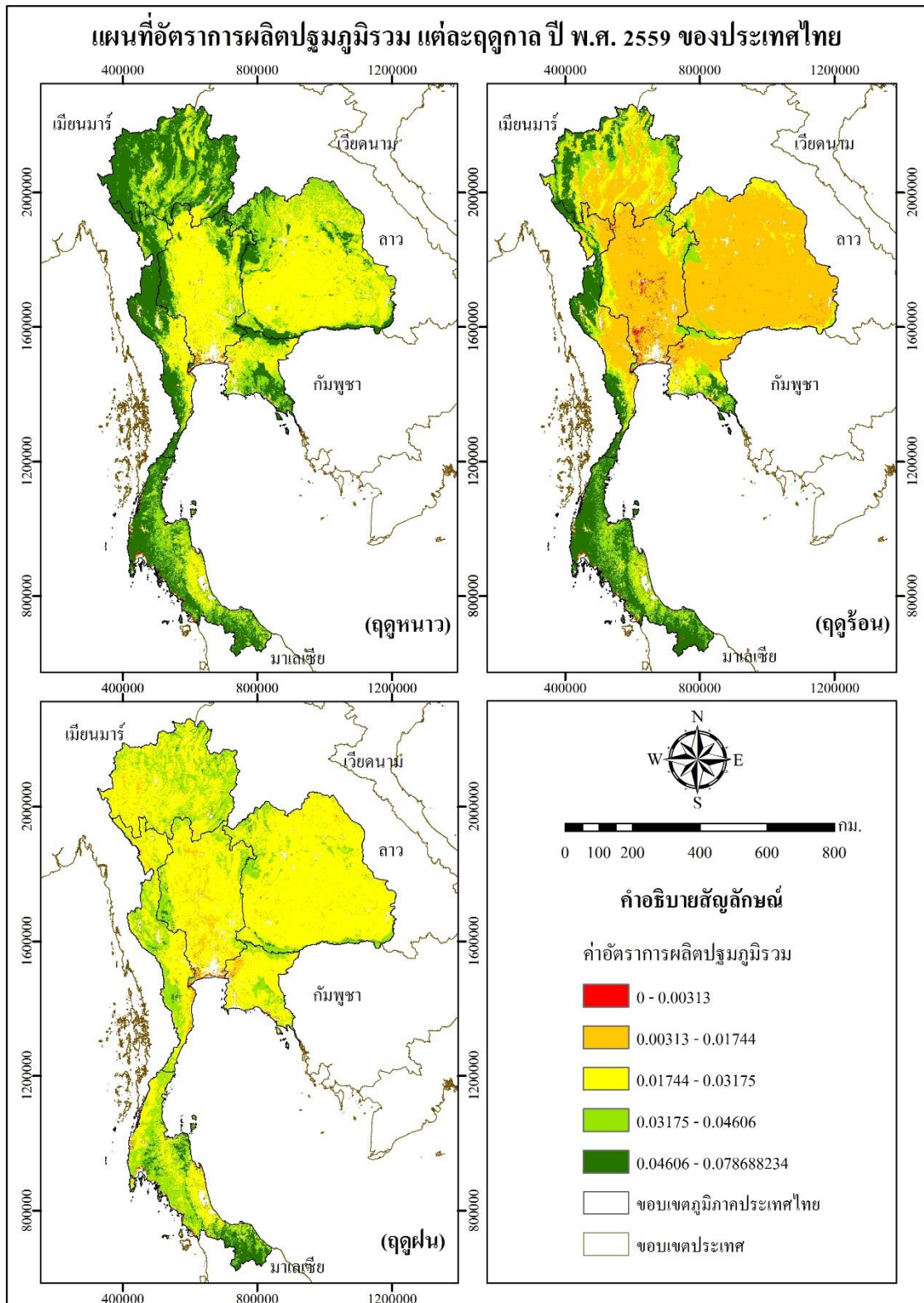
ตารางที่ 4-6 อัตราการผลิตปฐมภูมิรวม ปี พ.ศ. 2558 และ 2559 รายภาคแบ่งตามฤดูกาล ของประเทศไทย

ปี พ.ศ.	ภาค	ฤดูหนาว			ฤดูร้อน			ฤดูฝน		
		ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด
2558	ตะวันออก	0.0000	0.0419	0.0744	0.0000	0.0291	0.0872	0.0000	0.0294	0.0644
	ตะวันออกเฉียงเหนือ	0.0000	0.0319	0.0717	0.0000	0.0154	0.0618	0.0000	0.0228	0.0612
	เหนือ	0.0000	0.0525	0.0749	0.0000	0.0363	0.0724	0.0000	0.0334	0.0623
	ใต้	0.0000	0.0463	0.0744	0.0000	0.0579	0.0920	0.0000	0.0426	0.0670
	ตะวันตก	0.0000	0.0521	0.0763	0.0000	0.0407	0.0816	0.0000	0.0342	0.0652
	กลาง	0.0000	0.0340	0.0734	0.0000	0.0164	0.0654	0.0000	0.0245	0.0574
2559	ตะวันออก	0.0000	0.0407	0.0758	0.0000	0.0253	0.0899	0.0000	0.0248	0.0513
	ตะวันออกเฉียงเหนือ	0.0000	0.0318	0.0704	0.0000	0.0118	0.0501	0.0000	0.0248	0.0545
	เหนือ	0.0000	0.0505	0.0753	0.0000	0.0276	0.0653	0.0000	0.0290	0.0578
	ใต้	0.0000	0.0466	0.0743	0.0000	0.0532	0.0921	0.0000	0.0362	0.0664
	ตะวันตก	0.0000	0.0509	0.0787	0.0000	0.0335	0.0802	0.0000	0.0282	0.0547
	กลาง	0.0000	0.0326	0.0714	0.0000	0.0114	0.0575	0.0000	0.0235	0.0537





ภาพที่ 4-17 แผนที่อัตราการผลิตปฐมภูมิรวมแต่ละฤดูกาล ปี พ.ศ. 2558 ของประเทศไทย



ภาพที่ 4-18 แผนที่อัตราการผลิตปฐมภูมิรวมแต่ละฤดูกาล ปี พ.ศ. 2559 ของประเทศไทย

7. การศึกษาสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง จากชุดผลิตภัณฑ์ MOD15A2 จากข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS วิทยภาคแบ่งตามฤดูกาล ดังตารางที่ 4-7 อธิบายถึงการวัดสัดส่วนของการแผ่รังสีที่มีอยู่ในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสงที่ถูกดูดซับโดยเรือนยอด โดยค่าสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง จะแสดงถึงความสมบูรณ์ของพืชพรรณ แสดงแทนด้วยสีเขียวเข้ม และค่าสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง แสดงแทนด้วยสีแดง ดังภาพที่ 4-20 และ 4-21 ซึ่งผลการศึกษาพบว่า

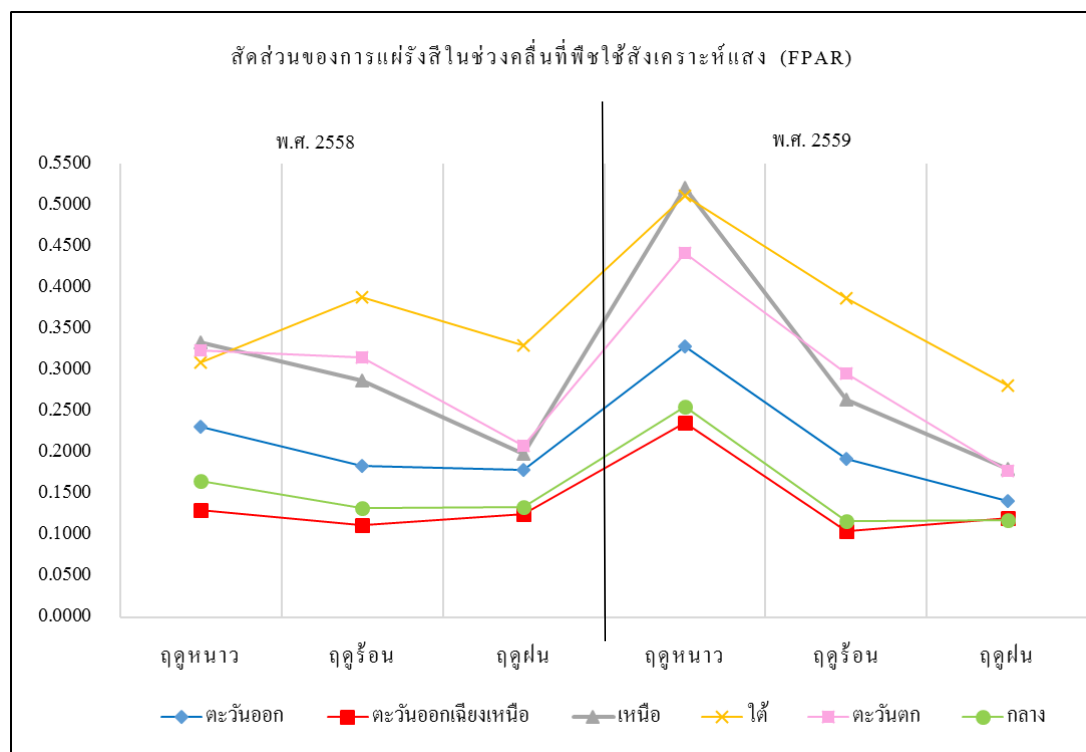
ฤดูหนาว ปี พ.ศ. 2558 ภาคเหนือของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสงมากที่สุดเท่ากับ 0.3336 รองลงมา คือ ภาคตะวันตก ภาคใต้ และภาคตะวันออก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.3230 0.3094 และ 0.2311 ตามลำดับ ซึ่งภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลางเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสงต่ำที่สุดเท่ากับ 0.1295 และ 0.1650 ตามลำดับ และในปี พ.ศ. 2559 พบว่า ภาคเหนือของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสงมากที่สุดเท่ากับ 0.5206 รองลงมา คือ ภาคใต้ ภาคตะวันตกและภาคตะวันออก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.5113 0.4415 และ 0.3282 ตามลำดับ ซึ่งภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลางเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสงต่ำที่สุด เท่ากับ 0.2360 และ 0.2549 ตามลำดับ

ฤดูร้อน ปี พ.ศ. 2558 ภาคใต้ของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสงมากที่สุดเท่ากับ 0.3882 รองลงมา คือ ภาคตะวันตก ภาคเหนือ และภาคตะวันออก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.3148 0.2873 และ 0.1835 ตามลำดับ ซึ่งภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลางเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสงต่ำที่สุดเท่ากับ 0.1111 และ 0.1318 ตามลำดับ และในปี พ.ศ. 2559 ภาคใต้ของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสงมากที่สุดเท่ากับ 0.3871 รองลงมา คือ ภาคตะวันตก ภาคเหนือ และภาคตะวันออก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.2951 0.2634 และ 0.1920 ตามลำดับ ซึ่งภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลางเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสงต่ำที่สุด เท่ากับ 0.1039 และ 0.1159 ตามลำดับ

ฤดูฝน ปี พ.ศ. 2558 ภาคใต้ของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสงมากที่สุดเท่ากับ 0.3300 รองลงมา คือ ภาคตะวันตก ภาคเหนือ และภาคตะวันออก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.2077 0.1986 และ 0.1788 ตามลำดับ ซึ่งภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลางเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสงต่ำที่สุดเท่ากับ 0.1244 และ 0.1329 ตามลำดับ และในปี พ.ศ. 2559 ภาคใต้ของประเทศไทยเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสงมากที่สุดเท่ากับ 0.2805 รองลงมา คือ



ภาคเหนือ ภาคตะวันตก และภาคตะวันออก มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.1794 0.1767 และ 0.1412 ตามลำดับ ซึ่งภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นภูมิภาคที่มีค่าเฉลี่ยสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสงต่ำที่สุด เท่ากับ 0.1174 และ 0.1205 ตามลำดับ



ภาพที่ 4-19 กราฟค่าเฉลี่ยสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง ปี พ.ศ. 2558 และ 2559 รายภาคแบ่งตามฤดูกาล ของประเทศไทย

จากภาพที่ 4-19 พบว่า รูปแบบของค่าเฉลี่ยสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสงของภาคเหนือ ภาคตะวันออก ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคตะวันตก และภาคกลาง มีค่าเฉลี่ยสูงสุดในฤดูหนาว ลดลงในฤดูร้อนและเพิ่มขึ้นอีกครั้งในฤดูฝน ส่วนภาคใต้มีรูปแบบของค่าเฉลี่ยสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง มีรูปแบบที่ไม่แน่นอน จากภาพที่ 4-20 และ 4-21 สังเกตได้ว่า สัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสงสูงสุด มีค่า > 0.385 แสดงแทนด้วยสีเขียวเข้มนั้น จะเป็นพื้นที่ที่เป็นลักษณะป่าไม้ในแต่ละภาค โดยเฉพาะภาคใต้จะมีค่าสูงกว่าภาคอื่น ๆ ทุกฤดูกาล เนื่องจาก ลักษณะพืชพรรณในเขตร้อนชื้น ฝนตกชุก มีความอุดมสมบูรณ์มากกว่า พื้นที่ป่าไม้ภาคเหนือและภาคตะวันตกที่จะมีสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสงลดลงในฤดูฝนอย่างเห็นได้ชัด

ตารางที่ 4-7 สัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง ปี พ.ศ. 2558 และ 2559 รายภาคแบ่งตามฤดูกาล ของประเทศไทย

