



รายงานความก้าวหน้างานวิจัย  
(ต่อเนื่อง 3 ปี ปีนี้เป็นปีที่ 2)

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

รองศาสตราจารย์ ดร. ปุณยวีร์ จามจรีกุลกาญจน์  
นายอุดมสิทธิ์ ตั้งตระกูลไพศาล

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) เว็บไซต์ศูนย์การเรียนรู้การเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการเกิดภัยพิบัติ ที่สถานีภาคพื้นดินละติจูดต่ำบริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก จังหวัดชุมพร ประเทศไทย..... แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดิน  
 ประจำปีงบประมาณ..... 2561..... จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน..... 195,000..... บาท  
 ระยะเวลาทำการวิจัย..... 1..... ปี ตั้งแต่..... 1 ตุลาคม พ.ศ. 2560..... ถึง..... 30 กันยายน พ.ศ. 2561.....  
 นักวิจัย..... รศ.ดร.ปณณวีร์ จามจรกุลกาญจน์ และ นายอุดมสิทธิ์ ตั้งตระกูลไพศาล.....  
 ที่ปรึกษาโครงการ..... ศ.ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ..... หน่วยงานต้นสังกัด..... วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศึกษา.....

### บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้นำเสนอเว็บไซต์ศูนย์การเรียนรู้การเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการเกิดภัยพิบัติ ที่สถานีภาคพื้นดินละติจูดต่ำบริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก จังหวัดชุมพร ประเทศไทย โดยการศึกษาในปีที่ 2 นี้จะศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ความหนาแน่นของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และศึกษาตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่อาศัยค่า  $f_oF_2$  โดยพารามิเตอร์ความหนาแน่นจะอาศัยค่าข้อมูลที่วัดได้จริงจากสถานีสังเกตการณ์ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จำนวน 12 สถานีในฐานะข้อมูล GIRO ถูกนำมาศึกษาและละติจูดถูกแบ่งออกเป็น 4 โซน ได้แก่  $0^\circ - 20^\circ$ ,  $20^\circ - 40^\circ$ ,  $40^\circ - 60^\circ$  และสูงกว่า  $60^\circ$  นอกจากนี้ ค่าข้อมูลจะถูกจัดกลุ่มเป็น 3 ฤดูกาล ได้แก่ ฤดูอิควินอกซ์, ฤดูร้อนและฤดูหนาว ในที่นี้ ค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างของแต่ละโซนจะถูกหาค่าจากสมการที่นำเสนอ แล้วค่าการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างในแต่ละวันและในแต่ละฤดูกาลของทั้ง 12 สถานีจะถูกเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากเครื่องดิจิจิตอล ผลจากการศึกษา พบว่า ค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างที่คำนวณได้จากสมการที่นำเสนอมีการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนและมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่สังเกตได้ ผลต่างสัมบูรณ์ของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างในฤดูร้อนมีค่า 0.09 - 25.11 กิโลเมตร ส่วนผลต่างสัมบูรณ์ในฤดูอิควินอกซ์และฤดูหนาวมีค่า 0.03 - 16.46 กิโลเมตร และ 0.02 - 22.49 กิโลเมตร ตามลำดับ ค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างที่นำเสนอนี้เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการหาค่า TEC และค่าเวลาประวิงของสัญญาณจีพีเอสโดยประมาณสำหรับการระบุตำแหน่งของเครื่องรับ GNSS และการทำนายภัยพิบัติได้ ส่วนผลการศึกษาตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่อาศัยค่า  $f_oF_2$  นั้น พบว่า ค่าความน่าจะเป็นในการเกิดขึ้นแต่ละระดับของพายุที่แต่ละสถานีนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยสภาวะเงียบ (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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ 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 Government Budget A.D. 2017 **Research Budget:** 195,000 baht

**Duration:** 1 year from October 1<sup>st</sup> 2017 to September 30<sup>th</sup> 2018

**Researcher:** Assoc. Prof. Dr. Punyawi 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. As for the research on the second year, the variations of bottomside thickness parameters of the ionosphere and the ionospheric storm scale based on foF2 values are studied. The bottomside thickness parameter is investigated by using the observed Digisonde data from twelve ionospheric monitoring stations in GIRO (Global Ionospheric Radio Observatory) database. Their geographic latitudes are divided into four zones such as 0°–20°, 20°–40°, 40°–60°, and higher than 60°. The retrieved data are grouped into three seasons regarding to the north hemisphere, i.e., equinox, summer, and winter. The bottomside thickness parameters of all twelve stations are computed for each zone, and then their diurnal and seasonal variations are compared with those obtained from Digisonde. The studied results show that the bottomside thickness parameters computed using the proposed equation (B2botP) have similar trends as well as nearby values with the observed ones (B0\_obs). 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 method to compute approximately both the TEC and the GPS propagation delay for GNSS receiver positioning and disaster prediction. Refer to the ionospheric storm scale (I-scale) based on foF2, the studied results are shown that the occurrence probability of each I-scale among studied stations are close one another. The occurrence probability (Pocc) of quiet situations occur maximally about 71%. The Pocc of I<sub>p</sub>3 occur minimally about 0.3%. The Pocc of I<sub>p</sub>1, I<sub>N</sub>1, and I<sub>N</sub>2 are about 14%, 12.9%, and 1.4%.

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยงาน NICT (ประเทศญี่ปุ่น) เป็นอย่างสูงสำหรับการอนุเคราะห์ค่าข้อมูล  $foF2$  ที่วัดได้ที่สถานีชุมพรและสถานีเชียงใหม่ ตั้งแต่ เดือนมกราคม ปี ค.ศ. 2004 ถึง เดือนกรกฎาคม ปี ค.ศ. 2018 (ภายใต้โครงการ SEALION) นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ ศาสตราจารย์ ดร. พรชัย ทรัพย์นิธิ (อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัย) ซึ่งเป็นผู้ให้คำแนะนำ ให้ความรู้และให้การสนับสนุนตลอดเวลาเกี่ยวกับการทำวิจัยทางด้าน ionospheric monitoring, ionospheric and geomagnetic storms, plasma bubble, VHF radar และ space weather รวมถึงนักศึกษาปริญญาโทและเอกของห้องปฏิบัติการ CSSRG สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือและให้ข้อคิดเห็นที่มีประโยชน์ต่อการทำวิจัย รวมถึงนักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมสารสนเทศ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ สจล. วิทยาเขตชุมพรฯ (รหัสนักศึกษา 57) ชั้นปีที่ 4 ทุก ๆ คน คณะกรรมการวิจัย เจ้าหน้าที่ฝ่ายวิจัย ฝ่ายพัสดุและฝ่ายการเงินของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ ทุก ๆ ท่านที่ช่วยประสานงานและช่วยดำเนินการต่าง ๆ จนทำให้โครงการวิจัยในปีที่ 2 นี้เสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี พ.ศ. 2561 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รศ.ดร.ปุณยวีร์ จามจรีกุลกาญจน์  
นายอุดมสิทธิ์ ตั้งตระกูลไพศาล

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	V
สารบัญภาพ.....	VI
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
<b>บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>7</b>
2.1 ชั้นไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere).....	7
2.2 วัฏจักรสุริยะ (solar cycle).....	8
2.3 ปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ.....	9
2.4 พารามิเตอร์ความหนาแน่นล่างของแบบจำลอง IRI กับแบบจำลอง NeQuick.....	9
2.5 ตัวบ่งชี้ระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์.....	12
<b>บทที่ 3 หลักการและการออกแบบ.....</b>	<b>14</b>
3.1 ตัวบ่งชี้ระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์.....	14
3.2 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นล่าง (B2_bot).....	17
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัย.....</b>	<b>20</b>
4.1 ตัวบ่งชี้ระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่อาศัยค่า foF2.....	20
4.2 การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ความหนาแน่นล่างของชั้นไอโอโนสเฟียร์ ในวัฏจักรสุริยะที่ 24.....	26
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและแนวทางการพัฒนางานวิจัย.....</b>	<b>33</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	33
5.2 แนวทางการพัฒนางานวิจัย.....	33
<b>บรรณานุกรม.....</b>	<b>34</b>
<b>ภาคผนวก</b>	
ภาคผนวก ก ผลผลิตงานวิจัย.....	37
ภาคผนวก ข สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย.....	46
<b>ประวัตินักวิจัย.....</b>	<b>48</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนงานวิจัยและช่วงเวลาในการดำเนินการวิจัย.....	5
4.1 ค่า I-scale, คำบรรยายของระดับพายุ และระดับของค่า $P_{foF2}^*$ ที่เกิดขึ้น.....	21
4.2 จำนวนวัน (Samples) ที่พบแต่ละระดับของ I-scale ที่เกิดขึ้นทั้ง 3 สถานี.....	23
4.3 ค่าเฉลี่ยเลขคณิตและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า $P_{foF2}$ ที่สถานีชุมพร.....	24
4.4 ตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ของเครื่อง Digisonde ในสถานีวัดทั่วโลกจำนวน 12 สถานี.....	26
4.5 ค่าเฉลี่ยของค่าปรับแก้ในแต่ละโซนของสถานี Digisonde จำนวน 12 สถานี.....	27



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 บรรยากาศที่แบ่งออกเป็นชั้นต่าง ๆ ตามค่าอุณหภูมิและปริมาณความหนาแน่นพาสมา.....	7
2.2 จำนวนจุดดับของวัฏจักรสุริยะรอบที่ 21 – 25 ตั้งแต่ ค.ศ. 1975 ถึง ค.ศ. 2030.....	8
3.1 การกระจายทางสถิติของค่า $P_{TEC}$ จากปี 1997 ถึง 2014.....	13
3.2 การกระจายทางสถิติของค่า $P^*_{TEC}$ จากปี 1997 ถึง 2014.....	16
4.1 การกระจายตัวแบบเกาส์เซียนของค่าข้อมูล $P_{foF2}$ ที่สถานีชุมพรที่เวลา 18 UT (01 LT).....	22
4.2 การกระจายตัวแบบเกาส์เซียนของค่าข้อมูล $P^*_{foF2}$ ที่สถานีชุมพรที่เวลา 18 UT (01 LT).....	23
4.3 การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างในฤดูหนาวที่ เมือง El Arenosillo และเมือง Chilton ในปี ค.ศ. 2014.....	28
4.4 การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างในฤดูอิควินอกซ์ที่ เมือง El Arenosillo และเมือง Chilton ในปี ค.ศ. 2014.....	29
4.5 การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างในฤดูร้อนที่ เมือง El Arenosillo และเมือง Chilton ในปี ค.ศ. 2014.....	30
4.6 หน้าเว็บไซต์ของการคำนวณค่า B0 ในฟิลด์ของแบบจำลองและค่าข้อมูล.....	31
4.7 หน้าเว็บไซต์ของการหาค่า I-scale ในฟิลด์ของพายุแม่เหล็กโลก.....	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

รายงานวิจัยฉบับนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างเว็บไซต์ศูนย์การเรียนรู้การเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการเกิดภัยพิบัติ ที่สถานีภาคพื้นดินละติจูดต่ำๆ ปีที่ 2 (ประจำปี พ.ศ. 2561) บริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก จังหวัดชุมพร โดยมีความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาและวัตถุประสงค์ของการวิจัยอธิบายไว้ในหัวข้อที่ 1.1 และ 1.2 ส่วนหัวข้อที่ 1.3 และ 1.4 กล่าวถึงขอบเขตและวิธีดำเนินการวิจัยเพื่อสร้างเว็บไซต์ศูนย์การเรียนรู้ ปีที่ 2 และหัวข้อที่ 1.5 จะกล่าวถึงประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยในครั้งนี้ รายละเอียดในแต่ละหัวข้อมีดังนี้

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในตอนนี้ โลกกำลังเผชิญกับสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและภัยพิบัติจำนวนมากที่ทวีความรุนแรงในหลายประเทศทั่วโลก จึงทำให้หน่วยงานต่าง ๆ พยายามที่จะตรวจวัดค่าข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสภาพภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงและภัยพิบัติที่เกิดขึ้น ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น ปริมาณน้ำฝน การเกิดแผ่นดินไหว การเกิดคลื่นสึนามิ เป็นต้น รวมทั้งได้เร่งหามาตรการในการป้องกันและจัดการระบบ/อุปกรณ์มาติดตั้งเพิ่มเติมเพื่อบรรเทาความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชีวิตและทรัพย์สิน ซึ่งถึงแม้ว่าจะมีการติดตั้งและการใช้งานระบบและเครื่องมือวัดฯ ดังกล่าวกันอย่างมากมาย แต่ระบบและเครื่องมือวัดฯ เหล่านี้ก็มีข้อจำกัดเช่นกัน ในแง่ของอายุการใช้งาน ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา และค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมและปรับแต่งระบบ ค่าใช้จ่ายในการจ้างผู้ดูแล ซึ่งต้องใช้งบประมาณมหาศาล อีกทั้ง ข้อมูลสารสนเทศที่ได้จากแต่ละหน่วยงานทั้งทางด้านสภาพภูมิอากาศและภัยพิบัติในประเทศไทยนั้นก็ไม่เคยนำมาศึกษาหาความสัมพันธ์และวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้รับ เพื่อที่จะนำไปทำนายการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการเกิดภัยพิบัติร่วมกัน

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

Bergeot et al. [1] นี้แนะนำแบบจำลองเชิงการทดลองใหม่สำหรับการทำนายค่าเฉลี่ยรายวันของ TEC ที่ตำแหน่งละติจูดที่กำหนดโดยใช้อินพุตคือค่าดัชนีสุริยะ ในการพัฒนาแบบจำลองดังกล่าวนี้ เราใช้ประโยชน์จากค่าข้อมูล TEC ที่ได้จากระบบ GNSS ทั่วโลกจำนวน 15 ปี และค่าดัชนีสุริยะ (จำนวนจุดดับ ค่า F10.7 และค่า F10.7P) ในช่วงวัฏจักรสุริยะที่ 23 (23<sup>rd</sup> solar cycle) จากการทดสอบทั้งหมดพบว่า แบบจำลองที่ใช้ศึกษาชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในการทำนายค่าเฉลี่ยรายวันของ TEC นำเสนอผลต่างค่ามัธยฐานรายปี (yearly median) ด้วยค่าที่สังเกตได้เท่ากับ  $1.4 \pm 0.9$  TECu ( $11.5 \pm 2.9\%$  สำหรับค่าผลต่างสัมพัทธ์) โดยที่ไม่มีผลการแย่งลงมากนักในระหว่างปีของวัฏจักรสุริยะที่ 23 ในการพิจารณาแบบจำลองเชิงการทดลองใหม่นี้ เราใช้การปรับค่าด้วยค่ากำลังสองน้อยที่สุด โดยมีรายละเอียดต่าง ๆ ดังนี้ (1) มีการผสมผสานของทอมเซกเส้น รายปีและครึ่งรายปีระหว่างค่า TEC และค่า F10.7P (2) การทำเป็นดิสคริตเมื่อเทียบกับปีของวัฏจักรสุริยะ ผลต่างหลักระหว่างค่า TEC ที่ทำนายได้และที่สังเกตได้ในระหว่างพายุแม่เหล็กโลกตามทีระบุ ผลต่างที่มากที่สุด ( $-3.2 \pm 1.5$  TECu) และผลต่างสัมพัทธ์ ( $-19.6 \pm 15.0\%$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยหน่วยงานการศึกษา  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้น 1 วันภายหลังจากที่มีพายุเกิดขึ้น เวลาปกติที่ใช้ในการดึงค่าข้อมูลในสภาวะเงื่อนไขก่อนการเกิดพายุมีค่าเท่ากับ 3-4 วันภายหลังจากการเกิดพายุ ผลที่ได้รับเหล่านี้แสดงภาพทั่วโลกของผลกระทบของสภาวะการณ์ภูมิอากาศในอวกาศที่รุนแรงบนชั้นบรรยากาศด้านบนของโลก ผลงานวิจัย [1] นี้แสดงให้เห็นถึงความจำเป็นที่ควรที่จะสร้างแบบจำลองการทำนายค่า TEC เพื่อที่จะทราบปรากฏการณ์การเกิดพายุแม่เหล็กโลก ซึ่งพายุดังกล่าวนี้อาจจะบ่งชี้ถึงสภาพภูมิอากาศบนผิวโลกที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและอาจจะเกี่ยวข้องกับภัยพิบัติบนพื้นโลกก็เป็นไปได้ ดังนั้น จึงเป็นประเด็นที่จะต้องศึกษาและพัฒนาต่อเนื่องจากงานวิจัยนี้ได้

