



การวิเคราะห์เชิงพื้นที่และเวลาของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศด้วยเทคโนโลยีการรับรู้จากระยะไกล

Spatio-temporal Analysis of Atmospheric Carbon Dioxide through Remote Sensing Technology

ธีรวรงค์ เหล่าสุวรรณ^{1*}, พัชรินทร์ เสริมการดี²

Teerawong Laosuwan^{1*}, Patcharin Sermkarndee²

¹ รองศาสตราจารย์, ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

¹ associate professor, Department of Physics, Faculty of Science, Mahasarakham University.

² อาจารย์, สาขาวิชาสังคมศึกษา คณะศึกษาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยหาดใหญ่

² Lecturer, Department of Social Studies, Faculty of Education and Liberal Arts, Hatyai University.

*Corresponding author, E-mail: teerawong@msu.ac.th

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้คือ การวิเคราะห์เชิงพื้นที่และเวลาของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศด้วยเทคโนโลยีการรับรู้จากระยะไกลด้วยข้อมูลจากดาวเทียม IBUKI ในช่วงระยะเวลา 5 ปี การดำเนินการได้ใช้ข้อมูลจากดาวเทียม IBUKI มาทำการวิเคราะห์เชิงพื้นที่และเวลาร่วมกับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยขบวนการทางการวิเคราะห์ภาพเชิงตัวเลข สำหรับผลการดำเนินการสามารถอธิบายได้ดังนี้ (1) ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่ามีค่าต่ำสุดในปี พ.ศ. 2560 โดยมีค่าเฉลี่ยต่อปีที่ 401.10 ppm และมีค่าสูงสุดในปี พ.ศ. 2564 โดยมีค่าเฉลี่ยต่อปีที่ 409.903 ppm (2) การวิเคราะห์ตามความสูงจากระดับน้ำทะเลพบว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าเฉลี่ยต่ำสุดในปี 2560 อยู่ที่ 403.48 ppm และสูงที่สุดในปี 2564 อยู่ที่ 412.89 ppm และ (3) ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากปัจจัยเชิงฤดูกาลได้แก่ อุณหภูมิและปริมาณน้ำฝน พบว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงตามฤดูกาล โดยช่วงฤดูหนาวและฤดูร้อนระดับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในชั้นบรรยากาศมีความผันแปรตามค่าอุณหภูมิ ส่วนในช่วงฤดูฝนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศลดลงเนื่องจากพืชพรรณมีอัตราการเจริญเติบโตสูง

คำสำคัญ: การรับรู้จากระยะไกล, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์, ดาวเทียม IBUKI, การวิเคราะห์ภาพเชิงตัวเลข



Abstract

The objective of this study is to spatio-temporal analysis of atmospheric carbon dioxide through remote sensing technology: case study over a 5-year period. The operation uses data from IBUKI satellite to perform spatio-temporal analysis together with factors influencing carbon dioxide concentrations using digital image processing. The results showed that (1) carbon dioxide concentration was highest in 2021 with annual average of 409.90 ppm and lowest in 2017 with annual average of 401.10 ppm, (2) Analysis based on the height above sea level showed that the lowest carbon dioxide in 2017 was 403.48 ppm, the highest in 2021 was 412.89 ppm, (3) The concentration of carbon dioxide from seasonal factors is Temperature and rainfall found that carbon dioxide gas fluctuates depending on the season. During the winter and summer, the concentration of carbon dioxide in the atmosphere varies with the temperature. Moreover, during the rainy season, carbon dioxide in the atmosphere decreases due to the high rate of vegetation growth.

