



KKU SCIENCE JOURNAL

Journal Home Page : <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/KKUSciJ>

Published by the Faculty of Science, Khon Kaen University, Thailand



ผลกระทบของพายุแม่เหล็กโลกที่ขับเคลื่อนด้วยการพ่นมวลคอโรนาต่อการแผ่รังสีอินฟราเรดของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ส่วนล่าง Effects of Geomagnetic Storm with Coronal Mass Ejections Driven on Infrared Emissions of Carbon Dioxide in Lower Thermosphere

ปฐุมพ์พงศ์ พันธุ์พิบูลย์^{1*} และ สหรัฐ สาทิพจันทร์²Patapong Panpiboon^{1*} and Saharat Sathipchan²¹คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม 44000²ศูนย์วิศวกรรมเทคโนโลยีดาราศาสตร์วิทยุ สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) จังหวัดเชียงใหม่ 50180¹Faculty of Science and Technology, Rajabhat Maha Sarakham University, Maha Sarakham, 44000, Thailand²Center for Radio Astronomy and Engineering, National Astronomical Research Institute of Thailand (Public Organization), Chiang Mai, 50180, Thailand

บทคัดย่อ

การศึกษานี้ตรวจสอบการตอบสนองของฟลักซ์รังสีอินฟราเรดของ CO₂ ในชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ส่วนล่างต่อพายุแม่เหล็กโลกระดับปานกลาง 4 เหตุการณ์ที่ขับเคลื่อนด้วยการพ่นมวลคอโรนา (Coronal Mass Ejection; CME) ในปี พ.ศ. 2566 โดยใช้ข้อมูลจากเครื่องมือ SABER บนดาวเทียม TIMED และพารามิเตอร์ลมสุริยะจาก OMNIWeb การวิเคราะห์ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ยุคซ้อนทับ (Superposed Epoch Analysis; SEA) และสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ไขว้ (cross-correlation) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ลมสุริยะและค่าฟลักซ์รังสีอินฟราเรดของ CO₂ ผลการศึกษาพบว่าฟลักซ์รังสีอินฟราเรดของ CO₂ เพิ่มขึ้นร้อยละ 112 จากค่าเฉลี่ยก่อนเกิดเหตุการณ์ (1.67 mW/m²) โดยมีค่าสูงสุด 3.54 mW/m² ซึ่งปรากฏภายในเวลาประมาณ 24 นาทีหลังจากจุดต่ำสุดของดัชนี SYM-H ที่เป็นตัวชี้วัดความเข้มของกระแสวงแหวนและระดับความรุนแรงของพายุแม่เหล็กโลกในช่วงเวลาระดับนาที่ นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์เชิงลบที่สูงระหว่างฟลักซ์รังสีอินฟราเรดของ CO₂ กับดัชนี SYM-H ($r = -0.812$) เวลาตอบสนองแสดงให้เห็นว่า CO₂ มีผลกระทบต่อกระบวนการระบายความร้อนของชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ส่วนล่าง โดยใช้เวลาประมาณ 3 - 4 วันในการกลับคืนสู่สภาวะปกติ กลไกนี้สอดคล้องกับแนวคิดสมดุลพลังงานของชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์

ABSTRACT

This study examines the response of CO₂ infrared radiation (IR) flux in the lower thermosphere to four moderate geomagnetic storms driven by Coronal Mass Ejections (CMEs) during 2023. Data from the SABER instrument aboard the TIMED satellite and solar wind parameters from OMNIWeb were analyzed using Superposed Epoch Analysis (SEA) and cross-correlation techniques to investigate the relationship

*Corresponding Author, E-mail: patapong.pa@rmu.ac.th

Received date: 23 April 2025 | Revised date: 4 July 2025 | Accepted date: 21 July 2025

doi: 10.14456/kkuscij.2025.27

between solar wind parameters and CO₂ IR flux. Results show that CO₂ infrared flux increased by 112% from pre-storm baseline levels (1.67 mW/m²) peaking at 3.54 mW/m² within 24 minutes after the SYM-H minimum, which serves as an indicator of ring current intensity and geomagnetic storm strength on a minute scale. A strong negative correlation was found between CO₂ IR flux and SYM-H index ($r = -0.812$). The observed response time indicates that CO₂ contributes to the cooling processes in the lower thermosphere, requiring approximately 3 - 4 days to return to baseline levels. These findings are consistent with the concept of thermospheric energy balance.

คำสำคัญ: การแผ่รังสีอินฟราเรด พายุแม่เหล็กโลก คาร์บอนไดออกไซด์ ชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ ฟิสิกส์อวกาศ

Keywords: Infrared Radiation, Geomagnetic Storms, Carbon Dioxide, Thermospheric Layer, Space Physics

บทนำ

ชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ส่วนล่าง (lower thermosphere) อยู่ในระดับความสูงประมาณ 90 - 150 กิโลเมตร (Bakhmetieva *et al.*, 2023) มีบทบาทสำคัญในสมดุลพลังงานของสภาพอวกาศ (space weather) โกล์โลก คาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide; CO₂) เป็นตัวบ่งชี้สำคัญสำหรับการเข้าใจกระบวนการถ่ายเทพลังงานระหว่างเหตุการณ์สภาพอวกาศ (Mlynczak *et al.*, 2010) รังสีอินฟราเรด (infrared radiation) ที่ปล่อยออกมาจากโมเลกุล CO₂ ในช่วงความยาวคลื่น 15 ไมโครเมตร เป็นกลไกหลักของกระบวนการระบายความร้อน (cooling process) ในชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ โดยเฉพาะช่วงที่มีความปั่นป่วนของสนามแม่เหล็กโลก (geomagnetic disturbance) หลังจากถ่ายเทพลังงานจำนวนมากจากลมสุริยะ (solar wind) (Zhang *et al.*, 2019) การพ่นมวลโคโรนา (Coronal Mass Ejection; CME) มีอันตรกิริยากับสนามแม่เหล็กโลกกระตุ้นการตอบสนองที่ซับซ้อนในชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ ซึ่งนักวิจัยสามารถติดตามได้ผ่านการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ (flux) รังสีอินฟราเรดที่ปล่อยออกมาจาก CO₂ ซึ่งเป็นข้อมูลเชิงลึกที่มีประโยชน์ในการทำ ความเข้าใจพฤติกรรมภาพรวมของ CO₂ ในชั้นบรรยากาศและกระบวนการทางฟิสิกส์อวกาศ (Knipp *et al.*, 2017)

แม้จะมีการวิจัยอย่างกว้างขวางเกี่ยวกับพายุแม่เหล็กโลก (geomagnetic storm) และผลกระทบต่อระบบ ไอโอโนสเฟียร์-เทอร์โมสเฟียร์ (ionosphere-thermosphere system) แต่ยังคงมีช่องว่างสำคัญในการศึกษาความสัมพันธ์ ที่ขึ้นอยู่กับเวลาระหว่างพารามิเตอร์ลมสุริยะและการตอบสนองการระบายความร้อนของชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ เวลาและขนาดของการระบายความร้อนด้วย CO₂ ที่สัมพันธ์กับความรุนแรงของพายุแม่เหล็กโลกยังต้องการการตรวจสอบเพิ่มเติม ความแปรปรวนในกลไกการขับเคลื่อนของพายุแม่เหล็กโลกและความซับซ้อนของกระบวนการส่งผ่านพลังงานสร้างความท้าทายในการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์ปริมาณ CO₂ (Qian *et al.*, 2017) การศึกษาก่อนหน้านี้ยืนยันผลกระทบของการระบายความร้อนของ CO₂ ในชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ แต่การวิเคราะห์โดยละเอียดเกี่ยวกับวิวัฒนาการตามช่วงเวลาระหว่างพายุแม่เหล็กโลกที่แตกต่างกันยังคงมีจำกัด (Mlynczak *et al.*, 2016) แม้ว่าการแผ่รังสีอินฟราเรดของ CO₂ จะมีความเข้มต่ำกว่าไนตริกออกไซด์ (NO) ระหว่างพายุแม่เหล็กโลก แต่ CO₂ ยังคงเป็นองค์ประกอบสำคัญของสมดุลพลังงานในชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ โดยเฉพาะในชั้นบรรยากาศส่วนล่าง พายุแม่เหล็กโลกที่ขับเคลื่อนด้วย CME (CME-driven) ทำให้เกิดการสะสมความร้อนในชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ ที่เพิ่มอัตราการชนของอนุภาคและทำให้โมเลกุล CO₂ ได้รับความร้อนและแผ่รังสีอินฟราเรดออกมา การแผ่รังสีนี้ทำหน้าที่เป็นกลไกป้อนกลับที่ช่วยระบายพลังงานส่วนเกินออกจากระบบ ทำให้ชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์เย็นลงและฟื้นตัว โมเลกุล CO₂ จึงมีบทบาทในการรักษาเสถียรภาพของชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ต่อการรบกวนจากสภาพอวกาศ (Emmert *et al.*, 2012; Mlynczak *et al.*, 2016, 2022; Bag *et al.*, 2023)

