



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เว็บไซต์ศูนย์การเรียนรู้การเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ การเปลี่ยนแปลง  
สภาพภูมิอากาศ และการเกิดภัยพิบัติ ที่สถานีภาคพื้นดินละติจูดต่ำ  
บริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก จังหวัดชุมพร ประเทศไทย  
Learning Center Web of Atmosphere Variability, Weather  
Variability, and Disaster Occurrence at Equatorial Magnetic  
Latitude Station, Chumphon Province, Thailand

รองศาสตราจารย์ ดร. ปุณยวีร์ จามจรีกุลกาญจน์  
นายอุดมสิทธิ์ ตั้งตระกูลไพศาล

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน  
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560 – 2562 วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) เว็บไซต์ศูนย์การเรียนรู้การเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการเกิดภัยพิบัติ ที่สถานีภาคพื้นดินละติจูดต่ำบริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก จังหวัดชุมพร ประเทศไทย..... แหล่งเงิน..... งบประมาณแผ่นดิน.....  
 ประจำปีงบประมาณ 2560-2562..... จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน..... 530,000..... บาท  
 ระยะเวลาทำการวิจัย..... 3..... ปี ตั้งแต่..... 1 ตุลาคม พ.ศ. 2559..... ถึง..... 30 กันยายน พ.ศ. 2562.....  
 นักวิจัย..... รศ.ดร. ปณณวีร์ จามจรีกุลกาญจน์ และ นายอุดมสิทธิ์ ตั้งตระกูลไพศาล.....  
 ที่ปรึกษาโครงการ..... ศ.ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ..... หน่วยงานต้นสังกัด..... วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์.....

### บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้นำเสนอเว็บไซต์ศูนย์การเรียนรู้การเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการเกิดภัยพิบัติ ที่สถานีภาคพื้นดินละติจูดต่ำบริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก จังหวัดชุมพร ประเทศไทย เรียกว่า เว็บไซต์ศูนย์การเรียนรู้สภาพอากาศและภัยพิบัติ ซึ่งจะเน้นไปที่การนำเสนอสมการใหม่ที่ใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นล่างของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (B2botP) ตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่อาศัยค่า foF2 การสร้างแบบจำลองหาค่า B2botP แผ่นดินไหวและการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ผลลัพธ์ที่ได้จากการทำวิจัยก็คือ หน้าเว็บที่มีข้อมูลต่าง ๆ ที่นำเสนอตามขอบเขตงานที่นำเสนอ โดยค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นล่างที่คำนวณได้จากสมการที่นำเสนอมีการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนและมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่สังเกตได้ และผลต่างสัมบูรณ์ของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นล่างในฤดูร้อน ฤดูอิควินอกซ์และฤดูหนาวมีค่า 0.09 - 25.11 กม. , 0.03 - 16.46 กม. และ 0.02 - 22.49 กม. ตามลำดับ ส่วนผลการศึกษิตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่อาศัยค่า foF2 นั้น พบว่า ค่าความน่าจะเป็นในการเกิดขึ้นแต่ละระดับของพายุนี้มีค่าที่ใกล้เคียงกันโดยสถานะเงียบเป็นเหตุการณ์ที่พบมากที่สุดและสถานะพายุบวกที่รุนแรง ( $I_p3$ ) เป็นเหตุการณ์ที่พบน้อยที่สุด, ค่า  $I_p1$  และ  $I_N1$  มีค่าเกิดขึ้น 12-14% และ  $I_N2$  มีค่าเกิดขึ้น 1.4% และจากการวิเคราะห์ค่า foF2 ในช่วงที่เกิดแผ่นดินไหว จะเห็นได้ว่าไม่กี่ชั่วโมงก่อนการเกิดแผ่นดินไหว ค่า foF2 จะมีค่าลดลงจนมีค่าน้อย ๆ ในช่วงที่เกิดแผ่นดินไหว และในช่วงเวลา 2-3 วันก่อนแผ่นดินไหว ค่า foF2 ก็มีค่าที่เพิ่มขึ้นที่ขึ้นอยู่กับค่า foF2 เฉลี่ยในแต่ละวัน สำหรับการเปลี่ยนแปลงค่า TEC ในช่วงที่เกิดแผ่นดินไหว พบว่า ในระหว่างที่เกิดแผ่นดินไหวที่รุนแรง เราจะเห็นการเปลี่ยนแปลงของ TEC ภายใน 5 วันก่อนเกิดแผ่นดินไหว โดยจะมีการเพิ่มขึ้นของ TEC สองวันก่อนที่จะเริ่มการซ็อกหลักและมีการลดลงของ TEC 3-5 วันก่อนเกิดแผ่นดินไหว

คำสำคัญ : ละติจูดต่ำบริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก, การเกิดภัยพิบัติ, การเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ, การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ, ชุมพร, ศูนย์การเรียนรู้, เว็บไซต์.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Research Title:** Learning Center Web of Atmosphere Variability, Weather Variability, and Disaster Occurrence at Equatorial Magnetic Latitude Station, Chumphon, Thailand

**Research Fund:** Annual Budget A.D. 2017-2019 **Research Budget:** 530,000 baht

**Duration:** 3 year from October 1<sup>st</sup>, 2017 to September 30<sup>th</sup>, 2019

**Researcher:** Assoc. Prof. Dr. Punyawit Jamjareegulgarn and Udomsit Tangtrakunphaisan

**Research Supervisor:** Prof. Dr. Pornchai Supnithi **Faculty:** Prince of Chumphon Campus

## ABSTRACT

This research proposes a learning center web of atmosphere variability, weather variability, and disaster occurrence at equatorial magnetic latitude station, Chumphon, Thailand with a shorten name “web site of learning center for weather and disaster”. The main goals are to present a new expression for computing an ionospheric bottomside thickness parameter (B2botP), an ionospheric storm scale (I-scale) based on foF2, a B2botP model, the earthquakes, and the changes of ionospheric parameters. The research outcomes include the web pages with crucial information, the B2botP computation, and the B0 model. The proposed B2botP behaves similar diurnal variation and are close to the observed B0. Their absolute differences in summer, equinox, and winter are equal to 0.09 - 25.11 km, 0.03 - 16.46 km, and 0.02 - 22.49 km, respectively. Refer to the foF2-based I-scale, the occurrence probability (Pocc) of each I-scale are comparable one another. The Pocc of quiet situations occur maximally about 71%. The Pocc of  $I_p3$  occur minimally about 0.3%. The Pocc of  $I_p1$ ,  $I_N1$ , and  $I_N2$  are about 14%, 12.9%, and 1.4%. Refer to a foF2 analysis during earthquake, we find that a few hours prior to earthquake, the foF2 decrease, and then reach to a small value during the earthquake. Also, during a few days before earthquake, the foF2 increases which depends on the daily averaged foF2. As for the TEC changes during earthquake, we find that during the severe earthquake, the TEC have changes for five days before earthquake. The TEC increases by two days before the onset of main shock, and it decreases by 3-5 days prior to earthquake.

**Keywords:** Equatorial Magnetic Latitude, Disaster Occurrence, Atmosphere Variability, Weather Variability, Chumphon, Learning Center, Web Site.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร. พรชัย ทรัพย์นิธิ อาจารย์ผู้ให้คำแนะนำ ให้ความรู้และให้การสนับสนุนตลอดเวลาเกี่ยวกับการทำวิจัยทางด้าน ionospheric electron density profiles, ionospheric monitoring, geomagnetic storm, plasma bubble, VHF radar และ space weather รวมถึงนักศึกษาปริญญาโทและเอกของห้องปฏิบัติการ CSSRG สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือและให้ข้อคิดเห็นที่มีประโยชน์ต่อการทำวิจัย รวมถึงนักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมสารสนเทศ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สจล. วิทยาเขตชุมพรฯ คณะกรรมการวิจัย เจ้าหน้าที่ฝ่ายวิจัย ฝ่ายพัสดุและฝ่ายการเงินของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ ทุก ๆ ท่านที่ช่วยประสานงานและช่วยดำเนินการต่าง ๆ จนทำให้โครงการวิจัยนี้เสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี พ.ศ. 2560 - 2562 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รศ.ดร.ปทุมยวีร์ จามจรีกุลกาญจน์  
นายอุดมสิทธิ์ ตั้งตระกูลไพศาล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	VII
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	5
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	8
<b>บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>9</b>
2.1 ชั้นไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere).....	9
2.2 วัฏจักรสุริยะ (solar cycle).....	10
2.3 ปริมาณอิเล็กทรอนิกส์.....	11
2.4 สภาพภูมิอากาศ.....	12
2.5 แผ่นดินไหว.....	14
2.6 พายุแม่เหล็กโลก.....	15
2.7 ภาวะเรือนกระจก.....	20
2.8 แอลนีโญ.....	23
2.9 ลานีญา.....	24
2.10 พารามิเตอร์ความหนาแน่นล่างของแบบจำลอง IRI กับแบบจำลอง NeQuick.....	25
2.11 ตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์.....	28
2.12 แผ่นดินไหวและการเปลี่ยนแปลงชั้นไอโอโนสเฟียร์.....	30
<b>บทที่ 3 หลักการและการออกแบบ</b> .....	<b>52</b>
3.1 องค์ประกอบของหน้าหลัก.....	52
3.2 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ความหนาแน่นล่าง.....	53
3.3 ตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์.....	54
3.4 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นล่าง (B2botP).....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
3.5 แบบจำลองการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ความหนาของชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านล่าง .....	61
<b>บทที่ 4 ผลการศึกษา</b> .....	<b>63</b>
4.1 องค์ประกอบของโฮมเพจ.....	63
4.2 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ความหนาด้านล่าง.....	76
4.3 ตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่อาศัยค่า foF2.....	79
4.4 การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ความหนาด้านล่างของชั้นไอโอโนสเฟียร์ ในวัฏจักรสุริยะที่ 24.....	85
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและแนวทางการพัฒนางานวิจัย</b> .....	<b>92</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	92
5.2 แนวทางการพัฒนางานวิจัย.....	94
<b>บรรณานุกรม</b> .....	<b>95</b>
<b>ภาคผนวก</b>	
ภาคผนวก ก ผลผลิตงานวิจัย 3 ปี (งบประมาณปี พ.ศ. 2560 – 2562).....	101
ภาคผนวก ข สรุปค่าใช้จ่ายโครงการวิจัย 3 ปี (งบประมาณปี พ.ศ. 2560 – 2562).....	118
<b>ประวัตินักวิจัย</b> .....	<b>120</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนงานวิจัยและช่วงเวลาในการดำเนินการวิจัย.....	6
2.1 ค่ามัธยฐานของเวลาประวิงของสัญญาณ GPS PRN 1 – PRN 30 ในช่วงปี 2004-2013.....	36
2.2 สถานที่, วันที่, ละติจูด, ลองจิจูดและเวลาของการเกิดแผ่นดินไหวครั้งใหญ่ที่เกาะที่ศึกษา.....	48
4.1 ค่า I-scale, คำบรรยายของระดับพายุ และระดับของค่า $P_{foF2}^*$ ที่เกิดขึ้น.....	80
4.2 จำนวนวัน (Samples) ที่พบแต่ละระดับของ I-scale ที่เกิดขึ้นทั้ง 3 สถานี.....	82
4.3 ค่าเฉลี่ยเลขคณิตและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า $P_{foF2}$ ที่สถานีชุมพร.....	83
4.4 ตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ของเครื่อง Digisonde ในสถานีวัดทั่วโลกจำนวน 12 สถานี.....	86
4.5 ค่าเฉลี่ยของค่าปรับแก้ในแต่ละโซนของสถานี Digisonde จำนวน 12 สถานี.....	87



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 บรรยากาศที่แบ่งออกเป็นชั้นต่าง ๆ ตามค่าอุณหภูมิและปริมาณความหนาแน่นพาสมา.....	9
2.2 จำนวนจุดดับของวัฏจักรสุริยะรอบที่ 21 – 25 ตั้งแต่ ค.ศ. 1975 ถึง ค.ศ. 2030.....	10
2.3 สภาพการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นของพายุ St. Patrick day ระหว่างวันที่ 16-19 มีนาคม 2015.....	16
2.4 สภาพारेเรือนกระจก.....	21
2.5 ความผันแปรของอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกและทางซีกโลกเหนือ.....	22
2.6 ปริมาณน้ำฟ้าของโลกช่วงศตวรรษที่ 20.....	22
2.7 ระดับน้ำทะเลของประเทศเนเธอร์แลนด์ ฝรั่งเศสและโปแลนด์ในศตวรรษที่ 20.....	23
2.8 สภาพारेปกติของบริเวณเส้นศูนย์สูตรเหนือมหาสมุทรแปซิฟิก.....	24
2.9 สภาพारेที่เกิดเอลนีโญ.....	24
2.10 สภาพारेลานีญา.....	25
2.11 ระดับน้ำพื้นผิวมหาสมุทรแปซิฟิก.....	25
2.12 ตำแหน่งที่เกิดแผ่นดินไหว (วงกลมสีแดง) ทั่วโลกในช่วงวันที่ 1 มกราคม – 5 มิถุนายน 2562.....	31
2.13 จุดศูนย์กลางของการเกิดแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นทั้งสิ้น 358,214 จุดทั่วโลก ปี ค.ศ. 1963-1998.....	32
2.14 แผนที่ที่แสดงจุดที่เกิดแผ่นดินไหวขนาดที่มากกว่า 7.0 ริกเตอร์ ในช่วงปี ค.ศ. 1900-2006.....	32
2.15 แผนที่ที่เกิดแผ่นดินไหวขนาดเท่ากับหรือมากกว่า 8.0 ริกเตอร์ ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1900 เป็นต้นมา.....	33
2.16 บริเวณรอยเลื่อนของโลกที่อาจจะเกิดแผ่นดินไหวบนแผ่นดินของประเทศไทย.....	33
2.17 ขนาดของแผ่นดินไหวที่เกิดในประเทศไทย.....	34
2.18 การเตรียมการสำหรับอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อทำการตรวจจับและแจ้งเตือนการเกิดแผ่นดินไหว.....	34
2.19 การหาค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 (foF2) ที่วัดได้ด้วยไอโอโนซอนด์.....	36
2.20 แผนรูปไอโอโนแกรมที่สถานีชุมพร (ขวา) บนหน้าจอคอมพิวเตอร์.....	37
2.21 ค่า Dst-index, ค่า foF2 ที่วัดได้ กับค่าทางสถิติของ foF2 ที่สถานีชุมพรและสถานีโกโตตะบัง ตั้งแต่วันที่ 25 กันยายน - 6 ตุลาคม 2009.....	39
2.22 ผลต่างระหว่างค่ามัธยฐาน ค่าขอบเขตบนและล่างของค่า foF2 กับค่า foF2 ที่วัดได้ที่ สถานีชุมพรและสถานีโกโตตะบังในช่วงเวลาที่ศึกษา.....	40
2.23 ค่า foF2 เฉลี่ยสำหรับเดือนสิงหาคม กันยายนและตุลาคม ปี 2007.....	41
2.24 การเปลี่ยนแปลงในค่า foF2 ในวันที่ 12 ของเดือนสิงหาคม กันยายนและตุลาคม ปี 2007.....	42
2.25 การเปลี่ยนแปลงในค่า foF2 ในวันที่ 13 ของเดือนสิงหาคม กันยายนและตุลาคม ปี 2007.....	42
2.26 การเปรียบเทียบค่า foF2 ในวันที่ 11, 12 และ 13 ของเดือนกันยายน ปี 2007.....	43
2.27 การเปรียบเทียบค่า foF2 ในช่วงที่เกิดแผ่นดินไหว ในวันที่ 31 ตุลาคม ปี 2002.....	44
2.28 การเปรียบเทียบค่า foF2 ในช่วงที่เกิดแผ่นดินไหว ในวันที่ 1 พฤศจิกายน ปี 2002.....	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.29 ตำแหน่งของสถานีพารามสียและจุดศูนย์กลางของการเกิดแผ่นดินไหวทั้ง 9 จุดที่วิเคราะห์.....	46
2.30 แผนผังไดอะแกรมแสดงรูปทรงเรขาคณิตของการแปลงในการแปลงค่า STEC ไปเป็นค่า VTEC จากจุด IPP ที่ระดับความสูง h.....	47
2.31 การเปลี่ยนแปลงค่า TEC, ดัชนี Dst, ดัชนี AE และ ดัชนี ap ในช่วงแผ่นดินไหวจีน.....	49
2.32 การเปลี่ยนแปลงค่า TEC, ดัชนี Dst, ดัชนี AE และ ดัชนี ap ในช่วงแผ่นดินไหว Jaisalmer.....	50
2.33 การเปลี่ยนแปลงค่า TEC, ดัชนี Dst, ดัชนี AE และ ดัชนี ap ในช่วงแผ่นดินไหวพม่า.....	51
3.1 หน้าเว็บเพจหลักที่ออกแบบของโครงการวิจัย.....	53
3.2 ตำแหน่งของสถานี Jicamarca และสถานี Ramey.....	53
3.3 การกระจายทางสถิติของค่า $P_{TEC}$ จากปี 1997 ถึง 2014.....	56
3.4 การกระจายทางสถิติของค่า $P_{TEC}^*$ จากปี 1997 ถึง 2014.....	57
3.5 โค้ดแมทแลบที่ใช้ในการคำนวณหาค่า B2botP_old และค่า B2botP_new.....	60
3.6 ผลการรันของโค้ดในรูปที่ 3.5.....	61
3.7 แบบจำลองการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างโดยใช้โปรแกรม guide.....	62
4.1 หน้าเว็บเพจหลักของโครงการวิจัย.....	64
4.2 หน้าเว็บชั้นบรรยากาศ.....	64
4.3 หน้าเว็บสรุปภูมิอากาศ.....	65
4.4 หน้าเว็บก๊าซเรือนกระจก.....	65
4.5 หน้าเว็บสภาวะโลกร้อน.....	66
4.6 หน้าเว็บปริมาณน้ำฝนและระดับน้ำทะเล.....	66
4.7 หน้าเว็บแอลนีโญ.....	67
4.8 หน้าเว็บลานีญา.....	67
4.9 หน้าเว็บภัยพิบัติ.....	68
4.10 เว็บเพจที่เข้าสู่หัวข้อ “แผ่นดินไหว” ในฟิลด์ภัยพิบัติ.....	68
4.11 เว็บเพจแผ่นดินไหวและการเปลี่ยนแปลงในชั้นไอโอโนสเฟียร์.....	69
4.12 เว็บเพจการเปลี่ยนแปลงของค่า foF2 ก่อนที่จะเกิดแผ่นดินไหว.....	69
4.13 เว็บเพจการเปลี่ยนแปลงของค่า TEC ก่อนที่จะเกิดแผ่นดินไหว.....	70
4.14 หน้าเว็บ International Reference Ionosphere (IRI).....	70
4.15 หน้าเว็บแบบจำลอง NeQuick 2.....	71
4.16 เว็บเพจของแบบจำลองคำนวณค่า B2botP.....	72
4.17 โปรแกรม guide ที่ใช้คำนวณหาค่า B2botP.....	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 หน้าเว็บพายุแม่เหล็กโลก.....	73
4.19 หน้าเว็บพายุแม่เหล็กโลกที่เกิดขึ้นในวันที่ 15 – 17 มีนาคม พ.ศ. 2560.....	73
4.20 หน้าเว็บพายุ TEC (TEC Storm).....	74
4.21 หน้าเว็บพายุ SED (Storm Enhanced Density).....	74
4.22 หน้าเว็บบทความวิจัย.....	75
4.23 หน้าเว็บเกี่ยวกับเรา.....	75
4.24 การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างในฤดูหนาวที่สถานี Jicamarca.....	77
4.25 การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างในฤดูอควินอกซ์ที่ Jicamarca.....	77
4.26 การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างในฤดูร้อนที่ Jicamarca.....	78
4.27 การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างที่สถานี Ramey.....	78
4.28 การกระจายตัวแบบเกาส์เซียนของค่าข้อมูล $P_{foF2}$ ที่สถานีชุมพรที่เวลา 18 UT (01 LT).....	81
4.29 การกระจายตัวแบบเกาส์เซียนของค่าข้อมูล $P^*_{foF2}$ ที่สถานีชุมพรที่เวลา 18 UT (01 LT).....	82
4.30 การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างในฤดูหนาวที่ เมือง El Arenosillo และเมือง Chilton ในปี ค.ศ. 2014.....	88
4.31 การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างในฤดูอควินอกซ์ที่ เมือง El Arenosillo และเมือง Chilton ในปี ค.ศ. 2014.....	89
4.32 การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างในฤดูร้อนที่ เมือง El Arenosillo และเมือง Chilton ในปี ค.ศ. 2014.....	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

รายงานวิจัยฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างเว็บไซต์ศูนย์การเรียนรู้การเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการเกิดภัยพิบัติ ที่สถานีภาคพื้นดินละติจูดต่ำบริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก จังหวัดชุมพร โดยมีความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาและวัตถุประสงค์ของการวิจัยอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 1.1 และ 1.2 ส่วนหัวข้อที่ 1.3 และ 1.4 กล่าวถึงขอบเขตและวิธีดำเนินการวิจัยที่จะต้องดำเนินการเป็นขั้นเป็นตอน เพื่อนำไปสู่การออกแบบและสร้างเว็บไซต์ศูนย์การเรียนรู้ ให้เสร็จสมบูรณ์ นอกจากนี้ หัวข้อที่ 1.5 ยังได้กล่าวถึงประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ เนื้อหาในแต่ละหัวข้อมีดังนี้

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้ โลกของเรามีสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและมีภัยพิบัติที่ทวีความรุนแรงและเกิดขึ้นมากมายในหลายประเทศทั่วโลก จึงทำให้หน่วยงานต่าง ๆ ทั้งภาครัฐบาลและภาคเอกชนพยายามที่จะตรวจวัดค่าข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลง ได้แก่ อุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน ฯลฯ และภัยพิบัติที่เกิดขึ้น ได้แก่ การเกิดแผ่นดินไหว การเกิดน้ำท่วม การเกิดคลื่นสึนามิ ฯลฯ รวมถึงได้เร่งหามาตรการในการป้องกันและจัดหาระบบ/เครื่องมือ/อุปกรณ์มาติดตั้งเพิ่มเติมเพื่อบรรเทาความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชีวิต ทรัพย์สิน รวมถึงพืช/ผลไม้และสัตว์เศรษฐกิจ ซึ่งถึงแม้ว่าจะมีการติดตั้งและการใช้งานระบบและเครื่องมือวัดฯ ดังกล่าวกันอย่างมากมาย แต่ระบบและเครื่องมือวัดฯ เหล่านี้ก็มีข้อจำกัดเช่นกัน ในแง่ของอายุการใช้งาน ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา และค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมและปรับแต่งระบบ ค่าใช้จ่ายในการจ้างผู้ดูแล ซึ่งต้องใช้งบประมาณมหาศาล อีกทั้งข้อมูลสารสนเทศที่ได้จากแต่ละหน่วยงานทั้งทางด้านสภาพภูมิอากาศและภัยพิบัติในประเทศไทยนั้นก็ไม่เคยนำมาศึกษาหาความสัมพันธ์และวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้รับ เพื่อที่จะนำไปทำนายนการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการเกิดภัยพิบัติร่วมกัน

จากงานวิจัยของชาวต่างชาติในอดีตที่ผ่านมา ยกตัวอย่างเช่น [1] – [5] พบว่า การเปลี่ยนแปลงปริมาณอิเล็กตรอนรวม (total electron content หรือ TEC) ในชั้นบรรยากาศ อาทิเช่น ชั้น ไอโอโนสเฟียร์และชั้นพลาสมาเฟียร์ ที่ล้อมรอบโลกนั้นสามารถที่จะนำมาใช้ในการเพิ่มความแม่นยำในการระบุทิศทาง (positioning) และการนำร่องของดาวเทียม GPS (global positioning system) รวมถึง การบ่งชี้และการทำนายการเกิดสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงและภัยพิบัติที่เกิดขึ้นได้

N. Bergeot et al. [1] นี้แนะนำแบบจำลองเชิงการทดลองใหม่สำหรับการทำนายค่าเฉลี่ยรายวันของ TEC ที่ตำแหน่งละติจูดที่กำหนดโดยใช้อินพุตคือ ค่าดัชนีสุริยะ ในการพัฒนาแบบจำลองดังกล่าวนี้ เราใช้ประโยชน์จากค่าข้อมูล TEC ที่ได้จากระบบ GNSS ทั่วโลกจำนวน 15 ปี และค่าดัชนีสุริยะ (จำนวนจุดดับ ค่า F10.7 และค่า F10.7P) ในช่วงวัฏจักรสุริยะที่ 23 จากการทดสอบทั้งหมด พบว่า แบบจำลองที่ใช้ศึกษาชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในการทำนายค่าเฉลี่ยรายวันของ TEC นำเสนอผลต่างค่ามัธยฐานรายวันว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีด้วยค่าที่สังเกตได้เท่ากับ  $1.4 \pm 0.9$  TECu ( $11.5 \pm 2.9\%$  สำหรับค่าผลต่างสัมพัทธ์) โดยที่ไม่มีการแย่งมากนักในระหว่างปีของวัฏจักรสุริยะที่ 23 ในการพิจารณาแบบจำลองเชิงการทดลองใหม่นี้ เราใช้การปรับค่าด้วยค่ากำลังสองน้อยที่สุด โดยมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้ (1) มีการผสมผสานของเทอมเชิงเส้น รายปีและครึ่งรายปีระหว่างค่า TEC และค่า F10.7P (2) การทำเป็นดิคริตเมื่อเทียบกับปีของวัฏจักรสุริยะ ผลต่างหลักระหว่างค่า TEC ที่ทำนายได้และที่สังเกตได้ในระหว่างพายุแม่เหล็กโลกตามที่ระบุ ผลต่างที่มากที่สุด ( $-3.2 \pm 1.5$  TECu) และผลต่างสัมพัทธ์ ( $-19.6 \pm 15.0\%$ ) เกิดขึ้น 1 วันภายหลังจากที่มีพายุเกิดขึ้น เวลาปกติที่ใช้ในการดึงค่าข้อมูลในสภาวะเงื่อนไขก่อนการเกิดพายุมีค่าเท่ากับ 3-4 วันภายหลังจากการเกิดพายุ ผลที่ได้รับเหล่านี้แสดงภาพทั่วโลกของผลกระทบของสภาวะการณ์ภูมิอากาศในอวกาศที่รุนแรงบนชั้นบรรยากาศด้านบนของโลก ผลงานวิจัย [1] นี้แสดงให้เห็นถึงความจำเป็นที่ควรสร้างแบบจำลองการทำนายค่า TEC เพื่อที่จะทราบปรากฏการเกิดพายุแม่เหล็กโลก ซึ่งพายุดังกล่าวนี้อาจจะบ่งชี้ถึงสภาพภูมิอากาศบนผิวโลกที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและอาจจะเกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์หรือภัยพิบัติบนพื้นโลกก็เป็นไปได้ ดังนั้น จึงเป็นประเด็นที่จะศึกษาและพัฒนาต่อเนื่องจากงานวิจัยนี้ได้

L. R. Cander [2] ได้กล่าวไว้ว่า ในขณะที่สังคมยุคใหม่กำลังที่พัฒนาโครงสร้างพื้นฐานที่ทันสมัยใหม่อย่างต่อเนื่อง คุณสมบัติและพฤติกรรมของระบบโลก-ดวงอาทิตย์ก็มีความอ่อนไหวมากขึ้นเรื่อย ๆ คุณภาพในการให้บริการทางด้านเทคโนโลยีอวกาศสำหรับการติดต่อสื่อสาร การนำร่องและการจัดการทรัพยากร รวมถึงการทำธุรกิจเชิงพาณิชย์ที่เติบโตอย่างรวดเร็วก็ย่อมได้รับผลกระทบเพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังนั้น การศึกษา การจำลองและการทำนายอิทธิพลสภาพภูมิอากาศของอวกาศในเชิงลึกของสภาพภาคพื้นดินและสุริยะทั้งหมดจึงเป็นหัวข้องานวิจัยที่สำคัญ ในการศึกษาครั้งนี้จะนำเสนอวิธีการหนึ่งในการสร้างแบบจำลองเชิงการทดลองของค่า VTEC ซึ่งประกอบไปด้วย การทบทวนค่า VTEC และกระบวนการแมปปีงที่อาศัยข้อมูลจากเครือข่าย IGS (International GNSS Service) เสมือนเป็นเครื่องมือมาตรฐานของการเฝ้าตรวจตราดูแบบเวลาจริงและใช้ศึกษาสภาพภูมิอากาศอวกาศและเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการจำลองค่า TEC สำหรับการใช้งานกับสภาพภูมิอากาศอวกาศ ผลงานวิจัย [2] นี้แสดงให้เห็นถึงการสร้างแบบจำลองที่คล้ายกับงานวิจัย [1] แต่มีการนำเสนอวิธีการวิจัยแบบใหม่เพื่อศึกษาสภาพภูมิอากาศอวกาศและเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการจำลองค่า TEC สำหรับการใช้งานกับสภาพภูมิอากาศอวกาศ ดังนั้น จึงเป็นแนวทางที่สำคัญในการนำมาประยุกต์ใช้กับข้อมูลสารสนเทศและค่าข้อมูลที่คำนวณได้ของประเทศไทยเอง

O. P. Singh [3] ได้ศึกษาผลกระทบของแผ่นดินไหวที่มีต่อข้อมูล TEC ที่เมือง Agra ประเทศอินเดีย (ตำแหน่งละติจูด  $27.2^{\circ}\text{N}$  ลองจิจูด  $78^{\circ}\text{E}$ ) โดยการศึกษาในครั้งนี้จะรวบรวมข้อมูลตลอดระยะเวลา 30 เดือนจากวันที่ 1 มกราคม 2009 ถึงวันที่ 30 มิถุนายน 2011 และระบบเครื่องรับ GPS แบบสองความถี่ถูกใช้เพื่อบันทึกค่าข้อมูล TEC โดยระยะทางการเกิดแผ่นดินไหว (epicentral) เท่ากับ 2,000 km จากสถานีการตรวจวัดถูกนำมาใช้ในการศึกษาผลกระทบของแผ่นดินไหว (seismic) ที่มีต่อค่า TEC บริเวณนี้จะประกอบไปด้วย 22 กรณีของแผ่นดินไหวในระหว่างช่วงเวลาการศึกษาดังกล่าวที่มีขนาดการเกิดแผ่นดินไหวที่มาก (M สูงเกินกว่า 5.5 ริคเตอร์) กระบวนการทางสถิติที่แตกต่างกันถูกใช้เพื่อสังเกตความไม่วัฏกรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิดปกติของข้อมูล TEC ผลของการศึกษาพบว่า TEC มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะของการเพิ่มขึ้นและการลดลง รวมถึง สัญญาณบอกเหตุ (precursors) ที่มากที่สุดที่จะถูกพบล่วงหน้าก่อนการเกิดแผ่นดินไหวประมาณ 5-10 วัน วัฏจักรสุริยะและแม่เหล็กไฟฟ้าในระหว่างที่เกิดแผ่นดินไหวก็ถูกศึกษาเช่นกัน แต่ข้อมูลที่ได้รับผลกระทบเหล่านี้จะถูกไม่นำมาพิจารณาเพื่อแยกออกจากผลกระทบที่ได้รับจากการเกิดแผ่นดินไหว ดังนั้น ความผิดปกติของค่า TEC ที่สังเกตได้อาจจะมีสาเหตุมาจากการเกิดแผ่นดินไหวที่มีขนาดใหญ่รอบ ๆ บริเวณอินเดียเท่านั้น อย่างไรก็ตาม การเคลื่อนตัวของ  $E \times B$  เนื่องจากการเกิดขึ้นของสนามไฟฟ้าในระหว่างกระบวนการก่อตัวแผ่นดินไหวและการแกว่งคลื่นบนผิวโลกก็อาจจะเป็นปัจจัยที่มีส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดความผิดปกติของค่า TEC ที่ตรวจวัดได้

Tsugawa et al. [4] ได้ทำการศึกษาความไม่สงบ (disturbances) ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่เกิดขึ้นภายหลังจากแผ่นดินไหวที่เมือง Tohoku ในปี 2011 โดยรายละเอียดของความไม่สงบดังกล่าวได้รับการเปิดเผยครั้งแรกโดยการสังเกตค่า TEC จากเครื่องรับ GPS ที่มีความละเอียดสูงในญี่ปุ่น ความไม่สงบในชั้นไอโอโนสเฟียร์หลังจากที่เกิดแผ่นดินไหวนั้นเริ่มต้นจากการที่ค่า TEC ลดลงแบบทันที แล้วตามด้วยการเพิ่มขึ้นของ TEC เสมือนเป็นอิมพัลส์ขนาดเล็กน้อย 7 นาที ใกล้กับจุดศูนย์กลาง (epicenter) แล้วคลื่นที่มีศูนย์กลางร่วมกัน (concentric waves) จะปรากฏและแพร่กระจายไปในทิศทางในแนวรัศมีด้วยความเร็วเท่ากับ 138–3,457 m/s การเพิ่มขึ้นแบบที่ขยายไปตามโซนัลของ TEC จะเกิดขึ้นในทิศตะวันตกของญี่ปุ่นด้วย ในบริเวณที่ใกล้กับจุดศูนย์กลางการแกว่งตัวในช่วงเวลาสั้น ๆ ประมาณ 4 นาทีจะสังเกตเห็นได้บทความนี้เน้นไปที่คลื่นที่มีศูนย์กลางร่วมกัน แบบรูปของคลื่นที่มีศูนย์กลางร่วมกันบ่งชี้ให้เห็นว่ามีแหล่งกำเนิดเป็นจุด จุดศูนย์กลางของโครงสร้างเหล่านี้ถูกเรียกว่า ionospheric epicenter ซึ่งตั้งอยู่ห่างประมาณ 170 km จากจุดศูนย์กลางในทิศตะวันออกเฉียงใต้ สำหรับคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นนั้น คลื่นที่มีศูนย์กลางร่วมกันสามารถที่จะเกิดขึ้นได้จากคลื่นในชั้นบรรยากาศที่ถูกแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ คลื่นอนุสติกที่เกิดจากคลื่นเรย์ลีที่กำลังแพร่กระจาย คลื่นอนุสติกที่เกิดจากจุดศูนย์กลางในชั้นไอโอโนสเฟียร์ และคลื่นโน้มถ่วงในชั้นบรรยากาศจากจุดศูนย์กลางในชั้นไอโอโนสเฟียร์ โดยขนาดของคลื่นที่มีศูนย์กลางร่วมกันจะมีขนาดไม่สม่ำเสมอและขึ้นอยู่กับอะซิมุทของทิศทางการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งไม่สามารถที่จะอธิบายโดยทฤษฎีที่มีการนำเสนอมาก่อนหน้านี้ ผลการวิจัย [3] และ [4] นี้เป็นการศึกษาผลกระทบของการเกิดแผ่นดินไหวที่มีผลต่อค่า TEC ที่วัดได้บนสถานีภาคพื้นดิน โดยค่า TEC นี้สามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าเวลาประวิงของสัญญาณ GPS และนำมาใช้งานเพื่อเป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญของระบบการติดต่อสื่อสารที่ดี/ไม่ดี การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการเกิดภัยพิบัติของประเทศไทยในอนาคตได้ นอกจากนี้ G. Occhipinti et al. [5] ยังได้นำเสนอการตรวจจับคลื่นสึนามิด้วยสัญญาณ GPS ในปี ค.ศ. 2008 ผลการศึกษา พบว่า การตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของค่า TEC ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้นสามารถนำมาใช้ในการแจ้งการเกิดคลื่นสึนามิได้

แต่สำหรับประเทศไทยนั้น ผลการศึกษาและผลงานวิจัยของการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการเกิดภัยพิบัตินั้นมีน้อยมาก จึงทำให้ประเทศไทยยังไม่สามารถที่จะป้องกันและรับมือกับผลกระทบที่เกิดขึ้นจากสภาวะการณ์ที่อาจจะเลวร้ายและส่งผลกระทบต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์หรือประสงค์ในการนำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เศรษฐกิจและสังคมของประเทศได้ ซึ่งจะเห็นได้ชัดจากสถานการณ์ที่รัฐบาลไม่ให้ชาวเกษตรกรปลูกข้าวนาปีและปลูกพืชผลที่ใช้น้ำมากเมื่อเดือนมีนาคม - พฤษภาคม พ.ศ. 2558 ที่ผ่านมา เนื่องจากฝนตกน้อยและปริมาณน้ำในเขื่อนมีน้อย รัฐบาลเกรงว่าจะมีน้ำไม่เพียงพอต่ออุปโภคและบริโภค แต่เมื่อเริ่มมีพายุพัดผ่านเข้ามาในประเทศไทยปลายเดือนพฤษภาคม เป็นต้นมา ปริมาณน้ำในเขื่อนและบริเวณต่าง ๆ ของประเทศไทยเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงทำให้ประเทศไทยเริ่มจะมีน้ำใช้เพื่อการเกษตร อุปโภคและบริโภคเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก นอกจากนี้ สืบเนื่องจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรฯ มีการติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในการเฝ้าติดตามทั้งการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ด้วยเครื่อง FMCW ionosonde และการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอิเล็กตรอนรวมด้วยเครื่อง JAVAD GPS Receiver ภายใต้โครงการ SEALION จึงทำให้จังหวัดชุมพรมีความพร้อมอย่างยิ่งที่จะเป็นจังหวัดนำร่องในการเฝ้าติดตามและทำนายการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการเกิดภัยพิบัติ แต่เนื่องจากในปัจจุบันนี้ มีนักวิจัย คณาจารย์ และนักศึกษาภายในประเทศที่มีความรู้เกี่ยวกับเรื่องนี้ค่อนข้างน้อย โดยเฉพาะอย่างยิ่งบุคลากรของสถาบันฯ เองที่ยังไม่ทราบและไม่มีความรู้เกี่ยวกับเรื่องดังกล่าวนี้เป็นจำนวนมาก จึงทำให้ประเทศไทยขาดซึ่งบุคลากรที่มีความรู้และมีความเชี่ยวชาญที่จะทำวิจัย กำกับดูแล ออกแบบ/พัฒนา ทำนาย รวมถึงวิเคราะห์ข้อมูลสารสนเทศที่ได้จากหน่วยงานแต่ละด้าน

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเกิดแนวความคิดที่จะออกแบบและสร้างเว็บไซต์ศูนย์การเรียนรู้การเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการเกิดภัยพิบัติ ที่สถานีภาคพื้นดินละติจูดต่ำบริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก จังหวัดชุมพร ขึ้นมา โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือเพื่อเป็นแหล่งเผยแพร่ความรู้ให้แก่ นักเรียน นักศึกษา นักวิจัย คณาจารย์ รวมถึงผู้ที่สนใจในประเทศไทย แสดงค่าข้อมูลสถิติต่าง ๆ เพื่อทำการวิเคราะห์และหาความสัมพันธ์ของค่าข้อมูลต่าง ๆ และทราบค่าข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศ และสภาพภูมิอากาศต่าง ๆ ที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับการเกิดภัยพิบัติ นอกจากผลงานวิจัยที่ได้รับโดยตรงดังกล่าวข้างต้นแล้ว ผลพลอยได้ทางอ้อมของประเทศไทยคือลดความเสียหายทั้งชีวิตและทรัพย์สิน ลดงบประมาณมหาศาลในการสร้างระบบแจ้งเตือนภัยพิบัติและนำไปสู่การสร้างนักวิจัย คณาจารย์และเยาวชนรุ่นใหม่ที่มีความรู้ทางด้านอวกาศของประเทศไทยที่เพิ่มขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อสร้างเว็บไซต์ที่เป็นแหล่งเผยแพร่ความรู้ให้แก่ นักเรียน นักศึกษา นักวิจัย คณาจารย์ รวมถึงผู้ที่สนใจในประเทศไทย
2. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการเกิดภัยพิบัติ ที่สถานีภาคพื้นดินละติจูดต่ำบริเวณเส้นศูนย์สูตร จังหวัดชุมพร
3. เพื่อแสดงค่าข้อมูลสถิติต่าง ๆ ในเชิงบรรยาย เชิงแผนภาพและเชิงแบบจำลอง
4. เพื่อทำการวิเคราะห์และหาความสัมพันธ์ของค่าข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้รับในแต่ละด้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เพื่อทราบค่าข้อมูลในขณะที่ยกระดับชั้นบรรยากาศและสภาพภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง และมีความเกี่ยวข้องกับการเกิดภัยพิบัติ

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างเว็บไซต์ศูนย์การเรียนรู้ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการเกิดภัยพิบัติ ที่สถานีภาคพื้นดินละติจูดต่ำบริเวณเส้นศูนย์สูตร แม่เหล็ก จังหวัดชุมพร

2. แสดงค่าข้อมูลสถิติต่าง ๆ ในเชิงแผนภาพและเชิงแบบจำลองพร้อมทั้งทำการวิเคราะห์และหาความสัมพันธ์ของค่าข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้รับในแต่ละด้าน

3. แสดงค่าข้อมูลในขณะที่ยกระดับชั้นบรรยากาศและสภาพภูมิอากาศเปลี่ยนแปลงและมีความเกี่ยวข้องกับการเกิดภัยพิบัติ

### 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ออกแบบและเริ่มสร้างหน้าเว็บหลักของศูนย์การเรียนรู้ปีที่ 1 (หน้าเว็บหลักและข้อมูลการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ)
2. แสดงค่าข้อมูลสถิติการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในชั้นบรรยากาศเชิงบรรยายและเชิงแผนภาพ
3. แสดงผลการศึกษการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศที่มีต่อเวลาประวั่งในระบบการสื่อสาร
4. สรุปผลการวิจัย จัดทำรายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์ปีที่ 1 และส่งบทความวิจัยตีพิมพ์ฉบับที่ 1
5. ออกแบบและสร้างหน้าเว็บของศูนย์การเรียนรู้ปีที่ 2 (ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการเกิดภัยพิบัติ)
6. แสดงค่าข้อมูลสถิติการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการเกิดภัยพิบัติ
7. หาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและชั้นบรรยากาศกับการเกิดภัยพิบัติ
8. สรุปผลการวิจัย จัดทำรายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์ปีที่ 2 และส่งบทความวิจัยตีพิมพ์ฉบับที่ 2
9. ออกแบบและเริ่มสร้างหน้าเว็บหลักของศูนย์การเรียนรู้ปีที่ 3 (ข้อมูลการเกิดภัยพิบัติ เพิ่มเติมข้อมูลให้สมบูรณ์ และเพิ่มแบบจำลองข้อมูล)
10. บอกระดับการเกิดภัยพิบัติที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและชั้นบรรยากาศ
11. สร้างแบบจำลองเพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์บางตัวในชั้นบรรยากาศ
12. สรุปผลการวิจัย จัดทำรายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์ปีที่ 3 และส่งบทความวิจัยตีพิมพ์ฉบับที่ 3

โดยมีตารางแสดงแผนงานวิจัยและช่วงเวลาในการดำเนินการวิจัยตลอดระยะเวลาในการดำเนินงาน 3 ปี แสดงไว้ในตารางที่ 1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1.1 แผนงานวิจัยและช่วงเวลาในการดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานปีที่ 1 งปี 2560	ระยะเวลาทำวิจัยปีที่ 1 ตั้งแต่ เดือน ต.ค. 2559 – เดือน ก.ย. 2560											
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.
1. ออกแบบและสร้างหน้าเว็บหลักของศูนย์การเรียนรู้ปีที่ 1 (หน้าเว็บหลักและข้อมูลการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ)												
2. แสดงค่าข้อมูลสถิติการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในชั้นบรรยากาศเชิงบรรยายและเชิงแผนภาพ												
3. แสดงผลการศึกษการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศที่มีต่อเวลาประวิงการสื่อสาร												
4. สรุปวิจัย จัดทำรายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์ปีที่ 1 และส่งบทความตีพิมพ์ฉบับที่ 1												
5. ตัดหญ้า ทำความสะอาดทาสีและปรับปรุงพื้นที่ของศูนย์การเรียนรู้												
การดำเนินงานปีที่ 2 งปี 2561	ระยะเวลาทำวิจัยปีที่ 2 ตั้งแต่ เดือน ต.ค. 2560 – เดือน ก.ย. 2561											
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.
1. แสดงค่าข้อมูลการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการเกิดภัยพิบัติ												
2. หาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและชั้นบรรยากาศกับการเกิดภัยพิบัติ												

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



3. สรุปลวิจัย จัดทำรายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์ปีที่ 2 และส่งบทความตีพิมพ์ฉบับที่ 2											←	→
4. ตัดหญ้า ทำความสะอาดและปรับปรุงพื้นที่ที่ตั้งเสาอากาศ สายอากาศ, ห้อง lonosonde	←	→			←	→				←	→	
การดำเนินงานปีที่ 3 งบประมาณปี 2562	ระยะเวลาทำวิจัยปีที่ 3 ตั้งแต่ เดือน ต.ค. 2561 – เดือน ก.ย. 2562											
	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.
1. ออกแบบและสร้างเว็บไซต์ศูนย์การเรียนรู้ปีที่ 3 (ข้อมูลการเกิดภัยพิบัติเพิ่มเติมข้อมูลและแบบจำลอง)	←					→						
2. บอกระดับการเกิดภัยพิบัติที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและชั้นบรรยากาศ				←						→		
3. สร้างแบบจำลองเพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์บางตัวในชั้นบรรยากาศ								←		→		
4. สรุปลวิจัย จัดทำรายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์ปีที่ 3 และส่งบทความตีพิมพ์ฉบับที่ 3											←	→
5. ตัดหญ้า ทำความสะอาดทาสีและปรับปรุงพื้นที่ของศูนย์การเรียนรู้	←	→			←	→				←	→	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีเว็บไซต์ศูนย์การเรียนรู้การเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการเกิดภัยพิบัติในนาม สจล. ประเทศไทย
2. มีค่าข้อมูลสถิติการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการเกิดภัยพิบัติ
3. ทราบความสัมพันธ์ของการเกิดภัยพิบัติที่ส่งผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศกับชั้นบรรยากาศ
4. ทราบระดับการเกิดภัยพิบัติที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและชั้นบรรยากาศ
5. มีแบบจำลองที่สามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์บางตัวในชั้นบรรยากาศ
6. เมื่องานวิจัยเสร็จสิ้น จะทำการตีพิมพ์เผยแพร่ในงานประชุมวิชาการที่มี Peer Reviewer จำนวน 3 เรื่อง (ปีละ 1 เรื่อง)

#### หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์

1. วิทยุการบินแห่งประเทศไทย
2. ท่าอากาศยานแห่งประเทศไทย
3. กรมอุตุนิยมวิทยา
4. สถานีภาคพื้นดินที่ใช้งานระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม GPS
5. บริษัทที่ให้บริการสื่อสารผ่านดาวเทียม

#### แผนการถ่ายทอดเทคโนโลยีหรือผลการวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมาย

1. จัดการตีพิมพ์ในงานประชุมวิชาการและวารสารวิชาการ
2. เข้าร่วมงานเพื่อนำเสนอผลงานวิจัยในการประชุมวิชาการ
3. จัดอบรมเพื่อเผยแพร่ความรู้ที่ได้จากการศึกษาปีละ 1 ครั้ง
4. จัดทำรายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

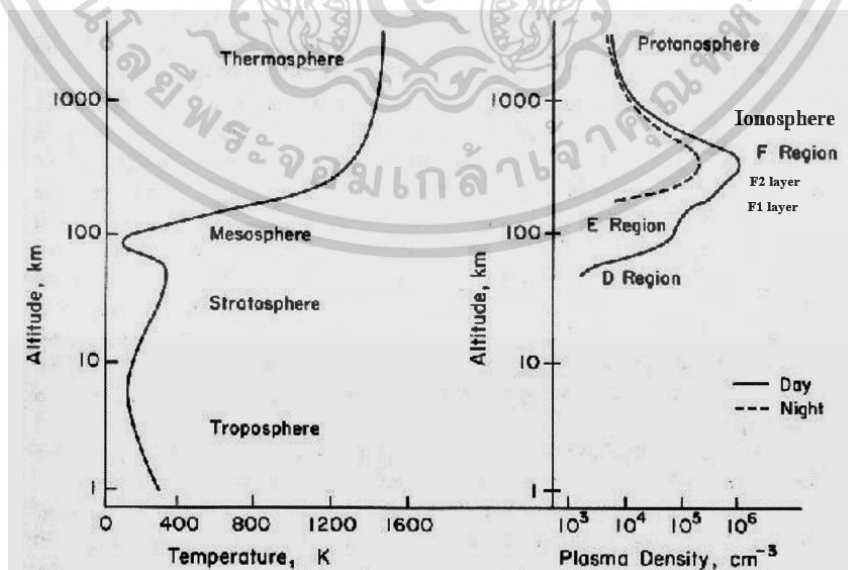
## บทที่ 2

### แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงเนื้อหาต่างๆ ในเบื้องต้นที่ถูกนำไปแสดงไว้ในเว็บไซต์ศูนย์การเรียนรู้การเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการเกิดภัยพิบัติ ที่สถานีภาคพื้นดิน ละติจูดต่ำบริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก จังหวัดชุมพร ได้แก่ ชั้นไอโอโนสเฟียร์ วัฏจักรสุริยะ ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ สภาพภูมิอากาศ แผ่นดินไหว พายุแม่เหล็กโลก ภาวะเรือนกระจก เอลนีโญ และลานีญา เป็นต้น โดยรายละเอียดของหัวข้อต่าง ๆ มีดังนี้

#### 2.1 ชั้นไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere) [6]

ชั้นไอโอโนสเฟียร์เป็นชั้นที่ประกอบไปด้วยกลุ่มพลาสมาที่เกิดการไอออไนซ์ รวมตัวกันจนมีความหนาแน่นมากพอที่จะสะท้อนคลื่นวิทยุในความถี่ที่ต่ำกว่าย่าน HF โดยมีความสูงประมาณ 50 km ถึง 2,000 km เหนือพื้นผิวโลกและมีปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิประมาณ  $10^{10} - 10^{12}$  อิเล็กตรอนต่อลูกบาศก์เมตร โดยชั้นไอโอโนสเฟียร์นี้สามารถแบ่งเป็นชั้นย่อย ๆ ได้ 4 ชั้น คือ ชั้น D, ชั้น E, ชั้น F1 และ ชั้น F2 ในเวลากลางคืน ชั้น F1 และ ชั้น F2 จะรวมตัวกันเป็นชั้น F เพียงชั้นเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยชั้น F2 นี้เป็นชั้นบรรยากาศที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับการติดต่อสื่อสารย่านความถี่สูงระยะไกล การสื่อสารผ่านดาวเทียม รวมถึงการระบุพิกัดด้วยดาวเทียม GPS เนื่องจากในช่วงเวลากลางวัน ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้น F2 นี้มีค่าที่มากที่สุดเมื่อเทียบกับชั้นย่อยอื่น ๆ ทั้งนี้การเปลี่ยนแปลงความสูงและความหนาแน่นอิเล็กตรอนของชั้น F2 นี้ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ เวลา อุณหภูมิเฉลี่ย และรอบวัฏจักรสุริยะ ฯลฯ



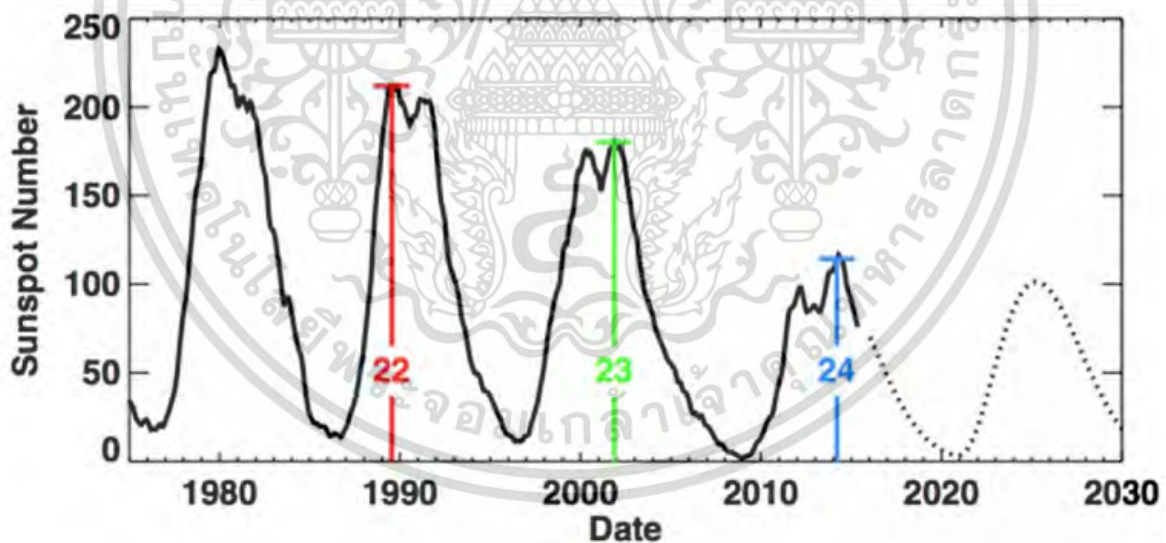
รูปที่ 2.1 บรรยากาศที่แบ่งออกเป็นชั้นต่าง ๆ ตามค่าอุณหภูมิและปริมาณความหนาแน่นพลาสมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยมีโมเลกุลเพียงบางส่วนเท่านั้นที่ถูกไอโอไนซ์ด้วยแสงอาทิตย์และยังคงมีโมเลกุลที่เป็นกลาง (neutral) จำนวนมากเหลืออยู่ในชั้นที่อยู่สูงกว่าชั้นไอโอโนสเฟียร์ คือ ชั้นพลาสมาสเฟียร์ (Plasma-sphere) ซึ่งอิเล็กตรอนอิสระที่ถูกไอโอไนซ์เหล่านี้ทำหน้าที่เสมือนเป็นสนามแม่เหล็กของโลกที่สามารถต่อต้านลมสุริยะ (solar wind) การไอโอไนซ์นี้จะเกิดขึ้นไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับช่วงเวลาและระดับความสูงของชั้นไอโอโนสเฟียร์ ตำแหน่งที่ตั้งบนโลก จำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ (sunspot number) อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับสถานะที่เอื้ออำนวยต่อการเกิดกระบวนการไอโอไนซ์ด้วย เช่น ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ปริมาณการชนกันของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว การแผ่รังสีอัลตรา ไวโอเลตและรังสีคอสมิก ฯลฯ

การแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าจากดวงอาทิตย์จะไปทำการไอโอไนซ์กับอะตอมของแก๊สออกซิเจนและอนุภาคต่าง ๆ ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งความรุนแรงของการไอโอไนซ์ดังกล่าวเป็นฟังก์ชันผกผันกับระยะห่างจากดวงอาทิตย์ไปยังชั้นไอโอโนสเฟียร์ หรืออาจจะกล่าวได้ว่าเป็นฟังก์ชันกับมุมซินิก (zenith angle) ของดวงอาทิตย์กับโลก ถ้ามุมซินิกมีค่าน้อยมากเท่าใด ระยะห่างจากดวงอาทิตย์ไปยังโลกก็จะสั้นมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งส่งผลทำให้การไอโอไนซ์เกิดความรุนแรงมากยิ่งขึ้น ดังนั้น อนุภาคที่ถูกไอโอไนซ์มากที่สุดจะอยู่รอบ ๆ เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก (equatorial magnetic) รวมถึงบริเวณละติจูดต่ำด้วย ทั้งนี้ เนื่องจากแกนแม่เหล็กของโลกจะวางตัวห่างไปจากแกนหมุนของโลกเป็นมุมประมาณ  $12^\circ$  จึงทำให้เส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กไม่ตรงกันกับเส้นศูนย์สูตรทางภูมิศาสตร์ของโลก



รูปที่ 2.2 จำนวนจุดดับของวัฏจักรสุริยะรอบที่ 21 – 25 ตั้งแต่ ค.ศ. 1975 ถึง ค.ศ. 2030

(<http://solarcyclescience.com/forecasts.html>).