Keyword: Remote sensing, carbon dioxide, IBUKI satellite, digital image processing

บทนำ

ก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gases) หรือเรียกโดยย่อๆว่า GHG เป็นก๊าซที่มีคุณสมบัติในการดูดซับรังสีความร้อนหรือรังสีอินฟราเรดได้ดี ก๊าซเหล่านี้มีความจำเป็นต่อการรักษาอุณหภูมิในบรรยากาศของโลกให้คงที่ ซึ่งหากบรรยากาศโลกไม่มีก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศ ดังเช่นดาวเคราะห์ดวงอื่น ๆ ในระบบสุริยะแล้ว จะทำให้อุณหภูมิในตอนกลางวันนั้นร้อนจัด และในตอนกลางคืนนั้นหนาวจัด [1] ก๊าซเรือนกระจกไม่ใช่ก๊าซชนิดใดชนิดหนึ่ง แต่เป็นกลุ่มก๊าซหลาย ๆ ชนิดที่สามารถกักเก็บและดูดซับรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ไว้ในเวลากลางวันแล้วค่อย ๆ แผ่รังสีความร้อนออกมาในเวลากลางคืนทำให้อุณหภูมิในบรรยากาศโลกไม่เปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน ก๊าซเหล่านี้ประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) มีเทน (CH_4) ไนตรัสออกไซด์ (CH_4) เพอฟลูโอโรคาร์บอน (PFC) ไฮโดรฟลูโอโรคาร์บอน (HFC) ซัลเฟอร์เฮกซาฟลูออไรด์ (Sulfur Hexafluoride) [2] ทั้งนี้ นักวิทยาศาสตร์ให้ความสำคัญก๊าซกับ 3 ชนิดแรก คือ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และไนตรัสออกไซด์มากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีปริมาณถึงกว่า 70% ของปริมาณก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด [3, 4] และถึงแม้ว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะดูดซับรังสีความร้อนได้น้อยกว่า มีเทนและไนตรัสออกไซด์ แต่ด้วยความที่ถูกลดปล่อยออกมามากกว่าและคงอยู่ในบรรยากาศได้นานกว่า ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีบทบาทต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศมากกว่านั่นเอง [5] จากการศึกษาของคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ได้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญและมีสัดส่วนมากในชั้นบรรยากาศได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว



จาก 280 ppm ในช่วงปฏิวัติอุตสาหกรรมช่วง ค.ศ. 1800 เพิ่มขึ้นเป็น 360 ppm ในปี ค.ศ. 2000 และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็น 407 ppm ในปี ค.ศ. 2017 เมื่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีปริมาณเพิ่มขึ้นในชั้นบรรยากาศ ทำให้อุณหภูมิของโลกเพิ่มสูงขึ้นจนเกิดปรากฏการณ์สภาวะเรือนกระจก และนำมาซึ่งการเกิดภาวะโลกร้อนรวมถึงการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ [6-9]

ปัจจุบัน เทคโนโลยีการรับรู้จากระยะไกลโดยการใช้ข้อมูลจากดาวเทียมได้มีการพัฒนาทางด้านอุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ ค่าการสะท้อนและดูดกลืนคลื่นในย่านอินฟราเรดสะท้อน และย่านอินฟราเรดความร้อนที่แตกต่างกันของอนุภาคก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศได้โดยตรง ครอบคลุมพื้นที่ที่เป็นบริเวณกว้าง อีกทั้งมีความถี่สูงในการวิเคราะห์ซ้ำที่ตำแหน่งเดิม ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการประเมิน การติดตาม การกระจายรวมถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศได้ [10-26] ด้วยเหตุผลและความสำคัญของการเปลี่ยนแปลงของปริมาณก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศโดยเฉพาะอย่างยิ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว การศึกษานี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อการวิเคราะห์เชิงพื้นที่และเวลาของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศด้วยเทคโนโลยีการรับรู้จากระยะไกลด้วยข้อมูลจากดาวเทียม IBUKI ในช่วงระยะเวลา 5 ปี (พ.ศ.2560 ถึงปี พ.ศ.2564)