การวิเคราะห์ยุคซ้อนทับ (Superposed Epoch Analysis; SEA) ใช้เพื่อแยกและกำหนดลักษณะการตอบสนองของฟลักซ์รังสีอินฟราเรดของ CO₂ ต่อพายุแม่เหล็กโลกที่ขับเคลื่อนด้วย CME โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ลมสุริยะหลัก ได้แก่ องค์ประกอบแกน z ของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์ (Interplanetary Magnetic Field; IMF B_z) ความเร็วลมสุริยะ (solar wind speed; V_x) อุณหภูมิพลาสมา (plasma temperature; T) ความดันไดนามิก (dynamic pressure; P) และ ดัชนีแม่เหล็กโลก (Symmetric H-component; SYM-H) กับฟลักซ์รังสีอินฟราเรดของ CO₂ วิธีการนี้ช่วยศึกษาลำดับเวลาต่าง ๆ ระหว่างพายุแม่เหล็กโลกและรักษาโครงสร้างตามเวลาของการตอบสนองชั้นบรรยากาศ (Walton and Murphy, 2022) การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ไขว้ (cross-correlation) ช่วยระบุความล่าช้า (lag time) ระหว่างตัวขับเคลื่อนพายุแม่เหล็กโลกและการเพิ่มปริมาณการปล่อยรังสีอินฟราเรดของ CO₂ (Salinas *et al.*, 2016) การวิเคราะห์นี้เป็นวิธีทางสถิติที่ใช้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลสองชุด โดยทำการเลื่อนชุดข้อมูลหนึ่งตามช่วงเวลาเพื่อวัดความสัมพันธ์เชิงเวลา หากค่าความสัมพันธ์สูงสุดเกิดขึ้นที่ตำแหน่งเวลาหนึ่ง อาจมีการตอบสนองหรือมีความล่าช้าระหว่างตัวแปร (Bag *et al.*, 2023; Zesta and Oliveira, 2019; Zebende, 2011)

การตอบสนองของชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ต่อสนามแม่เหล็กโลกมีผลกระทบสำคัญต่อภารกิจของดาวเทียมในวงโคจรต่ำของโลก (Low-Earth Orbit; LEO) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นในชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ส่งผลโดยตรงต่อแรงต้าน (drag) ที่กระทำต่อวัตถุที่โคจรอยู่ในระดับความสูงต่ำระหว่างพายุแม่เหล็กโลก การถ่ายเทพลังงานจากลมสุริยะเข้าสู่ทรงกลมแม่เหล็กโลก (magnetosphere) และไอโอโนสเฟียร์นำไปสู่การเพิ่มอุณหภูมิและการขยายตัวของชั้นบรรยากาศ ส่งผลให้ความหนาแน่นของโมเลกุลในระดับ LEO เพิ่มขึ้นชั่วคราว ทำให้แรงต้านเพิ่มขึ้นและดาวเทียมสูญเสียความสูงเร็วขึ้น (Zesta and Oliveira, 2019) ในกระบวนการควบคุมสมดุลพลังงานของชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ โมเลกุลของ CO₂ และ NO มีบทบาทสำคัญในการแผ่รังสีอินฟราเรดเพื่อระบายความร้อนออกจากระบบ (Mlynchak *et al.*, 2022) กระบวนการนี้เป็นกลไกธรรมชาติที่ช่วยให้ชั้นบรรยากาศกลับสู่สภาวะสมดุล กระบวนการระบายความร้อนของ CO₂ ระหว่างพายุแม่เหล็กโลกมีบทบาทสำคัญต่อการควบคุมการขยายตัวและการหดตัวของชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ (Bag *et al.*, 2023; Mlynchak *et al.*, 2022) มีรายงานว่า CO₂ จากกิจกรรมของมนุษย์กำลังเปลี่ยนแปลงสมดุลดังกล่าว ส่งผลให้ชั้นบรรยากาศหดตัวในระยะยาว (Emmert *et al.*, 2012; Mlynchak *et al.*, 2016) โดยเฉพาะเมื่อรวมกับแนวโน้มการลดลงของกิจกรรมสุริยะ การสะสมของ CO₂ เร่งการสูญเสียพลังงานในรูปของรังสีอินฟราเรดออกสู่อวกาศ ทำให้ชั้นบรรยากาศเย็นลงและความหนาแน่นของอากาศที่ระดับความสูงคงที่ลดลงต่อเนื่อง (Mlynchak *et al.*, 2010; Weimer *et al.*, 2018) ปรากฏการณ์นี้มีผลกระทบต่อพลวัตของชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ส่วนล่าง และส่งผลโดยตรงต่อการออกแบบและปฏิบัติการของดาวเทียมในวงโคจรต่ำ (Zesta and Oliveira, 2019; Wang *et al.*, 2021)

เครื่องมือวัด SABER (Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry) ที่ติดตั้งบนดาวเทียม TIMED (Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics) ให้โอกาสในการติดตามกระบวนการเหล่านี้ผ่านการตรวจสอบฟลักซ์รังสีอินฟราเรดของ CO₂ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงพลังงานของชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ส่วนล่าง (Rezac *et al.*, 2015) งานวิจัยนี้นำเสนอการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์รังสีอินฟราเรดของ CO₂ ระหว่างพายุแม่เหล็กโลกที่ขับเคลื่อนด้วย CME ความรุนแรงระดับปานกลาง (moderate storm) (Hutchinson *et al.*, 2011) โดยใช้วิธีวิเคราะห์ยุคซ้อนทับ วิเคราะห์สหสัมพันธ์ไขว้ และคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (*r*) ระหว่างฟลักซ์รังสีอินฟราเรดของ CO₂ กับพารามิเตอร์ลมสุริยะ ร่วมกับการประยุกต์ใช้วิธี Principal Component Analysis (PCA) และการคำนวณ global energy budget ผลการศึกษาจะช่วยเพิ่มความเข้าใจเกี่ยวกับพฤติกรรมเชิงเวลาและความล่าช้าของการตอบสนองฟลักซ์รังสีอินฟราเรดจาก CO₂ ในชั้นเทอร์โมสเฟียร์ส่วนล่างระหว่างพายุแม่เหล็กโลก

วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิเคราะห์พายุแม่เหล็กโลกระดับปานกลาง 4 เหตุการณ์ในปี พ.ศ. 2566 ดังตารางที่ 1 เหตุการณ์ละ 9 วัน ครอบคลุมเฟสเริ่มต้น (initial phase) เฟสหลัก (main phase) และเฟสคืนตัว (recovery phase) แบ่งเป็น 10 ขั้นตอนดังนี้