ปี พ.ศ.	ภาค	ฤดูหนาว			ฤดูร้อน			ฤดูฝน		
		ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด
2558	ตะวันออก	0.0120	0.2311	0.6513	0.0100	0.1835	0.6467	0.0100	0.1788	0.5747
	ตะวันออกเฉียงเหนือ	0.0093	0.1295	0.6447	0.0092	0.1111	0.6425	0.0095	0.1244	0.5974
	เหนือ	0.0140	0.3336	0.6460	0.0125	0.2873	0.6550	0.0179	0.1986	0.5211
	ใต้	0.0080	0.3094	0.6327	0.0100	0.3882	0.6542	0.0100	0.3300	0.6437
	ตะวันตก	0.0100	0.3230	0.6400	0.0100	0.3148	0.6558	0.0105	0.2077	0.5732
	กลาง	0.0087	0.1650	0.6447	0.0083	0.1318	0.6475	0.0100	0.1329	0.5621
2559	ตะวันออก	0.0153	0.3282	1.0006	0.0100	0.1920	0.6573	0.0100	0.1412	0.5206
	ตะวันออกเฉียงเหนือ	0.0124	0.2360	0.9876	0.0100	0.1039	0.6536	0.0117	0.1205	0.5478
	เหนือ	0.0176	0.5206	0.9982	0.0155	0.2634	0.6573	0.0183	0.1794	0.5022
	ใต้	0.0135	0.5113	0.9941	0.0091	0.3871	0.6573	0.0106	0.2805	0.6328
	ตะวันตก	0.0153	0.4415	1.0094	0.0100	0.2951	0.6600	0.0100	0.1767	0.4928
	กลาง	0.0053	0.2549	0.9971	0.0036	0.1159	0.6545	0.0100	0.1174	0.5128





### การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศและ ชุดผลิตภัณฑ์จากข้อมูลดาวเทียม Terra ระบบ MODIS

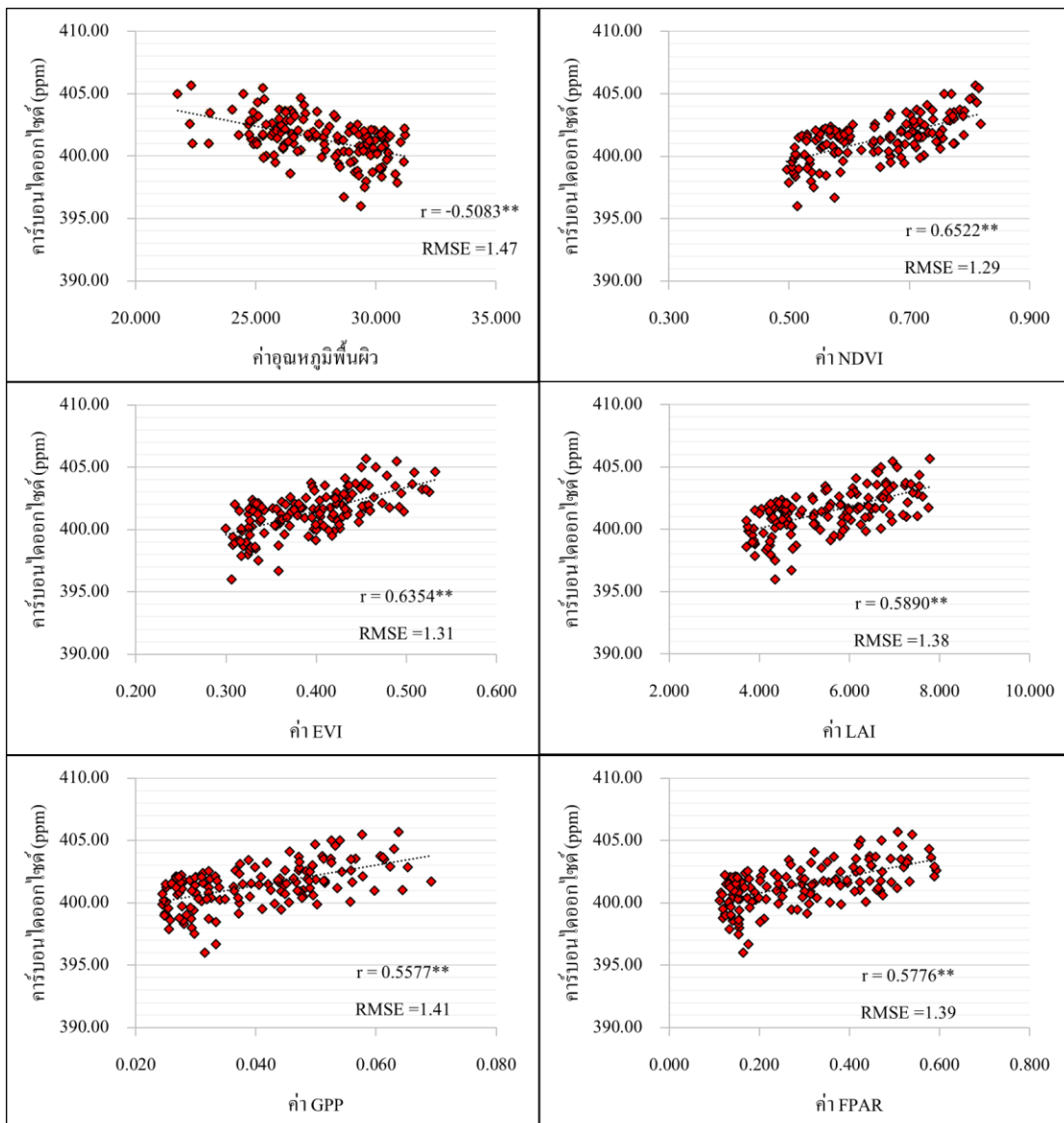
การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้น  
บรรยากาศจากดาวเทียม OCO-2 ให้เป็นตัวแปรตาม กับชุดผลิตภัณฑ์จากข้อมูลดาวเทียม Terra  
ระบบ MODIS ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิพื้นผิว (LST) ดัชนีพืชพรรณ NDVI และ EVI ดัชนีพื้นผิวใบ  
(LAI) อัตราการผลิตปฐมภูมิรวม (GPP) และสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์  
แสง (FPAR) เป็นตัวแปรต้น ที่ระดับนัยสำคัญมากกว่าหรือเท่ากับ 0.05 ในแต่ละฤดูกาลของ  
ประเทศไทย

ผลการศึกษาในฤดูหนาว เริ่มตั้งแต่วันที่ 15 ตุลาคม ถึง 15 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2558 และ พ.ศ.  
2559 จากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 143 ตัวอย่าง พบว่า ตัวแปรต้นที่มีค่าสหสัมพันธ์สูงสุด ได้แก่ ค่าดัชนีพืช  
พรรณ NDVI มีค่าเท่ากับ 0.6522 ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นความสัมพันธ์แบบแปรผัน  
ระหว่างค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI กับค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศอยู่  
ในระดับปานกลาง มีค่าความคลาดเคลื่อน RMSE เท่ากับ 1.29 รองลงมา คือ ค่าดัชนีพืชพรรณ EVI มีค่า  
สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.6354 ค่าดัชนีพื้นผิวใบ มีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.5890 และสัดส่วนการแผ่รังสี  
ในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง มีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.5776 ส่วนตัวแปรที่มีค่าสหสัมพันธ์ต่ำ  
ที่สุด ได้แก่ ค่าอุณหภูมิพื้นผิวมีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ -0.5083 มีค่าความคลาดเคลื่อน RMSE เท่ากับ  
1.47 และอัตราการผลิตปฐมภูมิรวม มีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.5577 ดังตารางที่ 4-8 และภาพที่ 4-22

ตารางที่ 4-8 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับชุดผลิตภัณฑ์  
จากข้อมูล MODIS ในฤดูหนาว

ตัวแปร	ค่าสหสัมพันธ์ (r)	จำนวนตัวอย่าง (N)	ค่า RMSE
ค่า LST	-0.5083**	143	1.47
ค่า NDVI	0.6522**	143	1.29
ค่า EVI	0.6354**	143	1.31
ค่า LAI	0.5890**	143	1.38
ค่า GPP	0.5577**	143	1.41
ค่า FPAR	0.5776**	143	1.39

หมายเหตุ \*\* คือ มีความสัมพันธ์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01



ภาพที่ 4-22 แผนภาพการกระจายตัวระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับชุดผลิตภัณฑ์จากข้อมูลจาก MODIS ในฤดูหนาว

การศึกษาความสัมพันธ์ในฤดูร้อน เริ่มตั้งแต่วันที่ 15 กุมภาพันธ์ ถึง 15 พฤษภาคม พ.ศ. 2558 และ พ.ศ. 2559 จากจำนวนกลุ่มตัวอย่างจำนวน 98 ตัวอย่าง พบว่า ตัวแปรต้นที่มีค่าสหสัมพันธ์สูงสุด ได้แก่ ค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบ มีค่าเท่ากับ -0.5772 ซึ่งอธิบายว่า ความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นความสัมพันธ์แบบแปรผกผันระหว่างค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบกับค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศในระดับปานกลาง มีค่าความคลาดเคลื่อน RMSE เท่ากับ 1.17 ppm รองลงมา คือ ค่าดัชนีพื้นที่ผิวใบ มีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.5574 สัดส่วนการแผ่รังสีในช่วง

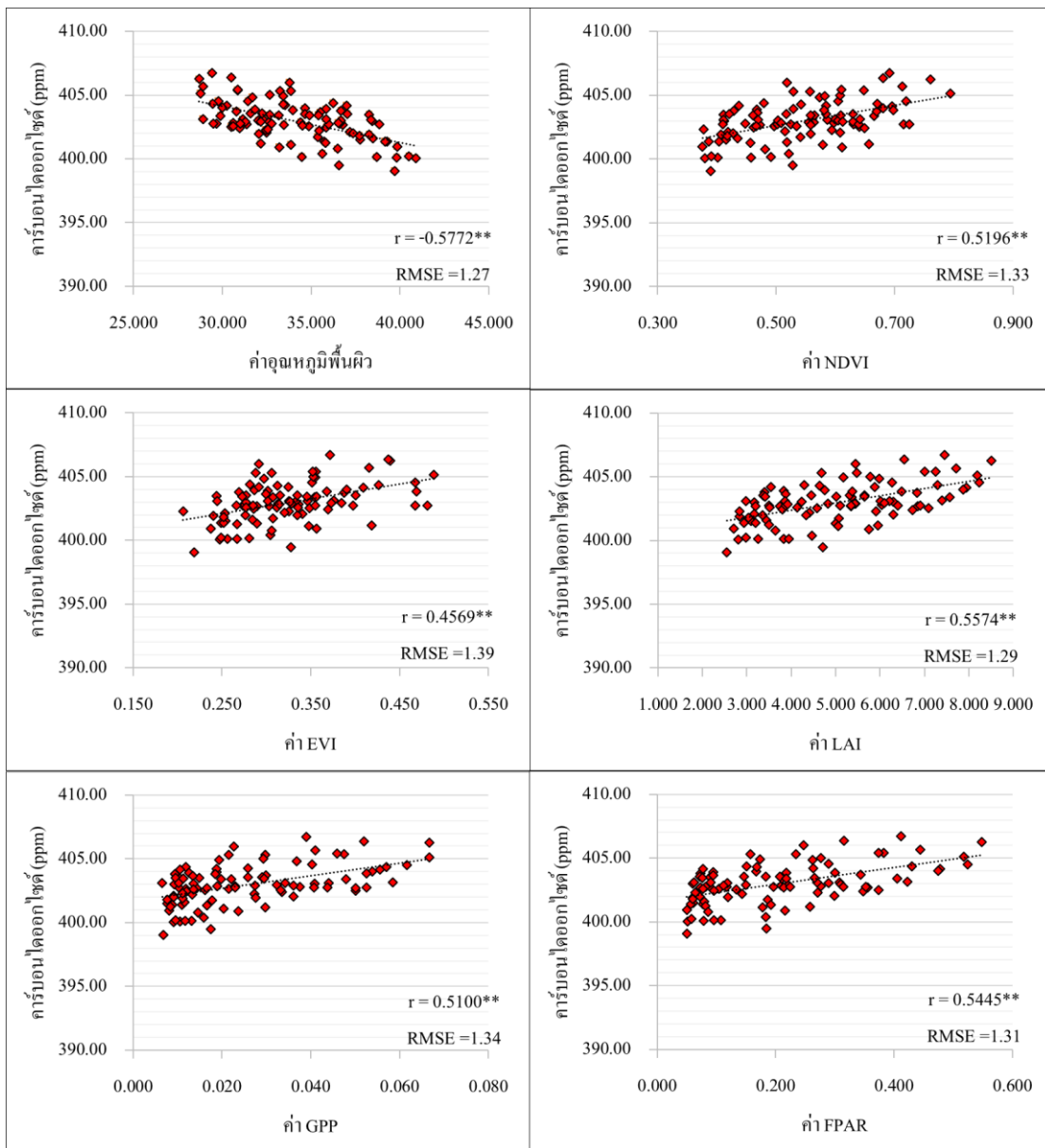
คลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง มีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.5445 และค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI มีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.5196 ส่วนตัวแปรต้นที่มีค่าสหสัมพันธ์ต่ำสุด ได้แก่ ค่าดัชนีพืชพรรณ EVI มีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.4569 มีค่าความคลาดเคลื่อน RMSE เท่ากับ 1.29 ppm และอัตราการผลิตปฐมภูมิ มีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.5100 ดังตารางที่ 4-9 และภาพที่ 4-23