วิธีดำเนินการวิจัย

การรวบรวมข้อมูลจากดาวเทียม : ดาวเทียม IBUKI ได้ถูกสร้างขึ้นจากความร่วมมือระหว่าง โดยถูกสร้างขึ้นจากความร่วมมือระหว่าง The Japanese Aerospace Exploration Agency (JAXA), National Institute for Environmental Studies (NIES) และ Ministry of the Environment, Japan (MOE) ถูกส่งเข้าสู่วงโคจรของอวกาศเมื่อ 23 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2552 ที่ศูนย์อวกาศ Tanegashima ประเทศญี่ปุ่น ครอบคลุมพื้นที่ทั่วโลกมีความละเอียดเชิงพื้นที่อยู่ที่ 10.5 กิโลเมตร ดาวเทียม IBUKI สามารถวิเคราะห์การสะท้อนแสงและค่าการแผ่รังสีช่วงคลื่นอินฟราเรดความร้อนจากพื้นผิวโลกและชั้นบรรยากาศรวมถึงการดูดกลืนคลื่นรังสีดังกล่าวของอนุภาคก๊าซเรือนกระจก เช่น คาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน โดยตำแหน่งของดาวเทียม IBUKI อยู่ที่ระดับความสูง 666 กิโลเมตรจากพื้นโลก ใช้เวลาในการโคจรรอบโลก 1 ชั่วโมง 40 นาที และจะโคจรกลับมาสำรวจในจุดเดิมทุก 3 วัน สำหรับการศึกษานี้ได้เลือกใช้ชุดข้อมูล L3 global CO₂ distribution (SWIR)

การวิเคราะห์ข้อมูล: สำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาในเชิงพื้นที่และปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศด้วยข้อมูลจากดาวเทียม IBUKI โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพเชิงตัวเลขในช่วงระยะเวลา 5 ปี โดยขบวนการวิเคราะห์โดยสังเขปในการศึกษานี้สามารถอธิบายได้ดังนี้ (1) ทำการวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างปี พ.ศ.2560 ถึงปี พ.ศ.2564 (2) วิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากปัจจัยความสูงจาก



ระดับน้ำทะเล, และ (3) วิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากจากปัจจัยเชิงฤดูกาล ได้แก่ อุณหภูมิและปริมาณน้ำฝน โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้ในการศึกษาคั้งนี้จะถูกแสดงในรูปแบบของแผนที่และกราฟเพื่อให้ชี้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาในเชิงพื้นที่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศของประเทศไทยในรูปแบบของหน่วยของ ppm.

ผลการวิจัยและอภิปราย

จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศของประเทศไทย ด้วยข้อมูลจากดาวเทียม IBUKI ระหว่างปี พ.ศ.2560 ถึงปี พ.ศ.2564 สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1.

ตารางที่ 1. ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศ

เดือน	CO ₂ (ppm)	เดือน	CO ₂ (ppm)	เดือน	CO ₂ (ppm)
มกราคม	399.55	มกราคม	402.10	มกราคม	403.98
กุมภาพันธ์	400.07	กุมภาพันธ์	402.51	กุมภาพันธ์	404.46
มีนาคม	401.15	มีนาคม	403.28	มีนาคม	405.38
เมษายน	402.31	เมษายน	404.57	เมษายน	406.67
พฤษภาคม	402.85	พฤษภาคม	405.19	พฤษภาคม	407.34
มิถุนายน	401.70	มิถุนายน	404.2	มิถุนายน	406.31
กรกฎาคม	399.78	กรกฎาคม	402.23	กรกฎาคม	404.29
สิงหาคม	399.11	สิงหาคม	401.27	สิงหาคม	403.32
กันยายน	404.05	กันยายน	401.48	กันยายน	404.05
ตุลาคม	400.37	ตุลาคม	402.40	ตุลาคม	404.77
พฤศจิกายน	400.93	พฤศจิกายน	402.93	พฤศจิกายน	405.34
ธันวาคม	401.30	ธันวาคม	403.44	ธันวาคม	N/A