1. รวบรวมข้อมูลฟลักซ์รังสีอินฟราเรดของ CO₂ จากเครื่องมือ SABER บนดาวเทียม TIMED โดยการเลือกข้อมูลรายนาฬิกาในช่วงเวลาที่คงที่ (fixed interval sampling)
2. รวบรวมข้อมูลพารามิเตอร์ลมสุริยะและดัชนีแม่เหล็กโลกจากฐานข้อมูล OMNIWeb ความละเอียดข้อมูลรายนาฬิกา ได้แก่ IMF B_z V_x T P และดัชนี SYM-H โดย IMF B_z อยู่ในในระบบพิกัด Geocentric Solar Ecliptic (GSE) แกน X ชี้จากโลกไปทางดวงอาทิตย์ แกน Z ตั้งฉากกับระนาบสุริยะในทิศเหนือ และแกน Y สมมาตรขวา (completes the right-handed system) (Zesta and Oliveira, 2019) ส่วนอุณหภูมิพลาสมา T คือ ค่าเฉลี่ยของพลังงานจลน์ของอนุภาคที่เป็นองค์ประกอบของพลาสมา (ส่วนใหญ่คือโปรตอนและอิเล็กตรอน) ในหน่วยเคลวิน (K) หรืออิเล็กตรอนโวลต์ (eV) (Mlynczak et al., 2022)
3. จัดเตรียมข้อมูลโดยปรับเวลาให้อยู่ในรูปแบบ Coordinated Universal Time (UTC)
4. ลบข้อมูลที่ผิดปกติ (outlier) และเติมข้อมูลที่ขาดหาย (missing values) ด้วยวิธี Interpolation
5. วิเคราะห์ SEA โดยกำหนดให้ Zero Epoch เป็นเวลาที่ค่าดัชนี SYM-H ต่ำสุด (เฟสหลักของพายุแม่เหล็กโลก)
6. เฉลี่ยข้อมูลฟลักซ์รังสีอินฟราเรดของ CO₂ และพารามิเตอร์ลมสุริยะทั้ง 5 ตัวแปรรอบ Zero Epoch
7. วิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์รังสีอินฟราเรดของ CO₂ ก่อน ระหว่าง และหลังพายุแม่เหล็กโลก
8. คำนวณสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ไขว้ระหว่างฟลักซ์รังสีอินฟราเรดของ CO₂ กับพารามิเตอร์ลมสุริยะทั้ง 5 ตัวแปร โดยข้อมูลทำการเฉลี่ยเป็นรายชั่วโมง
9. วิเคราะห์ความล่าช้าระหว่างฟลักซ์รังสีอินฟราเรดของ CO₂ กับพารามิเตอร์ลมสุริยะทั้ง 5 ตัวแปร
10. วิเคราะห์ PCA คำนวณ global energy budget และอภิปรายผล

ตารางที่ 1 ช่วงเวลาเหตุการณ์พายุและตำแหน่งระยะเวลาเฟสหลักของพายุแม่เหล็กโลก

เหตุการณ์	ช่วงเวลาเหตุการณ์พายุแม่เหล็กโลก (yyyy-mm-dd hh:mm)			SYM-H (nT)
	วันที่เริ่มต้น	ช่วงระยะเวลาเฟสหลักของพายุ	วันที่สิ้นสุด	
1	2023-02-24 00:00	2023-02-27 12:12	2023-03-04 23:59	-161
2	2023-03-21 00:00	2023-03-24 05:21	2023-03-29 23:59	-170
3	2023-04-21 00:00	2023-04-24 04:03	2023-04-29 23:59	-233
4	2023-11-02 00:00	2023-11-05 16:54	2023-11-10 23:59	-189

ผลการวิจัย

1. การวิเคราะห์ยุคซ้อนทับ

ผลจากการวิเคราะห์ SEA ดังรูปที่ 1 เมื่อแกน x แสดงเวลาในหน่วยชั่วโมงรอบ Zero Epoch และแกน y แสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ (a) IMF B_z (b) V_x (c) T (d) P (e) ดัชนี SYM-H และ (f) ฟลักซ์รังสีอินฟราเรดของ CO₂ โดยเส้นทึบสีดำคือค่าเฉลี่ย (mean) และแถบสีฟ้าคือช่วงควอไทล์ (interquartile range; IQR (Q1-Q3)) โดยการวิเคราะห์ความล่าช้าจากค่าสูงสุดของแต่ละพารามิเตอร์ลมสุริยะเทียบกับ Zero Epoch แสดงผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 2

จากรูปที่ 1(a) IMF B_z แสดงการลดลงอย่างรวดเร็วสู่ค่าติดลบถึง -17.60 nT ที่ตำแหน่ง Epoch = -35 นาที ซึ่ง IMF B_z เริ่มลดลงก่อน Zero Epoch ประมาณ 1 ชั่วโมง 25 นาที การลดลงอย่างมีนัยสำคัญนี้เป็นตัวบ่งชี้ของการเปลี่ยนไปทางใต้ของ IMF ที่เป็นกลไกหลักในการเริ่มต้นกระบวนการเชื่อมต่อใหม่ของสนามแม่เหล็ก (magnetic reconnection) และนำไปสู่การถ่ายโอนพลังงานเข้าสู่ทรงกลมแม่เหล็กโลก (Zhang *et al.*, 2023).

จากรูปที่ 1(b) V_x แสดงค่าสูงสุดถึง 637.90 km/s ที่ Epoch ประมาณ 38 ชั่วโมง 44 นาทีหลัง Zero Epoch ความเร็วเริ่มเพิ่มขึ้นจาก 450 km/s ที่ Epoch -863 นาที (ก่อน Zero Epoch 13 ชั่วโมง 33 นาที) และยังคงสูงอย่างต่อเนื่อง ลักษณะนี้บ่งชี้ถึงการมาถึงของลมสุริยะความเร็วสูง (high-speed solar wind stream) ที่สัมพันธ์กับ CME และการที่ความเร็วยังคงสูงต่อเนื่องเป็นเวลานานแสดงว่าเกี่ยวข้องกับลมสุริยะความเร็วสูงจากช่องโหว่โคโรนา (coronal hole) หรือการเกิด CME หลายครั้งต่อเนื่องกัน (Werner *et al.*, 2019; Panpiboon *et al.*, 2023)

จากรูปที่ 1 (c) ความแปรปรวนของอุณหภูมิพลาสมา (T) มีค่าสูงสุดที่ 0.99 MK ประมาณ 7 ชั่วโมง 55 นาที ก่อน Zero Epoch โดยค่าสูงสุดแบบฉับพลันนี้สอดคล้องกับการเข้าปะทะของ CME ส่วนค่าสูงสุดของการแปรปรวนแรกพบที่เกิดขึ้นที่ Epoch -828 นาที ที่ค่าอุณหภูมิสูงสุด 0.37 MK ซึ่งสอดคล้องกับค่าสูงสุดของความแปรปรวนของความดันไดนามิก (P) ครั้งแรกที่เกิดขึ้น รวมถึงความเร็วของลมสุริยะที่ 450 km/s

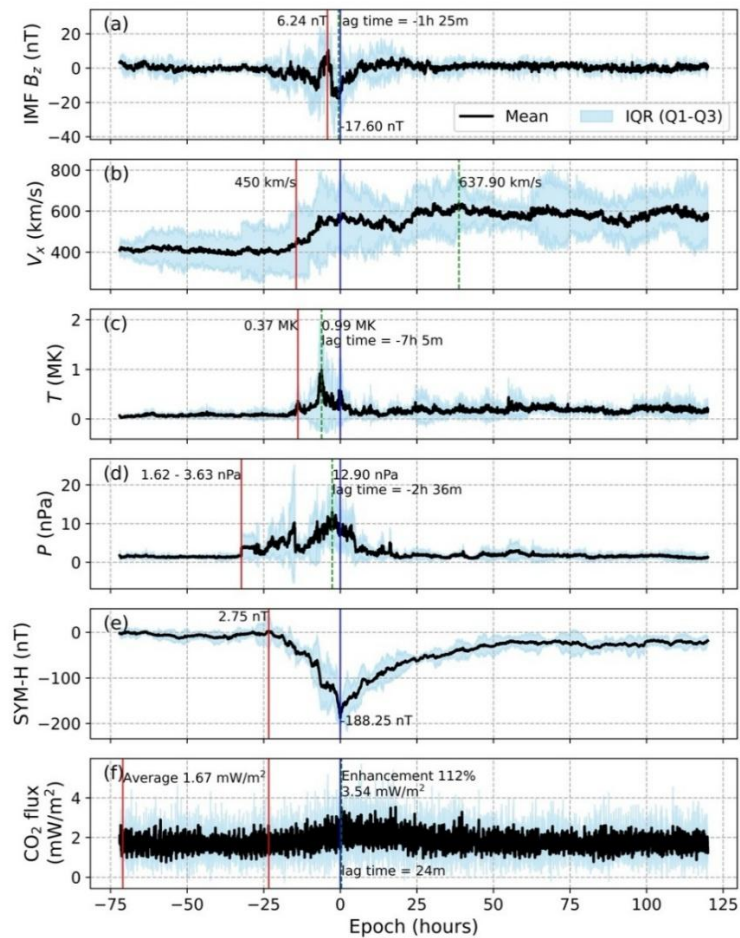
จากรูปที่ 1 (d) ความดันไดนามิก P แสดงค่าสูงสุดลูกที่สองที่ 12.90 nPa เกิดขึ้นก่อน Zero Epoch 3 ชั่วโมง 24 นาที ตำแหน่ง shock front ที่เกิดก่อน Zero Epoch 32 ชั่วโมง 12 นาที ความดันเพิ่มขึ้นจาก 1.62 ถึง 3.63 nPa ส่งผลโดยตรงต่อการบีบอัดทรงกลมแม่เหล็กโลก (Hudson *et al.*, 2015)

