

การวิเคราะห์เหตุการณ์การปะทุบนดวงอาทิตย์ที่มีความรุนแรงตามประเภทการ  
ปะทุในช่วงปี พ.ศ. 2554-2556

Analysis of the Violent Solar Flare Events in 2554 and 2556

ทิราณี ขำลำเลิศ<sup>1</sup>, นลินี เอี่ยมสะอาด<sup>2</sup>, วุฒิศักดิ์ กาญจนภา<sup>3</sup>, พรพิศรา ทิพรราช<sup>1</sup>, พรวิบูลย์ สุขรัมย์<sup>1</sup>  
และรุ่งทิวา ยิ้มบุญเกิด<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

<sup>2</sup>สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์

<sup>3</sup>โรงเรียนมัธยมสาธิตมหาวิทยาลัยนครสวรรค์

\*E-mail: thiraneek@nu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้วิเคราะห์การปะทุบนดวงอาทิตย์แบบทันทีทันใด ในวันที่ 3 พฤศจิกายน 2556 ความแรงของรังสีเอกซ์ที่ M5.0 และการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไปในวันที่ 9 สิงหาคม 2554 และวันที่ 29 ตุลาคม 2556 ความแรงรังสีเอกซ์ X6.9 และ X2.3 ตามลำดับ เกิดขึ้นในช่วงพีคของวัฏจักรดวงอาทิตย์ปัจจุบัน เกิดด้านตะวันตกของดวงอาทิตย์มีระยะเวลาในการเคลื่อนที่จากดวงอาทิตย์มายังโลกน้อยกว่า 20 นาที วิเคราะห์และจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคฮีเลียม ด้วยสมการขนส่ง Ruffolo 1995, 1998 ที่ระดับพลังงาน 4.032 - 34.770 MeV/n สำหรับการปะทุวันที่ 3 พฤศจิกายน 2556 และระดับพลังงาน 86.793 - 171.373 MeV/n สำหรับการปะทุวันที่ 29 ตุลาคม 2556 โดยใช้ข้อมูลจากยานอวกาศ ACE (Advanced Composition Explorer) จากอุปกรณ์ SIS (Solar Isotope Spectrometer) และเปรียบเทียบข้อมูลด้วยวิธีกำลังสองเชิงเส้นน้อยที่สุดเพื่อหาระยะเวลาปลดปล่อยอนุภาคบนดวงอาทิตย์ด้วยการแก้ปัญหาแบบย้อนกลับ และ FWHM พบว่า เมื่อระดับพลังงานเพิ่มขึ้นระยะทางอิสระเฉลี่ยของอนุภาคจะเพิ่มขึ้นและระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคจากดวงอาทิตย์มายังโลกลดลงตามพลังงานที่เพิ่มขึ้น พบความแปรปรวนของผลสำหรับระดับพลังงานที่น้อยและระดับพลังงานสูงเนื่องจากได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมและจำนวนจุดข้อมูลที่น้อยทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูง การปะทุในวันที่ 9 สิงหาคม 2554 มีความแรงของรังสีเอกซ์และความเร็วลมสุริยะสูง (600 km/s) พบคลื่นกระแทกในช่วงท้ายเวลาการปะทุทำให้เกิดการเร่งของอนุภาคขณะเคลื่อนที่มายังโลกเพิ่มขึ้นกว่าค่าที่วัดได้จากยานอวกาศมาก พบว่าเหตุการณ์ทั้ง 3 นี้ไม่ส่งผลให้เกิดความรุนแรงต่อสนามแม่เหล็กโลก

คำสำคัญ: การปะทุบนดวงอาทิตย์ ลมสุริยะ คลื่นกระแทก สภาพอวกาศ การปล่อยมวลสารจากคอโรนา

Abstract

This research analyzed the gradual solar flares on 9 August 2554 and 29 October 2556 with x-ray flux of X6.9 and X2.3 respectively, and the impulsive solar flare on 3 November 2556 with the x-ray flux of M5.0. These 3 flare events occurred at the peak of the present solar cycle and their positions were on the west side of the Sun. The injection time of the solar particles was less than 20 minutes. The study simulated the propagation of He with the transport equation of Ruffolo (1995; 1998) in the energy range of 4.032 to 34.770 MeV/n for the solar flares on 9 August 2554 and 3 November 2556, and 86.793 to 171.373 MeV/n for the solar flare on 29 October 2556, used solar particles from the SIS instrument on the ACE

spacecraft, and fitted the data by the linear least squares technique. The research found the injection time by the deconvolution technique and FWHM (full width at half maximum), and the results showed that the mean free path of particles increased and the injection time of the particles from the Sun decreased as the energy level increased. It was found that the fluctuation of the results for the low and high energy was because the low energy particles were easily affected by the space environment and the instrument on the spacecraft detected less high energy particles, which caused a high error rate. The solar flare on 9 August 2554 had a high x-ray flux and solar wind speed (600 km/s), and there was a shock wave on the tail of flare, resulting in the injection time being more than the data from the spacecraft. Variation of the Earth's magnetic field from these solar events was not observed.