## 2.2 วัฏจักรสุริยะ (solar cycle)

ปริมาณความเข้มในการเกิดการไอโอไนซ์นั้น นอกจากจะขึ้นอยู่กับช่วงเวลาและระดับความสูงของชั้นไอโอโนสเฟียร์ และตำแหน่งที่ตั้งบนโลกแล้ว ยังขึ้นอยู่กับจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ (sunspot) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในทางอื่นไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

number) ด้วย โดยจุดดับบนดวงอาทิตย์นั้นเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของดวงอาทิตย์ที่มีลักษณะเป็นจุดดำมืดดั่ง โดยจุดดับบนดวงอาทิตย์นี้เกิดขึ้นที่ชั้นโฟโตสเฟียร์ ขนาดของจุดดำนั้นมีตั้งแต่ขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ที่ครอบคลุมพื้นที่หลายพันล้านตารางกิโลเมตร เนื่องจากมีการรวมตัวกันของจุดดำ นอกจากนี้ จุดดำนี้จะมีการหมุนไปตามการหมุนของดวงอาทิตย์ด้วย และถูกกำหนดลักษณะโดยความเข้มของสนามแม่เหล็กที่มีค่าสูงถึง 0.4 เทสลา (4,000 G) และจุดดำนี้จะเกิดเป็นคู่ที่มีขั้วแม่เหล็กที่ตรงข้ามกัน ทำให้เกิดการไหลวนของสนามแม่เหล็กออกมาจากโคโรนาหรือผิวของดวงอาทิตย์ สนามแม่เหล็กดังกล่าวนี้เองที่เป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดปรากฏการณ์ต่าง ๆ บนดวงอาทิตย์และทำให้ความเข้มของแสงอาทิตย์ (solar flux) มีการเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยจะมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงเป็นคาบ ใน 1 รอบวัฏจักรจะมีค่าประมาณ 11.1 ปี จึงถูกเรียกว่า วัฏจักรสุริยะ (solar cycle) ดังในรูปที่ 2.2 ในรูปที่ 2.2 นี้แสดงจำนวนจุดดับ (sunspot number) ของวัฏจักรสุริยะรอบที่ 21 – 25 ตั้งแต่ ค.ศ. 1975 ถึง ค.ศ. 2030 การเปลี่ยนแปลงค่าต่าง ๆ ทางสุริยะนั้นจะมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างของชั้นไอโอโนสเฟียร์ กล่าวคือ ค่าความเข้มแสงอาทิตย์ที่สูงเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนมีค่าสูงขึ้นในแต่ละชั้นย่อยของชั้นไอโอโนสเฟียร์ โดยเฉพาะช่วงเวลาที่ปฏิกิริยาของดวงอาทิตย์มีค่าสูงที่สุด (maximum solar activity)

### 2.3 ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ

ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ (total electron content หรือ TEC) เป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งของชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่สร้างผลกระทบมากที่สุดในการใช้งานวิทยุหลาย ๆ ระบบ อาทิเช่น การสื่อสารวิทยุ การนำร่องและอากาศอวกาศ ในงานวิจัยที่นำเสนอนี้ ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิที่ถูกวัดด้วยระบบดาวเทียม GPS นั้นถูกนำมาศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการเกิดภัยพิบัติต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปค่า TEC จะมีค่าสูงในเวลากลางวัน แต่จะมีค่าต่ำที่สุดในเวลากลางคืน เนื่องจากผลกระทบจากดวงอาทิตย์ (ดัชนี Dst สำหรับพายุแม่เหล็กโลกและดัชนี Kp สำหรับพายุย่อย) มีค่าพิค 2 ค่าหรือมากกว่า 2 ค่าที่ปรากฏในกลางวัน เมื่อมีพายุ 2 ชนิดปรากฏในเหตุการณ์เดียวกัน เนื่องจากการลากของชั้นไอโอโนสเฟียร์จากละติจูดสูงไปต่ำ ผลกระทบของฤดูกาลที่มีต่อค่า TEC โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงฤดูใบไม้ผลิที่สูงกว่าฤดูกาลอื่น ๆ สำหรับพายุย่อยนั้น ค่าที่ต่ำที่สุดจะปรากฏในฤดูหนาว แต่เมื่อมีพายุแม่เหล็กโลกเกิดขึ้น ค่าที่ต่ำที่สุดจะอยู่ในฤดูร้อน อีกทั้งค่า TEC จะแปรผกผันกับทั้งละติจูดและลองจิจูด มันจะมีค่ามากที่สุดที่เส้นศูนย์สูตร

พารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งของ TEC คือความหนาของชั้นไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งจะสัมพันธ์ใกล้ชิดกับรูปร่างของความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นไอโอโนสเฟียร์  $N_e(h)$  และโพรไฟล์ TEC ค่าของความหนาไม่ได้สัมพันธ์กับ TEC โดยตรงเนื่องจากมันขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างค่า TEC กับค่าความถี่วิกฤติของชั้น F2 ( $f_oF2$ ) จากพฤติกรรมของความหนาพบว่า ความหนาของชั้นไอโอโนสเฟียร์จะปรากฏค่าพิคที่สูงค่าหนึ่งเป็นเวลาหลังดวงอาทิตย์ขึ้นและค่าความหนาในเวลากลางคืนจะสูงกว่าในเวลากลางวัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 สภาพภูมิอากาศ [7]

ประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตร้อนใกล้เส้นศูนย์สูตร ทำให้สภาพภูมิอากาศมีลักษณะเป็นแบบร้อนชื้น หรือแบบทุ่งหญ้าสะวันนา ในขณะที่ภาคใต้และภาคตะวันออกเฉียงเหนือเป็นเขตภูมิอากาศแบบมรสุม เขตร้อนทั่ว ประเทศมีอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่าง 19-38 องศาเซลเซียส อากาศร้อนที่สุดช่วงกลางเดือนเมษายน หลังจากนั้น เมื่อมีลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และตะวันออกเฉียงเหนือ ประเทศไทยเข้าสู่ฤดูฝนและฤดูหนาว ตามลำดับ พื้นที่ทั้งประเทศได้รับปริมาณฝนอย่างเพียงพอ ยกเว้นบางพื้นที่ แต่ระยะเวลาของฤดูฝนและ ปริมาณฝนมีความแตกต่างกันไปตามภูมิภาคและระดับความสูง ถึงแม้ว่าประเทศไทยจะตั้งอยู่ในพื้นที่เขตร ้อน แต่ก็มีสภาพภูมิอากาศที่แตกต่างกันเนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน ได้แก่ ที่ตั้งตำแหน่งละติจูด ความสูงของพื้นที่ แนวทิวเขาที่กั้นทิศทางลมประจำ ระยะห่างจากทะเล ทิศทางของลมประจำและอิทธิพล ของลมพายุหมุน นอกจากนี้ ประเทศไทยยังตั้งอยู่ภายใต้อิทธิพลของมรสุม 2 ชนิด คือ มรสุมตะวันตกเฉียง ใต้และมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ

### มรสุมตะวันตกเฉียงใต้

มรสุมตะวันตกเฉียงใต้จะเข้าปกคลุมประเทศไทยในช่วงกลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม โดยมีแหล่งกำเนิดจากบริเวณความกดอากาศสูงในซีกโลกใต้ บริเวณมหาสมุทรอินเดีย ซึ่งพัดออกจาก ศูนย์กลางเป็นลมตะวันออกเฉียงใต้ และเปลี่ยนเป็นลมตะวันตกเฉียงใต้เมื่อพัดข้ามเส้นศูนย์สูตร มรสุมนี้จะ นำมวลอากาศชื้นจากมหาสมุทรอินเดียเข้ามาสู่ประเทศไทย ทำให้มีเมฆมากและฝนตกชุกทั่วไป โดยเฉพาะ อย่างยิ่งตามบริเวณชายฝั่งทะเลและเทือกเขาด้านรับลมจะมีฝนตกมากกว่าบริเวณอื่น

### มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ

หลังจากหมดอิทธิพลของมรสุมตะวันตกเฉียงใต้แล้ว มรสุมตะวันออกเฉียงเหนือจะพัดเข้ามาปก คลุมประเทศไทยแทนในช่วงประมาณกลางเดือนตุลาคมจนถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ มรสุมนี้พัดพาเอามวล อากาศเย็นและแห้งซึ่งมีแหล่งกำเนิดมาจากบริเวณความกดอากาศสูงในซีกโลกเหนือ แถบประเทศ มองโกเลียและจีน ทำให้ท้องฟ้าโปร่ง อากาศหนาวเย็นและแห้งแล้งทั่วไป โดยเฉพาะภาคเหนือและภาค ตะวันออกเฉียงเหนือ ส่วนภาคใต้จะมีฝนตกชุกโดยเฉพาะภาคใต้ฝั่งตะวันออก เนื่องจากมรสุมนี้นำพาความ ชุ่มชื้นจากอ่าวไทยเข้ามาปกคลุมเช่นกัน

การที่แก๊สเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศของโลกได้เพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วโดยเฉพาะตั้งแต่ในช่วง ยุคปฏิวัติอุตสาหกรรมเป็นต้นมานั้น ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนที่มีความรุนแรงมากขึ้น ซึ่งส่งผลให้สภาพ ภูมิอากาศมีการเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม และเกิดผลกระทบต่อเนื่องไปยังระบบนิเวศน์และชีวิตความเป็นอยู่ ของผู้คนเช่นกัน ทั้งนี้ประเทศไทยตกอยู่ในข่ายที่จะได้รับผลกระทบจากภาวะโลกร้อนโดยหลีกเลี่ยงไม่ได้ การทำความเข้าใจต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคตจะช่วยให้ภาคส่วนต่างๆสามารถ ดำเนินการเตรียมตัวหรือปรับตัวเข้ากับสถานการณ์ในอนาคตได้อย่างเหมาะสมได้

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) คือ การเปลี่ยนแปลงสภาพหรือคุณลักษณะ อากาศโดยเฉลี่ยในบริเวณใดบริเวณหนึ่ง โดยคุณลักษณะของอากาศที่พิจารณานี้ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ฝน ลม พายุ ลูกเห็บ หิมะ ฯลฯ โดยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศนี้อาจจะเกิดขึ้นจากความแปรปรวน

ตามธรรมชาติและจากกิจกรรมของมนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อมที่ทำให้องค์ประกอบของสภาพบรรยากาศเปลี่ยนแปลงไป กิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ที่ทำให้ปริมาณแก๊สเรือนกระจก (Greenhouse Gases) ในบรรยากาศโลกเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก (Greenhouse Effect) ที่รุนแรงกว่าปกติ แล้วส่งผลทำให้อุณหภูมิของพื้นผิวโลกสูงขึ้น เราเรียกสถานการณ์นี้ว่า ภาวะโลกร้อน หรือ Global warming

ในการประชุมภูมิอากาศโลกครั้งแรกที่จัดขึ้นที่เจนีวา ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ ระหว่างวันที่ 12 - 23 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2522 นักวิทยาศาสตร์ได้ตระหนักถึงปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลก การประชุมครั้งนี้เน้นถึงเรื่องผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศที่มีต่อมนุษย์และเรียกร้องให้รัฐบาลของแต่ละประเทศให้ความสำคัญกับสภาพภูมิอากาศที่กำลังเปลี่ยนแปลง รวมถึงมาตรการป้องกันการกระทำของมนุษย์ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและจะย้อนกลับมามีผลกระทบต่อมนุษย์เองในภายหลัง นอกจากนี้ ยังได้วางแผนจัดตั้ง "แผนงานภูมิอากาศโลก" (World Climate Program หรือ WCP) ภายใต้ความรับผิดชอบของ 3 หน่วยงาน ได้แก่ องค์การอุตุนิยมวิทยาโลก (World Meteorological Organization หรือ WMO), โครงการสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติ (United Nations Environment Program หรือ UNEP) และ International Council of Science Unions (ICSU) จนกระทั่ง ในปี พ.ศ. 2531 คณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change หรือ IPCC) ได้ถูกจัดขึ้นมา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินข้อมูลข่าวสารด้านวิทยาศาสตร์ เศรษฐกิจและสังคม แล้วนำไปสู่ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ตลอดจนศึกษาถึงผลกระทบและการบรรเทาปัญหาที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศนั้นเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และใช้เวลานานกว่าที่จะสังเกตเห็นได้ เนื่องจากสภาพภูมิอากาศนั้นมีความแปรปรวนอยู่แล้วตามธรรมชาติ ดังนั้นการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศนั้นจึงจะต้องมองไปในอนาคตระยะยาวหลายสิบปีข้างหน้า ซึ่งเทคโนโลยีที่มีอยู่ในปัจจุบันนี้ยังไม่สามารถทำการพยากรณ์สภาพภูมิอากาศอนาคตระยะยาวได้ อีกทั้งพลวัตของภาคส่วนต่าง ๆ ก็ส่งผลให้เกิดความไม่แน่นอนได้มาก ดังนั้น แนวทางหนึ่งต่อการทำความเข้าใจต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในระยะยาวคือการศึกษาโดยการจำลองสถานการณ์อนาคตขึ้นภายใต้สมมติฐานบางประการ

การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคตของประเทศไทยในช่วงเวลา 4-5 ปีที่ผ่านมา นี้ [8] ได้มีการจำลองสภาพภูมิอากาศในอนาคตขึ้นโดยศูนย์เครือข่ายงานวิเคราะห์ วิจัยและฝึกอบรมการเปลี่ยนแปลงของโลกแห่งภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (SEA START RC) ซึ่งได้ร่วมมือกับทางหน่วยงาน Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) ประเทศออสเตรเลีย ซึ่งได้ทำการศึกษาและจำลองการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในภูมิภาคลุ่มแม่น้ำโขงตอนล่างและประเทศไทยโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ Conformal Cubic Atmospheric Model (CCAM) ในช่วงปี พ.ศ. 2546-2548 ภายใต้โครงการนำร่องศึกษาในชุดโครงการ Assessment of Impact and Adaptation to Climate Change in Multiple Sectors and Multiple Regions (AIACC) โดยที่ทางศูนย์เครือข่ายฯ ได้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการศึกษาในโครงการย่อย AIACC regional study AS07 ซึ่งศึกษาถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศต่อทรัพยากรน้ำและการเกษตรในพื้นที่ที่อาศัยน้ำฝน ตลอดจนการประเมินภาวะเสี่ยงต่อความเดือดร้อน และแนวทางการปรับตัวต่อสภาพภูมิอากาศในอนาคตของเกษตรกรในพื้นที่ของกลุ่มประเทศในเขตลุ่มแม่น้ำโขงตอนล่าง โดยมีการจัดทำสถานการณ์จำลองสภาพภูมิอากาศขึ้นโดยใช้เงื่อนไขที่ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นแก๊สเรือนกระจกที่สำคัญในบรรยากาศเพิ่มสูงขึ้นจาก 360 ppm เป็นค่าต่าง ๆ ปรมาณหนึ่งเท่าครึ่งและสองเท่าจากช่วงทศวรรษที่ 1980 อันเป็นช่วงปีฐานที่ใช้ในการศึกษา และใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ CCAM climate model ผลสรุปของการศึกษาพบว่า ทิศทางและแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในประเทศไทยในอนาคตจะเปลี่ยนแปลงไปในทางที่มีฝนตกมากขึ้นในเกือบทุกภาคของประเทศไทย ส่วนอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในประเทศไทยจะไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมมากนัก อาจเพิ่มสูงขึ้นหรือลดลงประมาณ 1-2°C แต่การเปลี่ยนแปลงในเชิงของอุณหภูมิที่สำคัญประการหนึ่งคือ จำนวนวันที่อากาศเย็นในรอบปีจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด และในทางกลับกัน จำนวนวันที่อากาศร้อนในรอบปีก็จะเพิ่มขึ้นมากขึ้น

ประเด็นที่สำคัญก็คือ การศึกษาโดยการจำลองสถานการณ์อนาคตขึ้นนั้นยังคงมีความไม่แน่นอนอยู่สูง ทั้งนี้เนื่องจากการเป็นการมองรู้ออกไปในอนาคตในระยะเวลายาวมาก ประกอบกับข้อจำกัดด้านอื่น ๆ ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้ ดังนั้น แนวทางการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในภูมิภาคและอนุภูมิภาคที่มีความละเอียดสูงนี้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาโดยการจำลองสถานการณ์ในอนาคตขึ้นให้หลากหลาย ทั้งนี้อาจจะทำได้โดยการใช้เครื่องมือและข้อมูลจาก Global Circulation Model ที่แตกต่างกัน และนำสถานการณ์จำลองที่มีความละเอียดสูงเหล่านั้นมาหาค่าเฉลี่ยหรือนำมาพิจารณาร่วมกันเพื่อหาข้อสรุปถึงทิศทางและระดับของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคต ดังนั้น การศึกษาการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการเกิดภัยพิบัติที่ประเทศไทย จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อนำไปสู่การทราบค่าข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศและสภาพภูมิอากาศต่าง ๆ ที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับการเกิดภัยพิบัติ ซึ่งในที่นี้จะทำการศึกษารวบรวมข้อมูล รวมถึงวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้รับ ณ สถานีภาคพื้นดินละติจูดต่ำบริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็กจังหวัดชุมพร เป็นกรณีศึกษาในขั้นแรก

## 2.5 แผ่นดินไหว

แผ่นดินไหว (Earthquake) [9] เป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่สามารถส่งแรงสั่นสะเทือนและมีผลกระทบไปได้ทั่วโลก ไม่เฉพาะบริเวณพื้นที่ที่เกิดเท่านั้น บางครั้งหากมีขนาดใหญ่ คลื่นแผ่นดินไหวสามารถส่งผ่านไปได้นับพันโลกหลายพันกิโลเมตรครอบคลุมพื้นที่หลายประเทศได้ด้วย การตรวจวัดแผ่นดินไหวจึงใช้ทั้งระบบเครือข่ายที่ประกอบไปด้วยสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวในระดับประเทศและในระดับโลก เพื่อการวิเคราะห์ตำแหน่ง ขนาดและเวลาเกิดของเหตุการณ์แผ่นดินไหวได้อย่างรวดเร็ว ประเทศไทยเริ่มมีการตรวจแผ่นดินไหวตั้งแต่ปี พ.ศ. 2506 โดยเป็นสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวแห่งแรกของกรมอุตุนิยมวิทยาที่ทำการติดตั้ง ณ จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งได้เข้าร่วมอยู่ในเครือข่ายระบบมาตรฐานโลก WWSSN (Worldwide Earthquake Standardized Stations) เมื่อเข้าสู่ทศวรรษที่ 2000 ประเทศไทยได้เพิ่มจำนวนสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวเพิ่มขึ้นอีกหลายแห่ง ปัจจุบันประเทศไทยมีสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวทั้งสิ้น 15 สถานี ซึ่งข้อมูลที่ได้จากสถานีเหล่านี้จะถูกส่งมายังศูนย์ข้อมูลแผ่นดินไหวโลก (International Earthquake Data Center) ที่สหรัฐอเมริกา และจะถูกเผยแพร่สู่สาธารณะผ่านทางเว็บไซต์ของศูนย์ข้อมูลแผ่นดินไหวโลก (www.earthquake.usgs.gov) นอกจากนี้ประเทศไทยยังมีหน่วยงานที่ดำเนินการตรวจวัดแผ่นดินไหวด้วยวิธีอื่น ๆ อีกด้วย เช่น กรมทรัพยากรธรณี ซึ่งใช้วิธีการตรวจวัดแผ่นดินไหวด้วยวิธี GPS (Global Positioning System) และกรมอุตุนิยมวิทยา ซึ่งใช้วิธีการตรวจวัดแผ่นดินไหวด้วยวิธี Seismometer (เครื่องวัดแผ่นดินไหว) ทั้งนี้ข้อมูลที่ได้จากสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวเหล่านี้จะถูกส่งมายังศูนย์ข้อมูลแผ่นดินไหวโลก (International Earthquake Data Center) ที่สหรัฐอเมริกา และจะถูกเผยแพร่สู่สาธารณะผ่านทางเว็บไซต์ของศูนย์ข้อมูลแผ่นดินไหวโลก (www.earthquake.usgs.gov) นอกจากนี้ประเทศไทยยังมีหน่วยงานที่ดำเนินการตรวจวัดแผ่นดินไหวด้วยวิธีอื่น ๆ อีกด้วย เช่น กรมทรัพยากรธรณี ซึ่งใช้วิธีการตรวจวัดแผ่นดินไหวด้วยวิธี GPS (Global Positioning System) และกรมอุตุนิยมวิทยา ซึ่งใช้วิธีการตรวจวัดแผ่นดินไหวด้วยวิธี Seismometer (เครื่องวัดแผ่นดินไหว) ทั้งนี้ข้อมูลที่ได้จากสถานีตรวจวัดแผ่นดินไหวเหล่านี้จะถูกส่งมายังศูนย์ข้อมูลแผ่นดินไหวโลก (International Earthquake Data Center) ที่สหรัฐอเมริกา และจะถูกเผยแพร่สู่สาธารณะผ่านทางเว็บไซต์ของศูนย์ข้อมูลแผ่นดินไหวโลก (www.earthquake.usgs.gov)



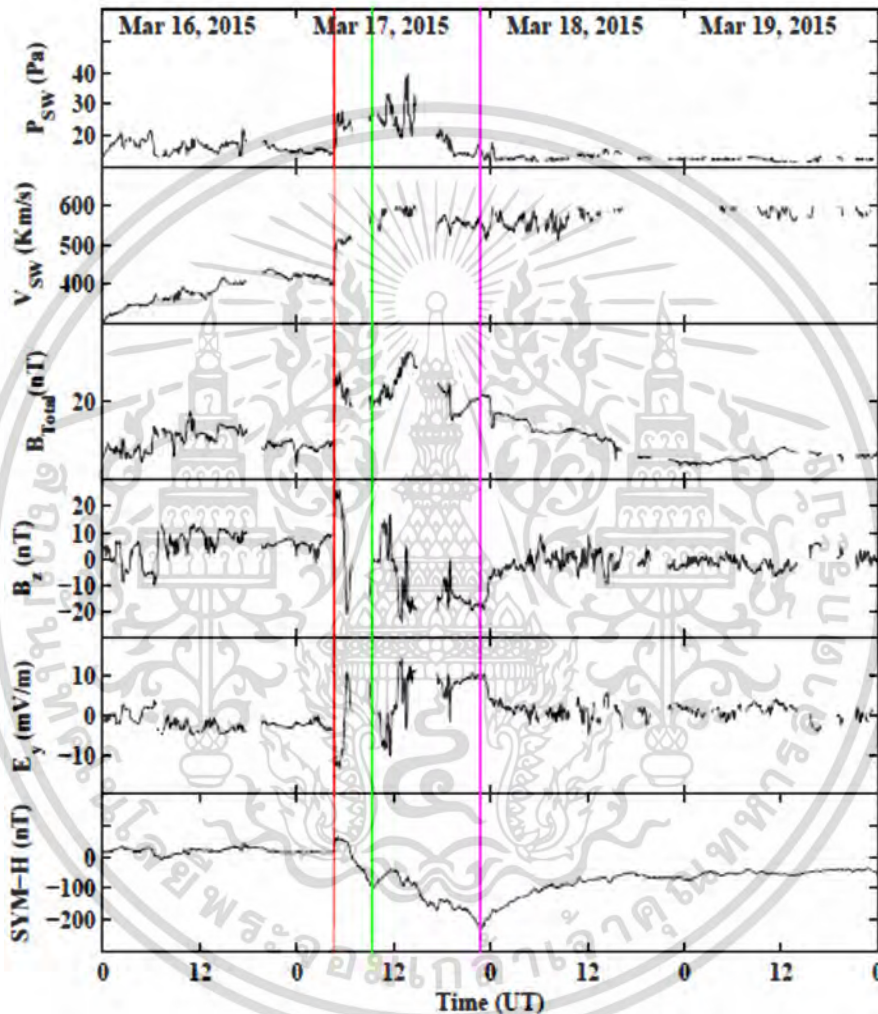
Standardized Seismograph Network) และต่อมาปรับเปลี่ยนเป็นระบบเครือข่าย IRIS (Incorporated Research Institution of Seismology) ซึ่งเป็นเครือข่ายโดยความร่วมมือของสถาบันการศึกษาหลายแห่งในสหรัฐอเมริกา บุคคลทั่วไปสามารถเข้าถึงข้อมูลผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ในตอนนี้ กรมอุตุนิยมวิทยาได้เพิ่มจำนวนสถานีตรวจแผ่นดินไหวในจังหวัดต่าง ๆ ทั่วประเทศเป็นแบบระบบแอนาโลกจำนวน 13 แห่ง และเป็นแบบระบบดิจิทัลจำนวน 11 แห่ง นอกจากนี้ ยังมีอีกหลายหน่วยงานที่ทำการตรวจวัดแผ่นดินไหว เช่น 1) กรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือ ซึ่งมีระบบเครือข่ายแบบ Array เพื่อการตรวจจับการทดลองระเบิดนิวเคลียร์ใต้พื้นดิน 2) การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยมีการตรวจวัดแผ่นดินไหวขนาดเล็กที่เป็นเครือข่ายบริเวณเขื่อนทางภาคตะวันตก 3) กรมชลประทานที่มีเครือข่ายตรวจวัดแผ่นดินไหว บริเวณจังหวัดแพร่ เพื่อศึกษาลักษณะการเกิดแผ่นดินไหวก่อนการสร้างเขื่อน และ 4) กรมโยธาธิการและจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่มีเครื่องตรวจวัดแผ่นดินไหวเพื่อทำงานวิจัยเรื่องการตอบสนองของอาคารจากความสั่นสะเทือนของแผ่นดินไหว

## 2.6 พายุแม่เหล็กโลก [10]

การระเบิดฟิลาเมนต์แม่เหล็กจากจุดดับบนดวงอาทิตย์หมายเลข 2297 ในวันที่ 15 มีนาคม 2015 ที่ผ่านมานั้นก่อให้เกิดการปลดปล่อยมวลโคโรนาฮาโลบางส่วน (halo coronal mass ejection หรือ CME) ที่มีองค์ประกอบต่าง ๆ พุ่งตรงเข้ามายังโลกในช่วงเวลาไม่กี่ชั่วโมง ต่อมาชั้นแมกเนโตสเฟียร์ (magnetosphere) ของโลกก็ได้รับผลกระทบจาก CME นี้ที่เวลา 0430 UT และลำดับของเหตุการณ์ต่าง ๆ ก็นำไปสู่การวิวัฒนาการของพายุแม่เหล็กโลก (geomagnetic storm) ที่แรงที่สุดของวัฏจักรสุริยะ 24 (24<sup>th</sup> solar cycle) พลาสมาลมสุริยะและพารามิเตอร์แม่เหล็กที่จุมกโบว์ช็อค (bow shock nose) ของโลกได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3 การมาถึงของ CME สามารถที่จะเห็นได้เสมือนเป็นการเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลันของค่าความดันลมสุริยะ (รูปที่ 2.3a), ความเร็วการไหล (รูปที่ 2.3b) และสนามแม่เหล็กอินเตอร์พลาเนตอะลี (interplanetary magnetic field หรือ IMF) (รูปที่ 2.3c) ที่ประมาณ 0445 UT ในทางกลับกัน องค์ประกอบแกน z ของสนามแม่เหล็กอินเตอร์พลาเนตอะลี (IMF Bz) (รูปที่ 2.3d) จะกลับไปยังทิศเหนือ และดัชนีกระแสแวนสมมาตร SYM-H (รูปที่ 2.3f) ก็ถูกเพิ่มขึ้นอย่างกระทันหัน ซึ่งเป็นตัวแทนของการเริ่มพายุแบบทันที (sudden storm commencement หรือ SSC) การเปลี่ยนแปลงที่เกี่ยวข้องในค่า IEF (สนามไฟฟ้าอินเตอร์พลาเนตอะลี) ก็ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 2.3e ต่อจากนั้น IMF Bz ก็จะหันไปทางทิศใต้ที่ 0600UT แม้ว่า IMF Bz จะฟื้นตัวไม่กี่ชั่วโมงในช่วงแรก แล้วมันก็จะหันไปทางทิศใต้อีกครั้งเป็นเวลาเกือบ 12 ชั่วโมงถัดไปก่อนที่จะฟื้นตัว ในระหว่างช่วงเวลานี้ SYM-H ก็จะลดลงไปถึงจุดต่ำสุด -232 nT ที่ 2245 UT ซึ่งมีความหมายว่าเป็นพายุที่แรงที่สุดของวัฏจักรสุริยะนี้ เพื่อความสะดวก นักวิจัยจะแบ่งพายุออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกอาจจะถูกพิจารณาจาก 0445 ถึง 1200 UT ในวันที่ 17 มีนาคม 2015 ในระหว่างช่วงเวลานี้ IMF Bz จะหันไปทางทิศใต้เป็นครั้งแรกและ SYM-H มีค่าต่ำประมาณ 110 nT ก่อนที่จะเริ่มฟื้นตัวเล็กน้อยด้วย IMF Bz ที่หันกลับไปทางทิศเหนือ ส่วนที่สองอาจจะถือว่าเป็นส่วนที่เหลือของพายุ หลังจากเวลา 1200UT ในระหว่างช่วงเวลานี้ IMF Bz จะหันและยังคงอยู่ในทางทิศใต้เป็นเวลาเกือบ 12 ชั่วโมงและ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYM-H มีค่าต่ำสุดเท่ากับ  $-232\text{ nT}$  ก่อนที่จะเริ่มเฟสการฟื้นตัว จากที่เห็นในรูปที่ 2.3 เวลาของการเริ่มต้นของพายุแบบทันที (SSC) ได้ถูกทำแสดงด้วยเส้นประสีแดงแนวตั้ง (วันที่ 17 มีนาคม 2015 เวลา 0465 UT) ในขณะที่เวลาที่ SYM-H มีค่าต่ำที่สุดครั้งที่ 1 จะถูกแสดงด้วยเส้นประสีเขียวแนวตั้ง (วันที่ 17 มีนาคม 2015 เวลา 0940 UT) ส่วนเวลาของค่าต่ำสุดที่แท้จริงของ SYM-H ( $-232\text{ nT}$  ที่เวลา 2245 UT) จะถูกแสดงด้วยเส้นประสีม่วงแนวตั้ง (วันที่ 17 มีนาคม 2015 เวลา 2270 UT)



รูปที่ 2.3 สภาวะการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นของพายุ St. Patrick day ระหว่างวันที่ 16-19 มีนาคม 2015

จะเห็นได้ว่า เมื่อ IMF Bz หันไปทางทิศใต้เนื่องจากสนามไฟฟ้าคอนเวกชันที่เพิ่มขึ้น สนามไฟฟ้าทะเลแบบทันที (PPEF) ไปทางทิศ E ก็จะถูกสังเกตเห็นได้ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ตอนกลางวันและเมื่อ PPEF ไปทางทิศ W ที่เกี่ยวข้องจะถูกสังเกตเห็นได้ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ตอนกลางคืน มันควรจะตั้งข้อสังเกตในกรณีนี้ (การหันเหไปทางทิศใต้ของ IMF) PPEFs จะอยู่ในทิศทางเดียวกับทิศของสนามไฟฟ้าในแนวเส้นศูนย์สูตร dawn-dusk ทั่วโลก อย่างไรก็ตาม ในระหว่างที่มีการหันเหไปทางทิศเหนือแบบฉับพลันของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IMF Bz โดยทั่วไป PPEFs ที่ซึ่งทะลุไปสู่ชั้นไอโอโนสเฟียร์ในแนวเส้นศูนย์สูตรและละติจูดต่ำนั้นจะอยู่ในทิศทางที่ตรงข้ามกับทิศของสนามไฟฟ้าโซแนลในแนวเส้นศูนย์สูตร dawn-dusk ทั่วโลกเหล่านั้น หรืออาจจะพูดง่าย ๆ ว่า ในระหว่างการหันเหไปทางทิศใต้ของ IMF สนาม PPEFs จะเสริมความแรงกับสนามไฟฟ้าโซแนลในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มีอยู่ ในขณะที่ ในระหว่างการหันเหไปทางทิศเหนือของ IMF สนาม PPEFs จะหักล้างกับสนามไฟฟ้าโซแนลในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มีอยู่ ดังนั้น ในกรณีนี้ ผลที่เกิดขึ้นจาก PPEFs ส่วนใหญ่ได้ถูกคาดหวังที่จะถูกสังเกตได้ประมาณ 2-3 ชั่วโมงบนทั้งสองด้านของเส้นสีเขียวแนวตั้ง โดยส่วนใหญ่ การหันเหของ IMF Bz จะเกิดขึ้นในระหว่างช่วงเวลานี้

การเปลี่ยนแปลงในความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นไอโอโนสเฟียร์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือแบบปกติและแบบทันที การเปลี่ยนแปลงแบบปกติมีคุณลักษณะของความเป็นคาบเวลาที่เด่นชัด เช่นกิจกรรมสุริยะซึ่งมีวัฏจักรโดยประมาณ 11 ปีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลที่เกี่ยวข้องกับการหมุนของโกลบรอบดวงอาทิตย์และการเปลี่ยนแปลงแบบรายวัน ดังนั้นจึงค่อนข้างง่ายต่อการจำลอง ในทางตรงกันข้าม การเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในกิจกรรมสุริยะ เช่น เปลวไฟสุริยะ (solar flare - เปลวไฟพลังงานสูงที่เกิดจากการรบกวนช่วงเวลาสั้น ๆ บนพื้นผิวของดวงอาทิตย์) ก่อให้เกิดการรบกวน (disturbance) ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านบนเหนือภาคพื้นดินเป็นระลอกอย่างต่อเนื่อง ซึ่งถูกขับเคลื่อนโดยพายุแม่เหล็กด้วยจึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นอิเล็กตรอนอย่างทันทีในชั้นไอโอโนสเฟียร์ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า "พายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์"

พายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ซึ่งมีความหนาแน่นอิเล็กตรอนลดลงจะถูกเรียกว่า "พายุลบ" (negative storm) และถ้ามีความหนาแน่นอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นจะถูกเรียกว่า "พายุบวก" (positive storm) ลักษณะที่พายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ประพาศตัวนั้นมีความแตกต่างกันอย่างมาก ตัวอย่างเช่นพายุบวกอาจจะกลายเป็นพายุลบเมื่อเวลาผ่านไปเรื่อย ๆ ก็ได้ทั้งพายุบวกหรือพายุลบอาจจะก่อตัวในช่วงเวลาหนึ่ง ๆ <เกิดขึ้นตัวใดตัวหนึ่ง> หรือพายุบวกและพายุลบอาจจะพัฒนาไปพร้อม ๆ กันที่ละติจูดที่ต่างกัน โดยทั่วไป พายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์เป็นการรบกวนความหนาแน่นอิเล็กตรอนไปทั่วโลก (global scale) แต่ก็ไม่บ่อยนักที่จะพบว่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนจะพุ่งขึ้นอย่างรวดเร็วในพื้นที่แคบ ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดพายุแม่เหล็กด้วยปรากฏการณ์นี้เรียกว่า SED ย่อมาจากคำว่า storm enhanced density (ความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นเพราะพายุ) ด้วยเหตุนี้ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนจะเปลี่ยนแปลงไปมาหลายครั้ง หรือแม้กระทั่งอาจจะมียุคที่ต่ำกว่าค่าปกติ 20 เท่าก็ได้ที่เวลาเดียวกันตอนราว ๆ พระอาทิตย์ตกดิน โดย SED นี้จะมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับการรบกวนแบบบวกในตอนกลางวัน เนื่องจากการลดลงของค่า  $f_oF_2$  ในพายุลบจะลดค่าความถี่ที่ใช้งานได้สูงสุด (maximum usable frequency หรือ MUF) สำหรับการสื่อสาร HF งานวิจัยที่ใช้เครื่องไอโอโนซอนด์ที่มีอยู่ในขณะนี้ยังคงที่จะศึกษากันต่อไป

ในตอนนีพายุบวกยังคงได้รับความสนใจที่จะศึกษาเพิ่มขึ้นในประเด็นที่เกี่ยวข้องกับเวลาประวิงในการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ เช่น คลื่นที่ถูกส่งจากดาวเทียม GPS ฯลฯ โดยเวลาประวิงในชั้นไอโอโนสเฟียร์ของคลื่นวิทยุดาวเทียมจะแปรผันตรงกับค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ (TEC) โดยค่า TEC นี้คือค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่ถูกปริพันธ์ตามเส้นทางการแพร่กระจายคลื่นจากดาวเทียมไปยังเครื่องรับ

รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง TEC กับเวลาประวิงในการแพร่กระจายคลื่นในกรณีของสัญญาณจีพีเอส L1 และ L2 สัญญาณ ( $1 \text{ TECU} = 1 \times 10^{16}$  อิเล็กตรอน/ $\text{m}^2$ ) การเปลี่ยนแปลงปกติหรือการรบกวนอย่างทันทีอาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่า TEC เปลี่ยนแปลงได้จากหลายสิบ TECU ไปจนถึง 200 TECU ก็ได้

เมื่อไม่กี่ปีมานี้ ค่า TEC ที่สังเกตได้จากดาวเทียมจีพีเอสและค่า  $f_oF2$  ที่ถูกสังเกตได้จากเครื่องไอโอโนซอนด์ก็ยังคงที่จะถูกใช้งานกันอย่างแพร่หลายสำหรับการศึกษาชั้นไอโอโนสเฟียร์เหตุผลข้อหนึ่งสำหรับแรงผลักดันดังกล่าวก็คือ เครื่องรับสัญญาณ GPS มีความง่ายต่อการติดตั้งมากกว่าเครื่องไอโอโนซอนด์และมีจำนวนสถานีที่ใช้ในการสังเกตมากกว่า ถึงแม้ว่า  $f_oF2$  และ TEC จะประพัตตัวคล้ายกันราวกับว่าแต่ละตัวเป็นตัววัดการเปลี่ยนแปลงในชั้นไอโอโนสเฟียร์ แต่ก็เป็นมาตรวัดที่ไม่เหมือนกัน ดังนั้น เราจึงควรใช้มาตรวัดทั้งสองตัวนี้ในลักษณะร่วมกันสำหรับการวิเคราะห์ที่ละเอียดขึ้น หน้าที่ที่สำคัญอีกอย่างของไอโอโนซอนด์คือการสังเกตความสูงของชั้นไอโอโนสเฟียร์ โดยกระบวนการทางแสง-เคมีนั้นมีความหมายอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงชั้นไอโอโนสเฟียร์และขึ้นอยู่กับความสูงอย่างมาก นอกจากนี้ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้นไอโอโนสเฟียร์จะบ่งบอกถึงกระบวนการทางแสง-เคมีแบบไดนามิกในชั้นบรรยากาศและพลาสมาโดยตรง ดังนั้น ความสูงของชั้นไอโอโนสเฟียร์จึงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญตัวหนึ่งในการที่จะช่วยขยายความไปถึงกลไกของการก่อตัวของพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ร่วมกับค่า  $f_oF2$  และค่า TEC ได้ โดยพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์นั้นมักจะก่อตัวที่มีความซับซ้อนและเข้าใจยากอยู่ 3 ประเด็น

- ประเด็นที่ 1 คือ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่กำลังเพิ่มขึ้น
- ประเด็นที่ 2 คือ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนมีค่าลดลง และ
- ประเด็นที่ 3 คือ คงเหตุการณ์/ผลกระทบนั้นไว้อย่างต่อเนื่องจนถึงระยะเวลาหนึ่ง

ในอดีตที่ผ่านมา พบว่า มีเหตุการณ์ที่สำคัญอย่างยิ่ง 2 เหตุการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงในชั้นไอโอโนสเฟียร์แบบบวกรที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสภาพอวกาศ โดยใช้ข้อมูลจากแผนที่ TEC ที่ได้มาจากเครือข่ายเครื่องรับจีพีเอส 2 ความถี่ (GEONET: เครือข่ายสังเกตการณ์โลกด้วย GPS) ที่ถูกสร้างขึ้นโดยหน่วยงาน GSI ของญี่ปุ่น ร่วมกับค่า  $f_oF2$  และ  $h_mF2$  ที่ได้มาจากการสังเกตด้วยไอโอโนซอนด์จำนวน 4 จุดในญี่ปุ่น จากการศึกษาพบว่า เหตุการณ์ที่ 1 คือพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่จัดว่าเป็น “พายุ TEC” (TEC storm) นั้นเกิดขึ้นเมื่อวันที่ 6 พ.ย. 2001 พายุลูกนี้ค่อนข้างที่โดดเด่นมากในการแสดงค่า TEC ที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนมาก ในขณะที่ ค่า  $f_oF2$  ได้รับผลกระทบไม่มากนัก ส่วนเหตุการณ์ที่ 2 คือ พายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่จัดว่าเป็น “SED” นั้นเกิดขึ้นเมื่อวันที่ 8 พ.ย. 2004 หลังจากที่พระอาทิตย์ตกดิน

พายุลบเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงในส่วนผสมในบรรยากาศชั้นเทอร์โมสเฟียร์ที่เกิดขึ้นโดยพลังงานที่ได้รับการฉีดเข้าไปในบริเวณขั้วโลกในระหว่างที่เกิดพายุแม่เหล็ก บรรยากาศชั้นเทอร์โมสเฟียร์ที่มีส่วนผสมที่เปลี่ยนแปลงจะเคลื่อนตัวไปยังละติจูดที่ต่ำกว่าในรูปของ TADs (การรบกวนในบรรยากาศที่เคลื่อนตัว) การเปลี่ยนแปลงในส่วนผสมถูกอธิบายได้ด้วยการเพิ่มขึ้นในค่าอัตราส่วน  $[N_2]/[O]$  และก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์การรวมตัวกันใหม่ของพลาสมาในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ดังนั้นจะก่อให้เกิดค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่ลดลง (โดยปกติ  $[O]$  มีค่าลดลงตาม  $h$  ที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้อัตราส่วน  $[N_2]/[O]$  ดังกล่าวมีค่าเพิ่มขึ้น)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาเหตุที่ทำให้เกิดพายุบวกรหรือการรบกวนไอโอโนสเฟียร์แบบบวกร (positive ionospheric disturbances) มีอยู่ 2 ประเด็นหลัก ๆ คือ

1. ลมที่ไปในทิศ E ในสภาวะเริ่มต้นของ TAD โดยลมที่ไปในทิศ E นี้มีความเข้มข้นมาก (เสมือนเป็น Surge-คลื่นยักษ์- ในทิศ E) ที่จะผลักดันพลาสมาให้ไปตามเส้นสนามแม่เหล็กโลกที่ถูกเอียงไว้ ถ้าปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นในตอนกลางวัน ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการจางหายของอิเล็กตรอนมีค่าลดลงที่  $h$  ที่มากขึ้น ในลักษณะดังกล่าวนี้ พายุบวกรอาจจะเกิดก่อนพายุลบ ถึงแม้ว่าเหตุการณ์นี้จะขึ้นอยู่กับคาบเวลาที่เกิดที่คลื่นยักษ์ในทิศ E อย่างมาก

2. พลาสมาที่ถูกยกขึ้น (ExB drift) ในทิศทางที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก โดยสนามไฟฟ้าไปทางทิศ E อัตราการจางหายของอิเล็กตรอนลดลงตามความสูงที่มากขึ้นเช่นเดียวกับในกรณีของผลกระทบของลม Surge ที่ไปในทิศตะวันออก เมื่อเหตุการณ์นี้เกิดขึ้นในตอนกลางวัน ความหนาแน่นอิเล็กตรอนก็จะมีเพิ่มขึ้น สนามไฟฟ้าในทิศ E นี้เกิดขึ้นจากแหล่งกำเนิด 2 แหล่งกว้าง ๆ คือ

1. สนามไฟฟ้าคอนเวกชันในชั้นแมกเนโตสเฟียร์ที่ถูกทำให้เข้มข้นขึ้นที่ทะลุผ่านเข้าไปในละติจูดที่ต่ำกว่า – PPEF ในชั้นแมกเนโตสเฟียร์

2. อีกแหล่งหนึ่งคือ ไดนาโมการรบกวน (disturbance dynamo หรือ DD) ที่เกิดขึ้นโดยการเปลี่ยนแปลงในการหมุนที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปในชั้นเทอร์โมสเฟียร์ที่ทำให้เกิดขึ้นโดยพลังงานที่ถูกฉีดเข้าไปในบริเวณขั้วโลก

ในกรณีของพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่เกิดขึ้นจริง ปัจจัยที่ซับซ้อนจำนวนมากอาจจะตอบโต้กันและกัน เพื่อที่จะเพิ่มการรบกวนหรือแม้กระทั่งจะหักล้างกันและกันก็ได้

Forbes et al. [11] และ Forbes [12] พยายามที่จะแยกแหล่งที่มาของการก่อกวนจำนวนมาก โดยการใช้ข้อมูลที่เก็บได้จากไอโอโนซอนด์ชุดหนึ่งที่ตรวจวัดอยู่ในแนวเมริเดียนอย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปแหล่งที่มาหลักของการรบกวนอาจจะเปลี่ยนแปลงได้ตามเวลาที่ผ่านไป ด้วยความสำคัญของแต่ละกระบวนการการรบกวนที่มีการเปลี่ยนแปลงจากเหตุการณ์หนึ่งไปยังอีกเหตุการณ์หนึ่ง ดังนั้น จึงทำให้หัวข้อ “การระบุแหล่งที่มาของการรบกวน” นี้จึงเป็นงานที่ยากลำบากที่จะทำได้อย่างเต็มที่ค่า  $f_oF2$  เป็นพารามิเตอร์พื้นฐานมากที่สุดของพารามิเตอร์ทั้งหมดที่บ่งบอกคุณลักษณะของพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์แต่ มันก็ไม่เพียงพอที่จะได้รับมุมมองที่สมบูรณ์เข้าไปถึงความซับซ้อนของการรบกวน ถึงแม้ว่าชั้น F ของชั้นไอโอโนสเฟียร์จะถูกยกตัวไปยัง  $h$  ที่สูงขึ้นด้วยสนามไฟฟ้าที่ไปในทิศตะวันออกหรือลมนิวโทรลเทอร์โมสเฟียร์ ในทิศตะวันออก (ETNW) มันอาจจะเป็นต้นเหตุให้  $f_oF2$  มีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับเวลา ท้องถิ่นหรืออัตราของความสูงที่เพิ่มขึ้น (ที่ถูกยกขึ้น) ตามที่ถูกอธิบายไว้โดย Rishbeth [13] การไหลของพลาสมาจากชั้นไอโอโนสเฟียร์ไปยังพลาสมาสเฟียร์จะลดค่า  $NmF2$  ภายใต้อิทธิพลที่แน่นอนอันหนึ่ง แต่ระดับของผลกระทบนี้จะแตกต่างกันมากขึ้นอยู่กับลมนิวโทรลในชั้นบรรยากาศและ ExB drift การตกลงของค่า  $f_oF2$  ที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของค่า  $hmF2$  ของชั้น F นั้นเป็นผลมาจากพลาสมาที่ถูกกระจาย (ใหม่ อีกครั้ง) ไปตามเส้นสนามแม่เหล็กโลกและเปลี่ยนแปลงโพรไฟล์ความสูงในชั้นไอโอโนสเฟียร์ชั้นพลาสมาสเฟียร์มีหน้าที่หนึ่งคือการดึงพลาสมาในชั้นไอโอโนสเฟียร์ออกไปในเวลากลางวันแล้วเติมเต็มใหม่ชั้นไอโอ

โนสเฟียร์ด้วยพลาสมาในตอนกลางคืน ผลของการเพิ่ม  $f_oF2$  ที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มขึ้นของ  $hmF2$  นั้นมีความเกี่ยวข้องกับการลดลงในอัตราการรวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนและความก้าวหน้าของการแตกตัวเป็นไอออนในชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านล่าง การเพิ่มขึ้นหรือการลดลงใน  $f_oF2$  จะถูกกำหนดในท้ายที่สุดซึ่งขึ้นอยู่กับว่าอันไหนที่จะเด่นมากกว่ากันระหว่างผลกระทบที่ตรงข้ามกันทั้งสองเหตุการณ์ ในทำนองเดียวกัน  $f_oF2$  อาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงแม้กระทั่งเมื่อความสูงของชั้น F ถูกทำให้มีค่าลดลงโดย ExB drift ที่เคลื่อนตัวลงมาที่ถูกขับเคลื่อนด้วยสนามไฟฟ้าไปทางทิศตะวันตกหรือลมนิวโทรลเทอร์โมสเฟียร์ที่ตรงขั้วโลก (poleward) การเพิ่มขึ้นในค่า  $f_oF2$  จะยังคงอยู่และจะหยุดในไม่ช้าเนื่องจากผลของการรวมตัวกันใหม่ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านล่างพร้อมกับค่า  $f_oF2$  เริ่มต้นที่จะมีค่าลดลง วิธีของการสังเกต TEC โดยใช้คลื่นวิทยุที่ส่งจากดาวเทียม GPS ได้รับการยอมรับกันอย่างแพร่หลายเมื่อเร็ว ๆ นี้ ดังนั้นจึงเป็นการสนับสนุนงานวิจัยเกี่ยวกับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์โดยใช้ TEC

ส่วนค่า TEC นั้น TEC เองก็ประพฤติตัวในลักษณะที่คล้ายกับ  $f_oF2$  เมื่อเกิดพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์แต่ก็ไม่ได้สอดคล้องกันหมด ยกตัวอย่างเช่นเมื่อ  $f_oF2$  มีการเปลี่ยนแปลงลดลงภายใต้การกระจายตัวใหม่ของพลาสมาตามเส้นสนามแม่เหล็กโลกค่าที่ปริพันธ์ได้ของ TEC ก็ไม่ได้แสดงการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนใด ๆ เนื่องจากการกระจายตัวใหม่เพียงตัวเดียวไม่สามารถที่จะทำให้เกิดการรวมตัวใหม่ได้และก็ได้สร้างพลาสมาด้วย ในทางกลับกัน เมื่อ  $f_oF2$  มีค่าลดลงอันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของอัตราการรวมตัวกันใหม่ ค่า TEC เองก็มีค่าลดลงเช่นกัน เนื่องจาก TEC เป็นพารามิเตอร์ที่คิดเหนือชั้นไอโอโนสเฟียร์ไปยังชั้นพลาสมาสเฟียร์ TEC ก็จะมีค่าที่ต่ำลงในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงในอัตราการจางหายอิเล็กตรอนในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับค่า  $f_oF2$  อีกทั้ง TEC และ  $f_oF2$  ก็ยังแสดงการเปลี่ยนแปลงตามเวลาที่แตกต่างกัน ดังนั้นการวิเคราะห์ค่าที่สังเกตได้ทั้งสองที่แตกต่างในด้านพฤติกรรมควรจะช่วยอย่างมากในการแปลความหมายของพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์

## 2.7 ภาวะเรือนกระจก

ภาวะเรือนกระจก คือ ภาวะที่ชั้นบรรยากาศของโลกกระทำตัวเสมือนกระจก ที่ยอมให้รังสีคลื่นสั้นจากดวงอาทิตย์ผ่านลงมายังพื้นผิวโลกได้ แต่จะดูดกลืนรังสีคลื่นยาวช่วงอินฟราเรดที่แผ่ออกจากพื้นผิวโลกเอาไว้ จากนั้นก็จะคายพลังงานความร้อนให้กระจายอยู่ภายใน บรรยากาศจึงเปรียบเสมือนกระจกที่ปกคลุมผิวโลกให้มีภาวะสมดุลทางอุณหภูมิจึงเหมาะสมต่อสิ่งมีชีวิตบนผิวโลก ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (อ่านรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่ [www.tmd.go.th/knowledge/know\\_greenhouse01.html](http://www.tmd.go.th/knowledge/know_greenhouse01.html))

แก๊สเรือนกระจก คือ แก๊สที่เป็นองค์ประกอบของบรรยากาศและมีคุณสมบัติยอมให้รังสีคลื่นสั้นจากดวงอาทิตย์ผ่านทะลุมายังพื้นผิวโลกได้ แต่จะดูดกลืนรังสีคลื่นยาวช่วงอินฟราเรดที่แผ่ออกจากพื้นผิวโลกเอาไว้ แก๊สเรือนกระจกที่สำคัญ และเป็นผลมาจากกิจกรรมของมนุษย์ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ไนตรัสออกไซด์ ฯลฯ

ภาวะโลกร้อน หมายถึง ภาวะที่อุณหภูมิโดยเฉลี่ยของโลกสูงขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ภูมิอากาศเปลี่ยนแปลง ภาวะโลกร้อนอาจนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงของปริมาณฝน ระดับน้ำทะเล และมีผลกระทบอย่างกว้างขวางต่อพืช สัตว์ และมนุษย์

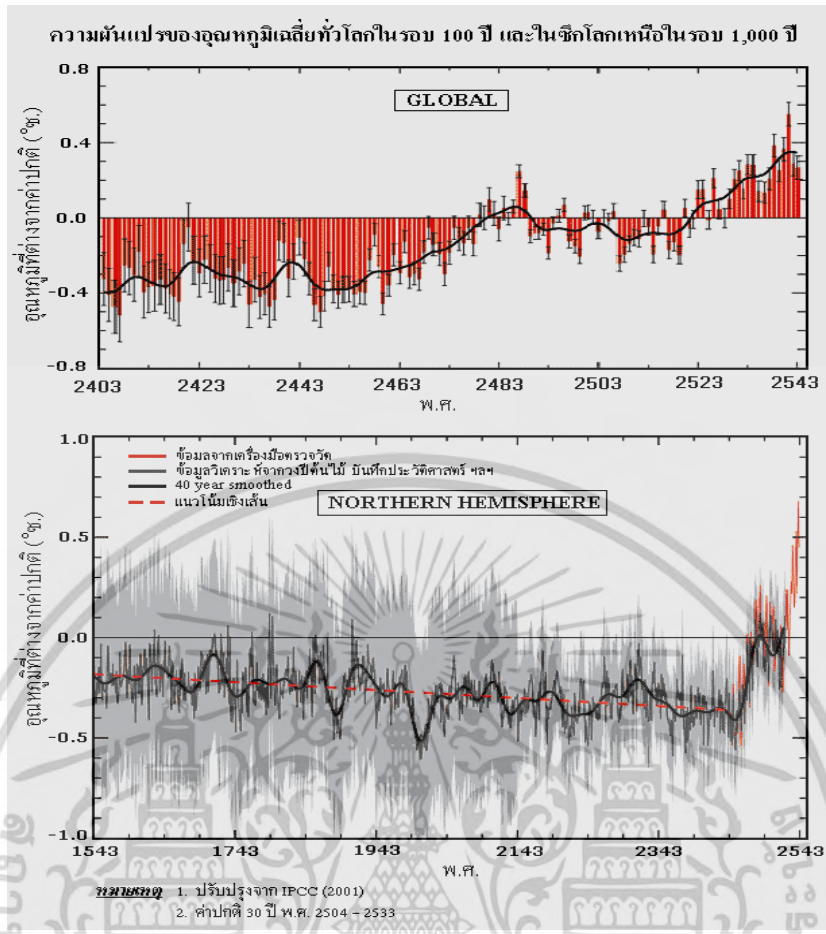
ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1861 อุณหภูมิผิวพื้นเฉลี่ยของโลกสูงขึ้น และสูงขึ้นประมาณ 0.6 องศาเซลเซียส จากการวิเคราะห์ข้อมูลในซีกโลกเหนือ ย้อนหลังไป 1,000 ปี พบว่า อุณหภูมิของโลกสูงขึ้นมากในศตวรรษที่ 20 โดยสูงขึ้นมากที่สุดในทศวรรษที่ 1990 และ ค.ศ. 1998 (พ.ศ. 2541) เป็นปีที่ร้อนมากที่สุดในรอบ 1,000 ปี รูปที่ 2.5 แสดงสภาวะเรือนกระจกที่เกิดขึ้นและความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิโดยเฉลี่ยของโลกและทางซีกโลกเหนือ

นอกจากนี้ ในศตวรรษที่ 20 ปริมาณน้ำฟ้า (น้ำฟ้า หมายถึง น้ำที่ตกลงมาจากฟ้าไม่ว่าจะอยู่ใน ภาวะของเหลวหรือของแข็ง เช่น ฝน หิมะ ลูกเห็บ) บริเวณพื้นแผ่นดินส่วนใหญ่ของซีกโลกเหนือในเขต ละติจูดกลางและละติจูดสูง สูงขึ้นโดยเฉลี่ย 5 - 10 % แต่ลดลงประมาณ 3 % ในบริเวณกึ่งเขตร้อน ส่วน ระดับน้ำทะเล ดังแสดงในรูปที่ 2.6 จากข้อมูลทางธรณีวิทยา ปรากฏว่า เมื่อ 6,000 ปีที่ผ่านมา ระดับน้ำทะเลของโลกสูงขึ้นในอัตราเฉลี่ยประมาณ 0.5 มิลลิเมตร/ปี และในระยะ 3,000 ปีที่ผ่านมา สูงขึ้น เฉลี่ย 0.1 - 0.2 มิลลิเมตร/ปี (IPCC, 2001) แต่จากข้อมูลตรวจวัดในศตวรรษที่ 20 ระดับน้ำทะเลของโลก สูงขึ้นในอัตราเฉลี่ย 1 - 2 มิลลิเมตร/ปี ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยรูปที่ 2.7 นี้แสดงระดับน้ำทะเลของประเทศ เนเธอร์แลนด์ ฝรั่งเศสและโปแลนด์ในศตวรรษที่ 20 ที่สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับศตวรรษที่ 19



รูปที่ 2.4 สภาวะเรือนกระจก (<http://www.greenhouse.gov.au/education/what.html>).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



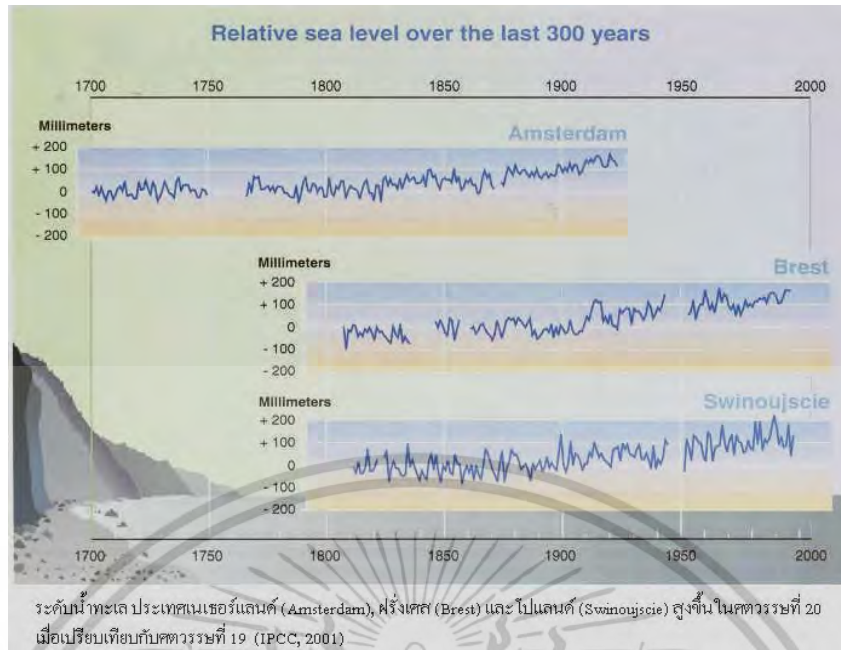
รูปที่ 2.5 ความผันแปรของอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกและทางซีกโลกเหนือ



รูปที่ 2.6 ปริมาณน้ำฟ้าของโลกช่วงศตวรรษที่ 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





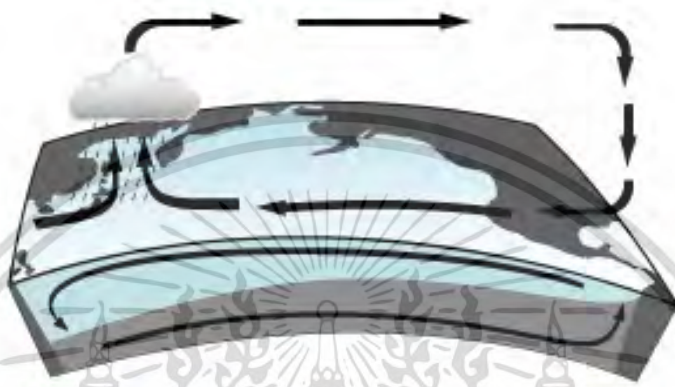
รูปที่ 2.7 ระดับน้ำทะเลของประเทศเนเธอร์แลนด์ ฝรั่งเศสและโปแลนด์ในศตวรรษที่ 20

## 2.8 เอลนีโญ

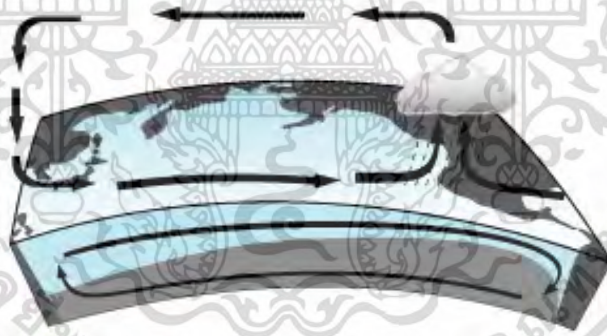
เอลนีโญ (El Niño) มาจากภาษาสเปน หมายถึง บุตรพระคริสต์ เอลนีโญเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างการหมุนเวียนของกระแสอากาศกับกระแสน้ำในมหาสมุทร มักเกิดขึ้นในช่วงเทศกาลคริสต์มาส เมื่อกระแสน้ำอุ่นในมหาสมุทรแปซิฟิกไหลเข้าแทนที่กระแสน้ำเย็นบริเวณชายฝั่งเปรู ส่งผลกระทบทางระบบนิเวศและห่วงโซ่อาหาร ฝูงปลามีจำนวนลดลง ทำให้นกชายฝั่งขาดอาหาร ชาวประมงขาดรายได้ รวมทั้งเกิดฝนตกและดินถล่มอย่างรุนแรงในประเทศเปรูและเอกวาดอร์ อย่างไรก็ตาม เอลนีโญเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอย่างไม่มีคาบเวลาที่แน่นอน ไม่ได้เกิดขึ้นทุกปี แต่แต่ละครั้งที่เกิดเอลนีโญอาจกินเวลาประมาณ 2 - 3 เดือนหรือนานกว่านั้น

โดยปกติ ที่บริเวณเส้นศูนย์สูตรเหนือมหาสมุทรแปซิฟิก ลมสินค้าตะวันออก (Easterly trade winds) จะพัดจากประเทศเปรูชายฝั่งทวีปอเมริกาใต้ไปทางตะวันตกของมหาสมุทรแปซิฟิก แล้วยกตัวขึ้นบริเวณประเทศอินโดนีเซีย ทำให้มีฝนตกมากในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และทวีปออสเตรเลียตอนเหนือ กระแสลมสินค้าพัดให้กระแสน้ำอุ่นบนพื้นผิวมหาสมุทรแปซิฟิกไปกองรวมกันทางทิศตะวันตก จนมีระดับสูงกว่าระดับน้ำทะเลปกติประมาณ 60 - 70 เซนติเมตร แล้วจมตัวลง กระแสน้ำเย็นใต้มหาสมุทรซีกเบื้องล่างไหลเข้ามาแทนที่กระแสน้ำอุ่นพื้นผิวซีกตะวันออกนำพาธาตุอาหารจากก้นมหาสมุทรขึ้นมา ทำให้ปลาชุกชุม เป็นประโยชน์ต่อนกทะเลและการทำประมงชายฝั่งของเปรูดังรูปที่ 2.8 ในกรณีที่เกิดเอลนีโญ กระแสลมสินค้าตะวันออกอ่อนกำลัง กระแสลมพื้นผิวจึงเปลี่ยนทิศทางโดยพัดจากประเทศอินโดนีเซียและออสเตรเลียตอนเหนือไปทางทิศตะวันออก แล้วยกตัวขึ้นเหนือชายฝั่งทวีปอเมริกาใต้ ทำให้เกิดฝนตกหนักและแผ่นดินถล่มในประเทศเปรูและเอกวาดอร์ กระแสลมพัดกระแสน้ำอุ่นบนพื้นผิวมหาสมุทรแปซิฟิก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปกองรวมกันบริเวณชายฝั่งประเทศเปรู ทำให้กระแสน้ำเย็นใต้มหาสมุทรไม่สามารถลอยตัวขึ้นมาดังรูปที่ 2.9 บริเวณชายฝั่งจึงขาดธาตุอาหารสำหรับปลาและนกทะเล ทำให้ชาวประมงเปรูขาดรายได้ ในขณะที่เอลนีโญทำให้ฝนตกหนักทางตอนเหนือของทวีปอเมริกาใต้และทำให้เกิดความแห้งแล้งในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้และออสเตรเลียตอนเหนือเช่นกัน ไฟไหม้ป่าที่รุนแรงในอินโดนีเซียในบางปีก็มีสาเหตุจากเอลนีโญเช่นกัน



รูปที่ 2.8 สภาวะปกติของบริเวณเส้นศูนย์สูตรเหนือนมหาสมุทรแปซิฟิก

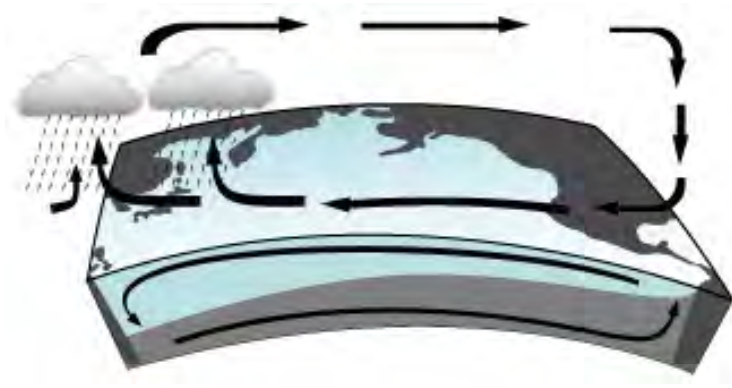


รูปที่ 2.9 สภาวะที่เกิดเอลนีโญ

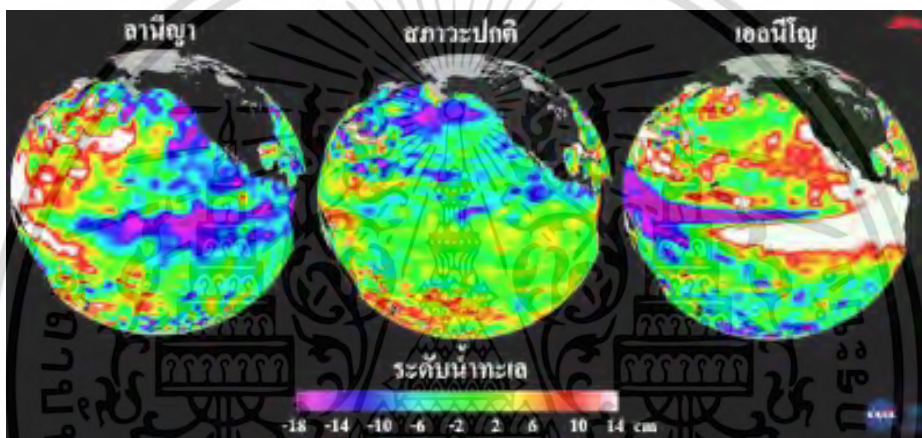
## 2.9 ลานีญา

ลานีญา (La Niña) แปลว่า บุตรธิดา ลานีญาเป็นปรากฏการณ์ที่มีลักษณะตรงข้ามกับเอลนีโญ คือ มีลักษณะคล้ายคลึงกับสภาวะปกติแต่รุนแรงกว่า กล่าวคือ กระแสลมสินค้าตะวันออก (Trade wind) ที่พัดไปทางทิศตะวันออกมีกำลังแรง ทำให้ระดับน้ำทะเลบริเวณทางซีกตะวันตกของมหาสมุทรแปซิฟิกสูงกว่าสภาวะปกติ ลมสินค้ายกตัวเหนือประเทศอินโดนีเซีย ทำให้เกิดฝนตกอย่างหนัก แต่ที่บริเวณชายฝั่งประเทศเปรูน้ำเย็นใต้มหาสมุทรยกตัวขึ้นแทนที่กระแสน้ำอุ่นบริเวณชายฝั่งมหาสมุทรแปซิฟิกทางซีกตะวันออก ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ทำให้เกิดธาตุอาหารและฝูงปลาชุกชุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 สภาวะลานีญา



รูปที่ 2.11 ระดับน้ำพื้นผิวมหาสมุทรแปซิฟิก

หรือกล่าวอย่างง่ายว่า เอลนีโญทำให้เกิดฝนตกหนักในตอนเหนือของทวีปอเมริกาใต้และเกิดความแห้งแล้งในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ในทางกลับกัน ลานีญาทำให้เกิดความแห้งแล้งทางตอนเหนือของทวีปอเมริกาใต้และเกิดฝนตกหนักในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ทั้งเอลนีโญและลานีญาเกิดจากความผกผันของกระแสอากาศโลกบริเวณเส้นศูนย์สูตรเหนือมหาสมุทรแปซิฟิก ซึ่งยังไม่สามารถระบุสาเหตุที่แน่ชัด ภาพถ่ายจากดาวเทียมโทเพกซ์/โพซีดอน (Topex/Poseidon) ในรูปที่ 2.11 แสดงให้เห็นความต่างระดับของน้ำทะเลบนพื้นผิวมหาสมุทรแปซิฟิกในขณะที่เกิดลานีญากับเอลนีโญ สีขาวแสดงระดับน้ำซึ่งสูงกว่าระดับน้ำทะเลปานกลาง 14 ซม. สีม่วงหรือสีเข้มแสดงระดับน้ำซึ่งต่ำกว่าระดับน้ำทะเลประมาณ -18 ซม.