(ก) พ.ศ.2560

(ข) พ.ศ.2561

(ค) พ.ศ.2562



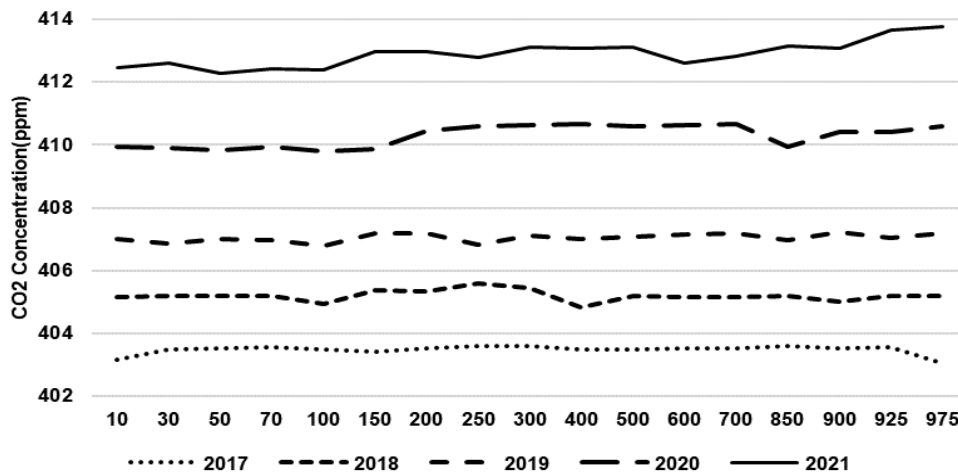
เดือน	CO ₂ (ppm)	เดือน	CO ₂ (ppm)
มกราคม	406.46	มกราคม	408.95
กุมภาพันธ์	406.73	กุมภาพันธ์	409.32
มีนาคม	407.79	มีนาคม	410.23
เมษายน	409.19	เมษายน	411.43
พฤษภาคม	410.10	พฤษภาคม	412.09
มิถุนายน	408.86	มิถุนายน	410.38
กรกฎาคม	406.94	กรกฎาคม	409.12
สิงหาคม	406.07	สิงหาคม	408.42
กันยายน	406.49	กันยายน	408.79
Oct.	407.16	ตุลาคม	409.37
Nov.	407.74	พฤศจิกายน	410.14
Dec.	408.30	ธันวาคม	410.55

(ง) พ.ศ.2563

(จ) พ.ศ.2564

จากตารางที่ 1 พบว่า ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศของประเทศไทยมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงในรอบ 1 ปีตามฤดูกาล ซึ่งฤดูกาลของประเทศไทยแบ่งออกได้เป็น 3 ฤดู คือ ฤดูร้อนเริ่มต้นประมาณกลางเดือนกุมภาพันธ์ถึงกลางเดือนพฤษภาคม ฤดูฝนเริ่มต้นประมาณกลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม และฤดูหนาวเริ่มต้นประมาณกลางเดือนตุลาคมถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ จากการศึกษาในปี พ.ศ.2560 พบว่าค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศของประเทศไทยมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 399.11 ppm และมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 402.85 ppm ในปี พ.ศ.2561 พบว่าค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในชั้นบรรยากาศของประเทศไทยมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 401.27 ppm และมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 405.19 ppm ในปี พ.ศ. 2562 พบว่าค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศของประเทศไทยมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 403.32 ppm และมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 405.19 ppm ในปี พ.ศ. 2563 พบว่าค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศของประเทศไทยมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 406.07 ppm และมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 410.10 ppm ในปี พ.ศ.2564 พบว่าค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศของประเทศไทยมีค่าต่ำสุดอยู่ที่ 408.42 ppm และมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 412.09 ppm

สำหรับผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศของประเทศไทยจากปัจจัยความสูงจากระดับน้ำทะเลตั้งแต่ระดับ 10 เมตร ถึง ระดับ 975 เมตร สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1