**Keywords:** Solar flare; Solar wind; Shock wave; Space weather; Coronal mass ejection

## บทนำ

การปะทุบนดวงอาทิตย์ (Solar Flare) เป็นการปะทุอย่างรุนแรงที่ผิวดวงอาทิตย์เกิดการปลดปล่อยอนุภาคที่มีพลังงานสูงเข้าสู่ที่ว่างระหว่างดาวเคราะห์ การระเบิดที่ผิวดวงอาทิตย์เกิดจากการยกตัวของสนามแม่เหล็กบนดวงอาทิตย์โดยภายใต้สนามแม่เหล็กจะมีอนุภาคที่มีประจุถูกกักอยู่ภายใต้เส้นสนามแม่เหล็ก อนุภาคเหล่านี้เมื่อมีพลังงานสูงขึ้นและมากพอที่สามารถเอาชนะแรงดึงของเส้นสนามแม่เหล็กทำให้สนามแม่เหล็กแยกออกจากกันอนุภาคพลังงานสูงที่อยู่ภายใต้เส้นสนามแม่เหล็กจะเคลื่อนที่เข้าสู่ตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์เรียกเหตุการณ์นี้ว่าการระเบิดหรือการปะทุบนดวงอาทิตย์

เนื่องจากการปะทุบนดวงอาทิตย์มีการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงจำนวนมากเข้าสู่ตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ ซึ่งอนุภาคเหล่านี้เคลื่อนที่เป็นเกลียวตามเส้นสนามแม่เหล็กที่เชื่อมต่อระหว่างดวงอาทิตย์กับโลก ทำให้อนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์สามารถเคลื่อนที่เข้ามายังโลกได้และจำนวนของอนุภาคและส่งผลต่อโลก อาทิเช่น การรบกวนระบบสื่อสารระหว่างนักบินบนเครื่องบินกับภาคพื้นดิน การรบกวนการปฏิบัติงานของนักบินอวกาศ ส่งผลกระทบต่อระบบอิเล็กทรอนิกส์บนยานอวกาศระบบสื่อสารและระบบไฟฟ้าบริเวณขั้วโลกและปรากฏการณ์ที่เกิดบริเวณขั้วโลกคือการเกิดแสงเหนือแสงใต้(aurora)

ผลกระทบที่กล่าวข้างต้นจะมีความรุนแรงมากหรือน้อยขึ้นกับความรุนแรงของการระเบิดบนดวงอาทิตย์ โดยที่ความรุนแรงของการระเบิดสัมพันธ์กับการเกิดวัฏจักรบนดวงอาทิตย์ (solar cycle) ในทุกๆ 11 ปี และในปัจจุบันดวงอาทิตย์อยู่ในรอบวัฏจักรที่ 24 โดยรอบวัฏจักรนี้ดวงอาทิตย์จะมีการเปลี่ยนแปลงและมีความรุนแรงมากสุดในช่วงปี พ.ศ. 2554 ถึง 2556 งานวิจัยนี้จึงศึกษาและวิเคราะห์การระเบิดที่เกิดขึ้นจริงและมีความรุนแรงในช่วงเวลาดังกล่าว

การปะทุบนดวงอาทิตย์แบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามลักษณะทางกายภาพคือการปะทุแบบทันทีทันใดและการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไป [1] การปะทุแบบทันทีทันใด (impulsive solar flare) ความหนาแน่นของอนุภาคตามเวลาจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วขณะเกิดการปะทุและลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออนุภาคเหล่านี้เคลื่อนที่ผ่านโลก [1] การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน Fe/O และ  $^3\text{He}/^4\text{He}$  มีค่าเป็น 4 เท่าของค่าที่พบในโคโรนา [2] ในขณะที่การปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไป (gradual solar flare) จะพบการปล่อยมวลสารจากชั้นโคโรนา (coronal mass ejection; CMEs) ในบริเวณที่เกิดการปะทุและมักเกิดคลื่นกระแทกในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ตามมา [2], [3] ในขณะที่ Cohen et al, 1999 [4] วิเคราะห์การปะทุแบบทันทีทันใดพบว่าค่าสถานะประจุเฉลี่ยของอนุภาคมีค่าสูงแสดงว่าอุณหภูมิบริเวณที่เกิดการกระจายตัวของอนุภาคใกล้บริเวณการปะทุมีค่าสูง ( $\sim 10^7$  K) อัตราส่วน Fe/O มีค่าสูง ( $\sim 1$ ) เมื่อพิจารณาข้อมูลการปลดปล่อยรังสีเอกซ์

ที่ร้อยละ 10 ของพิคความเข้มรังสีเอกซ์ ถ้ามีค่า <1 ชั่วโมงจะเป็นการปะทุแบบทันทีทันใด [5, 6] การปะทุบนดวงอาทิตย์ในแต่ละประเภทส่งผลกระทบต่อจำนวนอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านเข้ามาของโลกแตกต่างกัน