จากรูปที่ 1(e) ดัชนี SYM-H แสดงค่าต่ำสุดที่ -188.25 nT ที่ Zero Epoch เฟสเริ่มต้นก่อน Zero Epoch 23 ชั่วโมง 21 นาที ที่ค่า SYM-H = 2.75 nT พายุแม่เหล็กโลกมีขนาดปานกลาง (SYM-H = -300 ถึง -150 nT) (Hutchinson *et al.*, 2011) การลดลงอย่างรวดเร็วในเฟสหลักตามด้วยเฟสคืนตัวโดยใช้เวลา 72 - 96 ชั่วโมงก่อนกลับสู่สภาวะปกติ บ่งชี้ผลกระทบต่อเนื่องต่อระบบอวกาศใกล้โลกเป็นเวลา 3 - 4 วัน (Bag *et al.*, 2023)

ตารางที่ 2 ค่าต่ำสุด-สูงสุด ช่วงเวลาการตอบสนองเทียบกับ Zero Epoch และข้อสังเกตที่สำคัญ

Parameters	Peak	Epoch (minute)	Lag time (hour, minute)	Key observation
IMF B_z (nT)	-17.60	-35	-1, 25*	ค่าสูงสุดของ IMF B_z = 6.24 nT ที่ Epoch = -253 นาที
V_x (km/s)	637.90	2324	38, 44	V_x = 450 km/s ที่ Epoch = -863 นาที และเพิ่มสูงขึ้นเกือบคงที่ประมาณ 600 km/s
T (MK)	0.99	-365	-7, 55*	ค่าสูงสุดลำดับแรกของ T = 0.37 MK ที่ Epoch = -828 นาที ซึ่งเกิดขึ้นแบบฉับพลันพร้อม ๆ กับการเพิ่มขึ้นของความเร็วลมสุริยะ V_x
P (nPa)	12.90	-156	-3, 24*	ตำแหน่ง shock front ที่ Epoch = -1935 นาที ค่า P เพิ่มขึ้นฉับพลันจาก 1.62 ถึง 3.63 nPa
SYM-H (nT)	-188.25	0	0, 0	ตำแหน่งเฟสเริ่มต้นที่ Epoch = -1401 นาที ค่า SYM-H=2.75 nT ส่วนเฟสคืนตัวใช้เวลา 3-4 วัน
CO ₂ flux (mW/m ²)	3.54	24	0, 24	CO ₂ flux เพิ่มขึ้นจากค่าเฉลี่ยของ 2 วันก่อนพายุแม่เหล็กโลก (1.67 mW/m ²) ประมาณร้อยละ 112

หมายเหตุ: * ค่าต่ำสุด - สูงสุดที่พบก่อนระยะเวลาเฟสหลักของเหตุการณ์พายุแม่เหล็กโลก



รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ลมสุริยะและฟลักซ์รังสีอินฟราเรดของ CO_2 ระหว่างพายุแม่เหล็กโลก

จากรูปที่ 1(f) ฟลักซ์รังสีอินฟราเรดของ CO_2 แสดงค่าสูงสุดที่ 3.54 mW/m^2 หลัง Zero Epoch 24 นาที เพิ่มขึ้นจากค่าเฉลี่ย 2 วันก่อนเหตุการณ์ (1.67 mW/m^2) คิดเป็นร้อยละ 112 ลักษณะการตอบสนองนี้แสดงความล่าช้าเพียงเล็กน้อยหลังจากจุดต่ำสุดของดัชนี SYM-H

วิธี SEA แสดงการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์รังสีอินฟราเรดของ CO_2 สอดคล้องกับงานวิจัยของ Bag *et al.* (2023) และ Mertens *et al.* (2009) โดย Mlynckzak *et al.* (2022) รายงานว่าชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ส่วนล่างมีการเย็นตัวและหดตัวระหว่างปี 2002 - 2019 โดยส่วนหนึ่งเป็นผลจากการเพิ่มขึ้นของ CO_2 ซึ่งเป็นตัวการสำคัญในการระบายความร้อนออกสู่อวกาศ ทำให้ชั้นบรรยากาศเย็นลง ความหนาแน่นลดลง และยุบตัวในแนวตั้ง

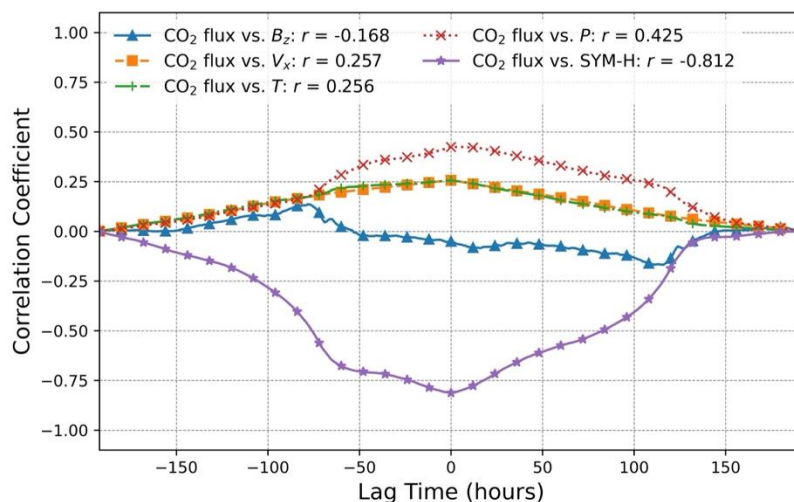
2. การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ไขว้

ผลจากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ไขว้แสดงดังรูปที่ 2 เมื่อแกน x แสดงเวลาที่ล่าช้าในการตอบสนองของชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ (ชั่วโมง) และแกน y แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ การวิเคราะห์เปรียบเทียบพารามิเตอร์ลมสุริยะทั้ง 5 ตัวแปร มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 เส้นสัมพันธ์ $\text{CO}_2 \text{ flux vs. SYM-H}$ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงลบที่สูง ($r = -0.812$) ค่าสหสัมพันธ์ติดลบหมายถึงความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม เมื่อ SYM-H ลดลงมากเท่าใดบ่งชี้ว่าพายุแม่เหล็กโลกมีความรุนแรงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ฟลักซ์รังสีอินฟราเรดของ CO_2 เพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ที่สูงนี้เกิดจาก SYM-H เป็นดัชนีที่สะท้อนความแปรปรวนของสนามแม่เหล็กโลกใกล้ผิวโลก ซึ่งเป็นผลลัพธ์ของอันตรกิริยาระหว่างลมสุริยะและทรงกลมแม่เหล็กโลก การคำนวณความล่าช้ามีค่าเป็น 0 ชั่วโมง