## 2.10 พารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านข้างของแบบจำลอง IRI กับแบบจำลอง NeQuick

คณะกรรมการวิจัยอวกาศและสหภาพนานาชาติทางด้านวิทยาศาสตร์วิทยุยังคงที่จะพัฒนาแบบจำลอง IRI กันอย่างต่อเนื่องและได้เสนอแบบจำลอง IRI-2012 ออกมา ซึ่งเป็นเวอร์ชันล่าสุดของแบบจำลอง IRI โดยแบบจำลอง IRI-2012 ยังคงที่จะได้รับปรับปรุงหลาย ๆ ประเด็น อาทิเช่น ตัวเลือก ABT-2009 สำหรับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งพารามิเตอร์ความหนา พารามิเตอร์รูปร่าง และค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านล่าง (bottomside ionosphere) โดยแบบจำลอง IRI เป็นแบบจำลองที่สร้างขึ้นจากค่าข้อมูลที่วัดได้ในทางปฏิบัติทั่วโลกแล้วจะนำมาสร้างสมการเชิงการทดลอง (empirical model) ซึ่งจะให้ค่าเฉลี่ยรายเดือนของพารามิเตอร์ในชั้นไอโอโนสเฟียร์สำหรับตำแหน่งและเวลาที่ต้องการ โดยโพไฟล์ความหนาแน่นอิเล็กตรอนด้านล่างของชั้นย่อย F2 ในชั้นไอโอโนสเฟียร์สามารถหาค่าได้จากสมการต่อไปนี้ [14]

$$N(h) = NmF2 \times \frac{\exp(-y^{B1})}{\cosh(y)}, \quad (2.1)$$

$$\text{และ} \quad y = \frac{hmF2 - h}{B0} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $NmF2$  เป็นค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนสูงสุดในชั้น F2,  $hmF2$  เป็นค่าความสูงสูงสุดในชั้น F2 ที่เกิดค่า  $NmF2$  โดย  $y$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ถ้า  $y$  มีค่าเท่ากับ 0 ค่า  $h$  จะมีค่าเท่ากับ  $hmF2$  และค่า  $B0$  มีค่ามากกว่า 0 และถ้า  $y$  มีค่าเท่ากับ 1 ค่า  $B0$  จะมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างค่า  $hmF2$  และ  $h0.24$  ( $h = h0.24$ ) ในที่นี้  $h0.24$  เป็นค่าความสูงที่ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้น F2 มีค่าลดลงเหลือเพียง 24% ของค่า  $NmF2$

แบบจำลอง IRI-2012 นำเสนอ 3 ตัวเลือกสำหรับการทำนาย (จำลอง) ค่าพารามิเตอร์ความหนาและพารามิเตอร์รูปร่างของชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านล่าง ( $B0, B1$ ) ได้แก่ Bil-2000, Gul-1987 และ ABT-2009 โดยวิธี Bil-2000 นั้นเป็นแบบจำลองมาตรฐานที่ใช้ตารางของค่า  $B0$  ที่คำนวณออกมาได้จากการแปลงกลับโพไฟล์ของไอโอโนแกรมที่สถานีจำนวนมากที่ตั้งอยู่ในบริเวณละติจูดใกล้เส้นศูนย์สูตร ละติจูดต่ำและละติจูดกลาง ตัวเลือก Gul-1987 ประกอบไปด้วยสมการฟังก์ชันที่แสดงสหสัมพันธ์ที่วัดได้ระหว่างค่า  $hmF2$  และ  $h0.5$  ( $h0.5$  เป็นค่าความสูงที่ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้น F2 มีค่าลดลงเหลือเพียง 50% ของค่า  $NmF2$ ) ที่ละติจูดกลาง โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวจะถูกใช้เพื่อหาค่า  $B0_{Gul}$  ในเวลาต่อมา ส่วนตัวเลือกสุดท้ายคือ ABT-2009 เป็นวิธีที่อาศัยเทคนิคการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกแบบทรงกลม (spherical harmonics analysis หรือ SHA) ซึ่งใช้ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงในค่า  $B0$  เมื่อเทียบกับค่าละติจูดพิพ (dip latitude) ที่ปรับปรุง เวลาท้องถิ่น เดือนและจุดดับบนดวงอาทิตย์ ผลการศึกษาพบว่า ค่า  $B0_{ABT}$  ได้รับการปรับปรุงจนมีค่าที่แม่นยำสูงกว่าวิธี Gul-1987 และวิธี Bil-2000 ประมาณ 40% และ 32% ในขณะที่ ค่า  $B1_{ABT}$  ได้ถูกปรับปรุงจนมีค่าแม่นยำสูงกว่าวิธี Gul-1987 และวิธี Bil-2000 ประมาณ 20%

ก่อนหน้านี้มีการศึกษาและวิจัยมากมายเกี่ยวกับค่า  $B0$  [18-20] พบว่า การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวัน, ตามฤดูกาลและตามปฏิกิริยาสุริยะของค่า  $B0$  นั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งของสถานีไอโอโนซอนด์ ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงเหล่านั้นของค่า  $B1$  นั้นมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยตามฤดูกาล ในตอนกลางวัน ค่า  $B0_{Gul}$  จะมีค่าที่สูงกว่าค่า  $B0$  ที่วัดได้ [18] ในตอนกลางวันที่สถานีไฮหนาน ค่า  $B0_{Bil}$  จะสอดคล้องเป็นอย่างดีกับค่า  $B0$  ที่วัดได้เมื่อเทียบกับค่า  $B0_{Gul}$  ในฤดูร้อน และมีผลตรงข้ามเกิดขึ้นในฤดูหนาว [19] ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถานีใกล้เส้นศูนย์สูตรและที่ละติจูดต่ำ ค่า B0\_Gul จะสอดคล้องเป็นอย่างดีกับค่า B0 ที่วัดได้เมื่อเทียบกับค่า B0\_ABT และค่า B0\_Bil ในช่วงปี 2010-2011 ของช่วงเริ่มต้นของไซเคิลสุริยะลำดับที่ 24 [20] เมื่อไม่นานมานี้ Jamjareegulgarn et al. (2016) [21] ได้นำเสนอพารามิเตอร์ความหนาแน่นกลางของแบบจำลอง NeQuick ขึ้นมาใหม่แทนที่ค่า B2bot เดิม (B2\_NeQ) ซึ่งจะถูกแทนด้วยตัวแปร B2P\_1 ในงานวิจัยนี้ การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันและตามฤดูกาลของค่า B2P\_1 จะถูกเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่ได้รับจากค่า B2\_NeQ, ค่า B0\_Bil และค่า B0\_ABT ยกเว้นค่า B0\_Gul ผลการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่า B2P\_1 จะมีแนวโน้มเดียวกับการเปลี่ยนแปลงที่ได้จากค่า B0 ที่วัดได้ที่สถานี Kwajalein และสถานี Jicamarca เมื่อเทียบกับค่า B2\_NeQ หลังจากนั้น Jamjareegulgarn et al. (2017) [22] ก็ได้นำเสนอตัวปรับแก้สำหรับค่า B2P\_1 ที่ได้นำเสนอไปก่อนหน้านี้ (ถูกเรียกว่า B2P\_2 ในงานวิจัยนี้) ที่สถานี Kwajalein เพื่อที่จะลดผลต่างที่เกิดขึ้นระหว่างค่า B0 ที่วัดได้กับค่า B2P\_1 ผลการศึกษาพบว่า ค่า B2P\_2 เป็นค่าที่เข้าใกล้กับค่า B0 ที่สังเกตมากขึ้นและปรับปรุงค่า B2P\_1 เดิมขึ้นมาประมาณ 65-83% อย่างไรก็ตาม ผลการวิจัยครั้งนั้นกระทำขึ้นเพียงแค่วันเดียวในแต่ละฤดูกาลของปี ค.ศ. 2008 เท่านั้น นอกจากนี้ ผลการศึกษาก่อนหน้านี้จำนวนมากยังคงแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างที่มาก ระหว่างค่า B0 ที่วัดได้จริงกับค่า B0 ที่ทำนายได้จากแบบจำลอง IRI โดยเฉพาะอย่างยิ่ง สถานีใกล้เส้นศูนย์สูตรและสถานีละติจูดต่ำ มีเพียงไม่กี่บทความเท่านั้นที่พิจารณาค่า B0 ที่ซีกโลกเหนือและซีกโลกใต้ของยอด EIA พร้อมกัน (ประมาณ 15°N และ 15°S) ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ การเปลี่ยนแปลงของค่า B2P\_2 ที่ซีกโลกเหนือและซีกโลกใต้ของยอด EIA จะถูกนำมาศึกษาและวิเคราะห์ แล้วผลลัพธ์ที่ได้รับจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่า B0 ที่วัดได้จริงกับค่า B0 ที่ทำนายได้จากแบบจำลอง IRI จำนวน 3 วิธี ได้แก่ วิธี B0\_Gul, วิธี B0\_Bil และวิธี B0\_ABT

แบบจำลอง NeQuick 2 เป็นแบบจำลองความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ซึ่งนำเสนอค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนและค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ (TEC) ที่ตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ ความสูง วันและเวลาที่ต้องการ โดยแบบจำลอง NeQuick 2 นั้นมีสมการเชิงการทดลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านล่างและชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านบน พารามิเตอร์หลักตัวหนึ่งของความสัมพันธ์ดังกล่าวคือค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นล่าง (B2bot) โดยค่า B2bot เดิมที่นำเสนอใน [23] ได้ถูกศึกษาและถูกกำหนดให้อยู่ในรูปตัวแปร B2\_NeQ ในงานวิจัยนี้ โดย B2\_NeQ สามารถที่จะคำนวณได้จากสมการที่ 2.3 และ 2.4 ดังนี้

$$B2\_NeQ = \frac{0.385 \times NmF2}{(dN/dh)_{\max}} \quad (2.3)$$

เมื่อค่าสูงสุดของอนุพันธ์ความหนาแน่นอิเล็กตรอนเมื่อเทียบกับความสูง หรือ  $(dN/dh)_{\max}$  (หน่วย:  $10^9 \text{ m}^{-3}\text{km}^{-1}$ ) ในสมการที่ 2.3 นั้นสามารถที่จะคำนวณได้จากสมการที่ 2.4 ที่ได้จากการทดลอง

$$\ln((dN/dh)_{\max}) = -3.467 + 1.714 \ln(f_oF2) + 2.02 \ln(M(3000)F2) \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ สมการใหม่ที่ใช้ในการคำนวณค่า NeQuick B2bot ที่นำเสนอใน Jamjareegulgarn et al. (2017) ได้ถูกนำเสนออีกครั้งหนึ่งในที่นี้และถูกแทนด้วยตัวแปร B2P\_1 ในงานวิจัยนี้ โดยค่า B2P\_1 สามารถที่จะคำนวณได้จากสมการที่ 2.5

$$B2P\_1 = \frac{\tau/2 - 0.113hmF2}{1 + Q} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $\tau$  เป็นค่าความหนาอิเล็กทรอนิกส์ (km) ซึ่งหาค่าได้จากสมการที่ 2.6 และ  $Q$  เป็นตัวแปรใหม่ที่กำหนดขึ้นมาที่หาค่าได้จากสมการที่ 2.7 ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่งของพารามิเตอร์รูปร่างด้านบน ( $k$ )

$$\tau = \frac{TEC}{NmF2} \quad (2.6)$$

$$Q = 3.22 - 0.0538foF2 - 0.00664hmF2 + 0.00257Rz12 \quad (2.7)$$

โดยขั้นตอนในหาค่าตัวแปร  $Q$  และค่า B2P\_1 สามารถที่จะศึกษาเพิ่มเติมได้จาก Jamjareegulgarn et al. (2017) [22] นอกจากนี้ เนื่องจากมีความแตกต่างระหว่างค่า B0 ที่วัดได้และค่า B2P\_1 ที่คำนวณได้ ดังนั้น ค่าปรับแก้ (correction factor) ของค่า B2P\_1 จึงได้ถูกนำเสนอและหาค่าออกมาในรูปของตัวแปร  $c$  โดยอาศัยความสัมพันธ์ดังแสดงในสมการที่ 2.8

$$B2P\_2 = B2bot\_Pro + c \cdot \tau \quad (2.8)$$

นอกจากนี้ ค่าผลต่างสัมบูรณ์ระหว่างค่า B2P\_2 ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้และค่า B0 ที่วัดได้จะถูกคำนวณด้วยเช่นกันโดยใช้สมการที่ 2.9 เพื่อที่ใช้ในการวิเคราะห์ให้เห็นว่าค่า B2P\_2 นั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่า B0 ที่วัดได้ของดิจิซอนได้อย่างไร

$$AD\_B = | B0\_obs - B2P\_2 | \quad (2.9)$$

## 2.11 ตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์

มีการเปลี่ยนแปลงทางเวลาและระยะทางอย่างมากในชั้นไอโอโนสเฟียร์ เมื่อกิจกรรมทางแม่เหล็กโลกเพิ่มขึ้นอย่างมาก ปฏิสัมพันธ์เชิงซ้อนของชั้นแมกเนโตสเฟียร์ ชั้นไอโอโนสเฟียร์ และชั้นเทอร์โมสเฟียร์ก็จะเป็นต้นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างพลวัตของการกระจายตัวของพลาสมาในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งจะก่อให้เกิดพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ในเวลาต่อมา ในระหว่างที่เกิดพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์นั้น ความหนาแน่นพลาสมาในชั้นไอโอโนสเฟียร์สามารถที่จะเพิ่มขึ้น และ/หรือ ลดลงจากหลายชั่วโมงไปจนถึงหลายเอกซาสาร์เป็นเอกซาสาร์ที่สวนงวสำหรับภารกิจงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วันที่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขสภาพปะทุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ คุณลักษณะของพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ไม่จำเป็นที่จะต้องเหมือนกับพายุแม่เหล็กโลกเสมอไป ถึงแม้ว่ากิจกรรมแม่เหล็กโลกจะต่ำ แต่เงื่อนไขในชั้นไอโอโนสเฟียร์สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้อย่างมาก ซึ่งขึ้นอยู่กับฤดูกาล เวลาท้องถิ่นและตำแหน่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเปลี่ยนแปลงของ EIA ที่ส่งผลกระทบต่อเงื่อนไขในชั้นไอโอโนสเฟียร์อย่างมากที่ละติจูดกลางและละติจูดต่ำ

เงื่อนไขในชั้นไอโอโนสเฟียร์เป็นหนึ่งในคุณลักษณะสภาพอวกาศที่สำคัญมากที่สุดประเด็นหนึ่งสำหรับผู้ใช้งานระบบต่าง ๆ ที่อาศัยคลื่นวิทยุ อาทิเช่น ระบบดาวเทียมนำทางสากล (GNSS), ระบบการสื่อสารย่าน HF, และระบบการตรวจจذبระยะไกลที่อาศัยอวกาศ ยกตัวอย่างเช่น ผู้ใช้ GNSS อาจจะมีผลผลิตในการระบุตำแหน่งที่มาก ซึ่งเกิดขึ้นจากค่าเวลาประวิงในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่เพิ่มขึ้นอย่างมากอันเนื่องมาจากพายุเชิงบวกในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ส่วนผู้สื่อสารย่าน HF อาจจะมีประสบการณ์กับการขาดติดต่อไปเลย (blackouts) อันเนื่องมาจากพายุเชิงลบในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ส่วนผู้ใช้ระบบการตรวจจذبระยะไกลที่อาศัยอวกาศอาจจะประสบปัญหาจากการเปลี่ยนแปลงขนาดและเฟสแบบกะทันหัน (scintillation) ในช่วงที่เกิดพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์อย่างหนักหน่วง โดยผู้ปฏิบัติการและผู้ใช้ระบบเหล่านี้ต้องการที่จะรู้ว่าเงื่อนไขในชั้นไอโอโนสเฟียร์นั้นมีความเสถียรหรือไม่

สารสนเทศของสภาพอวกาศ อาทิเช่น กิจกรรมสุริยะและกิจกรรมแม่เหล็กโลก ถูกจัดให้มีโดยศูนย์แจ้งเตือนสากลของหน่วยให้บริการสภาพแวดล้อมในอวกาศนานาชาติ (ISES) ตัวบอกระดับ (scale) บางตัวถูกใช้เพื่อบ่งชี้คุณลักษณะของสิ่งเหล่านั้น เช่น G scale สำหรับพายุแม่เหล็กโลก, S scale สำหรับการแผ่รังสีสุริยะ, และ R scale สำหรับการรบกวนคลื่นวิทยุไม่ได้ โดย S กับ R scales จะอาศัยการวัดค่ากิจกรรมสุริยะ ส่วน G scale จะอาศัยการวัดค่าของกิจกรรมแม่เหล็กโลก ตัวบอกระดับเหล่านี้เป็นส่วนหนึ่งของ “NOAA scale” ที่ได้รับการยอมรับเป็นอย่างดีและแสดงบทบาทที่สำคัญในการมอนิเตอร์และการทำนายของเงื่อนไขสภาพอวกาศ ในทางกลับกัน ตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่อาศัยการวัดชั้นไอโอโนสเฟียร์ยังไม่มีมาตรฐานในการระบุเลย เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางเวลาและระยะทางที่มากของชั้นไอโอโนสเฟียร์ (ยกตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล วันต่อวัน เวลาท้องถิ่นและตำแหน่ง) จึงทำให้มันยากที่จะกำหนดตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่แน่นอน

ความพยายามจำนวนมากที่จะบ่งบอกคุณลักษณะของชั้นไอโอโนสเฟียร์โดยการใช้ค่าพารามิเตอร์ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ได้จากวัดได้ถูกกระทำขึ้น หนึ่งในดัชนีหลาย ๆ ตัวเริ่มแรกของชั้นไอโอโนสเฟียร์เป็นความถี่วิกฤตชั้น F2 (foF2) ซึ่งได้ถูกนิยามเสมือนเป็นค่าเฉลี่ยรายเดือนของ foF2 (ปี 1960) ดัชนีตัวนี้ถูกใช้สำหรับการวิเคราะห์แนวโน้มระยะยาวของชั้นไอโอโนสเฟียร์ เมื่อไม่กี่ปีมานี้ จากการใช้ที่มีสารสนเทศในชั้นไอโอโนสเฟียร์จำนวนมากมาย นักวิจัยจำนวนมากยังคงพยายามที่จะสร้างดัชนีชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่สามารถที่จะถูกหามาได้แบบเวลาจริง ยกตัวอย่างเช่น ดัชนีกิจกรรมชั้นไอโอโนสเฟียร์ (AI) ได้ถูกนำเสนอโดย Bremer et al. [24] บนพื้นฐานของการวัดค่า foF2 ในยุโรป หลังจากนั้น มันก็ได้ถูกทบทวนเพื่อที่จะบรรยายพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ละติจูดกลางโดย Mielich and Bremer [25] พวกเขาได้ใช้ข้อมูล foF2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวน 13 ปีที่ได้รับจาก 1 สถานีในยุโรปและได้ทำวิเคราะห์การขึ้นอยู่กับฤดูกาลของพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์

1. ดัชนีอีกตัวหนึ่งที่บรรยายพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์คือ “ดัชนีสภาพอากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์” (W index) ซึ่งถูกนำเสนอโดย Gulyaeva et al. [26][27] โดยการใช้ค่า foF2 และค่าปริมาตรอิเล็กทรอนิกส์ (TEC) ในยุโรป การขึ้นอยู่กับเวลาท้องถิ่นของพารามิเตอร์ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ได้ถูกกำจัดออกไปโดยการคำนวณค่าคงตัวการปรับแก้ที่ขึ้นอยู่กับมุมซินคสุริยะ [27] โดยดัชนี W ได้ถูกนิยามโดยการกำหนดเงื่อนไขให้แก่เทอมลอการิทึมของพารามิเตอร์ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ถูกปรับแก้แล้วเมื่อเทียบกับค่าอ้างอิงในสถานะเงียบของมัน เงื่อนไขดังกล่าวจะถูกกำหนดตายตัวบนพื้นฐานของค่าความน่าจะเป็นของพายุเชิงลบที่ 1 สถานี นอกจากนี้ พวกเขา ยังได้คำนวณหาค่าดัชนี W สำหรับสถานีอื่น ๆ ด้วย และได้พบว่า “ค่าดัชนี W มีค่าที่เพิ่มขึ้นตามละติจูดที่สูงขึ้น”

2. ดัชนีในชั้นไอโอโนสเฟียร์ตัวอื่น ๆ ได้บรรยาย perturbation degree (ระดับของการรบกวน) ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้วย ซึ่งได้บ่งชี้คุณลักษณะการรบกวนของ “traveling ionosphere disturbances (TID)” โดย Jakowski et al. [28][29] ได้แนะนำดัชนีชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มีสิ่งรบกวนดังกล่าวเพื่อที่จะลดผลกระทบสภาพอวกาศที่มีต่อการนำทางที่อาศัย GNSS และการระบุตำแหน่ง

3. เมื่อไม่นานมานี้ ตัวบ่งชี้อีกตัวหนึ่งของเงื่อนไขในชั้นไอโอโนสเฟียร์ คือ “Along Arc TEC Rate (AATR)” ได้ถูกนำเสนอในกรอบงานของกิจกรรม EGNOS โดย AATR ได้ถูกหาค่าเสมือนเป็นตัวบ่งชี้ตัวหนึ่งของระบบ SBAS ที่เกี่ยวข้องกับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งเป็นค่าที่เจาะจงต่อบริเวณโดยเฉพาะของยุโรป และได้ถูกปรับแต่งสำหรับผู้ใช้งานระบบ SBAS

## 2.12 แผ่นดินไหวและการเปลี่ยนแปลงชั้นไอโอโนสเฟียร์

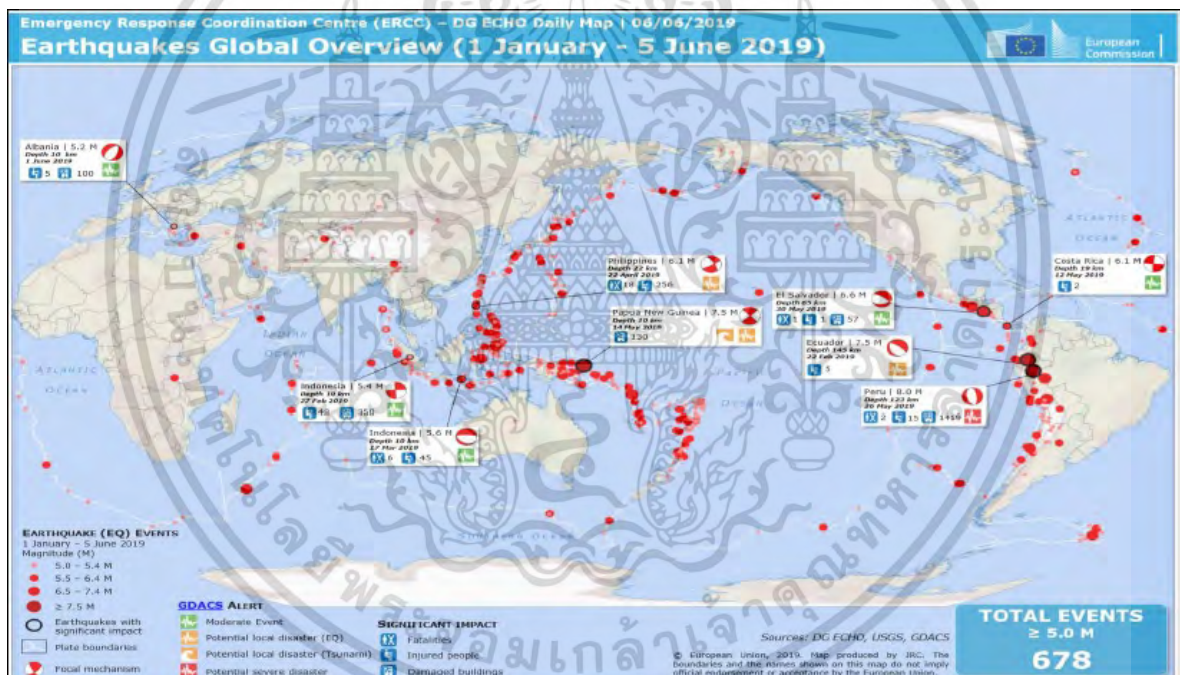
แผ่นดินไหว (earthquakes) เป็นภัยพิบัติทางธรรมชาติที่เป็นต้นเหตุให้เกิดความเสียหายที่รุนแรง ชีวิตและทรัพย์สินของมนุษย์ สาเหตุของแผ่นดินไหว ได้แก่ แผ่นดินไหวแบบที่เกิดแรงเทคโทนิก (tectonic forces) การระเบิดของภูเขาไฟ การทำเหมือง ฯลฯ โดยทั่วไป ผลที่เกิดจากแรงเทคโทนิกนั้นมีอิทธิพลมากที่สุด ที่ซึ่งผลของมันเป็นการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกร่วมกับการสะสมพลังงานภายในพื้นโลก ขนาดของแผ่นดินไหว (M) สามารถที่จะแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด ได้แก่

1. ระดับความรุนแรงท้องถิ่น (ไม่มาก) - ML
2. ระดับความรุนแรงคลื่นบอดี - MB
3. ระดับความรุนแรงคลื่นพื้นผิว - MS
4. ระดับความรุนแรงโมเมนต์ - MW

โดย ML เป็นจุดศูนย์กลางของการเกิดแผ่นดินไหว (epicenter) ที่ระยะทางน้อยกว่า 1000 km ที่แสดงในหน่วยของริกเตอร์ (richter) หรือเม็กนิจูด (M) ส่วน MB แสดงขนาดของแผ่นดินไหวที่ระยะทางมากกว่า 1000 km MS เป็นระยะที่ยาวห่างจากแผ่นดินไหวมากและ MW ใช้แทนขนาดของเม็กนิจูดที่มาก ระดับความรุนแรงของแผ่นดินไหวได้ถูกใช้อย่างกว้างขวางในหน่วยของเมอร์เคลลี (Mercalli scale หรือ



MM) โดย MM นี้ถูกแบ่งออกได้เป็น 12 ระดับ โดย MM ระดับ 5 ขึ้นไปทำให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและรอบทรัพย์สิน ประเทศไทยก็เป็นประเทศหนึ่งในหลายประเทศที่ได้รับผลกระทบจากแผ่นดินไหว โดยแผ่นดินไหวที่มีระดับที่มาก ( $M \geq 5.0$ ) ได้เกิดขึ้นหลายครั้งรอบ ๆ ประเทศไทย ซึ่งสามารถที่จะตรวจสอบได้จากสถิติของการเกิดแผ่นดินไหวที่เว็บไซต์ [www.earthquake.tdm.go.th](http://www.earthquake.tdm.go.th) เทคนิคจำนวนมากที่ใช้ในการศึกษาการเกิดขึ้นของแผ่นดินไหว ได้แก่ การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า การเคลื่อนตัวของ crustal dynamics ส่วนของ radon emanation การสังเกตน้ำใต้ดินและการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ไอโอโนสเฟียร์ ได้แก่ ค่าความถี่วิกฤตชั้น F2 (foF2) และค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ (TEC) ในขณะนี้ ทวีโลกกำลังให้ความสำคัญกับการแจ้งเตือนภัยล่วงหน้าก่อนการเกิดแผ่นดินไหวเป็นอย่างมาก ตามข้อมูลที่ได้จากหน่วยงาน Asia-Pacific Space Cooperation Organization (APSCO) พบว่า เราทุกคนกำลังจะเผชิญหน้ากับแผ่นดินไหว ดังนั้นสิ่งที่มุ่งหวังที่สำคัญ (Motivation) คือเราสามารถที่จะทำนายแผ่นดินไหวโดยการใช้ค่าข้อมูลที่วัดได้จากชั้นไอโอโนสเฟียร์แบบเรียลไทม์ได้หรือไม่

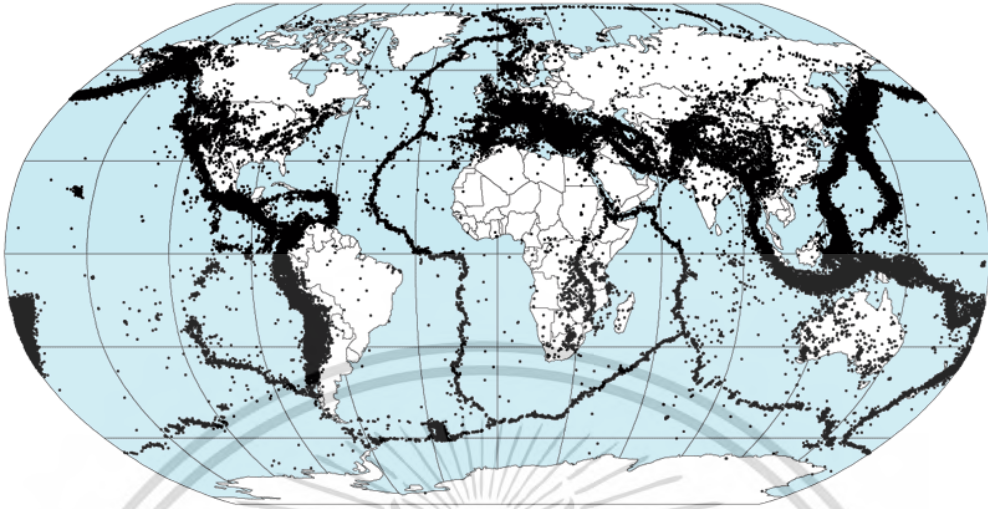


รูปที่ 2.12 ตำแหน่งที่เกิดแผ่นดินไหว (วงกลมสีแดง) ทั่วโลกในช่วงวันที่ 1 มกราคม – 5 มิถุนายน 2562

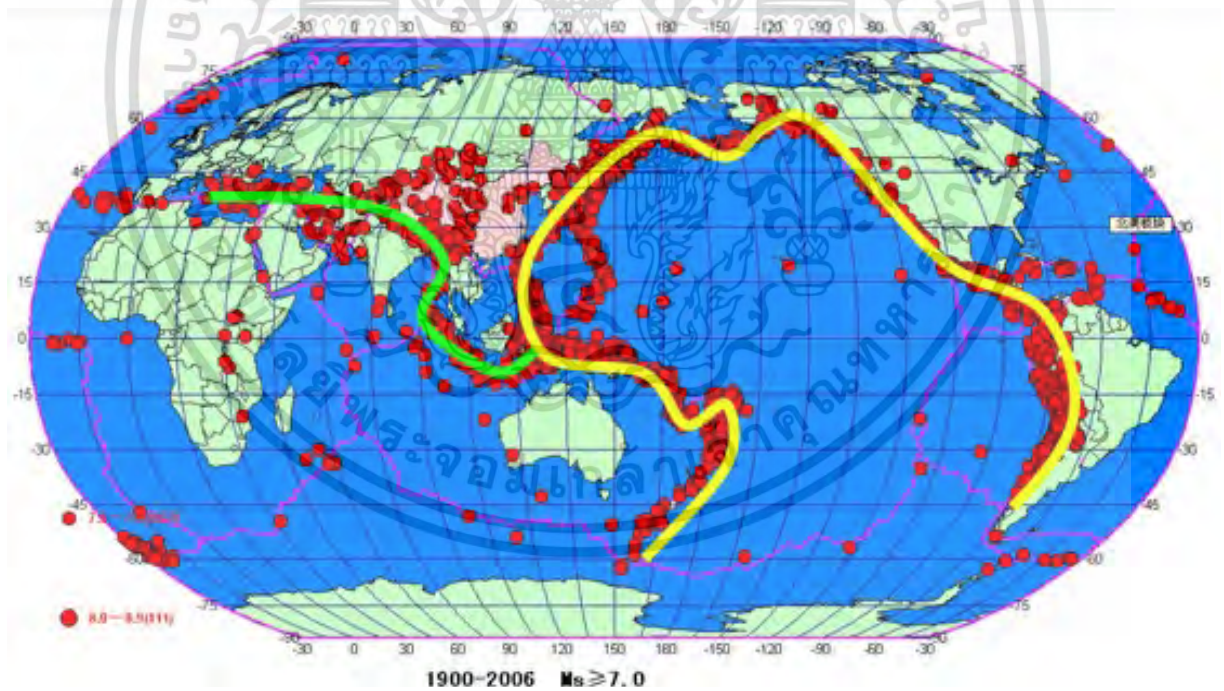
โดยโครงการของ APSCO สำหรับแผ่นดินไหว คือ การบูรณาการค่าที่วัดได้จากดาวเทียมและจากสถานีภาคพื้นดินเพื่อการส่งสัญญาณ (Signatures) และการแจ้งเตือนล่วงหน้า (Precursors) แผ่นดินไหวในรูปที่ 2.12 แสดงจุดต่าง ๆ ที่เกิดแผ่นดินไหวทั่วโลกระหว่างวันที่ 1 มกราคม – 5 มิถุนายน พ.ศ. 2562 และรูปที่ 2.13 จุดศูนย์กลางของการเกิดแผ่นดินไหวทั้งหมด 358,214 จุดทั่วโลก ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1963-1998

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Preliminary Determination of Epicenters  
358,214 Events, 1963 - 1998

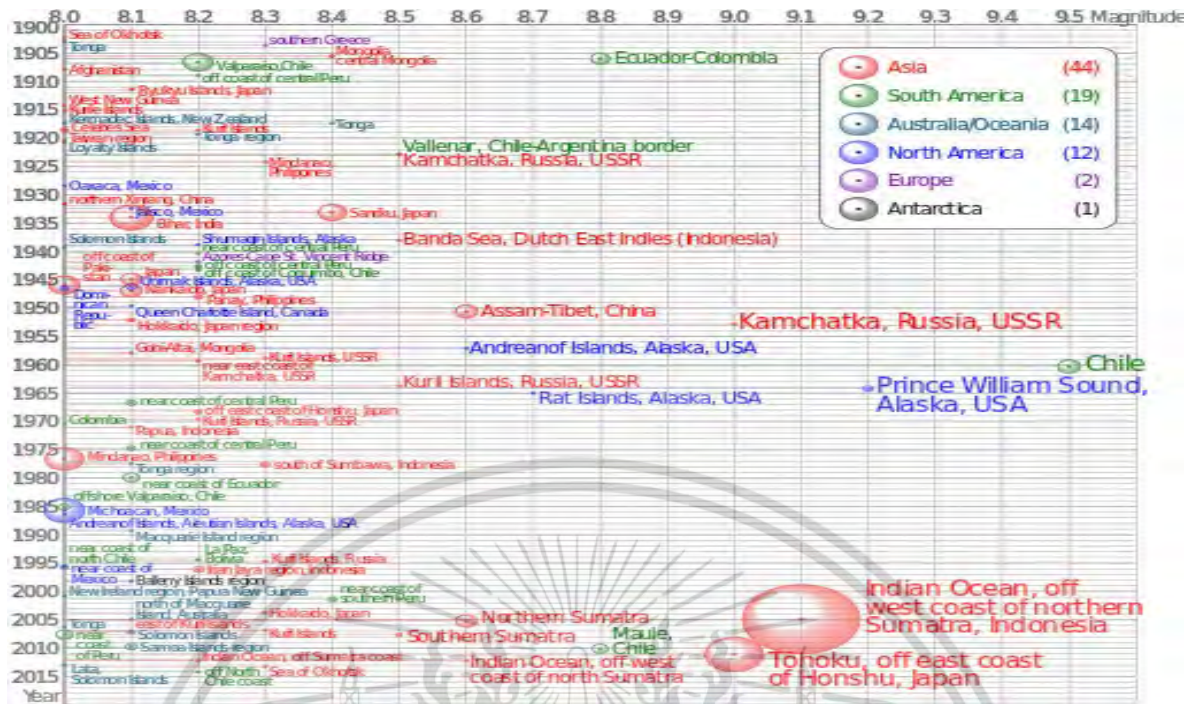


รูปที่ 2.13 จุดศูนย์กลางของการเกิดแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นทั้งสิ้น 358,214 จุดทั่วโลก ปี ค.ศ. 1963-1998  
(<https://en.wikipedia.org/wiki/Earthquake>)

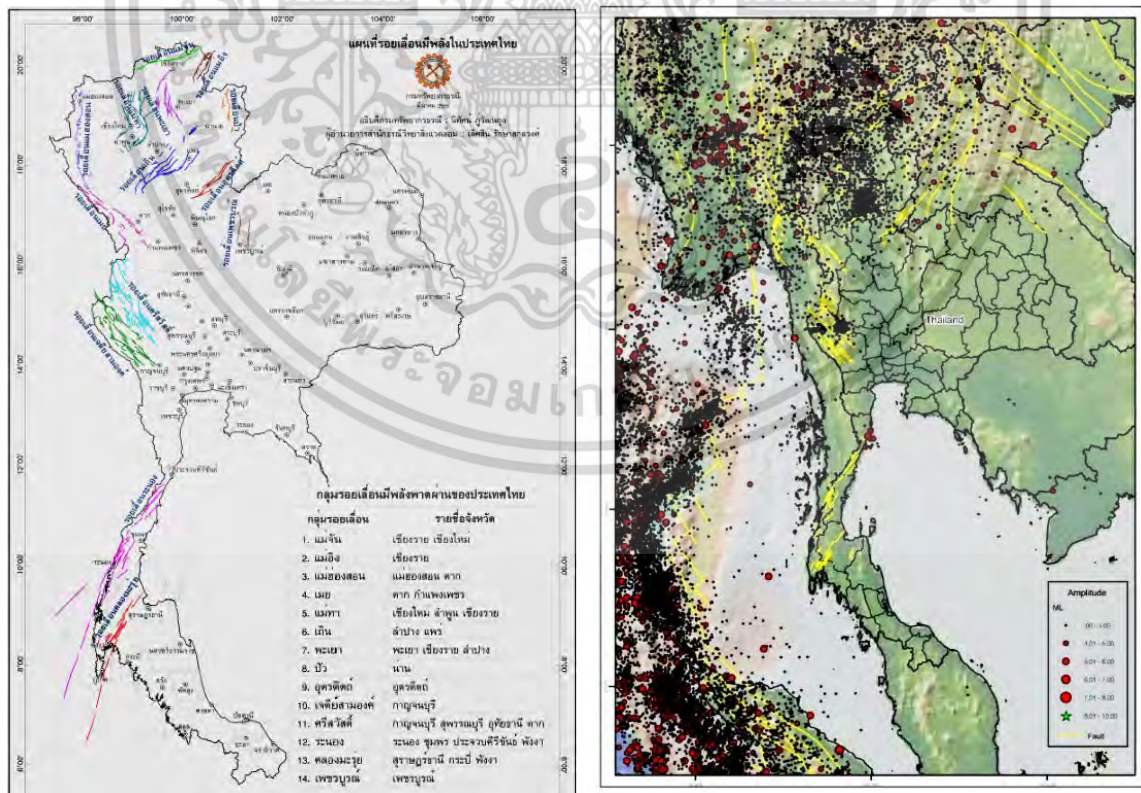


รูปที่ 2.14 แผนที่ที่แสดงจุดที่เกิดแผ่นดินไหวขนาดที่มากกว่า 7.0 ริคเตอร์ ในช่วงปี ค.ศ. 1900-2006

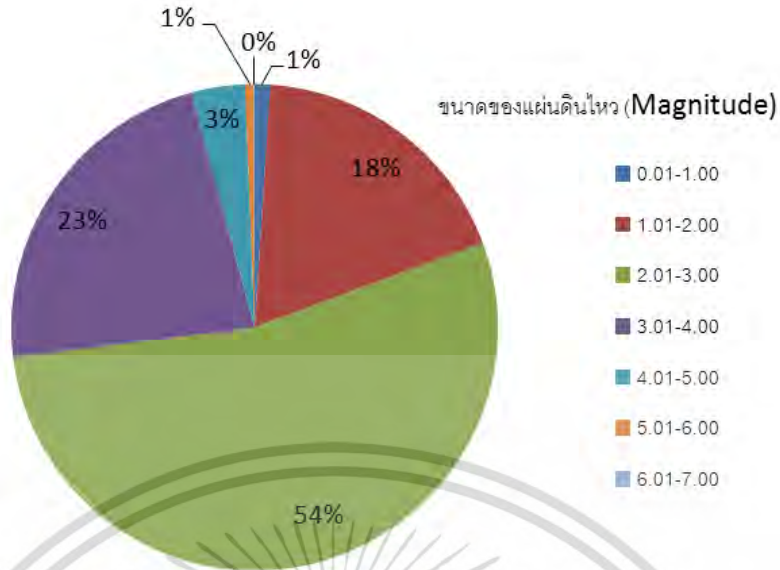
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



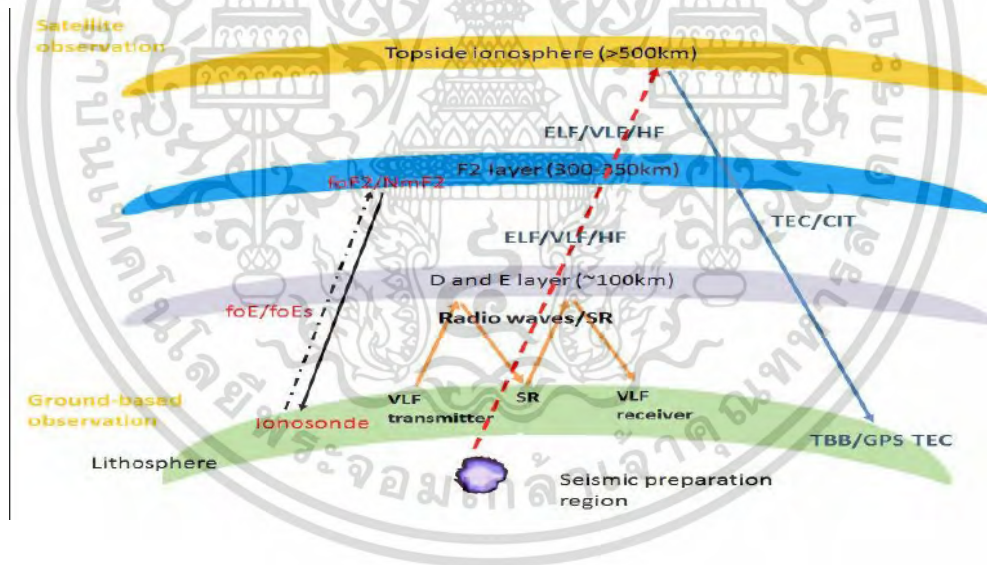
รูปที่ 2.15 แผนที่ที่เกิดแผ่นดินไหวขนาดเท่ากับหรือมากกว่า 8.0 ริกเตอร์ ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1900 เป็นต้นมา (<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=17980815>)



รูปที่ 2.16 บริเวณรอยเลื่อนของโลกที่อาจจะเกิดแผ่นดินไหวบนแผ่นดินของประเทศไทย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 ขนาดของแผ่นดินไหวที่เกิดในประเทศไทย  
(<http://www.earthquake.tmd.go.th/home.html>)



รูปที่ 2.18 การเตรียมการสำหรับอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อทำการตรวจจับและแจ้งเตือนการเกิดแผ่นดินไหว

โดยรูปที่ 2.14 และ 2.15 แสดงแผนที่ที่แสดงจุดที่เกิดแผ่นดินไหวขนาดที่มากกว่า 7.0 ริกเตอร์ ในช่วงปี ค.ศ. 1900-2006 และมีขนาดเท่ากับหรือมากกว่า 8.0 ริกเตอร์ ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1900 เป็นต้นมา ตามลำดับ ส่วนรูปที่ 2.16 บริเวณรอยเลื่อนของโลกที่อาจจะเกิดแผ่นดินไหวบนแผ่นดินของประเทศไทย และรูปที่ 2.17 ขนาดของแผ่นดินไหวที่เกิดในประเทศไทย นอกจากนี้ รูปที่ 2.18 การเตรียมการสำหรับอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อทำการตรวจจับและแจ้งเตือนการเกิดแผ่นดินไหว ที่ผ่านมามีเหตุการณ์การเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นดินไหวที่รุนแรงในมหาสมุทรอินเดียในวันที่ 26 ธันวาคม เวลา 00.58 LT ปี 2004 ขนาด 9.1 ริกเตอร์ โดยมีศูนย์กลางการเกิดแผ่นดินไหวอยู่ที่ชายฝั่งทางด้านทิศตะวันตกของเกาะสุมาตรา ประเทศอินโดนีเซีย สำหรับประเทศไทยนั้น แผ่นดินไหวที่รุนแรงเกิดขึ้นในวันที่ 5 พฤษภาคม ปี 2014 ขนาด 6.3 ริกเตอร์ ที่จังหวัดเชียงราย นอกจากนี้ มีแผ่นดินไหวที่รุนแรงเกิดขึ้นในพม่า (23.14°N, 94.87°E) ในวันที่ 13 เมษายน ปี 2016 ขนาด 7.2 ริกเตอร์

ที่ผ่านมา มีการยอมรับกันโดยทั่วไปแล้วว่า “การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่า foF2 และค่า TEC ของชั้นไอโอโนสเฟียร์สามารถใช้เป็นค่าบ่งชี้ระดับและใช้ทำนายการเกิดแผ่นดินไหวได้ โดยทั่วไป ทั้งสองค่านี้สามารถที่จะหาค่าได้ดังนี้

1. ค่า foF2 สามารถที่จะวัดได้จากการรับส่งสัญญาณย่านความถี่สูงจริงระหว่าง 2 สถานี หรือ อาจจะสามารถได้จากแผนภาพไอโอโนแกรมที่บันทึกได้จากเครื่อง Digisonde หรือ Ionosonde โดยใช้โปรแกรม Artist หรือ POLAN ซึ่งจะทำการอินเวอร์สเพื่อพล็อตกราฟ bottomsides electron density profiles แล้วหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านล่างออกมา ได้แก่ ค่า foF2, ค่า hmF2, ค่า B0, ค่า B1 ฯลฯ

2. ค่า TEC นั้นสามารถหาได้เครื่องรับ GNSS ทั้งความถี่เดียวกับสองความถี่ โดยในที่นี้ จะขอกล่าวถึงค่า TEC ที่ได้จากเครื่องรับ GNSS แบบสองความถี่เท่านั้น (L1 = 1.57542 GHz และ L2 = 1.22760 GHz) ซึ่งเริ่มต้นจากการหาค่า STEC จากผลต่างระหว่างค่าระยะทางเสมือน (pseudorange) กับผลต่างเฟสของทั้งสองความถี่ โดยอาศัยวิธีการของ Blewitt [30] หลังจากนั้น เราจะทำการแปลงจากค่า STEC ไปเป็นค่า VTEC (หน่วยวัด จำนวนอิเล็กตรอน/ตารางเมตร) โดยอาศัยวิธีการของ Ma และ Maruyama [31] โดยสำหรับเครื่องรับ GNSS แบบสองความถี่นั้น ค่า VTEC นี้จะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับเวลาประวิงในชั้นไอโอโนสเฟียร์ [32]

$$I = \frac{40.3}{cf^2} \text{TEC} \quad (2.10)$$

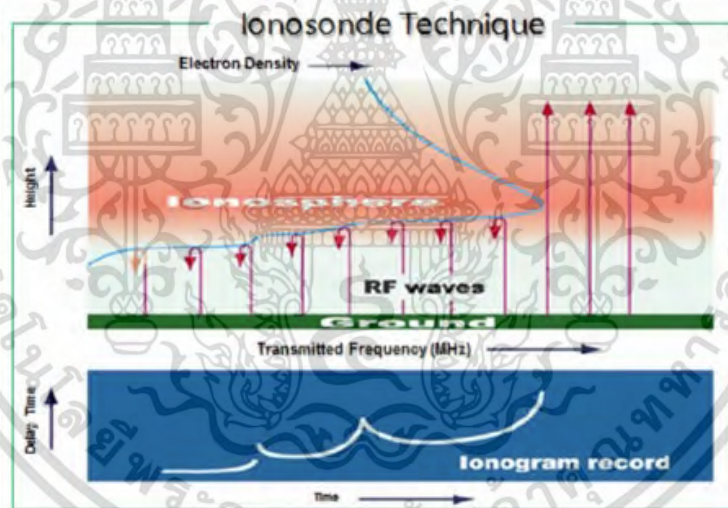
$$I = \frac{1.345 \times \text{TEC} \times 10^{-7}}{f^2} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $I$  คือ เวลาประวิงในชั้นไอโอโนสเฟียร์,  $f$  คือค่าความถี่ของสัญญาณ GPS และ TEC คือค่า VTEC ที่คำนวณได้จากข้อมูล RINEX จากการศึกษ พบว่า ค่ามัธยฐานของเวลาประวิงของสัญญาณดาวเทียมจาก PRN 1 – PRN 30 ในช่วงปี 2004-2013 มีค่าแสดงไว้ในตารางที่ 2.1 จากตารางที่ 2.1 พบว่า เครื่องรับ GPS ได้รับสัญญาณดาวเทียม GPS PRN 27 ที่มีเวลาประวิงมากที่สุดเท่ากับ 21.661 ns และเครื่องรับ GPS ได้รับสัญญาณดาวเทียม GPS PRN 14 ที่มีเวลาประวิงต่ำที่สุดเท่ากับ 7.221 ns

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ค่ามัธยฐานของเวลาประวิงของสัญญาณ GPS PRN 1 – PRN 30 ในช่วงปี 2004-2013

GPS (prn)	(ns)	GPS (prn)	(ns)	GPS (prn)	(ns)
1	20.662	11	18.027	21	8.664
2	18.068	12	13.158	22	9.258
3	20.693	13	16.776	23	7.593
4	19.525	14	7.221	24	18.846
5	12.386	15	10.339	25	11.312
6	13.577	16	12.332	26	16.118
7	20.877	17	17.203	27	21.661
8	21.627	18	8.5023	28	18.895
9	13.506	19	10.234	29	16.605
10	19.593	20	14.271	30	10.924



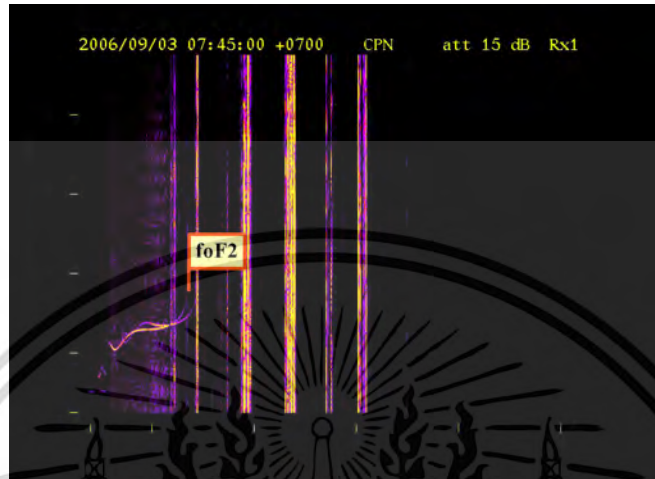
รูปที่ 2.19 การหาค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 (foF2) ที่ถูกวัดได้ด้วยไอโอโนซอนด์

### 2.12.1 การเปลี่ยนแปลงค่า foF2 ก่อนที่จะเกิดแผ่นดินไหว

ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่วิกฤตในชั้น F2 (foF2) ก่อนที่จะเกิดแผ่นดินไหว โดยค่า foF2 เป็นค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 ที่สามารถจะสะท้อนกับมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่ถูกวัดได้ด้วยไอโอโนซอนด์ (Barnes and Leonard, 1965) ดังแสดงในรูปที่ 2.19 โดยไอโอโนซอนด์นี้สามารถส่งและรับคลื่นวิทยุที่ย่านความถี่สูง (HF) ตั้งแต่ 2 – 30 MHz ด้วยการเพิ่มความถี่ขึ้นครั้งละ 100 kHz ต่อวินาที แต่จะรอบจะใช้เวลาประมาณ 5 นาที ความถี่ที่สะท้อนลงมาจากชั้นไอโอโนส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพียร์มายังเครื่องรับนั้นจะถูกแสดงค่าออกมาเป็นแผนภาพไอโอโนแกรมที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงเสมือน (virtual height) กับความถี่วิกฤติ ดังแสดงในรูปที่ 2.20 [33] โดยในที่นี้ เราจะใช้โปรแกรม special-100C-2000-eng.exe เพื่อสเกลค่าความสูงเสมือนกับค่าความถี่วิกฤติของชั้น E และชั้น F



รูปที่ 2.20 แผนภาพไอโอโนแกรมที่สถานีชุมพร (ขวา) บนหน้าจอคอมพิวเตอร์

นักวิจัยหลายท่านได้ทำการสังเกตค่า foF2 ประมาณ 2 – 3 วันก่อนการเกิดแผ่นดินไหวที่รุนแรง ยกตัวอย่างเช่น Rios et al. (2004) ได้นำเสนอการเปลี่ยนแปลงค่า foF2 ที่ถูกวัดค่าได้จากไอโอโนซอนด์ที่ Tucuman ประเทศอาร์เจนตินา โดยมีจุดศูนย์กลางเกิดขึ้นที่เมือง San Juan ด้วยระดับความรุนแรง 7.3 M ณ วันที่ 23 พ.ย. 1977 Liu et al. (2006) ได้นำเสนอค่า foF2 ที่ถูกวัดค่าได้ในช่วง anomalous ที่สัมพันธ์กับการเกิดแผ่นดินไหว  $M > 5$  ที่ไต้หวันในช่วงปี 1994-1999 การเปลี่ยนแปลงค่า foF2 ก่อนการเกิดแผ่นดินไหวเหนือเกาะสุมาตราในปี 2007 และเหนืออิตาลีในปี 2002 ก็ได้ถูกนำเสนอโดย Adullah et al. (2011) ส่วน Sondhiya, Sonakia, and Gwal (2014) ก็ได้รายงานแผ่นดินไหวที่รุนแรงจำนวน 3 ครั้ง ที่นิวซีแลนด์ด้วยค่าข้อมูล foF2 ที่ระยะทางน้อยกว่า 1,500 km จากจุดศูนย์กลาง หลังจากนั้น Villalobos et al. (2016) ได้นำเสนอความหลากหลายของคุณสมบัติของชั้น E และ F ที่สังเกตได้ที่ Concepcion โดยใช้ไอโอโนซอนด์ Sharma et al. (2010) ได้นำเสนอการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน (anomaly) ของค่า foF2 และค่า TEC เหนือบริเวณละติจูดต่ำก่อนแผ่นดินไหวที่รุนแรงจำนวน 3 ครั้ง ( $M > 6$ ) ในประเทศจีน โดยการใช้ค่าข้อมูลที่ได้จากไอโอโนซอนด์และเครื่องรับจีพีเอสที่เมืองนิวเดลฮี เมืองโบพาล และเมืองทริวานดรัมในอินเดีย นอกจากนี้ คุณลักษณะที่แตกต่างกัน (anomaly) ของค่า foF2 และค่า TEC ก่อนการเกิดแผ่นดินไหว ( $M_w = 9.0$ ) ในญี่ปุ่นได้ถูกวิเคราะห์โดย Yao et al. (2012) ถึงแม้ว่าการสังเกตค่า foF2 ประมาณ 2 – 3 วันก่อนการเกิดแผ่นดินไหวจะยังคงที่จะถูกศึกษากันทั่วโลก แต่การศึกษาในประเทศไทยก็ยังมีน้อยมาก มีเพียงแค่การเปรียบเทียบระหว่างค่าการวัดกับการทำนายด้วยแบบจำลองเท่านั้น (Wichaipanich et al., 2013) ดังนั้น การศึกษาในครั้งนี้จะเน้นไปที่การเปลี่ยนแปลงค่า foF2 ประมาณ 2 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3 วันก่อนการเกิดแผ่นดินไหวที่รุนแรงที่ส่งผลกระทบต่อประเทศไทยในวันที่ 30 กันยายน 2009 โดยอาศัยค่าข้อมูลไอโอโนสเฟียร์ที่สเกลได้จากไอโอโนแกรมที่สถานีชุมพร ประเทศไทยและสถานีโกโตตะบัง ประเทศอินโดนีเซีย โดยสถานีเหล่านี้เป็น 2 แห่งจาก 6 แห่งในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ที่ได้รับการสนับสนุนจากสถาบัน NICT ประเทศญี่ปุ่นภายในโครงการ SEALION (Maruyama et al., 2007)

ในงานวิจัยที่นำเสนอนี้จะนำผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่า foF2 ในช่วงที่เกิดแผ่นดินไหวของ Wichaipanich et al. [43] มานำเสนอ โดยจะสนใจแผ่นดินไหวที่มีจุดศูนย์กลางเกิดขึ้นที่เกาะสุมาตรา (1.1 องศาใต้ 99.1 องศาตะวันออก) ประเทศอินโดนีเซีย ที่ซึ่งขนาดของแผ่นดินไหววัดได้ 7.9 ริคเตอร์ ที่เวลา 17.16 LT ณ วันที่ 30 กันยายน 2009 โดยมีจุดศูนย์กลางน้อยกว่า 1000 km จากสถานีทั้งสอง

ในที่นี้ มีการพิจารณาค่าทางสถิติที่ใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกัน (anomaly) ของค่า foF2 คือค่าขอบเขตบน (UB) และค่าขอบเขตล่าง (LB)

$$UB = X(MM) + 2\sigma \quad (2.12)$$

$$LB = X(MM) - 2\sigma \quad (2.13)$$

ในที่นี้  $X(MM)$  คือค่ามัธยฐานรายเดือนของค่า foF2 และ  $\sigma$  คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน นอกจากนี้เรายังจะพิจารณาค่าผลต่างระหว่างค่ามัธยฐานรายเดือน ค่า UB และค่า LB กับค่า foF2 ที่วัดได้จริง โดยอาศัยสมการที่ (2.14)

$$DfoF2 = foF2_x - foF2_{obs} \quad (2.14)$$

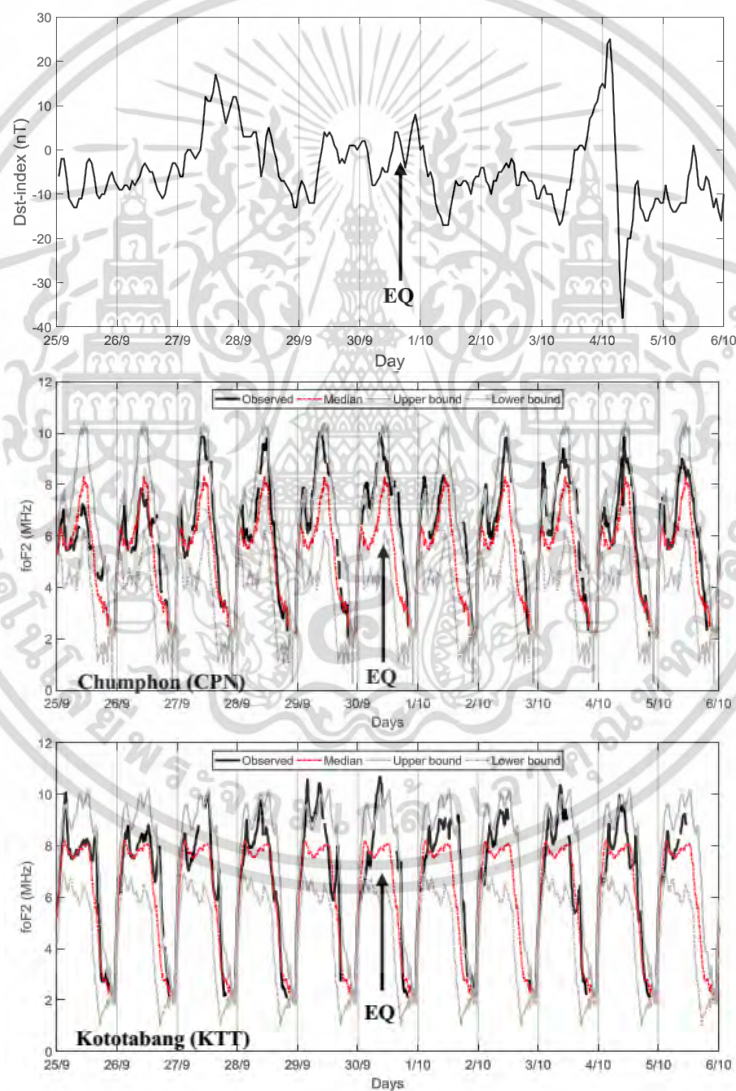
ในที่นี้ foF2<sub>x</sub> แทน 3 ค่าที่กล่าวถึงได้แก่ ค่ามัธยฐานรายเดือน ค่า UB และค่า LB กับ foF2<sub>obs</sub> คือค่า foF2 ที่วัดได้จริง

ผลจากการศึกษา มีดังนี้ รูปที่ 2.21 แสดงการเปลี่ยนแปลงของดัชนี Dst (Dst-index) (รูปบนสุด) กับค่า foF2 ที่สถานีชุมพร (รูปกลาง) และสถานีโกโตตะบัง (รูปล่างสุด) ในช่วงวันที่ 25 กันยายน - 6 ตุลาคม 2009 โดยค่า foF2 ที่วัดได้จริงถูกแสดงด้วยเส้นทึบสีดำ ค่ามัธยฐานรายเดือนถูกแสดงด้วยเส้นประ-จุดสีแดง ค่า UB และค่า LB ถูกแสดงด้วยเส้นทึบสีเทา กับเส้นประ-จุดสีเทา ตามลำดับ ดัชนี Dst (Dst-index) (รูปบนสุดในรูปที่ 2.21) เป็นค่าที่บอกคุณลักษณะของกิจกรรมแม่เหล็กโลก ซึ่งจะพบว่าค่าดัชนี Dst มีค่าต่ำมาก (จาก -30 nT ไปจนถึง -50 nT เป็น minor storm) ยกเว้นวันที่ 4 ต.ค. เท่านั้นที่พบว่า ค่า Dst มีค่าอยู่ระหว่าง 20 nT และ -40 nT แสดงให้เห็นว่า ช่วงเวลาทั้งหมดที่ศึกษาเป็นวันที่เงียบ

สำหรับค่า foF2 ที่สถานีชุมพร (รูปกลางสุดในรูปที่ 2.21) พบว่า foF2 เริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา ก่อนพระอาทิตย์ขึ้น (05-07 LT) มีค่าลดลงตอนเที่ยงเนื่องจากปรากฏการณ์ bite-out เพิ่มขึ้นอีกครั้งในตอนบ่ายและมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดประมาณพระอาทิตย์ตกดิน (17-19LT) และมีค่าลดลงในช่วงเวลา หลังพระอาทิตย์ตกดิน จนกระทั่งมีค่าต่ำสุดที่ประมาณ 05LT สำหรับค่า foF2<sub>obs</sub> นั้น พบว่าการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของ foF2<sub>obs</sub> จะเหมือนกันทุก ๆ วันยกเว้นวันที่ 25-26 กันยายน และวันที่ 1 ตุลาคมที่ค่า foF2<sub>obs</sub> มีค่าลดต่ำลง