ตารางที่ 4-9 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับชุดผลิตภัณฑ์จากข้อมูล MODIS ในฤดูร้อน

ตัวแปร	ค่าสหสัมพันธ์ (r)	จำนวนตัวอย่าง (N)	ค่า RMSE
ค่า LST	-0.5772**	98	1.27
ค่า NDVI	0.5196**	98	1.33
ค่า EVI	0.4569**	98	1.39
ค่า LAI	0.5574**	98	1.29
ค่า GPP	0.5100**	98	1.34
ค่า FPAR	0.5445**	98	1.31

หมายเหตุ \*\* คือ มีความสัมพันธ์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01





ภาพที่ 4-23 แผนภาพการกระจายตัวระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับชุดผลิตภัณฑ์จากข้อมูล MODIS ในฤดูร้อน

และการศึกษาความสัมพันธ์ในช่วงฤดูฝน เริ่มตั้งแต่วันที่ 15 พฤษภาคมถึง 15 ตุลาคม ปี พ.ศ. 2558 และ 2559 จากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 101 ตัวอย่างพบว่า อุณหภูมิพื้นผิวเป็นตัวแปรที่มีค่าสหสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศมากที่สุด ดังตารางที่ 4-10 และภาพที่ 4-24 เท่ากับ -0.6051 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์แบบแปรผกผันในระดับปานกลาง สามารถอธิบายได้ว่า เมื่ออุณหภูมิพื้นผิวเพิ่มขึ้นค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

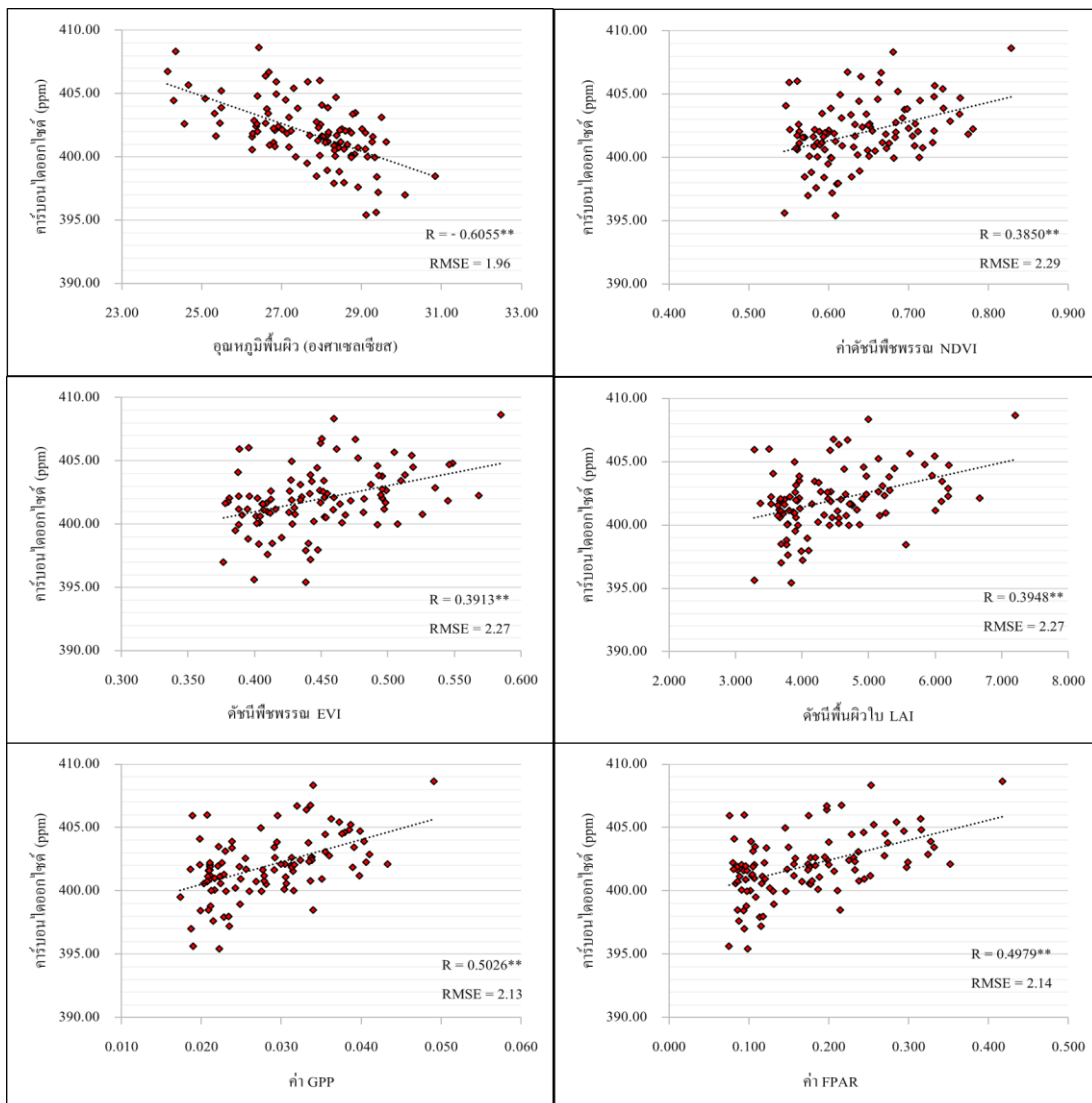


ในชั้นบรรยากาศจะลดลงในทิศทางตรงกันข้ามและมีค่าความคลาดเคลื่อน RMSE น้อยที่สุดเท่ากับ 1.96 รองลงมา ได้แก่ อัตราการผลิตปฐมภูมิ มีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.4979 สัดส่วนการแผ่รังสี ในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง มีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.4979 ดัชนีพื้นที่ใบ มีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.3948 ดัชนีพืชพรรณ EVI มีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.3913 และดัชนีพืชพรรณ NDVI มีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.3850 ซึ่งทั้งหมดมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตาม สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของค่าดังกล่าวข้างต้นค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ จะเพิ่มขึ้นในทิศทางเดียวกัน

ตารางที่ 4-10 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับชุดผลิตภัณฑ์ จากข้อมูล MODIS ในฤดูฝน

ตัวแปร	ค่าสหสัมพันธ์ (r)	จำนวนตัวอย่าง (N)	ค่า RMSE
ค่า LST	-0.6055**	101	1.96
ค่า NDVI	0.3850**	101	2.29
ค่า EVI	0.3913**	101	2.27
ค่า LAI	0.3948**	101	2.27
ค่า GPP	0.5026**	101	2.13
ค่า FPAR	0.4979**	101	2.14

หมายเหตุ \*\* คือ มีความสัมพันธ์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01



ภาพที่ 4-24 แผนภาพการกระจายตัวระหว่างค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับชุดผลิตภัณฑ์จากข้อมูล MODIS ในฤดูฝน

จากการศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรจำนวน 3 ฤดูกาล สามารถสรุปรูปแบบของความสัมพันธ์ได้ 2 รูปแบบ คือ 1) ความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ ได้แก่ อุนหภูมิพื้นผิวดิน และ 2) ความสัมพันธ์แบบแปรผันกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ ได้แก่ ดัชนีพืชพรรณ NDVI และ EVI ดัชนีพื้นผิวใบ อัตราการผลิตปฐมภูมิ และสัดส่วนการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสง ซึ่งตัวแปรต้นในแต่ละฤดูกาลมีค่าสหสัมพันธ์สูงสุดแตกต่างกัน คือ ฤดูฝนและฤดูร้อนพบว่า มีค่าสหสัมพันธ์สูงสุด ส่วนฤดูหนาวพบว่าค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI มีค่าสหสัมพันธ์มากที่สุด และตัวแปรต้นทุกตัวแปรมีความสัมพันธ์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01

### การสร้างสมการสำหรับประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ

การสร้างสมการสำหรับประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ ประเทศไทย จากข้อมูลจากดาวเทียม OCO-2 และชุดผลิตภัณฑ์จากข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS ด้วยการสร้างสมการพหุคูณถดถอยเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น และเลือกตัวแปรโดยวิธีเพิ่มตัวแปรแบบขั้นตอน (Stepwise Regression) เพื่อลดความซับซ้อนของตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันเอง

ผลการศึกษาในช่วงฤดูหนาว พบว่า ตัวแปรต้นที่ถูกคัดเลือกเข้าสู่สมการ คือ ดัชนีพืชพรรณ NDVI และอัตราการผลิตปฐมภูมิรวม จากตารางที่ 4-11 เมื่อนำมาสร้างสมการถดถอยเชิงเส้น มีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.6670 มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ  $R^2$  เท่ากับ 0.4449 และมีค่าความคลาดเคลื่อน RMSE เท่ากับ 1.28 ppm แสดงเป็นกราฟได้ดังภาพที่ 4-25 และสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 4-1 ส่วนสมการถดถอยไม่เชิงเส้นแบบ Polynomial มีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.6993 มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ  $R^2$  เท่ากับ 0.4891 และมีค่าความคลาดเคลื่อน RMSE เท่ากับ 1.21 ppm แสดงเป็นกราฟได้ดังภาพที่ 4-26 และสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 4-2 สรุปได้ว่า สมการที่เหมาะสมสำหรับการประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศในช่วงฤดูหนาว คือ สมการถดถอยไม่เชิงเส้นแบบ Polynomial โดยเมื่อแสดงผลออกมาเป็นแผนที่ดังภาพที่ 4-27 และ 4-28 พบว่า พื้นที่ที่มีค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศสูงแทนด้วยสีแดง คือ พื้นที่บริเวณป่าภาคเหนือ ภาคตะวันตก ภาคใต้และตอนล่างของภาคตะวันออก ส่วนพื้นที่ที่มีค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยแทนด้วยสีเขียวเข้มจะเป็นพื้นที่ราบภาคกลาง และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

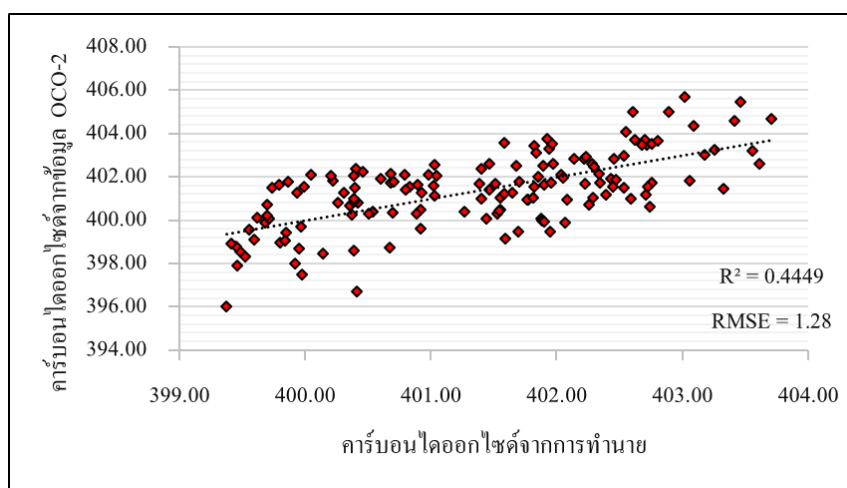
$$CO_2 = 391.69 + 18.45(NDVI) - 56.80(GPP) \quad (4-1)$$

$$CO_2 = 385.36 + 46.54(NDVI) - 16.63(NDVI)^2 - 432.30(GPP) + 3861.92(GPP)^2 \quad (4-2)$$

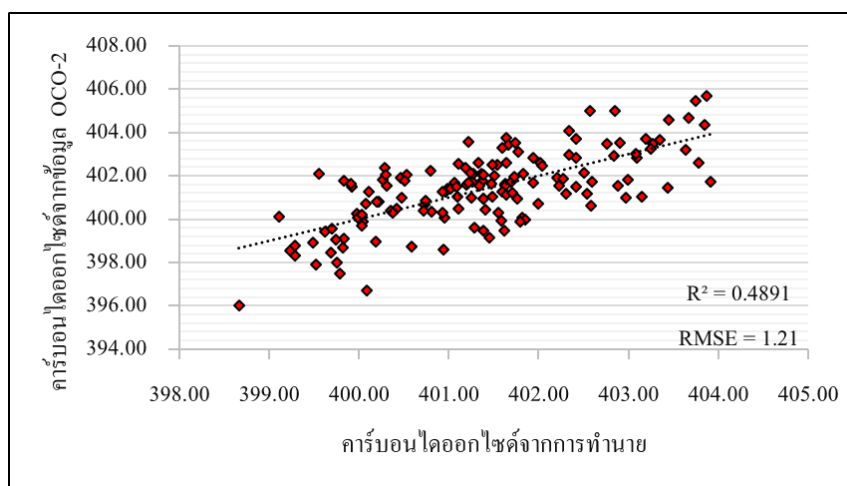
เมื่อ $CO_2$	คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ
NDVI	คือ ค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI
GPP	คือ ค่าอัตราการผลิตปฐมภูมิรวม