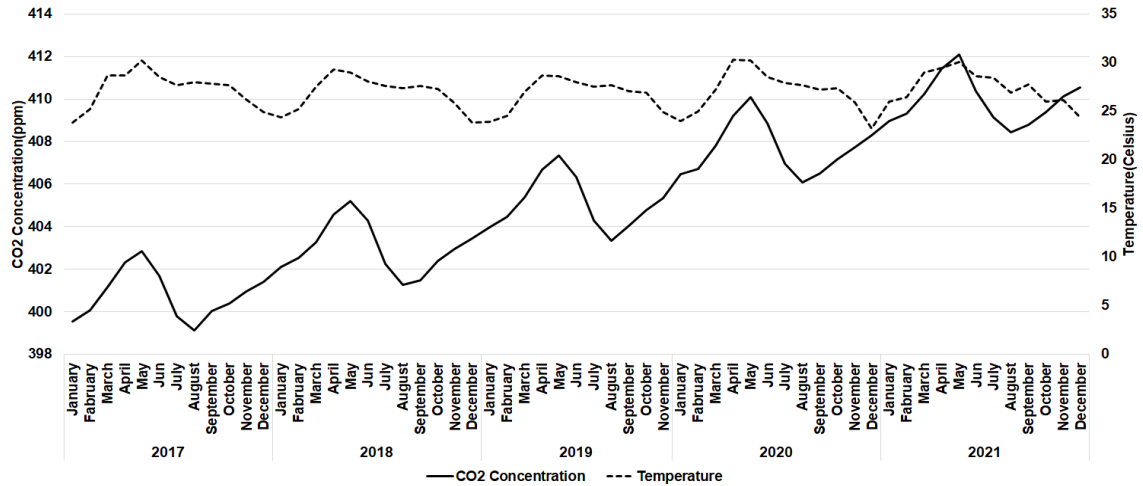
รูปที่ 1 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากปัจจัยความสูงจากระดับน้ำทะเล

จากรูปที่ 1 พบว่าประเทศไทยที่ระดับความสูงจากระดับน้ำทะเล 10 เมตร ถึง 200 เมตร ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะเพิ่มขึ้นในอัตราที่สูง และอัตราการเพิ่มมีแนวโน้มลดลงที่ระดับความสูงตั้งแต่ 200 เมตรขึ้นไป ทั้งนี้มีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยสูงสุดที่ระดับความสูงประมาณ 900 เมตร เมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายปีระหว่างปี พ.ศ.2560 ถึง พ.ศ.2564 ในชั้นบรรยากาศของประเทศไทยก็พบว่าค่าความเข้มข้นเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยค่าเฉลี่ยรายปีพบว่าในปีพ.ศ. 2560 มีค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 403.48 ppm ส่วนในปีพ.ศ. 2564 มีค่าความเข้มข้นของของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดมีค่าเท่ากับ 412.89 ppm ในส่วนผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากปัจจัยเชิงฤดูกาล ได้แก่ อุณหภูมิและปริมาณน้ำฝนในการศึกษาครั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า ค่าความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีความผันแปรตามค่าอุณหภูมิดังแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2 อีกทั้งยังมีความผันแปรตามปริมาณน้ำฝน

ทั้งนี้ ในช่วงฤดูร้อนนั้นมีการใช้เชื้อเพลิงในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจึงส่งผลทำให้ปริมาณก๊าซของ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศมีปริมาณสูงขึ้น ในช่วงฤดูฝนเป็นช่วงที่ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศจะลดลงเนื่องจากพืชพรรณมีสังเคราะห์แสงเพิ่มขึ้น ซึ่งของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศที่ถูกตรึงกลับมาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชพรรณและแปลงเป็นคาร์บอนสะสมอยู่ในรูปของเนื้อไม้ ในช่วงฤดูหนาวเป็นช่วงที่พืชพรรณมีการปรับตัวหลายอย่าง ซึ่งขบวนการที่ว่านี้มีกลไกที่สลับซับซ้อนและมีเอนไซม์เข้ามาเกี่ยวข้องจำนวนมากรวมไปถึงขบวนการทางเคมี เพื่อทำลายคลอโรฟิลล์สีเขียวจนกระทั่งพืชพรรณมีการผลัดใบ ด้วยเหตุนี้ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศที่ถูกตรึงกลับมาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชพรรณจึงลดลง อีกทั้งความชื้นในอากาศอยู่ในระดับต่ำทำให้กระบวนการแปลงของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไปเป็นกรดคาร์บอนิคลดลง ส่งผลให้ความเข้มข้นของ ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้นนั่นเอง นอกจากนี้อุณหภูมิของโลกที่