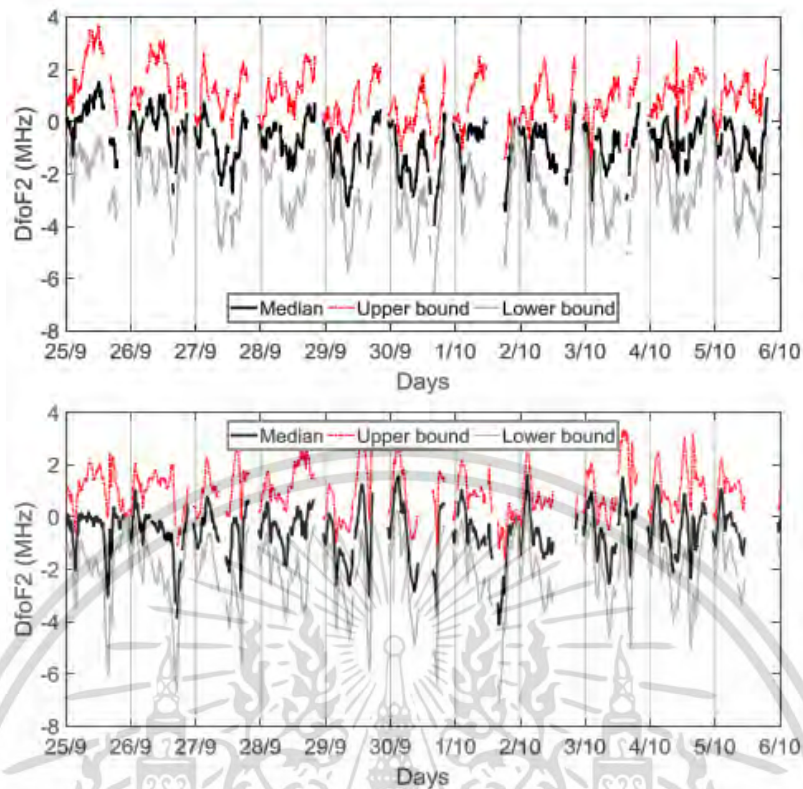


1. **เมื่อเปรียบเทียบ  $foF2_{obs}$  กับค่ามัธยฐาน** พบว่า ค่า  $foF2_{obs}$  มีค่าที่สูงกว่าค่ามัธยฐาน ยกเว้น 4-5 วัน (วันที่ 25-26 กันยายน) ก่อนที่แผ่นดินไหวรุนแรงจะเกิดขึ้นที่พบว่า ค่ามัธยฐานมีค่าที่สูงกว่าค่า  $foF2_{obs}$
2. **เมื่อเปรียบเทียบ  $foF2_{obs}$  กับค่า UB** พบว่า ค่า UB มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่า  $foF2_{obs}$  ในทุก ๆ วัน ยกเว้นวันที่ 25-26 กันยายน และวันที่ 1 ตุลาคมที่พบว่า ค่า  $foF2_{obs}$  มีค่าลดต่ำลง
3. **เมื่อเปรียบเทียบ  $foF2_{obs}$  กับค่า LB** พบว่า ค่า LB เป็นค่าที่น้อยที่สุด อย่างไรก็ตาม ค่า LB มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าอื่น ๆ ในช่วงเวลาก่อนพระอาทิตย์ขึ้นในทุก ๆ วัน ยกเว้นวันที่ 25-26 กันยายน และวันที่ 1 ตุลาคมที่พบว่า ค่า  $foF2_{obs}$  มีค่าลดต่ำลง



รูปที่ 2.21 ค่า Dst-index, ค่า foF2 ที่วัดได้ กับค่าทางสถิติของ foF2 ที่สถานีชุมพรและสถานีโกโตตะบัง ตั้งแต่วันที่ 25 กันยายน - 6 ตุลาคม 2009

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 ผลต่างระหว่างค่ามัธยฐาน ค่าขอบเขตบนและล่างของค่า foF2 กับค่า foF2 ที่วัดได้ที่สถานีชุมพรและสถานีโกโตตะบังในช่วงเวลาที่ศึกษา

สำหรับค่า foF2 ที่สถานีโกโตตะบัง (รูปล่างสุดในรูปที่ 2.21) พบว่าค่าทางสถิติต่าง ๆ มีลักษณะที่คล้ายกับผลที่ได้รับที่สถานีชุมพร (รูปกลางสุดในรูปที่ 2.21) โดย foF2 เริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาก่อนพระอาทิตย์ขึ้น (05-07 LT) มีค่าลดลงตอนเที่ยงเนื่องจากปรากฏการณ์ bite-out เพิ่มขึ้นอีกครั้งในตอนบ่าย และมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดประมาณพระอาทิตย์ตกดิน (17-19LT) และมีค่าลดลงในช่วงเวลาหลังพระอาทิตย์ตกดิน จนกระทั่งมีค่าต่ำสุดที่ประมาณ 05LT สำหรับค่า foF2<sub>obs</sub> นั้น พบว่าการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของ foF2<sub>obs</sub> จะเหมือนกันทุก ๆ วัน และค่า foF2<sub>obs</sub> ที่สถานีชุมพรมีค่าน้อยกว่าค่า foF2<sub>obs</sub> ที่สถานีโกโตตาบังตลอดเวลาในแต่ละวัน

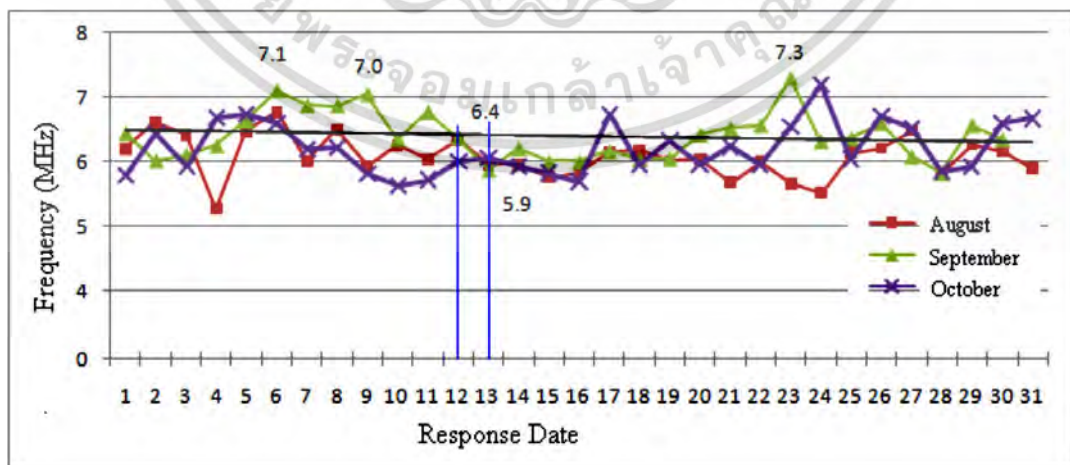
1. **เมื่อเปรียบเทียบ foF2<sub>obs</sub> กับค่ามัธยฐาน** พบว่า ค่า foF2<sub>obs</sub> ในช่วงที่เกิดแผ่นดินไหวที่รุนแรง จะมีค่าที่สูงกว่าค่าต่าง ๆ ในวันอื่น ยกเว้นวันที่ 29 กันยายนที่ค่า foF2 ต่าง ๆ มีค่าที่ใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ พบอีกว่า foF2<sub>obs</sub> มีค่าที่สูงกว่าค่ามัธยฐาน ยกเว้นวันที่ 25-26 กันยายนที่ค่าทั้งสองนี้ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน
2. **เมื่อเปรียบเทียบ foF2<sub>obs</sub> กับค่า UB** พบว่า ค่า foF2<sub>obs</sub> มีค่าที่ต่ำกว่าค่า UB ในทุก ๆ วันที่ศึกษา ยกเว้นวันที่ 29-30 กันยายนที่ค่าทั้งสองนี้ให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน
3. **เมื่อเปรียบเทียบ foF2<sub>obs</sub> กับค่า LB** พบว่า ค่า LB เป็นค่าที่น้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.22 แสดงผลต่างระหว่างค่ามัธยฐานรายเดือน ค่า UB และค่า LB กับค่า foF2 ที่วัดได้จริง (สมการที่ 3) โดยรูปบนแสดงผลที่ได้จากสถานีชุมพร ส่วนรูปล่างแสดงผลที่ได้รับจากสถานีโกโตตะบัง สำหรับที่สถานีชุมพรนั้น พบว่า ค่ามัธยฐานมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง -2 MHz ถึง 1.5 MHz ค่า UB มีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง -1 MHz ถึง 3 MHz และค่า LB มีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง -6 MHz ถึง 0 MHz ส่วนสถานีโกโตตะบังนั้น พบว่า ค่ามัธยฐานมีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง -3 MHz ถึง 1 MHz ค่า UB มีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง -0.5 MHz ถึง 3 MHz ส่วนค่า LB มีค่าเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง -6.5 MHz ถึง 0 MHz เมื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ได้รับกับผลจากการศึกษาในงานวิจัยก่อนหน้านี้ พบว่า ผลการศึกษาที่ได้รับจะสอดคล้องกับงานวิจัยที่มีการนำเสนอก่อนหน้านี้ (e.g. [35]-[37]) สำหรับกรณีของค่า foF2 ซึ่งมีค่าลดลงที่ไม่เหมือนเดิมในช่วง 5 วันก่อนวันที่เกิดแผ่นดินไหวอย่างรุนแรง อย่างไรก็ตาม ค่า foF2<sub>obs</sub> แสดงค่าที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย อันเนื่องมาจากระยะห่างที่ไกลมากระหว่างจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวกับสถานีชุมพรกับสถานีโกโตตะบัง มันจะเป็นการยืนยันและแสดงผลลัพธ์ที่ชัดเจนมากยิ่งขึ้นถ้ามีการศึกษาของการเกิดแผ่นดินไหวในประเทศไทยมากขึ้น

### 2.12.2 การเปลี่ยนแปลงของค่า foF2 เมื่อเกิดแผ่นดินไหวที่เกาะสุมาตรา

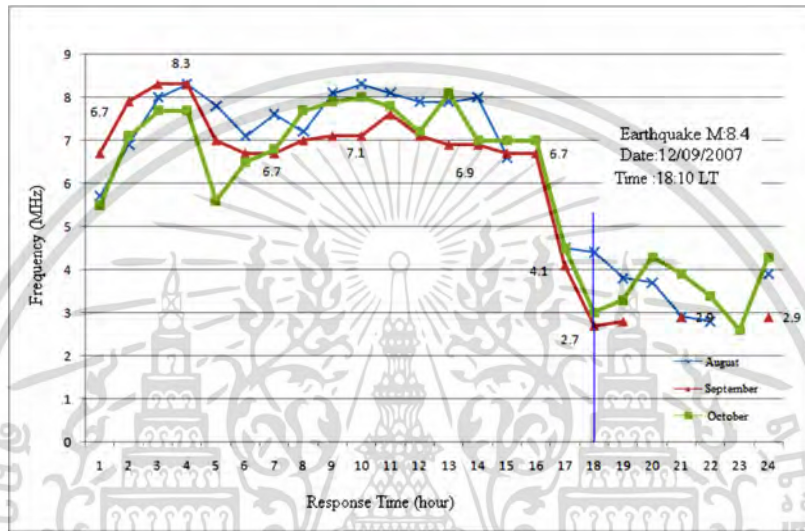
การวิเคราะห์ข้อมูลอันดับแรกนี้จะดำเนินการโดยการสังเกตค่า foF2 เฉลี่ยสำหรับเดือนสิงหาคม กันยายนและตุลาคม ค่าเฉลี่ยจะหาได้ง่าย ๆ โดยเฉลี่ยค่าในแต่ละวันตลอดระยะเวลาสามเดือน รูปที่ 2.23 แสดงค่า foF2 เฉลี่ยสำหรับสามเดือนดังกล่าว เมื่อวันที่ 12 และ 13 กันยายน ก่อนที่จะเกิดแผ่นดินไหว ค่า foF2 มีค่าสูงถึง 7.1 MHz และคงค่าราว ๆ นี้ไปประมาณ 4-5 วัน เมื่อเทียบกับค่า foF2 ในเดือนสิงหาคมและตุลาคม ในช่วงที่เกิดแผ่นดินไหว ค่า foF2 ในวันที่ 12 และ 13 กันยายนจะมีค่าที่ลดลงถึง 6.4 MHz และ 5.9 MHz ตามลำดับเมื่อเทียบกับอีกสองเดือน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่า foF2 เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดสำหรับวันที่เกิดแผ่นดินไหวกับวันที่ไม่เกิดแผ่นดินไหว



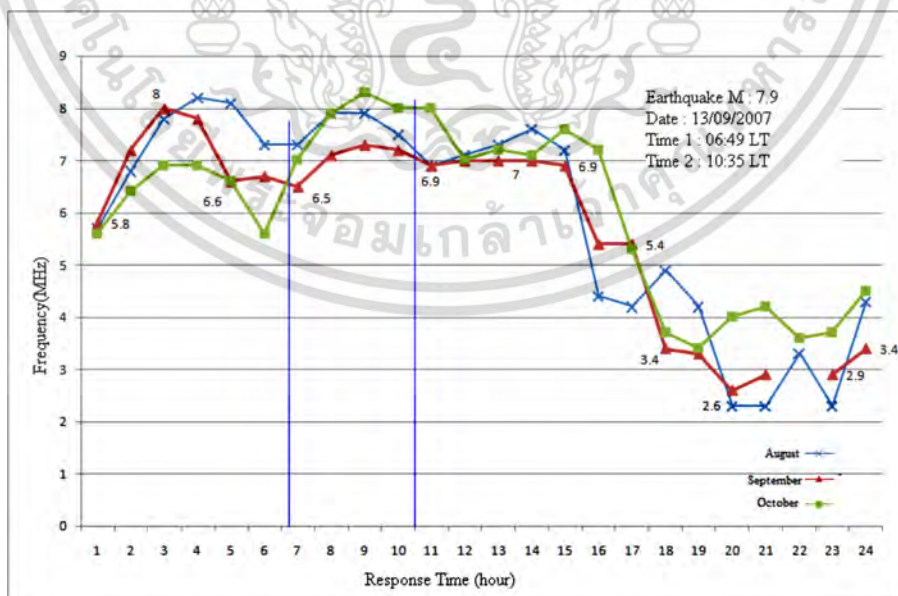
รูปที่ 2.23 ค่า foF2 เฉลี่ยสำหรับเดือนสิงหาคม กันยายนและตุลาคม ปี 2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวิเคราะห์ค่า foF2 ในวันที่ 12 ของเดือนสิงหาคม กันยายนและตุลาคม การเปรียบเทียบค่า foF2 ที่เกิดขึ้นจริงที่เวลา 16:20 ชั่วโมง LT ที่เกาะสุมาตรา ได้ถูกดำเนินการในช่วงเวลา 3 วันดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 2.24 อ้างถึงระยะเวลาหลายชั่วโมงก่อนที่จะเกิดแผ่นดินไหวนั้น ค่า foF2 มีค่าที่ลดลง แล้วเมื่อเกิดแผ่นดินไหวที่เวลา 16:20 ชั่วโมง ค่า foF2 มีค่าลดลงจนไปถึงค่า 2.7 MHz สิ่งนี้แสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยสำหรับ foF2 ในวันที่ 12 ของเดือนกันยายนเป็นค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับค่าที่เกิดขึ้นในเดือนสิงหาคมและเดือนตุลาคม

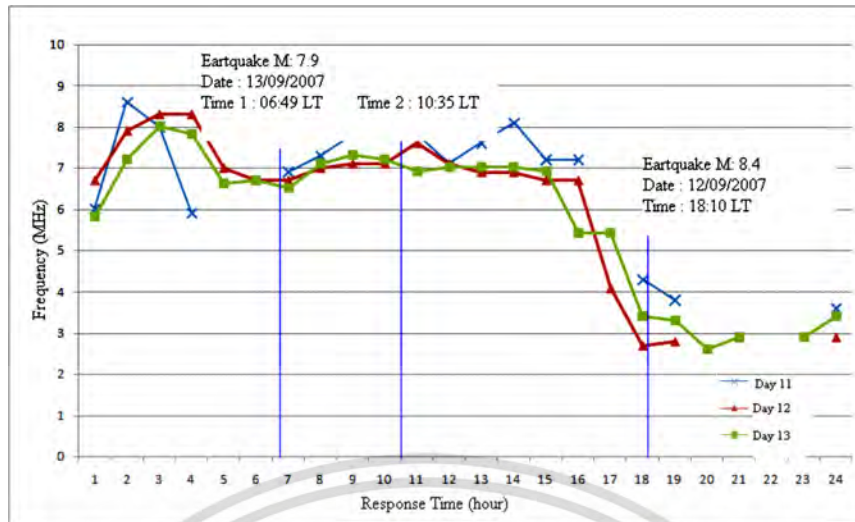


รูปที่ 2.24 การเปลี่ยนแปลงในค่า foF2 ในวันที่ 12 ของเดือนสิงหาคม กันยายนและตุลาคม ปี 2007



รูปที่ 2.25 การเปลี่ยนแปลงในค่า foF2 ในวันที่ 13 ของเดือนสิงหาคม กันยายนและตุลาคม ปี 2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 การเปรียบเทียบค่า foF2 ในวันที่ 11, 12 และ 13 ของเดือนกันยายน ปี 2007

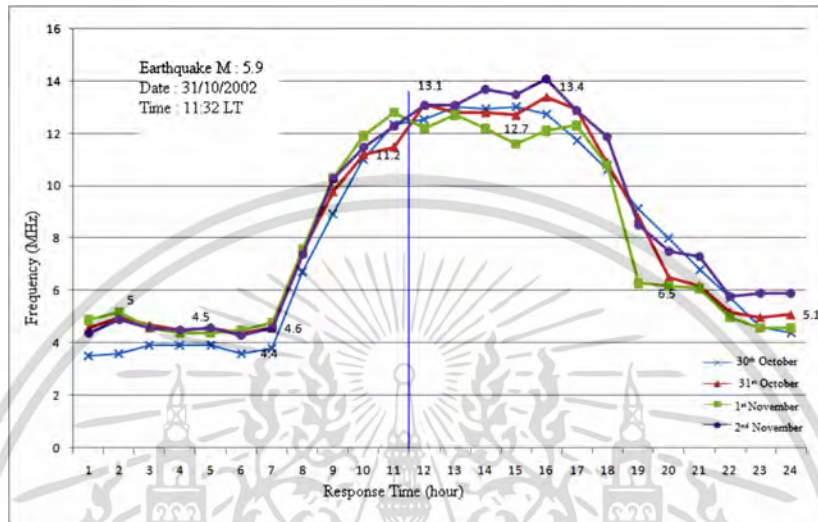
รูปที่ 2.25 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงในค่า foF2 ในวันที่ 13 ของเดือนสิงหาคม กันยายน และตุลาคม ปี 2007 จากรูป พบว่า ค่า foF2 มีค่าลดลงไปถึง 6.5 MHz ในระหว่างการเกิดแผ่นดินไหวที่ 06:49 LT และที่ 10:35 LT ค่า foF2 อยู่ที่ 6.9 MHz แผ่นดินไหววัดได้ 7.0 ตามมาตราริกเตอร์ (Richter scale) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่า foF2 มีค่าน้อยในช่วงเกิดแผ่นดินไหวเมื่อกับวันอื่นที่ไม่มีแผ่นดินไหว

รูปที่ 2.26 แสดงค่า foF2 ในวันที่ 11 – 13 กันยายน 2007 ซึ่งเป็นค่า foF2 ที่สังเกตได้ก่อนการเกิดแผ่นดินไหว โดยค่า foF2 ในวันที่ 12 กันยายน 2007 ที่เวลา 18:10 LT เริ่มต้นที่จะลดลงไปถึง 2.7 MHz ประมาณ 4-5 ชั่วโมงก่อนที่จะเกิดแผ่นดินไหว ค่า foF2 ยังคงลดลงจนถึงวันถัดไปที่เวลา 06:49 LT ซึ่งค่า foF2 จะเพิ่มขึ้นถึง 6.5 MHz ที่เวลา 10:53 LT ในวันเดียวกัน (13 กันยายน 2007) ในระหว่างการเกิดแผ่นดินไหว พบว่า ค่า foF2 มีค่าเป็น 6.9 MHz

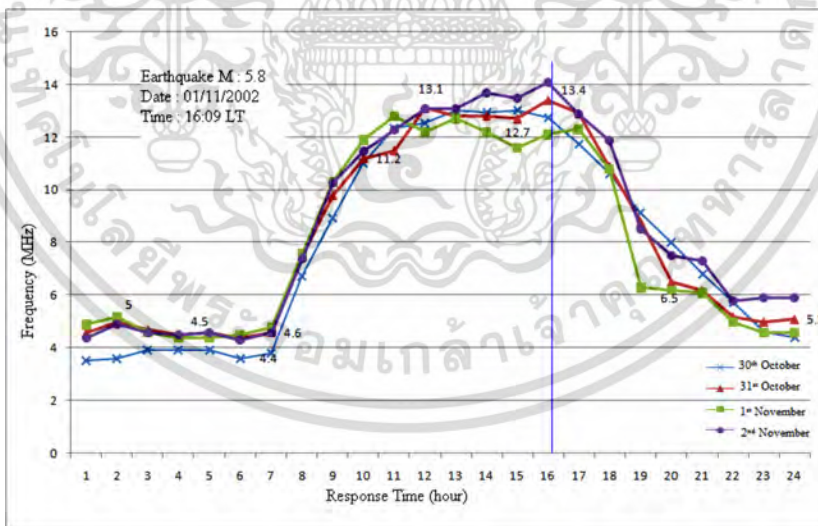
จากการวิเคราะห์นี้ จะเห็นได้ว่าไม่กี่ชั่วโมงก่อนการเกิดแผ่นดินไหว ค่า foF2 จะมีค่าลดลงจนมีค่าน้อย ๆ ในช่วงที่เกิดแผ่นดินไหว และในช่วงเวลา 2-3 วันก่อนแผ่นดินไหว ค่า foF2 ก็มีค่าที่เพิ่มขึ้นที่ขึ้นอยู่กับค่า foF2 เฉลี่ยในแต่ละวันสำหรับเดือนสิงหาคม กันยายนและตุลาคม ปี 2007 รูปที่ 2.27 แสดงผลที่ได้รับผ่านการวิเคราะห์ที่กระทำกับข้อมูลที่นำมาจาก Instituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) ประเทศอิตาลี การเปลี่ยนแปลงของค่า foF2 สามารถที่จะเห็นได้ในวันที่ 31 กันยายน 2002 เมื่อเทียบกับวันอื่น ๆ ที่แตกต่างออกไป จำนวน 3 วัน โดยในช่วงเวลา 2-3 ชั่วโมงก่อนการเกิดแผ่นดินไหว ค่า foF2 เป็นค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับเวลาเดียวกัน (11:32 LT) ในวันอื่น แล้วค่า foF2 จะมีค่าที่สูงขึ้นเท่ากับ 12.1 MHz

รูปที่ 2.28 แสดงให้เห็นว่าค่า foF2 ที่ลดลง (12.1 MHz ที่เวลา 16:10 LT) ซึ่งเป็นช่วงเวลา 4-5 ชั่วโมงก่อนแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในวันที่ 1 พฤศจิกายน 2002 ซึ่งมีแผ่นดินไหวเกิดขึ้นขนาด 5.8 Richter ซึ่งสิ่งนี้สามารถที่จะเปรียบเทียบกับค่า foF2 ในวันอื่น ๆ อีก 3 วันได้ การลดลงของค่า foF2 นี้ยังคงเกิดขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงแม้ว่าจะเป็นช่วงเวลาหลังจากที่เกิดแผ่นดินไหวแล้วก็ตาม โดยค่า foF2 จะมีค่าที่ลดลงไปจนถึง 4.6 MHz ที่เวลา 23:10 LT ปรากฏการณ์แบบเดียวกันนี้เคยถูกพบในวันที่ 31 ตุลาคม 2002 อัตราเวลาของการ Ew (t) เป็นอัตราที่ค่อนข้างที่จะคงที่และอัตราเฉลี่ยของพลังงานโน้มถ่วงของโลกที่เกิดขึ้นเนื่องจากแผ่นดินไหวมีค่าประมาณ -2.0 TW



รูปที่ 2.27 การเปรียบเทียบค่า foF2 ในช่วงที่เกิดแผ่นดินไหว ในวันที่ 31 ตุลาคม ปี 2002



รูปที่ 2.28 การเปรียบเทียบค่า foF2 ในช่วงที่เกิดแผ่นดินไหว ในวันที่ 1 พฤศจิกายน ปี 2002

### 2.12.3 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณอิเล็กตรอนทั้งหมดเมื่อเกิดแผ่นดินไหว

เนื้อหาในหัวข้อย่อยนี้นำมาจากบทความของ Priyadarshi et al. [44] ซึ่งได้บรรยายเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอิเล็กตรอนทั้งหมดเมื่อเกิดแผ่นดินไหว โดยรายละเอียดมีดังนี้ การเกิดแผ่นดินไหวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นหนึ่งในปรากฏการณ์สำคัญที่นำกลัวและเป็นอันตรายที่สุดของธรรมชาติ ในประวัติศาสตร์แผ่นดินไหว ได้คร่าชีวิตผู้คน ไปมากมายและทำลายชุมชนหลายแห่ง ในช่วง 100 ปีที่ผ่านมาได้มีการเกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่โดยเฉลี่ยประมาณ 18 ครั้ง (ขนาด 7.0–7.9) ในแต่ละปี (<http://earthquake.usgs.gov>) การศึกษาล่าสุดโดยใช้ข้อมูลจากมัลติเซ็นเซอร์ได้แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัดเกิดขึ้นบนพื้นผิวของโลก กรมอุตุนิยมวิทยา บรรยากาศและ ionospheric parameters ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในประเทศจีน รัสเซีย ญี่ปุ่น ไต้หวัน และยุโรป การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับแผ่นดินไหวที่ใกล้เข้ามา มีการใช้พารามิเตอร์หลายอย่างในการทำนายแผ่นดินไหวโดยใช้ปรากฏการณ์หลายอย่าง เช่น รูปแบบการเกิดแผ่นดินไหว-สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (seismo-magnetic) การเคลื่อนไหวภาคพื้นดินและเมฆที่ผิดปกติ และการสำรวจอวกาศตามการเร่งรัดของอิเล็กตรอนที่มีพลัง ฯลฯ การพยากรณ์แผ่นดินไหวเป็นเรื่องที่ล้อมรอบไปด้วยความขัดแย้งและความสงสัย ความคืบหน้าอย่างมีนัยสำคัญเกิดขึ้นจากการพัฒนา วิธีการวิเคราะห์แผ่นดินไหวสำหรับการวิเคราะห์อันตรายจากแผ่นดินไหวในระดับเวลาไม่กี่ทศวรรษ อย่างไรก็ตามการคาดการณ์ของแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาไม่กี่ปี จนถึงไม่กี่วันนั้นเป็นปัญหาที่ซับซ้อนมาก การศึกษาล่าสุดได้เสนอว่าดาวเทียมและสิ่งอำนวยความสะดวกบนพื้นดินอาจตรวจจับสัญญาณแจ้งเตือนล่วงหน้าของแผ่นดินไหวในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ภายในไม่กี่ชั่วโมงหรือวันก่อนเกิดแผ่นดินไหวครั้งใหญ่ หลังจากการบุกเบิกของ Gokhberg et al. [45] การศึกษาการทำนายแผ่นดินไหวแบบแอคทีฟเริ่มต้นโดยการตรวจสอบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับแผ่นดินไหว กลไกหลักสำหรับการสร้างกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในช่วงการเปลี่ยนรูปแบบของเปลือกโลกและการเกิดแผ่นดินไหว รวมถึงมีการเปลี่ยนแปลงของพลาสมาใกล้โลกที่สังเกตได้จากพื้นที่ที่มีแผ่นดินไหวด้วย

ปริมาณอิเล็กตรอนรวม (total electron content หรือ TEC) ที่ได้จากระบบระบุพิกัดสากล (global positioning system หรือ GPS) จะถูกนำมาศึกษาโดยใช้วิธีการของ Liu et al. (2004) [46] เพื่อหาความสัมพันธ์กับการแผ่นดินไหวจำนวน 9 ครั้ง ที่มีค่า  $M > 5$  ภายในระยะทาง 2000 กม. รอบเมืองพาราณสี (ละติจูด 25.38 N, ลองจิจูด 82.998 E) ประเทศอินเดีย ในช่วงปี 2550 และปี 2553 ค่ามัธยฐานรายเดือน (MM) ของ TEC และช่วงควอไทล์ที่เกี่ยวข้อง (IQR), ขอบเขตบน (UB) และขอบเขตล่าง (LB) ถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการระบุสัญญาณที่ผิดปกติในระหว่างการเกิดแผ่นดินไหวทั้ง 9 ครั้ง ผลลัพธ์จากการศึกษา พบว่า การลดลงและการปรับปรุงที่ผิดปกติใน TEC ความผิดปกติของปรากฏการณ์ไอโอโนสเฟียร์ก่อนเกิดแผ่นดินไหวเหล่านี้จะปรากฏขึ้นภายใน 5 วันก่อนเกิดแผ่นดินไหว รวมถึงบอกกลไกที่เป็นไปได้ที่เกี่ยวกับความผิดปกติของไอโอโนสเฟียร์ที่เกี่ยวข้องกับแผ่นดินไหว

จากการใช้เครื่องรับสัญญาณ GPS เราได้ทำการตรวจสอบอย่างต่อเนื่องของ ionospheric TEC ที่เมืองพาราณสี (ละติจูดทางภูมิศาสตร์ 25.38 N, ลองจิจูด 82.998 E), ประเทศอินเดียตั้งแต่เดือนมกราคม 2550 ในการศึกษาวิเคราะห์แผ่นดินไหว 9 ครั้ง ( $M > 5$ ) ที่เกิดขึ้นในช่วง กิจกรรม geomagnetic ซึ่งห่างจากศูนย์กลางเมืองพาราณสี, ประเทศอินเดียน้อยกว่า 2000 กม. เพื่อตรวจสอบการก่อตัวที่เกี่ยวข้องกับแผ่นดินไหวโดยใช้วิธีการของ Liu et al. [46] ตำแหน่งของสถานีสังเกตการณ์เมืองพาราณสี (ทำ

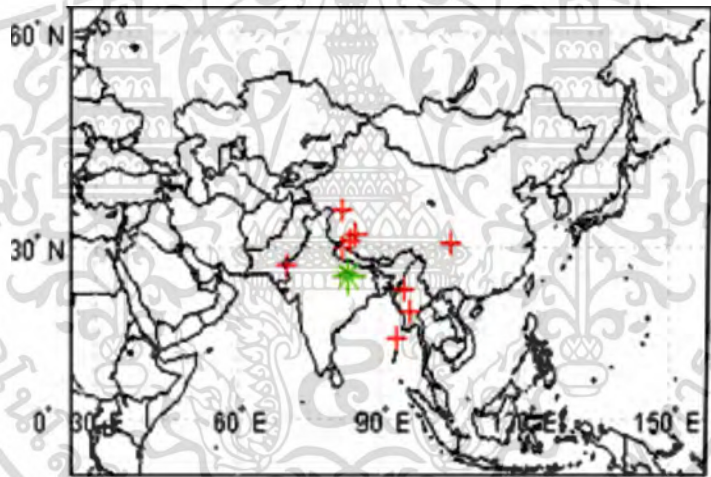
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องหมายด้วยดาวสีเขียว) และตำแหน่งของจุดศูนย์กลาง (ทำเครื่องหมายด้วยดาวสีแดง) ของการเกิดแผ่นดินไหวทั้งเก้าที่วิเคราะห์แล้วแสดงในรูปที่ 2.29

บรรยากาศรอบนอกมีดัชนีการหักเหของแสงที่ความถี่วิทยุซึ่งแตกต่างจากเอกภาพและสามารถส่งสัญญาณ GPS ได้หลายวิธีเมื่อผ่านจากดาวเทียมไปยังเครื่องรับภาคพื้นดิน หนึ่งในสัญญาณที่สำคัญคือสัญญาณ GPS ที่ส่งผ่านบรรยากาศรอบนอกโลกนั้นมีความล่าช้าเพิ่มเติมตามสัดส่วนของ TEC เนื้อหาอิเล็กตรอนรวมเอียง (STEC) ตามเส้นทางรังสีระหว่างดาวเทียม GPS S และตัวรับสัญญาณภาคพื้นดิน R สามารถเขียนเป็น:

$$STEC = \int_S^R N ds \quad (2.15)$$

โดยที่ N คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และ Slant total electron content (STEC) ได้มาจากข้อมูล GPS ที่บันทึกที่สถานีละติจูดต่ำของเรา



รูปที่ 2.29 ตำแหน่งของสถานีพารานีและจุดศูนย์กลางของการเกิดแผ่นดินไหวทั้ง 9 จุดที่วิเคราะห์

ค่า STEC ถูกแปลงไปเป็นค่า VTEC ตาม Rao et al. 2006 ดังสมการที่ (2.16)

$$VTEC = (STEC - [b_R + b_S])/S(E_1) \quad (2.16)$$

โดยที่  $b_R$  และ  $b_S$  เป็น receiver bias และ satellite bias ตามลำดับ  $E_1$  คือมุมเงยของดาวเทียมเป็นองศา  $S(E_1)$  เป็นปัจจัยเอียงที่มีมุมสุดยอด  $w$  (รูปที่ 2.30) ที่จุด ionospheric pierce point (IPP) และ VTEC คือ TEC แนวตั้งที่ IPP ปัจจัยความเอียง  $S(E_1)$  (หรือฟังก์ชันการทำแผนที่) ถูกกำหนดเป็น [45]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

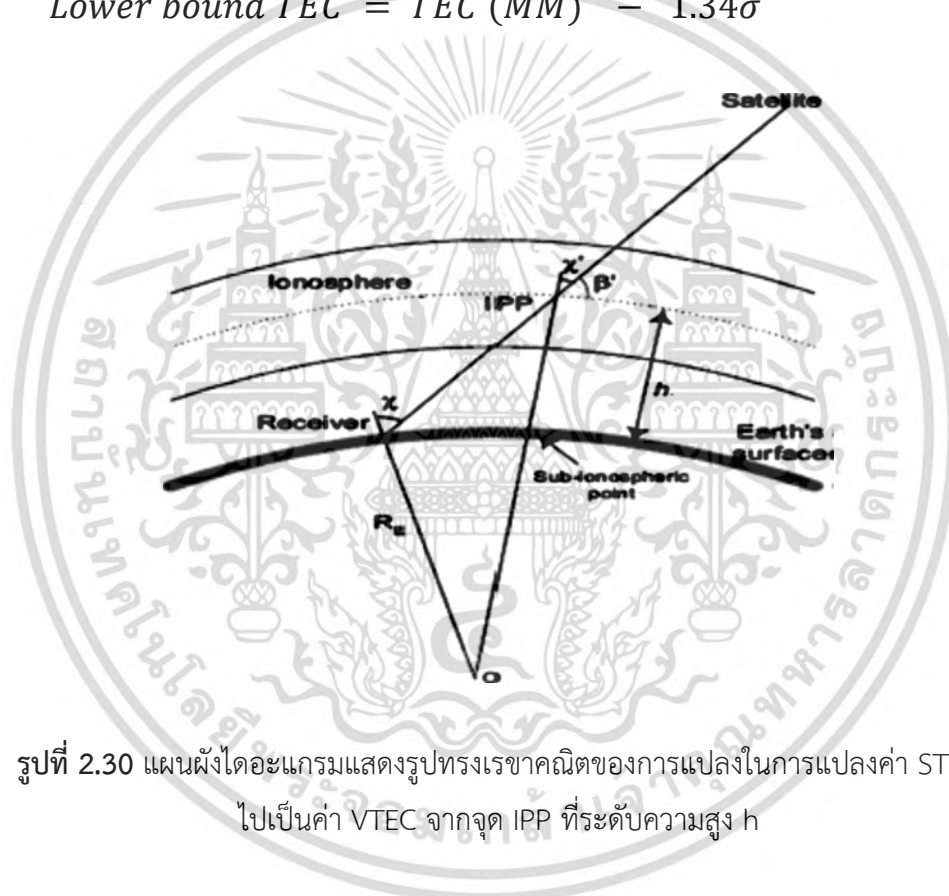


$$S(E_1) = \frac{1}{\cos(x)} = \left\{ 1 - \left( \frac{R_E \cos(E_1)}{R_E + h} \right)^2 \right\}^{-0.5} \quad (2.17)$$

เมื่อ RE คือค่าเฉลี่ยรัศมีของโลกเป็นกิโลเมตร, h คือความสูงไอออนของบรรยากาศเหนือพื้นผิวโลก, x คือมุมสุดยอดและ El เป็นมุมเงยของดาวเทียมเป็นองศา ขอบเขตบนและล่างของ TEC ใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการระบุสัญญาณที่ผิดปกติระหว่างเกิดแผ่นดินไหวคำนวณโดยใช้ความสัมพันธ์ต่อไปนี้ (Fedrizzi al., 2002):

$$\text{Upper bound TEC} = \text{TEC (MM)} + 1.34\sigma \quad (2.18)$$

$$\text{Lower bound TEC} = \text{TEC (MM)} - 1.34\sigma \quad (2.19)$$



รูปที่ 2.30 แผนผังไดอะแกรมแสดงรูปทรงเรขาคณิตของการแปลงในการแปลงค่า STEC ไปเป็นค่า VTEC จากจุด IPP ที่ระดับความสูง h

โดยที่  $\sigma$  คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและ TEC (MM) คือค่ามัธยฐานรายเดือนของ TEC การศึกษาปัจจุบันรายงานการก่อตัวของไอออน หากมีการตรวจพบเหนือพารานส์ก่อนเกิดแผ่นดินไหว 9 ครั้ง (M 4.5) ที่เกิดขึ้นระหว่างเดือนพฤษภาคม 2550 ถึงเมษายน 2553 เราได้วางแผนดัชนี Dst, AE และ ap ระยะเวลาของวันเพื่อให้สามารถมั่นใจได้ว่าไม่มีพายุ geomagnetic ในวันที่เกิดแผ่นดินไหวและการก่อตัวที่ก่อให้เกิดประจุไอโอโนสเฟียร์เกิดขึ้นเนื่องจากแผ่นดินไหว

เราจะศึกษาเกี่ยวกับสัญญาณแจ้งเตือนล่วงหน้าของแผ่นดินไหวเท่านั้น ดังนั้น เราจึงอธิบายความผิดปกติที่เราสังเกตเห็นก่อนเกิดการสั่นสะเทือนครั้งใหญ่ซึ่งได้รับการพิจารณาว่าเป็นสัญญาณแจ้งเตือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

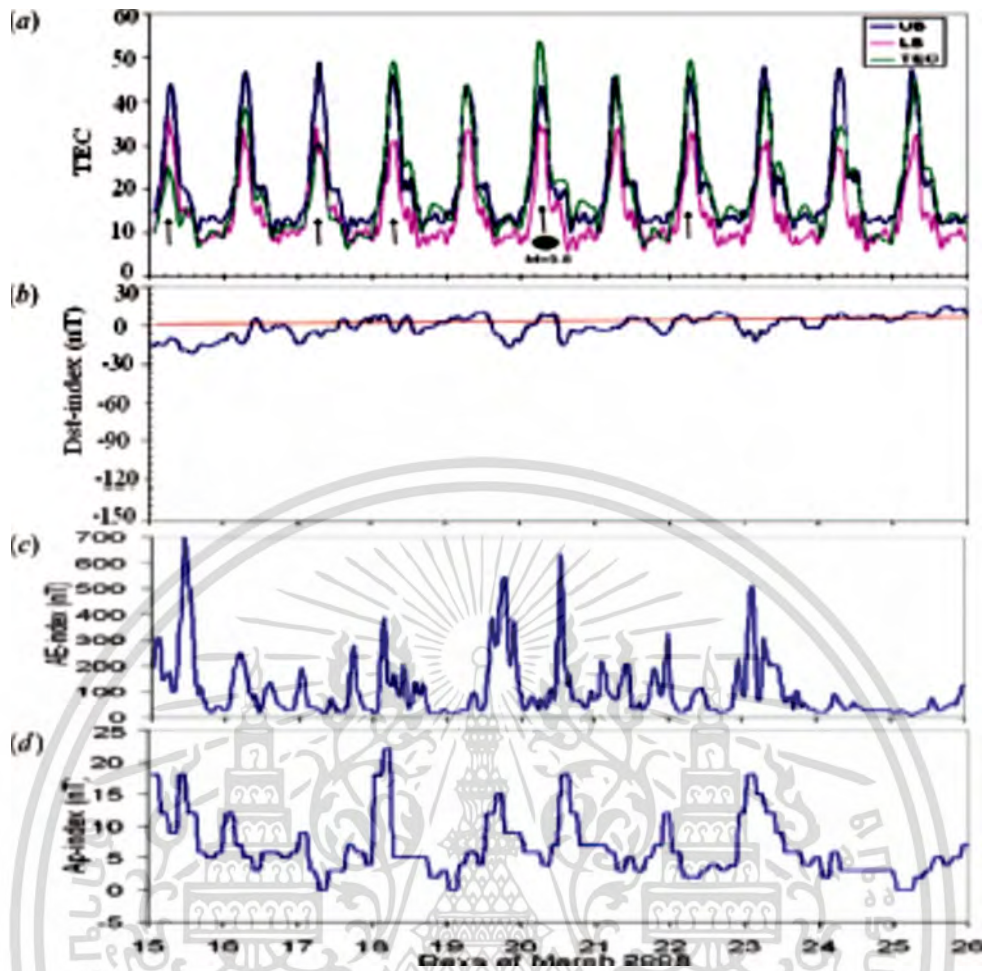
ล่องหน้าของแผ่นดินไหว รายละเอียดเกี่ยวกับสถานที่, วันที่, ละติจูด, ลองจิจูดและเวลาของการเกิดแผ่นดินไหวครั้งใหญ่ทั้งเก้าแห่งที่ศึกษาแสดงไว้ในตารางที่ 2.2 วันของสัญญาณแจ้งเตือนล่วงหน้าของประจุลบที่สังเกตได้ก่อนที่จะเกิดกระแสไฟฟ้าช็อคหลัก ใน TEC จะแสดงสำหรับการวิเคราะห์แผ่นดินไหวทั้งหมด ตัวอย่างของการเกิดแผ่นดินไหวโดยทั่วไปที่มีการก่อรูปแบบ ionospheric สามแบบแสดงในรูปที่ 2.31 - 2.33

ตารางที่ 2.2 สถานที่, วันที่, ละติจูด, ลองจิจูดและเวลาของการเกิดแผ่นดินไหวครั้งใหญ่ทั้งเก้าแห่งที่ศึกษา

Serial no.	Place	Date	Time of main shock (UTC)	Magnitude (M)	Precursor observed before (day)	Effect on ionospheric TEC (I: increase; D: decrease)
1	Myanmar (India)	30 July 2007	22:42:09.2	5.9	1, 6	1-I, 6-D
2	China	9 January 2008	08:26:54.7	6.3	2, 5	2-I, 5-I
3	China	20 March 2008	22:32:55.7	6.8	2, 3, 5	2-I, 3-D, 5-D
4	China	12 May 2008	06:27:56.4	7.5	5	5-D
5	Tibet (India)	25 August 2008	13:21:57.0	6.4	3	3-D
6	Nepal	8 December 2008	08:59:07.0	5.7	2, 4, 5, 6	2-I, 4-D, 5-I, 6-D
7	Rajasthan (India)	9 April 2009	01:46:57.0	5.3	2, 4, 5, 6	2-D, 4-D, 5-D, 6-D
8	Andaman	25 February 2010	03:51:47	5.0	2, 4	2-D, 4-D
9	Myanmar	12 March 2010	23:19:54	5.6	1, 2	1-D, 2-D

ตัวอย่างคือแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นเมื่อวันที่ 20 มีนาคม 2551 ขนาด  $M > 6.8$  (รูปที่ 2.31) ที่ Xinjiang-Xizang ภูมิภาคชายแดนของจีน (ละติจูด 35.88 N, ลองจิจูด 81.88 E) ที่นี้เราสังเกตการเปลี่ยนแปลงของ TEC ionospheric ภายใน 5 วันก่อนเกิดแผ่นดินไหวซึ่งถูกทำเครื่องหมายด้วยลูกศร (รูปที่ 2.31) ในกรณีนี้เราสังเกตเห็นการเพิ่มขึ้นของ ionospheric TEC สองวันก่อนที่จะเริ่มการช็อคหลักในขณะที่เราสังเกตการลดลงของ ionospheric TEC 3-5 วันก่อนเกิดแผ่นดินไหว การเปลี่ยนแปลงในดัชนี Dst, ดัชนี ap และดัชนี AE ในช่วงเวลาเหล่านี้จะปรากฏขึ้นด้วย (ซึ่งโมดูลมักจะน้อยกว่า 720 nT) ค่าของดัชนี ap น้อยกว่า 25 และดัชนี AE น้อยกว่า 800 nT ซึ่งแสดงช่วงเวลาที่เสียบสงบของ geomagnetic อย่างชัดเจน เราสังเกตว่าโมดูลของดัชนี Dst นั้นน้อยกว่า 720 nT เสมอ อีกตัวอย่างทั่วไปของการก่อแบบในชั้นบรรยากาศรอบนอกเมืองพาราณสีเนื่องจาก Jaisalmer แผ่นดินไหวราชา ( $M > 5.3$ ) (ละติจูด 27.18 N) เกิดขึ้นเมื่อวันที่ 9 เมษายน 2552 (รูปที่ 2.32) ที่นี้เราสังเกตการลดลงของ TEC ionospheric ที่ 2, 4, 5 และ 6 วันก่อนเกิดแผ่นดินไหว ดัชนี Dst, ดัชนี AE และดัชนี ap แสดงช่วงเวลาที่เสียบสงบของ geomagnetic อย่างชัดเจน รูปที่ 2.33 แสดงตัวอย่างทั่วไปครั้งที่สามของแผ่นดินไหวเมียนมาร์ ( $M > 5.9$ ) (ละติจูด 19.38 N, ลองจิจูด 95.68 E) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อวันที่ 30 กรกฎาคม 2550 ในกรณีนี้เราสังเกตการลดลงของ TEC 6 วันก่อนเกิดแผ่นดินไหวในขณะที่การเพิ่มขึ้นของชั้นบรรยากาศ TEC ถูกสังเกตได้หนึ่งวันก่อนเกิดแผ่นดินไหวครั้งสำคัญ ดัชนี Dst ที่ถูกพล็อตแสดงรูปแบบวันที่เสียบสงบที่ชัดเจน

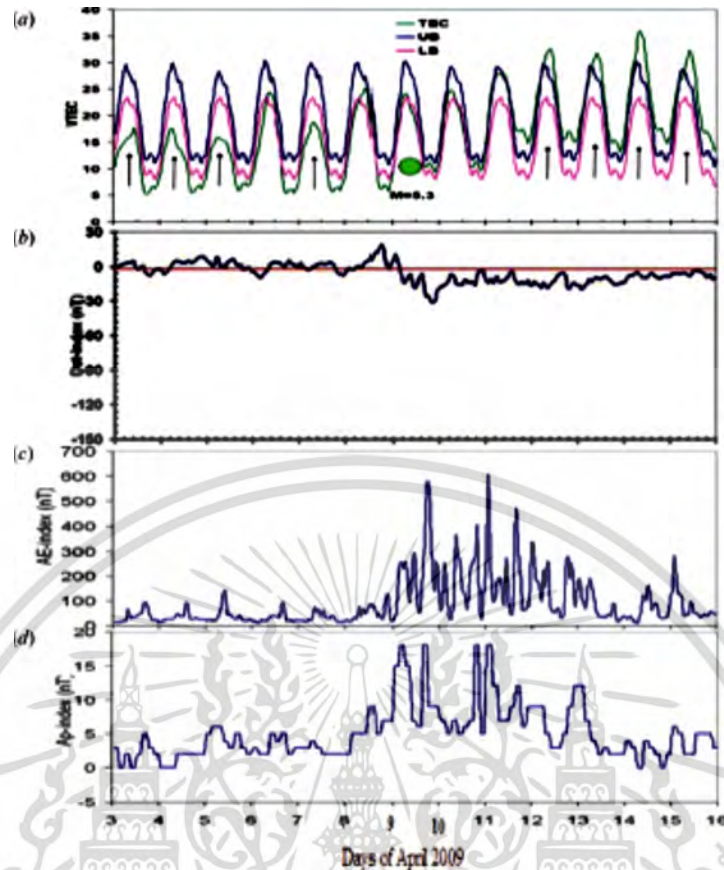
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.31 การเปลี่ยนแปลงใน (a) ปริมาณอิเล็กตรอนทั้งหมด (TEC), (b) ดัชนี Dst, (c) ดัชนี AE และ (d) ดัชนี ap (15-25 มีนาคม 2551) ในช่วงแผ่นดินไหวจีน (20 มีนาคม 2551)

นอกจากนี้เรายังศึกษาการเกิดแผ่นดินไหวของจีนอีกสองครั้งที่เกิดขึ้นในวันที่ 9 มกราคม 2551 และ 12 พฤษภาคม 2551 แผ่นดินไหวที่เบตที่เกิดขึ้นในวันที่ 25 สิงหาคม 2551 และแผ่นดินไหวเนปาลที่เกิดขึ้นในวันที่ 8 ธันวาคม 2551 แผ่นดินไหวสองครั้งล่าสุดเกิดขึ้นในปี 2553 เหตุการณ์แผ่นดินไหวครั้งใหญ่เกิดขึ้นเมื่อวันที่ 25 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2553 และเกิดแผ่นดินไหวครั้งใหม่ในประเทศพม่าเมื่อวันที่ 12 มีนาคม พ.ศ. 2553 ดัชนี Dst ที่มีขนาดเล็กกว่า 730 nT ดัชนี AE น้อยกว่า 800 nT และดัชนี ap น้อยกว่า 25 ซึ่งบ่งชี้อย่างชัดเจนว่าไม่มีพายุ geomagnetic พายุ 10 วันก่อนและหลังการเกิดแผ่นดินไหวครั้งสำคัญ ดังนั้น การก่อกวนอวกาศตามแนวชายฝั่งทั้งหมดที่น่าเสนาะมีความเกี่ยวข้องกับการเกิดแผ่นดินไหว อย่างไรก็ตามเป็นที่ทราบกันว่าการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กอาจทำให้เกิดแผ่นดินไหว สิ่งนี้สามารถเห็นได้เมื่อเราทำการติดต่อกันอย่างใกล้ชิดระหว่างพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่แสดงในรูปที่ 2.31-2.33 เราไม่สามารถเพิกเฉยต่อข้อมูลที่เห็นได้ชัดซึ่งปรากฏในเอกสารของเรา แต่ในทุกกรณีรูปแบบสนามแม่เหล็กนั้นอ่อนแอมากและการอภิปรายในประเด็นนี้อยู่นอกเหนือขอบเขตของการศึกษาในครั้งนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



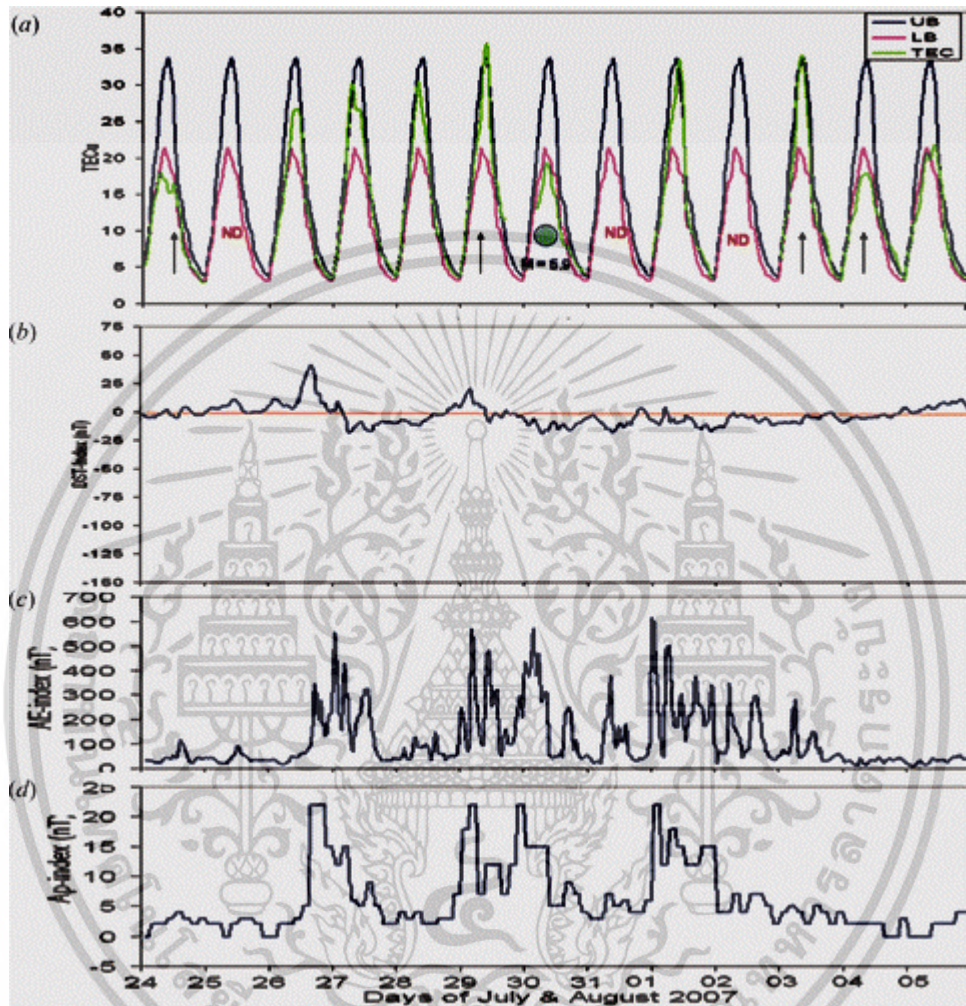
รูปที่ 2.32 การเปลี่ยนแปลงใน (a) เนื้อหาอิเล็กตรอนรวม (TEC), (b) ดัชนี Dst, (c) ดัชนี AE และ (d) ดัชนี ap (3–15 เมษายน 2552) ในช่วงแผ่นดินไหว Jaisalmer Rajasthan (9 เมษายน 2009)

สรุปผลการศึกษาในภาพรวมของค่า TEC ที่มีการเปลี่ยนแปลงในขณะที่เกิดแผ่นดินไหว คือ

1. จากการวิเคราะห์ข้อมูลแผ่นดินไหวเก่าครั้ง ( $M > 5$ ) ตั้งแต่เดือนมกราคม 2550 ถึง 2553 ในแง่ของพายุแม่เหล็กและแผ่นดินไหวเราสังเกตว่าการแปรผันของความผิดปกติใน TEC นั้นมีความสัมพันธ์กับการเกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ ( $M > 5.0$ ) ที่เกิดขึ้นภายใน 2000 กม. จากสถานีสังเกตการณ์พาราณสี
2. เราสังเกตว่าจากทั้งเก้ากรณีของแผ่นดินไหวที่มีขนาดใหญ่ ( $M > 5.0$ ) มีสามกรณีที่ทั้งการพ่องและการปรับปรุงเกิดขึ้น การพ่องเท่านั้นที่ถูกสังเกตได้ในห้ากรณี ในขณะที่การปรับปรุงเกิดขึ้นเพียงกรณีเดียวเท่านั้น
3. ในทั้งเก้ากรณีนี้ โมดูลของดัชนี Dst น้อยกว่า  $-30$  nT, ดัชนี AE น้อยกว่า 800 nT และดัชนี ap น้อยกว่า 25 ซึ่งบ่งชี้อย่างชัดเจนว่าไม่มีพายุ geomagnetic 10 วันก่อนและหลัง ซ็อดหลักของการเกิดแผ่นดินไหว (เช่นวันที่ geomagnetic เงียบสงบ) ดังนั้นเราสามารถสรุปได้ว่าความผิดปกติของไอโอโนสเฟียร์เหล่านี้ทั้งหมดเกิดจากแผ่นดินไหว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. มีการหารือกันถึงกลไกที่เป็นไปตามสนามไฟฟ้าแผ่นดินไหวในเขตเตรียมความพร้อมของแผ่นดินไหว เพื่อศึกษากลไกที่สมบูรณ์ของข้อต่อ lithosphere-ionosphere โดยใช้เครื่องมือที่แตกต่างกันในระดับความสูงที่แตกต่างกันของบรรยากาศ



รูปที่ 2.33 การเปลี่ยนแปลงใน (a) ปริมาณอิเล็กตรอนทั้งหมด (TEC), (b) ดัชนี Dst, (c) ดัชนี AE และ (d) ดัชนี ap (24 กรกฎาคม -5 สิงหาคม 2550) ระหว่างเกิดแผ่นดินไหวพม่า (30 กรกฎาคม 2007)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### หลักการและการออกแบบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงองค์ประกอบต่าง ๆ ที่จะปรากฏในเนื้อหาต่าง ๆ ในนำไปแสดงไว้ในเว็บไซต์ ศูนย์การเรียนรู้การเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการเกิดภัยพิบัติ ที่สถานีภาคพื้นดินละติจูดต่ำบริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก จังหวัดชุมพร ได้แก่ ชั้นไอโอโนสเฟียร์ ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ สภาพภูมิอากาศ แผ่นดินไหว พายุแม่เหล็กโลก ฯลฯ นอกจากนี้ ยังกล่าวถึงความสำคัญและที่มาของตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric storm scale หรือ I-scale) และการคำนวณค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นค่า (B2\_bot) ซึ่งประกอบไปด้วยการคำนวณค่า B2bot ที่ไม่มีค่าปรับแก้ (B2botP\_old) และการคำนวณค่า B2bot ที่มีค่าปรับแก้ (B2botP\_new) โดยรายละเอียดของหัวข้อต่าง ๆ มีดังนี้

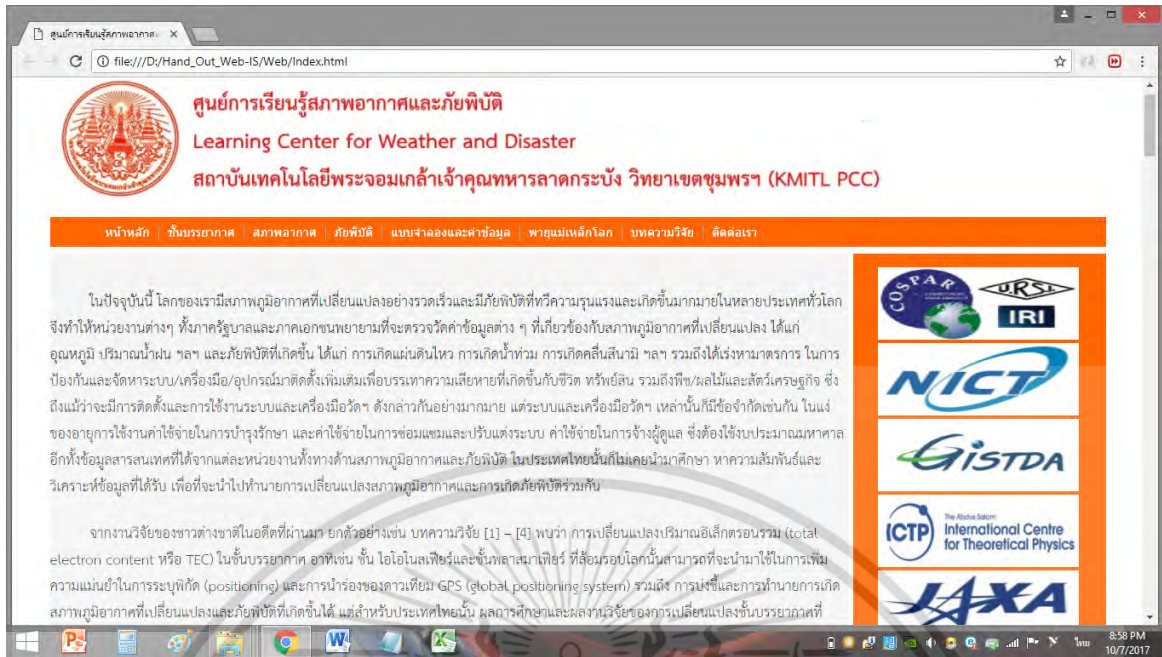
#### 3.1 องค์ประกอบของหน้าหลัก

ชื่อของเว็บไซต์ของโครงการวิจัยนี้จะถูกเรียกย่อ ๆ คือ ศูนย์การเรียนรู้สภาพอากาศและภัยพิบัติ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรฯ (Learning Center for Weather and Disaster, KMITL PCC) โดยเมนูของหน้าหลักประกอบไปด้วยหัวข้อต่าง ๆ ดังนี้

1. หน้าหลัก
2. ชั้นบรรยากาศ
3. สภาพอากาศ
4. ภัยพิบัติ
5. แบบจำลองและค่าข้อมูล
6. พายุแม่เหล็กโลก
7. บทความวิจัย
8. ติดต่อเรา

หน้าหลักจะถูกแบ่งออกเป็น 2 เฟรมหลัก ดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยเฟรมเนื้อหาทางซ้ายที่บรรยายถึงความสำคัญและที่มา วัตถุประสงค์ ขอบเขต ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ ประโยชน์ แผนการถ่ายทอดเทคโนโลยีหรือผลการวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมาย ขั้นตอนการดำเนินงาน สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล เอกสารอ้างอิง ของโครงการวิจัยนี้ และเฟรมทางขวาที่เป็นตราสัญลักษณ์ (logo) ของหน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานวิจัยนี้ ได้แก่ เว็บไซต์ไปยังกรมอุตุนิยมวิทยา, GISTDA, กรมทรัพยากรธรณี, ศูนย์แจ้งเตือนภัยพิบัติแห่งชาติ, NICT, JAXA, IRI, NeQuick, GIRO, IGS เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 หน้าเว็บเพจหลักที่ออกแบบของโครงการวิจัย



รูปที่ 3.2 ตำแหน่งของสถานี Jicamarca และสถานี Ramey  
(<http://www.digisonde.com/digisonde-station-map.html>)

### 3.2 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ความหนาแน่นล่าง

ในหัวข้อย่อหน้านี้นำเสนอข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ความหนาแน่นล่าง ซึ่งหัวข้อนี้เป็นประเด็นที่ 2 ที่จะศึกษาและนำเสนอในโครงการวิจัยนี้ โดยข้อมูลที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นค่ามัธยฐานรายชั่วโมงของค่า foF2 (ความถี่พลาสมาของชั้น F2), ค่า hmF2 (ค่าความสูงพีคของชั้น F2), ค่า m(3000)F2 (ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นจากชั้น F2) และ B0 (ค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่าง) ที่สถานี Jicamarca (12.0°S, 76.8°W) และสถานี Ramey (18.5°N, 67.1°W) โดยตำแหน่งของทั้งสองสถานีนี้มีแสดงไว้ในรูปที่ 3.2 โดยข้อมูลไอโอโนซอนดในปี 2014 (ปฏิบัติการสุริยะสูงสุดในไซเคิลสุริยะลำดับที่ 24) ของทั้งสองสถานีนี้จะถูกประมวลผลออกมาจากฐานข้อมูลไอโอโนแกรมดิจิทัล (Digital Ionogram Data Base หรือ DIDBase) ที่เว็บไซต์ <http://giro.uml.edu/didbase/scaled.php> โดยในที่นี้ ข้อมูลที่ประมวลผลได้จาก DIDBase จะถูกแบ่งออกเป็น 3 ฤดูกาล ได้แก่ ฤดูหนาว, ฤดูอิควินอกซ์ และ ฤดูร้อน โดยสถานี Jicamarca และสถานี Ramey เป็นสถานที่ตั้งอยู่ที่ด้านเหนือและด้านใต้ของยอด EIA (Equatorial Ionization Anomaly) ตามลำดับ นอกจากนี้ ค่าเฉลี่ยตลอด 12 เดือนของค่าจุดดับบนดวงอาทิตย์ (Rz12) ที่ใช้ในงานนี้ถูกนำมาจากเว็บไซต์ของแบบจำลอง IRI-2012