ในปัจจุบันเป็นช่วงสูงสุดของวัฏจักรดวงอาทิตย์ซึ่งกิจกรรมบนดวงอาทิตย์จะเพิ่มขึ้นและมีความรุนแรงกว่าช่วงปกติ คาดการณ์ว่าจะมีความรุนแรงบนดวงอาทิตย์มากในช่วงปี พ.ศ. 2554 - 2556 งานวิจัยนี้พยายามศึกษาการปะทุที่เกิดขึ้นจริงโดยเลือกเหตุการณ์ที่สอดคล้องกับประเภทของการปะทุวิเคราะห์ปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อการปะทุได้แก่ สภาพอวกาศขณะเกิดการปะทุและผลกระทบที่เกิดขึ้นบนโลกเช่น การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กโลก อีกทั้งการวิเคราะห์พฤติกรรมการณ์เคลื่อนที่ของอนุภาคพลังงานสูงที่ปลดปล่อยจากการปะทุบนดวงอาทิตย์มายังโลก ระยะเวลาที่อนุภาคใช้การในเคลื่อนที่มายังโลก เพื่อแจ้งเตือนเวลาล่วงหน้าทีอนุภาคใช้ในการเคลื่อนที่มาถึงโลกและสามารถป้องกันภัยที่จะเกิดขึ้นได้ทันและป้องกันการรบกวนสัญญาณสื่อสารและการปฏิบัติงานของนักบินอวกาศนอกโลก โดยงานวิจัยนี้เลือกวิเคราะห์การปะทุจริงบนดวงอาทิตย์ในวันที่ 3 พฤศจิกายน 2556 สำหรับเหตุการณ์การปะทุแบบทันทีทันใด การปะทุวันที่ 9 สิงหาคม 2554 และวันที่ 29 ตุลาคม 2556 สำหรับการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไป การเลือกเหตุการณ์การปะทุที่เกิดขึ้นทั้ง 3 เหตุการณ์นี้เน้นเป็นเหตุการณ์ที่มีความรุนแรงและความต่อเนื่องของข้อมูลความหนาแน่นอนุภาคตามเวลาที่ได้จากการบันทึกข้อมูลของยานอวกาศเพื่อให้การวิเคราะห์ข้อมูลมีความแม่นยำและถูกต้อง

### วัตถุประสงค์และวิธีดำเนินการวิจัย

การปะทุบนดวงอาทิตย์เป็นการระเบิดอย่างรุนแรงที่เกิดขึ้นที่บรรยากาศชั้นโครโมสเฟียร์ (chromosphere) บนดวงอาทิตย์ เกิดขึ้นเหนือรอยต่อระหว่างขั้วของสนามแม่เหล็กที่มีความเข้มสูง การปะทุบนดวงอาทิตย์เกิดขึ้นเนื่องจากการตัดขาดของเส้นสนามแม่เหล็กแล้วทำให้อนุภาคใต้เส้นสนามแม่เหล็กเคลื่อนที่ออกมาเกิดเป็นการระเบิดอย่างรุนแรงอนุภาคที่ถูกปลดปล่อยเป็นอนุภาคที่มีพลังงานสูงใน

รูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและเป็นอนุภาคที่มีประจุอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเหล่านี้เป็นตัวช่วยให้ลมสุริยะที่ออกมาจากดวงอาทิตย์ (solar wind) มีความรุนแรงขึ้น การปะทุบนดวงอาทิตย์ที่มีความรุนแรงมักพบคลื่นกระแทก (shock wave) ตามมาเนื่องจากการปลดปล่อยมวลสารจากดวงอาทิตย์ โดยสังเกตจากการพบคลื่นวิทยุประเภทที่ 2 (คลื่นความถี่ช่วง 0.1-100 MHz เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว  $10^6$  เมตรต่อวินาที) และคลื่นวิทยุประเภทที่ 4 (พบการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า) อนุภาคที่ถูกปลดปล่อยเนื่องจากการระเบิดบนดวงอาทิตย์เป็นอนุภาคที่มีพลังงานสูงเรียกว่ารังสีคอสมิก (cosmic ray) มีพลังงานในช่วง  $10^3 - 10^{20}$  eV เป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า มีผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศโลกเช่นด้านการสื่อสารระบบไฟฟ้าบริเวณขั้วโลก การทำงานของนักบินอวกาศ แสงเหนือแสงใต้ ผลกระทบต่อโลกเหล่านี้เรียกรวมว่าสภาพอวกาศ (space weather)

ลมสุริยะมีกำเนิดจากชั้นบรรยากาศโคโรนาบนดวงอาทิตย์ องค์ประกอบของลมสุริยะร้อยละ 95 เป็นอนุภาคโปรตอน ร้อยละ 4 เป็นอนุภาคอัลฟาและที่เหลือเป็นอนุภาคอื่นๆ เนื่องจากอนุภาคพลังงานสูงที่ปลดปล่อยออกมาพร้อมการระเบิดบนดวงอาทิตย์ประกอบด้วยอนุภาคที่มีประจุจึงเคลื่อนที่เป็นเกลียวตามเส้นสนามแม่เหล็กกระหว่างดาวเคราะห์ ความเร็วลมสุริยะในภาวะปกติมีค่าประมาณ 400 กิโลเมตรต่อวินาที และมีความหนาแน่นอนุภาค <10 อนุภาคต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