2.2 เส้นสีแดง CO_2 flux vs. P ($r = 0.256$) เส้นสีเขียว CO_2 flux vs. T ($r = 0.214$) เส้นสีส้ม CO_2 flux vs. V_x ($r = 0.257$) และเส้นสีฟ้า CO_2 flux vs. IMF B_z ($r = -0.168$) แสดงความสัมพันธ์ระดับต่ำจึงไม่พิจารณาความล่าช้าเนื่องจากมีแนวโน้มสูงที่จะทำให้การคำนวณความล่าช้ามีความคลาดเคลื่อน แม้ว่า IMF $B_z < 0$ จะเป็นปัจจัยสำคัญในการเริ่มต้นพายุแม่เหล็กโลกผ่านกระบวนการเชื่อมต่อใหม่ในด้านกลางวัน แต่ความสัมพันธ์กับฟลักซ์รังสีอินฟราเรดของ CO_2 กลับไม่สูงเท่าที่คาด ปรากฏการณ์นี้อธิบายได้ว่า IMF B_z เป็นเพียงพารามิเตอร์ที่บ่งชี้การกระตุ้นกระบวนการถ่ายโอนพลังงานเข้าสู่ทรงกลมแม่เหล็กโลกแต่ปริมาณพลังงานที่ถ่ายโอนจริงขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น เช่น ความดันไดนามิก หรือความเข้มของกระแสแวน (ring current) ซึ่งสังเกตได้จากดัชนี SYM-H ดังนั้น การวัดปริมาณพลังงานที่ถ่ายโอนเข้าสู่ระบบผ่านดัชนี SYM-H จึงมีความสำคัญต่อการตรวจสอบการตอบสนองของชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ (Bag *et al.*, 2023; Hudson *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2023)

Zebende (2011) นำเสนอการวัดระดับความสัมพันธ์ระหว่างอนุกรมเวลาไม่คงตัว (nonstationary time series) ซึ่งเหมาะสมกับการวิเคราะห์ข้อมูลทางสภาพอวกาศที่มีความผันผวนสูง Weimer *et al.* (2018) รายงานว่าการปล่อยการปล่อยรังสีอินฟราเรดของ CO_2 สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการติดตามการเปลี่ยนแปลงในชั้นบรรยากาศได้ Wang *et al.* (2021) พบการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ระดับความสูงประมาณ 100 กิโลเมตร ในละติจูดสูงของทั้งซีกโลกเหนือและซีกโลกใต้ ผลการวิเคราะห์สนับสนุนทฤษฎี "thermospheric energy budget" ที่เสนอโดย Mlynchak *et al.* (2003) ว่าการเย็นตัวด้วยรังสีอินฟราเรด (infrared cooling) เป็นกลไกสำคัญที่ช่วยให้ชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์กลับสู่สภาวะสมดุลหลังจากได้รับพลังงานจำนวนมากระหว่างพายุแม่เหล็กโลก โดยมีความสัมพันธ์ที่ชัดเจนที่สุดกับดัชนี SYM-H ซึ่งเป็นตัวชี้วัดความรุนแรงของพายุแม่เหล็กโลก



รูปที่ 2 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ไขว้ระหว่างฟลักซ์รังสีอินฟราเรดของ CO_2 กับพารามิเตอร์ลมสุริยะ

อภิปรายผลการวิจัย

โมเลกุล CO_2 ทำหน้าที่เป็นตัวแผ่รังสีหลักของบรรยากาศชั้นบน โดยปล่อยรังสีอินฟราเรดที่ความยาวคลื่น 15 ไมโครเมตร ผ่านการเปลี่ยนสถานะการสั่นสะเทือน (vibrational transitions) (Mlynarczyk *et al.*, 2016; Mertens *et al.*, 2009) กระบวนการนี้เป็นกลไกสำคัญในการระบายพลังงานจากพายุแม่เหล็กโลกออกสู่อวกาศ (Zesta and Oliveira, 2019; Bag *et al.*, 2023) ในระหว่างพายุแม่เหล็กโลก พลังงานจากทรงกลมแม่เหล็กโลกถ่ายเทสู่ชั้นบรรยากาศ ก่อให้เกิดการยกตัวของมวลอากาศ (upwelling) จากชั้นล่างสู่ชั้นบน ส่งผลให้ความหนาแน่น CO_2 ในระดับสูงเพิ่มขึ้น (Qian *et al.*, 2017; Emmert *et al.*, 2012) CO_2 เหล่านี้จึงมีบทบาทในการปลดปล่อยพลังงานความร้อนเพื่อรักษาสมดุลพลังงานของระบบ (Mlynarczyk *et al.*, 2022)

Mlynarczyk *et al.* (2010) วิเคราะห์การแผ่รังสีของ CO_2 และ NO ในชั้นเทอร์โมสเฟียร์จากข้อมูลเครื่องมือ SABER บนดาวเทียม TIMED ระหว่างปี พ.ศ. 2545 - 2552 เพื่อประเมิน global energy budget พบว่าอัตราการแผ่รังสี ค่าฟลักซ์ และกำลังรวมของทั้ง CO_2 และ NO มีความสัมพันธ์แปรผกผันกับวัฏจักรสุริยะ CO_2 ที่ความยาวคลื่น 15 ไมโครเมตร ทำหน้าที่เป็นกลไกการแผ่รังสีหลักในเขตเส้นศูนย์สูตรถึงละติจูดกลาง ขณะที่ NO ที่ 5.3 ไมโครเมตรมีบทบาทสำคัญในบริเวณละติจูดสูง ในช่วงกิจกรรมสุริยะต่ำ (พ.ศ. 2551) การแผ่รังสีจาก NO ลดลงถึงเกือบ 10 เท่าเมื่อเทียบกับช่วงสูงสุดของวัฏจักร ในขณะที่ CO_2 ยังคงแสดงการตอบสนองต่อเหตุการณ์พายุแม่เหล็กโลก สำหรับงานวิจัยนี้ ค่าฟลักซ์ที่วัดได้จาก CO_2 ในช่วงพายุแม่เหล็กโลกสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 3.54 mW/m^2 การคำนวณ global energy budget ใช้พื้นที่ผิวโลก ($4\pi R^2 \approx 5.1 \times 10^{14} \text{ m}^2$) โดยพิจารณาว่าพายุแม่เหล็กโลกส่งผลกระทบต่อพื้นที่คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 20 ถึง 40 ของผิวโลกขึ้นอยู่กับความรุนแรง ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่า CO_2 fundamental power อยู่ในช่วง 690 - 920 GW ตามวัฏจักรสุริยะ ซึ่งสอดคล้องกับการประมาณค่าจากข้อมูลการแผ่รังสีระหว่างพายุแม่เหล็กโลก

การวิเคราะห์ด้วยวิธี SEA ในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดสำคัญจากจำนวนเหตุการณ์ที่จำกัด (4 เหตุการณ์ในปี พ.ศ. 2566) ซึ่งไม่เพียงพอสำหรับการสร้างสถิติเชิงบรรยายที่มีนัยสำคัญ วิธี SEA ต้องอาศัยตัวอย่างจำนวนมากเพื่อลดอิทธิพลของความแปรปรวนเฉพาะรายการและสภาวะลักษณะสมรรถนะทั่วไปของระบบ แม้เหตุการณ์ที่คัดเลือกจะมีความรุนแรงในระดับเดียวกัน (SYM-H < -150 nT) แต่โครงสร้างต้นเหตุยังคงแตกต่างกัน เช่น ความเร็วลมสุริยะ V_x ช่วงเวลาการเปลี่ยนทิศทางใต้ของ IMF B_z และจำนวน CME ที่เกิดต่อเนื่อง ซึ่งส่งผลต่อการตอบสนองที่แตกต่างกันของชั้นบรรยากาศ (Zesta and Oliveira, 2019) การจำกัดข้อมูลภายในปีเดียวไม่สามารถสะท้อนพฤติกรรมเชิงสถิติในช่วงวัฏจักรสุริยะที่หลากหลาย (Hutchinson *et al.*, 2011) นอกจากนี้ ตำแหน่งดาวเทียมที่วัดฟลักซ์อินฟราเรดของ CO_2 อาจไม่ตรงกับพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบโดยตรงจากพายุในแต่ละครั้ง ส่งผลให้เกิดความแปรปรวนสูงในข้อมูลที่เกิดขึ้นได้ (Mlynarczyk *et al.*, 2003) เพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลการศึกษา ควรขยายจำนวนเหตุการณ์ที่ครอบคลุมพายุจากแหล่งกำเนิดที่หลากหลายและช่วงเวลาที่ยาวนานขึ้น