### 3.3 ตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์

ปฏิสัมพันธ์เชิงซ้อนของชั้นแมกเนโตสเฟียร์ ไอโอโนสเฟียร์ และเทอร์โมสเฟียร์ก็จะเป็นต้นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างพลวัติของการกระจายตัวของพลาสมาในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งจะก่อให้เกิดพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ในเวลาต่อมา ในระหว่างที่เกิดพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์นั้น ความหนาแน่นพลาสมาในชั้นไอโอโนสเฟียร์สามารถที่จะเพิ่มขึ้น และ/หรือ ลดลงจากหลายชั่วโมงไปจนถึงหลายวันก็ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขสภาวะปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์ คุณสมบัติของพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ไม่จำเป็นที่จะต้องเหมือนกับพายุแม่เหล็กโลกเสมอไป ถึงแม้ว่ากิจกรรมแม่เหล็กโลกจะต่ำ แต่เงื่อนไขในชั้นไอโอโนสเฟียร์สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้อย่างมาก ซึ่งขึ้นอยู่กับฤดูกาล เวลาท้องถิ่นและตำแหน่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเปลี่ยนแปลงของ EIA (equatorial ionization anomaly) ที่ส่งผลกระทบต่อเงื่อนไขในชั้นไอโอโนสเฟียร์อย่างมากที่ละติจูดกลางและละติจูดต่ำ โดยเงื่อนไขในชั้นไอโอโนสเฟียร์เป็นหนึ่งในคุณลักษณะสภาพอวกาศที่สำคัญมากที่สุดประเด็นหนึ่งสำหรับผู้ใช้งานระบบต่าง ๆ ที่อาศัยคลื่นวิทยุ อาทิเช่น ระบบดาวเทียมนำทางสากล (GNSS), ระบบการสื่อสารย่าน HF, และระบบการตรวจจับระยะไกลที่อาศัยอวกาศ

สารสนเทศของสภาพอวกาศ อาทิเช่น กิจกรรมสุริยะและกิจกรรมแม่เหล็กโลก ถูกจัดให้มีโดยศูนย์แจ้งเตือนสากลของหน่วยให้บริการสภาพแวดล้อมในอวกาศนานาชาติ (ISES) ตัวบอกระดับ (scale) บางตัวถูกใช้เพื่อบ่งชี้คุณลักษณะของสิ่งเหล่านั้น เช่น

1. G scale สำหรับพายุแม่เหล็กโลก
  2. S scale สำหรับการแผ่รังสีสุริยะ และ
- R scale สำหรับการรับคลื่นวิทยุไม่ได้

โดย S กับ R scales จะอาศัยการวัดค่ากิจกรรมสุริยะ ส่วน G scale จะอาศัยการวัดค่าของกิจกรรมแม่เหล็กโลก ตัวบอกระดับเหล่านี้เป็นส่วนหนึ่งของ “NOAA scale” ที่ได้รับการยอมรับเป็นอย่างดีและแสดงบทบาทที่สำคัญในการมอนิเตอร์และการทำนายของเงื่อนไขสภาพอวกาศ ในทางกลับกัน ตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่อาศัยการวัดชั้นไอโอโนสเฟียร์ยังไม่มีกำหนดเป็นค่ามาตรฐานออกมาใช้



งานกันเลย อาจจะมีสาเหตุมาจากการที่ชั้นไอโอโนสเฟียร์มีการเปลี่ยนแปลงทางเวลาและระยะทางที่มาก จึงทำให้มันยากที่จะกำหนดตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ชัดเจนออกมาเพื่อใช้งาน

ในงานวิจัยของ Nishioka et al. [59] นั้น ตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ยังคงถูกศึกษาและพัฒนาเพิ่มเติม เพื่อที่จะขยายผลการศึกษาให้มีความเป็นไปได้สำหรับการใช้งานทั่วไปในบริเวณต่าง ๆ ในโลก สำหรับจุดประสงค์นี้ การขึ้นอยู่กับฤดูกาล เวลาท้องถิ่น และตำแหน่งของการเปลี่ยนแปลงในชั้นไอโอโนสเฟียร์ควรจะถูกลำดับออกไป เพื่อที่สร้างตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ใหม่ตัวหนึ่ง (I-scale) เราจะทำการวิเคราะห์คุณลักษณะเชิงสถิติของค่า TEC และ foF2 พารามิเตอร์เหล่านี้จะถูกใช้งานอย่างเป็นประจำและใช้งานกันทั่วโลกในการมอนิเตอร์ชั้นไอโอโนสเฟียร์ คุณภาพของข้อมูลเหล่านี้ดีเพียงพอต่อการศึกษาค่าเหล่านั้นในทางสถิติ ตัวอย่างการคำนวณหาค่า I-scale ที่อาศัยการวัดค่า TEC และค่า foF2 นั้นสามารถศึกษาและอ่านเพิ่มเติมได้จากบทความวิจัยของ Nishioka et al. (2017) [59] ซึ่งได้ทำการศึกษาค่า I-scale ของประเทศญี่ปุ่น โดย TEC นำมาจากเครือข่าย GEONET และค่า foF2 นำมาจาก Ionosonde ของ 4 เมืองในประเทศญี่ปุ่น (ได้แก่ เมือง Wakkanai, Kokubunji, Yamagawa, Okinawa) โดยจะใช้ค่า foF2 ที่ถูกสเกลได้ด้วยมือทุก ๆ 1 ชั่วโมงจากปี 1997 – 2014 รายละเอียดของผลการศึกษาของ Nishioka et al. (2017) [59] มีดังนี้

### 3.3.1 ค่า I-scale ที่ขึ้นอยู่กับการวัดค่า TEC

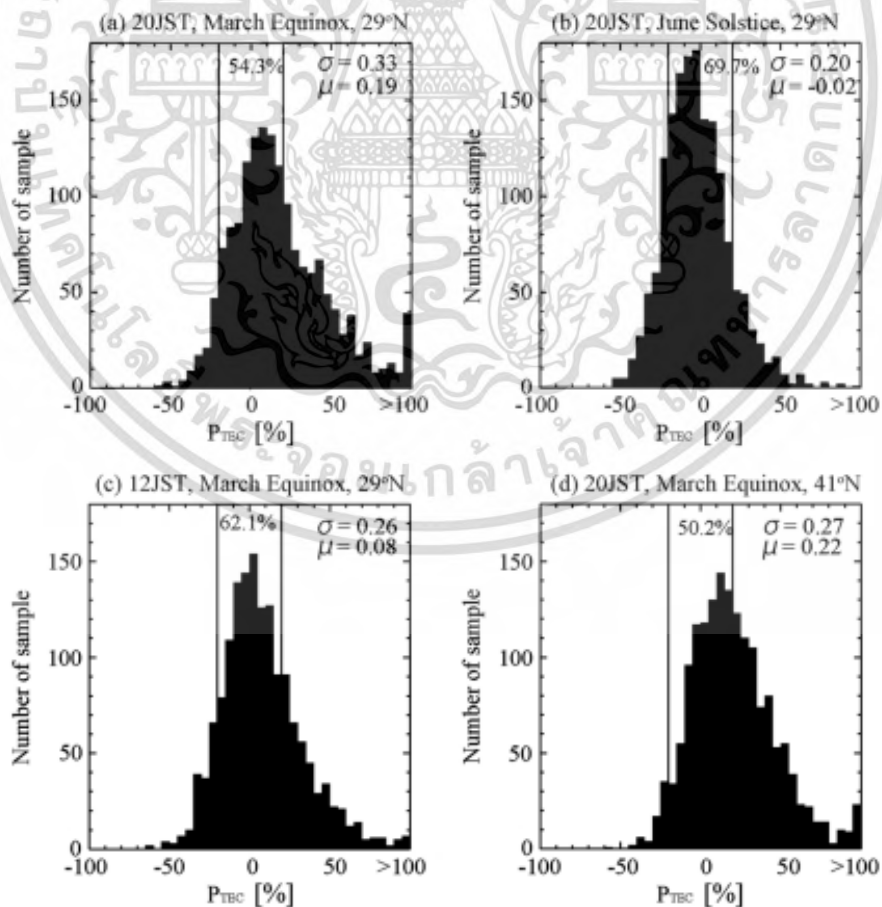
รูปที่ 3.3a แสดงค่าฮิสโตแกรมของ PTEC ในตอนกลางคืน (20 JST หรือ 11UT) ในช่วงเวลา 3 เดือนรอบ ๆ ฤดู March Equinox ที่แถบละติจูด 29 องศาเหนือ (27-31 องศาเหนือ) ตลอดระยะเวลา 18 ปี จำนวนสุทธิของตัวอย่างที่ใช้จะมีค่าเท่ากับวันทั้งหมดในฤดู ME ตลอด 18 ปี นั่นคือประมาณ 1600 ตัวอย่าง (วัน) ในรูปที่ 3.3a ขนาด 54.3% ของจำนวนตัวอย่างสุทธิ (all the samples) มีค่า  $abs(P_{TEC})$  มีค่าน้อยกว่า 20% ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขที่เสียบ (ไม่มีพายุ) ในทางตรงข้าม ค่า  $P_{TEC}$  มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 100% (was 100% or more) ในช่วงเวลาที่มากกว่า 40 วัน ที่บ่งชี้ให้เห็นว่าค่า  $O_{TEC}$  มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2 เท่าของค่า  $R_{TEC}$  ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าเฉลี่ยของค่า  $P_{TEC}$  ในรูปที่ 3.3a มีค่าเท่ากับ 0.33 และ 0.19 ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยมีค่าเป็นบวกเนื่องจากค่า  $O_{TEC}$  มีค่ามากกว่าค่า  $R_{TEC}$  ในทางสถิติในฤดู ME ซึ่งชี้ให้เห็นถึงการขึ้นอยู่กับฤดูกาลของค่า TEC ที่น่าจะถูกรวมไว้อยู่ในค่า PTEC อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากค่า  $R_{TEC}$  เป็นค่ามัธยฐานของค่า  $O_{TEC}$  ของ 27 วันที่ผ่านมา

ดังที่อธิบายไว้ในบทความของ Mielich และ Bremer (2010) ค่า AI เป็นค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลค่าหนึ่ง รูปที่ 3.4b แสดงฮิสโตแกรมของ  $P_{TEC}$  (เช่นเดียวกับรูปที่ 3.3a) แต่ในระหว่าง 3 เดือนรอบฤดู June Solstice (JS) การกระจายตัวในฤดู JS ในรูปที่ 3.3b มีค่าพีคที่แคบรอบ ๆ ค่า  $P_{TEC} = 0$  มากกว่าค่าเหล่านั้นในฤดู ME ในรูปที่ 3.3a โดยในรูปที่ 3.3b นั้น ขนาด 69.7% ของจำนวนตัวอย่างสุทธิมีค่า  $abs(P_{TEC})$  มีค่าน้อยกว่า 20% ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า  $P_{TEC}$  มีค่าเท่ากับ 0.2

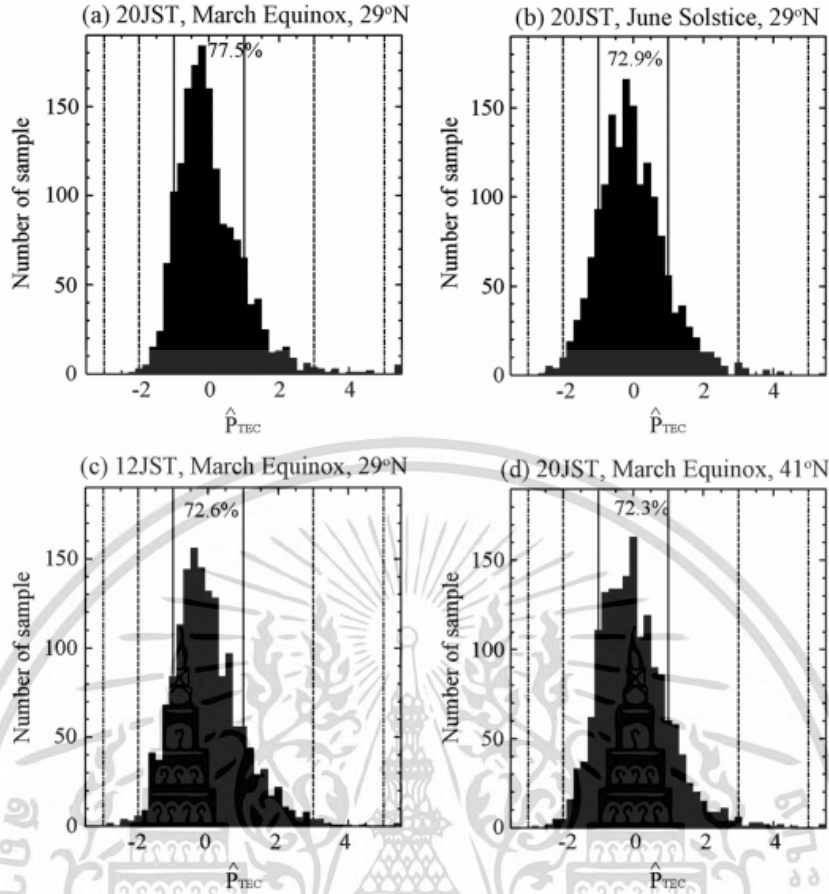
ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่า  $P_{TEC}$  ในฤดู ME การกระจายตัวของค่า AI แสดงคุณลักษณะที่มีการเปลี่ยนแปลงในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ละวันด้วยเช่นกัน รูปที่ 3.3c แสดงการกระจายตัวของ  $P_{TEC}$  ในตอนกลางวัน (12 JST) ที่แถบละติจูด 29 องศาเหนือในฤดู ME การกระจายตัวในตอนกลางวันจะมีค่าที่แคบกว่าค่าเหล่านั้นในตอนกลางคืนในรูปที่ 3.3a ในรูปที่ 3.3c ค่า 62.1% ของจำนวนตัวอย่างอย่างสุทธิมีค่า  $abs(P_{TEC})$  มีค่าน้อยกว่า 20% ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า  $P_{TEC}$  มีค่าเท่ากับ 0.26 รูปที่ 3.3d แสดงการกระจายตัวของ  $P_{TEC}$  ในตอนกลางคืน (20 JST) ที่แถบละติจูด 41 องศาเหนือ (40-42 องศาเหนือ) ในฤดู ME การกระจายตัวมีค่าที่แคบกว่าค่าเหล่านั้นในตอนกลางคืนในรูปที่ 1a ในรูปที่ 3.3d ค่า 50.2% ของจำนวนตัวอย่างอย่างสุทธิมีค่า  $abs(P_{TEC})$  มีค่าน้อยกว่า 20% ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า  $P_{TEC}$  มีค่าเท่ากับ 0.27

การขึ้นอยู่กับแถบละติจูด (ตำแหน่ง) ของค่า sigma ก็สามารถมองได้ชัดเจนเช่นกัน ในลองติจูดแถบญี่ปุ่น ค่า sigma ที่แถบละติจูด 29 องศาเหนือจะมีค่าที่มากกว่าค่า sigma ที่แถบละติจูด 41 องศาเหนือ การขึ้นอยู่กับฤดูกาล เวลาท้องถิ่นและตำแหน่งของค่า  $P_{TEC}$  ควรจะถูกกำจัดออกไปเพื่อที่จะนิยามตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ตัวใหม่ขึ้นมาอีก 1 ตัว รูปที่ 3.2a-3.2d แสดงการกระจายตัวของค่า  $P_{TEC}$  และ  $P_{TEC}^*$  ที่ซึ่งจะหาค่าได้จากสมการที่ (3.1)



รูปที่ 3.3 การกระจายทางสถิติของค่า  $P_{TEC}$  จากปี 1997 ถึง 2014 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 การกระจายทางสถิติของค่า  $P_{TEC}^*$  จากปี 1997 ถึง 2014

$$P_{TEC} = 100 \times \frac{O_{TEC} - R_{TEC}}{R_{TEC}} ; P_{TEC}^* = \frac{P_{TEC} - \mu}{\sigma} \quad (3.1)$$

โดย ค่า sigma และค่า  $\mu$  ได้ถูกแสดงไว้ตรงขวามือด้านบนของรูปที่ 3.3a-3.3d ตามลำดับ การกระจายตัวของ  $P_{TEC}^*$  นั้นจะคล้ายกันดังที่เห็นในรูปที่ 3.4a-3.4d ถึงแม้ว่า ฤดูกาล เวลาท้องถิ่นและตำแหน่งจะแตกต่างกัน เปอร์เซนต์ของตัวอย่างที่มีค่า  $P_{TEC}^*$  มีค่าอยู่ระหว่าง  $\pm 1\%$  นั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 72 และ 78% ดังที่แสดงอยู่ด้านบนของแต่ละรูป ซึ่งชี้ให้เห็นถึง “ค่าความน่าจะเป็นของการเกิดขึ้นของค่า  $abs(P_{TEC}^*) < 1$  มีความแตกต่างกันน้อยมากท่ามกลางฤดูกาล เวลาท้องถิ่นและตำแหน่งที่แตกต่างกัน

### 3.3.2 ค่า I-scale ที่ขึ้นอยู่กับการวัดค่า foF2

$P_{foF2}$  ก็มีคุณลักษณะที่ขึ้นอยู่กับฤดูกาล เวลาท้องถิ่นและละติจูดเช่นเดียวกับ  $P_{TEC}$  จากการศึกษพบว่า สถานี Okinawa นั้นมักจะพบกับ ESF หลายครั้งซึ่งเกิดขึ้นจากฟองพลาสมาในตอนกลางคืนของฤดูอิควินอกซ์ เนื่องจาก foF2 ไม่สามารถที่จะถูกสแกนได้เมื่อ ESFs เกิดขึ้น จำนวนสุทธิของค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลในตอนกลางคืน ฤดู ME จะน้อยกว่าจำนวนสุทธิของค่าข้อมูลในตอนกลางคืน ฤดู ME การกระจายตัวของค่า  $P_{foF2}$  ในตอนกลางคืนมีค่าพีคที่แคบในฤดู JS มากกว่าในฤดู ME ค่าความน่าจะเป็นของค่า  $abs(P_{foF2})$  ที่มีค่าน้อยกว่า 20% นั้นมีค่าเท่ากับ 59.1% และ 73.9% สำหรับฤดู ME และ JS ตามลำดับ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า  $P_{foF2}$  มีค่าเท่ากับ 0.30 และ 0.18 สำหรับฤดู ME และ JS ตามลำดับ การขึ้นอยู่กับฤดูกาลของค่า  $P_{foF2}$  ซึ่งจะสอดคล้องกับค่าเหล่านั้นของ  $P_{TEC}$  การขึ้นอยู่กับเวลาท้องถิ่นและละติจูดของค่า  $P_{foF2}$  ก็สอดคล้องเป็นอย่างดีกับค่าเหล่านั้นของ  $P_{TEC}$  ด้วยเช่นกัน ในที่นี้ เราได้ทำการนอร์มัลไลซ์ค่า  $P_{foF2}$  ด้วยกระบวนการเดียวกับ  $P_{TEC}$  เพื่อที่จะกำจัดการขึ้นอยู่กับ  $P_{foF2}$  ที่มีต่อฤดูกาล เวลาท้องถิ่นและตำแหน่งออกไป

### 3.4 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ความหนาต้านล่าง (B2botP)

#### 3.4.1 การคำนวณค่า B2bot ที่ไม่มีค่าปรับแก้ (B2botP\_old)

แบบจำลอง NeQuick 2 เป็นแบบจำลองที่แสดงค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นไอโอโนสเฟียร์อันหนึ่งซึ่งแสดงค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนและค่า TEC ที่ตำแหน่ง วันและเวลาที่ต้องการ (Nava et al. [60] โดยแบบจำลอง NeQuick 2 นี้จะถูกอธิบายด้วยฟังก์ชันเอพสไตน์ (Epstein) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านล่างกับชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านบน โดย Zhang et al. [61] ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ความหนาต้านล่าง (B2bot), ค่า  $k$  (พารามิเตอร์รูปร่างด้านบน), ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนพีคชั้น F2 ( $NmF2$ ) และค่า TEC ของแบบจำลอง NeQuick 2 ด้วยสมการที่ (3.2)

$$TEC = 2(1 + k)NmF2 \times B2bot \quad (3.2)$$

ในที่นี้ ค่า  $k$  หาค่าได้จากสมการที่ (3.3)

$$k = 3.22 - 0.0538foF2 - 0.00664hmF2 + 0.113 \frac{hmF2}{B2bot} + 0.00257Rz12 \quad (3.3)$$

หลังจากนั้น แทนค่า  $k$  จากสมการที่ (3.3) ลงไปในสมการที่ (3.2) แล้วทำการจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปของ B2bot เราจะได้สมการ B2bot ที่ได้รับการจัดรูปใหม่ดังแสดงในสมการที่ (3.4)

$$B2botP\_old = \frac{\tau/2 - 0.113hmF2}{S} \quad (3.4)$$

ในที่นี้ ค่า  $S$  และค่าความหนาอิเล็กตรอน (slab thickness; ตัวย่อคือ  $\tau$ ) หาค่าได้จากสมการที่ (3.5) และ (3.6) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S = 4.22 - 0.0538foF2 - 0.00664hmF2 + 0.00257Rz12 \quad (3.5)$$

$$\tau = \frac{TEC}{NmF2} \quad (3.6)$$

### 3.4.2 การคำนวณค่า B2bot ที่มีค่าปรับแก้ (B2botP\_new)

เนื่องจากมีค่าผลต่างที่เกิดขึ้นระหว่างพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านข้างที่คำนวณได้จากสมการที่นำเสนอ กับค่าที่วัดได้จาก Digisonde (B0\_obs) ในทางปฏิบัติ ดังนั้นค่าปรับแก้ (correction factor) สำหรับค่า B2botP\_old ควรที่จะได้รับการหาค่าเพิ่มเติม ในงานวิจัยนี้ เราเลือก “ค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านข้างที่คำนวณได้จากสมการที่นำเสนอ กับค่าที่วัดได้จาก Digisonde (B0\_obs)” มาใช้เป็นค่าปรับแก้ให้กับค่า B2botP\_old นอกจากนี้ ท่ามกลางพารามิเตอร์ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ศึกษาที่ใช้การคำนวณหาค่า B2botP\_old นั้น พารามิเตอร์ทั้งหมดเป็นค่าข้อมูลที่ได้จากการวัดและค่าข้อมูลที่ได้จากสมการเชิงการทดลอง ยกเว้นค่า  $\tau$  เนื่องจากค่า  $\tau$  เป็นอัตราส่วนระหว่างค่า TEC กับค่า NmF2 จึงมีความแตกต่างระหว่างค่า TEC ที่ได้จากเครื่อง Digisonde และค่า TEC ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดประเภทอื่น ๆ ดังนั้นค่าปรับแก้ของ B2botP\_old สามารถที่จะหาค่าได้จากสมการที่ (3.7)

$$c = \frac{\bar{x}}{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^{24} |B0\_obs_i - B2botP\_old_i|}{24 \times \tau} \quad (3.7)$$

หลักจากนั้น สมการที่ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านข้างที่มีค่าปรับแก้ (B2botP\_new) ก็จะคำนวณได้จากสมการที่ 8

$$B2botP\_new = B2botP\_old + c \times \tau. \quad (3.8)$$

โค้ดแมทแลบ (MATLAB) ที่ใช้ในการคำนวณหาค่า B2botP\_old และค่า B2botP\_new มีแสดงไว้ในรูปที่ 3.5 และผลการรันโค้ดนี้มีแสดงไว้ในรูปที่ 3.6 ซึ่งจะเห็นได้ว่า “ค่า B2botP\_new มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่า B0\_obs และการเปลี่ยนแปลงรายวันของค่า B2botP\_new ก็มีแนวโน้มที่เหมือนกับ การเปลี่ยนแปลงรายวันของค่า B0\_obs ด้วย” นั่นก็แสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นด้านข้างที่นำเสนอในสมการที่ (3.8) นั้นสามารถนำมาใช้เพื่อหาค่า B0 ในทางปฏิบัติ (B0\_obs) ได้

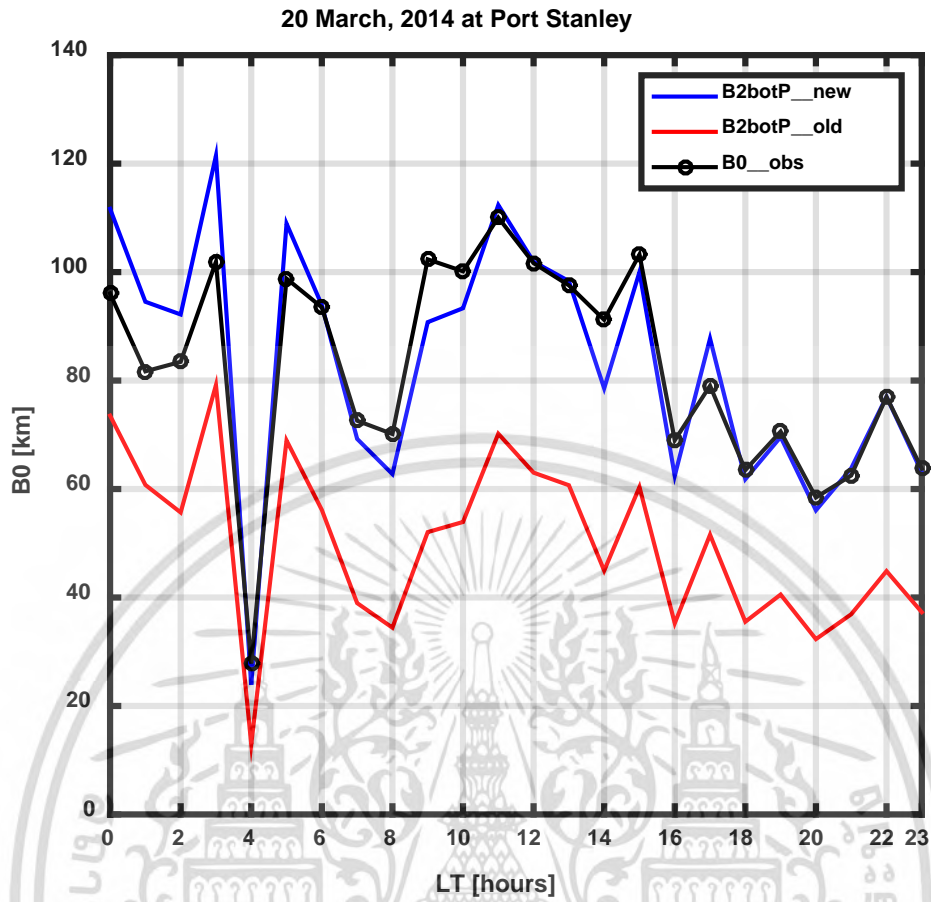
```

M = load('DB_Port_20032014.txt') % This file is obtained from GIRO of DIDbase
M1 = M(:,1); % foF2
M2 = M(:,2); % hmF2
M3 = M(:,3); % TEC
M4 = M(:,4); % Hm
M5 = M(:,5); % B0
m = 1;
for i = 1:1
    foF2(:,i) = M1(m:24*i);
    hmF2(:,i) = M2(m:24*i);
    TEC(:,i) = M3(m:24*i);
    Hm(:,i) = M4(m:24*i);
    B0(:,i) = M5(m:24*i);
    m = (24*i)+1;
end
NmF2 = (1.24)*((foF2).^2)*1e10;
Tau = TEC./NmF2;
L1 = 3.22-(0.0538.*foF2)-(0.00664.*hmF2)+(0.00257*Rz12_2014);
M1 = (0.113).*hmF2;
B2botP_old = ((Tau./1.2)-M1)./(L1+1);
a = abs(B0-B2botP_old)./Tau;
a_av = [ a(1,:) a(2,:) a(3,:) a(4,:) a(5,:) a(6,:) a(7,:) a(8,:) a(9,:) a(10,:) ...
        a(11,:) a(12,:) a(13,:) a(14,:) a(15,:) a(16,:) a(17,:) a(18,:) a(19,:) a(20,:) ...
        a(21,:) a(22,:) a(23,:) a(24,:) ];
mean_a_av = nanmean(a_av,2);
B2botP_new = B2botP_old + (mean_a_av *Tau);
t = 0:23; % tt2 = 0:2:46;
plot(t,B2botP_new,'b-', t,B2botP_old,'r-',t,B0_obs,'ko')
legend('B2botP_new', 'B2botP_old','B0_obs')
title('20 March, 2014 at Port Stanley')

```

รูปที่ 3.5 โค้ดแมทแลบที่ใช้ในการคำนวณหาค่า B2botP\_old และค่า B2botP\_new

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น กรุณาอย่าเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ผลการรันของโค้ดในรูปที่ 3.5

### 3.5 แบบจำลองการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ความหนาของชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านล่าง

จากที่ได้อธิบายการคำนวณหาค่า B2botP ไปในหัวข้อที่ 3.2 แล้ว ในหัวข้อนี้จะอธิบายการออกแบบหน้าจอ GUI (Graphical User Interface) โดยใช้โปรแกรมแมทแล็บ (การประยุกต์ใช้ matlab, 2555) นั้น การออกแบบหน้าจอ GUI นั้นมีวัตถุประสงค์หลักคือใช้ในการติดต่อกับผู้ใช้โดยใช้ทั้งคีย์บอร์ดและเมาส์ ยกตัวอย่างเช่น การคลิกเมาส์บนปุ่มกด (Pushbutton) การป้อนข้อความลงในช่องแก้ไขข้อความ (Edit box) และการคลิกบนปุ่มวิทยุ (Radio Button) ฯลฯ โดยทั่วไป เราจะเรียกสิ่งที่ผู้ใช้ป้อนเข้าผ่านทางองค์ประกอบ GUI ว่าเป็นเหตุการณ์ (event) เมื่อไรก็ตามที่มีเหตุการณ์เกิดขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ผู้ใช้งานกดปุ่มหรือป้อนข้อมูลในช่องแก้ไขข้อความ โปรแกรมก็จะทำงานตามชุดคำสั่งเพื่อตอบสนองกับเหตุการณ์ตามที่เราต้องการ เราเรียกโปรแกรม GUI ที่ทำงานตามเหตุการณ์ที่ต้องการว่า “การขับเคลื่อนด้วยเหตุการณ์ (event-based driving)” การสร้างโปรแกรม GUI ในแมทแล็บนั้นมีองค์ประกอบหลักอยู่ 2 ส่วน คือ

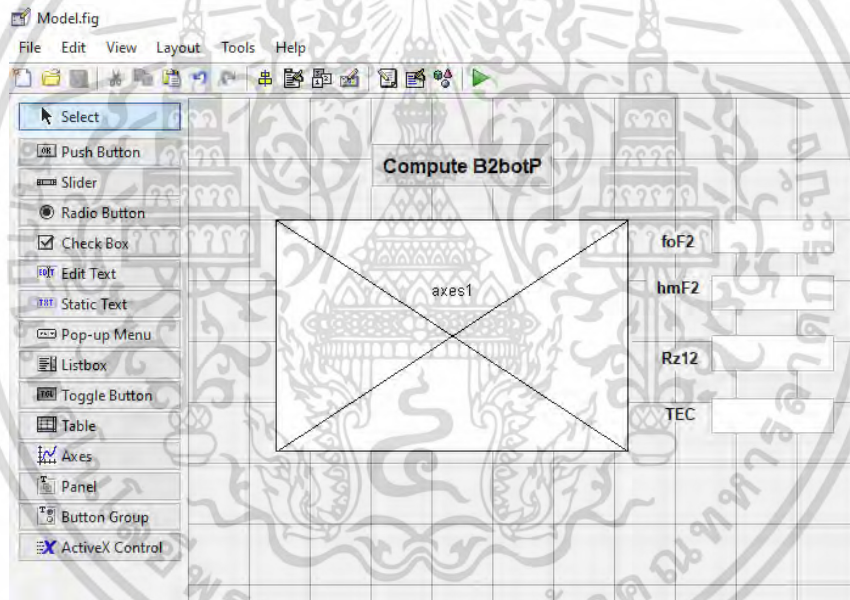
1. องค์ประกอบของ GUI (Form) บนหน้าต่างที่ใช้โต้ตอบกับผู้ใช้ ได้แก่ ปุ่มกด ปุ่มวิทยุ หรือช่องแก้ไขข้อความ โดยองค์ประกอบของ GUI เหล่านี้จัดว่าเป็นอ็อบเจกต์ของแมทแล็บทั้งสิ้น
2. โค้ดตัวโปรแกรมแมทแล็บที่ทำงานตามเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในฟอร์มที่ออกแบบไว้ในข้อที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับแมทแลบนั้น จะมีโปรแกรม guide (Graphical User Interface Development Environment) ที่ถูกนำมาใช้เพื่อออกแบบหน้าจอ GUI (Graphical User Interface) ให้มีการโต้ตอบกับ ผู้ใช้งานได้ง่ายขึ้น ดังนั้น ในหัวข้อนี้ เราใช้โปรแกรม guide ในการออกแบบองค์ประกอบของ GUI (Form) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ความหนาของชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านล่างดังสมการที่ (3.8)

แบบจำลองการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ความหนาของชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านล่างที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม guide นั้นมีแสดงในรูปที่ 3.7 โดยในที่นี้ พารามิเตอร์ที่เราทำการป้อนเข้าไปในแบบจำลองดังกล่าว ได้แก่

1. foF2 คือ ค่าความถี่วิกฤตชั้น F2
2. hmF2 คือ ค่าความสูง ณ ตำแหน่งที่ NmF2 มีค่าสูงสุดในชั้น F2
3. Rz12 คือ ค่าจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์โดยเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 12 เดือน
4. TEC คือ ค่า Ionospheric TEC



รูปที่ 3.7 แบบจำลองการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ความหนาด้านล่างที่ (B2botP) โดยใช้โปรแกรม guide

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## บทที่ 4 ผลการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงหน้าเว็บต่าง ๆ ที่แสดงเนื้อหาต่าง ๆ ที่สอดคล้องกับโครงการวิจัยทั้งหมด โดยข้อมูลส่วนหนึ่งจะถูกเรียบเรียงและแปลมาจากเว็บไซต์และบทความวิจัยทั้งภายในประเทศไทยและต่างประเทศ ได้แก่ เว็บไซต์กรมอุตุนิยมวิทยา เว็บไซต์ศูนย์แจ้งเตือนภัยพิบัติแห่งชาติ เว็บไซต์ทรัพยากรธรณี เว็บไซต์แบบจำลอง IRI เว็บไซต์แบบจำลอง NeQuick 2 เว็บไซต์แผ่นดินไหว ฯลฯ นอกจากนี้ ยังมีการกล่าวถึงผลการศึกษาดัชนีบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่อาศัยค่า foF2 (foF2-based I-scale) และการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ความหนาแน่นล่างของชั้นไอโอโนสเฟียร์ในวัฏจักรสุริยะที่ 24 รายละเอียดของแต่ละหน้าเว็บมีดังนี้

### 4.1 องค์ประกอบของโฮมเพจ

ชื่อของเว็บไซต์ของโครงการวิจัยนี้จะถูกเรียกย่อ ๆ คือ ศูนย์การเรียนรู้สภาพอากาศและภัยพิบัติ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรฯ (Learning Center for Weather and Disaster, KMITL PCC) โดยเมนูหลัก (main menu) ของโฮมเพจนี้ ประกอบไปด้วย

1. หน้าหลัก
2. ชั้นบรรยากาศ
3. สภาพอากาศ
4. ภัยพิบัติ
5. แบบจำลองและค่าข้อมูล
6. พายุแม่เหล็กโลก
7. บทความวิจัย
8. ติดต่อเรา

ทั้งนี้ เว็บเพจของศูนย์การเรียนรู้สภาพอากาศและภัยพิบัติที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะอยู่ภายใต้โดเมนเนม “<http://www.pcc.kmitl.ac.th/web-iono/>” ซึ่งนำไปเก็บไว้ในเซิร์ฟเวอร์ของ สจล. วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ เพื่อที่จะให้บริการข้อมูลสาธารณะแก่หน่วยงานที่เกี่ยวข้องและผู้สนใจ

#### 1. หน้าหลัก

หน้าหลักจะถูกแบ่งออกเป็น 2 เฟรมหลัก คือ เฟรมเนื้อหาทางซ้ายที่บรรยายถึงความสำคัญและที่มา วัตถุประสงค์ ขอบเขต ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ แผนการถ่ายทอดเทคโนโลยีหรือผลการวิจัยสู่กลุ่มเป้าหมาย ขั้นตอนการดำเนินงาน สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล เอกสารอ้างอิง ของโครงการวิจัยนี้ และเฟรมทางขวาที่เป็นตราสัญลักษณ์ (logo) ของหน่วยงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัยนี้ ดังแสดงในรูปที่ 4.1

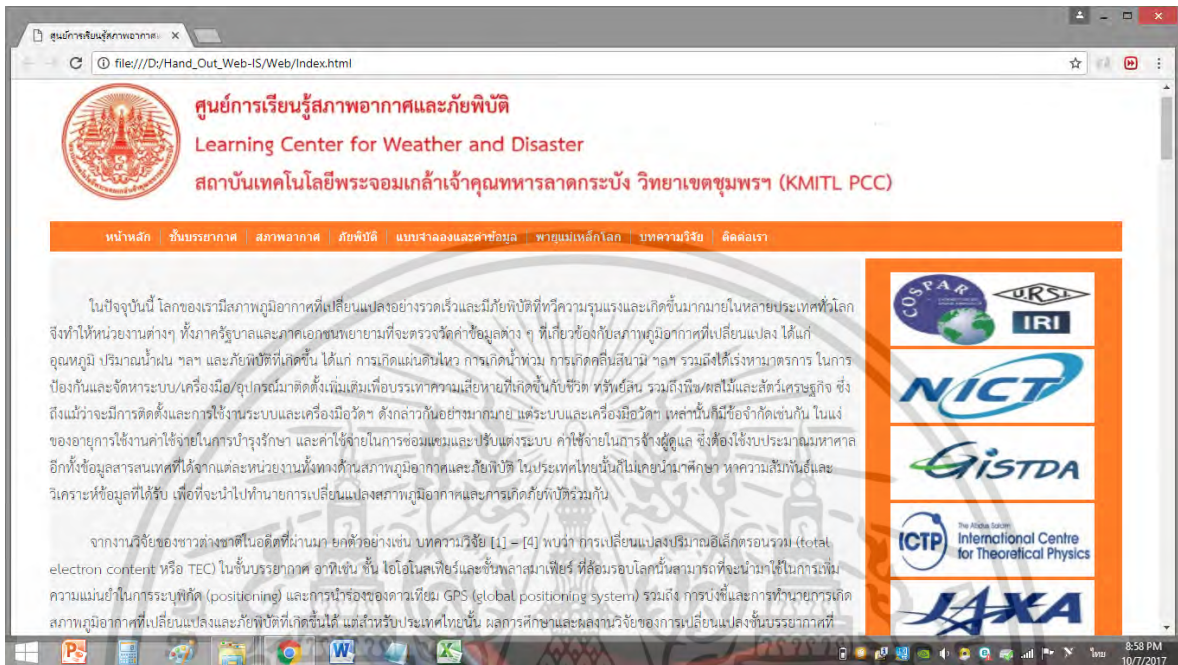
#### 2. ชั้นบรรยากาศ

หน้าเว็บนี้จะบรรยายชั้นบรรยากาศของโลก การแบ่งชั้นบรรยากาศของโลกออกเป็นชั้นย่อยต่าง ๆ 4 ลักษณะ รวมถึงประโยชน์ของแต่ละชั้นย่อยในทางปฏิบัติ โดยเนื้อหาส่วนใหญ่ในหน้าเว็บนี้ นำมาจาก <https://sites.google.com/site/sciencesittisak/content01/content011> ดังแสดงในรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. ชั้นบรรยากาศ

หน้าเว็บสภาพภูมิอากาศนี้จะบรรยายเกี่ยวกับสาเหตุการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ก๊าซเรือนกระจก สภาวะโลกร้อน ปริมาณน้ำฝนและระดับน้ำทะเล แอลนีโญและลานีญา ดังแสดงในรูปที่ 4.2 – 4.8

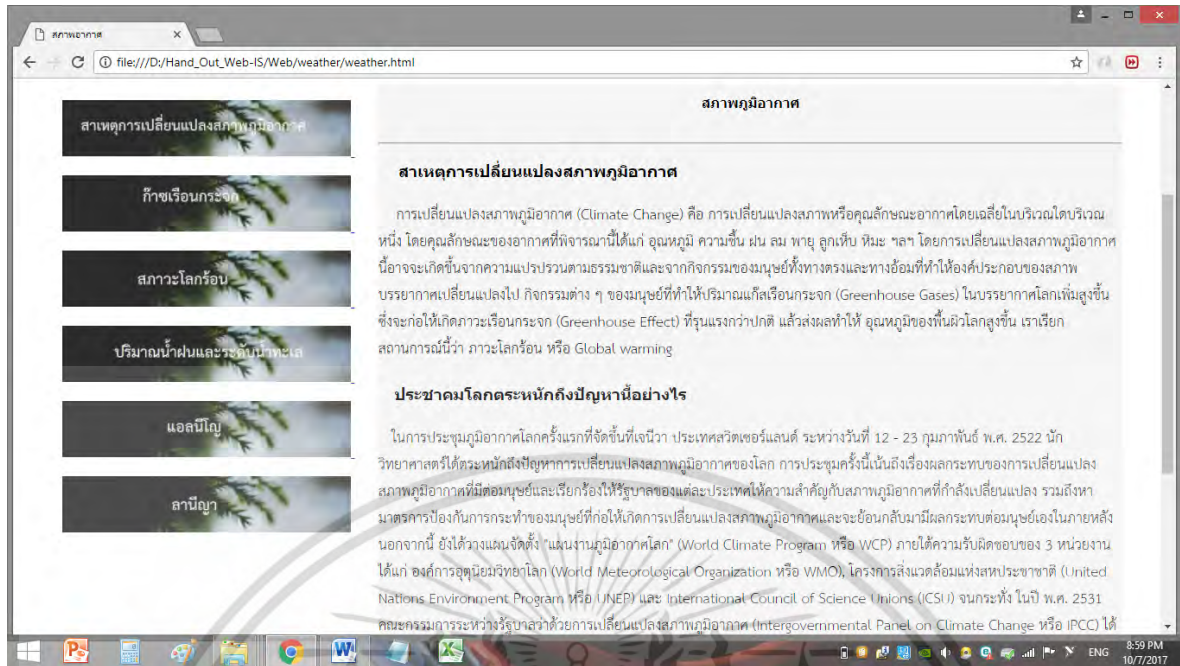


รูปที่ 4.1 หน้าเว็บเพจหลักของโครงการวิจัย

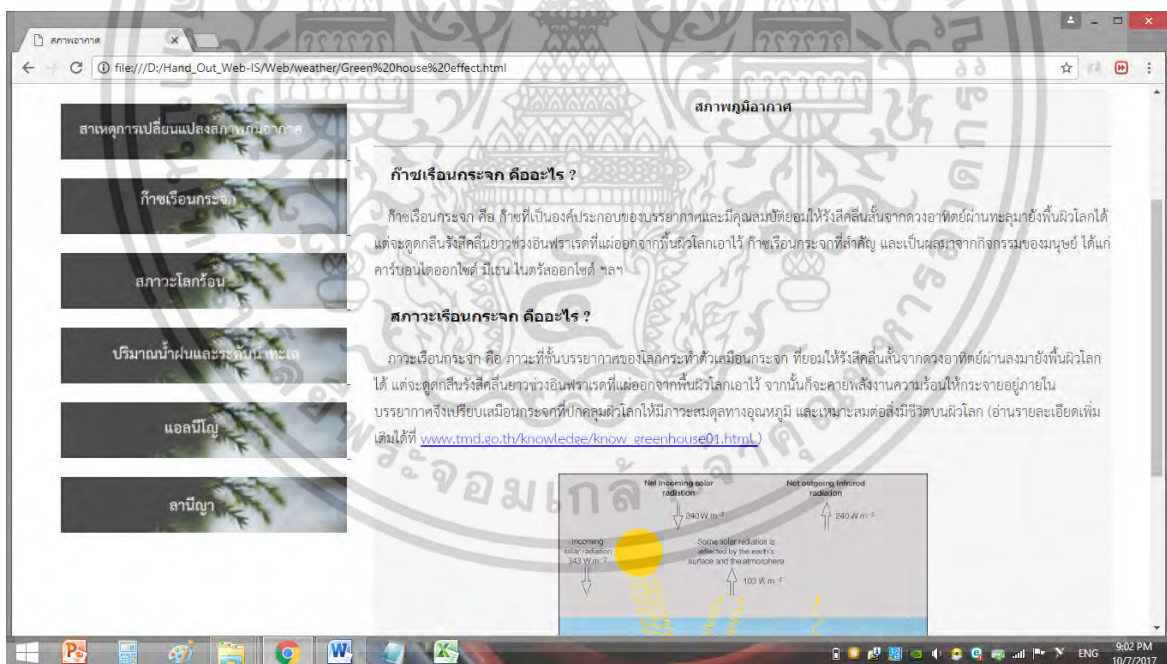


รูปที่ 4.2 หน้าเว็บชั้นบรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

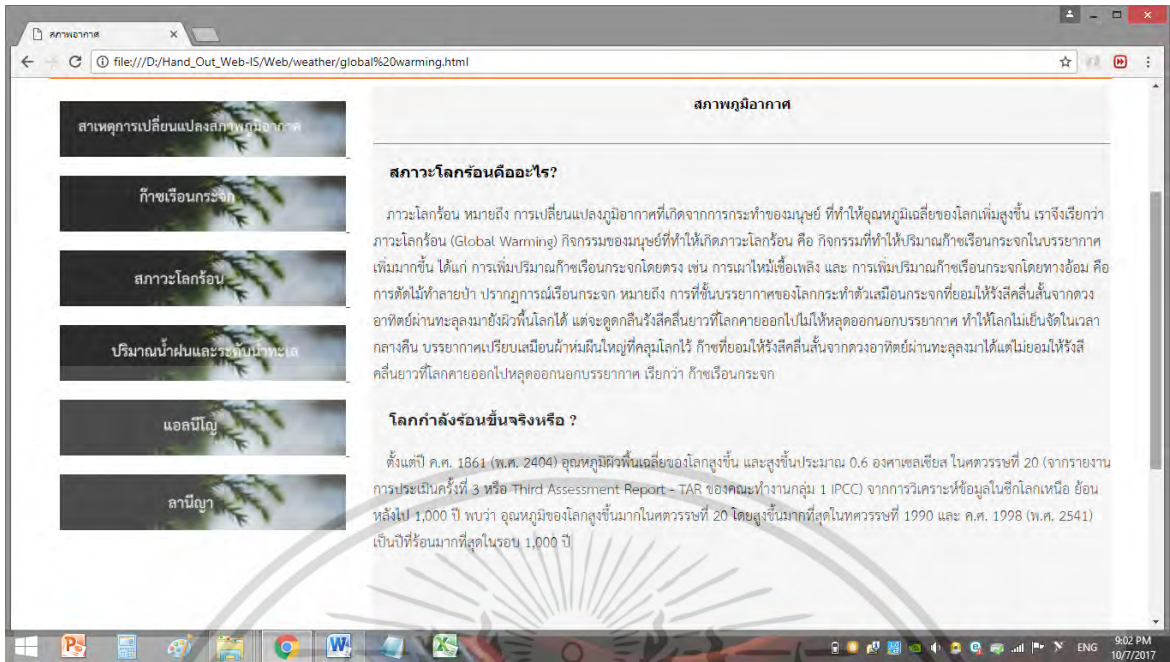


รูปที่ 4.3 หน้าเว็บสภาพภูมิอากาศ

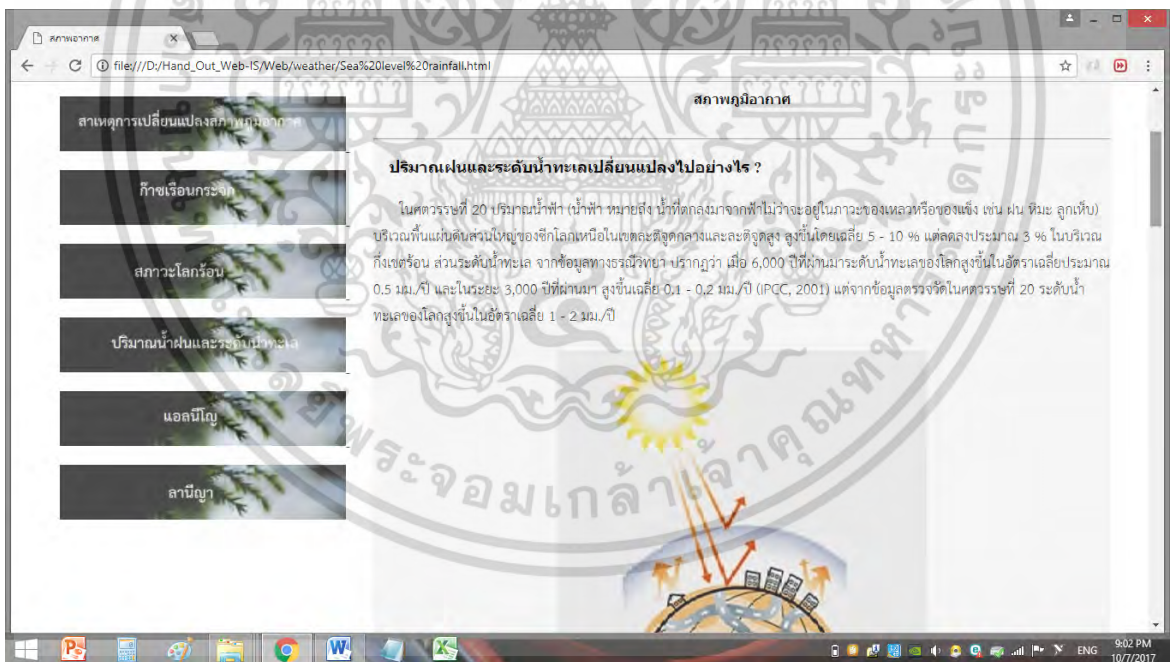


รูปที่ 4.4 หน้าเว็บก๊าซเรือนกระจก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

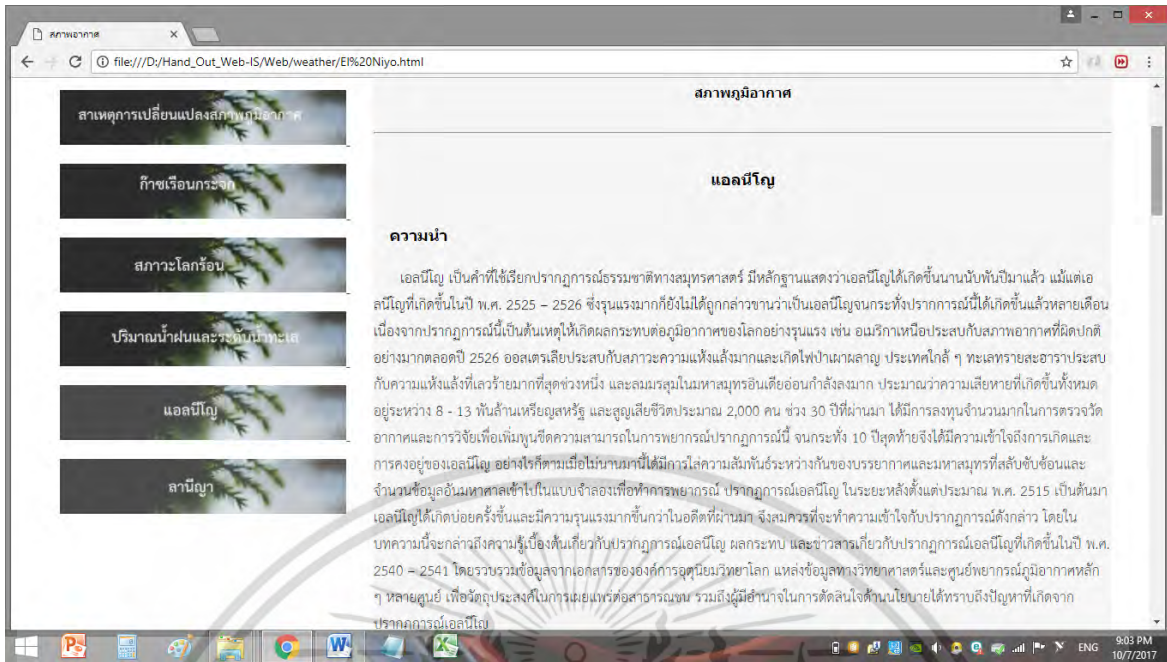


รูปที่ 4.5 หน้าเว็บสภาวะโลกร้อน

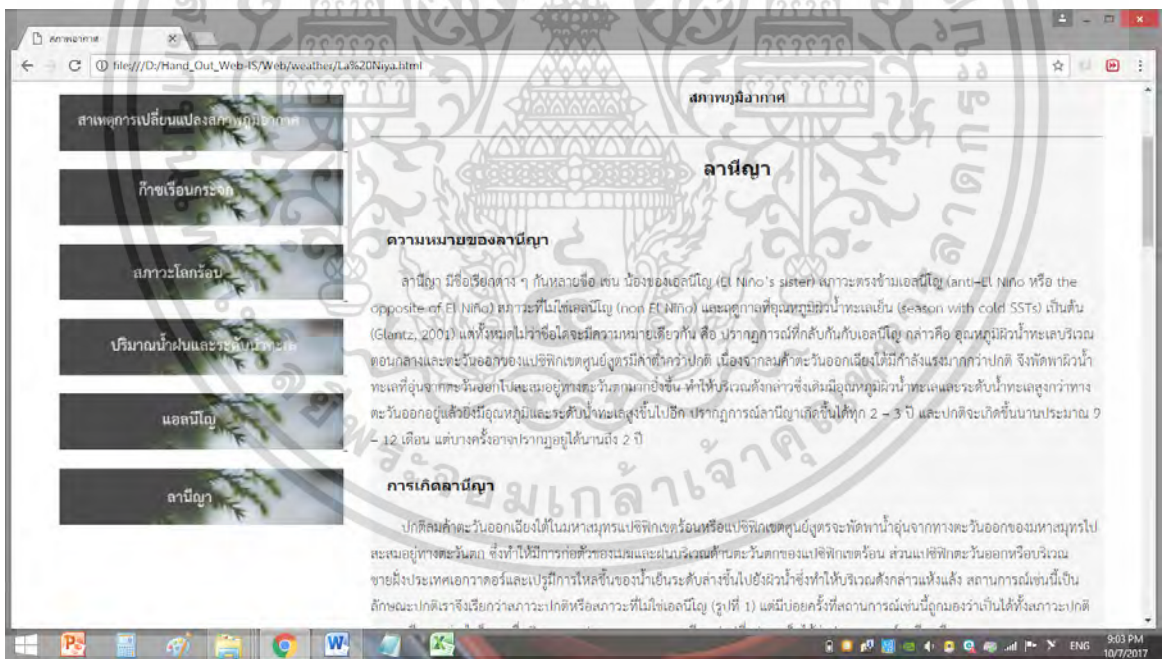


รูปที่ 4.6 หน้าเว็บปริมาณน้ำฝนและระดับน้ำทะเล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 หน้าเว็บเอลนีโญ



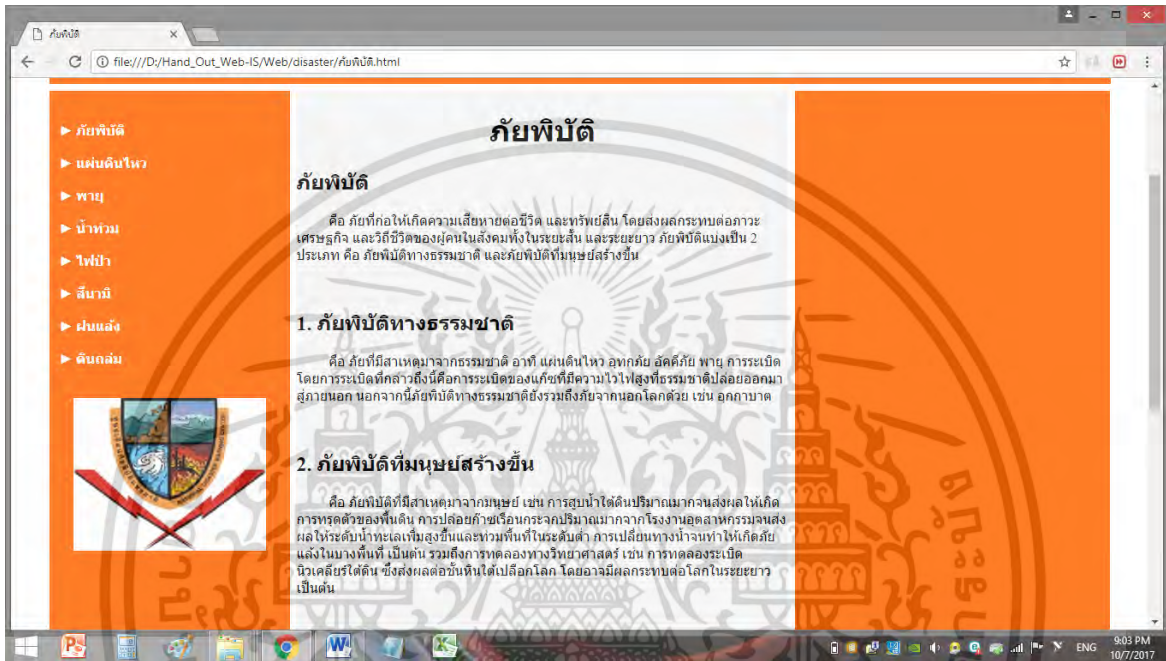
รูปที่ 4.8 หน้าเว็บลานีญา

#### 4. ภัยพิบัติ

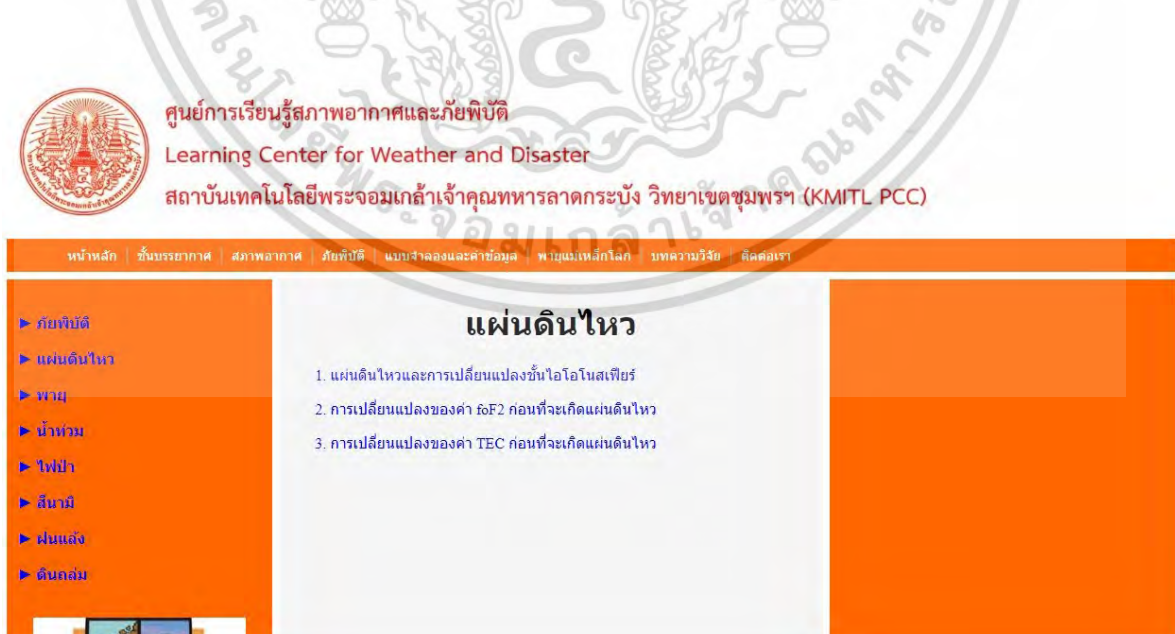
หน้าเว็บภัยพิบัตินี้จะบรรยายเกี่ยวกับภัยพิบัติ แผ่นดินไหว พายุ น้ำท่วม ไฟป่า สึนามิ ฝนแล้ง และดินถล่ม ซึ่งข้อมูลส่วนใหญ่นำมาจากเว็บศูนย์แจ้งเตือนภัยพิบัติแห่งชาติ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 นอกจากนี้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดแผ่นดินไหวและการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่เกี่ยวข้องกับแผ่นดินไหวจะนำเสนอในฟิลด์แผ่นดินไหว (รูปที่ 4.10) โดยเนื้อหาในเว็บเพจแผ่นดินไหวยังแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อ ได้แก่

1. แผ่นดินไหวและการเปลี่ยนแปลงชั้นไอโอโนสเฟียร์ - มีเว็บเพจแสดงในรูปที่ 4.11
2. การเปลี่ยนแปลงของค่า foF2 ก่อนที่จะเกิดแผ่นดินไหว - มีเว็บเพจแสดงในรูปที่ 4.12
3. การเปลี่ยนแปลงของค่า TEC ก่อนที่จะเกิดแผ่นดินไหว - มีเว็บเพจแสดงในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.9 หน้าเว็บภัยพิบัติ



รูปที่ 4.10 เว็บเพจที่เข้าสู่หัวข้อ “แผ่นดินไหว” ในฟิลด์ภัยพิบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ศูนย์การเรียนรู้สภาพอากาศและภัยพิบัติ

Learning Center for Weather and Disaster

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรฯ (KMITL PCC)

หน้าหลัก | ชั้นบรรยากาศ | สภาพอากาศ | ภัยพิบัติ | แบบจำลองและคำอธิบาย | พายุแม่เหล็กโลก | บทความวิจัย | ติดต่อเรา

- ▶ ภัยพิบัติ
- ▶ แผ่นดินไหว
- ▶ พายุ
- ▶ น้ำท่วม
- ▶ ไฟป่า
- ▶ สึนามิ
- ▶ ฝนแล้ง
- ▶ ดินถล่ม



### แผ่นดินไหวและการเปลี่ยนแปลงชั้นไอโอโนสเฟียร์

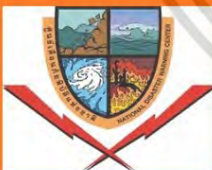
แผ่นดินไหว (earthquakes) เป็นภัยพิบัติทางธรรมชาติที่เป็นเหตุให้เกิดความเสียหายที่รุนแรงชีวิตและทรัพย์สินของมนุษย์ สาเหตุของแผ่นดินไหว ได้แก่ แผ่นดินไหวแบบที่เกิดแรงเทคโทนิค (tectonic forces) การระเบิดของภูเขาไฟ การทำเหมือง ฯลฯ โดยทั่วไปผลที่เกิดจากแรงเทคโทนิคนี้มีอิทธิพลมากที่สุด ที่ซึ่งผลของมันเป็นการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกร่วมกับการสะสมพลังงานภายในพื้นโลก ขนาดของแผ่นดินไหว (M) สามารถที่จะแบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด ได้แก่

1. ระดับความรุนแรงท้องถิ่น (ไม่มาก) – ML
2. ระดับความรุนแรงคลื่นบอดี้ – MB
3. ระดับความรุนแรงคลื่นพื้นผิว – MS

รูปที่ 4.11 เว็บไซต์แผ่นดินไหวและการเปลี่ยนแปลงในชั้นไอโอโนสเฟียร์

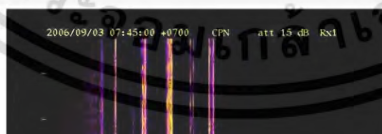
หน้าหลัก | ชั้นบรรยากาศ | สภาพอากาศ | ภัยพิบัติ | แบบจำลองและคำอธิบาย | พายุแม่เหล็กโลก | บทความวิจัย | ติดต่อเรา

- ▶ ภัยพิบัติ
- ▶ แผ่นดินไหว
- ▶ พายุ
- ▶ น้ำท่วม
- ▶ ไฟป่า
- ▶ สึนามิ
- ▶ ฝนแล้ง
- ▶ ดินถล่ม



### การเปลี่ยนแปลงของค่า foF2 ก่อนที่จะเกิดแผ่นดินไหว

ในหัวข้อนี้ จะกล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าความถี่วิกฤตในชั้น F2 (foF2) ก่อนที่จะเกิดแผ่นดินไหว โดยค่า foF2 เป็นค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 ที่สามารถจะสะท้อนกับมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ที่วัดได้ด้วยไอโอโนซอนด์ (Barnes and Leonard, 1965) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 โดยไอโอโนซอนด์สามารถส่งและรับคลื่นวิทยุย่านความถี่สูง (HF) ตั้งแต่ 2 – 30 MHz ด้วยการเพิ่มความถี่ขึ้นครั้งละ 100 kHz ต่อวินาที แต่ละรอบจะใช้เวลาประมาณ 5 นาที ความถี่ที่สะท้อนกลับจากชั้นไอโอโนสเฟียร์มายังเครื่องรับนั้นจะถูกแสดงค่าออกมาเป็นแผนภาพไอโอโนแกรมที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความสูงเสมือน (virtual height) กับความถี่วิกฤต ดังแสดงในรูปที่ 2.11 (Wakai, Ohiyama, and Kozumi, 1987) โดยในที่นี้ เราจะใช้โปรแกรม special-100C-2000-eng.exe เพื่อแปลค่าความสูงเสมือนกับค่าความถี่วิกฤตของชั้น E และชั้น F



รูปที่ 4.12 เว็บไซต์การเปลี่ยนแปลงของค่า foF2 ก่อนที่จะเกิดแผ่นดินไหว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าหลัก | ชั้นบรรยากาศ | สภาพอากาศ | ภัยพิบัติ | แบบจำลองและค่าข้อมูล | พายุแม่เหล็กโลก | บทความวิจัย | ติดต่อเรา

▶ ภัยพิบัติ  
 ▶ แผ่นดินไหว  
 ▶ พายุ  
 ▶ น้ำท่วม  
 ▶ ไฟป่า  
 ▶ สึนามิ  
 ▶ ฝนแล้ง  
 ▶ ดินถล่ม

### การเปลี่ยนแปลงของค่า TEC ก่อนที่จะเกิดแผ่นดินไหว

การเกิดแผ่นดินไหวเป็นหนึ่งในปรากฏการณ์สำคัญที่มักส่วและเป็นอันตรายที่สุดของธรรมชาติ ในประวัติศาสตร์แผ่นดินไหวได้คร่าชีวิตผู้คน ไปมากมายและทำลายชุมชนหลายแห่ง ในช่วง 100 ปีที่ผ่านมาได้มีการเกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่โดยเฉลี่ยประมาณ 18 ครั้ง (ขนาด 7.0-7.9) ในแต่ละปี (<http://earthquake.usgs.gov>) การศึกษาล่าสุดโดยใช้ข้อมูลจากมัลติเซ็นเซอร์ได้แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงอย่างเด่นชัดเกิดขึ้นบนพื้นผิวของโลก กรมอุตุนิยมวิทยา บรรยากาศและ ionospheric parameters ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นในประเทศจีน รัสเซีย ญี่ปุ่น ไต้หวัน และยุโรป การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับแผ่นดินไหวที่ใกล้เข้ามา มีการใช้พารามิเตอร์หลายอย่างในการทำนายแผ่นดินไหวโดยใช้ปรากฏการณ์หลายอย่าง เช่น รูปแบบการเกิดแผ่นดินไหว-สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (seismo-magnetic) การเคลื่อนไหวภาคพื้นดินและเมฆที่ผิดปกติ และการสำรวจอากาศตามการเร่งรัดของอิเล็กตรอนที่มีพลัง ฯลฯ การพยากรณ์แผ่นดินไหวเป็นเรื่องที่ล้อมรอบไปด้วยความขัดแย้งและความสงสัย ความคืบหน้าอย่างมีนัยสำคัญเกิดขึ้นจากการ

รูปที่ 4.13 เว็บเพจการเปลี่ยนแปลงของค่า TEC ก่อนที่จะเกิดแผ่นดินไหว

## 5. แบบจำลองและค่าข้อมูล

หน้าเว็บแบบจำลองและค่าข้อมูลนี้จะบรรยายเกี่ยวกับแบบจำลอง International Reference Ionosphere (IRI) และแบบจำลอง NeQuick 2 รวมถึงวิธีการใช้งานและตัวอย่างค่าข้อมูลที่สามารถเอาไปใช้งานได้ของทั้ง 2 แบบจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.14 – 4.15 นอกจากนี้ ยังมีการแสดงแบบจำลองคำนวณค่า B2botP ในฟิลด์ “แบบจำลองและค่าข้อมูล” ด้วย ในที่นี้ ตัวย่อ B2botP หมายถึง ค่าพารามิเตอร์ความหนาของชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านล่างที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ที่บรรยายไว้ในบทที่ 3

ศูนย์การเรียนรู้สภาพอากาศและภัยพิบัติ  
 Learning Center for Weather and Disaster  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรฯ (KMITL PCC)

หน้าหลัก | ชั้นบรรยากาศ | สภาพอากาศ | ภัยพิบัติ | แบบจำลองและค่าข้อมูล | พายุแม่เหล็กโลก | บทความวิจัย | ติดต่อเรา

### International Reference Ionosphere (IRI) model

The International Reference Ionosphere (IRI) model, a famous empirical ionospheric model, provides the monthly median values of several ionospheric parameter, such as peak height, plasma frequency, electron density, total electron content, electron and ion temperature, and ion compositions, etc. for given location, time, and sunspot number (Blitz, 2001). The committee on Space Research (COSPAR) and the International Union of Radio Science (IURSO) who established the IRI models have still developed and updated a series of IRI models. In the latest version, IRI-2012 model, more improvements have been made, for example, the new models for the bottomside thickness parameter (B0) and shape parameter (B1), the electron density in the bottomside ionosphere (Blitz et al., 2014). Many data sources are taken to be account for improving and updating the IRI model, such as, digisonde/ionosonde networks, ISIS and Alouette topside sounder, incoherent scatter radars (ISRs), and in situ instruments using ground stations, rockets, or satellites.