Cander [2] ได้กล่าวไว้ว่า ในขณะที่สังคมยุคใหม่กำลังที่พัฒนาโครงสร้างพื้นฐานที่ทันสมัยอย่างต่อเนื่อง คุณสมบัติและพฤติกรรมของระบบโลก-ดวงอาทิตย์ก็มีความอ่อนไหวมากขึ้นเรื่อย ๆ คุณภาพในการให้บริการทางด้านเทคโนโลยีอวกาศสำหรับการติดต่อสื่อสาร การนำร่องและการจัดการทรัพยากร รวมถึงการทำธุรกิจเชิงพาณิชย์ที่เติบโตอย่างรวดเร็วก็ย่อมได้รับผลกระทบเพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังนั้น การศึกษาการจำลองและการทำนายอิทธิพลสภาพภูมิอากาศของอวกาศในเชิงลึกของสภาพภาคพื้นดิน และสุริยะทั้งหมดจึงเป็นหัวข้องานวิจัยที่สำคัญ ในการศึกษาค้นคว้าจะนำเสนอวิธีการหนึ่งในการสร้างแบบจำลองเชิงการทดลองของค่า VTEC ซึ่งประกอบไปด้วย การทบทวนค่า VTEC และกระบวนการแมปปีงที่อาศัยข้อมูลจากเครือข่าย IGS (International GNSS Service) เสมือนเป็นเครื่องมือมาตรฐานของการเฝ้าตรวจตรวจวัดแบบเวลาจริงและใช้ศึกษาสภาพภูมิอากาศอวกาศและเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกับการจำลองค่า TEC สำหรับการใช้งานกับสภาพภูมิอากาศอวกาศ ผลงานวิจัย [2] นี้แสดงให้เห็นถึงการสร้างแบบจำลองที่คล้ายกับงานวิจัย [1] แต่มีการนำเสนอวิธีการวิจัยแบบใหม่เพื่อศึกษาสภาพภูมิอากาศอวกาศและเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกับการจำลองค่า TEC สำหรับการใช้งานกับสภาพภูมิอากาศอวกาศ ดังนั้น จึงเป็นแนวทางที่สำคัญในการนำมาประยุกต์ใช้กับข้อมูลสารสนเทศและค่าข้อมูลที่คำนวณได้ของประเทศไทยเอง

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) กระบวนการทางสถิติที่แตกต่างกันถูกใช้เพื่อสังเกตความผิดปกติของข้อมูล TEC ผลของการศึกษาพบว่า TEC มีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะของการเพิ่มขึ้นและการลดลง รวมถึง สัญญาณบอกเหตุ (precursors) ที่มากที่สุดที่จะถูกพบล่วงหน้าก่อนการเกิดแผ่นดินไหวประมาณ 5-10 วัน วัฏจักรสุริยะและแม่เหล็กไฟฟ้าในระหว่างที่เกิดแผ่นดินไหวก็ถูกศึกษาเช่นกัน แต่ข้อมูลที่ได้รับผลกระทบเหล่านี้จะถูกไม่นำมาพิจารณาเพื่อแยกออกจากผลกระทบที่ได้รับจากการเกิดแผ่นดินไหว ดังนั้น ความผิดปกติของค่า TEC ที่สังเกตได้อาจจะมีสาเหตุมาจากการเกิดแผ่นดินไหวที่มีขนาดใหญ่รอบ ๆ บริเวณอินเดียเท่านั้น อย่างไรก็ตาม การเคลื่อนตัวของ ExB เนื่องจากการเกิดขึ้นของสนามไฟฟ้าในระหว่างกระบวนการก่อตัวแผ่นดินไหวและการแกว่งคลื่นบนผิวโลกก็อาจจะเป็นปัจจัยที่มีส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดความผิดปกติของค่า TEC ที่ตรวจวัดได้

Tsugawa et al. [4] ได้ทำการศึกษาความไม่สงบ (disturbances) ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่เกิดขึ้นภายหลังจากแผ่นดินไหวที่เมือง Tohoku ในปี 2011 โดยรายละเอียดของความไม่สงบดังกล่าวได้รับการเปิดเผยครั้งแรกโดยการสังเกตค่า TEC จากเครื่องรับ GPS ที่มีความละเอียดสูงในญี่ปุ่น ความไม่สงบในชั้นไอโอโนสเฟียร์หลังจากที่เกิดแผ่นดินไหวนั้นเริ่มต้นจากการที่ค่า TEC ลดลงแบบทันที แล้วตามด้วยการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มขึ้นของ TEC เสมือนเป็นอิมพัลส์ขนาดเล็กน้อย 7 นาที่ ใกล้กับจุดศูนย์กลาง (epicenter) แล้วคลื่นที่มีศูนย์กลางร่วมกัน (concentric waves) จะปรากฏและแพร่กระจายไปในทิศทางในแนวรัศมีด้วยความเร็วเท่ากับ 138–3,457 m/s การเพิ่มขึ้นแบบที่ขยายไปตามโซ่ของ TEC จะเกิดขึ้นในทิศตะวันตกของญี่ปุ่นด้วย ในบริเวณที่ใกล้กับจุดศูนย์กลางการแกว่งตัวในช่วงเวลาสั้น ๆ ประมาณ 4 นาที่ จะสังเกตเห็นได้ บทความนี้เน้นไปที่คลื่นที่มีศูนย์กลางร่วมกัน แบบรูปของคลื่นที่มีศูนย์กลางร่วมกันบ่งชี้ให้เห็นว่ามีแหล่งกำเนิดเป็นจุด จุดศูนย์กลางของโครงสร้างเหล่านี้ถูกเรียกว่า ionospheric epicenter ซึ่งตั้งอยู่ห่างประมาณ 170 km จากจุดศูนย์กลางในทิศตะวันออกเฉียงใต้ สำหรับคุณลักษณะการแพร่กระจายคลื่นนั้น คลื่นที่มีศูนย์กลางร่วมกันสามารถที่จะเกิดขึ้นได้จากคลื่นในชั้นบรรยากาศที่ถูกแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ คลื่นอนุสติกที่เกิดจากคลื่นเรย์ลีที่กำลังแพร่กระจาย คลื่นอนุสติกที่เกิดจากจุดศูนย์กลางในชั้นไอโอโนสเฟียร์ และคลื่นโน้มถ่วงในชั้นบรรยากาศจากจุดศูนย์กลางในชั้นไอโอโนสเฟียร์ โดยขนาดของคลื่นที่มีศูนย์กลางร่วมกันจะมีขนาดไม่สม่ำเสมอและขึ้นอยู่กับอะซิมุท (Azimuth) ของทิศทางการแพร่กระจายคลื่น ซึ่งไม่สามารถที่จะอธิบายโดยทฤษฎีที่มีการนำเสนอมาก่อนหน้านี้ ผลการวิจัย [3] และ [4] นี้เป็นการศึกษาผลกระทบของการเกิดแผ่นดินไหวที่มีผลต่อค่า TEC ที่วัดได้บนสถานีภาคพื้นดิน โดยค่า TEC นี้สามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาเวลาประวิงของสัญญาณ GPS และนำมาใช้งานเพื่อเป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญของระบบการติดต่อสื่อสารที่ดี/ไม่ดี การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการเกิดภัยพิบัติของประเทศไทยในอนาคตได้ นอกจากนี้ Occhipinti et al. [5] ยังได้นำเสนอการตรวจจับคลื่นสึนามิด้วยสัญญาณ GPS ในปี ค.ศ. 2008 ผลการศึกษา พบว่า การตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของค่า TEC ในชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้นสามารถนำมาใช้ในการแจ้งการเกิดคลื่นสึนามิได้

แต่สำหรับประเทศไทยนั้น ผลการศึกษาและผลงานวิจัยของการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการเกิดภัยพิบัตินั้นมีน้อยมาก จึงทำให้ประเทศไทยยังไม่สามารถที่จะป้องกันและรับมือกับผลกระทบที่เกิดขึ้นจากสภาวะการณ์ที่อาจจะเลวร้ายและส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจและสังคมของประเทศได้ 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 และนักศึกษาภายในประเทศที่มีความรู้เกี่ยวกับเรื่องนี้มีน้อยมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งบุคลากรของสถาบันฯ เองที่ยังไม่ทราบและไม่มีความรู้เกี่ยวกับเรื่องดังกล่าวนี้เป็นจำนวนมาก จึงทำให้ประเทศไทยขาดซึ่งบุคลากรที่มีความรู้และมีความเชี่ยวชาญที่จะทำวิจัย กำกับดูแล ออกแบบ/พัฒนา ทำนาย รวมถึงวิเคราะห์ข้อมูลสารสนเทศที่ได้จากหน่วยงานแต่ละด้าน

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเกิดแนวความคิดที่จะออกแบบและสร้างเว็บไซต์ศูนย์การเรียนรู้การเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการเกิดภัยพิบัติ ที่สถานีภาคพื้นดินละติจูดต่ำบริเวณเส้นแอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศูนย์สูตรแม่เหล็ก จังหวัดชุมพร ขึ้นมา โดยมีวัตถุประสงค์หลักคือเพื่อเป็นแหล่งเผยแพร่ความรู้ให้แก่ นักเรียน นักศึกษา นักวิจัย คณาจารย์ รวมถึงผู้ที่สนใจในประเทศไทย แสดงค่าข้อมูลสถิติต่าง ๆ เพื่อทำการวิเคราะห์และหาความสัมพันธ์ของค่าข้อมูลต่าง ๆ และทราบค่าข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของชั้นบรรยากาศ และสภาพภูมิอากาศต่าง ๆ ที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับการเกิดภัยพิบัติ นอกจากนี้ผลงานวิจัยที่ได้รับโดยตรงดังกล่าวข้างต้นแล้ว ผลพลอยได้ทางอ้อมของประเทศไทยคือลดความเสียหายทั้งชีวิตและทรัพย์สิน ลดงบประมาณมหาศาลในการสร้างระบบแจ้งเตือนภัยพิบัติและนำไปสู่การสร้างนักวิจัย คณาจารย์และเยาวชนรุ่นใหม่ที่มีความรู้ทางด้านอวกาศของประเทศไทยที่เพิ่มขึ้น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

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

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ออกแบบและสร้างเว็บไซต์ศูนย์การเรียนรู้ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการเกิดภัยพิบัติ ที่สถานีภาคพื้นดินละติจูดต่ำบริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก จังหวัดชุมพร
2. แสดงค่าข้อมูลสถิติต่าง ๆ ในเชิงแผนภาพและเชิงแบบจำลองพร้อมทั้งทำการวิเคราะห์และหาความสัมพันธ์ของค่าข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้รับในแต่ละด้าน
3. แสดงค่าข้อมูลในกรณีที่ชั้นบรรยากาศและสภาพภูมิอากาศเปลี่ยนแปลงและมีความเกี่ยวข้องกับการเกิดภัยพิบัติ

## 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ออกแบบและเริ่มสร้างหน้าเว็บหลักของศูนย์การเรียนรู้ปีที่ 1 (หน้าเว็บหลักและข้อมูลการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ)
2. แสดงค่าข้อมูลสถิติการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในชั้นบรรยากาศเชิงบรรยายและเชิงแผนภาพ
3. แสดงผลการศึกษการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศที่มีต่อเวลาประวิงในระบบการสื่อสาร
4. สรุปผลการวิจัย จัดทำรายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์ปีที่ 1 และส่งบทความวิจัยตีพิมพ์ฉบับที่ 1
5. แสดงค่าข้อมูลสถิติการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการเกิดภัยพิบัติ
6. หาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและชั้นบรรยากาศกับการเกิดภัยพิบัติ
7. สรุปผลการวิจัย จัดทำรายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์ปีที่ 2 และส่งบทความวิจัยตีพิมพ์ฉบับที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. สร้างหน้าเว็บไซต์ของศูนย์การเรียนรู้ฯ เพิ่มเติม (ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและข้อมูลการเกิดภัยพิบัติ เพิ่มเติมข้อมูลให้สมบูรณ์ และเพิ่มแบบจำลองข้อมูล)
9. บอกระดับการเกิดภัยพิบัติที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและชั้นบรรยากาศ
10. สร้างแบบจำลองเพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์บางตัวในชั้นบรรยากาศ
11. สรุปผลการวิจัย จัดทำรายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์ปีที่ 3 และส่งบทความวิจัยตีพิมพ์ฉบับที่ 3

โดยมีตารางแสดงแผนงานวิจัยและช่วงเวลาในการดำเนินการวิจัย ดังแสดงในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แผนงานวิจัยและช่วงเวลาในการดำเนินการวิจัย

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. แสดงค่าข้อมูลสถิติการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการเกิดภัยพิบัติ												
2. หาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและชั้นบรรยากาศกับการเกิดภัยพิบัติ												
3. สรุปวิจัย จัดทำรายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์ปีที่ 2 และส่งบทความตีพิมพ์ฉบับที่ 2												
4. ตัดหญ้า ทำความสะอาดและปรับปรุงพื้นที่ที่ตั้งเสาอากาศ สายอากาศ, ห้อง lonosonde												

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีเว็บไซต์ศูนย์การเรียนรู้การเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการเกิดภัยพิบัติ
2. มีค่าข้อมูลสถิติการเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการเกิดภัยพิบัติ
3. ทราบความสัมพันธ์ของการเกิดภัยพิบัติที่ส่งผลกระทบต่อสภาพภูมิอากาศกับชั้นบรรยากาศ
4. ทราบระดับการเกิดภัยพิบัติที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและชั้นบรรยากาศ
5. มีแบบจำลองที่สามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์บางตัวในชั้นบรรยากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

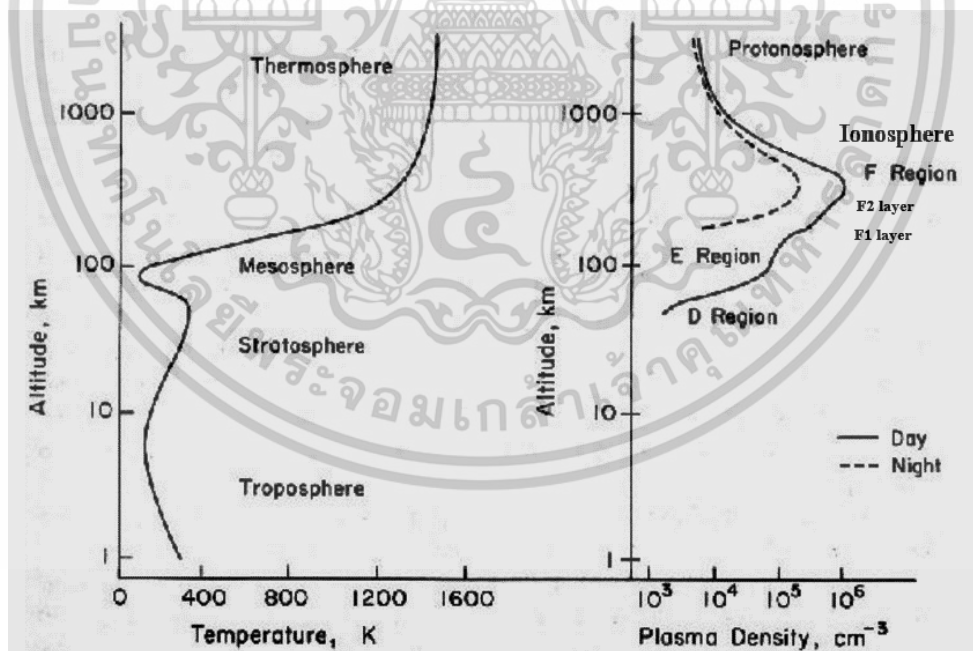
## บทที่ 2

### แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงเนื้อหาต่าง ๆ ที่นำไปใช้ในการออกแบบและสร้างเว็บไซต์ศูนย์การเรียนรู้การเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และการเกิดภัยพิบัติ ที่สถานีภาคพื้นดิน ละติจูดต่ำบริเวณเส้นศูนย์สูตรแม่เหล็ก จังหวัดชุมพร โดยรายละเอียดของหัวข้อต่าง ๆ มีดังนี้

#### 2.1 ชั้นไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere)

ชั้นไอโอโนสเฟียร์ (นร.เสกขุ, 2551) เป็นชั้นที่ประกอบไปด้วยกลุ่มพลาสมาที่เกิดการไอออไนซ์รวมตัวกันจนมีความหนาแน่นมากพอที่จะสะท้อนคลื่นวิทยุในความถี่ที่ต่ำกว่าย่าน 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

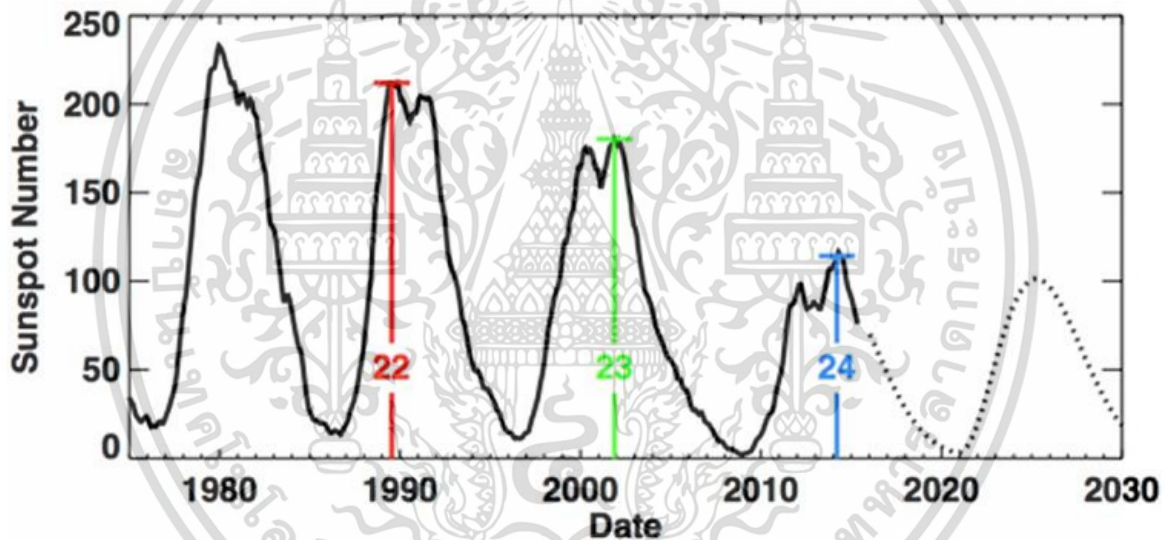


รูปที่ 2.1 บรรยากาศที่แบ่งออกเป็นชั้นต่าง ๆ ตามค่าอุณหภูมิและปริมาณความหนาแน่นพลาสมา (<http://utd500.utdallas.edu/ionosphere.htm>).