ตารางที่ 4-11 ค่าสถิติของสมการถดถอยในช่วงฤดูหนาวของประเทศไทย

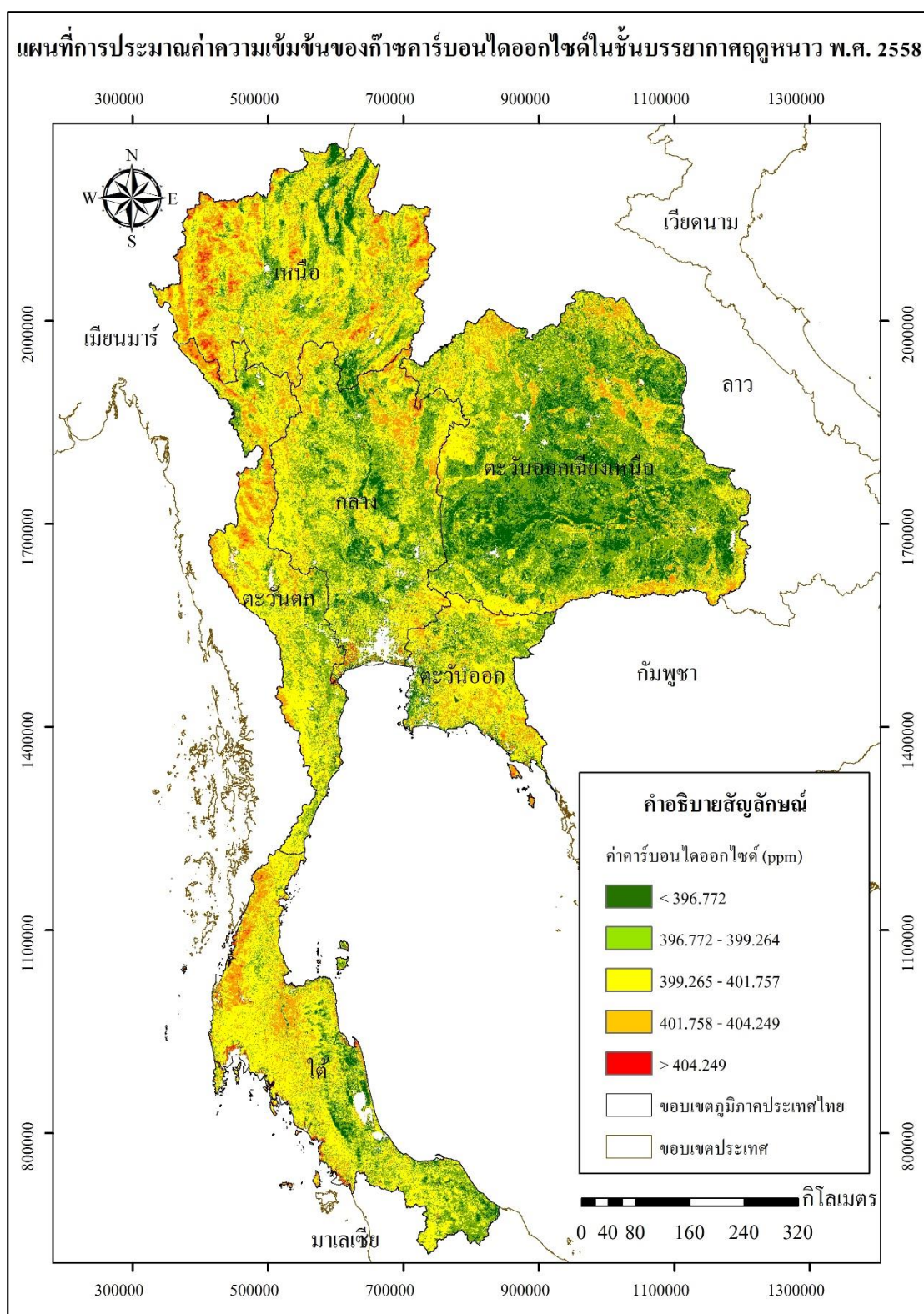
ค่าสถิติฤดูหนาว	Linear Regression	Polynomial Regression
ค่าสหสัมพันธ์	0.6670	0.6993
ค่า $R^2$	0.4449	0.4891
Adjusted R Square	0.4371	0.4746
ความคลาดเคลื่อน RMSE	1.28	1.21
จำนวนตัวอย่าง	143	143



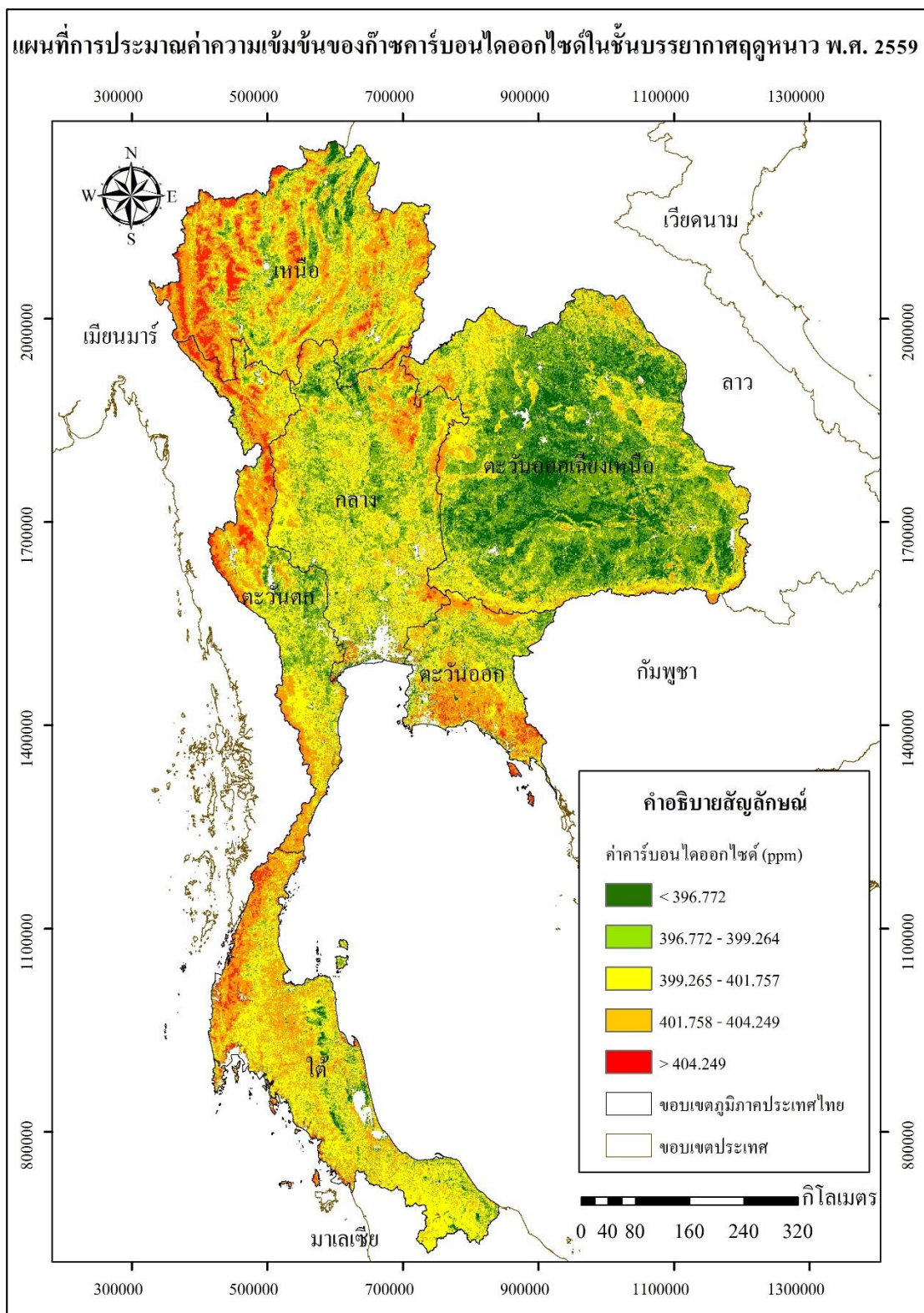
ภาพที่ 4-25 การกระจายตัวของค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากสมการถดถอยเชิงเส้นในช่วงฤดูหนาว ของประเทศไทย



ภาพที่ 4-26 การกระจายตัวของค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากสมการถดถอยไม่เชิงเส้นแบบ Polynomial ในช่วงฤดูหนาวของประเทศไทย



ภาพที่ 4-27 แผนที่การประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศฤดูหนาว พ.ศ. 2558



ภาพที่ 4-28 แผนที่การประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศฤดูหนาว พ.ศ. 2559



ผลการศึกษาในช่วงฤดูร้อน พบว่า ตัวแปรต้นที่ถูกคัดเลือกเข้าสู่สมการ คือ อุณหภูมิพื้นผิว จากตารางที่ 4-12 เมื่อนำมาสร้างสมการถดถอยเชิงเส้น มีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.5772 มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ  $R^2$  เท่ากับ 0.3332 มีค่าความคลาดเคลื่อน RMSE เท่ากับ 1.27 ppm แสดงเป็นกราฟได้ดังภาพที่ 4-29 และสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 4-3 ส่วนสมการถดถอยไม่ใช่เชิงเส้นแบบ Polynomial มีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.5812 มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ  $R^2$  เท่ากับ 0.3378 มีค่าความคลาดเคลื่อน RMSE เท่ากับ 1.27 ppm แสดงเป็นกราฟได้ดังภาพที่ 4-30 และสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 4-4 สรุปได้ว่า สมการที่เหมาะสมสำหรับการประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดร็อกไซด์ในชั้นบรรยากาศในช่วงฤดูร้อน คือ สมการถดถอยเชิงเส้น โดยเมื่อแสดงผลออกมาเป็นแผนที่ได้ภาพที่ 4-21 และ 4-32 พบว่า พื้นที่ที่มีค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศสูงแทนด้วยสีแดง คือ พื้นที่บริเวณป่าของทุกภาค ส่วนพื้นที่ที่มีค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยกว่าแทนด้วยสีส้มและสีเหลืองส่วนใหญ่จะเป็นพื้นที่ราบ

$$CO_2 = 412.66 - 0.28(LST) \quad (4-3)$$

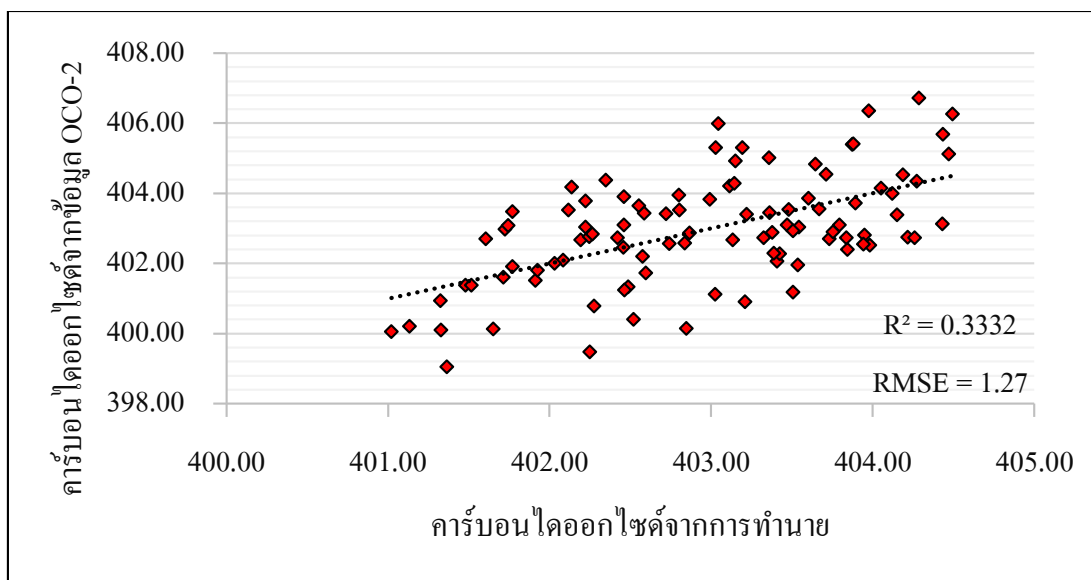
$$CO_2 = 400.23 + 0.44(LST) - 0.01(LST)^2 \quad (4-4)$$

เมื่อ  $CO_2$  คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ

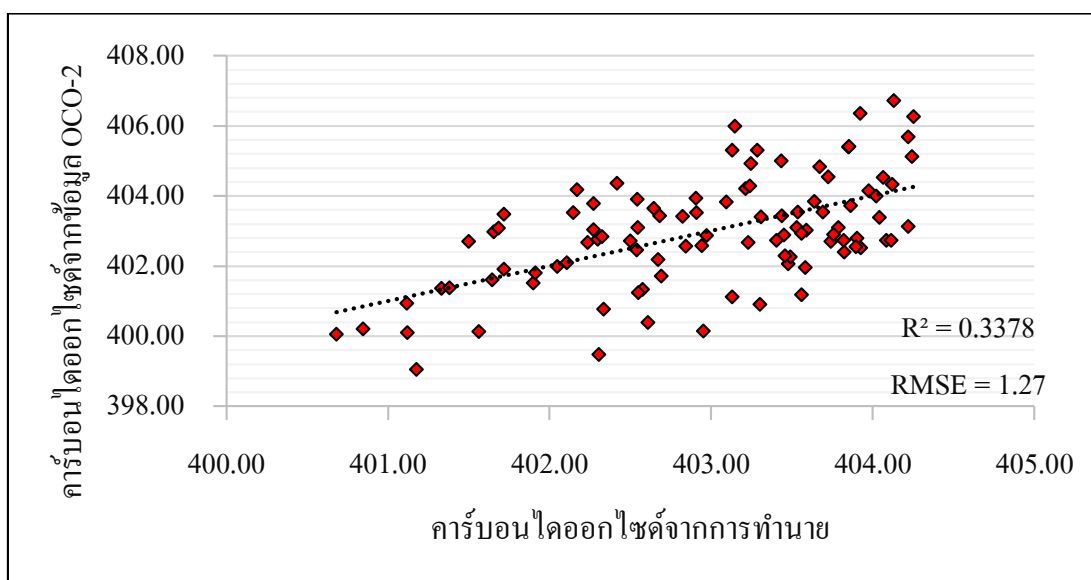
LST คือ อุณหภูมิพื้นผิว

ตารางที่ 4-12 ค่าสถิติของสมการถดถอยในช่วงฤดูร้อนของประเทศไทย

ค่าสถิติฤดูร้อน	Linear Regression	Polynomial Regression
ค่าสหสัมพันธ์	0.5772	0.5812
ค่า $R^2$	0.3332	0.3378
Adjusted R Square	0.3262	0.3239
ความคลาดเคลื่อน RMSE	1.27	1.27
จำนวนตัวอย่าง	98	98