Moreover, the IRI model has used two different sub-routines of computer programs to provide two different F peak models predicting any peak values of F layer, i.e., a model of the International Union of Radio Science (IURSO) developed by Rush et al. (1989) and another model of the International Radio Consultative Committee (CCIR) developed by several researchers of CCIR. Two computational maps of IURSI and CCIR models are based on spherical harmonics-based mapping techniques, the 12-month running mean relative sunspot numbers (Rz12), and the data sources from worldwide network of ionosondes. Hence, the maps of both models are enable to desc

รูปที่ 4.14 หน้าเว็บ International Reference Ionosphere (IRI)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





ศูนย์การเรียนรู้สภาพอากาศและภัยพิบัติ

Learning Center for Weather and Disaster

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร (KMITL PCC)

รูปที่ 4.15 หน้าเว็บแบบจำลอง NeQuick 2

ในเว็บเพจแบบจำลองคำนวณค่า B2botP นั้น จะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 2 หัวข้อ ได้แก่ โค้ดเมทแลบที่ใช้หาค่า B2botP และแบบจำลองการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ความหนาของชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านล่าง โดยเว็บเพจของแบบจำลองคำนวณค่า B2botP มีแสดงไว้ในรูปที่ 4.16 ซึ่งมีการแสดงโค้ดเมทแลบและหน้าโปรแกรม guide ของเมทแลบเพื่อคำนวณค่า B2botP หลังจากที่ย้อนค่าต่าง ๆ ที่วัดได้แล้ว

ในการคำนวณค่า B2botP ด้วยโปรแกรม guide นั้น เราจะทำการป้อนค่าข้อมูลต่าง ๆ ที่วัดได้ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.17 โดยพารามิเตอร์ที่ป้อนเข้าไปในแบบจำลองดังกล่าว ได้แก่

1. foF2 คือ ค่าความถี่วิกฤตชั้น F2
2. hmF2 คือ ค่าความสูง ณ ตำแหน่งที่ NmF2 มีค่าสูงสุดในชั้น F2
3. Rz12 คือ ค่าจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์โดยเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 12 เดือน
4. TEC คือ ค่า Ionospheric TEC

## 6. พายุแม่เหล็กโลก

หน้าเว็บพายุแม่เหล็กโลกนี้จะยกตัวอย่างวันที่เกิดพายุแม่เหล็กโลกและคุณลักษณะต่าง ๆ ที่สำคัญของพายุแม่เหล็กโลกนั้น ๆ ยกตัวอย่างเช่น จะกล่าวถึง พายุแม่เหล็กโลกที่เกิดขึ้นอย่างรุนแรงมากในวันที่ 15 - 17 มีนาคม พ.ศ. 2560 รวมถึงพายุ TEC และ พายุ SED ที่ตรวจจับได้ด้วยเครื่องมือวัดต่าง ๆ ที่ประเทศญี่ปุ่น ดังแสดงในรูปที่ 4.18 - 4.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ศูนย์การเรียนรู้สภาพอากาศและภัยพิบัติ

Learning Center for Weather and Disaster

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรฯ (KMITL PCC)

หน้าหลัก | ชั้นบรรยากาศ | สภาพอากาศ | ภัยพิบัติ | แบบจำลองและค่าข้อมูล | พายแม่เหล็กโลก | บทความวิจัย | ติดต่อเรา

แบบจำลอง IRI

แบบจำลอง NeQuick

การคำนวณค่า B0

แบบจำลองคำนวณค่า B2botP

1. โค้ดแม่แบบที่ใช้หาค่า B2botP

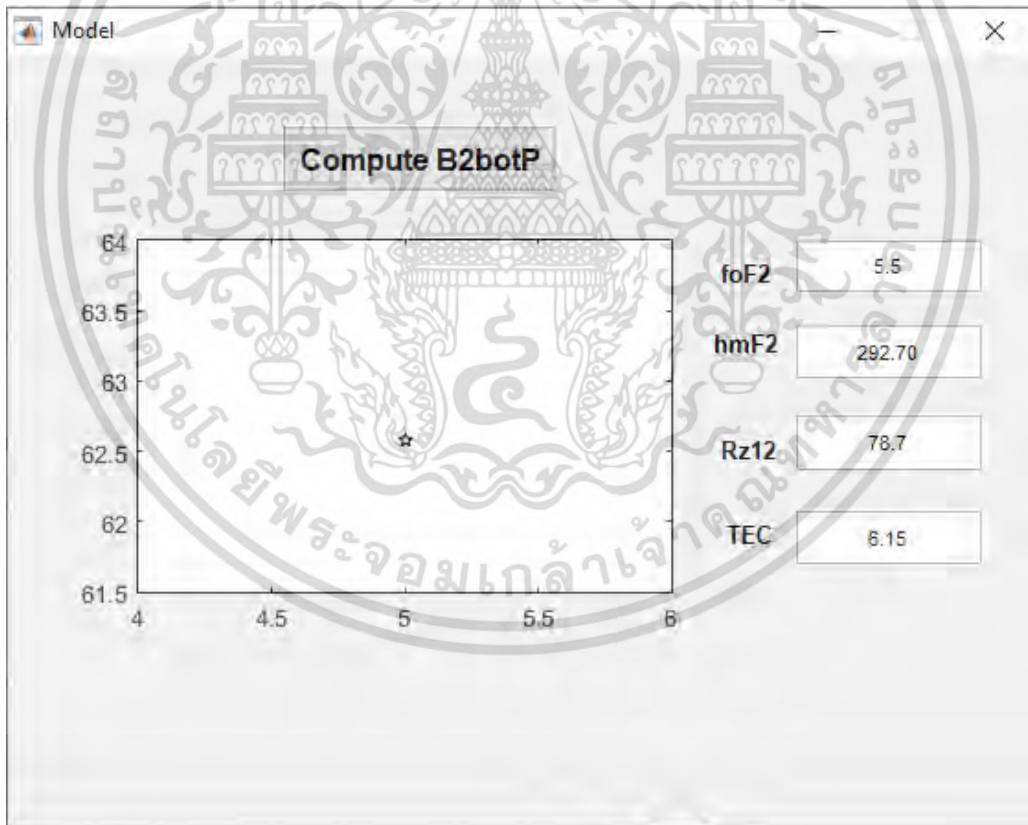
โค้ดแม่แบบ (MATLAB) ที่ใช้ในการคำนวณหาค่า B2botP\_old และค่า B2botP\_new มีแสดงไว้ในรูปที่ 1 และผลการรันโค้ดนี้มีแสดงไว้ในรูปที่ 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่า "ค่า B2botP\_new มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่า B0\_obs และการเปลี่ยนแปลงรายวันของค่า B2botP\_new ก็มีแนวโน้มที่เหมือนกับ การเปลี่ยนแปลงรายวันของค่า B0\_obs ด้วย" นั่นก็แสดงให้เห็นว่าค่าความหนาแน่นล่างที่นำเสนอในสมการที่ (3.8) นั้นสามารถนำมาใช้เพื่อหาค่า B0 ในทางปฏิบัติ (B0\_obs) ได้

```

M = load('DB_Port_20032014.txt') % This file is obtained from GIRO of DIDbase
M1 = M(:,1); % foF2
M2 = M(:,2); % hmF2
M3 = M(:,3); % TEC
M4 = M(:,4); % Hm
M5 = M(:,5); % B0
m = 1;
for i = 1:1
foF2(:,i) = M1(m:24*i);
hmF2(:,i) = M2(m:24*i);

```

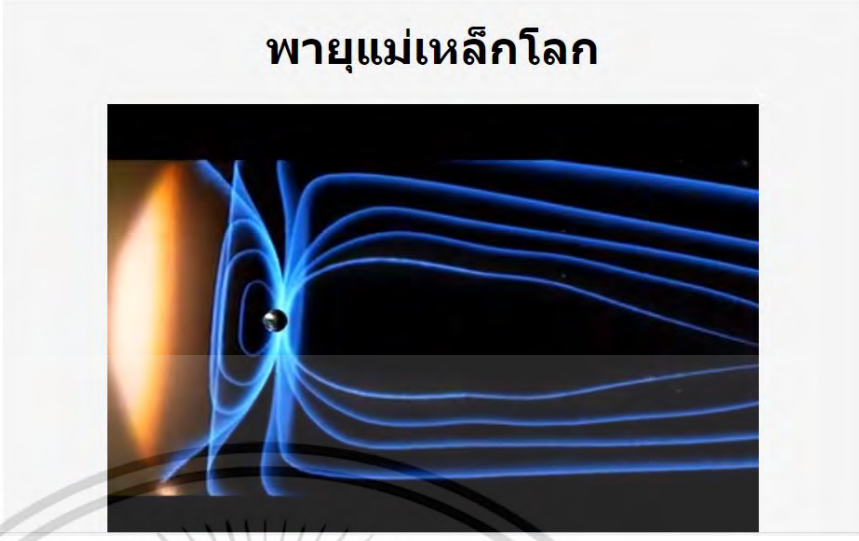
รูปที่ 4.16 เว็บไซต์ของแบบจำลองคำนวณค่า B2botP



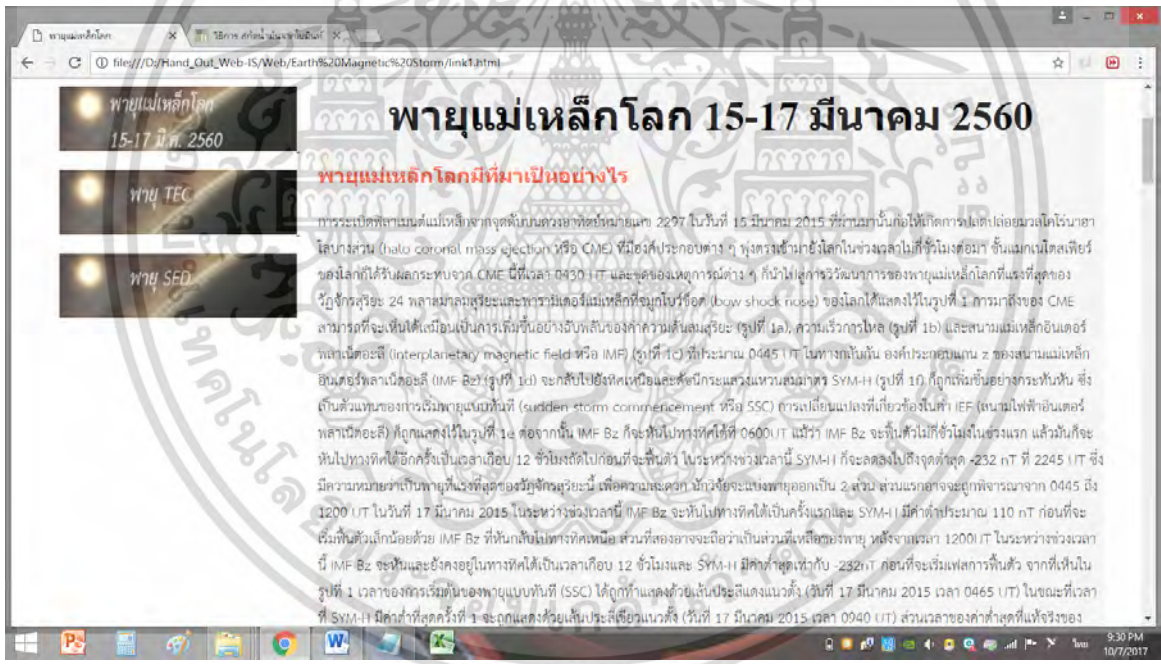
รูปที่ 4.17 โปรแกรม guide ที่ใช้คำนวณหาค่า B2botP

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ☀️ พายุแม่เหล็กโลก  
15-17 มี.ค. 2560
- ☀️ พายุ TEC
- ☀️ พายุ SED



รูปที่ 4.18 หน้าเว็บพายุแม่เหล็กโลก

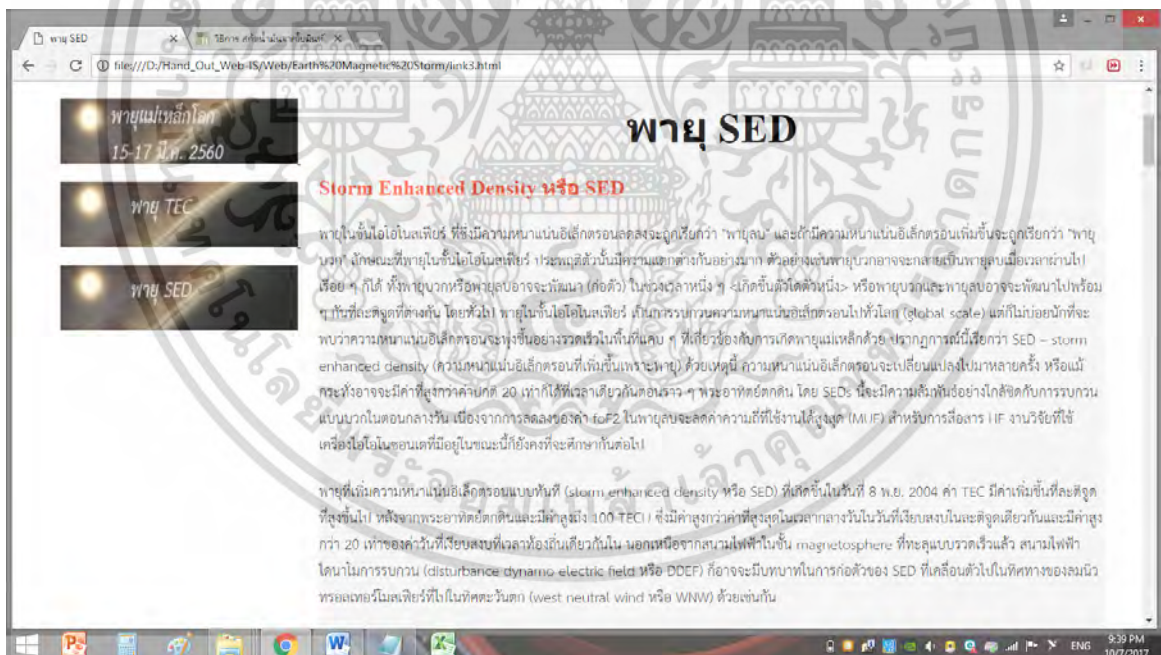


รูปที่ 4.19 หน้าเว็บพายุแม่เหล็กโลกที่เกิดขึ้นในวันที่ 15 – 17 มีนาคม พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 หน้าเว็บพายุ TEC (TEC Storm)

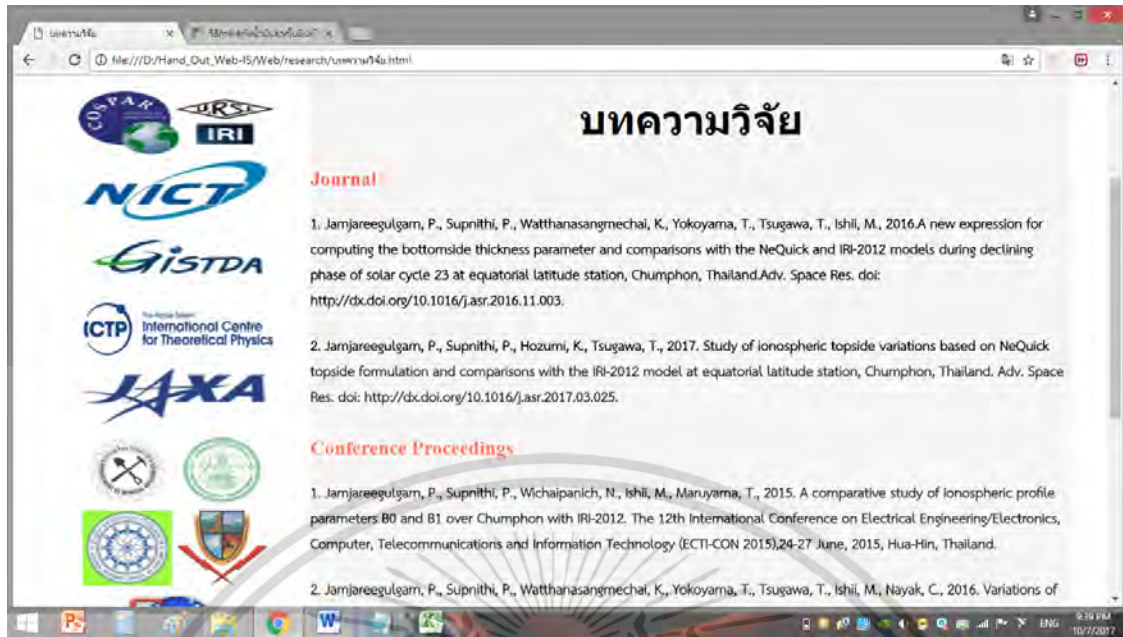


รูปที่ 4.21 หน้าเว็บพายุ SED (Storm Enhanced Density)

## 7. บทความวิจัย

หน้าเว็บบทความวิจัยนี้จะแสดงผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่โดยทีมผู้วิจัย ดังแสดงในรูปที่ 4.22

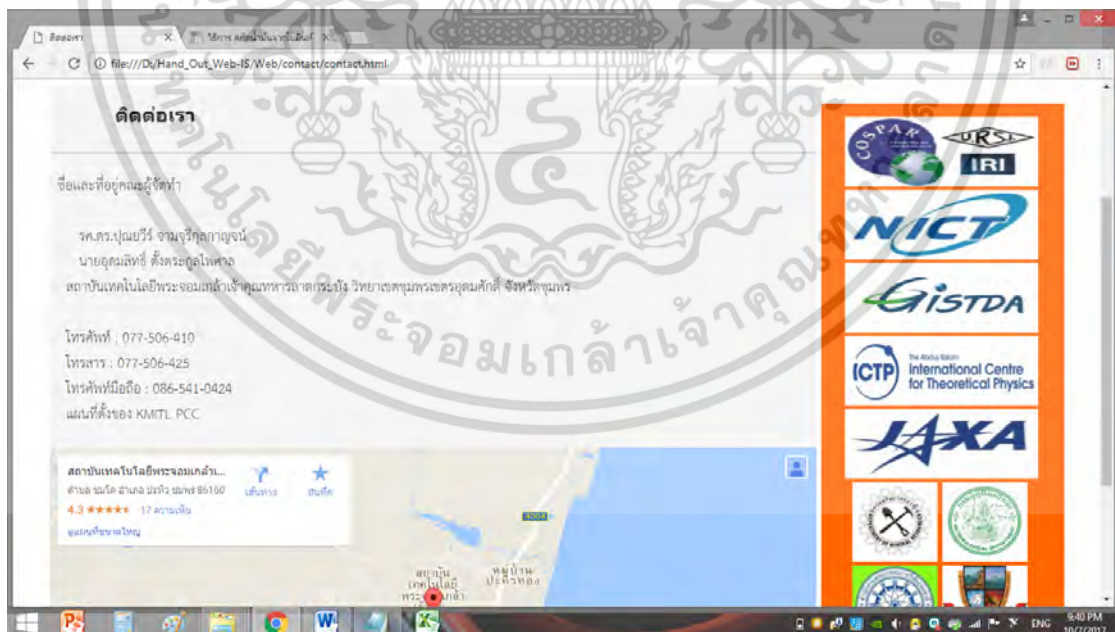
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 หน้าเว็บบทความวิจัย

## 8. เกี่ยวกับเรา

หน้าเว็บเกี่ยวกับเรานี้จะแสดงชื่อและที่อยู่คณะผู้จัดทำโครงการวิจัยนี้ ดังแสดงในรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 หน้าเว็บเกี่ยวกับเรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ความหนาด้านล่าง

รูปที่ 4.24 - 4.26 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ความหนาด้านล่างที่สถานี Jicamarca ในแต่ละวันของทั้ง 3 ฤดูกาลในปี 2014 ตามลำดับ จากผลการศึกษา พบว่า การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่า B2bot ใหม่ที่คำนวณได้จากสมการที่นำเสนอ (B2P\_2) มีแนวโน้มเดียวกับค่า B0 ที่สังเกตได้ และค่า B2P\_2 มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่า B0 ที่สังเกตได้ทุกฤดูกาลเมื่อเปรียบเทียบกับพารามิเตอร์ตัวอื่น ในขณะที่ ค่า B2bot เดิม (B2\_NeQ) มีค่าที่สูงกว่าค่า B0 ที่สังเกตได้ทุกฤดูกาลและมีค่าที่สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับพารามิเตอร์ตัวอื่น นอกจากนี้ ท่ามกลางพารามิเตอร์ B0 ที่ทำนายได้จากแบบจำลอง IRI-2012 ค่า B0\_Gul มีค่าที่ใกล้กับค่า B0 ที่สังเกตได้ในช่วงเวลา 00-09 LT และ 16-23 LT ในฤดูหนาวและฤดูออกวินอกซ์ ผลที่น่าสนใจคือว่า การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของพารามิเตอร์ทุกตัวที่ศึกษาในงานวิจัยนี้มีแนวโน้มเดียวกับค่า B0 ที่สังเกตได้ในฤดูร้อน โดย B2\_NeQ ส่วนใหญ่จะเป็นค่าที่มากที่สุด ในฤดูหนาวและฤดูออกวินอกซ์ ในขณะที่ ค่า B2\_NeQ, ค่า B0\_Bil และค่า B0\_ABT มักจะเป็นค่าที่สูงกว่าค่า B0 ที่สังเกตได้, ค่า B2P\_2, ค่า B0\_Gul เสมอในฤดูร้อนอย่างเห็นได้ชัด นอกจากนี้ จุดที่ต่ำที่สุดของพารามิเตอร์ความหนาด้านล่างทุกตัวจะมีให้เห็นในช่วงเวลา 00-04 LT ค่า B0 ที่สังเกตได้มีค่าสูงสุดในแต่ละวันที่เวลาประมาณ 11 LT ในฤดูออกวินอกซ์และฤดูร้อน และมีค่าสูงสุดในแต่ละวันที่เวลาประมาณ 18 LT ในฤดูหนาว ค่า IRI B0 ที่ทำนายได้มีค่าสูงสุดในแต่ละวันที่เวลาเที่ยงวัน ในขณะที่ค่า B2P\_2 และค่า B2\_NeQ มีค่าสูงสุดในแต่ละวันที่ประมาณ 14-19 LT นอกจากนี้ ค่า AD\_B ในฤดูร้อนมีค่าต่ำกว่า 30 กิโลเมตรเสมอ ในขณะที่ค่า AD\_B โดยส่วนใหญ่จะมีค่าที่ต่ำกว่า 30 กิโลเมตรตลอดทั้งวันในฤดูหนาวและฤดูออกวินอกซ์ ยกเว้นช่วงเวลา 12-20 LT โดยช่วงเวลา 12-20 LT นี้ ค่า AD\_B มีค่าประมาณ 31 – 76 กิโลเมตรอย่างน่าประหลาดใจ

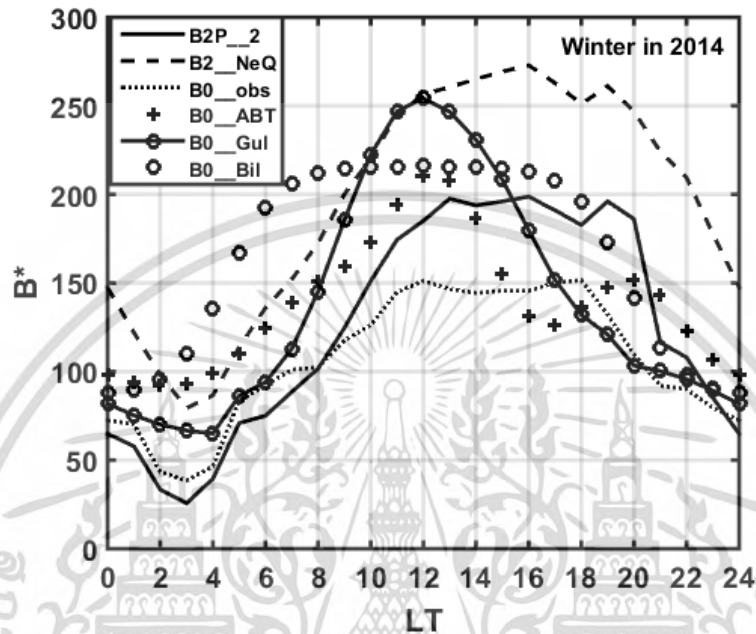
บทสรุปผลการศึกษาในเบื้องต้นที่สถานี Jicamarca สามารถที่จะกล่าวโดยภาพรวมได้ดังนี้ ค่า B2P\_2 มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่า B0 ที่สังเกตได้เมื่อเทียบกับค่า B2bot เดิม (B2\_NeQ) ค่า B2P\_2 ในแต่ละวันมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ใกล้เคียงกับค่า B0 ที่สังเกตได้เมื่อเทียบกับค่า B2\_NeQ เช่นกัน ดังนั้น ค่า B2P\_2 จึงเป็นค่าที่นักวิจัยแนะนำให้ถูกนำมาใช้แทนที่ค่า B2bot เดิม (B2\_NeQ) อย่างไรก็ตาม ความแตกต่าง (discrepancy) ระหว่างค่า B2P\_2 และค่า B0 ที่สังเกตได้ที่สถานี Jicamarca มีค่าที่มากในช่วงเวลา 12-20 LT ของฤดูหนาวและฤดูออกวินอกซ์อย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ ค่าความแตกต่างระหว่างค่า B2P\_2 และค่า B0 ที่สังเกตได้ไม่มีปรากฏที่สถานี Ramey (สถานีที่อยู่ทางด้านเหนือของยอด EIA) ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ผลความแตกต่างที่มากที่สถานี Jicamarca นี้สร้างประเด็นที่น่าสนใจที่นำไปสู่การวิเคราะห์และวิจารณ์เพิ่มเติมว่า “เพราะเหตุใดจึงเกิดผลความแตกต่างที่มากดังกล่าวที่สถานี Jicamarca ที่ตั้งอยู่ใกล้กับทางด้านใต้ของยอด EIA”

รูปที่ 4.27 แสดงการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่า B2P\_2, ค่า B2P\_1 และค่า B0 ที่สังเกตได้ทุกฤดูกาลในปี 2014 ที่สถานี Ramey โดยค่า IRI B0 และค่า B2\_NeQ จะไม่ถูกนำมาพิจารณาในกรณีนี้ เนื่องจากเป้าหมายของงานวิจัยนี้คือต้องการที่จะแสดงการไม่ปรากฏค่าความแตกต่างระหว่างค่า B2P\_2 และค่า B0 ที่สังเกตได้ที่สถานี Ramey เมื่อเทียบกับสถานี Jicamarca พบว่า การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวัน

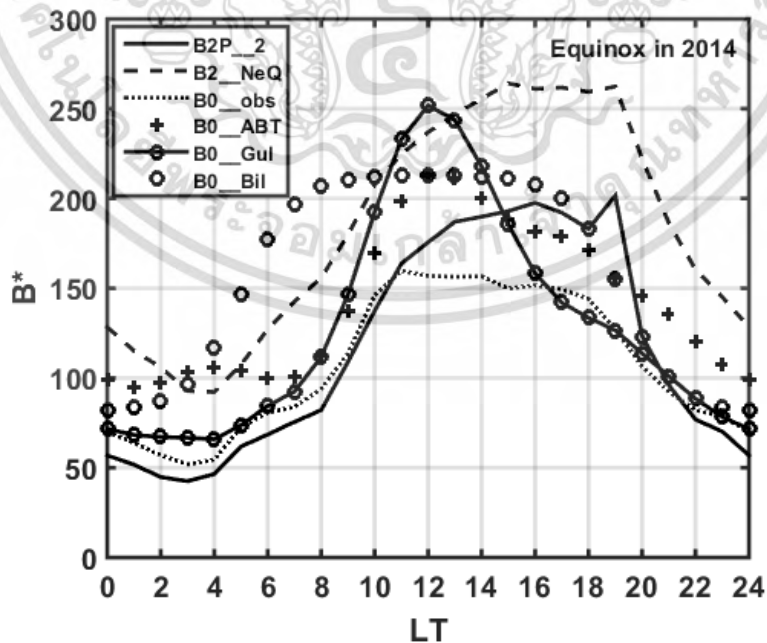
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในพิธีการเชิงวิชาการเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเห็นประโยชน์ของเอกสารนี้ กรุณาแจ้งให้ทราบ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

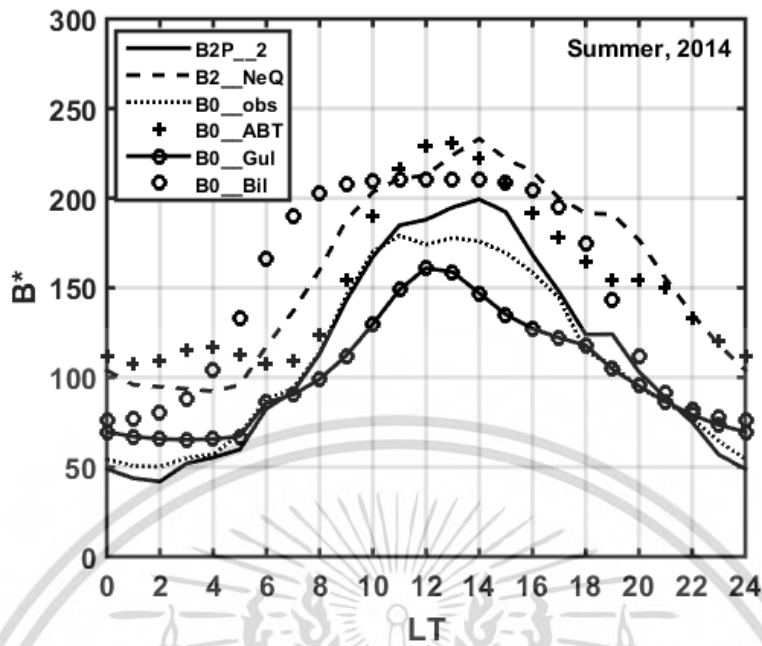
ของค่า B2P\_2 มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงและมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่า B0 ที่สังเกตได้ทุก ๆ ฤดูกาลเมื่อเทียบกับค่า B2P\_1 ทั้งค่า B2P\_2 และค่า B0 ที่สังเกตได้เริ่มต้นที่จะมีค่าที่สูงขึ้นตั้งแต่ตอน 00-04 ในทุกฤดูกาล แต่ค่าสูงสุดในแต่ละวันเกิดขึ้นที่เวลาท้องถิ่นต่างกันในแต่ละฤดูกาล โดยค่าสูงสุดในแต่ละวันเกิดขึ้นตอน 13-15 LT, 08 LT, และ 10-11 LT ในฤดูหนาว ฤดูอิควินอกซ์และฤดูร้อน ตามลำดับ



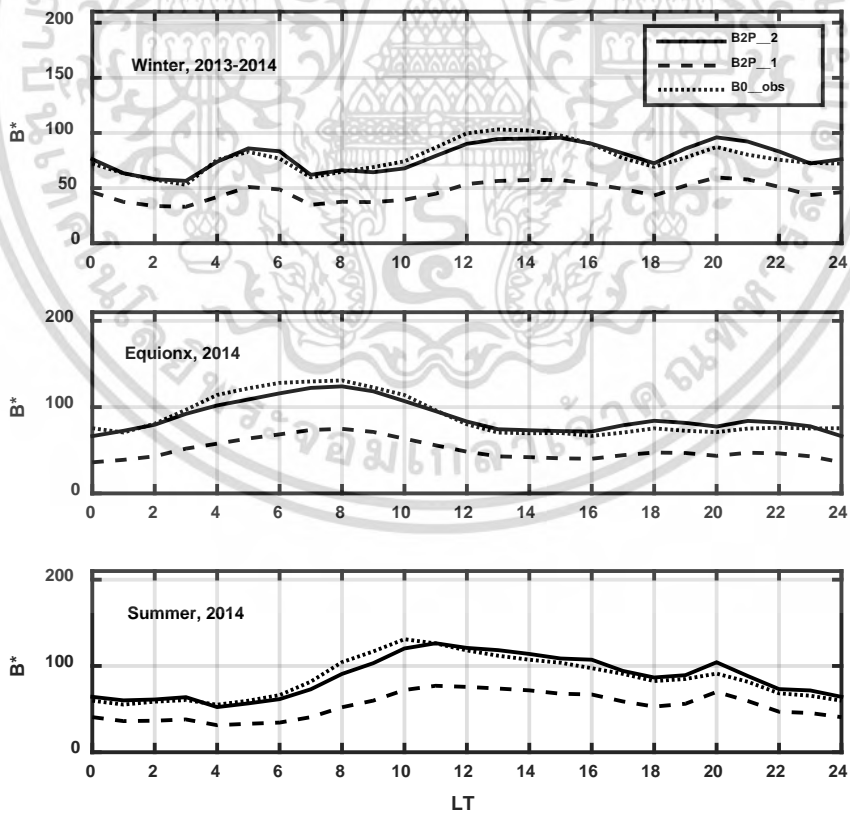
รูปที่ 4.24 การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านกลางวันในฤดูหนาวที่สถานี Jicamarca



รูปที่ 4.25 การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านกลางวันในฤดูอิควินอกซ์ที่ Jicamarca  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 การเปลี่ยนแปลงองค์พารามิเตอร์ความหนาแน่นในฤดูร้อนที่ Jicamarca



รูปที่ 4.27 การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นที่สถานี Ramey

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



นอกจากนี้ ค่า AD<sub>B</sub> ที่สถานี Ramey มีค่าที่น้อยตั้งแต่ 0.07–13.63 กิโลเมตร โดยค่า AD<sub>B</sub> ที่ต่ำที่สุดโดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่เวลา 11 LT ในขณะที่ ค่า AD<sub>B</sub> ที่สูงที่สุดจะเกิดขึ้นที่เวลาต่าง ๆ กัน สำหรับค่าปรับแก้ (correction factor) ของสมการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะพิจารณาอยู่ในรูปค่าคงที่ c พบว่า ค่า c ที่สถานี Jicamarca มีค่าเท่ากับ 0.129, 0.157 และ 0.188 ในฤดูหนาว ฤดูอควินอกซ์ และ ฤดูร้อน ตามลำดับ ค่า c เฉลี่ยทุกฤดูกาลที่สถานี Jicamarca มีค่าเท่ากับ 0.158 ในขณะที่ ค่า c ที่สถานี Ramey มีค่าเท่ากับ 0.165, 0.169 และ 0.161 ในฤดูหนาว ฤดูอควินอกซ์และฤดูร้อน ตามลำดับ รวมถึง ค่า c เฉลี่ยทุกฤดูกาลที่สถานี Ramey มีค่าเท่ากับ 0.165

#### 4.3 ตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่อาศัยค่า foF2

การศึกษาในครั้งนี้จะมุ่งเน้นไปที่ตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ใหม่ตัวหนึ่งที่อาศัยค่าสถิติ foF2 (foF2-based I-scale) โดยค่าข้อมูล foF2 เป็นค่าที่สเกลด้วยมือจากแผนภาพไอโอโนแกรมในช่วงเวลาตั้งแต่เดือนมกราคม ปี ค.ศ. 2004 ถึงเดือนกรกฎาคม ปี ค.ศ. 2018 ที่สถานีเชียงใหม่ (CMU) สถานีชุมพร (CPN) และสถานีโกโตตะบัง (KTB) โดยทั้ง 3 สถานีนี้อยู่ภายใต้โครงการ SEALION ซึ่งเป็นความร่วมมือในการตรวจสอบสภาพชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ระหว่าง KMITL (ประเทศไทย) กับ NICT (ประเทศญี่ปุ่น) นอกจากนี้ ใน 1 ปีเราจะแบ่งออกเป็น 4 ฤดูกาล ได้แก่ March Equinox (ME; เดือน มีนาคม-เมษายน), June Solstice (JS; เดือน พฤษภาคม-สิงหาคม), September Equinox (SE; เดือน กันยายน-ตุลาคม), และ December Solstice (DS; เดือน พฤศจิกายน-กุมภาพันธ์) โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สมการต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณค่า I-scale และระดับค่าของ I-scale นี้จะสอดคล้องกับตามบทความของ Nishioka et al. [59] ดังนี้

##### 4.3.1 เปอร์เซนต์ผลต่างของค่า foF2

ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ ค่าเปอร์เซนต์ผลต่างของค่า TEC หรือค่า foF2 ที่สังเกตได้เป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อบรรยายสถานะในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ในงานวิจัยนี้ ค่าเปอร์เซนต์ผลต่างจะถูกใช้งานและถูกอ้างอิงเป็นดัชนีกิจกรรมในชั้นไอโอโนสเฟียร์ (AI) และหาค่าได้จากค่า  $O_{foF2}$  และ  $P_{foF2}$  ซึ่งจะหาค่าได้จากสมการต่อไปนี้

$$P_{foF2} = 100 \times \frac{O_{foF2} - R_{foF2}}{R_{foF2}} \quad (4.1)$$

เมื่อค่า  $O_{foF2}$  เป็นค่า foF2 ที่สังเกตได้และ  $R_{foF2}$  เป็นค่าอ้างอิงของค่า  $O_{foF2}$  โดยค่าอ้างอิงถูกกำหนดเสมือนเป็นค่ามัธยฐานของค่า  $O_{foF2}$  ที่เวลาท้องถิ่นและตำแหน่งเดียวกันของ 27 วันที่ผ่านมา ในที่นี้เราจะใช้ค่ามัธยฐานมากกว่าค่าเฉลี่ยทางเลขคณิตในการเป็นตัวแทนสถานะที่ชั้นไอโอโนสเฟียร์ไม่ได้ถูกรบกวนเนื่องจากค่ามัธยฐานไม่ได้รับผลกระทบจากค่าที่มาก (น้อย) อย่างผิดปกติ โดยหน้าต่าง 27 วันนั้นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกใช้อย่างแพร่หลายสำหรับเงื่อนไขค่าอ้างอิงในการศึกษาชั้นไอโอโนสเฟียร์ ถ้าขนาดหน้าต่างมีค่ามากกว่า 27 วัน ค่ามัธยฐานจะได้รับผลกระทบมากขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล และถ้าขนาดหน้าต่างมีค่าน้อยกว่านั้น ค่ามัธยฐานจะได้รับผลกระทบมากขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันและพายุแม่เหล็กโลก ค่ามัธยฐานด้วยหน้าต่าง 27 วันมีความเหมาะสมในการแทนสถานะที่เกือบจะไม่ถูกรบกวน (เงียบ) ของชั้นไอโอโนสเฟียร์

นอกจากนี้ การขึ้นอยู่กับฤดูกาล เวลาท้องถิ่นและตำแหน่งของค่า  $P_{foF2}$  ควรจะถูกกำจัดออกไป เพื่อที่จะนิยามตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ตัวใหม่ขึ้นมาอีก 1 ตัว รูปที่ 4.22 a) – d) แสดงการกระจายตัวของค่า  $P_{foF2}$  โดยในที่นี้ มีการกำหนดค่า  $P_{foF2}^*$  เพิ่มเติม ซึ่งหาค่าได้จากสมการต่อไปนี้

$$P_{foF2}^* = \frac{P_{foF2} - \mu}{\sigma} \quad (4.2)$$

โดยค่า  $\mu$  และค่า  $\sigma$  เป็นค่าเฉลี่ยเลขคณิตและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละฤดูกาลของแต่ละสถานี ซึ่งแต่ละสถานีก็จะมีค่า  $\mu$  และค่า  $\sigma$  อย่างละ 4 ค่าสำหรับค่าข้อมูลทั้งหมดประมาณ 14 ปี และถ้าเราพิจารณาทั้งหมด 3 สถานี เราก็มียค่า  $\mu$  และค่า  $\sigma$  ทั้งหมด 12 ค่า สำหรับการจัดระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์นั้น เราได้นิยาม I-scale โดยการใช้  $P_{foF2}^*$  ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 คอลัมน์ที่ 1 ถึง 3 แสดงค่า I-scale คำบรรยายของระดับพายุที่เกิดขึ้น และระดับของค่า  $P_{foF2}^*$  ตามลำดับ ยกตัวอย่างเช่น I<sub>p3</sub> แทนพายุเชิงบวกที่รุนแรงและมีค่า  $P_{foF2}^*$  ที่มากกว่า 5

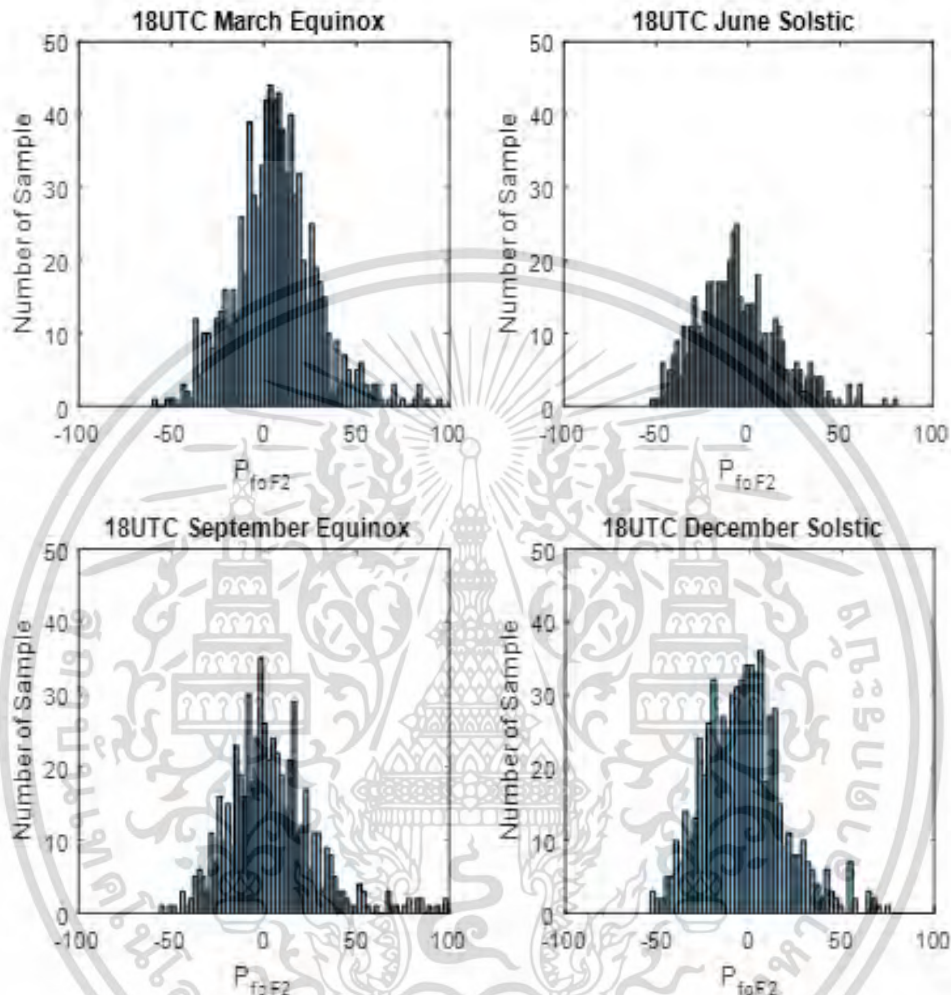
ตารางที่ 4.1 ค่า I-scale, คำบรรยายของระดับพายุและระดับของค่า  $P_{foF2}^*$  ที่เกิดขึ้น

I-scale	Descriptor	Definition ( $\hat{P}$ Stands for $\hat{P}_{TEC}$ or $\hat{P}_{foF2}$ )
I <sub>p3</sub>	Severe positive storm	$5 < \hat{P}$
I <sub>p2</sub>	Strong positive storm	$3 < \hat{P} \leq 5$
I <sub>p1</sub>	Moderate positive storm	$1 < \hat{P} \leq 3$
I <sub>0</sub>	Quiet	$-1 < \hat{P} \leq 1$
I <sub>N1</sub>	Moderate negative storm	$-2 < \hat{P} \leq -1$
I <sub>N2</sub>	Strong negative storm	$-3 < \hat{P} \leq -2$
I <sub>N3</sub>	Severe negative storm	$\hat{P} < -3$

#### 4.3.2 ค่า I-scale ที่ได้จากค่า foF2

ในความเป็นจริง เราสามารถจะแสดงผลการกระจายตัวแบบเกาส์เซียนของค่าข้อมูล  $P_{foF2}$  และ  $P_{foF2}^*$  ใน 4 ฤดูกาล (ME, JS, SE, และ DS) ที่ทุกสถานีและพิจารณาทั้งหมด 24 ชั่วโมงเลยก็ได้ (ตั้งแต่เวลา 00 LT – 23 LT) แต่ทั้งนี้ จะขอแสดงผลการทดลองเฉพาะที่สถานีชุมพรและค่าข้อมูลที่เวลา 18 UT เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

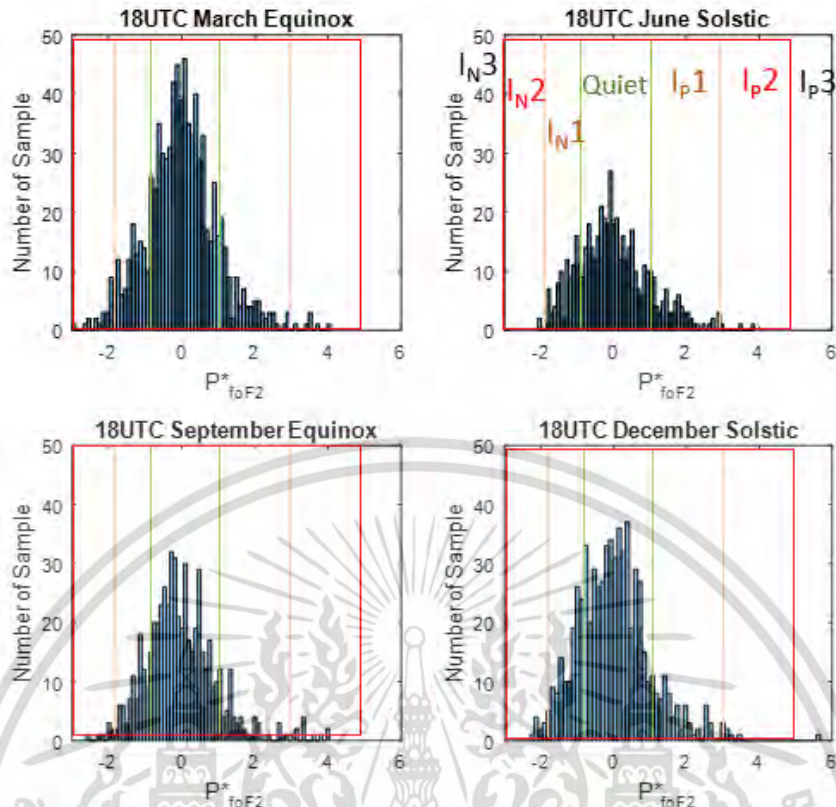
(01 LT) เท่านั้น รูปที่ 4.28 และ 4.29 แสดงการกระจายตัวแบบเกาส์เซียนของค่าข้อมูล  $P_{foF2}$  และ  $P_{foF2}^*$  ใน 4 ฤดูกาล (ME, JS, SE, และ DS) ที่สถานีชุมพรที่เวลา 18 UT (01 LT) ตามลำดับ



รูปที่ 4.28 การกระจายตัวแบบเกาส์เซียนของค่าข้อมูล  $P_{foF2}$  ที่สถานีชุมพรที่เวลา 18 UT (01 LT)

ตารางที่ 4.2 แสดงจำนวนวัน (Samples) ที่พบแต่ละระดับของ I-scale ที่เกิดขึ้นทั้ง 3 สถานี ซึ่งจะพบว่า ค่าความน่าจะเป็นในการเกิดขึ้นแต่ละระดับของพายุที่แต่ละสถานีนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยสภาวะเจียบ (ไม่มีพายุ) เป็นเหตุการณ์ที่พบมากที่สุด (ประมาณร้อยละ 71) และสภาวะพายุบวกที่รุนแรง ( $I_p3$ ) เป็นเหตุการณ์ที่พบน้อยที่สุด (ประมาณร้อยละ 0.03), ค่า  $I_p1$  และ  $I_N1$  มีค่าเกิดขึ้นอยู่ร้อยละ 12-14 และ  $I_N2$  มีค่าเกิดขึ้นร้อยละ 1.4 ส่วนตารางที่ 4.3 แสดงตัวอย่างผลของการคำนวณหาค่าเฉลี่ยเลขคณิตและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า  $P_{foF2}$  ที่สถานีชุมพร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 การกระจายตัวแบบเกาส์เซียนของค่าข้อมูล  $P_{foF2}^*$  ที่สถานีชุมพรที่เวลา 18 UT (01 LT)

ตารางที่ 4.2 จำนวนวัน (Samples) ที่พบแต่ละระดับของ I-scale ที่เกิดขึ้นทั้ง 3 สถานี

Occurrence Probability	CPN		CMU		KTB	
	Samples	%	Samples	%	Samples	%
Sample	60122	100	65544	100	57100	100
$I_{P3}$	22	0.04	9	0.02	15	0.03
$I_{P2}$	380	0.63	393	0.60	330	0.58
$I_{P1}$	8309	13.82	9157	13.97	7839	13.73
Quiet	42972	71.47	46361	70.73	40765	71.39
$I_{N1}$	7468	12.42	8779	13.39	7199	12.60
$I_{N2}$	840	1.40	798	1.22	862	1.51
$I_{N3}$	131	0.22	47	0.07	90	0.16
Sample	60122	100	65544	100	57100	100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยเลขคณิตและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า  $P_{foF2}$  ที่สถานีชุมพร

UT	Mean of $P_{foF2}$				Standard Deviation of $P_{foF2}$			
	ME	JS	SE	DS	ME	JS	SE	DS
0	0.0411	-0.0148	0.0198	-0.0371	0.0794	0.0779	0.0687	0.0795
1	0.0178	-0.024	0.0245	-0.0262	0.081	0.0835	0.0771	0.0909
2	-0.0042	-0.0174	0.0354	-0.0215	0.1101	0.1049	0.1071	0.1115
3	0.0078	-0.0104	0.0435	0.0007	0.1312	0.1156	0.1288	0.1323
4	0.014	-0.0152	0.0378	0.0115	0.1196	0.1024	0.1166	0.1312
5	0.0234	-0.0226	0.0321	0.0064	0.1159	0.0974	0.1093	0.1251
6	0.0267	-0.0223	0.0335	-0.0013	0.1167	0.102	0.1101	0.1135
7	0.0296	-0.0275	0.0421	-0.0067	0.1164	0.1027	0.1184	0.1063
8	0.0289	-0.0326	0.045	-0.0099	0.1109	0.1048	0.1212	0.1028
9	0.0273	-0.0357	0.0406	-0.0127	0.11	0.1072	0.1141	0.0994
10	0.0261	-0.0394	0.0327	-0.0155	0.1036	0.1035	0.1143	0.0958
11	0.0303	-0.0357	0.0213	-0.0111	0.109	0.1041	0.1141	0.095
12	0.0304	-0.0259	0.0093	-0.0133	0.1242	0.1052	0.1154	0.1138
13	0.0248	-0.0417	0.0395	-0.0273	0.147	0.1439	0.1463	0.1273
14	0.0267	-0.0568	0.07	-0.0333	0.1565	0.197	0.1931	0.147
15	0.0293	-0.0594	0.0723	-0.043	0.177	0.2111	0.2063	0.1829
16	0.0556	-0.0606	0.0539	-0.0487	0.2044	0.2074	0.2176	0.2068
17	0.0724	-0.0597	0.0471	-0.0364	0.2206	0.2225	0.2368	0.2229
18	0.0648	-0.0552	0.0417	-0.0182	0.2442	0.2368	0.2458	0.233
19	0.0597	-0.0474	0.0324	0.0071	0.2589	0.2301	0.2471	0.2426
20	0.0697	-0.0417	0.0223	0.0084	0.2609	0.2316	0.2395	0.2587
21	0.087	-0.0426	0.0284	0.0036	0.2607	0.2273	0.2582	0.2232
22	0.0902	-0.0168	0.0478	0.0239	0.2765	0.2078	0.2919	0.2513
23	0.0889	-0.0062	0.0155	-0.0545	0.1479	0.0941	0.0883	0.1041

#### 4.3.3 วิพากษ์ผลการศึกษา

ถึงแม้ว่าโดยทั่วไปพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นได้โดยพายุแม่เหล็กโลก การเปลี่ยนแปลงในชั้นไอโอโนสเฟียร์ก็สามารถเกิดขึ้นเนื่องจากสาเหตุอื่น ๆ ได้ด้วยยกตัวอย่างเช่น การไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงของ EIA, ลมและของผสมในชั้นเทอร์โมสเฟียร์ เป็นต้น เพื่อที่จะวิเคราะห์การขึ้นอยู่กับฤดูกาล เวลาท้องถิ่นและตำแหน่งของค่า  $\sigma$  ว่ามีส่วนที่เกี่ยวข้องกับพายุแม่เหล็กโลกหรือไม่ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า  $P_{foF2}$  สำหรับวันที่เงียบสงบ (ไม่มีพายุ) ทั้งหมดจะถูกวิเคราะห์ การขึ้นอยู่กับฤดูกาลและตำแหน่งของค่า  $\sigma$  น่าจะไม่เกี่ยวข้องกับพายุแม่เหล็กโลกเลย เราตั้งข้อสังเกตว่าผลกระทบของ EIA น่าจะส่งผลอย่างมากที่ละติจูดต่ำ ขนาดของค่ายอด EIA ที่ถูกก่อตัวขึ้นโดยส่วนใหญ่จะมีค่า TEC สูงที่สุดที่ ME และน้อยที่สุดที่ JS การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของ EIA ได้ถูกพบว่าจะมีค่าที่มากที่สุดในฤดูอิควินอกซ์และมีค่าน้อยที่สุดในฤดูโซติลส์ในบริเวณอาเซียน [62] การขึ้นอยู่กับฤดูกาลนี้จะสอดคล้องกับการขึ้นอยู่กับฤดูกาลของค่า  $\sigma$  ด้วย การขึ้นอยู่กับละติจูดของค่า  $\sigma$  ก็น่าจะอธิบายได้ด้วยเช่นกันจากการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของ EIAs ผลกระทบของ EIAs มีความสำคัญมากขึ้นทางตอนใต้มากกว่าที่ทางตอนเหนือของญี่ปุ่น เนื่องจากพื้นที่ทางตอนใต้อยู่ใกล้กับขอบทางตอนเหนือของ EIA

พายุ  $I_p3$  ที่ใหญ่ที่สุดอันดับที่ 3 ที่เกิดขึ้นในช่วงพายุแม่เหล็กโลกที่ถูกเรียกว่า Halloween event และได้ถูกรายงานในหลายบทความ (ในปี 2005) พายุเชิงลบที่รุนแรงมากที่สุดได้ถูกจัดไว้ในตารางที่ 4.3 ที่จะสัมพันธ์กับพายุแม่เหล็กโลกด้วย เหตุการณ์ที่ลิสต์ไว้อันดับที่ 2 ที่รู้จักเป็นอย่างดีชื่อว่า Bastille Day event ประเด็นหนึ่งในหลายจุดที่น่าสนใจคือว่า พายุชั้นไอโอโนสเฟียร์นี้ไม่ได้สอดคล้องกับพายุแม่เหล็กโลกเสมอไป ซึ่งถึงแม้ว่าพายุแม่เหล็กโลกจำนวน 6 เหตุการณ์ที่มีค่าดัชนี  $Dst < -300$  nT เกิดขึ้นในช่วงปี 1997-2014 ก็ตาม แต่ก็ไม่มีพายุลูกใดเลยที่เหนี่ยวนำให้เกิดพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์เชิงลบที่รุนแรงเลย ในขณะที่ มีเพียง 2 ลูกของพวกมันที่เหนี่ยวนำให้เกิดพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์เชิงบวกที่รุนแรง ความแตกต่างกันของดัชนีพายุแม่เหล็กโลก (เช่นค่า  $Dst$ ) และค่า  $I$ -scale ชี้ให้เห็นว่า “การตอบสนองของชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มีต่อพายุแม่เหล็กโลกมีความซับซ้อน” โดยทั่วไป พายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์จะถูกกระตุ้นให้เกิดขึ้นด้วยสาเหตุใดสาเหตุหนึ่งหรือจำนวนหนึ่ง ดังนี้

1. การทะลุทะลวงโดยตรงของสนามไฟฟ้าไปยังละติจูดต่ำ
2. การเปลี่ยนแปลงของลมเทอร์โมสเฟียร์
3. การเปลี่ยนแปลงในของผสมที่เป็นกลาง
4. ไดนาโมที่เป็นสิ่งรบกวน

สาเหตุเหล่านี้ไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับขนาดของพายุแม่เหล็กโลก แล้วแต่ยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ ได้แก่ เวลาท้องถิ่นของการเกิดพายุแม่เหล็กโลกและเงื่อนไขในชั้นไอโอโนสเฟียร์ อาทิเช่น รูปแบบของลมเทอร์โมสเฟียร์ ดังนั้น ตัวบอกระดับของพายุแม่เหล็กโลกจึงไม่เหมาะสมที่จะเป็นตัวบอกขนาดของพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ดังนั้น มันจึงมีความจำเป็นที่จะสร้างตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์