โดยมีโมเลกุลเพียงบางส่วนเท่านั้นที่ถูกไอออไนซ์ด้วยแสงอาทิตย์และยังคงมีโมเลกุลที่เป็นกลาง (neutral) จำนวนมากเหลืออยู่ในชั้นที่อยู่สูงกว่าชั้นไอโอโนสเฟียร์ คือ ชั้นพลาสมาสเฟียร์ (Plasma-sphere) เป็นเอกสารที่ลงนามโดยผู้เขียนเอกสารนี้ เมื่อผู้เขียนได้เห็นเว็บไซต์นี้ครั้งแรก ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

sphere) ซึ่งอิเล็กตรอนอิสระที่ถูกไอโอไนซ์เหล่านี้ทำหน้าที่เสมือนเป็นสนามแม่เหล็กของโลกที่สามารถต่อต้านลมสุริยะ (solar wind) การไอโอไนซ์นี้จะเกิดขึ้นไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับช่วงเวลาและระดับความสูงของชั้นไอโอโนสเฟียร์ ตำแหน่งที่ตั้งบนโลก จำนวนจุดดับบนดวงอาทิตย์ (sunspot number) อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับสถานะที่เอื้ออำนวยต่อการเกิดกระบวนการไอโอไนซ์ด้วย เช่น ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ปริมาณการชนกันของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่อย่างรวดเร็ว การแผ่รังสีอัลตรา ไวโอเลตและรังสีคอสมิก ฯลฯ

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



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 number) ด้วย โดยจุดดับบนดวงอาทิตย์นั้นเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของดวงอาทิตย์ที่มีลักษณะเป็นจุดดำมืดดั่ง โดยจุดดำบนดวงอาทิตย์นี้เกิดขึ้นที่ชั้นโฟโตสเฟียร์ ขนาดของจุดดำนั้นมีตั้งแต่ขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ที่ครอบคลุมพื้นที่หลายพันล้านตารางกิโลเมตร เนื่องจากมีการรวมตัวกันของจุดดำ นอกจากนี้ จุดดำนี้จะมีการหมุนไปตามการหมุนของดวงอาทิตย์ด้วย และถูกกำหนดลักษณะโดยความเข้มของสนามแม่เหล็กที่มีค่าสูงถึง 0.4 เทสลา (4,000 G) และจุดดำนี้จะเกิดเป็นคู่อที่มีขั้วแม่เหล็กที่ตรงข้ามกัน ทำให้เกิดการไหลวนของสนามแม่เหล็กออกมาจากโคโรนาหรือผิวของดวงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เห็นประโยชน์ในการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ( $f_oF2$ ) จากพลติกรรมของความหนาพบว่า ความหนาของชั้นไอโอโนสเฟียร์จะปรากฏค่าพิคที่สูงค่าหนึ่งเป็นเวลาหลังดวงอาทิตย์ขึ้นและค่าความหนาในเวลากลางคืนจะสูงกว่าในเวลากลางวัน

### 2.4 พารามิเตอร์ความหนาด้านล่างของแบบจำลอง IRI กับแบบจำลอง NeQuick

คณะกรรมการวิจัยอวกาศและสหภาพนานาชาติทางด้านวิทยาศาสตร์วิทยุยังคงที่จะพัฒนาแบบจำลอง IRI กันอย่างต่อเนื่องและได้เสนอแบบจำลอง IRI-2012 ออกมา ซึ่งเป็นเวอร์ชันล่าสุดของแบบจำลอง IRI โดยแบบจำลอง IRI-2012 ยังคงที่จะได้รับปรับปรุงหลาย ๆ ประเด็น อาทิเช่น ตัวเลือก ABT-2009 สำหรับทั้งพารามิเตอร์ความหนา พารามิเตอร์รูปร่าง และค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านล่าง (bottomside ionosphere) โดยแบบจำลอง IRI เป็นแบบจำลองที่สร้างขึ้นจากค่าข้อมูลที่วัดได้ในทางปฏิบัติทั่วโลกแล้วจะนำมาสร้างสมการเชิงการทดลอง (empirical model) ซึ่งจะให้ค่าเฉลี่ยรายเดือนของพารามิเตอร์ในชั้นไอโอโนสเฟียร์สำหรับตำแหน่งและเวลาที่ต้องการ โดยโพรไฟล์ความหนาแน่นอิเล็กตรอนด้านล่างของชั้นย่อย F2 ในชั้นไอโอโนสเฟียร์สามารถหาค่าได้จากสมการต่อไปนี้ (Ramakrisnan and K. Rawer, 1985)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

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) ค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นและพารามิเตอร์รูปร่างของชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านล่าง ( $B0$ ,  $B1$ ) ได้แก่ Bil-2000, Gul-1987 และ ABT-2009 โดยวิธี Bil-2000 นั้นเป็นแบบจำลองมาตรฐานที่ใช้ตารางของค่า  $B0$  ที่คำนวณออกมาได้จากการแปลงกลับโพลาไรซ์ของไอโอโนแกรมที่สถานีจำนวนมากที่ตั้งอยู่ในบริเวณละติจูดใกล้เส้นศูนย์สูตร 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  $B0$  เมื่อเทียบกับค่าละติจูดดิวที่ปรับปรุง เวลาท้องถิ่น เดือนและจุดดับบนดวงอาทิตย์ ผลการศึกษาพบว่า ค่า  $B0_{ABT}$  ได้รับการปรับปรุงจนมีค่าที่แม่นยำสูงกว่าวิธี Gul-1987 และวิธี Bil-2000 ประมาณ 40% และ 32% ในขณะที่ ค่า  $B1_{ABT}$  ได้รับการปรับปรุงจนมีค่าที่แม่นยำสูงกว่าวิธี Gul-1987 และวิธี Bil-2000 ประมาณ 20%

ก่อนหน้านี้นักการศึกษาและวิจัยมากมายเกี่ยวกับค่า  $B0$  [18-20] พบว่า การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวัน, ตามฤดูกาลและตามปฏิกิริยาสุริยะของค่า  $B0$  นั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งของสถานีไอโอโนซอนด์ ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงเหล่านั้นของค่า  $B1$  นั้นมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยตามฤดูกาล ในตอนกลางวัน ค่า  $B0_{Gul}$  จะมีค่าที่สูงกว่าค่า  $B0$  ที่วัดได้ (Reinisch and Huang, 1996) ในตอนกลางวันที่สถานีไฮหนาน ค่า  $B0_{Bil}$  จะสอดคล้องเป็นอย่างดีกับค่า  $B0$  ที่วัดได้เมื่อเทียบกับค่า  $B0_{Gul}$  ในฤดูร้อน และมีผลตรงข้ามเกิดขึ้นในฤดูหนาว (Zhang et al., 2008) ที่สถานีใกล้เส้นศูนย์สูตรและที่ละติจูดต่ำ ค่า  $B0_{Gul}$  จะสอดคล้องเป็นอย่างดีกับค่า  $B0$  ที่วัดได้เมื่อเทียบกับค่า  $B0_{ABT}$  และค่า  $B0_{Bil}$  ในช่วงปี 2010-2011 ของช่วงเริ่มต้นของไซเคิลสุริยะลำดับที่ 24 (Venkatesh and Fagundes, 2016) เมื่อไม่นานมานี้ Jamjareegulgarn et al. (2016) ได้นำเสนอพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างของแบบจำลอง NeQuick ขึ้นมาใหม่แทนที่ค่า  $B2bot$  เดิม ( $B2_{NeQ}$ ) ซึ่งจะถูกแทนด้วยตัวแปร  $B2P_1$  ในงานวิจัยนี้ การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันและตามฤดูกาลของค่า  $B2P_1$  จะถูกเปรียบเทียบกับค่า  $B2P_1$  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) ก็ได้นำเสนอตัวแปรแก้สำหรับค่า  $B2P_1$  ที่ได้นำเสนอไปก่อนหน้านี้ (ถูกเรียกว่า  $B2P_2$  ในงานวิจัยนี้) ที่สถานี Kwajalein เพื่อที่จะลดผลต่างที่เกิดขึ้นระหว่างค่า  $B0$  ที่วัดได้กับค่า  $B2P_1$  ผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาพบว่า ค่า B2P\_2 เป็นค่าที่เข้าใกล้กับค่า B0 ที่สังเกตมากขึ้นและปรับปรุงค่า B2P\_1 เดิมขึ้นมาประมาณ 65-83% อย่างไรก็ตาม ผลการวิจัยครั้งนั้นกระทำขึ้นเพียงแค่วันเดียวในแต่ละฤดูกาลของปี ค.ศ. 2008 เท่านั้น นอกจากนี้ ผลการศึกษาก่อนหน้านี้จำนวนมากยังคงแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างที่มากระหว่างค่า B0 ที่วัดได้จริงกับค่า B0 ที่ทำนายได้จากแบบจำลอง IRI โดยเฉพาะอย่างยิ่งสถานีใกล้เส้นศูนย์สูตรและสถานีละติจูดต่ำ 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 พารามิเตอร์หลักตัวหนึ่งของความสัมพันธ์ดังกล่าวคือค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่าง (B2bot) โดยค่า B2bot เดิมที่นำเสนอใน [24] ได้ถูกศึกษาและถูกกำหนดให้อยู่ในรูปแบบตัวแปร 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

$$\ln((dN/dh)_{\max}) = -3.467 + 1.714 \ln(foF2) + 2.02 \ln(M(3000)F2) \quad (2.4)$$

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  $\tau$  เป็นค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน (หน่วย km) ซึ่งหาค่าได้จากสมการที่ 2.6 และ  $Q$  เป็นตัวแปรใหม่ที่กำหนดขึ้นมา ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 2.7 ซึ่งเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่งของพารามิเตอร์รูปร่างด้านบน ( $k$ )

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

โดยขั้นตอนในหาค่าตัวแปร  $Q$  และค่า  $B2P\_1$  สามารถที่จะศึกษาเพิ่มเติมได้จาก Jamjareegulgarn et al. (2017) 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  $B0$  ที่วัดได้ของดิจิจอนต์อย่างไร

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

## 2.5 ตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์

มีการเปลี่ยนแปลงทางเวลาและระยะทางอย่างมากในชั้นไอโอโนสเฟียร์ เมื่อกิจกรรมทางแม่เหล็กโลกเพิ่มขึ้นอย่างมาก ปฏิสัมพันธ์เชิงซ้อนของชั้นแมกเนโตสเฟียร์ ไอโอโนสเฟียร์ และเทอร์โมสเฟียร์ก็จะ เป็นต้นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างพลวัตของการกระจายตัวของพลาสมาในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งจะก่อให้เกิดพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ในเวลาต่อมา ในระหว่างที่เกิดพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์นั้น ความหนาแน่นพลาสมาในชั้นไอโอโนสเฟียร์สามารถที่จะเพิ่มขึ้น และ/หรือ ลดลงจากหลายชั่วโมงไปจนถึงหลายวันก็ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขสภาวะปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์ คุณลักษณะของพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ไม่จำเป็นที่จะต้องเหมือนกับพายุแม่เหล็กโลกเสมอไป ถึงแม้ว่ากิจกรรมแม่เหล็กโลกจะต่ำ แต่เงื่อนไขในชั้นไอโอโนสเฟียร์สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้อย่างมาก ซึ่งขึ้นอยู่กับฤดูกาล เวลาท้องถิ่นและตำแหน่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเปลี่ยนแปลงของ EIA ที่ส่งผลกระทบต่อเงื่อนไขในชั้นไอโอโนสเฟียร์อย่างมากที่ละติจูดกลางและละติจูดต่ำ

เงื่อนไขในชั้นไอโอโนสเฟียร์เป็นหนึ่งในคุณลักษณะสภาพอวกาศที่สำคัญมากที่สุดประเด็นหนึ่งสำหรับผู้ใช้งานระบบต่างๆ ที่อาศัยคลื่นวิทยุ อาทิเช่น ระบบดาวเทียมนำทางสากล (GNSS), ระบบการสื่อสารย่าน HF, และระบบการตรวจจักระยะไกลที่อาศัยอวกาศ ยกตัวอย่างเช่น ผู้ใช้ GNSS อาจจะมีคามผิดพลาดในการระบุตำแหน่งที่มาก ซึ่งเกิดขึ้นจากค่าเวลาประวิงในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่เพิ่มขึ้นอย่างมากอันเนื่องมาจากพายุเชิงบวกในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ส่วนผู้สื่อสารย่าน HF อาจจะมีประสบการณ์การขาดติดต่อไปเลย (blackouts) อันเนื่องมาจากพายุเชิงลบในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ส่วนผู้ใช้ระบบการตรวจจักระยะไกลที่อาศัยอวกาศอาจจะประสบปัญหาจากการเปลี่ยนแปลงขนาดและเฟสแบบกะทันหัน (scintillation) ในช่วงที่เกิดพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์อย่างหนักหน่วง โดยผู้ปฏิบัติการและผู้ใช้ระบบเหล่านี้ต้องการที่จะรู้ว่าเงื่อนไขในชั้นไอโอโนสเฟียร์นั้นมีความเสียบสงบหรือไม่

สารสนเทศของสภาพอวกาศ อาทิเช่น กิจกรรมสุริยะและกิจกรรมแม่เหล็กโลก ถูกจัดให้มีโดยศูนย์แจ้งเตือนสากลของหน่วยให้บริการสภาพแวดล้อมในอวกาศนานาชาติ (ISES) ตัวบอกระดับ (scale) บางตัวถูกใช้เพื่อบ่งชี้คุณลักษณะของสิ่งเหล่านั้น เช่น G scale สำหรับพายุแม่เหล็กโลก, S scale สำหรับการแผ่รังสีสุริยะ, และ R scale สำหรับการรบกวนวิทยุไม่ได้ โดย S กับ R scales จะอาศัยการวัดค่ากิจกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่เป็นการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุริยะ ส่วน G scale จะอาศัยการวัดค่าของกิจกรรมแม่เหล็กโลก ตัวบอกระดับเหล่านี้เป็นส่วนหนึ่งของ “NOAA scale” ที่ได้รับการยอมรับเป็นอย่างดีและแสดงบทบาทที่สำคัญในการมอนิเตอร์และการทำนายของเงื่อนไขสภาพอวกาศ ในทางกลับกัน ตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่อาศัยการวัดชั้นไอโอโนสเฟียร์ยังไม่มีการนำเสนอ (ยังไม่ได้รับการยอมรับ) เลย เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางเวลาและระยะทางที่มากของชั้นไอโอโนสเฟียร์ (ยกตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล วันต่อวัน เวลาท้องถิ่นและตำแหน่ง) จึงทำให้มันยากที่จะนิยาม (หรือกำหนด) ตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์

ความพยายามจำนวนมากที่จะบ่งบอกคุณลักษณะของชั้นไอโอโนสเฟียร์โดยการใช้ค่าพารามิเตอร์ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ได้จากวัดได้ถูกกระทำขึ้น หนึ่งในดัชนีหลาย ๆ ตัวเริ่มแรกของชั้นไอโอโนสเฟียร์เป็นความถี่วิกฤตชั้น F2 (foF2) ซึ่งได้ถูกนิยามเสมือนเป็นค่าเฉลี่ยรายเดือนของ foF2 (ปี 1960) ดัชนีตัวนี้ถูกใช้สำหรับการวิเคราะห์แนวโน้มระยะยาวของชั้นไอโอโนสเฟียร์ เมื่อไม่กี่ปีมานี้ จากการใช้ที่มัสซาชูเซตส์ในชั้นไอโอโนสเฟียร์จำนวนมากมาย นักวิจัยจำนวนมากยังคงพยายามที่จะสร้างดัชนีชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่สามารถที่จะถูกหามาได้แบบเวลาจริง ยกตัวอย่างเช่น ดัชนีกิจกรรมชั้นไอโอโนสเฟียร์ (AI) ได้ถูกนำเสนอโดย Bremer et al. (2006) บนพื้นฐานของการวัดค่า foF2 ในยุโรป หลังจากนั้น มันก็ได้ถูกทบทวนเพื่อที่จะบรรยายพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ละติจูดกลางโดย Mielich and Bremer (2010) พวกเขาได้ใช้ข้อมูล foF2 จำนวน 13 ปีที่ได้รับจาก 1 สถานีในยุโรปและได้ทำวิเคราะห์การขึ้นอยู่กัฤดูกาลของพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์