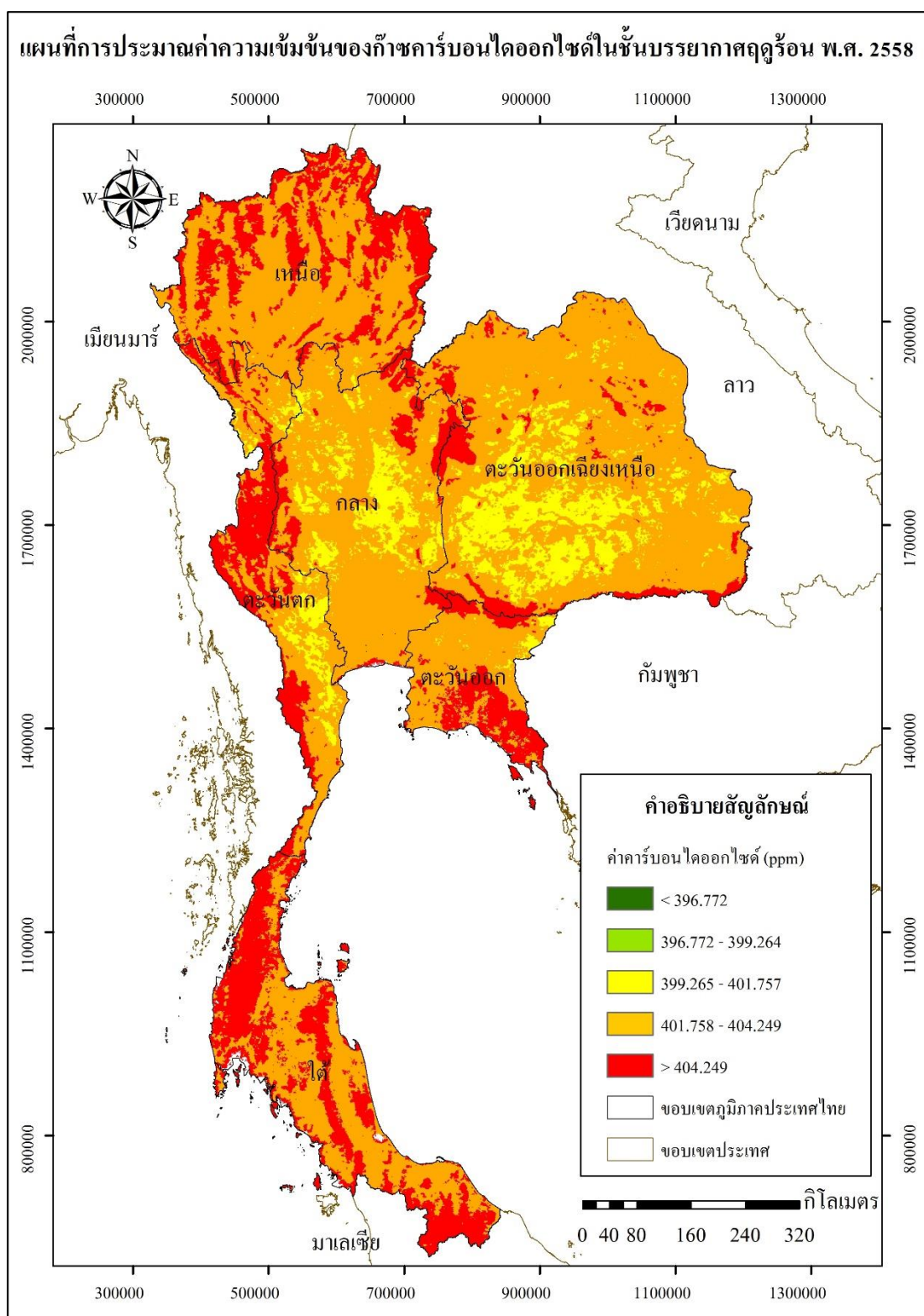


ภาพที่ 4-29 การกระจายตัวของค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากสมการถดถอยเชิงเส้นในช่วงฤดูร้อน ของประเทศไทย

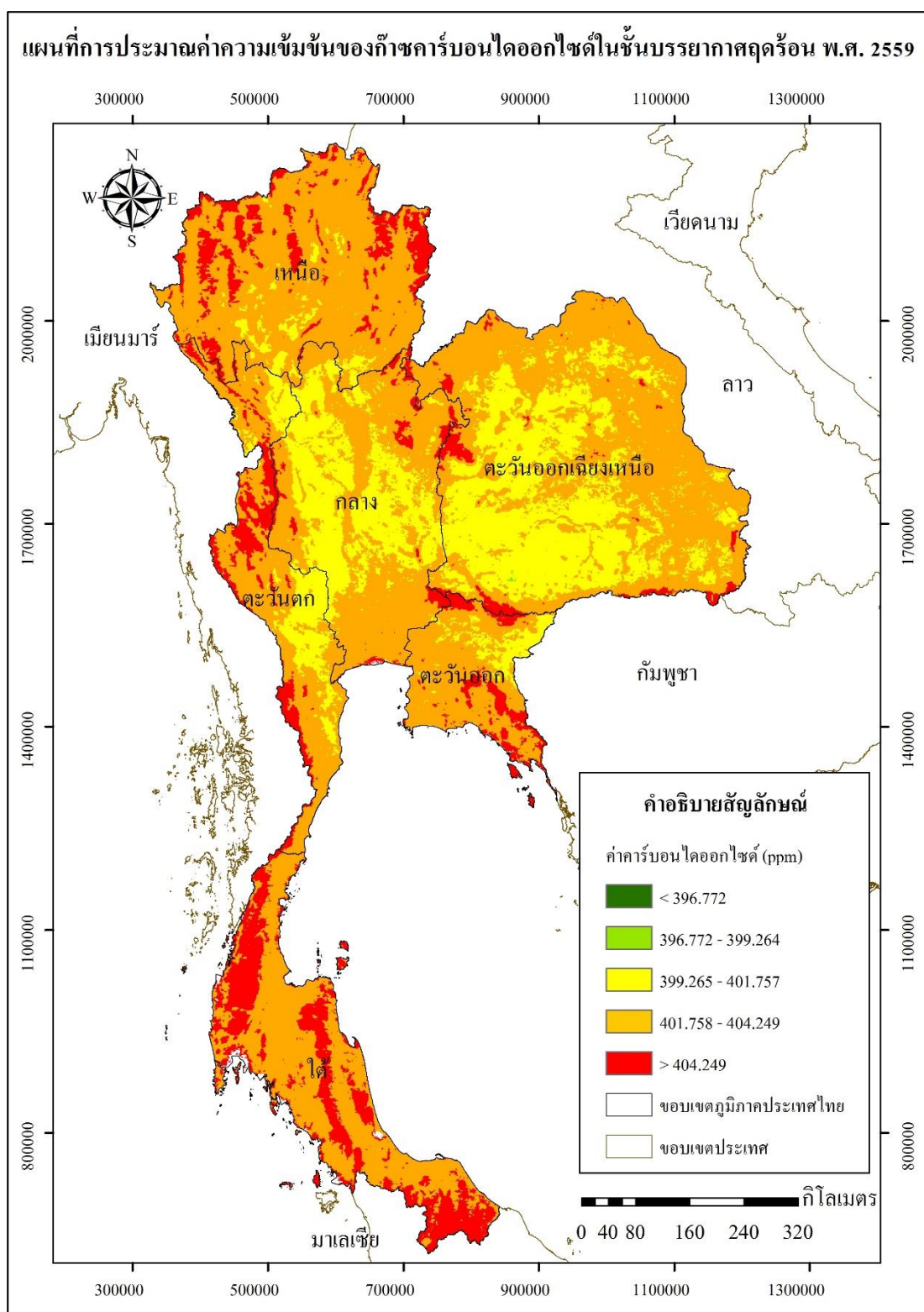


ภาพที่ 4-30 การกระจายตัวของค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากสมการถดถอยไม่ใช่เชิงเส้นแบบ Polynomial ในช่วงฤดูร้อนของประเทศไทย





ภาพที่ 4-31 แผนที่การประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศฤดูร้อน พ.ศ. 2558



ภาพที่ 4-32 แผนที่การประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศฤดูร้อน พ.ศ. 2559

และผลการศึกษาในช่วงฤดูฝน พบว่า ตัวแปรต้นที่ถูกคัดเลือกเข้าสู่สมการ คือ อุณหภูมิพื้นผิวและอัตราการผลิตปฐมภูมิ จากตารางที่ 4-13 เมื่อนำมาสร้างสมการถดถอยเชิงเส้น มีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.6262 มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ  $R^2$  เท่ากับ 0.3922 มีค่าความคลาดเคลื่อน RMSE เท่ากับ 1.92 ppm แสดงเป็นกราฟได้ดังภาพที่ 4-33 และสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 4-5 ส่วนสมการถดถอยไม่ใช้เชิงเส้นแบบ Polynomial มีค่าสหสัมพันธ์เท่ากับ 0.6491 มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ  $R^2$  เท่ากับ 0.4213 มีค่าความคลาดเคลื่อน RMSE เท่ากับ 1.88 ppm แสดงเป็นกราฟได้ดังภาพที่ 4-34 และสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 4-6 สรุปได้ว่า สมการที่มีความเหมาะสมสำหรับการประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศในช่วงฤดูฝน คือ สมการถดถอยไม่ใช้เชิงเส้นแบบ Polynomial โดยเมื่อแสดงผลออกมาเป็นแผนที่ยังภาพที่ 4-35 และ 4-36 พบว่า พื้นที่ที่มีค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศสูงแทนด้วยสีแดง คือ พื้นที่บริเวณป่าไม้ของแต่ละภาค ส่วนพื้นที่ที่มีค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์น้อยแทนด้วยสีเขียวเข้มจะเป็นพื้นที่ราบ

$$CO_2 = 385.36 - 0.861(LST) + 72.065(GPP) \quad (4-5)$$

$$CO_2 = 385.36 + 2.62(LST) - 0.07(LST)^2 - 425.22(GPP) + 8018.02(GPP)^2 \quad (4-6)$$

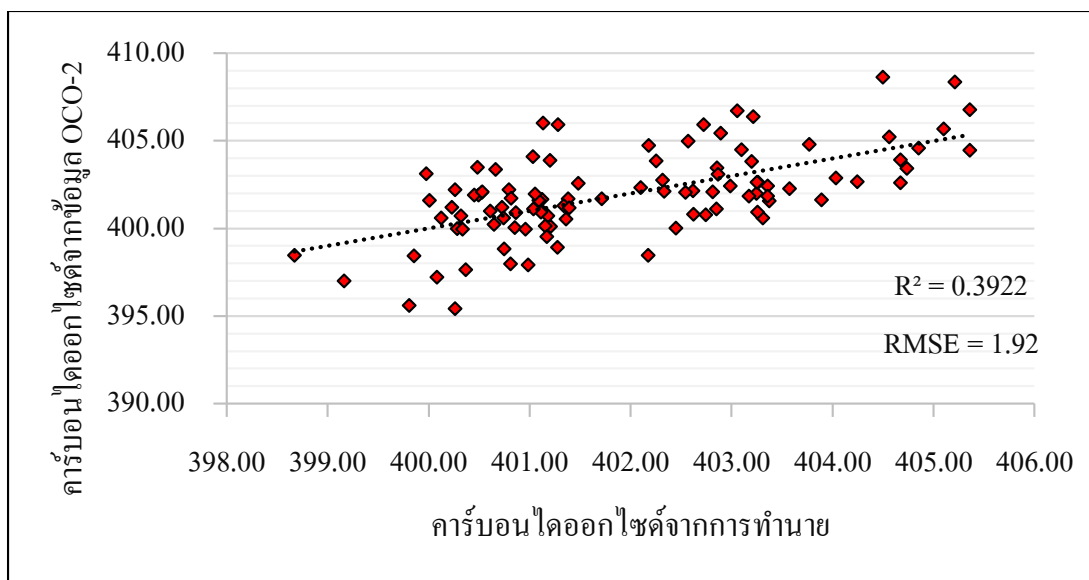
เมื่อ  $CO_2$  คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ

LST คือ ค่าอุณหภูมิพื้นผิวดิน

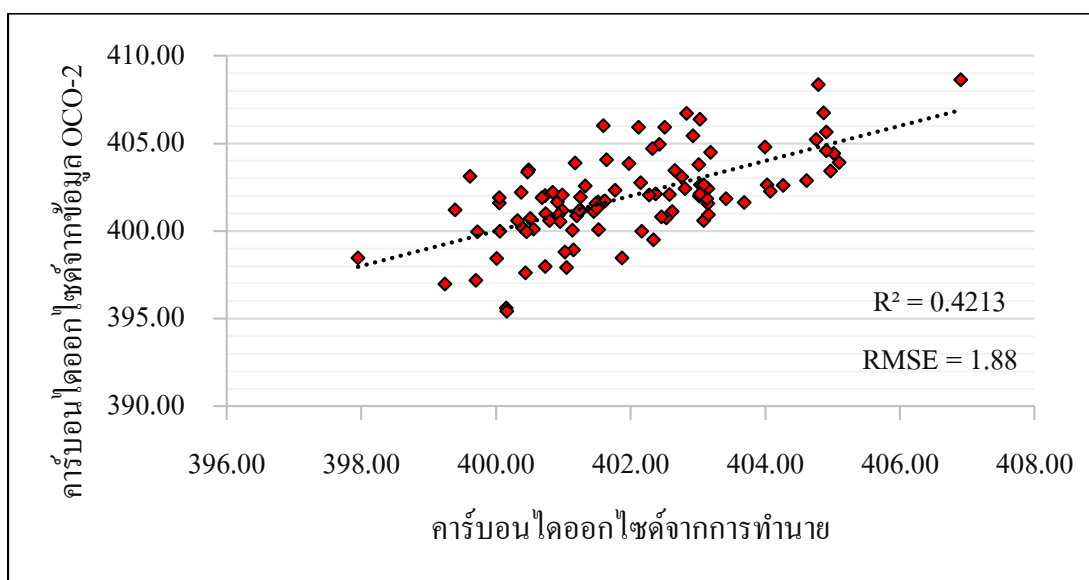
GPP คือ ค่าอัตราการผลิตปฐมภูมิ

ตารางที่ 4- 13 ค่าสถิติของสมการถดถอยในช่วงฤดูฝนของประเทศไทย

ค่าสถิติฤดูฝน	Linear Regression	Polynomial Regression
ค่าสหสัมพันธ์	0.6262	0.6490
ค่า $R^2$	0.3922	0.4213
Adjusted R Square	0.3798	0.3972
ความคลาดเคลื่อน RMSE	1.92	1.88
จำนวนตัวอย่าง	101.000	101

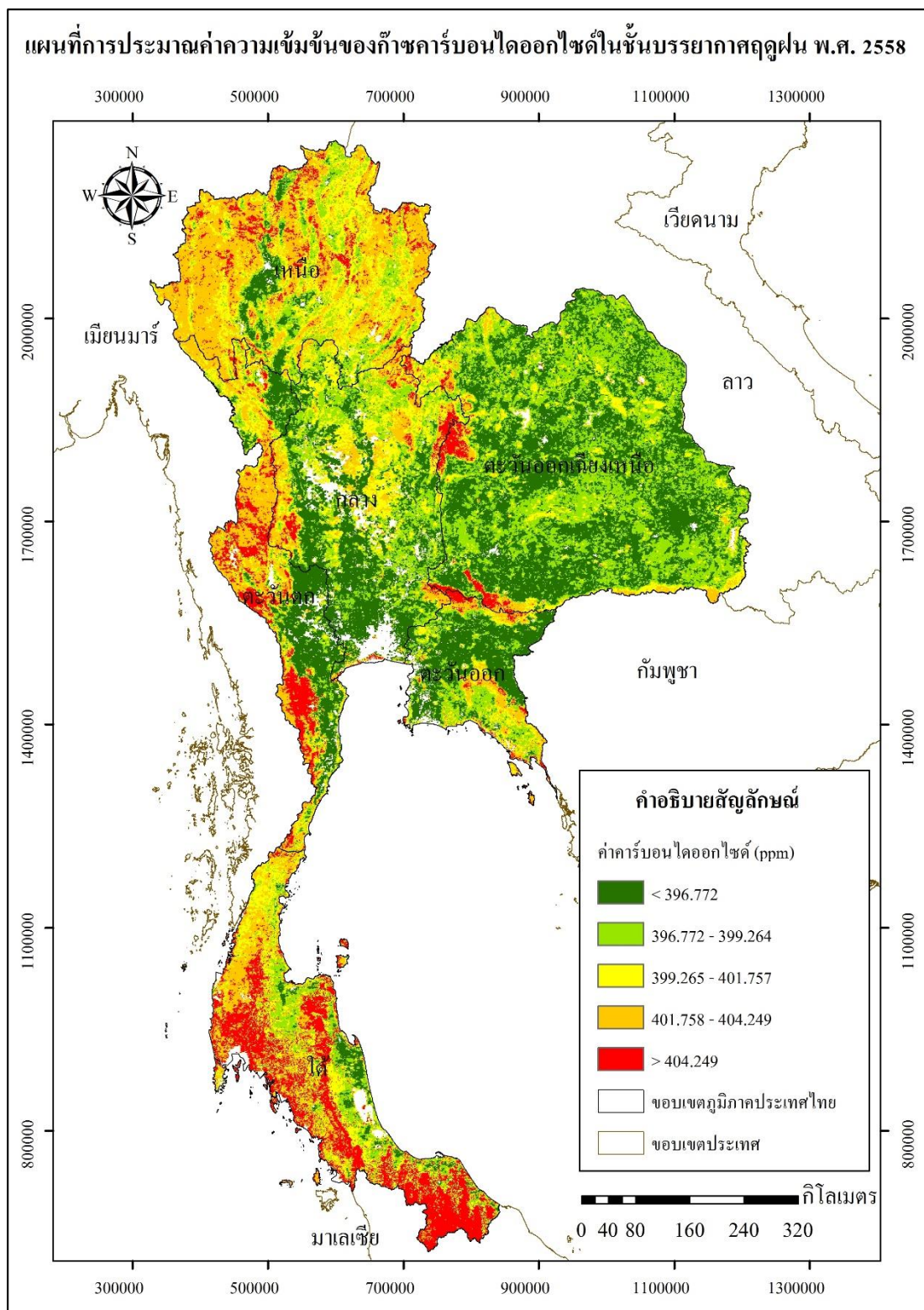


ภาพที่ 4-33 การกระจายตัวของค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากสมการถดถอยเชิงเส้นในช่วงฤดูฝนของประเทศไทย

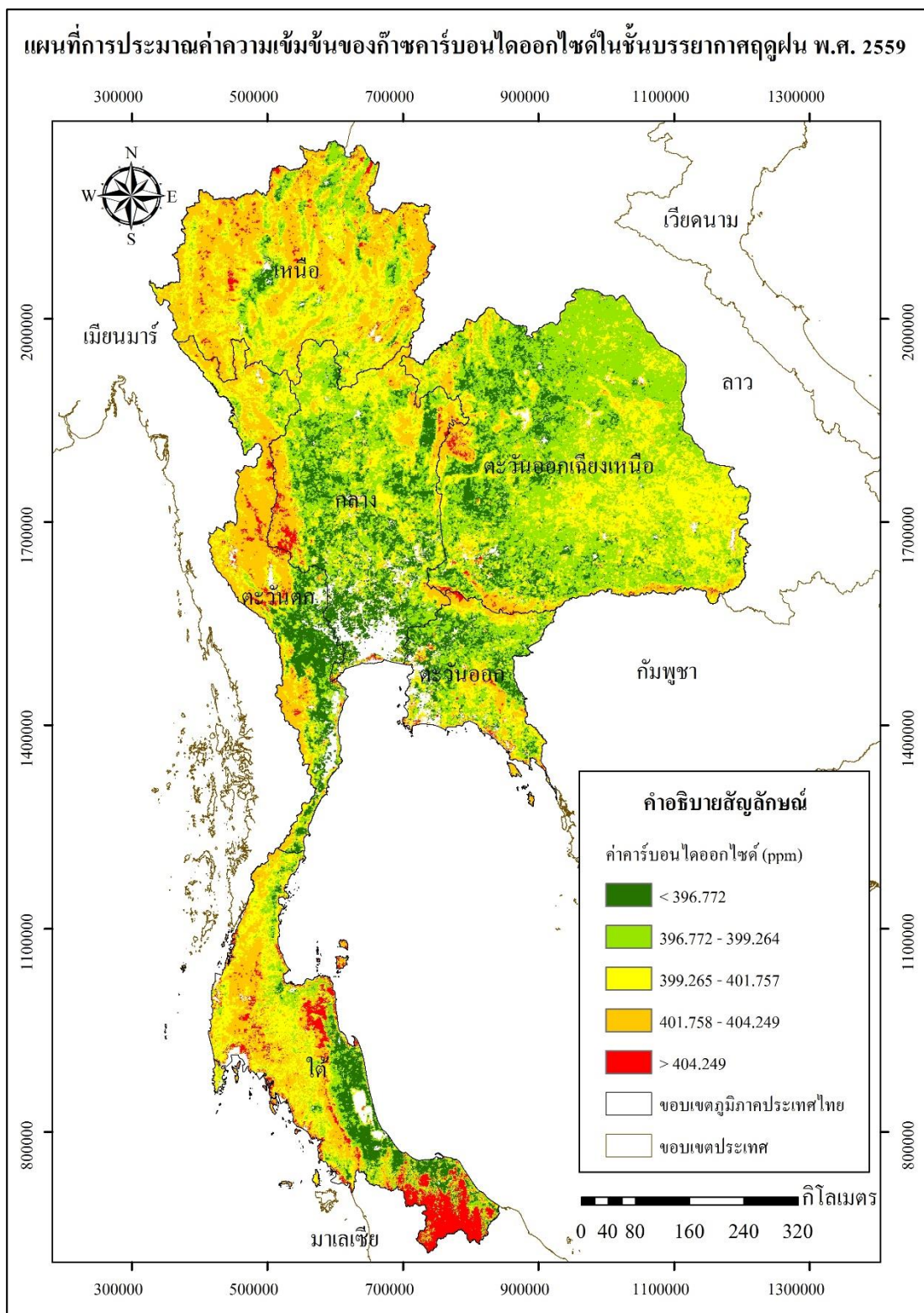


ภาพที่ 4-34 การกระจายตัวของค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากสมการถดถอยไม่ใช่เชิงเส้นแบบ Polynomial ในช่วงฤดูฝนของประเทศไทย





ภาพที่ 4-35 แผนที่การประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ  
ฤดูฝน พ.ศ. 2558



ภาพที่ 4-36 แผนที่การประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ  
ฤดูฝน พ.ศ. 2559

## บทที่ 5

### สรุปและอภิปรายผลการศึกษา

#### สรุปผลการศึกษา

การประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจากดาวเทียม OCO-2 และชุดผลิตภัณฑ์จากข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS และสร้างสมการสำหรับประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในชั้นบรรยากาศของฤดูหนาว ฤดูร้อน และฤดูฝน รวม 3 ฤดูกาล ของประเทศไทย พบว่า

ฤดูหนาว ตัวแปรต้นทุกตัวมีความสัมพันธ์กับค่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับนัยสำคัญมากกว่าหรือเท่ากับ 0.01 ซึ่งค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI มีค่าสหสัมพันธ์มากที่สุดเท่ากับ 0.6522 และค่าอุณหภูมิพื้นผิวมีค่าสหสัมพันธ์ต่ำที่สุดเท่ากับ -0.5083 เมื่อทำการวิเคราะห์แบบลำดับขั้น (Stepwise) ตัวแปรที่ถูกคัดเลือกเข้าสู่สมการ ได้แก่ ค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI และอัตราการผลิตปฐมภูมิรวม โดยที่สมการถดถอยไม่ใช่เชิงเส้นแบบ Polynomial เป็นสมการที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อน RMSE ต่ำที่สุด เท่ากับ 1.21 ppm มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.4891 และแสดงเป็นรูปสมการได้ดังนี้  $CO_2 = 385.36 + 46.54(NDVI) - 16.63(NDVI)^2 - 432.30(GPP) + 3861.92(GPP)^2$

ฤดูร้อน ตัวแปรต้นทุกตัวมีความสัมพันธ์กับค่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับนัยสำคัญมากกว่าหรือเท่ากับ 0.01 ซึ่งค่าอุณหภูมิพื้นผิว มีค่าสหสัมพันธ์มากที่สุดเท่ากับ -0.5772 และค่าดัชนีพืชพรรณ EVI มีค่าสหสัมพันธ์ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.4569 เมื่อทำการวิเคราะห์แบบลำดับขั้น ตัวแปรที่ถูกคัดเลือกเข้าสู่สมการ ได้แก่ ค่าอุณหภูมิพื้นผิวเพียงตัวแปรเดียว โดยที่สมการถดถอยเชิงเส้นและถดถอยไม่ใช่เชิงเส้นมีค่าความคลาดเคลื่อน RMSE ไม่แตกต่างกัน สมการถดถอยเชิงเส้นจึงมีความไม่ซับซ้อนและเหมาะสมต่อการนำมาใช้งาน โดยมีค่าความคลาดเคลื่อน RMSE ต่ำที่สุด เท่ากับ 1.27 ppm มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.3332 และแสดงเป็นรูปสมการได้ดังนี้  $CO_2 = 412.66 - 0.28(LST)$