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์หลักในพายุแม่เหล็กโลกทั้ง 4 เหตุการณ์แสดงให้เห็นว่า SYM-H มีความสัมพันธ์ระหว่างเหตุการณ์ในระดับสูง ($r = 0.3 - 0.9$) โดยเฉพาะเหตุการณ์ที่ 2 และ 3 ที่มีค่าสหสัมพันธ์ถึง 0.93 สะท้อนลักษณะสมรรถนะที่สอดคล้องกันของความรุนแรงพายุแม่เหล็กโลก (Hutchinson *et al.*, 2011) ในทางตรงกันข้าม พารามิเตอร์ลมสุริยะ (P , T , V_x , IMF B_z) แสดงความแปรปรวนสูงระหว่างเหตุการณ์ โดยเฉพาะ IMF B_z และ T ที่มีค่าสหสัมพันธ์ต่ำ ฟลักซ์รังสีอินฟราเรดของ CO_2 พบความสัมพันธ์ระหว่างเหตุการณ์ในระดับต่ำ ซึ่งสะท้อนถึงผลกระทบเฉพาะพื้นที่และช่วงเวลาที่แตกต่างกันในแต่ละเหตุการณ์ (Knipp *et al.*, 2017; Mlynarczyk *et al.*, 2003; Panpi boon *et al.*, 2023) การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างเหตุการณ์ให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับความแปรปรวนของพารามิเตอร์ที่วิธี SEA ไม่สามารถให้รายละเอียดได้ เนื่องจากมุ่งเน้นการหาค่าเฉลี่ยลักษณะร่วม การใช้วิธีทั้งสองร่วมกันจึงให้ภาพที่ครอบคลุมมากขึ้น (Walton and Murphy, 2022)

เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงพึ่งพาระหว่างกันของตัวแปรพลังงานภายในระบบสภาพอวกาศที่ซับซ้อน ซึ่งอาจมีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของการปล่อยฟลักซ์รังสีอินฟราเรดของ CO_2 ในเทอร์โมสเฟียร์ส่วนล่าง (Bag *et al.*, 2023) การประยุกต์ใช้วิธี PCA กับพารามิเตอร์ลมสุริยะทั้ง 5 ตัวแปร โดยแยกวิเคราะห์ในแต่ละเหตุการณ์พายุ พบว่าผลการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักสองอันดับแรก (PC1 และ PC2) สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลรวมกันได้ดังนี้ เหตุการณ์ที่ 1 PC1 เท่ากับร้อยละ 48.8 PC2 เท่ากับร้อยละ 20.4 (รวมร้อยละ 69.2) เหตุการณ์ที่ 2 PC1 เท่ากับร้อยละ 42.2 PC2 เท่ากับร้อยละ 30.5 (รวมร้อยละ 72.7) เหตุการณ์ที่ 3 PC1 เท่ากับร้อยละ 44.3 PC2 เท่ากับร้อยละ 23.4 (รวมร้อยละ 67.7) และเหตุการณ์ที่ 4 PC1 เท่ากับร้อยละ 40.9, PC2 เท่ากับร้อยละ 33.2 (รวมร้อยละ 74.1)

ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนความแปรปรวนร่วมที่อธิบายได้จาก PC1 และ PC2 ทั้ง 4 เหตุการณ์เท่ากับร้อยละ 70.9 ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพของ PCA ในการลดมิติข้อมูลและดึงโครงสร้างร่วมของระบบที่ซับซ้อน (Knipp *et al.*, 2017; Mlynczak *et al.*, 2010) โดยเฉพาะ PC1 แสดงการเปลี่ยนแปลงชัดเจนในช่วงที่เกิดค่าต่ำสุดของ SYM-H ซึ่งสอดคล้องกับเฟสหลักของพายุแม่เหล็กโลก ขณะที่ PC2 มักสะท้อนลักษณะพลศาสตร์ที่แปรเปลี่ยนเชิงเฉพาะ เช่น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิหรือแรงดันของลมสุริยะ ดังนั้น การใช้ PCA จึงช่วยเสริมความเข้าใจเชิงลึกเกี่ยวกับกลไกข้อมูลหลายตัวแปร (multivariate) ที่มีผลต่อการปล่อยรังสีอินฟราเรดของ CO_2 และสามารถนำไปใช้ร่วมกับวิธีสหสัมพันธ์ไขว้ เพื่อยืนยันและเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิเคราะห์รายตัวแปรแบบคู่ (bivariate) ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธีสหสัมพันธ์ไขว้เป็นวิธีหลัก เนื่องจากมีข้อได้เปรียบในการตรวจจับความสัมพันธ์เชิงเวลา (temporal lag relationship) ระหว่างพารามิเตอร์ของลมสุริยะกับฟลักซ์รังสีอินฟราเรดของ CO_2 (Zebende, 2011; Walton and Murphy, 2022)

ในงานวิจัยนี้ดัชนี SYM-H แสดงความสัมพันธ์เชิงลบกับ CO_2 flux อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในข้อมูลรายชั่วโมงที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ที่ -0.812 ที่ ความล่าช้า เท่ากับ 0 ชั่วโมง ต่างจากการพิจารณาในรูปที่ 1 (f) ที่พบความล่าช้า 24 นาทีด้วยการคำนวณจากผลต่างระหว่างจุดสูงสุดและ Zero Epoch (ข้อมูลรายนาทีก่อน) บ่งชี้ว่าการเฉลี่ยข้อมูลรายชั่วโมงทำให้สูญเสียความละเอียดทางเวลา (temporal resolution) ซึ่งส่งผลให้ไม่สามารถตรวจจับความล่าช้าระยะสั้น (short-term lag) ที่เกิดขึ้นจริงระหว่างการรบกวนทางแม่เหล็กโลก และการตอบสนองของการปล่อยรังสีอินฟราเรดของ CO_2 ได้อย่างแม่นยำ

พายุแม่เหล็กโลกที่ขับเคลื่อนด้วย CME เกิดขึ้นเมื่อพลาสมาของลมสุริยะที่องค์ประกอบแกน z ของสนามแม่เหล็กระหว่างดาวเคราะห์มีอันตรกิริยากับทรงกลมแม่เหล็กโลก ก่อให้เกิดการเชื่อมต่อใหม่ของสนามแม่เหล็กที่ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทพลังงานขนาดใหญ่สู่ระบบไอโอโนสเฟียร์-เทอร์โมสเฟียร์ นำไปสู่การให้ความร้อนจูล (Joule heating) เกิดขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้าในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ไหลผ่านอนุภาคที่เป็นกลางในชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ ทำให้พลังงานไฟฟ้าเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของชั้นบรรยากาศเพิ่มสูงขึ้น (Hudson *et al.*, 2015; Knipp *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2023) อีกทั้งยังเกิดกระบวนการที่อนุภาคประจุพลังงานสูง (อิเล็กตรอนและโปรตอน) จากทรงกลมแม่เหล็กโลกตกลงมาสู่ชั้นบรรยากาศส่วนล่างหรือเรียกว่าอนุภาคทรงพลังที่หยาดตก (energetic particle precipitation) โดยเฉพาะในบริเวณขั้วโลกและบริเวณที่เกิดปรากฏการณ์ออโรรา (auroral zone) ซึ่งอนุภาคเหล่านี้จะชนกับโมเลกุลและอะตอมในชั้นบรรยากาศ ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน การกระตุ้น และการปลดปล่อยพลังงานนี้จะเพิ่มอุณหภูมิของชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ (Zesta and Oliveira, 2019; Zhang *et al.*, 2019)