1. ดัชนีอีกตัวหนึ่งที่บรรยายพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์คือ “ดัชนีสภาพอากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์” (W index) ซึ่งถูกนำเสนอโดย Gulyaeva et al. (2008) และ (2009) โดยการใช้ค่า foF2 และค่าปริมาณอิเล็กตรอนสุทธิ (TEC) ในยุโรป การขึ้นอยู่กัเวลาท้องถิ่นของพารามิเตอร์ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ได้ถูกกำจัดออกไปโดยการคำนวณค่าคงตัวการปรับแก้ที่ขึ้นอยู่กัมุมซินิคลูริยะ (Gulyaeva, 2009) โดยดัชนี W ได้ถูกนิยามโดยการกำหนดเงื่อนไขให้แก่เทอมลอการิทึมของพารามิเตอร์ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ถูกปรับแก้แล้วเมื่อเทียบกับค่าอ้างอิงในสถานะเสถียรของมัน เงื่อนไขดังกล่าวจะถูกกำหนดตายตัวบนพื้นฐานของค่าความน่าจะเป็นของพายุเชิงลบที่ 1 สถานี นอกจากนี้ พวกเขายังได้คำนวณหาค่าดัชนี 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. (2006) และ (2012) ได้แนะนำดัชนีชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่มีสิ่งรบกวนดังกล่าวเพื่อที่จะลดผลกระทบสภาพอวกาศที่มีต่อการนำทางที่อาศัย GNSS และการระบุตำแหน่ง

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

## บทที่ 3

### หลักการและการออกแบบ

ในบทนี้จะกล่าวถึงความสำคัญและที่มาของตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric storm scale หรือ I-scale) และการคำนวณค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่าง (B2\_bot) ซึ่งประกอบไปด้วยการคำนวณค่า B2bot ที่ไม่มีค่าปรับแก้ (B2botP\_old) และการคำนวณค่า B2bot ที่มีค่าปรับแก้ (B2botP\_new) โดยรายละเอียดของหัวข้อต่าง ๆ มีดังนี้

#### 3.1 ตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์

ปฏิสัมพันธ์เชิงซ้อนของชั้นแมกเนโตสเฟียร์ ไอโอโนสเฟียร์ และเทอร์โมสเฟียร์ก็จะเป็นต้นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างพลวัตของการกระจายตัวของพลาสมาในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งจะก่อให้เกิดพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ในเวลาต่อมา ในระหว่างที่เกิดพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์นั้น ความหนาแน่นพลาสมาในชั้นไอโอโนสเฟียร์สามารถที่จะเพิ่มขึ้น และ/หรือ ลดลงจากหลายชั่วโมงไปจนถึงหลายวันก็ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขสภาวะปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์ คุณลักษณะของพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ไม่จำเป็นที่จะต้องเหมือนกับพายุแม่เหล็กโลกเสมอไป ถึงแม้ว่ากิจกรรมแม่เหล็กโลกจะต่ำ แต่เงื่อนไขในชั้นไอโอโนสเฟียร์สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้อย่างมาก ซึ่งขึ้นอยู่กับฤดูกาล เวลาท้องถิ่นและตำแหน่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเปลี่ยนแปลงของ EIA ที่ส่งผลกระทบต่อเงื่อนไขในชั้นไอโอโนสเฟียร์อย่างมากที่ละติจูดกลางและละติจูดต่ำ โดยเงื่อนไขในชั้นไอโอโนสเฟียร์เป็นหนึ่งในคุณลักษณะสภาพอวกาศที่สำคัญมากที่สุดประเด็นหนึ่งสำหรับผู้ใช้งานระบบต่างๆ ที่อาศัยคลื่นวิทยุ อาทิเช่น ระบบดาวเทียมนำทางสากล (GNSS), ระบบการสื่อสารย่าน HF, และระบบการตรวจจับสนามแม่เหล็กที่อาศัยอวกาศ

สารสนเทศของสภาพอวกาศ อาทิเช่น กิจกรรมสุริยะและกิจกรรมแม่เหล็กโลก ถูกจัดให้มีโดยศูนย์แจ้งเตือนสภากลของหน่วยให้บริการสภาพแวดล้อมในอวกาศนานาชาติ (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 ตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่อาศัยการวัดชั้นไอโอโนสเฟียร์ยังไม่มีกำหนดเป็นค่ามาตรฐานออกมาใช้งานกันเลย อาจจะมีสาเหตุมาจากการที่ชั้นไอโอโนสเฟียร์มีการเปลี่ยนแปลงทางเวลาและระยะทางที่มาก จึงทำให้มันยากที่จะกำหนดตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ชัดเจนออกมาเพื่อใช้งาน

ในงานวิจัยของ Nishioka et al. (2017) นั้น ตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ยังคงถูกศึกษาและพัฒนาเพิ่มเติม เพื่อที่จะขยายผลการศึกษาให้มีความเป็นไปได้สำหรับการใช้งานทั่วไปในบริเวณต่าง ๆ ในโลก สำหรับจุดประสงค์นี้ การขึ้นอยู่กับฤดูกาล เวลาท้องถิ่น และตำแหน่งของการเปลี่ยนแปลงในชั้นไอโอโนสเฟียร์ควรจะถูกกำจัดออกไป เพื่อที่สร้างตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ใหม่ตัวหนึ่ง (I-scale)

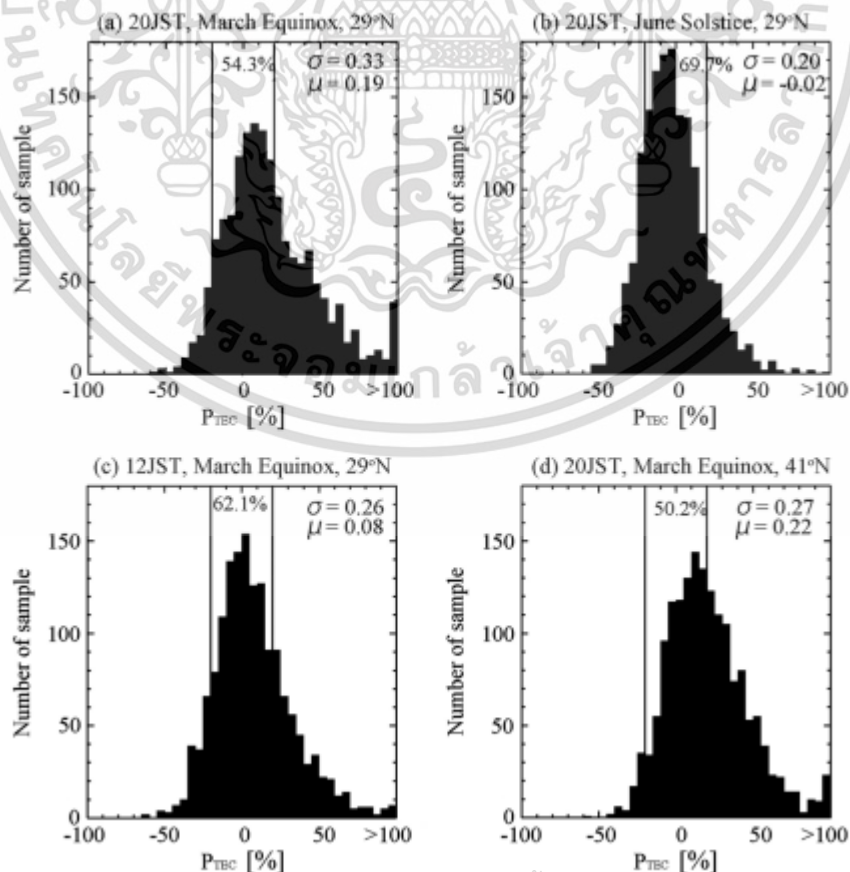
เราจะทำการวิเคราะห์คุณลักษณะเชิงสถิติของค่า TEC และ foF2 พารามิเตอร์เหล่านี้จะถูกใช้งานอย่างเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น เมื่อผู้ผู้เห็นไปใช้ประโยชน์ในการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

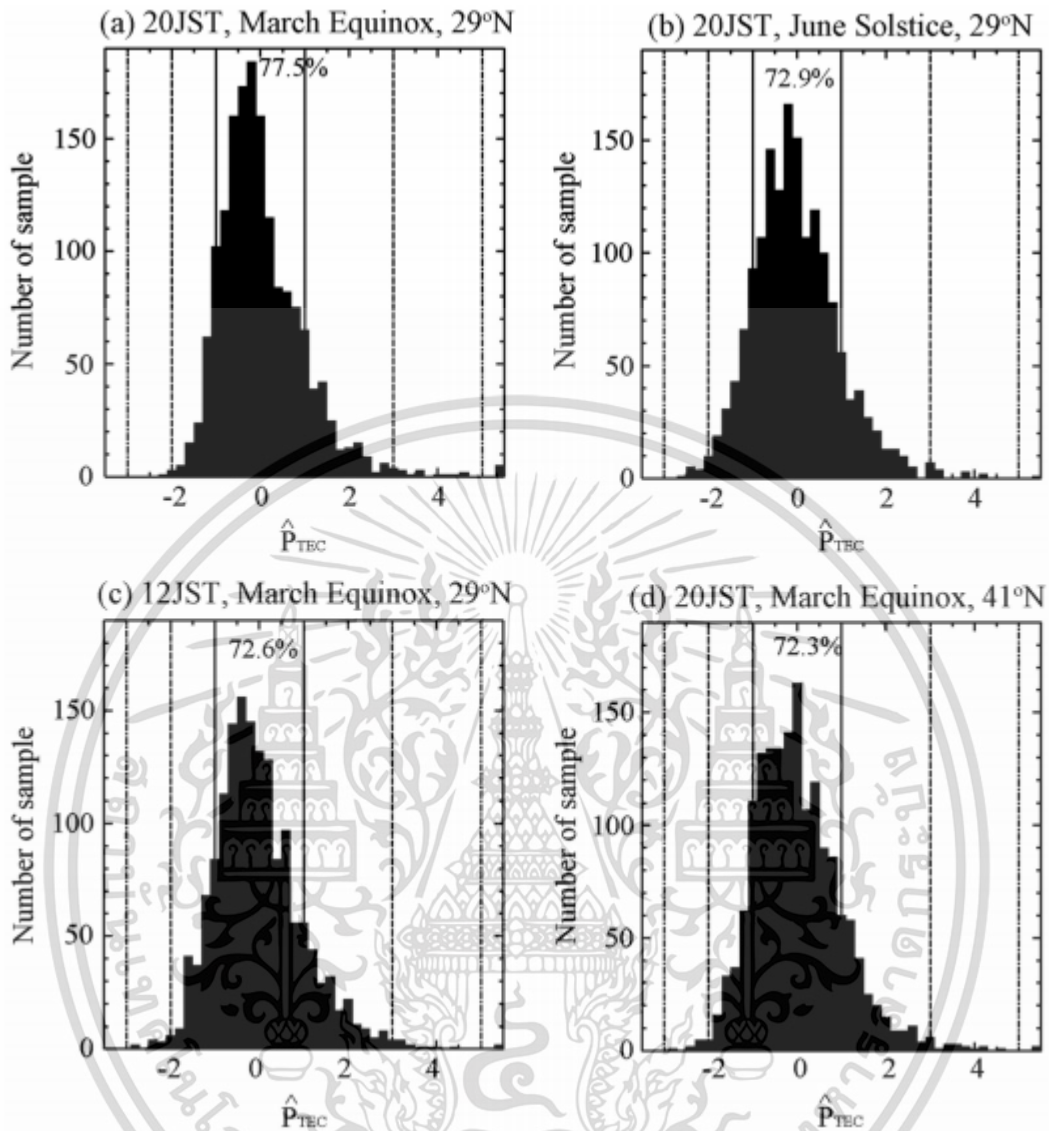
ประจำและใช้งานกันทั่วโลกในการมอนิเตอร์ชั้นไอโอโนสเฟียร์ คุณภาพของข้อมูลเหล่านี้ดีเพียงพอต่อการศึกษาค่าเหล่านั้นในทางสถิติ ตัวอย่างการคำนวณหาค่า I-scale ที่อาศัยการวัดค่า TEC และค่า foF2 นั้นสามารถศึกษาและอ่านเพิ่มเติมได้จากบทความวิจัยของ Nishioka et al. (2017) ซึ่งได้ทำการศึกษาค่า I-scale ของประเทศญี่ปุ่น 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) มีดังนี้

### 3.1.1 ค่า I-scale ที่ขึ้นอยู่กับการวัดค่า TEC

รูปที่ 3.1a แสดงค่าฮีสโตแกรมของ P<sub>TEC</sub> ในตอนกลางคืน (20 JST หรือ 11UT) ในช่วงเวลา 3 เดือนรอบๆ ฤดู March Equinox ที่แถบละติจูด 29 องศาเหนือ (27-31 องศาเหนือ) ตลอดระยะเวลา 18 ปี จำนวนสุทธิของตัวอย่างที่ใช้จะมีค่าเท่ากับวันทั้งหมดในฤดู ME ตลอด 18 ปี นั่นคือประมาณ 1600 ตัวอย่าง (วัน) ในรูปที่ 3.1a ขนาด 54.3% ของจำนวนตัวอย่างสุทธิ (all the samples) มีค่า abs(P<sub>TEC</sub>) มีค่าน้อยกว่า 20% ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขที่เสียบ (ไม่มีพายุ) ในทางตรงข้าม ค่า P<sub>TEC</sub> มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 100% (was 100% or more) ในช่วงเวลาที่มากกว่า 40 วัน ที่บ่งชี้ให้เห็นว่าค่า O<sub>TEC</sub> มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 2 เท่าของค่า R<sub>TEC</sub> ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าเฉลี่ยของค่า P<sub>TEC</sub> ในรูปที่ 3.1a มีค่าเท่ากับ 0.33 และ 0.19 ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยมีค่าเป็นบวกเนื่องจากค่า O<sub>TEC</sub> มีค่ามากกว่าค่า R<sub>TEC</sub> ในทางสถิติในฤดู ME ซึ่งชี้ให้เห็นถึงการขึ้นอยู่กับฤดูกาลของค่า TEC ที่น่าจะถูกรวมไว้อยู่ในค่า P<sub>TEC</sub> อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากค่า R<sub>TEC</sub> เป็นค่ามัธยฐานของค่า O<sub>TEC</sub> ของ 27 วันที่ผ่านมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.1 การกระจายทางสถิติของค่า  $P_{TEC}$  จากปี 1997 ถึง 2014รูปที่ 3.2 การกระจายทางสถิติของค่า  $P_{TEC}^*$  จากปี 1997 ถึง 2014

ดังที่อธิบายไว้ในบทความของ Mielich และ Bremer (2010) ค่า AI เป็นค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลค่าหนึ่ง รูปที่ 3.2b แสดงฮิสโตแกรมของ  $P_{TEC}$  (เช่นเดียวกับรูปที่ 3.1a) แต่ในระหว่าง 3 เดือนรอบฤดู June Solstice (JS) การกระจายตัวในฤดู JS ในรูปที่ 3.1b มีค่าพีคที่แคบรอบ ๆ ค่า  $P_{TEC} = 0$  มากกว่าค่าเหล่านั้นในฤดู ME ในรูปที่ 3.1a โดยในรูปที่ 3.1b นั้น ขนาด 69.7% ของจำนวนตัวอย่างสุทธิมีค่า  $abs(P_{TEC})$  มีค่าน้อยกว่า 20% ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า  $P_{TEC}$  มีค่าเท่ากับ 0.2 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่า  $P_{TEC}$  ในฤดู ME การกระจายตัวของค่า AI แสดงคุณลักษณะที่มีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันด้วยเช่นกัน รูปที่ 3.1c แสดงการกระจายตัวของ  $P_{TEC}$  ในตอนกลางวัน (12 JST) ที่ละติจูด 29 องศาเหนือในฤดู ME การกระจายตัวในตอนกลางวันจะมีค่าที่แคบกว่าค่าเหล่านั้นในตอนกลางคืนในรูปที่ 3.1a ในรูปที่ 3.1c ค่า 62.1% ของจำนวนตัวอย่างสุทธิมีค่า  $abs(P_{TEC})$  มีค่าน้อยกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

20% ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า  $P_{TEC}$  มีค่าเท่ากับ 0.26 รูปที่ 3.1d แสดงการกระจายตัวของ  $P_{TEC}$  ในตอนกลางคืน (20 JST) ที่แถบละติจูด 41 องศาเหนือ (40-42 องศาเหนือ) ในฤดู ME การกระจายตัวมีค่าที่แคบกว่าค่าเหล่านั้นในตอนกลางคืนในรูปที่ 1a ในรูปที่ 3.1d ค่า 50.2% ของจำนวนตัวอย่างสุทธิมีค่า  $abs(P_{TEC})$  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)