ฤดูฝน ตัวแปรต้นทุกตัวมีความสัมพันธ์กับค่าคาร์บอนไดออกไซด์ที่ระดับนัยสำคัญมากกว่าหรือเท่ากับ 0.01 เช่นเดียวกับฤดูหนาวและฤดูร้อน ซึ่งค่าอุณหภูมิพื้นผิว มีค่าสหสัมพันธ์มากที่สุดเท่ากับ -0.6055 และค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI มีค่าสหสัมพันธ์ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.3850 เมื่อทำการวิเคราะห์แบบลำดับขั้น ตัวแปรที่ถูกคัดเลือกเข้าสู่สมการ ได้แก่ ค่าอุณหภูมิและอัตราการผลิตปฐมภูมิรวม โดยที่สมการถดถอยไม่ใช่เชิงเส้นแบบ Polynomial เป็นสมการที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อน RMSE ต่ำที่สุด เท่ากับ 1.88 ppm มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.4213 และแสดงเป็นรูปสมการได้ดังนี้  $CO_2 = 385.36 + 2.62(LST) - 0.07(LST)^2 - 425.22(GPP) + 8018.02(GPP)^2$

สรุปได้ว่าการนำข้อมูลระหว่างดาวเทียม OCO-2 และชุดข้อมูลผลิตภัณฑ์จากข้อมูลดาวเทียม Terra ระบบ MODIS สามารถสร้างสมการสำหรับประมาณค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศเพื่อให้ครอบคลุมทั้งประเทศไทยได้เป็นอย่างดี รวมจำนวน 6 สมการ ซึ่งฤดูหนาวเป็นฤดูกาลที่มีค่าความคลาดเคลื่อนของสมการต่ำที่สุด รองลงมา คือ ฤดูร้อนและฤดูฝน

## อภิปรายผลการศึกษา

การประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศประเทศไทย จากข้อมูลจากดาวเทียม OCO-2 และชุดผลิตภัณฑ์จากข้อมูลจากดาวเทียม Terra ระบบ MODIS โดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์และสร้างสมการสำหรับประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ แบ่งประเด็นอภิปรายผลการศึกษาดังต่อไปนี้

1. ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศของประเทศไทย จะเพิ่มขึ้นในฤดูหนาวและเพิ่มขึ้นสูงสุดในฤดูร้อน ซึ่งสอดคล้องกับบทความขององค์การนาซ่า (NASA, 2017) ที่ได้อธิบายถึงรูปแบบการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศในซีกโลกเหนือว่า ในช่วงฤดูใบไม้ร่วงและฤดูหนาว (กลางเดือนกันยายนถึงกลางเดือนมีนาคมในประเทศไทย) เมื่อพืชพรรณเริ่มผลัดใบ การดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงจะลดลงส่งผลให้มีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น และจะมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดในช่วงต้นฤดูใบไม้ผลิ (กลางเดือนเมษายน) และยังคงสอดคล้องกับการวิจัยของศูนย์ข้อมูลก๊าซเรือนกระจกที่อธิบายว่า ในช่วงฤดูแล้งที่พืชมีการผลัดใบ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกนำมาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงน้อยลง จึงทำให้ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นในช่วงฤดูแล้ง (ศูนย์ข้อมูลก๊าซเรือนกระจกองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก, 2559)

2. ความสัมพันธ์ระหว่างคาร์บอนไดออกไซด์กับดัชนีพืชพรรณ NDVI ดัชนีพืชพรรณ EVI ดัชนีพื้นผิวใบ อัตราการผลิตปฐมภูมิรวม และสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสงแบบแปรผันตาม สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Meng Guo et al. (2015) ที่ได้ประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในฤดูกาลเพาะปลูกจากข้อมูลจากดาวเทียม GOSAT และจากข้อมูลดาวเทียม Terra ระบบ MODIS โดยอธิบายว่า ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูง ในบริเวณพื้นที่ป่าไม้ เป็นผลมาจากพืชมีการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง มิได้หมายความว่า พื้นที่ป่าไม้มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาเป็นจำนวนมาก แต่นั่นหมายถึง พื้นที่ป่าไม้คือแหล่งดูดซับ



คาร์บอนไดออกไซด์ที่ดีที่สุด ซึ่งจากการศึกษาดัชนีพืชพรรณ NDVI และ EVI ของประเทศไทย พบว่า ภาคใต้มีค่าเฉลี่ยสูงกว่าภาคอื่น ๆ ในทุกฤดูกาลของทั้ง 2 ปี เนื่องจาก ภาคใต้มีพืชพรรณอุดมสมบูรณ์มากที่สุด มีลักษณะของพืชพรรณที่ไม่ผลัดใบ อยู่ในเขตร้อนชื้นและได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ที่พัดพาฝนเข้าสู่ประเทศไทย ดังนั้น พื้นที่ป่าในภาคใต้ของประเทศไทย จึงเป็นแหล่งดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ได้เป็นจำนวนมากในทุก ๆ ฤดูกาล

3. สมการสำหรับประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในครั้งนี้ได้ใช้ข้อมูลคาร์บอนไดออกไซด์จากดาวเทียม OCO-2 โดยแบ่งเป็นช่วงฤดูกาล พร้อมทั้งมีการวิเคราะห์แบบลำดับขั้น (Stepwise) เพื่อลดตัวแปรที่มีความสัมพันธ์ในตัวเอง และมีการสร้างสมการถดถอยทั้งแบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นเปรียบเทียบกัน เพิ่มเติมจากงานวิจัยของ Meng Guo et al. (2015) ผลที่ได้คือ สมการมีรูปแบบไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการใช้งานและยังสามารถเลือกรูปแบบของสมการที่มีค่าความคลาดเคลื่อน RMSE น้อยที่สุดสำหรับการประมาณค่า จากการตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อน RMSE ของสมการมีค่าใกล้เคียงกัน คือ ไม่เกิน 2 ppm ซึ่งสมการดังกล่าวสามารถนำมาใช้ในการประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศได้เป็นอย่างดี

4. เมื่อทำการวิเคราะห์แบบลำดับขั้นแล้ว นำมาสร้างเป็นสมการถดถอยเชิงเส้นและไม่เชิงเส้นนั้น ยังมีค่า  $R^2$  ที่อยู่ในระดับน้อยถึงปานกลาง เนื่องจาก เป็นค่าคาร์บอนไดออกไซด์มีสถานะเป็นก๊าซที่อยู่ในชั้นบรรยากาศ ซึ่งมีความแปรปรวนค่อนข้างสูง เนื่องจาก แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของก๊าซมีค่าน้อยมาก ทำให้โมเลกุลของก๊าซเคลื่อนที่ตลอดเวลา โดยมีทิศทางไม่แน่นอน ก๊าซสามารถฟุ้งกระจายได้ง่าย ความดัน ปริมาตร และอุณหภูมิมีผลทำให้สมบัติต่าง ๆ ของก๊าซเปลี่ยนไป (ปริยา อนุพงษ์อ้ออาจ, มปป.) เมื่อนำมาศึกษาความสัมพันธ์กับตัวแปรที่มีลักษณะเป็นพื้นผิวที่มีรูปร่างและตำแหน่งที่แน่นอน จึงส่งผลต่อการวิเคราะห์

### ข้อเสนอแนะ

1. การประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศครั้งนี้ใช้ข้อมูลจำนวน 2 ปี เนื่องมาจากดาวเทียม OCO-2 ถูกส่งขึ้นสู่วงโคจรในปลายปี พ.ศ. 2557 จึงทำให้ข้อมูลที่ได้ยังไม่มากเพียงพอ ดังนั้น ในอนาคตจึงควรเพิ่มจำนวนความถี่ของปีในการศึกษา โดยอาจทำการศึกษาเป็นแบบ Time Series เพื่อให้สมการสำหรับประมาณค่ามีความเหมาะสมและมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำที่สุด

2. ข้อมูลที่ได้จากดาวเทียม OCO-2 ในฤดูฝน มีจำนวนข้อมูลไม่มากนัก เนื่องจากดาวเทียม OCO-2 เป็นดาวเทียมระบบ Passive ที่ต้องอาศัยพลังงานจากดวงอาทิตย์ และไม่สามารถ

ทะเลหลวงเมฆได้ ส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนของสมการสูงกว่าฤดูกาลอื่น ดังนั้น หากต้องการสมการประมาณค่าที่มีค่าคลาดเคลื่อนต่ำ จึงควรเลือกสมการประมาณค่าในช่วงฤดูหนาว

3. สมการสำหรับการประมาณค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนจากกลุ่มตัวอย่างเพียงด้านเดียว ไม่ได้ตรวจสอบความคลาดเคลื่อนจากสถานีตรวจวัดภาคพื้นดิน เนื่องจาก ประเทศไทยไม่มีสถานีตรวจวัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อย่างเป็นทางการ ดังนั้น ในอนาคตหน่วยงานที่เกี่ยวข้องควรสนับสนุนการติดตั้งสถานีดังกล่าวข้างต้นเพื่อใช้ในการติดตามและสอบเทียบ (Calibrate) สมการเพื่อให้ความถูกต้องน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

4. การศึกษาครั้งนี้มีการประมาณค่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศตามฤดูกาล ซึ่งพบว่า ฤดูกาลมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าเฉลี่ยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในอนาคตจึงควรศึกษาลงรายละเอียดในรายเดือน เพื่อเพิ่มรายละเอียดของชิ้นงานและลดความแปรปรวนอันเนื่องมาจากจำนวนข้อมูลที่มีระยะเวลาแตกต่างกันมากเกินไป

5. ในการสรุปผล ได้สรุปผลเป็นรายภาคตามขอบเขตการปกครองของประเทศไทย ซึ่งค่าที่ได้เปรียบเสมือนตัวแทนบริเวณนั้น ๆ เนื่องจาก การศึกษาคาร์บอนไดออกไซด์ที่อยู่ในชั้นบรรยากาศนั้นในความเป็นจริงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไม่ได้ถูกจำกัดอยู่ในขอบเขตการปกครองในอนาคตจึงควรทำการศึกษาเป็นโซนพื้นที่ หรือกำหนดบริเวณขึ้นมาเพื่อที่จะสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการติดตาม หรือสนับสนุนในการตัดสินใจเพื่อช่วยลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างชัดเจน

## บรรณานุกรม

- กรีนพีซ. (2553). การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์. เข้าถึงได้จาก <http://www.greenpeace.org/seasia/th/campaigns/climate-and-energy/climate-change-science/co2-emissions/>
- \_\_\_\_\_. (2553). ปραภฏการณั้เรื้อนกระจก. เข้าถึงได้จาก <http://www.greenpeace.org/seasia/th/campaigns/climate-and-energy/climate-change-science/greenhouse-effect/>
- กรมอุตุนิยมวิทยา. (2558). ภูมิอากาศของประเทศไทย. เข้าถึงได้จาก [https://www.tmd.go.th/info/climate\\_of\\_thailand-2524-2553.pdf](https://www.tmd.go.th/info/climate_of_thailand-2524-2553.pdf)
- \_\_\_\_\_. (2559). อุณหภูมิเดือนเมษายน 2559 ทำลายสถิติของประเทศไทย. วันที่ค้นข้อมูล 25 พฤศจิกายน 2559, เข้าถึงได้จาก <https://www.tmd.go.th/programs/uploads/weatherclimate/aprilbreakrecord.pdf>
- คมกฤษณ์ คีร์รัมย์. (2554). การศึกษาอัตราการแพร่กระจายก๊าซมีเทนในนาข้าวจากดัชนีพีซพรอม โดยประยุกต์ใช้ภาพถ่ายจากดาวเทียม LANDSAT-5 TM กรณีศึกษา อำเภอบางน้ำเปรี้ยว จังหวัดฉะเชิงเทรา. เข้าถึงได้จาก <http://libdcms.nida.ac.th/thesis6/2554/b171623.pdf>
- จักรกฤษณ์ ดาวไชสง. (2553). ภูมิศาสตร์ประเทศไทย. เข้าถึงได้จาก <http://jakkrit-geography2.blogspot.com/>
- ชาญณรงค์ ตั้งคณาทรัพย์. (2551). การวิเคราะห์ผลผลิตภาพของน้ำสำหรับการปลูกข้าว ในพื้นที่โครงการเจ้าพระยาตอนบน โดยใช้แบบจำลองพยากรณ์ผลผลิตพืชและเทคนิคการสำรวจระยะไกล. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมชลประทาน, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ทรงกต ทศานนท์. (2550). การวิเคราะห์และแปลภาพเชิงตัวเลข (*Digital Image Analysis and Interpretation*). นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- นราธิป เฟ่งพิศ. (2559). การประมาณค่าอุณหภูมิพื้นผิวดินจากข้อมูลจากดาวเทียม จังหวัดระยอง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, สาขาวิชาภูมิสารสนเทศศาสตร์, คณะภูมิสารสนเทศศาสตร์, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- ปรีชา อนุพงษ์อ้อจ. (มปป.). กฎของก๊าซ. เข้าได้จาก <http://www.rsu.ac.th/science/physics/pom/physics1/gas/gas.pdf>
- ฟิสิกส์ราชวมงคล. (มปป.). การแผ่รังสีของวัตถุดำ. เข้าถึงได้จาก <http://www.rmutphysics.com/charud/virtualexperiment/virtual3/blackbody/index2.html>
- การดี ช่วยบำรุง และชญัญญา ประพันธ์พจน์. (2558). ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ภายในระบบขนส่งมวลชนทางบกในเขตกรุงเทพมหานคร. เข้าถึงได้จาก <https://www.tci-thaijo.org/index.php/tstj/article/download/41328/34159>