ดวงอาทิตย์ประกอบด้วยพลาสมาร้อนและมีสนามแม่เหล็กบนผิวดวงอาทิตย์บางบริเวณ สนามแม่เหล็กมีความแรงทำให้พลาสมาถูกกักอยู่ภายใต้วงสนามแม่เหล็กปิด ถ้าความดันของพลาสมามีค่ามากกว่าแรงดันของสนามแม่เหล็กจะทำให้สนามแม่เหล็กยกตัวขึ้นและขาดออกจากกันพร้อมปลดปล่อยพลาสมาหรืออนุภาคที่มีประจุและมีพลังงานสูงออกมา อนุภาคที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากดวงอาทิตย์เหล่านี้จะลากเส้นสนามแม่เหล็กตามออกมาและโค้งเป็นเกลียวตามการหมุนรอบตัวเองของดวงอาทิตย์ และเนื่องจากอนุภาคที่ออกมาจาก

ดวงอาทิตย์มีความแปรปรวนจึงทำให้เส้นสนามแม่เหล็กที่ออกมาจากดวงอาทิตย์มีความไม่เรียบและแปรปรวนตามไปด้วย [7] งานวิจัยนี้วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่เคลื่อนที่ตามเส้นสนามแม่เหล็กจากดวงอาทิตย์มายังโลกตัวตามเวลา โดยใช้สมการขนส่งของ Ruffolo 1995, 1998 [1, 8] ซึ่งมีพื้นฐานจากสมการการฟุ้ง (Diffusion equation) ของอนุภาคในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ดังสมการ

$$D \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} - \frac{\partial F}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

เมื่อ D คือสัมประสิทธิ์การฟุ้ง,  $\partial x$  คือระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน,  $\partial t$  คือช่วงเวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านระยะ  $\partial x$ ,  $\frac{\partial^2 F}{\partial x^2}$  คือฟลักซ์ของอนุภาคต่อหน่วยปริมาตรที่ไหลผ่าน  $\partial x$  และ  $\frac{\partial F}{\partial t}$  คือ ความหนาแน่นของอนุภาคตามเวลา จากสมการการฟุ้งนำมาประยุกต์ร่วมกับสมการฟอร์กเกอร์แพลงก์ (Fokker Planck equation) เพื่อใช้อธิบายการกระจายตัวของฟลักซ์ของอนุภาคตามเวลาดังสมการ

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial (a_i F)}{\partial a_i} = Q \quad (2)$$

เมื่อ Q คือพจน์แหล่งกำเนิด (source term), F คือฟังก์ชันการแพร่กระจาย (distribution function),  $a_i$  คือพารามิเตอร์ของตัวแปรอิสระต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคเคลื่อนที่เป็นเกลียวตามเส้นสนามแม่เหล็กในแนวแกน z และความเร็วนองอนุภาคที่ทำกับเส้นสนามแม่เหล็กด้วยมุม  $\theta$  และพิจารณาทิศทางการเคลื่อนที่ด้วย  $\mu$  เมื่อ  $\mu$  คือตัวแปรแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค และ p คือโมเมนตัมของอนุภาค จะได้ตั้งสมการ

$$\frac{\partial F(t, \mu, z, p)}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\Delta z}{\Delta t} F \right) - \frac{\partial}{\partial \mu} \left( \frac{\Delta \mu}{\Delta t} F \right) - \frac{\partial}{\partial p} \left( \frac{\Delta p}{\Delta t} F \right) - \frac{\partial}{\partial \mu} \left[ \frac{\varphi(\mu)}{2} \frac{\partial}{\partial \mu} \left( \frac{E'}{E} F \right) \right] \quad (3)$$

โดยที่  $\varphi(\mu)$  คือสัมประสิทธิ์การกระเจิงของมุมที่อนุภาคกระทำกับเส้นสนามแม่เหล็ก (The pitch-angle

scattering coefficient) และอัตราส่วนพลังงานในกรอบอ้างอิงลมสุริยะเทียบกับกรอบอ้างอิงหยุดนิ่งคือ