สูงขึ้นยังทำให้ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำทะเลในมหาสมุทรระเหยแยกตัวออกมาอีกด้วย



รูปที่ 2 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผันแปรตามค่าอุณหภูมิ

สรุป

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นก๊าซที่สะสมพลังงานความร้อนในบรรยากาศโลกไว้มากที่สุด และมีผลทำให้ อุณหภูมิของโลกสูงขึ้นมากที่สุดในบรรดาก๊าซเรือนกระจกชนิดอื่น ๆ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนมากเกิดจากการกระทำของมนุษย์ เช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงต่าง ๆ การขนส่ง และการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น สำหรับผลการศึกษาค้างนี้สามารถใช้เป็นเส้นฐาน (baseline) ในการติดตามสถานการณ์ของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศของประเทศไทยได้ ซึ่งจะช่วยให้หน่วยงานภาครัฐสามารถและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องนำมาใช้กำหนดนโยบายและวางแผนการดำเนินโครงการที่จะช่วยลดการปลดปล่อยและเพิ่มการดูดกลับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพ อีกทั้งนำมาใช้เป็นข้อมูลที่สนับสนุนต่อการปรับตัวต่อผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของประเทศต่อไป



เอกสารอ้างอิง

- Anagnostou E., John E.H., Edgar K.M., Foster G.L., Ridgwell A., Inglis G.N., Pancost R.D., Lunt D.J., Pearson P.N. (2016). Changing atmospheric CO₂ concentration was the primary driver of early Cenozoic climate. *Nature*, 533(7603), 380–384.
- BOESCH H., BAKER D., CONNOR B., CRISP D., MILLER C. (2011). Global Characterization of CO₂ Column Retrievals from Shortwave-Infrared Satellite Observations of the Orbiting Carbon Observatory-2 Mission. *Remote Sensing*, 3(2), 270–304.
- D. Ehalt, M. Prather et al. (2021). Causes of climate change. Retrieved from https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_en/
- GOMASATHIT T., LAOSUWAN T., SANGPRADIT S., ROTJANAKUSOL T. (2015). Assessment of Drought Risk Area in Thung Kula Rong Hai using Geographic Information Systems and Analytical Hierarchy Process. *International Journal of Geoinformatics*, 11(2), 22–27.
- Greenhouse Gas. (2019). Greenhouse Gas Emission Reduction from Thailand's Agricultural Sector. *Sains Malaysiana*, 48(10), 2083–2092.
- HAMMERLING D.M., MICHALAK A.M., KAWA S.R. (2012.). Mapping of CO₂ at high spatiotemporal resolution using satellite observations: Global distributions from OCO-2. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 117, D06306,
- HAMMERLING, D.M.; MICHALAK, A.M.; O'DELL, C.; KAWA, S.R. (2012). Global CO₂distributions over land from the Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT). *Geophysical Research Letters*, 39, L08804.
- JOMSREKRAYOM N., MEENA P., LAOSUWAN T. (2021). Spatiotemporal Analysis of Vegetation Drought Variability in the Middle of the Northeast Region of Thailand using Terra /Modis Satellite Data. *Geographia Technica*, 16(Special Issue), 70–81.
- KONG Y., CHEN B., MEASHO S. (2019). Spatio-Temporal Consistency Evaluation of XCO₂ Retrievals from GOSAT and OCO-2 Based on TCCON and Model Data for Joint Utilization in Carbon Cycle Research. *Atmosphere*, 10(7), 354.
- LAOSUWAN T, UTTARUK Y. (2017). Carbon Sequestration Assessment of the Orchards using Satellite Data. *Journal of Ecological Engineering*, 18(1), 11–17.
- LAOSUWAN T, UTTARUK Y, ROTJANAKUSOL T. (2022). Analysis of Content and Distribution of Chlorophyll-a on the Sea Surface through Data from Aqua/MODIS Satellite.