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

โดย ค่า sigma และค่า  $\mu$  ได้ถูกแสดงไว้ตรงขวามือด้านบนของรูปที่ 3.1a-3.1d ตามลำดับ การกระจายตัวของ  $P_{TEC}^*$  นั้นจะคล้ายกันดังที่เห็นในรูปที่ 3.2a-3.2d ถึงแม้ว่า ฤดูกาล เวลาท้องถิ่นและตำแหน่งจะแตกต่างกัน เปอร์เซ็นต์ของตัวอย่างที่มีค่า  $P_{TEC}^*$  มีค่าอยู่ระหว่าง  $\pm 1\%$  นั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 72 และ 78% ดังที่แสดงอยู่ด้านบนของแต่ละรูป ซึ่งชี้ให้เห็นถึง “ค่าความน่าจะเป็นของการเกิดขึ้นของค่า  $abs(P_{TEC}^*) < 1$  มีความแตกต่างกันน้อยมากท่ามกลางฤดูกาล เวลาท้องถิ่นและตำแหน่งที่แตกต่างกัน

### 3.1.2 ค่า I-scale ที่ขึ้นอยู่กับการวัดค่า foF2

$P_{foF2}$  ก็มีคุณลักษณะที่ขึ้นอยู่กับฤดูกาล เวลาท้องถิ่นและละติจูดเช่นเดียวกับ  $P_{TEC}$  จากการศึกษาพบว่า สถานี Okinawa นั้นมักจะพบกับ ESF หลายครั้งซึ่งเกิดขึ้นจากพองพลาสมาในตอนกลางคืนของฤดูอิควินอกซ์ เนื่องจาก foF2 ไม่สามารถที่จะถูกสเกลได้เมื่อ ESFs เกิดขึ้น จำนวนสุทธิของค่าข้อมูลในตอนกลางคืน 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

## 3.2 การคำนวณค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่าง (B2\_bot)

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

แบบจำลอง NeQuick 2 เป็นแบบจำลองที่แสดงค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นไอโอโนสเฟียร์อันหนึ่งซึ่งแสดงค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนและค่า TEC ที่ตำแหน่ง วันและเวลาที่ต้องการ (Nava et al., 2008) โดยแบบจำลอง NeQuick 2 นี้จะถูกอธิบายด้วยฟังก์ชันเอพสไตน์ (Epstein) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านล่างกับชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านบน โดย Zhang et al. (1991) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ความหนาด้านล่าง (B2bot), ค่า  $k$  (พารามิเตอร์รูปร่างด้านบน), ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนพีคชั้น F2 (NmF2) และค่า TEC ของแบบจำลอง NeQuick 2 ด้วยสมการที่ (3.2)

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

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

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

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

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

เนื่องจากมีค่าผลต่างที่เกิดขึ้นระหว่างพารามิเตอร์ความหนาด้านล่างที่คำนวณได้จากสมการที่นำเสนอ กับค่าที่วัดได้จาก Digisonde (B0\_obs) ในทางปฏิบัติ ดังนั้นค่าปรับแก้ (correction factor) สำหรับค่า B2botP\_old ควรที่จะได้รับการหาค่าเพิ่มเติม ในงานวิจัยนี้ เราเลือก “ค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างพารามิเตอร์ความหนาด้านล่างที่คำนวณได้จากสมการที่นำเสนอ 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)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักจากนั้น สมการที่ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ความหนาด้านล่างที่มีค่าปรับแก้ (B2botP\_new) ก็จะสามารถได้จากสมการที่ 8

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4 ผลการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาดัชนีบ่งชี้ความหนาแน่นของชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่อาศัยค่า foF2 (foF2-based I-scale) และการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ความหนาแน่นกลางของชั้นไอโอโนสเฟียร์ในวัฏจักรสุริยะที่ 24 รายละเอียดของแต่ละหน้าเว็บมีดังนี้

### 4.1 ดัชนีบ่งชี้ความหนาแน่นของชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่อาศัยค่า foF2

การศึกษาในครั้งนี้ จะมุ่งเน้นไปที่ดัชนีบ่งชี้ความหนาแน่นของชั้นไอโอโนสเฟียร์ใหม่ตัวหนึ่งที่อาศัยค่าสถิติ foF2 (foF2-based I-scale) โดยค่าข้อมูล foF2 เป็นค่าที่สังเกตด้วยมือจากแผนภาพไอโอโนแกรมในช่วงเวลาตั้งแต่เดือนมกราคม 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; เดือนมีนาคม-เมษายน), June Solstice (JS; เดือนพฤษภาคม-สิงหาคม), September Equinox (SE; เดือนกันยายน-ตุลาคม), และ December Solstice (DS; เดือนพฤศจิกายน-กุมภาพันธ์) โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ สมการต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาค่า I-scale และระดับค่าของ I-scale นี้จะสอดคล้องกับตามบทความของ Nishioka et al. (2017) ดังนี้

#### 4.1.1 เปอร์เซ็นต์ผลต่างของค่า foF2

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

$$P_{foF2} = 100 \times \frac{O_{foF2} - R_{foF2}}{R_{foF2}}$$

เมื่อค่า  $O_{foF2}$  เป็นค่า foF2 ที่สังเกตได้และ  $R_{foF2}$  เป็นค่าอ้างอิงของค่า  $O_{foF2}$  โดยค่าอ้างอิงถูกกำหนดเสมือนเป็นค่ามัธยฐานของค่า  $O_{foF2}$  ที่เวลาท้องถิ่นและตำแหน่งเดียวกันของ 27 วันที่ผ่านมา ในที่นี้เราจะใช้ค่ามัธยฐานมากกว่าค่าเฉลี่ยทางเลขคณิตในการเป็นตัวแทนสถานะที่ชั้นไอโอโนสเฟียร์ไม่ได้ถูกรบกวนเนื่องจากค่ามัธยฐานไม่ได้รับผลกระทบจากค่าที่มาก (น้อย) อย่างผิดปกติ โดยหน้าต่าง 27 วันนั้นได้ถูกใช้อย่างแพร่หลายสำหรับเงื่อนไขค่าอ้างอิงในการศึกษาชั้นไอโอโนสเฟียร์ ถ้าขนาดหน้าต่างมีค่ามากกว่า 27 วัน ค่ามัธยฐานจะได้รับผลกระทบมากขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล และถ้าขนาดหน้าต่างมีค่าที่น้อยกว่านั้น ค่ามัธยฐานจะได้รับผลกระทบมากขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันและพายุแม่เหล็กโลก ค่ามัธยฐานด้วยหน้าต่าง 27 วันมีความเหมาะสมในการแทนสถานะที่เกือบจะไม่ถูกรบกวน (เงียบ) ของชั้นไอโอโนสเฟียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ การขึ้นอยู่กับฤดูกาล เวลาท้องถิ่นและตำแหน่งของค่า  $P_{foF2}$  ควรจะถูกกำจัดออกไป เพื่อที่จะนิยามตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ตัวใหม่ขึ้นมาอีก 1 ตัว รูปที่ 3a-3d แสดงการกระจายตัวของค่า  $P_{foF2}$  และ  $P_{foF2}^*$  ที่ซึ่งจะหาค่าได้จากสมการต่อไปนี้

$$P_{foF2}^* = \frac{P_{foF2} - \mu}{\sigma}$$

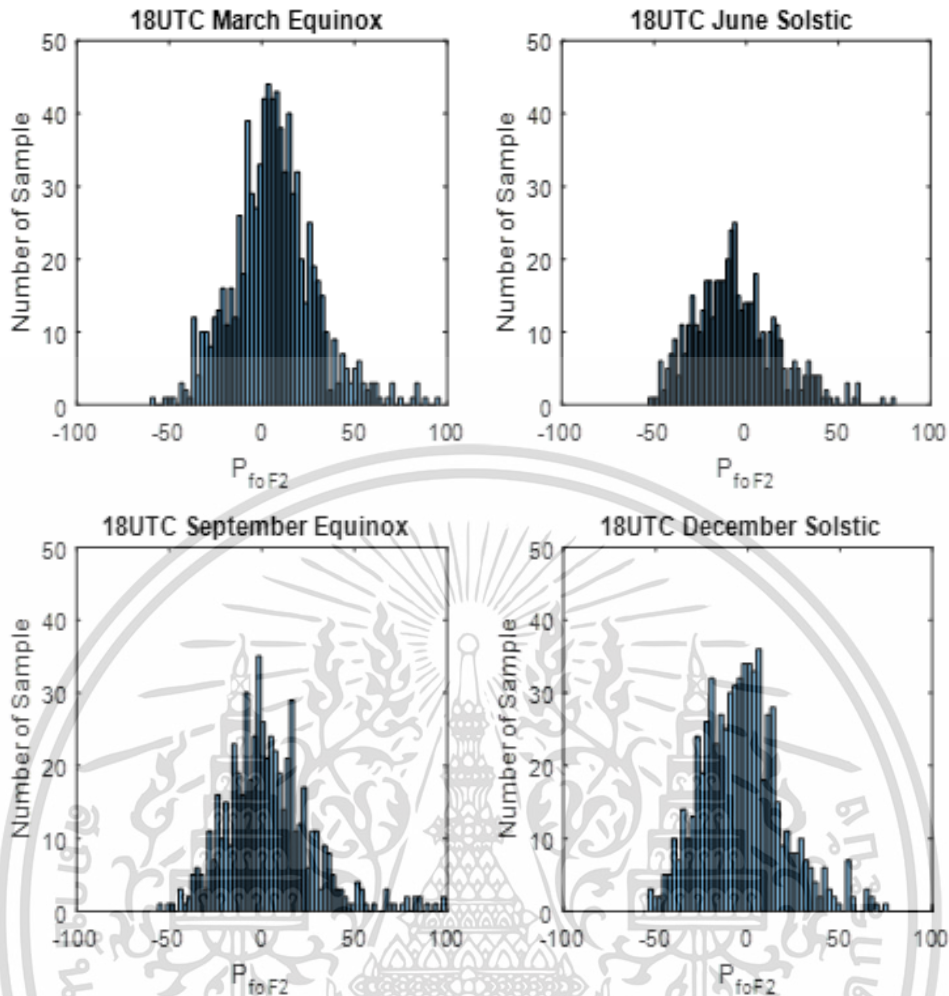
โดยค่า  $\mu$  และค่า  $\sigma$  เป็นค่าเฉลี่ยเลขคณิตและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละฤดูกาลของแต่ละสถานี ซึ่งแต่ละสถานีก็จะมีค่า  $\mu$  และค่า  $\sigma$  อย่างละ 4 ค่าสำหรับค่าข้อมูลทั้งหมดประมาณ 14 ปี และถ้าเราพิจารณาทั้งหมด 3 สถานี เราก็คจะมีค่า  $\mu$  และค่า  $\sigma$  ทั้งหมด 12 ค่า สำหรับการจัดระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์นั้น เราได้นิยาม I-scale โดยการใช  $P_{foF2}^*$  ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 คอลัมน์ที่ 1 ถึง 3 แสดงค่า I-scale คำบรรยายของระดับพายุที่เกิดขึ้น และระดับของค่า  $P_{foF2}^*$  ตามลำดับ ยกตัวอย่างเช่น Ip3 แทนพายุเชิงบวกที่รุนแรงและมีค่า  $P_{foF2}^*$  ที่มากกว่า 5

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

I-scale	Descriptor	Definition ( $\hat{P}$ Stands for $\hat{P}_{TEC}$ or $\hat{P}_{foF2}$ )
Ip3	Severe positive storm	$5 < \hat{P}$
Ip2	Strong positive storm	$3 < \hat{P} \leq 5$
Ip1	Moderate positive storm	$1 < \hat{P} \leq 3$
I0	Quiet	$-1 < \hat{P} \leq 1$
IN1	Moderate negative storm	$-2 < \hat{P} \leq -1$
IN2	Strong negative storm	$-3 < \hat{P} \leq -2$
IN3	Severe negative storm	$\hat{P} < -3$

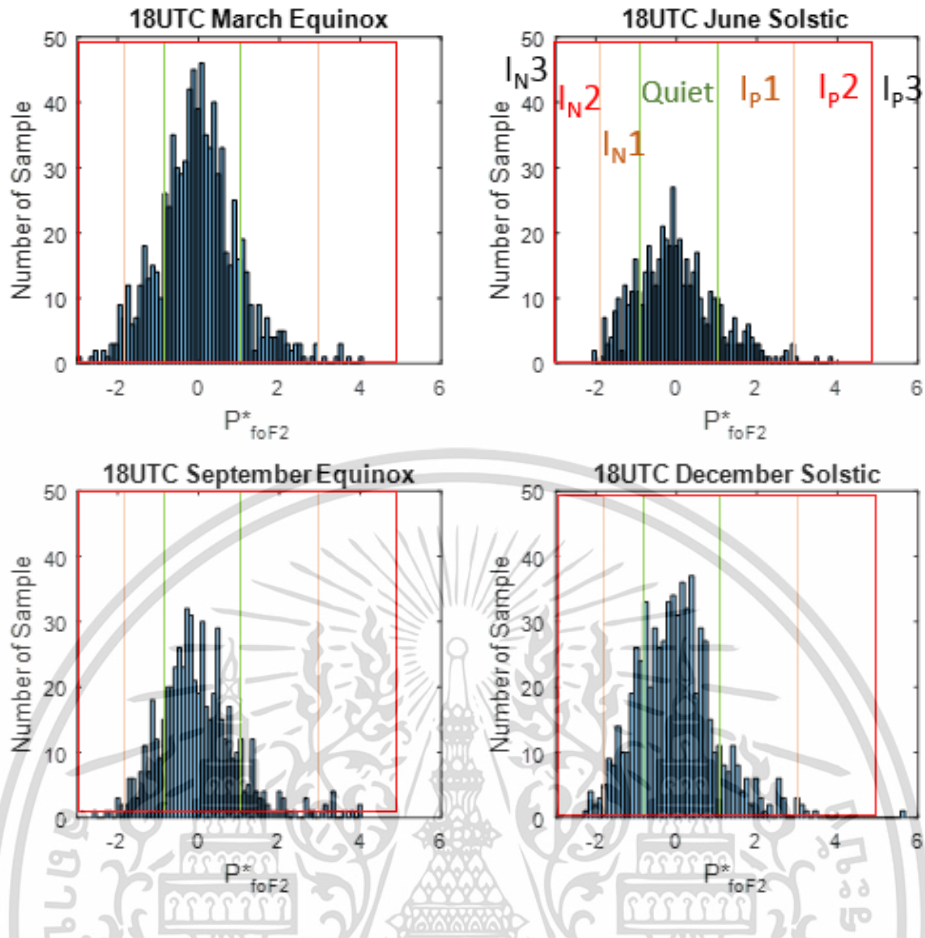
#### 4.1.2 ค่า I-scale ที่ได้จากค่า foF2

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 (01 LT) เท่านั้น รูปที่ 4.1 และ 4.2 แสดงการกระจายตัวแบบเกาส์เซียนของค่าข้อมูล  $P_{foF2}$  และ  $P_{foF2}^*$  ใน 4 ฤดูกาล (ME, JS, SE, และ DS) ที่สถานีชุมพรที่เวลา 18 UT (01 LT) ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 การกระจายตัวแบบเกาส์เซียนของค่าข้อมูล  $P_{foF2}$  ที่สถานีชุมพรที่เวลา 18 UT (01 LT)

ตารางที่ 4.2 แสดงจำนวนวัน (Samples) ที่พบแต่ละระดับของ I-scale ที่เกิดขึ้นทั้ง 3 สถานี ซึ่งจะพบว่า ค่าความน่าจะเป็นในการเกิดขึ้นแต่ละระดับของพายุที่แต่ละสถานีนั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยสภาวะเงียบ (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



รูปที่ 4.2 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
$I_p^3$	22	0.04	9	0.02	15	0.03
$I_p^2$	380	0.63	393	0.60	330	0.58
$I_p^1$	8309	13.82	9157	13.97	7839	13.73
Quiet	42972	71.47	46361	70.73	40765	71.39
$I_N^1$	7468	12.42	8779	13.39	7199	12.60
$I_N^2$	840	1.40	798	1.22	862	1.51
$I_N^3$	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

#### 4.3.1 วิชาภษผลการศึกษา

ถึงแม้ว่าโดยทั่วไปพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์จะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นได้โดยพายุแม่เหล็กโลก การเปลี่ยนแปลงในชั้นไอโอโนสเฟียร์ก็สามารถเกิดขึ้นเนื่องจากสาเหตุอื่นๆ ได้ด้วยยกตัวอย่างเช่น การเปลี่ยนแปลงของ EIA, ลมและของผสมในชั้นเทอร์โมสเฟียร์ เป็นต้น เพื่อที่จะวิเคราะห์การขึ้นอยู่กัฤดูกาล เวลาท้องถิ่นและตำแหน่งของค่า  $\sigma$  ว่ามีส่วนที่เกี่ยวข้องกับพายุแม่เหล็กโลกหรือไม่ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า  $P_{foF2}$  สำหรับวันที่เงียบสงบ (ไม่มีพายุ) ทั้งหมดจะถูกวิเคราะห์ การขึ้นอยู่กัฤดูกาลและตำแหน่งของค่า  $\sigma$  น่าจะไม่เกี่ยวข้องกับพายุแม่เหล็กโลกเลย เราตั้งข้อสังเกตว่าผลกระทบของ EIA น่าจะส่งผล