$$\frac{E'}{E} = 1 - \frac{(\mu v v_{sw} \sec \theta)}{c^2}$$

เมื่อได้สมการขนส่งแล้วเราสามารถเตรียมข้อมูลเพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยวิธีการเชิงตัวเลข Finite different method โดยใช้ข้อมูลจริงของการระเบิดบนดวงอาทิตย์ที่บันทึกโดยยานอวกาศ ACE อนุภาคที่เลือกวิเคราะห์คืออนุภาคฮีเลียม (He) พลังงานช่วง 4-35 MeV/n สำหรับการปะทุวันที่ 3 พฤศจิกายน 2556 และระดับพลังงาน 86.793 - 171.373 MeV/n สำหรับการปะทุวันที่ 29 ตุลาคม 2556 ข้อมูลที่ได้จากยานอวกาศประกอบด้วย เวลา ค่าฟลักซ์ของอนุภาค และค่าความคลาดเคลื่อนของอนุภาค ข้อมูลที่ใช้มีความต่อเนื่องของข้อมูลความหนาแน่นอนุภาคตามเวลา เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนที่จะเกิดขึ้น และเลือกเหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับประเภทของการปะทุทั้งประเภทที่เห็นที่ทันใดและประเภทค่อยเป็นค่อยไป โดยการเลือกเหตุการณ์ในแต่ละประเภทของการปะทุจะพิจารณาจากด้วยค่าระยะเวลาการปลดปล่อยรังสีเอกซ์และการตรวจพบคลื่นวิทยุประเภทที่ 2 และ 4 ที่แสดงการเกิดคลื่นกระแทกในตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ที่รายงานโดยยานอวกาศ GOES (The Geostationary Operational Environmental Satellite) โดยเลือกการปะทุในวันที่ 9 สิงหาคม 2554 และการปะทุในวันที่ 29 ตุลาคม 2556 สำหรับการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไปและการปะทุในวันที่ 3 พฤศจิกายน 2556 สำหรับการปะทุแบบทันที่ทันใด โดยการปะทุทั้ง 3 เหตุการณ์นี้มีลักษณะทางกายภาพดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของการปะทุ

การปะทุแบบทันทีทันใด					
วันที่	ตำแหน่ง	เวลาเริ่ม การปะทุ (UT)	ระดับความรุนแรง ของรังสีเอกซ์	ความเร็วลม สุริยะ (km/s)	เวลาคลื่น กระทบ (UT)
3 พฤศจิกายน 2556	S12W16	10	M5.0	387.8	-
การปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไป					
9 สิงหาคม 2554	N17W69	7.48	X6.9	600	8.01
29 ตุลาคม 2556	N06W92	21.42	X2.3	367	21.58

เมื่อเลือกเหตุการณ์การปะทุที่สนใจแล้ว ผู้วิจัยทำการดาวน์โหลดข้อมูลความหนาแน่นของอนุภาคตามเวลาจากอุปกรณ์ SIS ที่ติดตั้งบนยานอวกาศ ACE โดยข้อมูลที่ได้ ประกอบด้วย เวลา (นาฬิกา) ความหนาแน่นของอนุภาค (particles/(s-cm<sup>2</sup>-sr-MeV/n) และค่าความคลาดเคลื่อนของอนุภาค เมื่อเตรียมข้อมูลที่ได้จากยานอวกาศแล้ว ผู้วิจัยจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่เคลื่อนที่เข้ามายังโลกด้วยสมการขนส่งของ Ruffolo 1995, 1998 [1, 8] ด้วยวิธีการเชิงตัวเลข (Finite different method) โดยใช้ข้อมูลตั้งต้นจากเหตุการณ์การปะทุที่เกิดขึ้นจริงของแต่ละเหตุการณ์ ผลที่ได้จะเป็นค่าความหนาแน่นของอนุภาคตามเวลาในหน่วยนาฬิกาของแต่ละพลังงานและที่ระยะทางอิสระเฉลี่ยค่าหนึ่ง เมื่อระยะทางอิสระเฉลี่ยคือระยะทางที่อนุภาคสามารถเคลื่อนที่ได้ไกลสุดตามเส้นสนามแม่เหล็กก่อนที่จะกระเจิงเนื่องจากความไม่เรียบของสนามแม่เหล็ก;  $\lambda$  ในหน่วย AU

เราวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคโดยการฟิตข้อมูลแบบกำลังสองเชิงเส้นน้อยที่สุด (Linear least squares fitting) โดยค่าผลต่างระหว่างข้อมูลจริงที่ได้จากยานอวกาศและข้อมูลที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่ด้วยสมการขนส่งแสดงด้วยค่า

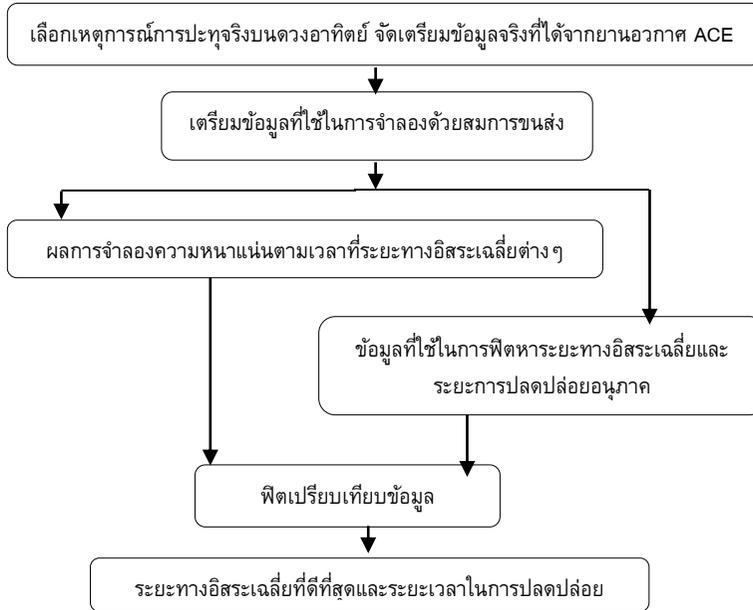
$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{[y_n - y(x_n)]^2}{\sigma_n^2}$$