- Polish Journal of Environmental Studies, 31(5), 4711–4719.
- LIU L.J., LIANG Q. M. (2017). Changes to pollutants and carbon emission multipliers in China 2007-2012: An input-output structural decomposition analysis. *Journal of environmental management*, 203, 76–86.
- MEENA P., LAOSUWAN T. (2021). Spatiotemporal Variation Analysis of Atmospheric Carbon Dioxide Concentration using Remote Sensing Technology. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering*, 13(3), 7–13.
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2021). Carbon dioxide now more than 50% higher than pre-industrial levels. Retrieved from <https://www.noaa.gov/news-release/carbon-dioxide-now-more-than-50-higher-than-pre-industrial-levels>.
- Parker R., Boesch H., McNorton J., Comyn-Platt E., Gloor M., Wilson C., Chipperfield M.P., Hayman G.D., Bloom A.A. (2018). Evaluating year-to-year anomalies in tropical wetland methane emissions using satellite CH₄ observations. *Remote Sensing of Environment*, 211, 261–275.
- PROHMDIREK T., CHUNPANG P., LAOSUWAN T. (2020.). The Relationship between Normalized Difference Vegetation Index and Canopy Temperature that Affects the Urban Heat Island Phenomenon. *Geographia Technica*, 15(2), 222–234.
- SEYED M.M., NAGHMEH M.D., SAEED A., OLIVER S. (2022). Analyzing spatiotemporal patterns in atmospheric carbon dioxide concentration across Iran from 2003 to 2020. *Atmospheric Environment*, 14, 100–163.
- REBECCA LINDSEY. (2021). CLIMATE CHANGE: ATMOSPHERIC CARBON DIOXIDE. Retrieved from <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>.
- ROTJANAKUSOL T, LAOSUWAN T. (2020). Model of Relationships between Land Surface Temperature and Urban Built-Up Areas in Mueang Buriram District, Thailand. *Polish Journal of Environmental Studies*, 29(5), 3783–3790.
- ROTJANAKUSOL T., LAOSUWAN T. (2018). Inundation Area Investigation Approach using Remote Sensing Technology on 2017 Flooding in Sakon Nakhon Province Thailand. *Studia Universitatis Vasile Goldis Arad, Seria Stiintele Vietii*, 28(4), 159–166.
- ROTJANAKUSOL T., LAOSUWAN T. (2018). Estimation of land surface temperature using Landsat satellite data: A case study of Mueang Maha Sarakham District, Maha



Sarakham Province, Thailand for the years 2006 and 2015. Scientific Review Engineering and Environmental Sciences, 27(4), 401–409.

UTTARUK Y, LAOSUWAN T. (2019). Drought Analysis Using Satellite-Based Data and Spectral Index in Upper Northeastern Thailand. Polish Journal of Environmental Studies, 28(6), 4447–4454.

Uttaruk Y, Rotjanakusol T, Laosuwan T. (2022). Burned Area Evaluation Method for Wildfires in Wildlife Sanctuaries Based on Data from Sentinel-2 Satellite. Polish Journal of Environmental Studies, 31(6), 5875–5885.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. (2019). WMO Greenhouse Gas Bulletin (GHG Bulletin) - No. 15: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2018. Retrieved from https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21620#.X0Dd5n7gqUk.

YANG D., ZHANG H., LIU Y., CHEN B., CAI Z., LÜ D. (2017). Monitoring carbon dioxide from space: Retrieval algorithm and flux inversion based on GOSAT data and using CarbonTracker-China. Advances in Atmospheric Sciences, 34, 965–976.