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างมากที่ละติจูดต่ำ ขนาดของค่ายอด EIA ที่ถูกก่อตัวขึ้นโดยส่วนใหญ่จะมีค่า TEC สูงที่สุดที่ ME และน้อยที่สุดที่ JS การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของ EIA ได้ถูกพบว่าจะมีค่าที่มากที่สุดและน้อยที่สุดในฤดูอิควินอกซ์และมีค่าน้อยที่สุดในฤดูซอลิสต์สในบริเวณอาเซียน (Venkatesh et al., 2015) การขึ้นอยู่กับฤดูกาลนี้จะสอดคล้องกับการขึ้นอยู่กับฤดูกาลของค่า  $\sigma$  ด้วย การขึ้นอยู่กับละติจูดของค่า  $\sigma$  ก็น่าจะอธิบายได้ด้วยเช่นกันจากการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของ EIAs ผลกระทบของ EIAs มีความสำคัญมากขึ้นทางตอนใต้มากกว่าที่ทางตอนเหนือของญี่ปุ่น เนื่องจากพื้นที่ทางตอนใต้อยู่ใกล้กับขอบทางตอนเหนือของ EIA

พายุ I<sub>p3</sub> ที่ใหญ่ที่สุดอันดับที่ 3 ที่เกิดขึ้นในช่วงพายุแม่เหล็กโลกที่ถูกเรียกว่า Halloween event และได้ถูกรายงานในหลายบทความ (ในปี 2005) พายุเชิงลบที่รุนแรงมากที่สุดได้ถูกจัดไว้เป็นตารางที่ 3 ที่จะสัมพันธ์กับพายุแม่เหล็กโลกด้วย เหตุการณ์ที่จัดไว้อันดับที่ 2 ที่รู้จักเป็นอย่างดีชื่อว่า Bastille Day event ประเด็นหนึ่งในหลายจุดที่น่าสนใจคือว่า พายุชั้นไอโอโนสเฟียร์นี้ไม่ได้สอดคล้องกับพายุแม่เหล็กโลกเสมอไป

ถึงแม้ว่าพายุแม่เหล็กโลกจำนวน 6 เหตุการณ์ที่มีค่าดัชนี Dst < -300 nT เกิดขึ้นในช่วงปี 1997-2014 ก็ตาม แต่ก็ไม่มีพายุลูกใดเลยที่เหนี่ยวนำให้เกิดพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์เชิงลบที่รุนแรงเลย ในขณะที่มีเพียง 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 ตัวบอกระดับของพายุแม่เหล็กโลกจึงไม่เหมาะสมที่จะเป็นตัวบอกระดับของพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ดังนั้น มันจึงมีความจำเป็นที่จะสร้างตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์

โดยทั่วไป คำจำกัดความของดัชนีกิจกรรมใดๆ ควรจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของผู้ใช้ ผู้ใช้ GNSS ยกตัวอย่างเช่นระบบ SBAS เป็นหนึ่งในผู้ใช้งานหลักของสารสนเทศสภาพภูมิอากาศในอวกาศ ค่า AATR ที่ถูกนำเสนอและถูกสร้างขึ้นมาในประชาคมของ EGNOS นั้นเป็นค่ารากที่สองของค่ากำลังสองเฉลี่ย (rms) รายชั่วโมงของ Along-Arc TEC rate ซึ่งเป็นตัววัด (proxy) ตัวหนึ่งของการเปลี่ยนแปลงของค่า TEC ตามระยะทางและเชิงเวลา 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 ที่นำเสนอขึ้นนี้ได้ถูกกำหนดขึ้นโดยอาศัยค่าข้อมูล foF2 และ TEC โดยตัวบอกระดับที่อาศัยค่าพารามิเตอร์เหล่านี้มีส่วนช่วยเหลือต่อผู้ใช้งานทั่วไป อาทิเช่น ผู้ใช้งานระบบการสื่อสารย่านความถี่เอกซาร์เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 ตัวบอกระดับในชั้นไอโอโนสเฟียร์สำหรับพารามิเตอร์เหล่านี้ก็ควรที่จะให้มีในภาคต่ออันใกล้นี้ด้วย

#### 4.2 การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างของชั้นไอโอโนสเฟียร์ในวัฏจักรสุริยะที่ 24

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาในงานวิจัยนี้เป็นค่ามัธยฐานรายชั่วโมงของค่า  $f_oF2$  (ค่าวิกฤตความถี่ในชั้น F2),  $hmF2$  (ค่าความสูงพีคชั้น F2), ค่า TEC, ค่าคงที่การแพร่กระจายคลื่นชั้น F2  $<m(3000)F2>$  และค่า B0 ที่วัดได้จากเครื่อง Digisonde ของสถานีวัดทั่วโลกจำนวน 12 สถานี ดังแสดงในตารางที่ 1 ในที่นี้ ค่าข้อมูลที่วัดได้ในช่วงที่มีผลกระทบของสุริยะมากที่สุดของวัฏจักรสุริยะที่ 24 (ปี 2013 - 2014) ของสถานี Digisonde 12 สถานีทั้งหมดจะนำมาจากเว็บไซต์ของ DIDBASE คือ <http://giro.uml.edu/dibase/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)

ตารางที่ 4.4 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างในช่วงวัฏจักรสุริยะที่ 24

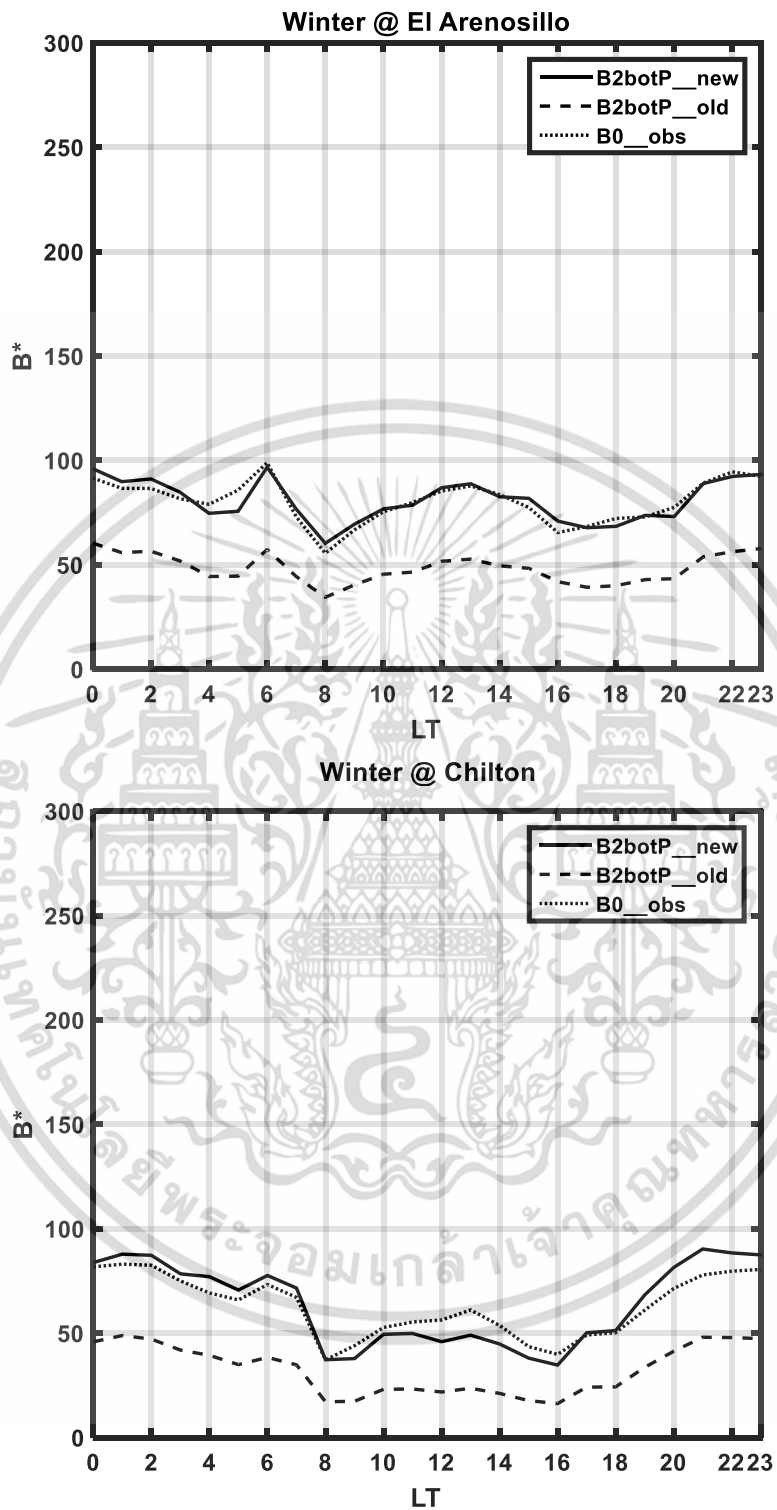
ในหัวข้อนี้ ค่า B2botP\_new จะถูกคำนวณหาค่าออกมาและทำการเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จาก Digisonde (B0\_obs) และค่า B2botP\_old ที่นำเสนอใน Jamjareegulgarn et al. (2016) โดยในที่นี้ จะขอแสดงค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างที่สถานี El Arenosillo (Spain) และสถานี Chilton (England) เท่านั้น เนื่องจากเป็นผลการศึกษาที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างและค่าเฉลี่ยของค่าปรับแก้ที่คำนวณได้ในแต่ละโซนของทั้ง 12 สถานีที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ผลการศึกษามีดังนี้

การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างในฤดูหนาว ฤดูออคโทเบอร์และฤดูร้อนที่เมือง El Arenosillo และ เมือง Chilton ในปี ค.ศ. 2014 มีแสดงไว้ในรูปที่ 4.3, 4.4 และ 4.5 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 25 กิโลเมตร โดยผลต่างที่มากที่สุดจะเกิดขึ้นที่เวลา 11.00 น. ที่เมือง El Arenosillo นอกจากนี้ ในภาพรวมของการศึกษาพบว่า ผลต่างสัมบูรณ์ของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างในฤดูร้อนมีค่า 0.09 – 25.11 กิโลเมตร ส่วนผลต่างสัมบูรณ์ในฤดูออคโทเบอร์และฤดูหนาวมีค่า 0.03 – 16.46 กิโลเมตร และ 0.02 – 22.49 กิโลเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยของค่าปรับแก้ในแต่ละโซนของสถานี Digisonde จำนวน 12 สถานี

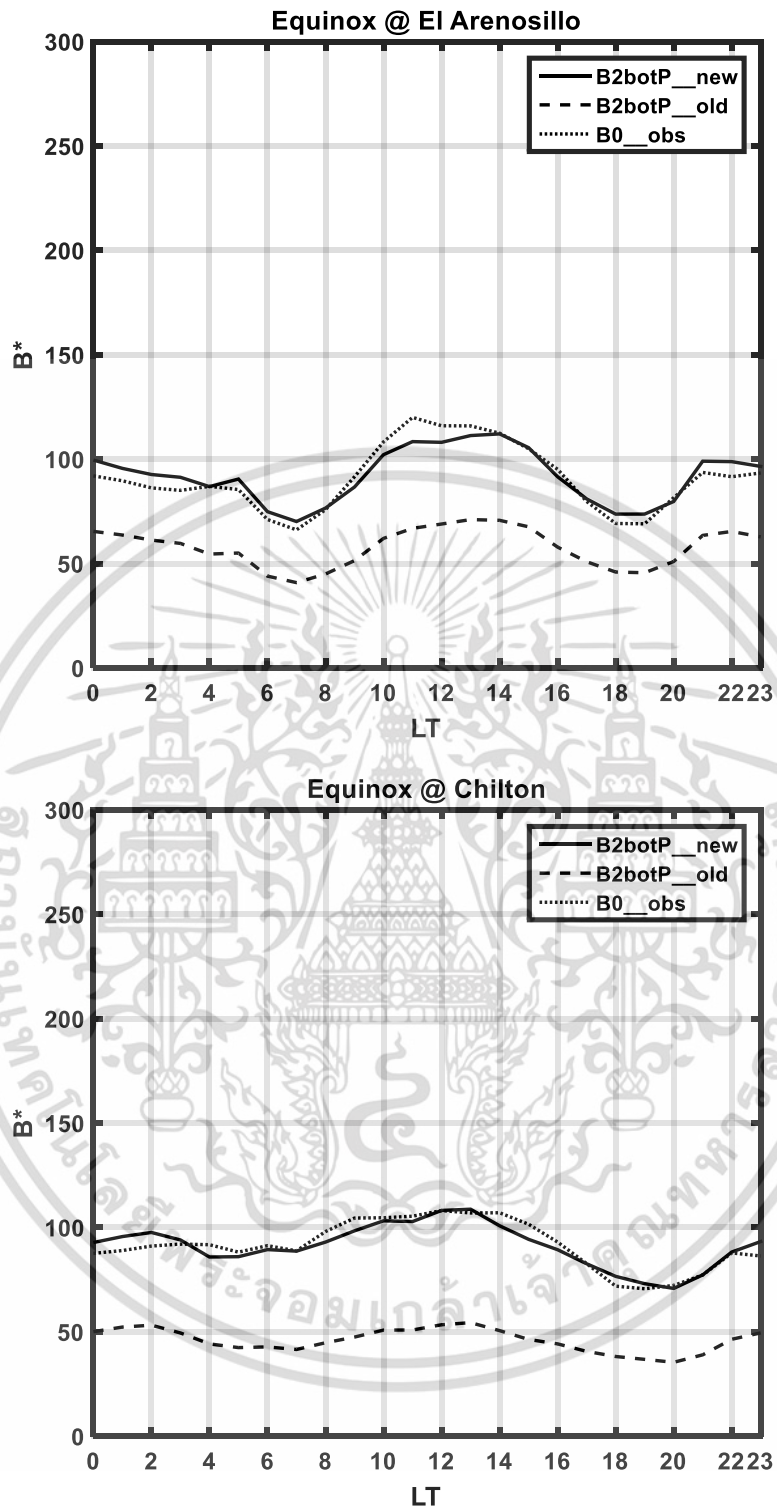
Twelve Digisonde Stations	Geographic Latitudes	ค่า c เฉลี่ย
Ramey	0°–20° (group 1)	0.1674
Ascension Island		
Jicamarca		
Wuhan	20°–40° (group 2)	0.1898
El Arenosillo		
Louisvale		
Idaho National Lab.	40°–60° (group 3)	0.2043
Chilton		
Port Stanley		
Yakutsk	> 60° (group 4)	0.2639
Tromso		
Qaanaaq		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