ความร้อนจูลและอนุภาคทรงพลังที่หยาดตกเป็นแหล่งพลังงานหลักที่ทำให้ชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ร้อนขึ้นในช่วงที่มีกิจกรรมลมสุริยะรุนแรง (Zesta and Oliveira, 2019; Knipp *et al.*, 2017) เมื่ออนุภาคมีประจุจาก CME เคลื่อนที่มาถึงโลก อนุภาคเหล่านี้จะมีปฏิสัมพันธ์กับทรงกลมแม่เหล็กโลก ส่งผลให้เกิดการฝากพลังงานในระบบและเพิ่มกระแสไฟฟ้า

ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ โดยเฉพาะในบริเวณที่เกิดปรากฏการณ์ออโรรา (Bag *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2019) เมื่อพลังงานจลน์ของอนุภาคมีประจุในไอโอโนสเฟียร์เพิ่มสูงขึ้น ความถี่ของการชนระหว่างอนุภาคเหล่านี้กับอนุภาคเป็นกลางในชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ก็จะเพิ่มขึ้นตาม ส่งผลให้ความหนาแน่นของชั้นบรรยากาศเพิ่มขึ้น โดยส่วนใหญ่เกิดขึ้นในซีกโลกเหนือ (Knipp *et al.*, 2017)

การแผ่รังสีอินฟราเรดจาก NO และ CO₂ ในชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ถือเป็นตัวชี้วัดที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความหนาแน่น พลังงานที่เพิ่มขึ้นจากพายุแม่เหล็กโลกทำให้อัตราการแผ่รังสีอินฟราเรดจากก๊าซทั้งสองชนิดเพิ่มขึ้น ซึ่งโดยปกติแล้ว กระบวนการแผ่รังสีนี้มีบทบาทในการทำให้ชั้นบรรยากาศเย็นลงหลังจากพายุ (Mlynchak *et al.*, 2003, 2010; Knipp *et al.*, 2017) อย่างไรก็ตาม หากเกิดพายุอย่างต่อเนื่องหรือยาวนาน อุณหภูมิของชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์อาจยังคงอยู่ในระดับสูง เนื่องจากการสะสมของพลังงานเกินขีดความสามารถในการระบายความร้อน (Zesta and Oliveira, 2019; Mlynchak *et al.*, 2010; Knipp *et al.*, 2017; Bag *et al.*, 2023;)

ผลการศึกษานี้มีนัยสำคัญต่อวงวิชาการด้านฟิสิกส์บรรยากาศและฟิสิกส์อวกาศ โดยแสดงให้เห็นถึงบทบาทของการปล่อยรังสีอินฟราเรดของ CO₂ ในชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ส่วนล่างที่ตอบสนองต่อพายุแม่เหล็กโลกที่ขับเคลื่อนด้วย CME อย่างมีนัยสำคัญ (Mlynchak *et al.*, 2010; Bag *et al.*, 2023; Hudson *et al.*, 2015) การวิเคราะห์เชิงเวลาด้วยสหสัมพันธ์ไขว้ และการลดมิติด้วย PCA แสดงให้เห็นความสัมพันธ์เชิงซ้อนของพารามิเตอร์ลมสุริยะกับการแผ่รังสีของ CO₂ (Knipp *et al.*, 2017; Bag *et al.*, 2023; Zebende, 2011) ซึ่งสะท้อนถึงกลไกการถ่ายเทพลังงานและการระบายความร้อนในระบบเทอร์โมสเฟียร์ (Mlynchak *et al.*, 2010; Zesta and Oliveira, 2019) วิธี SEA ช่วยระบุรูปแบบเฉพาะที่สอดคล้องกันระหว่างพายุแม่เหล็กโลกและการตอบสนองของชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ได้อย่างเป็นระบบ (Hutchinson *et al.*, 2011; Walton and Murphy, 2022) ผลลัพธ์เหล่านี้สนับสนุนแนวคิดของ "thermospheric energy budget" และชี้ให้เห็นความสำคัญของการใช้ตัวชี้วัดรังสีอินฟราเรดของ CO₂ เป็นดัชนีตัวแทน (proxy) สำหรับติดตามผลกระทบจากสภาพอวกาศ (Emmert *et al.*, 2012; Mlynchak *et al.*, 2016; Weimer *et al.*, 2018) ต่อสภาพแวดล้อมใกล้โลกในระดับโลกและระดับภูมิภาค การศึกษานี้ยังเปิดแนวทางใหม่ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ข้อมูลพหุคูณร่วมกับวิธี SEA เพื่อให้เข้าใจพลวัตของระบบชั้นบรรยากาศ (Zhang *et al.*, 2023; Mertens *et al.*, 2009; Bag *et al.*, 2023)

สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้วิเคราะห์ผลกระทบของพายุแม่เหล็กโลกที่ขับเคลื่อนด้วย CME ต่อการแผ่รังสีอินฟราเรดของ CO₂ ในชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ส่วนล่าง ใช้ข้อมูลจากเครื่องมือ SABER บนดาวเทียม TIMED ที่ให้ข้อมูลการแผ่รังสีของ CO₂ ที่ความยาวคลื่น 15 ไมโครเมตร คัดเลือกเหตุการณ์พายุแม่เหล็กโลกความรุนแรงขนาดปานกลางจำนวน 4 เหตุการณ์ในปี พ.ศ. 2566 โดยค่าดัชนี SYM-H อยู่ระหว่าง -161 ถึง -233 nT การวิเคราะห์ข้อมูลใช้วิธีการทางสถิติที่สำคัญ 2 วิธี ได้แก่ การวิเคราะห์แบบยุคซ้อนทับโดยกำหนด Zero Epoch ที่จุดต่ำสุดของดัชนี SYM-H และการคำนวณสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ไขว้ระหว่างฟลักซ์รังสีอินฟราเรดของ CO₂ กับพารามิเตอร์ลมสุริยะและดัชนีแม่เหล็กโลก

ผลการศึกษาพบว่าฟลักซ์รังสีอินฟราเรดของ CO₂ เพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 112 ระหว่างพายุแม่เหล็กโลก มีค่าสูงสุด 3.54 mW/m² ที่ 24 นาทิลหลังจุดต่ำสุดของดัชนี SYM-H ซึ่งเพิ่มขึ้นจากค่าเฉลี่ยปกติของ 2 วันก่อนพายุแม่เหล็กโลก (1.67 mW/m²) การเพิ่มขึ้นนี้แสดงให้เห็นถึงกลไกการระบายความร้อนของชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์ในช่วงที่ได้รับพลังงานจำนวนมากจากลมสุริยะที่กระตุ้นให้เกิดพายุแม่เหล็กโลก ระยะเวลาการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์ CO₂ สอดคล้องกับช่วงการฟื้นตัว

ของพายุแม่เหล็กโลก (3 - 4 วัน) ซึ่งบ่งชี้ว่าพายุแม่เหล็กโลกระดับปานกลางมีผลกระทบต่อเนื่องต่อระบบพลังงานของชั้นบรรยากาศส่วนบนเป็นระยะเวลาหลายวัน

ความสัมพันธ์ของ CO₂ flux และดัชนี SYM-H แสดงค่าสหสัมพันธ์สูงสุดที่ -0.812 ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่าเมื่อ SYM-H ลดลง (พายุแม่เหล็กโลกมีความรุนแรงเพิ่มขึ้น) ฟลักซ์รังสีอินฟราเรดของ CO₂ จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย กลไกทางฟิสิกส์ที่อธิบายความสัมพันธ์นี้เริ่มจากการเสริมกำลังของกระแสแวนเลน ซึ่งเกิดจากการสะสมอนุภาคพลังงานสูงในบริเวณแม่เหล็กโลก การเพิ่มขึ้นของกระแสแวนเลนส่งผลให้เกิดการขยายตัวของอนุภาคทรงพลังเข้าสู่ชั้นบรรยากาศส่วนบน ทำให้อุณหภูมิของชั้นบรรยากาศเทอร์โมสเฟียร์และไอโอโนสเฟียร์เพิ่มขึ้น พลังงานที่เพิ่มขึ้นนี้ถูกระบายออกในรูปของการแผ่รังสีอินฟราเรดจากโมเลกุล CO₂ ส่งผลให้สังเกตเห็นการเพิ่มขึ้นของฟลักซ์รังสีอินฟราเรดของ CO₂