โดยทั่วไป คำจำกัดความของดัชนีกิจกรรมใด ๆ ควรจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของผู้ใช้ ผู้ใช้ GNSS ยกตัวอย่างเช่นระบบ SBAS เป็นหนึ่งในผู้ใช้งานหลักของสารสนเทศสภาพภูมิอากาศในอวกาศ ค่า AATR ที่ถูกนำเสนอและถูกสร้างขึ้นมาในประชาคมของ EGNOS นั้นเป็นค่ารากที่สองของค่ากำลังสองเฉลี่ย (rms) รายชั่วโมงของ Along-Arc TEC rate ซึ่งเป็นตัววัด (proxy) ตัวหนึ่งของการเปลี่ยนแปลงของค่า TEC ตามเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะทางและเชิงเวลา ผู้ใช้งาน GNSS ได้สร้างแผนที่ TEC โดยการประมาณค่า TEC ที่วัดได้และสมมติว่า TEC มีการแจกแจงเป็นแบบเชิงเส้น สมมติฐานของความเป็นเชิงเส้นดังกล่าวนี้ไม่สามารถที่จะใช้งานได้ในช่วงเวลาที่ชั้นไอโอโนสเฟียร์ได้ถูกรบกวน ค่า AATR ได้ถูกใช้งานในการบ่งชี้ช่วงเวลาที่ชั้นไอโอโนสเฟียร์ได้ถูกรบกวนสำหรับการป้องกันผู้ใช้งานจากภัยคุกคามในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ค่า AATR มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า TEC ประมาณ 200-300 km (ในที่นี้ ถูกอ้างอิงเสมือนเป็น “ระดับปานกลาง”) ในที่นี้ I-scales ที่นำเสนอขึ้นไม่ได้มีความจำเป็นที่จะบ่งบอกถึงผลกระทบของโครงสร้างระดับปานกลางที่มีต่อระบบ SBAS ที่ใช้ GNSS

ค่า I-scales ที่นำเสนอขึ้นได้ถูกกำหนดขึ้นโดยอาศัยค่าข้อมูล foF2 และ TEC โดยตัวบอกระดับที่อาศัยค่าพารามิเตอร์เหล่านี้มีส่วนช่วยเหลือต่อผู้ใช้งานทั่วไป อาทิเช่น ผู้ใช้งานระบบการสื่อสารย่านความถี่ HF และผู้ใช้งานระบบการนำทาง/การบ่งบอกตำแหน่งโดยใช้ GNSS สำหรับผู้ใช้งานระบบ GNSS นั้น สารสนเทศของพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์นั้นมีความสำคัญต่อการประมาณค่าเวลาประวิงในการแพร่กระจายคลื่นผ่านชั้นไอโอโนสเฟียร์ สำหรับผู้ใช้งานระบบการสื่อสารย่านความถี่ HF นั้น สารสนเทศของพายุเชิงลบนั้นมีความสำคัญเนื่องจากพายุเชิงลบที่รุนแรงจะทำให้การสื่อสาร HF นั้นมีการแย่งหลายชั่วโมง เนื่องจากผู้ใช้งานระบบ GNSS และผู้ใช้งานระบบการสื่อสารย่านความถี่ HF เป็นส่วนใหญ่ของผู้ใช้งาน พารามิเตอร์เหล่านี้จึงมีความสมเหตุสมผลสำหรับการนิยาม I-scale ในทางกลับกัน พารามิเตอร์อื่น ๆ อาทิเช่น ความหนาแน่นอนุภาคที่เป็นกลาง, ดัชนีซีลทีเลชั่น, และการขาดการติดต่อในสัญญาณ GNSS เองก็เป็นประเด็นที่สำคัญสำหรับผู้ใช้งานรายอื่น ๆ ด้วย ตัวบอกระดับในชั้นไอโอโนสเฟียร์สำหรับพารามิเตอร์เหล่านี้ก็ควรที่จะให้มีในอนาคตอันใกล้ด้วย

#### 4.4 การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างของชั้นไอโอโนสเฟียร์ในวัฏจักรสุริยะที่ 24

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นค่ามัธยฐานรายชั่วโมงของค่า foF2 (ค่าวิกฤติความถี่ในชั้น F2), hmF2 (ค่าความสูงพีดชั้น F2), ค่า TEC, ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นชั้น F2 <math>m(3000)F2</math> และค่า B0 ที่วัดได้จากเครื่อง Digisonde ของสถานีวัดทั่วโลกจำนวน 12 สถานี ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ในที่นี้ ค่าข้อมูลที่วัดได้ในช่วงที่มีผลกระทบของสุริยะมากที่สุดของวัฏจักรสุริยะที่ 24 (ปี 2013 - 2014) ของสถานี Digisonde 12 สถานีทั้งหมดจะนำมาจากเว็บไซต์ของ DIDBASE คือ <http://giro.uml.edu/didbase/scaled.php> ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลนั้น ค่าข้อมูลจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ฤดูกาล ได้แก่ ฤดูหนาว (พฤศจิกายน, ธันวาคม, มกราคม และกุมภาพันธ์), ฤดูอควินอกซ์ (มีนาคม, เมษายน, กันยายน และตุลาคม), และ ฤดูร้อน (พฤษภาคม – สิงหาคม) และค่าเฉลี่ยของจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ที่คิดตลอดระยะเวลา 1 ปี (Rz12) ก็นำมาจากเว็บไซต์ IRI-2012 คือ [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012\\_vitmo.html](https://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ของเครื่อง Digisonde ในสถานีวัดทั่วโลกจำนวน 12 สถานี

Twelve Digisonde Stations	Geographic Latitudes	Latitude	Longitude
Ramey		18.50	292.90
Ascension Island	0°-20° (group 1)	-7.95	345.60
Jicamarca		-12.00	283.20
Wuhan	20°-40° (group 2)	30.50	114.40
El Arenosillo		37.10	353.30
Louisvale		-28.50	21.20
Idaho National Laboratory	40°-60° (group 3)	43.81	247.32
Chilton		51.50	359.40
Port Stanley		-51.60	302.10
Yakutsk	> 60° (group 4)	62.00	129.60
Tromso		69.60	19.20
Qaanaaq		77.50	290.80

#### 4.4.1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างในช่วงวัฏจักรสุริยะที่ 24

ในหัวข้อนี้ ค่า B2botP\_new จะถูกคำนวณหาค่าออกมาและทำการเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จาก Digisonde (B0\_obs) และค่า B2botP\_old ที่นำเสนอใน Jamjareegulgarn et al. [21] โดยในที่นี้ จะขอแสดงค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างที่สถานี El Arenosillo (Spain) และสถานี Chilton (England) เท่านั้น เนื่องจากเป็นผลการศึกษาที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่าง โดยผลของการศึกษาสรุปได้ดังนี้

การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างในฤดูหนาว ฤดูออคโทเบอร์และฤดูร้อนที่เมือง El Arenosillo และ เมือง Chilton ในปี ค.ศ. 2014 มีแสดงไว้ในรูปที่ 4.30, 4.31 และ 4.32 ตามลำดับ จากผลการศึกษาจะเห็นได้ชัดว่า ค่า B2botP\_new ที่นำเสนอมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนและมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่สังเกตได้จากเครื่องดิจิซอนด์ (B0\_obs) โดยค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างในตอนกลางวันจะสูงกว่าค่าในตอนกลางคืน ยกเว้นฤดูหนาว นอกจากนี้ คุณลักษณะที่เด่นชัดอีก 2 ประการที่พบก็คือ มีการยกตัว (เพิ่มขึ้น) ของความหนาแน่นอิเล็กตรอนอย่างเห็นได้ชัดในช่วงเวลาก่อนพระอาทิตย์ขึ้น (Pre-sunrise enhancement) ที่เมือง El Arenosillo และในตอนกลางวัน ค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างที่เมือง El Arenosillo จะสูงกว่าค่าที่เมือง Chilton นอกจากนี้ ผลการศึกษาพบว่า ค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างที่เมือง El Arenosillo จะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนกับค่าที่วัดได้ที่เมือง Chung Li ประเทศไต้หวัน (Chuo, 2012) โดยผลต่างสัมบูรณ์ของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างในฤดูหนาวและฤดูออคโทเบอร์มีค่าประมาณ 10 กิโลเมตร ส่วนผลต่างสัมบูรณ์ของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างในฤดูร้อนมีค่าประมาณ 10 กิโลเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นว่ามีประโยชน์ประการใด กรุณาแจ้งเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ความหนาแน่นด้านล่างในฤดูร้อนมีค่าประมาณ 25 กิโลเมตร โดยผลต่างที่มากที่สุดจะเกิดขึ้นที่เวลา 11.00 น. ที่เมือง El Arenosillo นอกจากนี้ ในภาพรวมของการศึกษาพบว่า ผลต่างสัมบูรณ์ของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างในฤดูร้อนมีค่า 0.09 - 25.11 กิโลเมตร ส่วนผลต่างสัมบูรณ์ในฤดูอุทกวินอกซ์และฤดูหนาวมีค่า 0.03 - 16.46 กิโลเมตร และ 0.02 - 22.49 กิโลเมตร ตามลำดับ

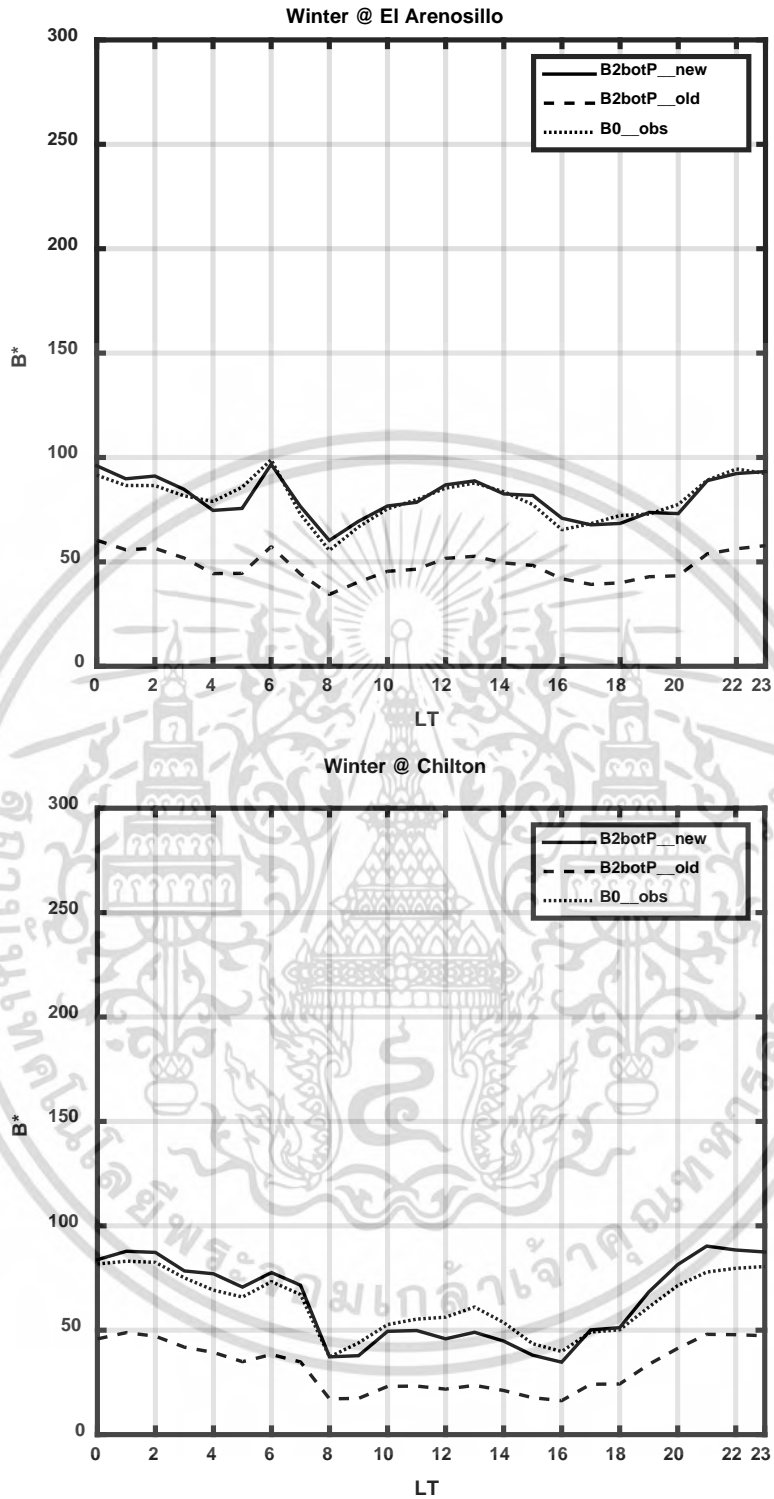
ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยของค่าปรับแก้ในแต่ละโซนของสถานี Digisonde จำนวน 12 สถานี

Twelve Digisonde Stations	Geographic Latitudes	ค่า c เฉลี่ย
Ramey	0°-20° (group 1)	0.1674
Ascension Island		
Jicamarca		
Wuhan	20°-40° (group 2)	0.1898
El Arenosillo		
Louisvale		
Idaho National Lab.	40°-60° (group 3)	0.2043
Chilton		
Port Stanley		
Yakutsk	> 60° (group 4)	0.2639
Tromso		
Qaanaaq		

ในตารางที่ 4.5 เป็นผลการคำนวณค่าเฉลี่ยของค่าปรับแก้ (ค่า c) ในแต่ละโซนของสถานี Digisonde ที่ศึกษาในบทความวิจัยนี้จำนวน 12 สถานี พบว่า ค่าเฉลี่ยของค่าปรับแก้มีค่าเท่ากับ 0.1674, 0.1898, 0.2043 และ 0.2639 สำหรับ 4 โซนของละติจูด 0°-20°, 20°-40°, 40°-60° และสูงกว่า 60° ที่พิจารณา ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าปรับแก้มีค่าที่เพิ่มขึ้นจากละติจูดต่ำไปยังละติจูดที่สูงขึ้น

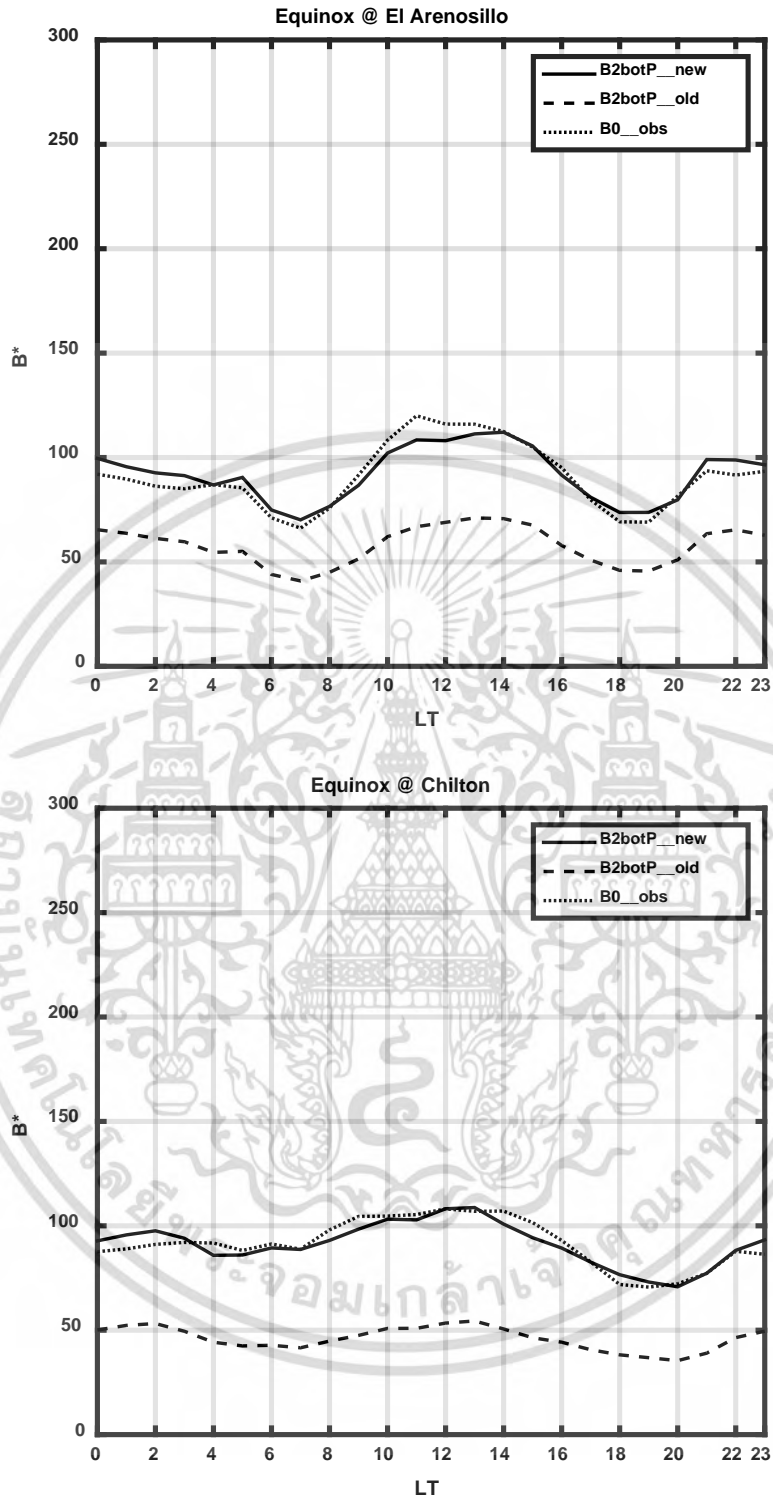
ปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่อธิบายการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นอิเล็กตรอนอย่างเห็นได้ชัดในช่วงเวลาก่อนพระอาทิตย์ขึ้น (Pre-sunrise enhancement) คือ ลมนิวทรอล (neutral wind) ที่มีการเคลื่อนตัวไปทางทิศใต้ที่เวลา 0300 นาฬิกาแล้วมีการเคลื่อนตัวย้อนกลับมาทางทิศเหนือที่เวลา 0500 นาฬิกา จึงทำให้ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนในช่วงเวลาก่อนพระอาทิตย์ขึ้นในทางซีกโลกเหนือจึงมีค่าที่เพิ่มขึ้น [63] ส่วนค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างในตอนกลางวันมีค่าที่สูงกว่าค่าในตอนกลางคืนนั้น มีสาเหตุมาจากการลอยเลื่อนของพลาสมา E × B ในแนวตั้ง โดยค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างจะมีค่ามากขึ้นที่ละน้อยในช่วงเวลา 0800 - 1300 นาฬิกา เนื่องจากการลอยเลื่อนของพลาสมาใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



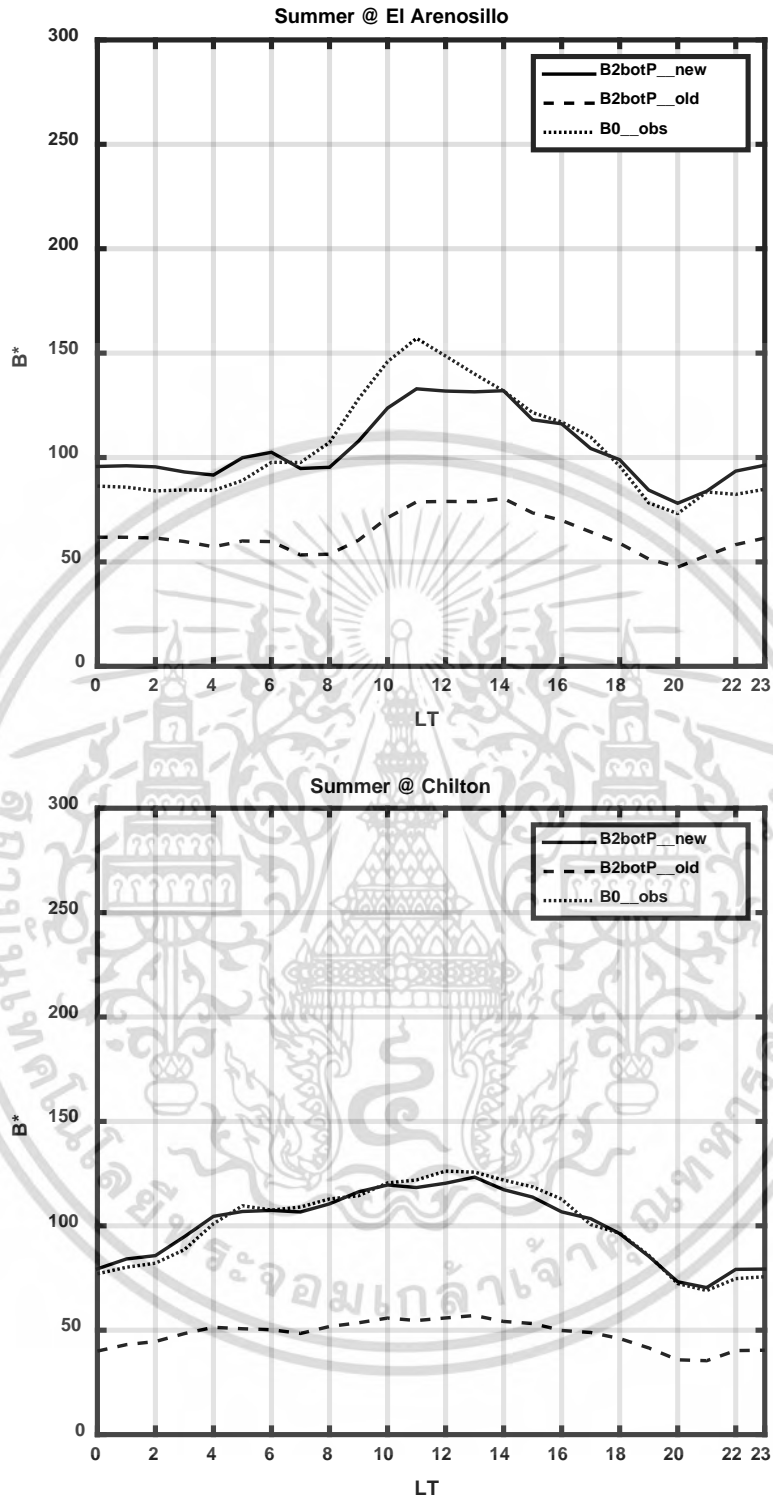
รูปที่ 4.30 การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่าง  
ในฤดูหนาวที่เมือง El Arenosillo และเมือง Chilton ในปี ค.ศ. 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่าง ในฤดูอิกวินอกซ์ ที่เมือง El Arenosillo และเมือง Chilton ในปี ค.ศ. 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.32 การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่าง  
ในฤดูร้อนที่เมือง El Arenosillo และเมือง Chilton ในปี ค.ศ. 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวตั้งดังกล่าวจะผลักดันให้พลาสมาเกิดการยกตัวสูงขึ้นไปยังชั้นบรรยากาศที่สูงขึ้นบริเวณเส้นศูนย์สูตร โดยพลาสมาจะแพร่กระจายไปตามเส้นสนามแม่เหล็กที่มุ่งไปสู่ละติจูดต่ำ ทำให้ความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่บริเวณละติจูดต่ำมีค่าที่เพิ่มขึ้น [64] ผลลัพธ์นี้เป็นการยืนยันให้เห็นว่า การลอยเลื่อนของพลาสมาในแนวตั้งแสดงบทบาทที่สำคัญในบริเวณ EIA (Equatorial Ionization Anomaly) โดยการเพิ่มขึ้นที่น้อยของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างนี้เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่พระอาทิตย์ขึ้นในฤดูอิควินอกซ์และฤดูร้อน อีกทั้งยังมีค่าที่เพิ่มขึ้นไปจนถึง 1300 นาฬิกาในฤดูหนาวอีกด้วย ในทำนองเดียวกัน Liu et al. [65] ก็ได้ทำการศึกษาสนามไฟฟ้าในแนวนอนที่มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันออกของปรากฏการณ์ไดนาโมที่เกิดขึ้นในชั้น E ใกล้กับเส้นศูนย์สูตร พบว่า สนามไฟฟ้าที่มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันออกเหล่านี้ได้ทำการยกการลอยเลื่อนของพลาสมาในแนวตั้งไปในชั้นบรรยากาศที่สูงขึ้น แล้วแพร่กระจายลงมา จึงทำให้เกิดความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นในตอนกลางวันในบริเวณ EIA



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการวิจัยและแนวทางการพัฒนางานวิจัย

## 5.1 สรุปผลการวิจัย

ภาพรวมของการทำวิจัยภายใต้หัวข้อเรื่อง “เว็บไซต์ศูนย์การเรียนรู้สภาพอากาศและภัยพิบัติฯ” นั้นสำเร็จลุล่วงตามขอบเขตที่ตั้งไว้ โดยเว็บเพจต่าง ๆ ที่จัดทำขึ้นนี้จะนำขึ้นเซิร์ฟเวอร์ของ สจล. วิทยาเขต ชุมพร “<http://www.pcc.kmitl.ac.th/web-iono/>” โดยหน้าเว็บและข้อมูลต่าง ๆ ที่นำเสนอ นั้นเป็น ข้อมูลที่ได้จากศึกษาและมีส่วนหนึ่งที่นำมาเว็บไซต์อื่นที่เกี่ยวข้องกับสภาพอากาศและภัยพิบัติ โดยที่สามารถสรุปเนื้อหาที่สำคัญและเป็นหัวใจหลักของงานวิจัยนี้ได้แก่ ค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่าง, ตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่อาศัยค่า foF2 และเว็บเพจและแบบจำลองที่ใช้หาค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่าง โดยผลการศึกษาค้นคว้าหลักเหล่านี้สามารถที่จะสรุปได้ดังนี้

สำหรับผลการศึกษาค้นคว้าการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างที่สถานี Jicamarca ในแต่ละฤดูกาลของปี 2014 พบว่า การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่า B2bot ใหม่ที่คำนวณได้จากสมการที่นำเสนอ (B2P\_2) มีแนวโน้มเดียวกับค่า B0 ที่สังเกตได้ และค่า B2P\_2 มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่า B0 ที่สังเกตได้ทุกฤดูกาลเมื่อเปรียบเทียบกับพารามิเตอร์ตัวอื่น ในขณะที่ ค่า B2\_NeQ มีค่าที่สูงกว่าค่า B0 ที่สังเกตได้ทุกฤดูกาลและมีค่าที่สูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับพารามิเตอร์ตัวอื่น นอกจากนี้ ท่ามกลางพารามิเตอร์ B0 ที่ทำนายได้จากแบบจำลอง IRI-2012 ค่า B0\_Gul มีค่าที่ใกล้กับค่า B0 ที่สังเกตได้ในช่วงเวลา 00-09 LT และ 16-23 LT ในฤดูหนาวและฤดูออกนอกซ์ ค่า AD\_B ในฤดูร้อนมีค่าต่ำกว่า 30 กิโลเมตรเสมอ ในขณะที่ค่า AD\_B โดยส่วนใหญ่จะมีค่าที่ต่ำกว่า 30 กิโลเมตรตลอดทั้งวันในฤดูหนาวและฤดูออกนอกซ์ ยกเว้นช่วงเวลา 12-20 LT โดยช่วงเวลา 12-20 LT นี้ ค่า AD\_B มีค่าประมาณ 31 – 76 กิโลเมตรอย่างน่าประหลาดใจ นอกจากนี้ ความแตกต่างระหว่างค่า B2P\_2 และค่า B0 ที่สังเกตได้ที่สถานี Jicamarca มีค่าที่มากในช่วงเวลา 12-20 LT ของฤดูหนาวและฤดูออกนอกซ์อย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ ค่าความแตกต่างระหว่างค่า B2P\_2 และค่า B0 ที่สังเกตได้ไม่มีปรากฏที่สถานี Ramey (สถานีที่อยู่ทางด้านเหนือของยอด EIA) ผลความแตกต่างที่มากที่สถานี Jicamarca นี้สร้างประเด็นที่น่าสนใจที่นำไปสู่การวิเคราะห์และวิจารณ์เพิ่มเติมว่า “เพราะเหตุใดจึงเกิดผลความแตกต่างที่มากดังกล่าวที่สถานี Jicamarca ที่ตั้งอยู่ใกล้กับทางด้านใต้ของยอด EIA”

สำหรับตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ (I-scale) ที่นำเสนอ นั้น มีคุณลักษณะเด่นที่สำคัญคือว่า มันไม่ขึ้นอยู่กับฤดูกาล เวลาท้องถิ่นและตำแหน่ง ซึ่งจะแตกต่างจากดัชนีกิจกรรมในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ได้ถูกนำเสนอก่อนหน้านี้ เราได้นิยามตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ดังกล่าวขึ้นมาจากพื้นฐานของค่า  $P_{foF2}^*$  ซึ่งไม่ได้รวมการขึ้นอยู่กับฤดูกาล เวลาท้องถิ่นและตำแหน่งของค่า  $P_{foF2}$  ความสอดคล้องกันระหว่าง I-scales ที่อาศัยค่า  $P_{foF2}^*$  ได้แนะนำที่ว่า “I-scale สามารถที่เป็นค่าดัชนีตัวใหม่ตัวหนึ่งได้ที่อิสระจากเทคนิคที่ใช้ในการสังเกต” เนื่องจากคำจำกัดความมีความง่าย ตัวบอกระดับนี้ก็สามารถที่จะถูกนำไปใช้งานสำหรับตำแหน่งอื่น ๆ อาทิเช่น บริเวณขั้วโลกและบริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตร ถ้าข้อมูลเชิงสถิติมีอยู่ให้ใช้งานเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าดัชนีที่นำเสนอ นั้นสามารถที่จะถูกใช้งานเสมือนเป็นดัชนีที่ทำเป็นมาตรฐานตัวหนึ่งสำหรับช่วยเหลือผู้ใช้งานสภาพอากาศในการมอนิเตอร์และประเมินผลกระทบที่เป็นไปได้ต่อระบบของผู้ใช้งาน สำหรับงานในอนาคต มันจะมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า I-scales ที่นำเสนอ กับผลกระทบที่แท้จริงสำหรับผู้ใช้งานในทางปฏิบัติ นอกจากนี้ ความสำคัญของการมอนิเตอร์และการทำนายชั้นไอโอโนสเฟียร์กำลังจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากเงื่อนไขในชั้นไอโอโนสเฟียร์นั้นส่งผลกระทบต่อระบบจำนวนมากที่ใช้เทคนิคที่อาศัยคลื่นวิทยุ

ส่วนการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านข้างในช่วงวัฏจักรที่ 24 (ปี 2014) นั้น ผลการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านข้างของสถานีดิจิทัลจำนวน 12 สถานี ได้ถูกศึกษาในงานวิจัยนี้ โดยเลือกช่วงเวลาในการศึกษาที่ได้รับผลกระทบของดวงอาทิตย์มากที่สุดของวัฏจักรสุริยะปัจจุบัน (ลำดับที่ 24 ช่วงปี ค.ศ. 2013 - 2014) ผลจากการศึกษาสรุปได้ว่า ค่า B2botP\_new ที่นำเสนอ มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนและมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่สังเกตได้จากเครื่องดิจิทัล (B0\_obs) โดยค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านข้างในตอนกลางวันจะสูงกว่าค่าในตอนกลางคืน ยกเว้นฤดูหนาว นอกจากนี้ ความหนาแน่นอิเล็กตรอนมีค่าที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในช่วงเวลาก่อนพระอาทิตย์ขึ้นที่เมือง El Arenosillo และค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านข้างในตอนกลางวันในเมือง El Arenosillo มีค่าที่สูงกว่าค่าที่เมือง Chilton ทั้งนี้ นักวิจัยคาดหวังว่าสมการที่ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านข้างที่นำเสนอ นี้จะเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าไปใช้ในการหาค่า TEC และค่าเวลาประวิงของสัญญาณจีพีเอส โดยประมาณสำหรับการระบุตำแหน่งของเครื่องรับ GNSS และใช้ในการทำนายภัยพิบัติที่จะเกิดขึ้นได้ในอนาคตอันใกล้

สำหรับแบบจำลองคำนวณค่า B2botP ที่นำเสนอ นั้นจะประกอบไปด้วยโค้ดแมทแลบที่ใช้หาค่า B2botP และแบบจำลองการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นของชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านข้าง และในส่วนของ การเกิดแผ่นดินไหวและการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่เกี่ยวข้องกับแผ่นดินไหว ซึ่งประกอบไปด้วยคำอธิบายของแผ่นดินไหวและการเปลี่ยนแปลงชั้นไอโอโนสเฟียร์, การเปลี่ยนแปลงของค่า foF2 ก่อนที่จะเกิดแผ่นดินไหว และการเปลี่ยนแปลงของค่า TEC ก่อนที่จะเกิดแผ่นดินไหว รายละเอียดโดยสรุปมีดังนี้

แผ่นดินไหว (earthquakes) เป็นภัยพิบัติทางธรรมชาติที่เป็นต้นเหตุให้เกิดความเสียหายที่รุนแรง ชีวิตและทรัพย์สินของมนุษย์ สาเหตุของแผ่นดินไหว ได้แก่ แผ่นดินไหวแบบที่เกิดแรงเทคโทนิก (tectonic forces) การระเบิดของภูเขาไฟ การทำเหมือง ฯลฯ โดยทั่วไป ผลที่เกิดจากแรงเทคโทนิกนั้นมีอิทธิพลมากที่สุด ที่ซึ่งผลของมันเป็นการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกร่วมกับการสะสมพลังงานภายในพื้นโลก

สำหรับค่า foF2 ในช่วงที่เกิดแผ่นดินไหวที่สถานีชุมพร พบว่า foF2 เริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลา ก่อนพระอาทิตย์ขึ้น (05-07 LT) มีค่าลดลงตอนเที่ยงเนื่องจากปรากฏการณ์ bite-out เพิ่มขึ้นอีกครั้งในตอนบ่ายและมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดประมาณพระอาทิตย์ตกดิน (17-19LT) และมีค่าลดลงในช่วงเวลา หลังพระอาทิตย์ตกดิน จนกระทั่งมีค่าต่ำสุดที่ประมาณ 05LT สำหรับค่า foF2\_obs นั้น พบว่าการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของ foF2\_obs จะเหมือนกันทุก ๆ วัน สำหรับค่า foF2 ที่สถานีโกโตตะบัง พบว่าค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานในท้องถิ่น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางสถิติต่าง ๆ มีลักษณะที่คล้ายกับผลที่ได้รับที่สถานีชุมพร โดย foF2 เริ่มมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาก่อนพระอาทิตย์ขึ้น (05-07 LT) มีค่าลดลงตอนเที่ยงเนื่องจากปรากฏการณ์ bite-out เพิ่มขึ้นอีกครั้งในตอนบ่าย และมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดประมาณพระอาทิตย์ตกดิน (17-19LT) และมีค่าลดลงในช่วงเวลาหลังพระอาทิตย์ตกดิน จนกระทั่งมีค่าต่ำสุดที่ประมาณ 05LT สำหรับค่า foF2<sub>obs</sub> นั้น พบว่าการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของ foF2<sub>obs</sub> จะเหมือนกันทุก ๆ วัน และค่า foF2<sub>obs</sub> ที่สถานีชุมพรมีค่าน้อยกว่าค่า foF2<sub>obs</sub> ที่สถานีโกโตตาบังตลอดเวลาในแต่ละวัน นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์ค่า foF2 ในช่วงที่เกิดแผ่นดินไหว จะเห็นได้ว่าไม่กี่ชั่วโมงก่อนการเกิดแผ่นดินไหว ค่า foF2 จะมีค่าลดลงจนมีค่าน้อย ๆ ในช่วงที่เกิดแผ่นดินไหว และในช่วงเวลา 2-3 วันก่อนแผ่นดินไหว ค่า foF2 ก็มีค่าที่เพิ่มขึ้นที่ขึ้นอยู่กับค่า foF2 เฉลี่ยในแต่ละวันสำหรับเดือนสิงหาคม กันยายนและตุลาคม ปี 2007 การเปลี่ยนแปลงของค่า foF2 สามารถที่จะเห็นได้ในวันที่ 31 กันยายน 2002 เมื่อเทียบกับวันอื่น ๆ ที่แตกต่างกันออกไป จำนวน 3 วัน ในช่วงเวลา 2-3 ชั่วโมงก่อนการเกิดแผ่นดินไหว ค่า foF2 เป็นค่าที่ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับเวลาเดียวกัน (11:32 LT) ในวันอื่น แล้วค่า foF2 จะมีค่าที่สูงขึ้นเท่ากับ 12.1 MHz

ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงของค่า TEC ในช่วงที่เกิดแผ่นดินไหว พบว่า ในระหว่างที่เกิดแผ่นดินไหวที่รุนแรง  $M > 6.8$  เราสังเกตการเปลี่ยนแปลงของ TEC ionospheric ภายใน 5 วันก่อนเกิดแผ่นดินไหวซึ่งถูกทำเครื่องหมายด้วยลูกศร ในกรณีนี้เราสังเกตเห็นการเพิ่มขึ้นของ ionospheric TEC สองวันก่อนที่จะเริ่มการซ็อกหลักในขณะที่เราสังเกตการลดลงของ ionospheric TEC 3-5 วันก่อนเกิดแผ่นดินไหว การเปลี่ยนแปลงในดัชนี Dst, ดัชนี ap และดัชนี AE ในช่วงเวลาเหล่านี้จะปรากฏขึ้นด้วย โดยดัชนี Dst มีค่าน้อยกว่า 720 nT เสมอ, ค่าของดัชนี ap น้อยกว่า 25 และดัชนี AE น้อยกว่า 800 nT ซึ่งแสดงถึงช่วงเวลาที่ยียบสงบของ geomagnetic storm อย่างชัดเจน

## 5.2 แนวทางการพัฒนางานวิจัย

1. กำลังจะวิจัยและเพิ่มแผนภาพ TEC 3 มิติ (TEC assimilation) ด้วยวิธี EOF (empirical orthogonal function) เข้าไปเป็นส่วนหนึ่งในเว็บไซต์ศูนย์การเรียนรู้สภาพอากาศและภัยพิบัติ
2. คำนวณหาค่าเวลาประวิงที่นำไปใช้กับระบบ GNSS การนำร่องและการบิน
3. คำนวณ electron density profiles จากค่า bottomside thickness parameter ที่นำเสนอ
4. มีการพัฒนาหน้าจอโปรแกรม GUI เพื่อแจ้งเตือนสภาวะผิดปกติและการเกิดภัยพิบัติ



## บรรณานุกรม

- [1] N. Bergeot et al., “The influence of space weather on ionospheric total electron content during the 23rd solar cycle,” J. Space Weather Space Climate, 3 (A25), 2013.
- [2] L. R. Cander, “Total electron content modelling for space weather applications,” 6th GNSS Vulnerabilities and Solutions Conference, 2012.
- [3] O. P. Singh, “GPS based total electron content (TEC) anomalies and their association with large magnitude earthquakes occurred around Indian region,” Indian Journal of Radio & Space Physics, 42, 131 – 135, June 2013.
- [4] T. Tsugawa et al., “Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake,” Earth Planets Space, 63, 875–879, 2011.
- [5] G. Occhipinti et al., “Tsunami detection by GPS: How ionospheric observations might improve the global warning system,” Innovation: System Design & Test, GPS World, 50 – 57, February 2008.
- [6] นรเสฏฐ์ วิชัยพาณิชย์, “การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้น F ค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 ค่าแฟกเตอร์ M(3000)F2 และความสูงสูงสุดของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์บริเวณละติจูดต่ำ,” วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, วิศวกรรมโทรคมนาคม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551.
- [7] ภูมิอากาศไทย. สืบค้นจาก <https://th.wikipedia.org/wiki/ภูมิอากาศไทย>.
- [8] ศุภกร ชินวรรณโณ. สืบค้นจาก การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของประเทศไทยในอนาคต. [http://startcc.iwlearn.org/doc/Doc\\_thai\\_4.pdf](http://startcc.iwlearn.org/doc/Doc_thai_4.pdf).
- [9] แผ่นดินไหว. สืบค้นจาก <http://www.tmd.go.th/info/info.php?FileID=33>.
- [10] C. Nayak, L. C., Tsai, S. Y., Su, I. A. Galkin, A. T. K. Tan, Ed Nofri, and P. Jamjareegulgarn, “Peculiar features of the low- and mid-latitude ionospheric response to the St. Patrick day geomagnetic storm of March 17, 2015,” Journal of Geophysical Research - Space Physics, 2016, doi: 10.1002/2016JA022489.
- [11] J. M. Forbes, M. Codrescu, T. J. Hall, “On the utilization of ionosonde data to analyze the latitudinal penetration of ionospheric storm effects. Geophys. Res. Lett., 15, 249–252, 1988.
- [12] B. G. Fejer and L. Scherliess, “Empirical models of storm time equatorial zonal electric fields,” J. Geophys. Res., 102, 24,047–24,056, 1997. doi:10.1029/97JA02164.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] T. J. Fuller-Rowell, M. V. Codrescu, H. Risbeth, R. J. Moffett, S. Quegan, "On the seasonal response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms," *J. Geophys. Res.*, 101, 2343–2354, 1996. doi:10.1029/95JA01614.
- [14] S. Ramakrishnan and K. Rawer, "Electron density reference profile in the lower ionosphere," *Adv. Space Res.*, 5, 29-34, 1985.
- [15] D. Bilitza, "International reference ionosphere 2000," *Radio Science*, 36, 2, 261-275, 2001.
- [16] T. L. Gulyaeva, "Progress in ionospheric information based on electron density profile analysis of ionograms," *Adv. Space Res.*, 7, 39-48, 1987.
- [17] D. Altadill, J. M. Torta, E. Blanch, "Proposal of new models of the bottom-side B0 and B1 parameters for IRI," *Adv. Space Res.*, 43, 1825-1834, 2009.
- [18] B. W. Reinisch and X. Huang, "Low latitude digisonde measurements and comparison with IRI," *Adv. Space Res.*, 18 (6), 5–12, 1996.
- [19] M. L. Zhang, W. Wan, L. Liu, J. K. Shi, "Variability of the behavior of the bottomside (B0, B1) parameters obtained from the ground-based ionograms at China's low latitude station," *Adv. Space Res.*, 42, 695–702, 2008.
- [20] K. Venkatesh and P. R. Fagundes, "Bottom-side profile parameters (B0, B1) characteristics over the Brazilian equatorial and low latitudes and their comparison with different options in the IRI-2012 model during the 24th solar minimum (2010-2011)," *J. Atmos. Sol. Ter. Phys.*, 2016.
- [21] P. Jamjareegulgarn, P. Supnithi, K. Watthanasangmechai, T. Yokoyama, T. Tsugawa, M. Ishii, "A new expression for computing the bottomside thickness parameter and comparisons with the NeQuick and IRI-2012 models during declining phase of solar cycle 23 at equatorial latitude station, Chumphon, Thailand," *Adv. Space Res.* 2016.
- [22] P. Jamjareegulgarn, P. Supnithi, K. Hozumi, T. Tsugawa, "A correction factor of bottomside thickness parameter for computing TEC in global navigation satellite systems," *iEECON 2017*, 2017.
- [23] M. M. de Gonzalez and S. M. Radicella, "On a characteristic point at the base of F2 layer in the ionosphere," *Adv. Space Res.*, 10 (11), 17-20, 1990.
- [24] J. Bremer, Lj. R. Canderb, J. Mielicha, R. Stamperb, "Derivation and test of ionospheric activity indices from real-time ionosonde observations in the European region," *Solar-Terrestrial Physics*, 68 (18), 2075-2090, 2006. doi.org/10.1016/j.jastp.2006.07.003.

[25] J. Mielich and J. Bremer, “A modified index for the description of the ionospheric short- and long-term activity,” *Ann. Geophys.*, 28, 2227–2236, 2010.

[26] Gulyaeva, T.L., Stanislawski, I., Tomasik, M., “Ionospheric weather: Cloning missed foF2 observations for derivation of variability index,” *Ann. Geophys.*, 26, 315–321, 2008.

[27] Gulyaeva, T.L., “Proxy for the ionospheric peak plasma density reduced by the solar zenith angle,” *Earth, Planets and Space*, 61 (5), 629–631, 2009.

[28] N. Jakowski, S. M. Stankov, S. Schlueter, D. Klaehn, “On developing a new ionospheric perturbation index for space weather operations,” *Adv. Space Res.*, 38, 2596–2600, 2006.

[29] N. Jakowski, C. Borries, C. Wilken, “Introducing a disturbance ionosphere index,” *Radio Sci.*, 47 (RS0L14), 2012.

[30] G. Blewitt, “An automatic editing algorithm for GPS data,” *Geophys. Res. Lett.* 17, 199-202, 1990.

[31] G. Ma and T. Maruyama, “Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan,” *Ann. Geophys.* 21, 2083-2093, 2003.

[32] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, J. Collins, “Global Positioning System: Theory and Practice,” Springer Publisher, 1994.

[33] N. Wakai, H. Ohyama, T. Koizumi, “Example of typical ionogram,” *Manual of Ionogram Scaling, Third Version*, 1987.

[34] V. H. Rios, V. P. Kim, V. V. Hegai, “Abnormal perturbations in the F2 region ionosphere observed prior to the great San Juan earthquake of 23 November 1977,” *Adv. Space Res.*, 33, 323–327, 2004.

[35] J. Y. Liu, Y. I. Chen, Y. J. Chuo, and C. S. Chen, “A statistical investigation of pre earthquake ionospheric anomaly,” *J. Geophys. Res.*, 111 (A05304), , 2006.

[36] M. Abdullah, J. S. Mandeep, S. Zainuddin, S. Abdullah, A. F. M. Zain, “Variations of foF2 Prior to Earthquakes,” *MAPAN – Journal of Metrology Society of India*, 26 (2), 97-103, 2011.

[37] D. K. Sondhiya, A. Sonakia, A. K. Gwal, “Wavelet analysis of an Ionospheric foF2 parameter as a precursor of earthquakes using ground-based techniques,” 40th COSPAR Scientific Assembly, August 2-10, 2014, Moscow, Russia.

[38] C. U. Villalobos, M. A. Bravo, E. M. Ovalle, A. J. Foppiano, “Ionospheric characteristics prior to the greatest earthquake in recorded history,” *Adv. Space Res.*, 57, 1345-1359, 2016.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[39] K. Sharma, R. S. Dabas, S. K. Sarkar, R. M. Das, S. Ravindran, A. K. Gwal, “Anomalous enhancement of ionospheric F2 layer critical frequency and total electron content over low latitudes before three recent major earthquakes in China,” *J. Geo. Res.*, 115 (A11313), 2010.

[40] Y. Yao, P. Chen, H. Wu, S. Zhang, W. Peng, “Analysis of ionospheric anomalies before the 2011 Mw 9.0 Japan earthquake,” *Chinese science bulletin*, 57, 500-510, 2012.

[41] N. Wichaipanich, P. Supnithi, T. Tsugawa, T. Maruyama, T. Nagatsuma, “Comparison of ionosphere characteristic parameters obtained by ionosonde with IRI-2007 model over Southeast Asia,” *Adv. Space Res.*, 52, 1748-1755, 2013.

[42] T. Maruyama, M. Kawamura, S. Saito, K. Nozaki, H. Kato, N. Hemmakorn, T. Boonchuk, T. Komolmis, C. H. Duyen, “Low latitude ionosphere-thermosphere dynamics studies with ionosonde chain in Southeast Asia,” *Ann. Geophys.*, 25, 1569-1577, 2007.

[43] N. Wichaipanich, S. Suwanumpai, K. Hozumi, “Anomalous Variations of Ionospheric F2-Layer Critical Frequency Prior to the Earthquake of September 30, 2009 Affecting Thailand,” *ISCIT 2018*, Sep. 26 - 29, 2018.

[44] S. Priyadarshi, S. Kumar, A. K. Singh, “Changes in total electron content associated with earthquakes ( $M > 5$ ) observed from GPS station, Varanasi, India,” *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2 (2), 123-139, 2011. doi: 10.1080/19475705.2011.563390.

[45] M. B. Gokhberg, V. A. Morgounov, T. Yoshino, I. Tomizawa, “Experimental measurement of electromagnetic emissions possibly related to earthquakes in Japan,” *Journal of Geophysical Research*, 87, 7824–7828, 1982.

[46] J. Y. Liu, Y. J. Chuo, S. J. Shan, Y. B. Tsai, Y. I. Chen, S. A. Pulnits, S. B. Yu, “Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC,” *Annales Geophysicae*, 22, 1585–1593, 2004.

[47] M. Fedrizzi, R. B. Langley, A. Komjathy, M. C. Santos, E. R. De Paula, I. J. Kantor, “The low-latitude ionosphere: monitoring its behavior with GPS,” *GPS World*, 13, 41–47, 2002.

[48] <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=17980815>

[49] <https://en.wikipedia.org/wiki/Earthquake>

[50] <http://www.earthquake.tmd.go.th/home.html>

[51] [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012\\_vitmo.html](https://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html).

[52] <http://utd500.utdallas.edu/ionosphere.htm>.

[53] <http://solarcyclescience.com/forecasts.html>.

[54] <http://www.lesa.biz/earth/hydrosphere/elno>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [55] <https://sites.google.com/site/sciencesittisak/content01/content011>.
- [56] [http://data.allenai.org/tqa/layers\\_of\\_the\\_atmosphere\\_L\\_0023](http://data.allenai.org/tqa/layers_of_the_atmosphere_L_0023).
- [57] <http://www.digisonde.com/digisonde-station-map.html>.
- [58] ลัญฉกร วุฒิสีทชีกุลกิจ และคณะ, “MATLAB การประยุกต์ใช้งานทางวิศวกรรมไฟฟ้า,” พิมพ์ครั้งที่ 3, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ, 2551.
- [59] M. Nishioka, T. Tsugawa. H. Jin, M. Ishii, “A new ionospheric storm scale based on TEC and foF2 statistics,” *Space Weather*, 15, 228-239.
- [60] B. Nava, P. Coïsson, S. M. Radicella, “A new version of the NeQuick ionosphere electron density model,” *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 70, 1856-1862, 2008.
- [61] M. L. Zhang, S. M. Radicella, P. Spalla, “The use of simultaneous observations of TEC and ground vertical ionospheric soundings to improve the modeling of the ionosphere,” IRI Workshop, Athens, Greece, 1991.
- [62] K. Venkatesh, P. R. Fagundes, D. S. V. V. D. Prasad, C. M. Denardini, A. J. de Abreu, R. de Jesus, and M. Gende, “Day-to-day variability of equatorial electrojet and its role on the day-to-day characteristics of the equatorial ionization anomaly over the Indian and Brazilian sectors,” *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, 9117-9131, 2015.
- [63] B. V. K. Murthy, S. S. Hari, V. V., Somayajulu, “Nighttime equatorial thermospheric meridional winds from ionospheric h' F data. *J. Geophys. Res.* 95 (A4), 4307–4310, 1990.
- [64] B. G. Fejer, E. R. de Paula, R. A. Heelis, W. B. Hanson, “Global equatorial ionosphere vertical plasma drifts measured by the AE-E satellite,” *J. Geophys. Res.* 100, 5769-5776, 1995.
- [65] J. Y. Liu, H. F. Tsai, C. C. Wu, C. L. Tseng, L. C. Tsai, W. H. Tsai, K. Liou, J. K. Chao, “The effect of geomagnetic storm on ionospheric total electron content at the equatorial anomaly region,” *Adv. Space Res.* 24 (11), 1491-1494, 1999.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก  
ผลผลิตงานวิจัย 3 ปี (งบประมาณปี พ.ศ. 2560 – 2562)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Variations of bottomside thickness parameters at the northern and the southern of EIA crests during solar maximum of the 24<sup>th</sup> solar cycle

Punyawi Jamjareegulgarn<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus, Chumphon 86160, Thailand.  
kjpunyaw@kmitl.ac.th

Udomsit Tangtrakunphaisan<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Division of Computer, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus, Chumphon 86160, Thailand.  
ping0056@gmail.com

**Abstract**— This paper studies and analyzes the variations of bottomside thickness parameters of the ionosphere. The thickness parameter is used to evaluate the electron density as well as the total electron content, and the latter can be used to correct receiver positions in GNSS. The NeQuick bottomside thickness parameter (B2bot) with correction factors (B2P\_2) at Jicamarca and Ramey stations, the northern and the southern of EIA crests, are computed and compared with the observed B0 of digisonde and the IRI2012-predicted B0. Our results show that the diurnal variations of the B2P\_2 have the same trends as those of the B0\_obs. The B2P\_2 are also close to those of the B0\_obs for all seasons compared with the others. The original B2bot (B2\_NeQ) always overestimate the B0\_obs for all seasons and they are often higher than other parameters in the winter and equinox. Among the IRI B0 values, the B0\_Gul are close to the B0\_obs compared with the B0\_Bil and the B0\_ABT. A dominant result discovered in this work is that the great discrepancies between the B2P\_2 and the B0\_obs at Jicamarca during the period of 12-20 LT are found surprisingly, whereas ones at Ramey disappear.

**Keywords**— bottomside thickness parameter; EIA crests; GNSS; IRI; NeQuick

## I. INTRODUCTION

The Committee on Space Research (COSPAR) and the International Union of Radio Science (URSI) have developed a series of International Reference Ionosphere (IRI) models and released IRI-2012 model as the latest version. The IRI-2012 model has been updated with many improvements such as ABT-2009 option for both the B0 (thickness parameter), the B1 (shape parameter), and the corresponding electron density, etc. The IRI model is an empirical model of the ionosphere which gives monthly averages of ionospheric parameters for given location and time. IRI characterizes the bottomside electron density profile  $N(h)$  of the F2 layer ionosphere as follows [1]

$$N(h) = NmF2 \times \frac{\exp(-y^{B1})}{\cosh(y)}, \quad (1)$$

$$\text{and} \quad y = \frac{hmF2 - h}{B0} \quad (2)$$

where  $NmF2$  is the F2 peak electron density,  $hmF2$  is the F2 peak height of  $NmF2$ . The  $y$  values range from 0 to 1. If  $y$  is

equal to 0, the  $h$  is equal to the  $hmF2$  and the B0 is greater than 0. Furthermore, if the  $y$  is equal to 1, the B0 is equal to a difference between the  $hmF2$  and the  $h0.24$  ( $h = h0.24$ ). Here, the  $h0.24$  is a height where the F2 electron density drops to be 24% of the  $NmF2$ .

The IRI-2012 model provides three options to model the (B0, B1) parameters, i.e., Bil-2000, Gul-1987, and ABT-2009. The Bil-2000 option is a standard model that uses a table of B0 values retrieved from the profile inversion of ionograms at equatorial, low, and middle latitude stations [2]. The Gul-1987 option comprises a functional description of the observed correlation between the  $hmF2$  and the  $h0.5$  (the height where the electron density is the half of  $NmF2$ ) at middle latitude stations and that relation is converted into a model for computing the B0\_Gul [3]. The ABT-2009 option employs spherical harmonics analysis to predict the variations in B0 with respect to modified dip latitude, local time, month, and sunspot number. Their results show that the B0 improvements can be achieved to be 40% over Gul-1987 and 32% over Bil-2000, while the B1 improvement can also be fulfilled to be 20% over other parameters [4].

Several earlier studies have investigated the variations in B0 [5]-[7]. They revealed that the diurnal, seasonal, solar activity variations in B0 depend on the locations of ionospheric monitoring, while the variations in B1 change slightly with the seasons. During daytime, the B0 with Gul-1987 (B0\_Gul) overestimates the observed B0 of digisonde (B0\_obs) [5]. During daytime at Hainan station, the B0 with Bil-2000 (B0\_Bil) is in a good agreement with the B0\_obs than the B0\_Gul in the summer, and vice versa in the winter [6]. At the equatorial and low latitudes, the B0\_Gul is in a good agreement to the B0\_obs compared with the B0\_ABT and the B0\_Bil during the 24<sup>th</sup> solar minimum (year 2010-2011) [7]. Recently, Jamjareegulgarn et al. [8] have proposed a new NeQuick bottomside thickness parameter instead of the original one (B2\_NeQ) which is designated as B2P\_1 in this work. The diurnal and seasonal variations in B2P\_1 are compared with those obtained from the B2\_NeQ, the B0\_Bil and the B0\_ABT, excluding the B0\_Gul. Their results show that the diurnal variations in B2P\_1 have the same trends as those obtained from the B0\_obs at Kwajalein and Jicamarca stations compared with those in B2\_NeQ. Afterwards,



Jamjareegulgarn et al. [9] proposed a correction factor for the B2P\_1 (namely, B2P\_2 in this work) at Kwajalein so as to reduce the differences between the B0\_obs and the B2P\_1. The B2P\_2 is closer to the B0\_obs and improves better about 65-83% compared with the B2P\_1. However, they studied only one date in each season of year 2008 during solar minimum. Moreover, the previous studies have also shown the great discrepancies between the B0\_obs and the IRI-predicted B0, particularly at equatorial and low latitudes. Few studies have investigated on the B0 values at the northern and the southern of EIA crests (around 15°N and 15°S) simultaneously. Hence, in this work, the variations in B2P\_2 at the northern and the southern of EIA crests are studied and analyzed. Then, the results are compared with the B0\_obs and the IRI-predicted B0 with three options (B0\_Gul, B0\_Bil, and B0\_ABT). The structures of this paper are as follows. The data used and the computation of NeQuick bottomsides thickness parameters are explained in Section 2 and 3, respectively. Results and discussions are addressed in Section 4. Finally, the conclusions are drawn in Section 5.

## II. DATA USED

In this work, the studied data are hourly median values of  $f_oF2$  (F2 layer critical frequency),  $hmF2$  (F2 layer peak height),  $m(3000)F2$  (F2 layer propagation factor) and B0 of digisonde stations as shown in Fig. 1. These ionospheric data are in 2014 (solar maximum of the 24<sup>th</sup> solar cycle) and are obtained from DIDBase via <http://giro.uml.edu/didbase/scaled.php>. Then, the retrieved data are grouped into 3 seasons, i.e., winter (November, December, January and February), equinox (March, April, September and October), and summer (May – August). Ramey and Jicamarca stations are located near the northern and the southern of EIA crests, respectively. Moreover, the 12-month running average of the sunspot number (Rz12) used in this study is retrieved from the IRI-2012 model web site [10].



Fig. 1. Locations of the Ramey and Jicamarca digisonde stations.

(Source: <http://www.digisonde.com/digisonde-station-map.html>)

## III. NEQUICK BOTTOMSIDE THICKNESS PARAMETERS

NeQuick 2 model known as an ionospheric electron density model provides both electron density and TEC values at a specified geographic location, height, date, and time. The NeQuick 2 model has a relationship between bottomsides and topsides ionospheres. A major parameter of this relationship is the NeQuick bottomsides thickness parameter (B2bot). The original B2bot proposed by [11] is also studied and designated as B2\_NeQ in this work. The B2\_NeQ can be determined using (3) and (4) as follows.

$$B2\_NeQ = \frac{0.385 \times NmF2}{(dN/dh)_{\max}} \quad (3)$$

where the maximum of the electron density derivative with respect to height  $(dN/dh)_{\max}$  (unit:  $10^9 \text{ m}^{-3}\text{km}^{-1}$ ) is computed using the empirical relation in (4) as shown below.

$$\ln((dN/dh)_{\max}) = -3.467 + 1.714 \ln(f_oF2) + 2.02 \ln(M(3000)F2) \quad (4)$$

Moreover, the new expression for computing the NeQuick B2bot presented in [8] is also mentioned and designated as B2P\_1 in this work. The B2P\_1 can be calculated by (5) as shown below.

$$B2P\_1 = \frac{\tau/2 - 0.113hmF2}{1 + Q} \quad (5)$$

where  $\tau$  is an ionospheric slab thickness (km) which is computed by (6), and  $Q$  is a new variable which is computed by (7) for representing the topsides shape parameter ( $k$ ) in [8].

$$\tau = \frac{TEC}{NmF2} \quad (6)$$

$$Q = 3.22 - 0.0538 f_oF2 - 0.00664 hmF2 + 0.00257 Rz12 \quad (7)$$

Note that how to derive both the  $Q$  and the B2P\_1 can be studied additionally in [8].

Since there is a discrepancy between the B0\_obs and the B2P\_1 in (5), an average of the differences between the B0\_obs and the B2P\_1 is computed and represented by a constant  $c$  in (8) as a part of correction factor for the B2P\_1 [9]. Therefore, the expression for computing the B2P\_1 with a correction factor (B2P\_2) is demonstrated below in (8).

$$B2P\_2 = B2bot\_Pro + c \cdot \tau \quad (8)$$

Furthermore, an absolute difference between the computed B2P\_2 and the B0\_obs (namely, AD\_B) is also studied and computed by (9). The AD\_B values are analyzed so as to know how the B2P\_2 values are close to the B0\_obs values.

$$AD\_B = |B0\_obs - B2P\_2| \quad (9)$$

## IV. RESULTS AND DISCUSSIONS

Fig. 2 – 4 show diurnal variations for all three seasons in 2014 at Jicamarca station, i.e., winter, equinox, and summer, respectively. It can be seen that the diurnal variations of the B2P\_2 have the same trends as those of the B0\_obs at Jicamarca station and are also close to those of the B0\_obs for all three seasons compared with other parameters. Meanwhile, the original NeQuick B2bot (B2\_NeQ) always overestimate the B0\_obs for all three seasons. Among the IRI B0 values, the B0\_Gul are close to the B0\_obs in the summer compared with the B0\_Bil and the B0\_ABT. Meanwhile, the B0\_Gul are close to the B0\_obs only during 00-09 LT and 16-23 LT in the winter and equinox. It is worthy to note that the diurnal variations of all studied parameters have the same trends as those of the B0\_obs only in the summer. The B2\_NeQ are often the highest values in the winter and equinox. Meanwhile, the B2\_NeQ, the B0\_Bil, and the B0\_ABT always are higher than the B0\_obs, the B2P\_2 and the B0\_Gul obviously in the summer. Moreover, the minimum points of all bottomside thickness parameters are during the period of 00-04 LT. The diurnal peaks of the B0\_obs exist at the same local time (11 LT) in the equinox and the summer, while a diurnal peak of the B0\_obs exists at 18 LT in the winter. The diurnal peaks of the IRI B0 values occur at the local noontime, whereas those of the B2P\_2 and the B2\_NeQ are during the period of 14-19 LT. Furthermore, the AD\_B in the summer always are lower than 30 km and they are often lower than 30 km in the winter and the equinox, except during the period of 12-20 LT. At that period, the AD\_B range approximately from 31 km to 76 km surprisingly.

The preliminary conclusions of our results at Jicamarca station can be addressed as follows. The B2P\_2 are closer to the B0\_obs than the B2\_NeQ, and the diurnal values in B2P\_2 have the same trends as those obtained from the B0\_obs compared with those in B2\_NeQ. Therefore, the B2P\_2 are suggested to be used instead of the original NeQuick B2bot (B2\_NeQ). However, the great discrepancies between the B2P\_2 and the B0\_obs appear obviously during the period of 12-20 LT in the winter and equinox. On the other hand, when we study the B2P\_2 at Ramey station (the northern of EIA crest), the great discrepancies are not available as shown in Fig. 5. The great discrepancies at Jicamarca station raise an interesting topic that leads to further investigations and discussions about “why they occur at Jicamarca station which is located near the southern of EIA crest”.