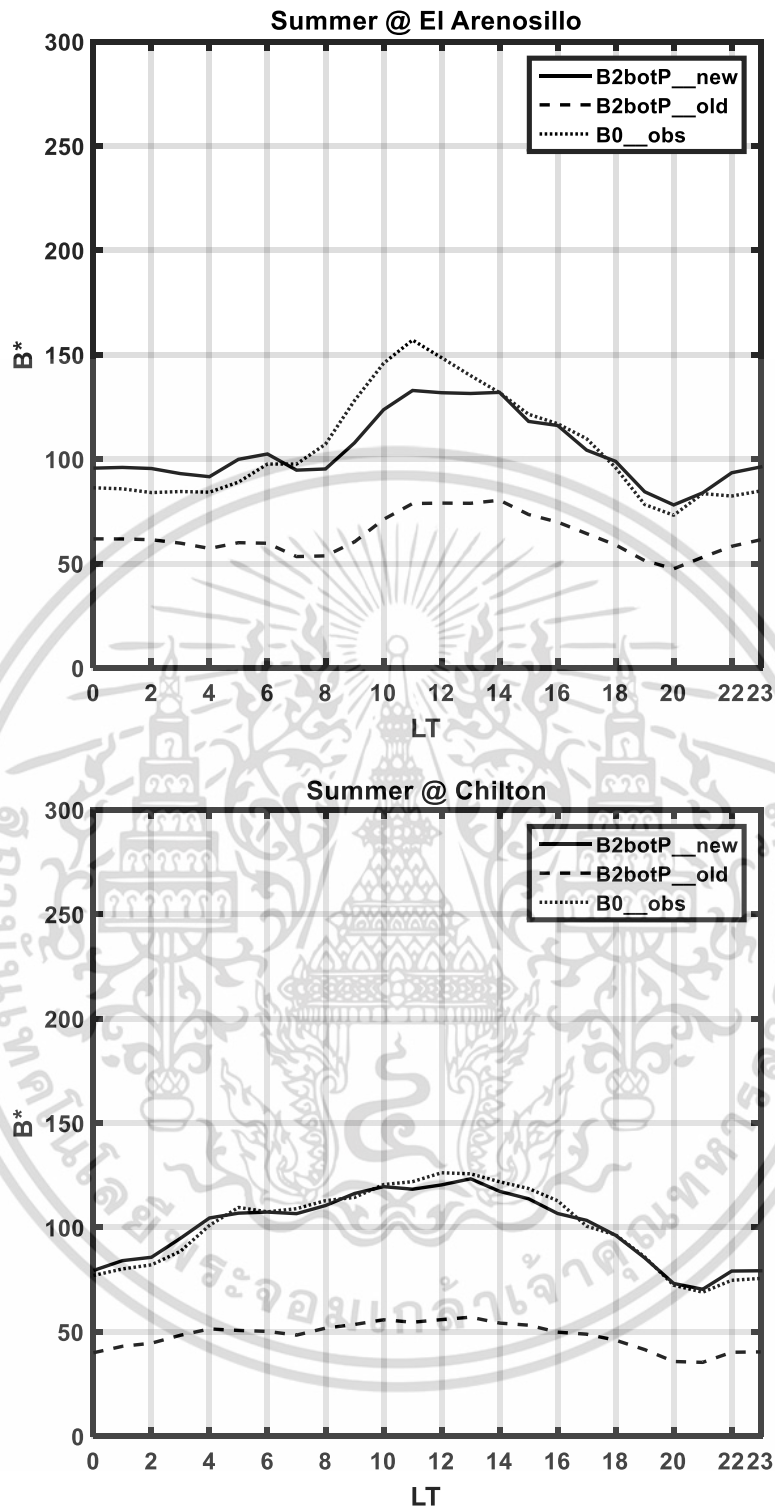
รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่าง  
ในฤดูหนาวที่เมือง El Arenosillo และ เมือง Chilton ในปี ค.ศ. 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นล่าง  
ในฤดูออติวโนกซ์ ที่เมือง El Arenosillo และ เมือง Chilton ในปี ค.ศ. 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่าง ในฤดูร้อนที่เมือง El Arenosillo และ เมือง Chilton ในปี ค.ศ. 2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 (Murthy et al., 1990) ส่วนค่าพารามิเตอร์ความหนาด้านล่างในตอนกลางวันมีค่าที่สูงกว่าค่าในตอนกลางคืนนั้นมิสาเหตุมาจากการลอยเลื่อนของพลาสมา E × B ในแนวตั้ง โดยค่าพารามิเตอร์ความหนาด้านล่างจะมีค่ามากขึ้นทีละน้อยในช่วงเวลา 0800 – 1300 นาฬิกา เนื่องจากการลอยเลื่อนของพลาสมาในแนวตั้งดังกล่าวจะผลักดันให้พลาสมาเกิดการยกตัวสูงขึ้นไปยังชั้นบรรยากาศที่สูงขึ้นบริเวณเส้นศูนย์สูตร โดยพลาสมาจะแพร่กระจายไปตามเส้นสนามแม่เหล็กที่มุ่งไปสู่ละติจูดต่ำ ทำให้ความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่บริเวณละติจูดต่ำมีค่าที่เพิ่มขึ้น (Fejer et al., 1995) ผลลัพธ์นี้เป็นการยืนยันให้เห็นว่า การลอยเลื่อนของพลาสมาในแนวตั้งแสดงบทบาทที่สำคัญในบริเวณ EIA (Equatorial Ionization Anomaly) โดยการเพิ่มขึ้นทีละน้อยของค่าพารามิเตอร์ความหนาด้านล่างนี้เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่พระอาทิตย์ขึ้นในฤดูอิควินอกซ์และฤดูร้อน อีกทั้งยังมีค่าที่เพิ่มขึ้นไปจนถึง 1300 นาฬิกาในฤดูหนาวอีกด้วย ในทำนองเดียวกัน Liu et al. (1999) ก็ได้ทำการศึกษานามไฟฟ้าในแนวนอนที่มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันออกของปรากฏการณ์ไดนาโมที่เกิดขึ้นในชั้น E ใกล้กับเส้นศูนย์สูตร พบว่า สนามไฟฟ้าที่มุ่งหน้าไปทางทิศตะวันออกเหล่านี้ได้ทำการยกการลอยเลื่อนของพลาสมาในแนวตั้งไปในชั้นบรรยากาศที่สูงขึ้น แล้วแพร่กระจายลงมา จึงทำให้เกิดความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นในตอนกลางวันในบริเวณ EIA



ศูนย์การเรียนรู้สภาพอากาศและภัยพิบัติ

Learning Center for Weather and Disaster

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรฯ (KMUTL PCC)

หน้าหลัก	ชั้นบรรยากาศ	สภาพอากาศ	ภัยพิบัติ	แบบจำลองและค่าข้อมูล	พายุแม่เหล็กโลก	บทความวิจัย	ติดต่อเรา
<b>แบบจำลอง IRI</b>	<b>การคำนวณค่า B0</b>						
<b>แบบจำลอง NeQuick</b>	<p>ค่า B0 คือค่าพารามิเตอร์ความหนาด้านล่าง ซึ่งมีความสำคัญต่อการวัดรูปโพรไฟล์ความหนาแน่นอิเล็กตรอนของชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านล่าง และมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพารามิเตอร์ชั้นไอโอโนสเฟียร์ตัวอื่น ๆ ดังนั้น การศึกษาและการสร้างสมการคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณและทำนายค่า B0 จึงมีความสำคัญ ในที่นี้ จะอธิบายการคำนวณค่าพารามิเตอร์ความหนาด้านล่าง 2 วิธีการที่มีการพัฒนามาจากแบบจำลอง NeQuick โดยใช้ด้วยแทนคือ B2bot โดยค่า B2bot มีหมายถึงพารามิเตอร์ความหนาด้านล่างเหมือนกับค่า B0 แต่ค่าที่มากและสมการที่ใช้ในการคำนวณต่างกัน รายละเอียดของแต่ละวิธี มีดังนี้</p> <p>1. การคำนวณค่า B2bot ที่ไม่มีค่าปรับแก้ (B2botP_old)</p> <p>แบบจำลอง NeQuick 2 เป็นแบบจำลองที่แสดงค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนในชั้นไอโอโนสเฟียร์อันหนึ่งซึ่งแสดงค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนและค่า TEC ที่ตำแหน่ง รัศมีและเวลาที่ต้องการ (Nava et al., 2008) โดยแบบจำลอง NeQuick 2 นี้จะถูกอธิบายด้วยฟังก์ชันเอพสไตน์ (Epstein) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านล่างกับชั้นไอโอโนสเฟียร์ด้านบน โดย Zhang et al. (1991) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ความหนาด้านล่าง (B2bot), ค่า k (พารามิเตอร์รูปร่างด้านบน), ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนที่ชั้น F2 (NmF2) และค่า TEC ของแบบจำลอง NeQuick 2 ด้วยสมการที่ (1)</p> $TEC = 2(1+k)NmF2 \times B2bot \tag{1}$ <p>ในที่นี้ ค่า k หาได้จากสมการที่ (2)</p>						

รูปที่ 4.6 หน้าเว็บไซต์ของการคำนวณค่า B0 ในฟิลด์ของแบบจำลองและค่าข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

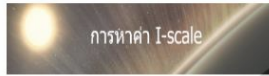
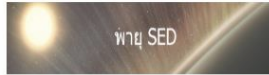


ศูนย์การเรียนรู้สภาพอากาศและภัยพิบัติ

Learning Center for Weather and Disaster

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรฯ (KMITL PCC)

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



## การหาค่า I-scale

### ตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ (I-scale)

ปฏิสัมพันธ์เชิงซ้อนของชั้นแมกเนโตสเฟียร์ ไอโอโนสเฟียร์ และเทอร์โมสเฟียร์ที่จะเป็นต้นเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างพลวัติของการกระจายตัวของพลาสมาในชั้นไอโอโนสเฟียร์ ซึ่งจะก่อให้เกิดพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ในเวลาต่อมา ในระหว่างที่เกิดพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์นั้น ความหนาแน่นพลาสมาในชั้นไอโอโนสเฟียร์สามารถที่จะเพิ่มขึ้น และ/หรือ ลดลงจากหลายชั่วโมงไปจนถึงหลายวันก็ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขสภาวะปกติในชั้นไอโอโนสเฟียร์ คุณลักษณะของพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ไม่จำเป็นต้องเหมือนกับพายุแม่เหล็กโลกเสมอไป ถึงแม้ว่ากิจกรรมแม่เหล็กโลกจะต่ำ แต่เงื่อนไขในชั้นไอโอโนสเฟียร์สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้อย่างมาก ซึ่งขึ้นอยู่กับฤดูกาล เวลาท้องถิ่นและตำแหน่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเปลี่ยนแปลงของ EIA ที่ส่งผลกระทบต่อเงื่อนไขในชั้นไอโอโนสเฟียร์อย่างมากที่ละติจูดกลางและละติจูดต่ำ โดยเงื่อนไขในชั้นไอโอโนสเฟียร์เป็นหนึ่งในคุณลักษณะสภาพอากาศที่สำคัญมากที่สุดประเด็นหนึ่งสำหรับผู้ใช้งานระบบต่างๆ ที่อาศัยคลื่นวิทยุ อาทิเช่น ระบบดาวเทียมนำทางสากล (GNSS), ระบบการสื่อสารย่าน HF, และระบบการตรวจจับระยะไกลที่อาศัยอวกาศ

รูปที่ 4.7 หน้าเว็บไซต์ของการหาค่า I-scale ในฟิลด์ของพายุแม่เหล็กโลก

สำหรับเว็บไซต์ศูนย์การเรียนรู้ฯ นั้น ผู้วิจัยได้ทำการนำองค์ความรู้ใหม่ที่ได้รับจากการทำวิจัยได้แก่ การคำนวณค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่าง (B0) และการหาค่าตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ (Ionospheric Scale หรือ I-Scale) มาใส่ในเว็บไซต์ในฟิลด์ของ “แบบจำลองและค่าข้อมูล” และ “พายุแม่เหล็กโลก” ตามลำดับ โดยรายละเอียด ความสำคัญ รวมถึงคุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ทั้งสองตัวนี้ได้อธิบายไว้ในเนื้อหาหน้าก่อนหน้านี้อย่างครบถ้วนแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและแนวทางการพัฒนางานวิจัย

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยที่ทำในปีที่ 2 นี้ประกอบไปด้วยการศึกษาตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่อาศัยค่า foF2 (foF2-based I-scale) และการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ความหนาแน่นกลางของชั้นไอโอโนสเฟียร์ในวัฏจักรสุริยะที่ 24 โดยสรุปผลการศึกษาแต่ละหัวข้อ มีดังนี้

ตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ (I-scale) มีคุณลักษณะเด่นที่สำคัญคือว่ามันไม่ขึ้นอยู่กับฤดูกาล เวลาท้องถิ่นและตำแหน่ง ซึ่งจะแตกต่างจากดัชนีกิจกรรมในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ได้ถูกนำเสนอก่อนหน้านี้ เราได้นิยามตัวบอกระดับพายุในชั้นไอโอโนสเฟียร์ดังกล่าวขึ้นมาบนพื้นฐานของค่า  $P^*_{foF2}$  ซึ่งไม่ได้รวมการขึ้นอยู่กับฤดูกาล เวลาท้องถิ่นและตำแหน่งของค่า  $P_{foF2}$  ความสอดคล้องกันระหว่าง I-scales ที่อาศัยค่า  $P^*_{foF2}$  ได้แนะนำที่ว่า “I-scale สามารถที่เป็นค่าดัชนีตัวใหม่ตัวหนึ่งได้ที่อิสระจากเทคนิคที่ใช้ในการสังเกต” เนื่องจากค่าจำกัดความง่าย ตัวบอกระดับนี้ก็สามารถที่จะถูกนำไปใช้งานสำหรับตำแหน่งอื่น ๆ อาทิเช่น บริเวณขั้วโลกและบริเวณใกล้เส้นศูนย์สูตร ถ้าข้อมูลเชิงสถิติมีอยู่ให้ใช้งาน ค่าดัชนีที่นำเสนอแนะสามารถที่จะถูกใช้งานเสมือนเป็นดัชนีที่ทำเป็นมาตรฐานตัวหนึ่งสำหรับช่วยเหลือผู้ใช้งานสภาพอวกาศในการมอนิเตอร์และประเมินผลกระทบที่เป็นไปได้ต่อระบบของผู้ใช้งาน สำหรับงานในอนาคต มันจะมีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า I-scales ที่นำเสนอแนะกับผลกระทบที่แท้จริงสำหรับผู้ใช้งานในทางปฏิบัติ นอกจากนี้ ความสำคัญของการมอนิเตอร์และการทำนายชั้นไอโอโนสเฟียร์กำลังจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากเงื่อนไขในชั้นไอโอโนสเฟียร์นั้นส่งผลกระทบต่อระบบจำนวนมากที่ใช้เทคนิคที่อาศัยคลื่นวิทยุ

ส่วนการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นกลางในช่วงวัฏจักรที่ 24 (ปี 2014) นั้น ผลการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ความหนาแน่นกลางของสถานีดิจิทัลจำนวน 12 สถานี ได้ถูกศึกษาในงานวิจัยนี้ โดยเลือกช่วงเวลาในการศึกษาที่ได้รับผลกระทบของดวงอาทิตย์มากที่สุดของวัฏจักรสุริยะปัจจุบัน (ลำดับที่ 24 ช่วงปี ค.ศ. 2013 - 2014) ผลจากการศึกษาสรุปได้ว่า ค่า B2botP\_new ที่นำเสนอแนะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนและมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่สังเกตได้จากเครื่องดิจิทัล (BO\_obs) โดยค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นกลางในตอนกลางวันจะสูงกว่าค่าในตอนกลางคืน ยกเว้นฤดูหนาว นอกจากนี้ ความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์ที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในช่วงเวลาก่อนพระอาทิตย์ขึ้นที่เมือง El Arenosillo และค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นกลางในตอนกลางวันในเมือง El Arenosillo มีค่าที่สูงกว่าค่าที่เมือง Chilton ทั้งนี้ นักวิจัยคาดหวังว่าสมการที่ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นกลางที่นำเสนอแนะจะเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าไปใช้ในการหาค่า TEC และค่าเวลาประวิงของสัญญาณจีพีเอส โดยประมาณสำหรับการระบุตำแหน่งของเครื่องรับ GNSS และใช้ในการทำนายภัยพิบัติที่จะเกิดขึ้นได้ในอนาคตอันใกล้

#### 5.2 แนวทางการพัฒนางานวิจัย

1. เพิ่มเติมเนื้อหาในเว็บไซต์ให้เสร็จในปีที่ 3 (ข้อมูลการเกิดภัยพิบัติ แบบจำลองข้อมูล ฯลฯ)
2. บอกระดับการเกิดภัยพิบัติที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและชั้นบรรยากาศ
3. สร้างแบบจำลองเพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์บางตัวในชั้นบรรยากาศ
4. สรุปผลการวิจัย จัดทำรายงานผลการวิจัยฉบับสมบูรณ์ปีที่ 3 และส่งบทความวิจัยตีพิมพ์ฉบับที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นเว็บไซต์นี้ขอให้แจ้งให้ทางผู้จัดทำเอกสารนี้ทราบด้วยจะดีมาก

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- Altadill, D., Torta, J.M., Blanch, E., "Proposal of new models of the bottom-side B0 and B1 parameters for IRI," *Adv. Space Res.*, vol. 43, pp. 1825-1834, 2009.
- Bergeot, N., 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.
- Bilitza, D., "International reference ionosphere 2000," *Radio Science*, vol. 36, no. 2, pp. 261-275, 2001.
- Bremer, J., Cander, L. R., Mielich, J., Stamper, R., "Derivation and test of ionospheric activity indices from real-time ionosonde observations in the European region," *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 68, 2075-2090, 2006.
- Cander, L.R., "Total electron content modelling for space weather applications," 6th GNSS Vulnerabilities and Solutions Conference, 2012.
- Gonzalez, M.M., Radicella, S.M., "On a characteristic point at the base of F2 layer in the ionosphere," *Adv. Space Res.*, vol. 10, no. 11, pp. 17-20, 1990.
- Gulyaeva, T.L., "Progress in ionospheric information based on electron density profile analysis of ionograms," *Adv. Space Res.*, vol. 7, pp. 39-48, 1987.
- Gulyaeva, T.L., "Proxy for the ionospheric peak plasma density reduced by the solar zenith angle," *Earth Planets Space*, 61, 629-631, 2009.
- Gulyaeva, T.L., Stanislawska, I., Tomasik, M., "Ionospheric weather: Cloning missed foF2 observations for derivation of variability index," *Ann. Geophys.*, 26, 315-321.
- Jakowski, N., Stankov, S.M., Schlueter, S., Klaehn, D., "On developing a new ionospheric perturbation index for space weather operations," *Adv. Space Res.*, 38, 2596-2600.
- Jamjareegulgarn, P., Supnithi, P., Hozumi, Tsugawa, T., "A correction factor of bottomside thickness parameter for computing TEC in global navigation satellite systems," *iEECON 2017*, 2017.
- Jamjareegulgarn, P., Supnithi, P., Watthanasangmechai, K., Yokoyama, T., Tsugawa, T., Ishii, M., "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.
- Jakowski, N., Borries, C., Wilken, V., "Introducing a disturbance ionosphere index," *Radio Sci.* 47, RS0L14, 2012, doi:10.1029/2011RS004939.
- Mielich, J., Bremer, J., "A modified index for the description of the ionospheric short- and long-term activity," *Ann. Geophys.*, 28, 2010, 2227-2236, doi:10.5194/angeo-28-2227-2010.
- Nishioka, M., Tsugawa, T., Jin, H., Ishii, M., "A new ionospheric storm scale based on TEC and foF2 statistics," *Space Weather*, 15, 228-239, 2017, doi:10.1002/2016SW001536.