การวิจัยในอนาคตควรเปรียบเทียบการตอบสนองของฟลักซ์รังสีอินฟราเรดจาก CO₂ ระหว่างตัวขับเคลื่อนพายุแม่เหล็กโลกประเภทต่าง ๆ เพื่อตรวจสอบความแตกต่างในระยะเวลาและความรุนแรงของผลกระทบ ตรวจสอบความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของสภาพอวกาศ ผลการศึกษาจะมีประโยชน์ต่อการพัฒนาแบบจำลองการพยากรณ์สภาพอวกาศและการประเมินผลกระทบต่อดาวเทียมและเทคโนโลยีอวกาศ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทีมงานภารกิจดาวเทียม TIMED ที่ให้บริการฐานข้อมูลฟลักซ์รังสีอินฟราเรดของ CO₂ และขอขอบคุณทีมงานโครงการ OMNIWeb ที่ให้บริการข้อมูลพารามิเตอร์ลมสุริยะและดัชนีแม่เหล็กโลก

เอกสารอ้างอิง

- Bag, T., Rout, D., Ogawa, Y., and Singh, V. (2023). Distinctive response of thermospheric cooling to ICME and CIR-driven geomagnetic storms. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* 10: 1107605. doi: 10.3389/fspas.2023.1107605
- Bakhmetieva, N.V., Zhemyakov, I.N., Grigoriev, G.I. and Kalinina, E.E. (2023). Impact of Natural Factors on the Temperature in the Lower Thermosphere. *Russian Journal of Physical Chemistry B* 17: 1202 - 1215. doi: 10.1134/S1990793123050160.
- Emmert, J.T., Stevens, M.H., Bernath, P.F., Drob, D.P. and Boone, C.D. (2012). Observations of increasing carbon dioxide concentration in Earth's thermosphere. *Nature Geoscience* 5(12): 868 - 871. doi: 10.1038/ngeo1626.
- Hudson, M.K., Paral, J., Kress, B.T., Wiltberger, M., Baker, D.N., Foster, J.C., Turner, D.L. and Wygant, J.R. (2015). Modeling CME-shock-driven storms in 2012 - 2013: MHD test particle simulations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 120(2): 1168 - 1181.
- Hutchinson, J.A., Wright, D.M., and Milan, S.E. (2011). Geomagnetic storms over the last solar cycle: A superposed epoch analysis. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 116(A9): A09211.
- Knipp, D.J., Pette, D.V., Kilcommons, L.M., Isaacs, T.L., Cruz, A.A., Mlynczak, M.G., Hunt, L.A. and Lin, C.Y. (2017). Thermospheric nitric oxide response to shock-led storms. *Space Weather* 15(2): 325 - 342. doi: 10.1002/2016SW001567

- Mertens, C.J., Winick, J.R., Picard, R.H., Evans, D.S., López-Puertas, M., Wintersteiner, P.P., Xu, X., Mlynchzak, M.G. and Russell III, J.M. (2009). Influence of solar-geomagnetic disturbances on SABER measurements of 4.3 μm emission and the retrieval of kinetic temperature and carbon dioxide. *Advances in space research* 43(9): 1325 - 1336.
- Mlynchzak, M., Martin-Torres, F.J., Russell, J., Beaumont, K., Jacobson, S., Kozyra, J., Lopez-Puertas, M., Funke, B., Mertens, C., Gordley, L., Picard, R., Winick, J., Wintersteiner, P. and Paxton, L. (2003). The natural thermostat of nitric oxide emission at 5.3 μm in the thermosphere observed during the solar storms of April 2002. *Geophysical Research Letters* 30(21): 2100.
- Mlynchzak, M.G., Hunt, L.A., Thomas Marshall, B., Martin-Torres, F.J., Mertens, C.J., Russell III, J.M., Remsberg, E.E., López-Puertas, M., Picard, R., Winick, J., Wintersteiner, P., Thompson, R.E. and Gordle, L.L. (2010). Observations of infrared radiative cooling in the thermosphere on daily to multiyear timescales from the TIMED/SABER instrument. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 115: A03309. doi: 10.1029/2009JA014713.
- Mlynchzak, M.G., Daniels, T.S., Kratz, D.P., Feldman, D.R., Collins, W.D., Mlawer, E.J., Alvarado, M.J., Lawler, J.E., Anderson, L.M., Fahey, D.W., Hunt, L.A. and Mast, J.C. (2016). The spectroscopic foundation of radiative forcing of climate by carbon dioxide. *Geophysical research letters* 43(10): 5318 - 5325. doi: 10.1002/2016GL068837
- Mlynchzak, M.G., Hunt, L.A., Garcia, R.R., Harvey, V.L., Marshall, B.T., Yue, J., Mertens, C.J. and Russell III, J.M. (2022). Cooling and contraction of the mesosphere and lower thermosphere from 2002 to 2021. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 127: e2022JD036767. doi: 10.1029/2022JD036767.
- Panpiboon, P., Noysena, K., and Yeeram, T. (2023). Variations in thermospheric density during two consecutive geomagnetic storms of different solar wind conditions in November 2022. *Journal of Physics: Conference Series* 2653: 012017. doi:10.1088/1742-6596/2653/1/012017.
- Qian, L., Burns, A. and Yue, J. (2017). Evidence of the lower thermospheric winter-to-summer circulation from SABER CO₂ observations. *Geophysical Research Letters* 44(10): 100 - 107. doi: 10.1002/2017GL075643
- Rezac, L., Jian, Y., Yue, J., Russell III, J. M., Kutepov, A., Garcia, R., Walker, K. and Bernath, P. (2015). Validation of the global distribution of CO₂ volume mixing ratio in the mesosphere and lower thermosphere from SABER. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 120(23): 67 - 81.
- Salinas, C.C.J.H., Chang, L.C., Liang, M.C., Yue, J., Russell III, J. and Mlynchzak, M. (2016). Impacts of SABER CO₂-based eddy diffusion coefficients in the lower thermosphere on the ionosphere/thermosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 121(12): 80 - 92. doi: 10.1002/2016JA023161.
- Walton, S.D. and Murphy, K.R. (2022). Superposed epoch analysis using time-normalization: A Python tool for statistical event analysis. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* 9: 1000145.
- Wang, N., Yue, J., Wang, W., Qian, L., Jian, L., and Zhang, J. (2021). A Comparison of the CIR- and CME-Induced Geomagnetic Activity Effects on Mesosphere and Lower Thermospheric Temperature. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 126(6): e2020JA029029.

- Weimer, D.R., Mlynczak, M.G., Emmert, J.T., Doornbos, E., Sutton, E.K. and Hunt, L.A. (2018). Correlations between the thermosphere's semiannual density variations and infrared emissions measured with the SABER instrument. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 123(10): 8850 - 8864.
- Werner, A.L.E., Yordanova, E., Dimmock, A.P., and Temmer, M. (2019). Modeling the multiple CME interaction event on 6 - 9 September 2017 with WSA-ENLIL+Cone. *Space Weather* 17(2): 357 - 369.
- Zebende, G.F. (2011). DCCA cross-correlation coefficient: Quantifying level of cross-correlation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 390(4): 614 - 618.
- Zesta, E., and Oliveira, D.M. (2019). Thermospheric Heating and Cooling Times During Geomagnetic Storms, Including Extreme Events. *Geophysical Research Letters* 46(22): 12739 - 12746.
- Zhang, H.X., Lu, J.Y. and Wang, M. (2023). Energy transfer across magnetopause under dawn-dusk IMFs. *Scientific Reports* 13(1): 7409.
- Zhang, Y., Paxton, L.J., Lu, G. and Yee, S. (2019). Impact of nitric oxide, solar EUV and particle precipitation on thermospheric density decrease. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 182: 147 - 154. doi: 10.1016/j.jastp.2018.11.016.