เมื่อ  $\chi^2$  คือผลรวมของค่าความแตกต่างกำลังสองของข้อมูลจำนวน  $n$  ตัว,  $y_n$  คือข้อมูลจริงจากยานอวกาศ,  $y(x_n)$  คือข้อมูลที่ได้จากการจำลองการ

เคลื่อนที่ของอนุภาค และ  $\sigma_n^2$  คือค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ได้จากยานอวกาศ ผลการฟิตที่ได้จะแสดงฟังก์ชันการปลดปล่อยอนุภาคที่วัดได้ทั่วโลกสำหรับค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยที่ให้ค่า  $\chi^2$  น้อยที่สุด จากนั้นเราสามารถหาฟังก์ชันการปลดปล่อยอนุภาคบนดวงอาทิตย์โดยแทนฟังก์ชันการปลดปล่อยด้วยฟังก์ชันสามเหลี่ยม (Piecewise linear injection function;  $a_j$ ) และใช้วิธี Inversion Problem ในการแก้ปัญหาแบบย้อนกลับจากคำตอบไปสู่เงื่อนไขปัญหาที่เริ่มต้นเพื่อหาฟังก์ชันการปลดปล่อยที่แท้จริงจากดวงอาทิตย์ จากความสัมพันธ์

$$R(t) = \int_0^t G(t-t')I(t')dt' \quad (4)$$

เมื่อ  $I(t')$  คือฟังก์ชันการปลดปล่อยอนุภาคตามเวลาที่ดวงอาทิตย์,  $G(t-t')$  คือฟังก์ชันการตอบสนองเนื่องจากการขนส่งของอนุภาค,  $R(t)$  คือฟังก์ชันการตอบสนองที่โลกหรือค่าความหนาแน่นของอนุภาคตามเวลาที่ตรวจวัดได้ทั่วโลก และ  $I(t')$  คือฟังก์ชันสามเหลี่ยมแสดงการปลดปล่อยอนุภาคบนดวงอาทิตย์ [9] จากฟังก์ชันการปลดปล่อยอนุภาคบนดวงอาทิตย์ที่ได้เราสามารถหาระยะเวลาในการปลดปล่อยอนุภาคจากดวงอาทิตย์มายังโลกด้วยวิธี FWHM (Full width at half maximum) โดยขั้นตอนการดำเนินงานดังแสดงในภาพที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

**ผลการวิจัย**

จากการวิเคราะห์เหตุการณ์การปะทุที่สนใจ เราสามารถหาค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยของอนุภาคที่เคลื่อนที่ไปตามเส้นสนามแม่เหล็กและระยะเวลาที่

อนุภาคใช้ในการเคลื่อนที่จากดวงอาทิตย์มายังโลก จากการฟิตเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคและข้อมูลจริงที่วัดจากยานอวกาศ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงระดับพลังงาน ระยะทางอิสระเฉลี่ย ( $\lambda$ ) และระยะเวลาในการปลดปล่อยอนุภาคที่ได้จากผลการฟิตข้อมูลจากเหตุการณ์การปะทุจริงบนดวงอาทิตย์

วันที่ปะทุ	พลังงานอีเลียม (MeV/n)	$\lambda \pm \Delta\lambda$ (AU)	ระยะเวลาในการปลดปล่อยอนุภาค (นาที)
3 พฤศจิกายน 2556	4.032	$1.345 \pm 1.120$	445.984
	5.390	$1.116 \pm 0.887$	624
	6.685	$0.934 \pm 0.901$	579.579
	8.418	$1.040 \pm 0.864$	284.775
	11.493	$0.993 \pm 0.672$	375.695
	15.623	$1.244 \pm 0.913$	396.149
	22.959	$0.895 \pm 0.296$	312.714
	34.770	$0.697 \pm 0.528$	103.066
9 สิงหาคม 2554	4.032	$0.15 \pm 10.121$	815.020
	5.390	$0.165 \pm 0.143$	580.893

วันที่ปะทุ	พลังงานฮีเลียม (MeV/n)	$\lambda \pm \Delta\lambda$ (AU)	ระยะเวลาในการปลดปล่อยอนุภาค (นาที)
	6.685	$0.325 \pm 0.276$	535.610
	8.418	$0.229 \pm 0.198$	172.022
	11.493	$0.272 \pm 0.255$	244.477
	15.623	$0.153 \pm 0.145$	296.878
	22.959	$0.310 \pm 0.297$	191.738
	34.770	$0.701 \pm 0.685$	270.000
29 ตุลาคม 2556	86.793	$0.730 \pm 0.677$	473.069
	100.389	$0.115 \pm 0.101$	336.338
	111.834	$0.428 \pm 0.403$	431.71
	125.552	$0.431 \pm 0.396$	380.4544
	146.826	$0.975 \pm 0.887$	285.404
	171.372	$0.592 \pm 0.572$	144.958