Fig. 5 shows the diurnal values of the B2P\_2, the B2P\_1, and the B0\_obs for all seasons in 2014 at Ramey station. The IRI B0 and the B2\_NeQ are not considered in this case, since our main goal is to show the disappearance of great discrepancies at Ramey compared with those observed at Jicamarca. We find that the diurnal variations of the B2P\_2 not only have the same trends, but also are at the nearby values as those obtained from the B0\_obs for all seasons compared with those of the B2P\_1. Both the B2P\_2 and the B0\_obs start to increase during the period of 00-04 LT for all seasons, but the diurnal peaks occur at different local times for

each season. The diurnal peaks exist at 13-15 LT, 08 LT, and 10-11 LT in the winter, equinox, and summer, respectively.

Moreover, the AD\_B values at Ramey station are small ranging from 0.07 – 13.63 km. The minima of AD\_B often exist at 11 LT whereas the maxima of AD\_B occur at the different local times.

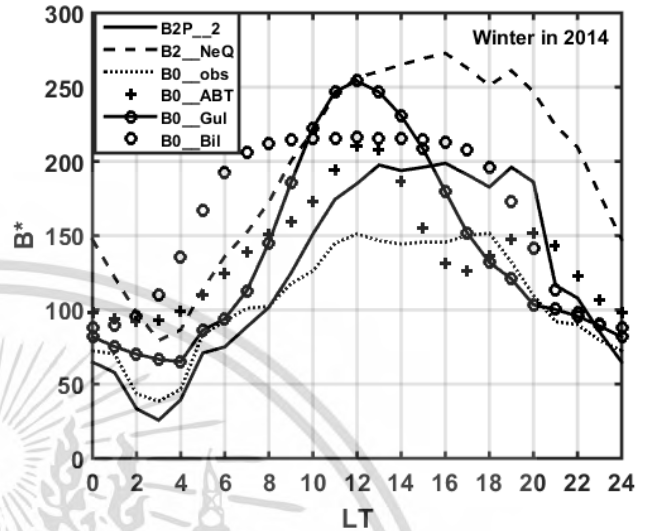


Fig. 2. Diurnal variations of the thickness parameters in winter at Jicamarca.

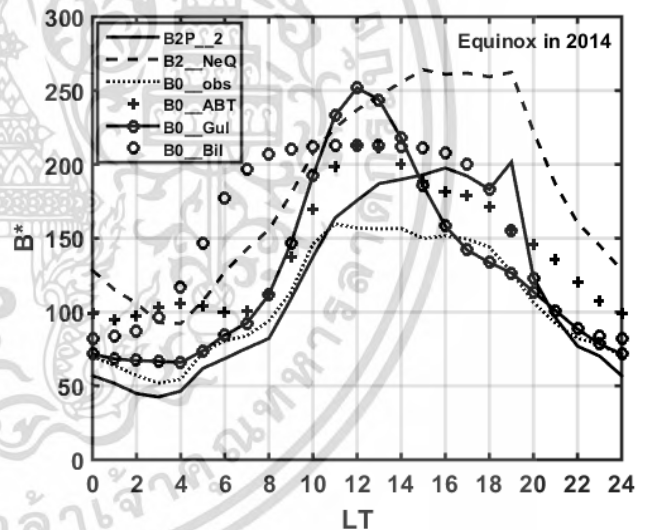


Fig. 3. Diurnal variations of the thickness parameters in equinox at Jicamarca.

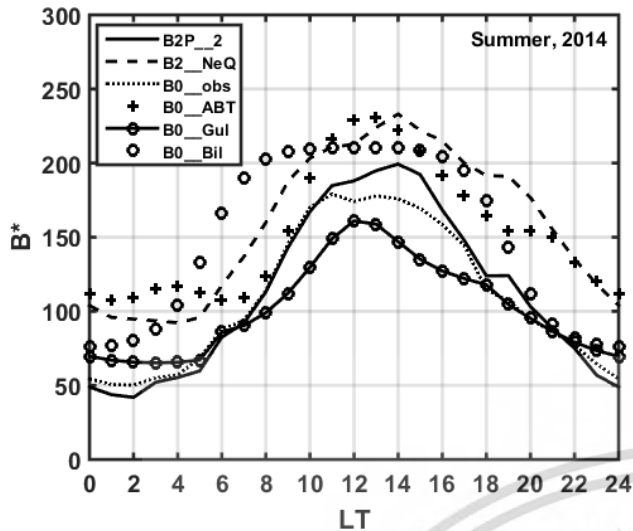


Fig. 4. Diurnal variations of the thickness parameters in summer at Jicamarca.

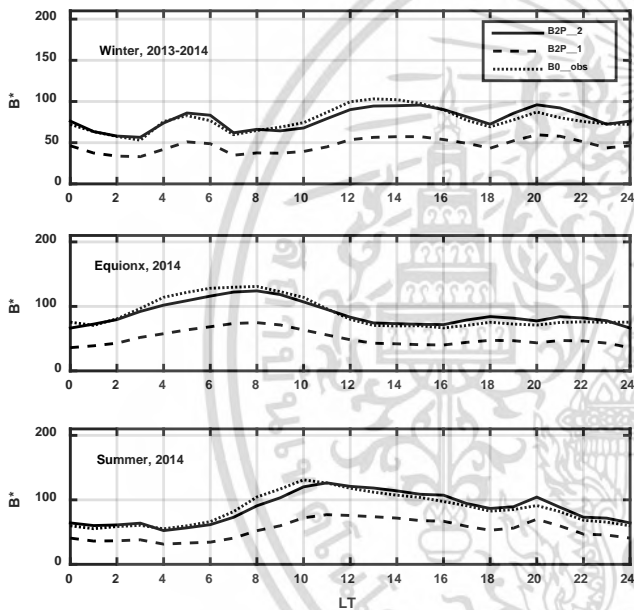


Fig. 5. Diurnal variations of the thickness parameters at Ramey station.

For the constant  $c$  in (8), we find that the  $c$  values are equal to 0.129, 0.157, and 0.188 in the winter, equinox, and summer, respectively, at Jicamarca station. An average of the constant  $c$  for all seasons at Jicamarca is equal to 0.158. Meanwhile, at Ramey station, the  $c$  values are equal to 0.165, 0.169, and 0.161 in the winter, equinox, and summer, respectively. An average of the constant  $c$  for all seasons at Ramey is equal to 0.165.

## V. CONCLUSIONS

In this paper, the NeQuick bottomside thickness parameter with a correction factor (B2P\_2) proposed in [9] is taken into account so as to study and analyze the diurnal values of

seasonal variations at both the northern and the southern of EIA crests (Jicamarca and Ramey) during solar maximum of the 24th solar cycle (year 2014). Our results can be concluded that the diurnal variations of the B2P\_2 do not only have the same trends, but also have the nearby values as those obtained from the B0\_obs for all seasons compared with those obtained from the B2\_NeQ and the IRI-predicted B0. The B2\_NeQ always overestimate the B0\_obs for all seasons. Hence, the B2P\_2 are suggested to be used instead of the B2\_NeQ. The great discrepancies between the B2P\_2 and the B0\_obs appear obviously during the period of 12-20 LT in the winter and equinox at Jicamarca, whereas they disappear at Ramey. "What are the causes of these great discrepancies at Jicamarca" discovered in this paper is an interesting topic that leads to further investigations and discussions in the future.

## ACKNOWLEDGMENT

The authors are grateful to the anonymous reviewers for the comments. The financial support from the annual government budget in A.D. 2017 is acknowledged in this work. The authors are grateful to Prof. Dr. Pornchai Supnithi, KMITL and NICT researchers for technical discussions and suggestions. In addition, the authors would like to thank Jumpon Udomchaibanjerd and Jirapoom Budtho for constructing a program to retrieve the ionospheric data from DIDBase web.

## REFERENCES

- [1] S. Ramakrishnan and K. Rawer, "Electron density reference profile in the lower ionosphere," *Adv. Space Res.*, vol. 5, pp. 29-34, 1985.
- [2] D. Bilitza, "International reference ionosphere 2000," *Radio Science*, vol. 36, no. 2, pp. 261-275, 2001.
- [3] T.L. Gulyaeva, "Progress in ionospheric information based on electron density profile analysis of ionograms," *Adv. Space Res.*, vol. 7, pp. 39-48, 1987.
- [4] D. Altadill, J.M. Torta, E. Blanch, "Proposal of new models of the bottom-side B0 and B1 parameters for IRI," *Adv. Space Res.*, vol. 43, pp. 1825-1834, 2009.
- [5] B.W. Reinisch and X. Huang, "Low latitude digisonde measurements and comparison with IRI," *Adv. Space Res.*, vol. 18, no. 6, pp. 5-12, 1996.
- [6] M.L. Zhang, W. Wan, L. Liu, J.K. Shi, "Variability of the behavior of the bottomside (B0, B1) parameters obtained from the ground-based ionograms at China's low latitude station," *Adv. Space Res.*, vol. 42, pp. 695-702, 2008.
- [7] K. Venkatesh and P.R. Fagundes, "Bottom-side profile parameters (B0, B1) characteristics over the Brazilian equatorial and low latitudes and their comparison with different options in the IRI-2012 model during the 24th solar minimum (2010-2011)," *J. Atmos. Sol. Ter. Phys.*, 2016.
- [8] P. Jamjareegulgar, P. Supnithi, K. Wathanasangmechai, T. Yokoyama, T. Tsugawa, M. Ishii, "A new expression for computing the bottomside thickness parameter and comparisons with the NeQuick and IRI-2012 models during declining phase of solar cycle 23 at equatorial latitude station, Chumphon, Thailand," *Adv. Space Res.* 2016.
- [9] P. Jamjareegulgar, P. Supnithi, K. Hozumi, T. Tsugawa, "A correction factor of bottomside thickness parameter for computing TEC in global navigation satellite systems," *iEECON 2017*, 2017.
- [10] [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012\\_vitmo.html](https://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html).
- [11] M.M. de Gonzalez and S.M. Radicella, "On a characteristic point at the base of F2 layer in the ionosphere," *Adv. Space Res.*, vol. 10, no. 11, pp. 17-20, 1990.

การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างของชั้นไอโอโนสเฟียร์ในช่วงที่มีผลกระทบของสุริยະมากที่สุดของวัฏจักรสุริยະที่ 24 สำหรับระบบดาวเทียมนำทางสากล  
Variations of bottomside thickness parameter of ionosphere during the solar maximum of 24<sup>th</sup> solar cycle for global navigation satellite systems

สัพพัญญู สารพันธ์, ศรีญ ดวงสุวรรณ, อุดมสิทธิ์ ตั้งตระกูลไพศาล และ ปุณยวีร์ จามจรกุลกาญจน์\*

Sappanyoo Sarapan, Sarun Duangsuwan, Udomsit Tangtrakunphaisan, and  
Punyawi Jamjareegulgarn\*

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus

\* Corresponding author: chjamjar@hotmail.com

### บทคัดย่อ

บทความศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในช่วงที่มีผลกระทบของสุริยະมากที่สุดของวัฏจักรสุริยະที่ 24 (ปี 2013 - 2014) สำหรับระบบดาวเทียมนำทางสากล โดยค่าข้อมูลที่วัดได้จริงจากสถานีสังเกตการณ์ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จำนวน 12 สถานีในฐานข้อมูล GIRO ถูกนำมาศึกษาและละติจูดถูกแบ่งออกเป็น 4 โซน ได้แก่ 0°-20°, 20°-40°, 40°-60° และสูงกว่า 60° นอกจากนี้ ค่าข้อมูลจะถูกจัดกลุ่มเป็น 3 ฤดูกาล ได้แก่ ฤดูอิควินอกซ์, ฤดูร้อนและฤดูหนาว ในที่นี้ค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างของแต่ละโซนจะถูกหาค่าจากสมการที่นำเสนอ แล้วค่าการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างในแต่ละวันและในแต่ละฤดูกาลของทั้ง 12 สถานีจะถูกเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากเครื่องดิจิจิตอล ผลจากการศึกษา พบว่าค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างที่คำนวณได้จากสมการที่นำเสนอมีการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนและมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่สังเกตได้ ผลต่างสัมบูรณ์ของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างในฤดูร้อนมีค่า 0.09 - 25.11 กิโลเมตร ส่วนผลต่างสัมบูรณ์ในฤดูอิควินอกซ์และฤดูหนาวมีค่า 0.03 - 16.46 กิโลเมตร และ 0.02 - 22.49 กิโลเมตร ตามลำดับ ค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างที่นำเสนอนี้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการหาค่า TEC และค่าเวลาประวิงของสัญญาณจีพีเอสโดยประมาณสำหรับการระบุตำแหน่งของเครื่องรับ GNSS และการทำนายภัยพิบัติได้

**คำสำคัญ:** ฐานข้อมูลกิโกล, พารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่าง, ระบบดาวเทียมนำทางสากล

## Abstract

This paper studies the variations of bottomside thickness parameter of ionosphere during the solar maximum of 24<sup>th</sup> solar cycle (year 2013 – 2014) for global navigation satellite systems. The data observed from twelve ionospheric monitoring stations in GIRO (Global Ionospheric Radio Observatory) database are studied and the geographic latitudes are divided into four zones such as  $0^{\circ}$ – $20^{\circ}$ ,  $20^{\circ}$ – $40^{\circ}$ ,  $40^{\circ}$ – $60^{\circ}$ , and higher than  $60^{\circ}$ . The retrieved data are grouped into three seasons (herein, season consideration regarding to the north hemisphere), i.e., equinox, summer, and winter. Here, the bottomside thickness parameters of each zone are computed using the proposed equations. Afterwards, the diurnal and seasonal variations of the bottomside thickness parameters of all twelve stations are compared with those obtained from Digisonde. The studied results show that the bottomside thickness parameters computed using the proposed equation have similar trends as well as nearby values with the observed ones. The absolute differences of all stations in summer season range from 0.09 – 25.11 km. Meanwhile, the absolute differences in equinox and winter seasons cover from 0.03 – 16.46 km and 0.02 – 22.49 km, respectively. The bottomside thickness parameter proposed in this research is an alternative to compute approximately both the TEC and the GPS propagation delay for GNSS receiver positioning and disaster prediction.

**Keywords:** GIRO database, bottomside thickness parameter, global navigation satellite systems.

## บทนำ

ระบบดาวเทียมนำทางสากล (GNSS) เป็นระบบที่สำคัญสำหรับการลงจอดของเครื่องบิน การระบุพิกัดตำแหน่งบนโลก ฯลฯ การระบุตำแหน่งเครื่องรับ GNSS ที่แม่นยำเป็นหัวข้อที่สำคัญมากซึ่งยังคงมีการศึกษาและได้รับการปรับปรุงโดยใช้เทคนิคหลายวิธี เวลาประวิงในชั้นไอโอโนสเฟียร์เป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญต่อการระบุตำแหน่งที่แม่นยำ ในที่นี้ ค่า

ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ (TEC) ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าเวลาประวิงในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ดังนั้น แบบจำลองค่า TEC ที่แม่นยำและการวัดค่า TEC ที่เชื่อถือได้จึงเป็นหัวข้อที่จำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการปรับแก้ค่าเวลาประวิงในชั้นไอโอโนสเฟียร์ โดยค่า TEC จะแปรผันตรงกับค่าเวลาประวิงในชั้นไอโอโนสเฟียร์ของสัญญาณ GPS (Ma and Maruyama, 2003) การวัด TEC ส่วนใหญ่ในทางปฏิบัติสามารถทำได้จากเครื่องมือวัดจำพวก TOPEX surface reflection, incoherent scatter radar และเครื่องรับ GPS แบบสองความถี่ เป็นต้น นอกจากนี้ ยังมีแบบจำลองในชั้นไอโอโนสเฟียร์จำนวนมากที่มีการนำเสนอค่า TEC อาทิเช่น แบบจำลอง IRI และแบบจำลอง NeQuick ฯลฯ ในอดีตที่ผ่านมา Zhang et al. (1991) ได้เสนอสมการที่ใช้ในการประมาณค่า TEC กับค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นกลางของแบบจำลอง NeQuick (B2bot) ซึ่งจะอธิบายต่อไปในหัวข้อที่ 3 โดยสมการนี้เป็นสมการที่น่าสนใจมาก เนื่องจากเราสามารถที่จะใช้สมการดังกล่าวนี้คำนวณหาค่า TEC โดยที่ไม่ต้องประมวลผลด้วยโปรแกรม RINEX ดังนั้น เทคนิคนี้เป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับสถานีดิจิทัลที่ไม่มีการติดตั้งเครื่องรับ GPS ไว้ใช้งาน

นอกจากนี้ Jamjareegulgarn et al. (2017) ได้นำเสนอค่าปรับแก้ (correction factor) สำหรับพารามิเตอร์ความหนาแน่นกลางที่ Kwajalein มหาสมุทรแปซิฟิก เพื่อที่จะลดค่าผลต่างที่เกิดขึ้นระหว่างพารามิเตอร์ความหนาแน่นกลางที่คำนวณได้จากสมการที่นำเสนอกับค่าที่วัดได้จาก Digisonde (BO\_obs) ผลจากการศึกษาพบว่า ทั้ง 2 ค่ามีค่าที่ใกล้เคียงกันมากขึ้นอย่างชัดเจนและมีการปรับปรุงมากขึ้นประมาณ 65-83% เมื่อเทียบกับค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นกลางที่ไม่มีค่าปรับแก้ อย่างไรก็ตาม การศึกษาดังกล่าวใช้เพียงแค่ 1 วันในแต่ละฤดูกาลในปี 2008 ช่วงวัฏจักรสุริยะที่ต่ำเท่านั้น นอกจากนี้ ผลงานวิจัยจำนวนมากก่อนหน้านี้ก็ยังสามารถแสดงให้เห็นถึงผลต่างที่มากกว่าระหว่างค่าที่วัดได้จาก Digisonde กับค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นกลางที่ทำนายได้จากแบบจำลอง IRI (BO) โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณละติจูดต่ำและใกล้เส้นศูนย์สูตร ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันและตามฤดูกาลของพารามิเตอร์ความหนาแน่นกลางที่มีค่าปรับแก้ของสถานี Digisonde จำนวน 12 สถานีในช่วงที่มีผลกระทบของสุริยะมากที่สุดของวัฏจักรสุริยะที่ 24 (ปี 2013 - 2014) สำหรับระบบดาวเทียมนำทางสากลจะถูกศึกษาในงานวิจัยนี้ แล้วค่า TEC ที่คำนวณได้โดยใช้สมการที่นำเสนอเพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงการคำนวณหาค่า TEC โดยประมาณที่ง่ายขึ้น แทนที่จะมีการประมวลผลหาค่า TEC

โดยใช้โปรแกรม RINEX โดยค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างที่นำเสนอนี้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการคำนวณหาทั้งค่า TEC และค่าเวลาประวิงของสัญญาณจีพีเอสโดยประมาณ

### ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นค่ามัธยฐานรายชั่วโมงของค่า  $foF2$ ,  $hmF2$ , ค่า TEC, ค่า  $m(3000)F2$  และค่า B0 ที่วัดได้จากเครื่องดิจิซอนด์ของสถานีวัดทั่วโลกจำนวน 12 สถานี ดังแสดงในตารางที่ 1 ในที่นี้ ค่าข้อมูลที่วัดได้ในช่วงที่มีผลกระทบของสุริยะมากที่สุดของวัฏจักรสุริยะที่ 24 (ปี 2013 - 2014) ของสถานีดิจิซอนด์ 12 สถานีทั้งหมดจะนำมาจากเว็บไซต์ของ DIDBASE ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลนั้น ค่าข้อมูลจะถูกแบ่งออกเป็น 3 ฤดูกาล ได้แก่ ฤดูหนาว (พฤศจิกายน-กุมภาพันธ์), ฤดูใบไม้ผลิ (มีนาคม, เมษายน, กันยายน และตุลาคม), และ ฤดูร้อน (พฤษภาคม - สิงหาคม) และค่าเฉลี่ยของจำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ที่คิดตลอดระยะเวลา 1 ปี ( $Rz12$ ) ก็นำมาจากเว็บไซต์ IRI-2012

ตารางที่ 1 ตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ของเครื่อง Digisonde ในสถานีวัดทั่วโลกจำนวน 12 สถานี

Twelve Digisonde Stations	Geographic Latitudes	Latitude	Longitude
Ramey		18.50	292.90
Ascension Island	0°-20°	-7.95	345.60
Jicamarca	(group 1)	-12.00	283.20
Wuhan		30.50	114.40
El Arenosillo	20°-40°	37.10	353.30
Louisvale	(group 2)	-28.50	21.20
Idaho National Laboratory		43.81	247.32
Chilton	40°-60°	51.50	359.40
Port Stanley	(group 3)	-51.60	302.10
Yakutsk		62.00	129.60
Tromso	> 60°	69.60	19.20
Qaanaaq	(group 4)	77.50	290.80

### การคำนวณค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่าง (B2\_bot)

#### 1. การคำนวณค่า B2bot ที่ไม่มีค่าปรับแก้ (B2botP\_old)

แบบจำลอง NeQuick 2 เป็นแบบจำลองที่แสดงค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นไอโอโนสเฟียร์อันหนึ่งซึ่งแสดงค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนและค่า TEC ที่ตำแหน่ง วันและเวลาที่ต้องการ โดยแบบจำลอง NeQuick 2 นี้จะถูกอธิบายด้วยฟังก์ชันเอพสไตน์ (Epstein) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านล่างกับชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านบน Zhang et al. (1991) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ความหนาด้านล่าง (B2bot), ค่า  $k$  (พารามิเตอร์รูปร่างด้านบน), ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนพีคชั้น F2 (NmF2) และค่า TEC ของแบบจำลอง NeQuick 2 ด้วยสมการที่ 2

$$TEC = 2(1 + k)NmF2 \times B2bot \quad (2)$$

ในที่นี้ ค่า  $k$  หาได้จากสมการที่ 3

$$k = 3.22 - 0.0538foF2 - 0.00664hmF2 + 0.113 \frac{hmF2}{B2bot} + 0.00257Rz12 \quad (3)$$

หลังจากนั้น แทนค่า  $k$  จากสมการที่ 3 ลงไปในสมการที่ 2 แล้วทำการจัดรูปสมการให้อยู่ในรูปของ B2bot เราจะได้สมการ B2bot ที่ได้รับการจัดรูปใหม่ดังแสดงในสมการที่ 4

$$B2botP_{old} = \frac{\tau/2 - 0.113hmF2}{S} \quad (4)$$

$$S = 4.22 - 0.0538foF2 - 0.00664hmF2 + 0.00257Rz12 \quad (5)$$

$$\tau = \frac{TEC}{NmF2} \quad (6)$$

## 2. การคำนวณค่า B2bot ที่มีค่าปรับแก้ (B2botP\_new)

เนื่องจากมีค่าผลต่างที่เกิดขึ้นระหว่างพารามิเตอร์ความหนาด้านล่างที่คำนวณได้จากสมการที่นำเสนอกับค่าที่วัดได้จาก Digisonde (B0\_obs) ในทางปฏิบัติ ดังนั้นค่าปรับแก้ (correction factor) สำหรับค่า B2botP\_old ควรที่จะได้รับการหาค่าเพิ่มเติม ในงานวิจัยนี้ เราจึงเลือก “อัตราส่วนระหว่างค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างพารามิเตอร์ความหนาด้านล่างที่คำนวณได้จากสมการที่นำเสนอกับค่าที่วัดได้จาก Digisonde (B0\_obs) กับค่า  $\tau$  มาใช้เป็นค่าปรับแก้ (c)” ให้กับค่า B2botP\_old นอกจากนี้ ท่ามกลางพารามิเตอร์ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่



ศึกษาที่ใช้การคำนวณหาค่า B2botP\_old นั้น พารามิเตอร์ทั้งหมดเป็นค่าข้อมูลที่ได้จากการวัดและค่าข้อมูลที่ได้จากสมการเชิงการทดลอง ยกเว้นค่า  $\tau$  เนื่องจากค่า  $\tau$  เป็นอัตราส่วนระหว่างค่า TEC กับค่า NmF2 จึงมีความแตกต่างระหว่างค่า TEC ที่ได้จากดิจิจอนด์และค่า TEC ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดประเภทอื่นๆ ดังนั้น สมการที่ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นที่ปรับแก้ (B2botP\_new) ก็จะคำนวณได้จากสมการที่ 7 ดังนี้

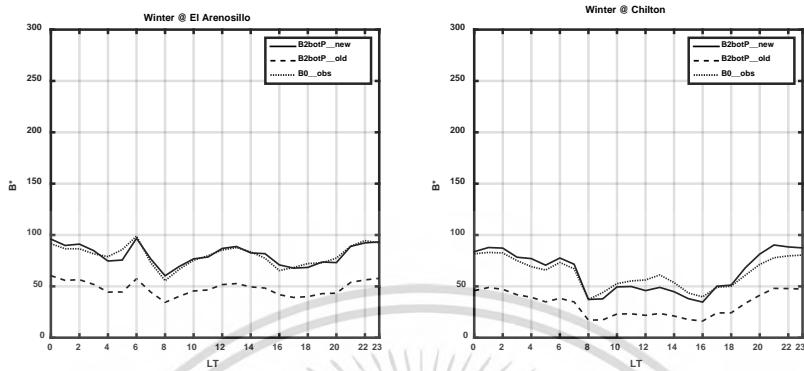
$$\text{B2botP}_{\text{new}} = \text{B2botP}_{\text{old}} + c \times \tau. \quad (7)$$

### ผลการศึกษาและวิจารณ์

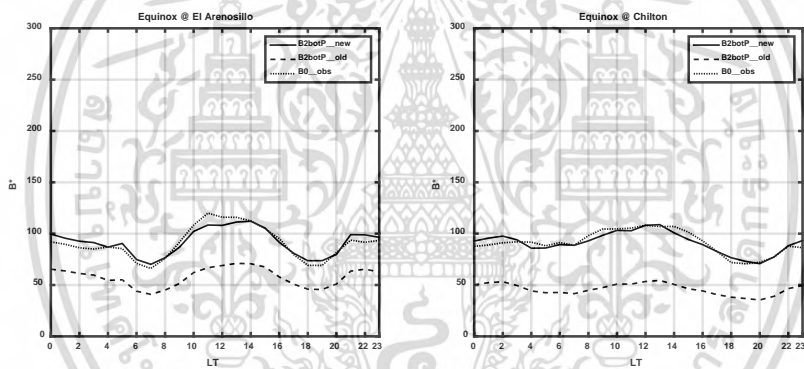
ในหัวข้อนี้ ค่า B2botP\_new จะถูกคำนวณหาค่าออกมาโดยใช้สมการที่ 8 และทำการเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จาก Digisonde (BO\_obs) และค่า B2botP\_old ที่นำเสนอใน Jamjareegulgarn et al. (2016) โดยในที่นี้ จะขอแสดงค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นที่สถานี El Arenosillo (Spain) และสถานี Chilton (England) เท่านั้น เนื่องจากเป็นผลการศึกษาที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นและค่าเฉลี่ยของค่าปรับแก้ที่คำนวณได้ในแต่ละโซนของทั้ง 12 สถานีที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ผลการศึกษามีดังนี้

การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นในฤดูหนาว ฤดูออกวินอกซ์และฤดูร้อนที่เมือง El Arenosillo และ เมือง Chilton ในปี ค.ศ. 2014 มีแสดงไว้ในรูปที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ จากผลการศึกษาจะเห็นได้ชัดว่า ค่า B2botP\_new ที่นำเสนอมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนและมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่สังเกตได้จากเครื่องดิจิจอนด์ (BO\_obs) โดยค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นในตอนกลางวันจะสูงกว่าค่าในตอนกลางคืน ยกเว้นฤดูหนาว นอกจากนี้ คุณลักษณะที่เด่นชัดอีก 2 ประการที่พบก็คือ มีการยกตัว (เพิ่มขึ้น) ของความหนาแน่นอิเล็กตรอนอย่างเห็นได้ชัดในช่วงเวลาก่อนพระอาทิตย์ขึ้นที่เมือง El Arenosillo และในตอนกลางวัน ค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นที่เมือง El Arenosillo จะสูงกว่าค่าที่เมือง Chilton นอกจากนี้ ผลการศึกษาพบว่า ค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นที่เมือง El Arenosillo จะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนกับค่าที่วัดได้ที่เมือง Chung Li ประเทศไต้หวัน (Chuo, 2012) โดยผลต่างสัมบูรณ์ของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นในฤดูหนาวและฤดูออกวินอกซ์มีค่าประมาณ 10 กิโลเมตร ส่วนผลต่างสัมบูรณ์ของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นในฤดูร้อนมีค่าประมาณ 25 กิโลเมตร โดยผลต่างที่มากที่สุดจะเกิดขึ้นที่เวลา 11.00 น. ที่เมือง El Arenosillo นอกจากนี้ ผลต่างสัมบูรณ์ของค่าพารามิเตอร์ความ

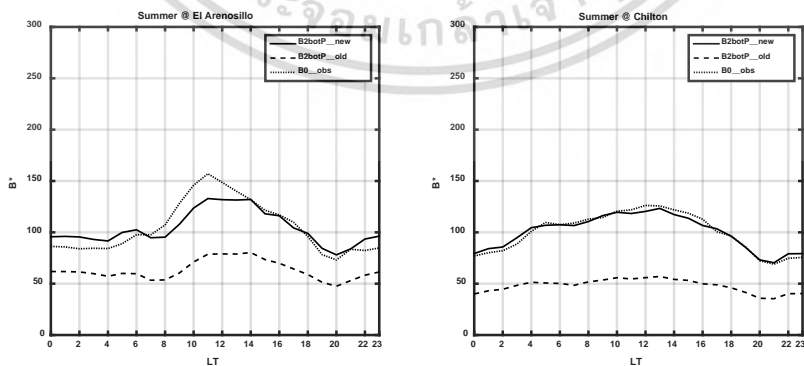
หนาด้านล่างในฤดูร้อนมีค่า 0.09 - 25.11 กิโลเมตร ส่วนผลต่างสัมบูรณ์ในฤดูอิกวินอกซ์และฤดูหนาวมีค่า 0.03 - 16.46 กิโลเมตร และ 0.02 - 22.49 กิโลเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 1 การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่า  $B^*$  ในฤดูหนาว ปี ค.ศ. 2014



รูปที่ 2 การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่า  $B^*$  ในฤดูหนาว ปี ค.ศ. 2014



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่า  $B^*$  ในฤดูหนาว ปี ค.ศ. 2014

## สรุป

พารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างของสถานีดิจิซอนด์ 12 สถานีได้ถูกศึกษาในงานวิจัยนี้ โดยเลือกช่วงเวลาในการศึกษาที่ได้รับผลกระทบของดวงอาทิตย์มากที่สุดของวัฏจักรสุริยะที่ 24 พบว่า ค่า B2botP\_new ที่นำเสนอมีการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนกับค่าที่สังเกตได้จากเครื่องดิจิซอนด์ โดยค่าในตอนกลางวันมีค่าสูงกว่าค่าในตอนกลางคืน ความหนาแน่นอิเล็คตรอนมีค่าที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในช่วงเวลาก่อนพระอาทิตย์ขึ้นที่ El Arenosillo และค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างในตอนกลางวันที่ El Arenosillo มีค่าที่สูงกว่าค่าที่ Chilton

## กิตติกรรมประกาศ

นักวิจัยขอขอบคุณหน่วยงาน NICT ประเทศญี่ปุ่น, เว็บไซต์กิโร (GIRO) สำหรับข้อมูลดิจิซอนด์ และ ศาสตราจารย์ ดร. พรชัย ทรัพย์นิธิ บทความวิจัยนี้เป็นผลผลิตของโครงการวิจัยที่ได้รับการสนับสนุนค่าใช้จ่ายจากงบประมาณแผ่นดิน (วช.) ประจำปี 2561

## เอกสารอ้างอิง

- Chuo, Y.J. 2012. Variations of ionospheric profile parameters during solar maximum and comparison with IRI-2007 over Chung-Li, Taiwan. *Ann. Geophys.* 30, 1249-1257.
- Jamjareegulgarn, P., P. Supnithi, K. Watthanasangmechai, T. Yokoyama, T. Tsugawa, M. Ishii. 2016. A new expression for computing the bottomside thickness parameter and comparisons with the NeQuick at equatorial latitude station, Chumphon, Thailand. *Adv. Space Res.* 2016.
- Jamjareegulgarn, P., P. Supnithi, K. Hozumi, T. Tsugawa. 2017. A correction factor of Bottomside Thickness Parameter for Computing TEC in Global Navigation Satellite Systems. *iEECON 2017*, 8-10 March, 2017, Thailand.
- Ma, G. and T. Maruyama. 2003. Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan. *Ann. Geophys.* 21, 2083-2093.
- Zhang, M.L., S.M. Radicella, P. Spalla. 1991. The use of simultaneous observations of TEC and ground vertical ionospheric soundings to improve the modeling of the ionosphere, IRI Workshop, Athens, Greece.

# Identifying Geomagnetic Storms with Ionospheric Storm Scale for GNSS and Disaster Prevention

Punyawi Jamjareegulgarn<sup>1</sup>, Sarun Duangsuwan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Department of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon, Chumphon 86160, Thailand. Email: kjpgunyaw@kmitl.ac.th*

Pornchai Supnithi<sup>3</sup>, Jirapoom Budtho<sup>3</sup>

<sup>3</sup> *Department of Telecommunication Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand.*

Udomsit Tangtrakunphaisan<sup>2</sup>

<sup>2</sup> *Division of Computer, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus, Chumphon 86160, Thailand.*

Kornyanat Hozumi<sup>4</sup>, Takuya Tsugawa<sup>4</sup>

<sup>4</sup> *Space Environmental Laboratory, National Institute of Information and Communications Technology, Nukui-Kita, Koganei, Tokyo, Japan.*

**Abstract**—This paper proposes an ionospheric storm scale (I-scale) for identifying the impact of geomagnetic or ionospheric storms in the Ionosphere for GNSS (global navigation satellite system) service and disaster prevention. The I-scale in this work is computed based on the observed foF2 at Chumphon station (10.72°N, 99.37°E; dip latitude 3°N) over equatorial latitude from January 2004 to July 2018. The results report that the severe geomagnetic storms, i.e., Ip3 and In3, seldom occur at Chumphon with the probabilities of 0.02% and 0.07%, respectively. The probability of quiet ionospheric condition is the maximum value of 70.73%. Meanwhile, the other I-scales sometimes occur and range from 0.60% to 13.97%. The benefits of the foF2-based I-scale are to indicate the violence level of geomagnetic storms and to alarm the ionospheric irregularities in practice.

**Keywords**—Chumphon; foF2; geomagnetic storm; I-scale; space weather.

## I. INTRODUCTION

Space weather monitoring in ionosphere is an important task, since there exist significant ionospheric variations temporally and spatially in which they affect directly to GNSS (global navigation satellite system) service, disaster prevention, and transoceanic connections etc. Particularly, when the geomagnetic activity changes, the interaction complexity among the atmospheric layers surrounding the Earth leads to dynamical changes in ionospheric plasma distribution and then results in ionospheric storms [1]. Consequently, ionospheric plasma density can increase and/or decrease with respect to normal situations from many hours to days. The behaviors of ionospheric storms are not necessarily similar to that of geomagnetic storms because the ionospheric changes rely on local time, season and location. Furthermore, the ionospheric changes at midlatitude and low latitude are affected largely by the variations of equatorial ionization anomaly (EIA) [2]. A main task for users of GNSSs, HF communication systems,

space-based remote sensing systems is to monitor ionospheric conditions continuously, because the undesired situations may occur unexpectedly. For instance, GNSS users may encounter unacceptable positioning errors due to ionospheric positive storms and etc. Hence, the users of these systems need to know whether the ionospheric condition is silent or not.

As for the information of space weather, “NOAA scale” is well recognized for characterizing geomagnetic storms (G-scale), solar radiation storms (S-scale), and radio blackouts (R-scale). In contrast, no ionospheric storm scale based on ionospheric measurement has yet been acknowledged, since large temporal and spatial ionospheric variations make it difficult to define an ionospheric storm scale. Several endeavors to identify the ionospheric variations by using experimental ionospheric parameters have been conducted. For instance, Gulyaeva et al. [3] proposed a W index for explaining ionospheric storms by using F2 layer critical frequency (foF2) and ionospheric total electron content (TEC) in Europe. The W index is defined by identifying criteria to a logarithm of the corrected ionospheric parameter relative to its quiet reference. The W index is also calculated for other stations and it increases toward high latitudes. Moreover, Jakowski et al. [4] introduced the disturbance ionosphere index so as to indicate and reduce the space weather influences on GNSS-based navigation and positioning. Recently, Nishioka et al. [5] of NICT, Japan presented an ionospheric storm scale (I-scale) for identifying ionospheric storms by using foF2 and TEC values in Japan. Here, the TEC values are obtained from GNSS-TEC data of GEONET, Japan, and four ionosonde observatories in Japan. Furthermore, the percentage deviations of TEC and foF2 at the same location and local time are presented.

In this present work, we extend the previous work as proposed by Nishioka et al. [5] to investigate the ionospheric storms by using the measured ionosonde data at Chumphon stations under SEALION project [6]. The data used and the foF2-based ionospheric storm scale are addressed in Section 2 and 3, respectively. Results and discussions are addressed in Section 4. Finally, the conclusions are drawn in Section 5.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## II. DATA USED

Data used in this paper are hourly median values of foF2 (F2 critical frequency) of FMCW ionosonde at Chumphon station, Thailand. The Chumphon station is located at King Mongkut's Institute of Technology of Ladkrabang, Prince of Chumphon Campus (10.72°N, 99.37°E; dip latitude 3°N) as shown in Fig. 1. Theoretically, the FMCW ionosonde transmits radio wave continuously from 2 to 30 MHz into ionosphere for each round, and then receives an echo. The collected data are displayed as ionograms. To derive the I-scale from foF2, we scale the foF2 manually with 15 min intervals from January 2004 to July 2018. The ionospheric data have been scaled up to July 2018 for this I-scale study. Moreover, the scaled foF2 data are grouped into 4 seasons, i.e., December Solstice or DS (November, December, January and February), March Equinox or ME (March, April), September Equinox or SE (September and October), and June Solstice or JS (May – August).

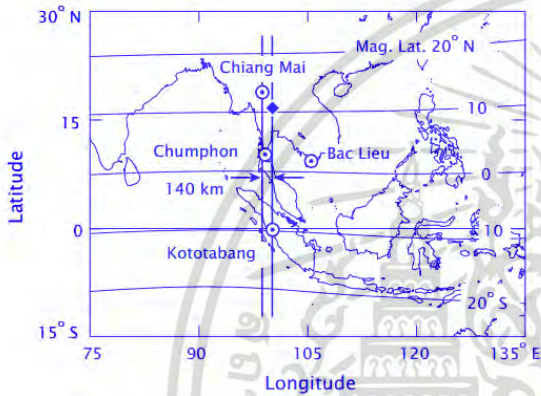


Fig. 1. Location of ionosonde station at Chumphon Province, Thailand [6].

## III. IONOSPHERE STORM SCALE (I-SCALE) WITH FOF2 VALUES

In this present study, we focus on proposing the ionospheric storm scale based on the foF2 data. The hourly median foF2 over Chumphon station from January 2004 to July 2018 are computed and denoted as  $O_{foF2}$  in this paper. Moreover, in previous ionospheric studies, a percentage deviation of foF2 is used widely to explain an ionospheric state at the same local time and location. Here, the percentage deviation of foF2 ( $P_{foF2}$ ) can be computed hourly by using

$$P_{foF2} = \left( \frac{O_{foF2} - R_{foF2}}{R_{foF2}} \right) \times 100 \quad (1)$$

where the  $R_{foF2}$  are the reference values of  $O_{foF2}$ . The  $R_{foF2}$  are defined as the median values of  $O_{foF2}$  in the past 27 days. The median values are used to show the undisturbed state of ionosphere instead of the arithmetic values since the former are not affected by the extremely small (or large) values. The 27-day duration is widely used for studying the reference ionospheric condition [7]. If the window size is lower than 27 days, then the median is highly affected by daily variations and geomagnetic storms. Meanwhile, if the window size is larger, then the median is largely affected by seasonal variations. Hence, the medians with 27-day window would be suitable to represent the undisturbed ionospheric situations.

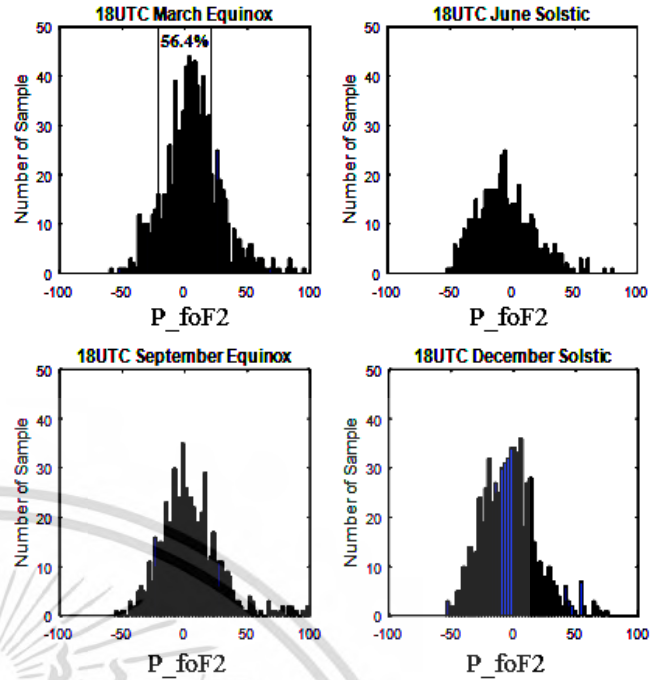


Fig. 2. Statistical distribution of  $P_{foF2}$  from 2004 to 2018 at 18 UTC (01 LT) during the three different seasons at Chumphon station.

Figure 2 shows a histogram of the  $P_{foF2}$  18 UTC (01 LT) during the three different seasons at Chumphon station. Note that the values at 18 UTC are shown only as an example in this paper, in fact, the values of all hours during a day are available and can also be shown. Due to the space limitation of this article, we can show only one hour among those histograms. In Fig. 2, we find that the histograms of  $P_{foF2}$  during the three seasons over Chumphon show the same distributions as those over 29°N latitudinal band in Japan. For example, 56.40% and 59.1% of all the samples had a  $|P_{foF2}|$  smaller than 20% over Chumphon and 29°N latitudinal band in Japan, respectively. The occurrence probability ( $P_{occ}$ ) of  $|P_{foF2}|$  smaller than 20% during three seasons at 18 UTC over Chumphon station are shown in Table I. The variations of  $P_{foF2}$  depend largely on the seasons, i.e., the  $P_{foF2}$  are the highest level in the March equinox, while they are at the lowest level in the September equinox. Moreover, the dependence of  $P_{foF2}$  on season, local time, and location can be removed so as to define a new ionospheric storm scale, namely a normalized  $P_{foF2}$  ( $\hat{P}_{foF2}$ ). Here, the  $\hat{P}_{foF2}$  can be computed by using the following equation:

$$\hat{P}_{foF2} = \frac{P_{foF2} - \mu}{\sigma} \quad (2)$$

where  $\mu$  and  $\sigma$  are the average and standard deviation of  $O_{foF2}$  at the same local time, season, and location. The  $\hat{P}_{foF2}$  are used to indicate the ionospheric storm scale as shown in Table II, for instance, I0 represents the quiet ionospheric condition where the  $\hat{P}_{foF2}$  range from -1 and 1. Furthermore, the occurrence probability (%) of I-scale for all observed foF2 values from January 2004 to July 2018 over Chumphon are shown in Table II. It can be seen that the severe storms (I<sub>P3</sub> and I<sub>N3</sub>) rarely occur at Chumphon with 0.02% and 0.07%, respectively. Most of the situations are in quiet conditions with 70.73%, whereas other I-scales sometimes occur and range from 0.60% to 13.97% ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table I. The Pocc of  $P_{foF2}$  and  $\hat{P}_{foF2}$  during three seasons at 18 UTC.

Seasons	Pocc of $ P_{foF2}  < 20\%$	Pocc of $\hat{P}_{foF2} \leq \pm 1$
March Equinox	56.40%	45.65%
June Solstice	40.07%	29.78%
September Equinox	37.56%	29.86%
December Solstice	44.04%	33.60%

Table II. The occurrence probability of I-scale for all foF2 from 2004 to 2018.

I-scale	Samples	Pocc (%)	Levels of $\hat{P}_{foF2}$
$I_{p3}$	9	0.02	$5 < \hat{P}_{foF2}$
$I_{p2}$	393	0.60	$3 < \hat{P}_{foF2} < 5$
$I_{p1}$	9,157	13.97	$1 < \hat{P}_{foF2} < 3$
Quiet	46,361	70.73	$-1 < \hat{P}_{foF2} < 1$
$I_{N1}$	8,779	13.39	$-2 < \hat{P}_{foF2} < -1$
$I_{N2}$	798	1.22	$-3 < \hat{P}_{foF2} < -2$
$I_{N3}$	47	0.07	$\hat{P}_{foF2} < -3$
<b>Total</b>	<b>65,544</b>	<b>100</b>	

#### IV. RESULTS AND DISCUSSIONS

In this section, some geomagnetic storms are shown here to indicate the violent level of geomagnetic storms by using the proposed I-scale. Two geomagnetic storms considered in this paper are “St. Patrick’s Day storm” on March 17-19, 2005 and “a positive ionospheric storm” on December 15, 2006. The St. Patrick’s Day storm was the strongest geomagnetic storm observed till now during the current solar cycle 24. The storm’s details and its effects on the Earth can be studied further in [8]. Meanwhile, the storm on December 15, 2006 was a long-duration positive ionospheric storm in the last solar cycle 23 [9]. Figures 3(a) and 4(a) show the variations of Dst index during the onsets of these two storms. Meanwhile, in Fig. 3(b) and 4(b), the solid red and black lines denote the  $O_{foF2}$  value and the  $R_{foF2}$  value, respectively. Likewise, the shaded areas above and below of  $O_{foF2}$  lines represent the levels of I-scales from  $I_{N3}$  up to  $I_{p3}$  as shown in Table V. The benefits of I-scale proposed in this paper show its feasibility to notify the effects of geomagnetic storms on the Earth. For example, the effects of St. Patrick’s Day storm on the ionosphere can be monitored with the proposed I-scale at a class of  $I_{p2}$  on March 18, 2015. Meanwhile, the effect of December 15, 2006 storm on the ionosphere can be monitored with the I-scale at a class of  $I_{N3}$  on December 15, 2006.

Moreover, it can be seen that the observed foF2 ( $O_{foF2}$ ) on March 18, 2015 are generally higher than the  $R_{foF2}$  during daytime hours as shown with the red lines in Fig. 3(a), whereas the 27-day reference values ( $R_{foF2}$ ) do not reflect well this storm effect. Likewise, the  $O_{foF2}$  on December 15,

2006 are generally lower the  $R_{foF2}$  in all hours of the day as shown with the red lines in Fig. 4(b), while the lower  $R_{foF2}$  can be seen obviously compared with the other days.

#### V. CONCLUSIONS

The I-scale are proposed to indicate the effects of ionospheric storms on the Earth as well as Ionosphere. The I-scale in this work is computed based on the experimental foF2 at Chumphon station from January 2004 to July 2018. The percentage deviations between the observed foF2 and the 27-day reference values ( $P_{foF2}$ ) are also reported. Since the  $P_{foF2}$  values depend on the local time, season, and location, the  $\hat{P}_{foF2}$  are also proposed to remove the mentioned dependences. The foF2-based I-scale is used to indicate the geomagnetic storms suitably, for instance, the St. Patrick’s Day storm and a storm on December 15, 2006. In the future, the I-scale based on foF2 should be extended to other stations and used to alarm the ionospheric irregularities in practice.

#### ACKNOWLEDGMENT

The authors thank to NICT, Japan, for providing the ionospheric data under SEALION project and the technical discussions. This research is financially supported by KMTIL Research Fund (KREF 045906) and the annual government budget in A.D. 2019 (A118-01162-016).

#### REFERENCES

- [1] Tsurutani, B., et al., “Global dayside ionospheric uplift and enhancement associated with interplanetary electric fields,” *J. Geophys. Res.*, vol. 109, A08302, 2004.
- [2] Venkatesh, K., Fagundes, P.R., Prasad, D.S.V.V.D., Denardini, C.M., de Abreu, A.J., de Jesus, R., Gende, M., “Day-to-day variability of the equatorial electrojet and its role on the day-to-day characteristics of the equatorial ionization anomaly over the Indian and Brazilian sectors,” *J. Geophys. Res. Space Physics*, vol. 120, pp. 9117–9131, 2015.
- [3] Gulyaeva, T.L., Stanislawski, I., Tomasik, M., “Ionospheric weather: Cloning missed foF2 observations for derivation of variability index,” *Ann. Geophys.*, vol. 26, pp. 315–321, 2008.
- [4] Jakowski, N., Borries, C., Wilken, C., “Introducing a disturbance ionosphere index,” *Radio Sci.*, vol. 47, RS0L14, 2012.
- [5] Nishioka, M., Tsugawa, T., Jin, H., Ishii, M., “A new ionospheric storm scale based on TEC and foF2 statistics,” *Space Weather*, vol. 15, pp. 228–239, 2017.
- [6] Maruyama, T., et al., “Low latitude ionosphere-thermosphere dynamics studies with ionosonde chain in Southeast Asia,” *Ann. Geophys.*, vol. 25, pp. 1569-1577, 2007.
- [7] Deng, Z., Liu, R., Zhen, W., Liu, D., Ma, B., Wu, Y., “Ionospheric TEC disturbances based on GPS observations,” *9th Int. Symp. Antennas Propagation and EM Theory (ISAPE)*, pp. 395–398, 2010.
- [8] Nayak, C., Tsai, L.C., Su, S.Y., Galkin, I.A., Tan, A.T.K., Nofri, E., Jamjareegulgarn, P., “Peculiar features of the low-latitude and midlatitude ionospheric response to the St. Patrick’s Day geomagnetic storm of 17 March 2015,” *J. Geophys. Res. Space Physics*, vol. 121, 2016.
- [9] Pedatella, N.M., Lei, J., Larson, K.M., Forbes, J.M., “Observations of the ionospheric response to the 15 December 2006 geomagnetic storm: Long-duration positive storm effect,” *J. Geophys. Res.*, vol. 114, A12313, 2009.

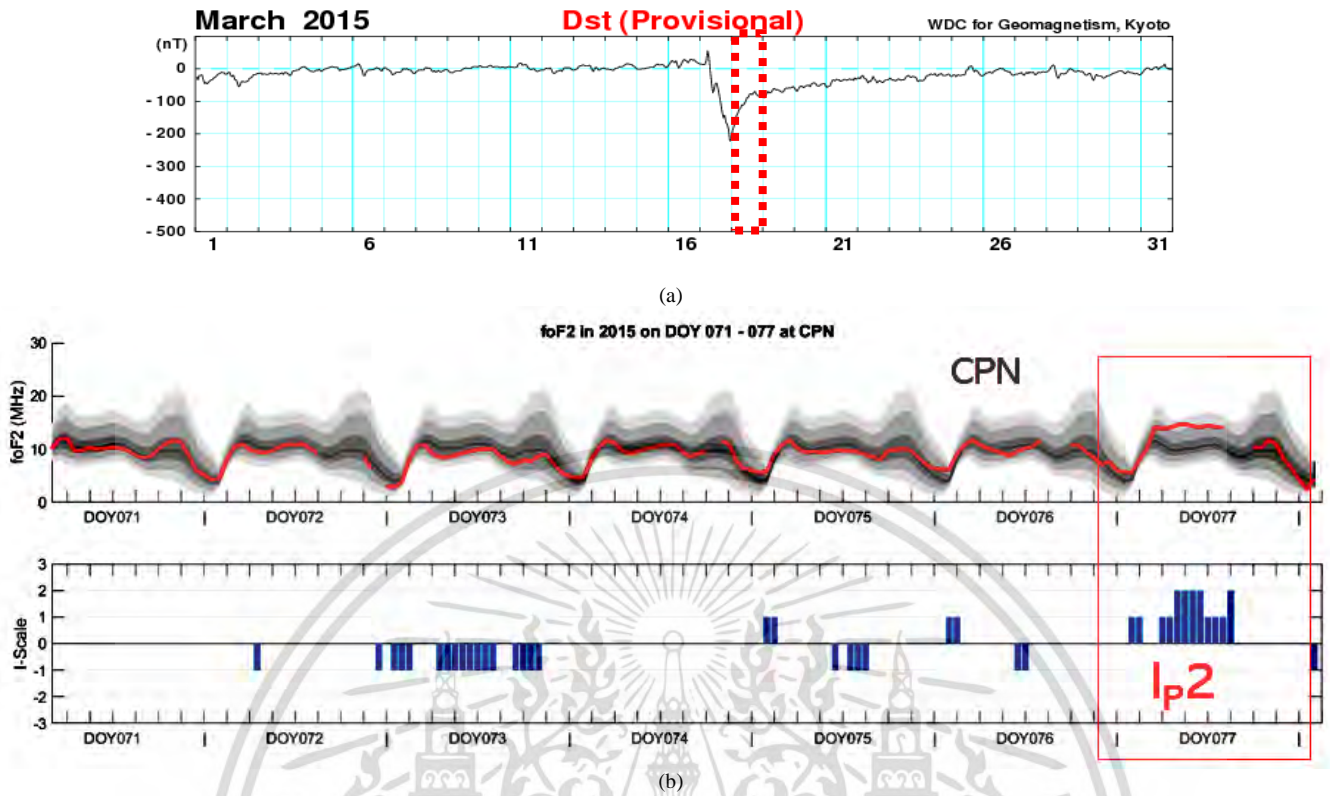


Fig. 3. The variations of Dst index, O\_foF2, R\_foF2, the levels of computed I-scales, and the violence level of St. Patrick's Day storm ( $I_p2$ ).

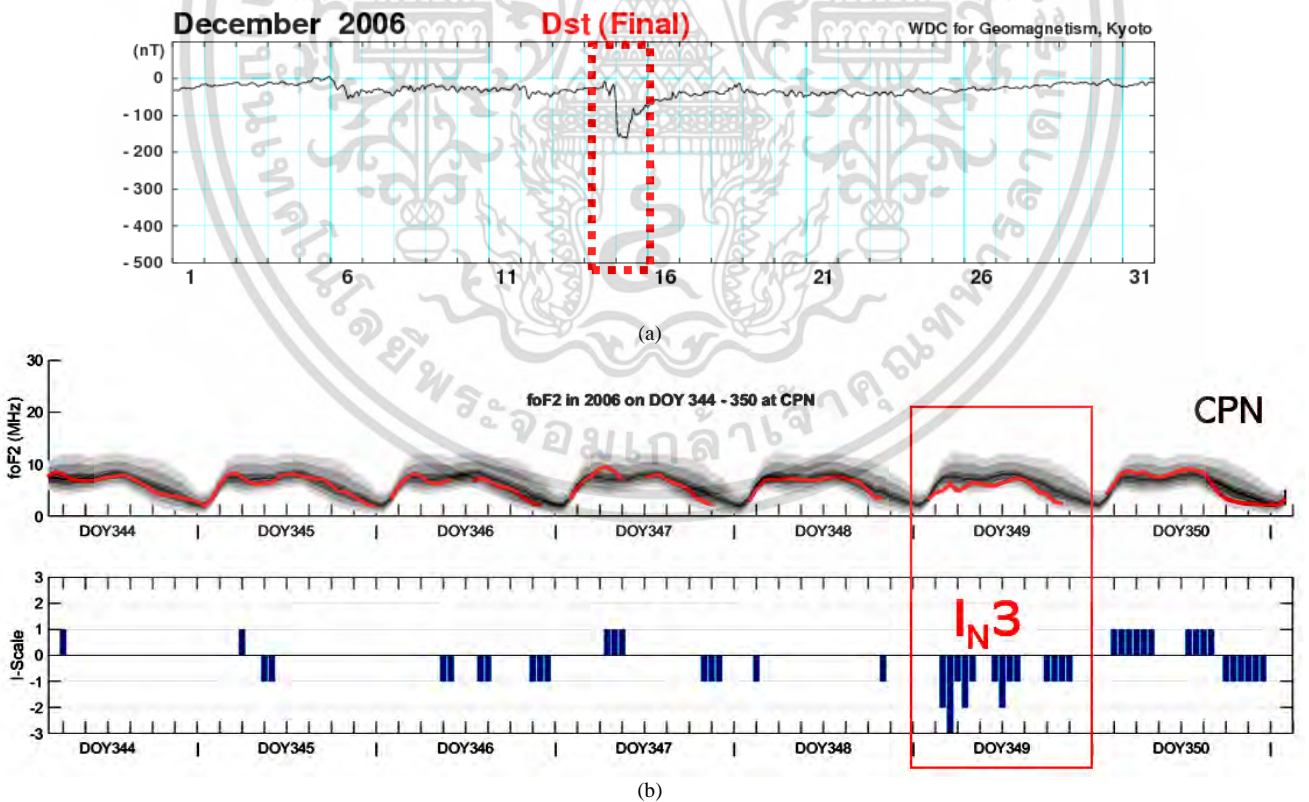



Fig. 4. The variations of Dst index, O\_foF2, R\_foF2, the levels of computed I-scales, and the violence level of a December 15, 2006 storm ( $I_{N3}$ ).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข  
สรุปค่าใช้จ่ายโครงการวิจัย 3 ปี (งบประมาณปี พ.ศ. 2560 – 2562)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





## แบบรายงานการใช้จ่ายเงินโครงการวิจัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รายงานความก้าวหน้า ครั้งที่ 2 รอบ 12 เดือน ประจำปีงบประมาณ 2562

 แหล่งงบประมาณแผ่นดิน (แบบปกติ)
  แหล่งเงินรายได้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย).....เว็บไซต์ศูนย์การเรียนรู้การเปลี่ยนแปลงขั้นบรรยากาศ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และ การเกิดภัยพิบัติ ที่สถานีภาคพื้นดินละติจูดต่ำบริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก จังหวัดชุมพร ประเทศไทย

(ภาษาอังกฤษ) ...Learning Center Web of Atmosphere Variability, Weather Variability, and Disaster Occurrence at Equatorial Magnetic Latitude Station, Chumphon, Thailand

ชื่อ-สกุลหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน/ผู้วิจัย (อ./ดร./ผศ./รศ./ศ.).....บุญยวีร์ จามจรีกุลกาญจน์

รายงานในช่วงตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2561 ถึงวันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2562

ระยะเวลาดำเนินการ 3 ปี - เดือน ตั้งแต่วันที่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2559 ถึงวันที่ 30 กันยายน พ.ศ. 2562

## ข้อมูลการรายงานค่าใช้จ่ายงบประมาณโครงการวิจัย

## 1. การเบิกจ่ายงบประมาณ (กรณีการจ่ายเงินถ้าจ่ายงวดเดียวให้ลบข้อที่ไม่เกี่ยวข้องออก)

งวดแรก 38,000 บาท 40 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ด/ว) 9 มกราคม 2562

งวดที่ 2 47,500 บาท 50 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ด/ว) 2 พฤษภาคม 2562

งวดที่ 2 9,500 บาท 10 % วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ด/ว) 22 กรกฎาคม 2562

## 2. สรุปงบประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้ตั้งแต่เริ่มทำการวิจัยถึงปัจจุบัน (จำแนกตามหมวดค่าใช้จ่าย)

หมวดค่าใช้จ่าย	งบประมาณรวมทั้งโครงการ	ค่าใช้จ่าย (บาท)	คงเหลือ (หรือเกิน)
งบบุคลากร : ค่าจ้างชั่วคราว	-	-	-
งบดำเนินงาน			
ค่าใช้สอย	280,000	280,000	-
ค่าวัสดุ	250,000	250,000	-
งบลงทุน: ค่าครุภัณฑ์	-	-	-
<b>รวม</b>	<b>530,000</b>	<b>530,000</b>	<b>0</b>

\* หมายเหตุ มีดอกเบี้ยที่เกิดขึ้นระหว่างการทำโครงการวิจัยปีที่ 1 - ปีที่ 3 เป็นจำนวนเงิน 100.25 บาท

บุญยวีร์ จามจรีกุลกาญจน์

( รศ.ดร.บุญยวีร์ จามจรีกุลกาญจน์ )

ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

ไม่ปรากฏชื่อฯ พงสน อักษรหมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากนำไปใช้

...../...../.....

บุญยวีร์ จามจรีกุลกาญจน์

( รศ.ดร.บุญยวีร์ จามจรีกุลกาญจน์ )

ลงนามเจ้าหน้าที่การเงินโครงการ

ไม่ปรากฏชื่อฯ พงสน อักษรหมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากนำไปใช้

...../...../.....

## ประวัตินักวิจัย

### 1. หัวหน้าโครงการวิจัย

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) : รองศาสตราจารย์ ดร. ปุณยวีร์ จามจรีกุลกาญจน์

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) : Assoc. Prof. Dr. Punyawee Jamjareegulgarn

หน่วยงานและสถานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก

หลักสูตรวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ฯ

17/1 หมู่ 6 ตำบลชุมโค อำเภอปะทิว จังหวัดชุมพร 86160

โทรศัพท์มือถือ: 086-541-0424

โทรสาร: 0-7750-6426

E-mail: kjpunyaw@kmitl.ac.th

ประวัติการศึกษา

ปีที่จบ	ระดับปริญญา	อักษรย่อปริญญา	ภาควิชา/คณะ	ชื่อสถาบันการศึกษา
2538	ตรี	วศ.บ.	ภาควิชาวิศวกรรม โทรคมนาคม / คณะวิศวกรรมศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอม เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2541	โท	วศ.ม.	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (แขนงวิชาการระบบโทรคมนาคม) / คณะวิศวกรรมศาสตร์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2560	เอก	วศ.ด.	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า / คณะวิศวกรรมศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอม เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์วิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การสังเกตการณ์ชั้นไอโอโนสเฟียร์ แบบรูปความหนาอิเล็กทรอนิกส์ และสภาพอวกาศ
2. การออกแบบและสร้างระบบอัตโนมัติและระบบควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์
3. การวิเคราะห์และประเมินสมรรถนะเครือข่ายสื่อสารแบบใช้สายและแบบไร้สาย
4. การประยุกต์ใช้งานวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทางด้านอาหาร เกษตรและพลังงานทดแทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. ผู้ร่วมโครงการวิจัย

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) : นายอุดมสิทธิ์ ตั้งตระกูลไพศาล

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) : Mr. Udomsit Tangtrakunphaisan

หน่วยงานและสถานที่อยู่ติดต่อดีสะดวก

แผนกคอมพิวเตอร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ฯ

17/1 หมู่ 6 ตำบลชุมโค อำเภอปะทิว จังหวัดชุมพร 86160

โทรศัพท์มือถือ: 081-580-6973

โทรสาร: 0-7750-64265

E-mail: ping0056@gmail.com

ประวัติการศึกษา

ปีที่จบ	ระดับปริญญา	อักษรย่อปริญญา	ภาควิชา/คณะ	ชื่อสถาบันการศึกษา
2552	ตรี	วศ.บ.	หลักสูตรวิศวกรรม อิเล็กทรอนิกส์ / ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอม เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรฯ

ประสบการณ์วิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. Development of a web-based Laboratory for Chaos
2. Engineering Experiment
3. Computer infrastructure

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้