- มหาวิทยาลัยแม่โจ้. (มปป.). *อัตราผลิตในระบบนิเวศ (Productivity in Ecosystem)*. เข้าถึงได้จาก <http://coursewares.mju.ac.th:81/e-learning46/bi100/22.htm>
- วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. (2559). *ภูมิภาคของประเทศไทย*. เข้าถึงได้จาก <https://th.wikipedia.org/wiki/ภูมิภาคของประเทศไทย>
- วลดา เดชะพงศัรนา. (2559). ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวและดัชนีความแตกต่างพืชพรรณของพื้นที่นาข้าวในแต่ละช่วงการเจริญเติบโต จากข้อมูลดาวเทียม. *ว.เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศมหาวิทยาลัยบูรพา*, 1(2). 14-30.
- ศักรินทร์ นนทพจน์ และมัลลิกา สมพลกรัง. (2557). *ความสัมพันธ์ระหว่างการขยายตัวการท่องเที่ยวกีฬาการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในประเทศไทย*. เข้าถึงได้จาก [http://www.journal.msu.ac.th/upload/articles/article69\\_24414.pdf](http://www.journal.msu.ac.th/upload/articles/article69_24414.pdf).
- ศูนย์ข้อมูลก๊าซเรือนกระจกองค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน). (2559). *การประเมินก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศของประเทศไทย*. เข้าถึงได้จาก [http://conference.tgo.or.th/download/tgo\\_or\\_th/Article/2016/Conc%20project\\_14122016\\_Final.pdf](http://conference.tgo.or.th/download/tgo_or_th/Article/2016/Conc%20project_14122016_Final.pdf)
- ศูนย์รวมตำราเรียนรามคำแหงบนโลกอินเทอร์เน็ต. (2545). *คาร์บอนไดออกไซด์กับการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ*. เข้าถึงได้จาก <http://e-book.ram.edu/e-book/g/GE410/chapter11.pdf>
- สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ. (มปป.). *วัสดุอ้างอิงเพื่อการตรวจวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ*. เข้าถึงได้จาก <http://www.nimt.or.th/etrm/upload/basicdescription/file-8.pdf>
- สายรุ้ง แวดตะคุ สุจินณา วรรณสุด และสุรัตน์ บัวเลิศ. (2558). *ประสิทธิภาพในการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างพื้นที่สีเขียวในเขตเมืองและพื้นที่สีเขียวในเขตชนบท*. เข้าถึงได้จาก [http://scijournal.kku.ac.th/files/Vol\\_43\\_No\\_3\\_P\\_446-458.pdf](http://scijournal.kku.ac.th/files/Vol_43_No_3_P_446-458.pdf)
- แสวง เกิดประทุม. (2559). *คาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide)*. เข้าถึงได้จาก <http://www.tistr.or.th/ed/?p=566>
- สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน). (2552). *ตำราเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศศาสตร์*. เข้าถึงได้จาก [https://issuu.com/iskd/docs/space\\_geo](https://issuu.com/iskd/docs/space_geo)
- เอกลักษณ์ สลักคำ. (2553). *การประยุกต์ใช้ข้อมูลการรับรู้ระยะไกลเพื่อประมาณค่าอุณหภูมิพื้นผิวดิน*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาการคอมพิวเตอร์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก. (2558). *สถานการณ์ก๊าซเรือนกระจก/อนุสัญญา UNFCCC*. เข้าถึงได้จาก <http://www.tgo.or.th/2015/thai/content.php?s1=9&s2=175&sub3=sub3>
- Becker, F., & Li, Z.-L. (1995). Surface temperature and emissivity at various scales: Definition, measurement and related problems. *Remote Sens*, 12, 225-253. Retrieved from

- <https://www.researchgate.net/publication/239727004>
- Curtis Mobley. (2014). *Bi-Directional Reflectance Distribution Function*. Retrieved from [http://www.oceanopticsbook.info/view/surfaces/the\\_brdf](http://www.oceanopticsbook.info/view/surfaces/the_brdf)
- Earth Data. (2014). *Science Data Sets for MODIS Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V005 (MOD13Q1)*. Retrieved from [https://lpdaac.usgs.gov/dataset\\_discovery/modis/modis\\_products\\_table/mod13q1](https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod13q1)
- Gary Witt. (2013). *Using Data from Climate Science to Teach Introductory Statistics*. Retrieved from <http://ww2.amstat.org/publications/jse/v21n1/witt.pdf>
- Gibson, P.J., and Power, C.H. (2000). *Introductory Remote Sensing Digital Image Processing And Applications*. London: Routledge.
- Gillespie, A. R., Rokugawa, S., Matsunaga, T., Cothorn, J. S., Hook, S. J., & Kahle, A. B. (1998). A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*, 36, 1113-1126. Retrieved from <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=700995>
- Harrisgeospatial. (2013). *Vegetation Analysis: Using Vegetation Indices in ENVI*. Retrieved from <http://www.harrisgeospatial.com/Learn/WhitepapersDetail/TabId/802/ArtMID/2627/ArticleID/13742/Vegetation-Analysis-Using-Vegetation-Indices-in-ENVI.aspx>
- Herrmann, S.M., Anyamba, A. and Tucker, C.T. (2005). *Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate*. *Global Environmental Change*. 15: 394-404.
- Huete, A. R., Justice, C., & van Leeuwen, W. (1996). *MODIS vegetation index (mod13)*. Algorithm theoretical basis document. Version 2. Greenbelt, Maryland 20771. USA: NASA Goddard Space Flight Center.
- Huete, A. R., Liu, H. Q., Batchily, K., & vanLeeuwen, W. (1997). A comparison of vegetation indices global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 59, 440–451.
- ICTInternational. (n.d.). *Hand Held Remote Sensing Instrumentation*. Retrieved from <http://ictinternational.com/casestudies/hand-held-remote-sensing-instrumentation/>
- Jimenez-Munoz, J. C., & Soborino, J. A. (2003). A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of Geophysical*

- Research*, 108. Retrieved from [http://www.uv.es/ucg/articulos/2005/Publications\\_2003\\_13.pdf](http://www.uv.es/ucg/articulos/2005/Publications_2003_13.pdf)
- Kuenzer, C. (2013). *Physical Principle of Remote Sensing*. Retrieved from <https://earth.esa.int/documents/973910/1002056/CK3.pdf/4e5b4e5a-d898-43b8-9e5c-ba7494aa58c8>
- McMillin, L. M. (1975). *Estimation of sea surface temperature from two infrared window measurements with different absorption*. *Journal of Geophysical Research*, 20, 11587-11601. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/248787140>
- Meng Guo, Jiawei Xu, Xiufeng Wang, Hongshi He, Jing Li & Li Wu. (2015). *Estimating CO<sub>2</sub> concentration during the growing season from MODIS and GOSAT in East Asia*. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 4363–4383. Retrieved from <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431161.2015.1081305?journalCode=tres20>
- Meng Guo, Xiufeng Wang, Jing Li, Kunpeng Yi, Guosheng Zhong & Hiroshi Tani. (2012). *Assessment of Global Carbon Dioxide Concentration Using MODIS and GOSAT Data*. *Sensors*, 12, 16368-16389. Retrieved from <http://www.mdpi.com/1424-8220/12/12/16368>
- NASA. (2016). *Carbon Dioxide*. Retrieved from <http://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>
- \_\_\_\_\_. (2016). *Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2)*. Retrieved from <http://oco.jpl.nasa.gov/>
- \_\_\_\_\_. (2017). *MODIS*. Retrieved from <https://modis.gsfc.nasa.gov/>
- \_\_\_\_\_. (2017). *Seasonal Changes in Carbon Dioxide*. Retrieved from <https://svs.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/details.cgi?aid=4565&button=recent>
- Niclos, R., Caselles, V., Coll, C., & Valor, E. (2007). *Determination of sea surface temperature at large observation angles using an angular and emissivity dependent split-window equation*. *Remote Sensing of Environment*, 111, 107-1211. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/222823027>
- Norman, J. M. & Becker, F. (1995). *Terminology in thermal infrared remote sensing of natural surfaces*. *Remoted Sens*, 12, 153-166. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/016819239502259Z>
- Peng Gong, Ruiliang Pu, Greg S. Biging, Mirta Rosa Larrieu. (2003). *Estimation of Forest Leaf Area Index Using Vegetation Indices Derived From Hyperion Hyperspectral Data*.

- Retrieved from <http://nature.berkeley.edu/~penggong/PDFpapers/IEEEGong2003.pdf>
- Price, J. C. (1984). Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA 7 Advanced Very High Resolution Radiometer. *Journal of Geophysical Research*, 89, 7231-7237. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/240485214>
- Qinqin Sun, Zhifeng Wu & Jianjun Tan. (2012). The relationship between land surface temperature and land use/land cover in Guangzhou, China. *Environ Earth Sci*, 65, 1687–1694. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/251308568\\_The\\_relationship\\_between\\_land\\_surface\\_temperature\\_and\\_land\\_useland\\_cover\\_in\\_Guangzhou\\_China](https://www.researchgate.net/publication/251308568_The_relationship_between_land_surface_temperature_and_land_useland_cover_in_Guangzhou_China)
- Quora. (2016). *What does planck's curve explain?*. Retrieved from <https://www.quora.com/What-does-plancks-curve-explain>
- Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, & D.W. Deering. (1974). *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*, In: S.C. Freden, E.P. Mercanti, and M. Becker (eds) *Third Earth Resources Technology Satellite–I Symposium*. Volume I: Technical Presentations, NASA SP-351, NASA, Washington, D.C., pp. 309-317.
- Sabins, F. F. (1997). *Remote Sensing and Principles and Image Interpretation*. New York. Retrieved from <https://earth.esa.int/documents/973910/1002056/CK3.pdf/4e5b4e5a-d898-43b8-9e5c-ba7494aa58c8>
- Salisbury, J. W., Wald, A., & A'aria, D. M. (1994). *Thermal infrared remote sensing and Kirchhoff's law 1. Laboratory measurements*. *Journal of Geophysical Research*, 99, 11897-11911. Retrieved from <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc1993/pdf/1619.pdf>
- Singh R. P., S. Roy & F. Kogan. (2003). Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India. *Int. J. Remote Sens*, 24, 4393-4402.
- Snyder, W. C., & Wan, Z. (1998). *BRDF models to predict spectral reflectance and emissivity in the thermal infrared*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36, 214-225. Retrieved from <https://www.cis.rit.edu/~cnspci/references/snyder1998.pdf>
- Sobrino, J. A., Jimenez-Munoz, J. C., Soria, G. (2008). *Land surface emissivity retrieval from different VNIR and TIR sensors*. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 316-327. Retrieved from <http://www.umbc.edu/rssipl/people/aplaza/Papers/Journals/2008.TGARS.LandSurface.pdf>
- Sobrino, J. A., Li, Z. L., Stoll, M. P., & Becker, F. (1996). Multi-channel and multi-angle

- algorithms for estimating sea and land surface temperature ATSR data. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 2089-2114. Retrieved from [https://www.researchgate.net/profile/Francois\\_Becker3/publication/259062187](https://www.researchgate.net/profile/Francois_Becker3/publication/259062187)
- Van de Griend, A. A., & Owe, M. (1993). *On the relationship between thermal emissivity and normalized difference vegetation index for natural surface*. *Int J Remote sens*, 14, 1119-1131. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/23851967>
- Venkatesh Reddy Chejarla, Pramod Kumar Maheshuni & Venkata Ravibabu Mandla. (2015). *Quantification of LST and CO2 levels using Landsat-8 thermal bands on urban environment*. 1752-0762 . Retrieved from :<https://www.researchgate.net/publication/283167155>
- Wan, Z., & Dozier, J. (1996). A generalized split window algorithm for retrieving land-surface temperature from space. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*, 34, 892-905. Retrieved from <http://www2.bren.ucsb.edu/~dozier/Pubs/WanDozierIEEE1996.pdf>
- Wan, Z., Zhang, Y., Zhang, Q. C., & Li, Z. L. (2004). *Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature*. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 261-274. Retrieved from [https://www.researchgate.net/profile/Zhao-Liang\\_Li/publication/228540455\\_Quality\\_assessment\\_and\\_validation\\_of\\_the\\_MODIS\\_global\\_land\\_surface\\_temperature/links/545f27620cf27487b44f16e5.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Zhao-Liang_Li/publication/228540455_Quality_assessment_and_validation_of_the_MODIS_global_land_surface_temperature/links/545f27620cf27487b44f16e5.pdf)
- Wang, Y., Buermann, W., Stenberg, P., Smolander, H., Ha"me, T., Tian, Y., Hu, J., Knyazikhin, Y., & Myneni, R. B. (2003). Hyperspectral remote sensing of vegetation canopy: Leaf area index and foliage optical properties. *Remote Sensing of Environment*, 85, 304 – 315.



ภาคผนวก

**ภาคผนวก**  
**คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ**

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

CO <sub>2</sub>	Carbon Dioxide
OCO-2	Orbiting Carbon Observatory 2
MODIS	Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
GIS	Geographic Information Systems
GPS	Global Positioning System
EVI	Enhanced Vegetation Index
LAI	Leaf Area Index
GPP	Gross Primary Productivity
NPP	Net Primary Productivity
FPAR	Fraction of Photosynthetically Active Radiation
PAR	Photosynthetically Active Radiation
APAR	Absorbed Photosynthetically Active Radiation
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
CH <sub>4</sub>	Methane
NO <sub>2</sub>	Nitrogen Dioxide
CFC	Chlorofluorocarbon
ppm	part per million
LSE	Land Surface Emissivity
LST	Land Surface Temperature
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Near Infrared
OLI	Operational Land Imager
GOSAT	Greenhouse Gases Observing Satellite
RS	Remote Sensing
TIRS	Thermal Infrared Sensor
USGS	United States Geological Survey