การปะทุในวันที่ 3 พฤศจิกายน 2556 เป็นการปะทุแบบทันทีทันใดพบว่าค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยอยู่ในช่วงประมาณ 0.697-1.345 AU เมื่อระดับพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้นระยะทางอิสระเฉลี่ยของอนุภาคมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แต่พบการแปรปรวนของผลที่ได้ในช่วงพลังงานน้อยกว่า 6.685 MeV/n และช่วงพลังงานที่สูงกว่า 15.623 MeV/n เนื่องจากพลังงานที่น้อยข้อมูลจะได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมมาก และอนุภาคที่มีพลังงานสูงมาก ๆ จำนวนข้อมูลที่บันทึกได้มีค่าน้อยทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนสูง การปะทุในวันที่ 29 ตุลาคม 2556 และในวันที่ 9 สิงหาคม 2554 เป็นการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไปพบว่าเหตุการณ์ในวันที่ 9 สิงหาคม 2554 สามารถพืดและรายงานผลได้ในช่วงพลังงาน 4.032- 4.770 MeV/n แต่วันที่ 29 ตุลาคม 2556 เราไม่สามารถพืดและรายงานผลในช่วงพลังงานเดิมได้จึงได้วิเคราะห์ที่ระดับพลังงานที่สูงขึ้นเป็น 86.793-171.373 MeV/n ซึ่งทำให้ครอบคลุมพลังงานเพิ่มขึ้น พบว่าการรายงานผลระยะทางอิสระเฉลี่ยมีความแปรปรวนสูง เนื่องจากการปะทุทั้ง 2 ประเภทเกิดขึ้นกระแทกตามมาทำให้เกิดความแปรปรวนในแนวโน้มของระยะทางอิสระเฉลี่ย แต่ทั้ง 3 เหตุการณ์มีค่าระยะเวลาในการปลดปล่อยอนุภาคจากดวงอาทิตย์ส่วนใหญ่ไปทาง

เดียวกันคือ เมื่อพลังงานสูงขึ้นระยะเวลาการปลดปล่อยอนุภาคจากดวงอาทิตย์มีค่าลดลงเมื่อระดับพลังงานสูงขึ้น เนื่องมาจากอนุภาคที่มีระดับพลังงานสูงมีความสามารถในการเคลื่อนที่ไปตามเส้นสนามแม่เหล็กและเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าอนุภาคที่มีระดับพลังงานน้อยและไม่ถูกรบกวนเนื่อง จากสภาพของตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ จึงทำให้ใช้เวลาในการเดินทางน้อยกว่า ในขณะที่อนุภาคที่มีพลังงานน้อยจะถูกกระเจิงเนื่องจากความไม่เรียบของสนามแม่เหล็กทำให้ระยะเวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่จากดวงอาทิตย์มายังโลกใช้ระยะเวลานานกว่า

เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบของการปะทุที่เกิดขึ้นบนโลก ผู้วิจัยวิเคราะห์จากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กโลก (Kp-index) จาก <http://www.spaceweatherlive.com> พบว่าทั้ง 3 เหตุการณ์มีค่า Kp-index  $\leq 3$  ในช่วงที่เกิดการปะทุ ซึ่งเป็นค่าที่ไม่ส่งผลกระทบต่อโลก

#### สรุปและเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เลือกเหตุการณ์การปะทุที่มีความรุนแรงและสอดคล้องกับประเภทการปะทุ คือ การปะทุแบบทันทีทันใด สำหรับเหตุการณ์วันที่ 3 พฤศจิกายน 2556 ระดับความรุนแรง M5.0 ตำแหน่งการปะทุที่ S12W16 มีความเร็วลมสุริยะขณะเกิดการปะทุ 387.8

กิโลเมตรต่อวินาที เหตุการณ์นี้เริ่มระเบิดที่เวลา 05.16 UT และ สิ้นสุดที่เวลา 05.26 UT รวมเวลาในการระเบิดทั้งสิ้น 10 นาที และตรวจพบคลื่นวิทยุประเภทที่ I และประเภทที่ III แสดงว่าเหตุการณ์นี้ไม่มีการปลดปล่อยมวลสารจากชั้นโคโรนาตามมา และการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไปในวันที่ 9 สิงหาคม 2554 ระดับความรุนแรงรังสีเอกซ์ที่ X6.9 ตำแหน่งการปะทุที่ N17W69 ความเร็วลมสุริยะ 600 กิโลเมตรต่อวินาที เหตุการณ์นี้เริ่มระเบิดที่เวลา 07.48 UT และสิ้นสุดลงที่เวลา 08.08 UT รวมเวลาในการระเบิดทั้งสิ้น 20 นาที ตรวจพบคลื่นวิทยุประเภทที่ II ที่เวลา 08.01 UT แสดงว่ามีการตรวจพบคลื่นกระแทกในขณะที่เกิดการปะทุซึ่งเป็นเงื่อนไขของการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไป

เช่นเดียวกับเหตุการณ์ในวันที่ 29 ตุลาคม 2556 วัดระดับความรุนแรงรังสีเอกซ์ได้ X2.3 ตำแหน่งการปะทุที่ N06W92 มีความเร็วลมสุริยะ 317 กิโลเมตรต่อวินาที เหตุการณ์นี้เริ่มระเบิดที่เวลา 21.42 UT และ สิ้นสุดลงที่เวลา 22.01 UT รวมเวลาในการระเบิดทั้งสิ้น 19 นาที และตรวจพบคลื่นวิทยุประเภทที่ II และ IV ที่เวลา 21.58 UT เมื่อวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอนุภาคฮีเลียมที่ระดับพลังงานต่างๆ พบว่าระยะทางอิสระเฉลี่ยในบางช่วงพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานเพิ่มขึ้นแต่ในช่วงพลังงานที่ต่ำกว่า 6.685 MeV/n และช่วงพลังงานที่สูงกว่า 15.623 MeV/n ค่าระยะทางอิสระเฉลี่ยแปรปรวนเนื่องจากผลกระทบของตัวกลางระหว่างดาวเคราะห์ ที่ส่งผลต่อข้อมูลอนุภาคที่บันทึกได้ ในขณะที่ระยะเวลาที่อนุภาคใช้ในการเคลื่อนที่จากดวงอาทิตย์มายังโลกที่ได้จากการติดตามข้อมูลพบว่า อนุภาคที่มีระดับพลังงานสูงจะมีความสามารถในการเคลื่อนที่ไปตามเส้นสนามแม่เหล็กนานกว่าอนุภาคที่มีพลังงานต่ำ เนื่องจากอนุภาคพลังงานต่ำบางส่วนจะถูกกักไว้ได้ง่ายเนื่องจากความไม่เรียบของสนามแม่เหล็ก

สำหรับเหตุการณ์การปะทุในวันที่ 9 สิงหาคม 2554 เป็นการปะทุแบบค่อยเป็นค่อยไปที่มีความรุนแรงของรังสีเอกซ์สูง (X6.9) และมีความเร็วลมสุริยะค่อนข้างสูง พบว่าระยะเวลาที่อนุภาคใช้ในการเคลื่อนที่จากดวงอาทิตย์มายังโลกมีค่ามากกว่าค่าที่วัด

ได้จากยานอวกาศมากซึ่งสอดคล้องกับการตรวจพบคลื่นกระแทกในช่วงท้ายของเวลาการปะทุ ทำให้เกิดการเร่งของอนุภาคขณะเคลื่อนที่มายังโลกเพิ่มขึ้น และจากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กโลกพบว่าเหตุการณ์ทั้ง 3 นี้ทำให้เกิดความรุนแรงต่อสนามแม่เหล็กโลกน้อย เนื่องจากค่า Kp-index  $\leq 5$  สำหรับทั้ง 3 เหตุการณ์

### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ศ.ดร.เดวิด รูฟโฟโล อาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ให้ความอนุเคราะห์สมการขนส่งและโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ขอขอบคุณงบประมาณแผ่นดินประจำปี 2557 มหาวิทยาลัยนเรศวร ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ กลุ่มฟิสิกส์บูรณาการ ที่สนับสนุนทุนการทำวิจัย และขอขอบคุณภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่สนับสนุนวัสดุและอุปกรณ์การทำวิจัยในครั้งนี้

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Ruffolo, D. and Khumlumliert, T. 1995. "Formation, Propagation, and Decay of Coherent Pulses of Solar Cosmic Rays." **Geophysical Research Letters**, 22, 2073.
- [2] Mason, G. M. et al. 1999a. "Particle acceleration and sources in the November 1997 solarenergetic particle event." **Geophys. Letts.** 26: 153.
- [3] Mason, G. M. et al.1999b. "He enhancements in large solar energetic particle events." **Astrophys. J.** 525: L133.
- [4] Cohen, C. M. S. et al. 1999. "New observations of heavy-ion-rich solar particle events from ACE." **Geophys. Res. Letts.** 26: 2697.
- [5] Pallavivini, R., et al. 1997. "A survey of soft X-ray limb flare images: The relation between their structure in the corona

- and other physical parameters.” **Astrophys. J.** 216: 108.
- [6] Cane, H. V. et al. 1986. “Two classes of solar energetic particle events associated with impulsive and long-duration soft X-ray flares.” **Astrophys. J. Part 1** (ISSN 0004-637X), 301: 448.
- [7] Jokipii, J. R. 1968. “Cosmic-ray propagation. I. Charged particles in a random magnetic field.” **Astrophys. J.** 146, 480; (Addendum and erratum to Cosmic-ray propagation I. **Astrophys. J.** 152, 671, 1968).
- [8] Ruffolo, D. and Khumlumert, T. 1995. “Formation, propagation, and decay of coherent pulses of solar cosmic rays.” **Geophys. Res. Lett.** 22: 2073.
- [9] Ruffolo, D. Khumlumert T., and Youngde W. 1998. “Deconvolution of interplanetary transport of solar energetic particles.” **J. Geophys. Res.** 103: 20591.