Occhipinti, G., 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.

Ramakrisnan S., Rawer, K., "Electron density reference profile in the lower ionosphere," *Adv. Space Res.*, vol. 5, pp. 29-34, 1985.

Reinisch, B.W., Huang, X., "Low latitude digisonde measurements and comparison with IRI," *Adv. Space Res.*, vol. 18, no. 6, pp. 5–12, 1996.

Singh, O.P., "GPS based total electron content (TEC) anomalies and their association with large magnitude earthquakes occurred around Indian region," *Indian Journal of Radio & Space Physics*, Vol. 42, June 2013, pp. 131 – 135.

Tsugawa, T., 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

Zhang, M.L., Wan, W., Liu, L., Shi, J.K., "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.

Venkatesh, K., Fagundes, P.R., "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),"

[http://data.allenai.org/tqa/layers\\_of\\_the\\_atmosphere\\_L\\_0023](http://data.allenai.org/tqa/layers_of_the_atmosphere_L_0023).

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

<http://utd500.utdallas.edu/ionosphere.htm>.

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

[http://www.lesa.biz/earth/hydrosphere/el\\_nino](http://www.lesa.biz/earth/hydrosphere/el_nino).

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

<https://sites.google.com/site/sciencesittisak/content01/content011>.

นรเศรษฐ์ วิชัยพาณิชย์, "การศึกษาการเปลี่ยนแปลงความสูงของชั้น F ค่าความถี่วิกฤตของชั้น F2 ค่าแฟกเตอร์ M(3000)F2 และความสูงสูงสุดของชั้น F2 ของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์บริเวณละติจูดต่ำ,"

วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, วิศวกรรมโทรคมนาคม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551.



## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างของชั้นไอโอโนสเฟียร์ในช่วงที่มีผลกระทบของสุริยมากที่สุดของวัฏจักรสุริยะที่ 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, ศรีญู ดวงสุวรรณ, อุดมสิทธิ์ ตั้งตระกูลไพศาล และ ปุณยวีร์ จามจรกุลกาญจน์\*,  
Sappanyoo Sarapan, Sarun Duangsuwan, Udomsiti Tangtrakunphaisan, and  
Punyawi Jamjareegulgarn\*

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

\* Corresponding author: chjamjar@hotmail.com

### บทคัดย่อ

บทความวิชาการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างของชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ในช่วงที่มีผลกระทบของสุริยมากที่สุดของวัฏจักรสุริยะที่ 24 (ปี 2013 - 2014) สำหรับระบบดาวเทียมนำทางสากล โดยค่าข้อมูลที่วัดได้จริงจากสถานีสังเกตการณ์ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์จำนวน 12 สถานีในฐานะข้อมูล 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 ค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างที่นำเสนอเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการหาค่า TEC และค่าเวลาประวิงของสัญญาณจีพีเอสโดยประมาณสำหรับการระบุตำแหน่งของเครื่องรับ GNSS และการทำนายภัยพิบัติได้

**คำสำคัญ:** ฐานข้อมูลกิโล, 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°–20°, 20°–40°, 40°–60°, and higher than 60°. 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 (B2botP) have similar trends as well as nearby values with the observed ones (B0\_obs). 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 method 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

ปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ (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 กับค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างของแบบจำลอง NeQuick (B2bot) ซึ่งจะอธิบายต่อไปในหัวข้อที่ 3 โดยสมการนี้เป็นสมการที่น่าสนใจมาก เนื่องจากเราสามารถที่จะใช้สมการดังกล่าวนี้คำนวณหาค่า TEC โดยที่ไม่ต้องประมวลผลด้วยโปรแกรม RINEX ดังนั้น เทคนิคนี้เป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับสถานีดิจิทัลที่ไม่มีการติดตั้งเครื่องรับ GPS ไว้ใช้งาน

นอกจากนี้ Jamjareegulgarn et al. (2017) ได้นำเสนอค่าปรับแก้ (correction factor) สำหรับพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างที่ Kwajalein มหาสมุทรแปซิฟิก เพื่อที่จะลดค่าผลต่างที่เกิดขึ้นระหว่างพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างที่คำนวณได้จากสมการที่นำเสนอกับค่าที่วัดได้จาก Digisonde (B0\_obs) ผลจากการศึกษาพบว่า ทั้ง 2 ค่ามีค่าที่ใกล้เคียงกันมากขึ้นอย่างชัดเจนและมีการปรับปรุงมากขึ้นประมาณ 65-83% เมื่อเทียบกับค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างที่ไม่มีค่าปรับแก้ อย่างไรก็ตาม การศึกษาดังกล่าวใช้เพียงแค่ 1 วันในแต่ละฤดูกาลในปี 2008 ช่วงวัฏจักรสุริยะที่ต่ำเท่านั้น นอกจากนี้ ผลงานวิจัยจำนวนมากก่อนหน้านี้ก็ยังสามารถแสดงให้เห็นถึงผลต่างที่มากระหว่างค่าที่วัดได้จาก Digisonde กับค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างที่ทำนายได้จากแบบจำลอง IRI (B0) โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณละติจูดต่ำและใกล้เส้นศูนย์สูตร ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันและตามฤดูกาลของพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างที่มีค่าปรับแก้ของสถานี 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), ฤดูอควินอกซ์ (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° (group 1)	-7.95	345.60
Jicamarca		-12.00	283.20
Wuhan		30.50	114.40
El Arenosillo	20°-40° (group 2)	37.10	353.30
Louisvale		-28.50	21.20
Idaho National Laboratory		43.81	247.32
Chilton	40°-60° (group 3)	51.50	359.40
Port Stanley		-51.60	302.10
Yakutsk		62.00	129.60
Tromso	> 60° (group 4)	69.60	19.20
Qaanaaq		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), ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอนพิคชั้น F2 (NmF2) และค่า TEC ของแบบจำลอง NeQuick 2 ด้วยสมการที่ 2

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

ในที่นี้ ค่า k หาค่าได้จากสมการที่ 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 ท่ามกลางพารามิเตอร์ในชั้นไอโอโนสเฟียร์ที่ศึกษาที่ใช้การคำนวณหาค่า B2botP\_old นั้น พารามิเตอร์ทั้งหมดเป็นค่าข้อมูลที่ได้จากการวัดและค่าข้อมูลที่ได้จากสมการเชิงการทดลอง ยกเว้นค่า  $\tau$  เนื่องจากค่า  $\tau$  เป็นอัตราส่วนระหว่างค่า TEC กับค่า NmF2 จึงมีความแตกต่างระหว่างค่า TEC ที่ได้จากดิจิซอนด์และค่า

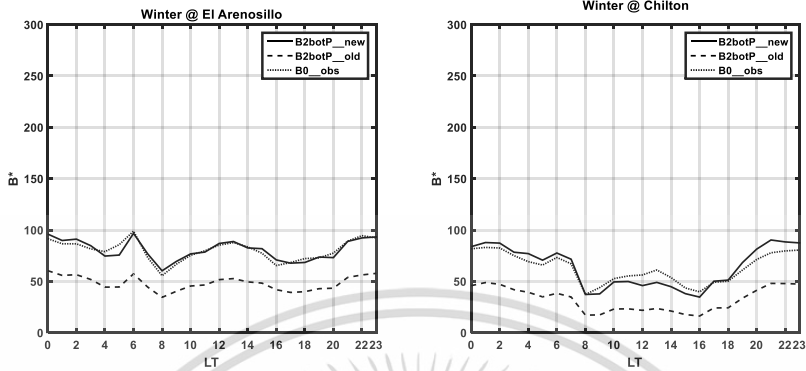
TEC ที่วัดได้จากเครื่องมือวัดประเภทอื่นๆ ดังนั้น สมการที่ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นล่างที่มีค่าปรับแก้ (B2botP\_new) ก็จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 7 ดังนี้

$$B2botP\_new = B2botP\_old + c \times \tau. \quad (7)$$

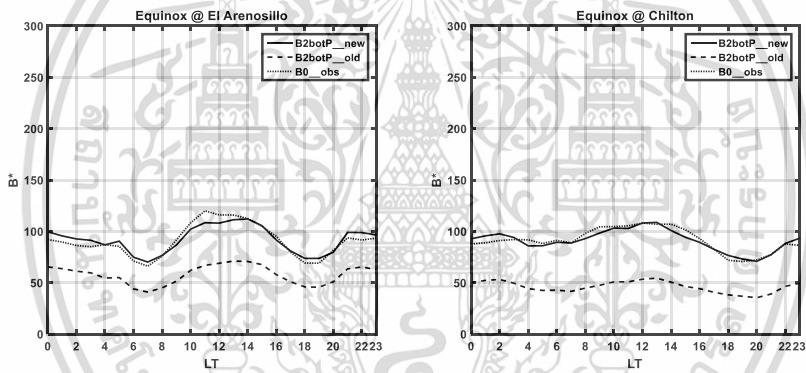
### ผลการศึกษาและวิจารณ์

ในหัวข้อนี้ ค่า B2botP\_new จะถูกคำนวณหาค่าออกมาโดยใช้สมการที่ 8 และทำการเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จาก Digisonde (B0\_obs) และค่า B2botP\_old ที่นำเสนอใน Jamjareegulgarn et al. (2016) โดยในที่นี้ จะขอแสดงค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นล่างที่สถานี El Arenosillo (Spain) และสถานี Chilton (England) เท่านั้น เนื่องจากเป็นผลการศึกษาที่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัดของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นล่างและค่าเฉลี่ยของค่าปรับแก้ที่คำนวณได้ในแต่ละโซนของทั้ง 12 สถานีที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ ผลการศึกษามีดังนี้

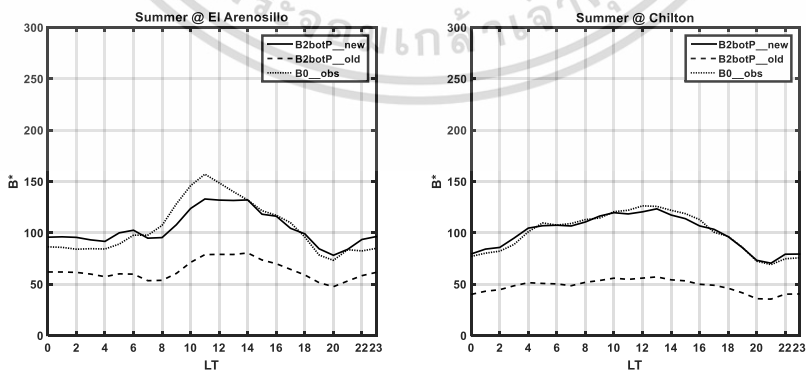
การเปลี่ยนแปลงในแต่ละวันของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นล่างในฤดูหนาว ฤดูอิกวินอกซ์และฤดูร้อนที่เมือง El Arenosillo และ เมือง Chilton ในปี ค.ศ. 2014 มีแสดงไว้ในรูปที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ จากผลการศึกษาจะเห็นได้ชัดว่า ค่า B2botP\_new ที่นำเสนอมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนและมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่สังเกตได้จากเครื่องดิจิซอนด์ (B0\_obs) โดยค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นล่างในตอนกลางวันจะสูงกว่าค่าในตอนกลางคืน ยกเว้นฤดูหนาว นอกจากนี้ คุณลักษณะที่เด่นชัดอีก 2 ประการที่พบก็คือ มีการยกตัว (เพิ่มขึ้น) ของความหนาแน่นอิเล็กทรอนิกส์อย่างเห็นได้ชัดในช่วงเวลาก่อนพระอาทิตย์ขึ้นที่เมือง El Arenosillo และในตอนกลางวัน ค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นล่างที่เมือง El Arenosillo จะสูงกว่าค่าที่เมือง Chilton นอกจากนี้ ผลการศึกษาพบว่า ค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นล่างที่เมือง El Arenosillo จะมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนกับค่าที่วัดได้ที่เมือง Chung Li ประเทศไต้หวัน (Chuo, 2012) โดยผลต่างสัมบูรณ์ของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นล่างในฤดูหนาวและฤดูอิกวินอกซ์มีค่าประมาณ 10 กิโลเมตร ส่วนผลต่างสัมบูรณ์ของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นล่างในฤดูร้อนมีค่าประมาณ 25 กิโลเมตร โดยผลต่างที่มากที่สุดจะเกิดขึ้นที่เวลา 11.00 น. ที่เมือง El Arenosillo นอกจากนี้ ผลต่างสัมบูรณ์ของค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นล่างในฤดูร้อนมีค่า 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

พารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างของสถานีดิจิจอนด์ 12 สถานีได้ถูกศึกษาในงานวิจัยนี้ โดยเลือกช่วงเวลาในการศึกษาที่ได้รับผลกระทบของดวงอาทิตย์มากที่สุดของวัฏจักรสุริยะที่ 24 พบว่า ค่า B2botP\_new ที่นำเสนอมีการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนกับค่าที่สังเกตได้จาก เครื่องดิจิจอนด์ โดยค่าในตอนกลางวันมีค่าสูงกว่าค่าในตอนกลางคืน ความหนาแน่น อิเล็กตรอนมีค่าที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในช่วงเวลาก่อนพระอาทิตย์ขึ้นที่ El Arenosillo และ ค่าพารามิเตอร์ความหนาแน่นด้านล่างในตอนกลางวันที่ El Arenosillo มีค่าที่สูงกว่าค่าที่ Chilton

## กิตติกรรมประกาศ

นักวิจัยขอขอบคุณหน่วยงาน NICT ประเทศญี่ปุ่น, เว็บไซต์กิโร (GIRO) สำหรับ ข้อมูลดิจิจอนด์ และ ศาสตราจารย์ ดร. พรชัย ทรัพย์นิธิ บทความวิจัยนี้เป็นผลผลิตของ โครงการวิจัยที่ได้รับการสนับสนุนค่าใช้จ่ายจากงบประมาณแผ่นดิน (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 and IRI-2012 models during declining phase of solar cycle 23 at equatorial latitude station, Chumphon, Thailand. *Adv. Space Res.* doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2016.11.003>.
- 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.



ภาคผนวก ข  
สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## แบบรายงานการใช้จ่ายเงินโครงการวิจัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รายงานความก้าวหน้า ครั้งที่.....2.....รอบ.....12.....เดือน ประจำปีงบประมาณ.....2561.....

 แหล่งงบประมาณแผ่นดิน (แบบปกติ)     แหล่งเงินรายได้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย).....เว็บไซต์ศูนย์การเรียนรู้การเปลี่ยนแปลงชั้นบรรยากาศ, 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. 2560.....ถึงวันที่.....30 กันยายน พ.ศ. 2561.....

ระยะเวลาดำเนินการ.....1.....ปี.....เดือน ตั้งแต่วันที่.....1 ตุลาคม พ.ศ. 2560.....ถึงวันที่.....30 กันยายน พ.ศ. 2561.....

## ข้อมูลการรายงานค่าใช้จ่ายงบประมาณโครงการวิจัย

## 1. การเบิกจ่ายงบประมาณ (กรณีการจ่ายเงินถ้าจ่ายงวดเดียวให้ลบข้อที่ไม่เกี่ยวข้องออก)

งวดแรก.....165,750.....บาท.....85.....% วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ด/ว).....5 มกราคม 2561

งวดที่ 2.....29,250.....บาท.....15.....% วันที่ได้รับอนุมัติให้เบิกจ่ายเงิน (ป/ด/ว).....30 พฤษภาคม 2561

## 2. สรุปงบประมาณค่าใช้จ่ายที่ใช้นับตั้งแต่เริ่มทำการวิจัยถึงปัจจุบัน (จำแนกตามหมวดค่าใช้จ่าย)

หมวดค่าใช้จ่าย	งบประมาณรวมทั้งโครงการ	ค่าใช้จ่าย (บาท)	คงเหลือ (หรือเกิน)
งบบุคลากร : ค่าจ้างชั่วคราว	-	-	-
งบดำเนินงาน			
ค่าใช้สอย	105,000	105,000	-
ค่าวัสดุ	90,000	90,000	-
งบลงทุน: ค่าครุภัณฑ์	-	-	-
รวม	195,000	195,000	0

\* หมายเหตุ มีดอกเบี้ยที่เกิดขึ้นระหว่างการทำโครงการวิจัยปีที่ 1 - ปีที่ 2 เป็นจำนวนเงิน 43.73 บาท

( รศ.ดร.บุญยวีร์, จามจรีกุลกาญจน์ )

ลงนามหัวหน้าโครงการวิจัยผู้รับทุน

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

(รศ.ดร.บุญยวีร์, จามจรีกุลกาญจน์)

ลงนามเจ้าหน้าที่การเงินโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้ง/ที่มีกา/นำไปใช้

## 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 อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 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
2561	โท	วศ.ม.	หลักสูตรวิศวกรรม สารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอม เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรฯ

ประสบการณ์วิจัยที่เกี่ยวข้อง

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้